

# El Zapotillo – eine 130 m hohe Walzbetonstaumauer mit besonderer Gründung

Am Río Verde bei Guadalajara in Mexico wird eine etwa 130 m hohe Walzbetonstaumauer gebaut. Sie wird auf stark verformbaren Tuffschichten gegründet. Unterhalb der Talsohle verlaufen zwei artesische Grundwasserleiter. Der Entwurf der Staumauer muss diesen schwierigen Baugrundverhältnissen Rechnung tragen. Für die Standsicherheit spielt insbesondere die große Verformbarkeit der Tufflagen eine Rolle. Der Entwurf von Injektions- und Drainagemaßnahmen wird im Wesentlichen von den beiden artesischen Aquiferen bestimmt. Der Bau, der erste Einstau und der Betrieb der Mauer werden im Sinne der Beobachtungsmethode mess- und fachtechnisch begleitet.

Walter Wittke und Bettina Wittke-Schmitt

## 1 Projekt

Am Río Verde im Bundesstaat Jalisco, Mexiko, wird derzeit die über Gründungssohle etwa 130 m hohe Staumauer El Zapotillo gebaut. Nach ihrer Fertigstellung wird diese Staumauer einen Stausee mit einem Volumen von etwa 1 Mrd. m<sup>3</sup> einstauen. Die Sperre dient der Trinkwasserversorgung der Großstädte Leon (Guanajuato), Guadalajara (Jalisco) sowie der Hochebene des Bundesstaates Jalisco. Der Río Verde mündet flussabwärts der Sperrenstelle bei Guadalajara in den Río Santiago, der in Richtung Pazifik weiter fließt (Bild 1). WBI wurde damit beauftragt, die Ausführungsplanung für die Staumauer auszuarbeiten sowie die Baumaßnahme fachtechnisch zu begleiten.

## 2 Untergrundverhältnisse

An der Sperrenstelle steht eine Wechselfolge von vulkanischen Gesteinen an (Bild 2). Es handelt sich im Wesentlichen um Ignimbrite und Tuffe. An der Gründungssohle steht ein Dolerit an.

Insbesondere die Ignimbrite sind stark geklüftet. Es wurden sowohl horizontale Bankungsfugen als auch drei vertikale Trennflächenscharen kartiert, entlang derer die Scherfestigkeit im Vergleich zu derjenigen des unzerklüfteten Gesteins deutlich reduziert ist. (Bild 3)

Die Verformungsmodulare des Felsen wurden zunächst auf der Basis von Dilatometerversuchen und aufgrund von Erfahrungen bestimmt. Sie liegen in der Größenordnung von 2 000 bis

5 000 MN/m<sup>2</sup> für die Ignimbrite und nur 500 bis 3 000 MN/m<sup>2</sup> für die Tuffe. Damit weisen der Fels und insbesondere die Tuffe eine für den Bau einer so hohen Staumauer sehr hohe Verformbarkeit auf. Auch die einaxialen Druckfestigkeiten der Tuffe sind mit Werten von 2 bis 15 MN/m<sup>2</sup> vergleichsweise gering.

Der Grundwasserspiegel steht in beiden Talhängen nur wenig oberhalb des derzeitigen Flusspiegels bei etwa 1 550 msnm (m ü. Meeresspiegel) an (Bild 2). Die Tuffe sind überwiegend gering durchlässig mit Durchlässigkeitsbeiwerten in der Größenordnung von  $k_f = 10^{-6}$  bis  $10^{-8}$  m/s. Die Ignimbrite weisen in der Regel größere Durchlässigkeitswerte auf. Unterhalb der Talsohle stehen zwei Ignimbritenhorizonte mit deutlich größerer Durchlässigkeit an, in denen artesisches Grundwasser ansteht (Bild 2). Im oberen artesischen Aquifer A entspricht die Druckhöhe in etwa dem Flusspiegel (1 550 msnm). Im unteren artesischen Aquifer B liegt die Druckhöhe etwa 20 bis 30 m höher (ca. 1 575 msnm). Für den unteren Aquifer wurden in Pumpversuchen Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von  $k_f = 10^{-4}$  m/s ermittelt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass zwischen dem späteren Stausee und den beiden Aquiferen hydraulische Verbindungen bestehen.

**Kompakt**

- Planung einer Schwergewichtsmauer aus Walzbeton, welche auf stark verformbaren Gesteinsschichten gegründet ist.
- Eine besondere Herausforderung stellen auch noch zwei artesische Aquifere unter der Gründungssohle dar.



Bild 1: Übersicht Gesamt-Projekt und Sperrenstelle

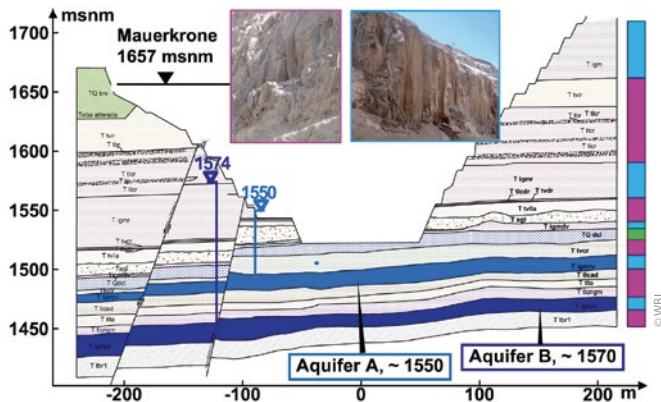


Bild 2: Untergrund- und Grundwasserverhältnisse

### 3 Mauerform und Standsicherheit

Die Staumauer hat im Grundriß eine leicht gekrümmte Form, durch die eine gewisse räumliche Tragwirkung entsteht. Die Kronenlänge beträgt etwa 390 m (Bild 4). Es ist ein zentrisch angeordneter, fester Hochwasserüberlauf mit einer Länge an der Krone von etwa 130 m vorgesehen. Die Schussrinne mit seitlichen Leitwänden und zwei Reihen von Deflektoren ist in den Bildern 5 und 10 zu sehen.

Die Staumauer hat eine Höhe von etwa 130 m über Talsohle (Bild 6). Die Breite in der Gründungssohle beträgt etwa 137 m. Die unterwasserseitige Maueroberfläche hat eine Neigung von etwa 1 (vertikal) zu 1,25 (horizontal) und mündet am unterwasserseitigen Fuß in einen horizontal verlaufenden Mauerteil, den sogenannten Rucksack. Dieser „Rucksack“ hat sich aus der Historie der Planung und des Baus dieser Staumauer ergeben, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Das Bauwerk wirkt als Schwergewichtsmauer.

Der Mauerkörper wird aus Walzbeton errichtet. Es sind drei verschiedene Betongüten mit von unten nach oben abnehmender Festigkeit und zunehmender Verformbarkeit vorgesehen (Bild 6). An der Oberwasserseite ist eine Vorsatzschale aus konventionellem Beton vorgesehen. Ebenso werden die Schussrinne

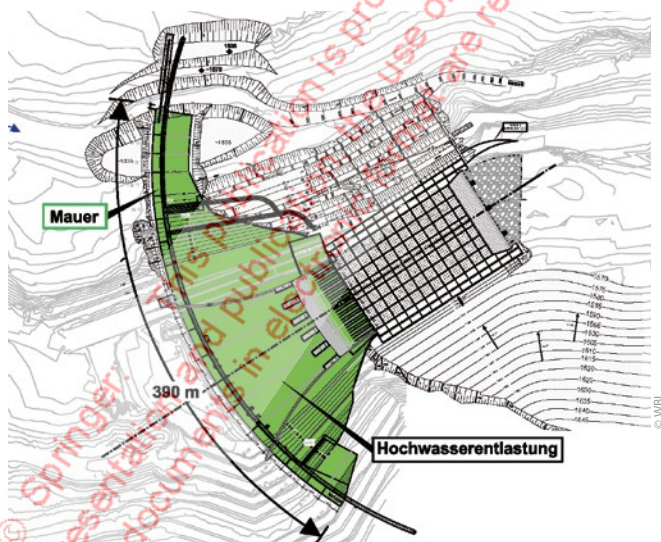


Bild 4: Lageplan Staumauer

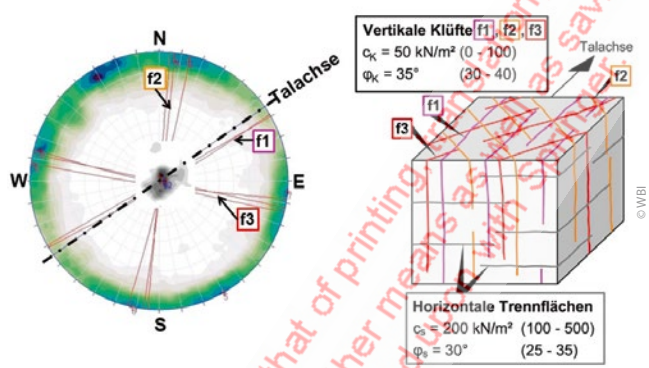


Bild 3: Trennflächengefüge

und die sonstigen Bauteile der Hochwasserentlastung aus konventionellem Beton gebaut.

Der Standsicherheitsnachweis wurde räumlich mit Hilfe der FE-Methode geführt. Es wurden alle maßgebenden Lastfälle berücksichtigt. In den räumlichen FE-Netzen wurden die Staumauer sowie der Untergrund unterhalb der Gründungssohle und im Widerlagerbereich wirklichkeitsnah nachgebildet (Bild 7). Auch die Sickerströmung aus dem Einstau wurde unter Berücksichtigung des Einflusses der beiden Aquifere berücksichtigt.

Für die Sickerströmungsberechnungen und die statischen Berechnungen wurden die von WBI entwickelten Programmsysteme HYD03 und FEST03 verwendet [1]. Der Nachweis für die Belastung aus Erdbeben wurde räumlich mit dem ebenfalls eigenen Programmsystem FESTD3 und zweidimensional mit dem Programmsystem SAP 2000, das in Wilson [2] beschrieben wird, geführt.

### 4 Injektions- und Drainageschleier

In der Staumauer und in den Widerlagern beidseitig der Staumauer sind insgesamt fünf Kontrollgänge vorgesehen. Ausgehend von diesen wird ein einreihiger Injektionsschleier ausge-



Bild 5: Blick auf die Staumauer vom linken Widerlager in 2014

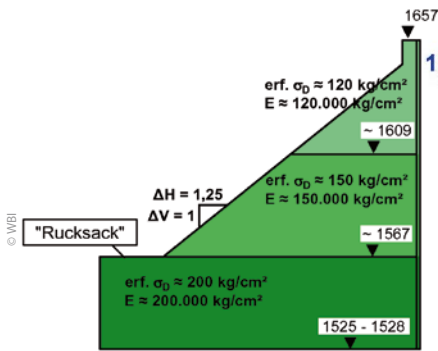


Bild 6: Querschnitt Staumauer

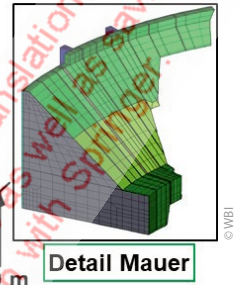
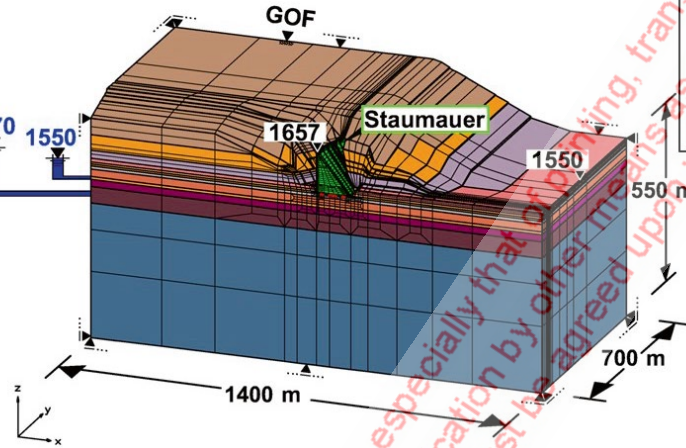


Bild 7: 3-D-FE-Netz für Sickerströmungs- und Standsicherheitsberechnungen

führt. Mit diesem werden die durchlässigeren Felspartien im Widerlagerbereich und unterhalb der Gründungssohle abgedichtet. Mit dem Injektionsschleier müssen auch die beiden unterhalb der Gründungssohle anstehenden, artesisch gespannten Aquifere abgedichtet werden. Hierzu ist das Abteufen und Injizieren von bis etwa 100 m langen Bohrungen gegen vergleichsweise hohe artesische Drücke erforderlich.

Auf der Unterwasserseite des Injektionsschleiers ist ein Drainageschleier vorgesehen. Mit diesem werden die Widerlagerbereiche drainiert sowie der Fels unterhalb der Gründungssohle bis einschließlich des oberen artesischen Aquifers. Der untere artesische Aquifer wird aufgrund der hohen zu erwartenden Wassermengen nicht über die Drainagebohrungen und die Mauer drainiert. Für die Drainage dieses Aquifers ist eine Serie

von Entspannungsbrunnen am unterwasserseitigen Fuß der Staumauer vorgesehen (Bild 8).

### 5 Bauausführung, Monitoring, Qualitätssicherung

Mit dem Bau der Mauer wurde Ende 2011 begonnen. Einen Eindruck von den Betonarbeiten vermittelt Bild 9. Für den Walzbeton wird eine umfangreiche Qualitätssicherung ausgeführt, deren Ergebnisse von WBI ausgewertet und bewertet werden.

Aufgrund der besonderen Schwierigkeit des Bauwerks und des Gründungsfelses sowie gewisser Unsicherheiten in den Kennwerten wird die Baumaßnahme im Sinne der Beobach-

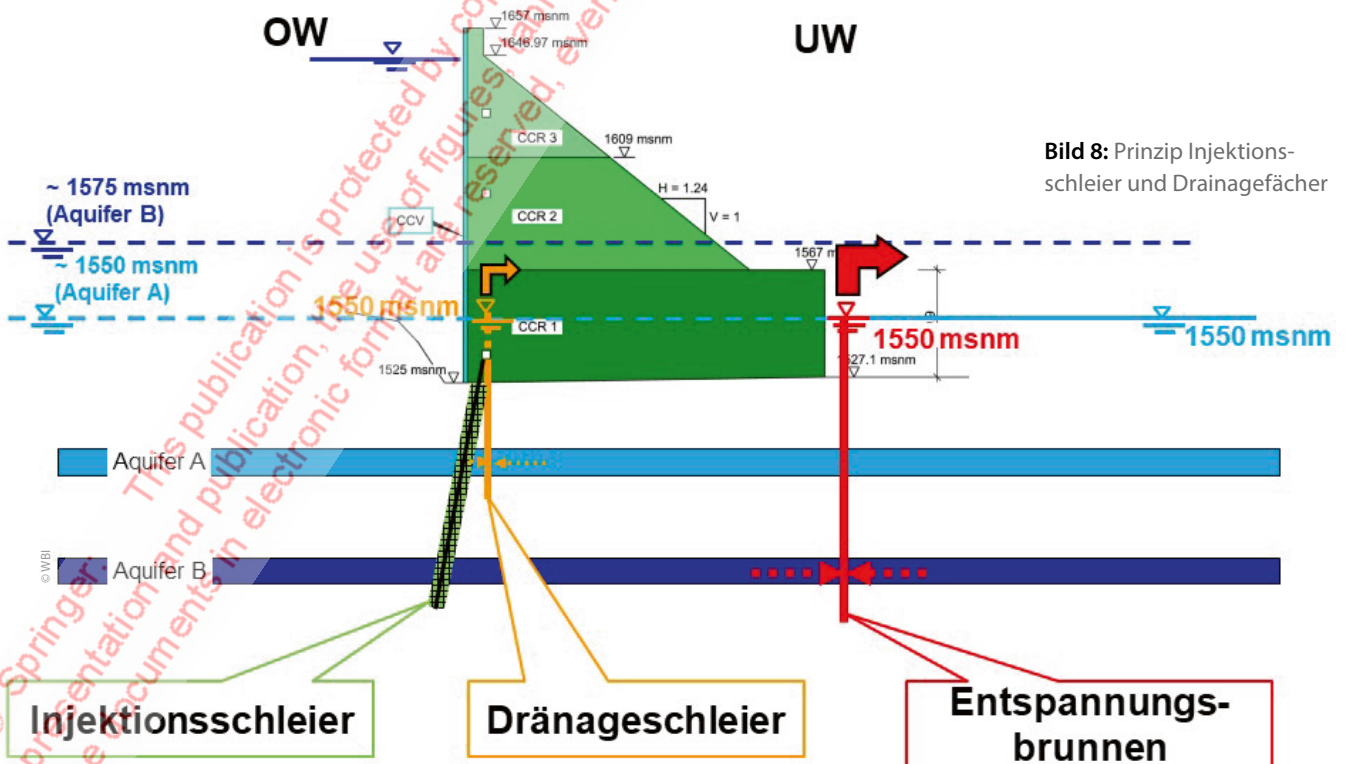


Bild 8: Prinzip Injektionsschleier und Drainagefächer



Bild 9: Betonierarbeiten

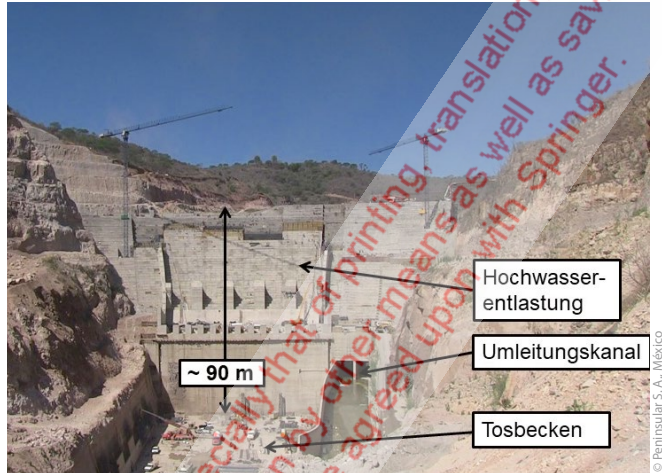


Bild 10: Blick auf die Staumauer vom Unterwasser in 2014

tungsmethode von WBI fachtechnisch eng begleitet. Es ist sowohl für den Bau als auch für den späteren Einstau und Betrieb der Staumauer ein extensives Monitoring-Programm vorgesehen. Die Messinstrumente werden baubegleitend schrittweise eingebaut und anschließend regelmäßig gemessen. Die Messergebnisse werden mindestens im monatlichen Rhythmus ausgewertet, bewertet und mit den Ansätzen der Planung verglichen. Wenn sich aus den Messungen ergeben sollte, dass die in der Planung getroffenen Annahmen modifiziert werden müssen, werden nach Erfordernis Nachrechnungen durchgeführt. Diese messtechnische und fachtechnische Begleitung wird auch nach Abschluss der Bauarbeiten während des Einstaus der Mauer fortgesetzt.

## 6 Ausblick

Zwischen 2012 und 2014 schritt der Bau der Mauer zügig und erfolgreich voran. Im Sommer 2014 – es war eine Höhe von etwa 100 m über Gründungssohle erreicht und die Mauer befand sich wenige Monate vor ihrer Fertigstellung (Bilder 5 und 10) –

mussten die Arbeiten aus politischen Gründen vorübergehend eingestellt werden. Ein Jahr später, im Spätsommer 2015 konnten die Arbeiten zur Errichtung der Injektions- und Drainageschleier wieder aufgenommen werden. Wir hoffen, dass auch die Bauarbeiten für den Mauerkörper selbst bald wieder begonnen und erfolgreich zum Abschluss gebracht werden können.

### Autoren

Prof. Dr.-Ing. E. h. Walter Wittke  
 Dr.-Ing. Bettina Wittke-Schmitt  
 WBI Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure  
 für Grundbau und Felsbau GmbH (WBI)  
 Im Technologiepark 3  
 69469 Weinheim  
 wbi@wbionline.de

### Literatur

- [1] Wittke, W.: Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), 2014.
- [2] Wilson, E. L.: Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, 2002.
- [3] Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.: Talsperre Zapotillo in Mexiko – eine 130 m hohe Staumauer aus Walzbeton auf stark verformbarem Fels. In: WasserWirtschaft 106 (2016), Heft 6, S. 90-93.

Walter Wittke and Bettina Wittke-Schmitt  
**El Zapotillo – A 130 metre-high RCC dam founded on a highly deformable rock mass**  
 The El Zapotillo roller compacted concrete (RCC) dam, which is around 130 metres high, is being built on the Río Verde near Guadalajara, Mexico. The dam is built on highly deformable layers of tuff, which are encountered in an alternating sequence with ignimbrite. Two layers of ignimbrite with a higher permeability form two artesian aquifers below the valley floor. The design of the dam has to account for these difficult ground conditions. The high deformability of the tuff layers in particular represents a major challenge in terms of proving stability of the dam. The design of the grouting and drainage concept is dominated by the two artesian aquifers. Proof of stability was provided with the help of 3D finite element analyses using programme systems from the WBI consulting firm. Construction of the dam and reservoir filling and operation are and will be accompanied by an extensive monitoring programme and expert opinions following the observational method well known in geotechnical engineering.



### Walzbetonstaumauer

Pohl, R.: Dammkronenelemente zur Verminderung des Wellenauf- und -überlaufes. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 05/2016. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.  
[www.springerprofessional.de/link/10099516](http://www.springerprofessional.de/link/10099516)

Hoepffner, R.; et al: Verteilte faseroptische Dehnungsmessungen in Betonbauwerken, Lockergestein und Hangrutschungen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 09/2012. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.  
[www.springerprofessional.de/link/3416698](http://www.springerprofessional.de/link/3416698)