

Des arcs pour la structure du Learning Center

Autor(en): **Weilandt, Agnes / Santini, Gilbert / Wagner, Michael**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **134 (2008)**

Heft 12: **En chantier**

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-99685>

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.

Des **arcs** pour la structure du Learning Center

L'originalité et l'élégance des formes dessinées par SANAA pour le *Rolex Learning Center* ont immédiatement séduit. Restait cependant à trouver un moyen de garantir la constructibilité et la stabilité de deux coques qui se caractérisent par leur faible surbaissement, leur dissymétrie et leur grande portée. La solution passe par la création de onze arcs sous-tendus « dissimulés » dans les coques.

L'art de la conception de coques minces en béton consiste à leur donner une géométrie de sorte qu'elles soient principalement sollicitées par un état de contrainte membranaire,

sans qu'elles ne subissent aucun moment de flexion ou de torsion. Si on parvient à trouver cette forme « idéale », il est possible de réaliser des coques présentant des élancements très élevés, c'est-à-dire avec des rapports portée/épaisseur situés entre 250 et 500. Ainsi, une coque à double courbure d'une portée de 50 m peut par exemple avoir une épaisseur de 20 cm, soit environ dix fois moins que pour une poutre fléchie.

Pour le *Learning Center*, il est pour ainsi dire impossible de trouver une forme idéale : les contre-courbures et les grandes ouvertures excentrées des patios vont fatalement engendrer d'importants moments de flexion, empêchant la structure

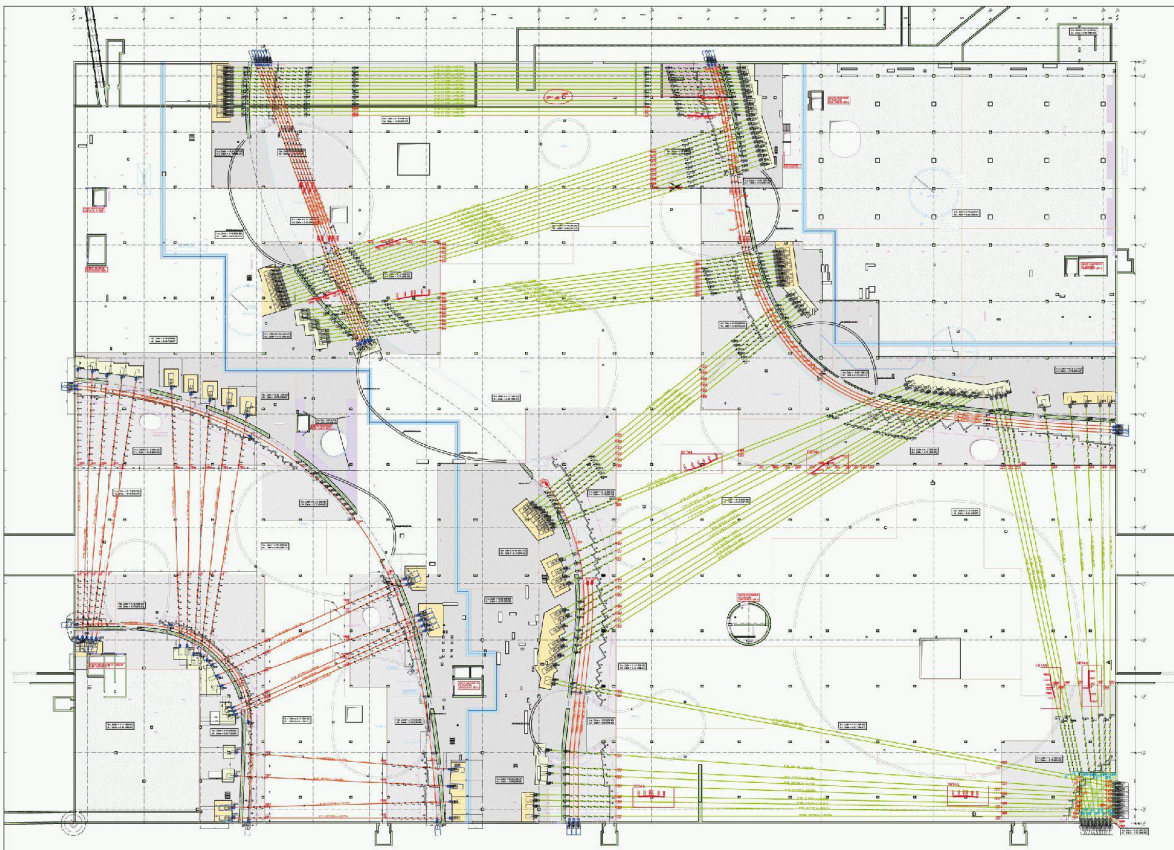
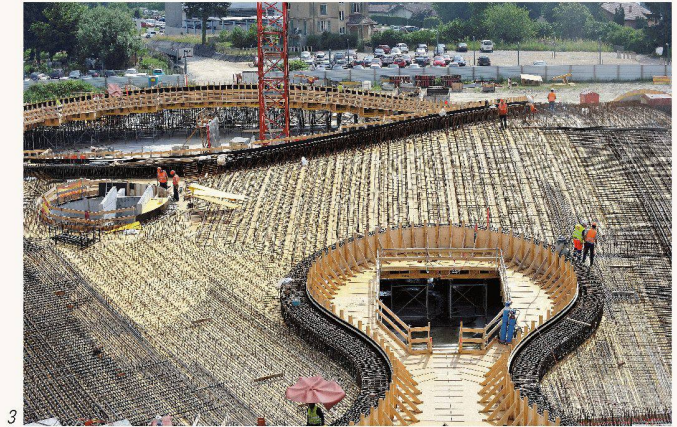
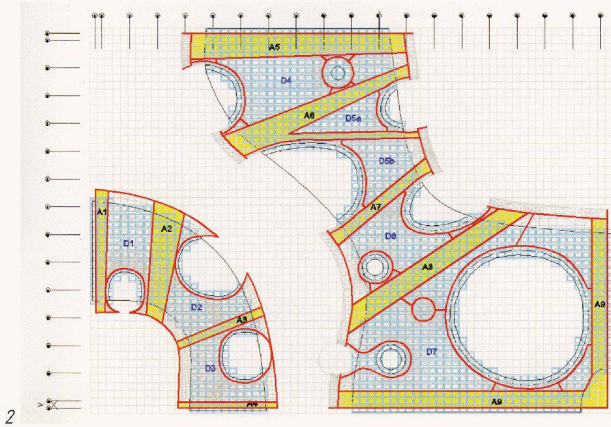


Fig. 1 : Représentation en plan des câbles de précontrainte dans la dalle sur sous-sol

Fig. 2 : Positions des arcs dans les deux coques

Fig. 3 : Armatures renforcées dans les bords des patios
(Photo Augusto Da Silva)



de fonctionner comme une coque mince. Il a dès lors fallu trouver une alternative qui ne nuise pas à la qualité architecturale du projet.

Des arcs cachés

Malgré les doutes qu'ils ont initialement émis, le bureau *Bolliger und Grohmann Ingenieure GmbH* de Francfort et le bureau *Walther Mory Maier Bauingenieure AG* de Bâle ont été mandatés pour les travaux d'ingénierie. Leur tâche a notamment consisté à proposer une solution structurale qui sauvegarde la conception architecturale prévue.

La proposition simpliste d'appuyer les coques sur une forêt de poteaux a d'emblée été rejetée, puisqu'elle aurait complètement gâché l'esthétique et le concept architectural. Les ingénieurs ont donc proposé un système porteur hybride, en créant à l'intérieur des coques onze arcs sous-tendus de grande portance (fig. 1 & 2) qui assurent la stabilité de l'ensemble. Ces arcs reprennent également les réactions des espaces bétonnés entre eux, des espaces qui fonctionnent plutôt comme une dalle et sont donc essentiellement sollicités en flexion.

Ainsi le système porteur réel ne correspond pas à son apparence. L'adoption de cette solution hybride a impliqué d'apporter quelques modifications à la géométrie initialement proposée par les architectes, notamment pour l'emplacement des patios et la courbure des arcs.

Si les arcs ont permis de se passer de tout élément porteur vertical pour la petite coque, leur présence ne s'est pas avérée suffisante pour stabiliser la partie sud de la grande coque, une zone où trois points d'appuis supplémentaires sont nécessaires. Le premier est obtenu par le biais d'une cage d'ascenseur. On a ensuite placé un mur sous le coté

ouest de l'arc sud, mur dont la présence est indispensable pour donner une contre courbure à l'amorce de cet arc. Finalement, un poteau supplémentaire a dû être positionné au nord du grand patio pour stabiliser l'arc diagonal A8, qui présente une grande portée et une asymétrie importante. Une géométrie structurellement plus favorable n'était pas possible dans cette zone, afin de préserver la vue sur le panorama impressionnant des Alpes.

Conception de la géométrie des coques

La solution est le résultat d'un compromis entre les contraintes d'exploitation, le design voulu par les auteurs du projet et les exigences structurelles. Les conditions d'exploitation concernaient notamment la mise à disposition de suffisamment de surfaces d'utilisation planes, les chemins de fuite ou les circulations entre différentes zones et les points de vue. En matière de design, deux aspects étaient essentiels : créer un espace intérieur captivant et éviter un effet de « tunnel » sous les coques. En bref, durant la phase d'optimisation de la géométrie, l'apparence du « paysage » voulue par les architectes a dû être préservée.

La géométrie des coques a été développée à partir de la proposition présentée lors du concours par les architectes de SANAA. La répartition des zones d'exploitation n'était pas encore définitivement fixée et a pu être modifiée. On a par exemple agrandi la zone plate entre les coques, afin d'augmenter les surfaces facilement aménageables.

Des modifications importantes en direction d'une géométrie constructible ont pu être envisagées : les rapports entre portées et hauteurs ont été optimisés, les surfaces ont été lissées et le positionnement des patios a été revu. Les courbes de niveau de la maquette de SANAA ont servi de base à

l'établissement des premiers modèles 3D géométriques. Ces derniers ont permis une première analyse par la méthode des éléments finis, laquelle a conduit à la définition de certaines règles géométriques à respecter, dont la principale concerne le rapport maximal entre portée et hauteur. Ces modèles ont aussi aidé à cerner les éléments critiques des géométries proposées. Parallèlement aux analyses tridimensionnelles, des modèles simples bidimensionnels ainsi que des calculs à la main ont été utilisés pour valider les modèles plus complexes.

L'optimisation des formes s'est poursuivie au cours de l'avant-projet, puis du projet de détail. Les géométries proposées par SANAA à ce stade du projet, qui respectaient déjà certaines règles définies, conservaient néanmoins des caractéristiques structurelles désavantageuses. La géométrie définitive a été ajustée en fonction des règles suivantes :

- déplacer ou modifier la forme des patios, afin de permettre l'insertion des arcs entre les patios,
- optimiser la forme des arcs vers une section parabolique et symétrique,
- réduire les imperfections géométriques,
- éviter des contre-courbures à l'amorce des coques en différenciant la géométrie de la structure des coques et de celle du sol fini par le biais d'une hauteur variable de l'aménagement intérieur.

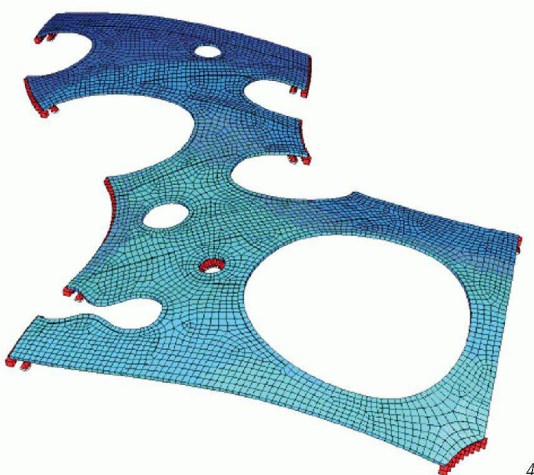
Les géométries des deux coques finalement obtenues ne correspondent probablement pas à un optimum structurel. Elles expriment l'indispensable compromis entre les exigences d'exploitation, le design et les contraintes statiques. A noter que les enseignements tirés de la mise en oeuvre de la petite coque – aujourd'hui terminée – conforte les concepteurs dans leurs idées.

Dimensionner des arcs surbaissés

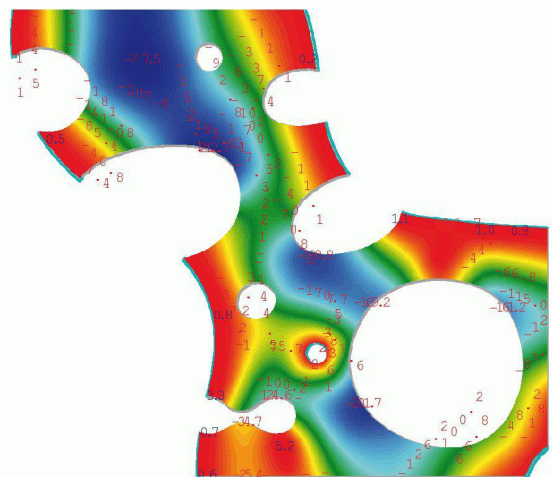
Assurer la stabilité des arcs – les éléments porteurs principaux – a été le souci premier des ingénieurs durant la phase de planification. D'innombrables analyses très sophistiquées ont ainsi dû être effectuées avec des modèles par éléments finis spatiaux (fig. 4 & 5).

Le dimensionnement des arcs du *Learning Center* est particulièrement délicat, d'une part en raison de leurs surbaissements extrêmes et, d'autre part, parce qu'ils ne suivent pas la forme idéale d'un arc. Cette dernière peut facilement être définie par analogie avec celle que prend une corde à laquelle on suspend des poids correspondant aux charges. Toute déviation de cette forme crée des moments de flexion risquant d'engendrer une ruine par instabilité.

Les dimensions des arcs et les efforts qui en résultent sont considérables. Leur ordre de grandeur peut être donné par le biais de l'arc A5, situé à proximité de la façade nord. Pour cet arc, le rapport entre la portée (l) et la surélévation (f) est de 16,5 ($l/f = 80/4,85$). Cette valeur est presque le double de celle que les spécialistes de la construction de ponts recommandent comme limite supérieure de faisabilité. Pour reprendre les réactions horizontales de cet arc, il a fallu disposer des câbles de précontrainte dans la dalle sur sous-sol d'une capacité totale de 78 000 kN. La forme de cet arc n'est pas tout à fait idéale, puisqu'il est légèrement plus bombé à droite qu'à gauche : cette dissymétrie engendre des moments de flexion non négligeables, auxquels s'ajoutent les sollicitations des surcharges mobiles. Il a donc fallu renforcer les arcs par un taux d'armature très élevé allant jusqu'à 470 kg/m³ de béton, près de quatre fois plus que dans une construction courante. Ce renforcement n'avait pas pour seul objectif d'assurer la résistance nécessaire, mais aussi de limiter les déformations,



4



5

Fig. 6 : Bord de coffrage de la grande coque (Photo Augusto Da Silva)

Fig. 7 : Détail de l'armature de l'amorce de la petite coque

Fig. 8 : Détail de principe de l'armature des bords de patio

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)



notamment celles dues aux effets différés. Le béton est en effet un matériau visco-élastique. Comprimé, il enregistre des déformations de fluage deux à trois fois plus importantes que les déformations élastiques initiales. Sachant qu'un raccourcissement de seulement 2 cm des arcs se traduit par un déplacement vertical d'environ 10 cm de leur sommet, il était impératif de réduire au minimum les effets du fluage, les façades ne pouvant évidemment pas supporter de tel mouvement.

Mise en œuvre

Mettre en place une telle densité d'acier en laissant suffisamment de place pour le bétonnage et le compactage a imposé l'usage de barres longitudinales de 50 mm, un diamètre tout à fait inhabituelle pour des aciers d'armature. La continuité de ces barres ne pouvant pas être réalisée par la méthode conventionnelle du recouvrement – risque d'éclatement du béton –, il a fallu se résoudre à les souder. Après avoir étudié et testé plusieurs possibilités, les entrepreneurs

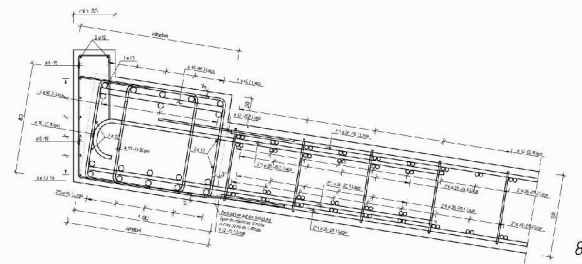
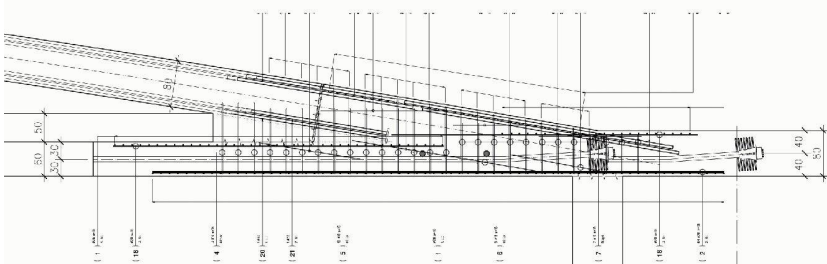
ont trouvé une solution astucieuse qui permet de souder les barres sur le chantier à l'aide de manchons perforés. De sa propre initiative, l'entreprise a également examiné la méthodologie de la mise en œuvre de cette construction exigeante à l'aide de maquettes partielles à l'échelle réelle.

Les plans illustrent combien la mise en place des armatures s'est avérée délicate dans les zones les plus sollicitées (fig. 7 & 8). Ils ont été établis principalement en deux dimensions, les longueurs effectives des barres tenant compte de la courbure de la structure. Afin de garantir la longueur des barres, les constructeurs étaient assistés par des experts 3D qui leur préparaient les données géométriques nécessaires. Pour les amorces de coques, une représentation complète en 3D a été nécessaire pour garantir une précision suffisante du positionnement des barres.

6 Du sous-sol aux dalles

Le sous-sol du bâtiment abrite avant tout le futur parking du *Learning Center*. Sa structure est relativement simple, puisqu'elle se compose de pieux, de radiers, de murs périphériques et intérieurs ainsi que de colonnes. Selon qu'ils sont situés ou non dans l'emprise de la descente de charges des coques, ces éléments remplissent plusieurs fonctions statiques.

Les 650 pieux qui servent à reporter les charges verticales sur la moraine saine sont de types et de longueurs différents selon leur emplacement. Le projet initial ne comprenait que des pieux de type *Fundex* (pieux forés tubés avec tête auto-forante perdue) de 50 et 60 cm de diamètre pour des longueurs allant de 14 à 25 m. Toutefois, la présence inopinée d'importants blocs dans le sol a fortement ralenti ou même stoppé le forage de certains pieux, imposant de recourir à deux autres types de pieux. Sous les appuis des coques, des pieux béton forés dans des tubes de plus gros diamètre (90 cm) et de 27 m de longueur ont remplacé les pieux *Fundex*. A quelques emplacements, des micro-pieux ont été rajoutés au côté des pieux *Fundex* qui n'avaient pu atteindre la profondeur voulue en raison des blocs sus-mentionnés.



La capacité portante des pieux a été démontrée non seulement avant leur exécution, par des tests effectués sur des pieux d'essais, mais aussi après, sur les pieux réalisés. Tous les pieux situés sous ou à proximité des appuis des coques ont été testés en raison de leur importance pour la sécurité structurale.

Conçu sans aucun joint de dilatation permanent pour des raisons de durabilité, exécuté en 36 étapes de bétonnage, le radier a une épaisseur constante minimale de 25 cm sur la plupart de la surface du bâtiment. Il présente toutefois des surépaisseurs au droit des groupes de pieux pour atteindre jusqu'à deux mètres dans les zones les plus sollicitées par les appuis des arcs.

Les murs périphériques ont une épaisseur constante de 25 cm et ont eux aussi été exécutés sans joint de dilatation. En phase de construction, des bandes de clavages ont été placées de part et d'autre des appuis des coques, pour permettre la déformation axiale des murs périphériques lors de la mise en tension des câbles de précontrainte situés dans la dalle sur sous-sol.

Les murs intérieurs situés au droit des jonctions entre les coques et la dalle sur sous-sol ont pour unique fonction d'assurer le transfert des réactions verticales des coques sur les pieux. Ils ont une épaisseur constante de 55 cm. Ces murs sont courbes et suivent exactement le dessin des appuis des coques. Ils s'interrompent lorsque des patios remplacent le béton, créant ainsi des zones de circulation pour le parking.

Pour les colonnes, il faut différencier celles situées de part et d'autre des murs servant d'appui aux coques des autres. En effet, les colonnes situées au premier rang devant et derrière les murs d'appui reprennent des efforts supplémentaires dus à l'encastrement des coques. Leur taille a été adaptée à ces sollicitations, pour atteindre un maximum de 30 x 60 cm. Les autres poteaux, qui servent uniquement d'appuis à la dalle sur sous-sol, ont des dimensions de 30 x 40 cm ou de 40 x 40 cm.

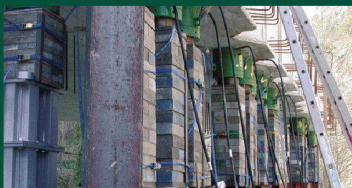
La dalle sur sous-sol remplit une double fonction : elle sert de fermeture supérieure et abrite les tirants (câbles de précontrainte) au droit des arcs. Des câbles de 19 torons de 150 mm² sont utilisés pour la petite coque, alors que ceux de la grande ont 31 torons de 150 mm². L'épaisseur de la dalle est adaptée aux sollicitations et aux besoins constructifs. Vers les appuis des coques, elle atteint 60, voire 80 cm dans les zones d'ancrages des câbles de précontrainte, afin de pouvoir placer plus aisément les têtes d'ancrage (fig. 7). Ailleurs, lorsque la dalle ne sert qu'à la reprise de charges verticales, son épaisseur est de 28 cm dans la zone où la trame des poteaux est irrégulière (5,90 m à 8,10 m x 8,85 m) et de 35 cm lorsque la trame est de 9,0 x 9,0 m. Pendant la phase de construction deux bandes de clavages séparent les parties sous coques des parties hors coques. Après clavetage de ces bandes, la dalle ne comprendra aucun joint de dilatation.

Prêt pour la grande coque

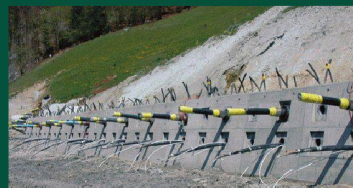
La réalisation de ce projet ambitieux posait aux ingénieurs et à l'entreprise d'énormes problèmes, notamment en ce qui concerne ses voûtes extrêmement surbaissées et de formes complexes. A présent, les travaux du sous-sol et de la petite voûte sont terminés avec succès. Le comportement réel de cette dernière correspond parfaitement aux prévisions théoriques. Cette expérience est de bon augure avant la phase la plus délicate, c'est à dire la réalisation de la grande voûte, pour laquelle les cintres et l'armature sont déjà en place (fig. 6).

Agnes Weilandt, dr ing. civil TU
Michael Wagner, ing. civil dipl. EPFZ
B + G Ingenieure - Bollinger und Grohmann GmbH
Westhafenplatz 1, D – 60327 Frankfurt am Main

Gilbert Santini, ing. civil dipl. EPFZ
Prof. René Walther, dr ing. civil dipl. EPFZ
Walther Morly Maier Bauingenieure AG
Florenz-Strasse 1d, CH – 4142 Münchenstein



ABAISSMENTS
VERINAGES
RIPAGES



TIRANTS PERMANENTS
TIRANTS TEMPORAIRES



PRÉCONTRAİNTE



Moudon - Zürich - Bellinzona



www.freyssinet.ch