Fundationen für weitgespannte Brücken

Autor(en): **Leonhardt, Fritz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **10 (1976)**

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-10392

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Fundationen für weitgespannte Brücken

Foundation Structures for long span Bridges

Structures des fondations pour les ponts de grande portée

FRITZ LEONHARDT
Professor
Universität Stuttgart
Stuttgart, BRD

In den Berichten über weitgespannte Brücken finden wir meist nur knappe Angaben über die Gründungen, obwohl gerade sie oft mehr Können und Wagemut der Ingenieure erfordern als die Überbauten. Die Ingenieure widmen sich offensichtlich dem sichtbaren Teil der weitgespannten Brücken weit mehr als den unsichtbaren Gründungen mit dem Ergebnis, daß die Überbauten einen höheren Reifegrad der Entwicklung sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht erreicht haben als die Gründungen. Die Arbeitskommissionen der IVBH beschlossen daher, in den nächsten Jahren den Gründungen mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Es besteht kein Zweifel, daß aus Erfahrungen und Beobachtungen bei ausgeführten Gründungen manche Erkenntnis gewonnen werden kann, die dazu beitragen wird, künftig solche Gründungen einfacher und wirtschaftlicher zu bauen. Der Generalberichter zu diesem Thema hofft daher sehr, daß zum Tokio-Kongress 1976 wertvolle und nützliche Berichte über interessante Gründungen für große Brücken eingehen werden. - In diesem Vorbericht sollen nur einige Probleme angesprochen werden.

Mehr Baugrunduntersuchungen nötig

Die wichtigste Vorarbeit für Gründungen ist zweifellos die Baugrunduntersuchung, die in groben Zügen schon der Wahl der Trasse des Verkehrsweges vorausgehen muß, damit unnötige Schwierigkeiten umgangen werden. Neben einer gründlichen geologischen Analyse sind nach wie vor Bohrungen möglichst mit ungestört entnommenen Kernproben das beste Mittel, die Baugrundverhältnisse zu erkunden. Für schwer belastete Fundamente sollte man dabei weder an der Zahl noch an der Tiefe der Bohrungen sparen, auch wenn der Geologe einen gleichmäßigen Baugrund erwartet oder über die Art der tieferen Schichten sicher zu sein glaubt. Jeder erfahrene Brückenbauer weiß, daß der Baugrund immer wieder Überraschungen bietet, sei es im Fels oder in Sedimentschichten. Für jede größere Gründung sind daher innerhalb der geplanten Gründungsfläche mindestens 4 bis 6 Bohrungen bis in eine Tiefe durchzuführen, die etwa 1,5 $\sqrt{F_g}$ (F_g = Gründungsfläche) entspricht. Die Kosten solch tiefer Bohrungen lohnen sich im Durchschnitt, weil nicht rechtzeitig erkannte Unregelmäßigkeiten im Baugrund während der Bauausführung stets zu äußerst unangenehmen Änderungen und Mehrkosten führen. Es gibt zahlreiche Beispiele in der Geschichte des Großbrückenbaues für solchen Kummer.

Trifft man Fels an, so ist der Brückeningenieur in der Regel glücklich, doch sollten gerade auch Schichtung, Schichtneigung, Klüftigkeit und dergleichen des anstehenden Felsens gründlich überprüft werden.

Dem Verfasser passierte es einmal bei dem Verankerungswiderlager einer Hängebrücke, daß der Fels zwischen zwei nur rund 20 m voneinander entfernten Bohrungen eine über 30 m tiefe Kluft aufwies, die anzeigte, daß der dem Fluß zu gelegene Felsteil sich schon talwärts geneigt hatte und daher zur Aufnahme großer Horizontalkräfte ungeeignet war. Es genügte nicht, den Spalt auszuheben, zu reinigen und mit Beton zu füllen, sondern die Verankerung mußte durch vorgespannte Bodenanker zusätzlich gesichert werden.

Felsgründungen

Wenn man gut gelagerten Fels antrifft, dann ist die Gründung in der Regel einfach. Die hohe Tragfähigkeit sollte jedoch in Zukunft mehr ausgenützt werden, indem man Pressungen von 20 bis etwa 60 kg/cm^2 je nach Güte des Felsen zuläßt. Es ist heute auch nicht schwierig, Biegemomente hoher Brückenpfeiler oder Verankerungskräfte von Hängebrücken oder Schrägkabelbrücken mit gebohrten, vorgespannten Felsankern aufzunehmen. Schon vor rund 15 Jahren hat ein Vergleich zwischen einer durch Betongewicht gesicherten Verankerung einer Hängebrücke und einer weitgehend aus gebohrten Felsankern bestehenden Lösung deutlich gezeigt, daß die Felsanker wesentlich billiger werden. Inzwischen wurde sowohl die Bohrtechnik als auch die Technik der Felsanker verbessert, so daß die Überlegenheit heute noch größer sein müßte. Dies gilt vor allem, wenn man gesundes Urgestein antrifft.

Caisson-Gründungen

Hat man angeschwemmten Boden, sei es Sand, Schluff, Mergel oder Ton, so sollte man die Fundamentgröße und damit die Bodenpressung hauptsächlich im Hinblick auf die für den Überbau erträglichen Setzungen wählen. Dabei spielen eigentlich nur die Setzungsdifferenzen oder zu Schrägstellung führende ungleiche Setzungen hauptsächlich bei statisch unbestimmten Hauptträgersystemen eine Rolle. Meist sind heute die Überbauten weitgespannter Brücken so schlank und gegen ungleiche Setzungen so unempfindlich, daß man beachtliche Setzungen ohne Nachteile in Kauf nehmen kann. Bei den heute weit verbreiteten Gummitopflagern, ob fest oder auf Teflon gleitend, kann man zudem ohne hohe Kosten den Überbau mit hydraulischen Pressen nachstellen, so daß Setzungen nachträglich ausgeglichen werden können. Die zulässige Bodenpressung nimmt mit der Gründungstiefe zu, weil die Grundbruchsicherheit durch die auflagernde Bodenschicht zunimmt. In der Regel ist es günstiger, Gründungen großer Brücken mit höherer Bodenpressung tiefer zu machen als die Lasten weiter oben mit niedriger Bodenpressung auf eine großflächige Fundamentplatte abzutragen, die dann große Biegemomente erleidet und entsprechend viel Stahl braucht. Es wäre erwünscht, daß gerade über diese Frage künftig mehr gearbeitet wird. Aus Probebelastungen großflächiger Pfähle weiß man, daß der Spitzendruck auf sehr hohe Pressungen gesteigert werden kann, ohne daß Grundbruchgefahr besteht, und so kann man zweifellos auch bei Caissons mit größerem Durchmesser ziemlich hohe Bodenpressungen ausnützen, ohne damit das Maß der Setzung viel zu vergrößern oder die Sicherheit in unzulässiger Weise zu verringern. Natürlich gibt es hier Ausnahmefälle bei Böden

mit verhältnismäßig hohem Porenwassergehalt, wo die Setzungen dann über sehr lange Zeit anhalten und mehrmaliges Nachstellen oder dergleichen bedingen würden. In der Tendenz sollte man jedoch die höhere Tragfähigkeit der Böden in größeren Tiefen mehr als bisher ausnützen.

Tiefe Gründungen können einerseits mit Caissons, andererseits mit Pfählen ausgeführt werden. Caissons, die mit Druckluft abgesenkt werden, sind zwar sehr zuverlässig, aber wegen der erschwerten Arbeitsbedingungen wenig beliebt und auch nur bis $\sim$ 30 m Tiefe geeignet. Die offenen Caissons können sehr tief gegründet werden und werden gern dort gewählt, wo die Gründung im Bett von Flüssen mit stark wechselndem Wasserstand, d. h. mit starken Hochwassern und hohen Strömungsgeschwindigkeiten, ausgeführt werden muß. In solchen Flüssen muß man mit erheblichen Verlagerungen der Flußsohle (Kolk, scour) rechnen, wobei in Flüßen wie Indus oder Ganges 20 bis 30 m tiefe Auskolkungen nicht ungewöhnlich sind. Sie bedingen Gründungstiefen von 40 bis 60 m, um die Pfeiler für Hochwasserkräfte standfest zu machen. Für solche Verhältnisse ist zweifellos der kreisrunde Caisson aus Stahlbeton immer noch die beste Lösung, wobei die Wanddicke reichlich gewählt werden muß, damit der Caisson der Ausbaggerung folgend absinkt. Sinkhilfen mit tixotropem Betonit oder mit Injektionsspülung sind merkwürdigerweise in diesen Ländern noch nicht verbreitet. Der Kreiszylinder ist günstig, weil die Bodenpressung vorwiegend Druck und nur bei ungleicher Verteilung geringfügig Biegemomente erzeugt, die in der Regel nicht gefährlich werden können. Eine schwache Ringbewehrung genügt, weil Biegemomente durch eine entsprechende Biegeverformung die Druckverteilung günstig beeinflußt. Kommt man mit einem Gründungszylinder nicht aus, so ist es in der Regel besser, z. B. zwei zylindrische Brunnen nebeneinander zu stellen und sie über dem Niedrigwasser kräftig miteinander zu verbinden, als zu rechteckigen Caissons überzugehen, die zur Aussteifung Zwischenwände brauchen und selbst dann noch verhältnismäßig viel Biegebewehrung erfordern (Bild 1).

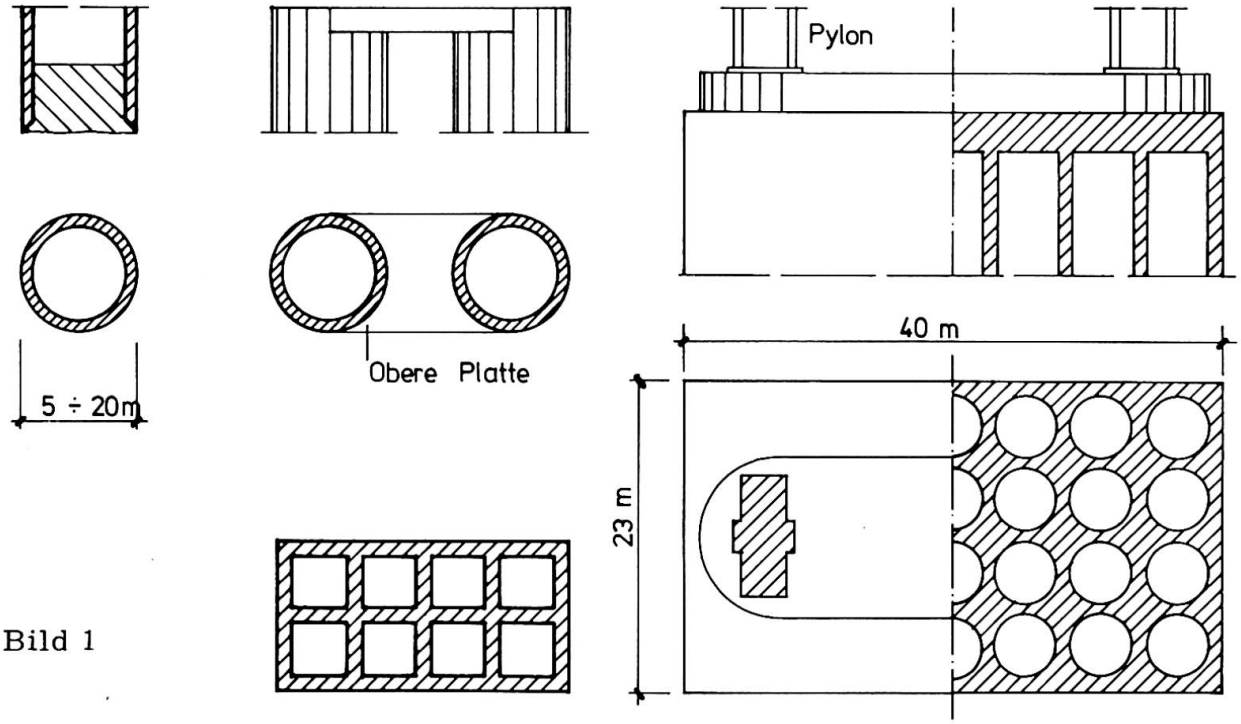

Bild 1

Die Caissons können bei Niedrigwasser auf Grund oder auf einer mit einer Spundwand geschützten Inselanschüttung hergestellt werden. Hat man die Gründung in schiffbarem tieferem Wasser auszuführen, so wird man heute den unteren Teil der Caissons in der Regel einschwimmen und zwischen wenigen Führungspfählen absenken oder - wie bei japanischen Brücken ausgeführt - mit großen Schwimmkranen genau am gewünschten Ort versetzen. Die japanischen Brückeningenieure haben für eine ihrer neuen Brücken mit einem Mammut-Schwimmkran von 2000 t Hubkraft einen vorgefertigten Caisson von rund 12 m Durchmesser und 30 m Länge versetzt - eine beachtliche Leistung.

Die Amerikaner verwendeten mehrfach Caissons, die aus einer ganzen Batterie von Kreiszylindern aus Stahlblech zusammengesetzt waren, die zum Einschwimmen oben luftdicht verschlossen wurden. Zum Absinken auf den Flußgrund werden zunächst die Zwischenräume zwischen den Stahlzylindern soweit wie nötig ausbetoniert. Der Boden wird dann in den Stahlzylindern ausgebaggert, bis der Caisson auf den tragfähigen Grund abgesenkt ist. Mit dieser Methode wurden die Pylonen der Tejo-Brücke Lissabon auf der Südseite bis auf 83 m unter dem Mittelwasserspiegel gegründet (Bild 1, rechts). Das Verfahren ist zwar sicher, aber wegen des hohen Stahlverbrauches für die meisten Länder zu teuer.

Pfahlgründungen

Wenn keine großen Kolktiefen und starken Strömungen zu berücksichtigen sind, dann beherrscht heute die Pfahlgründung selbst für sehr große Brückenlasten das Feld. Ein grosser Fortschritt war 1958 bis 1960 bei der Gründung der Brücke über den Maracaibo See in Venezuela erzielt worden, wo einerseits Rammpfähle mit Durchmessern bis zu 100 cm und Längen von über 50 m, und andererseits Bohrpfähle mit Durchmessern von 135 cm und Längen bis über 60 m erfolgreich verwendet wurden. Bei Probebelastungen wurden die Bohrpfähle mit rund 2000 t belastet, ohne die Grenztragfähigkeit zu erreichen. Erstmalig wurde dort ein erhöhter Spitzendruck durch Zementinjektionen an der flachen Pfahlspitze erzielt.

Wenige Jahre danach wurde bei der zweiten Brücke in Abidjan (Westafrika) ein Verfahren angewandt, um die Mantelreibung durch Injektionen unter Druck wesentlich zu vergrößern. Auch bei der größten Brücke Südamerikas von Rio de Janeiro nach Niteroi herrschen Pfahlgründungen vor. Bei den 1973 begonnenen beiden großen Schrägkabelbrücken über den Rio Parana bei Zarate-Brazo Largo wurden Bohrpfähle mit 2,0 m Durchmesser auf rund 70 m Tiefe unter dem Wasserspiegel in über 30 m tiefem Wasser gegründet (Bild 2), wobei die

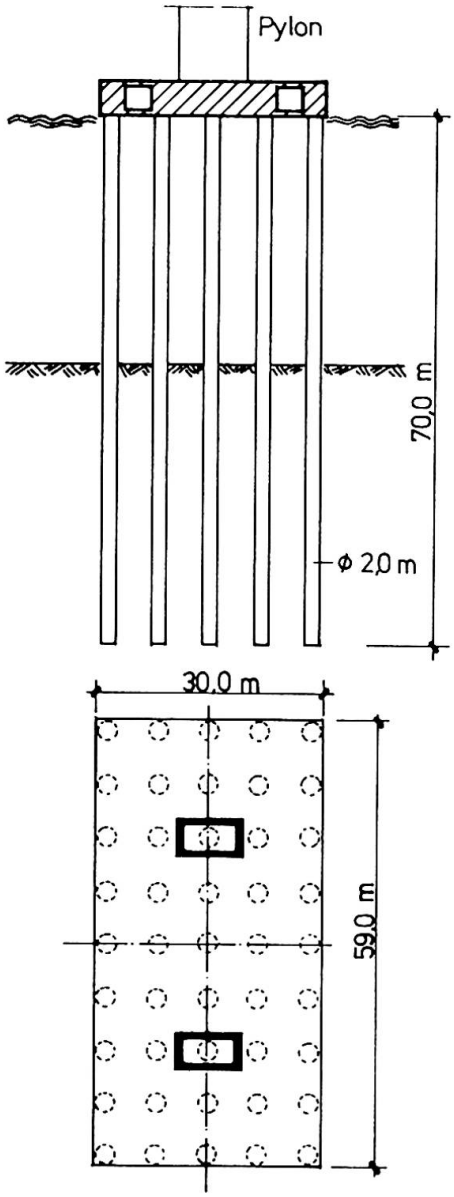

Bild 2: Pfahlgründung für Paraná-Brücken, Argentinien

Tragfähigkeit der Pfahlspitze wieder durch Zementinjektionen verbessert wurde. 35 Pfähle genügen so, um rund 36 000 t Last unter den Pylonen einer 330 m weit gespannten Schrägkabelbrücke für Eisenbahn und Straße zu tragen. Es besteht kein Zweifel, daß hier die Entwicklung noch nicht am Ende ist, sowohl die Durchmesser als auch die Längen der Bohrpfähle können weiter gesteigert werden.

In den dicken Kopfplatten, mit denen große Pfahlgruppen oben miteinander verbunden werden, treten je nach den Größenverhältnissen zwischen der Grundfläche der Brückenpfeiler und der Pfahlgruppe erhebliche Querkräfte und Biegemomente auf, die bei der Größe der Brückenlasten von vielen Tausend Mp sehr starke Bewehrungen bedingen. Man findet häufig, daß diese Bewehrungen aus sehr dicken Stäben (Ø 40 bis 50 mm) in 4 bis 6 Lagen einfach übereinander angeordnet werden. Viele Ingenieure haben noch nicht erkannt, daß damit eine große Gefahr verbunden ist, weil die hohen Querkräfte extrem hohe Verbundspannungen zur Folge haben, die zum Spalten des Betons in der Ebene der Bewehrungslagen führen können. Diese Gefahr wird natürlich verstärkt, wenn mehrere Lagen dicht übereinander liegen. Solche Bewehrungen muß man in einem gegenseitigen Abstand von mindestens 4- bis 6fachem Stabdurchmesser verlegen, wobei die gesamte Bewehrung auf eine Höhe von 0,1 d bis 0,15 d verteilt werden sollte. Diese mehrlagigen Zuggurte müssen außerdem lotrecht verbügelt und auf die 1,2fache Breite der Pfahlköpfe beschränkt werden, wenn man Aufhängebewehrung zwischen den Pfählen vermeiden will. Man vergleiche hierzu die Berichte von W. Taylor über Versuche zu Pfahlkopfplatten der Lower Yarra Bridge, Melbourne, Australien, (vgl. CaCA-Technical Reports, London).

In der weiteren Entwicklung wird es zweifellos richtiger sein, diese großen Pfahlkopfplatten horizontal vorzuspannen, sie damit rissefrei zu halten und die Korrosionsgefahr zu bannen.

Gründungen in tiefem Wasser

In der Welt sind einige Großbrücken geplant, die Meeresstraßen mit verhältnismäßig tiefem Wasser überqueren und für die Brückenpfeiler in 60 bis 100 m tiefem Wasser gegründet werden müssen. In der Regel sind hierfür mit offenen Caissons hergestellte, massive Betonblöcke von riesenhaften Abmessungen vorgesehen, die einen erheblichen Aufwand erfordern und die Brücken

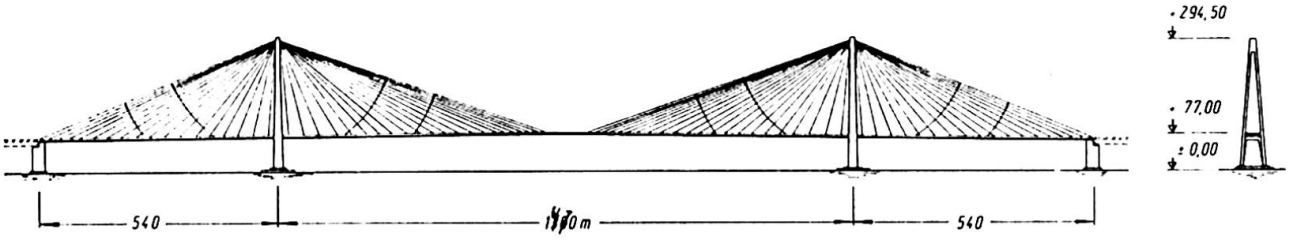

Bild 3: Entwurf Gruppo Lambertino für Brücke über die Straße von Messina, 1972

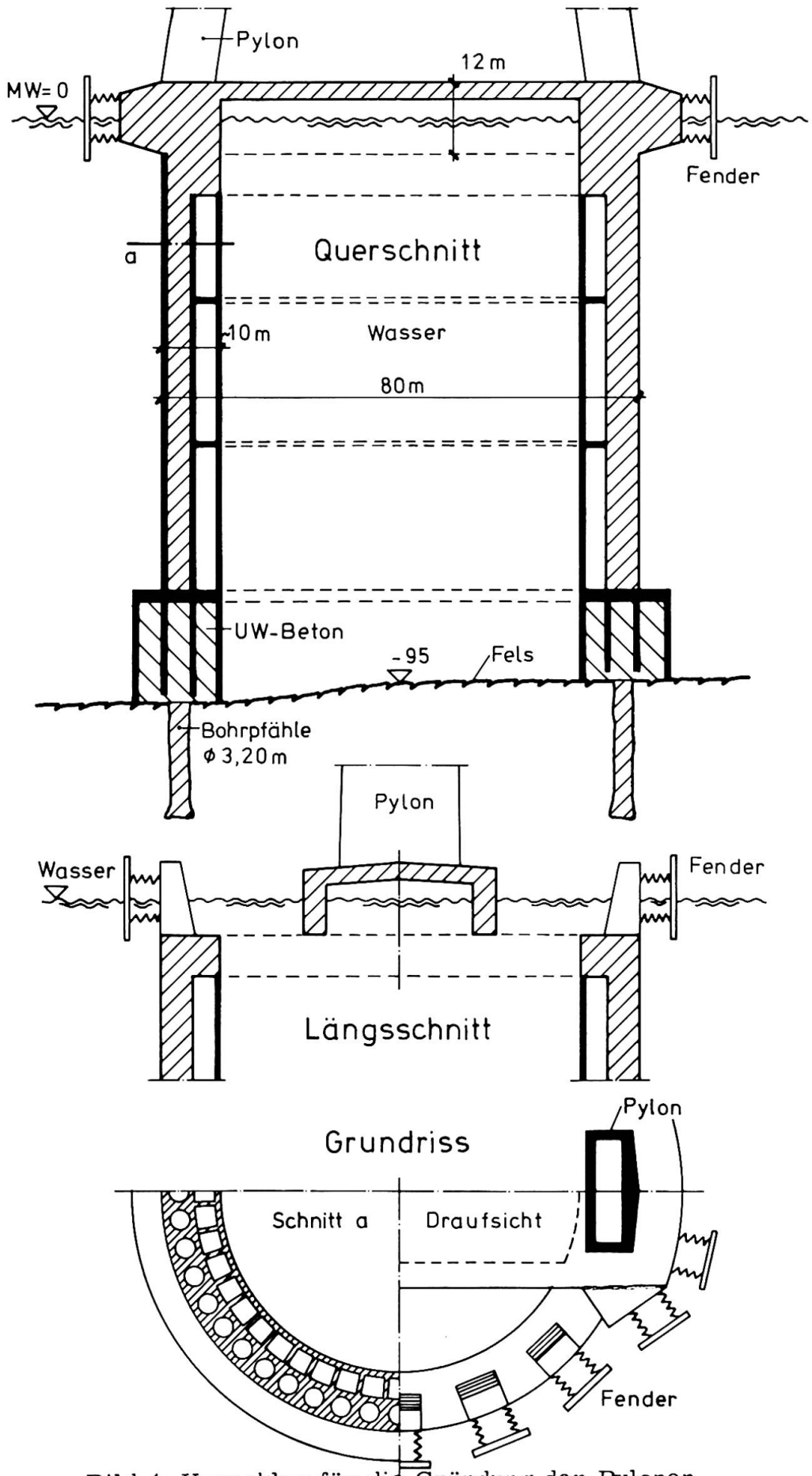

Bild 4: Vorschlag für die Gründung der Pylonen der Schrägkabelbrücke des Bildes 3

unnötig verteuern. Der Verfasser hat für einen Entwurf einer Brücke über die Straße von Messina als Schrägkabelbrücke von 1470 m Spannweite die Gründung der großen Pylone mit einem ringförmigen Zylinder von 80 m Durchmesser vorgeschlagen, in dessen Innenraum das Meereswasser verbleibt (Bild 3 und Bild 4) [1]. Der untere Ring wird dabei in einem Trockendock hergestellt, dessen Boden die Form der Felsoberfläche an der Gründungsstelle hat. Der Ring wird geflutet und in tieferes Wasser gebracht. Daraufhin wird die Zylinderwand mit Gleitschalung weitergebaut, wobei außen eine 5 m dicke, mit kreisförmigen Röhren durchsetzte Ringwand angeordnet ist, an die sich eine weitere rund 6 m dicke Zellenkonstruktion für den Auftrieb anschließt. Ähnlich wie beim Bau des großen Nordsee-Ölbehälters Ekofisk wird der Pfeiler schwimmend in genügend tiefem Wasser, jedoch in Ufernähe weitergebaut. Der fast fertige Pfeiler wird dann an seinen Bestimmungsort geschleppt, an versenkten schweren Ankerblöcken gegen die Tideströmungen festgehalten und durch Fluten der inneren Ringkammern auf die gesäuberte Felsoberfläche abgesenkt. Der Fels besteht dort aus einem Konglomerat. Die Fuge zwischen dem Felsboden und den Wänden der großen Ringkammer kann mit vorweg eingesetzten, mit Stahlgitter bewehrten Gummischläuchen mit Druckwasser abgedichtet werden. Danach werden die Ringkammern über Zuleitungen ausbetoniert.

Durch die kreisförmigen Röhren in der äußeren Zylinderwand hindurch werden nun Bohrpfähle in den Fels vorgetrieben, deren Tiefe von der Felsqualität abhängig zu wählen ist. In diesen Bohrpfählen werden Spannglieder verankert, mit denen die vom Eigengewicht der Brücke her ohnehin schon große lotrechte Druckspannung im Zylinder noch vergrößert wird, um ihn gegen Erdbeben- bzw. Meeresbeben-Kräfte sicher zu machen. Vor diesem Vorspannen werden die Zylinderröhren natürlich ausbetoniert, so daß der äußere 5 m dicke Mantel des Zylinders massiv wird. Falls erforderlich, können auch die Zellen des unmittelbar anschliessenden inneren Ringes vollbetoniert werden.

Die Pylonenbeine der Brücke stehen unmittelbar auf dem Ring und werden durch einen 12 m hohen und rund 32 m breiten U-förmigen Riegel miteinander verbunden. Nur dieser Querriegel ragt aus dem Wasser heraus. An den Zylinderwandungen sind rundherum kräftige Fender an aus dem Wasser herausragenden Pfeilern befestigt, die einen eventuellen Schiffsstoß mit großem Verformungsweg von etwa 3 bis 4 m abfangen.

Nach dem erfolgreichen Bau von Ekofisk in der rauhen Nordsee, die bis zu 20 m Wellenhöhe aufweist, sollten keine Zweifel mehr daran bestehen, daß auch Brückenpfeiler solcher Abmessungen in Wassertiefen von 80 bis 100 m gegründet werden können.

Dieser Vorschlag für die Gründung eines Pfeilers in der Straße von Messina wurde hier nur als Anregung für solche Projekte beschrieben.

Zum Kongress werden zweifellos manche interessante Berichte über Gründungen weitgespannter Brücken vorliegen, zudem im gastgebenden Land Japan die zur Zeit größten Brücken der Welt gebaut werden.

[1] F. Leonhardt und W. Zellner: Vergleiche zwischen Hängebrücken und Schrägkabelbrücken für Spannweiten über 600 m IVBH-Abhandlungen Band 32-I, Zürich 1972

ZUSAMMENFASSUNG

Gründlichere Baugrunduntersuchungen und höhere Pressungen werden empfohlen. Grosse Caissongründungen sollten bevorzugt mit zylinderförmigen Caissons gebaut werden. Bei den Pfahlgründungen werden Bohrpfähle bereits bis 2,5 m Durchmesser und bis 70 m Tiefe eingesetzt. Einige Hinweise für die Bewehrungen von Pfahlkopfplatten werden gegeben. Für Pfahlgründungen in sehr tiefem Wasser, 60 bis 100 m, wird ein Vorschlag mit einem offenen Zylinder beschrieben, der für eine 1470 m weit gespannte Brücke über die Strasse von Messina entworfen wurde.

SUMMARY

More, better and deeper soil investigations and higher allowable soil pressures under large bridge foundations are recommended. Caissons should preferably be designed as circular cylinders. For pile foundations, drilled piles with diameters up to 2,5 m and dephts of 70 m have been built. Some advice for pile cap reinforcement is given. For foundations in very deep water (60 to 100 m) a proposal with an open cylinder is described, as it was designed for a cable stayed bridge with 1470 m span across the Straits of Messina.

RESUME

Il est recommandé de prévoir de meilleures analyses des sols de fondation et de considérer des pressions admissibles supérieures pour les fondations des ponts de grande portée. Il est préférable d'envisager des caissons cylindriques. En ce qui concerne les fondations en pieux, il faut savoir que des pieux d'un diamètre de 2,50 m et d'une hauteur de 70 m ont déjà été réalisés. Quelques indications sont données pour la protection de la tête des pieux. Pour le cas de fondations en eau très profonde (60 à 100 m), la proposition d'un cylindre ouvert est faite, comme c'est le cas pour le projet de pont suspendu, de 1470 m de portée, sur le détroit de Messine.