

# Meyer 3D - Die dreidimensionale Erfassung der Meyerstollen in Aarau

## Meyer 3D – Relevé tridimensionnel des galeries Meyer à Aarau

Yvo Weidmann, Kevin Hilfiker, Marc Griesshammer, Reinhard Gottwald\*

Traduction: TSL-Translation, Florian Hof & Rémy Wenger



### Motivation und Hintergrund

Im Ausbildungsprogramm zum Bachelor of Science in Geomatik (BSc Geomatik) an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) spielt in den höheren Semestern das projektorientierte Arbeiten an realen Objekten eine zentrale Rolle. Aus diesem Grunde wurde vor vielen Jahren am Institut Vermessung und Geoinformation FHNW (IVGI) die Projektinitiative „3D Cultural Heritage“ lanciert, in welcher längerfristig ein virtuelles, digitales Archiv kulturhistorisch wertvoller Bauten und Objekte aufgebaut werden wird. Zentrales Element ist dabei der Einbezug von Studierenden des BSc Geomatik, die in diesen teilweise sehr anspruchsvollen Projekten das gesamte Register der 3D-Messtechnik zur Erfassung und die entsprechenden Informatikwerkzeuge zur Weiterverarbeitung und Visualisierung anwenden müssen.

Im Frühjahr 2015 wurde das Meyersche Stollenssystem in Aarau bearbeitet. 8 Studierende der Abschlussklasse 2015 hatten zur Aufgabe, einen Teil des öffentlich nicht zugänglichen Stollenssystems dreidimensional zu erfassen und darzustellen, um dem Besucher des „Aufschlusses Meyerstollen“ eine trockene und „schlammfreie“

\* Yvo Weidmann, 8003 Zürich

\* Kevin Hilfiker und Reinhard Gottwald, Institut Vermessung und Geoinformation FHNW, 4132 Muttenz  
Marc Griesshammer, Stadtmuseum Aarau, 5000 Aarau

### Motivation et contexte

Dans le programme de formation de la licence scientifique en géomatique (BSc Géomatique) à la Haute École technique du Nord-Ouest de la Suisse (FHNW), dans les semestres supérieurs, les travaux pratiques sur des objets réels jouent un rôle central. Dans ce cadre, il y a de nombreuses années, l'Institut de Mensuration et de Géoinformation de la FHNW (IVGI), a initié le projet « 3D Cultural Heritage » (Patrimoine culturel 3D). Son but à long terme est de réaliser une archive numérique des bâtiments et objets de valeur culturelle. L'élément central dans ces projets parfois très exigeants est l'implication des élèves en géomatique, qui doivent recourir à l'ensemble des connaissances des technologies de mesure 3D pour le relevé et les outils informatiques nécessaires au post-traitement et à la visualisation.

Au printemps 2015 le réseau des Galeries Meyer, à Aarau, a été traité. Huit étudiants de la volée 2015 (obtention des diplôme) avaient pour tâche de relever une partie des galeries non accessible au public et de la représenter en trois dimensions. Cette réalisation rend possible une visite sèche et sans boue des Galeries Meyer via un écran et donne aux responsables du service de génie civil d'Aarau des informations 3D précises sur le tracé des galeries. Le travail a été rendu possible et soutenu par la ville d'Aarau (musée de la ville et service du génie civil) et par l'OGH (Ostschweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung).



Besichtigung der aufgenommenen Stollenteile am Bildschirm zu ermöglichen und um dem Tiefbauamt Aarau genaue Informationen über den 3D-Verlauf der Stollen zu geben. Ermöglicht und unterstützt wurden die Arbeiten durch die Stadt Aarau (Stadtmuseum und Tiefbauamt) und die Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung (OGH).

## Die Geschichte der Meyerstollen

Die Meyerstollen sind ein faszinierendes, rund 200 Jahre altes Baudenkmal, das in seiner Verwendung und Bauweise einzigartig ist. Erbaut wurde das Stollensystem zwischen 1791 und ca. 1811 in mehreren Etappen. Auftraggeber war Johann Rudolf Meyer Sohn, ältester Sohn des Seidenbandindustriellen Johann Rudolf Meyer, bekannt als Vater Meyer.

Das System erstreckt sich auf einer Gesamtlänge von 1700 m und führt auf drei Ebenen in 4 bis 17 Meter Tiefe auf einer Fläche von rund 9 Hektaren vom Gebiet des heutigen Torfeld unter dem Bahnhof Aarau hindurch bis zur Laurenzenvorstadt durch den Aarauer Untergrund. Zweck des Stollenbaus war es, sauberes Wasser für die Färberei im Keller der Villa von Rudolf Meyer Sohn, heute

## L'histoire des Galeries Meyer

Les Galeries Meyer sont une fascinante réalisation vieille d'environ 200 ans, unique par son type de construction et sa fonction. Le réseau de galeries a été construit en plusieurs étapes entre 1791 et 1811. Le maître d'ouvrage était Johann Rudolf Meyer fils, fils aîné de l'industriel de la soie Johann Rudolf Meyer, connu comme le "Père Meyer".

Le système s'étire sur une longueur totale de 1700 m sur trois niveaux de 4 à 17 mètres de profondeur. Il s'étend sur une superficie d'environ 9 hectares dans une zone située entre l'actuelle gare d'Aarau (Torfeld) et la banlieue Laurenzenvorstadt, à travers le sous-sol. La fonction de cet ouvrage était d'amener de l'eau propre jusqu'à la teinturerie se trouvant dans la cave de la maison du fils de Rudolf Meyer, un bâtiment devenu depuis lors maison paroissiale. En même temps, les galeries ont été utilisées pour le drainage des terrains. Avec la construction d'une nouvelle usine en 1810, un moulin a été installé. Ce moulin possédait la plus grande roue souterraine de son temps en Europe. Cette roue fournissait l'énergie nécessaire à des dispositifs mécaniques pour la finition de rubans de soie et à un soufflet pour la teinturerie.

Le réseau de galeries a progressivement été étendu, afin d'augmenter la puissance de la roue à aubes à un maximum de 50 l/s. Vers 1860, la famille Feer, qui avait pris la direction de la fabrique de rubans de soie Meyer en 1830, a remplacé la roue à aubes par une turbine pour produire encore plus d'énergie. Le système a été maintenu en activité jusqu'en 1881, puis, en 1888, les retenues d'eau ont été démontées. Durant les travaux de construction de la nouvelle gare d'Aarau, entre 2008 à 2010, la partie nord des galeries a été rendue accessible. Pour la première fois, une partie des galeries a pu être rendue publique. On peut les observer dans le troisième sous-sol de la gare d'Aarau, dans l'espace « Aufschlusses Meyerstollen », littéralement « Affleurement des Galeries Meyer », en référence à la géologie. L'entrée à cette annexe au musée de la ville d'Aarau est gratuite.

## Situation initiale et objectifs

En 2000, des géomètres ont effectué une mesure de précision d'une polygone le long de l'axe des galeries. A noter que le tracé des galeries était alors en grande partie inconnu. Cette ligne polygone a servi de base pour le nouveau relevé tridimensionnel. Lors de la cartographie en deux dimensions de l'an 2000, les points fixes ont été matérialisés avec des boulons. Ceux-ci ont pu être réutilisés pour les topographies ultérieures.

Lors des travaux préparatifs, les différentes exigences et contraintes pour le nouveau relevé ont été formulées et affinées. Dans cette démarche, l'accent a été mis sur la documentation des ouvrages historiques et l'élaboration éventuelle d'un système d'information interactif pour le musée. D'autre part, l'objectif était de créer un modèle 3D des installations qui puisse être utilisé pour la planification du drainage et pour l'entretien des galeries.

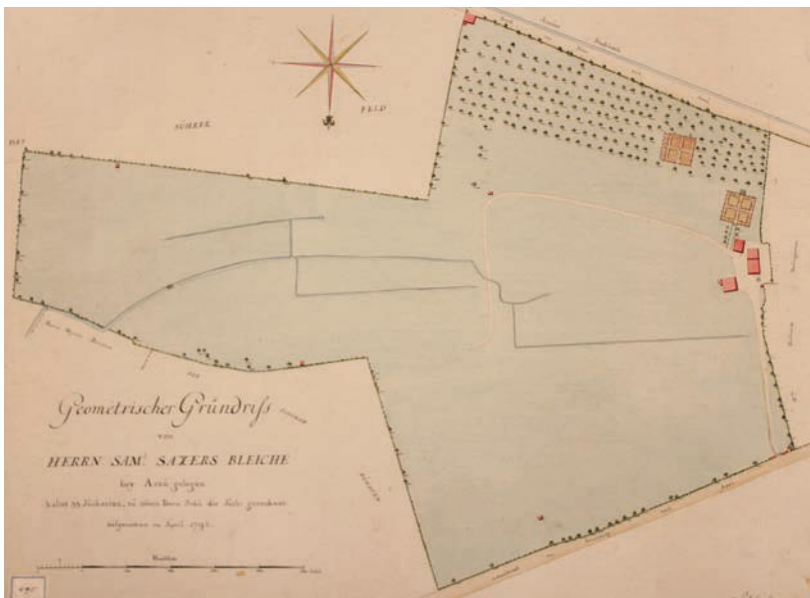


Fig. 1: Plan des Grundstückes von Major Saxer, welches 1792 offiziell an Sohn Meyer überschrieben wurde und als Basis für den Bau des Stollensystems diente.

Fig. 1: Plan du major Saxer dressé en 1792, et qui a servi de base pour la construction du réseau de galeries.

das katholische Pfarramt, zu sammeln. Gleichzeitig dienten die Stollen der Entwässerung seines Grundstückes. Mit dem Bau einer neuen Fabrik im Jahr 1810 wurde ein Wasserrad installiert, welches das grösste unterirdische Rad seiner Zeit in Europa war. Mit diesem Rad wurden Geräte zur Veredelung von Seidenbändern und ein Blasebalg für die Färberei angetrieben.

Die Stollen wurden später in mehreren Etappen laufend ausgebaut, um die Leistung des Wasserrades auf bis zu 50 l/s zu erhöhen. Um 1860 ersetzte die Familie Feer, welche den Meyer'schen Seidenbandbetrieb 1830 übernahm, das Wasserrad durch eine Turbine, um noch mehr Energie zu erzeugen. Das System blieb bis 1881 in Betrieb, bis dann 1888 alle Stauvorrichtungen aus den Stollen entfernt wurden. Mit dem Neubau des Bahnhofs Aarau von 2008 bis 2010 wurde der nördliche Teil der Stollen aufgeschlossen. So wurde erstmals ein kleiner Teil

der Stollen öffentlich zugänglich gemacht. Die Meyerstollen können im 3. Untergeschoss des Bahnhofs Aarau im „Aufschluss Meyerstollen“ des Stadtmuseums Aarau besichtigt werden. Der Eintritt ist gratis.

## Ausgangslage und Ziele

Als Grundlage für die 3D-Aufnahme der Stollenanlage diente der Polygonzug einer Präzisionsvermessung entlang der Stollenachse einer Vermessungsfirma aus dem Jahre 2000. Im Rahmen dieser zweidimensionalen Kartierung der bis dahin noch weitestgehend unbekanntesten Stollenverläufe wurden Fixpunkte mit Bolzen vermarkt. Diese konnten nun als Basis wiederverwendet werden.

Während den Vorarbeiten wurden die unterschiedlichsten Anforderungen an die neue Erfassung der Stollen formuliert und ausgearbeitet. Dabei standen die Dokumentation der historischen Anlagen und die mögliche Erarbeitung eines interaktiven Informationssystems für das Museum im Vordergrund. Weiter war es das Ziel, ein 3D-Modell der Anlagen zu erstellen, welches dem Stadtbauamt für die weitere Planung der Entwässerung und des Unterhalts der Stollen dienen soll.

## Methodik und Vorgehensweise

Im Vordergrund bei der Wahl des Instrumentariums stand die Anforderung, die Instrumente und die benötigte Beleuchtung ohne Stromanschluss betreiben zu können. So wurden zwei 3D-Laserscanner Focus3D X 330 der Firma FARO und Akku-LED-Scheinwerfer mit einer Leistung von je 20 Watt eingesetzt. Für die effiziente und kostengünstige Markierung der Fix- und Verknüpfungspunkte wurden handelsübliche Styroporkugeln mit einem Durchmesser von 7 cm verwendet (Fig. 2).

Die Verfügbarkeit einer grossen Anzahl solcher Kugeln aus dem Baumarkt ermöglichte es, grosse Abschnitte der Stollenanlage gleichzeitig zu signalisieren und parallel in zwei Gruppen zu scannen. Durch dieses Vorgehen konnte eine sehr hohe Effizienz bei der Erfassung erreicht werden.

Jede Gruppe, bestehend aus 2 bis 3 Studierenden, erfasste die ihnen zugewiesenen Stollenteile abschnittsweise mit einer Auflösung von 7 mm auf 10 m Aufnahmestanz. Pro 360-Grad-Scan benötigte man mit diesen



Photo: Yvo Weidmann

## Méthodologie et procédure

Une attention particulière dans le choix des instruments était indispensable afin que ceux-ci puissent fonctionner hors réseau électrique, idem pour l'éclairage nécessaire. Ainsi deux scanners laser tridimensionnels Focus3D X 330 de la marque FARO et des projecteurs LED à accus chacun d'une puissance de 20 Watts ont été utilisés. Pour le marquage efficace et bon marché des points fixes, des balles standard en polystyrène d'un diamètre de 7 cm ont été utilisées. (Fig. 2).

L'abondance de ces balles dans les magasins de bricolage a permis de matérialiser une grande partie du réseau de galeries à la fois. Ainsi, deux équipes de topographes pouvaient numériser simultanément. Cette manière de faire a permis une grande efficacité dans l'acquisition des données.

Chaque groupe de deux ou trois étudiants a relevé la partie du tunnel qui lui était assignée, tronçon par tronçon. La précision est de 7 mm sur une distance 10 m. Dans cette configuration, chaque scan à 360 degrés prend environ 6 minutes. Pour éviter que les opérateurs ne masquent certaines parois, les scanners étaient pilotés à distance grâce à une interface Wi-Fi (Fig. 3).

Chaque scan couvrait un tronçon d'environ 20 mètres de longueur. Pour obtenir une couverture optimale et un haut niveau de détail, le scanner était stationné tous les 3 à 5 m. Avec les chevauchements obtenus, la géométrie des galeries, la structure et le relief des parois ont pu être reproduits fidèlement. De plus, chaque point de référence a été relevé par au moins trois scans différents. Il en résulte une grande cohérence des scans individuels par rapport au modèle complet.

La figure 4 montre schématiquement le déroulement de la numérisation à partir de plusieurs stations fixes :

1. Les points de référence (vert) de la mensuration de base sont matérialisés avec des balles en polystyrène. Ces points ne sont pas visibles entre eux.
2. D'autres balles en polystyrène définissent des points de liaisons (violet) et sont fixés sur les parois, au plafond et au sol. Le scanner (rouge) numérise la position des parois et celle de ces points de liaison.
3. Le scanner est déplacé d'environ 5 mètres et une nouvelle numérisation est effectuée. Ainsi sont mesurés les

Fig. 2: Scanner, Scheinwerfer und Verknüpfungspunkte im gefluteten Abschnitt der Stollenanlage.

Fig. 2: Scanner, projecteurs et points de référence dans la section inondée du réseau de galeries.



Photo: Yvo Weidmann

Fig. 3: Bedienung des Scanners via WiFi von einem Mobilphone.

Fig. 3: Commande du scanner à distance via le Wifi d'un téléphone mobile.

Einstellungen ca. 6 Minuten. Um eine Abschattung der Ganganlagen durch die Operateure zu vermeiden, wurden einzelne Scans über die WiFi-basierte Fernsteuerung der Scanner ausgelöst (Fig. 3).

Mit jedem Scan wurden rund 20 m Gangabschnitt erfasst. Um eine möglichst optimale Abdeckung und einen hohen Detaillierungsgrad zu erreichen, wurde die Stationierung rund alle 3 m bis 5 m wiederholt. Somit konnte die Geometrie der Gänge und die Struktur an den Stollenwänden des Stollenbaus hochgenau erfasst werden. Zudem wurden die markierten Fix- und Verknüpfungspunkte von mindestens 3 unterschiedlichen Scans erfasst. Dies führte zu einer sehr stabilen relativen Verknüpfung der einzelnen Scans zu einem Gesamtmodell.

Die nachfolgende Grafik (Fig. 4) zeigt schematisch den Ablauf des Scanvorganges über mehrere Stationen:

1. Die Passpunkte (grün) der Grundlagenvermessung sind mit Styroporkugeln signalisiert. Sie besitzen keine Sichtverbindung untereinander.
2. Es werden weitere Styroporkugeln als Verknüpfungspunkte (violett) in den zu scannenden Gangabschnitten an den Wänden, der Decke und am Boden montiert. Der Scanner (rot) erfasst mit einzelnen Messungen die Wände und die Verknüpfungspunkte.
3. Der Scanner wird um rund 5 Meter verschoben und es wird eine weitere Messung durchgeführt. Die bereits vorgängig gemessenen und neue Verknüpfungspunkte werden neben der Wandgeometrie erneut vermessen.
4. Der Scanner wird wieder um rund 5 Meter verschoben. Die weitere Messung deckt zum einen die bestehenden und neuen Verknüpfungspunkte und die Gangeometrie ab. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis sämtliche Gangabschnitte durch den Scanner erfasst wurden.
5. Alle Verknüpfungs- und Passpunkte werden zusammen mit den Scannerstandorten in eine umfassende Triangulation integriert. Mit der Berechnung aller Unbekannten des Scanners (Koordinaten der Verknüpfungspunkte und der Scannerstandorte sowie der Orientierung in allen 3 Achsen) durch die Triangulation lassen sich die einzelnen Scans hochgenau zusammenfügen. Zudem wird das gesamte 3D-Modell an das Koordinatennetz der realen Welt angehängt.

Für die Berechnung der Mittelpunktskordinaten der Verknüpfungspunkte, respektive die Übertragung der bekannten Koordinaten der Passpunkte, wird das Prinzip der Kugelgleichung (Fig. 5) angewendet:

1. Die Kugeln werden an den Passpunkten oder frei im Raum (Verknüpfungspunkte) platziert.
2. Der Scanner misst eine unbekannte Anzahl von Punkten auf den Kugeln.
3. Die einzelnen Messungen auf der Kugel werden als Sphäre erkannt.
4. Über die Kugelgleichung werden die Koordinaten des Mittelpunktes bestimmt.

Im Rahmen der gesamten 3D-Aufnahme der rund 300m Stollenanlage wurden an 156 Stationen einzelne Scans durchgeführt. Zusammen mit den ebenfalls durch den FARO Focus3D erfassten Fotografien wurde eine totale Rohdatenmenge von rund 20 GB gewonnen.

Um eine Verknüpfung der Stollenanlagen mit der aktuellen Oberfläche zu erlangen, wurden durch zwei

points de liaisons déjà mesurés sous un autre angle, de nouveaux points de liaisons ainsi que les parois environnantes.

4. Le scanner est à nouveau déplacé de cinq mètres environ. De même, le nouveau scannage numérise des points de référence existants, de nouveaux points et la géométrie. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que tout le tronçon soit couvert par le scanner.
5. Tous les points de référence, les points de liaison et les emplacements du scanner sont intégrés dans une triangulation globale. En résolvant toutes les inconnues mathématiques (coordonnées des points de référence et emplacements du scanner ainsi que l'orientation tridimensionnelle), les différents scans peuvent être assemblés précisément. En outre, le modèle 3D est intégré dans le réseau de coordonnées extérieures (suisse ou mondial).

Pour calculer les coordonnées du centre des points de liaison (balle en polystyrène), respectivement pour reprendre les coordonnées des points de référence, l'équation de la sphère est appliquée (Fig. 5):

1. Les sphères sont placées soit sur les points de référence soit, pour les points de liaisons, librement.
2. Le scanner mesure un nombre quelconque de points sur les sphères.
3. Les divers points mesurés sont reconnus comme appartenant à une sphère.
4. Par équation, les coordonnées du centre de la sphère/balle sont déterminées.

Le relevé tridimensionnel d'environ 300 m de galeries a nécessité 156 stations de scannage individuelles. Ces relevés, couplés aux images photographiées également par le scanner FARO Focus3D, représentent près de 20 Go de données brutes.

Le lien entre les mesures dans les galeries et la surface a été réalisé grâce à deux puits verticaux existants (Fig. 7). L'un des puits donne sur la place de la gare avec connexion au réseau de la mensuration officielle, l'autre se trouve dans un parking souterrain sous la place de la gare. Ces liaisons sont très utiles pour vérifier la qualité des relevés, mais permettent également une visualisation attrayante pour le musée.

## Traitement et résultats

### Positionnement des scans

Immédiatement après le relevé des scans, et à autant de stations possible, un traitement et un positionnement grossier ont été faits sur place. Ceci pour s'assurer que le tronçon a été intégralement numérisé avec un recouvrement suffisant pour garantir l'assemblage ultérieur des différentes numérisations. Le traitement complet a été effectuée avec le logiciel Trimble Real Works v9.1.1.336. Le positionnement des scans, et conjointement le géoréférencement du nuage de points 3D, ont été effectués sur la base des boulons et des points fixes de la topographie précédente. Par ailleurs, toutes les balles en polystyrène ont soit été détectées automatiquement soit indiquées manuellement, ceci dans le but d'augmenter la fiabilité et la précision du positionnement. En définitive, une précision globale de l'ordre de quelques centimètres a pu être atteinte, ceci dans chacune des trois dimensions.



Fig. 4: Ablauf der 3D-Vermessung eines Stollenabschnittes mit Passpunkten (grün), Verknüpfungspunkten (violett) und Messstationen (rot).

Fig. 4: Processus de numérisation 3D d'un tronçon de galerie avec des points de référence (vert), des points de liaison (violet) et des stations de scannage (rouge).

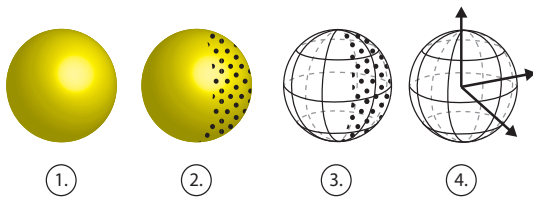


Fig. 5: Berechnung der Mittelpunktkoordinaten der verwendeten Styroporkugeln.

Fig. 5: Calcul des coordonnées du centre des balles en polystyrène.

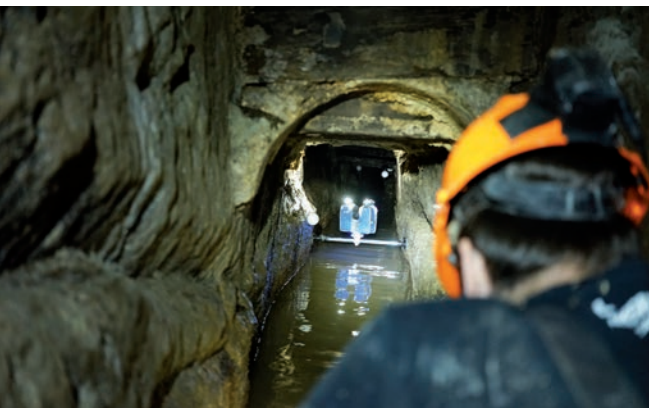
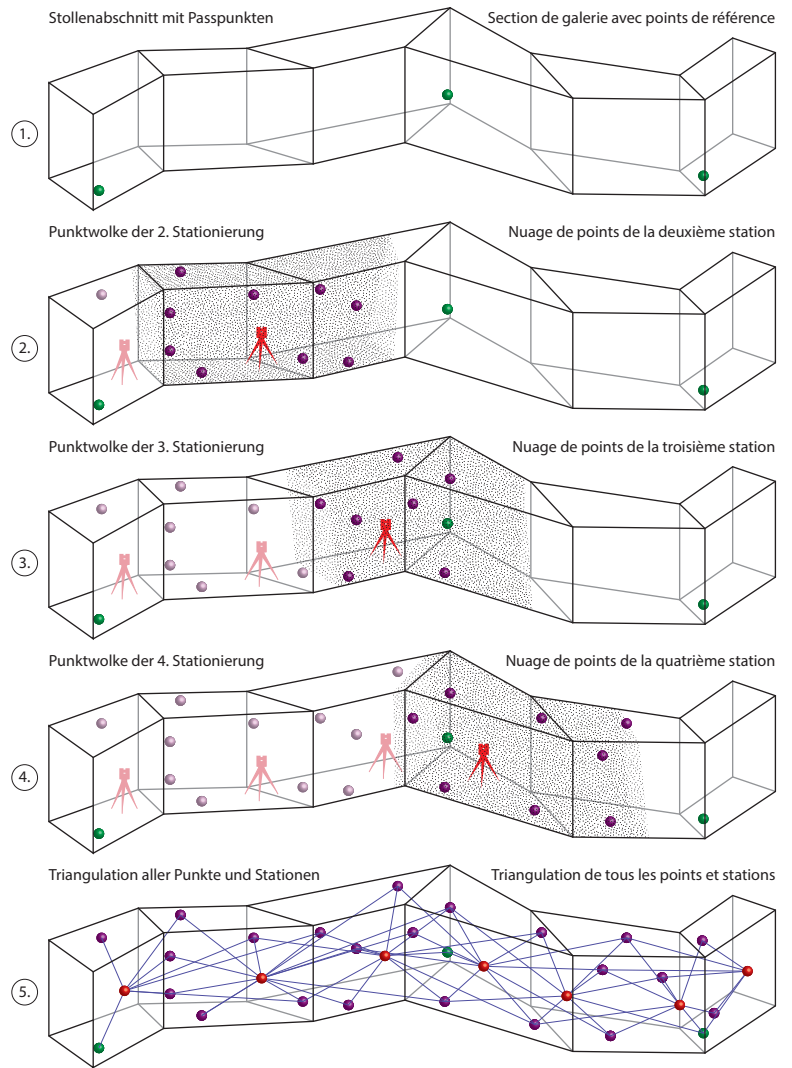


Photo: Yvo Weidmann

Fig. 6: Scan der niedrigen und wasserführenden Passagen. In kleinen Gangabschnitten mussten die Verknüpfungspunkte mit grosser Sorgfalt gesetzt werden. Zwischen den einzelnen Scans durften diese nicht verschoben werden.

Fig. 6: Scannage d'une section basse et aquatique. Dans les petites galeries, les points de liaison doivent être fixés avec grand soin. Ces points ne doivent pas bouger entre deux scans.



Photo: Yvo Weidmann

Fig. 7: Verknüpfung der Vermessung der Stollenanlage mit der Oberfläche durch Vertikalschächte. Die drei Verknüpfungspunkte am Schachtkopf garantieren eine zuverlässige Verknüpfung der unter- und oberirdischen Vermessung.

Fig. 7: Liaison entre la topographie des galeries et la surface par un puits vertical. Les trois points de liaisons placés en tête de puits garantissent un lien fiable entre les mesures souterraines et extérieures.

bestehende Vertikalschächte Anschlussmessungen durchgeführt (Fig. 7), zum einen beim Bahnhofplatz mit Anschluss an das Netz der amtlichen Vermessung und zum anderen in einer Tiefgarage unter dem Bahnhofplatz. Diese Anschlussmessungen dienen zur Qualitätskontrolle der Vermessung, ermöglichen aber auch eine sehr attraktive Visualisierung für das Museum.

## Auswertung und Resultate

### Co-Registrierung der Scans

Direkt nach der Erfassung der Scans wurden bereits vor Ort so viele Stationen wie möglich ausgewertet und grob orientiert, um die Vollständigkeit der Stollenaufnahme sicherzustellen und zu garantieren, dass sich die Scans später auch miteinander verknüpfen lassen. Die komplette Auswertung wurde mit der Software Trimble Real Works v9.1.1.336 durchgeführt. Die Orientierung der Scans und damit verbunden die absolute Georeferenzierung (Lagerung) der 3D-Punktwolke erfolgte über die bereits im Stollen vorhandenen 3D-Fixpunktbolzen. Zusätzlich wurden sämtliche in den Scans sichtbaren Styroporkugeln detektiert oder manuell angemessen, um Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Scanorientierungen zu steigern. So konnte schlussendlich eine dreidimensionale Gesamtgenauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht werden.

Nachdem sämtliche Scans georeferenziert waren, umfasste das Gesamtprojekt 4 Milliarden Punkte. Deshalb wurde in einem nächsten Schritt die Punktwolke einheitlich auf ein Zentimeterraster gefiltert und danach manuell bereinigt. Vor allem streuende Punkte durch Wasserreflexionen mussten gelöscht werden. Dadurch wurde eine Reduktion auf 59 Millionen Punkte erreicht, ohne dabei eine signifikante Qualitätseinbuße in Kauf nehmen zu müssen. Diese texturierte georeferenzierte 3D-Punktwolke diente als Ausgangslage, um nachfolgende Produkte daraus ableiten zu können.

### Abgeleitete Produkte

Aus der Punktwolke konnte nun basierend auf dem bestehenden Fixpunktnetz, aber mit einer völlig unabhängigen Technologie, wiederum der Grundriss der Stollenanlage berechnet werden. Erfreulicherweise war ein Grossteil der Stollenverläufe praktisch deckungsgleich zur klassischen Vermessung. Die Differenzen lagen im Bereich von wenigen Zentimetern. Weiter wurden Produkte wie Quer- und Höhenprofile in Interessensbereichen (z.B. Wasserabflüsse) generiert. Zudem wurden über das gesamte Stollensystem Höhenschnitte gelegt, da für viele konkrete Anwendungsfälle (z.B. Wasserstandszenarien) von konkretem Interesse ist, welche Punkte sich auf der gleichen Höhe befinden (Fig. 9).

### Virtueller Panoramarundgang

Als weiteres Produkt wurden Panoramafotografien an unterschiedlichen Standorten im Stollensystem erstellt. Diese 360-Grad-Panoramas basieren auf einer Vielzahl von Spiegelreflexkameraaufnahmen einer Nikon D7000, welche unter der Verwendung eines „Seitz Roundshot VR Drive“ Nodalpunktadapters durchgeführt wurden. Aus rund 80-100 Einzelbildern pro Standort wurden vollsphärische Panoramen prozessiert, welche in einen Panoramaviewer



Fig. 8: Fortlaufende Montage des Scanners (mit spezieller Halterung für den Gebrauch in schmalen Stollen) und der Verknüpfungspunkte.

Fig. 8: Mise en place des points de liaisons (balles en polystyrène) et du scanner sur une station au moyen d'un support particulier adapté aux galeries étroites.

Après avoir géo-référencé tous les scans, l'ensemble du projet représentait 4 milliards de points. Ensuite, le nuage de points a été filtré uniformément sur une grille d'un centimètre, puis a été ajusté manuellement. En particulier, des points éparpillés à cause des reflets dans l'eau ont été éliminés. Ainsi, une réduction à 59 millions de points a été atteinte sans provoquer une perte significative de la qualité du levé. Ce nuage de points 3D avec texture géocodée a servi de point de départ pour obtenir les résultats suivants.

### Résultats dérivés

Le nuage de points, basé sur la topographie précédente, a permis à son tour une nouvelle topographie des plans et coupes, avec une technologie différente et indépendante. Heureusement, la plupart des profils coïncident à la topographie traditionnelle. Les différences étaient de l'ordre de quelques centimètres. Par la suite, ont été générés des documents tels que les profils transversaux et coupes développées dans des zones d'intérêt particulier (par exemple pour les écoulements d'eau). En outre, des courbes de niveau ont été ajoutées sur l'ensemble du réseau de galeries, car pour de nombreuses applications, il est intéressant de connaître les points situés au même niveau (par exemple pour simuler un niveau d'eau) (Fig. 9).

### Visite panoramique virtuelle

En différents endroits dans les galeries, des panoramas photographiques ont été réalisés. Ces panoramas à 360 degrés ont été créés à partir de nombreuses photos de l'appareil reflex Nikon D7000, lequel était monté sur un trépied panoramique « Seitz Roundshot VR Drive ».

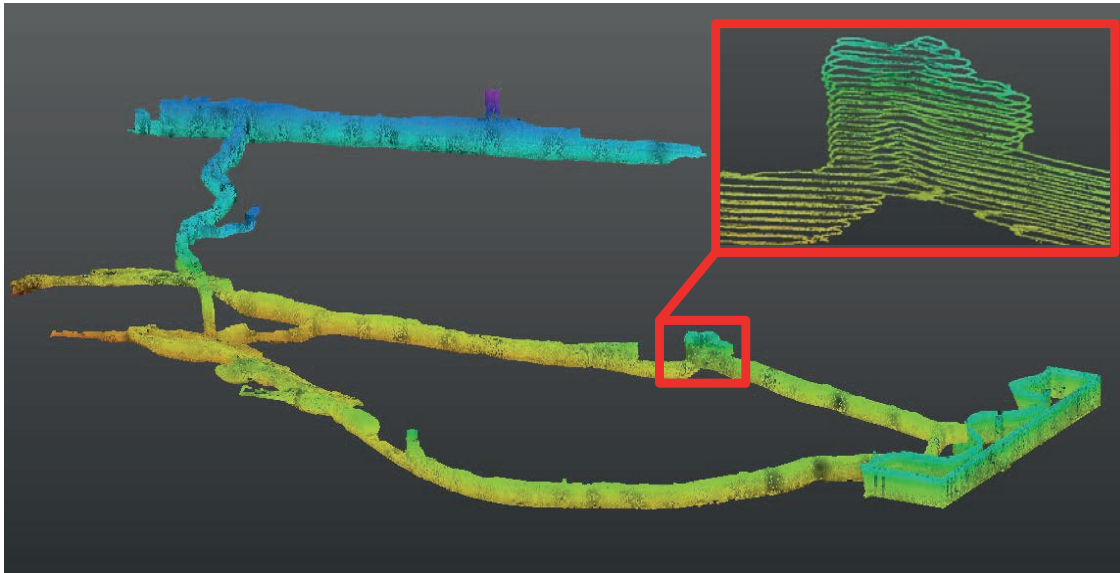


Fig. 9: Höhenschnitte der Stollenanlage.

Fig. 9: Courbes de niveau dans les galeries.

mit HTML / CSS und JavaScript implementiert wurden (Fig. 10). In diesem Webviewer ist es möglich, den Stollen virtuell zu begehen und das Sichtfeld punktuell komplett frei zu bewegen. Insgesamt wurden so 14 interessante Standorte im erfassten Bereich des Stollens abgelichtet. Da Besucher des Museums nur einen sehr kleinen Teil des Stollens selbst begehen können, ist die virtuelle Begehung des Stollens via Tablet, ohne sich dabei schmutzig zu machen, sicher eine willkommene Ergänzung für das Stadtmuseum Aarau und den Besuch im „Aufschluss Meyerstollen“.

## Fazit

Aus technischer Sicht konnte mit diesem Projekt gezeigt werden, dass eine 3D-Vermessung von komplexen und unterirdischen Räumen mit einer hohen Auflösung und Genauigkeit möglich ist. Die aktuelle Entwicklung bei den 3D-Scannern und Akkumulatoren ermöglicht eine immer grössere Autonomie des Instrumentariums.

Die Erfassung solcher Räume in der gewählten Auflösung bedingt ein sehr gutes Datenmanagement. Die hohe Auflösung bietet aber auch ein grosses Potential für weitere und neuartige Auswertungs- und Darstellungsmethoden.

Dankbarer Abnehmer des 3D-Modells und der daraus abgeleiteten Produkte ist neben dem Stadtmuseum Aarau und der Interessensgemeinschaft Meyer'sche Stollen auch die Sektion Gewässer des Stadtbauamts Aarau. Erstmals steht ihnen im gesamten Stollensystem nördlich des Bahnhofs Aarau auch die Höheninformation als enorm wichtige Komponente in einer extrem hohen Dichte und Qualität zur Verfügung. Daraus lassen sich Wasserverläufe studieren, um einen besseren Wasserdurchfluss zu ermöglichen oder mittels Höhenkurven Wasserstände im Stollen zu simulieren.

Für die Höhlenforschung dürfte die vorgestellte Methodik nur in seltenen und sehr speziellen Fällen anwendbar sein. Die Heterogenität der Ganganlagen von Karsthöhlen erfordern ein Mehrfaches an Scanstandorten, um ein vollständiges 3D-Modell mit den oben genannten Auflösungen zu erstellen. Eine Ablösung der klassischen Spieläometrie und Speleografie durch diese Methode wird

Grosso modo, 80 à 100 photographies étaient faites par emplacement pour générer un panorama sphérique complet. Ces panoramas ont été intégrés dans un navigateur web, en utilisant les technologies HTML, CSS et JavaScript. Avec cette implémentation, on peut parcourir virtuellement les galeries et choisir son champ de vision de manière complètement libre (Fig. 10).

Au total, 14 points dignes d'intérêt ont été ainsi photographiés dans les parties documentées de l'ouvrage. Les visiteurs du musée ne pouvant accéder qu'à une très petite partie des souterrains, la visite virtuelle permet de découvrir bien plus de galeries, via une tablette, tout cela sans de se salir! C'est indéniablement un plus pour le Musée de la ville d'Aarau et son annexe « Aufschluss Meyerstollen ».

## Conclusion

Techniquement, ce projet démontre qu'il est possible de mesurer en trois dimensions des volumes souterrains complexes avec une haute résolution et une grande précision. Le développement actuel des scanners 3D et des batteries permet une plus grande autonomie des appareils.

L'enregistrement de ce type de volumes avec la résolution retenue nécessite un très bon traitement des données. Mais cette haute résolution offre un grand potentiel pour des analyses innovantes et des représentations futuristes.

Outre le Musée de la ville et la Communauté d'Intérêt des Galeries Meyer, le service des eaux et d'urbanisme de la ville d'Aarau sont des utilisateurs reconnaissants envers ce modèle 3D. Pour la première fois, celui-ci dispose des plans complets des galeries situé au nord de la gare d'Aarau avec les très importantes informations d'altitude, ceci avec une résolution extrêmement dense et précise. Cela permet d'étudier les écoulements des eaux, ce qui améliorera la gestion de ceux-ci, et de simuler les niveaux d'eau dans les galeries, au moyen des courbes de niveau.

Pour la spéléologie, la méthodologie présentée ici est applicable uniquement dans des cas exceptionnels et très spécifiques. L'hétérogénéité des profils dans les grottes naturelles requiert une multiplication des stations de scan-nage pour une numérisation complète, recoins inclus.





Fig. 11: Oben: Installation des Scanners auf der Spezialanfertigung zusammen mit den benötigten Scheinwerfern. Gut zu erkennen der Passpunkt an der rechten Stollenwand.

Fig. 11: Installation du scanner accouplé aux spots nécessaires aux mesures. Sur la paroi de droite, on voit un point de référence.

in den kommenden Jahren kaum ein Thema sein. Die topografische Diskretisierung der Ganganlagen für die Planerstellung ist weiterhin noch die Aufgabe der Speläografen. In Fällen, wo hochgenaue Aufnahmen benötigt werden, z.B. bei Bauprojekten, ist diese Methodik aber sicher eine prüfungswerte Variante.

Alternativ stehen zudem heute Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie zu Verfügung. Diese erlebt momentan eine Renaissance. Lichtempfindliche Digitalkameras und neue Algorithmen zur Berechnung der äusseren Orientierung der Bildhauptpunkte mittels Bündelblockausgleichung erlauben ganz neue Wege bei der Anwendung der Photogrammetrie. Die aus der Bildanalyse resultierende Punktwolke und das texturierte Maschenmodell lassen sich durchaus mit den Resultaten der Scanner-Methodik vergleichen. ◆

### Literatur / Bibliographie

- GNÄGI, Ch. (2009): Hochgelegene
- GENNER, P. (2011/2012): Von Aarau nach Bayern – Auswanderung und Niedergang der Unternehmerfamilie Meyer. Aarauer Neujahrsblätter, 2011 und 2012.
- EVERS, E.A. (1815): Vater Johann Rudolf Meyer, Bürger von Aarau: eine Denkschrift. Aarau 1815.
- Historisches Lexikon der Schweiz: [www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D24701.php](http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D24701.php) und [www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D29127.php](http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D29127.php)



Fig. 10: Ausschnitt aus dem virtuellen Rundgang an einem Standort mit vollsphärischem Panorama.

Fig. 10: Extrait de la visite virtuelle d'une galerie avec panorama sphérique complet.



Fig. 12: Montage der Verknüpfungspunkte. Diese durften zwischen den Scans nicht mehr bewegt werden!

Fig. 12: Installation d'un point de liaison. Ceux-ci ne devaient pas être déplacés entre deux scans!

Un remplacement des méthodes classiques de topographie souterraine par le procédé mentionné ci-dessus n'est pas envisageable dans les prochaines années. La schématisation de la topographie des galeries pour l'élaboration de plans reste encore la tâche du spéléographe. Dans les cas où les mesures de haute précision seraient nécessaires, par exemple dans des projets de construction, cette méthode est une variante qui mérite d'être examinée.

Comme alternative, il existe actuellement des méthodes de photogrammétrie à courte distance. Ces dernières, portées par de nouvelles technologies, connaissent actuellement un regain d'intérêt. Avec, d'une part, des appareils photos numériques plus performants en basse lumière et, d'autre part, avec de nouveaux algorithmes d'analyse d'image pour déterminer la position de points marquants, ces méthodes ouvriront de nouvelles applications de la photogrammétrie. Le nuage de points et les structures en mailles texturées résultants de tels analyses d'images sont comparables à la méthode de scannage présentée ici. ◆

Photos: Yvo Weidmann