Die neue Brücke über den Kleinen Belt: Bericht vom Besuch der Baustelle zwischen dem dänischen Festland und der Insel Fünen im August 1967

Autor(en): **Schubiger, Stephan**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **86 (1968)**

Heft 23

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-70050

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

klein halten, wenn die Vorwarnung durch den Wetterdienst und die Hochwasservorhersagen in ein wohldurchdachtes Alarmsystem einbezogen sind und der Katastropheneinsatz der verschiedenen Dienste organisiert und auch eingespielt ist.

Man ist mit Landbaudirektor Dr. *Possegger,* der die Schlussworte sprach, einig über den Erfolg der Tagung, über die Grenzen hinweg das Gespräch in Gang gebracht, den Stand unseres Wissens überprüft und offene Probleme naturwissenschaftlich-technischer, aber auch planerischer und organisatorischer Art umfassend beraten zu haben. Damit ist ein neuer Anfang gemacht, wie er auch in der nachstehenden Entschliessung, allerdings noch sehr allgemein, skizziert ist.

Als Tagungsteilnehmer möchte der Berichterstatter auf die Schwierigkeiten hinweisen, welche solch ein erster Versuch bringt, und dem Veranstalter, Prof. Dr. *Aichinger,* für seine Initiative herzlich danken. Die eher lockere Organisation förderte den Kontakt zwischen den Vertretern der vielen Disziplinen. Auch für eine weitere Arbeit sollte diese Turbulenz erhalten bleiben, allerdings sollte mehr Zeit für die Diskussion gegeben sein und der Zeitplan eingehalten werden können. Prof. Dr. *H. Grubinger,* ETH, Zürich

Entschliessung der «Internationalen Tagung zur vorbeugenden Bekämpfung von Hochwasserschäden» in Klagenfurt vom 16.–21. Okt. 1967

Unter dem Eindruck der Naturkatastrophen der letzten Jahre haben sich Vertreter der einschlägigen Fachrichtungen aus der Bundesrepublik Deutschland, aus Italien, Jugoslawien, Norwegen, Österreich, Polen und der Schweiz zusammengefunden, um die erforderlichen vorbeugenden Massnahmen zu beraten und die fachlichen Grundlagen zu schaffen, damit der verfügbare Lebensraum in den Gebirgsländern erhalten bleibt. Der augenscheinliche Erfolg des Zusammenwirkens privater und öffentlicher Stellen bei den Hochwasserkatastrophen der Jahre 1965 und 1966 wurde durch eine internationale Zusammenarbeit wesentlich verstärkt, so dass eine solche auch für die Erörterung und Planung der Vorbeugungsmassnahmen geboten erscheint. Die Tagungsteilnehmer werden in dieser Meinung durch den erfolgreichen Verlauf der Tagung und die dabei gewonnenen Erkenntnisse bestärkt, dass der Fragenkomplex in allen betroffenen Gebirgsländern ein ähnlicher ist und sich auf folgende drei Problemkreise zurückführen lässt:

1. Eine Lenkung der Besiedlung im Rahmen einer sinnvollen Bauordnung
2. Eine zielführende Bewirtschaftung des Bodens
3. Massnahmen der Wasserwirtschaft

Bei allen zu ergreifenden Massnahmen wird zu bedenken sein, dass die Dynamik des Naturgeschehens insbesondere in den alpinen Räumen hinsichtlich der dadurch zeitweise ausgelösten Katastrophen nur in beschränktem Masse zu beeinflussen ist.

Angesichts der in den Referaten aufgeworfenen schwerwiegenden Fragen und des umfangreichen vorliegenden Materials sind die Tagungsteilnehmer übereingekommen, ein internationales Arbeitskomitee zur vorbeugenden Bekämpfung von Hochwasserschäden ins Leben zu rufen. Dieses Komitee soll sich aus Experten aller in Betracht kommenden Fachgebiete zusammensetzen. Weiters darf den Regierungen der einzelnen Staaten die Bildung von Arbeitskreisen auf nationaler Ebene empfohlen werden, die in enger Zusammenarbeit mit dem internationalen Arbeitskomitee an der Lösung der Probleme mitwirken sollen. Die Tätigkeit dieses Arbeitskomitees und der zu bildenden Arbeitskreise soll im Rahmen einer zweckvollen Raumordnung erfolgen, wobei ein ständiger Gedankenaustausch über die gewonnenen Erkenntnisse zu pflegen ist und Empfehlungen auszuarbeiten sind, die an die zuständigen Stellen weiterzuleiten wären, um die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse auf möglichst raschem Wege in die Praxis umzusetzen.

Die neue Brücke über den Kleinen Belt

DK 624.53

Bericht vom Besuch der Baustelle zwischen dem dänischen Festland und der Insel Fünen im August 1967[1])

Von **Stephan Schubiger,** dipl. Ing. ETH, Zürich

Am Kleinen Belt bietet sich gegenwärtig ein eindrucksvolles Bild. Ein Generationenwechsel zweier Brücken geht seinem Abschluss entgegen. Steht man am Ufer, dort wo der Belt sich wie ein Knie zwischen die Insel Fünen und die grosse Halbinsel Jütland legt (Bild 1), so erhebt sich zur Linken die Silhouette der bestehenden Fachwerkbrücke, zur Rechten lassen die beiden beinahe fertig erstellten Zufahrtsrampen die Dimensionen der zukünftigen Hängebrücke erraten. Ein nicht abbrechendes Band von Fahrzeugen bewegt sich hinter den Gitterstäben der Brücke, die nun in Kürze abgelöst werden soll.

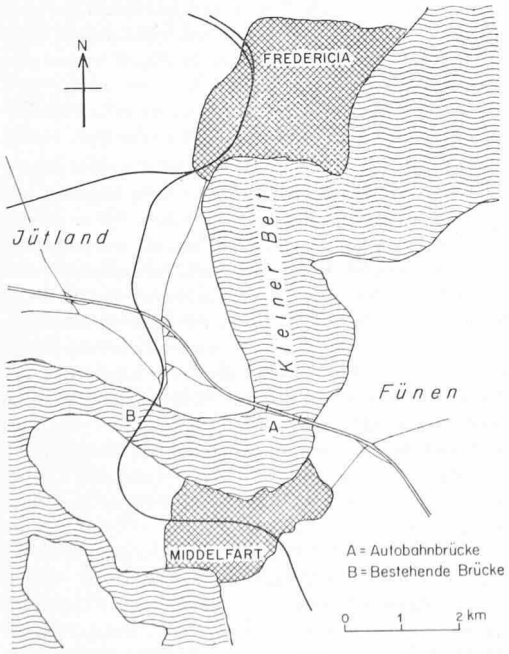


Bild 1. Lageskizze der Brücken über den Kleinen Belt. A = neue Brücke

Ein Blick auf die Karte erklärt, warum diesem Brückenübergang eine wichtige Bedeutung zukommt. Kopenhagen nennt sich gerne das Paris des Nordens. In verkehrsgeographischer Hinsicht jedenfalls stimmt der Vergleich nicht schlecht. Die Hauptstadt als wirtschaftlicher und kultureller Kopf des Landes ist radial durch verschiedene Adern mit den Provinzzentren verbunden. Die Hauptader ist die Ost-West-Verbindung nach Jütland, die zweimal übers Wasser führt. Zum ersten Mal am Grossen Belt, wo einstweilen der gut eingespielte Fährbetrieb der dänischen Staatsbahnen weitergeführt wird, zum zweiten Mal am Kleinen Belt, wo zeitweise die Verkehrslage recht schwierig werden kann.

Ein Bruchteil eines Menschenalters hat also genügt, die Kapazität der damals grosszügig geplanten Brücke zu überfordern. Misst man in geschichtlichen Massstäben, ist es noch nicht so lange her, seit man diesen wichtigen Übergang mit Muskelkraft und Wind bewerkstelligen musste. Nicht unweit der Baustelle soll sich folgende Historie abgespielt haben, die der Nobelpreisträger J.V. Jensen in einer seiner Erzählungen beschreibt: König Christian II. von Dänemark, auf der Flucht vor seinen innern und äussern Feinden (er verlor 1521 Schweden an Gustav Vasa), setzte in verzweifelter Ratlosigkeit von Jütland über den Kleinen Belt nach Fünen über. Auf halbem Weg bereute er den Entschluss und liess das Schiff wenden. In wechselnden Anwandlungen von Furcht und Stärke pendelte der König unentschlossen zwischen beiden Ufern hin und her, bis er beim Morgengrauen aus lauter Erschöpfung am Ufer Fünens anlegen musste.

Erst Jahrhunderte später, im Jahre 1872, machte das Zeitalter der Dampfmaschine die Einrichtung einer Eisenbahnfähre möglich. Jedoch schon wenige Jahre darauf dachten die dänischen Staatsbahnen an einen Brückenbau. Zwei Projekte entstanden, wurden aber nie ausgeführt: Das erste eine elegantere Ausgabe der Firth-of-Forth-Brücke, das zweite eine Hängebrücke, deren Tragkabel in einer romantischen, burgähnlichen Konstruktion verankert waren. Das Vertrauen in die Funktion dieses Widerlagers schien offenbar

[1]) Wir drücken dem Verfasser und seinen Kollegen in Dänemark unser Bedauern darüber aus, dass es uns erst jetzt möglich wurde, dieses im Oktober 1967 eingereichte Manuskript zu veröffentlichen. *Red.*

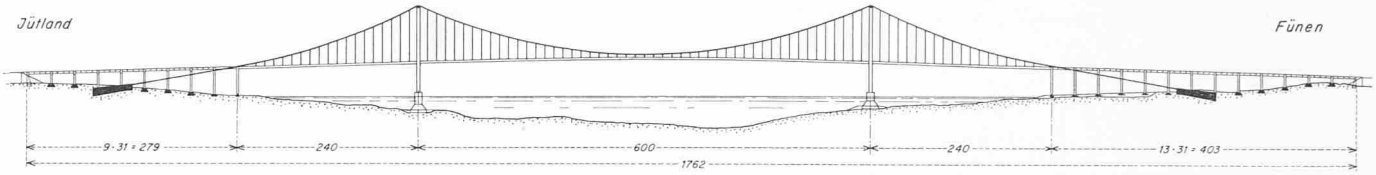


Bild 2. Neue Autobahnbrücke über den Kleinen Belt, Längenprofil 1:10 000

dem Architekten so besser gewährleistet. Der Brückenübergang wurde aber erst 1935 Wirklichkeit, als die heute bestehende Brücke dem Verkehr übergeben werden konnte. Niemand ahnte damals den Aufschwung des Automobilverkehrs. So wurde sie in erster Linie als Bahnbrücke geplant, und die Strasse erhielt nur zwei Fahrbahnen. Ein Vorschlag von damals, den Autoverkehr mittels einer unter die Brücke gehängten Kabine zu überführen, wirkt heute belustigend. Wenden wir uns nun aber der *neuen Brücke* zu.

Wo ich am Ufer Jütlands im Frühjahr 1965 eine Baugrube von der Grösse eines Fussballplatzes vorfand, deutet heute nichts mehr darauf hin, dass in der Zwischenzeit ein grosser und wichtiger Bauteil der Hängebrücke erstellt wurde, und nun mit 7 bis 12 m Erde überdeckt ist. Es sind dies die beiden *Ankerblöcke,* welche die Zugkräfte von den Tragkabeln in den Baugrund übertragen. Ankerblock ist zwar eine schlechte Bezeichnung für die 1,50 m dicke Platte, die wie ein festgefahrener Schneepflug wirkt (Bilder 2 bis 5). Wo später die Tragkabel eingeführt werden, ragen nur noch die beiden «Ankerhäuser» aus dem Boden. Die 2 × 8500 t Kabelzug übertragen sich durch Reibung mit dem Boden (rund 3 t/m²) auf eine 14 bis 24 m starke Moränenschicht, welche ihrerseits auf einer Lage von unbekannter Mächtigkeit aus sogenanntem Lillebeltlehm ruht. Prof. Schnitter weist in seinen Vorlesungen an der ETH immer wieder darauf hin, dass der gute Ingenieur auch den Baugrund als Konstruktionsteil seines Bauwerkes betrachten und somit die Konstruktions- und Gründungsprobleme immer als Ganzes sehen muss. In diesem Falle wurde die Kieslage von hoher Scherfestigkeit zum notwendigen Bestandteil der Brücke. Sie verteilt die Scherkraft am Übergang zur Lehmschicht auf eine weit grössere Fläche und macht diese Art Kabelverankerung erst möglich.

Aus Neugierde überprüfte ich die Resultierende aus Kabelzug einerseits und Ankerplatte mit Auffüllung anderseits und konnte beruhigt feststellen, dass diese beinahe senkrecht zur Fundamentfläche steht. Eine verdichtete Kiesschwelle vor dem «Pflug» gibt eine zusätzliche Sicherheit, worüber die Ingenieure sich anhand eines Grossversuches an einem Pfeilerfundament des Zufahrtsviaduktes Gewissheit verschafften. Diese elegante Methode der Kabelverankerung mittels einer riesigen Reibungsplatte ist eine «Weltpremière» und trägt wesentlich zum leichten Aussehen der Brückenanlage bei.

Eine ebenso interessante Ingenieuraufgabe stellt die *Pfahlgründung der beiden Pylonen* dar (Bilder 6 und 7). Einen guten Überblick über die Grossbaustelle bietet sich von der Zufahrtsbrücke aus. Beim Aufstieg über die 30 m hohe Gerüsttreppe konnten wir die

Bilder 3 und 4. Ankerblock, Längsschnitt und Grundriss 1:1000

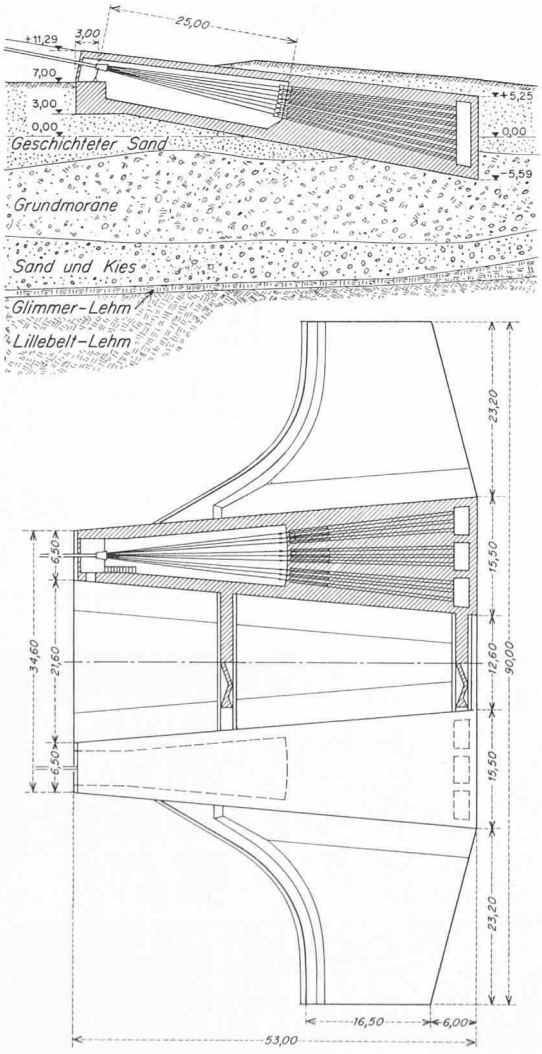
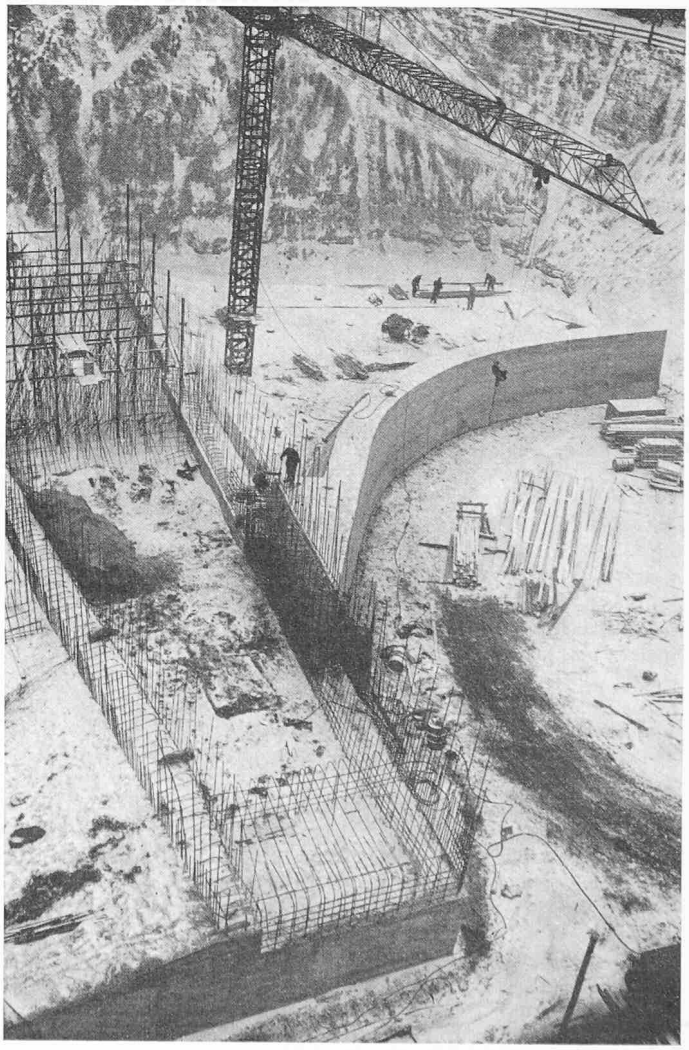
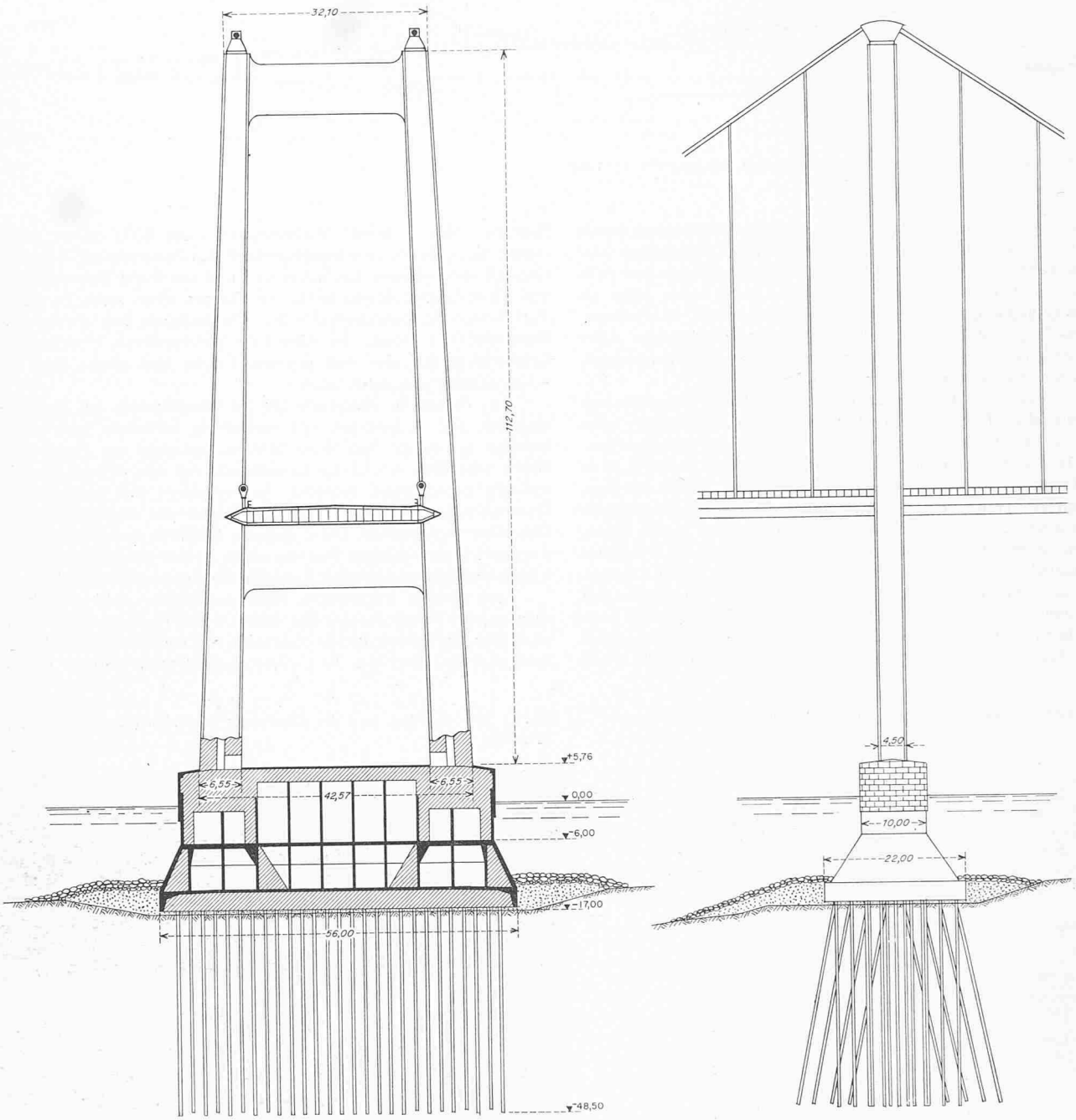


Bild 5. Wie ein Pflug liegt die Ankerplatte im Boden (nur eine Hälfte ist zu sehen)



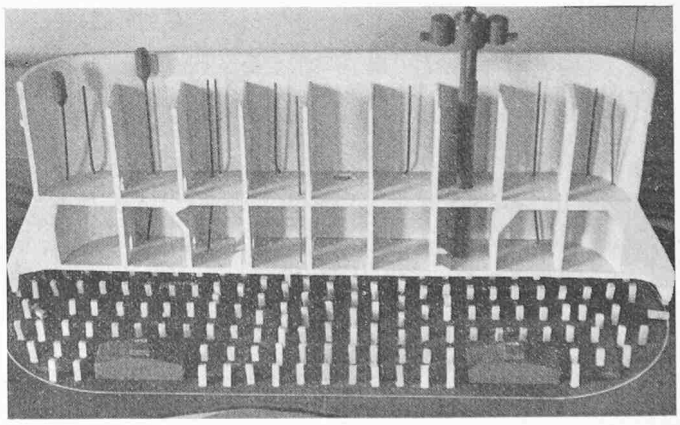


Bilder 6 und 7. Pylon samt seiner Gründung, Schnitt und Ansicht je quer zur Brückenachse. Massstab 1:1000

Dimensionen des Bauwerkes am eigenen Leib erfahren. Sofort fallen die beiden Senkkasten auf, die, wie mir auf den ersten Blick schien, in merkwürdiger Lage draussen im Belt stehen (Bild 8). Wohl befindet sich der Jütland-Pfeiler genau in der Brückenachse; sein Gegenpart liegt aber gleich nebenan, also Hunderte von Metern von der Stelle entfernt, wo er später seinen Dienst als Pylonenfundament versehen muss. Dies wird erst verständlich, wenn man sich den *Bauvorgang* in Erinnerung ruft.

Die Arbeit an den Caissons begann in einem Dock am Ufer (Bild 9). Zuerst entstand die Arbeitskammer, die später mit Beton gefüllt wird und die gesamte Last auf den Pfahlrost übertragen muss. Dann folgt der zellenartige Aufbau bis auf eine Höhe von rund 12 m. Bevor der Kasten zu schwer wurde, bekam er einen Schwimmgurt aus Stahltanks umgelegt. Eine Baggerung stellte die Verbindung mit dem Belt her, und der Caisson wurde an eine Zwischenstation mit grösserer Wassertiefe geschleppt (Bild 10). Nach einer weiteren Aufstockung auf eine Höhe von 21 m fand die Reise am plangemässen Standort ihr Ende. Ein ungewöhnlicher Transport, wenn man die unberechenbare Strömung im Belt (bis 4 m/s in beiden Richtungen) bedenkt. Es bestand die Gefahr, dass der Betonkoloss sich selbständig gemacht und die Pfeiler der alten Brücke bedroht hätte. Im Endzu-

Bild 11. Das Schnittmodell eines Pfeilers zeigt die aussteifenden Zellenwände



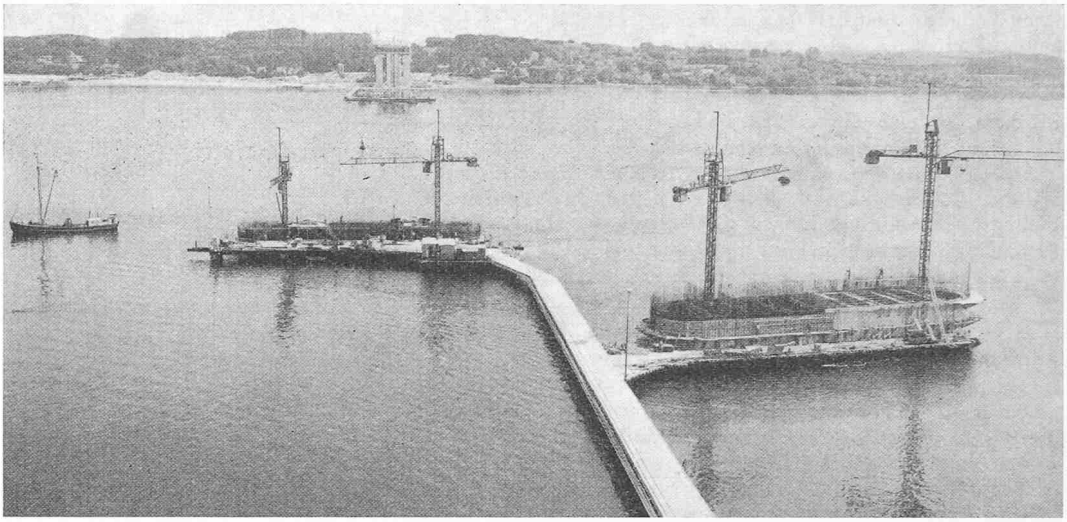


Bild 8. Der Fünen-Pfeiler (rechts) bei seinem Zwischenhalt auf der Reise an den plangemässen Standort (Blick vor der Westrampe nach Osten in Brückenlängsrichtung)

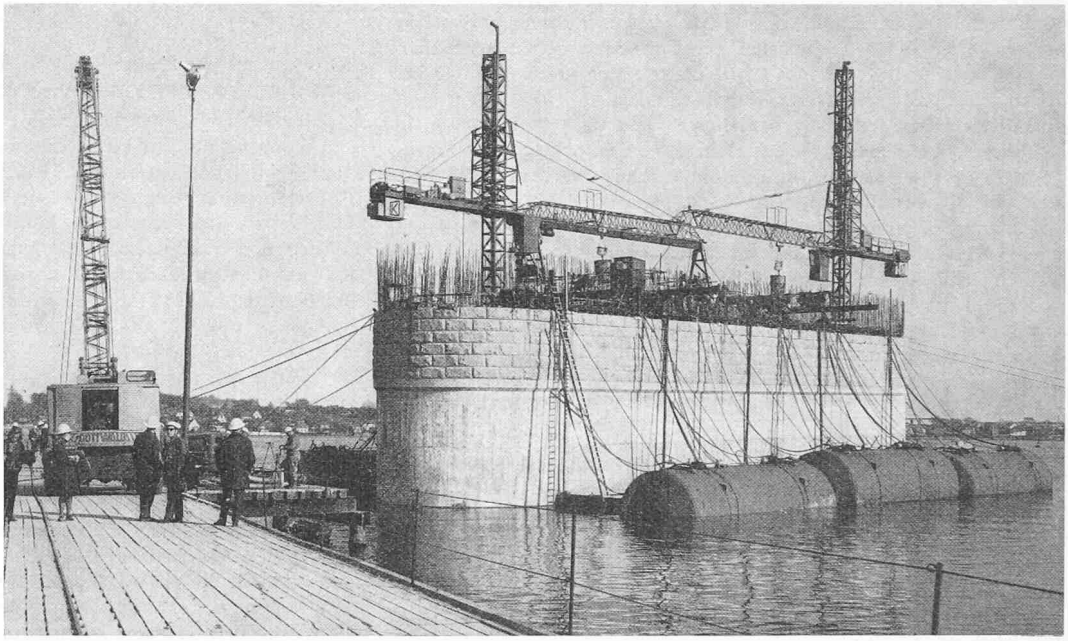


Bild 10. Der Fünen-Pfeiler bereit zu seiner letzten Reiseetappe

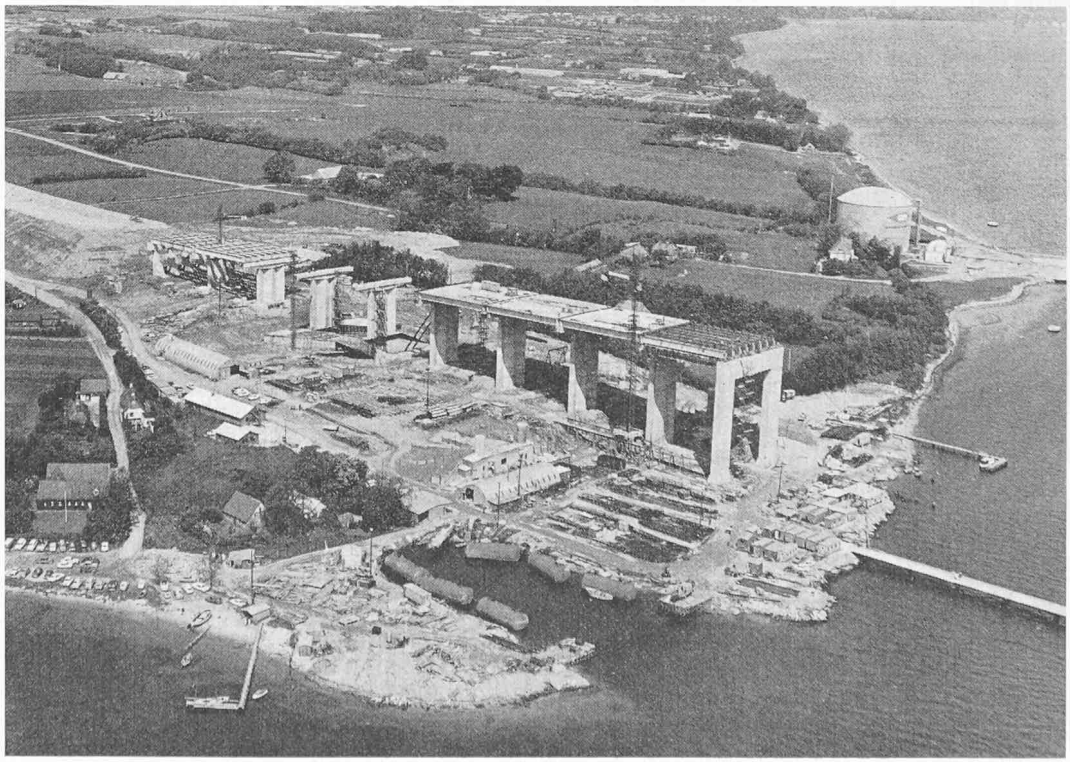


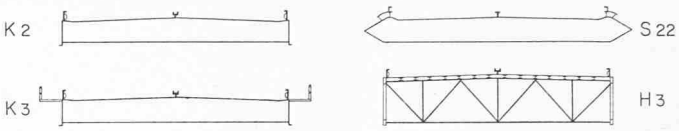
Bild 9. Die Zufahrt auf der Jütland-Seite. Im Vordergrund das Dock mit dem «Schwimmgurt»

stand kommen rund 41 000 t (das Gewicht einer Reihe von Hochhäusern) auf den Caisson zu stehen, somit hat jeder der 206 vorfabrizierten Betonpfähle (Querschnittsfläche 38 × 48 cm) 200 t zu tragen. Unter der Einwirkung der Verkehrslast, der Vereisung (5 t/m Brückenlänge) und weiterer Einflüsse kann der Pfahldruck im Extremfall bis auf 350 t ansteigen. Es versteht sich von selbst, dass das Rammen dieser rund 45 m langen Pfähle in 20 m Wassertiefe nichtalltägliche Probleme aufwarf. Besonders stellten das Zentrieren und Führen hohe Anforderungen an die Unternehmer, und es war eine Reihe von Voruntersuchungen notwendig, um Tragkraft, Setzungsverhalten und Ausführungsgeschwindigkeiten abzuklären.

Um mir den Gang der Arbeiten von der Nähe zu zeigen, führte mich mein Begleiter auf der Hilfsbrücke zu den Pylonen hinaus. Beim Landesteg liegt eine vollständige Taucherausrüstung. Einer der bauleitenden Ingenieure liess sich bei der Marine zum Tiefseetaucher ausbilden. In 20 m Wassertiefe kontrollierte er die Pfahlköpfe und überwachte den Absetzvorgang des Caissons auf die vier provisorischen Fundamentblöcke. Der Senkkasten auf der Jütlandseite ist im Begriff, seine endgültige Höhe zu erreichen. (Sein Bruder soll in wenigen Tagen an seinen endgültigen Standort überführt werden.) Ein Blick ins Innere zeigt den zellenartigen Aufbau (Bild 11). Dem Kräfteverlauf entsprechend müssen die Zellenwände noch verstärkt werden. Die beiden Punktlasten der Turmbeine sollen als gleichmässig verteilte Last auf der Grundplatte unten ankommen. Dabei treten in der obersten Decke Zugspannungen auf, die mit 36 Vorspannkabeln überdrückt werden. Bereits sind die Anschlusseisen in die Stiele der Pylonen zu sehen. Trotz des wesentlich höheren Eigengewichts erweisen sich Betontürme im Vergleich mit einer Stahlkonstruktion als wirtschaftlicher. In Kürze kann die Kletterschalung angesetzt werden, und etwa 6 Monate später ist der 118 m hohe Turm bereit zur Kabelmontage. Der zweite Pylon kann in Angriff genommen werden. Je nach Temperatur und Stellung der Verkehrslast verschiebt sich die Turmspitze bis zu 65 cm. Bei der Montage der Fahrbahn ginge die Deformation sogar über dieses zulässige Mass hinaus, wenn die Kabelsättel nicht vorher exzentrisch aufgestellt würden, so dass sie zu einem bestimmten Zeitpunkt nachgeschoben werden können.

Die projektierenden Ingenieure hatten einen langen Weg zu gehen, bis die nun vorliegende Lösung des *Versteifungsträgers* gefunden war. Ich kann mich noch gut erinnern an die Meldung aus Kopenhagen: «Die Zigarre hat gewonnen!» Gemeint war die Querschnittsform des Trägers. Es waren zwei Lösungen zur Submission ausgeschrieben: Ein 6 m hoher konventioneller Fachwerkträger, sowie ein 3 m hoher geschlossener Stahlkasten mit aerodynamisch geformtem, zigarrenähnlichem Querschnitt und orthotroper Platte (Bilder 12 bis 14). Die moderne Kastenlösung bringt eine Ersparnis von rund 1200 t Stahl und kostet somit 20% weniger als der Fachwerkträger. Natürlich hat dieser neuartige Querschnitt eine lange Vorgeschichte; sie beginnt im Grunde mit dem Tag, an dem vor etwa 20 Jahren der Versteifungsträger der Tacoma-Brücke in den USA auseinanderbrach.

Tabelle 1. Messungen an den Versteifungsträger-Modellen



	Kastenquerschnitt			Fachwerkträger
Bezeichnung	K 2	K 3	S 22	H 3
Brückenbreite im Modell cm	35,6	44,9	41,6	35,9
Verhältnis der Schwingungszahlen: Torsion: Biegung	2,63	2,52	2,59	2,37
krit. Windgeschwindigkeit v_c m/s	8,1	10,2	17,5	12,1
kritische Geschwindigkeit für «Flattern» v_F m/s*	18,8	16,4	19,2	15,6
v_c/v_F in %	43	62	91	77

Die Werte sind am Modell gemessen.

* berechnet an einem idealisierten Querschnitt nach der «Thin airfoil theorie».

Bei normaler Windstärke versetzte sich dieser Träger in Längs- und Drehschwingungen, die sich wegen der aerodynamischen Unstabilität bis zur Zerstörung aufschaukelten.

Wohlwissend um diese Zusammenhänge hat der Projektverfasser Windkanalversuche am Modell eines Brückenteilstückes angeordnet. Es ist möglich, aus den gemessenen kritischen Windgeschwindigkeiten am Brückenabschnitt auf die kritischen Werte der Brückenkonstruktion zu schliessen. Man kann sich so den Bau eines Modells der gesamten Brückenanlage ersparen, das nicht nur geometrisch ähnlich sein, sondern auch eine Ähnlichkeit der Massenverteilung, Steifigkeits- und Dämpfungsverhältnisse aufweisen müsste, was einen entsprechenden technischen und finanziellen Aufwand erforderte. Die Versuche erstreckten sich auf eine Reihe von Querschnittsvarianten, deren sukzessive Veränderungen zu der heutigen Form geführt haben. Die Vorteile der gewählten Lösung sind deutlich: Die kritischen Windgeschwindigkeiten sind bedeutend höher. Gleichzeitig ist die Gefahr für die folgenschweren kombinierten Schwingungen (Flattern) kleiner, da die hohe Torsionssteifigkeit des geschlossenen Kastens die Schwingungszahlen für Biegung und Verdrehung auseinanderrückt. Die windschlüpfige Form mit den günstigen Wirbelablösungen verhindert weitgehend die Schwingungsanfachung bei kleinen Windgeschwindigkeiten. Die Zahlen der Tabelle 1 zeigen, wie die schrittweise Annäherung an die Stromlinienform die aerodynamische Stabilität verbessert.

Erstaunlich ist, welch grossen Einfluss kleine Einzelheiten haben können. Im Gespräch mit Flugzeugingenieuren fiel der Vorschlag, die im Flugzeugbau als «flaps» bekannten stabilisierenden Flossen

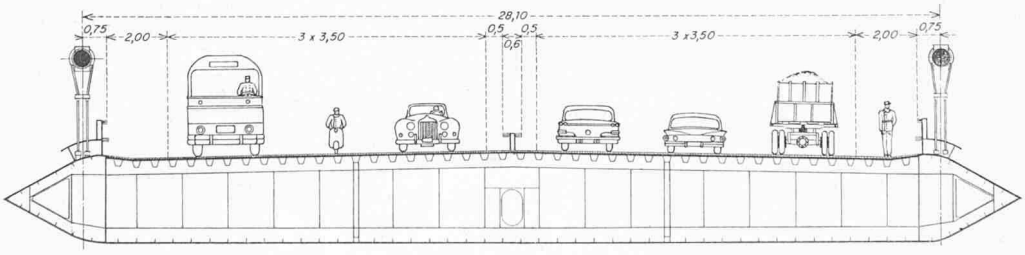


Bild 12. Versteifungsträger, Querschnitt 1:250

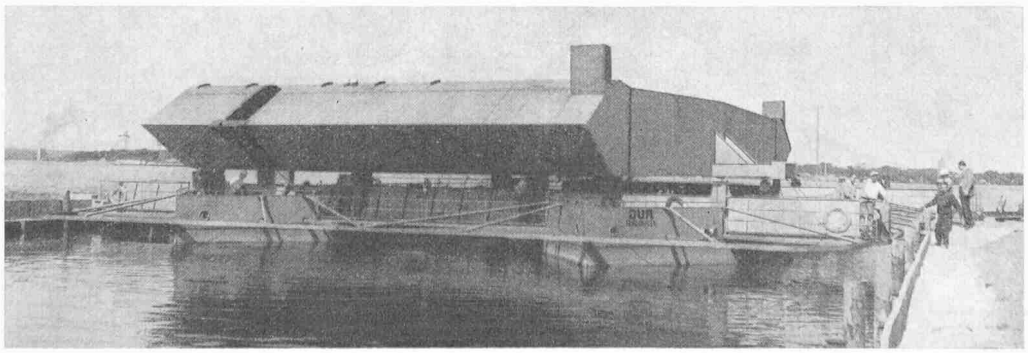


Bild 13. Der erste Abschnitt des Versteifungsträgers liegt auf dem Spezialfloss im Hafen des Stapelplatzes

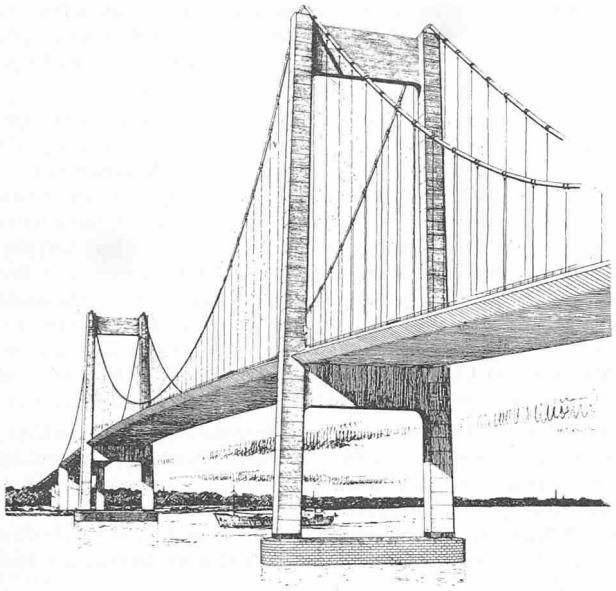


Bild 14. Die Perspektive zeigt, wie elegant der «Zigarrenquerschnitt» des Versteifungsträgers wirken wird

im Windkanal zu erproben. Offensichtlich war eine günstige Wirkung auf die Wirbelablösungen von der Fahrbahn hinter den Leitplanken festzustellen. Die «flaps» werden nun in Form von gekrümmten Blechen unterhalb der Leitplanken eingebaut.

Bei meinem Besuch in der Schiffswerft von Nakskov konnte ich die Herstellung der 12 m langen Teilstücke des Versteifungsträgers verfolgen. Eine Schiffswerft baut Brücken? mag man sich fragen. Aber schliesslich unterscheidet sich der Aufbau der geschweissten Stahlkasten nicht wesentlich von dem eines Schiffsrumpfes. Die Erfahrung im Schweissen grosser Stücke kommt dem Brückenbau zugute. Mehr Mühe bereitet das Einhalten der Masstoleranzen, erklärte der begleitende Ingenieur und fügte einige interessante Erfahrungen hinzu: Besondere Probleme bietet uns der Temperaturwechsel von Tag und Nacht. Wir können das Kastenelement erst genau einmessen, wenn die Thermometer auf der Ober- und Unterseite bis auf zwei Grad die gleiche Temperatur anzeigen, was oft erst um Mitternacht geschieht. Im Schiffsbau nehmen wir weniger Rücksicht auf diese Probleme. Daher auch die Tatsache, dass zwei nach den gleichen Plänen erstellte Schwesterschiffe meist abweichende Fahreigenschaften haben. Sodann ist die Erfahrung der Werft zur See beim Transport von Vorteil. Jede Woche soll ein Element von Nakskov zur über 100 km entfernten Baustelle geschleppt werden (Bild 13). Dort wartet, wegen der oft gefährlichen Strömungsverhältnisse, eine Landehilfe in Form eines grossen Schwenkarmes, der die Ladung sicher in den Hafen des Stapelplatzes einführt. Sind alle Trägerstücke beisammen, gelangen sie auf die selbe Weise zur Montagestelle. So ist es möglich, die Montage in wenigen Monaten durchzuführen.

Nicht unerwähnt bleiben sollen die beiden *Zufahrtsrampen* mit ihren 9 bzw. 13 Spannweiten von 31 m, stellen sie doch für sich allein zwei imposante Brückenbauwerke dar (Bild 9). Jeweils acht auf der Baustelle vorgefertigte Träger bilden das Tragelement und sind mit einer Ortsbeton-Fahrbahnplatte verbunden. Über den Stützen findet sich an Stelle eines Fahrbahnüberganges eine dünne, stark armierte Platte. Die eigentliche Attraktion aber bilden die mit einer Stahlgleitschalung hergestellten Stützen (Bilder 15 und 16). Ihr Querschnitt weist eine originelle und statisch richtige Wellenform auf, die zudem materialsparend ist. Die Sonne lässt auf der Oberfläche ein höchst lebendiges Schattenspiel erscheinen und lässt den Betrachter im Glauben, der Kleine Belt sei mit spielerischer Leichtigkeit überwunden worden. Der beigezogene Architekt hat seine Aufgabe jedenfalls besser gelöst als sein eingangs erwähnter Kollege in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts.

Aufschlussreich war der persönliche Kontakt mit den Projektverfassern im Büro zu Kopenhagen. Besser als durch viele Worte lassen sich die Einzelheiten der Statik am *Modell* erklären. Im Keller des Ingenieurbüros hat ein Team mit grosser Genauigkeit und Erfindungsgabe verschiedene Modelle im Massstab 1 : 200 aufgebaut. Dem Laien ist es oft unverständlich, wenn bei der Berechnung wichtiger Bauten Modellversuche herangezogen werden. Er kann sich nicht vorstellen, dass bei den meisten Ingenieuraufgaben die Berechnung immer auf Vereinfachungen und unsicheren Annahmen beruhen muss und somit die Kunst des Ingenieurs darin besteht, unter Anwendung aller Möglichkeiten die Grenzen abzustecken und in schrittweiser Näherung an die Lösung heranzukommen. In diesem Sinn war auch hier der Versuch ein wertvolles Hilfsmittel.

Besonders gut trägt das räumliche Modell zur Veranschaulichung des Tragverhaltens bei. Mit einem Daumendruck konnte ich mich selber von der guten lastverteilenden Wirkung des Kastenquerschnittes überzeugen. Hängt man eine Last unter das eine Tragkabel, so ver-

Bild 15. Pfeiler der Zufahrtsbrücke, Grundriss und Ansicht mit Schnitt der Brücke, Massstab 1:500

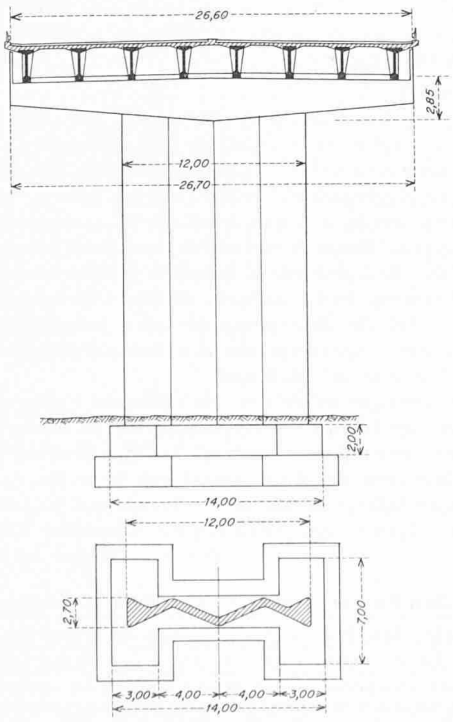
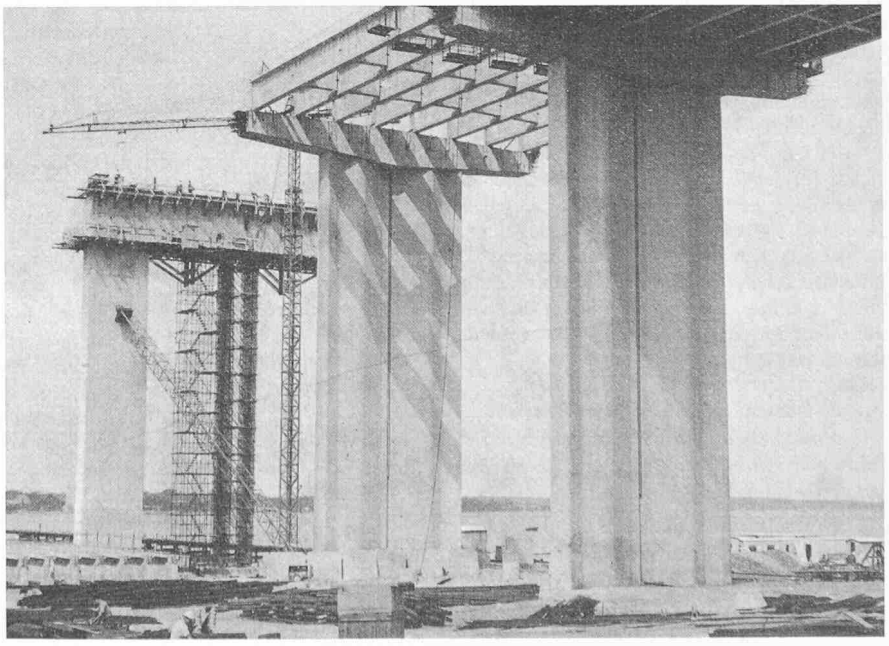


Bild 16. Gewellte Stützen, eine dänische Erfindung! Die Pfeiler der Zufahrtsbrücke vereinen Phantasie mit statischem Geschick



teilt sich das Verhältnis von 60 zu 40% auf beide Kabel. Vor allem liefert der Versuch Angaben, ob durch konstruktive Massnahmen die Deformationen und Schnittkräfte sowie das Schwingungsverhalten günstig beeinflusst werden können. Weitere Modellversuche betrafen:

— Einfluss der Torsionssteifigkeit der Pylonen
— Feste Verbindungen zwischen Tragkabel und Versteifungsträger
— Kontinuität des Versteifungsträgers bei den Pylonen
— Einziehen von Schrägseilen.

Das Resultat solcher Untersuchungen war, dass die Verwirklichung all dieser Massnahmen zu wenig Nutzen bringt im Verhältnis zum konstruktiven Aufwand.

Zusammen mit dem Modellspezialisten habe ich den Montagevorgang des Versteifungsträgers durchexerziert. Wir hängen das erste Fahrbahnelement in Brückenmitte an. Die anfängliche Kettenlinie wird geknickt und die Kabel weichen nach unten aus. Da wir beim weiteren Anhängen die Elemente auf Fahrbahnhöhe gelenkig verbunden haben, öffnen sich die Fugen auf der Unterseite. Beim Fortschreiten der Montage schliessen sich die Fugen wieder, und zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt ein ganzer Trägerabschnitt in gerader Linie. Dies ist der Moment, wo die Einzelstücke zu einem steifen Rohr verschweisst werden. Mehr und mehr strecken sich die Kabel; der Träger krümmt sich nach oben und kommt unter Spannung. Der Zeitpunkt der Montage der Seitenöffnungen ist dabei von geringem Einfluss.

Eine Einzelheit der Modellanlage sei noch erwähnt. Eine wichtige Aufgabe hiess: Wie misst man die Spannungen im Hauptkabel, ohne durch den Messvorgang die Genauigkeit empfindlich zu stören? Lösung: Der Draht läuft über eine Umlenkrolle zur Messstrecke. Daneben ist ein Vergleichsdraht von gleicher Stärke montiert, dessen Spannung mit Gewichten variiert werden kann. Durch Anzupfen und Vergleichen der Tonhöhe oder durch Beobachten der Resonanz kann die Kraft bestimmt werden. Voll Stolz stellten wir fest, dass die Grenzen der Brückenstatik bis nahe an die Tonkunst reichen!

Das Projekt und die Bauleitung liegen in den Händen des Ingenieurbüros Ostenfeld & Jønson in Kopenhagen. Ich bin Dr. Ostenfeld zu Dank verpflichtet, nicht nur für seine Hilfe beim Baustellenbesuch, sondern auch für das wertvolle persönliche Gespräch. In dessen Verlauf wurde offenbar, dass Ingenieurarbeit auf dieser Stufe mehr bedeutet als eine saubere Lösung einer richtig gestellten Aufgabe. Sie ist zielbewusstes Arbeiten an der Zukunft eines Landes. Von den fachlichen Erklärungen über das «Hängebrüggli», wie Dr. Ostenfeld es scherzhaft nannte (er ist nicht nur ein guter Kenner der Schweiz, sondern als Däne auch ein Meister des understatement), ging das Gespräch schliesslich über zu Erlebnissen aus seiner Döttingerzeit und zu Anekdoten von seinem ehemaligen Chef, Professor Roš in Zürich.

Die Brücke am Kleinen Belt ist nur die erste einer neuen Brückengeneration im kommenden Ausbau der Fernverbindungen. Bereits ist eine grosse Strecke der Nord-Süd-Verbindung, die sogenannte Vogelfluglinie, in Betrieb. Die Anwohner des Øresund warten auf die Verbindungsbrücke zwischen Schweden und Dänemark. Vor kurzer Zeit wurde ein Wettbewerb für ein Brückenprojekt über den Grossen Belt entschieden.

An alle zukünftigen Ferienreisenden nach dem Norden geht die Empfehlung, im Reiseführer dem Abschnitt über den Kleinen Belt einen dreifachen Stern anzufügen, was in der Terminologie der bekannten Michelin-Führer sagen will: vaut le voyage!

Adresse des Verfassers: *Stephan Schubiger*, dipl. Ing. ETH, in Ing.-Büro E. Schubiger, 8006 Zürich, Universitätsstrasse 86.

Injektionen in nutzbaren Grundwasserströmen

DK 624.138.23:628.112

Bemerkungen zum Aufsatz von P. D. Dr. H. Jäckli in Heft 15, S. 244 der Schweiz. Bauzeitung vom 11. April 1968

Über die Bedeutung *nutzbarer Grundwasserströme* für die Wasserwirtschaft im allgemeinen und die Wasserversorgung im besonderen und den daraus folgenden grundsätzlichen Anspruch auf Schutz besteht kein Zweifel. Mein seinerzeitiger Vortrag im Basler Ing.- und Arch.-Verein, der Dr. Jäckli Anlass zu seinem eingangs zitierten Aufsatz gab, behandelte die Injektionen unter anderem als Beispiel auch als Baumethode bzw. Bauhilfsmittel zur Wasserhaltung von Baugruben ganz allgemein in grundwasserführenden Böden. Es bestand dabei gar keine Veranlassung, näher auf Probleme einzutreten, die den Rahmen des Vortrages über «*Injektionen*» weit gesprengt hätten.

In grundsätzlicher Hinsicht veranlasst der Aufsatz von Dr. Jäckli den Unterzeichneten, einmal folgendes festzustellen. Es wird im Bauwesen wie in sämtlichen Lebensbereichen immer gebräuchlicher, Forderungen aufzustellen; um denselben mehr Gewicht zu verleihen, werden sie möglichst extrem gehalten. Wie die gestellten Forderungen erfüllt werden können und was für Folgen sie nach sich ziehen, darüber wird nicht nachgedacht. Darüber sollen andere, leider immer häufiger die Betroffenen, nachdenken; an ihnen ist es, die möglichen technischen Lösungen zu finden, um den gestellten Forderungen zu entsprechen. Dies trifft z. B. auch für den von Dr. Jäckli auf der zweiten Spalte oben angedeuteten «Düker» zu. Wie soll er technisch gestaltet werden unter einem Baukörper, ohne dadurch zu unzulässigen Einwirkungen auf das Bauwerk selbst zu führen, z. B. zu schädlichen Setzungsunterschieden? Eine Einteilung unserer nutzbaren Grundwasservorkommen hinsichtlich Menge und Güte und eine Aufteilung in Schutzzonen verschiedener Wertigkeit drängt sich auf (siehe die in Vorbereitung stehenden Richtlinien über Gewässerschutzmassnahmen beim Strassenbau des Eidg. Amtes für Gewässerschutz). Darnach sollten sich von Fall zu Fall die zu stellenden Forderungen richten. Auch auf diesem Gebiete *kommt es auf das Mass an.*

Anschliessend möge noch näher auf die von Dr. Jäckli aufgeführten Funktionen eines Grundwasserleiters eingegangen werden.

Wahrung des Durchflussprofils

Grössere Einbauten im Grundwasser beeinträchtigen nach Auffassung von Dr. Jäckli den Wasserdurchfluss der Menge nach. Diese Feststellung überrascht, sie widerspricht dem fundamentalen Prinzip der Kontinuität. Wird ein Durchflussquerschnitt der Grösse F durch Einbauten auf F' reduziert, so ändert sich am sekundlichen Durchfluss eines Grundwasserstromes gar nichts (Kontinuitätsgesetz). Das von oben zuströmende Wasser wird an der Störstelle leicht gestaut, es strömt aber in dem verengten Querschnitt mit der gleichen Intensität weiter. Was sich ändert, ist die Sickergeschwindigkeit. Sie erhöht sich von v auf $v' = F/F'$. Dank des leichten Aufstaues von einigen Zentimetern je nach dem Einbaugrad und der Geometrie des Einbaues erhöht sich das lokal vorhandene Gefälle und damit nach dem bekannten Gesetze von Darcy die Geschwindigkeit. Der Durchfluss bleibt gewahrt, aber die Filterwirkung (Funktion 3) wird verschlechtert. Wie gross diese Verringerung der Filterwirkung ist und ob sie sich praktisch schädlich auswirken kann, muss in jedem einzelnen konkreten Falle untersucht und beurteilt werden (natürlicher k-Wert, Aufbau des Bodens, Ausmass der in das Grundwasser tauchenden Einbauten und Geometrie derselben).

Schutz des Speichervolumens

Der nicht näher ausgeführte künstliche Kieskoffer mit Dükerwirkung müsse, so wird gefordert, mindestens dem Volumen des Aushubes im Grundwasser entsprechen. Auch hier wird über das Ziel hinausgeschossen. Was gegebenenfalls ersetzt werden müsste, ist der für die Grundwasserströmung wirksame Anteil des Porenvolumens des ausgehobenen Materials. Dieser Anteil ist bekanntlich bedeutend kleiner als das nach der Bodenmechanik definierte Porenvolumen. Auch dafür muss der einzelne Fall untersucht werden. Verallgemeinerungen sind hier wie bei der Beurteilung der oben behandelten Änderung der Sickergeschwindigkeit bzw. der sich daraus ergebenden Änderung in der Filterwirkung fehl am Platze.

Nicht extreme Forderungen helfen uns, die vielfachen Faktoren in Rechnung zu stellen, die bei der Verwirklichung der zahlreichen Bauaufgaben auftreten, sondern nur die möglichst gute Erfassung dieser Faktoren in jedem einzelnen Falle, womit sich sinnvolle, das heisst sämtliche wichtigen Belange gebührend abwägende und berücksichtigende, technisch mögliche und wirtschaftlich vertretbare Lösungen ergeben.

Prof. *G. Schnitter*, ETH

Rückäusserung zu den Bemerkungen von Prof. G. Schnitter

Ich freue mich sehr, dass Prof. Schnitter schon im ersten Satz seiner Bemerkungen den grundsätzlichen *Anspruch auf Schutz des nutzbaren Grundwassers* anerkennt, hatte er doch noch in seinem Aufsatz «Injektionen» die mit Zeichnungen erläuterten Injektions-