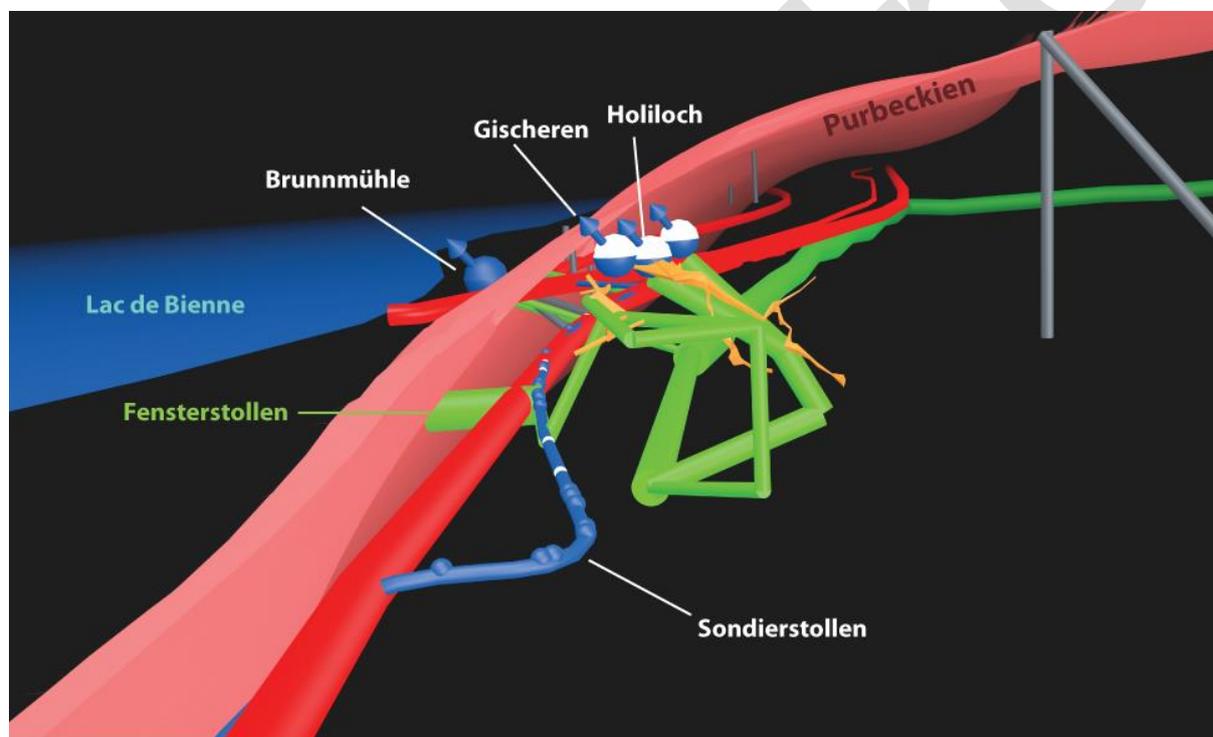


## Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen

Impacts du (et pour le) percement du  
Sicherheitstollen du tunnel de Ligerz



*Conduits karstiques probable (en vert) et tunnels (en rouge)  
dans la région de la source de Brunnmühle*

La Chaux-de-Fonds, le 20 mars 2014

Titre : Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen. Impacts du (et pour le) percement du Sicherheitstollen du tunnel de Ligerz.

Auteurs : Pierre-Yves Jeannin; Demian Rickerl

1ère de couverture : Conduits karstiques probables (en vert) et tunnels (en rouge) dans la région de la source de Brunnmühle

Mandant : Office fédéral des routes (OFROU)

Mots clés : source karstiques, Brunnmühle, aquifères karstiques, modèle hydraulique, Jura bernois, Suisse

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

*ISSKA (2014) – Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié – Mandant : Office fédéral des routes (OFROU), 24 p. + annexes*

# Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen

## Impacts du (et pour le) percement du Sicherheitstollen du tunnel de Ligerz

### Table des matières

1	Introduction et buts.....	1
2	Contexte .....	1
2.1	Quelques mots généraux sur le karst et le système Brunnmühle-Twannbachquellen en particulier .....	1
2.2	Documents .....	2
3	Synthèse des informations .....	3
3.1	Synthèse de toutes les données spatiales .....	3
3.2	Synthèse des données hydrauliques .....	3
3.2.1	Données-clés des sources.....	5
4	Elaboration d'un modèle hydrogéologique.....	8
4.1	Modèle hydraulique du système Brunnmühle – Twannbachquellen.....	8
5	Impact potentiel de la galerie de sécurité (ou du tunnel de Douane).....	13
6	Conclusion .....	16
6.1	Danger lié au chantier du Sicherheitstollen sur la source et le captage (zone S2) .....	16
6.1.1	Quantité d'eau.....	16
6.1.2	Qualité de l'eau .....	17
6.1.3	Risques pour le chantier.....	18
6.2	Recommandations pour le chantier du Sicherheitstollen.....	18
6.2.1	Etudes complémentaires.....	18
6.2.2	Mesures de protection.....	19
6.3	Danger lié au futur chantier du Twanntunnel sur la source et le captage .....	19
6.3.1	Quantité des eaux.....	19
6.3.2	Qualité des eaux .....	19
6.4	Recommandations pour le tunnel de Douane .....	20
6.4.1	Etudes complémentaires.....	20
7	Annexes .....	20

## Liste des figures

Figure 1	Carte synthétique de la situation des sources de la Brunnmühle, des arrivées d'eau dans le Sondierstollen et du tunnel de contournement de Ligerz (Bollinger 2006).....	2
Figure 2	Situation des sources et des cavités du système du Holiloch (Bollinger 2006).....	6
Figure 3	Chronique de l'essai hydraulique du 24-25 avril 1990 (Bollinger 2006).....	7
Figure 4	Topologie du modèle hydraulique du système de sources Brunnmühle-Holiloch. Les paramètres des nœuds et conduits sont donnés au Tableau 1.....	9
Figure 5	Intégration des éléments du modèle hydraulique du réseau karstique dans le modèle 3D du secteur des sources de Brunnmühle-Twannbach. Les conduits verts représentent le réseau karstique supposé; les conduits rouges les tunnels; les forages sont en gris; les boules bleues dans le Sondierstollen représentent les arrivées d'eau (Annexe A).....	10
Figure 6	Chronique des débits dans différentes branches du modèle d'écoulement du système Brunnmühle-Holiloch. Heures 0 à 18 = remplissage du modèle, heures 18 à 45 = essai de février 1990 (crue extrême), heures 45 à 120 = essai d'avril 1990. Les portes du Sondierstollen sont fermées entre 25.5 et 30.5 h, puis entre 85.5 et 120 h. ....	11
Figure 7	Débit dans les différentes branches du modèle aux temps 24.5 h, 26.5 h, 80 h et 100 h. ....	12
Figure 8	Débit à Brunnmühle, Gischeren et fuites du Sondierstollen (link 27, courbe verte). La fermeture des portes n'a aucun effet sur le débit de Brunnmühle. Elle diminue le débit de Gischeren et naturellement augmente notablement le débit des fuites du Sondierstollen (= ensemble des sources annexes se mettant à couler pendant les mises sous pression). ....	13
Figure 9	Chronique des débits des exutoires principaux du système Brunnmühle-Holiloch dans le cas où un tunnel recoupe une galerie de 1 m de diamètre située à 100 m du conduit principal entre le nœud amont et le nœud 21. ....	14
Figure 10	Très forte crue : Conduit de 1 m de diamètre et 100 m de long connecté au conduit principal à l'amont du modèle. Emergence (nœud 8) dans galerie de sécurité. Débit total entrant 11'000 L/s.....	14
Figure 11	Très forte crue : Idem avec un conduit de 2 m de diamètre. 10'600 L/s émergent dans le Sicherheitstollen et les sources de Holiloch, Schüttstein et Gischeren ne sont plus jamais actives. ....	14
Figure 12	Très forte crue : Idem avec un conduit de 1 cm de diamètre. Cette situation correspond à la situation sans recoupement par la galerie de sécurité. ....	15
Figure 13	Crue moyenne : Conduit de 1 m de diamètre et 100 m de long connecté au conduit principal à l'amont du modèle. Emergence (nœud 8) dans galerie de sécurité (débit 2868 L/s). Débit total entrant 3'430 L/s. ....	15
Figure 14	Crue moyenne : Idem avec un conduit de 2 m de diamètre. 3'274 L/s émergent dans le Sicherheitstollen et les sources de Holiloch, Schüttstein et Gischeren ne sont plus jamais actives. ....	15
Figure 15	Crue moyenne : Idem avec un conduit de 1 cm de diamètre. Cette situation correspond à la situation sans recoupement par la galerie de sécurité. Débit d'entrée 3430 L/s. ....	16

## Liste des tableaux

Tableau 1	Caractéristiques des conduits et des nœuds du modèle d'écoulement. ....	9
-----------	---	---

---

# Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen

## Impacts du (et pour le) percement du Sicherheitstollen du tunnel de Ligerz

### 1 Introduction et buts

- Proposer un modèle hydraulique et hydrogéologique centré sur le karst. L'hydrogéologie du delta est moins importante car le captage existant dans le delta sera abandonné au profit du nouveau puits qui se trouve dans le karst.
- Ce modèle doit répondre aux questions suivantes :
  - o Danger lié au chantier du Sicherheitstollen sur la source et le captage (zone S2), proposition de mesures de protection
  - o Danger lié au futur chantier du Twanntunnel sur la source et le captage, proposition de mesures de protection et de monitoring complémentaire
  - o Danger que le karst représente pour le chantier du Sicherheitstollen
  - o Danger que le karst représente pour le chantier du Twanntunnel

Doit inclure la question du tunnel de Twann et pas strictement le périmètre de la Brunnmühlequelle et du Sicherheitstollen. Pour nous c'était relativement évident.

En outre, l'objectif de notre mandat est de faire la synthèse des données existantes, d'en tirer un modèle d'écoulement et de signaler ce qui pourrait/devrait être complété pour améliorer ce modèle en vue du tunnel de Twann.

### 2 Contexte

#### 2.1 Quelques mots généraux sur le karst et le système Brunnmühle-Twannbachquellen en particulier

Les sources karstiques sont par définition des points de débordement/déversement d'un *réseau de conduits karstiques* drainant un massif. Les bassins karstiques drainés sont typiquement d'une taille de quelques km<sup>2</sup> à plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>. Les conduits karstiques forment un réseau de « tuyaux naturels » d'un diamètre décimétrique à pluri-métrique, extrêmement plus perméable que le massif rocheux qui entoure ces conduits.

La plupart des systèmes karstiques présentent des sources pérennes (inférieures) et des sources temporaires (supérieures), ces dernières étant des points de débordement lorsque le système se met en charge, lors de crues. Dans le cas des sources de Brunnmühle-Twannbachquellen, il est assez évident que toutes les sources appartiennent au même réseau de conduits karstiques : la source de Brunnmühle (et les captages) représente l'exutoire pérenne, alors que les sources temporaires de Holiloch, Schüttstein et Gischeren sont les exutoires de trop-plein.

Le bassin des sources du système Brunnmühle-Twannbachquellen a été étudié dans le cadre d'une étude réalisée en 2012 pour le canton de Berne (ISSKA 2012). Les résultats principaux sont donnés en Annexe A. Il en ressort que :

- Le bassin draine environ 66 km<sup>2</sup> sur le flanc de Chasseral.
- L'aquifère karstique principal est celui du Malm.
- Une nappe d'eau souterraine karstique doit exister sous le Plateau de Diesse.
- D'après les modèles géologiques, cette nappe se déverse en direction du Lac de Biene sous la localité de Prêles.
- A partir de ce point de déversement, l'eau rejoint la nappe karstique du pied du Jura et s'écoule vers le Nord-Est en direction de la Brunnmühle, puis des Twannbachquellen.

L'impact d'un tunnel sur les écoulements souterrains dépend donc très directement du lien hydraulique que pourrait avoir le tunnel avec le réseau de conduits karstiques, ainsi que de la topologie même du réseau de conduits (structure et caractéristiques des différentes branches du réseau). Dans la présente étude, nous utilisons donc les données existantes pour estimer la structure et les caractéristiques des différentes branches du réseau karstiques reliant les exutoires connus du système entre-eux, ainsi que les relations avec les galeries artificielles existantes ou futures. L'approche utilise un code de simulation hydraulique des écoulements dans un réseau de conduits. Le code SWMM, développé pour les calculs de réseau de conduites dans les villes est utilisé pour tester différentes hypothèses permettant d'expliquer les observations et mesures effectuées. Le principe fondamental est d'admettre qu'il existe des conduits qui relient les différents exutoires et points d'observation. L'allure de ce réseau de conduit se base sur nos connaissances générales du karst, sur la synthèse des données géologiques et hydrologiques du site et sur une série d'essais de simulation.

La figure 1 donne un aperçu synthétique de la position des tunnels et galeries existants, de la source de Brunnmühle et du Twannbach.

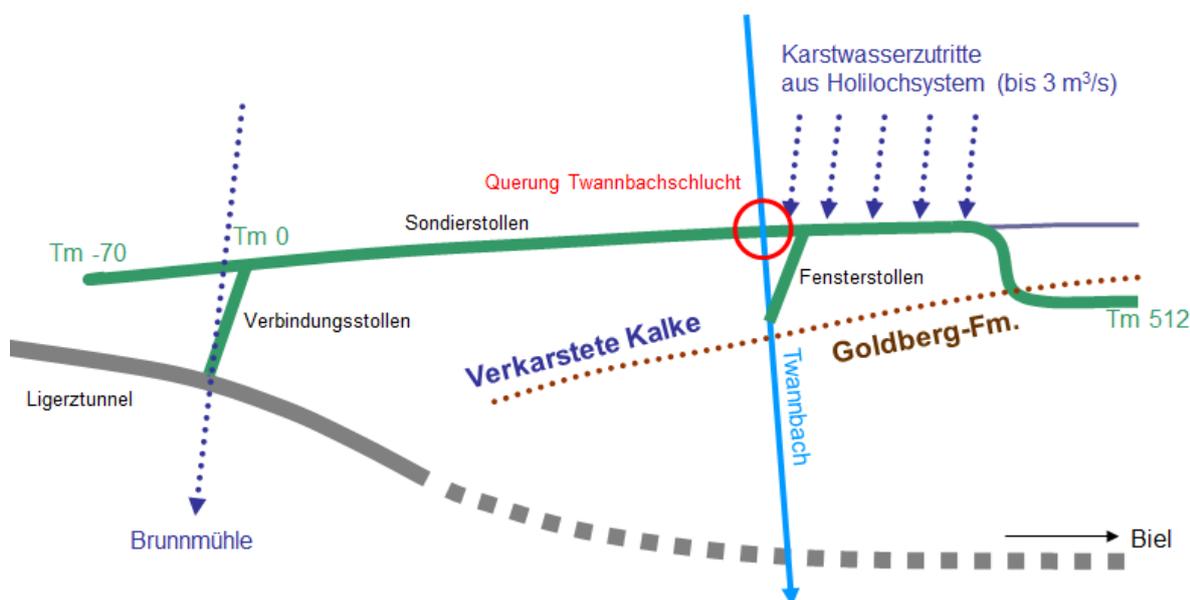


Figure 1 Carte synthétique de la situation des sources de la Brunnmühle, des arrivées d'eau dans le Sondierstollen et du tunnel de contournement de Ligerz (Bollinger 2006).

## 2.2 Documents

La liste complète des documents consultés, numérisés et inclus dans la compilation de données spatiales est fournie en Annexe A.

---

## 3 Synthèse des informations

### 3.1 Synthèse de toutes les données spatiales

Toutes les données géologiques et hydrogéologiques trouvées (rapports, plans-coupes et publications) ont été introduites d'une part dans un système bibliographique et d'autre part dans un système d'information géographique. Une partie de ce travail avait d'ailleurs déjà été réalisé dans le cadre du mandat pour l'AWA en 2012.

Concernant les données spatiales, toutes les coupes (hydro-)géologiques, les cartes géologiques, les données de forages et les sources ont été géoréférencés. Au-delà du simple objectif d'accessibilité aux données, ce référencement est indispensable à la construction des modèles géologiques et hydrogéologiques en 3D.

Un descriptif des données rassemblées est présenté en Annexe A.

A partir de ces données, le modèle géologique réalisé en 2012 pour l'AWA a été retravaillé pour l'ajuster le plus précisément possible à la totalité des informations à notre disposition. Une attention très particulière a été portée sur la position de la base et du toit de l'aquifère du Malm qui déterminent fortement la position probable des écoulements souterrains. Une certaine marge d'incertitude existe quant à la position exacte des toit et base de l'aquifère. Le modèle actuel confirme en principe le modèle de 2012 qui place l'axe principal de drainage de la nappe d'eau du Plateau de Diesse sous la localité de Prêles. Toutefois, l'ensellement visible dans le modèle n'a pas pu être validé formellement par un forage par exemple. Il reste donc hypothétique, mais résulte du modèle qui correspond le mieux aux données disponibles.

Le détail de tous les ouvrages (construits et prévus) a été introduit dans le modèle 3D, ce qui permet de visualiser directement les différents éléments les uns par rapport aux autres.

Il ressort de ce travail spatial que l'axe de drainage principal du système Brunnmühle-Twannbachquellen doit passer sous le tunnel de Ligerz, puis longer celui-ci sur plus d'un kilomètre dans des conduits situés quelques dizaines de mètres en contrebas, sur son côté Sud-Est. Entre la source de Brunnmühle est les sources du Twannbach des conduits traversent le tracé du Sondierstollen.

Toutes les données suivantes ont été placées dans le SIG et le modèle 3D :

- 4 sources principales
- Sondierstollen
- Forages et puits de captage, y.c. ceux de 2012
- Géologie
- Grottes
- Tunnel routier
- Sicherheitstollen
- Fensterstollen
- Levé géologique et hydrogéologique détaillé du Sicherheitstollen
- Tunnel ferroviaire
- Verbindungstollen
- Portes dans Sondier- et Fensterstollen

### 3.2 Synthèse des données hydrauliques

---

Ces données servent de base à la construction d'un modèle hydraulique détaillé de la zone des exutoires, c'est-à-dire depuis 200 m au Sud-Ouest de la Brunnmühle, jusqu'à l'extrémité Nord-Est du Sondierstollen.

Les données sont déjà bien résumées dans l'article de Bollinger & Kellerhals de 2008. Les données des autres rapports ont cependant été consultées et prises en compte systématiquement.

L'article de Bollinger montre que l'aquifère principal est celui du Malm (Untere Twannbachformation – Dolomitzone – Obere Twannbachformation). Il semble que ces trois formations présentent des caractéristiques assez équivalentes pour la formation de conduits, puisque les grottes passent d'une à l'autre. Le positionnement des grottes connues dans le modèle 3D de la géologie met en évidence des horizons particulièrement karstifiés (horizons d'inception).

Le débit minimal du système (totalité des exutoires) est donné à 100 L/s, avec une moyenne vers 500 L/s. Le débit maximal donné est de 15 + 1 m<sup>3</sup>/s. Un exutoire sous-lacustre est mentionné, mais son débit reste inconnu. De nombreux petits exutoires annexes ont été identifiés lors des essais hydrauliques (mise en charge du Sondierstollen par fermeture de portes étanches). Leurs débits ne sont pas indiqués systématiquement, mais sont de l'ordre de quelques L/s. Le débit issu du Verbindungstollen est donné pour les dernières années, mais pas pendant les essais hydrauliques.

La Brunnmühlequelle semble être une source pérenne, ce qui, vu sa position un peu perchée par rapport au lac (435.5 m), indique que les exutoires sous-lacustres doivent être modestes. Les autres exutoires sont actifs en crue :

- Schüttsteinquelle : 477.55 m.a.s.l.
- Holiloch: 477.68 m a.s.l. sonde à 440.6 m
- Gischere: 478.10 m a.s.l., mais sortie supérieure à 482.01 et visiblement la source déborde dès que le niveau d'eau atteint 473.5 m

Petites sources entre 464 et 478.10 m (cf. plan détail Twannbach) + Sauserquellen = 440.70 à 444.11 et 439.98 à 446.46 + petite grotte ( ? ) entre 457.3 et 462.7.

Le Sondierstollen (construit en 1988-1989), a une section de 14 m<sup>2</sup> et avait pour but d'évaluer le massif sur le tracé du futur tunnel de Douane. Un levé détaillé est disponible. Comme la galerie semble suivre un horizon particulièrement karstifié et produisant beaucoup d'eau, il avait été décidé de dévier la galerie vers le sud, pour la placer dans les marnes de Goldberg. Le percement du Sondierstollen et du Fensterstollen a asséché plusieurs sources du pied de la pente calcaire derrière le village de Douane.

Quelques forages donnent des indications de niveau d'eau pouvant indiquer des charges hydrauliques (p.ex. forage RB 7).

Une série d'essais hydrauliques ont été réalisés entre 1989 et 1991 en fermant les portes dans le Sondier- et Fensterstollen. Des mesures de charges hydrauliques et de débits ont été faites lors de ces essais, mais souvent de manière incomplète. Un essai « principal » a été réalisé en avril 1990 et il est décrit dans Bollinger and Kellerhals 2007. Un essai a eu lieu en février 1990 lors de conditions de crue assez extrême. Pour l'essai d'avril 1990 les données suivantes existent (figure 3, voir aussi Bollinger and Kellerhals 2007) :

- Pression aux 3 portes
- Pression dans 2 forages
- Pression dans la grotte du Holiloch
- Pression à la source de Gischere
- Débit (Q) du Twannbach en amont et en aval des sources.

Hélas, nous ne disposons pas d'indication sur le débit de la Brunnmühlequelle pendant ces essais. Il semble simplement qu'aucune variation notable n'y ait été observée.

---

Un résumé des essais hydrauliques est donné dans Annexe C. Nous résumons ici l'essai d'avril 1990, car il nous semble instructif pour comprendre la situation et élaborer le modèle hydraulique.

L'essai a été fait juste après une crue qui a fait déborder le Holiloch. 50 minutes après la fermeture des portes, le Sondierstollen était plein entre les portes A, B et le TM 517. La pression est montée jusqu'à 465.5 m. Simultanément, les sources des falaises ont été réactivées. L'air du Sondierstollen était évacué par le forage RB 7. La mise sous pression du Sondierstollen induit un effet visible mais assez léger sur Gischiere et Holiloch : Entre Twannbach oben et Twannbach unten le débit fourni par les sources varie pendant l'essai : la fermeture entraîne d'abord une baisse du débit qui correspond au volume de stockage dans le Sondierstollen. Progressivement, le débit augmente et atteint un débit plus élevé qu'au début de l'essai (3.5 m<sup>3</sup>/s à la fin contre 3.2 au début !). Un décolmatage semble avoir eu lieu pendant l'essai, induisant de la turbidité et abaissant la charge à Gischeren alors que le débit total du système augmente. Ce décolmatage semble avoir amélioré la connexion hydraulique entre Gischeren et le Sondierstollen (lien visuel possible, mais pas vraiment confirmé par Reto Wagner) Plusieurs sources modestes sont activées dans un rayon de 100 m après quelques heures, en particulier au niveau du portail du tunnel de Ligerz.

La réaction à cette mise en charge hydraulique est plus importante et directe à la source de Gischeren qu'à celle du Holiloch.

On relève encore que lors de la crue majeure de février 1990, la charge au fond du Holiloch a atteint 488 m, soit environ 10 m de plus qu'à l'entrée du Holiloch. Cet écart correspond à la perte de charge entre la sonde et la source (10 m de perte de charge sur environ 50 m de galerie).

Les rapports mentionnent encore qu'au fil des années, toutes les arrivées d'eau recoupées dans le Sondierstollen ont été nettoyées, induisant une augmentation de la perméabilité, donc du débit. Des événements avec de la turbidité et des galets ont été observés pendant les premières années. Le débit aurait été multiplié environ par 5 ! Le processus s'est stabilisé après quelques années. Il est donc probable que Holiloch et Gischeren soient actifs beaucoup moins souvent que par le passé ! Hélas aucune donnée antécédente n'est disponible.

Bollinger postule que le percement du Twanntunnel ne changera plus beaucoup les conditions par rapport à Sondierstollen. Le modèle hydraulique devra nous permettre d'investiguer cette hypothèse.

### **3.2.1 Données-clés des sources**

La figure 2 donne une idée précise de la position des différentes sources le long du Twannbach.

#### **Brunnmühlequelle**

Source pérenne „basale“ de l'aquifère karstique du Malm du flanc sud de Chasseral. La source semble émerger de plusieurs fissures ou petits conduits dans un étang situé à environ 434.5 m.

Q Max. env. 1000 L/s

Q Min. env. 120 L/s (7'000 L/min).

Q Moy. env. 420 L/s (25'000 l/min).

La source est captée pour l'eau potable (Trinkwasserversorgung Ligerz-Twann) par un ancien puits de captage. Deux nouveaux puits ont été forés en 2012. La proportion de débit issu de la source, respectivement des captages n'est pas connue.

Une petite centrale hydroélectrique existe à l'aval de Tosbecken (Figure 2). L'eau est captée dans un bassin à l'aval du Holiloch, à la station de Twannbach oben. L'eau est acheminée par

un conduit jusqu'à un pied de la cascade où elle est turbinée et est rejetée à l'amont de la station de mesure Twannbach unten.

### Holiloch-Twannbachquellen

Sources de trop-plein de la Brunnmühlequelle. Nombreux petits exutoires et trois principaux situés entre 6 et 44 m au-dessus de la Brunnmühlequelle. Trois exutoires principaux = Gischeren, Holiloch et Schuttstein.

Débit Max. 16 m<sup>3</sup>/s

Débit Min. environ 0 L/s.

Débit moyen : inconnu

Heute nicht genutzt

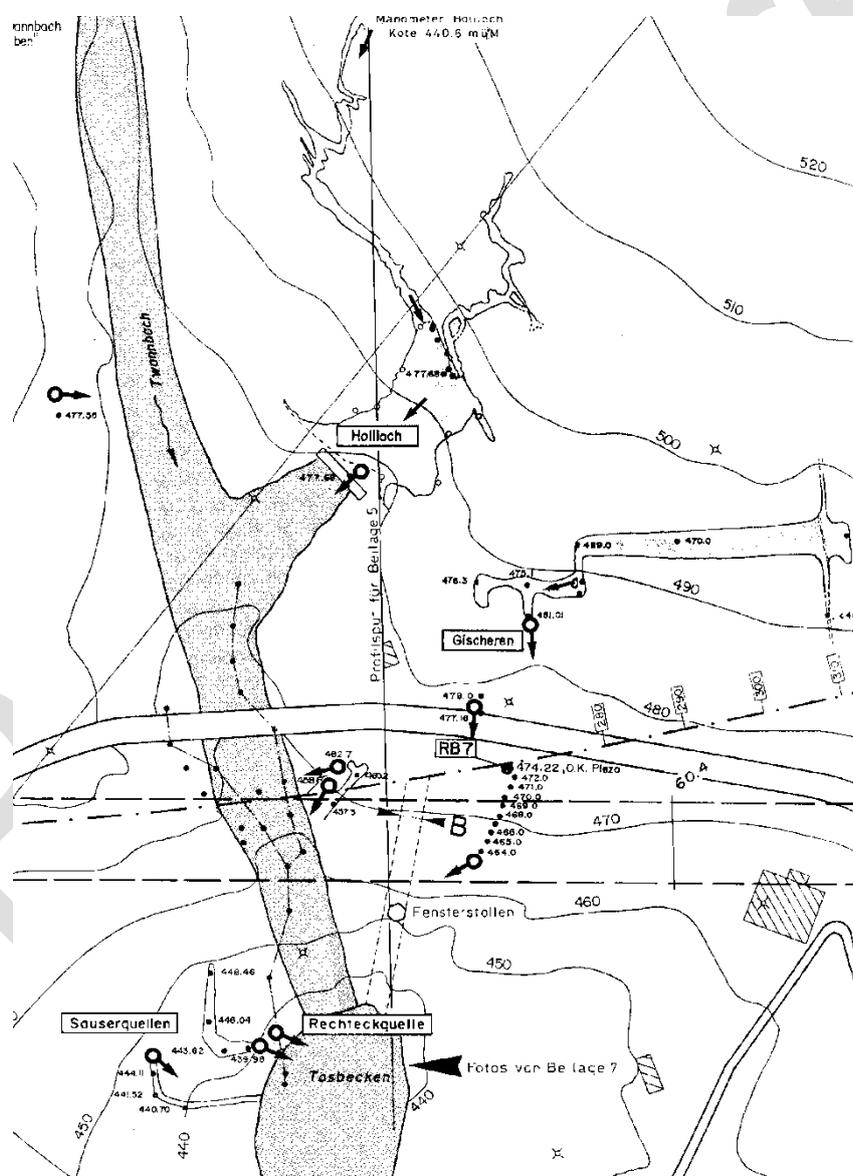


Figure 2 Situation des sources et des cavités du système du Holiloch (Bollinger 2006)

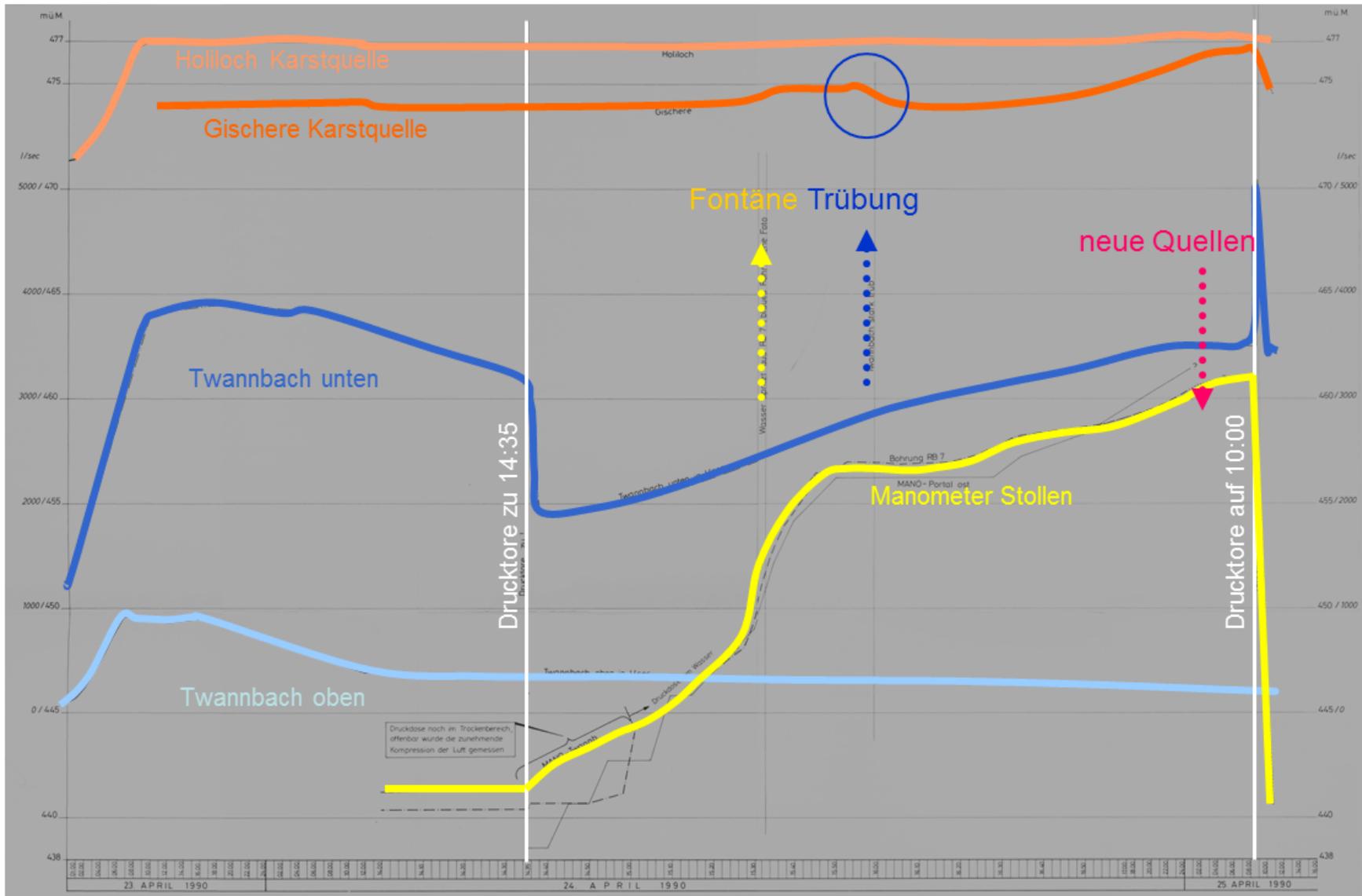


Figure 3 Chronique de l'essai hydraulique du 24-25 avril 1990 (Bollinger 2006)

---

## 4 *Elaboration d'un modèle hydrogéologique*

### 4.1 **Modèle hydraulique du système Brunnmühle – Twannbachquellen**

Les diverses observations existantes ont été synthétisées dans un modèle conceptuel, puis dans un premier modèle hydraulique (cf. Annexe D). C'est fort de cette expérience que le modèle présenté en Figure 4 a été obtenu. Il tient compte de la question de la charge dans le Sondierstollen pendant les essais hydrauliques (cf Annexe D) et simule raisonnablement l'ensemble des essais disponibles, en tenant compte du fait que les données de charges et de débits sont largement incomplètes. Il indique la topologie des relations hydrauliques entre les diverses branches du réseau de conduits. Il implique l'existence d'une « source inconnue » qui by-pass les portes du Sondierstollen, sans ressortir dans le Twannbach. Il pourrait bien s'agir des eaux qui ressortent au niveau de la Brunnmühlequelle. Le modèle simule de manière approximative les débits des différents exutoires. Dans la mesure où aucune mesure précise de chacun des exutoires n'est disponible, seuls les ordres de grandeurs sont visés par le modèle. Une calibration plus précise pourra être effectuée si des mesures réelles sont faites dans le futur. Il n'est pas impossible que d'autres topologies de réseaux de conduits aboutissent à des résultats plus ou moins équivalents.

Après différents essais de calibration, la topologie du modèle présentée en Figure 4 a été obtenue. Elle est basée sur les faits suivants :

- 1) Il est probable, d'après le modèle géologique, que l'eau de la nappe de Diesse descende au bord du lac de Biemme sous le village de Prêles, et donc que le système de sources soit alimenté depuis l'ouest. C'est pourquoi l'amont du modèle est placé à gauche de la Brunnmühle.
- 2) Il est probable que le conduit principal du système soit noyé, donc situé sous le niveau du lac de Biemme, parallèlement au bord du lac (et au tunnel de Ligerz).
- 3) La Brunnmühle représente un exutoire plus récent que ceux des gorges de Douane. Le débit de la Brunnmühle varie relativement peu par rapport au débit des exutoires du Twannbachschlucht (150 à 800 L/s d'après les informations obtenues). Les conduits reliant la Brunnmühle au drain principal du système ne sont pas encore entièrement développés et sont donc de petit diamètre. Cette hypothèse a un sens tant par rapport aux débits observés qu'à la spéléogénèse du réseau de conduits.
- 4) Des sources sous-lacustres sont mentionnées devant la Brunnmühle. Un petit conduit a donc été introduit pour alimenter la « Quelle See ».
- 5) Le Holiloch est nettement la source la plus importante des exutoires du Twannbachschlucht, Schütstein semble réagir très parallèlement à Holiloch.
- 6) La source de Gischeren se met à couler plus tard que Holiloch, bien qu'elle soit située plus bas en altitude.
- 7) Le débit au Fensterstollen est de 800 à 1200 L/s en crue (éventuellement jusqu'à 2000 L/s).
- 8) Des fissures et petits conduits reliant directement Gischeren au Sondierstollen sont indiqués dans certains rapports.
- 9) Lors de la fermeture des portes du Sondierstollen, différentes petites sources se mettent à couler dans le Twannbach pour un débit total estimé à un ordre de grandeur de 50 à 250 L/s.
- 10) Lors de la fermeture des portes du Sondierstollen, la charge hydraulique mesurée dans la galerie et les forages voisins est comprise entre 455 et 462 m, c'est-à-dire nettement inférieure à celle de Gischeren (>473.5 m) et Holiloch (>477.7 m).

De nombreux essais de géométrie du modèle ont été nécessaires pour respecter les 10 points précédents, en particulier le point 10). Pour ce point, la seule solution trouvée a été de placer un exutoire à l'extrémité du Sondierstollen (« Source inconnue »). En effet, pour obtenir une différence de charge de l'ordre de 15 m entre Gischeren et le Sondiertollen lorsque les portes sont fermées, il est obligatoire de créer la perte de charge en faisant couler un débit important entre les deux. Ce débit ne ressortant ni au Fensterstollen, ni aux fuites observées dans le Twannbach, nous pensons qu'il y a une fuite importante ailleurs, à partir du Sondierstollen. Le plus probable est que les deux portes Ouest soient by-passée et que ce débit s'écoule par le Verbindungstollen en direction de la Brunnmühlequelle. Aucune mesure de débit à cet exutoire pendant les essais hydrauliques n'a pu être trouvée.

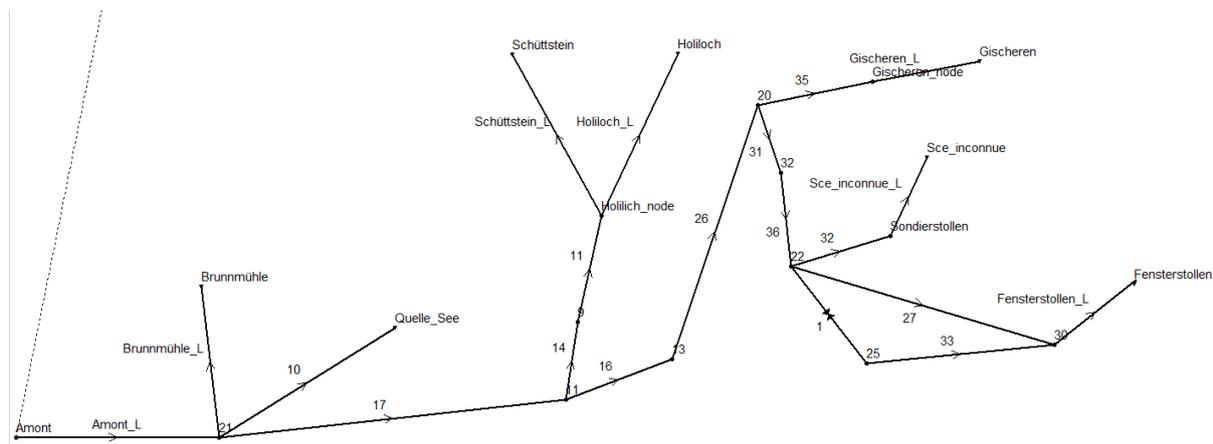


Figure 4 Topologie du modèle hydraulique du système de sources Brunnmühle-Holiloch. Les paramètres des nœuds et conduits sont donnés au Tableau 1

Conduit (Link)	Longueur [m]	Diamètre [m]	Rugosité	Type	Dénivelé [m]	Pente [%]	Nœuds	Altitude [m]	Type
Amont_L	100	5	0.05	circulaire	0	0%	Amont	400	Jonction
17	300	3	0.05	circulaire	10	3%	21	400	Jonction
16	60	0.95	0.05	circulaire	19.5	33%	11	410	Jonction
26	50	0.95	0.05	circulaire	40.5	81%	13	429.5	Jonction
31	100	1	0.05	circulaire	-1	-1%	20	470	Jonction
36	50	0.8	0.05	circulaire	-27	-54%	32	469	Jonction
1		2	0.05	Porte circulaire	-1	-	22	442	Jonction
33	100	3	0.01	circulaire	-0.5	-1%	25	441	Jonction
27	80	0.22	0.01	circulaire	-1.5	-2%	30	440.5	Jonction
Fensterstollen_L	20	3	0.01	circulaire	-0.5	-3%	Fensterstollen	440	Outfall
Brunnmühle	100	0.5	0.05	circulaire	35.5	36%	Brunnmühle	435.5	Outfall
Quelle_see	150	0.25	0.05	circulaire	29	19%	Quelle See	429	Outfall
14	50	2	0.05	circulaire	19.5	39%	9	429.5	Jonction
11	40	2	0.05	circulaire	40	100%	Holiloch_node	450	Jonction
Holiloch_L	60	2	0.05	circulaire	37.68	63%	Holiloch	477.68	Outfall
Schüttstein_L	60	2	0.05	circulaire	37.55	63%	Schüttstein	477.55	Outfall
35	40	0.8	0.05	circulaire	1	3%	Gischeren_node	471	Jonction
Gischeren_L	70	1.3	0.05	circulaire	2.5	4%	Gischeren	473.5	Outfall
32	400	3	0.01	circulaire	6	2%	Sondierstollen	448	Jonction
Source_inconnue_L	100	1	0.05	circulaire	9	9%	Sce_inconnue	457	Outfall

Tableau 1 Caractéristiques des conduits et des nœuds du modèle d'écoulement.

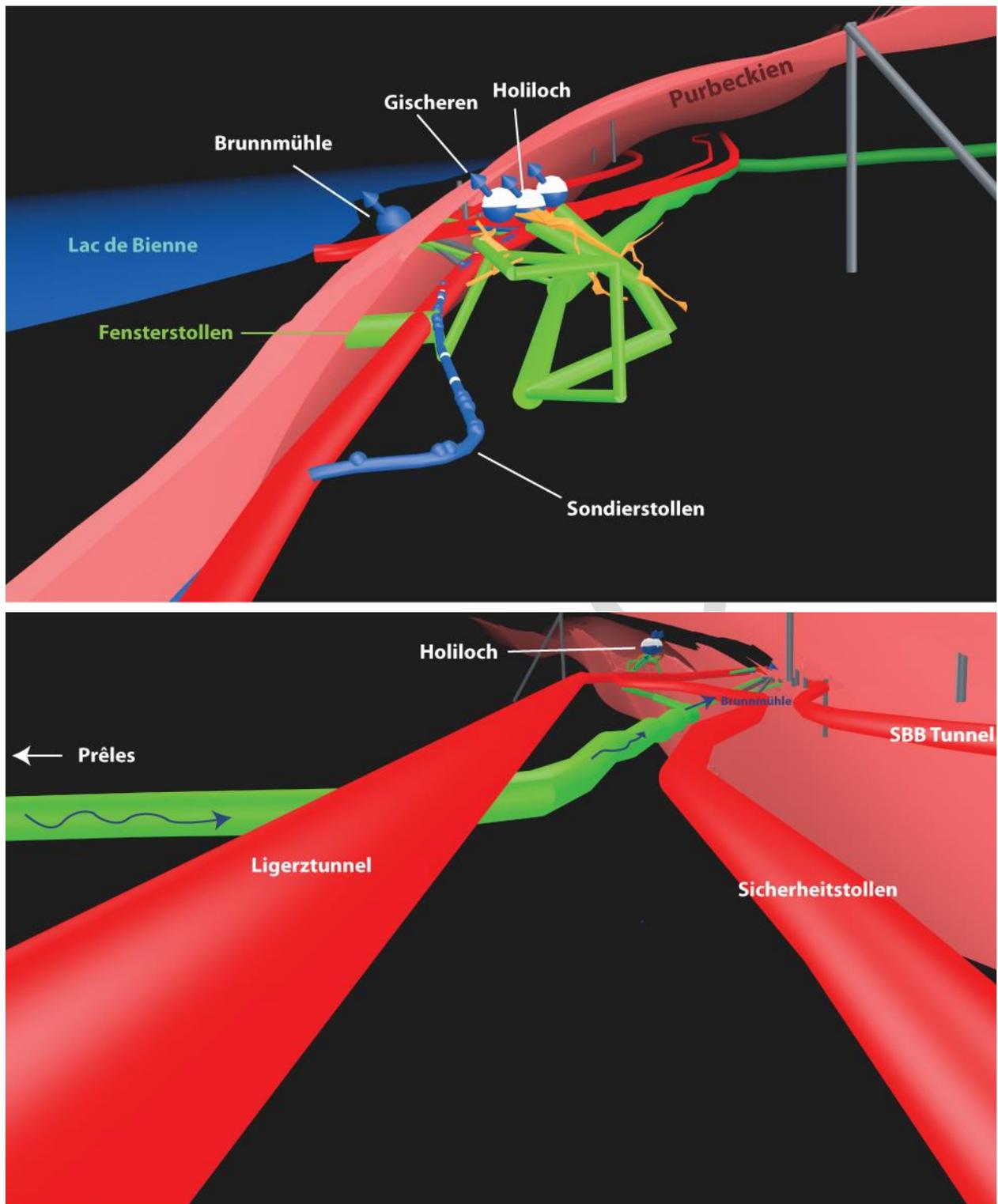


Figure 5 Intégration des éléments du modèle hydraulique du réseau karstique dans le modèle 3D du secteur des sources de Brunnmühle-Twannbach. Les conduits verts représentent le réseau karstique supposé; les conduits rouges les tunnels; les forages sont en gris; les boules bleues dans le Sondierstollen représentent les arrivées d'eau (Annexe A).

Le modèle présenté est basé sur la simulation de deux essais hydrauliques : l'un extrême correspondant à l'essai hydraulique réalisé pendant la crue de février 1990, l'autre, moins extrême réalisé en avril 1990. Cette simulation approche les mesures des autres essais de manière approximativement correcte. Le modèle est généré en estimant la chronique du débit

total entrant dans le modèle pour les deux essais de référence. L'estimation est obtenue en prenant la différence de débit mesurée entre Twannbach Oben et Twannbach Unten, ceci avant (et après) fermeture des portes, à quoi on ajoute le débit estimé à la Brunnmühlequelle. La Figure 6 présente la chronique des débits d'entrée (Amont, en rouge) et les débits calculés des exutoires respectifs. La période de 18 à 45 heures correspond aux conditions de l'essai de février 1990 et celle entre 50 et 120 heures à celles de l'essai d'avril 1990.

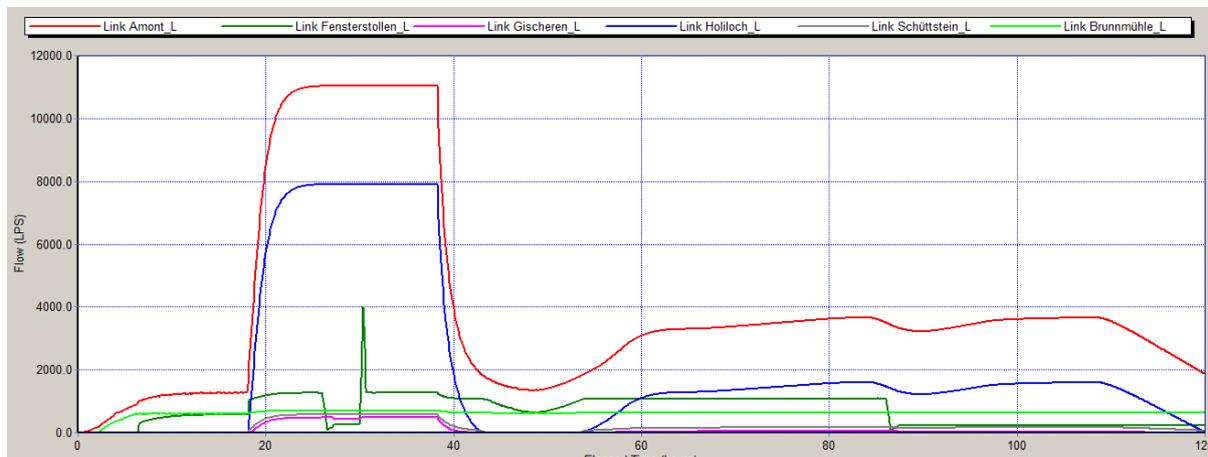
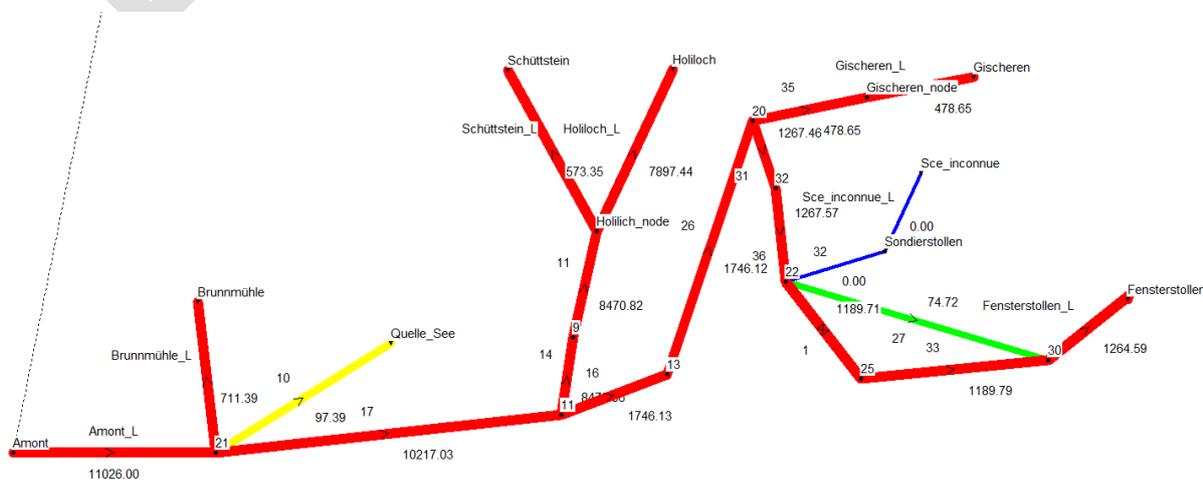


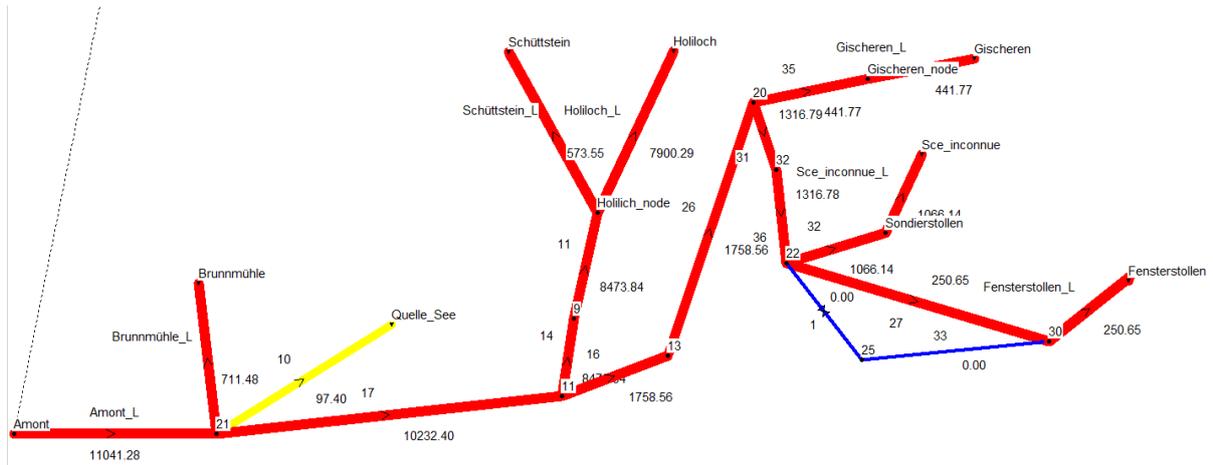
Figure 6 Chronique des débits dans différentes branches du modèle d'écoulement du système Brunnmühle-Holiloch. Heures 0 à 18 = remplissage du modèle, heures 18 à 45 = essai de février 1990 (crue extrême), heures 45 à 120 = essai d'avril 1990. Les portes du Sondierstollen sont fermées entre 25.5 et 30.5 h, puis entre 85.5 et 120 h.

Les débits respectifs sont d'un ordre de grandeur cohérent avec les estimations disponibles : 0 à 8000 L/s au Holiloch, 200 à 1200 L/s au Fensterstollen, 0 à 570 L/s au Schüttstein, 0 à 480 L/s à Gisчерen, 200 à 700 L/s à Brunnmühle. Le débit modélisé à Gisчерen est un peu bas, mais du bon ordre de grandeur par rapport aux observations.

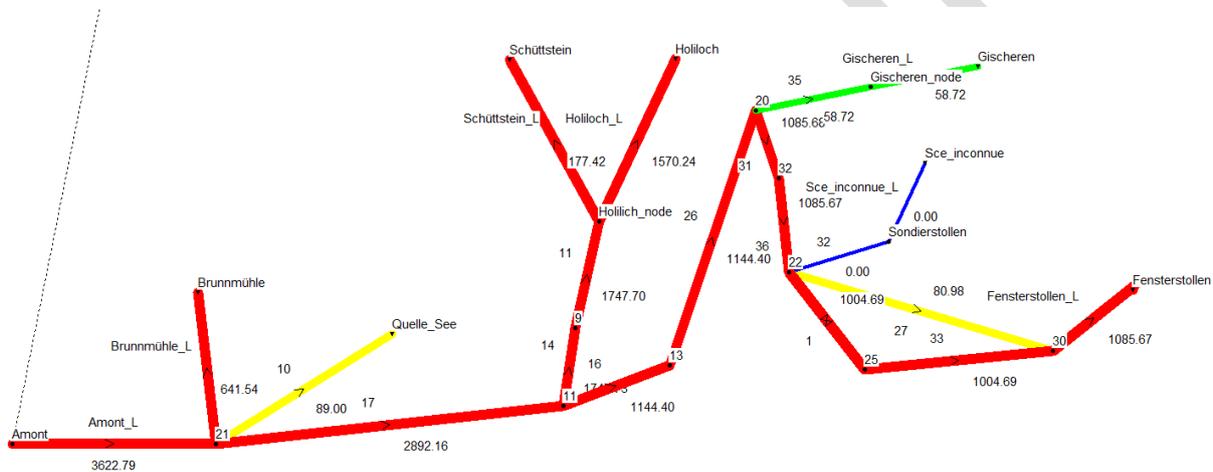
La Figure 7 indique les débits dans les différentes branches du modèle pour une crue extrême (février 1990) et une crue modérée (avril 1990), ainsi que l'effet de la fermeture des portes. La Figure 8 présente un zoom des courbes de Brunnmühle, Gisчерen et Sondierstollen (link 27) pour les mêmes crues. On relève que la fermeture des portes (débit de 250 L/s au link 27) n'a aucun effet visible sur le débit de la Brunnmühle. A Gisчерe (courbe verte), la réaction est particulière puisque le débit augmente pendant la mise en charge du Sondierstollen, puis descend à une valeur inférieure à celle précédant la fermeture des portes pendant toute la durée de mise en pression. Cette baisse de débit résulte d'une répartition nouvelle des charges dans tout le modèle qui abaisse légèrement la charge au nœud 20 et donc diminue le débit à Gisчерen.



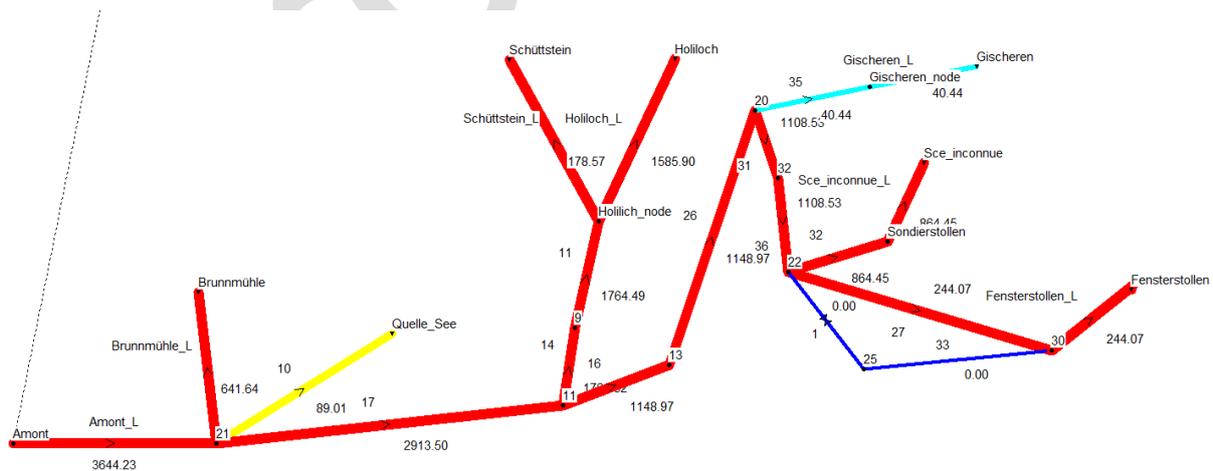
24.5 heures, crue extrême portes ouvertes



26.5 heures, crue extrême portes fermées



80 heures, crue modérée portes ouvertes



100 heures, crue modérée portes fermées

Figure 7 Débit dans les différentes branches du modèle aux temps 24.5 h, 26.5 h, 80 h et 100 h.

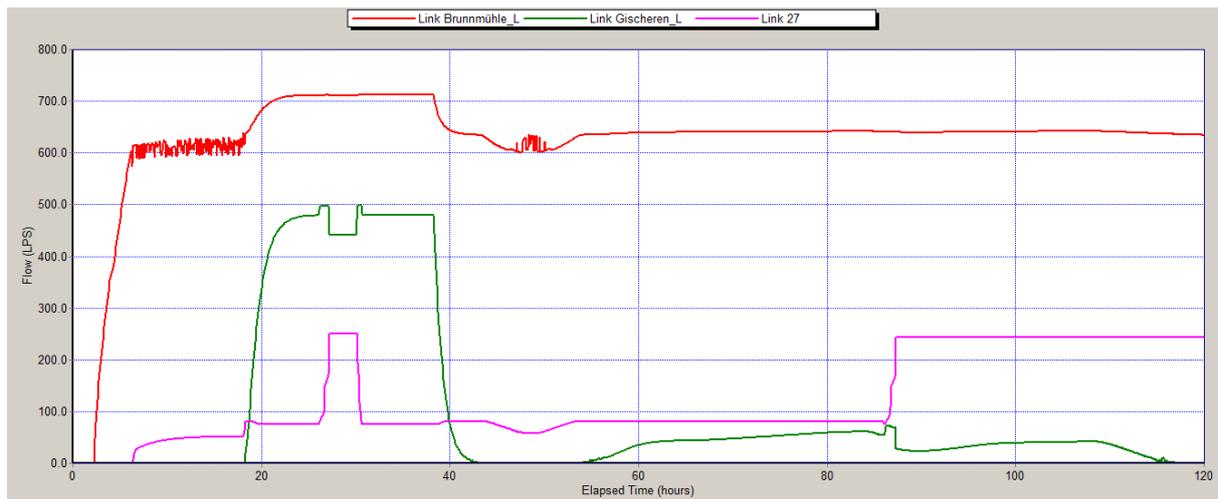


Figure 8 Débit à Brunnmühle, Gischeren et fuites du Sondierstollen (link 27, courbe verte). La fermeture des portes n'a aucun effet sur le débit de Brunnmühle. Elle diminue le débit de Gischeren et naturellement augmente notablement le débit des fuites du Sondierstollen (= ensemble des sources annexes se mettant à couler pendant les mises sous pression).

## 5 Impact potentiel de la galerie de sécurité (ou du tunnel de Douane)

Vu le côté incomplet des données disponibles, la calibration du modèle est approximative, entachée d'incertitudes importantes et basées sur certaines hypothèses qui ne sont que partiellement validées par des données. Le modèle simule cependant des charges et des débits qui dans l'ensemble correspondent à notre compréhension actuelle du système.

L'impact potentiel de la galerie de sécurité est donc évalué en regardant l'effet d'un recoupement par la galerie des différentes branches du réseau karstique. Quatre cas sont examinés dans un premier temps.

Deux cas ont été simulés : 1) recoupement d'un conduit de 1 m de diamètre à 100 m du conduit principal ; 2) recoupement d'un conduit de 2 m de diamètre à 100 m du conduit principal.

Les Figure 9 et Figure 10 indiquent l'effet calculé par le modèle pour différentes crues. Ces figures doivent être comparées aux Figure 6 Figure 7. Dans ces scénarii, le débit de la Brunnmühle est diminué d'environ 20%, sauf en période de moyennes eaux (40 à 60 h) où il est divisé par deux. L'effet est en outre majeur sur les sources de Holiloch et Gischeren qui ne sont alors actives que lors de crues exceptionnelles.

Si le conduit recoupé fait 2 m de diamètre, alors la quasi-totalité de l'écoulement du système utiliserait ce conduit. Le débit de la Brunnmühle est divisé par 10 en basse et moyennes eaux (50 à 70 L/s) et par 3 en très hautes eaux (280 L/s). L'altitude du point de déversement hypothétique dans le tunnel joue un rôle important. Dans le modèle il a été admis à 436 m. En plaçant l'exutoire à 442 m ou même à 450 m, les effets sont légèrement amoindris mais restent majeurs.

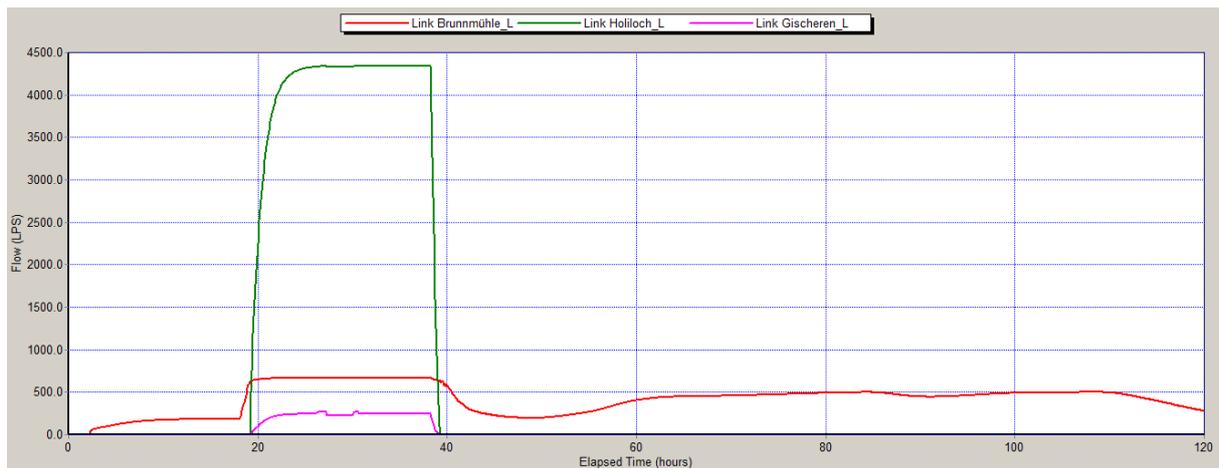


Figure 9 Chronique des débits des exutoires principaux du système Brunnmühle-Holiloch dans le cas où un tunnel recoupe une galerie de 1 m de diamètre située à 100 m du conduit principal entre le nœud amont et le nœud 21.

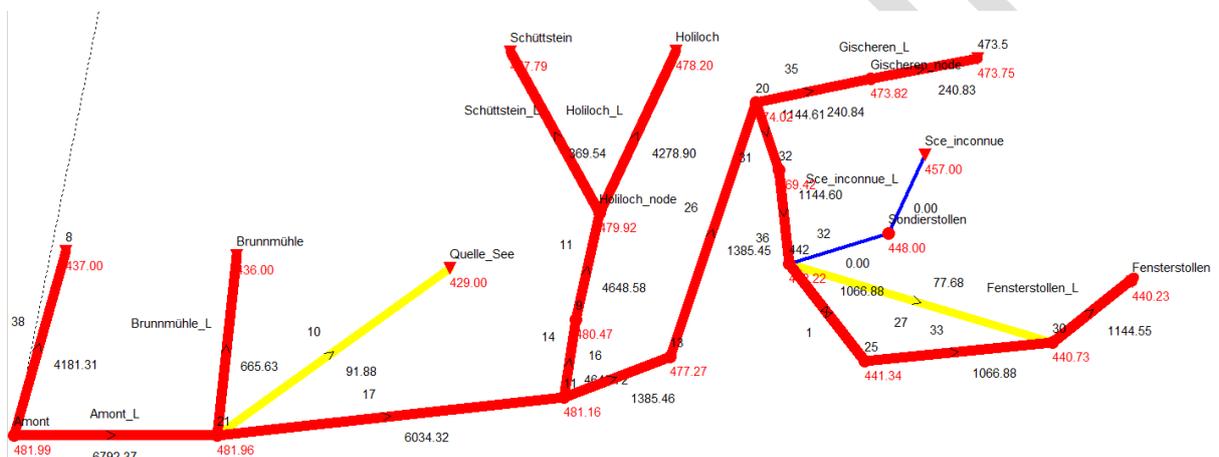


Figure 10 Très forte crue : Conduit de 1 m de diamètre et 100 m de long connecté au conduit principal à l'amont du modèle. Emergence (nœud 8) dans galerie de sécurité. Débit total entrant 11'000 L/s.

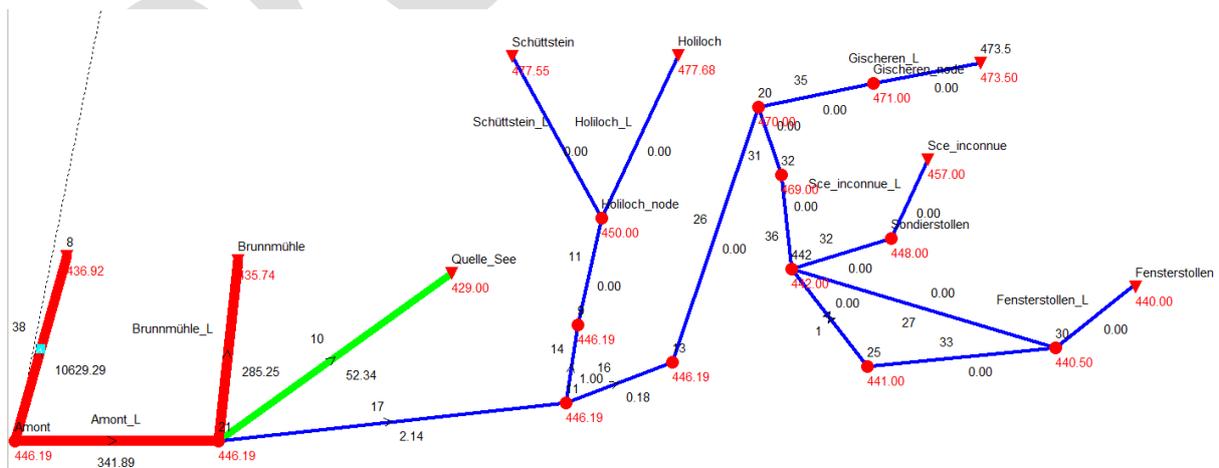


Figure 11 Très forte crue : Idem avec un conduit de 2 m de diamètre. 10'600 L/s émergent dans la Sicherheitstollen et les sources de Holiloch, Schüttstein et Gischeren ne sont plus jamais actives.

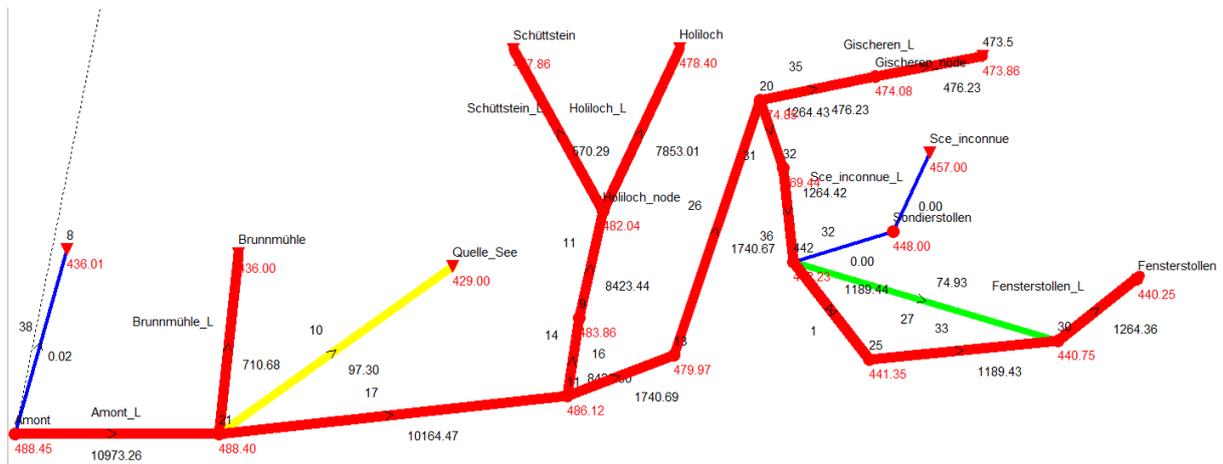


Figure 12 Très forte crue : Idem avec un conduit de 1 cm de diamètre. Cette situation correspond à la situation sans recoupement par la galerie de sécurité.

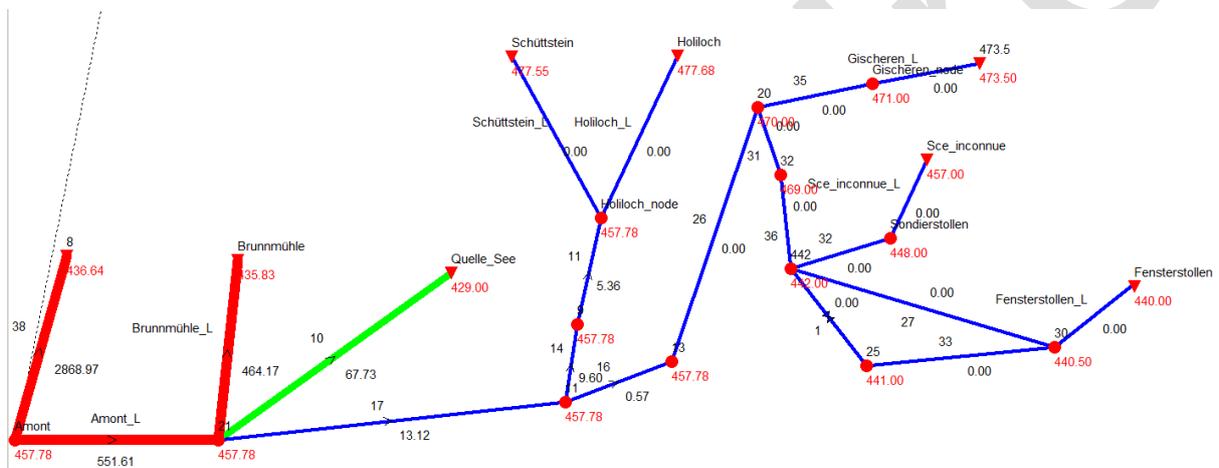


Figure 13 Crue moyenne : Conduit de 1 m de diamètre et 100 m de long connecté au conduit principal à l'amont du modèle. Emergence (nœud 8) dans galerie de sécurité (débit 2868 L/s). Débit total entrant 3'430 L/s.

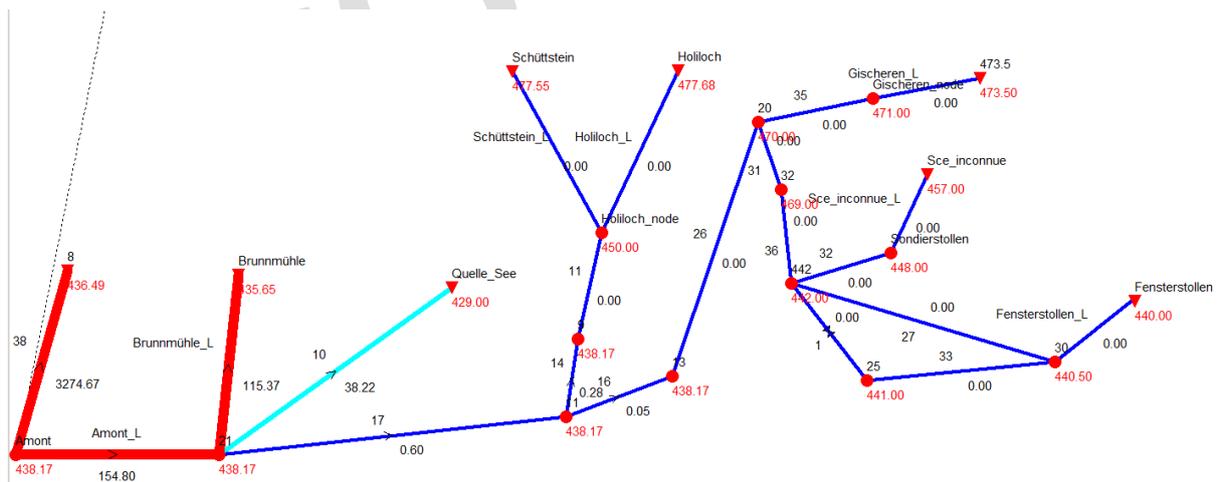


Figure 14 Crue moyenne : Idem avec un conduit de 2 m de diamètre. 3'274 L/s émergent dans la Sicherheitstollen et les sources de Holloloch, Schüttstein et Gischeren ne sont plus jamais actives.



Figure 15 *Crue moyenne : Idem avec un conduit de 1 cm de diamètre. Cette situation correspond à la situation sans recoupement par la galerie de sécurité. Débit d'entrée 3430 L/s.*

D'autres configurations de recoupement ont été simulées. Si le recoupement se produit plus en aval, au niveau du nœud 9 (toujours via un conduit de 100 m de long avec un exutoire à 436 m) alors l'effet est toujours presque le même que dans les deux scénarii précédents. Si le recoupement intervient au niveau de la branche de Gischeren (nœud 13), l'effet est toujours semblable, bien qu'un peu moindre. L'effet devient par contre négligeable si le recoupement intervient en aval du nœud 20.

## 6 Conclusion

Les données disponibles permettent de construire un modèle qui approche la topologie et les caractéristiques hydrauliques principales du réseau de conduits alimentant les sources de Brunnmühle, Holliloch et Gischeren. Ce modèle reste qualitatif dans la mesure où les données acquises sont incomplètes (p.ex. le débit respectif des différents exutoires n'est pas connu, ni le moment précis de leur entrée en activité lors d'une crue). Toutefois le modèle reproduit qualitativement les observations et mesures existantes et permet de comprendre le fonctionnement de ce système. Il permet aussi d'évaluer qualitativement l'effet d'un potentiel recoupement de conduits karstiques par la galerie de sécurité du tunnel de Ligerz, ou par le futur tunnel de Douane.

Ce modèle permet d'évaluer l'effet d'un recoupement éventuel d'un conduit karstique par la galerie de sécurité du tunnel de Ligerz. Cet effet est majeur, avec des débits potentiels de plusieurs m<sup>3</sup>/s pouvant inonder le Sicherheitstollen. Les paragraphes suivants décrivent de manière plus précise les dangers identifiés.

### 6.1 Danger lié au chantier du Sicherheitstollen sur la source et le captage (zone S2)

#### 6.1.1 Quantité d'eau

Il ressort des simulations hydrauliques que le recoupement d'un conduit karstique de taille moyenne (1 à 2 m de diamètre) par la galerie de sécurité induirait un impact majeur sur les débits des tous les exutoires du système. La diminution du débit de la Brunnmühle serait en gros d'un facteur 2 ou plus. Les autres exutoires seraient très fortement altérés (l'activité des sources se limiterait à quelques jours par an, lors de crues majeures uniquement). Enfin, le

---

débit dans la galerie de sécurité serait alors considérable (fréquemment plus de 5 m<sup>3</sup>/s). D'après le modèle, la charge hydraulique dans le drain karstique est souvent (moyennes et hautes eaux) plus élevée que la cote du Sicherheitstollen. Les charges dépassent 480 m et pourraient atteindre 490 ou 500 m. En basses eaux, le Sicherheitstollen est situé plus haut que la nappe karstique alimentant la Brunnmühlequelle : la galerie est alors infiltrante.

Le cadre hydrogéologique indique que le drain principal du réseau karstique est probablement parallèle au tunnel de Ligerz sur une longueur de 800 à 1500 m. La position précise du drain karstique n'est pas connue, mais doit se trouver dans la partie supérieure de la série des calcaires du Malm. D'après la position des sources et des grottes dans cette région, les couches supérieures du Malm (30 à 50 m) présentent trois horizons d'inception stratigraphiques marqués. Le tracé de la galerie de sécurité est prévu au Sud-Est du tunnel, c'est-à-dire dans la partie supérieure de l'aquifère du Malm. De plus, l'ouvrage recoupera au moins deux accidents transversaux susceptibles aussi d'être des structures d'inception (particulièrement karstifiées). Le conduit principal alimentant les sources se trouve en principe plus bas que le tunnel, mais il est très probable que des conduits supérieurs (zone épiphréatiques) se soient développés à des altitudes comprises entre 430 et 480 m (comme l'atteste la présence de sources et de grottes), voire plus haut. Vu ce contexte (horizons d'inception probablement traversés par le Sicherheitstollen), la probabilité de recouper un conduit actif le long du Sicherheitstollen est donc élevée.

Les données du pompage dans le puits de captage BR1/12 de la Brunnmühle (essai de fin 2012) ont pu être reproduites par le modèle en connectant le puits aux conduits alimentant la Brunnmühle par un conduit unique de 20 cm de diamètre et de 20 m de long (équivalent d'une fissure de quelques centimètres d'ouverture). Le puits de captage est donc connecté au réseau karstique principal du système de façon similaire à la source elle-même.

### **6.1.2 Qualité de l'eau**

Du point de vue de la qualité des eaux, deux conditions sont nécessaires pour que le captage soit menacé : 1) le recoupement (chantier) se trouve en amont hydraulique de la Brunnmühle ; 2) le recoupement (chantier) se trouve dans une zone infiltrante de la galerie.

Concernant la condition 1, la position de l'amont hydraulique du système de la source de Brunnmühle n'est pas clairement établie. Sur la base du modèle géologique, l'amont est admis à l'ouest de la source. La galerie de sécurité serait donc située dans la zone immédiatement à l'amont de la source et des captages de Brunnmühle. Toutefois, des données complémentaires seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse, car il n'est pas totalement exclu que l'amont se trouve sous le Twannbachschlucht ou même à l'Est de cette gorge.

Concernant la condition 2, il est presque certain qu'en hautes eaux la galerie de sécurité se trouve en zone exfiltrante, raison pour laquelle des venues d'eau importantes pourraient entrer dans la galerie. En basses eaux, les charges aux captages de Brunnmühle sont proches de 435.5 m, ce qui se situe légèrement plus bas que le radier prévu du Sicherheitstollen (440 à 453 m). Celui-ci se trouverait donc en zone infiltrante en basses eaux.

Il en ressort que le chantier du Sicherheitstollen se situera au moins temporairement (basses eaux) dans une zone extrêmement sensible pour la qualité des eaux des sources et captages de Brunnmühle. Ce danger est extrême si la galerie recoupe des conduits karstiques, même de petite taille, ce qui est très probable. Toute infiltration éventuelle aboutirait à la source dans un délai de quelques heures à quelques jours (si l'infiltration est moins directe). Le risque est donc majeur que de la turbidité atteigne la source et les captages. Tout produit polluant s'infiltrant dans le tunnel aboutirait aux captages dans un délai bref.

Il n'est toutefois pas totalement exclu que la charge dans le conduit soit en permanence plus élevée que l'ouvrage.

---

Des observations et mesures (en basses eaux) dans les galeries existantes permettraient assez facilement de tester la question des charges le réseau karstique par rapport à la cote du Sicherheitstollen. Des données du tunnel existant, éventuellement un ou deux nouveaux forages pourraient préciser ce point.

En résumé, la connexion entre le conduit alimentant la Brunnmühle et les nouveaux puits de captage semble très directe et n'offre aucune protection concernant la qualité des eaux.

### **6.1.3 Risques pour le chantier**

Vu la position de la galerie près du sommet de la série calcaire du Malm (3 horizons d'inception stratigraphiques identifiés) il existe une probabilité élevée de recoupement de conduits karstiques d'un diamètre supérieur à 0.5 m dans les 1.6 km Nord-Ouest du Sicherheitstollen.

Une étude KarstALEA permettrait de préciser la position, l'ampleur et la nature de ce danger.

Les scénarii calculés avec le modèle hydraulique indiquent que, pour des crues importantes, le débit serait de plus de 500 L/s avec un conduit de 0.5 m de diamètre et dépasserait notablement les 5000 L/s avec un diamètre de 2 m de diamètre. En hautes eaux, le modèle prédit une charge d'au-moins 3 à 4 bars dans les conduits potentiellement recoupés, pouvant générer des débits initiaux supérieurs à 10 m<sup>3</sup>/s. Nous conseillons donc vivement de prendre la problématique de ces recoupements très au sérieux, car des vies humaines sont ici en jeu.

## **6.2 Recommandations pour le chantier du Sicherheitstollen**

### **6.2.1 Etudes complémentaires**

En fonction des données rassemblées pour la présente étude, la probabilité est élevée que la galerie de sécurité recoupe un conduit karstique et induise un impact majeur sur les sources de Brunnmühle et Holiloch.

La position de l'amont hydraulique du système karstique joue un rôle-clé dans l'évaluation des dangers identifiés dans cette étude. Dans l'hypothèse où l'amont du système ne serait pas à l'ouest de la Brunnmühle, mais au Nord-Est, les dangers évoqués précédemment seraient alors fortement réduits par rapport au Sicherheitstollen. Ils augmenteraient cependant par rapport au percement futur du tunnel de Douane ! Il convient donc dans tous les cas de situer aussi bien que possible cette position.

La première étape serait d'évaluer plus précisément avec le géologue de l'ouvrage toutes les données encore éventuellement disponibles pour situer la position de l'amont avec plus de certitude. Un tel complément d'étude est réalisable dans un délai court (moins de 1 mois).

La deuxième étape serait de valider par une preuve formelle la position de l'amont hydraulique. Ceci pourrait nécessiter un forage, de nouveaux essais hydrauliques et surtout un monitoring complet des charges hydrauliques dans les cavités de Gischeren et Holiloch, ainsi qu'en différents endroits du Sicherheitstollen et éventuellement du Verbindungstollen. En effet, les charges hydrauliques sont des indicateurs fiables des relations amont-aval. L'instrumentation pourrait être mise en place dans un délai court et pourrait profiter des événements de crue du printemps. Il faudra toutefois quelques semaines pour la mise en place et l'acquisition de données utiles. Il est envisageable de disposer de données d'ici à fin mai.

Une troisième étape serait d'améliorer le modèle hydraulique. Pour y parvenir, il faut, en plus des charges hydrauliques, mesurer les débits en continu au Fensterstollen, Gischeren, Holiloch, Schüttstein, Verbindungstollen, Brunnmühle (captages et source), et obtenir un aperçu semi-quantitatif des sources annexes et des sorties d'eau dans les galeries respectives. Ce travail devrait se faire en parallèle à l'étape 2.

---

Parallèlement, s'il est décidé de mieux caractériser le danger karstique, il conviendrait d'appliquer la méthode KarstALEA sur le Sicherheitstollen pour mieux situer les zones particulièrement critiques.

Le degré de connexion hydraulique entre le conduit principal du réseau karstique et la source, respectivement les puits de captage de Brunnmühle semble très direct, mais pourrait être investigué plus en détail. Une preuve ultime serait obtenue par un essai de traçage à réaliser pendant un essai de pompage dans le puits de captage.

### **6.2.2 Mesures de protection**

En l'absence d'études complémentaires le tronçon de 1.6 km du Nord-Est du Sicherheitstollen doit être entièrement considéré comme situé dans une zone à très haut danger pour les captages de Brunnmühle et pour le chantier. Les mesures à prendre doivent absolument limiter toute infiltration d'eau boueuse ou polluée. La solution la plus fiable consisterait à ne travailler que pendant les mois où la charge du réseau karstique est supérieure à la cote de la zone de chantier. Le problème est qu'actuellement cette charge n'est ni connue, ni mesurable !

Les mesures de protection doivent aussi permettre de gérer le cas d'une arrivée massive (plusieurs m<sup>3</sup>/s) d'eau dans la galerie. L'impact sur les sources de Brunnmühle-Twannbachschlucht risque d'être irréversible.

## **6.3 Danger lié au futur chantier du Twanntunnel sur la source et le captage**

### **6.3.1 Quantité des eaux**

Si on admet que l'amont du système de conduits se trouve effectivement à l'Ouest de la Brunnmühle et que le percement de la Sicherheitstollen n'aurait (par chance) pas les effets décrits ci-dessus, alors le seuil hydraulique (nœud 20) du modèle est l'élément-clé concernant l'impact sur toutes les sources (y.c. le captage de Brunnmühle). En effet, ce seuil agit comme un barrage souterrain qui retient les eaux dans un réservoir souterrain dont l'exutoire inférieur est la Brunnmühle. Le Sondierstollen a déjà probablement altéré l'étanchéité et le niveau de ce seuil, mais sans conséquence trop majeure (impact surtout limité à la source de Gischeren en hautes eaux). Toute altération complémentaire diminuerait la capacité de ce réservoir et augmenterait le débit actuellement observé dans le Sondierstollen/futur tunnel de Douane. Or le risque d'altération de ce seuil est très élevé, puisqu'il est déjà établi que le futur tunnel passerait dans une zone très riche en conduits, comme l'a montré le Sondierstollen.

Si l'amont hydraulique du modèle se situe sous le Twannbachschlucht ou plus à l'Est, le percement du tunnel de Douane sera globalement dans une zone très critique.

Si le Sicherheitstollen recoupe un conduit majeur et que les effets décrits se développent, alors l'eau ne représentera plus un problème majeur pour le tunnel de Douane dans la mesure où l'essentiel du débit sera drainé par le Sicherheitstollen. Evidemment, la réalité pourrait bien se trouver entre les deux scénarii extrêmes (pas d'effet vs effet majeur du Sicherheitstollen). Il est par conséquent impossible à ce stade de prévoir les effets réels du percement du tunnel de Douane.

### **6.3.2 Qualité des eaux**

Si l'amont du système de conduit alimentant la Brunnmühle se trouve à l'Ouest de celle-ci, alors la zone de chantier du tunnel de Douane se trouverait très largement en aval de la source et le

---

risque de pollution des sources semblerait à première vue assez limité. Toutefois, il n'est pas établi avec certitude que l'alimentation se fait depuis l'Ouest. De plus, même si c'est le cas, la source de Brunnmühle représente en basses eaux l'exutoire pérenne du système et il est alors probable qu'une composante d'écoulement depuis le Nord-Est alimente la source en basses-eaux. Un danger de pollution similaire à celui évoqué pour le Sicherheitstollen du tunnel de Ligerz ne peut absolument pas être écarté en l'état actuel des connaissances.

## **6.4 Recommandations pour le tunnel de Douane**

### **6.4.1 Etudes complémentaires**

Quel que soit le scénario, la probabilité est élevée que le futur chantier du tunnel de Douane recoupe un conduit karstique et induise un impact majeur sur les sources de Brunnmühle et Holiloch.

Les études évoquées pour la Sicherheitstollen sont très fortement recommandée pour la planification du chantier du tunnel de Douane. En effet, la position de l'amont hydraulique du systèmes, la position et les caractéristiques des conduits karstiques sont des éléments très importants pour limiter les risque pour le chantier, pour l'environnement et pour les captages.

La méthode KarstALEA a été développée pour appréhender ce genre de risques et devrait à notre avis être appliquée avec autant de précision que possible au projet de tunnel de Douane. Le danger est effectivement élevé que le percement du tunnel aggrave la situation par rapport à la situation rencontrée dans le Sondierstollen. Les données sont assez nombreuses et une synthèse complète et rigoureuse permettrait de mieux caractériser le karst.

La méthode KarstALEA doit être complétée par une mise à jour du modèle hydraulique présenté dans ce rapport, ce qui implique le monitoring esquissé au chapitre 6.2. Vu les enjeux (risques importants pour une galerie de sécurité, deux tunnels, deux captages d'eau et 4 sources karstiques), il nous semble indispensable de mettre en œuvre ce qui peut l'être, et ceci dans les meilleurs délais.

L'application de KarstALEA et l'amélioration du modèle hydraulique pourrait conduire à des besoins complémentaires en investigations. Plus tôt celles-ci seront connues, plus tôt les coûts et procédures pourront être intégrés dans la planification.

## **7 Annexes**

- Annexe A. Synthèse des informations spatiales et référence bibliographiques**
- Annexe B. Eléments-clés retenus pour la simulation de l'essai de pompage de fin 2012 dans le puits de captage de Brunnmühle RB 1/12**
- Annexe C. Description des essais hydrauliques de 1989 à 1991**
- Annexe D. Elaboration d'un modèle conceptuel, puis d'un modèle hydraulique**

La Chaux-de-Fonds, le 20 mars 2014

Dr., Pierre-Yves Jeannin, Hydrogéologue

Demian Rickerl, Géologue

# **Annexe A1**

## **Synthèse des informations spatiales**

## **Synthèse des informations spatiales**

### ***Documentation***

#### **Situation des sources**

La Figure 1 situent la position des sources concernées par l'étude.

La source de la Brunnmühle se situe au pied du Jura au sud-est de Twann. Elle est située à une altitude de 433 m et émerge de la formation de Twannbach (Portlandien). La source est pérenne et son débit minimum est de 106 l/s tandis que son débit maximum est de 1000 l/s. La source n'est pas captée pour l'alimentation en eau du village de Twann, un captage situé à 60 m de la source joue actuellement ce rôle et devrait être remplacé par un nouveau forage (BR1/12, Wanner and Theiler 2013). Le débit de l'ancien captage n'a pas pu être quantifié, les données de pompage et de trop plein n'étant pas accessibles pour l'heure.

Un bassin a été aménagé autour de la source naturelle de la Brunnmühle dans lequel se déverse un drain de la galerie de reconnaissance (Sondierstollen) du tunnel de Twann. En 2013, le débit maximum a atteint 117 l/s et le débit minimum 14 l/s (Überwachung Brunnmühle 2013).

Au pied de la chute de Twannbach dans le village de Twann, se situent les sources de Sauser dont débits de ces sources ne sont pas documentés. Un bassin est aménagé au pied de la chute dans lequel un drain d'évacuation des eaux de la galerie de reconnaissance du tunnel de Twann se déverse. Les débits à la galerie d'évacuation ne sont pas mesurés continuellement.

Deux sources temporaires émergent des grottes de Holiloch et de Gischeren. Ces deux grottes se situent respectivement à 477 m et 488 m d'altitude à l'amont de la chute de Twannbach. Les cavités se mettent en charge en hautes eaux, généralement pendant la fonte des neiges et après une longue période de précipitation. Les débits maximaux de ces sources temporaires ne sont pas connus.

La galerie de reconnaissance du tunnel de contournement de Twann a traversé différents conduits karstiques. Différentes sources sont visibles dans la galerie. Des mesures sporadiques des débits de ces sources (environ six fois par années depuis 1999) sont effectuées. Un relevé géologique de la galerie de reconnaissance a permis de situer approximativement la position des sources. Les sources avec les débits les plus importants (30-50 l/min) se situent sous les grottes de l'Holiloch et de Gischeren.

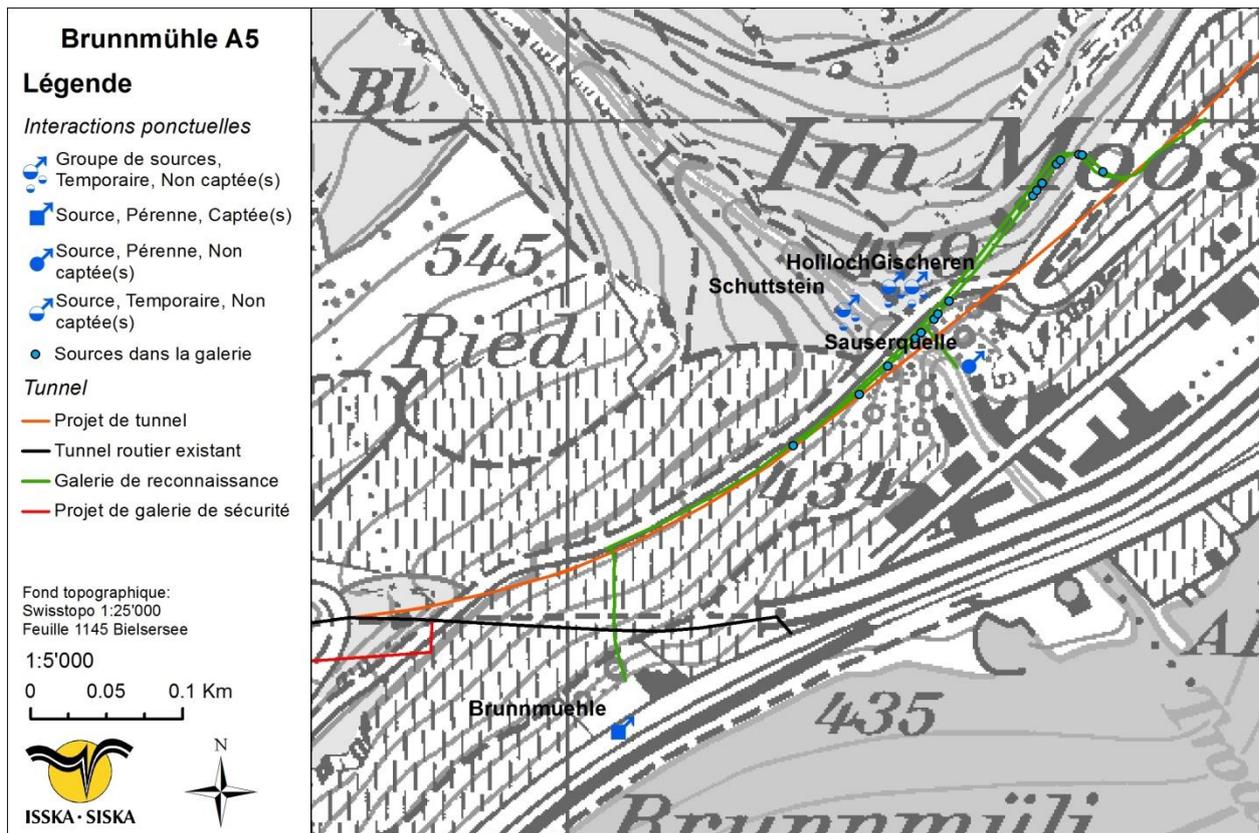


Figure 1 Situation des sources et des galeries

## Essais de traçage et bassin d'alimentation

Des études précédentes (Kellerhals and Tröhler 1979, ISSKA 2012) ont permis d'établir le bassin d'alimentation de la source de la Brunnmühle. De nombreux essais de traçages ont été réalisés et sont présentés dans la Figure 2. Certains secteurs du bassin d'alimentation sont diffluents. Le bassin d'alimentation s'étend au nord jusque dans la combe du Petit Chasseral pour une superficie d'environ 66 km<sup>2</sup>.

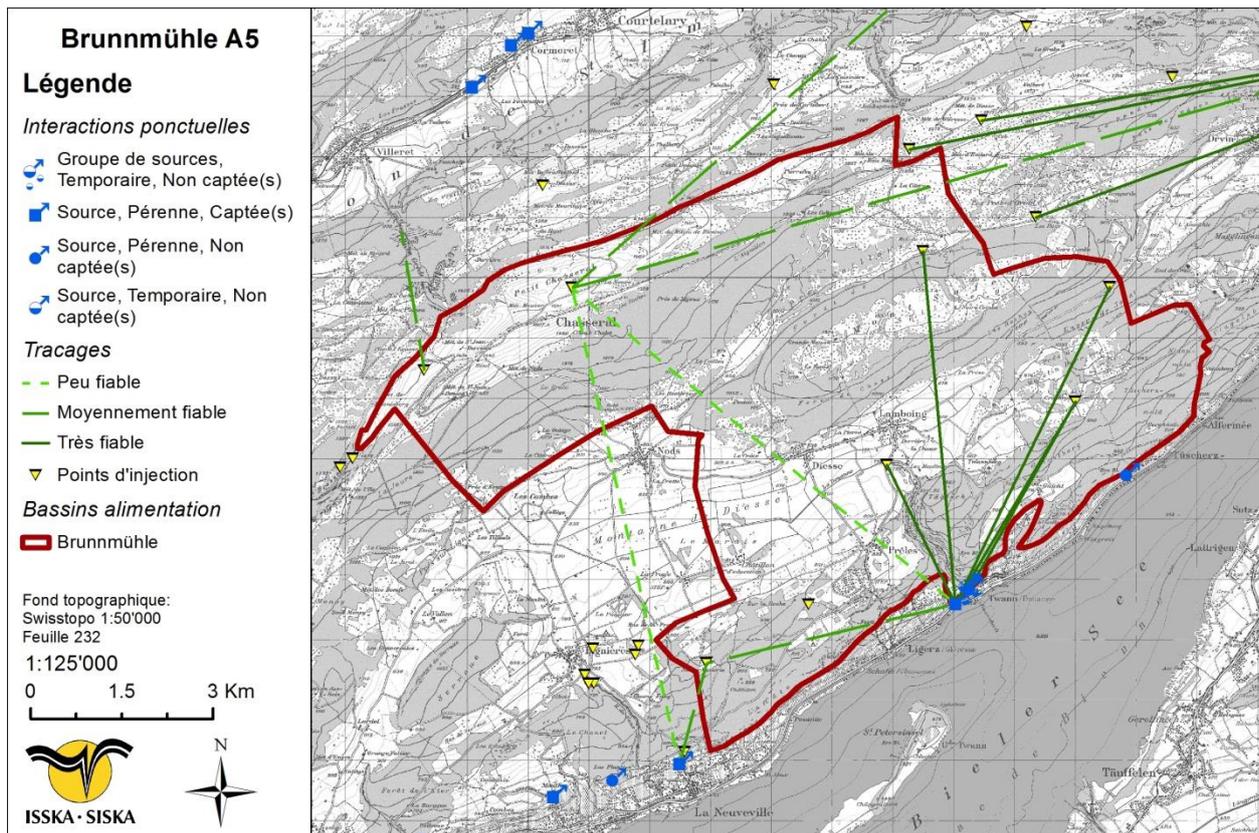


Figure 2 Extension du bassin d'alimentation de la source de la Brunnmühle, illustration des essais de tracages montrant un lien avéré et situation des points d'injection.

## Forages et piézomètres

De nombreux forages ont été forés le long des tracés des tunnels (Figure 3). Sur 46, seuls douze ont été forés sur plus de 50 m. 29 des 46 forages atteignent une nappe karstique. Les forages ayant des données sur la profondeur des nappes recouvrent de manière homogène le pied du Jura. L'altitude des nappes se situent entre 430 m et 475 m d'altitude. La situation des forages, les dates de mesures et les conditions hydrologiques jouent un rôle important dans l'altitude des nappes observées dans les forages. Le gradient hydraulique augmente rapidement comme le montre les sources temporaires de Holiloch et de Gischeren qui se situent 44 m au-dessus de la source de la Brunnmühle.

Plusieurs piézomètres ont été installés pour des essais de pompages du nouveau captage de la source de la Brunnmühle (Wanner and Theiler 2013, Kellerhals + Haefeli 2003, Kellerhals + Haefeli AG 1992).

## Tunnels et galerie

A ce jour seul le tunnel de contournement de Ligerz a été construit (Figure 3). Le tunnel de contournement de Twann est encore d'actualité malgré le défi que représente le système karstique de la Brunnmühle. Une galerie de reconnaissance a toutefois été creusée à sur la zone de source du Twannbach. Cette galerie a recoupé plusieurs conduits karstiques c'est pourquoi deux drains d'évacuation des eaux ont été construits : le premier se déverse dans le bassin de la source naturelle de la Brunnmühle (avec station de mesure), le second, au pied de la cascade du Twannbach, sous les sources temporaires de Gischeren et Holiloch (sans station de mesure).

De nombreuses venues d'eau ont été décrites dans la galerie de reconnaissance. Les débits les plus hauts atteignent le 50 l/min et sont concentrées sous les cavités de Holiloch et de Gischeren (métrage 262 à 272 de la galerie de reconnaissance, Kellerhals 1990). Une seconde zone où des débits plutôt élevés ont été observé se situent à l'extrême est de la galerie (entre métrage 367 et 412 sur le relevé géologique de la galerie de reconnaissance, Kellerhals 1990). Le zoom sur la Figure 3 situe le tracé de la galerie d'exploration ainsi que les source observées dans la galerie.

Des portes ont été installées dans la galerie afin de tester la mise en charge du système (Kellerhals and Haefeli 1989-1991, Kellerhals and Haefeli 1990 et Bollinger and Kellerhals 2007).

Un projet de galerie de sécurité du tunnel de Ligerz est prévu, cette étude doit servir à évaluer l'impact d'une telle galerie sur les sources karstiques de la Brunnmühle.

Un projet de contournement ferroviaire a également été étudié.

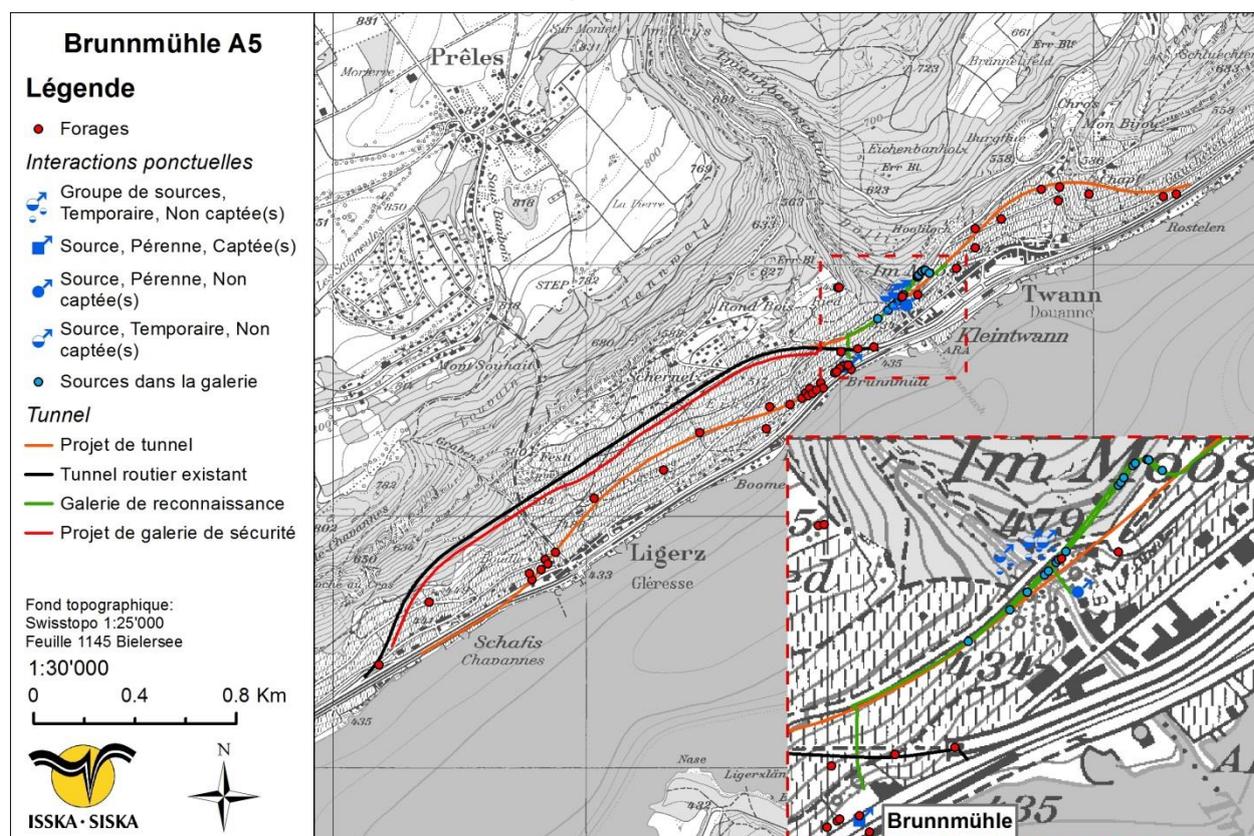


Figure 3 Situation des tunnels et projets de tunnel, le zoom est centré sur la galerie de reconnaissance.

## Modèle géologique et hydrogéologique 3D

Un modèle 3D géologique a été construit avec le programme de modélisation 3D Geomodeller (© BRGM – Intrepid Geophysics) sur la base de coupes, des forages et de la carte géologique. L'emprise du modèle est présentée sur la Figure 4 sur fond de carte géologique et topographique.

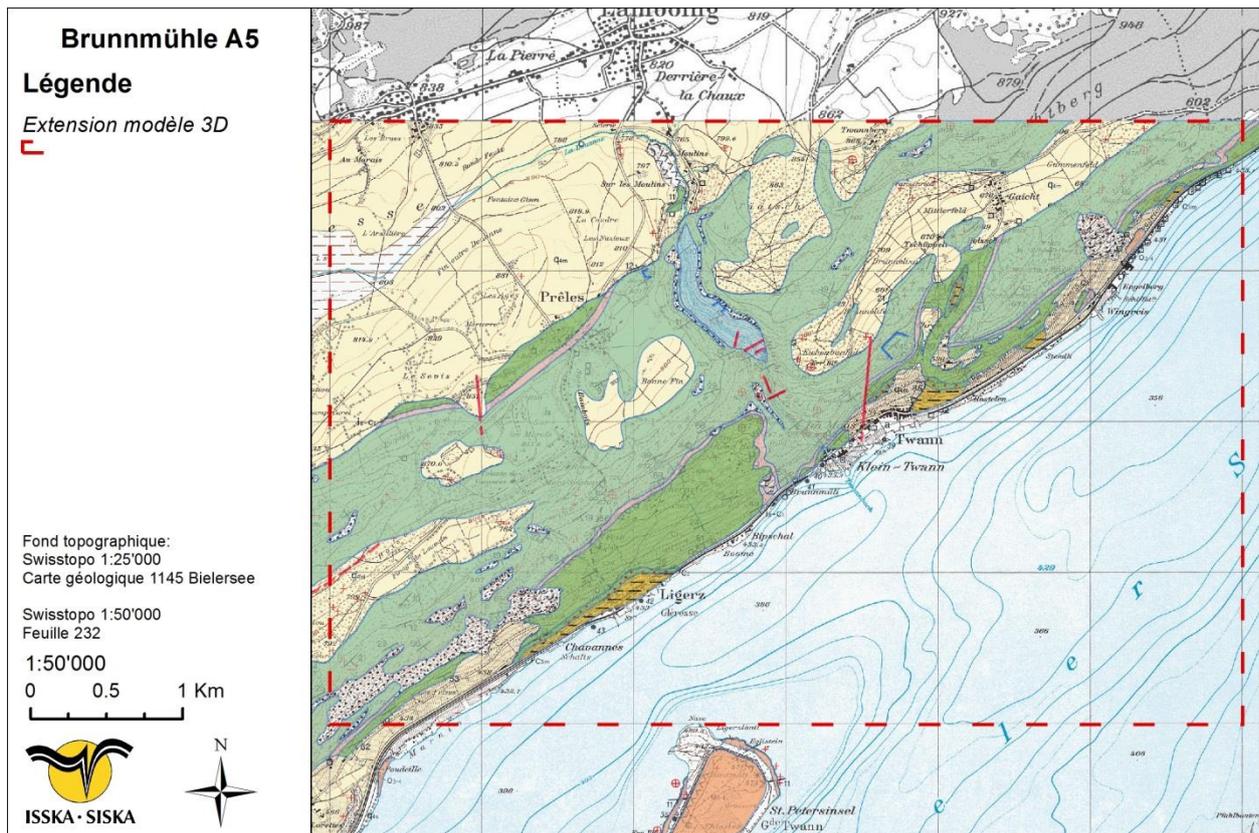


Figure 4 Extension du modèle géologique 3D, carte géologique vectorielle 1145 Bielensee sur fond topographique.

Les formations modélisées sont :

- Marnes bleues d'Hauterive (Hauterivien) ;
- Marnes d'Arzier, Calcaire roux (Valanginien) ;
- Marbres bâtards (Berriasien-Valanginien) ;
- Mergel- und Kalkzone (Berriasien)°;
- Purbeckien ;
- Formation de Twannbach (Portlandien) ;
- Formation de Reuchenette (Kimméridgien) ;
- Séquanien ;

Les cavités de Holiloch et Gischeren, les tracés des tunnels et galeries, la source de la Brunnmühle ainsi que la situation des sources dans la galerie de reconnaissance ont été intégrées au modèle 3D (Figure 5).

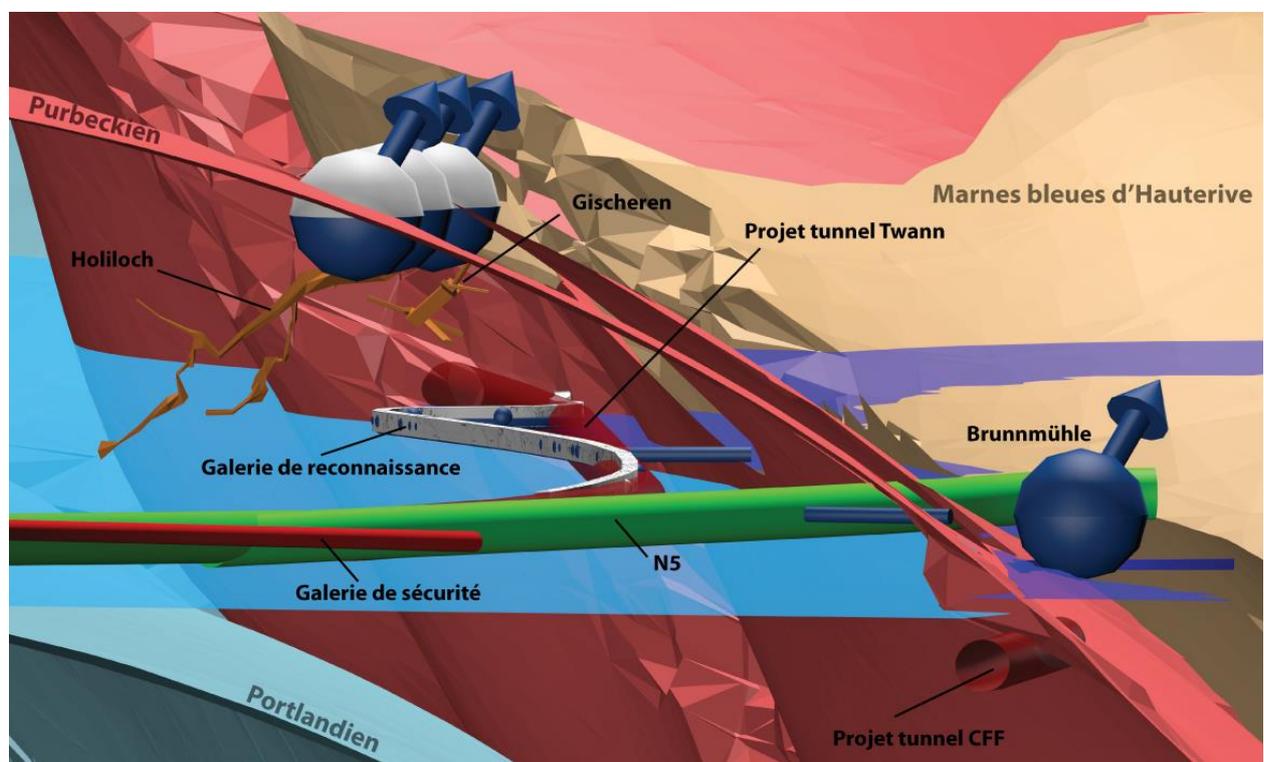
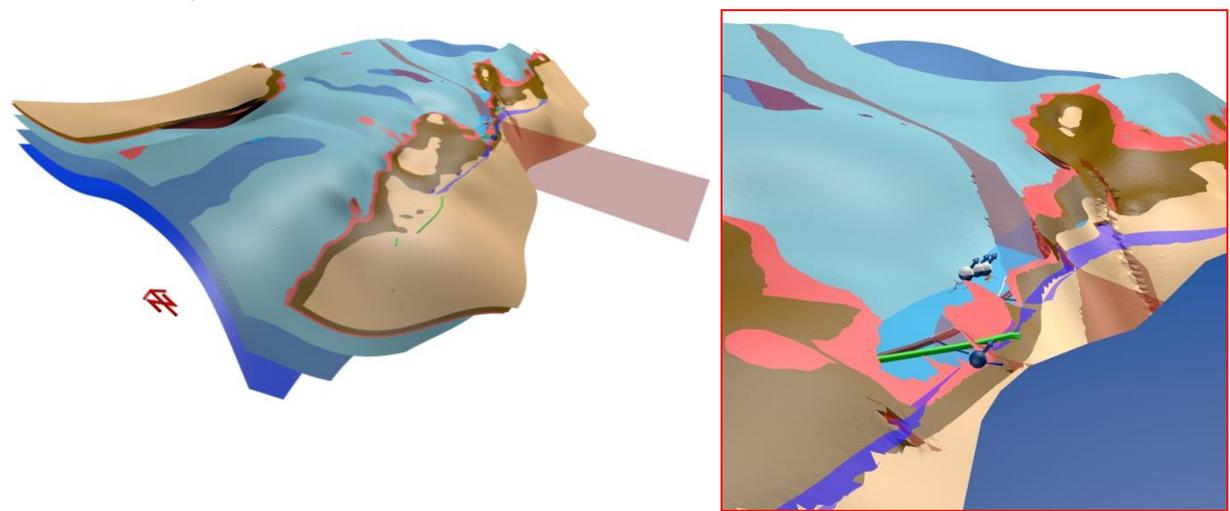


Figure 5 Modèle géologique et hydrogéologique 3D ; zoom sur la zone d'étude.

# **Annexe A2**

## **Documents pris en compte pour l'étude**

## **Références citées**

- Bollinger D, Kellerhals P (2007) Umfahrungstunnel Twann (A5): Druckversuche in einem aktiven Karst. Bull. angew. Geol 12/2: 49-61.
- ISSKA (2012) Synthèse hydrogéologique des systèmes karstiques du canton de Berne. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié - mandant: Office des Eaux et des Déchets du canton de Berne. 82 p.
- Kellerhals + Haefeli (2003) Brunnmühle, Kombiniertes Pumpversuch bei Niederwasserstand, vom 20. August bis 18. September 2003. unpubl. rep. Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse..
- Kellerhals + Haefeli AG (1992) Pumpversuch im Schrägbrunnen bei der Brunnmühle. unpubl. rep. Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse..
- Kellerhals P (1990) Twanntunnel Sondierstollen Geologische Aufnahme, N5 Twann Resultate Sondierstollen (notes). unpubl. rep. .
- Kellerhals P, Haefeli B (1989-1991) Druckversuch Sondierstollen 1989 und 1991 Beillagen. unpubl. rep. Peter Kellerhals und Charles Haefeli, Dres.Phil.Nat. Geologen SIA/ASIC.
- Kellerhals P, Haefeli C (1990) N5 Sondierstollen Umfahrung Twann, Bericht über die Druckversuche vom 15.2 resp. 24.4.1990, Stand des geologische Erkenntnisse. unpubl. rep. Peter Kellerhals und Charles Haefeli Dres.Phil.Nat. Geologen SIA/ASIC.
- Kellerhals P, Tröhler B (1979) Hydrogeologische Untersuchungen zur Ausscheidung von Schutzzonen S im Einzugsgebiet der Brunnmühlequellen. unpubl. rep. Wasserversorgung Twann - Ligerz.
- Wanner J, Theiler E (2013) Brunnmühle Brunnen BR1/12: Pumpversuch 19.11. bis 17.12.2012. unpubl. rep. Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse..

## ***Documents pris en compte (non cités)***

BOEHI, D. (2008): Sondierbohrung: RB6169-08-1. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

BOEHI, D. (2008): Sondierbohrung: RB6169-08-2. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

BOLLINGER, D. & KELLERHALS, P. (2007): Umfahrungstunnel Twann (A5): Druckversuche in einem aktiven Karst. *Bull. angew. Geol*, **12/2**, 49-61.

BÖHI, D. & WANNER, J. (2008): Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern - Wasserfassung Brunnmühle: Alternative Fassungsstandorte Tiefbohrungen Ligerz (Schernelz). *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

DERVEY, T., MATHEZ, C. & MATHEZ, B. (2003): Hydrometrie-Konzept des Kantons Bern: Grundlagen zum Quellenmessnetz. *Technical report* : **Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern - Abteilung Geologie**

FISCH, W. (1937): Bericht über die geoelektrische, geologische, und hydrogeologische Untersuchung der Rutschung bei Ligerz. *Technical report* : **Dr. W. Fisch Geologe, Geophysikal., geolog. u. hydrolog. Experten. Zurich, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI (2002): WEA Kanton Bern - Neufassung Brunnmühle. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI (2003): Brunnmühle, Kombiniertes Pumpversuch bei Niederwasserstand, vom 20. August bis 18. September 2003. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI AG (1992): SBB Tunnel Ligerz. UVB-Teilbericht Geologie und Hydrogeologie. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse**

KELLERHALS + HAEFELI AG (1992): SBB - Bahn 2000. *Technical report* : **Peter Kellerhals und Charles Haefeli, 3011 Berne, Suisse**

KELLERHALS + HAEFELI AG (1992): Pumpversuch im Schrägbrunnen bei der Brunnmühle. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI AG (1992): Doppelspurausbau Ligerz - Twann. Geologische Prognose. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI AG (1996): Trockenwetterabflüsse von ausgewählten Karst - Quellen im Berner Jura. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS + HAEFELI AG (2002): Brunnmühle - Projektstudie Neufassung. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

KELLERHALS, P. (1970): N5 Brunnmühle Beilage 1970. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals, Geologe SIA, 3035 Frieswil, Suisse.**

KELLERHALS, P. (1970): Hydrogeologische Untersuchungen Brunnmühle mit generellen Vorschlägen für die Neufassung der Quellen. *Technical report* : **Dr. Kellerhals Geologen 3035 Frieswil, Suisse.**

KELLERHALS, P. (1970): Hydrogeologische Untersuchungen Brunnmühle mit generellen Vorschlägen für die Neufassung der Quellen. *Technical report* : **Dr. Kellerhals Geologen 3035 Frieswil, Suisse.**

KELLERHALS, P. (1973): Brunnmühlequellen, Dauerkurven der Quelleschüttungen. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals, Geologe SIA, 3035 Frieswil, Suisse.**

KELLERHALS, P. (1973): Brunnmühlequellen Beilage 1973. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals, Geologe SIA, 3035 Frieswil, Suisse.**

- KELLERHALS, P. (1973): Brunnmühlequellen Hydrologische Charakteristik. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals, Geologe SIA, 3035 Frieswil, Suisse**
- KELLERHALS, P. (1974): Brunnmühlequellen, Situation der Quellen und Fassungen. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals, Geologe SIA, 3035 Frieswil, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1976): N5 Umfahrung Ligerz. Umfahrung Schafis/Ligerz. Geologische Beurteilung. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA 3011 Berne, Suisse**
- KELLERHALS, P. (1977): N5 Brunnmühle, Trübungsmessungen Brunnmühlequellen Mai 1974 - Dez 1976. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1979): Schutzzonenuntersuchung Brunnmühlequellen - Beilage 2. Genereller Schichtaufbau. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1979): Schutzzonenuntersuchung Brunnmühlequellen - Beilage 1. Generelle hydrogeologische situation 1:50'000. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1979): Schutzzonenuntersuchung Brunnmühlequellen - Beilage 3. Ganglinien der Farbkonzentration Färbversuche 13+14. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1981): N5 Ligerz-Tunnel. Geologische Begründung für den Gewässerschutzstollen. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1981): N5. Gewässerschutzstollen Brunnmühle. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1981): N5. Gewässerschutzstollen Brunnmühle. Geologische Karte 1/1000. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1981): N5 Gewässerschutzstollen Brunnmühle, Querprofil Brunnmühle. *Technical report* : **Peter Kellerhals und Charles Haefeli, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1981): N5 Gewässerschutzstollen Brunnmühle Geologische Verhältnisse. *Technical report* : **Peter Kellerhals und Charles Haefeli, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1982): N5 Ligerztunnel. Geologie. *Technical report* : **Dr. Peter Kellerhals Geologe SIA, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. (1982): N5 Ligerztunnel. Geologisches Längenprofil 1/1000. Beilage 2. *Technical report* : **Peter Kellerhals und Charles Haefeli, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. & HAEFELI, C. (1988): N5 Umweltverträglichkeits-Bericht Verlängerung Ligerztunnel. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG. 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. & HAEFELI, C. (1990): Trockenwetterabflüsse von ausgewählten Karstquellen im Berner Jura. *Technical report* : **Peter Kellerhals und Charles Haefeli, 3011 Berne, Suisse.**
- KELLERHALS, P. & TRÖHLER, B. (1979): Hydrogeologische Untersuchungen zur Ausscheidung von Schutzzonen S im Einzugsgebiet der Brunnmühlequellen. *Technical report* : **Wasserversorgung Twann - Ligerz**
- TROEHLER, B. (1973): Brunnmühlequellen. Hydrologische Charakteristik. *Technical report* : **Kanton Bern**
- TROEHLER, B. (1974): Ergänzender Bericht betreffend Gewässerschutzmassnahmen beim Bau des Doppelspur der SBB im Bereich der Brunnmühle/Twann. *Technical report* : **Kanton Bern**
- WANNER, J. & BÖHI, D. (2012): Wasserfassung Brunnmühle: Alternative Fassungsstandorte Brunnenbohrung Brunnmühle. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

WANNER, J. & GRÜNER, U. (2007): Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern (WWA) - Wasserfassung Brunnmühle Alternative Fassungsstandorte Hydrogeologische Beurteilung. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

WANNER, J. & THEILER, E. (2013): Brunnmühle Brunnen BR1/12: Pumpversuch 19.11. bis 17.12.2012. *Technical report* : **Kellerhals + Haefeli AG, 3011 Berne, Suisse.**

# **Annexe B**

## **Éléments-clés retenus pour la simulation de l'essai de pompage de fin 2012 dans le puits de captage de Brunnmühle RB 1/12**

## **Éléments-clés retenus pour la simulation de l'essai de pompage de fin 2012 dans le puits de captage de Brunnmühle RB 1/12**

### **Éléments-clés retenus pour la simulation de l'essai de pompage de fin 2012 dans le puits de captage de Brunnmühle RB 1/12**

- Le rabattement dans le forage pompé et dans le forage voisin sont de 2.5 m pour un débit pompé de 2210 L/min et de 6.5 m pour un débit pompé de 3150 L/min.
- Le rabattement observé dans le forage pompé est égal à celui observé dans le forage voisin (Brunnen\_N5). → ces forages sont reliés par des fissures ou conduits ouverts.
- La diminution du débit de la Brunnmühle (Quellteich) correspond à plus de 80% du débit pompé et un régime permanent est atteint en quelques heures. → pompage quasi-direct dans le réseau de conduits et peu d'effet de déstockage de l'aquifère.
- Tous les forages qui ont (légèrement) réagi touchent le top du Malm. Les forages de la petite nappe alluviale n'ont pas réagi. → Seul l'aquifère du Malm est concerné.
- Modèle hydraulique → Les pertes de charge des deux paliers correspondent très bien à celles d'un conduit de 20 cm de diamètre et de 20 m de long qui relierait le forage au conduit alimentant la Brunnmühlequelle.

# **Annexe C**

## **Description des essais hydrauliques de 1989 à 1991**

## **Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen**

# **Description des essais hydrauliques de 1989 à 1991**

Les graphiques disponibles pour chaque essai hydraulique sont disponibles dans une série de fichiers pdf donnés en annexe sur CD.

### **Essai du 6 avril 1989**

Les échelles verticales ne sont pas directement ajustées !

Les manomètres 1 à 3 indiquent une mise en charge de 12 à 15 mètres. Il est étonnant de voir que les trois charges ne sont pas les mêmes : il peut s'agir d'une différence d'altitude des portes, mais aussi de pertes de charge dans le Sondierstollen, si le débit y est considérable.

Le niveau du Holiloch monte de -0.4 à -0.3 m. Il est probable qu'il coule et qu'il s'agisse simplement d'une variation de débit de l'exutoire. Il doit se situer vers 478 m.

Dans le piézomètre, le niveau monte de 440.48 à 425.73 m (! il s'agit probablement plutôt de 452.73 = erreur de lettrage), soit une montée de 12.25 m, ce qui correspond bien aux manomètres.

Le débit dans le canal est probablement celui dans le canal d'évacuation des eaux du Sondierstollen. Les mesures s'arrêtent trop tôt pour intégrer la courbe et comparer le volume au volume de stockage dans le Sondierstollen. On aurait un débit de base d'environ 100 L/s et un volume total de vidange de l'ordre de 800 L/s (moyenne estimée) sur 2 heures (durée estimée), soit 5760 m<sup>3</sup>, dont un apport de l'ordre de 100 L/s pendant 2 h = 720 m<sup>3</sup>, donc un volume de stockage de l'ordre de 5000 m<sup>3</sup>. Avec 14 m<sup>2</sup> de section et environ 400 m de long, le volume du Sondierstollen (5600 m<sup>3</sup>) représente un ordre de grandeur tout-à-fait comparable.

### **Essai du 10 au 27 avril 1989**

Deux fichiers pdf présentent les données. Manifestement, les portes du Sondierstollen ont été fermées le 10 avril vers 11 heures et la pression a été mesurée aux manomètres 1 à 3, ainsi que dans le forage RB7. Le débit issu du Sondierstollen est aussi donné. A partir du 20 avril, le débit d'une petite source au portail Est du tunnel est aussi donné, mais le débit total du Sondierstollen n'est plus indiqué. L'essai se termine le 27 avril avec l'ouverture des portes. La baisse de niveau du Holiloch est alors donnée.

On observe les éléments suivants :

Les variations de pression dans le Drucktor A et dans le forage RB 7 sont très parallèles, sauf entre le 11 et le 14 avril où le RB7 est plus bas. La variation absolue est proche, mais les graphes permettent difficilement d'être très précis. Il faut de plus convertir les pressions en m d'eau. Le niveau est 12 à 18 m plus haut pendant l'essai, il est particulièrement haut entre le 21 et le 22 avril.

Les trois manomètres présentent globalement des variations similaires mais dans le détail le manomètre 1 s'inverse du 20 au 22 avril, pendant le passage de la crue maximale.

Le débit du Sondierstollen est de 800 L/s avant l'essai, il descend à 50 L/s pendant l'essai avec des petits pics à 100 voire 200 L/s. La raison de ces pics nous est inconnue.

Le point zéro du Abstich du Holiloch est à l'altitude de 475.64 m. L'échelle va vers le bas.

Le point zéro du Abstich du RB7 est à 475.03 m, l'échelle va vers le bas.

## **Essai du 15 février 1990**

Il ne doit pas s'agit ici d'un essai de mise en pression, mais plutôt de l'observation de la crue majeure du 14-15 février 1990.

Le débit du Twannbach à l'amont est estimé à 4.5 à 5 m<sup>3</sup>/s. Le débit du Twannbach à l'aval est mesuré à max environ 17 m<sup>3</sup>/s avec un plateau à partir de 14 m<sup>3</sup>/s. Le Sondierstollen aurait fourni jusqu'à 2 m<sup>3</sup>/s. La pression mesurée dans le Holiloch serait montée à 486 m d'altitude.

La sonde dans le Holiloch semble être installée à 440.60 m d'altitude.

## **Essai du 23 au 25 avril 1990**

Le 23 avril entre 1 et 6 heures du matin arrive une crue qui fait couler le Holiloch dès 6 h du matin. Le débit du Twannbach Oben est de 900 puis 400 L/s, celui du Holiloch+Sondierstollen d'environ 3000 L/s. Gischere coule également, la cote de débordement semble être env 3 m plus bas que celle du Holiloch.

Le 24 avril à 14h35 les portes sont fermées dans la Sondierstollen. Les manomètres et le forage montent assez parallèlement jusque vers 15h50 où un plateau est observé. Le débit a Gischere redescend alors que l'eau devient trouble (décolmatage). Ensuite, le niveau remonte progressivement. Les cotes max atteintes dans le Sondierstollen et RB7 sont d'env. 460 m, donc bien au-dessous de celles du Gischere et Holiloch qui sont restés vers 477 (Holiloch) et 474 (Gischere). A la fin de l'essai la cote dans Gischere semble s'approcher de celle du Holiloch (mesures incertaines).

Les portes sont ouvertes le 25 avril vers 10 heures.

## **Essai hydraulique du 8 au 11 janvier 1991**

L'échelle horizontal des graphiques a été coupée lors du scan, il est donc difficile d'être précis pour la description de cet essai.

L'essai a eu lieu immédiatement après une crue très importante lors de laquelle le Holiloch est monté à 480.5 m (selon petit graphe en bas à gauche) et à 484 m environ selon le graphique principal (!). Il peut s'agir de la lecture de la cote à l'entrée et de la sonde de pression respectivement (différence = perte de charge entre sonde et entrée).

Le débit du Twannbach aurait un peu dépassé 1000 L/s à l'amont et 9000 L/s à l'aval. Pendant l'essai, le débit à l'amont était de 200 à 300 L/s, alors qu'à l'aval 3500 et 6500 L/s. Il est très surprenant de voir que le Twannbach Unten a vu son débit augmenter juste après la fermeture des portes.

Les cotes indiquées sont de 450 au « Mano Twannbachfenster », de 454 au forage RB 90/5 et de 461.5 au forage RB7.

L'essai a été suivi d'une crue importante immédiatement après (pendant) l'ouverture des portes. Le niveau dans le Twannbachfenster et les forages est descendu de 4 à 8 m, mais il est resté

env. 10 m supérieur au niveau avant essai. Une sorte de régime pseudo permanent a donc été atteint pendant cette période. Mais les données sont un peu douteuses pendant cette période.

## **Essai hydraulique du 5 mars au 5 avril 1991**

C'est l'essai le plus complet.

On notera cependant que les valeurs du Holiloch sont toujours ambiguës car il s'agit à priori de charges mesurées par la sonde de pression qui sont transformées en cotes du niveau d'eau, ce qui n'est pas correct, sachant que des pertes de charges notables doivent intervenir entre la sonde et le point de sortie de l'eau. C'est particulièrement gênant pendant la crue du 22-23 mars qui a atteint un débit de l'ordre de 9000 L/s à l'amont et 2000 L/s à l'aval, soit environ 7000 L/s de Holiloch + Gischere (Sondiertollen = fermé).

La cote dans le Sondierstollen dépasse nettement les 2 bars (460 m) pendant la crue majeure.

Les cotes dans les forages RB 7 étaient de 460 au début, puis env. 464 pendant la grande crue. C'est donc sensiblement la même cote que dans le Sondierstollen.

Dans le forage RB 90-5 la courbe est parallèle environ 6 m plus bas.

On en déduit que le Holiloch a les charges les plus élevées, suivi de Gischere, suivi de RB7, suivi de RB 90-5, suivi de Twannbachfenster.

# **Annexe D**

## **Elaboration d'un modèle conceptuel, puis d'un modèle hydraulique**

## Modèle hydrogéologique du système karstique de Brunnmühle-Twannbachquellen

# Elaboration d'un modèle conceptuel, puis d'un modèle hydraulique

La Brunnmühlequelle sort d'un réseau de petits conduits noyés dont certains arrivent probablement directement au niveau du lac (source sous-lacustre probable mentionnée dans les rapports), d'autres au niveau de la source elle-même. Dans le modèle, on regroupe ces petits conduits dans 1 conduit équivalent menant à la source et un autre menant au lac.

En fonction des données, le débit total du système semble varier entre 200 l/s et 15 m<sup>3</sup>/s. Le débit entrant dans le modèle (amont) doit donc couvrir cette gamme de débits.

En plus de la Brunnmühle, les exutoires sont Holiloch, Schüttstein, Gischeren, Sondierstollen (Fensterstollen). On pourrait y ajouter les sources annexes car lors des essais hydrauliques (portes fermées) il y a visible une série de petites sources annexes qui se mettent à couler. Le Fenstersollen lui-même est parcouru par un débit qui n'est pas nul.

Le modèle hydraulique doit donc permettre d'investiguer comment relier ces exutoires pour correspondre environ aux observations.

Les éléments suivants sont utilisés comme base.

En dehors des essais hydrauliques, Gischeren présente une charge nettement plus élevée que celle mesurée dans le Sondierstollen, ce qui peut s'expliquer par une cascade (écoulement libre) reliant le conduit de Gischeren au Sondierstollen. Or pendant les essais hydrauliques, la charge monte dans le Sondierstollen, mais n'atteint de loin pas celle de Gischeren. Comme tout semble indiquer qu'une liaison hydraulique assez directe existe entre les deux (il est même fait mention d'une éventuelle connexion visuelle), il faut admettre qu'une perte de charge importante existe entre les deux et que le Sondierstollen est en aval de Gischeren. Cette hypothèse implique l'existence d'un exutoire important à partir du Sondierstollen, mais qui n'émerge pas en amont de la station de Twannbach unten.

Les données concernant l'altitude de Gischeren sont un peu ambiguës, mais il semble raisonnable d'admettre que le débordement principal de fait à une altitude de 473.5 m pour cette source.

L'amont du système est admis provenant de l'Ouest. La source de Brunnmühle serait connectée à ce drain en amont des autres sources. Ce drain doit être de grand diamètre (min 2.5 m) pour laisser passer les 16 m<sup>3</sup>/s alimentant ce système. En plaçant des drains de l'ordre de 20 à 60 cm vers les sources de Brunnmühle et Lac, le débit ne peut guère dépasser 1 m<sup>3</sup>/s. Des données précises de débit à tous les exutoires du système permettraient de calibrer la taille de ces conduits avec précision.

A l'aval de la Brunnmühlequelle, deux branches alimenteraient d'une part Holiloch et Schuttstein, d'autre part Gischeren et le Sondierstollen. Pour définir mieux cette partie, il faut des estimations de charges et de débits respectifs. Les ordres de grandeur suivants ont été admis : en grande crue, 8.5 m<sup>3</sup>/s à Holiloch, 3 m<sup>3</sup>/s à Gischere, 1 m<sup>3</sup>/s à Schuttstein et 2.5 m<sup>3</sup>/s dans Sondierstollen et 1 m<sup>3</sup>/s à Brunnmühle. Si on se base sur les données de mars

1991, on aurait 6 m<sup>3</sup>/s à Holiloch, 0.8 m<sup>3</sup>/s à Gischere, 0.4 m<sup>3</sup>/s à Schuttstein et 0.8 m<sup>3</sup>/s dans Sondierstollen et 0.5 m<sup>3</sup>/s à Brunnmühle. Vu les incertitudes sur les débits, il ne sera pas utile à ce stade de s'attarder trop sur des détails, seuls les ordres de grandeur comptent pour le moment.

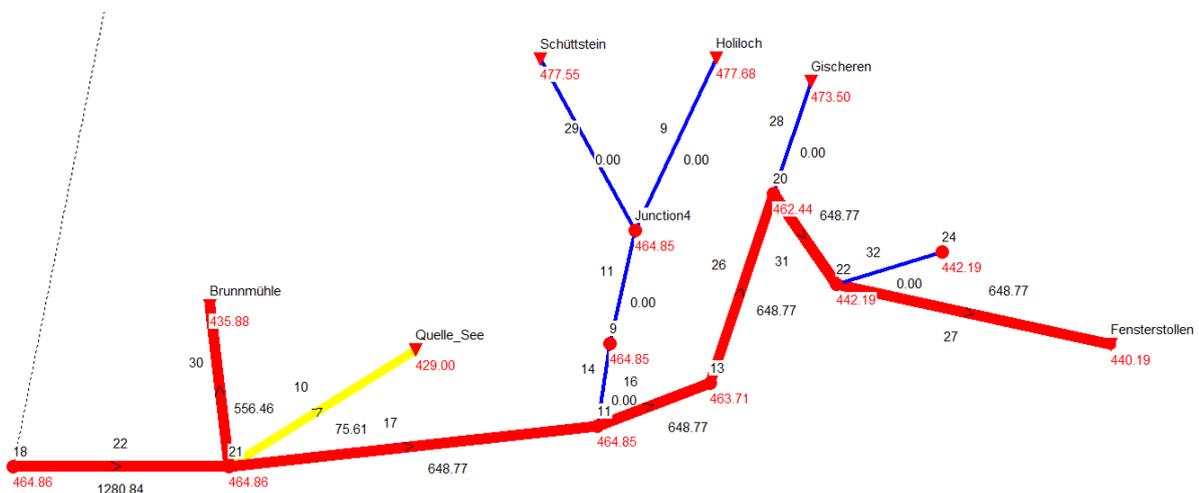
Assez clairement, les jets observés du forage RB7 pendant les essais hydrauliques ne correspondent pas à de l'artésianisme temporaire, mais à l'expulsion de l'air contenu dans le Sondierstollen. La charge dans le forage est visiblement nettement plus basse que la cote de la bouche du forage.

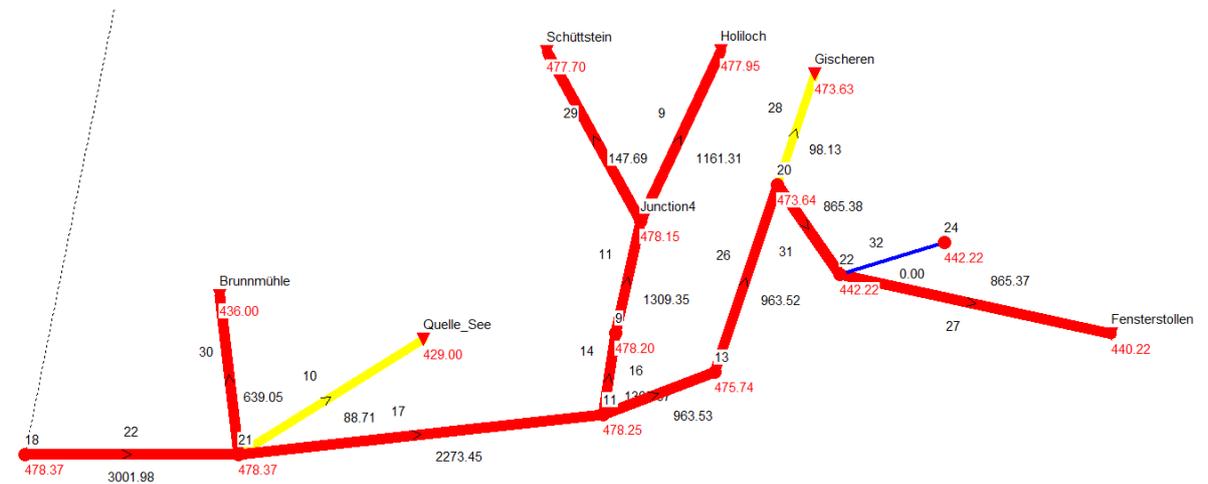
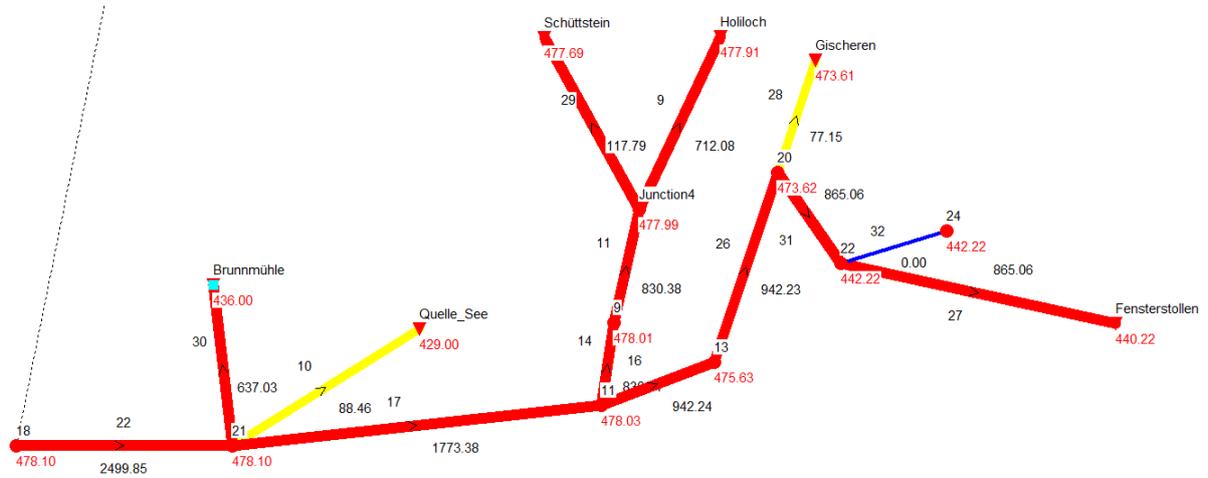
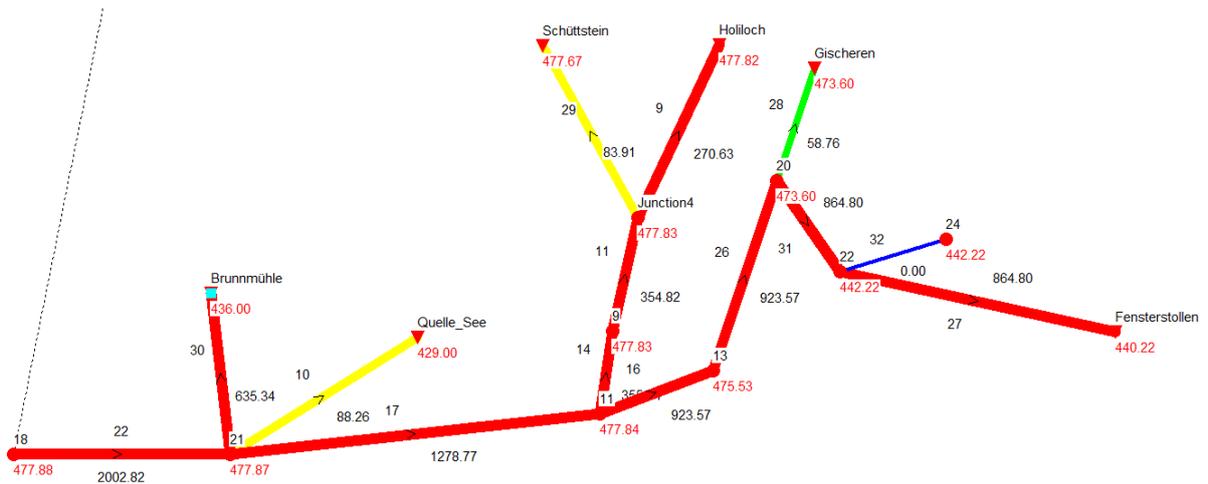
Après une calibration grossière du modèle sur 15 crues types de débits croissants entre 0.2 et 15 m<sup>3</sup>/s, nous avons reconstitué une chronique de débit d'entrée synthétisant approximativement les essais hydrauliques de février et avril 1990. Le modèle doit alors donner des résultats d'un ordre de grandeur raisonnable permettant de faire circuler le débit total du système et respectant approximativement le débit respectif des différents exutoires. Bien souvent un critère très intéressant est le moment précis d'entrée en fonction des exutoires temporaires. Les données disponibles donnent hélas des approximations très grossières de ces conditions. Le modèle doit aussi refléter les charges mesurées dans le Holiloch, le Sondierstollen et les forages.

Le débit au Fensterstollen semble souvent être de l'ordre de 800 L/s et descend à 50-200 L/s pendant les essais hydrauliques (portes fermées).

Pour estimer le débit total entrant dans le modèle, on admet qu'il équivaut approximativement à celui de la Brunmühlequelle + la différence entre Twannbach Oben et Unten.

A partir de ces données et après de nombreux essais, le réseau de conduits présenté en figure XXX est considéré comme satisfaisant compte-tenu des données existantes. Les charges hydrauliques (en rouge) et les débits (en noir, L/s) sont données pour cinq débits d'entrée différents.





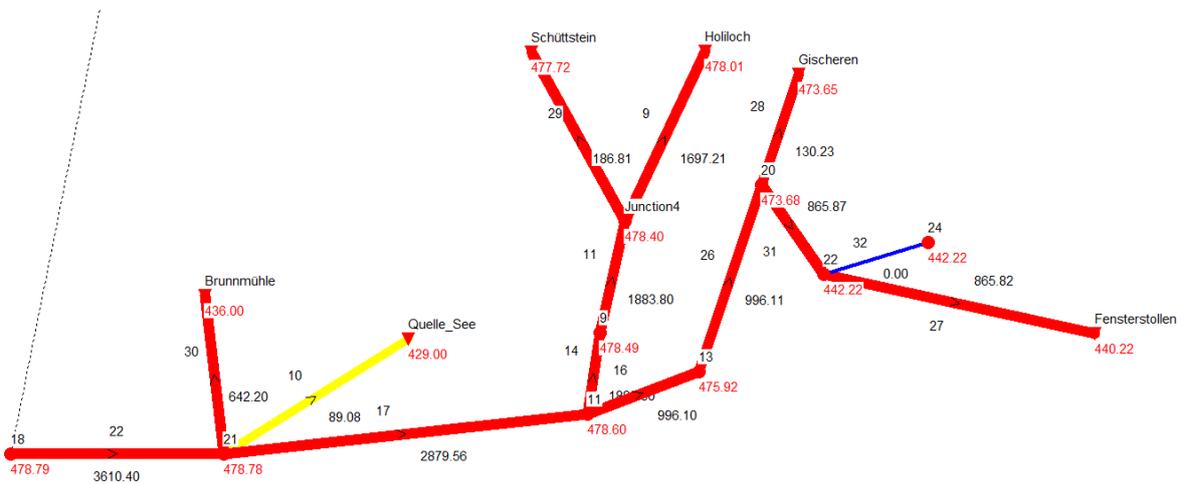


Figure 1 Premier modèle reproduisant approximativement les débits des différents exutoires. Ici cinq débits d'entrée sont considérés (1280 à 3610 L/s). Ce modèle ne permet cependant pas de simuler les essais hydrauliques.

Figure XXZ :

Pour simuler les essais hydrauliques, nous avons simplement fermé (entièrement ou partiellement) le conduit en direction du Fensterstollen. Cette fermeture a pour conséquence de diminuer le débit sortant du Fensterstollen (ce qui correspond aux observations), mais la charge hydraulique dans le Fensterstollen monte alors au niveau de la source de Gischeren, ou même légèrement plus haut (ce qui ne correspond pas du tout aux mesures de charge dans le Sondierstollen (et les forages voisins). Le fait que la charge dans le forage et le Sondierstollen soit nettement inférieure à celle de Gischeren pendant les essais hydrauliques indique que les pertes de charge entre les nœuds 20 à 22 sont environ égales à celles liées aux pertes du tunnel vers l'extérieur (toutes les petites sources = by-pass de la porte). Si on admet par exemple 200 L/s de fuites du Sondierstollen avec 16 m de mise en charge, il faudrait aussi admettre 16 m de perte de charge (avec aussi 200 L/s) entre Gischeren et le Sondierstollen. Si c'était le cas, alors comment faire passer 800 L/s ou plus lorsque les portes sont ouvertes ? De plus, en avril 1990, il est clairement établi que Gischeren coule avant la fermeture des portes. Ceci implique que la perte de charge entre les nœuds 20 et 22 est alors d'environ 34 m. Après la fermeture des portes, la perte de charge est d'environ 16 m. Or la fermeture des portes fait, d'après les données à disposition, baisser le débit sortant au Fensterstollen de 1200 L/s. Comme le débit à Gischeren et Holiloch ne changent presque pas pendant l'essai on peut penser que la charge aux nœuds 11, 13 et 20 ne varie pas notablement. Ceci indiquerait que la mise en charge dans le Sondierstollen n'atteint pas le nœud 20. Il n'y a alors aucune raison que le débit entre le nœud 20 et le 22 diminue pendant l'essai hydraulique, ce qui impliquerait qu'un débit important, au moins supérieur à 500 L/s circulerait dans le Sondierstollen pendant les essais hydrauliques. Le modèle tel qu'il présenté en Figure 1 peine à simuler correctement le fait d'avoir des charges dans le Sondierstollen fermé qui ne s'approchent pas de celles de Gischeren. → Un nouveau modèle est construit pour simuler ce cas, mais il est important dans le futur de mesurer les charges dans le Sondierstollen à différents endroits, de savoir exactement à quelle cote et à partir de quand Gischeren se met à couler, et enfin de savoir si un débit important circule dans le Sondierstollen et vers où il s'écoule.

D'après Reto Wagner (comm orale du 12.03.2014 ) Gischiere est la dernière source à couler (après le Holiloch).

Les conduits de la Brunnmühle présentent (selon notre hypothèse) des gradients très élevés et doivent s'agrandir rapidement à l'échelle des temps géologiques (érosion et dissolution).