




© Gesellschaft für Ingenieurbaukunst
www.ingbaukunst.ch

Das Guckloch

Nr. 4 | 2021

- 
- Konstruktionstyp:** Gewölbereihenmauer aus Stahlbeton
- Ort:** Les Marécottes (VS)
- Baujahr:** 1925 – 1926
- Bauingenieur:** Alexandre Sarrasin (1895 – 1976)
- Besonderheiten:** Das Ausgleichsbecken Les Marécottes ist ein schweizweit einzigartiges Beispiel für die «aufgelöste Bauweise» von Staumauern.

Das Ausgleichsbecken Les Marécottes im Vallée du Trient bei Martigny

Das Ausgleichbecken Les Marécottes – effiziente Schlankheit

Autorin: Clementine Hegner-van Rooden,
dipl. Bauing. ETH

Die SBB ist Besitzerin eines Ausgleichbeckens in Les Marécottes im Kanton Wallis. Es war Teil der Elektrifizierung des Schweizer Eisenbahnnetzes, nimmt turbinierte Abflüsse der Zentrale Châtelard auf und stellt dieses für die weitere Energieproduktion in der Kraftwerkzentrale Vernayaz im Rhonetal bereit.

Das in den Hang hinein gebaute, rund 200 m x 40 m grosse Becken mit einem Fassungsvermögen von etwa 47'000 m³ ist talseitig von einer Gewölbereihenstaumauer abgeschlossen. Diese wirkt wie eine über 180 m lange und 7 m hohe Staumauer und ist das prägende Element des Ausgleichbeckens, das der Ingenieur Alexandre Sarrasin 1925 kon-

Schlanke Betonkonstruktion der Staumauer
des Ausgleichbeckens.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)

zipiert hat. Sarrasin gehört zu den bedeutendsten Schweizer Ingenieuren des 20. Jahrhunderts. In der Zeit von 1920 bis 1970 trug er mit seinen eleganten Tragwerken in Stahl- und Spannbeton viel zur Innovation im konstruktiven Ingenieurbau bei. «Besonderes Talent zeigt Sarrasin in der Fähigkeit, neuartige Technologien weiterzuentwickeln», schreiben Eugen Brühwiler und Damien Metry in ihrem Beitrag 'Alexandre Sarrasin – Kreativität im Betonbau'.¹

Stahl in Beton genutzt

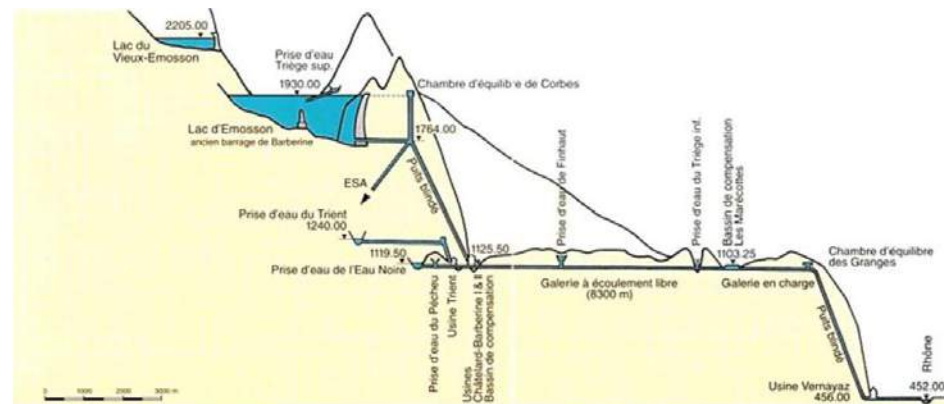
Die Gewölbereihenstaumauer ist eine bauliche Innovation aus ihrer Zeit, da die Gewölbe im damals neu eingesetzten Spritzbetonverfahren gebaut wurden. Sie besteht aus 43 geneigten und durch trapezförmige Scheiben gestützte Stahlbetonbögen, die nur 12 cm dünn sind. Einzig an den Gewölbefüssen, beim Übergang zum steifen Fels, wurde die Wandstärke erhöht.

Die Schlankheit der Gewölbe löste zu ihrer Bauzeit eine heftige Debatte unter Ingenieuren aus, denn der 30-jährige Sarrasin warf mit diesem Bauwerk viele herkömmliche statische Modellvorstellungen über Bord und baute ein Betonbauwerk von vorher kaum dagewesener Eleganz und Wirtschaftlichkeit. Begründet ist beides in der strengen Umsetzung der damals noch neuen



Stahlbetonbauweise – Sarrasin wusste die Stahlbewehrung gekonnt in der Betonkonstruktion umzusetzen.

Es gibt in der Schweiz nur noch eine weitere bauähnliche Staumauer – jene des Ausgleichsbeckens des Wasserkraftwerks Argessa in Oberems ob Turmann im Kanton Wallis. Im Ausland sind es beispielsweise der Mountain Dell Dam (1914-17) in den USA von Konstrukteur John S. Eastwood und die Linachtalsperre (1922-1925) in Deutschland von Dipl.-Ing. Dr. Fritz Maier. Nach der Bombardierung der Eder- und der Möhnetalsperre im 2. Weltkrieg endete der Bau dieses Bautyps. Das Ausgleichsbecken in Les Marécottes ist wegen seiner Rarität und seiner pionierhaften Bauweise



Elektrische Anlage von Vernayaz mit der Situation des Ausgleichsbeckens (oben links), der allgemeinen Lage der Anlage (oben rechts) und dem schematischen hydraulischen Längsprofil (unten).

(PLANE: LOMBARDI AG,
SCHEMA: SBB)

im Inventar der "Walliser Architektur des 20. Jahrhunderts" aufgeführt. Zudem ist es im Bundesinventar für Kulturgüterschutz als Objekt von nationaler Bedeutung aufgenommen.



Oben: Historische Aufnahme kurz nach dem Bau der Stau-mauer.

Unten: Betonieren der Gewölbe mit dem damals neuen Spritzbetonverfahren. Die Ausführung in Les Marécottes gilt als Pionierarbeit.

(BILD: AUS SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG, BD. 113, NR. 19, S. 233 UND S. 234)

Schlanke und aufgelöste, monolithische Bauweise

Auffallend in der Konstruktion sind die horizontalen Streben, die die Scheiben untereinander aussteifen. Jede zweite Strebe ist gebogen ausgeführt und unterbricht die lange Gerade in der aufgelösten Mauer. Sarrasin hatte sie bewusst aus statischen Gründen so ausgeführt. Er erkannte, dass Temperaturänderungen relevante Längenveränderungen und damit Risse und auch ungeplante Spannungen in den Scheiben und Gewölben verursachen würden. Er wusste aber auch, dass die entstehenden Zwängungen konstruktiv zu beherrschen waren.² Die Konzeption mit den gebogenen Streben war ingenieurmäßig! Diese Tragelemente wirken praktisch wie Dilatationsfugen, da sie weich sind. Dieses statische Konzept ermöglichte es Sarrasin, die Temperatureinflüsse in vertikaler und in horizontaler Richtung zu berechnen und somit die zusätzlichen Spannungen, die durch die Ausdehnung der Aussteifung in den Gewölben entstehen, zu ermitteln. Der Kräftefluss wurde berechenbar und die monolithische Konstruktion kontrollierbar.

Die Temperaturschwankungen verursachen generell erhebliche Spannungen in den Tragelementen. Sarrasin löste dieses statische Problem, indem er das Verhältnis zwischen der Gewölbestärke

und der Gewölbespannweite auf ein Minimum reduzierte. Er entwickelte ein statisches System, in dem die Gewölbe vorwiegend auf Druck beansprucht wurden – die Gefahr der Rissbildung war so reduziert worden.

Um ausserdem Frostschäden zu verhindern, die wegen Wasser gesättigtem Beton entstehen könnten, muss der Gewölbebeton möglichst dicht sein. Beim Bau ging man davon aus, dass die dichte Betonoberfläche allein mit Spritzbeton erreicht werden könne, ohne eine abdichtende Beschichtung. Dies sollte sich aber als zu optimistisch erweisen.

Das statische Potenzial nutzen

Die Rhythmisierung des Tragwerks ist optisch ausgewogen, nicht aber ohne Weiteres gegeben. Aus statischer Sicht spielten nämlich kontrovers ausgelegte Vor- und Nachteile gegenüber zwei Systemen eine Rolle. Es standen sich grosse Spannweiten mit grosszügigen Wandstärken und kleine Spannweiten mit dünnen Querschnitten gegenüber. Sarrasin hatte eine klare Tendenz zum zweiten System:

«L'augmentation de la portée des voûtes, en supprimant un certain nombre de contreforts, diminue la surface du coffrage, et, toutes les épaisseurs étant plus grandes, permet une mise en place plus économique du béton. Elle diminue



Frontalansicht des Ausgleichsbeckens im November 2017.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)

aussi le coût des fouilles. Par contre, le prix unitaire du coffrage des voûtes augmentera sensiblement, car, dans le cas de voûtes minces de petite portée, on utilise un coffrage très léger qui s'appuie directement sur les contreforts, tandis que pour des voûtes épaisses de grande portée, on aura un coffrage plus lourd que l'on soutiendra par un échafaudage ou par des cintres onéreux. Le volume des voûtes augmentera aussi d'une manière notable, mais il sera possible de récupérer une partie de ce cube dans les contreforts, si l'on calcule l'ensemble voûtes-contreforts comme un bloc. Il faudra alors redresser le parement amont par rapport au parement aval plus que dans le cas de voûtes minces. Du point de vue économique, les deux solutions sont donc assez proches.

Ce sont les circonstances locales qui feront pencher la balance en faveur de l'une ou de l'autre.

Du point de vue statique, la répartition des efforts est moins claire dans le cas de grandes portées que dans le cas de petites portées. En particulier, la réalisation de l'encastrement dans le rocher causera parfois des difficultés.

Mais il y a plus: un ouvrage en béton n'est pas une chose inerte, il vit sa vie propre, il se meut, il s'arc-boute pour résister à une pression; l'un de ses muscles semble-t-il faiblir, il bande les autres pour le soulager; il souffre du froid, de la chaleur, de la soif même, le manque d'eau entrave sa formation ou peut lui causer des blessures dont il périra, le gel peut à la longue le tuer. Il subit toutes les influences du milieu dans lequel il se

trouve. Or, les pauvres moyens d'investigation dont nous disposons ne peuvent pénétrer les lois si complexes de cette existence. Nos calculs sont basés sur des hypothèses simplistes. Ils ne sont que des approximations. Quand nous abandonnons notre ouvrage après des essais de charge satisfaisants, nous ne savons pas quel effort énorme lui sera peut-être, un jour, localement imposé par une modification de ses conditions d'existence, quelle énergie il devra déployer pour s'adapter à des circonstances nouvelles. Lorsqu'on a un enfant faible, on cherche, par l'éducation, à l'aguerrir et à l'armer contre les difficultés que la vie lui prépare. Un ouvrage en béton seul, ou faiblement armé, a une faiblesse de constitution congénitale. S'il peut résister à des efforts de compression élevés, il ne supportera sans fissuration que des efforts de traction très minimes. Or, les variations de température, la chute de température à travers la paroi, le retrait, les différences d'humidification d'une face par rapport à l'autre, causent souvent des efforts de traction dont on n'a pas toujours bien mesuré l'importance et qui sont d'autant plus grands que l'ouvrage est plus massif. Pour remédier à la faiblesse de sa constitution, il faut donner au béton une armature d'acier en rapport avec sa section. On ne pourra le faire, sans nuire à l'économie de l'ouvrage, que si les épaisseurs sont minces et

même très minces. Aussi, ne cachons pas notre préférence pour les voûtes de petite portée que nous proposons d'exécuter en gunite. Ce procédé nous permet en effet de suivre de nos yeux la mise en place du béton, de surveiller sa croissance. Comme une voûte en gunite se fissurera moins facilement qu'une voûte en béton, puisque l'adhérence du fer y est meilleure, nous obtenons bien ainsi, si l'on a soin de rendre la surface de la voûte imperméable, la solution qui convient le mieux aux climats rudes.»

Und aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ergänzt er: «Un barrage à arches multiples est, dans la plupart des cas, une solution très avantageuse. Nous parlons naturellement d'une œuvre sagement conçue, qui ne copie pas les erreurs commises principalement en Amérique, ou les ouvrages sont trop chers, parce que les inclinaisons sont mauvaises et parce qu'ils manquent totalement d'élasticité. Un constructeur américain des plus réputés indique, en effet, qu'avec son système, il réalise une économie de 75 % sur le cube d'un ouvrage gravité. Or nos directives permettent de réduire encore ce cube de 50, en changeant peu au coffrage, et en rendant l'ouvrage beaucoup moins sensible à des variations de température.»²

Es scheint, als habe er für diesen Kontext das geeignete Tragkonzept gewählt und es sogar effizient weiterentwickelt.

Unwiderlegbar ist, dass Sarrasin Erdbebenkräfte nicht berücksichtigte. Bauwerke waren damals noch nicht auf dieselbe zu bemessen; ihre Relevanz wurde schlicht noch nicht erkannt. Die Stabilität der Staumauer wurde heute dennoch nachgewiesen. Dabei mussten keine verstärkenden Massnahmen an der Struktur getroffen werden. – Ein Ausdruck der Robustheit des Tragwerks trotz seiner Schlankheit.

Dicht – und im originalen Bild

40 Jahre nach Inbetriebnahme stellte man erste undichte Stellen fest. Die Bauherrschaft liess die Konstruktion in den Jahren 1965-1966 instandsetzen. Dabei verstärkte man das Querschnittsmass der Gewölbewände von 8-12 cm auf 11-15 cm. Auch von 1990-1991 wurden Instandsetzungsarbeiten ausgeführt. Damals veränderte sich das Aussehen der Staumauer stark. Die gesamte, luftseitige Betonoberfläche wurde mit einer dampfdichten epoxidhaltigen Dünnschicht versehen, die den originalen Charakter des Sichtbetons vollständig verdeckte. Der Anstrich machte 2009 erneut Erhaltungsmaßnahmen erforderlich. Einige Streben, Gewölbe und Scheiben waren beschädigt. Um Zeit für die Planung und Realisierung einer umfassenden Instandsetzung zu gewinnen, liess man sie lokal reprofilieren.

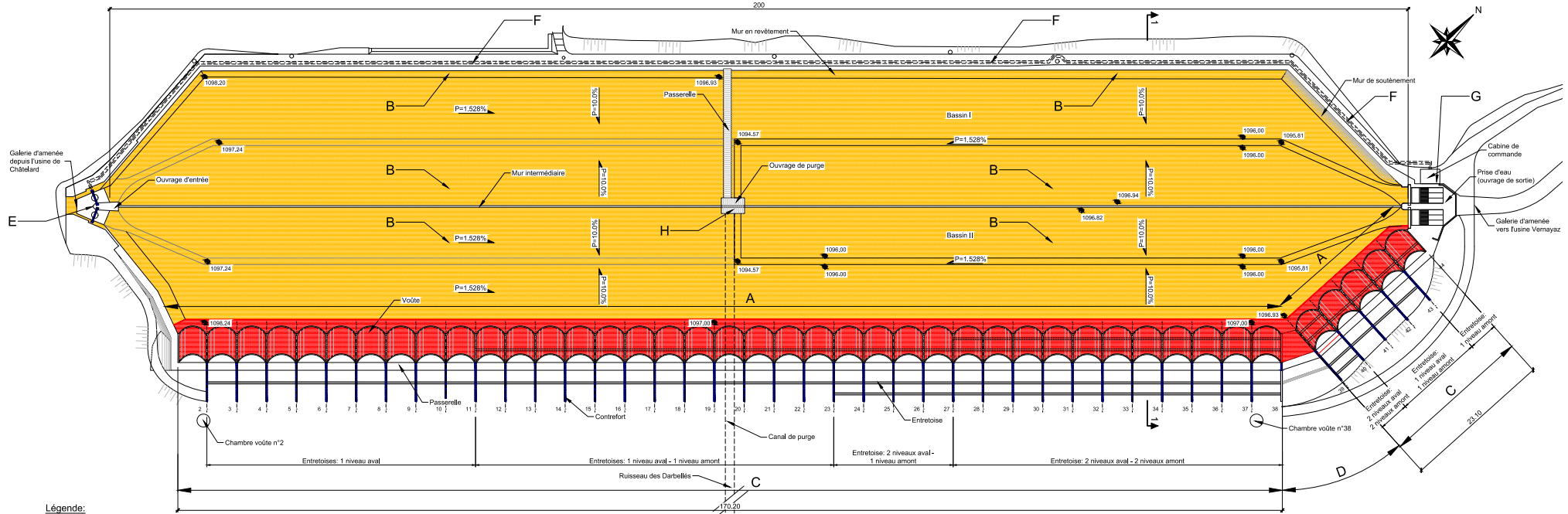


Die Sichtbetonflächen wurden 1991 mit einer Dünnschicht behandelt. Dadurch gingen die Oberflächenbeschaffenheit und die Farbe des originalen Sichtbetons verloren. Ein Fauxpas, denn unter der dichten Epoxihaut war der Beton stellenweise auch feucht, sodass die Bewehrung weiter korrodierte.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)

Situation

(1:300)



Légende:

- A** Intervention sur la face amont du barrage :
 - Hydrodémolition (< 1'000 bar, selon indications fournisseur) de la surface en grunite ;
 - Application d'un revêtement étanche synthétique. Système PP-DAM ou similaire (étanche à l'eau, perméable à la vapeur). Le revêtement couvrira le joint de bétonnage entre les voûtes et le radier ;
 - Revêtement étanche de couleur grise avec texture rugueuse et mate, le plus proche de la couleur de la surface en béton projeté d'origine ;
 - Dans des parties où le radier est posé sur du terrain moule, les parties de voûte sous le niveau du radier seront étanchéifiées par des injections de gel. Une telle intervention est attendue entre les contreforts 13 à 44.
- B** Intervention sur le radier et le mur de revêtement/soutènement :
 - Piquetage des nids de gravier et des zones altérées sur l'ensemble de la surface. Traitement des zones piquées par un mortier de réparation ;
 - Réparations locales et colmatage des fissures avec un produit à la base de bitume.
- C** Intervention exécutée sur la surface aval du barrage :
 - Fissures systématiques, assainissement par injection de résine époxy ;
 - Hydrodémolition "douce" à 750 bar sur la totalité des surfaces. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretoises et passerelle ;
 - Remise en état des zones localisées montrant des dégâts (éclat du béton proche de la surface, zone avec fissuration avancée et délamination) par l'application d'un mortier de reprofilage. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretoises et passerelle ;

- Application d'une imprégnation hydrophobe en profondeur (~4 mm) sur la totalité des surfaces exposées à la pluie. Surfaces concernées : C3, C4, C5 y compris entretoises et passerelle ;
- Optionnel et en fonction de l'aspect présent après l'application de l'imprégnation hydrophobe : Application d'un glacis légèrement recouvrant pour harmoniser la texture et la couleur sur la totalité des surfaces. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretoises et passerelle ;
- Les traitements des surfaces édictées ci-dessus sont effectués aussi sur les surfaces des contreforts jusqu'à une profondeur de 1.5 m sous le niveau du terrain. Surface concernée : C5 ;
- Pour éviter des traces sur les surfaces des contreforts, les eaux de ruissellement sur la passerelle sont évacuées à travers les joints. Des rainures de faible épaisseur sont fraisées sur la dalle de la passerelle.

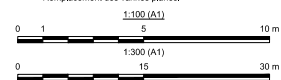
- Zones de degrés d'intervention :
- Degrés 1 : (C3 + C5) - sans dégâts de béton ;
 - Degrés 2 : (C2 + C4) - avec zones localisées montrant des dégâts de béton (éclat du béton proche de la surface, zone avec fissuration avancée et délamination) ;
 - Degrés 3 : (C1) - avec zones étendues montrant des dégâts de béton.

- E** Interventions sur l'ouvrage d'entrée :
 - Réfection du pilier intermédiaire et des ponts de service ;
 - Révision des vannes et renouvellement des joints ;
 - Fourniture et montage de 2 dispositifs de moteur électriques, grenage et crémaillères.

- F** Mise en place de câblage électrique :
 - Réalisation d'une batterie de câbles de protection pour tirage de câbles électriques (alimentation et commande) et de chambres de tirage.

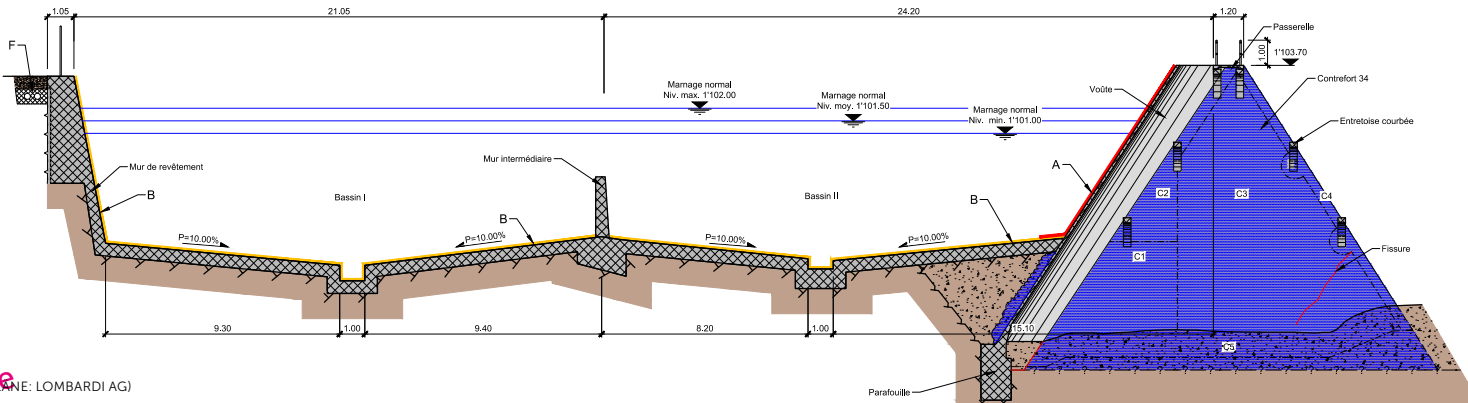
- G** Interventions sur la prise d'eau (ouvrage de sortie) :
 - Révision des vannes et renouvellement des joints ;
 - Travaux de raccordement et adaptations du tableau de commande existant, modification du système de gestion.

- H** Intervention sur l'ouvrage de purge :
 - Remplacement des vannes planes.



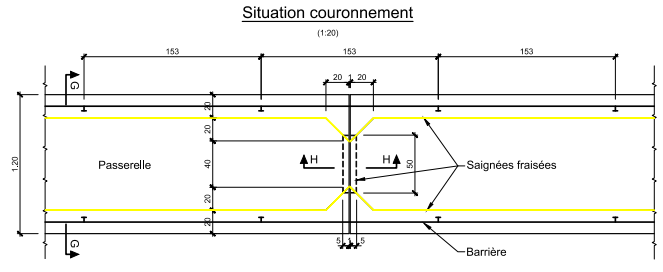
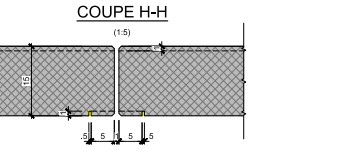
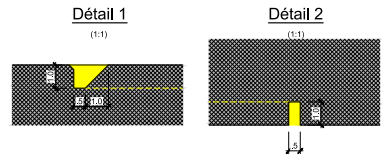
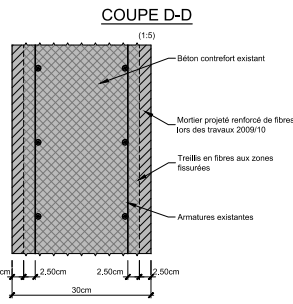
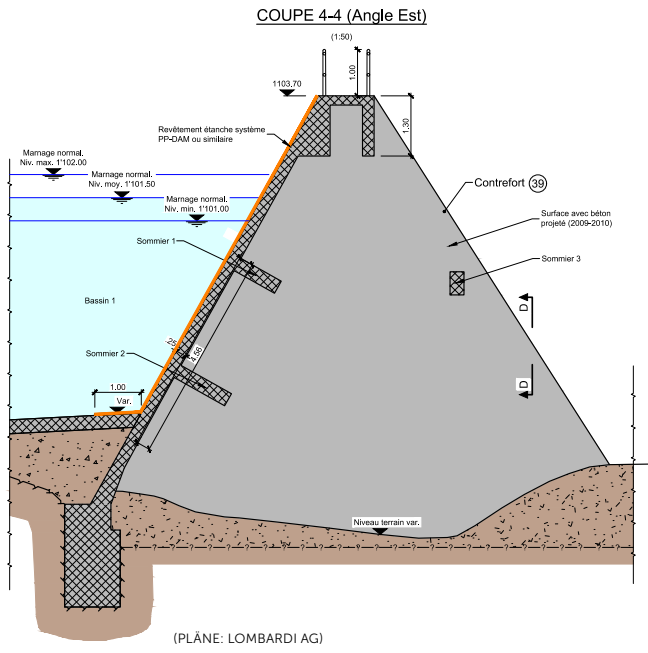
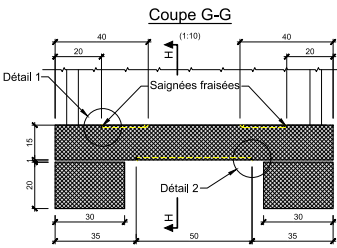
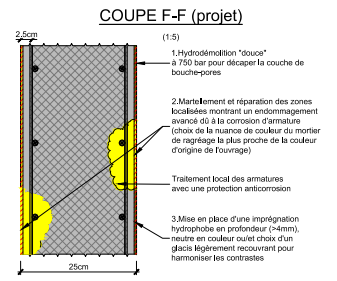
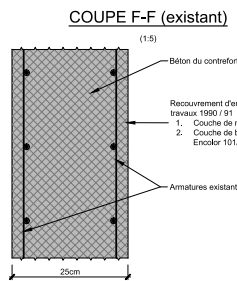
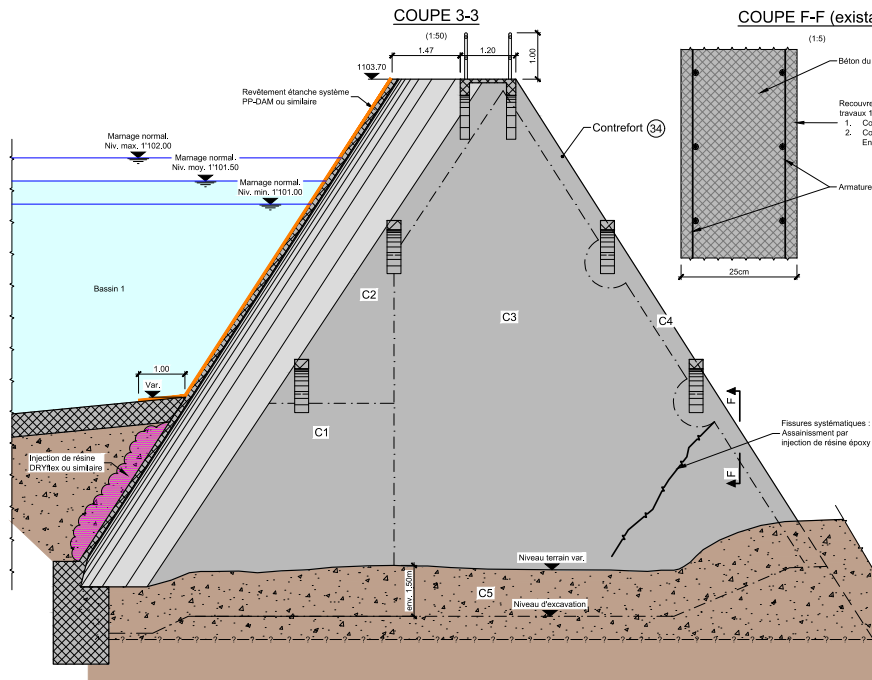
Coupe 1-1

(1:100)



Rechte klären (PLANE: LOMBARDI AG)

Die umfassenden Arbeiten am historischen Bauwerk wurden 2020 durchgeführt. Um diese behutsam anzugehen, zog die SBB den Denkmalschutz und den Experten Prof. Eugen Brühwiler bei. Sie halfen, das Instandsetzungskonzept zusammen mit den Ingenieuren der Lombardi AG zu vervollständigen und zu optimieren. Zuerst wurde die Dünnbeschichtung aus den 1990er-Jahren abgeschliffen. Diese wasserdampfdurchlässige Schicht begünstigte Betonabplatzungen und Korrosionserscheinungen an der vorhandenen Stahlbewehrung. Nach der lokalen Behandlung der beschädigten Zonen und einer Reprofilierung durch einen farblich angepassten Reparaturmörtel wurde die gesamte Beton-



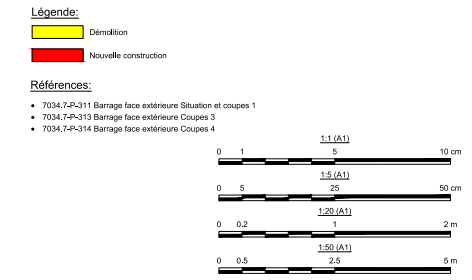
Légende:

Interventions sur la face aval du barrage :

- Fissures systématiques, assainissement par injection de résine époxy
- Hydrodémolition "douce" à 750 bar sur la totalité des surfaces. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretises et passerelle;
- Remise en état des zones localisées montrant des dégâts (état du béton proche de la surface, zone avec fissuration avancée et délaminations) par application d'un mortier de reprofilage. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretises et passerelle;
- Application d'une imprégnation hydrophobe en profondeur (4 mm) sur la totalité des surfaces exposées à la pluie. Surfaces concernées : C3, C4, C5 y compris entretises et passerelle;
- En option et en fonction de l'aspect présent après l'application de l'imprégnation hydrophobe : Application d'un glacis légèrement recouvrant pour harmoniser la texture et la couleur sur la totalité des surfaces. Surfaces concernées : C1, C2, C3, C4, C5 y compris entretises et passerelle;
- Les traitements des surfaces décrites ci-dessus sont effectués aussi sur les surfaces des contreforts jusqu'à une profondeur de 1,5 m sous le niveau du terrain. Surface concernée : C5;
- Dans des parties où le radier est posé sur du terrain meuble, les parties de voûte sous le niveau du radier seront étanchéifiées par des injecteurs de gel. Une telle intervention est attendue entre les contreforts 13 à 44.
- Pour éviter des traces sur les surfaces des contreforts, les eaux de ruissellement sur la passerelle sont évacuées à travers les joints. Des rainures de faible épaisseur sont fraisées sur la dalle de la passerelle.

Zones de degrés d'intervention :

- Degrés 1 : (C3 + C5) - sans dégâts de béton;
- Degrés 2 : (C2 + C4) - avec zones localisées montrant des dégâts de béton (état du béton proche de la surface, zone avec fissuration avancée et délaminations);
- Degrés 3 : (C1) - avec zones étendues montrant des dégâts de béton.



oberfläche durch eine Tiefenimprägnierung auf Basis sehr feiner organischer Partikel (Siloxane / Silane) getränkt. Diese hat die Aufgabe, den Wassereintritt von aussen in den Beton zu unterbinden und so die bestehende Bewehrung vor Korrosion zu schützen. Die wasserseitige Oberfläche der Gewölbreihenstaumauer wurde mit einer synthetischen Schicht auf PUR-Basis abgedichtet, und die beschädigten Stellen auf der Bodenplatte und auf den bergseitigen Stützmauern setzte man lokal instand. Schliesslich wurden auch die Einlasstore modernisiert, die Fugen an den Auslasstoren erneuert und der Grundablass lokal instandgesetzt.



Besuch der Baustelle während der Instandsetzungsarbeiten am 29. September 2020

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)



Die Stauwand des Ausgleichsbeckens während der Instandsetzung (nach Entfernung der Dünnbeschichtung); 29. September 2020.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)



Nachdem die epoxidhaltige Haut abgetragen war, stellte man Schadensbilder infolge Bewehrungskorrosion fest (oben). Sobald die Gewölbeoberfläche mit einem Haftvermittler vorbereitet war (Mitte), trug man die Abdichtungschicht auf PUR-Basis auf (unten).

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)





Das knapp 100-jährige Ausgleichsbecken in Les Marécottes. Es erstrahlt –
2020 instand gestellt – wieder in alter Frische, 9. Mai 2021.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)



Blick in die Bogen-
segmente (links)
und aus den Seg-
menten hinaus
(rechts);
9. Mai 2021.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)



Sichtbeton im Wechselspiel mit der umliegenden Natur: Die filigrane Betonkonstruktion, wie sie heute wieder in nahezu originaler Farbe und Oberflächenbeschaffenheit erscheint; 9. Mai 2021.

(BILD: EUGEN BRÜHWILER)

Mit diesen Instandsetzungs- und Schutzmassnahmen wird die Nutzungsdauer der filigrane Stahlbetonkonstruktion des Ausgleichsbeckens um 80 Jahre verlängert, was der neuen Konzession entspricht. Das historische Bauwerk ist so-

mit nach wie vor Teil einer modernen Energiegewinnungsanlage. Nicht zuletzt ist es aber – überholt und aufgefrischt – auch ein heute noch funktionierender Zeitzeuge der Ingenieurbaukunst aus dem letzten Jahrhundert. Und ein

statisch kreatives, konstruktiv durchdachtes und gestalterisch überzeugendes Betontragwerk noch dazu.

Literatur

- 1 TEC21 22/2002, Eugen Brühwiler und Damien Metry, S.19-24, «Alexandre Sarrasin – Kreativität im Betonbau», Zürich, 2002
- 2 Schweizerische Bauzeitung, A. Sarrasin, Bd. 113, Nr. 19, S.231-235, «Notes sur les barrages à arches multiples», 13. Mai 1939

© Gesellschaft für Ingenieurbaukunst
www.ingbaukunst.ch