

Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 52 (1960)
Heft: 1-2

Artikel: Sondages et injections
Autor: Descoedres, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-921732>

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: 14.01.2026

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

renden Übersichtspläne eingeleitet. Man suchte der Erfahrungslehre «Vermesse in der Zeit, dann hast du die Pläne in der Not» nachzuleben und muß es dennoch oft erleben, daß bei der da und dort überstürzten Folge von Projektieren und Bauen die Übersichtspläne 1:10 000 unausgearbeitet vom Stereoautographen abgeholt, um in der Reproduktionsanstalt auf Vergrößerungen 1:5000 vervielfältigt zu werden. Der topographische Inhalt steht höher im Kurs als eine gepflegte zeichnerische Ausführung, und da die Stereobildpaare auch zur Verfügung stehen — der Übersichtsplan wird heute nur noch luftphotogrammetrisch erstellt —, kommt der Wasserbauingenieur in kürzester Frist in den Besitz der notwendigsten Projektierungsunterlagen. Dabei handelt es sich meistens um weiträumige Planbereiche, die auch morphologische, hydrologische und geologische Studien über größere Berührungsgebiete ermöglichen. Darin übertrifft der Übersichtsplan in der Regel die Eigenaufnahmen der Kraftwerksgesellschaften, die oft nur kleineren Umfang sein können. Die Vermessungsfachleute freuen sich, daß sie in den verflossenen 15 Jahren mit der raschen Bereitstellung topographischer Unterlagen oft wirksam zur Abkürzung der Projektierungszeit beitragen konnten.

Soll in einem Tal, über das der Übersichtsplan noch nicht vorliegt, geplant und projektiert werden, dann ist zu raten, möglichst früh mit dem zuständigen kantonalen Vermessungsamt oder mit der Eidgenössischen Vermessungsdirektion für eine *beschleunigte Übersichtsplanaufnahme* Verbindung aufzunehmen. Es sind so aus der Kombination der amtlichen Vermessung mit kraftwerkeigenen Aufnahmen für beide Teile technisch, zeitlich und finanziell günstige Lösungen möglich. Das geltende Vermessungsrecht auferlegt 80 Prozent der Kosten der Übersichtsplanaufnahmen in Berggebieten dem Bund und 20 Prozent den Kantonen und Gemeinden. Die Gebirgsübersichtsplanaufnahme belastet ja in der Regel finanzschwache Kantone und Gemeinden, die im gegebenen Fall mit den Kostenanteilen der Kraftwerke etwas von ihren Vermessungsauslagen entlastet werden können. Diese Hilfe wird von den Berggemeinden sehr geschätzt.

Die Vermessung ist nie Selbstzweck, sondern immer Dienst am Recht, an der Technik und Wirtschaft. Die Bereitstellung der topographischen Unterlagen für Wasserbauten ist ein erfreuliches Kapitel in der Anleitung für Vermessungsfachleute, «möglichst viel Nutzen zu stiften».

Sondages et injections

J. Descoedres, Ing. en chef de Swissboring S. A., Zurich.

DK 550.8 + 624.138

Retracer de façon tant soit peu complète l'évolution de la technique des sondages et des injections au cours des 50 dernières années dépasserait largement le cadre de cet exposé; aussi nous nous limiterons aux grandes lignes du sujet et au seul domaine des barrages.

I. Introduction

Bien avant le développement des aménagements hydro-électriques, on construisait déjà des barrages soit pour l'irrigation, soit pour la protection contre les inondations.

On connaît des barrages de près de 20 m de hauteur construits par les anciens Chinois et Hindous ainsi que par les Romains et le barrage de Tibi élevé par les Hispano-arabes, à la fin du 16^e siècle près d'Alicante détiendrait durant près de trois cents ans le record de hauteur avec ses 42 m.

Dès la fin du 19^e siècle, le nombre, la hauteur et la hardiesse des constructions augmentent et le record de hauteur passe rapidement des 55 m du barrage de Furens (France 1866) aux 222 m du Hoover-Dam (USA 1937) et aux 237 m du barrage de Mauvoisin (Suisse 1958). Des barrages encore plus hauts sont actuellement en construction: Vajont (Italie) 266 m et Grande Dixence (Suisse) 284 m.

En Suisse on peut suivre étape par étape l'évolution des barrages «rigides» et les barrages du Wägital (1925 — type poids — hauteur 110 m), du Grimsel-Spitallamm (1932 — poids-vôûte — 114 m), de Mauvoisin (1958 — vôûte — 237 m) et bientôt de la Grande Dixence (1961 — poids — 284 m) ne le cèdent en rien aux grandes réalisations des autres pays. Nos barrages en terre, moins nombreux, ne sont pas des ouvrages

d'avant-garde mais illustrent néanmoins le développement de cet autre type de barrage, ce sont entre autres les barrages de Klöntal (1908 — 22 m), de Bannalp (1937 — 30 m), de Marmorera (1955 — 70 m) et bientôt de Göschenenalp (1961 — 155 m).

Ce n'est qu'à partir des dernières décades du siècle dernier que la construction des barrages sortit de l'empirisme et que se développèrent des méthodes de calcul de plus en plus raffinées complétées par des méthodes d'essais portant soit sur le comportement statique des ouvrages, soit sur la qualité des matériaux les constituant; simultanément apparurent dans de nombreux pays des prescriptions plus ou moins sévères destinées à garantir la sécurité des constructions.

Mais si le calcul d'un barrage se base sur des hypothèses relativement sûres et contrôlables il n'en est pas de même du problème de ses fondations. Les normes italiennes de 1886 n'autorisaient la construction d'un barrage qu'à condition que le terrain de fondation soit «stable, résistant et imperméable», mais où la nature répond-elle absolument à cette triple exigence?

«Elever un barrage, c'est faire une expérience». Cette phrase qu'écrivait il y a quelque 30 ans le regretté professeur Lugeon garde encore toute sa signification, tant il est vrai que chaque barrage est un cas particulier et ceci tout spécialement en ce qui concerne ses fondations.

Dans l'énorme majorité des cas «l'expérience» a réussi, mais pour tous ceux qui projettent et construisent des barrages, le souvenir des «expériences» qui ont provoqué des catastrophes est présent.

Or on constate que plus du 80% des barrages «rigides» emportés ne l'ont pas été par suite d'un défaut

de construction du barrage même, mais par suite d'une défaillance de ses appuis. La proportion est plus faible pour les barrages en terre car beaucoup d'entre eux ont été érodés par déversement de crues exceptionnelles par dessus leur crête.

Rappelons entre autres les catastrophes des barrages de Johnston (USA — 1889), de Bouzey (France — 1895 — 86 morts), du Gleno (Italie — 1923 — 600 morts), de Dolgarrog (Pays de Galles — 1926 — 60 morts), de Saint Francis (USA — 1928 — 400 morts), de la Regadera (Colombie — 1937), de Fort Peck (USA — 1938 — 8 morts) et de Malpasset (France — 1959 — 412 morts). Les causes de cette dernière ne sont pas encore officiellement établies mais paraissent être également une défaillance des terrains d'appui.

En plus de ces catastrophes il faut penser à tous les barrages qui n'ont pas ou ont mal rempli leur rôle par suite des pertes de leurs retenues ou qui ont exigé après leur achèvement des travaux supplémentaires d'étanchement ou de consolidation d'une telle ampleur qu'ils ont mis en question la rentabilité de l'aménagement. Ces exemples ne manquent pas, surtout dans les régions à sous-sol calcaire et nous ne citerons que les barrages de Monte Jaque et Camarasa (Espagne), de Saint Guilmel (France) et de Cavalli (Italie).

Tous ces exemples démontrent l'importance qu'il faut attacher d'une part à une reconnaissance poussée des emplacements possibles d'un barrage et de sa retenue, et ceci suffisamment tôt pour que le projet puisse encore être adapté aux conditions géologiques effectives, d'autre part aux travaux d'étanchement et éventuellement de consolidation des terrains constituant l'appui du barrage et le cas échéant la cuvette de sa retenue.

Jusqu'au début de ce siècle les attributions de l'ingénieur calculant un barrage et celles du géologue étudiant son emplacement étaient bien tranchées. Les sollicitations mécaniques et les pressions hydrostatiques de plus en plus grandes imposées par les barrages à leurs fondations et la nécessité de construire des barrages en des lieux présentant des conditions naturelles de moins en moins favorables obligèrent peu à peu l'ingénieur et le géologue à resserrer toujours plus leurs contacts et firent apparaître, comme trait-d'union entre eux, les spécialistes en fondations tels que l'ingénieur-géologue, l'hydrologue, le géotechnicien, le géophysicien et le sondeur-injecteur.

Les travaux de reconnaissance, d'étanchement et de consolidation d'un barrage devraient toujours être exé-

cutés en étroite collaboration entre l'ingénieur, le géologue et les uns ou les autres des spécialistes en fondations; s'agissant comme nous l'avons vu, pour chaque barrage, d'un cas particulier, il faudrait de plus que chacun des intéressés ait une expérience suffisante pour être en mesure de comparer de façon critique le cas présent avec un nombre aussi grand que possible de réalisations antérieures présentant quelque analogie avec lui.

II. Sondages

Les sondages ne sont qu'une partie des travaux de reconnaissance indispensables à l'étude d'un emplacement de barrage; examinons pourquoi ils ont acquis peu à peu une place prépondérante.

Jusqu'à la fin du siècle dernier presque tous les barrages furent construits à des emplacements «révés» où les conditions géologiques étaient si favorables qu'aucune reconnaissance profonde n'était nécessaire. Lorsque le géologue ne put plus se contenter des renseignements fournis par la surface du terrain, on creusa des tranchées et des galeries de reconnaissance pénétrant horizontalement dans les flancs rocheux de la vallée. On préférait généralement ce mode de prospection à l'exécution de sondages car les outillages à disposition étaient pesants et ne fournissaient malgré leur lenteur qu'une reconnaissance fort médiocre.

Lorsque le fond rocheux de la vallée était recouvert d'alluvions, on essaya de l'atteindre soit en fonçant des puits dans ces alluvions, ce qui s'avérait rapidement impossible lorsque le puits devenait profond ou que les alluvions étaient perméables, soit par sondages ce qui s'avérait également impossible dès que les alluvions contenaient de gros blocs. Au début du siècle on tenta maintes fois également de battre des rails à travers les alluvions jusqu'à ce qu'ils s'arrêtent sur le rocher (c'était en quelque sorte le début des sondages par battage pratiqués aujourd'hui par les géotechniciens); avec un peu de chance, on obtenait un bon profil du rocher, comme ce fut le cas à Génissiat (voir fig. 1), sinon les rails s'arrêtent sur de gros blocs et on obtenait une image fausse ou incomplète. On préféra souvent foncer des puits dans le rocher des rives et reconnaître par des galeries et de courts sondages la surface de séparation rocher-alluvions; ce fut le cas par exemple pour le barrage de Wägital (voir fig. 2).

La reconnaissance par tranchées, galeries et puits a l'avantage de permettre de voir les terrains traversés; en revanche elle a l'inconvénient d'être lente et coûteuse, surtout si l'on rencontre de fortes venues d'eau ou des zones ébouleuses; de plus elle est peu adéquate à la réalisation d'essais de perméabilité, donne parfois une idée inexacte de l'état de fissuration des roches ébranlées par les minages et affaiblit la zone des fondations du barrage. C'est pourquoi avec l'amélioration des techniques de forage les galeries et les puits furent de plus en plus remplacés par des sondages. On utilisa des machines de plus en plus légères et donc plus faciles à installer et des outillages de perforation de plus en plus perfectionnés assurant l'extraction de meilleurs échantillons des terrains traversés et un avancement supérieur d'où diminution de la durée et du coût des travaux. Dans le rocher, le forage à percussion fut pratiquement abandonné en faveur du forage à rotation permettant l'exécution de sondages dans toutes

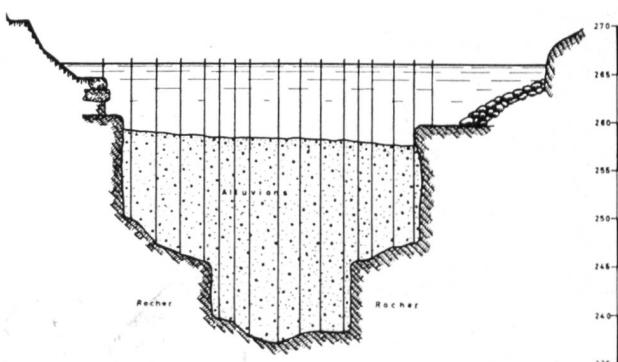


Fig. 1 Barrage de Génissiat — Reconnaissance du rocher par battage de rails

les directions descendantes ou ascendantes; dans les terrains meubles, le forage à percussion est encore très largement utilisé, mais a tendance également à faire place au forage à rotation pour les sondages de petit diamètre.

La reconnaissance par galerie ne disparut toutefois pas complètement, car mieux que les sondages, elle permet l'exécution de certains essais géotechniques, par exemple la détermination par charge directe des modules d'élasticité du rocher dans différentes directions.

Des sondages furent de plus en plus souvent exécutés dans le but principal de reconnaître la perméabilité des terrains; ils furent souvent équipés en tubes piézométriques indispensables dans toute étude d'hydrologie souterraine.

Avec l'apparition de la géotechnique on eut recours aux sondages pour procéder au prélèvement des échantillons de rocher ou de terrains meubles requis par les laboratoires pour en déterminer les caractéristiques.

Enfin les sondages devinrent un complément indispensable des mesures géophysiques, soit pour vérifier ou préciser leurs résultats, soit pour leur fournir des points de repère, soit dans certains cas pour leur exécution dans les forages mêmes.

La technique des sondages est encore en pleine évolution et chaque année voit apparaître de nouveaux outillages et de nouveaux procédés qui augmentent encore leur champ d'application.

Essayons de faire le point en examinant quels renseignements peut actuellement fournir un sondage de reconnaissance:

1. Sondage dans le rocher

Les sondages dans le rocher ont une importance primordiale dans l'étude des grands barrages «rigides» qui s'appuient directement sur le rocher aussi bien dans le fond que sur les flancs de la vallée. L'étude des barrages en terre et en enrochements nécessite presque toujours également des sondages dans le rocher.

a) Reconnaissance géologique

La longueur des sondages nécessaires à l'établissement d'un projet de barrage est très variable; si elle

reste généralement inférieure à 100 m, il n'est toutefois pas exceptionnel qu'elle dépasse 200 m.

Ces sondages sont exécutés exclusivement par forage à rotation et peuvent l'être dans n'importe quelle direction ascendante ou descendante. Leur diamètre est de l'ordre de 5 cm dans les roches dures et compactes et 10 cm dans les roches tendres et friables; en choisissant convenablement la machine, l'outillage et les conditions de perforation, il est possible aujourd'hui quelque soit la qualité de la roche d'obtenir un excellent «carottage» (gain d'échantillons).

En dressant le profil de sondage, le géologue devra néanmoins tenir compte des observations faites en cours de perforation qui lui fourniront un précieux complément d'informations.

Il est possible de relever exactement la position de l'axe d'un sondage afin de tenir compte de ses déviations éventuelles.

Il existe des appareils palpeurs permettant de relever les fissures les plus importantes rencontrées par un sondage.

A condition qu'un sondage ne soit pas rempli d'eau et qu'il ait un diamètre suffisant le géologue peut en examiner les parois jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur au moyen d'un périscope; au-delà de cette profondeur il est possible de relever photographiquement la paroi du forage et même depuis peu de l'observer avec un dispositif de télévision.

Citons enfin la possibilité d'exécuter verticalement des sondages d'un diamètre tel, que le géologue puisse y descendre et en examiner les parois (un forage de 1,20 m de diamètre et 154 m de profondeur a été exécuté dans l'appui du barrage de Zeuzier; il avait pour but de faciliter l'exécution d'un puits mais aurait pu aussi bien servir de sondage!) De tels sondages sont évidemment très coûteux, ils ont été néanmoins utilisés à maintes reprises pour des reconnaissances de barrages aux Etats-Unis: Norris-Dam et surtout barrage de Chickamauga (plus de 1000 m de sondages de 0,9 à 1,5 m de diamètre).

b) Reconnaissance de la perméabilité

Il est indispensable de connaître la perméabilité des roches formant l'appui d'un barrage et parfois de celles contenant sa retenue.

L'essai de perméabilité pratiqué usuellement dans les sondages en rocher consiste à mettre sous une pression d'eau déterminée une section limitée du sondage et à mesurer la quantité d'eau absorbée par unité de temps. De tels essais sont généralement exécutés systématiquement sur toute la longueur des sondages par sections de 3 à 5 m de longueur; chaque section est essayée avec 2 ou 3 pressions différentes choisies selon la hauteur du barrage à construire, la position du sondage et la qualité du rocher. La perméabilité s'exprime généralement en litres par mètre de sondage et par minute sous une certaine pression.

Vers 1920 le géologue suisse Henri Lugeon formula son fameux critère selon lequel la roche d'appui d'un barrage peut être considérée comme suffisamment étanche si sa perméabilité est inférieure à

$$1 \text{ l/m} \cdot \text{min sous } 10 \text{ kg/cm}^2$$

ce critère étant valable pour les barrages de plus de 30 m de l'époque, soit de 30 à 100 m environ. Pour les barrages de moins de 30 m de hauteur, Lugeon admettait une perméabilité triple.

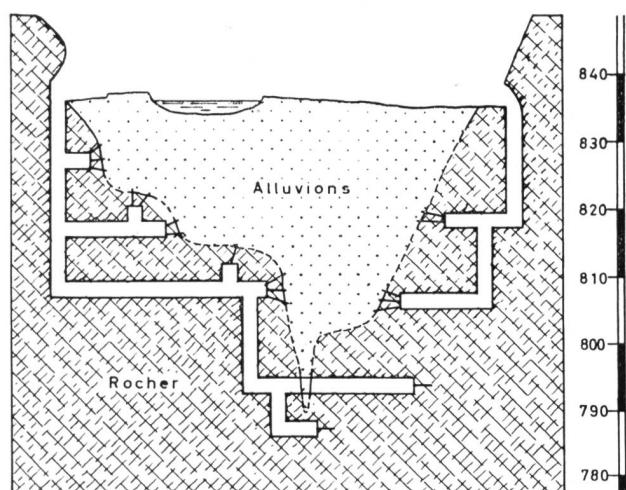


Fig. 2 Barrage de Wägital — Reconnaissance du rocher par puits et galeries

Depuis quelques années on a souvent choisi ce critère comme unité et par exemple pour une perméabilité de $15 \text{ l/m} \cdot \text{min}$ sous 10 kg/cm^2 on dit qu'elle est de 15 Lugeons.

Outre la perméabilité même il est parfois intéressant de chercher à reconnaître les cheminements existants ou possibles de l'eau dans les roches d'appui d'un barrage ou dans celles contenant sa retenue. Pour ce faire on introduit avec ou sans surpression un colorant dans une section déterminée du sondage et l'on observe les points et les temps de résurgence de ce colorant soit dans d'autres sondages, soit à la surface du terrain, soit dans les sources et cours d'eau voisins. Le colorant le plus souvent utilisé est la fluorescéine, décelable jusqu'à une dilution de 1 millionième; il en existe nombre d'autres. On peut procéder aussi par salaison de l'eau et depuis peu on utilise aussi des isotopes radioactifs décelables au compteur de Geiger.

Pour des observations hydrologiques de longue durée on équipe souvent des sondages en puits piézométriques; les mesures de niveau peuvent être exécutées soit directement, soit par l'intermédiaire d'appareils à flotteur ou de manomètres enregistreurs ou non.

c) Reconnaissance géotechnique

Les carottes extraites d'un sondage peuvent servir à déterminer en laboratoire les caractéristiques géotechniques des différentes roches; résistance, module d'élasticité, perméabilité etc. elles peuvent être également étudiées du point de vue minéralogique et chimique.

d) Reconnaissance de l'injectabilité

Pour étudier l'injectabilité des roches par un ou différents produits et se rendre compte des possibilités techniques d'étanchement et du coût des travaux d'injection à prévoir lors de la construction d'un barrage, on exécute parfois un essai d'injection; celui-ci ne devrait jamais être fait dans un seul sondage, mais dans un groupe de forages permettant de traiter une masse importante de rocher située entre eux et dans le centre de laquelle on puisse faire après les injections un sondage de contrôle. En comparant les résultats des essais de perméabilité exécutés avant et après l'injection, on se rendra compte de l'efficacité du traitement.

e) Reconnaissance géophysique

Différentes mesures géophysiques appelées à tort des «carottages» peuvent être exécutées dans un sondage. Cette technique apparue vers 1920 seulement est appliquée aujourd'hui systématiquement dans tous les forages pétroliers, mais n'en est qu'à ses débuts dans le domaine des barrages. Nous pensons que son application deviendra de plus en plus fréquente au fur et à mesure que se développeront des appareillages utilisables dans des forages de petit diamètre et que l'on disposera d'une plus grande expérience de l'interprétation de ces «carottages». Sans entrer dans le détail, citons les principaux procédés utilisés:

- Le carottage thermique basé sur la mesure des températures ou des variations de température dans le sondage.
- Le carottage électrique basé sur la mesure de la résistivité des roches ou de leur polarisation spontanée.
- Le carottage magnétique basé sur les perturbations du champ magnétique terrestre.

- Le carottage radioactif aux rayons γ basé sur la radioactivité naturelle des roches.
- Le carottage radioactif aux neutrons basé sur la radioactivité engendrée dans une roche sous l'effet d'un bombardement de neutrons.

2. Sondages dans les terrains meubles

Les sondages en terrains meubles nécessaires à l'étude d'un grand barrage «rigide» ont en général pour unique but de déterminer le profil rocheux de la vallée sous une couche d'alluvions, de moraine ou d'éboulis. La reconnaissance des terrains meubles eux-mêmes joue dans ce cas un rôle secondaire puisque ceux-ci devront être excavés pour faire place au béton du barrage; il est toutefois souvent intéressant de reconnaître leur nature, leur granulométrie et leur perméabilité afin de prévoir en conséquence l'exécution de la fouille et son étanchement éventuel et de savoir si les matériaux excavés sont utilisables par exemple pour la confection du béton du barrage ou de ses ouvrages annexes.

Pour l'étude d'un barrage en terre ou en enrochements, les sondages en terrains meubles ont une importance primordiale toutes les fois que le barrage s'appuie partiellement ou complètement sur ces terrains et surtout si son élément imperméable (masque ou noyau) ne descend pas jusqu'au rocher ou jusqu'à un horizon étanche mais est prolongé par un voile d'étanchement de ces terrains meubles appelé dans ce cas une «coupure étanche».

a) Reconnaissance géologique

La longueur des sondages de reconnaissance géologique en terrains meubles dépasse rarement une centaine de mètres; contrairement aux sondages dans le rocher ils ne peuvent être exécutés généralement que verticalement vers le bas. Leur diamètre est très variable selon leur but, leur profondeur et le mode de perforation adopté; il peut aller de 1 m à quelques cm. Les sondages de gros diamètres sont exécutés généralement par forage à percussion, ceux de petits diamètres, par forage à percussion ou à rotation ou encore par une combinaison des deux.

La paroi d'un sondage en terrains meubles à tendance à s'ébouler, il faut donc la maintenir soit en revêtant le forage d'un tube métallique ce qui oblige à en réduire successivement le diamètre (tubages télescopiques) soit en maintenant le forage rempli de «boue» (par exemple une suspension de bentonite).

Les échantillons de terrain provenant des sondages en terrains meubles sont en général remaniés, soit qu'ils parviennent à la surface entraînés par un courant d'eau ou de boue, soit qu'ils soient remontés au moyen d'une curette à clapet, d'une pompe à gravier, d'une tarière ou d'une benne preneuse. Les blocs rencontrés sont fragmentés au moyen d'un trépan ou à l'explosif ou traversés par un forage à rotation carotté ou non.

Il existe toutefois la possibilité d'extraire des sondages en terrains meubles des échantillons peu ou pas remaniés soit par forage à rotation carotté, soit au moyen d'appareils ou de procédés spéciaux.

L'interprétation géologique d'un sondage en terrains meubles est plus difficile que celle d'un sondage en rocher et le géologue devra prendre soin en examinant les échantillons provenant du sondage de tenir compte du mode de prélèvement de ces derniers.

b) Reconnaissance de la perméabilité

Les terrains meubles sont en majorité perméables ou semi-perméables et presque toujours hétérogènes et anisotropes. La détermination de leur perméabilité est difficile et complexe, elle est néanmoins indispensable pour résoudre les problèmes d'écoulements que pose presque chaque projet de barrage.

La perméabilité d'un terrain meuble est généralement exprimée par le coefficient k de la loi d'écoulement de Darcy.

Une mesure de perméabilité dans un sondage en terrains meubles immersés consiste à mesurer la quantité d'eau qui entre dans une section limitée du sondage ou qui en sort par unité de temps sous une dépression ou une surpression déterminée.

L'essai de pompage classique consistant à épuiser l'eau sur une section longue de plusieurs mètres d'un puits filtrant de gros diamètre est coûteux et ne donne qu'une perméabilité moyenne du terrain; en Suisse où nous avons en général des terrains très hétérogènes cet essai est peu utilisé dans les travaux de reconnaissance des barrages où on lui préfère des essais plus rapides dits «essais Maag»¹ exécutés sur des sections courtes d'un sondage et donnant des valeurs de k plus localisées.

Un essai Maag s'exécute au bas d'un sondage en cours de perforation soit en utilisant seulement le fond du forage, comme orifice filtrant (on parle alors d'essai ponctuel) soit de préférence en créant au-dessous du revêtement du forage une section filtrante de quelques décimètres de longueur.

Après avoir abaissé ou surélevé le niveau de l'eau dans le forage, on mesure soit le débit d'épuisement ou d'alimentation nécessaire à maintenir constant le niveau modifié, soit la vitesse de rétablissement du niveau statique original.

Si la section à essayer n'est pas immergée donc située au-dessus de la nappe phréatique, les essais par épuisement sont évidemment impossibles et les essais par alimentation requièrent quelques précautions.

A partir des débits ou des vitesses mesurées on peut calculer la perméabilité k ; nous n'entrerons pas ici dans la discussion de ce calcul pour lequel il existe de nombreuses formules se basant sur des hypothèses plus ou moins simplifiées de la forme de l'écoulement. Depuis peu on a parfois par analogie avec la perméabilité des roches exprimé en Lugeons celle des terrains meubles.

Pour étudier la perméabilité d'une grande masse de terrains meubles comme par exemple du remplissage alluvionnaire d'une vallée, il est important de faire un très grand nombre d'essais Maag en variant leurs conditions d'exécution. On obtient ainsi non seulement les valeurs extrêmes et une valeur moyenne digne de confiance de la perméabilité, mais encore la répartition spatiale de celle-ci indispensable à l'établissement d'un projet d'étanchement.

Rappelons la possibilité de procéder dans les sondages en terrains meubles, comme nous l'avons vu pour les sondages en rocher, à des prélèvements d'eau et à des essais de coloration.

Les sondages en terrains meubles sont souvent équipés en piézomètres simples ou multiples s'il y a plu-

sieurs niveaux phréatiques; on peut les équiper en puits filtrants si leur diamètre est suffisant.

c) Reconnaissance géotechnique

Une campagne de sondages en terrains meubles doit pouvoir fournir toutes les caractéristiques géotechniques requises pour l'établissement du projet. Selon que l'on attache plus ou moins d'importance aux unes ou aux autres de ces caractéristiques, les sondages seront exécutés selon des méthodes et avec des diamètres différents. Ainsi un sondage destiné à reconnaître l'aptitude d'un terrain à fournir les agrégats pour le béton d'un barrage devra être exécuté avec un outil preneur et avec un gros diamètre, de façon à fournir un volume important de matériaux aussi peu fracturés que possible, tandis qu'un sondage destiné à la reconnaissance d'une couche argileuse représentant un danger de glissement pour les assises d'un barrage en terre sera exécuté à percussion ou à rotation avec le diamètre minimum pour permettre le prélèvement d'échantillons non remaniés de la couche dangereuse.

Il vaut mieux faire plusieurs sondages chacun bien adapté à son but, qu'un seul mal adapté à plusieurs buts.

En plus de l'extraction d'échantillons un sondage en terrains meubles peut servir à l'exécution d'essais géotechniques sur le terrain en place, par exemple:

- Essai de charge ou de poinçonnement consistant à mesurer la déformation du terrain au fond du sondage sous une charge croissante; on en déduira les caractéristiques mécaniques du terrain.
- Essai de cisaillement consistant à enfoncez dans le terrain une barre munie d'ailettes et à mesurer l'effort de torsion nécessaire à cisaillement le terrain en faisant tourner ce dispositif.
- Essai de battage consistant à mesurer le travail mécanique nécessaire à enfoncez dans le terrain une barre munie d'une pointe.
- Un sondage en terrains meubles peut être transformé en repère de tassement en scellant au niveau à observer une barre émergeant du forage.
- Il peut être transformé en repère de glissement en le munissant d'un revêtement flexible dont on observera les déformations.
- Il peut être transformé en drain en le remplissant d'un matériau perméable ou en pieux foré en le remplissant de béton armé ou non.

d) Reconnaissance de l'injectabilité

Pour les mêmes raisons que dans le rocher, il peut être intéressant de faire un essai d'injection en terrains meubles. Plus encore que dans le rocher, il est indispensable pour qu'un tel essai donne des résultats utilisables qu'il soit exécuté sur une masse de terrain suffisamment grande pour que le centre de la zone d'essai ne subisse plus l'effet des phénomènes marginaux tels que pertes de coulis au large, chute de pression etc. On jugera du résultat d'un tel essai d'injection par comparaison des perméabilités avant et après le traitement; dans certains cas on pourra aussi faire un contrôle direct en creusant un puits dans la zone injectée.

e) Reconnaissance géophysique

Elles sont en principe les mêmes que dans les sondages en rocher toutefois les appareillages utilisés ont

¹ cf. E. Maag «Straße und Verkehr» Nr. 19/1941.

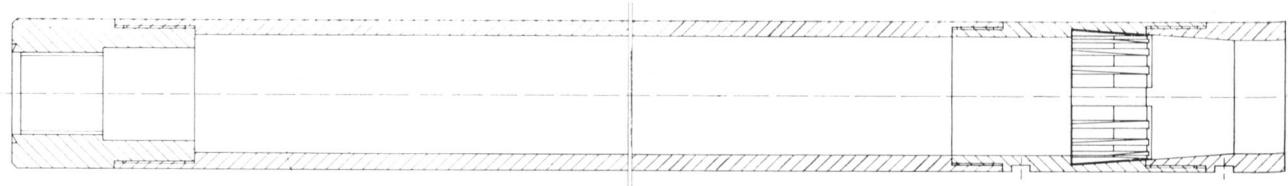


Fig. 3a Carottier simple

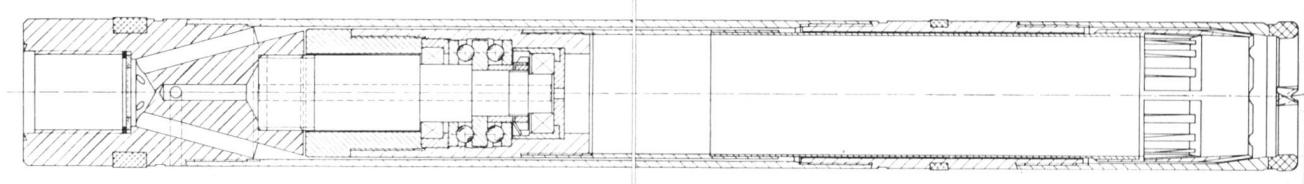


Fig. 3b Carottier double

en général des caractéristiques différentes. De plus la présence des tubages métalliques interdit certaines mesures si bien qu'on doit parfois les remplacer par des tubes en matière plastique perforés ou non.

En conclusion, on voit qu'une campagne de sondages de reconnaissance soit en rocher, soit en terrains meubles est à même de donner des renseignements nombreux et variés. Cette possibilité d'information augmente d'ailleurs d'année en année mais il est regrettable qu'on doive trop souvent renoncer à certains essais ou à certaines mesures pour des raisons d'économie.

3. L'évolution du matériel de sondage

Comme nous l'avons vu l'énorme développement intervenu dans l'application des sondages au cours des cinquante et surtout des trente dernières années a été de pair avec le perfectionnement des machines et des outillages utilisés pour les exécuter. (Lequel fut-il cause, lequel effet?)

Ne pouvant ici retracer, même sommairement, l'évolution du matériel de sondage nous nous bornerons à l'illustrer par quelques exemples significatifs.

a) Sondeuse rotative

La comparaison entre deux sondeuses rotatives d'une centaine de mètres de capacité, modèle début du siècle et modèle récent peut se résumer ainsi:

	1910	1960
Surface d'encombrement	4 m ²	0,75 m ²
Poids	3000 kg	400 kg
Vitesse de rotation	unique	4 vitesses
	60 t/min	150-1200 t/min
Caractéristiques	bruyante	silencieuse
	dangereuse	sûre
Avancement moyen brut en roche dure	0,3 m/h	1,5 m/h

b) Tube carottier

Rappelons que c'est le tube situé entre la couronne de perforation et les tiges de forage qui a pour fonction de recueillir les «carottes» et de les retenir pour permettre leur remontée à la surface.

La fig. 3a représente un tube carottier simple, tel qu'il était universellement utilisé autrefois et tel qu'il est d'ailleurs encore largement utilisé aujourd'hui toutefois avec une épaisseur de paroi réduite.

A part ce type simple il existe de nos jours une grande variété de carottiers dont chacun a été développé pour obtenir un carottage optimum dans une roche déterminée. La fig. 3b représente un double carottier moderne du type utilisé chez nous pour les sondages dans les roches friables telles que par exemple des schistes argileux. Ses avantages par rapport au carottier simple sont les suivants:

- le tube intérieur ne tourne pas durant le forage ce qui limite le frottement de la carotte contre l'extracteur et le tube carottier au seul frottement longitudinal. Le frottement par rotation beaucoup plus important qui a lieu dans le carottier simple est supprimé.
- la carotte n'est pas pressée vers la couronne par le courant d'eau comme dans le carottier simple.
- la carotte n'entre presque pas en contact avec le courant d'eau et n'est donc pas délavée par lui comme c'est le cas dans le carottier simple.
- si la carotte se coince dans le tube intérieur, elle n'est sollicitée qu'en compression par l'effort d'avancement de la sondeuse tout l'effort de rotation s'annulant dans les roulements à billes de suspension du tube intérieur. Dans le carottier simple la carotte coincée est cisaillée par rotation et l'avancement se poursuit sans carottage la roche étant usée par frottement sur toute la surface du forage.

c) Couronnes de perforation à diamants

C'est un Suisse, R. Lescot, qui le premier utilisa des couronnes à diamants lors du percement du tunnel du Mont Cenis en 1862. Jusque vers 1930 les diamants étaient sertis à la main dans des couronnes en acier doux, dont le diamètre dépassait rarement 100 mm. On utilisait des diamants noirs dits «carbones» ou des diamants du Brésil dits «ballas». Puis l'utilisation de petits diamants provenant du Congo ou de l'Afrique du Sud fit apparaître les couronnes «coulées» fabriquées en fixant les diamants dans un moule et en coulant dans ce dernier un alliage à base de bronze.

Aujourd'hui presque toutes les couronnes à diamants sont fabriquées par frittage; on peut les obtenir de n'importe quel diamètre et leur diversité est énorme, les variables étant le nombre, le poids unitaire, le poids total et la disposition des diamants, la forme du taillant et la dureté de la matrice (métal enserrant les diamants).

d) Appareils pour prélèvement d'échantillons non remaniés

Autrefois le prélèvement d'échantillons non remaniés dans les terrains cohérents n'existe pas et on se contentait de juger en les palpant les copeaux fournis par la tarière ou les morceaux remontés par la sonde à clapet.

La fig. 4 représente un appareil moderne de prélèvement d'échantillons non remaniés d'un type utilisé couramment dans notre pays dans les terrains de structure délicate telle que les limons et les craies lacustres.

Il existe une quantité d'autres types d'appareils parfois beaucoup plus compliqués que celui ci-dessus et nous ne citerons que ceux de Mohr, d'Osterberg, de Kjellmann et de Bishop sans insister sur le détail de leur construction et sur leurs avantages et inconvénients respectifs.

e) Clinomètres

Autrefois, pour mesurer la position d'un forage on descendait dans celui-ci un appareil contenant un tube de verre partiellement rempli de lait de ciment ou d'acide fluorhydrique; après avoir attendu suffisamment longtemps pour que le ciment ait fait prise ou pour que l'acide ait attaqué la paroi de verre de son contenant, on remontait l'appareil. L'inclinaison de la surface solidifiée du ciment ou de la limite de la surface corrodée sur l'axe du tube de verre correspond à l'inclinaison de l'axe du forage sur l'horizontale à la profondeur de la mesure. La direction de la déviation était mesurée en orientant chaque élément du train de tiges portant l'appareil. Toute cette longue opération livrait de façon assez peu exacte la position de l'axe du forage en un seul point.

Aujourd'hui nous disposons d'un appareil permettant de relever exactement et en une seule opération la direction et l'inclinaison de l'axe d'un forage de petit diamètre en autant de points qu'on le veut. Cet appareil contient une boussole et un pendule qui sont photographiés à des intervalles de temps réguliers et réglables. En descendant l'appareil dans le forage et en attendant quelques secondes à chaque point où l'on désire avoir une mesure que la caméra se soit déclenchée, on obtient sur un film une succession de photos de la boussole et du pendule indiquant avec précision pour chaque point la direction et l'inclinaison du forage.

Il existe d'ailleurs d'autres appareils, non moins raffinés basés sur d'autres principes, par exemple celui du gyroscope ou celui de la variation d'un champ électromagnétique.

Les quelques exemples qui précèdent pourraient être étendus aux outillages d'obturation, de déviation, d'alésage, de carottages géophysiques etc. nous pensons qu'ils suffisent à donner une idée d'une part des progrès réalisés, d'autre part de la complexité de l'outillage dont dispose le sondeur actuel.

III. Injections

Les injections appliquées aux barrages sont pour étancher et parfois pour consolider les terrains rocheux ou meubles sur lesquels s'appuie le barrage ou qui contiennent sa retenue.

1. Injections dans le rocher

Dès le début de la construction des barrages on étancha leurs appuis par des injections de ciment. Les conditions géologiques favorables et la faible hauteur des ouvrages permirent tout d'abord de se contenter d'injections superficielles mais dès le début du siècle on exécuta des voiles d'injection dépassant déjà 20 m de profondeur. Avec l'augmentation de la hauteur des barrages et leur implantation sur des roches parfois très perméables ou de qualité médiocre, les travaux d'injection prirent dans certains cas une importance considérable; citons par exemple:

Barrage	Etendue du voile principal m ²	Longueur forée m	Produits injectés to.
Mauvoisin (Suisse)	240 000	voile autres travaux	51 000 27 000 8 100 3 200
Hoover-Dam (USA)	60 000	2e voile	80 000 10 700
Santa Giustina (Italie)	50 000		83 000 9 000
Castillon (France)	35 000	voile autres travaux	11 000 18 000 5 100 8 700

On ne peut formuler aucune règle générale ni pour l'importance des travaux d'injection par rapport à ceux de construction du barrage, ni pour l'étendue ou la profondeur des voiles d'injection par rapport aux dimensions du barrage, ni pour les absorptions de produits d'injection par mètre de forage ou par m² d'écran.

Parmi les barrages cités ci-dessus, les travaux d'injection bien qu'importants ne représentent par rapport au coût du barrage qu'environ 4% dans le cas de Mauvoisin et 2,5% dans le cas de Hoover-Dam, par contre, on construit actuellement en Yougoslavie un barrage sur la Cetina pour lequel les travaux d'injection sont devisés à 400 % du coût du barrage.

En règle générale on a de fortes absorptions dans les roches calcaires ce qui n'empêche pas qu'au barrage de Colombera (Espagne) on ait eu dans des schistes et des gneis une absorption moyenne de 2000 kg/m de forage alors qu'au barrage de Cancano II (Italie) dans des calcaires triassiques l'absorption moyenne n'a été que de 11 kg/m.

Le principe d'exécution des injections dans le rocher a somme toute peu varié depuis 50 ans; les injections se font toujours dans des sections de forage de 3 à 5 m de longueur et si, en Suisse, on a passé de l'injection par passes descendantes (soit en injectant chaque forage de haut en bas au fur et à mesure de

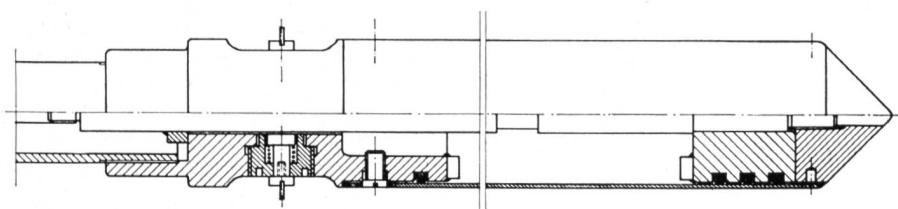


Fig. 4 Appareil de prélèvement d'échantillons non remaniés

sa perforation) à l'injection par passes ascendantes plus économique, il n'en est pas de même aux Etats-Unis! Chaque passe est injectée jusqu'au refus à une pression déterminée, seules les pressions maximums ont augmenté avec la hauteur des barrages et atteignent maintenant souvent 60 à 80 kg/cm².

De gros progrès ont été par contre réalisés dans la préparation des coulis d'injection dont le produit de base est resté le ciment.

Autrefois on ne disposait que de ciments grossiers et on n'utilisait guère que le sable comme produit d'adjonction lorsque les absorptions étaient fortes. Aujourd'hui on dispose de ciments mieux moulus et d'une foule de produits d'adjonction permettant de modifier dans une large mesure les propriétés des coulis de ciment utilisés (densité, viscosité, rigidité, stabilité etc.). Nous ne pouvons pas aborder ici cette question non plus que celle des coulis à base d'autres produits que le ciment, tels que les gels de silicate, les bitumes etc.

Le développement de la technique de brassage des coulis d'injection joua également un grand rôle dans leur amélioration. Les mélangeurs à hélice devinrent de plus en plus efficaces et l'apparition il y a une dizaine d'années des mélangeurs à haute turbulence fut une révolution dans ce domaine.

L'amélioration des coulis d'injection en augmentant leur puissance de pénétration a permis, toutes autres conditions restant égales, d'augmenter la distance entre les forages d'injection et de renoncer généralement aux voiles d'injection à plusieurs rangées de forages qui étaient de règle il y a quelques dizaines d'années.

Le contrôle de l'efficacité des travaux d'injection s'est notablement amélioré et nous renvoyons à ce sujet aux représentations graphiques des perméabilités du rocher au-dessous du barrage de Mauvoisin parues dans le no. 7—9/1956 de cette même revue et qui ont fait école dans ce domaine.

La tendance actuelle pour l'exécution d'un voile d'injection est de faire en première phase le strict minimum estimé indispensable, puis de juger du résultat obtenu par des forages de contrôle relativement rapprochés et enfin de renforcer les zones insuffisamment traitées par des forages supplémentaires. Cette façon de faire est certainement la plus économique si la première estimation est bonne, ce n'est pas forcément le cas si l'étendue du voile primitif a été choisie trop restreinte (cas du Hoover-Dam) ou si le voile doit être renforcé sur toute sa surface.

Mentionnons enfin la possibilité de combiner la consolidation par injections avec celle par tirants métalliques précontraints de petites dimensions (épinglage) ou de grandes dimensions (par exemple 1000 to/tirant à Castillon).

2. Injections dans les terrains meubles

On a exécuté depuis fort longtemps des injections de ciment dans des terrains meubles parfois avec plein succès lorsque leur granulométrie était favorable à ce mode de traitement. C'est ainsi qu'en 1923 les fouilles du barrage de San Domenico (Italie) furent descendues jusqu'à 55 m au-dessous du niveau de l'ancien lit du torrent Sagittario à l'abri d'alluvions grossières étanchées et consolidées au ciment. Des essais furent

également tentés d'injecter des coulis de marne diluée; ce fut sans grand succès car il était malaisé de mettre la marne convenablement en suspension dans l'eau et il y avait séparation des deux phases après l'injection.

Ce furent les expériences faites dès 1930 d'abord au laboratoire puis bientôt également au chantier sur le traitement des argiles, avec ou sans adjonction de ciment, par certains colloïdes (par exemple le silicate de soude) et par différents réactifs, peptisants ou flocculants ainsi que les progrès auxquels nous avons fait allusion plus haut réalisés dans le brassage des coulis d'injection qui permirent le rapide développement d'une véritable technique des injections en terrains meubles.

Il est à remarquer que cette technique est beaucoup plus complexe que celle des injections dans le rocher d'une part parce que les terrains meubles sont toujours plus ou moins hétérogènes et par conséquent d'injectabilité variable, d'autre part parce qu'on ne peut généralement pas y atteindre un refus. Pour obtenir un traitement satisfaisant il est généralement nécessaire de reprendre plusieurs fois avec des coulis et des pressions différents, l'injection d'un même forage, c'est pourquoi on équipe souvent ces derniers de tubes à clapets permettant plusieurs injections successives. On évite ainsi la perforation d'un nouveau forage pour chaque réinjection. Le choix des produits à injecter, de la composition des coulis et des pressions d'injection à utiliser demande une grande expérience et seules l'observation attentive de préférence au moyen d'appareils enregistreurs et l'interprétation perspicace des réactions du terrain à la pénétration de l'injection permettent d'obtenir un traitement satisfaisant de toutes les zones du terrain à un coût minimum.

Aujourd'hui la technique des injections en terrains meubles soit avec des gels d'argile, soit avec d'autres produits, bien qu'elle soit encore en plein développement a atteint une perfection suffisante pour permettre à des spécialistes avertis d'exécuter de grands travaux en étant certains de leur pleine réussite.

Les premiers travaux d'une certaine importance réalisés par injection de gels d'argile dans des terrains meubles furent ceux de prolongement jusqu'au rocher de la paroi de palplanches du prébatardéau amont de Génissiat (France — 1939) par un écran d'injection, ceux d'étanchement du barrage du Lac Noir et de ses fondations (France — 1940) et dans notre pays ceux d'obturation de renards dans une digue de l'Aar de l'aménagement de Rupperswil-Auenstein (1948).

Depuis lors, le nombre des réalisations ne se compte plus, rappelons les magnifiques travaux d'étanchement des fouilles pour la construction des barrages-usines d'Othmarsheim (1952), de Fessenheim (1954), de Vogelgrün (1956), de Marckolsheim (1958) et de Rhinau (en cours d'exécution) sur le canal du Rhin et illustrons les par quelques chiffres se rapportant à Fessenheim:

Dimensions de la «cuvette» injectée: longueur 175 m, largeur 89 m, hauteur 22 à 32 m.

Surface des écrans latéraux 16 000 m² — surface du fond 14 000 m².

Longueur totale perforée 22 500 m.

Quantité totale des produits injectés: argile 35 000 t, ciment 5 500 t, produits chimiques 2 000 t.

Citons enfin les coupures étanches réalisées au droit des barrages de

- Serre-Ponçon (France — 1956): surface 3000 m², profondeur max. 110 m, total des produits injectés 28 000 t.
- Senales (Italie — 1956): 18 500 m² — 33 m — 11 400 t.
- Sylvenstein (Allemagne — 1958): 5200 m² — 100 m — 13 000 t.
- Mission-Dam (Canada) en cours d'exécution.

En Suisse, rappelons les travaux plus modestes d'étanchement par injection d'une partie de la masse de terrains éboulés formant l'appui rive gauche du barrage de Marmorera, les écrans d'injection au-dessous et au droit des prises d'eau de Sarneraa, Motec, Löbbia etc. et l'élargissement en cours d'exécution de la base du noyau du barrage de Goescheneralp en attendant que soit commencée cette année encore la première grande coupure étanche, celle du barrage de Mattmark (surface 20 000 m² — profondeur maximum 100 m).

Entwicklung der Installationen für große Staumauern

A. Schläpfer, dipl. Ing., Locarno-Minusio

DK 627.8.005

1. Einleitung

Der Ausbau unserer Wasserkräfte hat den schweizerischen Ingenieur vor große und interessante Probleme gestellt. Es ist der Schriftleitung der WEW zu verdanken, daß sie auch die Bauunternehmungen als diejenigen zu Wort kommen läßt, welche schließlich die großen Arbeiten unserer Elektrizitätsgesellschaften durchführen. Die Mechanisierung der Baustellen hat ungeahnte Ausmaße angenommen und zwingt die Unternehmer, immer neuere und wieder verbesserte Maschinen einzusetzen. Sie sind dank des guten Auftragsbestandes in der Lage, an der Spitze der Entwicklung zu stehen und auf ihren Baustellen die modernsten Geräte zu verwenden. Um die enormen Kapitalinvestitionen speziell für Großbaustellen im Sperrenbau zu ermöglichen, bedurfte es einer Gruppe risikofreudiger und tatkräftiger Unternehmungen. Die früher «gewerbetreibenden» Bauunternehmungen haben den Sprung zur Bauindustrie durchgeführt, wenigstens was die Ausrüstung anbelangt. Die weitgehende Mechanisierung der Baustellen bedeutet eine empfindliche Verminderung der Arbeitskräfte und damit, besonders in Zeiten steigender Löhne, eine Kostensenkung. So konnten infolge rationellster Baumethoden die Kosten für Fundamentaushub und Staumauerbeton, um nur einige der wichtigsten Positionen zu nennen, wesentlich gesenkt werden, in einer Zeit, wo der Kostenindex seit 1945 stark gestiegen ist. Eine gesunde Preis- und Marktpolitik hat dies ermöglicht, wobei eine gute Beschäftigungslage natürlich Voraussetzung ist. Selbstverständlich kann eine Unternehmung nur dann die modernsten Maschinen zur Verfügung stellen, wenn es ihr auch ermöglicht wird, die Maschinen in vernünftigen Grenzen abzuschreiben. Dabei mußten sie über eine längere Periode Erfahrungen sammeln, um die Abschreibungen in der Kalkulation auch richtig erfassen zu können. Die übrige Industrie verfügt in dieser Hinsicht über langjährige Erfahrung und sichere Grundlagen. Überhaupt ist zu vermuten, daß viele Unternehmungen heute auf zu schmaler, durch die Mechanisierung aufgezwungener finanzieller Basis arbeiten müssen. Erst die nächsten Jahre, wenn der Auftragsbestand auf den Kraftwerkbaustellen abnehmen sollte, werden zeigen, ob alle beteiligten Unternehmungen finanziell gefestigt dastehen.

Die großen Bauvorhaben der letzten Jahre haben, wie bereits erwähnt, die Geräte und Maschinenparks derart erhöht, daß die Sorge um die Weiterverwendung dieser Investitionen im Denken und Handeln dieser Unternehmer einen breiten Raum einnimmt. Eine über-

mäßige Anhäufung großer Inventarmengen, von denen ja doch nur ein Teil immer im Einsatz stehen könnte, wäre zudem für unsere Volkswirtschaft nicht tragbar.

Die großen Kapitalinvestitionen — es wurden in den letzten 10 Jahren für etwa 200 Millionen Franken Bauinventar für Staumauern und Staudämme angeschafft — führten daher logischerweise zu einer Konzentration der Kräfte in der Form von Unternehmerkonsortien und Gruppen. Die wichtigen gemeinsamen Interessen sind derart viel stärker als Rivalitäten, Gegensätze und andere menschliche Schwächen, daß sie die verschiedensten Unternehmungen an einen Tisch bringen.



Bild 1 Fundamente der Sandsilos Luzzone: armierte Eisenbetonringe über quadratischem Entnahmestollen