

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 136 (2010)
Heft: 14-15: Verkehrsvisionen

Artikel: Ein Tunnel nach Afrika
Autor: Lombardi, Giovanni
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-109594>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

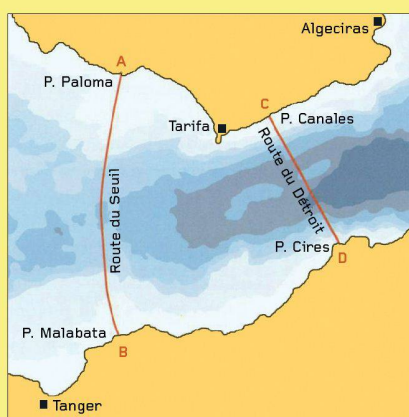
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

EIN TUNNEL NACH AFRIKA

Meerengen haben Politiker, Künstler, Feldherren und Ingenieure seit der Antike zu Visionen herausgefordert. Dies trifft insbesondere auf die Strasse von Gibraltar zu.¹ Jahrzehntelange Erfahrung im Tunnelbau und fortschrittliche Bautechnik rücken heute die Realisierung des fundierten Projekts einer internationalen Ingenieurgemeinschaft in den Bereich des Möglichen.²



Seit etwa einem halben Jahrhundert ist das Gebiet von Gibraltar Gegenstand von mehr und auch weniger realistischen Projektideen, um die Meerenge zu überqueren. Aus verschiedenen Gründen mussten Projekte für eine Hängebrücke, einen Tunnel auf dem Seeboden und einen schwimmenden Tunnel in beschränkter Tiefe fallen gelassen werden. Nur ein Bahntunnel im Felsuntergrund kommt beim heutigen Wissensstand infrage.

NATÜRLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Breite der Meerenge variiert zwischen etwa 15km bei Algeciras bis etwa 30km bei Tanger (Abb. 1). Die Tiefe verläuft umgekehrt von 1000m bei Gibraltar bis auf 300m in der Achse Punta Paloma–Tanger, wo eine «Schwelle» vorhanden ist (Abb. 4). Es scheint, dass beim Einbruch des Atlantiks in das Mittelmeer ein zentraler Graben von etwa gleichmässiger Breite erodiert wurde, während die kontinentalen Sockel von der Erosion teilweise verschont blieben. Daraus ergab sich die Entscheidung, den Tunnel entlang der genannten Schwelle zu trassieren. Der Untergrund der Meerenge besteht im Wesentlichen aus Flyschformationen, d.h. einer Wechsellagerung von dünnen Sandstein- und Mergelschichten (Abb. 7). Die Serie von subvertikalen Schuppen, die durch Störungszonen voneinander getrennt sind, deutet auf eine ausserordentliche tektonische Tätigkeit hin.

Als wichtige natürliche Tatsache sind die sehr starken Wasserströmungen in beiden Richtungen durch die Meerenge zu erwähnen, die den Sondierungen des Untergrunds ernsthafte Schwierigkeiten entgegenstellen.

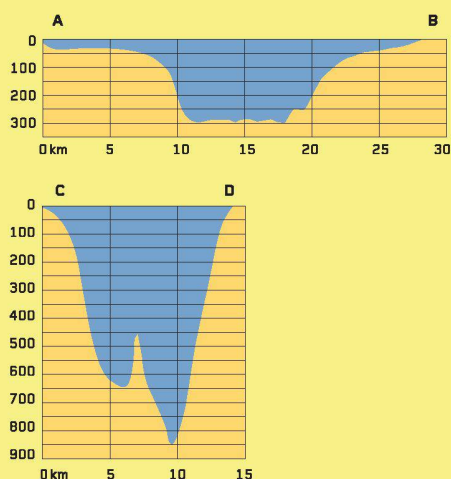
VORGESCHICHTE

Im Jahr 1980 wurde von den Königen von Spanien und Marokko eine Erklärung unterzeichnet, um die Studien für die Schaffung einer festen Verbindung zwischen den zwei Ländern zu fördern. Es wurden auch entsprechende Studiengesellschaften gegründet. In der Folge entstand 1996 das sogenannte APP96 (Avant-Projet Préliminaire 1996) auf Grund der damals bekannten natürlichen Gegebenheiten.

Die Trassierung folgte der erwähnten Meeresschwelle. Der tiefste Punkt des Tunnels lag etwa auf Kote minus 400m. Die Länge des Tunnels betrug rund 38km und die Steigung der Rampen maximal 25%. Der Ausbruch der Hohlräume im angenommenen Flyschgebirge sollte an sich keine besonderen Probleme aufwerfen. In den folgenden Jahren wurden verschiedene Sondierkampagnen ausgeführt. Zur grossen Überraschung wurden dabei zwei mit Brekzien (Gesteinstrümmer mit grober, eckiger Form, die in einer feinkörnigen Grundmasse eingebettet sind) gefüllte Gräben entdeckt (Abb. 2).

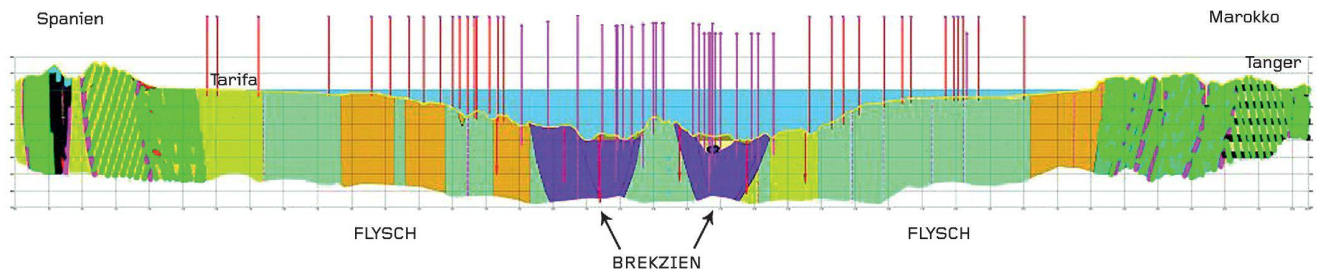
BREKZIEN, GRÄBEN UND WETTBEWERB

Entlang der Tunneltrassierung sind somit diese zwei Gräben zu queren, die eine Tiefe von mindestens 600m aufweisen und die auf der Kote von minus 500m zwischen 2.8km und 4.8km Breite erreichen. Der Ursprung dieser Gräben wird in der Erosion des Flyschgebirges durch die Wasserströmung vom Atlantik zum Mittelmeer vermutet. Anschliessend sollen grosse Rutschungen die Gräben bis auf etwa Kote minus 300m aufgefüllt haben. Die Auffüllung besteht aus Flyschbrekzien, die unter Wasser gerutscht sind und somit nicht gut

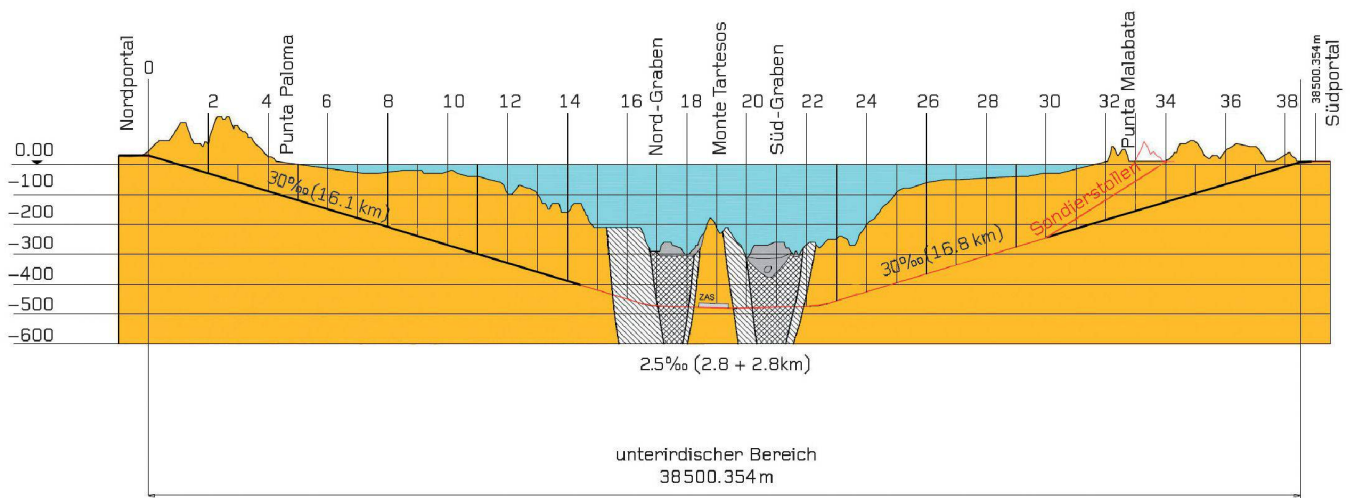


01

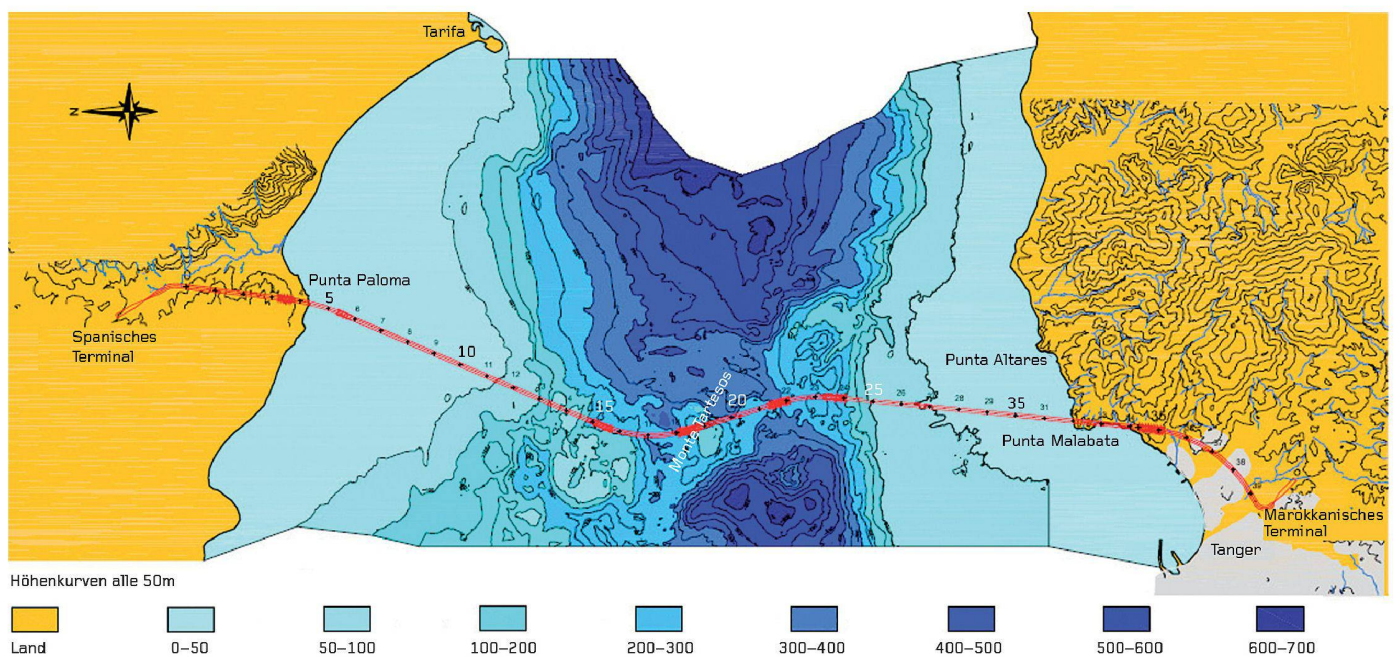
01 Situation und Tiefenprofil von zwei typischen Querschnitten durch die Meerenge von Gibraltar (Bilder: Lombardi AG)



02 Sondierungen des Untergrunds und Entdeckung der zwei brekziengefüllten Gräben



03 Längenprofil des Tunnels APP07 (2009). Der Sondierstollen ist rot eingezeichnet



04 Die Situation des Tunnels APP07

konsolidiert sein können. Die sehr schlechten felsmechanischen Eigenschaften des Gebirges stellten die Machbarkeit des Projektes APP96 infrage und verlangten zumindest dessen grundlegende Revision.

In der Tat ging es um das Erstellen eines neuen Projektes, da sich in der Zwischenzeit auch andere Erfordernisse geändert hatten. Deshalb wurde 2006 ein Ingenieurwettbewerb für das neue Projekt APP07 durchgeführt. Die Vergabe erfolgte an die Ingenieurgemeinschaft Typsa Madrid, Lombardi AG Minusio-Locarno, Geodata Torino und Ingema Rabat.

DAS PROJEKT

Die geotechnischen Eigenschaften der Brekzien und die Entdeckung von Sanden im Bereich der Gräben haben eine tiefere Trassierung des Tunnels bis etwa auf Kote minus 475m veranlasst. Demzufolge ergeben sich steilere Rampen, falls die Gesamtlänge des Tunnels nicht über das Minimum erhöht werden soll. Die Steigungen erreichen 30%, was als oberster zulässiger Wert angesehen wird (Abb. 3).

Zwischen den zwei Gräben liegt eine als «Monte Tartesos» bezeichnete Zone gesunden Flyschgebirges. Darin ist am tiefsten Punkt der Trassierung eine Sicherheitshaltestelle vorgesehen (Abb. 3 und 4). Die fertig gestellte Anlage würde aus zwei eingleisigen Bahntunneln und einem Sicherheitsstollen, mit Querverbindungen im Abstand von 340m, bestehen und somit dem Ärmelkanal-Tunnel sehr ähnlich sein. Von der Sicherheitshaltestelle wird die Abluft – und im Brandfall der Rauch – durch den Sondierstollen abgesogen.

GESTEINE UND BAUMETHODE

Die Brekzien in den zwei Gräben bilden die grösste Schwierigkeit für das Projekt (Abb. 8). Die Ermittlung ihrer wirklichen geotechnischen Eigenschaften ist immer noch anhand von einigen Bohrkernen aus den Sondierungen im Gange (vgl. Abb. 2). Wie die Erfahrung mit Sondierschächten und -stollen bewiesen hat, ist der Aushub im Flysch ohne besondere Probleme möglich. Erst vor Kurzem wurde aber die Quelfähigkeit dieser Formationen erkannt. Der natürliche Spannungszustand wird sich nur mit der Zeit wieder aufbauen, sodass eine sehr starke Auskleidung notwendig ist.

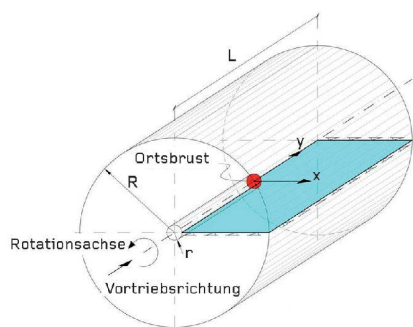
Die Durchquerung der erwähnten Gräben verlangt zweifellos den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen mit geeignetem Schild (EBP). Die Ortsbrust muss durch einen Erd- oder Schlammdruck stabilisiert werden. Als Folge des aussergewöhnlich hohen Wasserdruckes ist auch eine vorausgehende sehr intensive Drainierung des Gebirges durch einen Ring von Bohrungen erforderlich.

RECHNERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Wegen der bisher im Tunnelbau noch nirgends angetroffenen Verhältnisse werden nicht nur neue Baumethoden und neue Baumaschinen entwickelt werden müssen, sondern es galt zuerst, neue Berechnungsmethoden aufzustellen. Dabei handelt es sich um eine gekoppelte mechanisch-hydraulische Analyse unter der Bedingung eines fortschreitenden Vortriebs.

Die dreidimensionale Analyse konnte unter den gegebenen Verhältnissen durch ein zentral-symmetrisches Modell ersetzt werden (Abb. 5). Die sehr niedrige Durchlässigkeit der Brekzie von 10^{-10} m/s bis 10^{-7} m/s bestimmt die Dauer einer Drainage ungünstig mit. Es wurde ein Tunnel von 6m Innendurchmesser simuliert, der demjenigen des Sicherheits- und des Sondierstollens entspricht. Viele Fälle wurden durchgerechnet, die das ganze Spektrum der denkbaren Verhältnisse abdecken sollen (Abb. 6). Für jeden Fall wurden der Verlauf der Konvergenz, die effektiven Spannungen und der Porendruck im Verlaufe der Zeit, d.h. des Vortriebs, errechnet.

Die radiale Konvergenz vor dem Schild musste auf 40cm beschränkt werden, um die Führung der Tunnelbohrmaschine zu ermöglichen. Der Gegendruck an der Tunnelbrust wurde als Grundwert zu 1 MPa festgelegt, was etwa der obersten Grenze für heutige Bohrmaschinen entspricht. Ein höherer Wert, zum Beispiel um 2 MPa, wäre aber viel günstiger.



05

Geomechanische Eigenschaften der Brekzien (Mittelwerte)

Wichte	$\gamma_{\text{sat}} = 21.7 \text{ kN/m}^3$
Reibungswinkel	$\varphi = 17 - 24^\circ$
Kohäsion	$C = 100 - 150 \text{ kPa}$
Verformungsmodul	$E = 200 \text{ MPa}$
Plastische Grenze (Softening)	$\epsilon_{\text{pe}} = 10 \%$
Poisson'sche Zahl	$\nu = 0.33$
Durchlässigkeit	$k = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Hauptdaten für die Berechnungen (mit Streubreite)

Länge des Schildes	10 m
Druck an der Ortsbrust	1 MPa (1 – 2)
Vortriebsleistung	3 m/Tag (1 – 5)
Durchlässigkeit	10^{-8} m/s ($10^{-10} - 10^{-7}$)
Zulässige radiale Konvergenz (von Ortsbrust bis zum Schild)	40 cm

06

05 Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell
06 Parameter für die Simulation der felsmechanischen Verhältnisse beim Bohren eines Tunnels von 6 m Innendurchmesser in der Brekzie



07

07 Flyschformationen an der spanischen Küste
08 Bohrkerne aus der Brekzie



08

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass:

- die Strömungskräfte für die Stabilität der plastischen Zone während des Vortriebs massgebend sind
- in den Brekzien und in den Flyschen der schlechtesten Felsklasse Drainagebohrungen unerlässlich sind
- die erreichbare Vortriebsgeschwindigkeit von der Wirkung der Drainage und von der Durchlässigkeit des Gebirges abhängt
- der Gegendruck an die Ortsbrust höher als 1 MPa sein sollte
- die Gefahr des Einklemmens des Schildes gegeben ist.

FORTSETZUNG DES PROJEKTES

Am Ende der Studien schlägt die Ingenieurgemeinschaft die folgenden Massnahmen für die Weiterbearbeitung des Projekts vor:

1. In Zusammenarbeit mit den Herstellern von Tunnelbohrmaschinen ist zu untersuchen, ob ein höherer Gegendruck als 1 MPa auf die Ortsbrust möglich ist.
2. Vertikale Sondierbohrungen im Kanal sollen die Ausdehnung der Gräben festlegen.
3. Die anfallenden Bohrkerne sind felsmechanisch zu analysieren.
4. Der Ausbruch eines Sondierstollens ist unerlässlich.
5. Von diesem Sondierstollen aus sollen gezielte Bohrungen ausgeführt werden, um die Verhältnisse zu erforschen und um die Trassierung zu optimieren.

Aus heutiger Sicht ergibt sich ein Bauprogramm, welches etwa 30 Jahre umfassen würde. Die Baukosten sind in der Grössenordnung von etwa 12 Mrd. Euro geschätzt worden. Aus den bis heute durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass der Bau eines Tunnels unter der Meerenge von Gibraltar denkbar ist. Die effektive Machbarkeit muss jedoch noch nachgewiesen werden.

Es ist klar, dass ein Gefälle von 30‰ in den beiden Rampen nicht begeistern kann. Ein kleineres Gefälle könnte kaum durch Reduktion der Tiefe in der Durchquerung der Gräben erreicht werden, sondern nur durch Verlängerung des Trassees.

Anmerkungen

1 Ein Beispiel dafür ist das Projekt «Atlantropa» für einen Staudamm in der Strasse von Gibraltar, siehe TEC21 23/2007

2 Der vorliegende Beitrag ist eine gekürzte Fassung des Referats, das der Autor am Swiss Tunnel Congress 2010 im KKL Luzern am 10. Juni 2010 halten wird. Organisation: FGU Fachgruppe Untertagebau/Swiss Tunneling Society
Anmeldungen und Auskünfte: fgu@thomibraem.ch

Giovanni Lombardi, Dr. Ing., Lombardi SA Minusio, info@lombardi.ch