

**Tektonische Großstrukturen der Erde und ihre Bedeutung  
bei der Projektierung und Ausführung von Großbauvorhaben**

von

**Ing. Dr. Rudolf SCHWINGENSCHLÖGL**

mit 20 Abbildungen

(Die vorliegende Arbeit stellt die erweiterte Fassung eines Vortrages  
über „Plattentektonik und Kraftwerksbau“ dar,  
welcher im März 1984 an der HTL in Wiener Neustadt, Niederösterreich,  
vom Verfasser gehalten wurde.)

Schlüsselwörter:

Plattentektonik  
Großstrukturen  
Erdbeben  
Kraftwerks- und  
Verkehrswegebau

Anschrift des Verfassers:  
Ing. Dr. Rudolf Schwingenschlögl  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Bodenforschung und Baugeologie  
Abteilung für Baugeologie  
Gregor Mendel Straße 33  
A-1180 Wien

## Inhalt

Zusammenfassung, Summary	16
1. Einleitung, Zweck der Arbeit	17
2. Charakteristika der Plattentektonik	18
3. Erdbebenskalen	20
4. Gedanken zur Standortwahl	20
5. Bauwerksarten	21
6. Rezente Bewegungsvorgänge in Orogenen und an Plattengrenzen	21
7. Großbauvorhaben	22
7.1. Die Messina-Brücke	22
7.1.1. Bauwerksarten	22
7.1.2. Geographische Lage, Bestimmung, Kosten	23
7.1.3. Plattentektonische Aspekte und Erdbeben	23
7.1.4. Geologie des Gebietes, Bruchsysteme, Fundierung	25
7.1.5. Konstruktion, Maßnahmen in der Ausführung	26
7.2. Der Nurek-Damm	27
7.2.1. Geographische Lage	28
7.2.2. Plattentektonische Aspekte und Erdbeben	28
7.2.3. Geologie des Sperrengebietes, Bruchsystem und Fundierung	29
7.2.4. Induzierte Erdbeben bei großen Speicherbauwerken	29
7.2.5. Konstruktion, Ausführungsdetails, Bebeeinflüsse	31
7.3. Das Auburn-Folsom-South-Projekt	32
7.3.1. Bauwerksart	32
7.3.2. Geographische Lage, Bestimmung, Kosten	32
7.3.3. Plattentektonische Aspekte, Erdbeben und Bradyseismen	32
7.3.4. Aktive Störungs- und Verwerfungszonen	34
7.3.5. Geologie des Gebietes, Bruchsysteme, Fundierung	35
7.3.6. Berechnungsverfahren in Erdbebengebieten	35
7.3.7. Konstruktion, Ausführungsdetails, Bebeeinflüsse	36
7.4. Das Gibraltar-Projekt	36
7.4.1. Bauwerksart	36
7.4.2. Geographie, Bestimmung und Kosten	37
7.4.3. Plattentektonische Aspekte, Erdbeben	37
7.4.4. Geologie des Projektgebietes, Bruchsysteme, Auffahrung und Fundierung	38
7.4.4.1. Tunnellösung	38
7.4.4.2. Brückenlösung	39
7.4.5. Konstruktion, Ausführungsdetails und Bebeeinflüsse	40
7.4.5.1. Tunnellösung	40
7.4.5.2. Brückenlösung	41
8. Schlußbetrachtungen	41
9. Literatur	41

## Zusammenfassung

Die „Neotektonik“, als Wissenschaftsdisziplin von jungen und jüngsten Bewegungsabläufen in der Erdrinde in Verbindung mit dem Erdbebenrisiko für Großbauvorhaben, bildet die Grundlage für diese interdisziplinäre Arbeit.

In einer knappen, vornehmlich an den Bauingenieur adressierten Darstellung der Plattentektonik und den daraus resultierenden seismischen Ereignissen in der Erdkruste, werden in einer Zusammenschau mit vier bedeutenden Großprojekten (Wasserkraftwerke und Verkehrswegevorhaben) tektonische Großstrukturen (Störungssysteme) eingehend analysiert.

Neben der jeweils gewählten Bauwerksart, den plattentektonischen Aspekten und den Erdbebeneinwirkungen werden die Geologie der Projektgebiete, die Bruchsysteme und der primäre Spannungszustand sowie einige Konstruktionsdetails zur Betrachtung kommen. Induzierte Erdbeben, die Frage nach der „Aktivität“ einer Störung oder eines Störungssystemes und Berechnungsverfahren von Gewölbemauern im Lichte der Ingenieurgeologie werden kurz erläutert.

### Summary

Neotectonics, as a new branch of study in recent activity of tectonics combined with the seismic risk at big engineering projects is the basis for this interposed headwork.

In a concise description of the plate tectonic and the resulting seismic events in the earth crust, especially directed to the civil engineer, macrotectonics (fault bundles) was analysed in a synopsis with four significant projects (hydroplants and traffic connections).

These considerations include the kind of building, the plate tectonic, the effects of an earthquake, the geology of the area, the joint pattern, the primary stress conditions and some details of the construction.

„Man-made“ earthquakes, the questions of fault or fault systems activity and the methods of calculation at an arched dam seen by engineering geology will be illustrated in short cases.

### 1. Einleitung, Zweck der Arbeit

Auf die Bedeutung von tektonischen Großstrukturen im Zusammenhang mit Kraftwerksbauten wurde schon vor Jahrzehnten in verschiedenen Arbeiten (wie J. STINI, 1926, 179 ff.; H. P. CORNELIUS, 1941, 386–388; L. MÜLLER, 1949, 101 ff. und jüngst T. E. GATTINGER, 1978, 17 ff.) eingegangen. Trotzdem scheint es angezeigt, gerade die moderne Theorie der Plattentektonik und ihre Auswirkungen auf Großbauwerke genauer zu beleuchten und jene regionale/lokale Tektonik bei großen Projekten stets zu berücksichtigen. Wohl wirkt sich eine bloß säkular zu beobachtende Hebungs- oder Senkungstendenz eines Orogens oder die langsame, kriechende Bewegung von zwei Erdkrustenschollen auf diese Kunstbauten nicht sofort sichtbar und nachweisbar aus – sie liegt oft unter der Meßgenauigkeit von Geräten. Da aber heute manche Kraftwerke, große Talsperren, kontinentverbindende Tunnel und auch große Brücken, oft in der Nähe einer Plattengrenze oder sogar aktiven Verwerfung liegen, und die Gründungsgebiete von Erdbebenzonen, Störungen und Brüchen geprägt sind, müssen diese tektonischen Großstrukturen hinsichtlich ihrer Bewegungsabläufe genauestens untersucht werden. Zweck dieser Arbeit ist wieder einmal mehr, daß es bei großen Eingriffen in den Boden und den felsigen Untergrund ja heute eigentlich keinen Bauingenieur mehr geben dürfte, der diese komplizierten Wechselbeziehungen von Bauwerkslasten und Untergrunddeformationen mit ihren vielfältigen Spannungs- und Verformungsbildern außer acht lassen kann, um sein Bauwerk sozusagen für die „Ewigkeit“ zu bauen.

Eine Zusammenarbeit von Bauingenieuren und Geologen kann daher bei der Projektierung und Ausführung von Großbauvorhaben nur nützlich und förderlich sein.

## 2. Charakteristika der Plattentektonik

Die Plattentektonik ist eine moderne, erdwissenschaftliche, mobilistische Theorie der Erdkrustenverteilung und der Ozeanbildung.

Grundgedanke war die Kontinentalverschiebungstheorie von A. WEGENER, einem deutschen Meteorologen und Geophysiker, aus dem Jahre 1912. WEGENER wirkte übrigens auch lange Zeit an der Universität Graz.

Von einem Großkontinent – Pangäa genannt – ausgehend, haben sich die Teilkontinente, durch treibende Kräfte im äußeren Erdmantel, in ihre heutige Position geschoben. Am Beispiel Südamerikas und Afrikas sieht man bei Zusammenfügen das beinahe nahtlose Zusammenpassen dieser Kontinente.

Eine Fülle von geologischen und paläontologischen Argumenten, wie Ähnlichkeiten der Gebirgsstrukturen, der fossilen Pflanzen- und Tierwelt auf beiden Seiten des Südatlantiks, wie auch das Auftreten von fossilen Moränen auf allen Südkontinenten, deutet auf einen einstigen Großkontinent hin.

Mit Beginn des Jurazeitalters (d. s. 190 Mio. Jahre b. P.) vollzog sich dann eine Trennung der einzelnen Krustenschollen – die Drift der Kontinente begann. Verschiedene geophysikalische (wie paläomagnetische, reflexionsseismische, gravimetrische und wärmestrombedingte) und geologische (wie tiefbohrtechnische und sedimentologische) Belege wie auch charakteristische Erdbebenzonen und Vulkanketten bestätigten in den 60er Jahren voll die vorher vielfach angezweifelte Hypothese von A. WEGENER. Untermeerische Gebirge von gewaltigen Ausmaßen, die sogenannten „mittelozeanischen Rücken“, wurden bei diesen Forschungen entdeckt und umspannen mit 80.000 km Gesamtlänge den ganzen Erdball. An „rift-valleys“ (= Gipfeltälern) tritt nun ständig basaltisches Magma aus und sorgt somit für die stetige Auseinanderbewegung von Teilplatten der Erdkruste (s. Abb. 1).

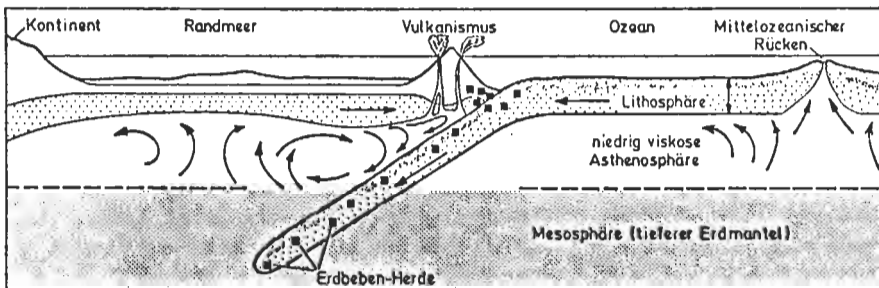


Abb. 1: Subduktion einer ozeanischen – unter eine kontinentale Platte. Die Pfeile in der Asthenosphäre deuten die Richtung lokaler Konvektionsströme an (nach TOKSÖZ, 1983).

So liegt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Teilplatten am ostpazifischen Rücken zwischen 6 und 18 cm/a, am mittelatlantischen Rücken nur bei 1–3 cm/a.

Nach der Einrichtung von weltweiten Erdbebenregistrierstationen Ende der 50er Jahre, damals nicht zu wissenschaftlichen Zwecken, sondern als Kontrollinstanz unterirdischer Atomwaffentests, konnte sozusagen als Nebeneffekt gezeigt werden, daß die meisten Beben in relativ schmalen Zonen, am Rande des Pazifiks, dem „zirkum-

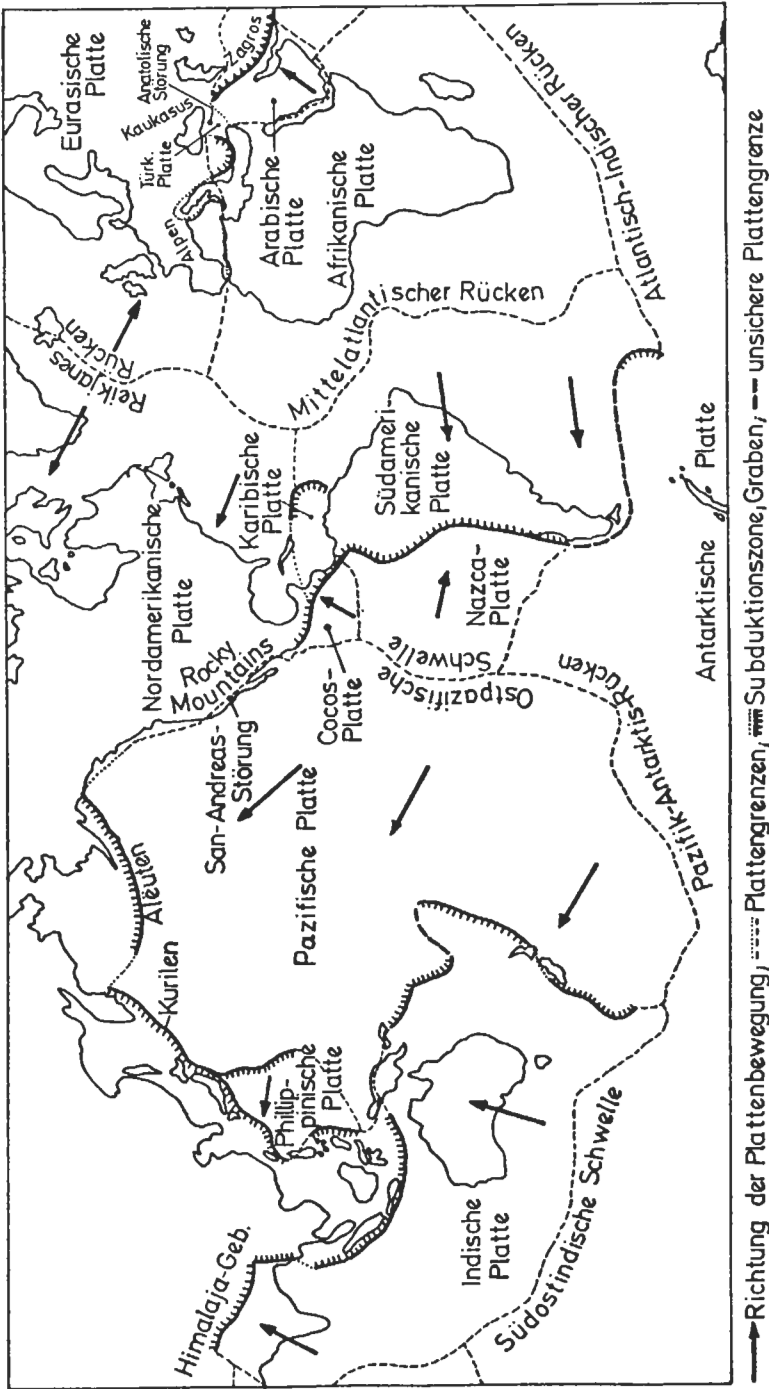


Abb. 2: Geographische Anordnung der wichtigsten Lithosphärenplatten in der äußeren Schale des Erdkörpers (nach DEWEY, 1983, verändert umgezeichnet).

pazifischen Erdbebengürtel“ und am Südrand Eurasiens auftraten. Die seismische Aktivität Europas hingegen folgt im allgemeinen dem Verlauf der alpidisch geformten Gebirge (s. Abb. 2).

Da die Beben an diese schmalen Gürtel gebunden scheinen und sich innerhalb dieser Zonen kaum Erdbeben ereigneten, wurde der Begriff „Plattentektonik“ geprägt und die Erdkruste in 12 Hauptplatten (X. LE PICHON et al., 1973) eingeteilt. Also die bebenfreien Zonen s. l., stellen die starren Platten dar, die Bebenzonen zeigen hingegen die Ränder oder Grenzen dieser Platten an.

Plattengrenzen können nun durch Dehnung, Kompression und/oder Scherung der Erdkruste charakterisiert werden.

Dehnung findet an den „mittelozeanischen Rücken“ statt. Beben ereignen sich an Querverwerfungen.

Kompression wird durch sogenannte „Subduktions“- oder Verschluckungszonen angezeigt, wo eine spezifisch schwerere, ozeanische Lithosphärenplatte unter eine spezifisch leichtere, kontinentale Platte geschoben wird (s. Abb. 1). Tiefherdbeben verdeutlichen diese Zonen.

Große Blattverschiebungen, welche eine Scherung in den Erdkrustenschollen verursachen, wie die berühmte San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien, an der die Stadt San Francisco liegt, lösen als steil geneigte Plattengrenze, beim Aneinandervorbeigleiten von Erdkrustenschollen, Erdbeben aus. Beim Überschreiten der Scherfestigkeit des Gesteinsmaterials erfolgt ein ruckartiges Nachgeben – ein Erdbeben. Danach erfolgt ein neuerlicher Spannungsaufbau bis zum nächsten Beben.

Es wird hier Energie frei, die in Form von elastischen Raumwellen innerhalb des Erdkörpers nach allen Richtungen abgestrahlt wird und für die Verschiebung, Verdrehung, wellenförmige Hebung und Senkung der Erdoberfläche sorgt.

Erdbeben treten somit überall dort auf, wo Spannungen in der Erdkruste, vorwiegend Scher- oder Schubspannungen, die Scherfestigkeit von Gesteinen überschreitet.

### 3. Erdbebenskalen

Die Feststellung der Erdbebenstärke erfolgt einerseits nach makroseismischen Eindrücken – der bekannten Mercalli-Skala und andererseits nach der Magnitude, d. h. dem Energieinhalt, der ebenfalls bekannten Richter-Skala.

Die klassische Mercalli-Cancani-Sieberg-Skala (MS), wird heute durch die wesentlich verfeinerte, auf die Bauteile und Baustoffe eingehende, Medvedev-Sponheuer-Karnik Skala (MSK) ersetzt.

Die von Ch. RICHTER (1935) definierte Magnitude  $M$  ist ein Maß für die freigesetzte Energie, sie wird aus den Maximalausschlägen seismischer Registrierungen abgeleitet. Eine einfache Faustregel von J. TRIMMEL (1981, S. 8 ff.) mit  $M = (2/3) \cdot I_0$  ( $I_0$  = Epizentralintensität nach der 12-teiligen Mercalli-Skala) liefert eine rasche Zuordnung dieser beiden wichtigen Kenngrößen.

### 4. Gedanken zur Standortwahl

Die vordringlichsten Gesichtspunkte für den Standort eines Kraftwerkes, eines Tunnels oder eines wichtigen Brückenbauvorhabens sind zunächst einmal wirtschaftlicher Natur.

Beginnend mit der Wirtschaftsstruktur, dem Bedarf, der Lage zu Ballungszentren, gelangt der planende Techniker sodann zu geographischen Zwangspunkten und zuletzt, so ist es vielfach der Fall, wird der geologische Aufbau eines Projektgebietes beachtet.

Aus diesem Grund kommt der geologischen Voruntersuchung heute mehr denn je eine wichtige Stellung zu und umso mehr ist dem petrologischen Aufbau und dem regionalen Spannungsfeld im Projektgebiet größte Beachtung zu schenken.

### 5. Bauwerksarten

Im allgemeinen lassen sich drei Gruppen von Großbauvorhaben unterscheiden: Wasserkraftwerke, Brücken und Hohlraumbauten.

Bei Wasserkraftwerken richtet sich die Art des Sperrenbauwerkes in erster Linie nach dem Untergrund und dem Talquerschnitt. Sucht man für Bogenmauern einen Talquerschnitt mit geringerem Höhen- und Breitenverhältnis sowie einem belastungsfähigen Fels in den Talflanken, besonders im mittleren Drittel der Höhe, so werden Dämme bei flachem Talquerschnitt, geringer Tragfähigkeit des Untergrundes und großer Wasserräumlichkeit bevorzugt.

Bei Brücken wird man sich hingegen überlegen müssen, ob eine Talung in Form einer Bogenbrücke gequert werden soll – hier werden die resultierenden Auflagerkräfte in die Talflanken abgeleitet, was auch hier gut tragfähiges Gebirge voraussetzt. Oder man wählt eine Mehrfeldbrücke (Balkenbrücke, Hängebrücke), welche die Gesamtlasten über mehrere Stützen in das Gründungsgestein ableitet.

Ein Tunnelprojekt sollte ebenfalls nur nach genauer Erfassung der lokalen Geologie und Tektonik, also dem Störungsmuster des Baugebietes, des Primärspannungszustandes des Gebirges und der jüngsten Bewegungsrate von Hängen oder ganzen Gebirgstteilen in Angriff genommen werden und nicht nur die kürzeste Verbindung der beiden Tunnelportale darstellen (s. L. MÜLLER, 1978, S. 670 ff. und Abb. 3).

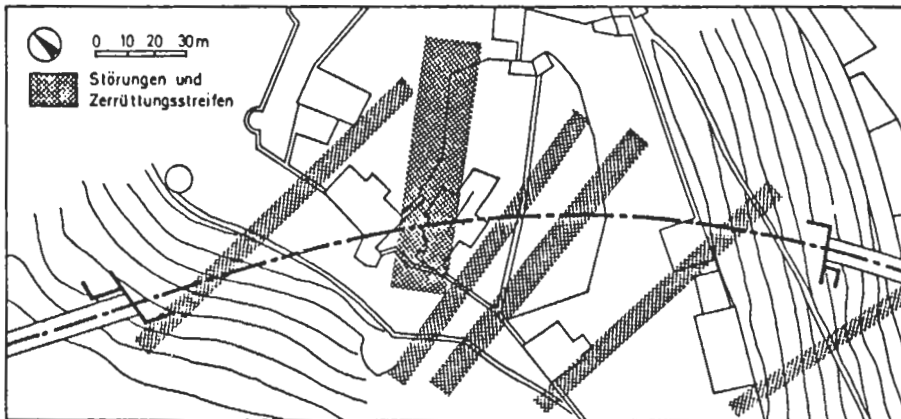


Abb. 3: Gekrümmte Linienführung einer Tunneltrasse zwecks günstiger (möglichst große spitze Winkel) Verschneidung mit Störungszonen (nach MÜLLER, 1978).

### 6. Rezente Bewegungsvorgänge in Orogenen und an Plattengrenzen

In allen alpidisch geformten Kettengebirgen läßt sich eine, vornehmlich vertikal polarisierte, Bewegungstendenz erkennen. Von unseren Ostalpen ausgehend sind nach E. SENFTL & CH. EXNER (1973, S. 228 ff.) vertikale Hebungen, bevorzugt am Südrand der Hohen Tauern, mit ca. 1 mm/a ermittelt worden – welche immer noch an-

dauern. Die Hebungsarten der vergleichbaren penninischen Einheiten betragen in der Schweiz ebenfalls ca. 1 mm/a.

Im Kaukasus, einem alpinotypen Gebirge, welches in einer Randgeosynklinale entstanden ist, wurden sogar Hebungen bis 12 mm/a beobachtet.

Durch T. HAGEN (1959, S. 59 ff.) wurden im Himalaya-Südvorland (der Siwalik-Molasse) jüngste Krustenhebungen bekannt. Alle Gebirgsketten der alpidischen Ära liegen nun an Plattenrändern oder -grenzen, an welchen heute immer noch eine meßbare Krusteneinengung stattfindet. Einengung führte s. l. zur Faltung und Deckentektonik, während für die epirogenen Hebungen das Wegschmelzen der Eisauflast und isostatische Ausgleichsbewegungen verantwortlich gemacht werden können. So lautet nach X. LE PICHON et al. (1973) eine fundamentale Prämisse, daß „die seismischen Zonen der Erdkruste Gürtel sind, welche eine differentielle Bewegung zwischen starren Platten zulassen“.

Kriechbewegungen von Erdkrustenschollen können an Scher- bzw. Plattengrenzen Beträge von mm/a bis dm/a hervorrufen. G. SCHNEIDER (1980, S. 35 ff.) betrachtet andererseits alle Verwerfungen in einem seismisch aktiven Gebiet als potentielle Erdbebenherde, wenn deren Streichrichtung etwa mit der Richtung größter Scherspannungen im regionalen-tektonischen Spannungsfeld zusammenfällt.

An vier bereits ausgeführten, bzw. projektierten, bedeutsamen Großbauvorhaben möchte ich die geologisch-tektonischen Charakteristika und den daraus resultierenden Einfluß verschiedener Bewegungsabläufe auf diese Kunstbauten besprechen.

## 7. Großbauvorhaben

### 7.1. Die Messina-Brücke

Seit Beginn der 50er Jahre wurden von der italienischen Regierung verschiedene Projektanten aus mehreren Ländern beauftragt, die „sagenhafte“ Durchfahrt zwischen Scylla und Charybdys – die Meerenge von Messina – zwischen Kalabrien (Süditalien) und der Insel Sizilien mit einem Verkehrswegeprojekt zu verbinden.

War die Messina-Straße schon im Altertum der Schrecken der Seeleute (s. HOMER: Irrfahrten des Odysseus), so muß sich heute der planende Techniker nicht nur mit den Strömungsverhältnissen des Meeres und den Windgeschwindigkeiten (bis 150 km/h) auseinandersetzen, sondern er muß vor allem die tektonische Unruhe dieses süditalienischen Spornes bei seinen Konstruktionen berücksichtigen.

#### 7.1.2. Bauwerksarten

Von den vielen diskutierten und im Modell erarbeiteten Lösungen für eine Querung der Meerenge wurden nach R. BRAUN (1954, S. 140) drei Projekte frühzeitig ausgeschlossen:

- ein Tunnel: zu teuer gegenüber einer Hängebrücke, da ein Tunnel für zwei Bahngleise und zwei 3-spurige Autobahnstreifen zu errichten wäre.
- ein Damm: zu große Meerestiefe (bis 120 m), zu starke Meeresströmungen und zu große Stabilitätsprobleme dieser außerordentlich großen, hohen Schüttmasse.
- eine Schwimmbrücke: wohl aus hydrodynamischen Gründen mit Ballastkammern erwogen, doch Gezeitenwirkung, Elementeinschwimmung und hohe Windgeschwindigkeiten ließen auch dieses Projekt scheitern.

Eine Hängebrücke stellt die heute wahrscheinlichste Lösung dar. Die zentrale Frage ist nur eine Einfeld- oder Mehrfeldbrücke.



### 7.1.2. Geographische Lage, Bestimmung, Kosten

Das Brückenprojekt wird die Messina-Straße etwas nördlich von Villa San Giovanni, bei Punta Pezzo (Kalabrien) nach Ganzirri (Sizilien) überspannen (s. Abb. 4). Sie wird neben zwei Eisenbahngleisen noch zwei Autobahnrichtungsspuren mit mindestens drei Fahrbahnen aufweisen.



Abb. 4:  
Lage der Brückenachse sowie Flut- und Ebbestrom in der Messina-Straße.  
(Nach TOSCANO, 1980, verändert umgezeichnet.)

Die Kosten für eine Hängebrücke, nach einem Projekt von M. HERZOG (1982, S. 33 ff.), mit einer Spannweite von 3.500 m würden annähernd 1,6 Mrd. Dollar betragen.

### 7.1.3. Plattentektonische Aspekte und Erdbeben

Ausgehend von D. McKENZIE (1970, S. 242) kann man annehmen, daß die Afrikanische Platte bei ihrem stetigen Nordvormarsch auf die Eurasische Platte in Form einer fingerförmigen Teilplatte, Adriatische Platte genannt (s. Abb. 5), die Ursache für den süditalienischen Vulkanismus und die Erdbeben im Raum von Sizilien und Kalabrien darstellt.

Von manchen Autoren wie D. NINKOVICH & J. HAYS (1972), C. MORELLI (1972) und J. KELLER (1974) wird der Bereich dieses Vulkan- und Erdbebengebietes zwischen Sizilien, den Äolischen Inseln und Kalabrien als Subduktionszone mit einer steilen NW-Abtauchrichtung angesehen. Betrachtet man die Verteilung von Hypozentren der Erdbeben im süditalienischen-tyrrhenischen Raum (C. BLOT, 1971), so häufen sich in der Messinastraße die flachen Erdbeben. Nach R. SCHICK (1977) sind diese oft folgenreichen Großereignisse rein tektonischer Natur. Bei der Ermittlung der Herdparameter hat SCHICK zeigen können, daß die Herdlinie (das ist die Schnittgerade der Herdfläche = Störungslinie mit der Erdoberfläche) in NNE-SSW-

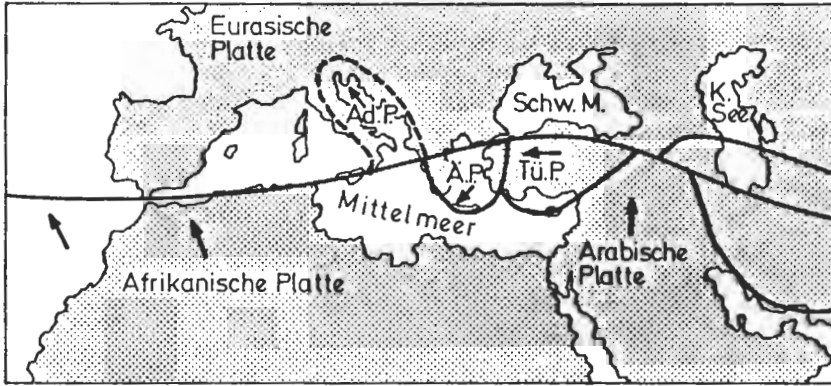


Abb. 5: Plattenverteilung im Mittelmeergebiet. Ad. P. = Adriatische Platte, Ä. P. = Ägäische Platte und Tü. P. = Türkische Platte. (nach CALDER, 1972).

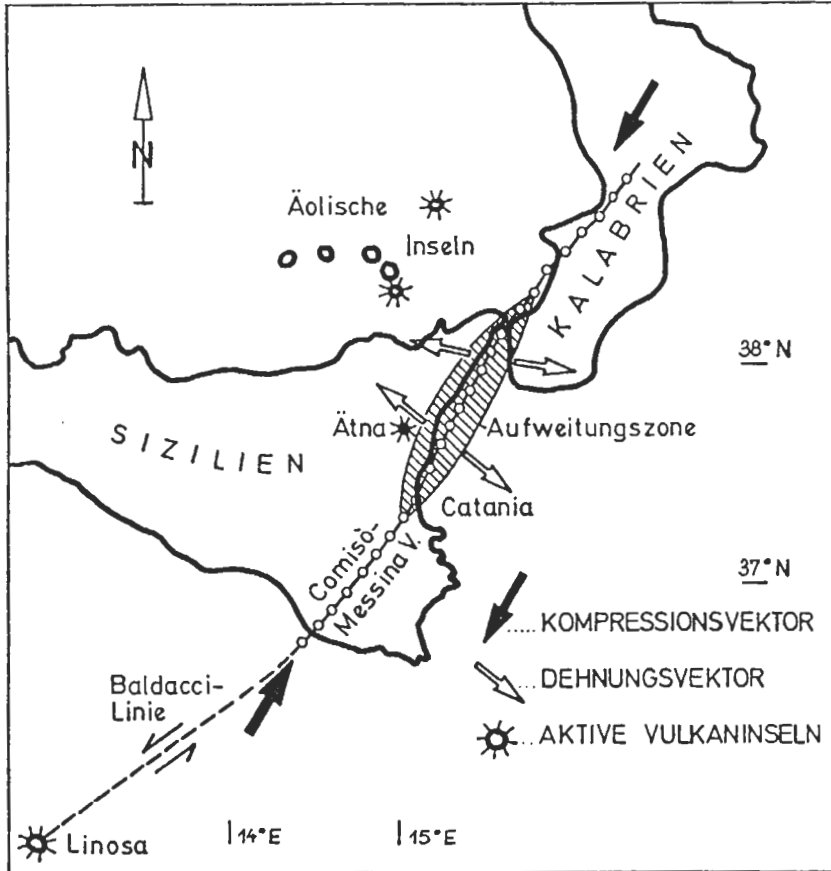


Abb. 6: Schematischer Verlauf eines großräumigen Kräftesystems in Süditalien (nach SCHICK, 1977, verändert umgezeichnet).

Richtung streicht und mit der Comisò-Messina-Verwerfung genau übereinstimmt (s. Abb. 6).

Der Abschnitt der Straße von Messina ist weiters einem NE-SW-gerichteten Kompressionsspannungsfeld unterworfen. Gleichzeitig bewirkt dieses Spannungsfeld eine Aufweitung in NW-SE-Richtung und ist durch eine horizontale Zugkomponente charakterisiert. Sichtbarer Ausdruck dafür ist das Aufdringen von Magma aus dem oberen Erdmantel in Ostsizilien sowie die teilweise seismisch ablaufende „Grabenbildung“ in der Messina-Straße (s. Abb. 6).

Diese Dehnungsstrukturen führen in Kalabrien zu Sprödb Brüchen in der Kruste, hingegen in Ostsizilien zu Fließ- oder Kriechbewegungen, sogenannten Bradyseismen.

#### 7.1.4. Geologie des Gebietes, Bruchsysteme, Fundierung

Um die geologische Erkundung durchzuführen, wären eine Reihe von Meeresbohrungen nötig, welche aber wegen der hohen Strömungsgeschwindigkeit von ca. 3,2 m/sek. sehr schwer auszuführen sind. Bis jetzt wurden nur zwei Bohrungen abgeteuft. Die aus den Bohrungen ermittelten Ergebnisse zeigen Verwerfungen mit einem Alter von ca. 1 Mio. Jahren, welche zur Bildung der Straße von Messina bzw. des „Messina-Grabens“ führten. Störungssysteme, die Ortschaften und Verkehrswege kreuzen, zeigten jedoch beim Beben von 1908 keine sichtbare Versetzung und werden somit als inaktiv angesehen. Die Hauptverwerfungen befinden sich allerdings untermeerisch (s. Abb. 7) und sind in ihrer genauen Lage noch nicht lokalisierbar.

Die Gründungsgesteine für einen möglichen Pfeiler und die beiden Brückenpylonen sind die Sandsteinschichten von Messina, alttertiäre Sedimentgesteine, die auf einem variszischen, kristallinen Grundgebirge zur Ablagerung gelangten (Abb. 8). In diesen Sandsteinen wären, im Trockenbau, die beiden 405 m hohen Betonpylone zu gründen und die Kabelverankerung mit einer Normalkraft von  $N = 3170 \text{ MN}$  oder  $317.000 \text{ Mp}$  mittels Vorspannankern in den Baugrund einzuleiten.

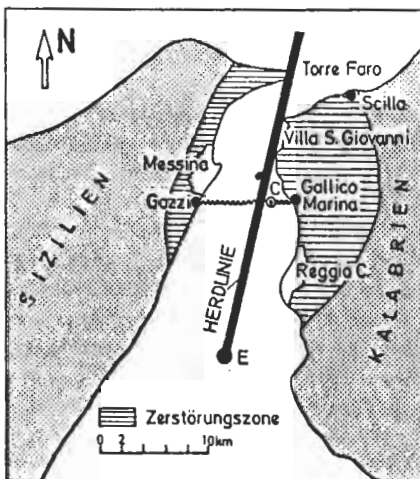


Abb. 7:  
Herdlinie und deren geographische Lage in der Straße von Messina. C: Kabelbruchstelle, E: vermutetes Epizentrum (nach SCHICK, 1977, verändert umgezeichnet).

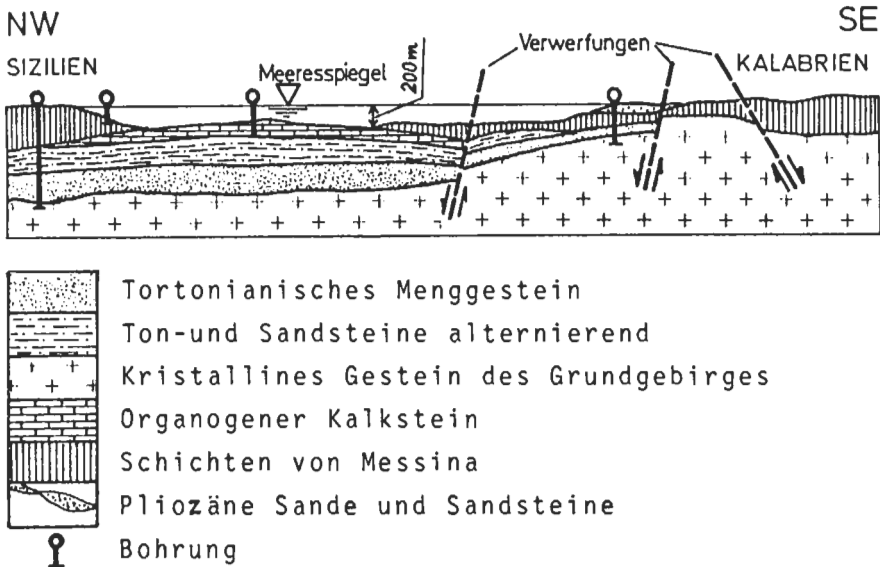


Abb. 8: Geologisches Profil in der projektierten Linienführung (nach TOSCANO, 1980, verändert umgezeichnet).

### 7.1.5. Konstruktion, Maßnahmen in der Ausführung

A. M. TOSCANO gibt nun eine Reihe von Postulaten für eine endgültige, projektsreife Ausgestaltung eines Brückenbauwerkes an.

Die Fundierung der Betonpylonen oder eines möglichen Pfeilers soll auf einem submarinen Rücken erfolgen, welcher Punta Pezzo (Kal.) und Ganzirri (Siz.) verbindet.

Durch die starken Meeresströmungen ist außerdem mit einem ständigen Pfeilerwasserdruck von  $5 \text{ KN/m}^2$  zu rechnen. Von Interesse ist dabei, daß große Schiffe, bei Bug und Heck von gegenläufigen Strömungen erfaßt, sich sehr schnell in ihrer Fahrtrichtung drehen können.

Eine Konstruktion als Mehrfeldbrücke, mit auch nur einem Pfeiler, in ca. 120 m Wassertiefe, ist nicht nur ein Gründungsproblem, sondern auch wegen eines möglichen Schiffsstoßes, etwa durch einen Supertanker und der daraus entstehenden ökologischen Katastrophe, abzulehnen.

Das von R. SCHICK (1977) rekonstruierte Messina-Beben vom 28. Dez. 1908, mit einer Magnitude  $M = 7$ , wird als Entwurfsbeben angesehen und soll vom Tragwerk mit normalen Betriebsspannungen überstanden werden. Die maximale Beschleunigung wird mit  $0,5 \text{ g}$  angegeben. Eine Scherdislokation von  $1,5 \text{ m}$  Gesamtlänge, welche eine asymmetrische Abschiebung von Sizilien gegenüber Kalabrien darstellt sowie heute noch andauernde Bradyseismen, müssen als Entwurfsverwerfung von der Konstruktion aufgenommen werden. Die Bruchgeschwindigkeit während des Bebens betrug  $1\text{--}3 \text{ km/sek}$ . im Streichen der Messina-Straße nach Norden.

Ausführungsprojekt wird nach den genannten Parametern wahrscheinlich eine Hängebücke mit  $3.500 \text{ m}$  Spannweite sein (s. Abb. 9).

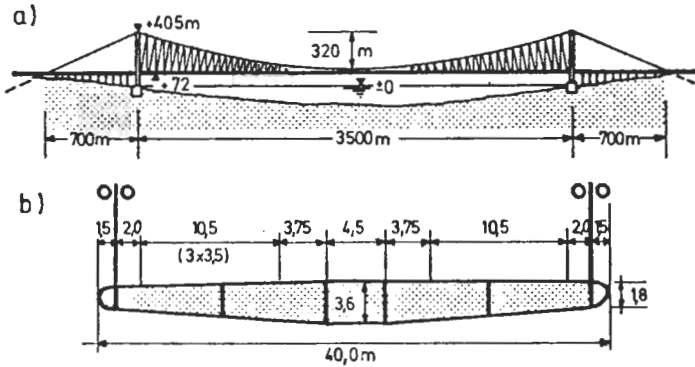


Abb. 9: a) Längsschnitt der geplanten Hängebrücke; b) Querschnitt mit Fahrstreifenaufteilung (nach HERZOG, 1982).

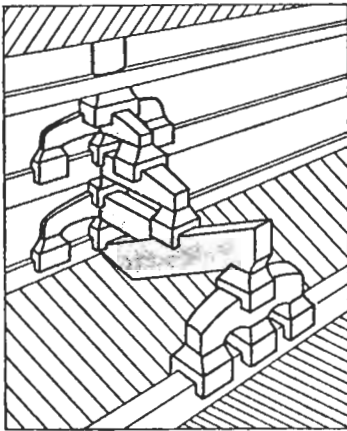


Abb. 10: Schema eines gelenkig gelagerten (= erdbebensicheren) Dachsparrenauflegers in japanischen, buddhistischen Pagoden (nach WALKER, 1982, verändert umgezeichnet).

Den Gefahren eines Zusammenbruches bei einem potentiellen Erdbeben kann eine Hängebrücke nach F. PFANNMÜLLER (1971) auf zwei Wegen entgehen:

Durch eine Konstruktion vieler verhältnismäßig kleiner Elemente, die voneinander unabhängig auf die Bewegung einzeln reagieren (siehe auch

hölzerne Dachträgerkonstruktion alter buddhistischer Pagoden, Abb. 10);

Oder man wählt eine derartig große Konstruktion, daß die auftretenden Bewegungen dazu immer relativ klein und leicht kompensierbar bleiben.

## 7.2. Der Nurek-Damm

Einen Steinschüttdamm der Superlative stellt der 1975, in der südlichen Sowjetunion fertiggestellte Nurek-Damm dar. Vorwiegend zu Bewässerungszwecken der Trockengebiete im Unterlauf des aus dem Pamir-Gebirge kommenden Wachs-Flusses errichtet, ist sein Speicherinhalt 10,4 Mrd.  $m^3$ . (Zum Vergleich: Die Kölnbreinsperre im Maltatal, Kärnten, hat einen Speicherinhalt von 200 Mio.  $m^3$ ). Seine

elektrische Energiegewinnung hingegen entspricht unserer voll ausgebauten Donau und beträgt 2700 MW Leistung.

### 7.2.1. Geographische Lage

Der bislang höchste Schüttdamm der Welt (310 m) befindet sich 50 km ESE' der Hauptstadt von Tadschikistan, Duschanbe (s. Abb. 11). Der Damm wurde in einer nach SW gerichteten, schluchtartigen Durchbruchstrecke errichtet.

Am Oberlauf des Wachs-Flusses wird in den Jahren 1985/86 ein weiterer Schüttdamm, der Rogoun-Damm, fertiggestellt werden – Gesamthöhe 325 m.

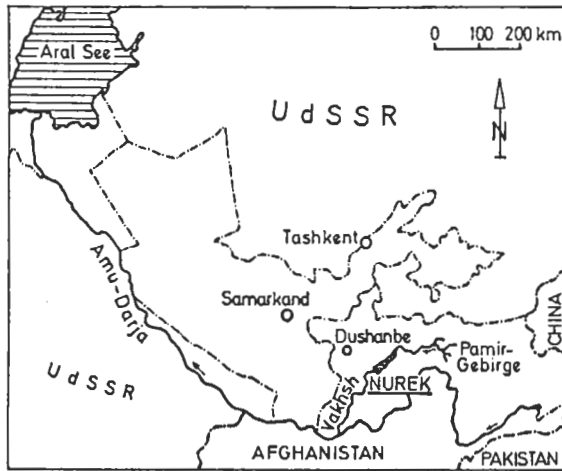
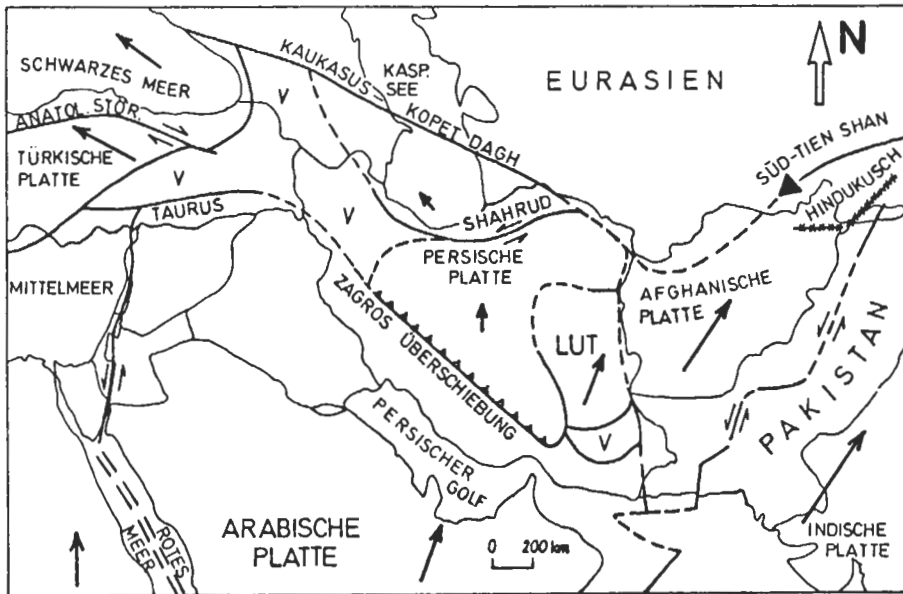


Abb. 11: Geographische Lage des Nurek-Dammes in der Tadschikischen SSR (nach SCHOBER, 1974).

### 7.2.2. Plattentektonische Aspekte und Erdbeben

Nach G. SCHNEIDER (1975, S. 176 ff.) ist die Lage des Sperrengebietes im Bereich der westlichen Ausläufer des Hindukusch–Pamir-Tiefherdbebengebietes zu suchen.

Die nordanatolische Verwerfung (= eine Blattverschiebung im Norden der Türkei) setzt sich südlich des Kaspischen Meeres, in der sogenannten Sharud-Störung, weiter nach Osten fort. Ihre weitere östliche Fortsetzung findet diese etwas hypothetische Plattengrenze in der Süd-Tienschan-Linie. Der Driftweg dieser mittelasiatischen Mikroplatten wird in Abb. 12 mit seinen N–NNE gerichteten Komponenten deutlich. Der afrikanische Kontinent mit der arabischen Platte drückt gegen die Eurasische Platte. Deutlich sichtbare, tektonische Äußerungen in diesem Raum sind: der Kaukasus, die Zagrosüberschiebung und das Hindukusch–Pamir–Karakorum-Gebirge. Wir haben es hier mit einer Kontinent/Kontinent-Kollision zu tun, die keine Subduktionszone aufweist, aber dafür durch steilstehende Verwerfungssysteme mit horizontalem Verschiebungscharakter geprägt ist. In einem Ausschnitt der tektonischen Karte des mittelasiatischen Erdbebengebietes wird die tektonisch-geologische Position der Sperrstelle gezeigt (Abb. 13). Die Hindukusch-Pamir-Tiefbeben (Herdtiefen von 150–200 km)



- ▲▲▲ Überschiebung
- ◆◆◆ Bebenzone (H=100+200km)
- === Plattengrenze ← gesichert
- ← vermutet
- ⇌ Blattverschiebung
- === Spreizungszone
- ↗ Richtung u. Größe der Plattenbewegung
- ▲ Nurek-Sperrenstelle

Abb. 12: Anordnung der Hauptplatten im Mittleren Osten. V. = Gebiete mit quartärem und aktivem Vulkanismus (nach NOWROZZI, 1972, verändert umgezeichnet).

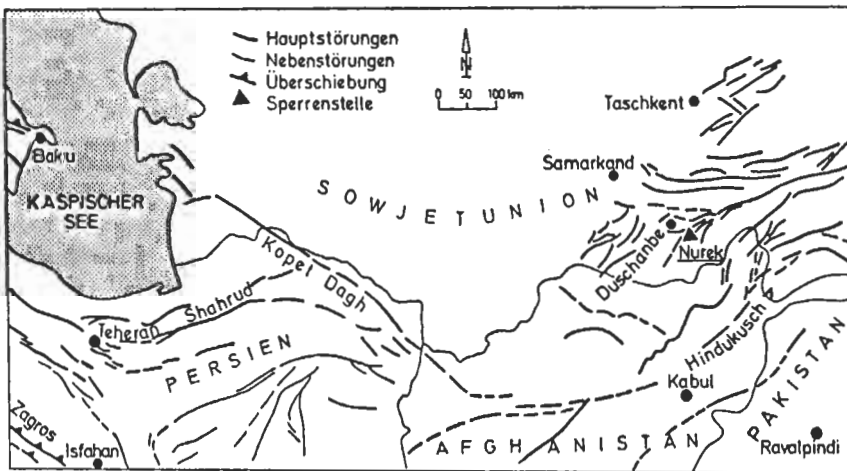


Abb. 13: Störungssysteme in der weiteren und nahen Umgebung der Nurek-Sperrenstelle (nach NOWROZZI, 1971, verändert umgezeichnet).

sind eine Folge von Überschiebung und Blockbewegung. Die flachliegenden Beben, bis 100 km tief, besitzen eine ausgeprägte Horizontalkomponente. Diese sich in raschen seismischen Bewegungen äußernden tektonischen Vorgänge liefern Erdbeben mit Magnituden von  $M = 7,8-8,6$ .

Insgesamt treten in diesem Raum pro Jahr etwa 2000 Erdbeben auf. Da die tektonische Schubrichtung ungefähr senkrecht zum Verlauf der Gebirge Zentralasiens orientiert ist und die größte Hauptspannung senkrecht zum Gebirgsverlauf liegt, die Achse kleinster Hauptspannung aber vertikal zeigt, muß nach G. SCHNEIDER (1975, S. 183) der Überschiebungstyp vorherrschen.

Die Einengungskraft, welche nach geologisch-seismologischen Daten errechenbar ist, liegt nach J. DZIEWANSKI et al. (1981, S. 77) für den Tianschan mit seiner neotektonischen Aktivität zwischen 10 und 100 MPa ( $= 1.10^7$  und  $1.10^8 \text{ N/m}^2$ !).

### 7.2.3. Geologie des Sperrengebietes, Bruchsystem und Fundierung

Das Gründungsgebiet besteht aus rötlich-braunen Sand- bis Siltsteinen sowie Tongesteinen der Kreideformation. Das Einfallen ist mittelsteil nach SE gerichtet. Die quartäre Sedimentbedeckung, vorwiegend Kiese, hatte eine Mächtigkeit von ca. 25 m.

Das Störungssystem zeigt nach A. NOWROZZI (1971) einen um NE-SW streichenden Verlauf (s. Abb. 13), mit steil einfallenden Bruchflächen. Die Richtung der Kompressionsachse zeigt von SSE nach NNW.

Im Gegensatz zu verhältnismäßig steifen Gewölbemauern handelt es sich bei geschütteten Steindämmen, welche heute zur Ausführung kommen, um im Verformungsverhalten nachgiebigere Bauwerke. So kann die Gründung dieser Dämme sowohl auf nicht konsolidiertem als auch felsigem Untergrund erfolgen. Durch den Wechsel von geologischen und morphologischen Bedingungen an den jeweiligen Sperrenstellen zeigt sich die Universalität des Dammbaus auch auf durchlässigem und zusammendrückbarem Untergrund zu fundieren. Bei diesen Sperrtypen werden an die geologischen Bedingungen weniger hohe Anforderungen gestellt als bei den Betonsperrern. Das Verhalten bei Beben ist jedoch sehr komplex, da die verschiedenen Baustoffe eines Schüttdammes eine unelastische Kombination bilden. Die Tatsache, daß die Fundamentbreite des Dammes ungefähr in der gleichen Größenordnung liegt, wie die Länge der Erdbebenwellen, führt zu äußerst komplizierten Reaktionen bei Bebenwirkung. Durch seismische Bewegungen eingeleitete Verschiebungen sind bei weichem Untergrund größer als bei hartem, deswegen ist der Sperrenuntergrund auch hier sorgfältig zu untersuchen und es ist zweckmäßig am Sperrenfuß luft- und wasserseitig zusätzlich eine Gegengewichtsschüttung vorzusehen, um die Böschungstandfestigkeit zu erhöhen. Es kann auch günstig sein, der Dammachse eine leichte Krümmung zu geben und gegen die Widerlager hin den Damm breiter werden zu lassen. Dies alles wirkt sich auf die Gesamtstabilität des Bauwerkes positiv aus. Wesentliche Standsicherheitskriterien sind die Gleitsicherheit, die Böschungstabilität des Dammes, die innere Erosion des Dichtkernes und die Durchströmung des Gründungsgesteines.

### 7.2.4. Induzierte Erdbeben bei großen Speicherbauwerken

In einem natürlichen Spannungsfeld (Primärspannungszustand) kann durch zusätzliche Belastung oder allgemein durch großräumige Veränderung in der obersten Erdkruste dieser Spannungszustand beeinflusst werden. Eine „Triggerung“ bzw. Auslösung von Erdbeben setzt ein, wenn die tektonischen Spannungseinrichtungen mit den, durch den Eingriff umgelagerten Spannungen übereinstimmen.



Bis 1976 waren 20 große Sperrenbauwerke auf der ganzen Welt bekannt, die nach Vollstau ein Beben mit  $M = 5$  auslösten. Nach einem UNESCO-Symposium wurde die kritische Stauhöhe mit 100 m angesetzt. Schon vor seiner Fertigstellung und nach einem Teilstau 1972 bemerkte man beim Nurek-Speicher Anzeichen verstärkter seismischer Aktivitäten.

Die Staubecken erleiden infolge der Wasserlast eine Verformung, da der Wasserdruck die Tendenz hat, den Talquerschnitt bei gleichzeitiger Senkung des Talbodens auszuweiten (O. J. RESCHER, 1981). B. BOLT (1984, S. 119) führt aus, daß der zusätzliche Wasserdruck sich als Druckwelle oder Druckimpuls in der Erdkruste ausbreitet. Es kann Monate oder Jahre dauern, je nach Gestein- bzw. Gebirgsbeschaffenheit, bis eine Zone mit Mikrobrüchen erreicht ist, Wasser in diese hineingepreßt und die Reibungsfläche verringert wird, welche der vorhandenen tektonischen Spannung das Gleichgewicht hielten. Die Wasserlast bzw. der Kluftwasserüberdruck führen nun auf bereits vorgegebenen tektonischen Flächen, wie Klüftung oder Störungen, zur Minderung der inneren Reibung des Gesteinsverbandes (ST. MÜLLER, 1970). Kleine Verschiebungsbrüche treten auf und führen so zu Mikroerdbeben.

Berühmte Beispiele für sogenannte "man-made-earthquakes" sind der Lake Kariba in Zambia, mit seiner 128 m hohen Sperrenmauer. Nach Vollstau wurden, meist unter dem Staubecken, über 2000 örtliche Beben registriert – größte Magnitude:  $M = 5.8$ .

Am 10. 12. 1967 erschütterte ein Erdbeben der Magnitude  $M = 6,4$  ein großes Gebiet südöstlich von Bombay. Die Epizentren lagen alle in der Nähe des 110 m hohen, neuen Koyna-Staudammes. Dieses weltweit registrierte Schadbeben forderte über 200 Menschenleben und tausende Verletzte. Beide Sperrenstellen, Kariba und Koyna, waren bis zu ihrer Fertigstellung und dem Staubeginn als bebenfrei klassifiziert worden. Falls mit induzierter Seismizität zu rechnen ist, muß auch der Staubeckenuntergrund stets auf größere tektonische Flächen, ausgeprägte Kluftscharen und seinem Primärspannungszustand genauestens untersucht und ein Mikroerdbeben-Seismograph an der Sperrenstelle installiert werden.

### 7.2.5. Konstruktion, Ausführungsdetails, Bebeeinflüsse

Der zur Zeit höchste Steinschüttdamm der Welt weist eine Höhe von 310 m auf und eine Basisbreite von ca. 1250 m. Die Kronenlänge beträgt 700 m. Der zentrale Dichtungskern (s. Abb. 14) besteht aus heterogenen Hangablagerungen, hat eine Basisbrei-

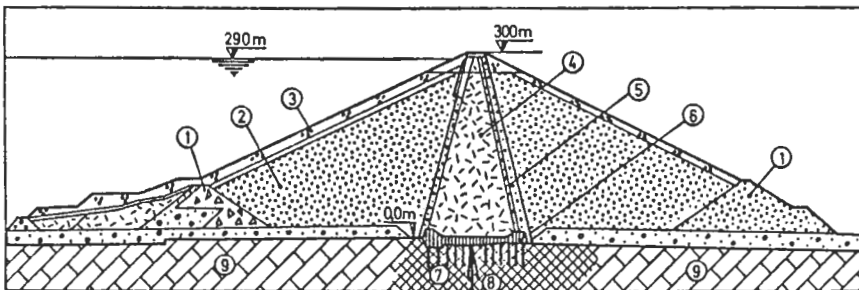


Abb. 14: Charakteristischer Dammquerschnitt des Nurek-Projektes (nach TECHNOPROMEX-PORT MOSKAU, 1977). 1 – Gegengewichtsschüttung; 2 – Stützkörper; 3 – Deckschicht; 4 – Dichtungskern; 5 – Filterzone; 6 – Betonplombe; 7 – Konsolidierungsinjektionen; 8 – Tiefenschirm; 9 – Gründungsgestein.

te von 155 m und ist 1 : 0,25 geneigt. Er wurde in Lagen von 30 cm Dicke eingebaut und mit Gummiradwalzen verdichtet. Angestrebt wurde ein  $k$ -Wert von  $10^{-5}$  bis  $10^{-7}$  cm pro Sekunde. Der Sickerwasserdurchfluß wurde auf  $140.000 \text{ m}^2$  Abdichtungsfläche mit 20–30 l pro Sekunde geschätzt. Der beste Schutz gegen die innere Erosion des Erdkernes ist eine beiderseitige Filterzone mit Kornbereichen von 0,1 bis 10 mm. Der Stützkörper besteht aus Flußkies und wurde in Lagen von 70 bis 100 cm eingebaut und mit 70 t Walzen dynamisch verdichtet. Das Gesamtvolumen des Dammes wird mit 56 Mio.  $\text{m}^3$  angegeben. Trotz der guten Verdichtung der Schüttstoffe traten 8 m Gesamtsetzung (6 m davon während der Bauzeit) auf. Der Anschluß des Dichtkernes wurde auf einer, durch Injektionen konsolidierten Aufstandsfläche, welche vorher noch gesäubert, plombiert und die sprengraue Oberfläche mit einem Spritzbetonüberzug geglättet wurde, durchgeführt. Umfangreiche Rechen- und Modellversuche wurden im Moskauer Hydroprojekt-Labor vorgenommen, um das Spannungs- und Verformungsverhalten des Dammes zu ermitteln. Die Böschungsneigungen von 1 : 2,5 wurden einer möglichen Erdbebenbelastung angepaßt.

Wohin die Entwicklung der hohen Staudämme mit Erdkerndichtung führen kann, läßt W. SCHÖBER (1975) in seiner Studie offen – sie bewegen sich mit ihren Gesamthöhen (325 m, Rogoun-Damm) – vielleicht bis 350 m oder sogar (?) 400 m. Aus topographischen, hydrogeologischen und bevölkerungspolitischen Gründen ist dies eher schwer vorstellbar.

Bei Stauhöhen über 300 m erreicht man nach O. J. RESCHER (1981, S. 164) jedoch sehr bald die Grenze des Tragvermögens des Untergrundes, welche dann in einer großen Veränderung des primären Spannungszustandes und einer möglichen Erdbebenvergrößerung gipfeln kann.

### 7.3. Das Auburn–Folsom–South–Projekt

#### 7.3.1. Bauwerksart

Die Auburn-Talsperre ist eine doppelt gekrümmte Bogenstaumauer mit Hochwasserentlastungseinrichtungen an den Widerlagern. Mit den Aushubarbeiten wurde 1968 begonnen.

#### 7.3.2. Geographische Lage, Bestimmung, Kosten

Die Auburn-Gewölbemauer liegt ca. 55 km nordöstlich von Sacramento in Kalifornien (s. Abb. 15), in den nordwestlichen Ausläufern der Sierra Nevada. Das Bauwerk wurde zur Gewinnung von Trink- und Brauchwasser, zur Bewässerung, zum Hochwasserschutz und zur Wasserkraftnutzung erstellt. Die Gesamtkosten wurden 1968 mit 1,2 Mrd. Dollar (d. s. ca. 24 Mrd. öS) veranschlagt.

#### 7.3.3. Plattentektonische Aspekte, Erdbeben und Bradyseismen

Die Sperrenstelle befindet sich noch im Einflußbereich der Plattengrenze Pazifische/Nordamerikanische Platte. Diese wahrscheinlich am besten studierte Störungszone der Welt, die San Andreas-Verwerfung, reicht von der mexikanischen Grenze ungefähr NW–SE verlaufend bis zum Kap Mendocino. Die Gesamtlänge beträgt beinahe 950 km. Allgemein bekannt wurde dieses Störungssystem durch das Erdbeben von 1906 in San Francisco. Die Breite des Störungstreifens wird nach R. IACOPI (1973, S. 16 ff.) von 100 m bis ca. 2 km angegeben und besteht aus einer Vielzahl von parallelen bis subparallelen Verwerfungen. Das kalifornische System besteht somit aus  $\pm$

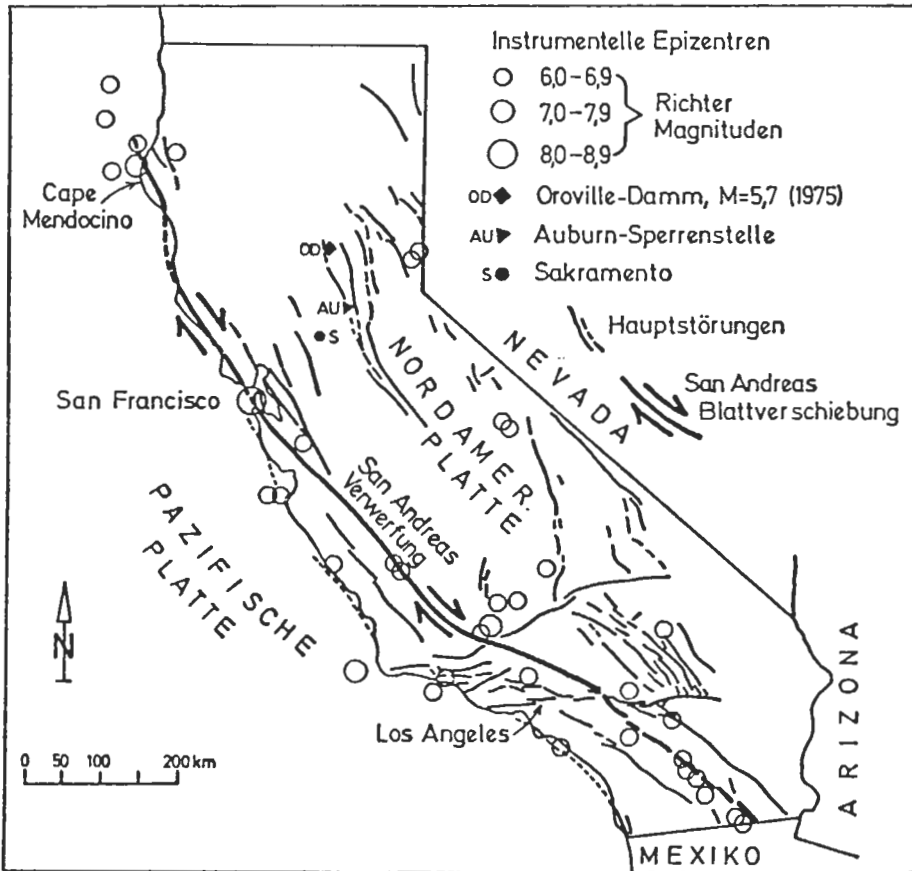


Abb. 15: Geographische Lage der Auburn-Folsom-Sperrenstelle mit Störungsmuster und der Plattengrenze zwischen Nordamerikanischer und Pazifischer Platte (nach BOLT, 1984, verändert umgezeichnet).

küstenparallelen, rechtsdrehenden Verwerfungen. Ein Tochtersystem mit E-W-Streichrichtung ist linksdrehend angelegt. Da die Erdbeben im kalifornischen Raum auf die obersten 20 km Erdkruste beschränkt sind, ist die abgestrahlte Energie an der Geländeoberfläche groß.

Als "creep events" bezeichnet man langsame, kriechende Verschiebungen mit Geschwindigkeiten von  $v = 1$  bis (max. 7) cm/a. So kam es, daß viele Gebäude, welche über der Blattverschiebungszone gebaut, regelrecht zerschert wurden. Besonders gefährlich sind nun die Auswirkungen des sogenannten seismischen Kriechens. Hier wurden Störungen an Myloniten aktiv und verursachten Erdbeben, da im tieferen Untergrund die elastische Energie, welche an der Erdoberfläche zu Kataklastitbildung führte, in einer Tiefe von 15 bis 20 km (gilt für Kalifornien) im kristallinen Gestein noch als Deformationsenergie gespeichert wurde.

Ein lehrreiches Beispiel für Talsperren, welche an aktiven Verwerfungen gebaut wurden, ist der 27 m hohe San Andreas-Damm. Er wurde um 1870 errichtet und steht mit seiner Sperrenachse ungefähr senkrecht zur Streichrichtung der San Andreas-Stö-

rung. Glücklicherweise verlief die Hauptstörung in einem Sattel zwischen dem linken Widerlager des Hauptdammes und einem kleinen Seitendamm, so daß beim 1906er Beben kein Schaden an der Sperre auftrat, obwohl die Dammkrone um ungefähr 2 m gegeneinander verschoben wurde (s. Abb. 16). Ein schlüssiges Argument für die „Plastizität“ eines Steinschüttdammes. Nach SHERARD, J. L. et al. (1974, S. 369) war das Reservoir auch nach dem Beben voll und hatte kein Leck in der Dammkonstruktion.

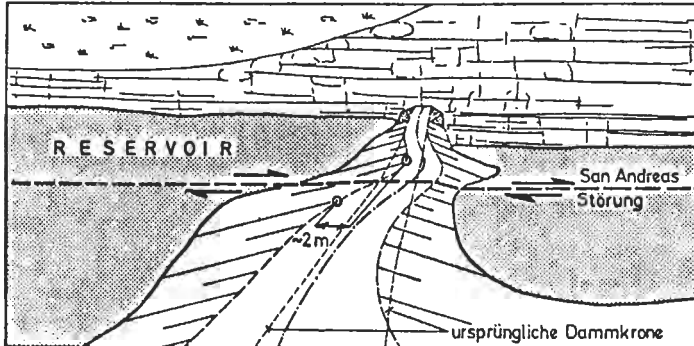


Abb. 16: Situation des Alten San Andreas-Dammes mit einer Flexur im Dammkörper, hervorgehoben durch das Beben von 1906 (nach SHERARD et al., 1974, verändert umgezeichnet).

Sollten nun Absperrbauwerke in Gebieten mit großen Störungszonen ungewisser Aktivität errichtet werden, wo wohl eine gewisse Erdbebenaktivität nachweisbar war, und kein anderer überzeugender Beweis für die augenblickliche Inaktivität der Verwerfungen erbracht werden konnte, so sollten aus Sicherheitsgründen die Störungsaktivität und darausfolgende Beben trotzdem in die Planung mit einbezogen werden.

#### 7.3.4. Aktive Störungs- oder Verwerfungszonen

Nach einer Studie der IAEA (1979, S. 22 ff.) zeigt eine aktive Störung eine oder mehrere der folgenden Charakteristika:

- a) Quartäre (d. h. 2 bis 3 Mio. Jahre alte) oder rezente Bewegungen an bzw. nahe der Erdoberfläche.
  - Erdbebenaktivität durch die Verteilung von historischen oder instrumentell ermittelten Erdbeben.
- c) Strukturelle Beziehungen zu einer Störung mit den Merkmalen a) oder b), bei der eine Bewegung der einen, eine Bewegung der anderen an oder nahe der Erdoberfläche verursacht.

Wenn nun Störungen mit einigen der von a) bis c) angegebenen Merkmalen existieren, sind weitere Untersuchungen über den Grad der Aktivität anzustellen:

- ob Bewegungen wiederkehrender Natur an oder nahe der Erdoberfläche innerhalb der letzten 500 000 Jahre auftraten und ob die „Triggerung“ von weiteren Bewegungen einsetzen kann,
- weiters soll die strukturelle Verwandtschaft zu einer bekannten Störung und deren Fähigkeit Bewegungen auf eine andere an oder nahe der Erdoberfläche zu übertragen, untersucht werden,

- den Querverlauf der Störungszone kartieren,
- Spannungsmessungen quer zur Störungszone und
- instrumentelle Beobachtung der Bebenaktivität an der Verwerfungszone durchführen.

Zuletzt ist der Grad der Aktivität und die Natur der möglichen Gefahr zu klären und ob eine geeignete ingenieurmäßige Lösung dazu existiert.

### 7.3.5. Geologie des Gebietes, Bruchsysteme, Fundierung

Das Projektsgelände der Auburn-Sperre liegt im kristallinen Untergrund des Sierra Nevada-Orogens, hier durch metamorphe Gesteine vertreten (Ph. B. KING, 1976, S. 170 ff.). Das Gründungsgestein besteht aus Amphibolit mit weichen Schieferungswenigen und gering verbreiteten Metasedimenten. Einige Talkzonen von unterschiedlicher Mächtigkeit streichen etwa senkrecht zur Sperrachse und ergaben mit einigen Scher- und Störungsflächen äußerst stark variierende Gebirgskennwerte. Die Verformungsmoduli sind stark schwankend und lassen unterschiedliche Lastverteilung und Spannungskonzentration erwarten. Ein umfangreiches Erkundungsprogramm umfaßte: 8 km Schürftgräben, 6 km Erkundungsstollen, 5 Schrägschächte und 27 km Bohrkernkerne aus 300 Bohrungen sowie umfangreiche Labor- und in situ-Versuche. Schwächere Zonen im Gründungsgestein, Aushubtiefen und Vergüten der Gründungssohle wurden mittels FEM (= Finite Elemente Methode) untersucht und festgelegt, um akzeptable Spannungsverteilungen in der Gründungsfläche zu erhalten. Insgesamt kostete die geologische Vorerkundung und die Baugrundvergütung 110 Mio. Dollar oder 1,9 Mrd. Schilling. Mächtige Betonplomben bis zu 30 m Tiefe unter der Gründungssohle verdeutlichen die intensive Verwitterung mancher Abschnitte. Im Durchschnitt mußten etwa 30 m abgetragen werden, um in Zonen mit geringer Verwitterung zu gelangen (D. STEIN & B. MAIDL, 1980, S. 67 ff.).

Eine Konsolidierung der Gründungsfuge wurde im Anschluß daran bis in 10 m Tiefe vorgesehen, um Klüfte und lokale Auflockerungszonen endgültig zu verfestigen.

### 7.3.6. Berechnungsverfahren in Erdbebengebieten

Von den anderen wichtigen Lastfällen, wie z. B. „gefüllter“ oder „entleerter Speicher“ abgesehen, wird eine Bogensperre immer auch auf den Lastfall „Erdbeben“ untersucht.

Hat man in den frühen 50er Jahren noch quasi-statische Belastungen angesetzt, so werden heute diese Staumauern nach der Methode des Antwortspektrums und der Zeitverlaufsmethode berechnet. Es werden dabei alle in Frage kommenden Erdbeben, auch aus historischer Zeit, aber in allen Fällen jene mit der höchsten Magnitude der Untersuchung zugrunde gelegt. Das so ermittelte höchstmögliche Erdbeben mit einer entsprechenden Magnitude und Beschleunigung bildet nun die Grundlage für die statisch-dynamischen Standsicherheitsnachweise. Ein gewisses elastisches Verhalten und ein Dämpfungsfaktor der Staumauer wird ebenfalls angenommen.

Kurz einige Erläuterungen zum Antwortspektrumverfahren: Erdbebenwellen bringen vorwiegend vertikale und horizontale Bodenbewegungen, bei Bebenfortdauer kommt es auch noch zu Oberflächenwellen und komplizierten, gemischten Wellentypen. Es sind vor allem die horizontalen Belastungen, die, wie die Windlast, auf ein Sperrbauwerk einwirken.

Diese Antwortspektren sind abhängig von der regionalgeologisch-tektonischen Po-

sition des Bauvorhabens, dem Primärspannungszustand des Untergrundes, von der möglichen Bebenenergie, von den schwingungstechnischen Eigenschaften des Sperrentyps und zuletzt vom Grundungsgestein.

(Altes Berechnungsverfahren: eine Ersatzlast ( $P = \frac{a}{g} \cdot W$ ) wird am Schwerpunkt eines Bauwerkes als statisch wirkende Horizontalkraft angesetzt, wobei

- a . . . die Bebenbeschleunigung,
- g . . . die Erdbeschleunigung und
- W . . . das Mauergewicht darstellen.)

Bei Antwortspektren wird ein Modell eines Einmassenschwingers erstellt, das bei einer komplizierten seismischen Kraftfunktion, bei einer bestimmten Periode von Bebenwellen als Antwort einen bestimmten Maximalwert in der Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung ergibt. Eigenperiode und Dämpfung des Sperrentyps müssen möglichst genau bekannt sein.

In diesem Zusammenhang möchte ich noch darauf hinweisen, daß eine Reihe von nicht näher bekannten, energieverbrauchenden Vorgängen schlimme Folgen für Bauwerke abenden kann, wie das Auftreten von Mikrobrüchen, rheologischen Vorgängen und die Reibung zwischen verschiedenen Fundierungsabschnitten.

### 7.3.2. Konstruktion, Ausführungsdetails, Bebeninflüsse

Die Sperre weist an der größten Mauerhöhe 209 m auf und hat eine Kronenlänge von 1219 m. In einem weiten V-Tal konzipiert, verhält sich Kronenlänge zu -höhe wie 1 : 6.

Ein in der Nähe der Sperrenstelle befindliches Störungssystem, die Foothill-Störungen, verlaufen südlich der Stadt Oroville und konnten mit dem Erdbeben am Oroville-Damm 1975 in kausale Beziehung gesetzt werden.

Ursprünglich wurde der Bereich der Auburn-Bogenmauer aufgrund der geologischen Vorgeschichte mit seiner geringen Seismizität als inaktiv angesehen.

Diese Begleitstörungen des großen San-Andreas-Verwerfungssystems wurden aber bei einem Erdbeben am nahe gelegenen Oroville-Damm mit einer Magnitude von  $M = 5,7$  aktiv und brachten die Erdbebensicherheit der längsten, doppelt gekrümmten Bogenstaumauer der Welt zur Diskussion.

Da nun die Stadt Sacramento bei einem Bruch der Staumauer unmittelbar bedroht wäre, wurden neuerlich die Entwurfskriterien mit einem Entwurfsbeben von  $M = 6,5$  angenommen. Weiters wurden unter Annahme, daß durch den hohen Stauspiegel selbst ein Erdbeben ausgelöst werden könnte, Verschiebungen im Bereich der Gründungssohle von mindestens 125 mm in die Bemessung eingeführt. Der behördlich festgelegte Wert, welchen das Absperrbauwerk noch aufnehmen muß, wurde sogar auf 230 mm angesetzt. In Anbetracht der Erdbebenungewißheit im Bereich des vorhin genannten San-Andreas-Verwerfungssystems, also der Plattengrenze von Pazifischer und Nordamerikanischer Platte und der geforderten 230 mm Mauerbewegung wurde der Weiterbau am Auburn-Folsom-South-Projekt bis heute eingestellt.

## 7.4. Das Gibraltar-Projekt

### 7.4.1. Bauwerksart

Als wesentliche Erleichterung für den Transport- und Personenverkehr wurden bereits seit dem ausgehenden vorigen Jahrhundert mehrere Projekte für eine Verbindung des europäischen und afrikanischen Kontinentes ausgearbeitet.

Schon 1869 hat L. VALLENDEUIL einen Tunnelplan hierfür entworfen. 1959 ist dann von A. PEÑA BOUEF, einem spanischen Ingenieur, ein Projekt für eine Brücke vorgestellt worden. Ein auf dem Meeresgrund verankerter Tunnel, nur 15 m unter dem Wasserspiegel schwimmend, wurde von dem Spanier HERRERA in Erwägung gezogen.

#### 7.4.2. Geographie, Bestimmung und Kosten

Welches Projekt auch immer ausgeführt werden wird, es muß einen submarinen Rücken, welcher sich ca. 12 km westlich von Tarifa und ca. 9 km östlich von Tanger in N-S-Richtung erstreckt, queren. Wie man auf Abb. 17 sehen kann, ist das nicht die kürzeste Verbindung zwischen Afrika und Europa, sondern beträgt nun 26 km, aber die größte Wassertiefe liegt hier bei „nur“ 350 m!

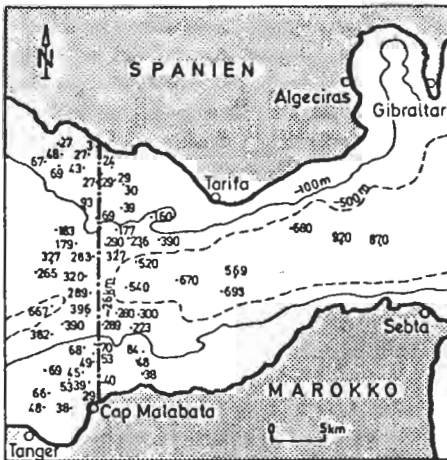


Abb.17:  
Projektierte Lage einer Brücken- oder Tunnel-  
verbindung zwischen Westeuropa und Nord-  
afrika (nach KABBAJ, 1979).

Mit dem Bau eines Tunnels oder einer Brücke an der Gibraltarmeenge würde eine durchgehende Straßenverbindung von Europa (Spanien) über Dakar und Lagos bis nach Mombasa (Kenia) geschaffen.

Die Kosten einer kontinentverbindenden Meereskreuzung würden, je nach Bauwerk und im Vergleich zum Messinaprojekt (siehe Kap. 7.1.), zwischen 50 und 100 Mrd. öS liegen.

#### 7.4.3. Plattentektonische Aspekte, Erdbeben

Nach einer Arbeit von W. FRISCH (1977, S. 268, Abb. 2) über den westmediterranen Raum ist schon seit dem Jura die Laurasische Platte (Europa und Asien s. l.) von der Gondwana-Platte (Afrika s. l.) durch eine linksdrehende Blattverschiebung gewaltigen Ausmaßes getrennt worden. Diese verläuft nun, und das zeigen auch die vielen Erdbeben und Herdparameter, als eine Bruchzone aus dem westlichen Mittelmeer durch die Gibraltarstraße bis zu den Azoren, um sich dort in einem Tripelpunkt (s. D. Mc KENZIE, 1972, S. 114, Fig. 4) mit dem mittelatlantischen Rücken zu vereinen.

Als Azoren-Gibraltar-Bruchzone bezeichnen A. LOPEZ ARROYO & A. UDÍAS (1972, S. 699 ff.) den Verlauf von markanten Erdbebeneignissen in dieser Region. Im Gegensatz zur Darstellung von W. FRISCH (1977), nämlich einer Linksseitenverschiebung, gelangen nun beide vorhin genannten Autoren auf Grund von Herdflächenlösungen zu der Auffassung, daß es sich heute um eine rechtsdrehende Blattverschiebung handeln muß und abschnittsweise eine Überschiebungstendenz der Spanischen Halbinsel gegenüber Nordafrika bei Gibraltar vorherrscht.

G. SCHNEIDER (1975, S. 162 ff.) zeigt, daß im Erdbebengebiet des westlichen Mittelmeeres Erdbebenlinien ca. parallel zur Küste des Mittelmeeres verlaufen und

als Horizontalverschiebungen Flachbeben mit Magnituden bis  $M = 6,5$  hervorrufen können. Mit einem etwa nach NW gerichteten Vektor bewegt sich außerdem Nordafrika mit 2–3 cm/a gegen West-Europa.

Die komplizierten Bruchmuster in der sogenannten Alboranischen See (s. Abb. 18) zeigen in der Gibraltar-Straße miozäne bis quartäre Störungen, hier in Form eines ENE–WSW verlaufenden Grabenbruches.

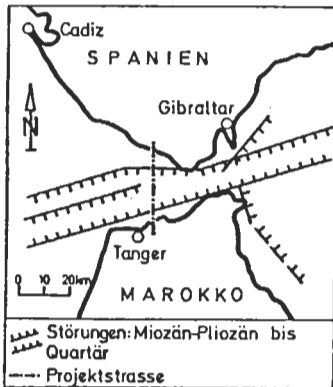


Abb. 18:  
Bruchanordnung und „Gaben“-Ränder in der Straße von Gibraltar (nach RIOS, 1978, verändert umgezeichnet).

A. PEÑA BOEUF hatte nun schon 1962 eine ausführende Studie über die Meeresenge von Gibraltar vorgelegt, aus der hervorgeht, daß diese Grabenbildungen sehr wohl existieren und für das unruhige Relief des Meeresgrundes verantwortlich sind. Was die Bildung der Gibraltarstraße betrifft, so ist auch das Umbiegen der Betschen Kordillere und des Rif-Gebirges mit einem Aufreißen an der Atlantikseite (= Zugzone des Orogens) und einem gegenläufigen Vergenzcharakter als Ursache nach J. ANDRIEUX et al. (1971) denkbar.

#### 7.4.4. Geologie des Projektgebietes, Bruchsysteme, Auffahrung und Fundierung

Die Ansteckpunkte eines Tunnels oder die Widerlager für eine Brückenquerung kämen in oberjurassischen bis eozänen Flysch-Gesteinen zu liegen (s. M. DURAND-DELLA, 1978, S. 171).

Bestimmendes Strukturelement (s. Abb. 19) ist eine geologisch recht gut fundierte Blattverschiebung. Nach J. M. RIOS (1978, S. 48 ff.) beträgt die horizontale Verschiebungswerte, gemessen an Juravorkommen zu beiden Seiten der Gibraltarstraße, etwa 20 km.

Nach der Ansicht von A. PEÑA BOEUF muß man in der Gibraltarstraße, neben den als Staffelbrüche ausgebildeten Grabenrändern, auch noch mit Querstörungen, also N–S-Störungen rechnen, welche in ihrer Lage schwer zu beurteilen sind, aber mit großer Sicherheit einen ständigen Gesteinswechsel nach sich ziehen werden. Die Sprunghöhe der vermuteten Staffelbrüche wird jeweils mit mindestens 100 m angenommen. Betrachtet man ein Profil zwischen Marokko und Spanien (Abb. 20), so weisen die vor- wie auch nach-oligozänen Bewegungsvektoren, gerade in der Gibraltar-Straße, nach NW- bzw. W. Insgesamt ist die Hauptbewegungsrichtung des Afrikanischen Blocks, nach einem geophysikalischen Modell ermittelt, durch eine Reihe von steilen Aufschiebungen auf den westeuropäischen Block geprägt.

##### 7.4.4.1. Tunnellösung

Oftmaliger Gesteins- bzw. Gebirgswechsel würde große Ausbruchs- und Vortriebsprobleme bedingen, wie auch die aktive Seismik in der Gibraltar-Enge für eine steife Tunnelröhre eine ständige Gefahr darstellt.

Enorme Schwierigkeiten dürfte auch der Wasserzutritt verursachen, welcher mit 45 bis 50 bar, je nach Tiefenlage der Röhre, auftreten würde.



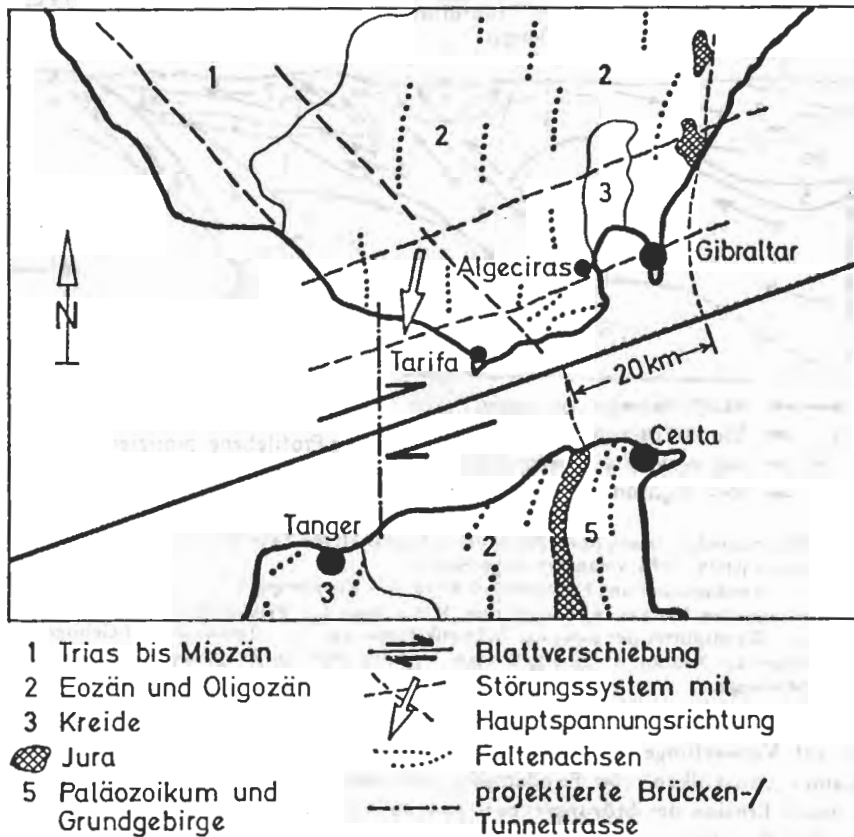


Abb. 19: Großstrukturen in der Gibraltar-Meerenge (nach RIOS, 1978, verändert umgezeichnet).

Die vorhin genannten Querstörungen erhöhen durch das lange schleifende Schneiden eines potentiellen Zerrüttungsstreifens mit der Tunnelachse außerdem die Wahrscheinlichkeit von Mehrausbrüchen. Die Richtung der größten Hauptspannung ist in der Gibraltarstraße nach L. ARROYO und A. UDIAS (1972, S. 717) N–NW gerichtet, was günstig für einen Tunnel wäre, da man nicht mit großen Verdrückungen in der Profilebene rechnen muß. Ist der Überlagerungsdruck, wohl durch Wasserlast und Gebirgsgewicht über der Tunnelfirste bereits groß, so muß man hier auch den sogenannten Überschiebungsdruck (J. STINI, 1950, S. 141 ff.) dazurechnen, der durch die Nordbewegung Afrikas ständig wirksam bleiben wird.

#### 7.4.4.2. Brückenlösung

Wegen der zu erwartenden komplizierten Geologie und des N–S-Bruchsystemes ist vielfach eine Brücke vorgeschlagen worden. Die Pfeiler würden allesamt auf dem submarinen Rücken zwischen Spanien und Marokko (s. Abb. 17) zu fundieren sein. Allerdings wird es bei den Pfeilergründungen schwer, wenn nicht sogar unmöglich sein,

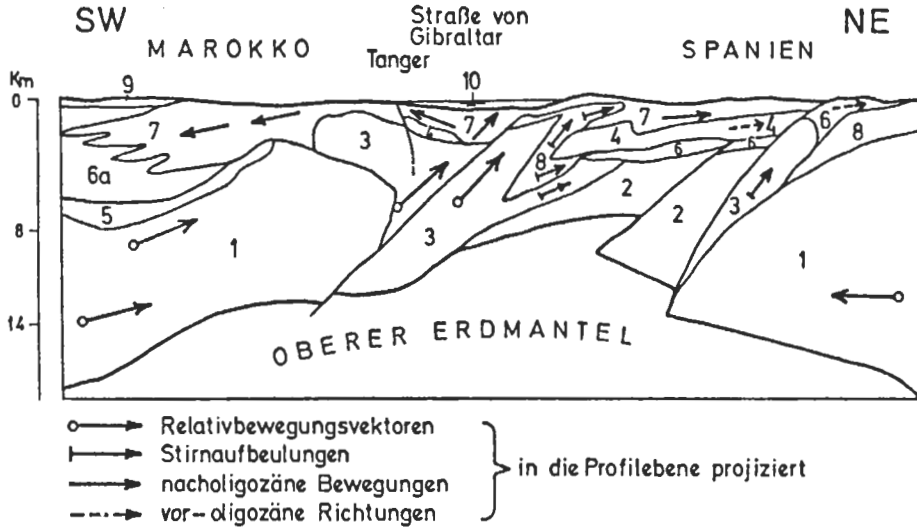


Abb. 20: Schematischer Querschnitt durch die Gibraltar-Straße zwischen Marokko und Spanien (nach RIOS, 1978, verändert umgezeichnet).

1 – Afrikanischer und Europäischer Block, 2 – Krustenspäne, 3 – Krustenspäne des afrikanischen Blockes, 4 – voreozäne Mantelteile, 5 – Paläozoikum und Mesozoikum, 6 – Randsplitter der externen Subbetik-Einheiten, 6 a – Tertiär des Rif-Gebirges, 7 – Oligozän–Miozän, 8 – Kristallinbasis der Sierra Nevada, 9 – jüngste Sedimente, 10 – Meerenge.

nicht auf Verwerfungen zu fundieren. Pfeilerhöhen von ca. 400 m würden durch langsames „Auskolken“ der Fundamente, hervorgerufen durch submarine Strömungen, durch Erosion der Störungszonen, eine enorme Gefährdung des Gesamtbauwerkes nach sich ziehen.

#### 7.4.5. Konstruktion, Ausführungsdetails und Beeinflüsse

##### 7.4.5.1. Tunnellösung

Die tatsächliche Länge eines Tunnelprojektes unter dem genannten submarinen Rücken, beträgt, wegen der Zufahrtsrampen mit 5 % Gefälle, etwa 32 km. Im tiefsten Punkt würde der Tunnel demnach ungefähr 500 m unter dem Meeresspiegel liegen. Ausgeführt werden würde heute wohl ein zweispuriger Straßentunnel nebst Eisenbahnverbindung.

Als ± starre Röhre bildet der Tunnel gegen Beeinflussung, also gegen Verschiebungen quer zur Tunnelachse, eher eine geringe Sicherheit.

Bietet der Tunnel gegenüber den unterschiedlich hohen Meeresströmungsgeschwindigkeiten einen guten Schutz, so bilden der Wasserandrang und die Tunnelbelüftung nahezu unüberbietbare Schwierigkeiten.

Ein auf dem Meeresgrund aufgeständerter „schwimmender Tunnel“ scheidet höchstwahrscheinlich aus, da die Verankerung der Röhre bei diesen Tiefen sehr schwierig ist und der Wasserdruck sehr voluminöse Tunneldimensionen verlangt.

#### 7.4.5.2. Brückenlösung

Von A. PEÑA BOEUF wurde 1962 eine Hängebrücke mit einer Länge von 26 km konzipiert. Die Brücke trägt Eisenbahn und Autobahn und würde ca. die Hälfte bis ein Drittel eines Tunnelprojektes kosten. Diese ist wohl elastischer gegen Bebeeinflüsse, hat aber mit den gegenläufigen Meeresströmungen zu kämpfen. An der Oberfläche verläuft die Strömung in W–E-Richtung und in 250–400 m Tiefe vom Mittelmeer in den Atlantik! Die „obere“ Bewegung ist die weitaus stärkere und steht im Verhältnis zur „unteren“ wie 8 : 1 (s. BRÜCKE und STRASSE, 1959). Die Windgeschwindigkeiten und die Bebeeinflüsse auf die Brücke könnten durch entsprechend hohes Gewicht, also durch die große Masse, kompensiert werden.

Die Hängebrücke muß hier aber als Mehrfeldbrücke erstellt werden, und zwar im tiefsten Abschnitt mit Pfeilerabständen von 2000 m, in den Randfeldern nur 1000 m.

Die Hauptprobleme sind allerdings nicht so sehr materialbedingter Natur, bei Stahlhängebrücken wären sogar Stützweiten bis 3000 m (!) möglich, sondern es sind vor allem Gründungsfragen!

So sollen vorgefertigte Stahlbetonpfeiler eingeschwommen, geflutet (etwa nach der Technik der Bohrplattformaufstellung bei off-shore-Bohrungen), abgesenkt und verankert werden, dies allerdings in nahezu 400 m Wassertiefe !!!

Von vier Modellpfeilern ausgehend und als Bojen ausgebildet, soll dann die felderweise Herstellung erfolgen.

Die Methode der offenen Senkkasten-Gründung von D. B. STEINMANN schon (1951) entworfen, könnte in modifizierter Form die Pfeilergründung bis zu Wassertiefen von 150 m durchaus ermöglichen.

### 8. Schlußbetrachtungen

In einer Arbeit von G. B. CARULLI (1980, S. 35 ff.) weist dieser ausdrücklich auf die Bedeutung der Neotektonik hin und analysiert an Hand einiger „neotektonischer“ Ereignisse die technische Geologie sowie die Erklärungsfindung dieser Vorgänge. Diese neue Disziplin wird vom Mentor der Ingenieurgeologie, L. MÜLLER, schon 1949 angeschnitten, da zur exakten Berechnung von Gebirgsdruck und Untergrundreaktionen stets die Eigenschaften und das Verhalten von geologischen Körpern zu bestimmen sind. Weiters schreibt dann L. MÜLLER, daß der Statiker im Bauwerk Spannungen ermittelt und sodann die Verformungen und Bruchgefahr betrachtet. Der tektonisch denkende Baugeologe muß jedoch aus bleibenden Formänderungen und dem Bruchzustand die Spannungszustände und deren Verteilungen ermitteln, um so das Kräftespiel in einem geologischen Körper beurteilen zu können.

### 9. Literatur

- ANDRIEUX, J. et al., 1971: Sur un modele explicatif de l'Arc de Gibraltar. – Earth Planet. Sci. Lett., 12(1971), 191–198, 6 fig., Amsterdam.
- ANONYM, 1959: Projekt Gibraltar-Meerengen-Straßentunnel. – Brücke und Straße, 5, 193–194, 1 Abb., Isernhagen.
- ARROYO, L. A. & UDIAS, A., 1972: Aftershock Sequence and Focal Parameters of the February 26, 1969, Earthquake of the Azores-Gibraltar Fracture Zone. – Bull. Seism. Soc. Amer., 62(3), 669–720, 11 figs., 6 tables, Berkeley.
- BLOT, C., 1971: Etudes sismologiques de Vulcano. – Cah. ORSTOM, Sér. géophys., No. 11, 32 S., Paris.

- BOLT, B. A., 1984: Erdbeben: eine Einführung. — XIII + 236 S., 78 Abb., Berlin (Springer).
- BRAUN, R., 1954: Die Meerenge von Messina und ihr Verkehrsproblem. — Stahlbau, 23 (6), S. 140, 3 Bilder, Berlin.
- CALDER, N., 1972: Erde — ruheloser Planet. — 247 S., zahlr. Abb. u. Farbfotos, Hamburg (Rowohlt).
- CARULLI, C. B., 1980: Neotectonics and Its Implications on Engineering Geology. — Rock Mech., Suppl. 10, 35–45, 8 figs. Wien.
- CHRIST, Th. A., 1903: Homers Odyssee 4. Aufl., 12. Gesang, 137–146. — 337 S., 16 Abb., 1 Titelbild, 1 Karte, Wien (Tempusky).
- CORNELIUS, H. P., 1941: Über einige zu wenig beachtete Gefahren für den Bau von Wasserkraftanlagen in den Alpen. — Deutsche Wasserwirtschaft, 36 (1941, H. 8), 386–388, Stuttgart.
- DEMME, W., 1978: Geologie im Kraftwerksbau. — Energie aus Schwarz und Weiß, 1978, 174–191, 7 Abb., 5 Skizzen, Wien–Berlin.
- DEWEY, J. F., 1983: Plattentektonik. — Spektrum d. Wiss., 26–38, 9 Bilder, [in:] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (Hrsg.): Ozeane und Kontinente. — 248 S., zahlr. Bilder, Heidelberg (Spektrum d. Wissenschaft).
- DURAND-DELGA, M., 1978: Alpine Chaines of the Western Mediterranean (Betic Cordilleras and Maghrebides). — 163–225, 69 figs., [in:] LEMOINE, M. (Hrsg.): Geological Atlas of Alpine Europe and Adjoining Alpine Areas. — XV + 584 p., 655 illustr., 2 colour maps, Amsterdam (Elsevier).
- DZIEWANSKI, J. et al., 1981: Ingenieurgeologische Untersuchungen für den Wasserbau im Fels. — 260 S., 110 Bilder, 40 Tab., Leipzig (VEB).
- FRISCH, W., 1977: Die Alpen im westmediterranen Orogen — eine plattentektonische Rekonstruktion. — Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 24, 263–275, 5 Abb., Wien.
- GATTINGER, T. E., 1978: Aktuelle Krustenbewegungen in den Alpen und ihre Bedeutung für das Baugeschehen. — Rock Mech., Suppl. 6, 17–23, Wien.
- HAGEN, T., 1959: Vom Werden des höchsten Gebirges der Welt. — 111–112, 24 Fig., 15 Fotos [in:] HAGEN, T. et al.: Mount Everest. — 234 S., zahlr. Abb., Fotos u. Tab., Zürich (Orell Füssli).
- HERZOG, M., 1982: Das Projekt einer Hängebrücke über die Meerenge von Messina mit 3500 m Spannweite. — Stahlbau, 51 (2), 33–36, 7 Bilder, 1 Tab., Berlin.
- IAJACOPI, R., 1973: Earthquake Country. — 160 S., zahlr. Abb., California, Menlo Park (Lane Books).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (eds.), 1979: Earthquakes and associated Topic in Relation to Nuclear Power Plant Siting. — Safety Ser., 50-SG-S1, 69 p., some tab. and diagr., Vienna (IAEA).
- KABBAJ, M., 1979: Crossing two continents via the Straits of Gibraltar. — Tunnels and Tunneling, 11 (7/8), 56–57, 3 Abb., London.
- KELLER, J., 1974: Petrology of some volcanic rock series of the Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea: calc-alkaline and shoshonitic associations. — Contr. Mineral. Petrol., 46, 27–49, Berlin.
- Mc KENZIE, D. P., 1970: Plate tectonics of the Mediterranean region. — Nature, 226, 234–243, 4 figs., London.
- , 1972: Active tectonics of the Mediterranean region. — Geophys. J. R. Astr. Soc., 30, 109–185, 38 figs., London.

- KING, Ph. B., 1977: The Evolution of North America. Rev. Edition. — XVI + 197 S., 109 figs., 1 plate, Princeton, New Jersey (University Press).
- MORELLI, C., 1971: Physiography, gravity and magnetism of the Tyrrhenian Sea. — *Boll. Geofis. teor. appl.*, 12, 275–309, Trieste.
- MÜLLER, L., 1949: Technologie der Erdkruste. — *Geol. u. Bauwesen*, 17 (4), 97–108, 2 Textabb., Wien.
- , 1978: Der Felsbau, 3. Bd.: Tunnelbau. — XIII + 945 S., 612 Einzelabb., 50 Taf., Stuttgart (Enke).
- & LÖGTERS, G., 1974: Eine Rutschung am Rand eines geologischen Grabens. — *Rock Mech., Suppl.* 3, 53–67, 10 Abb., Wien.
- MÜLLER, ST., 1970: Man-Made Earthquakes. Ein Weg zum Verständnis natürlicher seismischer Aktivität. — *Geol. Rdsch.*, 59 (2), 792–805, 7 Abb., Stuttgart.
- NINKOVICH, D. & HAYS, J., 1972: Mediterranean island arcs and origin of high potash volcanoes. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 16, 331–345, Amsterdam.
- NOWROZZI, A. A., 1971: Seismo-tectonics of the Persian Plateau, Eastern Turkey, Caucasus, and Hindu-Kush Regions. — *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 61 (2), 317–341, 14 figs., Berkeley.
- , 1972: Focal Mechanism of Earthquakes in Persia, Turkey, West Pakistan, and Afghanistan and Plate Tectonics of the Middle East. — *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 62, 823–850, Berkeley.
- PEÑA BOEUF, A. D., 1962: El Paso de dos estrechos: Gibraltar y el canal de la Mancha. — *Rev. Obras Publicas*, 110 (2963), 155–165, 11 figs., Madrid.
- PFANNMÜLLER, F., 1971: Projekt einer Brücke über die Meerenge von Messina. — *Stahlbau*, 1971 (2), 60–62, 5 Bilder, Berlin.
- LE PICHON, X., FRANCHETAU, J. & BONNIN, J., 1973: Plate Tectonics, Developments in Geotectonics 6. — XII + 300 p., Amsterdam (Elsevier).
- RESCHER, O.-J., 1981: Geomechanische Modelluntersuchungen für die Gründung von Talsperren. — *Rock Mech.*, 14, 117–166, 25 Abb., Wien.
- RICHTER, Ch. F., 1935: An instrumental earthquake magnitude scale. — *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 25, 1–32, Berkeley.
- RIOS, J. M., 1978: The Mediterranean Coast of Spain and the Alboran Sea. — S. 1–65, 15 Abb., 3 Taf. [in:] NAIRN, A. E. M. et al.: The Ocean Basins and Margins. Volume 4B. The Western Mediterranean. — XIV + 447 S., many figs., New York (Plenum Press).
- ROEDER, D. & BÖGEL, H., 1978: Geodynamic Interpretation of the Alps. — S. 191–212, 6 Fig., [in:] CLOSS, H. et al. (eds.): Alps-Appenines-Hellenides. — XVIII + 620 S., 279 figs., 14 tabl., 5 foldouts, Stuttgart (Enke).
- SCHICK, R., 1977: Eine seismotektonische Bearbeitung des Erdbebens von Messina im Jahre 1908. — *Geol. Jb.*, E 11, 3–74, 25 Abb., 4 Tab., 1 Taf., Hannover.
- SCHNEIDER, G., 1975: Erdbeben. — VIII + 406 S., 100 Abb., 35 Tab., Stuttgart (Enke).
- , 1980: Naturkatastrophen. — X + 364 S., 190 Einzeldarst., 40 Tab., Stuttgart (Enke).
- SCHOBER, W., 1974: Damm auf 310 m Höhe geschüttet. — *VDI-Nachrichten (Bodenmechanik/Medizin)*, 19, 10. Mai 1974, S. 6, 5 Abb., 1 Tab., Düsseldorf.
- SENFTEL, E. & EXNER, CH., 1973: Rezente Hebung der Hohen Tauern und geologische Interpretation. — *Verh. Geol. B.-A.*, 1973 (2), 209–234, 3 Abb., Wien.
- SHERARD, J. L., CLUFF, L. S. & ALLEN, C. R., 1974: Potentially active faults

- in dam foundations. – *Geotechnique*, 24 (3), 367–428, 47 figs., London.
- STEIN, D. & MAIDL, B., 1980: Erdbebengefahr verhindert den Weiterbau der längsten doppelt gekrümmten Bogenstaumauer der Welt am Auburn-Folsom-South-Projekt in Kalifornien. – *Rock Mech.*, Suppl. 10, 63–75, 8 Abb., Wien.
- STEINMANN, D. B., 1951: Der Entwurf einer Brücke von Italien nach Sizilien mit der größten Spannweite der Welt. – *Stahlbau*, 20 (3), 29–32, 3 Bilder, Berlin.
- STINI, J., 1926: Bewegungen der Erdkruste und Wasserbau. – *Die Wasserwirtschaft*, 7/8/11 u. 15, 179–183, 202–206, 286–289, 479–483, zahlr. Abb., Wien.
- , 1939: Die Gründung von Stauwerken und die Wahl der Baustelle. – *Geol. u. Bauwesen*, 11, 50–93, 21 Abb., Wien.
- , 1950: Tunnelbaugeologie. – VI + 366 S., 192 Textabb., Wien (Springer).
- , 1953: Verwerfungen und Talsperrenbau. – *Geol. u. Bauwesen*, 20(3), 152–166, 3 Abb., Wien.
- TECHNOPROMEXPORT MOSCOU [Hrsg.], 1977: Usine hydro électrique de Nourek. – 34 S., zahlr. Abb. u. Tab., Moskau.
- TOKSÖZ, N. M., 1983: Die Subduktion der Lithosphäre. – *Spektrum d. Wiss.*, 106–116, 10 Bilder [in:] *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* (Hrsg.): Ozeane und Kontinente. – 248 S., zahlr. Bilder, Heidelberg (Spektrum d. Wissenschaft).
- TOSCANO, A. M., 1980: Postulate für die Kreuzung der Meerenge von Messina. – *Stahlbau*, 49 (2), 33–41, 16 Bilder, Berlin.
- TRIMMEL, J., 1981: Erdbeben in Niederösterreich. – *Wiss. Schriftenreihe Niederösterreich*, 51, 31 S., 4 Abb., 10 Tab., St. Pölten–Wien (NÖ-Verlag).
- WALKER, B., 1982: Der Planet Erde – Erdbeben. – 176 S., zahlr. Fotos u. Abb., Amsterdam (Time Life).
- WEGENER, A., 1929: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. – 4. Aufl., *Die Wissenschaft*, 66, X + 231 S., Braunschweig (Vieweg).
- WOHNLICH, M., 1984: Geotechnische Untersuchungen als Planungsgrundlage für große Talsperren. – *Baumaschine–Baugerät–Baustelle*, 1/84, 14–17, 10 Abb., Wien.