

■ BUT AKTUELL

Sanierung der Gründung eines Pylons der Öresundbrücke

Dipl.-Ing. Martin Krentz,
Keller Grundbau GmbH, Bereich Nord,
Fallingbommel (Dorfmark)

Im Sommer 2000 wird die feste Landverbindung zwischen Dänemark und Schweden eröffnet.

Im Zuge der Öresundquerung stellt die Schrägseilbrücke als Fortsetzung der vor Kopenhagen beginnenden Tunnelstrecke und einer künstlichen Insel als Verbindungselement den Anschluß an das schwedische Festland südlich von Malmö dar.

Die insgesamt ca. 7,8 km lange Brücke besteht aus den westlichen und östlichen sogenannten Vorlandbrückenbereichen von je ca. 3,0 bzw. 3,7 km Länge und dem 1092 m langen Hochbrückenteil, der die Schifffahrtsrinne



Westpylon mit schematischer Zeichnung des Unterwasserteils

„Flintrännen“ mit einer freien Durchfahrts Höhe von 57 m überquert.

Die bauausführende Arbeitsgemeinschaft SUNDLINK Contractors setzt sich zusammen aus dem schwedischen Baukonzern Skanska, der deutschen Hochtief AG, den dänischen Unternehmen Højgaard & Schultz und Monberg & Thorsen. Wie bei einem Brückenbauwerk dieser Dimension nicht anders zu erwarten, galt es für SUNDLINK während der 1995 begonnenen Bauphase überraschend auftretende Probleme zu beherrschen.

Dieser Bericht schildert die „Vollendung“ der Westpylongründung, die nach Abschluß der planmäßigen Herstellung zunächst nicht den Qualitätsanforderungen des Bauherrn genügte. Planung und Ausführung der Instandsetzung erfolgte unter der Federführung von SUNDLINK mit Einbindung der sogenannten JVSK, einer als Nachunternehmer beauftragten Joint Venture, die sich aus dem schwedischen Spezialtiefbauunternehmen Stabilator AB und der deutschen Keller Grundbau GmbH zusammensetzte.

Bauwerk

Sowohl die Fundamentkörper zur Gründung der insgesamt 51 Vorlandbrückenpfeiler, als auch die Gründungselemente der beiden Hochbrückenpylone wurden im Nordhafen bzw. im Trockendock einer ehemaligen Werft in Malmö als nach unten geschlossene Caissons aus Spannbeton vorgefertigt. Während sämtliche Bauteile zum Bau der Vorlandbrücken bei einem Einzelgewicht von bis zu 6.500 t mit dem Schwimmkran „Svanen“ zu ihrem endgültigen Bestimmungsort verbracht worden sind, wurde der Transport der ca. 20.000 t wiegenden Pyloncaissons vom Trockendock zur Flintrännen mit einem eigens dafür hergestellten Katamaran vorgenommen.

Zur Vorbereitung des Baugrundes wurde an jedem Pfeiler- und Pylonstandort der den tragfähigen Kalkstein überlagernde Mergel durch Unterwasseraushub abgetragen. Auf der Oberfläche des freigelegten Kalksteins wurden jeweils drei provisorische Einzelfundamente hergestellt, anschließend wurde ein Caisson in die Unterwasserbaugrube eingesetzt. Zur Herstellung des flächigen Kraftschlusses wurde die durch die temporären Einzelfundamente überbrückte Fuge zwischen Kalkstein und Caissonsohle mit pumpfähigem Unterwassermörtel verfüllt.

Bei der Ausführung dieses Arbeitsschrittes am Caisson des Westpylons der Hochbrücke kam es zu Komplikationen, nachdem der Betoniervorgang aufgrund einer überraschenden Wetterverschlechterung zunächst verzögert und später gänzlich unterbrochen werden mußte.

Problemstellung

Im Anschluß an den Betoniervorgang wurde hier der Erfolg der Maßnahme durch den Einsatz von Tauchern kontrolliert. Die Inspektion ergab, daß Teile des Unterwassermörtels unter der Caissonbodenplatte ausgespült und entmischte Zuschlagstoffe an einer Außenecke des Caissons abgelagert worden waren. Es mußte daher davon ausgegangen werden, daß Hohlräume und durch Entmischung des Unterwassermörtels entstandene Sandlagen in der Sohlfuge unterhalb des Caissons verblieben sind. Kernbohrungen, die stichproben-

artig an geeigneten Stellen durch die Caissonbodenplatte hindurch ausgeführt wurden, bestätigten den Verdacht.

Im Verlauf der von SUNDLINK unternommenen Untersuchung des Schadensbildes wurde zur Entwicklung eines Sanierungskonzeptes Kontakt mit Keller Grundbau aufgenommen. Die daraufhin gegründete Joint Venture Stabilator/Keller Grundbau (JVSK) wurde dann beauftragt, gemeinsam mit SUNDLINK während des weiteren Verlaufs der Untersuchung ein Sanierungskonzept zu entwickeln und umzusetzen. Es war außerdem anhand von zwei Großversuchen nachzuweisen, daß das vorgesehene Sanierungskonzept zur Herstellung des flächigen Kraftschlusses zwischen Sohle und Baugrund geeignet war, ohne daß es bei der Umsetzung zur Gefährdung des Caissons z. B. durch Hebungen oder Beschädigung der Spannstähle käme.

Qualitätssicherung

Vor Beginn der Bohr- und Injektionsarbeiten am Caisson wurde gemeinsam von SUNDLINK und JVSK ein Qualitätsplan aufgestellt. Für die wesentlichen Gewerke waren separate Bauablaufbeschreibungen mit Prüfplan, Korrekturmaßnahmenkatalog und Arbeitssicherheitsplan aufzustellen und vom Bauherrn freizugeben. Die Großversuche im Arbeitshafen wurden mit dem gleichen Aufwand dokumentiert.

Untersuchung des Schadensbildes

Die Sohlfuge des Caissons befindet sich ca. 18,5 m unter dem Wasserspiegel. Der Innenraum des in der Grundfläche ca. 30 x 35 m messenden Caissons ist durch Zwischenwände in 42 separate Zellen unterteilt, deren Decke unterhalb der Wasserlinie liegt. Sämtliche Arbeitskräfte und Werkzeuge wurden in Mannkörben mit Hilfe von Winden durch Stahlrohre Ø 850 mm hindurch bis zur ca. 18 m unter dem Wasserspiegel liegenden Oberkante der Sohle in die Caissonzellen herabgelassen. Die Winden waren in transportablen Rahmen auf einer 4 m über dem Wasserspiegel hergestellten Arbeitsplattform fixiert.

Gleichzeitig mit der Ausführung der Sanierungsarbeiten im Innern des

Blick über die Arbeits-Plattform des Westpylons, dahinter der Ostpylon, im Hintergrund die schwedische Küste, der Schwimmkran „Svanen“ beim Einbau des ersten Vorlandbrückenträgers



Pyloncaissons wurden die Betonierarbeiten zur Errichtung der Pylonbeine fortgesetzt. Ziel war es, den Gesamtbauzeitenplan für die Schrägseilbrücke nicht zu gefährden.

Zur Feststellung der Ausdehnung der Störzonen und Hohlräume unterhalb der Caissonbodenplatte wurden insgesamt 465 Kernbohrungen durch die Sohlplatte und die schadhafte Betonfuge bis in den Kalkstein hinein ausgeführt. Zur Beherrschung des aus 18 m WS resultierenden Überdruckes wurden von der JVSK Preventer entwickelt, die sowohl den Einsatz von Kernbohrwerkzeug zuließen als auch den späteren Einbau von speziell angefertigten Endoskopröhren und Verpreßventilröhren. Auf diese Weise konnten die Bohrungen sowohl für die Schadenserkundung als auch für die spätere Injektionsmaßnahme benutzt werden.

Während der späteren Füllinjektionen konnte das aus den Hohlräumen verdrängte Wasser über die Preventer abgelassen werden.

Die Anordnung der Bohransatzpunkte erfolgte in einem geometrischen Raster, das einerseits die kontrollierte Verfüllung von Hohlräumen bei Benutzung dieser Bohrungen zuließ und andererseits so an die Lage der mit geringem Einzelabstand in der Sohlplatte angeordnete Spannstähle angepaßt war, daß Beschädigungen vermieden wurden. Im Mittel betrug der Achsabstand im Dreiecksraster ca. 1,9 x 0,85 m.

SUNDLINK führte geotechnische Bohrungen und zerstörungsfreie Tests nach dem Impuls-Echo-Prinzip auf der Caissonbodenplatte aus, die eine qualitative Aussage über den flächigen Kraftschluß zwischen Sohle und Unterwassermörtel zuließen. Die zerstörungsfreien Tests bestätigten die Ergebnisse der Kernbohrungen und der Endoskopuntersuchungen.

Nach Auswertung aller Untersuchungen konnten verschiedene Bereiche unterhalb der Caissonsohle eingegrenzt werden, in denen der Kraftschluß aufgrund von im Unterwassermörtel verbliebener Hohlräume fehlte. Durch Entmischung des Unterwassermörtels entstandene Sandlagen wurden entgegen ursprünglicher Befürchtung nur in geringem Umfang gefunden.

Durch gezielte Wassereinspeisung mit geringem Überdruck bzw. kurzzeitiges Öffnen der mit Preventern verschlossenen Kernbohrlöcher und gleichzeitige Beobachtung des Sohlwasserdruckes an benachbarten Bohrlöchern, konnte eine Aussage über die hydraulische Verbindung zwischen den Bohrungen getroffen werden.

Dieser sogenannte „Hydraulic Conductivity Test“ wurde bereits mit dem für die spätere Injektion eingesetzten Verpreßcontainer durchgeführt, um eine detaillierte Dokumentation der Druckverläufe zu erhalten.

Großversuche

Parallel zur Ausführung der Erkundungs- bzw. Injektionsbohrungen wurden an einem von SUNDLINK hergestellten Testkasten im Hafen von Limhamn, Malmö, Injektionsversuche ausgeführt. Neben der Festlegung der für das Bauwerk verträglichen Injektionsparameter sollte anhand der Versuche die Eignung des Rastermaßes der Bohransatzpunkte sowie die Zuverlässigkeit der Preventer und der spezialgefertigten Ventilrohre nachgewiesen werden.

Der Betonkasten mit ca. 5x5 m Seitenlänge war mit einer Betonplatte wasserdicht verschlossen. Die Platte entsprach in bezug auf Dicke, Bewehrungsanteil und Spannstahlanordnung dem Design der Bodenplatte des Pyloncaissons und wurde mit Ankern gegen den Kasten gespannt. Durch die druckgeregelte Zu- und Abführung von Wasser wurde die an der Caissonsohle wirkende Beanspruchung der Sohlplatte aus Wasserüberdruck simuliert.

In das Innere des Testkastens wurde Sand mit Mörtellinsen und eingelagerten Hohlräumen eingebaut, wie es der schadensbedingten Situation unterhalb des Caissons entsprach. Die Instrumentierung des Testkastens mit Druckzellen und Wegaufnehmern zeigte den während der Probeinjektion auf die Platte wirkenden resultierenden Druck und evtl. auftretende Veränderungen ihrer Lage.

Das zerstörungsfreie Impuls-Echo-Meßsystem wurde zur Eichung am Testkasten eingesetzt.

Im Anschluß an die Probeinjektion wurde der ca. 50 t schwere Deckel

des Testkastens abgehoben und ein Aufmaß der gefüllten Hohlräume aufgestellt. Spitzendrucksondierungen vor und nach der Injektion dienten als Nachweis für die Verdichtung der im Testfall eingebauten Sandlagen. Durch Zugabe verschiedener Farbstoffe in die frische Bindemittelsuspension konnte im nachhinein die Ausbreitung des Injektionsgutes während der verschiedenen Schritte nachvollzogen werden.

Gerät

Die zur Durchführung der Injektionsarbeiten erforderliche Ausrüstung wurde auf der Arbeitsplattform des Caissons eingerichtet. Eingesetzt wurde ein von Keller Grundbau entwickelter Injektionscontainer mit programmierbarer Pumpensteuerung und digitaler Verpreßdatenregistrierung. Für das Handling des in seawasserdichten BigBags angelieferten Injektionsgutes wurde eine Sackaufreißvorrichtung mit Schneckenförderung zum automatischen Mischer vorgehalten. Das zunächst im Arbeitshafen von Limhamn betriebene Baustellenlabor wurde für die Durchführung der Qualitätssicherung während der Ausführungsphase gemeinsam mit dem Baubüro auf einer neben dem Pylon verankerten Barge aufgebaut.

Hohlrauminjektion mit nachträglicher Verspannung

Die Ausführungsparameter für die Injektionsarbeiten waren so zu wählen, daß die Gefahr einer Hebung oder Verkipfung des Caissons und eine Beschädigung der Caissonbodenplatte ausgeschlossen werden konnte. Das im Bauzustand auf den Baugrund wirkende Gewicht des Caissons nach Abzug der Auftriebskraft betrug lediglich ca. 3.000 t, daher wurde das Bewegungsverhalten des Bauteils während der Injektionsarbeiten mit zehn im Kalkstein verankerten Extensometern und zwei elektronischen Neigungsmessern im Online-Betrieb beobachtet. Beim Überschreiten der festgelegten Schwellenwerte konnte automatisch ein Alarmsignal ausgelöst werden.

Als Grenzkriterien für die Ausführung der Füllinjektion wurde ein maximaler Austrittsdruck von 2 bar am Ventil und eine Verpressung von max. 500 l pro Durchgang festgelegt.

Nach Erreichen des Zieldruckes an allen Verpreßpunkten im Bereich eines abgeschlossenen Hohlraumes wurden sämtliche Ventilrohre in einem weiteren Arbeitsdurchgang beaufschlagt, bis an allen Punkten ein Verpreßdruck von 10 bar erreicht war. Während dieses Injektionsdurchgangs war die Verpreßmenge auf 60 l pro Bohrung begrenzt. Bei Nichterreichen des Zieldruckes wurde der Injektionsschritt nach dem Erstarren der eingebrachten Charge wiederholt.

Am Druckverlauf während der einzelnen Injektionsschritte dieses Durchgangs war erkennbar, daß das im ersten Füllinjektionsdurchgang wenige Tage früher eingebaute Material zum Teil aufgefract und



Anlieferung des Injektionsgutes in seewasserdichten Big Bags mit einer Arbeitsfähre des Auftraggebers Sundlink



Testbox im Arbeitshafen von Limhamn, im Süden von Malmö

gleichzeitig verfüllt worden war. Auf diese Weise wurde eine „Nachverdichtung“ und somit ein sicherer Kraftschluß zwischen Sohlplatte und Baugrund erzielt. Die Protokolle der digitalen Verpreßdatenerfassung dienen als Nachweis für das Erreichen der Zielwerte.

Auf Basis der Erkenntnisse des Hydraulic Conductivity Tests wurden die einzelnen Linsen verfüllt. Dazu wurde jede Bohrung mit einem glattwandigen Ventilrohr mit ein bis fünf Einzelventilen ausgerüstet. Durch gleichzeitige Beaufschlagung mehrerer benachbarter Ventilrohre wurde zunächst am Rand einer Linse eine „Front“ aus Füllmaterial gebildet, die im Anschluß flächig fortschreitend über das Bohrraster ausgedehnt wurde. In den Hohlräumen eingeschlossenes Wasser wurde voreilend durch kontrolliertes Öffnen der noch nicht behandelten Bohrungen entlastet.

Nach Abschluß der Injektionen an allen lokalisierten Störzonen wurde der Erfolg der Maßnahme durch Kernbohrungen und Endoskopuntersuchungen verifiziert. Durch Wiederholung der zerstörungsfreien Tests und Vergleich der Ergebnisse mit dem Ursprungszustand konnte nachgewiesen werden, daß der Kraftschluß in den ehemals gestörten Bereichen nun die Qualitätsanforderungen erfüllte. Abschließend wurden die Bohrlöcher in der Bodenplatte gereinigt und mit Spezialmörtel versiegelt. Basierend auf diesen Kontrollen und der Auswertung sämtlicher



Mitarbeiter der Keller Grundbau GmbH beim Einfahren in den Caisson

gemäß Qualitätsplan erstellter Bohr- und Injektionsprotokolle sowie der Endoskop-Resultate erfolgte die Abnahme der Sanierungsarbeiten durch den Bauherrn.

Mix Design

Die Rezeptur des verwendeten Injektionsgutes wurde von Spezialisten der AZ BUT und der Entwicklungsabteilung der Keller Grundbau GmbH speziell für diesen konkreten Anwendungsfall entwickelt.

Insbesondere erwartete der Bauherr den Nachweis der Seewasser- und Dauerbeständigkeit des Materials. Hier konnte die ANNELIESE BUT auf langjährige Lagerungsversuche für die Anwendung ihrer Dämm®-Produkte in Salzstöcken und diverse gemeinsam mit Keller Grundbau erarbeitete Referenzen zurückgreifen. Ferner war das rheologische Verhalten der frischen Suspension sowie die Entwicklung der Anfangsfestigkeit in Abhängigkeit von jahreszeitlich



*Bohrkern des eingefärbten Injektionsgutes.
Rot: Füllinjektion mit geringem Druck, Gelb und Schwarz: Durch Nachinjektion entstandene Fracs*

bedingten Temperaturschwankungen zu bestimmen. Mit Unterstützung des von SUNDLINK eingesetzten Fachgutachters Dr. Donel wurde eine stabile, feststoffreiche Suspension entwickelt, die bedingt durch ihre pastösen Eigenschaften auch die weitreichende Verfüllung kleinster Linsen ermöglichte.

Gewählt wurde ein im Werk Ennigerloh hergestelltes Fertigprodukt, das speziellen Zement mit besonders auf die Anforderungen abgestimmte Kalk- und Tonkomponenten enthält. Auf der Baustelle wurde das Material zu einer Suspension mit dem W/F-Faktor 1,0 aufbereitet und zusätzlich mit 1% Aktivbentonit stabilisiert.

Eine leicht verzögerte Festigkeitsentwicklung in den ersten Tagen nach Einbau ermöglichte das erneute Aufreißen des Füllkörpers durch wiederholte Beaufschlagung der Verpreßventile bei Aufreißdrücken bis max. 60 bar und Verpreßdrücken bis max. 10 bar.

Vom Schadenseintritt im April 1997 dauerte die gesamte Sanierungsmaßnahme ca. ein Jahr. Die etwa 3,5 Monate dauernde Injektionsmaßnahme am Pylon fiel nach Beendigung der vorlaufenden Untersuchungen, der Großversuche und nach Freigabe der Ausführungsplanung durch den Bauherrn in die Winterperiode 1997/98.

Das international besetzte Projekt zeichnete sich durch ein außergewöhnlich hohes Maß an Vertrauen und partnerschaftlich fairem Umgang zwischen Bauherrn, dem Hauptauftragnehmer SUNDLINK, seinen Nachunternehmern Stabilator und Keller und allen beteiligten Fachgutachtern aus. Diese Voraussetzungen ermöglichten der schwedisch-deutschen Mannschaft trotz der widrigen örtlichen und zeitlichen Randbedingungen ein besonnenes, zielgerichtetes Arbeiten, das ohne Arbeitsunfälle zum technischen Erfolg führte.

Inzwischen kann SUNDLINK auf die erfolgreiche Fertigstellung der gesamten Brückenbaumaßnahme zurückblicken. Die Übergabe des „Jahrhundertbauwerks“ an den Bauherrn erfolgte vier Monate vor dem vertraglich vereinbarten Termin.

Literaturverzeichnis:

- (1) Dipl.-Ing. G. Krummbach, Essen: Der Bau der Öresundbrücke zwischen Dänemark und Schweden, Tiefbau 10-1999
- (2) Dr. Ing. Bernd Steinfeld: Die Gründung der Öresundbrücke – Gesamtübersicht und Sanierung einer Caissongründung, Felsbau 17 (1999)