Stützmauer Reussthal
Reussthal retaining wall

Stephan Etter

Einleitung

Bei der Stützmauer Reussthal handelt es sich um eine rund 340 m lange und bis zu 23 m hohe Ankerwand. Sie ist Bestandteil des Gesamtverkehrskonzepts Luzern Nord, das sich vom Kasernenplatz bis zur Sprengi in Emmenbrücke erstreckt. Dieses soll die Leistungsfähigkeit des öffentlichen und des individuellen Verkehrs verbessern und sichere Verbindungen für den Langsamverkehr gewährleisten. Die dazu erforderliche Verbreiterung der Kantonsstrasse K13 um rund 7 m erfolgte aufgrund der Nähe zum SBB-Trassee ausschliesslich bergseitig, wo am Fusse des Steilhangs eine über 150 Jahre alte und bis zu 8 m hohe Natursteinmauer ersetzt wurde.

Wesentliche Randbedingungen

Der bewaldete Steilhang oberhalb der Kantonsstrasse weist eine Neigung von bis zu 43° auf (Fig. 3). Im gesamten Perimeter überdeckt eine ein bis zwei Meter mächtige Lockergesteinsschicht den oberflächennahen Fels. Der Felsgrund (Obere Süsswassermolasse) besteht aus einer Wechsellagerung aus Konglomeraten sowie gebankten Abfolgen aus Schlamm-, Silt- und Sandsteinen. Von geotechnischer Bedeutung war beim Fels insbesondere die Verwitterungszone. Eine ausgeprägte Verwitterungs- und Entlastungsklüftung verläuft bis in eine Tiefe von zwei bis fünf Metern unter der Felsoberfläche mehrheitlich parallel zur Geländeoberfläche und führt zusammen mit den sehr steil stehenden tektonischen Klüften zu einem ungünstigen Trennflächengefüge. Unterhalb der Verwitterungszone ist der Fels grossräumig standfest.
Aufgrund der grossen Steilheit des Geländes besteht die Gefahr von Spontanrutschungen und Hangmuren sowie von Steinschlag. Der Wald oberhalb der Strasse hat daher die Funktion eines Schutzwalds. Für das Projekt bedeutete dies, dass für die Waldbewirtschaftung eine Unterhaltsstrasse

Introduction

The Reussthal retaining wall is a 340 m long and up to 23 m high anchor wall. It is part of the overall traffic concept for Lucerne North, which extends from Kasernenplatz to Sprengi in Emmenbrücke. This is intended to improve the efficiency of public and individual transport and ensure safe connections for non-motorised traffic. The necessary widening of the K13 cantonal road by around 7 m was carried out exclusively on the hill side due to the proximity to the SBB railway line, where an over 150 years old and up to 8 m high natural stone wall at the foot of the steep slope was replaced.

Essential boundary conditions

The wooded steep slope above the cantonal road has a gradient of up to 43° (Fig. 3). In the entire perimeter, a one to two metre thick layer of loose rock covers the rock near the surface. The bedrock (Upper Freshwater Mo-

Fig. 1
Gesamtansicht Stützmauer Reussthal.
General view of the Reussthal retaining wall.
(© Emch+Berger WSB AG)

Fig. 2
Staffelung der Wand mit Berme; stehende Riegel mit runden Ankernischen auf der oberen Wand.
Staggered wall with berm; standing ribs with round anchor niches on the upper wall.
(© Emch+Berger WSB AG)

lasse) consists of an alternating bedding of conglomerates and layers of mudstones, siltstones and sandstones. The weathering zone of the rock was of particular geotechnical importance. Pronounced weathering and unloading joints run mostly parallel to the ground surface down to a depth of two to five metres below the rock surface and, together with the very steep tectonic joints, leads to an unfavourable jointing. Below the weathering zone, the rock is largely stable.
Due to the steepness of the terrain, there is a risk of spontaneous landslides and debris flows as well as rockfall. Therefore, the forest above the road has the function of a protective forest. Hence, concerning the project a maintenance road along the top of the wall and protective barriers over large areas had to be provided for forest management.

Design

The size of the wall and its location in the city of Lucerne was of significant importance for the design. The following considerations had a decisive influence on the design, which was carried out in close collaboration with the architect Eduard Imhof:

- Above all, the layers near the surface (slope debris and weathered rock) required comprehensive anchoring. For reasons of controllability, the anchoring should be carried out with prestressed control anchors.
- The ground conditions were known in principle, but could not easily be predicted locally.

entlang der Mauerkrone sowie über weite Bereiche Schutznetze vorzusehen waren.

Entwurf

Die Grösse des Bauwerks und seine Lage in der Stadt Luzern wiesen der Gestaltung einen hohen Stellenwert zu. Folgende Überlegungen haben den Entwurf, der in enger Zusammenarbeit mit dem Architekten Eduard Imhof erfolgte, massgeblich beeinflusst:

- Vor allem die oberflächennahen Schichten (Hangschutt und verwitterter Fels) erfordern eine umfassende Sicherung. Aus Gründen der Kontrollierbarkeit sollte die Verankerung mit vorgespannten Kontrollankern erfolgen.
- Die Baugrundverhältnisse waren zwar grundsätzlich bekannt, lokal aber kaum prognostizierbar. Entsprechend musste mit dem Bauwerk auf die effektiv angetroffenen Verhältnisse reagiert werden können.
- Eine Staffelung sollte die hohe Wand gliedern.

Bauherr/Client
Kanton Luzern
Verkehr und Infrastruktur (vif)
Projektierung und Bauleitung/
Project planning and site management
Ingenieurgemeinschaft IG Reussthal
– Emch+Berger WSB AG, Emmenbrücke (FF)
– Bänziger Partner AG, Zürich
Gestaltung/Design
Eduard Imhof, Luzern
Geologie/Geology
Keller+Lorenz AG, Luzern
Unternehmer/Contractor
Arbeitsgemeinschaft ARGE K13+
– Implenia Schweiz AG, Luzern (FF)
– Lötscher Tiefbau AG, Luzern

– Eine Begrünung sollte das massive Bauwerk besser in die Umgebung einpassen.

Die Stützmauer Reussthal ist in zwei übereinander gestaffelte und unterschiedlich geometrisierte Mauerschalen aufgeteilt, siehe Figuren 1 und 2. Die beiden Stufen bilden zwar eine Einheit, erlauben aber Differenzierungen. Zudem bricht die Staffelung optisch die grosse Höhe des Bauwerks. Dies gilt vor allem für mauernahe Betrachterstandorte.

Die untere Mauerstufe bezieht sich auf die Strasse, die obere auf den Berg. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Entwicklung der Formen. Die untere Mauer wird von einer Krone abgeschlossen, die parallel zur Strassennivelette verläuft. Sie erinnert an eine Gebäudeflucht mit durchlaufender Traufhöhe. Ganz anders die obere Mauer, deren Krone dem Geländeschnitt folgt und an eine Gebirgssilhouette denken lässt. Die obere Mauer ist geprägt von vertikal gesetzten Riegeln, die in einem straffen Rhythmus die Wand gliedern. In den Riegeln liegen die Köpfe der vorgespannten Kontrollanker versteckt in runden Ankernischen (Kegelstumpf). Die untere Mauer bildet einen flächigen Hintergrund, auf dem Abspannungen in einem von der Mauerkonstruktion unabhängigen Rhythmus gesetzt werden können. Die differenzierte Gestaltung der Mauer widerspiegelt die hinter ihr verborgenen geologischen Verhältnisse.

Zudem binden ein Bepflanzungskonzept und die Nachbearbeitung der Betonoberflächen das Bauwerk besser in die Umgebung ein. Hängende Pflanzen, die hinter den Mauerkronen wurzeln, überdecken beide Mauerstufen. Auf den Wandflächen wird die helle Zementhaut mit Hochdruckwasser abgetragen, damit der rauere und dunklere Beton sichtbar wird. Ausgenommen sind der Mauerfuss und die Betonrippen. Der aufgeraute Beton wird im Laufe der Zeit schneller nachdunkeln und von Algen und Flechten bewachsen werden, was die Helligkeitsunterschiede der Oberflächen mit der Zeit verstärken wird. Es geht aber nicht nur um die Steigerung plastischer Effekte auf der oberen Wand. Die verschiedenen Oberflächen sind auch ein Hinweis auf andersartige Beanspruchungen.

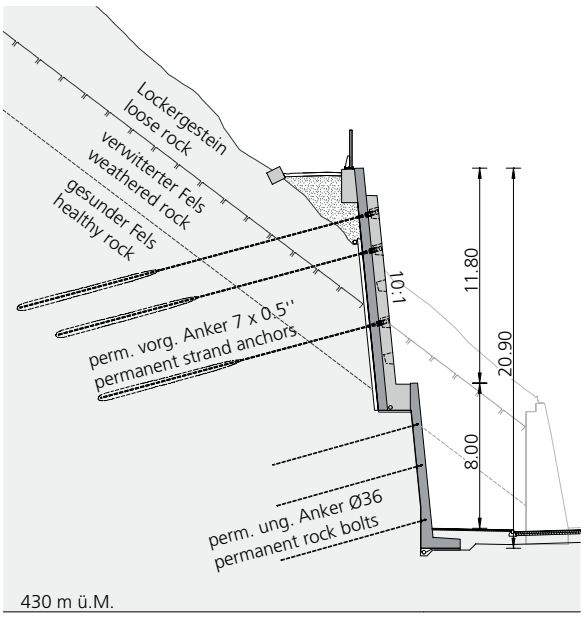

Fig. 3
Typischer Querschnitt der Ankerwand: Permanente vorgespannte Verankerung im oberen Teil, permanente ungespannte Verankerung im unteren Teil.
Typical cross-section of the anchor wall: permanent prestressed anchorage in the upper part, permanent rock bolts in the lower part.

Accordingly, the structure had to be able to adapt to the actual conditions encountered.

– A staggered structure should divide the high wall.
– Greenery should integrate the massive structure better into its surroundings.

The Reussthal retaining wall is divided into two staggered, differently geometric wall shells, see Figures 1 and 2. Although the two steps form a unit, they allow for differentiation. In addition, the staggering visually breaks up the great height of the structure. This is especially true for viewer locations close to the wall.

The lower wall level refers to the street, the upper one to the hill. This influences directly on the development of the forms. The lower wall is terminated by a crown that runs parallel to the street level. It is reminiscent of a building line with a continuous eaves height. The upper wall is completely different, with a crown that follows the terrain and is reminiscent of a mountain silhouette. The upper wall is characterised by vertically placed ribs that structure the wall in a taut

Tragwerkskonzept und Bemessung

Die Stützmauer Reussthal ist als Ankerwand mit permanenten vorgespannten und ungespannten Verankerungen konzipiert. Die Gesamthöhe von bis zu 23,7 m wird durch die Anordnung einer 1,80 m breiten Berme gegliedert, siehe Querschnitt (Fig. 3). Sämtliche Ansichtsflächen sind mit einem Anzug von 10:1 ausgeführt. Die untere, 50 cm dicke Wand weist eine Ansichtshöhe von etwa 8 m auf und taucht seitlich ab. Sie schneidet hauptsächlich den standfesten Fels an, wird mit permanenten ungespannten Ankern Ø 36 mm, Schutzstufe 2b nach SIA 267, verankert und hat über grosse Bereiche die Funktion einer Futtermauer. Die obere Wand wird durch die hohen Erddrücke in den Bereichen der Verwitterungszone des Felsens,

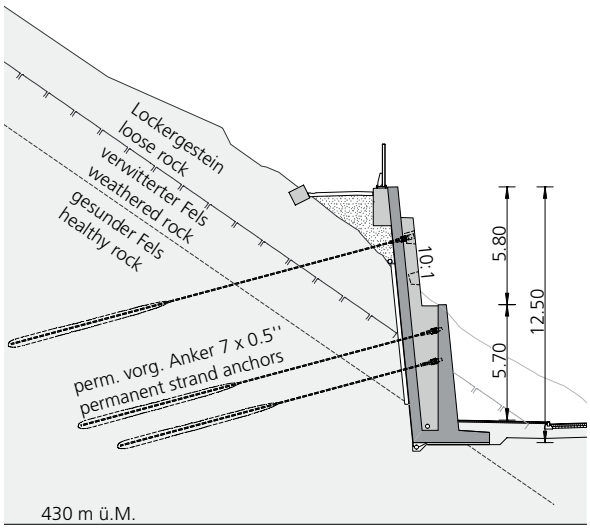

Fig. 4
Querschnitt im Randbereich, wo vorgespannte Anker ausnahmsweise auch unterhalb der Berme angeordnet sind.
Cross-section in the edge area, where strand anchors are exceptionally also arranged below the berm.

rhythm. The heads of the prestressed control anchors lay hidden in round anchor niches (truncated cones) in the ribs. The lower wall forms a flat background on which guy wires can be placed in a rhythm independent of the wall construction. The differentiated design of the wall reflects the geological conditions hidden behind it.
In addition, a planting concept and the finishing of the concrete surfaces better integrate the structure into its surroundings. Hanging plants rooted behind the wall crowns cover both wall steps. On the wall surfaces, the light cement skin is removed with high-pressure water jetting to reveal the rougher and darker concrete. The base of the wall and the concrete ribs are excluded. The roughened concrete will darken more quickly over time and become overgrown with algae and lichen, which will increase the differences in brightness of the surfaces over time. However, it's not just about increasing sculptural effects on the top wall. The different surfaces are also an indication of different loading.

des Hangschutts und der Auffüllung beansprucht. Entsprechend wird sie mit 16 bis 22 m langen, permanenten vorgespannten Litzenankern 7 x 0,5" mit einer Festsetzkraft von je 650 kN gesichert. Die Kontrollankerköpfe sind in stehenden Rippen mit einem Gesamtquerschnitt von 1,20 m x 1,10 m angeordnet, die einen Achsabstand von 4,0 m aufweisen. Sie verteilen die Ankerkräfte auf die 50 cm dicke Wand dazwischen und schaffen eine ausreichende Tiefe für die Anordnung runder Ankernischen (Kegelstumpf) zum Schutz der Ankerköpfe. Der vertikale Abstand der Nischen beträgt 2 m. Im Vergleich zu einer massiven Wand mit gleicher Stärke benötigte die Ausbildung mit Rippen rund 1050 m^3 weniger Beton, was einer Einsparung von etwa 350 t CO_2 entspricht. Jede Ankernische kann als Ankerstandort für Kontroll- oder Messanker genutzt werden oder dient als Reservestandort. Mit dem regelmässigen Raster liess sich während der Ausführung auf die angetroffenen geologischen Verhältnisse reagieren, ohne die Gestaltung zu beeinflussen. An den

Structural concept and dimensioning

The Reussthal retaining wall is designed as an anchor wall with permanent strand anchors and rock bolts. The total height of up to 23.7 m is divided by the arrangement of a 1.80 m wide berm, see cross-section (Fig. 3). All elevation surfaces are designed with a taper of 10:1. The lower, 50 cm thick wall has an elevation height of about 8 m and dips laterally. It mainly intersects the stable rock, is anchored with permanent rock bolts Ø 36 mm, protection level 2b according to code SIA 267, and has the function of a lining wall over large areas. The upper wall is stressed by the high earth pressures in the areas of the weathering zone of the rock, the slope debris and the backfill. Accordingly, it is secured with 16 to 22 m long permanent prestressed strand anchors 7 x 0.5" with an anchorage force of 650 kN each. The control anchor heads are arranged in upright ribs with a total cross-section of 1.20 m x 1.10 m, which have a centre-to-centre distance of 4.0 m. They distribute the anchor forces to the 50 cm thick wall in between and create sufficient depth for the arrangement of round anchor niches (truncated cones) to protect the anchor heads. The vertical spacing of the niches is 2 m. Compared to a solid wall of the same thickness, the ribbed construction required around 1050 m^3 less concrete, which corresponds to a saving of around 350 t CO_2. Each anchor niche can be used as an anchor location for control or surveillance anchor or serves as a reserve location. With the regular grid, it was possible to react to the geological conditions encountered during construction without influencing the design. In the few places where the weathering zone of the rock was also cut below the berm, which was particularly the case in the edge areas, the ribs behind the lower wall were extended downwards in order to be able to arrange further prestressed anchors on them, see Fig. 4. For design reasons, the

wenigen Orten, wo die Verwitterungszone des Felsens auch unterhalb der Berme angeschnitten wurde, was insbesondere in den Randbereichen der Fall war, wurden die Rippen hinter der unteren Wand nach unten verlängert, um darauf weitere vorgespannte Anker anordnen zu können, siehe Figur 4. Aus Gründen der Gestaltung wurde hier auf die Ausbildung sichtbarer Ankernischen und damit auf die Kontrollierbarkeit der Ankerköpfe verzichtet.

Die Baugrubensicherung wurde grosszügig perforiert und das Hangwasser über Drainagematten zwischen der Stützmauer abgeleitet. Ausserdem sind tiefere Drainagbohrungen und spülbare, stehende Drainagerohre angeordnet.

Da die Neigung des Geländes oberhalb der Stützmauer grossräumig deutlich über dem Winkel der inneren Reibung des anstehenden kohäsionslosen Lockergesteins liegt, wurden die Erddrücke mit der Gleitkeilmethode ermittelt. Dabei wurde die Ausdehnung der Gleitkeile in Absprache mit dem Geologen begrenzt (horizontale Ausdehnung bis 10 m ab Hinterkante Mauerkrone, vertikale Ausdehnung maximal 7 m). Die Baugrundparameter wurden durch eine Rückrechnung des Ist-Zustands am selben Modell bestimmt, wobei die günstige Wirkung einer Wurzelkohäsion im Lockergestein berücksichtigt wurde. Die Bemessung der Verankerung erfolgte mit den üblichen Partialsicherheitsfaktoren für die Leiteinwirkungen Verkehrslast auf Unterhaltsstrasse, Hangwasser und Erdbeben unter Vernachlässigung der Wurzelkohäsion im Lockergestein. Die Modellbildung beinhaltete grobe Annahmen, berücksichtigte aber die wesentlichen Einflussfaktoren und führte zu plausiblen Resultaten. Da für Rückrechnung und Bemessung dasselbe Modell verwendet wurde, konnte belegt werden, dass mit der Stützmauer die Standsicherheit des Steilhangs erhöht und im Einflussbereich der Stützmauer eine normgemässe Sicherheit erreicht wird.

formation of visible anchor niches and thus the controllability of the anchor heads was dispensed with here.

The excavation support was generously perforated and the slope water drained off via drainage mats between the retaining wall. In addition, deeper drainage holes and flushable standing drainage pipes were arranged.

Since the slope of the terrain above the retaining wall is widely higher than the angle of internal friction of the overlying cohesionless loose rock, the earth pressures were determined using the "wedge method". The extension of the sliding wedges was limited in consultation with the geologist (horizontal extension up to 10 m from the rear edge of the wall crown, vertical extension maximum 7 m). The soil strength parameters were determined by back-calculating the actual condition on the same model, taking into account the favourable effect of a root cohesion in the loose rock. The design of the anchorage was carried out with the usual partial safety factors for the effects of traffic load on the maintenance road, slope water and earthquake, neglecting the root cohesion in the loose rock. The modelling contained rough assumptions, but took into account the main influencing factors and led to plausible results. Since the same model was used for back-calculation and design, it could be proven that the retaining wall increases the stability of the steep slope and that a standard safety is achieved in the area of influence of the retaining wall.

Bauausführung

Der Verkehr auf der Kantonsstrasse musste bis auf wenige Ausnahmen in der Nacht zweispurig aufrechterhalten werden. Entsprechend waren die Platzverhältnisse auf der rund 350 m langen Linienbaustelle zu Beginn der Arbeiten extrem knapp. Die Baustellenlogistik war eine grosse Herausforderung. Ein Schutzgerüst zwischen Kantonsstrasse und Baustelle sorgte für eine robuste Trennung und reduzierte die Einschränkungen beim Kraneinsatz trotz der Nähe zu den Bahnstromanlagen, siehe Figur 5.

Der Hanganschnitt erfolgte in kleinen Etappen und wurde mit einer temporären Nagelwand gesichert. In den oberen Bereichen mit ungünstigeren geologischen Verhältnissen wurde eine Lage temporärer vorgespannter Anker angeordnet. Diese leistungsfähigen Anker verstärkten hier die Nagelwand, reduzierten die Verformungen und erlaubten mit Messankern eine zuverlässige Ergänzung der Überwachung. Wo der gesunde Fels angeschnitten wurde, konnte grösstenteils auf die Spritzbetonschale verzichtet und der Fels – falls erforderlich – direkt mit ungespannten Ankern gesichert werden. Wo für den Endzustand eine ungespannte Verankerung vorgesehen war, wurden die permanenten ungespannten Anker (Schutzstufe 2b) bereits zur Sicherung der Baugrube genutzt. Sie wurden mit einer zweiten Ankerplatte ausgerüstet und in die Stahlbetonwände eingebunden.

Technische Daten
Erstellung: 2019–2021
Baukosten Stützmauern:
CHF 15,2 Mio.
Gesamtlänge: ca. 340 m
Höhe: max. 23,7 m
Ansichtsfläche total: 5500 m^2
Aushub/Felsabbau: ca. 20 000 m^3
Betonkubatur: ca. 5000 m^3
Perm. Anker vorgespannt: 221 Stk.
Perm. Anker ungespannt: 370 Stk.

Technical data
Construction: 2019–2021
Construction costs retaining walls:
CHF 15.2 million
Total length: approx. 340 m
Height: max. 23.7 m
Total visible area: 5,500 m^2
Excavation/rock removal:
approx. 20,000 m^3
Concrete cubage: approx. 5,000 m^3
Perm. Anchors prestressed: 221 pcs.
Perm. Anchors untensioned: 370 pcs.

Fig. 5
Aushub und temporäre Sicherung; Linienbaustelle hinter dem Schutzgerüst.
Excavation and temporary anchoring; line construction site behind the protective scaffolding.
(© Emch+Berger WSB AG)

Fig. 6
Erstellung der Ortbetonwand in Etappen.
Construction of the in-situ concrete wall in stages.
(© Emch+Berger WSB AG)

Construction

With a few exceptions, traffic on the cantonal road had to be maintained on two lanes during the night. Accordingly, the space conditions on the approximately 350 m long line construction site were extremely tight at the beginning of the work. The construction site logistics were a major challenge. A protective scaffolding between the cantonal road and the construction site provided a robust separation and reduced the restrictions on crane use despite the proximity to the traction current installations, see Figure 5.

The slope was cut in small stages and secured with a temporary nail wall. In the upper areas with less favourable geological conditions, a layer of temporary strand anchors was placed. These powerful anchors reinforced the nail wall here, reduced deformations and, with surveillance anchors, allowed for reliable supplementation of monitoring. Where the healthy rock was cut, the shotcrete lining could be largely dispensed with and the rock – if necessary – secured directly with rock bolts. Where untensioned anchoring was planned for the final state, the permanent rock bolts (protection level 2b) were already used to secure the excavation. They were equipped with a second anchor plate and integrated into the reinforced concrete walls.

Der Bau der eigentlichen Stützmauer – eine monolithische Stahlbetonkonstruktion – erfolgte von unten nach oben in 8 m breiten Betonieretappen variabler Höhe (Fig. 6). Mehrheitlich wurden die Bohrungen für die vorgespannte Verankerung per Handlafette ab dem Arbeitsgerüst erstellt. Die temporären Litzenanker durften entspannt werden, sobald die knapp darunterliegenden permanenten Litzenanker festgesetzt waren.

Für die Ausführung stand inklusive Installation und Strassenbau eine Bauzeit von rund zwei Jahren zur Verfügung. Zwischen der Kranmontage und -demontage blieben 16 Monate für die Erstellung der Stützmauer. So mussten beispielsweise neben den laufenden Ankerarbeiten je Woche bis zu acht Betonieretappen erstellt werden. Die Arbeiten konnten im Frühling 2021 termingerecht abgeschlossen werden. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle herzlich für den grossen Einsatz gedankt.

The construction of the actual retaining wall – a monolithic reinforced concrete structure – was carried out from bottom to top in 8 m wide concreting stages of variable height (Fig. 6). Most of the boreholes for the prestressed anchors were drilled by means of a hand-held mount from the working scaffold. The temporary strand anchors could be released as soon as the permanent strand anchors just below them were installed.

The construction time, including installation and road construction, was about two years. Between the crane assembly and disassembly, 16 months remained for the construction of the retaining wall. For example, in addition to the ongoing anchoring work, up to eight concreting stages had to be completed each week. The work was completed on schedule in spring 2021. We would like to take this opportunity to thank all those involved for their great commitment.

Autor/Author

Stephan Etter
Dr. sc. ETH, Dipl. Bauing. ETH,
Bänziger Partner AG
CH-8045 Zürich
s.etter@bp-ing.ch