

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 86 (1960)
Heft: 1

Artikel: Étude sur modèle par photoélasticité de la résistance d'une section type du tunnel de Donnerbühl: essais effectués au Laboratoire de statique des constructions de l'EPUL
Autor: Panchaud, F. / Rescher, O.J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64458>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgrin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: D. Bonnard, ing.
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; R. Neeser, ing.; A. Robert, ing.;
J. P. Stucky, ing.

Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION

Vacat

Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »

Tirés à part, renseignements

Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II. 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 290.—
1/2 »	» 150.—
1/4 »	» 75.—
1/8 »	» 37.50

Adresse: Annonces Suisses S. A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales

**SOMMAIRE**

Etude sur modèle par photoélasticité de la résistance d'une section type du tunnel de Donnerbühl, par F. Panchaud, professeur, et O. J. Rescher, chargé de cours à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.

Tunnel du Donnerbühl. Calcul statique et fabrication des voussoirs, par Paul Kipfer, ingénieur-conseil ASIC, à Berne, et Hans Wanzenried, ing. dipl.

La construction du tunnel du Donnerbühl par la méthode du bouclier, par H. Ruppner, ingénieur diplômé.

Divers. — Bibliographie. — Les Congrès. — Carnet des concours. — Documentation générale. — Informations diverses.

ÉTUDE SUR MODÈLE PAR PHOTOÉLASTICITÉ DE LA RÉSISTANCE D'UNE SECTION TYPE DU TUNNEL DE DONNERBÜHL

Essais effectués au Laboratoire de statique des constructions de l'EPUL

par F. PANCHAUD, professeur, et O. J. RESCHER, chargé de cours à l'EPUL.

Introduction

Il est utile de rappeler aux non-spécialistes que l'étude de la résistance des ouvrages sur modèles réduits n'est pas applicable sans réserve: comme il s'agit toujours de transposer à la réalité les observations effectuées sur le modèle, on doit vérifier dans chaque cas si les règles de la similitude mécanique sont valables. Pour cela, deux conditions essentielles doivent être satisfaites: 1° les déformations doivent être réversibles — ce n'est pas le cas en général lorsque les forces de frottement interviennent; 2° les déformations doivent être proportionnelles à l'intensité des charges. Si les règles de la similitude ne sont pas applicables, l'essai sur modèle n'est pas nécessairement sans intérêt; analysé avec méthode, il permet alors de mettre en lumière l'influence des différents facteurs intervenant dans le problème posé.

L'étude qui va suivre est de celles où ces questions se sont posées; il nous a paru intéressant de la signaler.

F. P.

1. Objet des essais

La construction du tunnel ferroviaire de Donnerbühl, dans le cadre des travaux pour l'extension de la nouvelle gare de Berne, pose des problèmes de résistance délicats, étant donné la nature hétérogène des terrains traversés. Il est apparu indiqué aux auteurs du projet, le bureau d'ingénieurs Kipfer, à Berne, et au maître de l'œuvre, de limiter ces incertitudes en procédant à des essais sur modèle.

La méthode d'exécution envisagée par bouclier est décrite d'autre part. Le revêtement du tunnel est un anneau circulaire de 8,85 m de diamètre intérieur et de 0,55 m d'épaisseur; l'exécution doit se faire par tranches de 0,50 m, chaque section se compose de quatre secteurs préfabriqués reliés par des joints formant articulations.

Les essais avaient pour objet initial d'étudier l'état de contrainte dans l'anneau sous l'effet de différentes surcharges et si possible de déterminer les pressions du terrain sur l'anneau.

2. Description des essais

Les caractéristiques du terrain sableux traversé par le tunnel étant très variables, il est pratiquement impossible de réaliser un modèle réduit donnant l'image de cette hétérogénéité. Nous nous sommes donc limités à une première série d'essais en plaçant le modèle entre deux plaques de verre, et en l'entourant de sable (diamètre des grains : de 0 à 2 mm (fig. III/1)). Le modèle était formé d'un anneau à l'échelle 1 : 65 placé dans le sable. La surcharge a été réalisée par une pression uniforme exercée sur la surface libre du sable. La hauteur du recouvrement du sable au-dessus du sommet de l'anneau était de l'ordre du diamètre du modèle.

D'emblée, on a constaté que les forces de frottement à l'intérieur du sable et entre le sable et les plaques de verre étaient importantes, faisant disparaître la réversibilité des efforts comme on s'y attendait dans une certaine mesure, de sorte que les principes de similitude

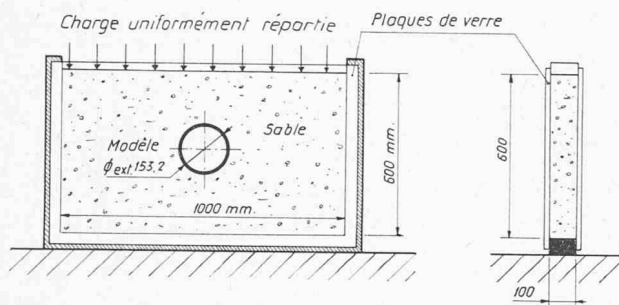


Fig. III/1. — Disposition initiale des essais.

de l'ensemble de l'essai n'étaient plus applicables. Il en résultait que l'évaluation des pressions actives exercées sur le modèle devenaient trop incertaines, malgré les mesures prises pour atténuer l'influence des frottements. C'est pourquoi de cette première série d'essais, nous n'avons retenu qu'un cas de charge.

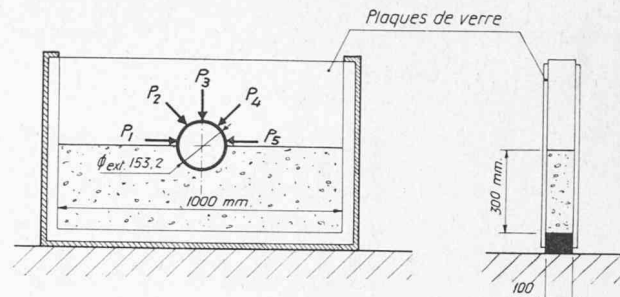


Fig. III/2. — Disposition de la série d'essais effectués.

Mais il est apparu que si l'essai photoélastimétrique ne pouvait pas donner les pressions radiales actives exercées sur le pourtour de l'anneau par le sable, il donnait une image assez correcte des états de contraintes dans l'anneau si les pressions du sable sont passives.

C'est pour cette raison que, d'entente avec les Chemins de fer fédéraux et l'auteur du projet, il a été décidé de procéder à une série d'essais, en plaçant le modèle dans un lit de sable jusqu'à mi-hauteur de la section, et en exerçant sur la partie supérieure des forces concentrées représentant les efforts extérieurs actifs (fig. III/2) choisis entre les cas limites vraisemblables. On a ainsi schématisé et encadré les conditions réelles : la masse de recouvrement du tunnel exerce des forces actives, tandis que le massif d'appui inférieur subit les forces passives de réaction.

L'examen de plusieurs cas de charge probables permet alors d'encadrer le problème avec plus de certitude que par une évaluation des pressions exercées sur le pourtour par l'intermédiaire d'un recouvrement de sable.

Il faut remarquer que la superposition des différents cas de charge n'est valable rigoureusement que dans la mesure où le mode d'appui du lit de sable est invariable ; avec une approximation suffisante, il en est ainsi pour les cas considérés, lorsque les pressions sur le sable sont passives.

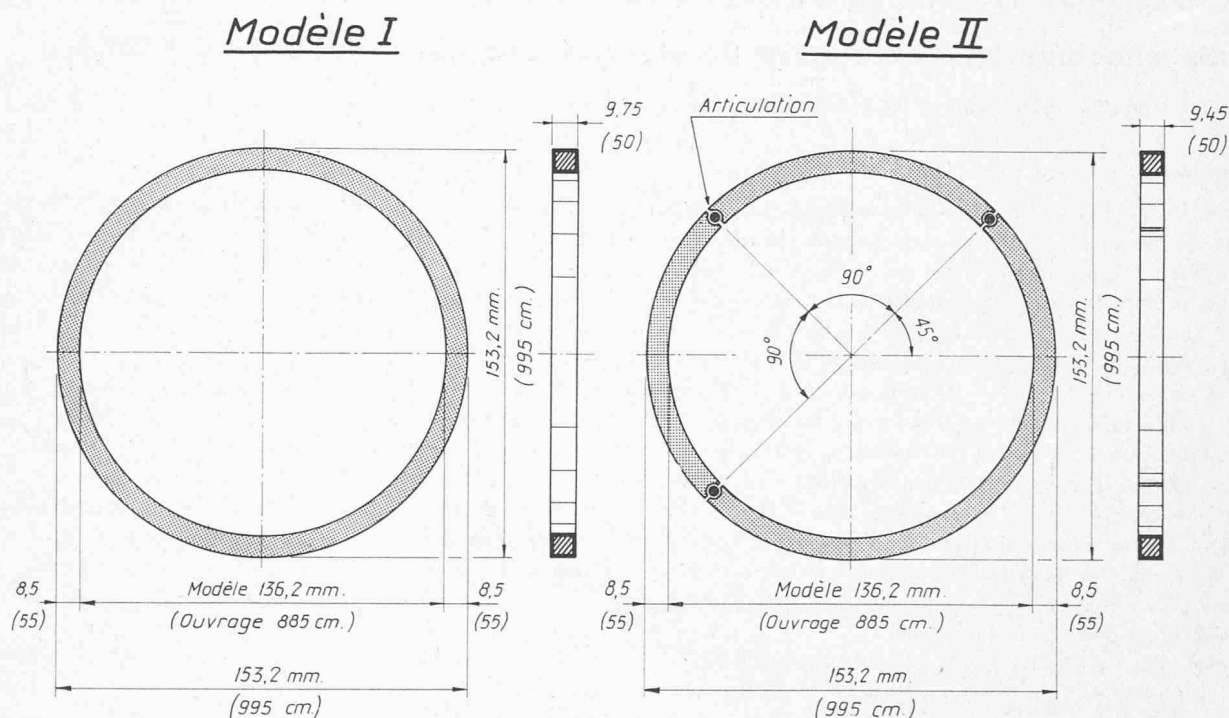


Fig. III/3. — Dimensions géométriques des modèles étudiés.

3. Modèles étudiés

Comme le projet prévoit que l'anneau est constitué tout d'abord par quatre segments articulés que l'on charge par la suite, on a étudié d'une part l'anneau monolithique et d'autre part l'anneau articulé : représentés par les deux modèles de la figure III/3.

Le cas MO correspond à un cas réel où le recouvrement du tunnel est important (minimum 1,5 fois le diamètre). Quoique ce cas ne donne que l'ordre de grandeur des contraintes, on peut toutefois en tirer une conclusion intéressante sur la répartition des pressions sur le pourtour extérieur ; la distribution des pressions sur le pourtour du tunnel est loin d'être hydrostatique, du fait que l'on enregistre d'après les photographies des isochromes quatre sections de moment nul. On peut aussi constater que la poussée verticale exercée par le sable est plus forte que celle qui se manifeste dans le sens horizontal. Fig. III/4 et III/5.

Pour tous les cas de la série d'essais effectuée pour le modèle I, on a constaté, dans la partie inférieure, l'existence de deux points de moment nul, situés plus ou moins symétriquement sous un angle variant de 45° à 60° par rapport à la verticale. Dans la partie supérieure, la distribution des points de moment nul dépend essentiellement du mode d'application de la charge ; pour une charge répartie, les points de moment nul sont pratiquement les symétriques de ceux du radier.

Pour le modèle II, modèle annulaire avec trois articulations, on a vu apparaître, pour tous les cas de charge symétriques ou plus ou moins symétriques, un point de moment nul sur le radier au voisinage du symétrique de l'articulation inférieure.

Modèle I : anneau monolithique (étude théorique).
Modèle II : anneau à trois articulations.

L'étude du modèle I était destinée à déterminer l'emplacement des points de moment nul dans la section, suivant les différents cas de charge.

Le modèle II, avec trois articulations, devait représenter le cas de l'ouvrage réel avant clavage. Pour des raisons d'exécution, la section de l'ouvrage réel était munie de quatre articulations.

Pour l'étude sur modèle, il n'était pas possible de réaliser la quatrième articulation, le modèle devenant instable. On a pu relever la position du quatrième point de moment nul.

Les échelles sont les mêmes pour les deux modèles, soit 1 : 65.

L'intensité des charges appliquées sur modèle a été mesurée par voie optique, avec une précision de l'ordre de 3 %.

4. Cas de charge considérés

Parmi les cas de charge étudiés pour les deux modèles, soit 8 pour le modèle I et 12 pour le modèle II, nous ne retenons que quatre cas parmi les plus intéressants. Pour chacun d'eux, nous avons reproduit le champ des lignes isochromes (ligne d'égale différence des contraintes principales) et l'interprétation des résultats.

La figure III/4 montre l'image des lignes isochromes du modèle I avec la première disposition des essais (modèle entouré de sable), les figures III/6 et III/8 celle d'un même cas de charge considéré sur l'anneau monoli-

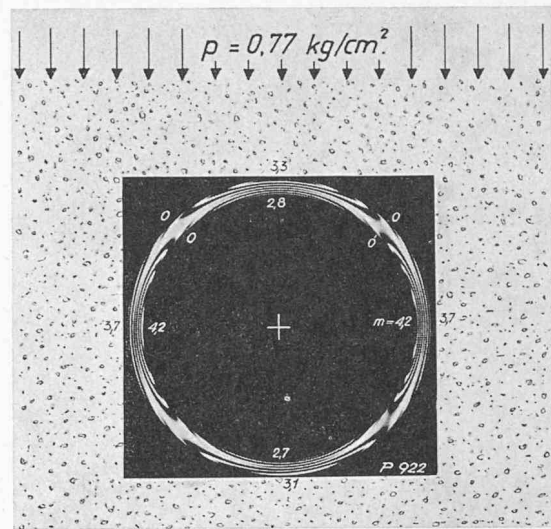


Fig. III/4. — Lignes isochromes ($\sigma_I - \sigma_{II} = \text{const.}$).
Lumière monochromatique.
Cas de charge MO.
Contraintes annulaires sur l'ouvrage : $\sigma \text{ kg/cm}^2 = 9,20 \text{ m}$
(+) traction (-) compression

thique (modèle I situé dans un lit de sable) ou avec articulations (modèle II). La figure III/10 représente un cas de charge dissymétrique.

Sur les figures III/5, III/7, III/9 et III/11, nous avons représenté la répartition des contraintes annulaires sur le pourtour extérieur et intérieur de l'anneau en kg/cm^2 pour une charge totale de 150 tonnes s'exerçant sur la partie supérieure du tunnel. Tous les cas de charge ont été interprétés pour cette même charge totale se répartissant différemment suivant le cas de charge.

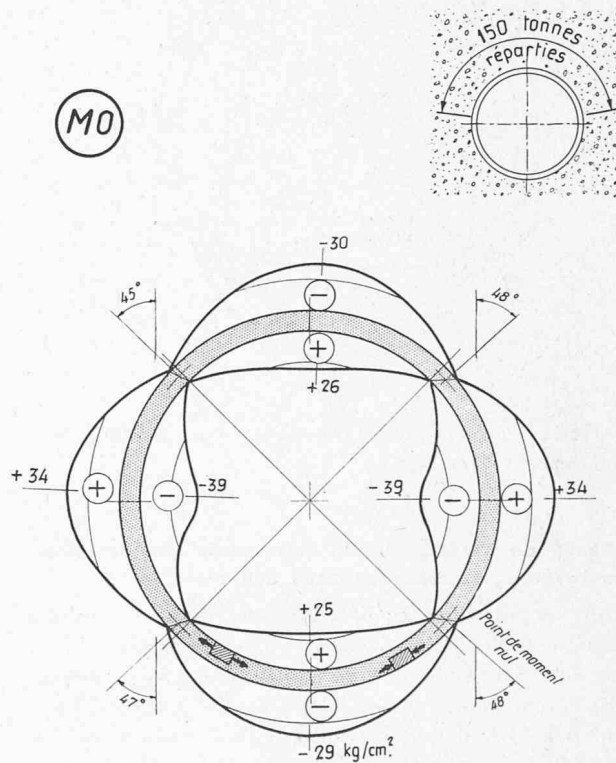


Fig. III/5. — Interprétation graphique du cas de charge MO.
(Photographie P 922)

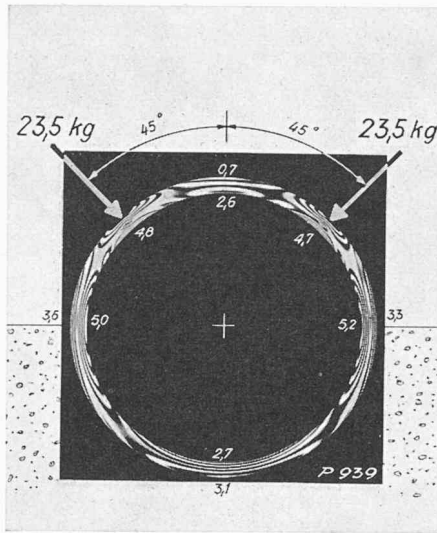


Fig. III/6. — Lignes isochromes ($\sigma_I - \sigma_{II} = \text{const.}$).
Lumière monochromatique.
Cas de charge M 4.
Contraintes annulaires sur l'ouvrage : $\sigma \text{ kg/cm}^2 = 8,64 \cdot m$
(+) traction (-) compression
 $m = \text{nombre de franges}$

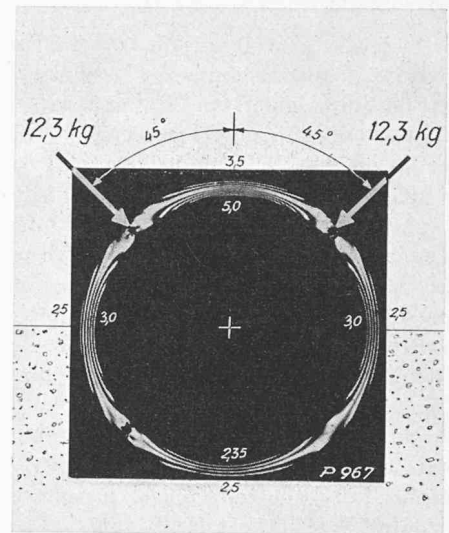


Fig. III/8. — Lignes isochromes ($\sigma_I - \sigma_{II} = \text{const.}$).
Lumière monochromatique.
Cas de charge A 4.
Contraintes annulaires sur l'ouvrage : $\sigma \text{ kg/cm}^2 = 16,65 \cdot m$
(+) traction (-) compression
 $m = \text{nombre de franges}$

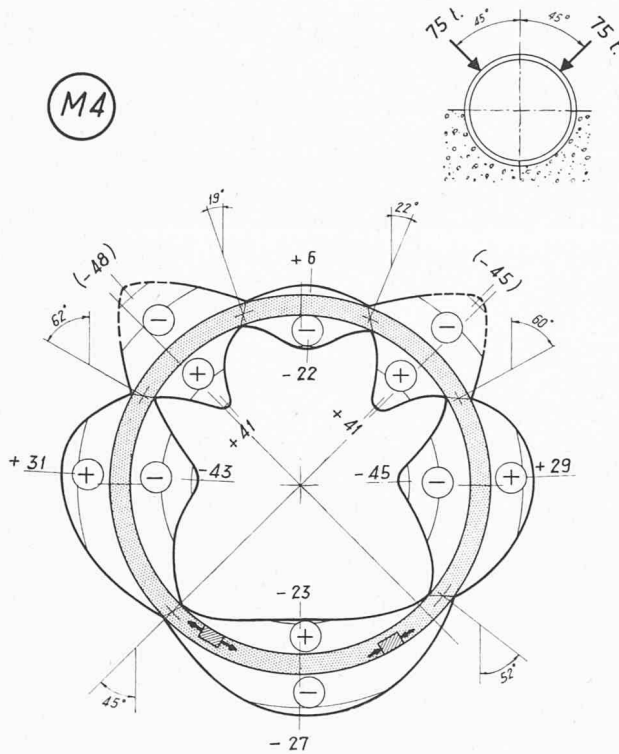


Fig. III/7. — Interprétation graphique du cas de charge M 4.
(Photographie P 939)

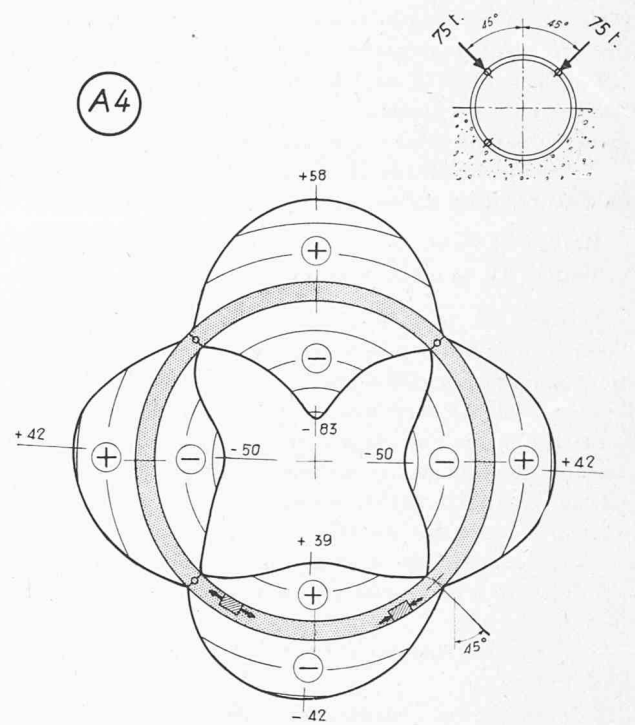


Fig. III/9. — Interprétation graphique du cas de charge A 4.
(Photographie P 967)

5. Bases de l'interprétation des essais photoélastométriques, et commentaires des résultats

Sans entrer dans les détails, nous signalons qu'une frange, observée sur les photographies, représente dans le modèle une différence de contraintes principales de $18,10 \text{ kg/cm}^2$ pour le modèle I et de $18,75 \text{ kg/cm}^2$ pour le modèle II. Nous avons indiqué pour chaque cas de charge le facteur multiplicatif (fig. III/4, III/6, III/8 et III/10), qui permet de passer de la charge appliquée sur le modèle à la charge de référence pour obtenir les

contraintes parallèles aux bords sur l'ouvrage réel, en supposant que la charge totale est de 150 t.

Les valeurs extrêmes des franges indiquées sur les photographies des isochromes ont été obtenues par extrapolation. Sur le bord extérieur, nous avons négligé la correction qui tiendrait compte de la deuxième contrainte principale non rigoureusement nulle sur le pourtour d'appui dans le lit de sable. Au droit du point d'application des charges, où cette correction est plus importante, nous avons également négligé cette

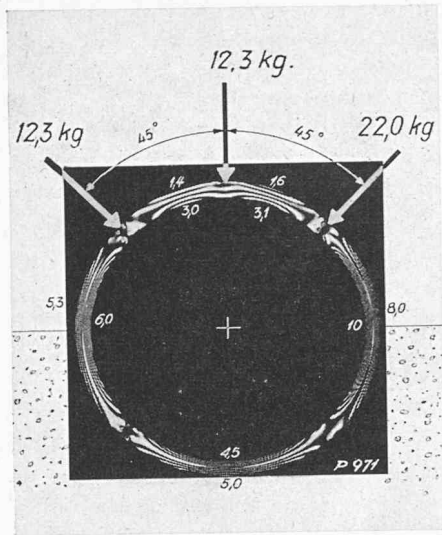


Fig. III/10. — Lignes isochromes ($\sigma_I - \sigma_{II} = \text{const.}$)
Lumière monochromatique
Cas de charge A 8
Contraintes annulaires sur l'ouvrage : $\sigma \text{ kg/cm}^2 = 8,72 \cdot m$
(+) traction (-) compression

influence, estimant qu'en réalité les charges ne seront jamais concentrées mais réparties et que les points de contrainte ne se produiront jamais ; les contraintes pratiques sont évaluées par continuité.

En outre, nous avons représenté, pour chaque cas de charge, l'emplacement des points de moment nul.

Pour interpréter les photographies, on peut faire les remarques suivantes :

Dans les régions où les lignes isochromes sont ou parallèles ou plus ou moins parallèles aux bords, l'effet d'un moment fléchissant est prédominant.

624.19 (494.24)

TUNNEL DU DONNERBÜHL

CALCUL STATIQUE ET FABRICATION DES VOUSOIRS

par PAUL KIPFER, ingénieur-conseil ASIC, à Berne, et HANS WANZENRIED, ing. dipl.

1. But du calcul statique

Lorsque le staticien se propose de fixer les dimensions des voussoirs d'un tunnel, il doit se préoccuper avant tout de la détermination exacte des efforts. Comme dans d'autres problèmes où intervient la poussée des terres, les forces en jeu peuvent, dans le cas qui nous occupe, varier dans des limites assez larges en raison de l'hétérogénéité du sous-sol. Il s'agit donc de déterminer les cas limites pour connaître les sollicitations les plus défavorables du tunnel circulaire.

En soi, la forme annulaire est particulièrement apte à supporter des pressions s'exerçant uniformément sur l'ouvrage. Pour un anneau, ce sont les irrégularités de répartition des efforts qui sont dangereuses, parce qu'elles sont la source de moments élevés. La valeur absolue de la pression extérieure joue, en revanche, un rôle secondaire. L'objectif principal des recherches statiques consiste donc à déterminer avec une sécurité suffisante le rapport entre les charges horizontales et les efforts verticaux. De plus, l'influence des méthodes

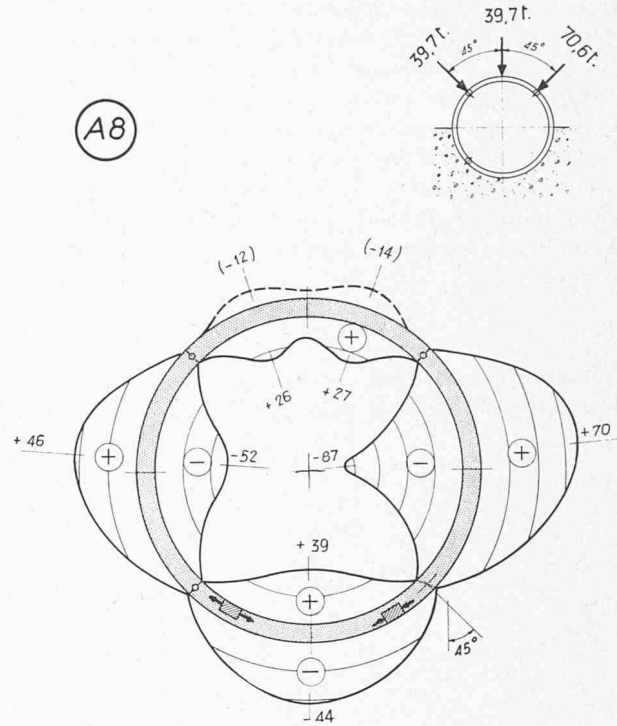


Fig. III/11. — Interprétation graphique du cas de charge A 8.
(Photographie P 971)

Si la ligne isochrome $m = 0$ se trouve près du milieu de la section, bien visible sur une certaine longueur, cela indique un moment fléchissant important, effort normal petit, pas ou très peu d'effort tranchant.

Si, par contre, la ligne isochrome $m = 0$ n'est bien visible que sur une courte longueur, puis s'efface, cela indique un effort tranchant plus marqué.

de construction et celle de l'appui élastique de l'anneau posent des problèmes secondaires que nous examinerons au cours de notre exposé.

2. Bases de calcul

a) Données géotechniques

Les sondages et les examens préalables effectués ont permis de déterminer les valeurs des caractéristiques géotechniques du matériau à forer :

Densité apparente	$\gamma_e \text{ max}$	= 2,2 t/m ³
Angle de frottement interne	φ	= 30° ÷ 35°
Cohésion	c	= 0 ÷ 0,4 kg/cm ²

Un essai de charge opéré dans un sondage près du portail ouest du tunnel a permis de déterminer la valeur M_e et d'en déduire par le calcul la valeur du module de réaction à adopter pour les efforts horizontaux, soit au maximum 0,4 kg/cm².

b) Méthodes de calcul

On ne trouve dans la littérature que peu d'indications concernant la répartition des pressions sur un