

Lötschberg Base Tunnel, Second Tube: Automated Cost Optimization of the Inner Lining

Automatisierte Kostenoptimierung des Innengewölbes der zweiten Röhre des Lötschberg-Basistunnels

To realize the integrated synchronized timetables in long-distance traffic and to increase the capacity in freight traffic between Brig and Bern, the two-lane extension of the Lötschberg Base Tunnel (LBT) is necessary. This demands the installation of an inner lining over 14 km in the second LBT tube. Considering the excavation profile available, a skillful choice in the sequence of formwork carriage geometries (FCGs) can lead to optimization of the concrete volume to be installed, the feasibility of the build and the construction sequences. In the sense of a “proof of concept”, mathematical optimization algorithms are used to find a cost-optimal sequence of FCGs for a defined tunnel section. This article describes the chosen approach and the results of the cost optimization.

Dr.-Ing. JÖRG MEIER, Senior Projektingenieur,

LAURENT PITTELOUD, Leiter Geotechnik, Gruner AG, BU SDNW, Abteilung Geotechnik, Basel, Switzerland/Schweiz

Dr.-Ing. STEFAN IRNGARTINGER, Projektleiter Bau und Leiter Projektsteuerung, BLS Netz AG, Alptransit, Bern, Switzerland/Schweiz

Für die Realisierung des Halbstundentakts im Fernverkehr und die Kapazitätserhöhung im Güterverkehr zwischen Brig und Bern ist der durchgängige zweispurige Ausbau des Lötschberg-Basistunnels (LBT) erforderlich. Hierfür ist in der aktuell mit Spritzbeton gesicherten zweiten Röhre auf 14 km Länge ein Innengewölbe einzubauen. Durch die geschickte Wahl der Abfolge von Schalwagengeometrien soll eine Optimierung sowohl in Bezug auf das einzubauende Betonvolumen als auch auf die Baubarkeit bzw. die Bauabläufe erfolgen. Im Sinne eines Proof-of-Concepts wurden für einen abgegrenzten Tunnelabschnitt mathematische Optimierungsalgorithmen für die Ermittlung einer kostenoptimalen Abfolge von Schalwagen-Geometrien eingesetzt. Dieser Beitrag beschreibt die gewählte Vorgehensweise und die Resultate der Kostenoptimierung.

1 Project Overview

The Lötschberg Baseline – comprising the 34.6 km long Lötschberg Base Tunnel (LBT) and the 2.6 km long Engstlige tunnel in the north – has been in operation since 2007. Due to limited financial resources during construction, the Lötschberg Baseline could not be completed over its entire length with two separate single-track tubes.

Currently, only the east tubes are in continuous operation (**Fig. 1**). The west tube of the LBT has been upgraded in the south over almost 14 km between the Raron south portal and the Ferden emergency stop. However, from the Ferden switch point to the Adelrain switch point (at the Frutigen portal), the tunnel can only be used as a single track for about 20 km. Between Ferden and Mitholz, the west tunnel has been excavated for about 14 km and secured with auxiliary construction measures. This so-called shell tunnel is currently used for rescue, evacuation and maintenance. Between Mitholz and the Adelrain switch point, the west tunnel has not yet been excavated over a distance of about 6 km.

As part of the 2035 expansion plan, the Swiss Confederation has decided to equip the existing shell structures with railway technology. In the LBT, the temporary invert

1 Projektüberblick

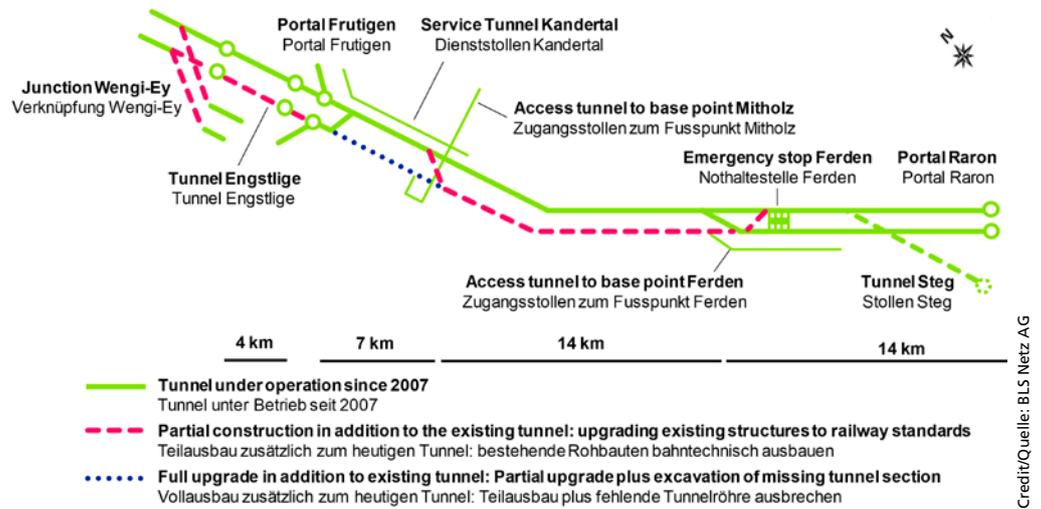
Die Lötschberg-Basisstrecke (LBS) – bestehend aus dem insgesamt 34.6 km langen Lötschberg-Basistunnel (LBT) und dem im Norden vorgelagerten 2.6 km langen Tunnel Engstlige – ist seit 2007 in Betrieb. Aufgrund begrenzter finanzieller Mittel während der Bauzeit konnte die LBS nicht über die gesamte Länge mit zwei voneinander getrennten Einspurröhren fertiggestellt werden.

Derzeit sind jeweils nur die Oströhren durchgehend unter Betrieb (**Bild 1**). Die Weströhre des LBT ist im Süden über knapp 14 km zwischen dem Südportal Raron und dem Fußpunkt Ferden bahntechnisch ausgebaut. Ab der Spaltungsweiche Ferden ist der Basistunnel aber bis zur Spaltungsweiche Adelrain (beim Portal Frutigen) über etwa 20 km nur einspurig befahrbar. Zwischen den Fußpunkten Ferden und Mitholz ist die Weströhre auf rund 14 km ausgebrochen und mit Bauhilfsmaßnahmen gesichert. Dieser sogenannte Rohbautunnel dient derzeit für Rettung, Evakuierung und Erhaltung. Zwischen dem Fußpunkt Mitholz und der Spaltungsweiche Adelrain ist die Weströhre auf etwa 6 km noch nicht ausgebrochen.

Im Rahmen des Ausbaus 2035 hat die Schweizerische Eidgenossenschaft beschlossen, die bestehenden Rohbauten bahntechnisch auszurüsten. Im LBT muss hierfür die provisorische Sohle ausgebrochen und teilweise durch ein

1 Layout of the Lötschberg Base Tunnel

Übersichtsdarstellung des Lötschberg-Basistunnels



Credit/Quelle: BLS Netz AG

must be excavated and partially replaced by an arched invert. After the installation of the sealing and inner lining, the actual railway equipment (slab track, overhead contact line, etc.) will be installed. The LBT will be extended while the neighbouring tube remains in service, so that the tube to be extended will also function as a rescue route. Construction is scheduled to start in 2025; the construction time for the main works is estimated at six to eight years.

The LBT has been excavated largely by different consortia using drill and blast. A 3D scan of the tunnel surface of the carcass section was taken to gain precise knowledge of the actual condition. This revealed deviations

Sohlgewölbe ersetzt werden. Nach dem Einbau von Tunnelabdichtung und Innenschale wird die eigentliche bahntechnische Ausrüstung (Feste Fahrbahn, Fahrleitung, etc.) realisiert. Der Ausbau des LBT folgt unter laufendem Betrieb der Nachbarröhre, so dass die auszubauende Röhre gleichzeitig auch als Rettungsröhre fungiert. Der Baustart ist ab 2025 geplant; die Bauzeit der Hauptarbeiten wird auf sechs bis acht Jahre prognostiziert.

Der LBT ist durch unterschiedliche Konsortien weitgehend im Sprengvortrieb aufgefahren worden. Zur genauen Kenntnis des Ist-Zustands wurde ein 3D-Scan der Tunnel-Oberfläche des Rohbautunnels aufgenommen. Demnach ergeben sich im nördlichen Abschnitt Abweichungen von der geometrischen



Credit/Quelle: BLS Netz AG, Gruner AG

2 Photo from inside the tunnel (left) and visualisation of the triangular meshing from the 3D scan (right)

Foto aus dem Tunnelinneren (links) und Visualisierung der Dreiecksvernetzung des 3D-Scans (rechts)

from the geometric objective line of up to 20 cm (over- and under-profile) in the northern section; in the southern section, there is an overprofile of up to 80 cm (**Fig. 2**). BLS has decided to optimise the normal profile of the inner vault: This is to be widened in sections with a large overprofile to minimise the volume of statically unnecessary additional concrete. The commissioned general planner solved this optimisation task on the basis of the 3D data primarily with conventional, two-dimensional analogue engineering methods. To verify the existing solutions, BLS commissioned a further development on a mathematical basis for a limited section (km 31.500 to km 32.000) in order to investigate the use of mathematical optimisation algorithms for the automated determination of a cost-optimal sequence of formwork carriage geometries in the sense of a proof-of-concept. The results of this proof-of-concept are described below.

2 Motivation

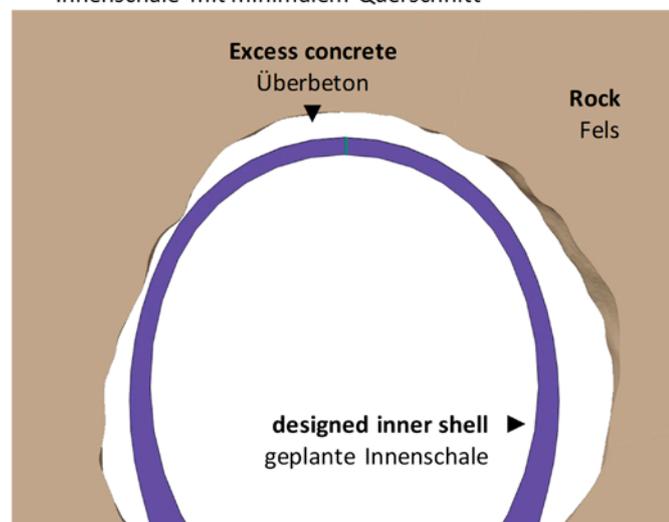
In compliance with static boundary conditions, the extension of the inner lining is to be optimised with regard to various considerations: These include good constructability with reasonable construction sequences, minimisation of the concrete volume used and maximisation of the tunnel cross-section (a larger free cross-sectional area reduces air resistance and increases the usable structural space for future adaptations to the tunnel vault. The approach followed here is to minimise the total costs for the realisation of the inner vault as an optimisation goal and to represent all influencing factors in terms of their financial costs.

Soll-Linie von bis zu 20 cm (Über- und Unterprofil); im südlichen Abschnitt liegt Überprofil bis zu 80 cm vor (**Bild 2**). Die BLS hat sich für eine Optimierung des Normalprofils des Innengewölbes entschieden: Dieses soll in Abschnitten mit großem Überprofil so aufgeweitet werden, dass die Kubatur an statisch nicht erforderlichem Mehrbeton minimiert wird. Der beauftragte Gesamtplaner hat diese Optimierungsaufgabe auf Basis der 3D-Daten im Wesentlichen mit klassischen, zwei-dimensional-analogen Ingenieur-Methoden gelöst. Zur Verifizierung der vorliegenden Lösungen hat die BLS eine Weiterentwicklung für einen abgegrenzten Abschnitt (km 31,500 bis km 32,000) auf mathematischer Basis beauftragt, um im Sinne eines Proof-of-Concepts den Einsatz von mathematischen Optimierungsalgorithmen für die automatisierte Findung einer kostenoptimalen Abfolge von Schalwagen-Geometrien zu untersuchen. Die Ergebnisse dieses Proof-of-Concepts sind im Folgenden beschrieben.

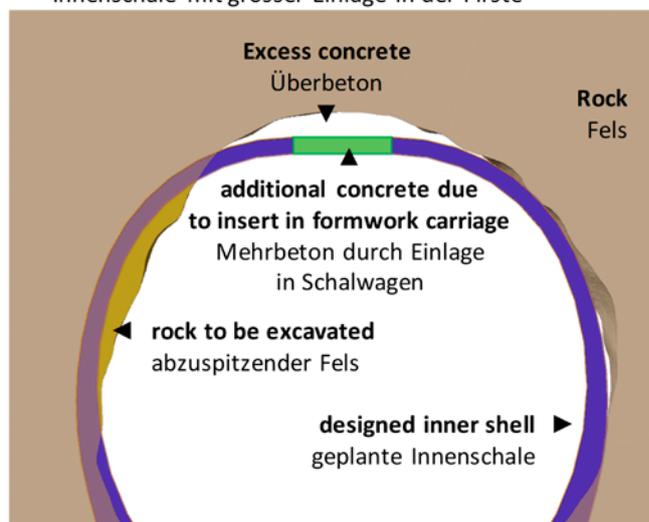
2 Motivation

Unter Einhaltung statischer Randbedingungen soll die Ergänzung der Innenschale in Bezug auf mehrere Gesichtspunkte hin optimiert werden: Zu diesen gehören eine gute Baubarkeit mit sinnvollen Bauabläufen, die Minimierung des verwendeten Betonvolumens und die Maximierung der Querschnittsfläche des Tunnelquerschnitts (eine größere freie Querschnittsfläche verringert den Luftwiderstand und vergrößert den bautechnischen Nutzraum für zukünftige Anpassungen am Tunnelgewölbe). Der hier verfolgte Ansatz strebt die Minimierung der Gesamtkosten für die Realisierung des Innengewölbes als Optimierungsziel an; alle Einflussfaktoren sollen dabei über ihre monetären Kosten repräsentiert werden.

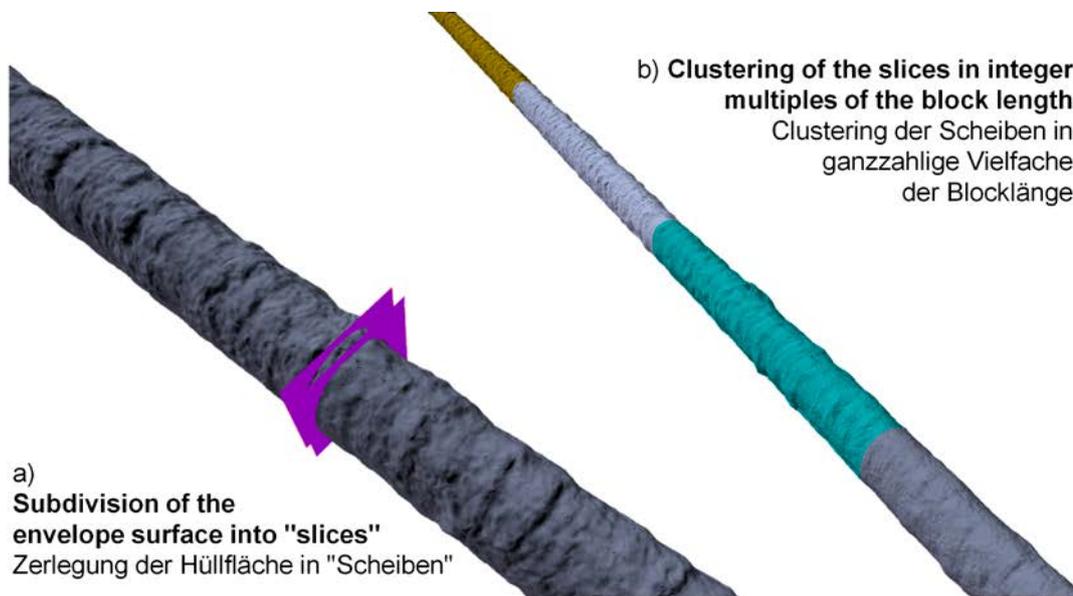
a) Inner shell with minimal cross-section
Innenschale mit minimalem Querschnitt



b) Inner shell with large insert in the ridge
Innenschale mit grosser Einlage in der Firste



3 Schematic section with two extreme values for the width of the insert
Schemaschnitt mit zwei Extremwerten für die Breite der Einlage



4 Visualisation of the concept of subdivision of the enveloping into slices (a) and the subsequent clustering (b)

Visualisierung des Konzepts der Zerlegung der Hüllfläche in Scheiben (a) und dem nachfolgenden Clustering (b)

Credit/Quelle: BLS Netz AG, Gruner AG

The optimisation is based on the point cloud of a laser scan reduced to a point spacing of 5–10 cm and geometric specifications for the formwork carriage geometry. According to these specifications, the geometry of the formwork carriage can only be changed by a horizontal insert in the apex, allowing the parament formwork to shift horizontally and symmetrically to the left and right (Fig. 3).

3 Principles for the Design of the Approach

The following principles were considered when developing the solution design:

- **Modularisation:** The task is divided into manageable and clearly separated work steps. Input and result variables have, if possible, comprehensible or "tangible" units (monetary amounts are perceived as such, too).
- **Verifiability:** Due to modularisation and the focus on quantities with "physical significance", each step can be validated.
- **Automatability:** The work steps should preferably be easy to automate. This requirement follows in particular in view of a possible later optimisation of the entire 14 km of tunnel.
- **Scalability:** To enable a more efficient optimisation of longer tunnel sections, the demand for scalability arises. If possible, the numerical effort should only increase linearly with the tunnel length. This also results in the need for the best possible parallelisability (independent simultaneous computability of numerically complex subtasks) and the storage of intermediate results.

In addition to these principles, the following considerations were included:

- For practical construction reasons, formwork carriage conversions should not take place too frequently and should be tied to casting section boundaries (section length chosen here: 10 m). The conversion points must be a multiple of the section length.
- Accordingly, it is sufficient to carry out the optimisation on the basis of short tunnel sections (division of the tunnel into "slices"). These slices are at first

Grundlage der Optimierung bilden die auf 5–10 cm Punktabstand reduzierte Punktwolke eines Laserscans und geometrische Vorgaben zur Schalwagengeometrie. Gemäß diesen Vorgaben ist die Geometrie des Schalwagens ausschließlich durch eine horizontale Einlage im Scheitel veränderbar, so dass sich die Paramentschalungen horizontal und symmetrisch nach links und rechts verschieben (Bild 3).

3 Grundsätze für den Entwurf der Vorgehensweise

Bei dem Entwurf des Lösungsdesigns wurden die folgenden Grundsätze berücksichtigt:

- **Modularisierung:** Die Aufgabe wird in überschaubare und klar voneinander abgetrennte Arbeitsschritte aufgeteilt. Eingangs- und Ergebnisgrößen haben nach Möglichkeit nachvollziehbare bzw. „greifbare“ Einheiten (auch Geldbeträge werden als solche wahrgenommen).
- **Prüfbarkeit:** Durch die Modularisierung und den Fokus auf Größen mit „physikalischer Bedeutung“ ist jeder Schritt validierbar.
- **Automatisierbarkeit:** Die Arbeitsschritte sollen möglichst gut automatisierbar sein. Diese Forderung folgt insbesondere mit Blick auf eine mögliche spätere Optimierung der gesamten 14 km Tunnel.
- **Skalierbarkeit:** Um eine effizientere Optimierung längerer Tunnelabschnitte zu ermöglichen, ergibt sich die Forderung nach Skalierbarkeit. Der numerische Aufwand sollte nach Möglichkeit nur linear mit der Tunnellänge anwachsen. Einhergehend ergibt sich so auch die Notwendigkeit einer möglichst guten Parallelisierbarkeit (unabhängige zeitgleiche Berechenbarkeit numerisch aufwändiger Teilaufgaben) und der Speicherung von Zwischenergebnissen.

Neben diesen Grundsätzen wurden die folgenden Überlegungen einbezogen:

- Aus baupraktischen Gründen sollen Schalwagenumbauten nicht zu häufig stattfinden und an Blockgrenzen (hier gewählte Blocklänge: 10 m) gebunden sein. Die Umbaupunkte müssen ein Vielfaches der Blocklänge sein.
- Entsprechend genügt es, die Optimierung auf der Basis von kurzen Tunnelabschnitten durchzuführen (Zerlegung

considered independently of each other (Fig. 4a). In this case, the slice thickness was set at 1 m.

- For practical construction reasons, only the placement of an insert in the ridge is permissible for the conversion of the formwork carriage, which allows a symmetrical horizontal displacement of the two halves of the formwork carriage. The width of this insert must be an integer multiple of 5 cm for each half of the formwork carriage (Fig. 3).
- Thus, there is only a (small) number of possible insert widths (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, ...) per slice.
- For each slice, the costs are estimated for all insert widths using the function f_1 .
- Based on the results of the cost function f_1 , the slices can be grouped into clusters (Fig. 4b), where the cluster lengths must be a multiple of the casting section length (chosen here: 10 m).
- For each configuration of clusters, the costs are estimated using the cost function f_2 (based on the costs from f_1).
- An (automated) optimisation algorithm is used to combine the slices into clusters, aiming to minimise the total costs.

4 Approach

4.1 Data Preparation

To enable processing in the following work steps, the available data was transferred in advance into formats that can be processed by the respective software and programme codes used:

- Conversion of the point cloud of the tunnel scan: The already reduced data of the laser scan, available in the form of (binary) LAS files (file format for the exchange of LIDAR point clouds), were converted into a text-based format containing only the coordinates of the points.
- Conversion of the tunnel axis into a polygonal chain: The tunnel axis available in CAD files was converted into a coherent three-dimensional polygonal chain.
- Addition of the normal vectors of the points of the point cloud: A "normal vector" was assigned to each point of the point cloud. The normal vector is understood here as the vector that leads from the point of the point cloud in the direction of the nearest point on the tunnel axis

4.2 Triangular Meshing of the (Current) Tunnel Outline

The freely available software "Mesh-Lab" (open source, <https://www.meshlab.net/>) is used to generate the triangle mesh from the point cloud. This software provides a filter function called "Ball Pivoting" which can be used

des Tunnels in „Scheiben“). Diese Scheiben werden zunächst unabhängig voneinander betrachtet (Bild 4a). Hier wurde die Scheibendicke mit 1 m gewählt.

- Aus baupraktischen Gründen ist für den Umbau des Schalwagens ausschließlich das Einsetzen einer Einlage in der Firste zulässig, die eine symmetrische horizontale Verschiebung der beiden Schalwagenhälften zulässt. Die Breite dieser Einlage muss je Schalwagenhälfte ein ganzzahliges Vielfaches von 5 cm sein (Bild 3).
- Somit existiert pro Scheibe nur eine (kleine) abzählbare Menge von Möglichkeiten (Einlagenbreiten von 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, ...).
- Pro Scheibe werden für alle Einlagenbreiten mittels der Funktion f_1 die Kosten abgeschätzt.
- Aufbauend auf den Resultaten der Kostenfunktion f_1 kann ein Zusammenschluss der Scheiben zu „Clustern“ erfolgen (Bild 4b), wobei die Clusterlängen ein Vielfaches der Blocklänge sein müssen (hier gewählt: 10 m).
- Für jede Konfiguration von Clustern werden mittels der Kostenfunktion f_2 die Kosten abgeschätzt (basierend auf den Kosten aus f_1).
- Für den Zusammenschluss der Scheiben zu Clustern wird ein (automatisiert laufender) Optimierungsalgorithmus eingesetzt, dessen Ziel eine Minimierung der summarischen Kosten darstellt.

4 Vorgehensweise

4.1 Datenvorbereitung

Um eine Verarbeitung in den folgenden Arbeitsschritten zu ermöglichen, wurden die zur Verfügung stehenden Daten vorab in Formate übertragen, die durch die jeweils verwendeten Anwendungen und Programmcodes verarbeitet werden können:

- Konvertierung der Punktwolke des Tunnelscans: Die in Form von (binären) LAS-Dateien (Dateiformat für Austausch von LIDAR Punktwolken) vorliegenden und bereits reduzierten Daten des Laserscans wurden in ein Text-basiertes Format konvertiert, das nur noch die Koordinaten der Punkte enthält.
- Konvertierung der Tunnelachse in einen Polygonzug: Die in CAD-Files vorliegende Tunnelachse wurde in einen zusammenhängenden dreidimensionalen Polygonzug konvertiert.
- Ergänzung der Normalenvektoren der Punkte der Punktwolke: Jedem Punkt der Punktwolke wurde ein „Normalenvektor“ zugewiesen. Als Normalenvektor wird hier der Vektor verstanden, der von dem Punkt der Punktwolke ausgehend in Richtung des nächsten Punktes auf der Tunnelachse zeigt.

4.2 Dreiecksvernetzung der (heutigen) Tunnelkontur

Für die Erzeugung der Dreiecksvernetzung der Punktwolke wird das frei verfügbare Programm „Mesh-Lab“ (Open Source,

to reconstruct a triangle mesh from a point cloud. In addition to the coordinates of the points, this filter requires the normal vectors described in section 4.1.

- After generating the meshing, various local adjustments were made manually:
- The exits to the cross passages (**Fig. 5**), which appear in the point cloud as large unmeshed openings, are closed over their entire surface.
- The ramps to the cross passages (**Fig. 5**) are removed from the model and the walls are extended vertically downwards to compensate for the missing mesh part of the ramps.

4.3 Subdivision of the Tunnel Outline Into Slices and Transfer to Volume Bodies

Based on triangular meshing, the tunnel outline is subdivided into slices. The slice width is a freely selectable parameter that should ideally be an integer multiple of the projected casting section length. For the later determination of the intersection volume etc. (Chapter 4.4), the rock volume is generated radially from the tunnel axis by means of geometric extrusion (**Fig. 6**). The subdivision into slices and the volume generation are fully automated in a specially written programme.

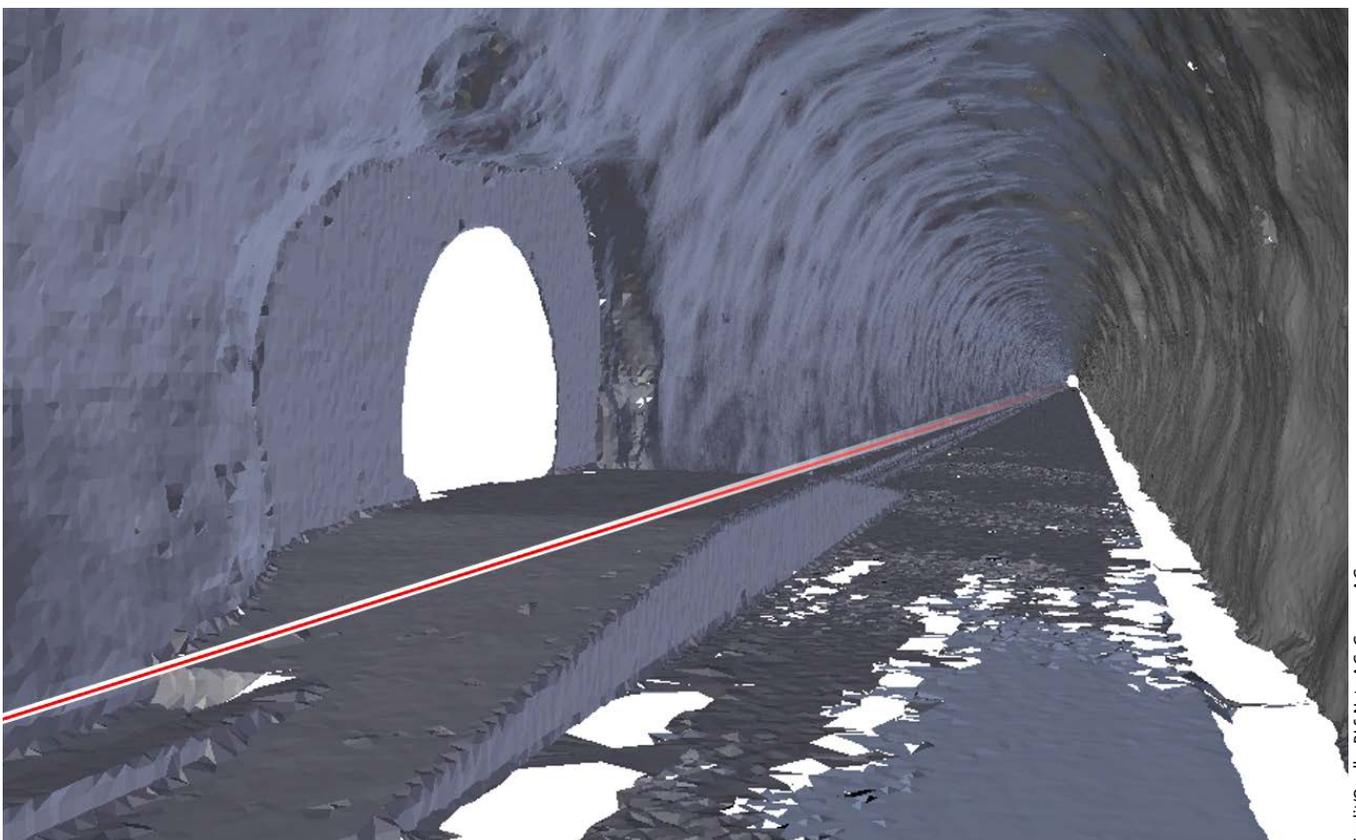
<https://www.meshlab.net/>) verwendet. Innerhalb dieses Programms steht mit dem Filter „Ball Pivoting“ eine Funktion zur Verfügung, mit deren Hilfe die Rekonstruktion einer Dreiecksvernetzung einer Punktwolke vorgenommen werden kann. Dieser Filter benötigt neben den Koordinaten der Punkte die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Normalenvektoren.

Nach der Erzeugung der Vernetzung wurden händisch verschiedene lokale Anpassungen vorgenommen:

- Die in der Punktwolke als große unvernetzte Öffnungen erscheinenden Abgänge zu den Querschlägen (**Bild 5**) werden flächig geschlossen.
- Die Rampen zu den Querschlägen (**Bild 5**) werden aus dem Modell entfernt und die Wände vertikal nach unten verlängert, um den fehlenden Netzteil der Rampen auszugleichen.

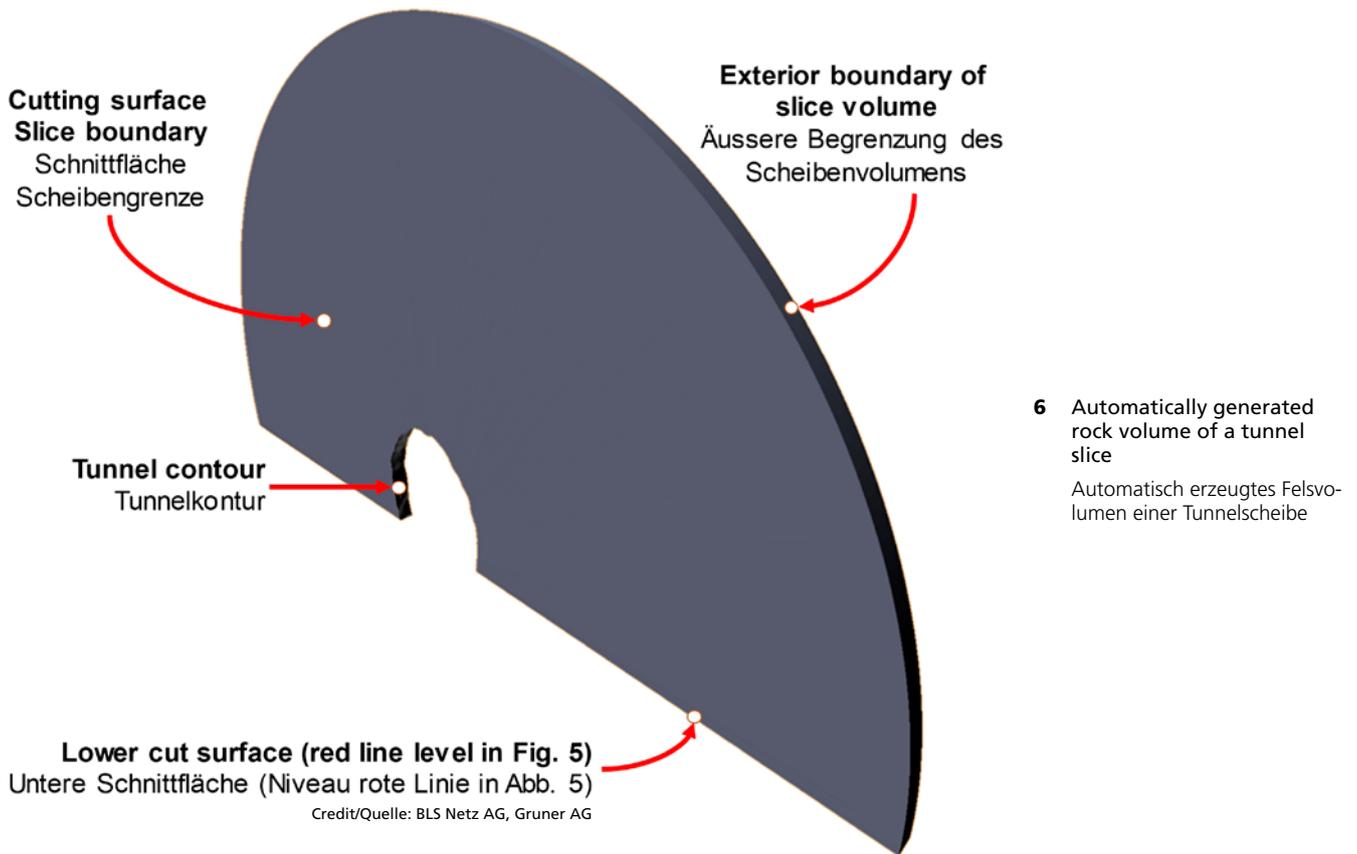
4.3 Zerlegung der Tunnelkontur in Scheiben und Überführung in Volumina

Aufbauend auf einer Dreiecksvernetzung, erfolgt eine Zerlegung der Tunnelkontur in Scheiben. Die Scheibenbreite ist hierbei ein frei wählbarer Parameter, der idealerweise ein ganzzahliges Vielfaches der projektierten Blocklänge sein sollte. Für die spätere Bestimmung der Verschnittvolumen etc. (Abschnitt 4.4) wird das Felsvolumen radial von der Tunnelachse ausgehend



5 View into the tunnel outline meshed with triangles and marking of the lower cutting edge (red line)
Blick in die mit Dreiecken vernetzte Tunnelkontur mit Markierung der unteren Schnittkante (rote Linie)

Credit/Quelle: BLS Netz AG, Gruner AG



6 Automatically generated rock volume of a tunnel slice
Automatisch erzeugtes Felsvolumen einer Tunnelscheibe

4.4 Determination of the Volumes and Outline Surfaces Overlapping With the Formwork Carriage

For the use in the objective function f_1 (Chapter 4.5), different geometric parameters are required, which change depending on the width of the insert in the formwork carriage ridge (cf. also Fig. 3): These are the parameters V_{ri} , A_{ri} and V_{ci} defined in Figure 7. To speed up the subsequent optimisation, it is advisable to temporarily save these values depending on the different insert widths for each slice.

4.5 Definition of the Objective Function f_1 : Cost per Tunnel Slice

In accordance with Figure 7, the objective function f_1 is defined as a plain sum of four cost components for the $i = 1 \dots 500$ tunnel slices. Following the principles of chapter 3, parameters and constants with "physical" relevance and relevance for tunnel construction, are used in this function. In doing so, a certain simplification of the complex cost-relevant dependencies is accepted. (e.g. assumption of a constant and geology-independent reprofiling performance of $r = 2 \text{ m}^2/\text{h}$).

4.6 Definition of the Objective Function f_2 : Costs for Clustering

The total costs calculated with the objective function f_2 contain both the costs f_1 of the $i = 1 \dots 500$ tunnel slices,

mittels geometrischer Extrusion erstellt (Bild 6). Die Zerlegung in Scheiben und die Volumenerzeugung findet vollständig automatisch in einem eigens geschriebenen Programm statt.

4.4 Bestimmung der mit dem Schalwagen überlappenden Volumina und Konturflächen

Für die Verwendung in der Zielfunktion f_1 (Abschnitt 4.5) werden verschiedene geometrische Kenngrößen benötigt, die sich in Abhängigkeit von der Breite der Einlage in der Schalwagenfirse verändern (vgl. auch Bild 3): Dies sind die in Bild 7 definierten Größen V_{ri} , A_{ri} und V_{ci} . Für eine Beschleunigung der späteren Optimierung ist es empfehlenswert, diese Werte in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einlagenbreiten für jede Scheibe zwischenspeichern.

4.5 Definition der Zielfunktion f_1 : Kosten pro Tunnelscheibe

Die Zielfunktion f_1 ist gemäß Bild 7 als einfache Summe aus vier Kostenkomponenten für die $i = 1 \dots 500$ Tunnelscheiben definiert. Den Grundsätzen von Abschnitt 3 folgend werden in dieser Funktion Größen und Konstanten mit „physikalischer“ bzw. „tunnelbaulicher“ Bedeutung verwendet. Hierbei wird eine gewisse Vereinfachung der komplexen kostenbildenden Abhängigkeiten in Kauf genommen. (z. B. Ansatz einer konstanten und geologieunabhängigen Leistung der Reprofilierung von $r = 2 \text{ m}^2/\text{h}$).

$$f_{1,i} = \sum C_{*,i} = C_{r,i} + C_{s,i} + C_{d,i} + C_{c,i}$$

using | mit:

$C_{r,i} = A_{r,i}/r \cdot C'_r$ **Reprofiling costs (due to low $V_{r,i}$ dependent on $A_{r,i}$)** | Reprofilierungskosten (wegen kleiner $V_{r,i}$ abhängig von $A_{r,i}$)

$C_{s,i} = A_{r,i} \cdot t \cdot C'_s$ **Costs of shotcrete protection** | Kosten Spritzbetonsicherung

$C_{d,i} = V_{r,i} \cdot C'_d$ **Disposal costs of the excavated material** | Kosten für Entsorgung des Ausbruchs

$C_{c,i} = V_{c,i} \cdot C'_c$ **Cost of structural concrete to be placed** | Kosten für einzubringenden Konstruktionsbeton

$V_{r,i}$ (m³) **Volume of rock or shotcrete to be demolished** | Volumen des abzubrechenden Felsens bzw. Spritzbetons

$A_{r,i}$ (m²) **Contour area to be secured by shotcrete** | neu durch Spritzbeton zu sichernde Konturfläche

$V_{c,i}$ (m³) **Volume of the structural concrete to be placed** | Volumen des einzubringenden Konstruktionsbetons

C'_r (CHF/h) **Hourly reprofiling costs** | stündliche Reprofilierungskosten

C'_s (CHF/m³) **Unit costs for shotcrete protection to be applied** | Einheitskosten für neu aufzubringende Spritzbetonsicherung

C'_d (CHF/m³) **Disposal costs of the excavated material, loosening incl.** | Entsorgungskosten des Ausbruchs, inkl. Auflockerung

C'_c (CHF/m³) **Unit cost of structural concrete to be placed** | Einheitskosten für einzubringenden Konstruktionsbeton

r (m²/h) **Performance of reprofiling, here $r = 2 \text{ m}^2/\text{h}$** | Leistung Reprofilierung, hier $r = 2 \text{ m}^2/\text{h}$

t (cm) **Thickness shotcrete protection, here $t = 5 \text{ cm}$** | Dicke Spritzbetonsicherung, hier $t = 5 \text{ cm}$

Credit/Quelle: BLS Netz AG, Gruner AG

7 Formula for calculating the objective function f_1

Berechnungsvorschrift der Zielfunktion f_1

$$f_2 = \sum_j \left(C_m + \sum_{i|l_i \in j} f_{1,i} + C_{p,j} \right) \quad \text{with } | \text{ mit} \quad C_{p,j} = \begin{cases} \frac{L_{min}-L_j}{L_{min}} \cdot C_p & \text{if } | \text{ wenn } L_j < L_{min} \\ 0 \text{ CHF} & \text{otherwise } | \text{ andernfalls} \end{cases}$$

using | mit

$f_{1,i}$ (CHF)	Value of the cost function of the i-th tunnel slice Wert der Kostenfunktion der i -ten Tunnelscheibe
C_m (CHF)	Costs for a modification of the formwork traveller Kosten für einen Umbau des Schalwagens
C_p (CHF)	Penalty costs for cluster lengths that are too short Strafkosten bei zu kurzen Clusterlängen
L_j (m)	Length of the j-th cluster Länge des j -ten Clusters
L_{min} (m)	Minimum cluster length without penalty costs Minimale Clusterlänge ohne Strafkosten

Credit/Quelle: BLS Netz AG, Gruner AG

8 Formula for calculating the objective function f_2

Berechnungsvorschrift für die Zielfunktion f_2

as well as the costs for the necessary number $j = 1 \dots n$ of formwork carriage conversions and a cluster-related penalty term. The penalty term is used to assign (purely virtual) penalty costs to solutions with cluster lengths that are too short, which also devalues these solutions with regard to the optimisation algorithm. The calculation rule is given in Fig. 8.

4.7 Clustering by Means of an Optimisation Algorithm

The previously described work steps, which are completely automated as far as necessary (and beyond that), are suitable for the use with automatically running, mathematical optimisation algorithms. With the given number of tunnel slices, a "discrete optimisation problem" exists for which the corresponding discrete optimisation algorithms could be used. A "trial and error" of all possible solutions, even for this only 500 m long tunnel section, would result in approx. $9.5 \cdot 10^{53}$ possibilities for 1 m wide tunnel slabs and 20 possible insert widths, which cannot be calculated in a reasonable time even with the fast-computing technology available today (even if 99.99% of these combinations are excluded from the outset for reasons of constructability, approx. $9.5 \cdot 10^{49}$ combinations remain).

Most of the optimisation algorithms that can be used for this "class" of mathematical problems (for an overview, see e.g. [4]) usually cannot change the number of parameters during an optimisation sequence. At the same time, the "numerical cost" of an optimisation problem often increases superlinearly with the number of unknown parameters. Due to these boundary conditions, the approach followed here is to specify the number of conversions of the formwork carriage inserts (corresponds to the number of clusters) before starting an optimisation run. The number of conversions or clusters is therefore an input variable of the optimisation and not a result of it. By carrying out several optimisation runs with different quantities of conversions or clusters and comparing the results of these runs, the optimal number of clusters can still be determined. The number of parameters m of an optimisation sequence is calculated as a function of

4.6 Definition der Zielfunktion f_2 : Kosten für Clustering

Die mit der Zielfunktion f_2 berechneten Gesamtkosten enthalten sowohl die Kosten f_1 der $i = 1 \dots 500$ Tunnelscheiben, als auch die Kosten für die notwendige Anzahl $j = 1 \dots n$ der Schalwagenumbauten und einen Cluster-bezogenen Strafterm. Mit dem Strafterm werden Lösungen mit zu kurzen Clusterlängen (rein virtuelle) Strafkosten zugeordnet, die diese Lösungen auch aus Sicht des Optimierungsalgorithmus herabwertet. Die Berechnungsvorschrift ist in Bild 8 gegeben.

4.7 Clustering mittels Optimierungsalgorithmus

Die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte, die soweit notwendig (und darüber hinaus) vollständig automatisiert sind, eignen sich für den Einsatz von automatisiert laufenden, mathematischen Optimierungsalgorithmen. Mit der vorgegebenen Anzahl von Tunnelscheiben liegt ein „diskretes Optimierungsproblem“ vor, für welches die entsprechenden diskreten Optimierungsalgorithmen einsetzbar sind. Ein „Durchprobieren“ aller möglichen Lösungen selbst für diesen nur 500 m langen Tunnelabschnitt ergäbe bei 1 m breiten Tunnelscheiben und 20 möglichen Einlagenbreiten bereits ca. $9,5 \cdot 10^{53}$ Möglichkeiten, die selbst bei der heute verfügbaren schnellen Rechentechnik nicht in sinnvoller Zeit berechenbar sind (selbst wenn 99,99 % dieser Kombinationen von vornherein aus Baubarkeitsgründen ausgeschlossen werden, verbleiben ca. $9,5 \cdot 10^{49}$ Kombinationen).

Die meisten der für diese „Klasse“ an mathematischen Problemen nutzbaren Optimierungsalgorithmen (Überblick siehe z. B. [4]) können i. d. R. während einer Optimierungssequenz die Anzahl der Parameter nicht ändern. Gleichzeitig steigt oft die „numerische Härte“ eines Optimierungsproblems mit der Anzahl der unbekannt Parameter überlinear. Aufgrund dieser Randbedingungen wird hier der Weg verfolgt, vor dem Start eines Optimierungsdurchlaufs die Anzahl der Umbauten der Schalwageneinlagen (entspricht der Anzahl der Cluster) vorzugeben. Die Anzahl der Umbauten bzw. Cluster ist demnach eine Eingangsgröße der Optimierung und kein Resultat derselben. Indem mehrere Durchläufe der Optimierung mit unterschiedlichen Umbauten- resp. Cluster-mengen durchgeführt und die Resultate dieser Durchläufe verglichen

the number of clusters n with $m = 2n - 1$. This is because two parameters (width of the insert and length of the cluster) are necessary for each cluster, but the last cluster always extends to the end of the tunnel (cluster length is given and therefore no parameter).

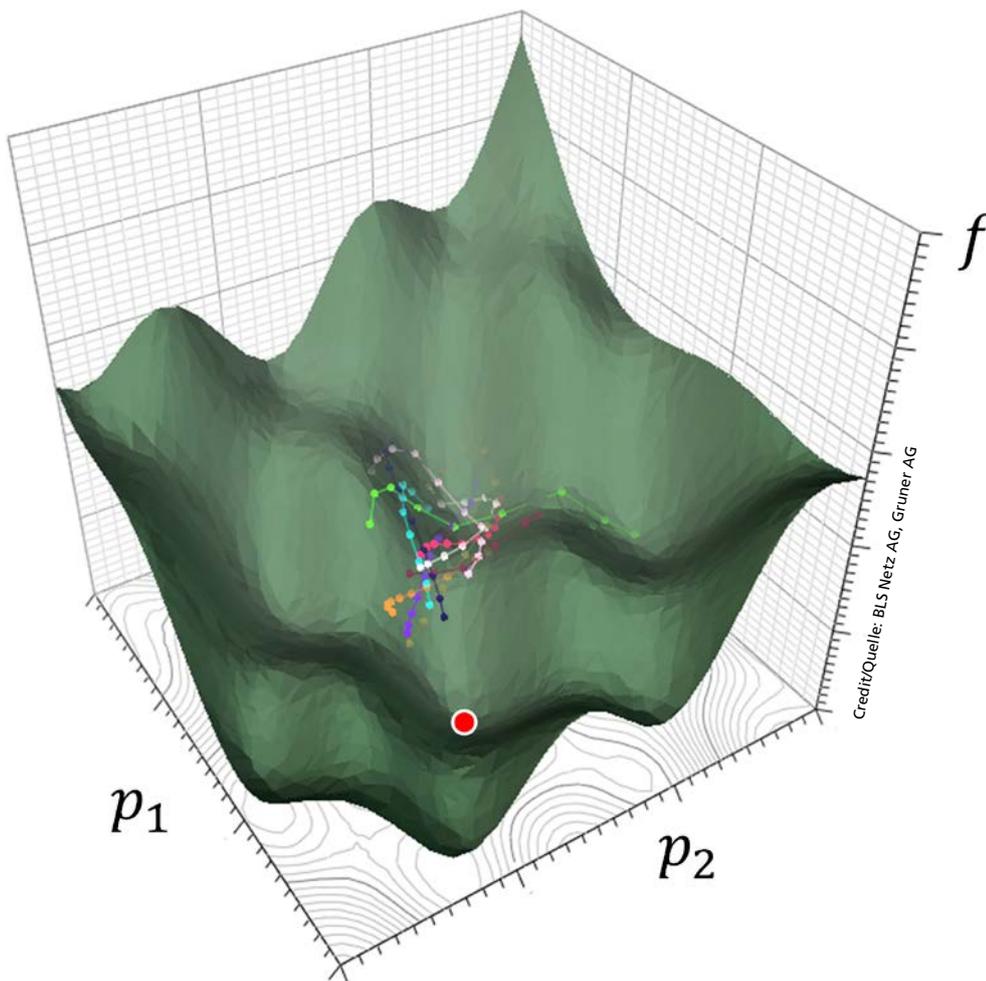
An optimisation algorithm will trigger a forward calculation for a large number of parameter combinations in the sense of a "targeted trial and error" and try to minimise the resulting objective function value step by step. The numerical process at the end of which an objective function value f_2 results is here referred to as the forward calculation. Although the numerical cost of determining the geometric parameters as the basis for the objective functions f_1 and f_2 is not significant for the optimisation itself here due to the intermediate storage of the values, it has proven useful to use mathematical optimisation methods that are as efficient as possible – in the sense of algorithms that do not require an excessive number of forward calculations.

Experience shows, however, that many available discrete optimisation algorithms require many more forward

werden, kann aber dennoch die optimale Anzahl an Clustern bestimmt werden.

Die Anzahl der Parameter m einer Optimierungssequenz errechnet sich in Abhängigkeit der Anzahl der Cluster n mit $m = 2n - 1$. Dies, da pro Cluster zwei Parameter (Breite der Einlage und Länge des Clusters) notwendig sind, aber der letzte Cluster immer bis zum Tunnelende reicht (Clusterlänge gegeben und somit kein Parameter).

Ein Optimierungsalgorithmus wird im Sinne eines „gerichteten Probierens“ für eine Vielzahl von Parameterkombinationen je eine Vorwärtsrechnung auslösen und versuchen, den resultierenden Zielfunktionswert schrittweise zu minimieren. Als Vorwärtsrechnung wird hier der numerische Vorgang bezeichnet, an dessen Ende ein Zielfunktionswert f_2 resultiert. Obwohl der numerische Aufwand der Bestimmung der geometrischen Kenngrößen als Grundlage für die Zielfunktionen f_1 und f_2 für die Optimierung selbst aufgrund der Zwischenspeicherung der Werte hier nicht von Bedeutung ist, hat es sich bewährt, möglichst effiziente mathematische Optimierungsverfahren einzusetzen – im Sinne von Algorithmen, die eine nicht zu hohe Anzahl an Vorwärtsrechnungen benötigen.



9 Symbolic image of a particle swarm optimiser on a two-parametric cost function

Symbolbild eines Partikel Schwarm Optimierers auf einer zwei-parametrischen Kostenfunktion

calculations than algorithms for continuous optimisation. Therefore, the previously described discrete optimisation problem was converted into a "continuous problem". For this purpose, a linear interpolation is performed between the (discrete) grid points. With such a limitation to a purely linear interpolation, the resulting optimisation problem is also continuous and the local optima still lie on the grid points.

The primary optimisation algorithms used were a "Particle Swarm Optimiser" (PSO, [1] and [2]) and the "Adaptive Differential Evolution Exploitation and Quantum-Inspired Exploration" algorithm (ADEQFS, [3]). The latter shows quite good convergence properties, especially with an increased number of parameters to be determined. An overview of different optimisation methods in the context of geotechnics can be found in [4]. A quantitative comparison (benchmarking) of these methods is given in [5].

From a mathematical point of view, the search for a cost optimum is similar to the search for the lowest point on a multi-dimensional surface in space (e.g.: red point in **Figure 9**). With the help of the objective function (or cost function), a objective function value (cost) can be determined unambiguously and reproducibly for each parameter combination. With this objective function, the surface is implicitly defined, whereby at the beginning

Erfahrungsgemäß benötigen viele verfügbare, diskrete Optimierungsalgorithmen jedoch viel mehr Vorwärtsrechnungen als Algorithmen für kontinuierliche Optimierung. Daher wurde das zuvor beschriebene diskrete Optimierungsproblem in ein „kontinuierliches Problem“ überführt. Hierfür wird zwischen den (diskreten) Stützstellen eine lineare Interpolation vorgenommen. Mit einer solchen Begrenzung auf eine rein lineare Interpolation ist das resultierende Optimierungsproblem zudem stetig und die lokalen Optima liegen nach wie vor auf den Stützstellen.

Als Optimierungsalgorithmen wurden primär ein „Partikel Schwarm Optimierer“ (PSO, [1] und [2]) und der „Adaptive Differential Evolution Exploitation and Quantum-Inspired Exploration“-Algorithmus (ADEQFS, [3]) eingesetzt. Letzterer zeigt insbesondere bei einer erhöhten Anzahl von zu bestimmenden Parametern recht gute Konvergenzeigenschaften. Ein Überblick zu verschiedenen Optimierungsverfahren im Kontext der Geotechnik findet sich in [4]. Ein quantitativer Vergleich (Benchmarking) dieser Verfahren ist in [5] enthalten.

Aus mathematischer Sicht gleicht die Suche nach einem Kostenoptimum der Suche nach dem tiefsten Punkt auf einer mehrdimensionalen Oberfläche im Raum (z. B: roter Punkt in **Bild 9**). Mithilfe der Zielfunktion (bzw. Kostenfunktion) kann für jede Parameterkombination eindeutig und reproduzierbar ein Zielfunktionswert (Kosten) bestimmt werden. Mit dieser Zielfunktion ist die Fläche implizit definiert, wobei zu Beginn

of the optimisation there is usually no information about the shape and properties of the objective function surface. All optimisation algorithms used here therefore start the iterative search from randomly selected parameter combinations and determine the positions to be examined first according to their internal set of rules. At these positions, objective function values are also determined, which in turn are the starting point for the next iteration cycle. This search resp. iteration can be aborted if a number of iteration cycles to be defined does not yield any further minimisation of costs. **Figure 9** shows, as an illustration, an intermediate state during a run of a particle swarm optimiser on a two-parameter cost function.

5 Results

The procedure presented and the algorithms used proved to be robust and effective in determining reasonable solutions for optimising the geometry of the tunnel interior vault. Thanks to the full automation of the procedure described in Chapter 4, different sets of unit prices could be investigated and compared without

der Optimierung i. d. R. über die Form und Eigenschaften der Zielfunktionsoberfläche keine Informationen vorliegen. Alle hier verwendeten Optimierungsalgorithmen starten die iterative Suche daher von zufällig gewählten Parameterkombinationen und bestimmen entsprechend ihres internen Regelwerkes die zunächst zu überprüfenden Positionen. An diesen Positionen werden ebenfalls Zielfunktionswerte bestimmt, die wiederum Ausgangspunkt für den nächsten Iterationszyklus sind. Diese Suche bzw. Iteration kann abgebrochen werden, wenn eine zu definierende Anzahl von Iterationszyklen keine weitere Minimierung der Kosten erbringt. **Bild 9** zeigt im Sinne eines Symbolbildes einen Zwischenzustand während eines Durchlaufs eines Partikel Schwarm Optimierers auf einer zwei-parametrischen Kostenfunktion.

5 Resultate

Das dargestellten Vorgehen und die verwendeten Algorithmen erwiesen sich als stabil und wirksam, um sinnvolle Lösungen zur Optimierung der Geometrie des Tunnel-Innengewölbes zu bestimmen. Dank der vollständigen Automatisierung der in Abschnitt 4 beschriebenen Vorgehensweise konnten

significant effort. As a result of the decision presented in Chapter 4.7 to specify the number of clusters as an input variable and to repeat the optimisation several times (with different numbers of clusters), the following parameters were available at the end of the optimisation per number of clusters:

- Costs according to f_2 incl. all intermediate results
- Start and end kilometer point of each cluster and the corresponding insert width

A separate sensitivity analysis showed that the cost functions f_1 and f_2 react sensitively to the input parameters used. Practical experience and expertise are required to determine these factors. The short calculation times also allow parameter variations to be carried out.

For the task at hand, several sequences were calculated with both optimisation algorithms for each number of clusters to be examined and the best results were used.

In the section under consideration, the general planner originally proposed a symmetrical widening of 20 cm on the first 150 m and then a widening of 60 cm on the following 350 m (1x reconstruction of the formwork carriage). According to the result of the mathematical optimisation, the formwork carriage is also converted at the same point, but the tunnel vault is not widened on the first 150 m, as the costs for the reprofiling exceed those for the reduced concrete. On the following 350 m, a widening of 70 cm results. The mathematical optimisation thus finds a more favourable solution for the section under consideration by about CHF 100/m – extrapolated to the entire tunnel length, this results in additional savings in the millions.

In terms of a critical review, the mathematical solution essentially confirms the previous results. However, due to the large number of solutions found, further optimisation potential becomes apparent, which can be used in the subsequent phases.

6 Summary and Outlook

In the sense of a proof-of-concept, it could be shown for a 500 m long section of the LBT that mathematical optimisation algorithms in combination with consistent automation can reliably find solutions that are interesting for all project participants from both an economic and a practical construction point of view. It was important to ensure that the clearly defined work steps could be validated and falsified.

In terms of optimisation, it would be possible to allow further degrees of freedom for the adaptation of the formwork carriage geometry (which might lead to a better approximation to the excavation outline with possibly higher conversion costs) or additional components respectively boundary conditions in the cost function without any problems. In tunnelling and geotechnical engineering, experience has shown that a large number of

verschiedene Sets mit Einheitspreisen ohne nennenswerten Aufwand untersucht und gegenübergestellt werden. Infolge der in Abschnitt 4.7 dargelegten Entscheidung, die Anzahl der Cluster als Eingangsgröße vorzugeben und die Optimierung mehrfach (mit unterschiedlichen Clusterzahlen) zu wiederholen, lagen am Ende der Optimierung pro Clusteranzahl die folgenden Kenngrößen vor:

- Kosten gemäß f_2 inkl. aller Zwischenergebnisse
- Start und Endkilometrierung jedes Clusters und die zugehörige Einlagenbreite

Eine gesonderte Sensitivitätsanalyse ergab, dass die Kostenfunktionen f_1 und f_2 sensitiv auf die enthaltenen Eingabeparameter reagieren. Zur Bestimmung dieser Faktoren sind Praxiserfahrung und Fachkenntnis erforderlich. Die geringen Berechnungszeiten erlauben es zudem, Parametervariationen durchzuführen.

Für die vorliegende Aufgabe wurden für jede Anzahl zu untersuchender Cluster mehrere Sequenzen mit beiden Optimierungsalgorithmen berechnet und die besten Resultate verwendet.

Im betrachteten Abschnitt schlug der Gesamtplaner ursprünglich auf den ersten 150 m eine symmetrische Aufweitung um 20 cm und anschließend auf 350 m eine Aufweitung um 60 cm vor (1x Umbau des Schalwagens). Gemäß dem Resultat der mathematischen Optimierung findet ebenfalls ein Umbau des Schalwagens an selber Stelle statt, aber das Tunnelgewölbe wird auf den ersten 150 m nicht aufgeweitet, da hier die Kosten für die Reprofilierung jene für den Minderbeton übersteigen. Auf den nachfolgenden 350 m resultiert eine Aufweitung um 70 cm. Die mathematische Optimierung findet für den betrachteten Abschnitt so eine um ca. 100 CHF/m günstigere Lösung – auf die gesamte Tunnellänge hochgerechnet ergeben sich demnach zusätzliche Ersparnisse in Millionenhöhe. Im Sinne des kritischen Koreferats bestätigt die mathematische Lösung im Wesentlichen die bisherigen Ergebnisse. Durch die Vielzahl der gefundenen Lösungen wird jedoch weiteres Optimierungspotenzial offensichtlich, welches in den Folgephasen genutzt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Sinne eines Proof-of-Concepts konnte für einen 500 m langen Abschnitt des LBT gezeigt werden, dass mit mathematischen Optimierungsalgorithmen im Zusammenspiel mit einer konsequenten Automatisierung zuverlässig Lösungen gefunden werden, die sowohl aus ökonomischer wie auch baupraktischer Sicht für alle Projektbeteiligten interessant sind. Hierbei wurde darauf geachtet, die klar definierten Arbeitsschritte validierbar und falsifizierbar zu gestalten.

Aus Sicht der Optimierung wäre das Zulassen weiterer Freiheitsgrade für die Anpassung der Schalwagengeometrie (damit ggf. bessere Annäherung an die Ausbruchskontur bei evtl. höheren Umbaukosten) oder zusätzlicher Komponenten bzw. Randbedingungen in der Kostenfunktion problemlos möglich. Im Tunnelbau und in der Geotechnik sind erfahrungsgemäß

optimisation tasks have to be solved. Examples range from the determination of constitutive parameters to the determination of a cost-optimal excavation pit shoring (see e.g. [6]). With the necessary expertise, mathematical optimisation algorithms can provide significant assistance. However, these mathematical methods usually only provide a mathematical extremum and not a practical solution. In order to work out optimal solutions, it is therefore necessary that mathematical approaches and engineering expertise complement each other.

eine Vielzahl von Optimierungsaufgaben zu lösen. Beispiele reichen von der Bestimmung von konstitutiven Kenngrößen bis zur Findung eines kostenoptimalen Baugrubenverbau (siehe z. B. [6]). Mit der nötigen Fachkenntnis können hier mathematische Optimierungsalgorithmen eine wesentliche Hilfestellung geben. Allerdings liefern diese mathematischen Methoden i. d. R. nur ein mathematisches Extremum und noch keine baupraktische Lösung. Um optimale Lösungen herauszuarbeiten ist es daher notwendig, dass mathematische Ansätze und Ingenieur-Sachverstand sich einander verstärken.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] Eberhardt, R. C.; Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1995, pp. 39–43.
- [2] Kennedy, J.; Eberhardt, R. C. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Volume IV, 1995, pp. 1942–1948, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NY.
- [3] Yin, J.; Wang, Y.; Hu, J. Free Search with Adaptive Differential Evolution Exploitation and Quantum-Inspired Exploration. Journal of Network and Computer Applications, Volume 35, Issue 3, 2012, pp. 1035–1051.
- [4] Meier, J. Parameterbestimmung mittels inverser Verfahren für geotechnische Problemstellungen. PhD thesis, Bauhaus-Universität Weimar, 2008.
- [5] Meier, J.; Schanz, T. Benchmarking and Rating of Optimization Algorithms. EURO:TUN 2013, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering, Ruhr University Bochum, 17–19 April 2013, 2013, 8 pages.
- [6] Meier, J. Optimierung von Baugrubenabschlüssen. In 26. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, 2019.