

Mesures de protection contre les effets de la sous-pression et des infiltrations au barrage-voûte de Gigerwald

Autor(en): **Schnitzler, Emile**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **73 (1981)**

Heft 4

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941314>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mesures de protection contre les effets de la sous-pression et des infiltrations au barrage-voûte de Gigerwald

Emile Schnitzler

Résumé

Le barrage-voûte de Gigerwald, de 147 m de hauteur, s'appuie en rive gauche contre un rocher partiellement fissuré. Pour prévenir les effets néfastes de sous-pressions et d'infiltrations, diverses mesures ont été prises, soit en particulier:

- approfondissement de la fondation pour assurer un meilleur encastrement en rive gauche;
- vérification de la stabilité du massif rocheux gauche dans les conditions les plus sévères;
- observation des mouvements du rocher pendant l'exécution des travaux;
- réalisation de forages de drainage destinés à réduire les influences de la sous-pression et des infiltrations;
- contrôle de l'efficacité des dispositions adoptées par des mesures appropriées (sous-pression, débits d'infiltration, etc.).

Zusammenfassung: Schutzmassnahmen gegen die Auswirkungen des Auftriebes im Fundament der Staumauer Gigerwald

Die Bogenstaumauer Gigerwald stützt sich auf der linken Flanke auf einen teilweise geklüfteten Fels ab. Um schädlichen Auswirkungen durch Auftrieb infolge Auftretens von Sickerwasser vorzubeugen, sind folgende Massnahmen ergriffen worden:

- Vertiefung der Fundamentfläche, um eine bessere Einbindung in den Fels zu gewährleisten;
- Überprüfen der Stabilität des linken Widerlagers unter strengeren Bedingungen;
- Beobachtung von Felsbewegungen während der Ausbaus- und Betonierarbeiten;
- Erstellung zahlreicher Drainagebohrungen, um zu verhindern, dass sich grössere Zonen mit hohem Wasserdruck (Auftrieb) aufbauen können;
- Messen der Auftriebskräfte und der Sickerwassermengen zur Überprüfung der getroffenen Massnahmen.

Abstract: Precaution measures against uplift and seepage effects on Gigerwald arch-dam

The 147 m high Gigerwald arch-dam is founded on its left bank on a partially fissured rock. To prevent the negative effects of uplift and seepage, different measures have been taken, especially:

- deepening of the foundation to get a better embedding in the rock;
- stability checking of the left rocky abutment under more severe conditions;
- observation of the rock movements during construction;
- drilling of drainage boreholes in order to reduce the effects of uplift and seepage;
- checking of the precaution measure efficiency through proper observations (uplift, discharge of seepage, etc.).

Riassunto: Misure di protezione contro le sottopressioni e le infiltrazioni presso la diga ad arco di Gigerwald

L'imposta sinistra della diga ad arco di Gigerwald, alta 147 m, è formata da una roccia parzialmente fessurata. Per prevenire gli effetti devastanti delle sottopressioni e delle infiltrazioni sono state prese diverse precauzioni, in particolare:

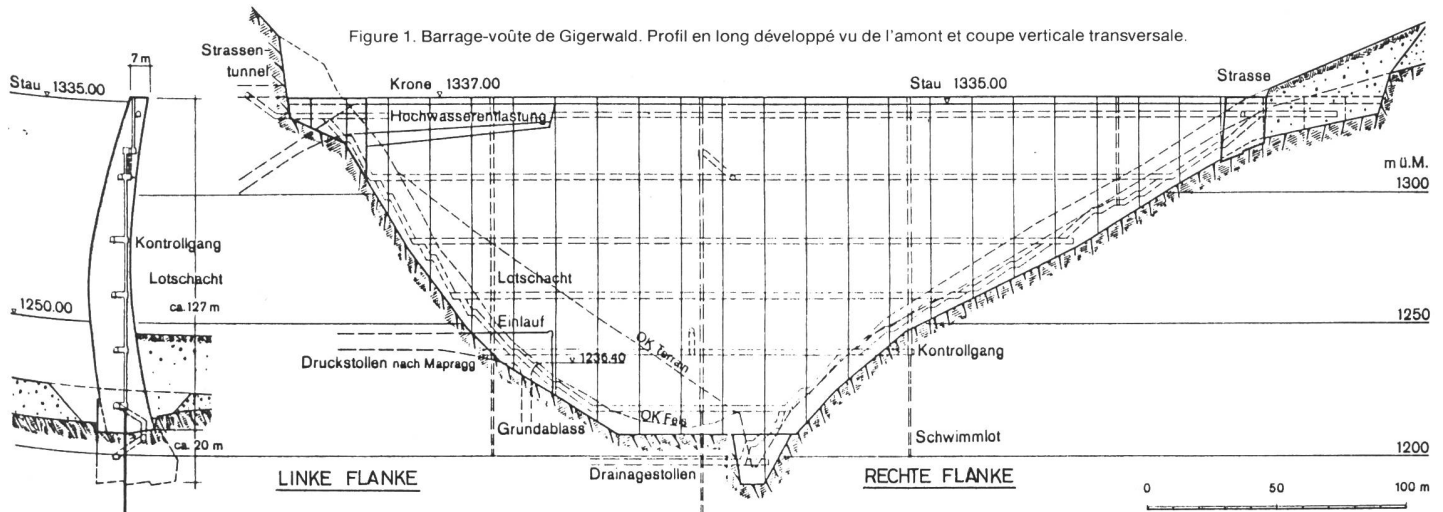
- l'approfondimento della fondazione per ottenere un miglior incastro nell'imposta sinistra;
- la verifica della stabilità nelle condizioni più rigorose della massa rocciosa in riva sinistra;
- l'osservazione dei movimenti della roccia durante i lavori di costruzione;
- la realizzazione di un drenaggio mediante perforazioni atte a diminuire l'influsso delle sottopressioni e delle infiltrazioni;
- l'osservazioni costante dell'efficacia delle precauzioni adottate con misure appropriate e delle infiltrazioni; (sottopressioni, portate d'infiltrazione, ecc.)

Introduction

Les phénomènes de sous-pression, importants pour les barrages-poids, peuvent avoir aussi dans certains cas une influence non négligeable pour les barrages-voûtes, en particulier dans les zones où le rocher de fondation est fissuré.

Nous résumons ici quelques-unes des mesures prises à l'encontre de la sous-pression et des infiltrations au barrage-voûte de Gigerwald, exploité par la Société des «Kraftwerke Sarganserland AG, Pfäfers».

Figure 1. Barrage-voûte de Gigerwald. Profil en long développé vu de l'amont et coupe verticale transversale.



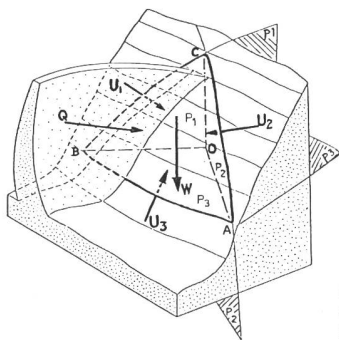


Figure 2. Schéma du volume rocheux «quasi tétraédrique» et forces qui le sollicitent (d'après P. Londe).

Description du barrage de Gigerwald

Construit sur la Tamina, cet ouvrage (figure 1) est un barrage-voûte à double courbure, de type classique, dont les sections horizontales sont des arcs paraboliques dissymétriques. Arasé à la cote 1337 m s.m., il crée une retenue utile de 33,4 hm³. Sa hauteur totale (y compris celle d'un bouchon d'une vingtaine de mètres de hauteur obstruant une gorge étroite dans le talweg) est de 147 m. Son épaisseur varie de 7 m au couronnement à 19,4 m au pied et la longueur du couronnement est de 430 m. Le volume de béton est de 460 000 m³ et celui des excavations s'est élevé à 440 000 m³ (dont 350 000 en terrain meuble et 90 000 en rocher).

L'étanchéité du rocher sous le barrage est réalisée par une voile d'injection, légèrement incliné côté lac, atteignant environ 90 m de profondeur sous les fondations. Un système de forages de drainage décharge de la pression d'eau le pied aval du barrage et la zone de l'aile gauche. Les travaux, commencés en avril 1972, se sont achevés en mai 1977, tandis que la première mise en eau débutait le 1^{er} juillet 1976.

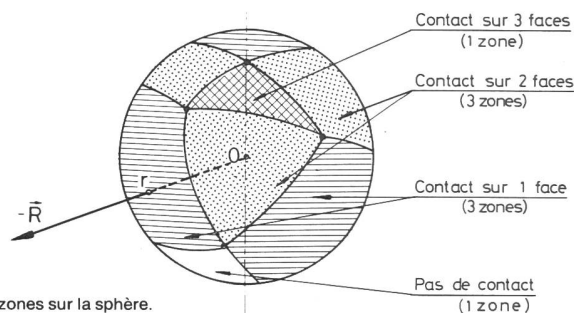
Incidences de la géologie sur le projet d'exécution

A l'emplacement du barrage, le sous-sol rocheux consiste en formations calcaires du Malm; le flanc gauche et la partie inférieure sont constitués de couches de Schilt, tandis que le flanc droit est formé de calcaire de Quinten inférieur. La roche, d'une dureté normale et homogène dans son ensemble, est plus ou moins fissurée localement dans quelques zones et de perméabilité moyenne.

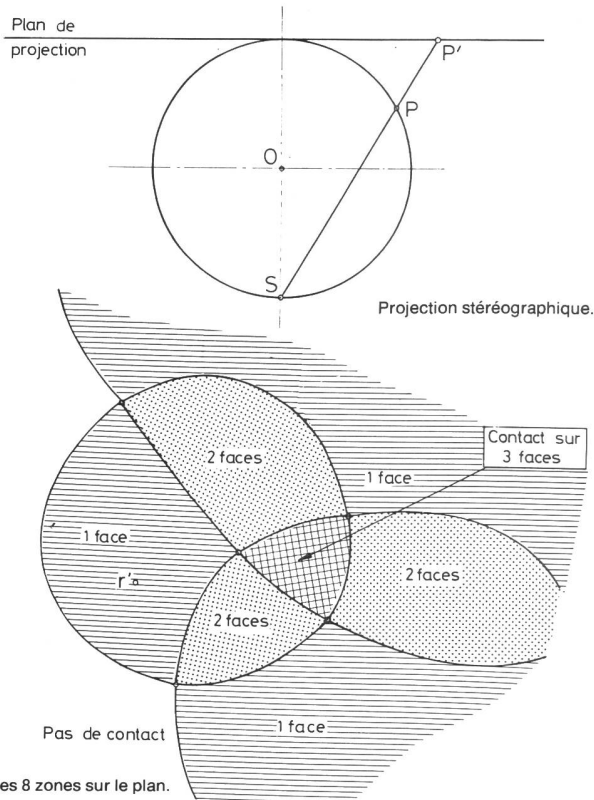
Les travaux d'excavation ont décelé sur la rive gauche un clivage de la roche plus accentué que prévu, ce qui a nécessité un approfondissement vertical de la fondation (par rapport au projet primitif), pour obtenir un encastrement convenable et une meilleure butée des blocs isolés, c'est-à-dire avant l'injection des joints. Ce clivage faisait aussi redouter l'apparition, lors de la mise en eau, d'infiltrations et de sous-pressions importantes dans cette partie de l'ouvrage.

Une telle situation exigeait donc:

- la vérification de la stabilité générale du massif d'appui rive gauche;
- l'observation continue des mouvements éventuels du rocher pendant l'exécution des travaux;
- la réalisation de moyens visant à réduire ultérieurement les influences néfastes de la sous-pression et des infiltrations et le contrôle de leur efficacité par des mesures appropriées.



Les 8 zones sur la sphère.



Les 8 zones sur le plan.

Figure 3. Représentation, sur une sphère et – par projection stéréographique – sur un plan, des 8 zones correspondant aux cas de stabilité (1 zone) et d'instabilité (7 zones) du bloc «quasi tétraédrique» sollicité par une force résultante R.

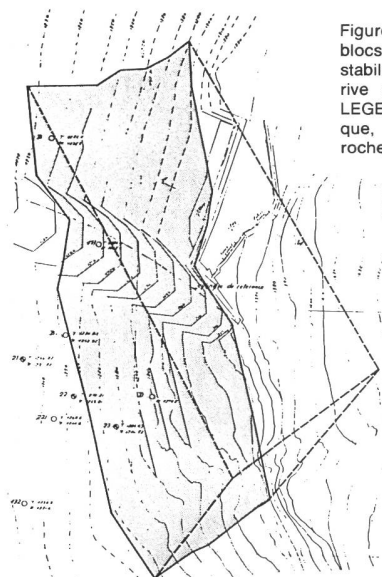
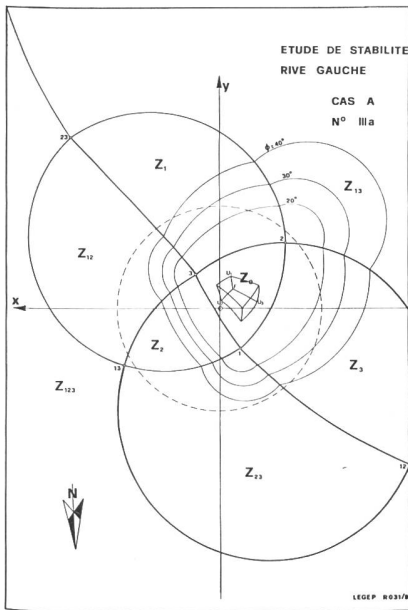
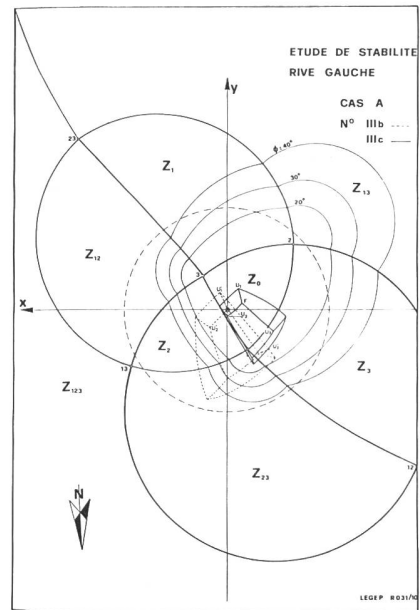


Figure 4. Définition de l'un des 7 blocs envisagés pour vérifier la stabilité du massif rocheux de la rive gauche (Selon rapport du LEGEP, Laboratoire de géotechnique, Section de mécanique des roches de l'EPFL).



Figures 5 et 6. Vérification de la stabilité du bloc défini à la figure 4 pour trois cas de charge différents (Fig. 5: cas a – Fig. 6: cas b et c) et pour des angles de frottement de 20°, 30° et 40° (calcul établi par le LEGEP).



Stabilité du massif rocheux rive gauche

La solution de ce problème, étudié en collaboration avec le Laboratoire de géotechnique, Section de mécanique des roches, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, sous la direction du Professeur Descœudres, repose sur les éléments et les faits suivants.

Définition du massif rocheux rive gauche et de son système de fissuration

La roche calcaire constituant ce massif comporte 3 familles de plans de fissuration dont l'une, plongeant vers l'intérieur du massif, est la stratification. Les plans d'une même famille, sensiblement parallèles entre eux, sont caractérisés par deux valeurs moyennes: leur plongement et l'azimut de celui-ci (déterminés par le géologue).

Méthode de calcul appliquée

Dans le cas particulier, la méthode graphique de Londe [1] a été jugée la plus pratique (figures 2 et 3). Elle consiste à étudier les conditions d'équilibre d'un volume rocheux «quasi tétraédrique» limité par 3 plans de fissuration (1 plan de chaque famille) et la surface naturelle du rocher qu'ils déterminent et contre laquelle s'appuie le barrage. Des considérations tenant compte des formes respectives du barrage, du massif rocheux d'appui et de la disposition des plans de fissuration ont permis de ramener les volumes rocheux à envisager à 7 blocs principaux.

La méthode de Londe est une généralisation dans l'espace du problème de frottement à une dimension: On sait que si un bloc parallélépipédique reposant sur un sol plan P est sollicité par une force résultante \vec{R} faisant un angle β avec la normale \vec{n} au plan dirigée vers l'intérieur du sol, 3 cas peuvent se produire, suivant les valeurs de

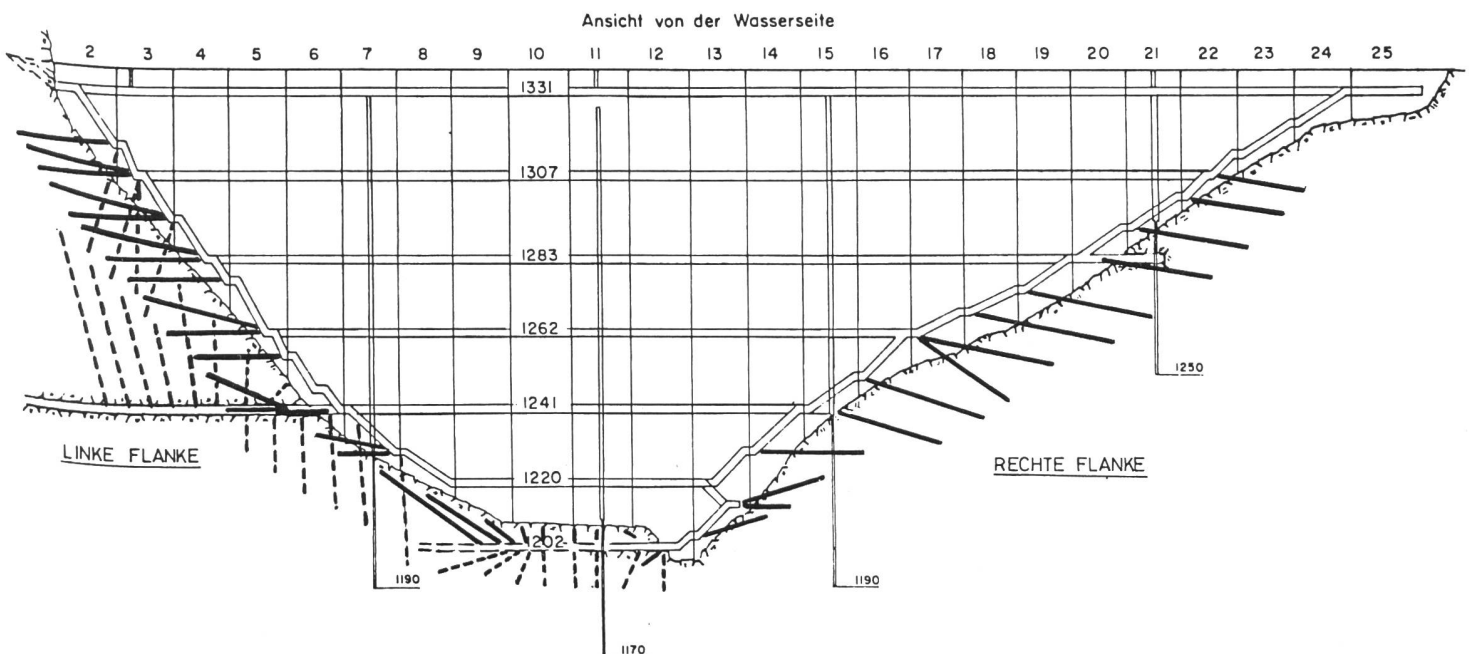


Figure 7. Forages de drainage sous le pied aval du barrage.

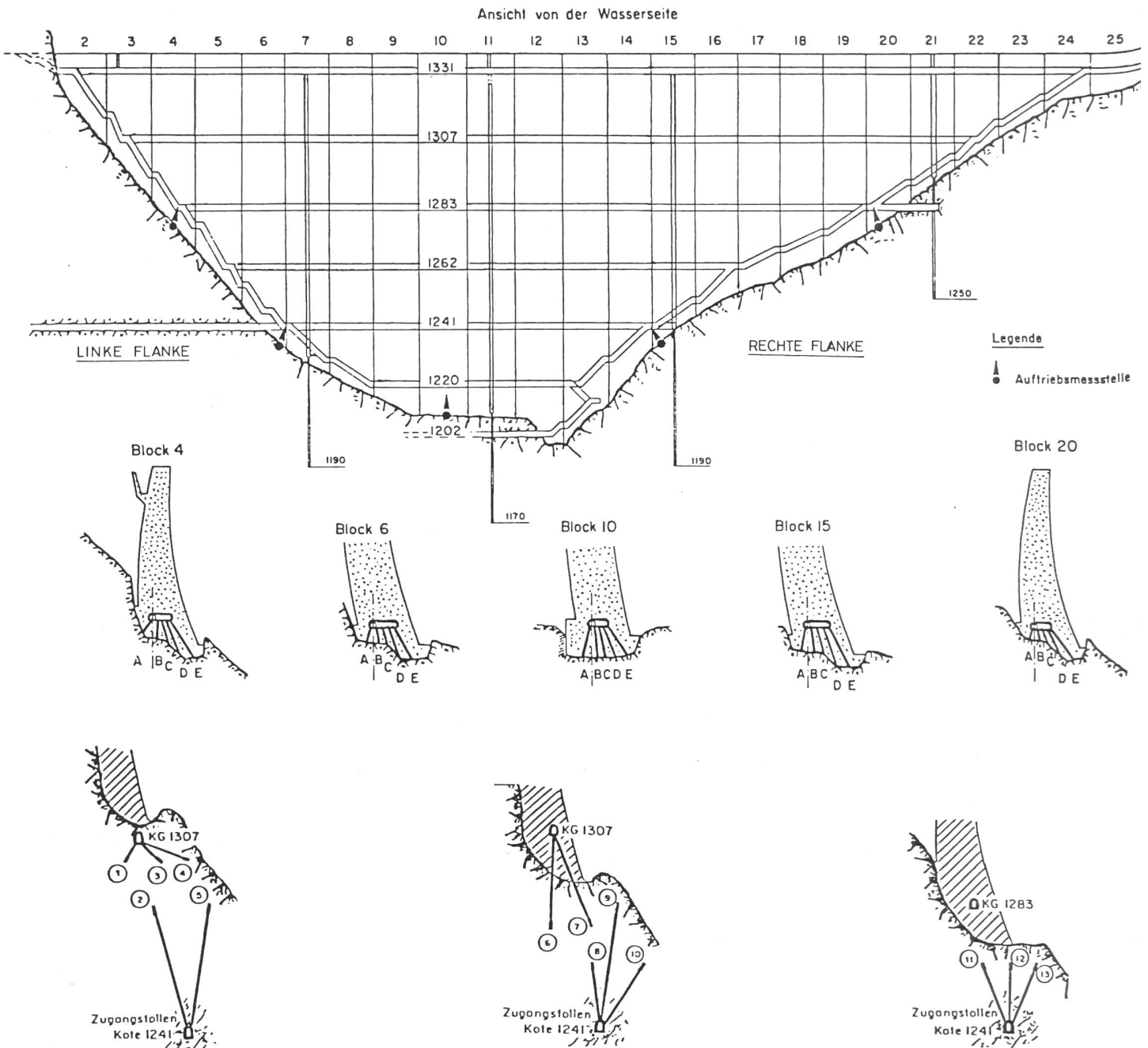


Figure 8. Disposition des prises de mesure de la sous-pression sous le barrage et dans l'appui en rocher de la rive gauche.

l'angle β et de l'angle de frottement \varnothing entre le bloc et le sol:

- Bloc stable si $0 < \beta < \varnothing$
- Bloc instable, rupture par glissement sur P si $\varnothing < \beta < \pi/2$
- Bloc instable, rupture par arrachement de P si $\beta > \pi/2$

Pour le bloc «quasi tétraédrique», limité par 3 plans de fissuration (ou de glissement) et par la surface naturelle du rocher, 8 éventualités sont possibles selon la direction de la force résultante \vec{R} :

- (1) Stabilité si \vec{R} applique le bloc contre le trièdre des 3 plans.
- (2,3,4) Instabilité par glissement selon l'une des 3 arêtes du trièdre.
- (5,6,7) Instabilité, par glissement selon l'un des 3 plans du trièdre.
- (8) Instabilité par arrachement du trièdre formé par les 3 plans.

On montre qu'à ces 8 éventualités correspondent, sur une sphère de rayon arbitraire dont le centre coïncide avec le sommet du trièdre, 8 triangles sphériques couvrant l'ensemble de la sphère.

Le mode de représentation est simplifié au moyen d'une projection stéréographique qui fait correspondre à chaque point de la sphère un point du plan de projection, et transforme tout cercle de la sphère en un cercle du plan. Les 8 triangles sphériques sont ainsi transformés en 8 zones planes délimitées chacune par 3 arcs de cercle.

A la direction de la force résultante \vec{R} correspond, dans le plan de projection, un point r dont la position dans l'une ou l'autre des 8 zones permet de conclure à la stabilité du bloc, ou à son instabilité par glissement selon une arête ou une face du trièdre ou par arrachement.

Forces agissant sur le massif rocheux (figure 2)

Forces isolées:

- (\vec{W}) : Poids propre du bloc ($\gamma_{\text{rocher}} = 2,7 \text{ t/m}^3$, mesuré sur échantillon).
- (\vec{Q}) : Poussée du barrage à lac plein (niveau du lac: 1335 m s. m.)
- $(\vec{U}_1), (\vec{U}_2), (\vec{U}_3)$: Résultantes des sous-pressions maximales agissant sur les faces (1), (2), (3) du bloc.
- (\vec{A}) : Poussée de l'eau sur la 4^e face du bloc (c'est-à-dire sur la portion de la surface naturelle du rocher située à l'amont du barrage).

Combinaisons possibles des forces isolées (ou «cas de charge»):

Différentes combinaisons de ces forces ont été envisagées, même certaines paraissant peu probables.

En outre, les effets «exceptionnels» des tremblements de terre ont été pris en considération sous une forme particulière, en supputant les modifications qui pourraient en résulter pour les cas de charge «normaux».

Vérification de la stabilité du massif sur la base des essais de cisaillement direct des roches

Les essais de cisaillement direct des roches de la rive gauche ont permis d'attribuer aux *angles de frottement* dans les 3 familles de plans de fissuration les valeurs moyennes de: 32° pour l'une des familles (stratification); 35° pour les deux autres (fissuration) (figures 4, 5, 6).

Ces valeurs ont permis de vérifier la stabilité du massif pour 19 variantes, ce nombre découlant de l'application des différents «cas de charge» aux 7 blocs principaux considérés.

Conclusions générales

La stabilité des blocs déterminés par les 3 familles de plans est assurée dans tous les cas de charge susceptibles de se manifester réellement à Gigerwald.

Un drainage permettant de diminuer les sous-pressions est cependant souhaitable, notamment celles qui pourraient apparaître dans les discontinuités de l'une des 2 familles de plans de fissuration (famille 3).

Observations des mouvements du rocher rive gauche

Dès septembre 1973, la stabilité de la paroi rocheuse dominant les fouilles en rive gauche a été observée périodiquement:

- au moyen de 3 rocmètres situés au niveau 1337 de la plate-forme des installations et destinés à en surveiller les mouvements éventuels, pendant les excavations essentiellement;
- par des nivellements de précision.

Les mouvements observés de décembre 1973 à juin 1974 (notamment pendant les minages de la rive gauche) n'ont pas dépassé 1,8 mm; ils ont atteint au plus 3 mm jusqu'en novembre 1975, époque à laquelle le bétonnage du barrage était achevé, à l'exclusion du couronnement.

Pendant les premières mises en eau, les variations de longueurs enregistrées se sont également avérées très faibles.

Pour contrôler en outre les mouvements de l'appui rive gauche à un niveau inférieur et en suivre l'évolution au cours des remplissages et vidanges successifs, 2 rocmètres ont également été placés au niveau 1283: l'un est placé dans le prolongement de l'axe de l'arc (direction tangentielle), l'autre lui est perpendiculaire et dirigé vers l'amont (direction radiale). Ils sont inclinés tous deux de 10 degrés sous l'horizontale et sont chacun composés d'une seule tige de mesure de 40 m de longueur.

Au cours des deux premiers remplissages du lac, en 1976 et 1977, où le plan d'eau a atteint respectivement les cotes 1328,56 et 1335 (retenue maximale):

- la *déformation radiale* n'a atteint que 0,16 mm (allongement), valeur très faible inférieure à la précision de $\pm 1,0$ mm que l'on peut attendre des mesures de rocmètre;

- la *déformation tangentielle* a atteint 1,43 mm (raccourcissement du rocher) à lac plein, valeur mesurée approximativement dans la même direction que la réaction d'appui du barrage. La réversibilité ne semble pas complète (ce qui est normal, s'agissant des 2 premières mises en eau), mais la déformation résiduelle de 0,5 mm reste de l'ordre de grandeur de la précision des mesures.

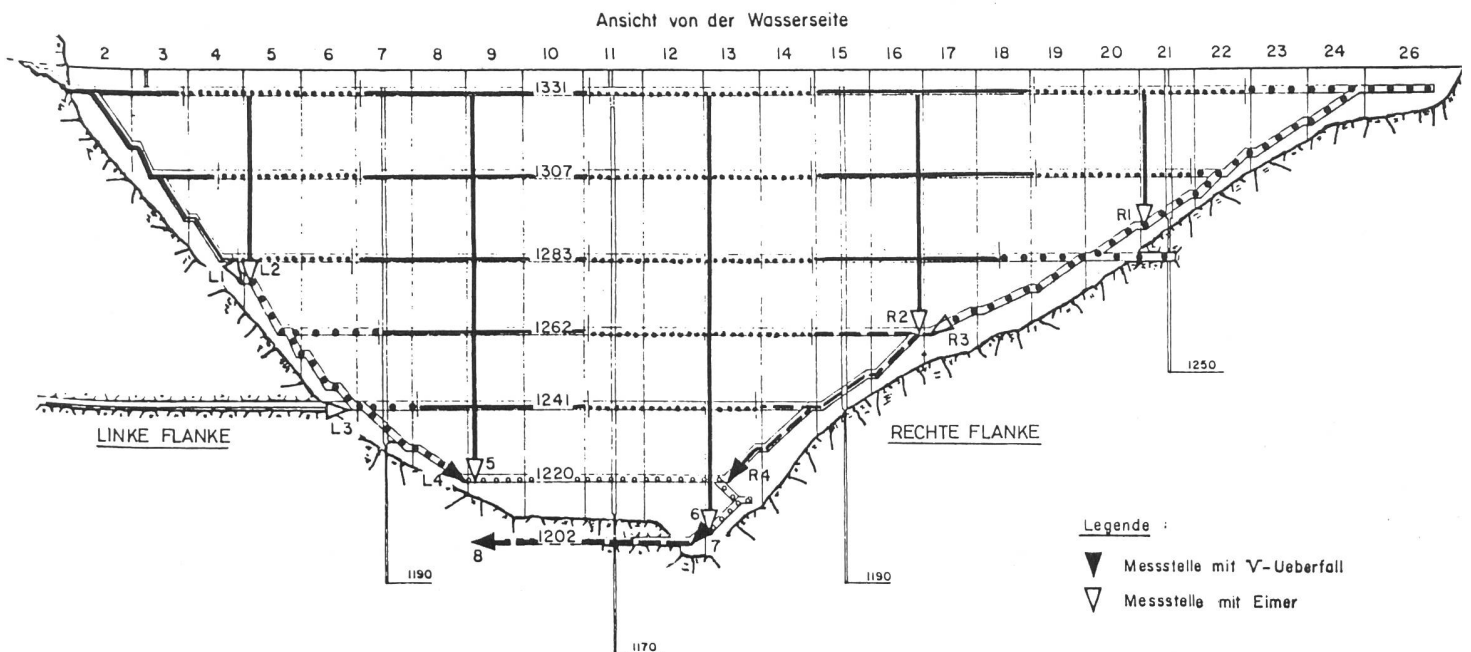


Figure 9. Installation de mesure débits d'infiltration dans le barrage.

Moyens propres à réduire les effets des infiltrations et de la sous-pression

Vu la nature des appuis rocheux, un réseau de forages de drainage a été aménagé sous le pied aval du barrage (figure 7) pour:

- éviter une mise en pression du rocher, à l'aval du voile d'injection;
- constituer un système de contrôle de l'efficacité de ce voile.

La disposition et les caractéristiques de ce réseau ont été fixées en fonction des données géologiques et de l'étude de stabilité:

Forages rive gauche

En rive gauche, le réseau est scindé en 2 familles:

- La 1^{re} famille est composée de forages horizontaux ou ascendants (drains descendants) qui traversent les plans de clivage n° 2. En plan, les forages, orientés vers l'aval, drainent la zone du pied aval du barrage. Leur longueur est telle qu'un plan de clivage n° 2 est toujours coupé par 3 ou 4 drains.
- La 2^e famille est composée de forages fortement inclinés par rapport à l'horizontale ou verticaux (drains ascendants ou descendants) qui traversent les plans de clivage n° 3. Ils plongent vers l'aval en s'éloignant du voile d'injection. Leur longueur est telle qu'ils coupent toujours un plan de clivage n° 3 passant sous le pied amont du barrage.

Forages rive droite

En rive droite, le drainage est constitué par une seule famille de forages, orientés pour:

- abaisser les sous-pressions éventuelles dans le système de stratification (forages descendants, drains ascendants et dirigés vers la rive droite);
- drainer la zone du pied aval du barrage (forages dirigés vers l'aval et si possible proches de l'horizontale). Leur longueur est telle qu'ils puissent drainer la zone de rocher située à l'aval de l'emprise de la fouille.

Exécution et essais de perte d'eau des forages

Tous les forages, d'un diamètre de 45 mm, ont été exécutés à la foreuse rotative à couronne, avant le début de la mise en eau mais après l'achèvement des injections du rocher. Tous les forages ont été essayés, par passes de 5 m de longueur, sous une pression d'eau de 10 kg/cm²; les essais ont conduit aux résultats suivants:

- forages de la zone de clé: absorptions de 0,20 l/min · m
 - forages de la rive gauche: comprises entre 0,61 et 1,05 l/min · m
 - forages de la rive droite: absorptions de 1,18 l/min · m
- Moyenne générale pour 65 forages d'une longueur totale de 1415 m: absorptions de 0,83 l/min · m.

Ces résultats ne sont cependant pas représentatifs de la perméabilité du rocher dans son état naturel, les forages ayant été exécutés après toutes les injections du rocher.

Dispositifs de mesure de la sous-pression et des infiltrations

Ces dispositifs (figures 8 et 9) se composent de:

- 5 sections de 5 prises de pression chacune, pour mesurer la sous-pression sous le barrage, aux blocs 4, 6, 10, 15, 20.
- 3 sections comprenant respectivement 5, 5 et 3 prises de pression en profondeur, pour mesurer les sous-pressions qui pourraient se développer dans l'appui en rocher rive gauche.

– 12 stations de mesure du débit des eaux d'infiltration et de drainage. Des travaux d'injection du béton du barrage ayant été exécutés pendant les deux premières mises en eau de 1976/77, ces mesures n'étaient pas représentatives des infiltrations réelles durant cette période. Par contre, le débit des eaux de drainage a été mesuré à l'orifice de chacun des 65 drains.

Résultats des mesures de sous-pression et des infiltrations pendant les 2 premières mises en eau de 1976/77

a) Sous-pressions sous le barrage

Valeurs maximales des coefficients moyens de sous-pression par section, atteintes à lac «plein» en 1976/77.

	Rive gauche		Clé	Rive droite	
Bloc	B 4	B 6	B 10	B 15	B 20
λ max.	33%	24%	88%	63%	25%

Bloc 10 (clé): les résultats sont influencés par une fissure en rocher qui établit une communication d'une prise à l'autre et provoque ainsi une augmentation des sous-pressions.

Cette zone de rocher est fortement drainée et on n'y a décelé ni débit anormal, ni mise en pression des drains, ce qui indique que cette sous-pression élevée est très localisée.

Bloc 15 rive droite, (près du talweg): les valeurs de la sous-pression sont relativement élevées, mais comparables à celles mesurées dans certains barrages de même type et dans les sections qui subissent les plus fortes rotations sous l'effet de la poussée de l'eau, comme c'est le cas au bloc 15. Ces résultats ont d'ailleurs fait l'objet d'une vérification de la stabilité au glissement des bancs rocheux de la rive droite au voisinage du bloc 15, bancs dont le pendage maximal est d'environ 37°.

b) Sous-pression dans l'appui en rocher rive gauche

Les sous-pressions sont restées faibles et en aucun moment les drains ont été mis en pression. En particulier, dans les forages ascendants exécutés à partir de la galerie 1241, les niveaux d'eau mesurés n'ont pas atteint les prises de pression proprement dites. On peut donc estimer que les effets conjugués du voile d'étanchéité et du réseau de drainage sont satisfaisants.

c) Eaux d'infiltration et de drainage du pied aval

Comme on l'a vu, les débits des infiltrations mesurés en 1976/77 ne sont pas significatifs (en raison des injections exécutées durant cette période).

En revanche, le débit des eaux de drainage mesuré à l'orifice de chacun des 65 drains, ainsi qu'à celui de 2 drains provenant des puits des pendules inverses des blocs 7 et 11, est resté relativement faible, confirmant ainsi l'étanchéité de la fondation. En effet, le débit cumulé de tous les drains a atteint au plus 53 l/min durant la 1^{re} mise en eau et 37 l/min durant la 2^e. Les observations ultérieures (à plus ou moins longue échéance) permettront de définir éventuellement les causes de cette diminution de débit total, soit par exemple: colmatage des drains ou tendance vers un état d'équilibre après la première mise en eau.

Bibliographie:

- [1] Pierre Londe: Stabilité des massifs rocheux. Application aux barrages. «Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics», n° 251 de novembre 1968. Série: Sols et fondations, n° 69.

Exposé présenté le 18 septembre 1980 à Ilanz, dans le cadre des «Journées du Comité national suisse des grands barrages».

Adresse de l'auteur: Emile Schnitzler, Prof. hon. EPFL. – Stucky, Bureau d'Ingenieurs-Conseils. 6, chemin de Roseneck, 1006 Lausanne.