

# Schiffshebewerk, Drei-Schluchten-Staudamm, China

Sonderdruck aus: **Bautechnik 83 (2006), Heft 2** | **Bautechnik 93 (2016), Heft 12**  
**Steel Construction 2 (2009), Heft 2**



## AUTOREN

Jan Akkermann  
Dorothea Krebs  
Thomas Runte  
Gerhard Strack  
Xiaoyun Wu

[www.kuk.de](http://www.kuk.de)

**AUSZEICHNUNG 2017**  
ULRICH FINSTERWALDER  
**INGENIEURBAUPREIS**





Luftbild des Drei-Schluchten-Staudamms  
(Foto: China Three Gorges Corporation)



# Inhalt **Sonderdruck**

© Foto: China Three Gorges Corporation

Jan Akkermann  
**Vorwort – Zum Projekt**

- Dorothea Krebs, Thomas Runte, Gerhard Strack  
**1 Planung für das Schiffshebewerk am  
Drei-Schluchten-Staudamm in China**  
(Nachdruck aus „Bautechnik“ 83 (2006), Heft 2, Seite 73 – 84)
- Jan Akkermann, Xiaoyun Wu  
**13 Das Schiffshebewerk am  
Drei-Schluchten-Staudamm, China –  
Bau des größten Fahrstuhls der Welt**  
(Nachdruck aus „Bautechnik“ 93 (2016), Heft 12, S. 899 – 906)
- Jan Akkermann, Thomas Runte, Dorothea Krebs  
**21 Ship lift at Three Gorges Dam, China –  
design of steel structures**  
(Nachdruck aus „Steel Construction“ 2 (2009), No. 2, p. 61 – 71)

**Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

© Wilhelm Ernst & Sohn – Verlag  
für Architektur und technische  
Wissenschaften GmbH & Co. KG  
Rotherstraße 21  
10245 Berlin

info@ernst-und-sohn.de  
www.ernst-und-sohn.de

## Vorwort – Zum Projekt

Der 1992 begonnene Bau des Drei-Schluchten-Staudamms am Jangtse in Zentralchina ist ein Jahrhundertprojekt. Die gut 2,3 km lange Schwergewichtsmauer reguliert ein hydraulisches Einzugsgebiet von über einer Million km<sup>2</sup>. Neben der Hochwasserkontrolle am Jangtse dient der Damm mit seinen integrierten Kraftwerken mit einer installierten Leistung von 22.500 MW vor allem der Energiegewinnung.

Mit dem am 18. September 2016 in den Probebetrieb gestarteten Schiffshebewerk wurde der letzte Baustein des Staudammprojekts in Sandouping fertiggestellt. Das Ingenieurbauwerk ist eine Struktur der Superlative: Mit einer Hubhöhe von bis zu 113 m und einer Schiffsverdrängung von bis zu 3.000 t ist es das weltweit Größte seiner Art. Durch das Hebewerk wird die Querung des Staudamms für die Schifffahrt auf dem Jangtse, einer der meist befahrenen Wasserstraßen der Welt, von zuvor 3,5 h in der fünfstufigen Schleuse auf jetzt 40 min verkürzt.

Bereits 1999 war KREBS+KIEFER Mitglied der mit einer Machbarkeitsstudie beauftragten Planungsgruppe unter der Federführung der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). 2004 entstand hieraus der Planungsauftrag für die Entwurfs- und Ausschreibungsplanung des kompletten Schiffshebewerks inklusive aller Ausrüstungselemente an ein Joint Venture aus KREBS+KIEFER International und Lahmeyer International. Zusammen mit dem Auftraggeber und Bauherrn, China Three Gorges Corporation (CTG), entstand im integralen Planungsprozess ein Bauwerk, das zugleich eine Maschine darstellt.

KREBS+KIEFER bringt Ihnen in diesem Sonderdruck dieses außergewöhnliche Bauwerk mit seinen technischen Besonderheiten näher.

In neun „Design Liaison Meetings“ – intensiven, zum Teil mehrwöchigen Workshops – wurden zwischen 2004 und 2010 von deutschen und chinesischen Ingenieuren gemeinsam vielfältige Lösungen erarbeitet.

Die Experten von KREBS+KIEFER Ingenieure verantworteten hierbei die Tragwerksplanung, eine aufgrund der Anforderungen aus Erdbeben, klimatischen Randbedingungen und Bauprozess komplexe Aufgabe. Die zu KREBS+KIEFER gehörende IRS Stahlwasserbau Consulting AG war zudem direkt mit der Planung von Stahlwasserbaukomponenten betraut.

Dank der intensiven und vertrauensvollen Zusammenarbeit aller an der Planung Beteiligten untereinander und mit dem Bauherrn CTG konnte eine Lösung entwickelt werden, die für parallel und nachfolgend entstehende Schiffshebewerke Beispielcharakter hat.

Insbesondere auch durch die Organisation der fachgerechten Ausführungsplanung und Realisierung von 2008 bis 2015 mittels chinesischer Baufirmen durch den Bauherrn CTG – KREBS+KIEFER konnte diesen Prozess beratend begleiten – gelang es, ein technisch ausgereiftes und funktionstüchtiges Bauwerk zu erstellen.

Die Auszeichnung des Projektes im Rahmen des Ingenieurbaupreises 2017 freut und bestätigt uns und alle Beteiligten, bei denen KREBS+KIEFER sich für die exzellente Zusammenarbeit bedankt, in unserer gemeinsamen Leistungsfähigkeit.

Prof. Dr.-Ing. *Jan Akkermann*  
Geschäftsführer  
KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH

# Planung für das Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China

Zur Beförderung von Passagierschiffen am Drei-Schluchten-Staudamm am Yangtze ist in der Nähe der Stadt Yichang ein Senkrecht-Schiffshebewerk nach dem Gegengewichtsprinzip vorgesehen, das derzeit durch die China Yangtze Three Gorges Project Corporation, Bauherr und Betreiber des Drei-Schluchten-Staudamms, geplant wird. Mit der Ausschreibungsplanung ist die „German Design Group“, ein deutsches Joint Venture, bestehend aus Krebs und Kiefer International und Lahmeyer International, beauftragt. Berater des Bauherrn im Sinne eines „Panel of Experts“ ist die Bundesanstalt für Wasserbau.

*Design of the ship lift at the Three Gorges Dam in China. A vertical ship lift based on the counterweight principle is to be built to allow passenger ships passing the Three Gorges Dam at the Yangtze River near Yichang. This project is realized by the China Yangtze Three Gorges Project Corporation, building and operating company of the Three Gorges Dam. The German joint venture, „German Design Group“, incorporating the two companies Krebs and Kiefer International and Lahmeyer International has been entrusted with the general layout, intermediate and final design. As part of the „Panel of Experts“ the German Bundesanstalt für Wasserbau (Federal Waterways Engineering and Research Institute) provides consulting support to the building company.*

## 1 Einleitung

Mit der Gesamtbaumaßnahme des Drei-Schluchten-Staudamms am Yangtze verfolgt China die Ziele der Erzeugung elektrischer Energie, des Hochwasserschutzes dicht besiedelter Gebiete sowie der Erleichterung der Schifffahrt.

Der Staudamm ist ein Beton-Schwergewichtsdamm mit einer Dammlänge von 2310 m und einer Höhe von ca. 180 m. Die Staulänge beträgt ca. 660 km, so daß eine Flutspeicher-Kapazität von 22,15 Mrd. m<sup>3</sup> vorhanden sein wird. Das Kraftwerk wird mit 26 Francis-Turbinen mit je 700 MW installierter Leistung jährlich ca. 85 TWh Strom erzeugen. Für die Schifffahrt stehen zur Überwindung von 113 m Hubhöhe eine zweizügige, aus fünf Schleusenammern bestehende Schleusentreppe mit Nutzabmessungen von jeweils 280 m Länge, 34 m Breite und 5 m Wassertiefe, sowie künftig ein Senkrecht-Schiffshebewerk nach dem Gegengewichtsprinzip zur Verfügung (Bild 1).

Der Bau des Dammes ermöglicht die Schifffbarkeit des Yangtze, dem längsten Fluß Asiens, auf 660 km Länge von Yichang bis Chongqing für Schiffe bis 10000 BRT (Bilder 2 und 3).

Nach Fertigstellung der Gesamtbaumaßnahme werden Güterschiffe über die Fünf-Kammer-Schleuse (bereits im Betrieb) mit einer Schleusenzeit von ca. 3 Stunden geleitet (Bild 4). Die Personenschifffahrt wird mit einer weit aus kürzeren Fahrzeit von gut einer Stunde (die reine Hubzeit beträgt max. 21 min. bei einer Hubgeschwindigkeit von 0,2 m/s) über das Schiffshebewerk transportiert.

Das Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Projekt wird bauliche Besonderheiten aufweisen, die sich von allen bisher bekannten Schiffshebewerken deutlich unterscheiden [1] (s. auch Tabelle 1):

- Die maximale Hubhöhe von 113 m ist etwa dreimal so groß wie die von deutschen Schiffshebewerken.

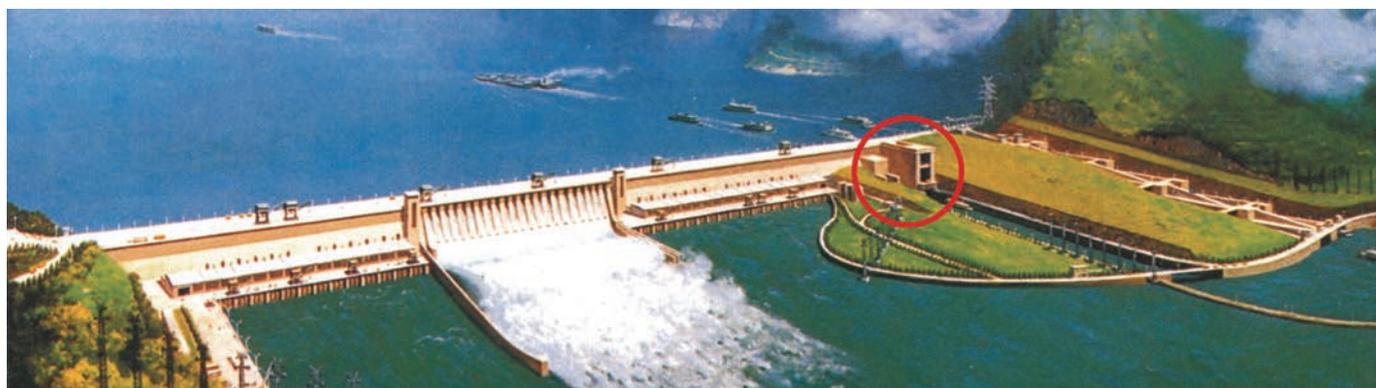


Bild 1. Visualisierung der Gesamtbaumaßnahme mit Kennzeichnung des geplanten Schiffshebewerks  
Fig. 1. Visualisation of the overall project with marking of the planned ship lift

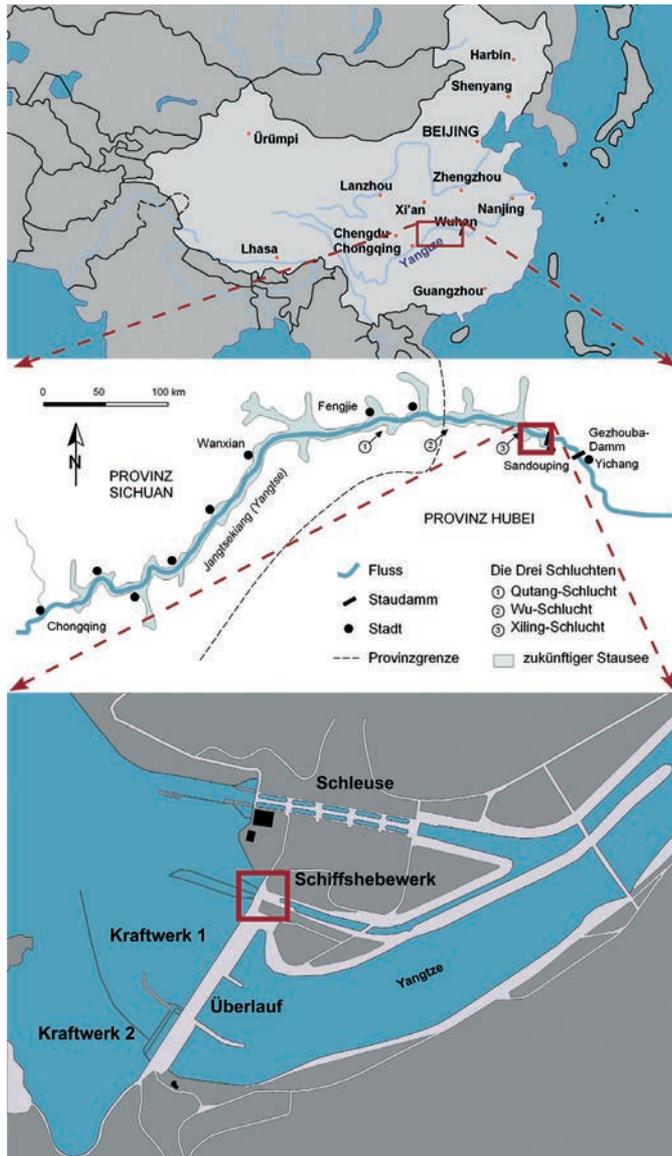


Bild 2. Geographische Lage des Schiffshebwerks am Drei-Schluchten-Staudamm am Yangtze  
 Fig. 2. Geographical location of the ship lift at the Three-Gorges-Dam at the river Yangtze



Bild 3. Kreuzschiffahrt auf dem Yangtze  
 Fig. 3. Cruising on the river Yangtze

- Die Trogabmessungen und dadurch die mit Gegengewichten zu bewegenden Massen (34000 t) sind größer als bei bisher ausgeführten Anlagen.
- Als Teil einer riesigen Stauanlage mit Kraftwerken, Hochwasserentlastung und zwei Schleusentreppen ist im Unter-



Bild 4. Obere Schleusenzufahrt mit Sicht in die Schleusenkammern der Doppelschleuse  
 Fig. 4. Upper lock access with view into the lock chamber of the double lock

- wasser mit kurzfristigen, betrieblichen Wasserspiegelschwankungen von bis zu 50 cm in der Stunde zu rechnen.
- Hydrologisch bedingte Wasserspiegelschwankungen von 30 m im Oberwasser und 11,8 m im Unterwasser bedingen besondere bauliche Maßnahmen an der oberen und unteren Haltung.
- Vorrangig für die Passagierschiffahrt bestimmt, ist für das Objekt ein besonders hoher Sicherheitsstandard erforderlich.

## 2 Projektanbahnung

Deutschland hat im Bau und Betrieb von Senkrecht-Schiffshebwerken langjährige Erfahrungen [4]. Ausgehend vom ersten, urkundlich erwähnten Senkrecht-Schiffshebwerk an der Freiburger Mulde bei Halsbrücke in Sachsen, das zum Zwecke der Erzbeförderung das Heben und Senken von Schiffen mit den Abmessungen 18 m × 2 m im Trockenverfahren über eine Hubhöhe von 8 m ermöglichte, sind noch heute vier Senkrecht-Schiffshebwerke mit Hubhöhen zwischen 13 m und 38 m in Betrieb. Ein neues, zweites Schiffshebwerk Niederfinow, an der Havel-Oder-Wasserstraße bei Eberswalde, ist derzeit mit einer Hubhöhe von 36 m durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung in der Ausschreibungsplanung. Es ergänzt ein vorhandenes Schiffshebwerk, das 1936 gebaut wurde und sich durch seinen robusten Betrieb bis heute auszeichnet. Die Trogabmessungen des neuen Schiffshebwerks Niederfinow sind für den modernen Schiffsverkehr konzipiert. Die Tragkonstruktion ist eine Stahlbetonkonstruktion, während das vorhandene Hebewerk ein Haupttragwerk aus Stahl hat. Bauherr und Planer ist das Wasserstraßen-Neubauamt Berlin.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, unterstützte diese Planung durch Beratungen, insbesondere bei der Auswahl des Sicherungs- und Antriebssystems für den Trog des Hebewerks. Diese Planungen waren auch dem Bauherrn und Betreiber des Drei-Schluchten-Staudamms, der China Three Gorges Project Corporation (CTGPC), bekannt geworden. CTGPC beauftragte Ende 1999 die BAW, mit der Ausarbeitung einer

Machbarkeitsstudie [2] für ein Antriebs- und Sicherungssystem des geplanten chinesischen Schiffshebewerks [3]. Die Machbarkeitsstudie untersuchte ferner Trog, Stahlwasserbau und hydraulische Systeme sowie die Auslegung auf Erdbeben. An der Machbarkeitsstudie waren unter Leitung der BAW bereits mehrere Ingenieur-Gesellschaften beteiligt, die auch bei Vorplanungen für das neue Schiffshebewerk Niederfinow mitwirkten (Krebs und Kiefer, Germanischer Lloyd Spezialbau Engineering GmbH).

Auf der Grundlage der Bewertung von Antrieben bestehender Schiffshebewerke in Deutschland und im Ausland, z. B. Seilwindenantrieb (SHW Strépy Thieu), Zahnstange-Ritzel (SHW Lüneburg), Mutter mit angetriebener Spindel (SHW Henrichenburg), Spindel mit angetriebener Mutter (SHW Rothensee) und Triebstock-Ritzel (SHW Niederfinow alt), wurde als Vorzugsvariante für das neue Drei-Schluchten-Schiffshebewerk der Ritzelantrieb ausgewählt. Die Bewertung der jeweiligen Sicherungssysteme, die eng mit dem Antrieb verbunden sind, z. B. Trommelbremse (SHW Strépy Thieu), Mutterbackensäule (SHW Niederfinow alt, SHW Lüneburg) und Sicherungsmutter auf Spindel (SHW Henrichenburg, SHW Rothensee), favorisierte die Mutterbackensäule als zuverlässigstes Sicherungssystem [3]. Beide Prinzipien haben eine Parallelität zum neu geplanten Schiffshebewerk Niederfinow.

Der Ritzelantrieb zeichnet sich durch seine große Robustheit aus. Besondere Bedeutung hat die Trogsicherung. Sie verhindert in jeder Höhenlage durch ein sicheres Arretieren des Trogs am Massivbau das Entstehen unberechenbarer Betriebszustände, die als Folge von Havarien auftreten können. Havarielasten treten z. B. bei einer unvorhergesehenen völligen oder teilweisen Entleerung des Troges auf. Solche Wasserverluste sind meistens auf größere Undichtigkeiten der Trogverschlüsse oder auf Beschädigungen des Trogs zurückzuführen. Bemessungsrelevant ist typischerweise der Auftrieb des Troges in unterer Position im Fall einer, z. B. durch ein außergewöhnliches Hochwasser, mit Wasser gefüllten Trogwanne. In den Schiffshebewerken Lüneburg und Niederfinow haben bisher die Trogsicherungen bei diesen seltenen Lastfällen störungsfrei funktioniert.

Nach intensiver Prüfung der Studie entschied sich CTGPC für die in der Machbarkeitsstudie vorgeschlagenen Lösungen. Nachdem mittlerweile weitere Ingenieurbüros in den nächsten Planungsphasen für das Schiffshebewerk Niederfinow eingebunden waren und sind, sollte auf Wunsch von CTGPC das gesamte deutsche Ingenieur-Know-how für Schiffshebewerke bei der Ausschreibungsplanung der chinesischen Anlage gebündelt werden (Bild 5).

Hierzu haben sich die beiden Ingenieurunternehmen Krebs und Kiefer International und Lahmeyer International zu einem projektbezogenen Joint Venture, mit Namen „German Design Group“, zusammengeschlossen. Im Unterauftrag wurden für die Bereiche Maschinenbau sowie Elektro- und Steuerungstechnik Fachplaner eingebunden. Weiterhin wurde beratend der Germanische Lloyd für die Themen Sicherheit und Betrieb in das Joint Venture einbezogen.

Als Berater des Bauherrn im Sinne eines „Panel of Experts“ wirkt die Abteilung Bautechnik der BAW.

### 3 Projektbearbeitung im Joint Venture

Die Vertragsverhandlungen zwischen dem Joint Venture und dem chinesischen Bauherrn CTGPC konnten im April 2004 zu einem erfolgreichen Abschluß geführt werden (Bild 5). Gegenstand des Ingenieurvertrags, der auf dem FIDIC-Vertragsmuster basiert, ist die Erstellung einer ausschreibungsreifen Planung in englischer Sprache. Diese Planung soll zum Frühjahr 2006 vorliegen.

Die Planung ist in vier Leistungsphasen strukturiert:

- Phase A: Einarbeitung in das Projekt und Erarbeitung von Entwurfsgrundsätzen
- Phase B: Vorplanung
- Phase C: Entwurfsplanung
- Phase D: Ausschreibungsplanung

In Zusammenarbeit mit CTGPC wurden Entwurfsgrundsätze in der „Guideline for Design“ [5] zusammengefaßt. Diese regelt projektspezifische Vorschriften, Einwirkungen und Werkstoffe.

Die in Phase D erstellten Pläne und Spezifikationen versetzen die im Bieterwettbewerb erfolgreichen Firmen in die Lage, die Werkplanung und dann die Bauausführung durchzuführen. Bemessung und Konstruktion sollen in der Regel nach aktuellen deutschen Normen erfolgen.

Die chinesische Seite führt nach Abschluß jeder Planungsphase ein „review“ durch, in dem die Planungsergebnisse überprüft und als Grundlage für die nächste Planungsstufe freigegeben werden.

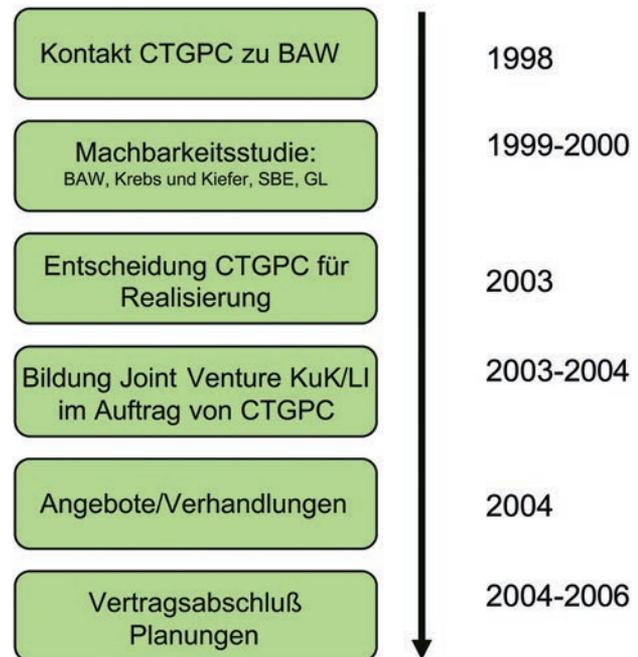


Bild 5. Projektanbahnung  
Fig. 5. Initiation of project

### 4 Massivbau

Die Tragkonstruktion des Schiffshebewerks wird in Stahlbeton ausgeführt. Die Gesamtabmessungen betragen 119 m in der Länge und 169 m in der Höhe. Die Breite beträgt 57,8 m (Bilder 6 und 7).

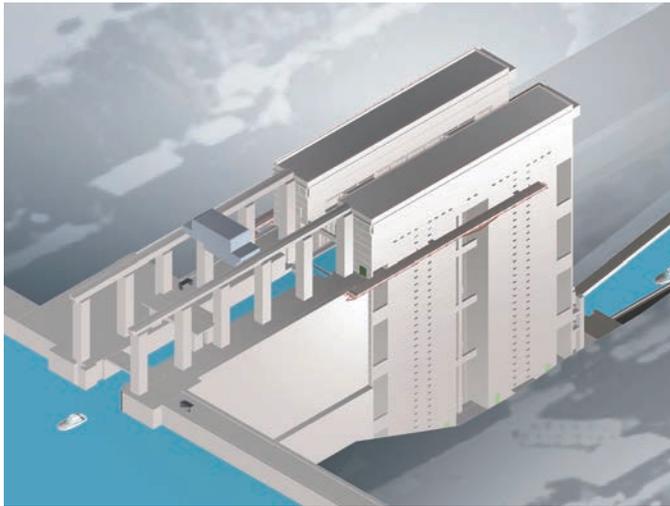


Bild 6. Isometrie  
Fig. 6. Isometry

Der Personenschiffsverkehr wird inmitten der Stahlbetonkonstruktion senkrecht abgewickelt. Durch die Auflösung der längsverlaufenden riesigen Wandscheiben wurde versucht, eine maximal mögliche natürliche Belichtung und Belüftung, gerade auch im Brandfall, zu ermöglichen.

Längs des Trogs wird beidseitig je ein Turmpaar errichtet. Die Türme eines Paares stehen in einem lichten Abstand von 20 m. Die Türme werden am Kopf von einer 21 m hohen Seilscheibenhalle als Stahlkonstruktion überspannt (Bild 8) und sind zusätzlich mit über die Höhe ver-

teilten Riegeln miteinander verbunden. In Querrichtung sind die Türme am Kopf durch die Besucherplattform und den Bedienstand gekoppelt (Bild 9).

Der Trog ist über Seile, die über Seilrollen geführt werden, mit den Gegengewichten verbunden. Beidseitig des Troges sind je acht Gegengewichtspakete angeordnet, die jeweils in einem Betonschacht bzw. längs neben den Türmen geführt werden (Bild 10). Ein Stahlbetonschacht hat Abmessungen von ca. 10 m auf 16 m, die Stahlbetontürme sind 40 m lang und 16 m breit. Der Querschnitt der Türme setzt sich aus zwei seitlichen Schächten und einem etwas zurückgesetzten Bereich, in dem der Aufzug und das Treppenhaus untergebracht sind, zusammen. In diesem Bereich werden auch die Zahnstange für den Antrieb und die Mutterbackensäule für die Trogsicherung eingebaut (Bild 14).

Am Übergang zum Ober- und Unterwasser stehen in Querrichtung jeweils einzelne Wandscheiben, die über Riegel und die Deckenscheibe der Seilscheibenhalle ausgesteift sind. Zwischen den jeweiligen Turmpaaren ist eine weitere Wandscheibe angeordnet (Bild 10). Diese Wandscheiben sind als Auflager für den Seilscheibenträger erforderlich und dienen zusätzlich zur Führung der Gegengewichte.

Die Lasten aus dem Trog und den Gegengewichten – in der Summe ca. 320 MN – werden über die Seilscheibenträger am Kopf des Bauwerks in die Konstruktion eingeleitet (Bild 8). Der Seilscheibenträger spannt von Querwand zu Querwand und übernimmt die Last eines Gegengewichtspakets mit anteiligem Troggewicht. In jedem Feld des Seilscheibenträgers werden acht Doppelseilscheiben mit einem

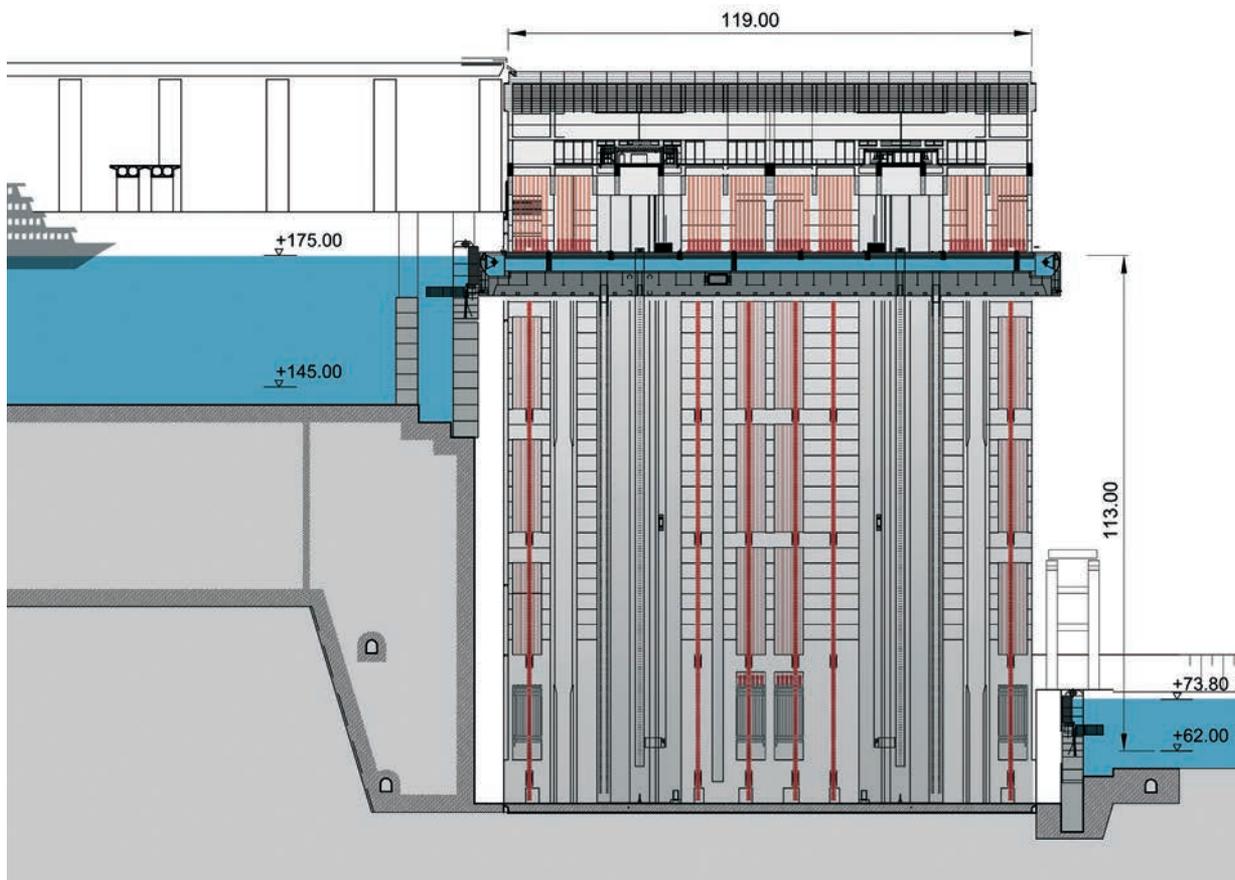


Bild 7. Längsschnitt in Trogmittle mit oberer und unterer Haltung  
Fig. 7. Longitudinal section through the middle of the ship camber with upper and lower bay

Durchmesser von 5 m aufgelagert. Die Seilscheiben werden durch die Seilscheibenhallen vor äußeren Umwelteinflüssen geschützt. In den Hallen ist je ein Kran mit einer Traglast von 65 t installiert, um Wartungsarbeiten ausführen zu können.

Die tragenden Wände der Stahlbetonkonstruktion haben zumeist eine Dicke von 1 m. In Bereichen mit konzentrierter Lasteinleitung sind die Wände verstärkt.

Die Betonkonstruktion ist für eine Lebensdauer von 100 Jahren ausgelegt. Die Standardbereiche werden mit der chi-

Tabelle 1. Anforderungsprofil Schiffshebewerk  
Table 1. Ship lift specifications

Max. Bauwerksabmessungen (L/B/H)	119,0 m/57,8 m/169,0 m
Max. Trogabmessungen (L/B/H)	132,0 m/23,0 m/11,5 m
Max./min. Hubhöhe	113,0 m/71,2 m
Max. Wasserstandsunterschiede	Oberwasser 30,0 m Unterwasser 11,80 m
Max. Wasserstandsschwankungen	0,5 m/h
Nutzlänge/-breite/-höhe	120,0 m/18,0 m/18,0 m
Max. Tragfähigkeit	3000 t
Gesamttroggewicht Bewegte Masse	16000 t 34000 t
Fahrtzeit (ohne Ein- und Ausfahrt) Betriebsfahrten/Tag	21 min (für max. Hubhöhe) 18 Auf- und Ab- fahrten/Tag

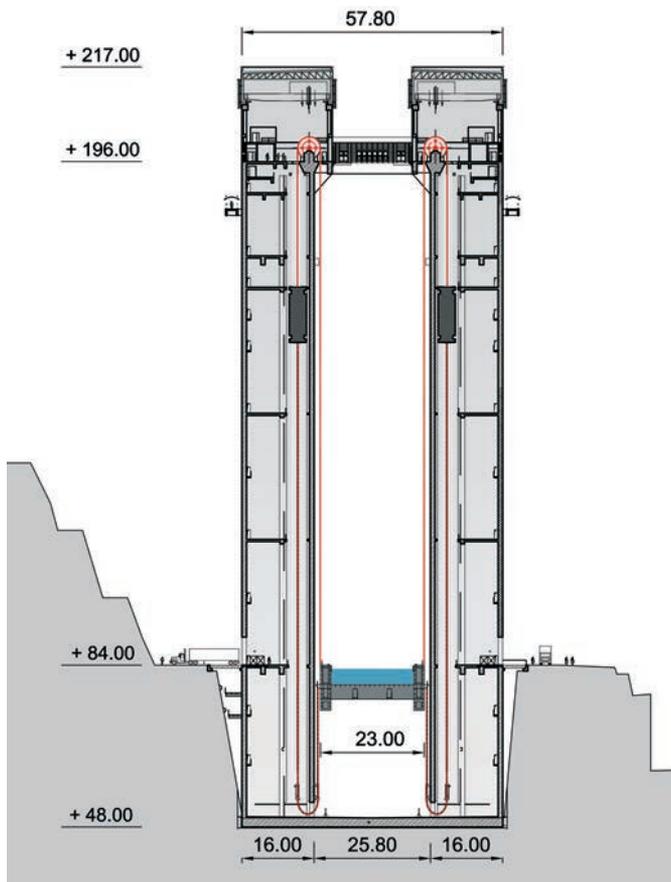


Bild 8. Querschnitt mit Trog in Wartungsposition  
Fig. 8. Cross section – ship chamber in maintenance position

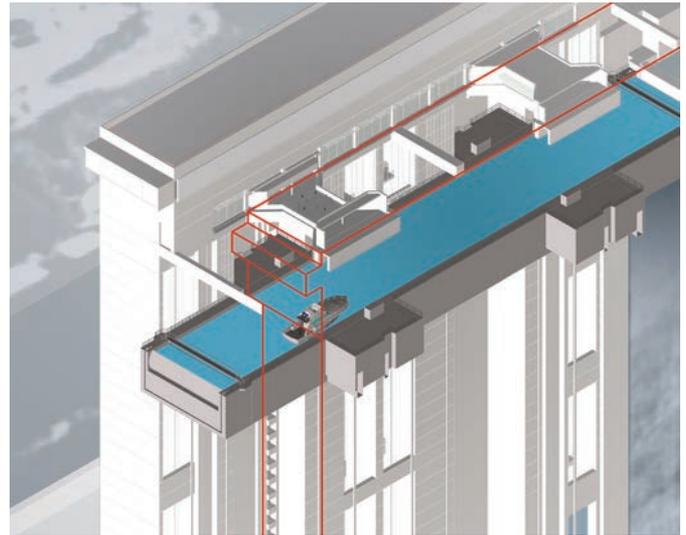


Bild 9. Isometrie, vorderer Turm nur in seinen Umrissen dargestellt

Fig. 9. Isometry, only one half of the solid construction is shown)

nesischen Betongüte C 30 ausgeführt, die einem C 25/30 entspricht. In hochbelasteten Bereichen wird ein C 35 eingebaut, der weitestgehend einem C 30/37 entspricht. Die Standardbereiche werden mit dem chinesischen Bewehrungsstahl HRB 335 ( $f_{yk} = 335 \text{ N/mm}^2$ ) ausgeführt. In hochbelasteten Bereichen kommt ein HRB 400 ( $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$ ) zum Einsatz.

Die Gründung der Stahlbetontürme erfolgt in einer ca. 36 m tiefen Baugrube. Hier steht Fels (Granit) mit einer Steifigkeit von  $30000 \text{ MN/m}^2$  an. Die berechneten Setzungen unter der Gesamtlast der Konstruktion betragen nur wenige Millimeter. Die Berechnung der Gründung erfolgt mit einem Halbraum-Modell.

## 5 Stahlbau

Der 132 m lange und 23 m breite Stahltrog wird als selbsttragende Konstruktion ausgeführt. Der Trog wird pro Seite an 128 Seilen kontinuierlich (16 Seile pro Gegengewichtspaket) aufgehängt (Bild 11). Hierüber ist eine sehr gleichmäßige Lasteinleitung in den Trog gewährleistet. Lediglich am Trogende und im Bereich der Maschinenräume können aus konstruktiven Gründen keine Seile angeordnet werden. Der Trog ist für eine Wassertiefe von 3,5 m ausgelegt und hat einen Freibord von 80 cm. Die lichte Weite zwischen den Fendern beträgt 18 m. Die nutzbare Länge zwischen den Stoßschutzeinrichtungen vor den Toren beträgt 120 m.

Der Trog ist neben den Passagierschiffen mit Abmessungen von 84,5 m Länge, 17,2 m Breite und einem Tiefgang von 2,65 m auch auf Schubverbände mit 109,4 m Länge, 14 m Breite und einem Tiefgang von 2,78 m ausgelegt. Das Passagierschiff hat eine Wasserverdrängung von 3000 t.

Für die Bemessung des Trogs sind neben der DIN 19704 Stahlwasserbau auch die DIN 18800 und die „Guideline for Design“ [5] maßgebend.

Die Trogkonstruktion wird als orthotrope Platte ausgebildet. Für die Längssteifen unter dem Trogboden kommen offene Profile zum Einsatz, um den Auftrieb, der im Kata-

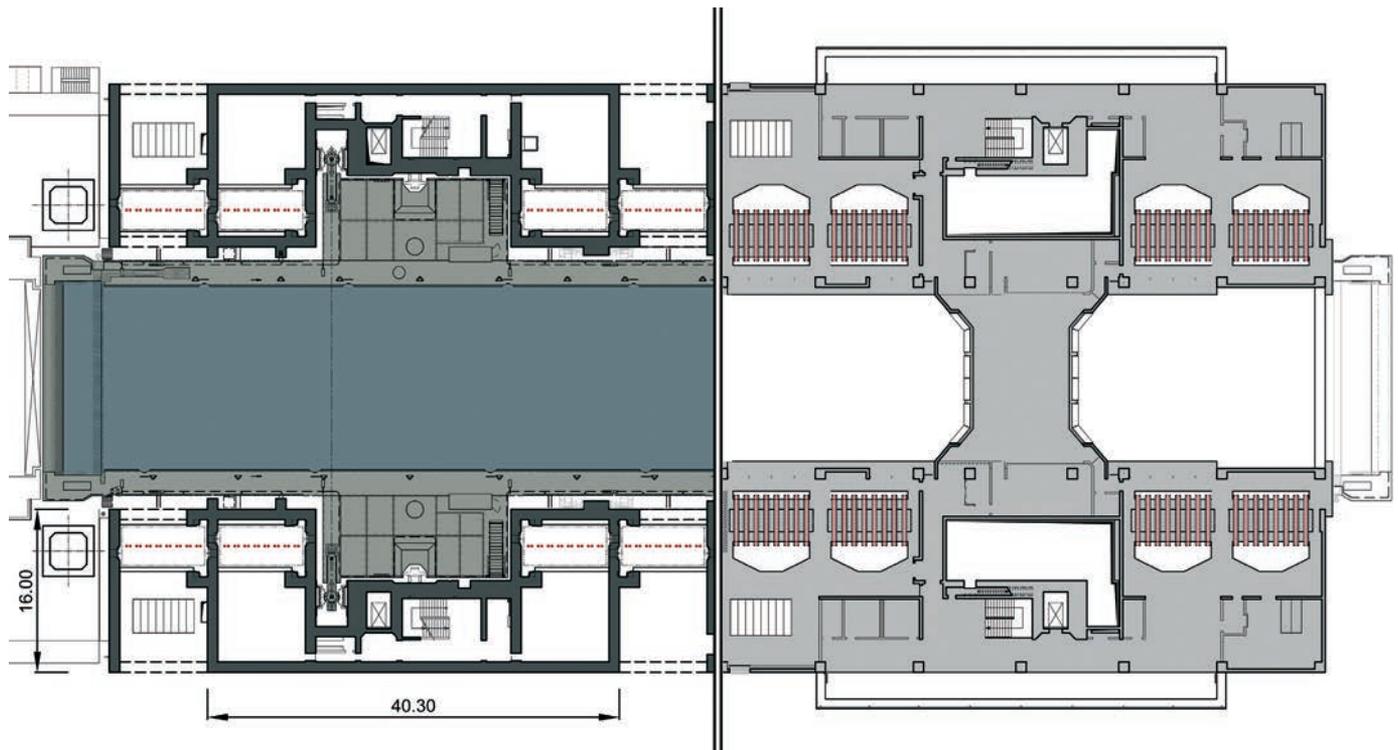


Bild 10. Grundriß Schnitt auf zwei Höhen: Links – Regelschnitt, rechts – Höhe der Besucherplattform  
 Fig. 10. Plan view section of two levels: left – regular section, right – level of the visitor platform

stropfenlastfall einer wassergefüllten Trogwanne entsteht, nicht zu erhöhen. Die Hauptträger werden als 10 m hohe und 2,3 m breite, dreizellige Hohlkästen ausgeführt. Durch die Wahl dieser sehr steifen Hauptträger ist gewährleistet, daß die Gesamtkonstruktion eine ausreichende Steifigkeit besitzt, um die Funktionstüchtigkeit des Troges in allen Betriebssituationen sicherzustellen. Die Hohlkästen weisen seitliche Öffnungen auf, um eine ausreichende Belüftung sicherzustellen und das Auftriebsvolumen zu reduzieren. Die Stahlkonstruktion wird in der chinesischen Stahlgüte Q 345 ausgeführt, die dem deutschen Stahl S 355 sehr ähnlich ist. Die mechanischen Kennwerte werden auch bei chinesischem Stahl in Abhängigkeit von den Blechdicken gegenüber dem Nennwert reduziert.

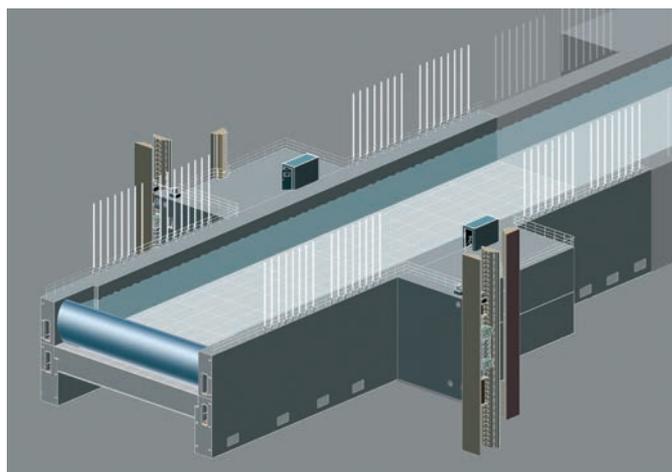


Bild 11. Trogisometrie, dargestellt ist der halbe Trog  
 Fig. 11. Isometry of ship chamber, only half of the ship chamber is shown

Die Seile verbinden Trog und Gegengewichte miteinander. Ein Gegengewicht baut sich aus 16 Einzelgewichten zusammen. Jedes am Trog angeschlagene Seil wird über die Seilscheiben umgelenkt und mit einem Einzelgegengewicht verbunden. Durch diese Art des Lastanschlags ist sichergestellt, daß alle Seile gleichmäßig belastet werden. Die 16 Einzelgewichte pro Schacht werden über einen Fangrahmen zu einem Paket zusammengebaut. Durch diesen Fangrahmen ist gewährleistet, daß bei einem Seilriß der Absturz eines Einzelgewichts verhindert wird. Die Seile haben eine Nennfestigkeit von 1960 N/mm<sup>2</sup> und werden mit einem Durchmesser von 74 mm ausgeführt.

In den Viertelpunkten des Troges sind auf beiden Längsseiten die Maschinenräume angeordnet, die in die Betontürme eingreifen (Bild 11). In den Maschinenräumen sind sowohl der Trogantrieb als auch die Trogsicherung angeordnet (Bild 12). In der Ebene unter den Antrieben werden in wasserdichten Räumen die Elektroinstallation und die Steuerung untergebracht.

Als Trogabschluß wird ein Segmenttor (Bild 13) verwendet. Das Torsegment hat einen Radius von 3,1 m und ist seitlich in den Hauptträgern gelagert. In geöffneter Stellung verschwindet das Tor in der Tornische am Trogende und schließt bündig mit dem Trogboden ab. Für Revisionszwecke kann das Tor in eine Überkopf-Stellung gefahren werden.

Die Stahlkonstruktion ist auf eine Lebensdauer von 70 Jahren ausgelegt. Die Maschinenbau-Komponenten sind für eine Lebensdauer von 35 Jahren konzipiert. Für die Betriebsfestigkeitsuntersuchungen wird von 335 Betriebstagen pro Jahr und 22 Stunden pro Tag ausgegangen. Im Schnitt sind 18 Kreuzschleusungen (je eine Berg- und Talfahrt) pro Tag geplant.

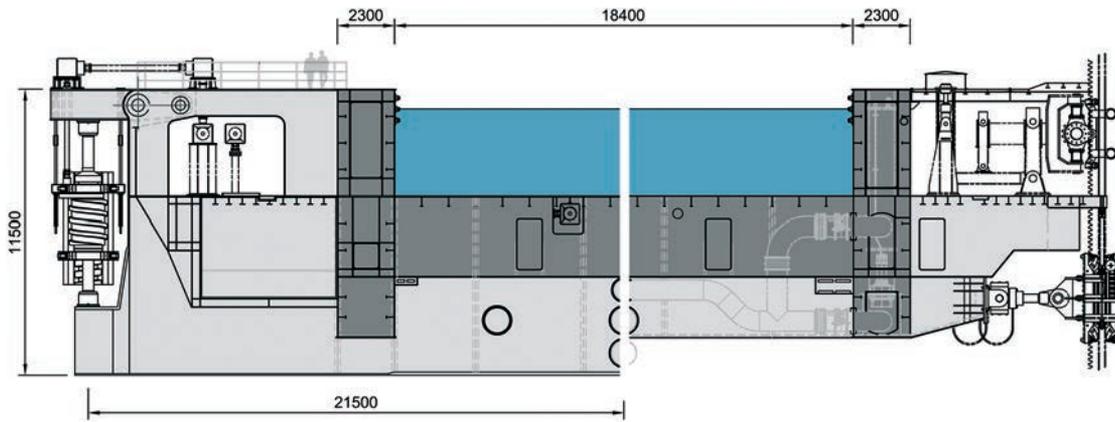


Bild 12. Querschnitt durch den Trog: Links – Trogsicherung, rechts – Antrieb und Querführung  
 Fig. 12. Cross section through ship chamber: Left – safety mechanism, right – drive and transverse guiding

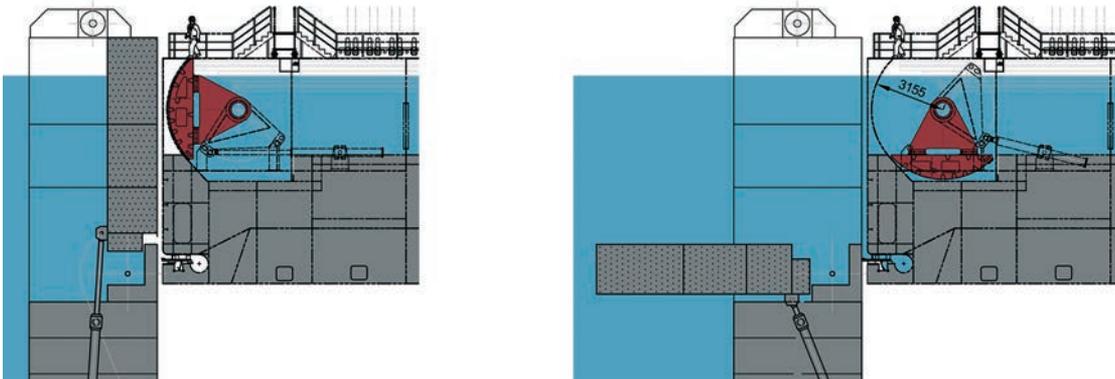


Bild 13. Trogtor in geschlossener und offener Position  
 Fig. 13. Chamber gate – closed and open

## 6 Führungsmechanismen

Das Schiffshebewerk ist neben den Betriebslasten auch Katastrophenlasten wie z. B. Erdbeben ausgesetzt. Dies bedingt ein gezieltes Längs- und Querführen des Trogs über die gesamte Hubhöhe von ca. 113 m. Somit kann einerseits ein kontrolliertes Fahren des Trogs unter Nor-

malbelastung (Betrieb) und andererseits eine gezielte Lastabnahme bei Katastrophenlasten sichergestellt werden. Ein freies Schwingen des Trogs ist nicht möglich (Bild 14).

Die aus dem Betrieb resultierenden Kräfte (z. B. aus Wind) sind relativ gering. Im Fall des Bemessungserdbebens müssen die Konstruktionen in der Lage sein, die

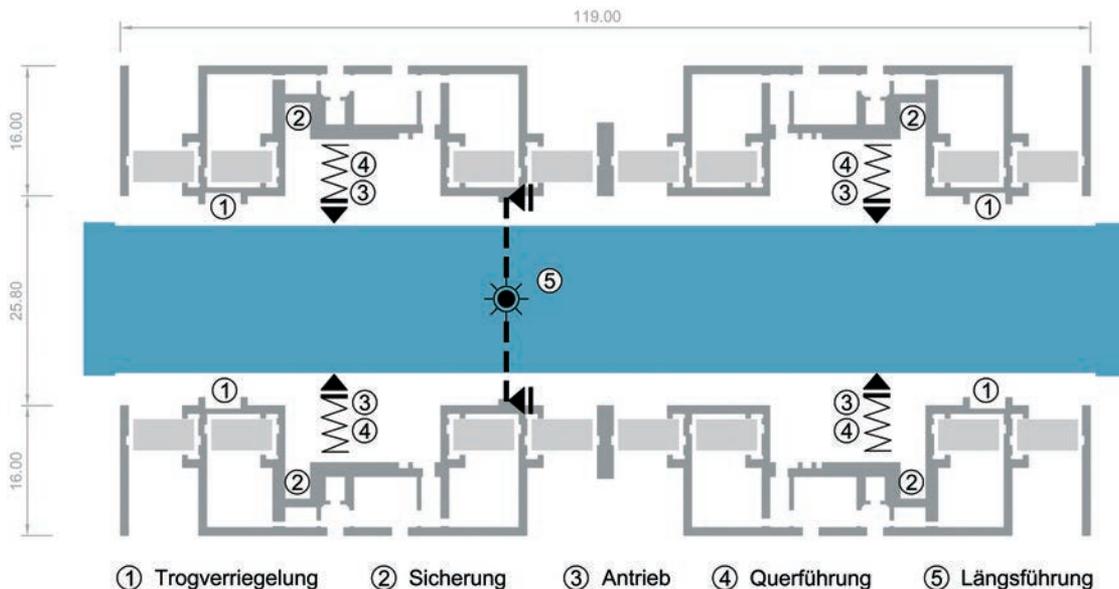


Bild 14. Schema der Sicherungs- und Führungsmechanismen  
 Fig. 14. Scheme of safety and guiding mechanisms

dann auftretenden enormen Kräfte aufnehmen zu können (s. Abschn. 10).

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden für den Betriebsfall und den Katastrophenfall Erdbeben keine verschiedenen Führungseinrichtungen vorgehalten. Die Querführung ist in die Zahnstange für den Trogantrieb integriert. Die Längsführung ist mit der Erdbebenlagerung kombiniert.

Die Querführungen werden in der Ebene der E-Technik-Räume unterhalb der Maschinenräume angeordnet (Bild 16). Der Führungswagen klammert sich um die beiden seitlich an der Zahnstange vorgesehenen Führungsschienen und kann sowohl Druck- als auch Zugkräfte übertragen. An jeder Querführung ist ein doppelt wirkender Hydraulikzylinder mit einer durchgehenden Kolbenstange eingebaut. In den beiden Führungsachsen werden die Hydraulikzylinder auf der einen Seite des Trogs über Kreuz mit dem Hydraulikzylinder auf der anderen Seite verbunden (Bild 15). Durch diese Schaltung fahren beide Zylinder immer gleichmäßig aus oder ein, und der Trog ist zentrisch zwischen den Stahlbetontürmen geführt. Auf eine aufwendige Steuerung des Troges konnte so verzichtet werden. Der Führungsschlitten wird mit einem geringen Abstand zur Zahnstange geführt. Die Führungsrollen sind für die normalen Betriebslasten vorgespannt. Im Erdbebenfall werden die Rollen überdrückt. Die 2 m langen Kufen des Führungsschlittens legen sich kraftschlüssig an und können die enormen Kräfte aufnehmen (Bild 16).

Die Längsführung hat mehrere Funktionen zu übernehmen. In den Haltepositionen müssen sowohl der Wasserdruck aus dem einseitig geöffneten Tor (ca. 8 MN), die Pressenkräfte aus dem Andichtrahmen (ca. 2 MN) als auch evtl. auftretende Schiffsstoßkräfte aufgenommen werden können. Zusätzlich übernimmt die Längsführung die aus Erdbeben abzutragenden Lasten von bis zu 20 MN. Wegen der notwendigen großen Steifigkeit der Stahlbetontürme und des Stahltroges ist eine zwängungsfreie Lagerung des Trogs sehr wichtig. Dies wurde über eine mechanisch sehr einfache Punktlagerung gewährleistet, nämlich über einen quer zum Trog eingebauten Biegeträger. Dieser nimmt seine Lasten über ein Punktlager in der Längsachse des Trogs auf und gibt die Lasten über seine Biegesteifigkeit seitlich auf die Stahlbetontürme ab. Der Stahlträger, der als Hohlkasten mit einem Querschnitt von 2 m × 4 m ausgeführt wird, durchdringt die Hauptträger unterhalb des Trogbodens. Zwischen dem Hauptträger und der Stahlbetonkonstruktion greift der Träger mit einer

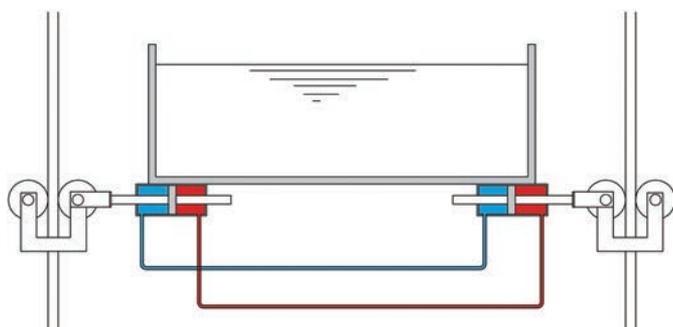


Bild 15. Systematische Darstellung der Querführung  
Fig. 15. Technical scheme of transverse guiding

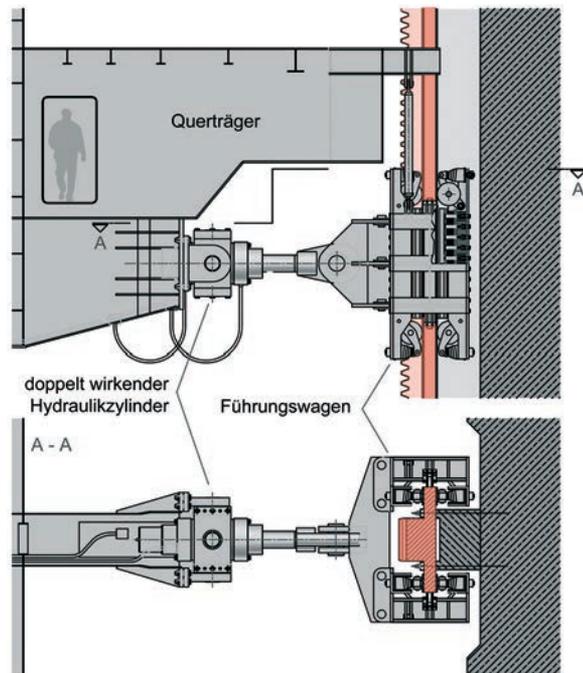


Bild 16. Querschnitt und Grundriß der Querführung  
Fig. 16. Cross section and plan view of transverse guiding

Art Hammerkonstruktion um eine Stahlbetonnase und leitet dort seine Kräfte gleichmäßig rechts und links in die Stahlbetonkonstruktion ab (Bild 17). Das Mittelauflager der Längsführung ist für eine Last von nahezu 30 MN bemessen. Es wird als Elastomerlager ausgeführt. Die Lastenleitung aus dem Trog erfolgt über den Trogboden und über die neben dem Lager durch zusätzliche Bleche zu einem Hohlkasten zusammengesetzten Querträger. Das Lager ist auf einer trägerrostartigen Unterkonstruktion ein-

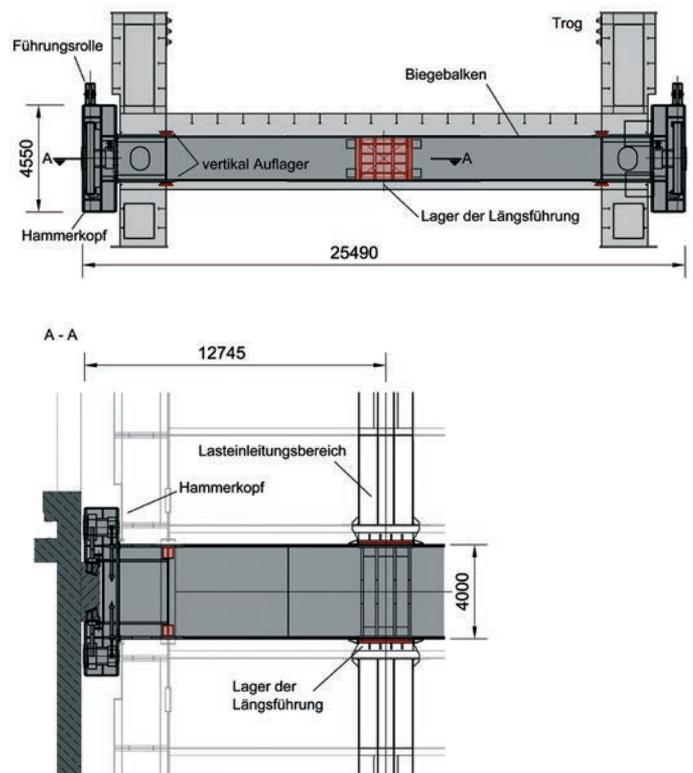


Bild 17. Querschnitt und Grundriß der Längsführung  
Fig. 17. Cross section and plan view of longitudinal guiding

gebaut, um die konzentrierten Lasten in die Stahlkonstruktion einleiten zu können. Hierzu sind auch zusätzliche Schottbleche zwischen den Querträgern erforderlich, um eine Lastausbreitung zu gewährleisten.

Die Längsführung hat im Betrieb einen Spalt von 5 mm zu den Führungsschienen, der über vorgespannte Führungsrollen sichergestellt wird.

Durch die statisch bestimmte Führung des Troges können sich sowohl die Stahlbetontürme als auch der Trog zwängungsfrei verformen. Die Querführung und auch die Längsführung können unabhängig voneinander die auftretenden Lasten abtragen.

## 7 Antrieb

Die Trogmasse und die normale Wasserfüllung werden über die Gegengewichte ausgeglichen. Der Antrieb ist für eine Wasserlamelle von 10 cm ausgelegt.

Der Antrieb des Troges erfolgt über vier Ritzel, die in Zahnstangen, die in den Türmen eingebaut sind, eingreifen. Die Ritzel sind auf einem Lagerbock in den Maschinenräumen derart federnd gelagert, daß Bewegungen ausgeglichen werden können (Bild 18). Durch die gewählte Kinematik der Lagerung kommt es hierbei nur zu geringen Relativverformungen zwischen Ritzel und Zahnstange. Der permanente Eingriff des Ritzels ist durch einen hinter die Zahnstange greifenden Führungswagen sichergestellt. Das Ritzel wird beidseitig von Wellen angetrieben, die jeweils über ein Getriebe direkt mit einem Elektro-Motor verbunden sind.

Für den seltenen Fall, daß ein oder sogar beide Motoren einer Antriebsstation ausfallen, sind alle Antriebe durch unter dem Trog angeordnete Ausgleichswellen miteinander verbunden. In dieser Situation wird das fehlende Antriebsmoment über diese Wellen dort hingeleitet, um die Trogfahrt planmäßig beenden zu können.

Der Trog wird sowohl bei der Berg- als auch bei Tal-fahrt motorisch angetrieben. Bei der Bergfahrt wird der Trog mit einer etwas größeren Wasserlamelle gefahren. Bei der Tal-fahrt ist der Trog etwas geringer befüllt. Der Kraftausgleich erfolgt in beiden Fällen über den motorischen Antrieb. Die Konstruktion ist jedoch derart ausgelegt, daß ein generatorischer Betrieb möglich ist. Der motorische Betrieb führt zu einer Wechselbeanspruchung in den Ritzeln, die bei der Dimensionierung berücksichtigt wurde.

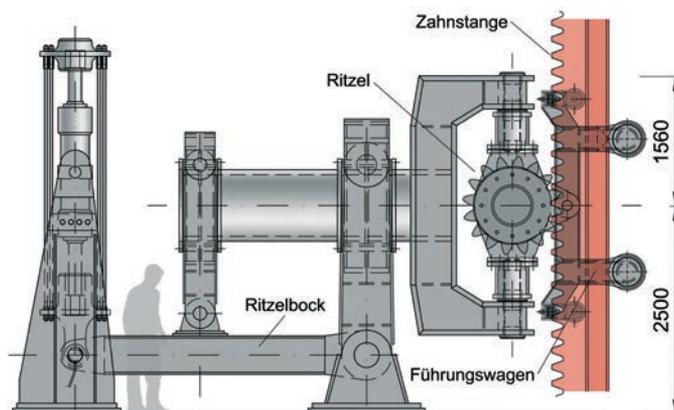


Bild 18. Trogantrieb – Querschnitt

Fig. 18. Drive of ship chamber – cross section

## 8 Trogsicherung

Die Trogsicherung verhindert durch ein sicheres Arretieren des Troges am Massivbau das Entstehen von unberechenbaren Betriebszuständen, die als Folge von Havarien auftreten können. Als Trogsicherung kommt die Kombination aus Mutterbackensäule und Drehriegel zum Einsatz. Die Mutterbacke ist eine Gußstahlsäulenkonstruktion, die längsgeschlitzt, innen hohl, mit einem Innengewinde versehen und über die gesamte Hubhöhe in die Betonkonstruktion eingebaut ist. In dieser Mutterbackensäule bewegt sich, um sich selbst drehend, eine Spindel. Diese Spindel, auch als Drehriegel bezeichnet, wird direkt vom Trogantrieb angetrieben. Bedingt durch die über ein Wellensystem gewährleistete direkte mechanische Kopplung zwischen den Antrieben und den Drehriegeln der Trogsicherung laufen die Drehriegel immer kraftfrei und synchron zu den Antrieben mit. Der Drehriegel hat während des normalen Betriebs ein Spiel zur Mutterbackensäule, damit es nicht zu Berührungen kommt. Der Drehriegel ist über Pendelstäbe, die sich auf dem oberen und unteren Eckstück des Trogs abstützen, gelagert (Bild 19). Das obere Eckstück ist über eine Bolzenkonstruktion mit dem Trog verbunden und kann für Reparaturen am Drehriegel ausgebaut werden.

Das Ritzel entzieht sich bei einer Überbeanspruchung, z. B. durch eine zusätzliche Wasserlamelle oder bei Wasserverlust, durch Einfedern seiner Belastung. In diesem Fall setzt sich der Trog über den Drehriegel in der Mutterbackensäule ab und wird sofort gehalten.

Die Mutterbackensäule wird über die Höhe in Segmentlängen von ca. 5 m eingebaut. Wegen der sehr hohen Anforderungen an die Einbaugenauigkeit ist die Montage im Erstbeton nicht möglich. Zu diesem Zweck werden im Erstbeton Aussparungen vorgesehen, in die in einem nächsten Schritt – nach Fertigstellung der Türme – Stahlträger einbetoniert werden. Die Stahlträgerflansche haben auf der zur

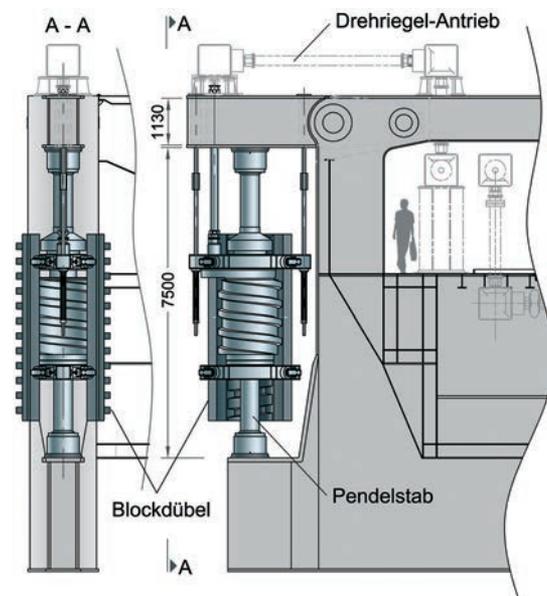


Bild 19. Trogsicherung: Mutterbacke mit Drehriegel – Querschnitt

Fig. 19. Ship chamber safety mechanism: nut post with rotary archimedean screw – cross section

Mutterbackensäule zugewandten Seite Blockdübel und schließen bündig mit dem Zweitbeton ab. Durch diese Maßnahme kann die Einbaugenauigkeit schon wesentlich erhöht werden. Für den Einbau der Mutterbackensäule ist dieser Schritt allerdings noch nicht ausreichend. In einem letzten Schritt wird die Mutterbackensäule, auf deren Rückseite ebenfalls Blockdübel angeordnet sind, justiert. Die Blockdübel greifen nun direkt ineinander. Die Fuge zwischen den Blockdübeln ist auf den Ausgleich von max. 2 cm ausgelegt. Nach einer abschließenden genauen Justierung wird die Fuge mit einem hochfesten, schwindarmen Mörtel vergossen. Die vertikale Lastabtragung erfolgt nur über die Blockdübel. Die aus der exzentrischen Lasteinleitung resultierenden Zugkräfte werden über Schrauben und Spannglieder in die Betonkonstruktion zurückgehängt.

## 9 Trogverriegelung

In seiner oberen und unteren Haltestellung wird der Trog sowohl vertikal als auch horizontal verriegelt. Hierdurch ist sichergestellt, daß zusätzliche Vertikallasten, z. B. aus einer Wasserstandsänderung, zu keiner zusätzlichen Belastung der Antriebsritzel führen. Horizontallasten, z. B. aus einem Schiffsanprall, können so ebenfalls problemlos abgetragen werden.

Die vertikale Verriegelung erfolgt an den jeweils äußersten Punkten der Betonschächte (Bild 14 und Bild 20). Durch einen vertikalen Zylinder werden zwei horizontale Klinken in Höhenlage von seitlich im Beton vorgesehenen Verriegelungstaschen positioniert. Im Anschluß werden die Klinken horizontal ausgefahren und kraftschlüssig vertikal vorgespannt (Bild 20). Aus Sicherheitsgründen wird die Kolbenstange des vertikalen Zylinders anschließend verkeilt, um auch bei einem nachlassenden Öldruck nicht nachzugeben.

In Längsrichtung wird der Trog in der Längsführung über die Hartanlage ebenfalls festgesetzt. In der Hartanlage wird über einen Exzenter die Längsführung kraft-

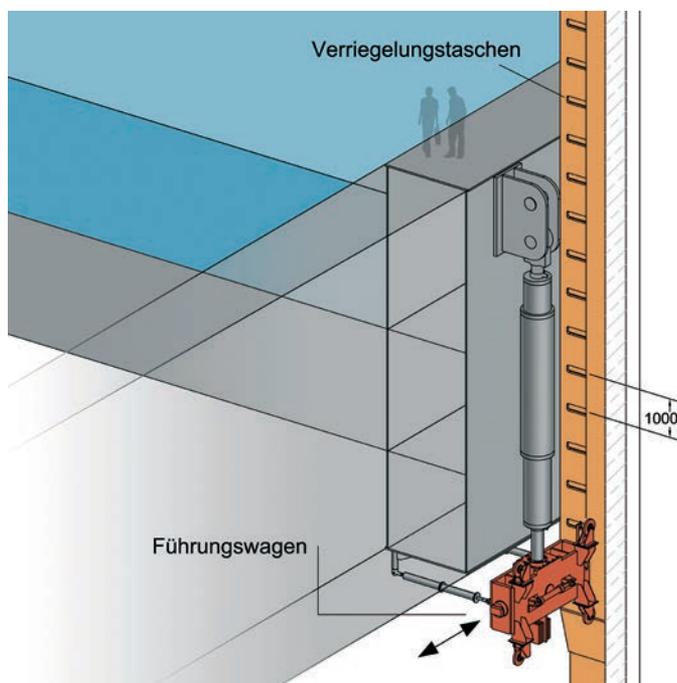


Bild 20. Trogverriegelung – Isometrie  
Fig. 20. Ship chamber locking mechanism – isometry

schlüssig mit dem Beton verklemt. Die aus dem einseitig geöffneten Tor und durch einen eventuellen Schiffsanprall auftretenden Horizontallasten können so problemlos aufgenommen werden.

Sowohl die Trogverriegelung als auch die Hartanlage müssen über die gesamte Höhe der im Oberwasser auftretenden Wasserschwankungen von 30 m (145 m bis 175 m) funktionstüchtig sein. Im Unterwasser können Wasserspiegeländerungen von 11,8 m (62 m bis 73,8 m) auftreten.

## 10 Lastfälle, insbesondere Erdbeben

Massive Bauteile sind als Ingenieurbauteile für die maßgebenden Bemessungssituationen nach ZTV-ING bzw. DIN-Fachberichten 100-102 und Stahlwasserbauteile nach DIN 19704 auf der Grundlage des neuen Normenkonzepts zu untersuchen. Ergänzend hierzu sind in den Entwurfsgrundsätzen („Guideline for design“) [5] weitere Lastfälle in Abstimmung mit dem Bauherren und seinem Berater, der Bundesanstalt für Wasserbau, festgelegt worden.

Neben den normalen Lastfällen, wie Wasserfüllung, Windlast, Anfahrlasten und Führungskräften, müssen zusätzlich ganz spezielle Lastfälle untersucht werden. Zu diesen Lastfällen zählen Schiffsanlegestoß, gesunkenes Schiff, Trog leer und Schiffstrog unter Auftrieb. Von ganz besonderer Bedeutung für das Bauwerk ist der Lastfall Erdbeben. Neben der reinen Belastung aus den bewegten Massen ist auch eine Aussage zur Höhe der Wellen im Trog von Interesse, um beurteilen zu können, ob das Wasser aus dem Trog herausschwappen kann [6].

Die Festlegung der Einwirkungen für den Lastfall Erdbeben erfolgte nach der chinesischen Erdbeben-Norm für Wasserbauwerke. Das Bauwerk befindet sich in Zone VI der Mercalli-Skala (Bild 21). Aufgrund der sehr hohen Sicherheitsanforderungen, die an das Bauwerk gestellt werden, erfolgt die Bemessung für Zone VII mit einer Grundbeschleunigung von 0,1 g ( $1 \text{ m/s}^2$ ), bei einer Wiederholungswahrscheinlichkeit von einmal in 5000 Jahren. Da für dieses Gebiet keine digital aufgezeichneten Erdbeben Daten vorlagen, werden für die Bemessung künstlich generierte Erdbeben zugrunde gelegt. Hierfür wird das international anerkannte Programm SIMQKE des Massa-

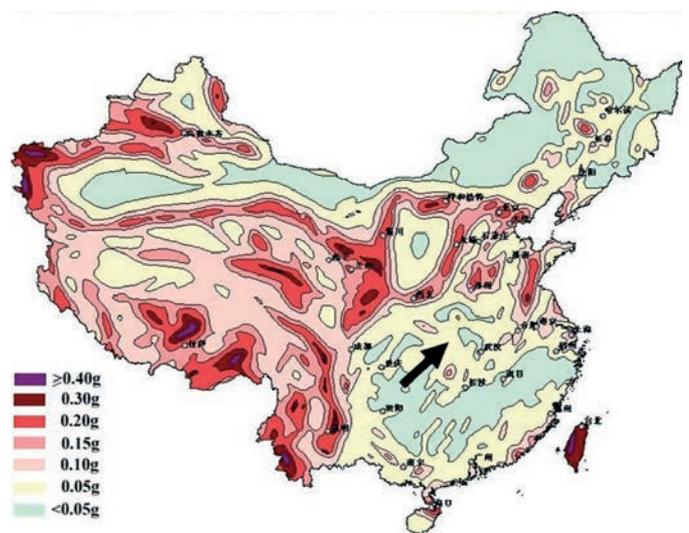


Bild 21. Erdbebenkarte von China  
Fig. 21. Map of earthquake areas in China

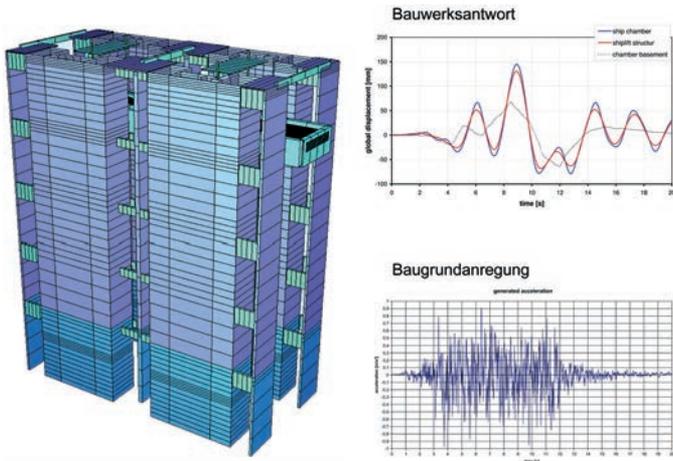


Bild 22. Erdbebenergebnisse an einem 3D-Modell  
 Fig. 22. Earthquake analysis on a 3d-model

Massachusetts Institute of Technology verwendet. Die Bemessung der Bauteile erfolgt nach Eurocode 8 (Bild 22).

Es gilt sicherzustellen, daß im Fall eines Erdbebens vor allem die Sicherheit von Menschenleben gewährleistet ist und unverhältnismäßig große wirtschaftliche Schäden vermieden werden. Dies führt zu kleinen zulässigen Verschiebungen ( $\approx \pm 8$  bis 10 cm) zwischen dem Trog und den Führungseinrichtungen am Massivbau. In jeder Betriebsstellung muß die Funktion der Trogsicherung gewährleistet sein.

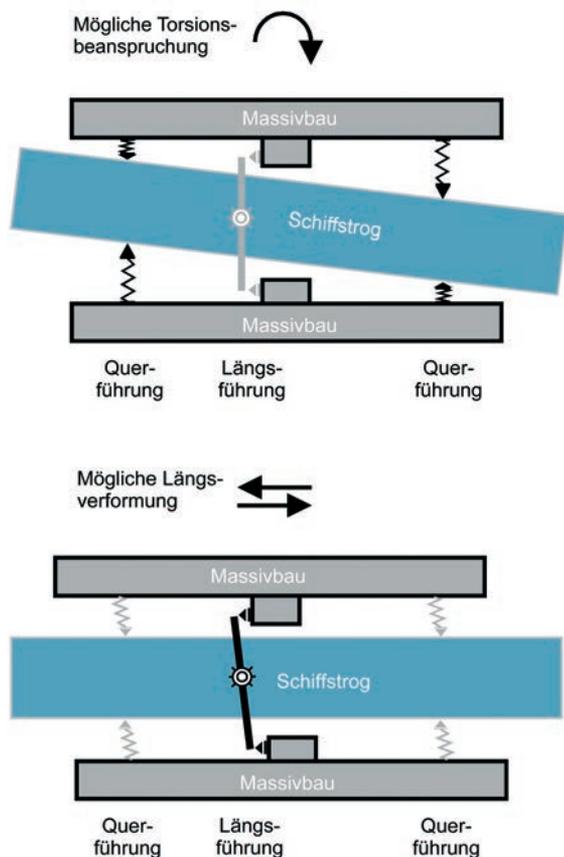


Bild 23. Mögliche Torsions- und Längsverformung infolge Erdbeben  
 Fig. 23. Possible torsion- and longitudinal deformations due to earthquake action

Im Falle eines Erdbebens werden die Kräfte optimal über eine statisch bestimmte Lagerung aufgenommen (Bild 23). Deren Lagerungsmechanismen werden an den Führungseinrichtungen des Trogs in einer Weise vorgesehen, daß sie nur im Fall eines Erdbebens „greifen“. Somit sind keine zusätzlichen Einbauteile an der Massivkonstruktion erforderlich, und unter Normalbetrieb kommt es nicht zum Verschleiß an den Erdbebenlagern.

Aus Erdbeben und sonstigen Horizontallasten ergeben sich in Längsrichtung Kräfte von insgesamt 30 MN, in Querrichtung je Lagerpunkt von 4,5 MN, die über die Erdbebenführungen sicher in die Massivbaukonstruktion geleitet werden.

### 11 Verformungen

Neben den rein statischen Berechnungen der einzelnen Bauteile spielen die Verformungen (Tabelle 2) eine entscheidende Rolle für die Funktionsfähigkeit des Schiffshebewerks. Die Bauteile des Maschinenbaus, insbesondere die Antriebe, die Trogsicherung und auch die Trogtore

Tabelle 2. Verformungen der Türme  
 Table 2. Deformations ship lift

Level [-]	$U_{\text{quer}}$ [mm]	$U_{\text{längs}}$ [mm]
+196 m	259	52,5
+175 m	210	45
+123 m	91	23,3
+ 62 m	6	2,1

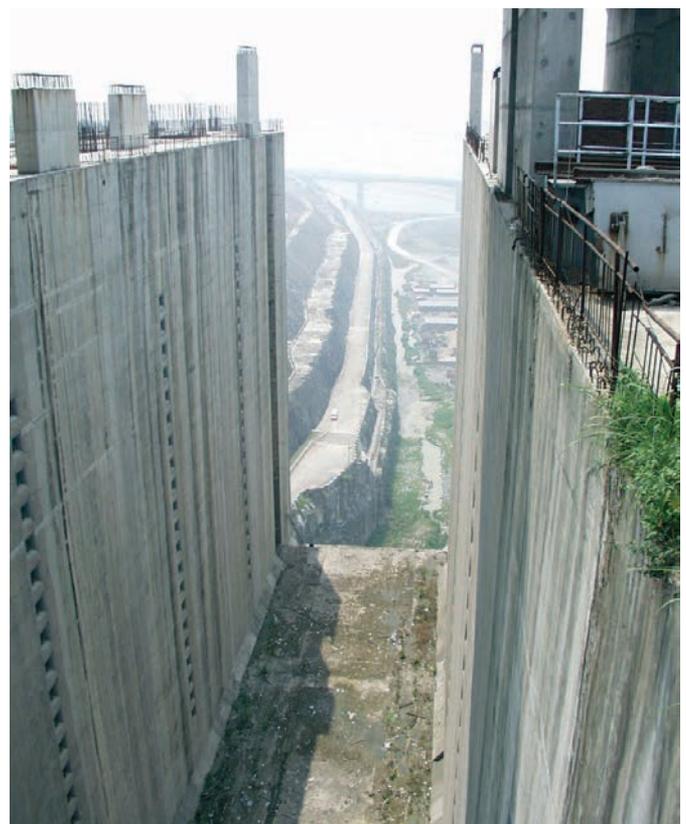


Bild 24. Blick von der oberen Haltung in das Tal  
 Fig. 24. View from the upper bay downstream

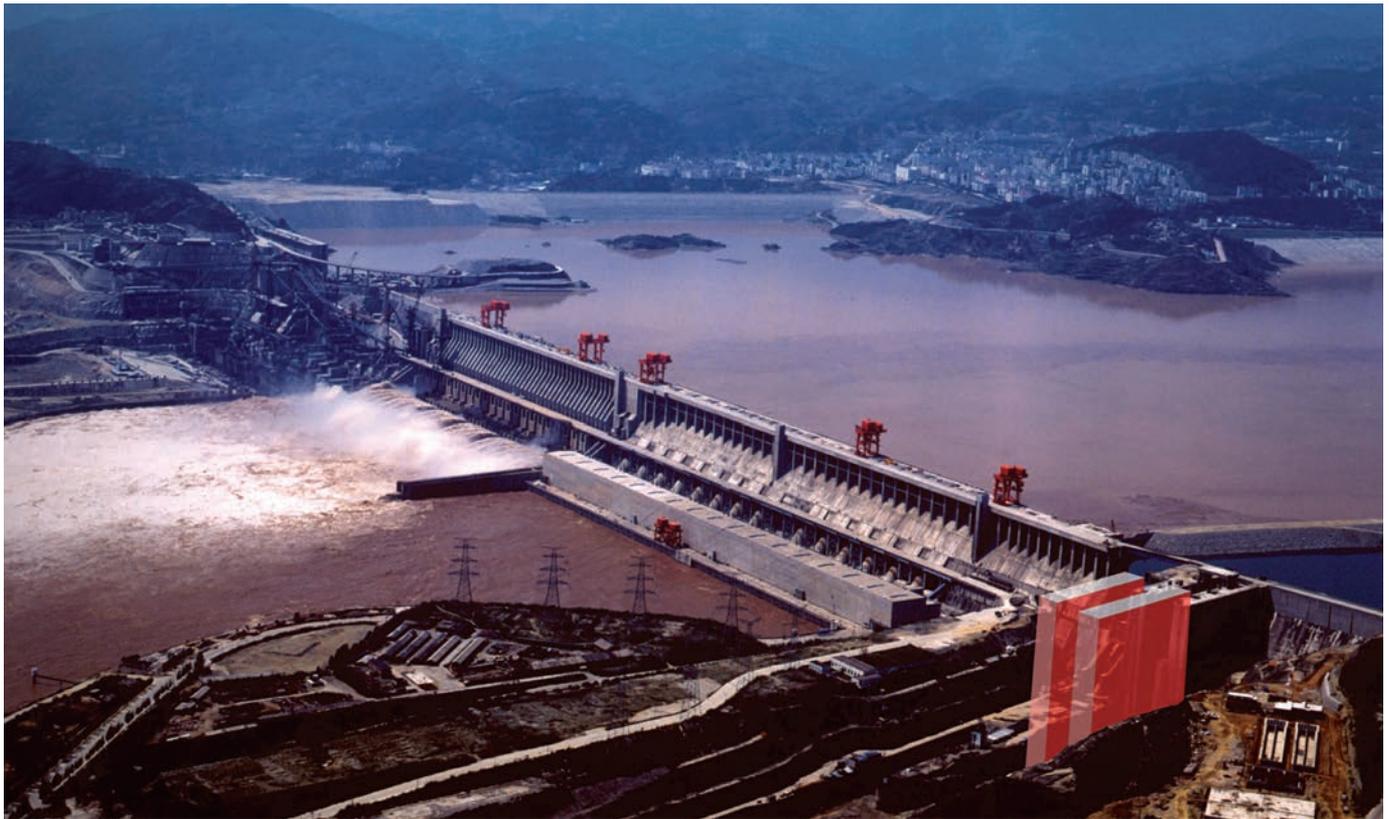


Bild 25. Übersicht der Gesamtanlage mit eingeblendeten Umrissen des Schiffshebwerks, Sommer 2004  
Fig. 25. Overview of the overall construction with marking of the contours of the shiplift in summer 2004

können nur geringe Verformungen tolerieren. Dem stehen die bei den hier vorliegenden enormen Lasten üblicherweise großen Verformungen des Gesamtsystems und die üblicherweise relativ großen Maßungenaugigkeiten im Massivbau entgegen. Das stellt hohe Anforderungen an die Ausführung des Massivbaus, Maschinenbaus und insbesondere der Einbauteile.

## 12 Wie geht es weiter?

Nach Abschluß der Ausschreibungsplanung im Frühjahr 2006 ist die Ausschreibung für das Schiffshebwerk geplant, um noch im gleichen Jahr die Vergabe vornehmen zu können.

Im Jahr 2009/2010 wird seitens der chinesischen Bauherren mit der Inbetriebnahme des neuen – dann weltweit größten – Schiffshebwerks gerechnet.

## 13 An der Planung Beteiligte

Joint Venture

Krebs und Kiefer International/Lahmeyer International:

Lahmeyer International, Friedberger Straße 173,  
61118 Bad Vilbel

Krebs und Kiefer, Beratende Ingenieure für das Bauwesen  
GmbH Karlsruhe, Karlstraße 46, 76133 Karlsruhe

Germanischer Lloyd, Vorsetzen 35, 20459 Hamburg  
Ingenieurbüro Rapsch und Schubert, Max-von-Laue-  
Straße 12, 97080 Würzburg

Spezialbau Engineering Magdeburg, Lübeckerstraße 71,  
39124 Magdeburg

DriveCon, Mainfrankenpark 57, 97337 Dettenbach

## Literatur

- [1] Wagner, R.: Schiffshebwerke in Deutschland, Ansichts- und Sicherheitsprinzipien. Stahlwasserbautagung von Mannesmann-Rexroth, Lohr/Main, 1997.
- [2] BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Machbarkeitsstudie für das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Projekt des Yangtze, Karlsruhe, 25.05.2000 (unveröffentlicht).
- [3] Wagner, R., Krebs, A.: Das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Projekt des Yangtze. Jahrbuch 2001 der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG).
- [4] Kunz, C., Lindlar, H.-G., Wigand, R.: Schiffshebwerk am Yangtze-Drei-Schluchten-Staudamm in China. 13. Deutscher Beton- und Bautechniktag 2005, Düsseldorf, 28.-29. April 2005.
- [5] CTGPC: „Guideline for design“ Entwurfsgrundsätze für das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Staudamm, 2004 (unveröffentlicht).
- [6] Germanischer Lloyd: Erdbebenuntersuchungen eines Schiffstrogens, Hamburg 2005 (unveröffentlicht).
- [7] Krebs, D., Kunz, C., Strack, G. Zhao Xijin: Planung für das neue Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China, Hafenbautechnische Gesellschaft (HTG), 2005.

## Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Dorothea Krebs, Geschäftsführende Gesellschafterin, Krebs und Kiefer Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH,  
Dipl.-Ing. Thomas Runte, Krebs und Kiefer Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Karlstraße 46, 76133 Karlsruhe  
Dipl.-Ing. Gerhard Strack, Lahmeyer International, Friedberger Straße 173, 61118 Bad Vilbel

# Das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Staudamm, China – Bau des größten Fahrstuhls der Welt

Mit einer Bauwerkshöhe von 169 m, einer maximalen Hubhöhe von 113 m und bewegten Massen von ca. 33 000 t wird das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China das weltweit größte seiner Art sein. Das Bauwerk steht vor seiner Fertigstellung; der Probetrieb läuft seit 2015. Parallel gelegen zur bereits voll betriebenen fünfstufigen Schleusentreppe an dem 2,3 km langen Staudamm besteht das Hebwerk aus vier Stahlbeton-Türmen. Ein stählerner, wassergefüllter Schiffstrog mit 132 m Länge, 23 m Breite und 10,5 m Höhe wird Schiffe mit einer maximalen Wasserverdrängung von 3 000 t befördern. Die Konstruktion gewinnt ihre Flexibilität aus der innovativen Kombination aus Tragwerk und Maschinenbau. Das sich seit 2008 im Bau befindende Hebwerk wurde mittels Gleitschalung errichtet. Aufgrund der Toleranzanforderungen des eingebauten Antriebssystems wurde eine spezielle Kombination aus Erst- und Zweitbeton sowie Verguss verwendet. Der Artikel beschreibt die bautechnischen Aspekte des Projekts mit Fokus auf die Bauausführung.

**Keywords** Wasserbau, konstruktiver; Bauwerk, bewegliches; Erdbebenbemessung; Kletterschalung; Bautoleranz; Zweitbeton

## The ship lift at the Three-Gorges-Dam in China – Construction of the world's largest elevator

With a total height of 169 m, a maximal lifting height of 113 m and moved masses of approx. 33 000 t, the ship lift at the Three-Gorges-Dam in China will be the largest of its kind worldwide. The entire structure is nearing completion. Operational testing started in 2015. Located parallel to the existing fully operating five stage ship lock at the 2,3 km long barrage, the ship-lift consists of four RC towers. A steely, water filled ship chamber with 132 m length, 23 m width and 10,5 m height will lift ships with a max. water displacement of 3 000 t. The construction gains its flexibility from an innovative combination of structural and mechanical parts. Since 2008 the ship lift structure was erected by climbing formwork. Due to the tolerances demanded by the embedded parts of the mechanical drive system, a special procedure of 1st and 2nd stage concrete and grouting had to be developed. The article describes the structural aspects of the project with focus on the execution.

**Keywords** hydraulic structure; moveable construction; earthquake design; climbing formwork; construction tolerances; second stage concrete



**Bild 1** Luftbild des Drei-Schluchten-Staudamms  
Aerial view of the Three-Gorges-Project



**Bild 2** Ansicht des Hebewerks von Unterstrom  
View of the ship lift from downstream

### 1 Jahrhundertbauwerk Drei-Schluchten-Projekt

Mit dem Realisierungsbeschluss für den ca. 2,3 km langen und 185 m hohen Staudamm am Jangtse veranlasste die chinesische Regierung 1992 eine der umfangreichsten Wasserbaumaßnahmen der Geschichte [1]. Das Drei-Schluchten-Projekt ist ein multifunktionales Entwicklungsprojekt mit großen Vorteilen für Hochwasserschutz, Energiegewinnung und die Verkehrsschifffahrt. Es besteht aus dem Staudamm mit Überlauf, zwei Krafthäusern und Bauwerken für die Schifffahrt. Das Hebwerk (Bild 2) ist eine der beiden Schifffahrtseinrichtungen und befindet sich direkt neben der fünfstufigen Doppelschleuse. Der insgesamt ca. 7 km lange Schiffshebwerkkomplex besteht aus dem oberen Zulaufkanal, der oberen Haltung, dem Hebwerk an sich, der unteren Haltung und dem unteren Zulaufkanal (Bild 1). Die wesentliche Aufgabe des Schiffshebwerks, das für Schiffe mit einer Verdrängung von 3000 t vorgesehen wurde, ist die signifikante Beschleunigung der Staudampassage von über 3 h bei Schleusung auf ca. 40 min für die Passagierschifffahrt und spezielle Frachter.

Die wesentlichen Projekttrandbedingungen waren:

- max. Hubhöhe 113 m, die weltweit höchste (Tab. 1)
- Wasserspiegelschwankungen 30 m oberwasserseitig und 11,8 m unterwasserseitig
- kurzfristige Wasserspiegelschwankungen  $\pm 0,5$  m unterwasserseitig aufgrund Kraftwerksbetrieb/Flutentlastung
- Lichtraumhöhe für Schiffe 18 m
- Mittlerer Jahresbetrieb 335 d, 22 h/d, 18 Hebungen/d
- Lebensdauer: Massivbau 100 Jahre, Stahlbau 70 Jahre, Maschinenbau 35 Jahre

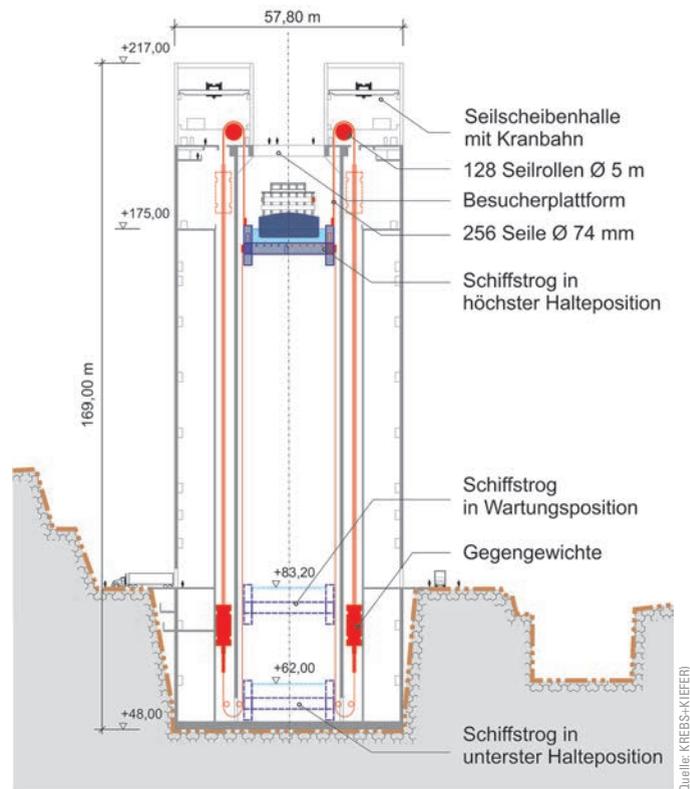
Die Vorentwurfsplanung der mit Planung, Bau und Betrieb des gesamten Staudammkomplexes betrauten China Three Gorges Corporation (CTG) sah hierbei ein einstufiges

Senkrecht-Hebwerk nach dem Gegengewichtsprinzip mit Seilaufhängung vor. Zur Gewährleistung von Zuverlässigkeit im Betrieb sowie Sicherheit sollten ein Zahnstangen-Ritzelantrieb und eine Mutterbackensicherung mit kurzem Drehriegel verwendet werden. CTG beauftragte 1999 die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zusammen mit deutschen Fachplanern mit einer Machbarkeitsstudie zur Untersuchung und Optimierung des eigenen Vorentwurfs hinsichtlich Antrieb und Sicherungsmechanismen. Hieraus entstand 2004 die Beauftragung eines Joint Ventures aus KREBS+KIEFER International und Lahmeyer International mit der Generalplanung für die Entwurfsüberarbeitung des Hebwerks (ohne Haltungen und Vorhäfen) und die Ausschreibungsplanung [2–4].

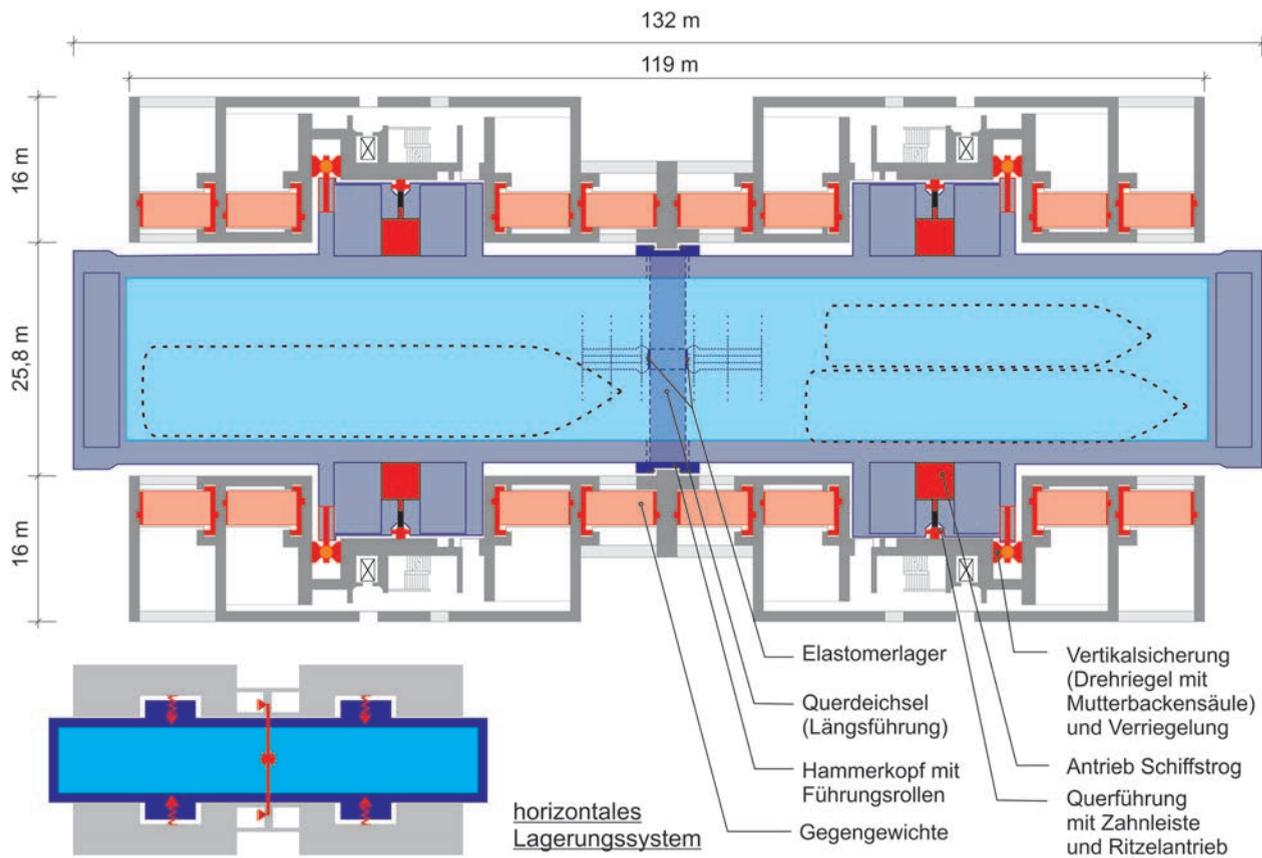
**Tab. 1** Vergleich aktueller Senkrecht-Schiffshebwerke  
Comparison of recent vertical ship lift structures

Name, Ort	Inbetriebnahme	Schiffsverdrängung [t]	Hubhöhe [m]
Strépy-Thieu, Belgien	2002	1 350	73,15
Drei-Schluchten-Damm, China	2016	3 000	113,0
Niederfinow (neu), Deutschland	2017	2 300	36,0

Die Vorlaufbauwerke waren bereits 2003 fertiggestellt worden. Mit Abschluss der Ausschreibungsplanung begann 2008 auch der Rohbau des Hebwerks an sich. Die

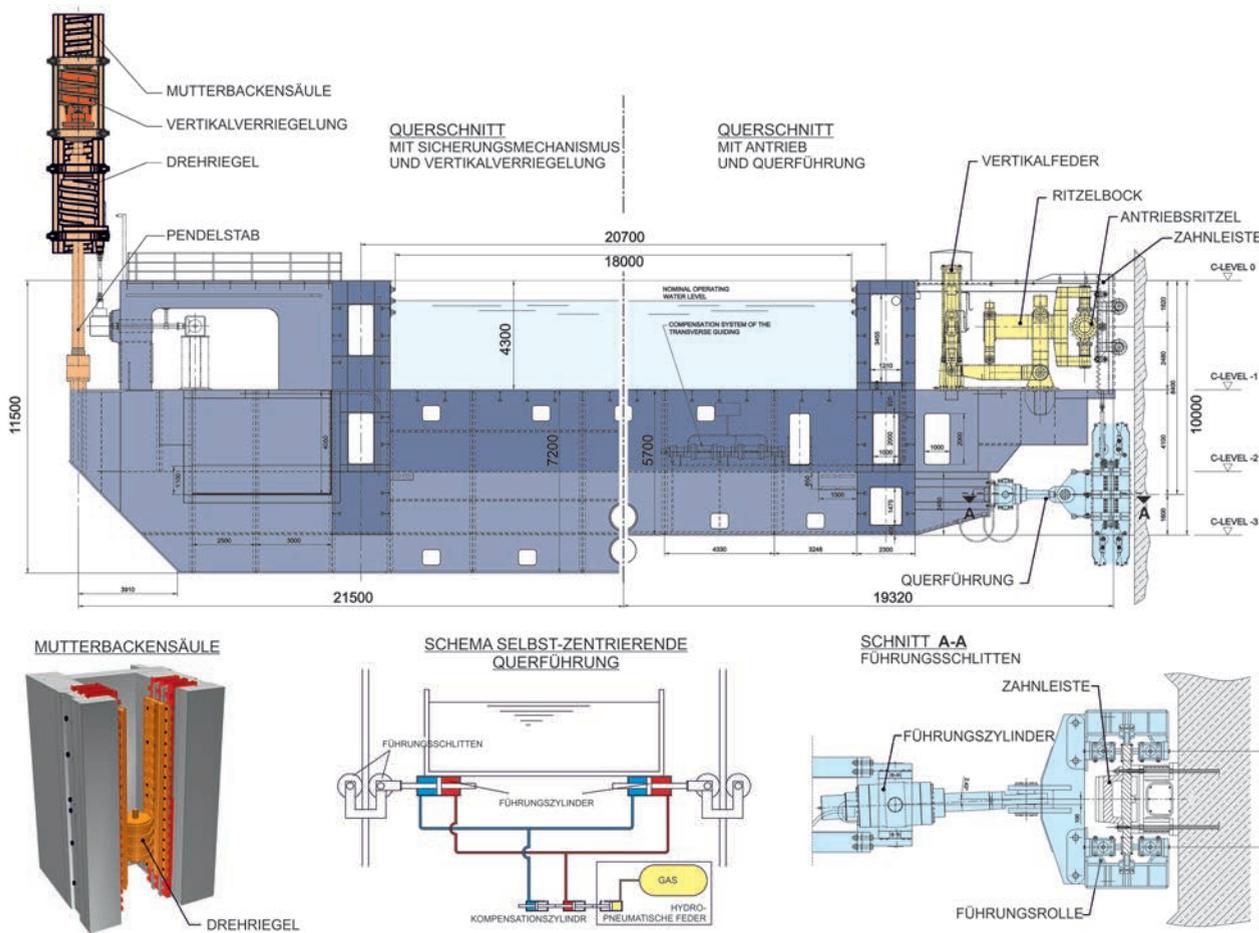


**Bild 3** Vertikalschnitt durch das Hebwerk  
Vertical section of the ship lift



(Quelle: KREBS+KIEFER)

**Bild 4** Horizontalschnitt durch das Hebewerk  
Horizontal section of the ship lift



(Quelle: KREBS+KIEFER)

**Bild 5** Querschnitte durch den Schiffstrog mit Führungs-, Sicherheits- und Antriebsmechanismen  
Section of the ship chamber with guiding-, safety- and drive-mechanisms

ausführenden Firmen begannen 2015 mit dem Probebetrieb, der dieses Jahr abgeschlossen werden soll. Im Juli 2016 passierten die ersten Lastschiffe den Damm via Schiffshebwerk (Bild 18).

## 2 Konstruktion des Bauwerks

### 2.1 Bautechnische Komponenten

Die wesentliche Tragstruktur besteht aus vier Stahlbetontürmen mit einer Grundfläche von 40 m × 16 m (Bild 4), die auf einer durchgehenden, direkt auf den Fels betonierten Sohlplatte mit 119 m × 57,8 m Grundfläche gegründet sind (Bild 7). Jedes Turmpaar an der Längsseite wird von Schubwänden flankiert. Die Türme und Wandscheiben mit bis zu 1,0 m dicken Wänden werden durch gleichmäßig über die Höhe verteilte Koppelriegel verbunden. Die Verbindung in Querrichtung erfolgt am Turmkopf über Riegel und zwei Brückenplattformen, eine für den Leitstand und eine für Besucher (Bilder 3, 17).

Der Schiffstrog aus Stahl mit Außenabmessungen von 132 m Länge, 23 m Breite und 10,5 m Höhe (Bilder 4, 5) sowie nutzbaren Innenmaßen von 120 m × 18 m × 3,5 m ist mittels 256 gleichmäßig über die Bauwerkslänge verteilten Seilen zwischen den Türmen abgehängt (Bilder 3, 14). Die Seile werden über 128 Seilscheiben an den Turmköpfen (Bilder 3, 13) umgelenkt und sind mit Gegengewichten verbunden.

Der Schiffstrog ist als orthotrope Platte ausgebildet, deren Hauptträger nahezu kontinuierlich durch die Seile getragen werden [4]. Vier seitliche Anbauten mit jeweils Antrieb, Horizontalführung und Vertikalverriegelung greifen in jeweils Turmnischen ein (Bilder 4, 5). Die Trogtore wurden als im Trogboden versenkbare Segmente konzipiert. In der Halteposition erfolgt die Abdichtung gegen die Haltungen durch horizontal ausfahrende Anpressrahmen.

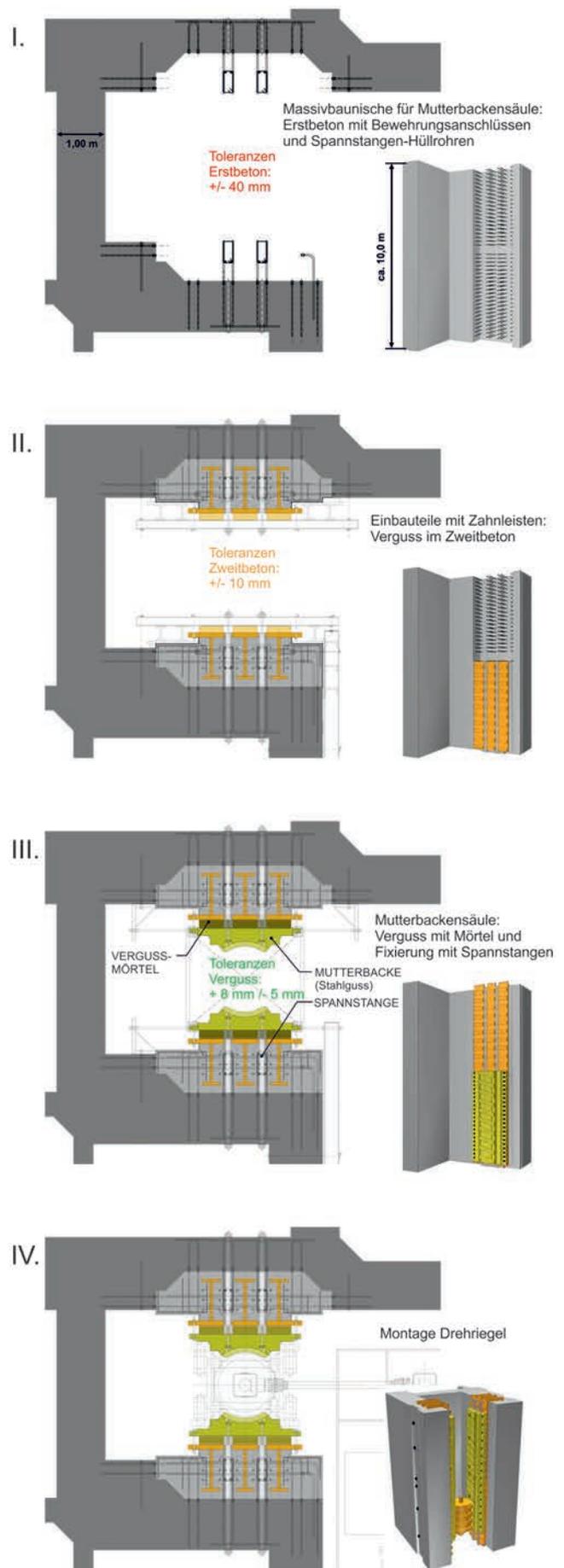
Neben den üblichen Lasten aus Eigengewicht und Verkehr galt es vor allem, Klima- und Sonderlasten wie Erdbeben und Havarien zu berücksichtigen [2, 3].

Zusammen mit dem Eigengewicht des Schiffstrogs von ca. 7 180 t, der Wasserfüllung, den Seilen, den Gegengewichten und den Gleichgewichtsketten werden beim Hubvorgang insgesamt ca. 33 000 t bewegt.

### 2.2 Maschinen- und Anlagenbau

Der Antrieb des Hubvorgangs erfolgt über vier mit Elektromotoren angetriebene und durch ein Getriebe gekoppelte Ritzel [2, 4]. Diese greifen in Zahnleisten in den Turmnischen ein (Bilder 4, 5, 15).

Die Zahnleisten aus Stahlguss dienen gleichzeitig als Führungsschiene für die Querführung des Trogs (Bild 5) und



**Bild 6** Montageschema Mutterbackensäule: Toleranzausgleich durch Zweitbeton und Mörtelverguss  
Mounting scheme of nut post: tolerance equalization by second stage concrete and grouting

(Quelle: KREBS+KIEFER)

sind daher mittels Spannstangen mit dem Massivbau der Türme verbunden. Da von horizontalen Differenzverformungen der Türme infolge Temperatur- oder Erdbeneinwirkungen auszugehen ist, erfolgt durch ein hydropneumatisches Kompensationssystem eine kontinuierliche Horizontalzentrierung zwischen den Türmen (Bild 5).

Die Längsführung des Trogs, welche die Horizontalkräfte aus Erdbeben und einseitigem Wasserdruck bei Toröffnung aufnehmen muss, erfolgt durch einen gelenkig mit der Trogmitte verbundenen Querträger (Bild 4). Zusammen mit der Querführung wurde damit ein zwängungsfreies Horizontallagerungssystem erzielt.

Zentraler Bestandteil des vertikalen Sicherungssystems im Havariefall (z. B. bei Seilbruch) ist die sogenannte Mutterbacke mit Drehriegel, welche unabhängig von den Seilen eine Vertikallagerung in jeder Höhenlage garantiert. Hierbei wird während des Regelbetriebs ein Drehriegel aus Stahlguss mit Außengewinde kontinuierlich, synchron und lastfrei in einem aus zwei am Massivbau der Türme fixierten Gusssegmenten bestehenden Innengewinde (Bild 5) gedreht. Im Havariefall blockiert der Drehriegel und überträgt mittels eines Pendelstabs die Vertikalkräfte des Trogs, die lokal bis zu 123 000 kN betragen können.

Da der Ritzelantrieb alleine keine großen Vertikalkräfte übernehmen kann, erfolgt die vertikale Verriegelung in der Halteposition ebenfalls über das Mutterbackensäulensystem. Hierzu wurde oberhalb des Sicherheits-Drehriegels ein weiterer, segmentierter Drehriegel angeordnet (Bild 5), der sich in der Halteposition in den Mutterbacken durch horizontale Spreizung verklammert.

### 3 Bauprozess

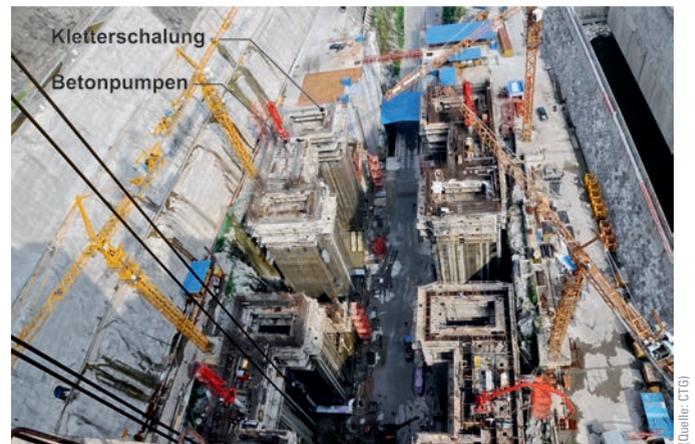
#### 3.1 Massivbauerstellung

Ausgehend von der 2,5 m dicken, direkt auf den Granit gegründeten Sohlplatte (Bild 7) aus Massenbeton (vergleichbar C25) wurden die vier Stahlbetontürme in 3,5 m



**Bild 7** Gründungsohle zwischen Vorhäfen  
Foundation slab between bays

hohen Abschnitten mittels einer speziell angefertigten, hydraulisch fahrbaren Kletterschalung errichtet (Bilder 8–10). Der Transportbeton wurde mittels Mischerfahrzeugen mit bis zu 10 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen vom bereits für den Dammbau errichteten Werk angeliefert und



**Bild 8** Bauzustand Massivbau 2010  
Construction stage reinforced concrete 2010



**Bild 9** Kletterschalung Massivbau 2010  
Climbing formwork for concrete structures 2010



**Bild 10** Massivbau 2012  
Concrete structures 2012

durch mitkletternde Pumpen in acht Lagen pro Abschnitt eingebaut (Bild 9). Um den Pumpdruck bei zunehmender Betonagehöhe zu gewährleisten, wurden die Betonpumpen hierfür jeweils auf der Bodenplatte (+50 m), den seitlichen Andienungsplattformen (+84 m) und auf dem Kanalboden der oberen Haltung (+141 m) platziert. Die Nachbehandlung nach dem Ausschalen fand durch eine mitkletternde Berieselungsanlage statt. Für die spätere Montage der Stahl-Einbauteile wurden im Erstbeton vertikale Aussparungsschlitze belassen. Dort wurden Hüllrohre für die späteren Spannstangen und Bewehrungsanschlüsse mit einbetoniert (Bilder 6, 8).

### 3.2 Stahlwasserbau

Der Schiffstrog wurde weitestgehend zwischen den Türmen auf der Sohlplatte zusammengesweißt (Bild 11). Die selbsttragende Konstruktion beinhaltet neben dem Wasserbehälter für die Schiffe auch die Ausrüstungsgegenstände und die Maschinen für den Antrieb. Es wurde vorwiegend chinesischer Stahl Q345D bei maximaler Plattendicke von 110 mm verwendet. Der Schiffstrog wurde in mehr als 50 Segmente zur Vormontage in der



**Bild 11** Montage Schiffstrog zwischen Türmen  
Mounting of the ship chamber between towers



**Bild 12** Segment Schiffstrog  
Segment ship chamber



**Bild 13** Seilscheibenhalle  
Sheave hall



**Bild 14** Wassergefüllter Schiffstrog mit Seilaufhängung  
Ship chamber with water supported by ropes

Werkstatt aufgeteilt (Bild 12). Aufgrund der Krankapazität wog das größte Segment 150 t bei einem Gesamtgewicht von 4500 t. Ausgehend von den Achsen für Mutterbackensäulen, Zahnleisten und Längsführung wurden die Segmente in Längsrichtung verschweißt.

### 3.3 Einbauteile

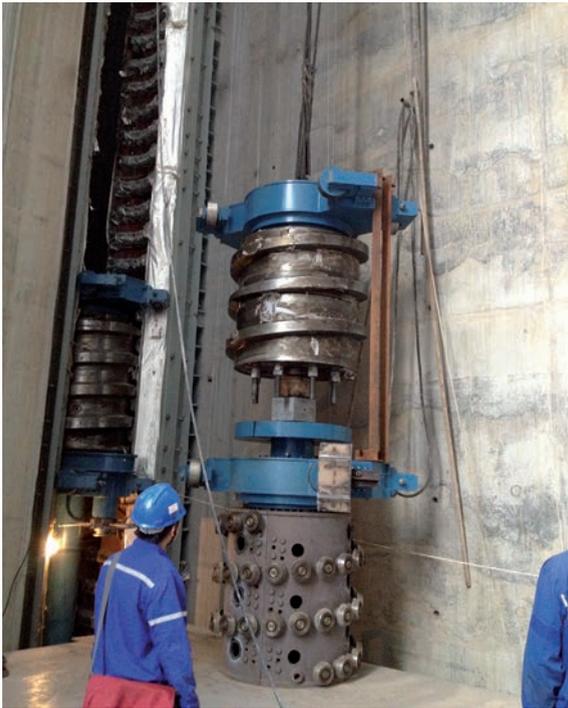
Untersuchungen des Temperatureinflusses aus der Umgebung und einseitiger Besonnung ergaben potenzielle



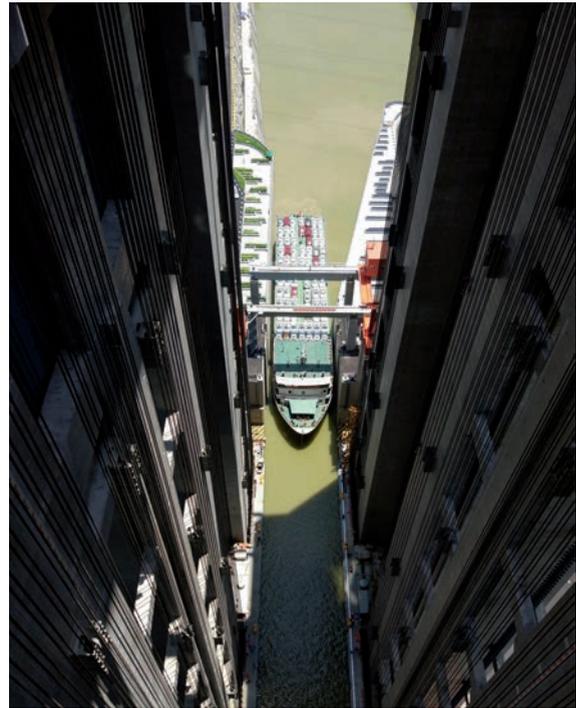
**Bild 15** Montage Zahnleisten Antrieb und Mutterbackensäule 2014  
Mounting of toothed racks of drive and nut post 2014

Relativverformungen zwischen Türmen und Schiffstrog von horizontal 150 mm und vertikal 110 mm. Um ein Blockieren während des Betriebs zu vermeiden, waren für den Ritzelantrieb, die Querführung sowie die Vertikalsicherung entsprechend hohe und grenzwertige Verformungskompensationen vorzusehen. Zur Gewährleis-

tung derselben waren die Bautoleranzen des Massivbaus möglichst gering zu halten. Es wurden daher bereits im Vorfeld Verformungsprognosen für Kriech- und Schwindverformungen aufgrund von Bau- und Belastungszuständen abgeschätzt. Während des Bauprozesses wurden die Prognosen auf Basis der tatsächli-



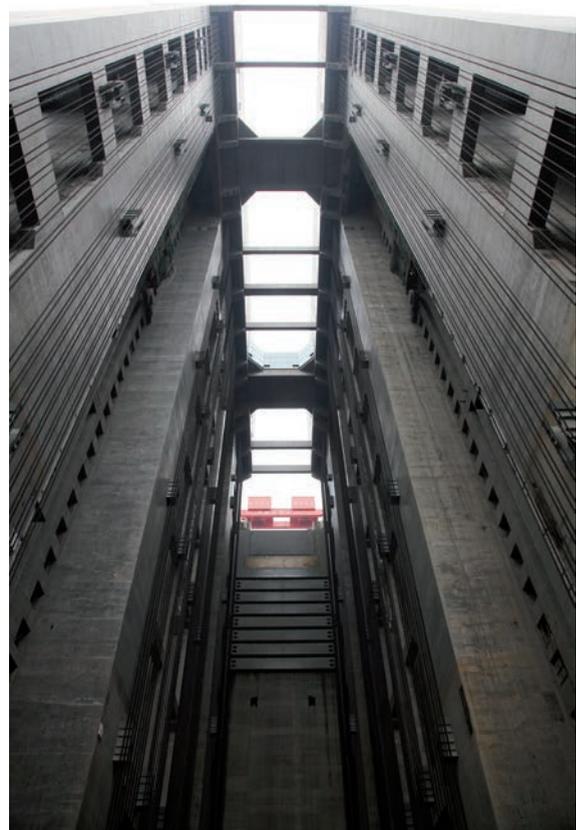
**Bild 16** Montage Drehriegel in Mutterbackensäule  
Mounting of rotary locking rod in nut post



**Bild 18** Blick auf Schiffstrog und untere Haltung mit Vorhafen  
View on ship chamber and lower bay with harbor



**Bild 17** Leitstand am Bauwerkskopf  
Control stand at tower top



**Bild 19** Blick auf obere Haltung  
View on upper bay



Quelle: CTG

**Bild 20** Vorhafenkanal Unterwasserseite  
Harbour at lower bay

chen Materialkennwerte und aktuellen Messungen kontinuierlich angepasst, um die für den Betrieb sensiblen Einbauteile in optimaler Lage zu fixieren. Die oberen 2/3 der Zahnleisten und Mutterbackensäulen wurden erst nach nahezu voller Belastung der Türme mit ca. 30 000 t installiert (Bild 15), um spätere Verformungen zu vermeiden.

Für die Mutterbackensäulen wurde hierbei folgende Vorgehensweise gewählt (Bild 6). In den Turmnischen des Erstbetons wurden Stahl-Einbauteile mit Justierrahmen eingebaut und mittels Zweitbeton vergossen (Bild 15). Die Stahlgusselemente der Mutterbackensäule wurden sodann nach Justage an den Stahl-Einbauteilen mit Schrauben fixiert. Der Kraftschluss erfolgte durch einen Mörtelverguss zwischen den ineinandergreifenden Zahnleisten der Gussteile und der Einbauteile. Ein den Drehriegel simulierendes Passstück garantierte hierbei die Einbautoleranz des Drehriegels von horizontal + 8 mm/- 5 mm und vertikal  $\leq 2,0$  mm (Bild 16). Für Antriebsritzel und Zahnleiste wurde ein maximales Spiel von  $\leq 2,0$  mm zugelassen. Die maximale Abweichung von der Rechtwinkligkeit betrug  $\leq 3,0$  mm.

## Literatur

- [1] China Three Gorges Corporation: *Project Introduction*. [www.ctgpc.com/introduction/introduction\\_a.php](http://www.ctgpc.com/introduction/introduction_a.php).
- [2] KREBS, D.; RUNTE, T.; STRACK, G.: *Planung für das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China*. Bautechnik 83 (2006), H. 2, S. 73–84.
- [3] AKKERMANN, J.; HEWENER, A.: *Erdbebenbemessung des Schiffshebwerks am Drei-Schluchten-Staudamm, China*. Bauingenieur 81 (2006), H. 4, S. 171–180.
- [4] AKKERMANN, J.; RUNTE, T.; KREBS, D.: *Ship lift at Three Gorges Dam, China – design of steel structures*. Steel Construction 2 (2009), H. 2, S. 61–71.

## 4 Zusammenfassung

Das Schiffshebwerk am Drei-Schluchten-Projekt wurde als eine hochfunktionale und nachhaltige Struktur entwickelt und realisiert. Die Konstruktion an sich wurde stark durch das Zusammenspiel zwischen Bautechnik und Maschinenbau geprägt. Außergewöhnliche Dimensionen und Funktionen führten zu speziellen und einzigartigen Lösungen. Ein Projekt dieser Größenordnung kann nur durch die perfekte Kooperation aller involvierten Unternehmen realisiert werden. Die Autoren bedanken sich bei dieser Gelegenheit bei allen Beteiligten für ihre exzellente Kooperation.

### Projektbeteiligte

Bauherr, Betreiber, Projektsteuerung, Ausführungsplanung	China Three Gorges Corporation, China
Beratung, Bauherr	Bundesanstalt für Wasserbau
Generalplanung	KREBS+KIEFER International/
Entwurfsüberarbeitung und Ausschreibungsplanung	Lahmeyer International, Deutschland
Entwurf Tragwerksplanung	KREBS+KIEFER Ingenieure, Karlsruhe
Entwurf Maschinenbau, Elektrotechnik	IRS Stahlwasserbau Consulting, Spezialbau Engineering, Drivecon, Deutschland
Ausführungs- und Montageplanung, Bauausführung	Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research China Shipbuilding Industry Corp. China Erzhong Group Co. Taiyuan Heavy Industry Group Co. Gezhouba Group Co.

### Kennzahlen

Planung	1995–2008
Ausführung	2008–2016
Massen	Beton: 230 000 m <sup>3</sup>
(nur Struktur Hebwerk)	Bewehrungsstahl: 22 000 t Baustahl: 4 000 t Seile: 38 400 m
Kosten (gesamter Schiffshebwerkkomplex)	~ 4 800 000 000 Yuan (~ 675 000 000 €)

### Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
Jan.Akkermann@hs-karlsruhe.de

Xiaoyun Wu  
China Three Gorges Corporation, Director Ship Lift Department  
13th small district, Three Gorges Dam Area,  
Yichang City, Hubei Province, P.R. China  
wu\_xiaoyun@ctgpc.com.cn

# Ship lift at Three Gorges Dam, China – design of steel structures

The vertical ship lift at the Three Gorges Dam in China will consist of a reinforced concrete structure with an internal steel ship chamber. The chamber will be a self-supporting orthotropic plate structure, continuously suspended from ropes with counterweights. Its components, such as segment gates, drive, horizontal guiding systems in the longitudinal and transverse directions plus locking and safety mechanisms are described here. A special procedure for reducing the tolerances of the steel components embedded in the reinforced concrete structure is explained.

## 1 Introduction

The Three Gorges reservoir dam was designed as a reinforced concrete gravity structure with a length of approx. 2.3 km and a height of 175 m. The dam itself was finished in May 2008. The maximum difference between the upstream and downstream water levels is 113 m. The Yangtze River is one of the busiest waterways in the world. At present, shipping traffic can only pass the dam by means of a two-lane, five-chamber lock chain. The last component in the dam complex is the ship lift (Fig. 1), which has been under construction since 2008 and will be used mostly for passenger ships. It will shorten the time taken for ships to pass the dam from more than 3 hours at present to approx. 1 hour (lifting time 21 minutes). With a lifting height of up to 113 m, internal dimensions of 120 × 18 × 3.5 m (useable space) and moving mass of approx. 34 000 tonnes, the vertical ship lift will be the largest of its kind in the world [1].



Fig. 1. Model of the Three Gorges Dam on the Yangtze River

## 2 Overall structure

The main components of the structure are four 169 m high reinforced concrete towers each measuring 40 × 16 m on plan (Fig. 2). The four towers are built on a continuous foundation slab measuring 119 × 57.8 m, directly on granite rock (Fig. 3). Between the towers the steel ship chamber (Fig. 4), which is 132 m long, is suspended from 256 ropes that are connected with counterweights via 128 double rope pulleys at the tops of the towers. Each pair of towers on the long sides of the ship chamber is flanked by shear

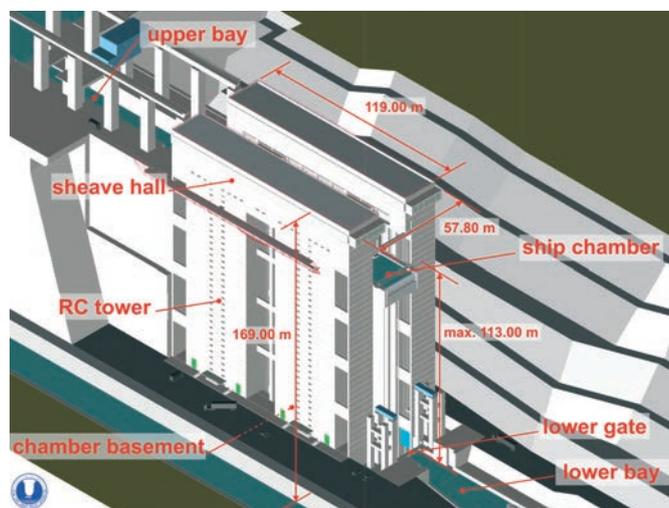


Fig. 2. Isometric view of the ship lift

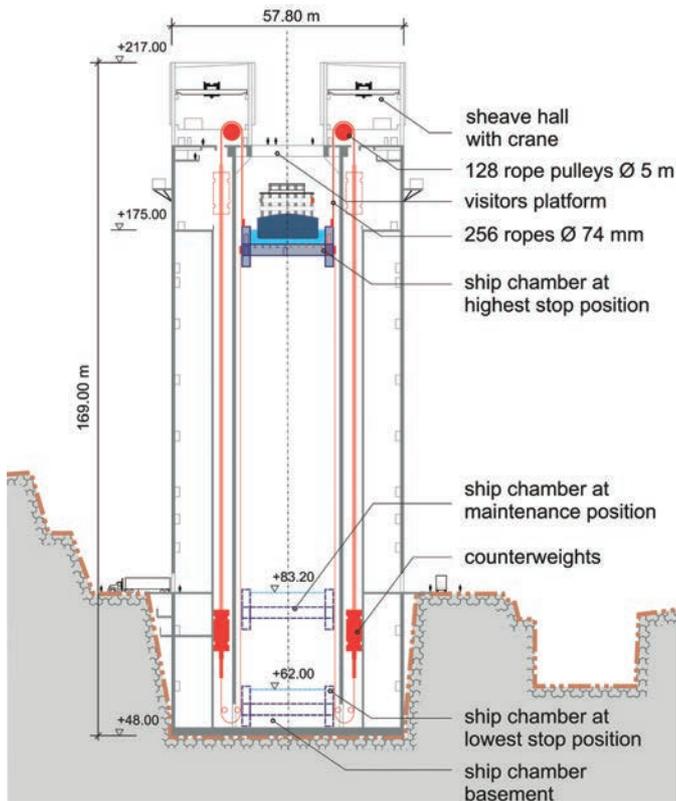


Fig. 3. Vertical section

walls. The walls and towers are connected by coupling beams distributed evenly over the height. Two bridges between the towers are located above the ship chamber, one for the central control room and one for a visitor platform. The guided counterweights, made of high-density concrete, run in shafts inside the towers. The ropes are deflected by rope pulleys at the top of the structure which are supported by reinforced concrete girders mounted on the shear walls and the towers. The rope pulleys are protected by sheave halls, two steel structures on the top of the building with crane runways (Fig. 3). The cranes can also serve the machine rooms on top of the ship chamber.

The ship lift is different from other structures of the same type realized up to now:

- Hitherto, nothing near the maximum lifting height of 113 m has ever been realized.
- The moving mass of approx. 34 000 tonnes (water + ship chamber + counterweights + ropes) and useable space of 120 × 18 × 18 m are larger than in any similar structure completed to date.
- As part of a dam complex with power stations, flood protection and two chains of locks, the ship lift is subjected to short-term operational water level fluctuations of up to 50 cm per hour on the downstream side.
- Hydrological water level fluctuations of 30 m on the upstream side and 11.8 m on the downstream side require special gate equipment at the upper and lower bays.

At the request of the owner, the China Three Gorges Project Corporation (CTGPC), which also operates the entire dam complex, the structure was designed according to German industrial standards, taking into account regional conditions such as seismic loads [2] and the building materials available.

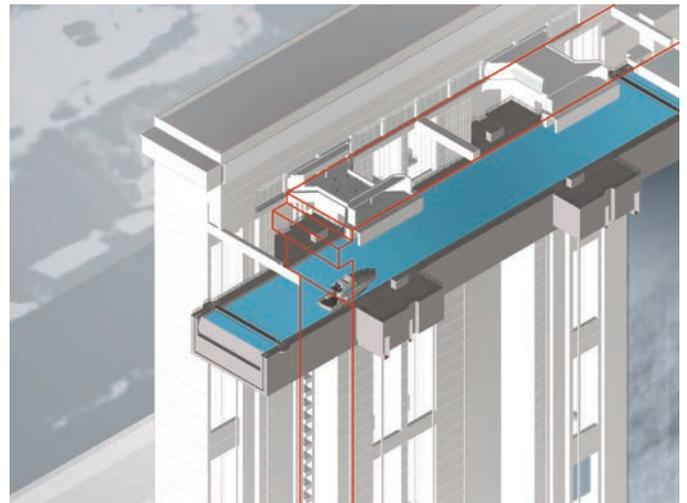


Fig. 4. Isometric view of ship chamber

### 3 Ship chamber

The ship chamber is designed for passenger ships with a max. water displacement of 3000 tonnes, max. length of 84.5 m, max. width of 17.2 m and max. draught of 2.65 m (Fig. 5). A pushed chain of barges with a water displacement of 1500 tonnes, length of 109.4 m and width of 14 m was taken into consideration as an alternative. The useable length inside the chamber between the anti-collision devices in front of the gates is 120 m. The clear distance between the fenders on the long sides is 18 m. Ships with a height up to 18 m above the waterline can use the ship lift.

#### 3.1 Chamber structure

The 132 m long and 23 m wide ship chamber structure will be built as a self-supporting steel construction. The depth of water in the chamber is 3.5 m and there is a free-board of 80 cm. On each side, 128 approximately evenly distributed ropes are connected to the counterweights, with 16 ropes in each counterweight group. This results in a very even load transfer into the chamber. The ends of the chamber and the machine rooms are the only areas where no ropes can be located (for structural reasons). The ship chamber extends into the lower and upper bays at the ends.

The design of the chamber was based on DIN 19704 ‘Hydraulic steel construction’, DIN 18800 and a ‘Guideline for Design’ agreed with the owner. The ‘Guideline for Design’ specifies all the loading cases for the project.

The chamber floor is an orthotropic plate (Fig. 8). The main beams on the long sides are three-cell box girders 10.0 m deep and 2.3 m wide. These very rigid main beams guarantee that the entire construction is stiff enough to ensure correct functioning in all operational situations. The box girders include lateral openings to provide adequate ventilation and reduce the uplift volume. Evenly spaced cross-girders with an average thickness of 18 mm are located beneath the floor of the chamber. In these areas the longitudinal girders are stiffened by compartments to ensure correct load transfer. Open sections are used for the cross-girders and the longitudinal stiffeners under the floor plate in order to prevent increasing the uplift (in the

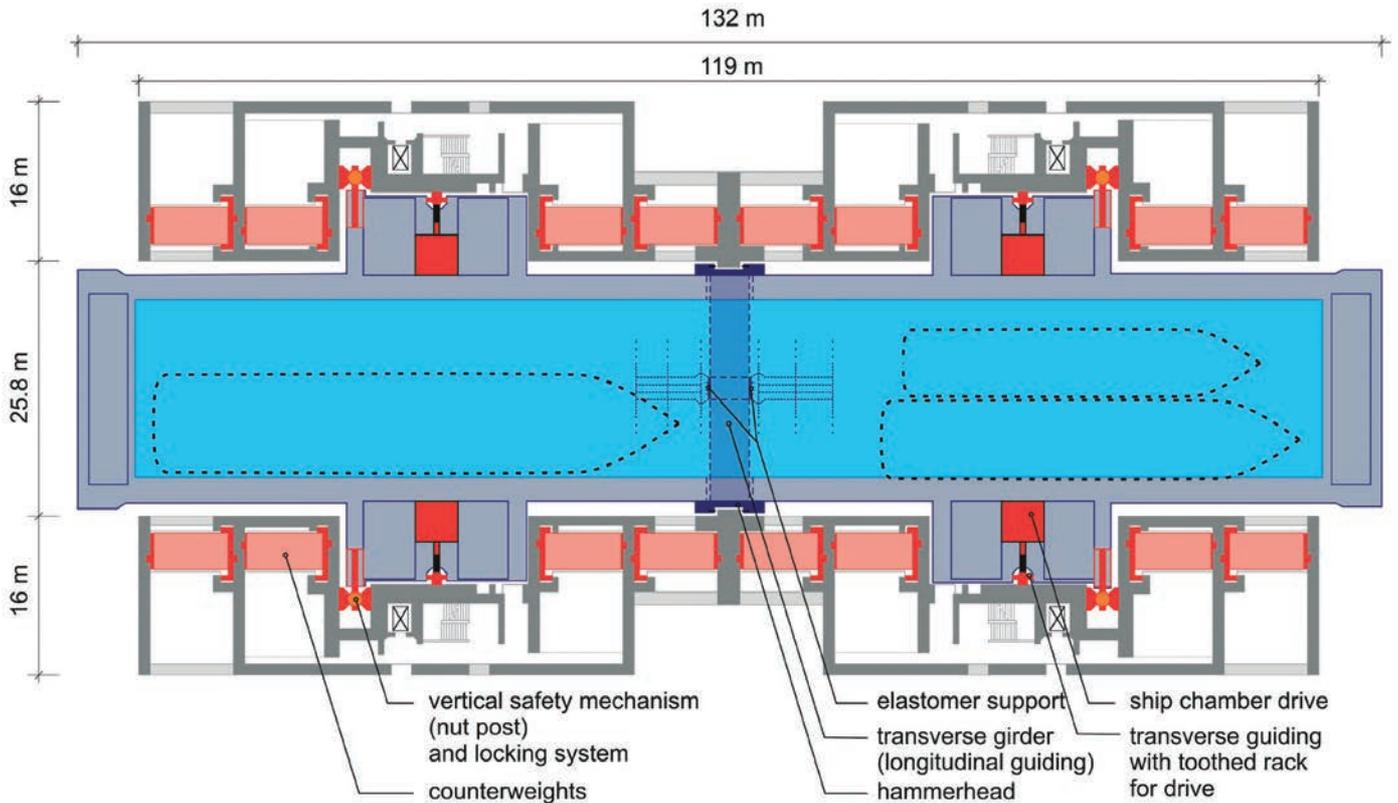


Fig. 5. Horizontal section

catastrophic loading case of a water-filled chamber basement with an empty chamber). This also ensures that there are no unwanted hollow spaces.

The design is based on Chinese steel grade Q 345 D, which is similar to German steel grade S 355. However, the yield strength values for Chinese steel decrease steeply, compared with the nominal value, as the plate thickness increases (Tab. 1). The impact toughness corresponds to class K2 (S 355 K2).

Table 1. Material properties of steel grade Q 345 D to GB 1591-94

Plate thickness [mm]	< 16	16–35	35–50	50–100
Modulus of elasticity [N/mm <sup>2</sup> ]	210 000			
Yield strength $f_{y,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	345	325	295	275
Impact toughness at -20°C [J]	34	34	34	34

### 3.2 Ropes and counterweights

Each rope is connected to one counterweight. The ropes are fixed to the outer web of each longitudinal girder by end fittings with eyes. Every two ropes are guided over a pair of rope sheaves on one rope pulley and connected to two individual weights. This method of handling the loads ensures that all ropes carry the same load. The individual weights are combined to form groups of 16 using a sling frame which ensures that each individual weight is prevented from falling should its rope break. Each group of counterweights is guided inside a reinforced concrete shaft. To compensate for uneven stretching of the ropes, each pair of ropes is connected to two counterweights via

a rocker that can even out small tolerances. The ropes have a nominal strength of 1960 N/mm<sup>2</sup> and a diameter of 74 mm.

### 3.3 Anti-collision device

At the ends of the ship chamber, an anti-collision device is positioned at a distance of 4.5 m from the back plate of the chamber gate to prevent damage by ships that do not stop in time. This device takes the form of a rope 50 cm above the waterline. The rope is installed below a rope barrier beam which also serves as a walkway. The maximum impact energy for the design was 1600 kNm.

### 3.4 Horizontal guiding

Horizontal guiding of the ship chamber is achieved by two independent systems, one in the longitudinal and one in the transverse direction.

The transverse guiding system is located beneath the machine rooms of the ship chamber drive (Fig. 6). Guide carriages are fixed to the sides of the toothed rack of the drive (see section 4.1) by means of prestressed rollers in such a way that they can resist compression and tension forces. The carriages are connected to the ship chamber via twin-chamber hydraulic cylinders. A reverse connection with the hydraulic system of the opposite cylinder ensures simultaneous movement of the cylinders (Fig. 6). The ship chamber is therefore always centred between the towers, even if the deformations of the towers differ.

The longitudinal guiding system (Fig. 7) has to absorb normal operational loads, such as water pressure when the chamber gate is open on one side, and pressure from the sealing mechanism (see section 4.4), together approx. 9000 kN,

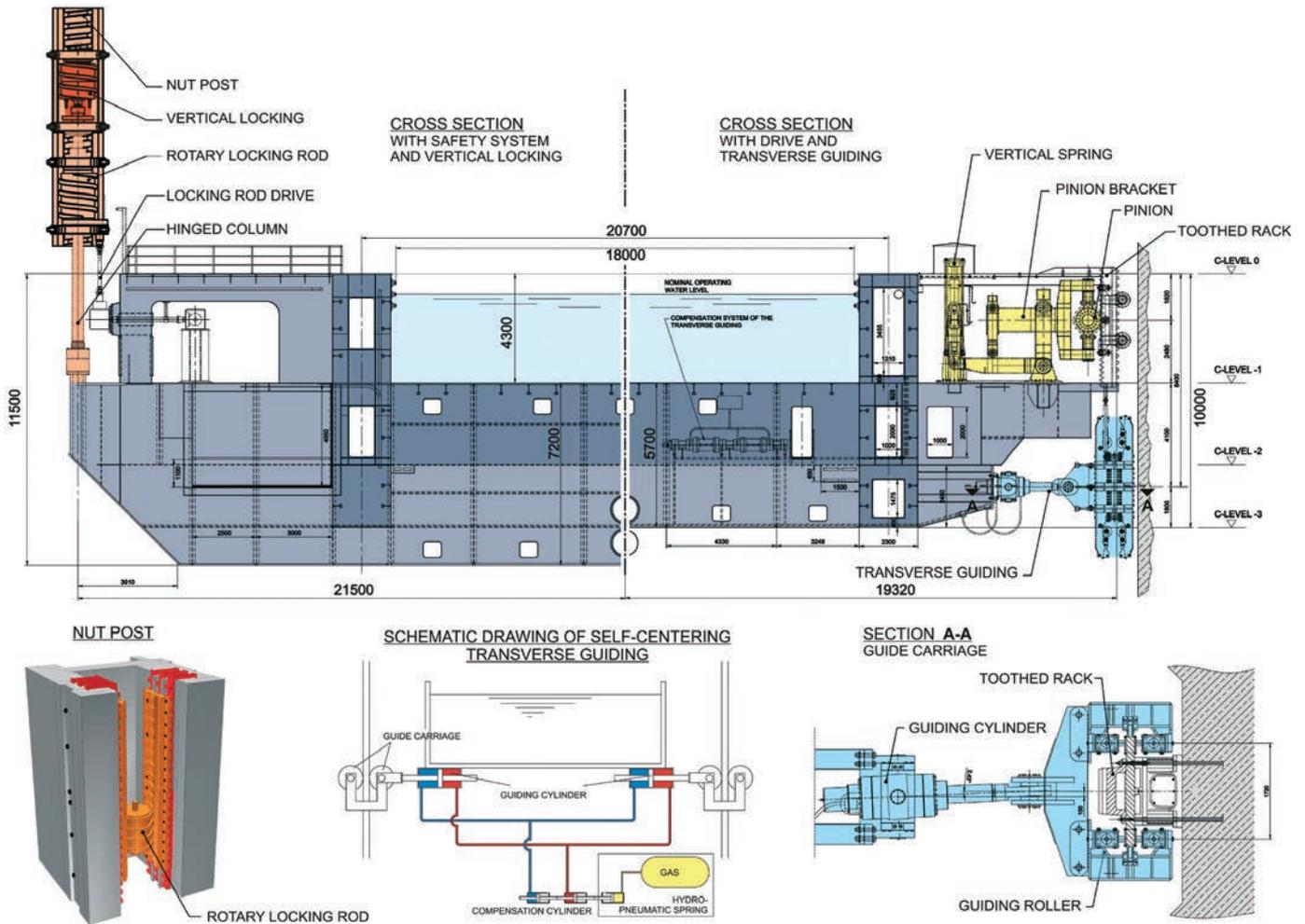


Fig. 6. Section through ship chamber: left – safety mechanism and vertical locking; right – drive and transverse guiding

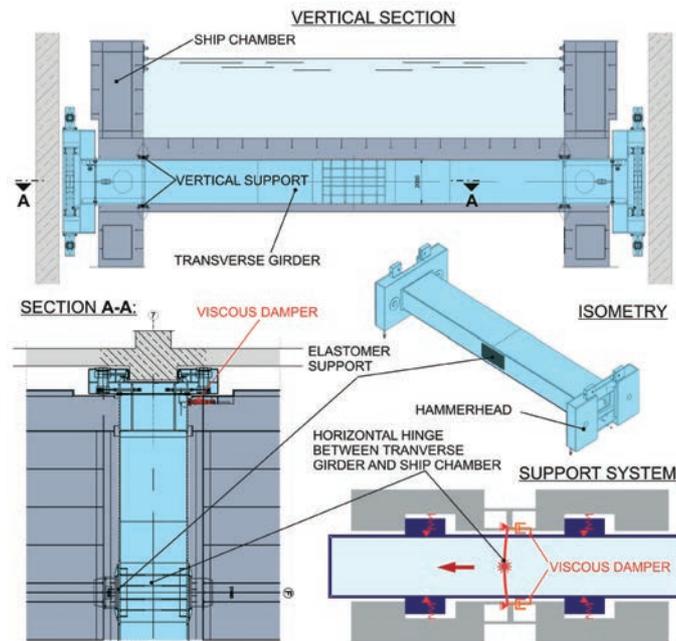


Fig. 7. Longitudinal guiding system with transverse girder

as well as abnormal loads such as ship impacts or earthquakes. To ensure that the high stiffness of the towers and the ship chamber do not lead to constraining forces because they deform differently, the longitudinal guiding system is statically determinate. A hollow section steel beam

measuring  $4 \times 2$  m spans transversely beneath the chamber floor and crosses the main longitudinal girders. The transverse girder is connected to the ship chamber by a horizontal hinge on the central axis of the chamber. This hinge takes the form of two conventional elastomer bearings, well known from bridge supports. In the hinge area, the transverse chamber floor girders are connected by additional steel plates to form a box girder and ensure load transfer. Hammerheads with rollers and sliders are located at both ends of the transverse girder. These hammerheads grip vertical reinforced concrete corbels on the side walls on the central axis of the whole structure. To lock the chamber at the stop position, the sliders in the guiding mechanism are mechanically pressed onto the corbel via eccentric sheaves. While the chamber is moving, there is a gap of 5 mm between the sliders and the roller rails. The rollers are supported by springs, which ensure that the sliders also come into contact with the corbels in case of high horizontal loads, e. g. due to earthquakes.

Two viscous hydraulic dampers are located between the hammerheads and the longitudinal girders of the ship chamber (Fig. 7). During normal operation, these viscous systems remain unloaded and the load transfer in the longitudinal direction takes place via the transverse girder only. During motion, there is a phase shift between the viscous forces and the elastic forces so that the bending forces on the transverse girder are decreased significantly. This means that for the design of the transverse girders, fa-

tigue considerations are more important than earthquake loads [3]. Furthermore, earthquake loads on the central wall of the concrete structure could be significantly reduced.

### 3.5 Design calculations

In addition to the ‘normal’ actions on building structures such as dead and imposed loads, the following special load cases also had to be taken into consideration:

- incorrect operation of the drive
- sunken ship
- ship collision
- ropes breaking
- buoyancy
- earthquakes
- different water levels
- water pressure when one gate is open
- chamber completely full/empty

The calculations for the ship chamber structure were carried out using 3D FEM computations, modelling 1/4, 1/2 or the entire structure (Fig. 8). Within these calculations, the main structures were modelled using 3D shell elements.

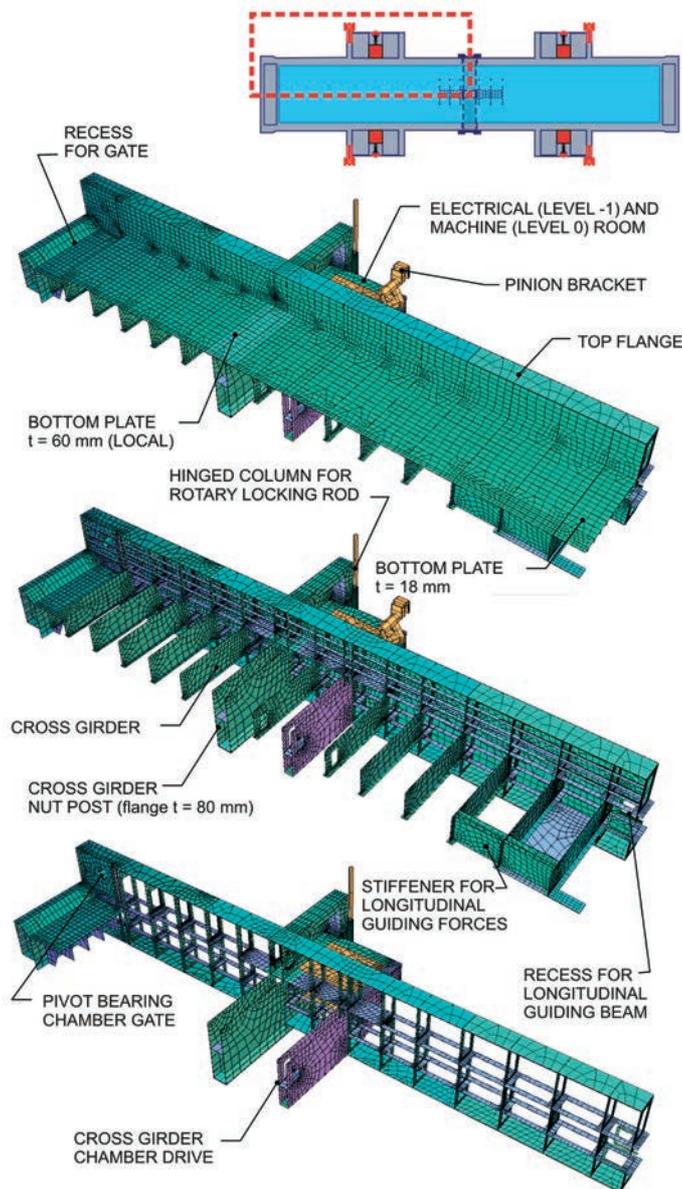


Fig. 8. FEM model of 1/4 of the ship chamber

Smaller parts, e. g. stiffeners, were modelled using coupled beam elements. Stability aspects such as buckling were investigated separately in detail.

### 4 Mechanical parts

By combining the drive and transverse guiding systems and the vertical locking and safety systems, it was possible to optimize the design so that the length of guide rails could be almost halved, thus reducing costs.

#### 4.1 Ship chamber drive

The four drives are installed on the long sides of the chamber, two on each side at a distance equal to about a quarter of the chamber length from each end (Fig. 5). The machine rooms

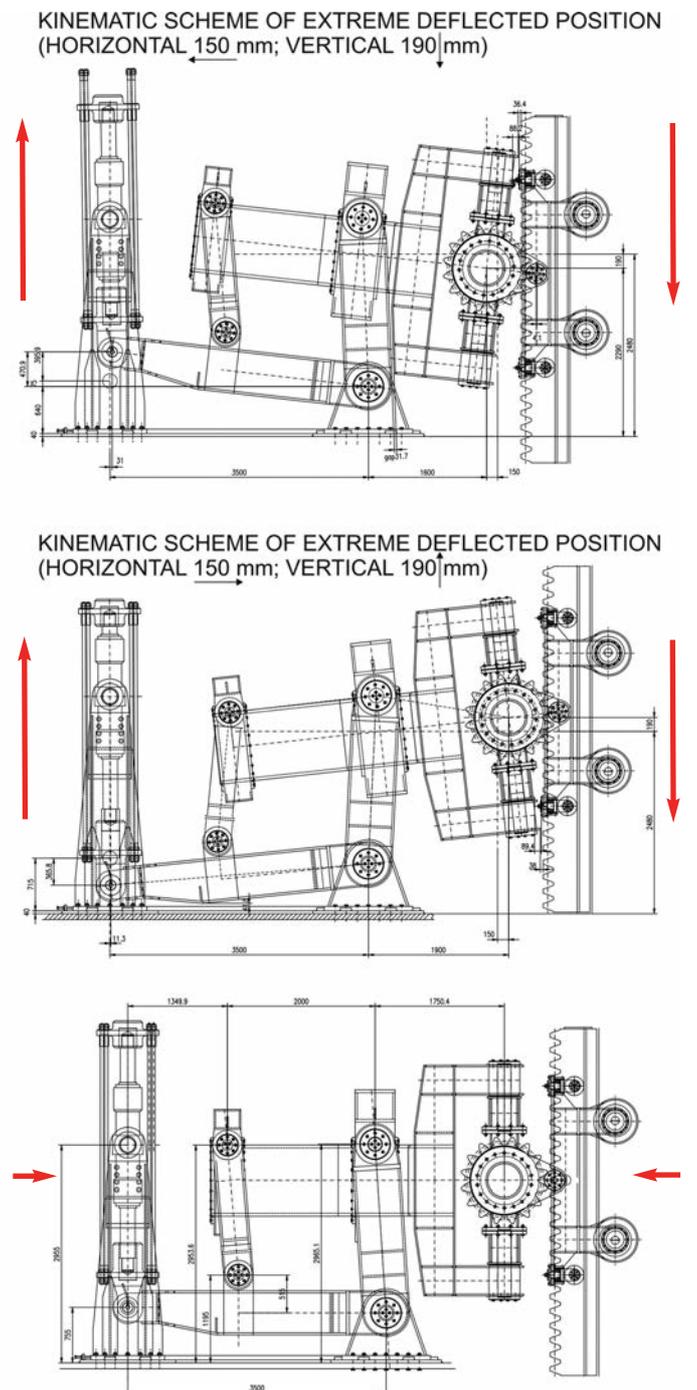


Fig. 9. Kinematics of chamber drive

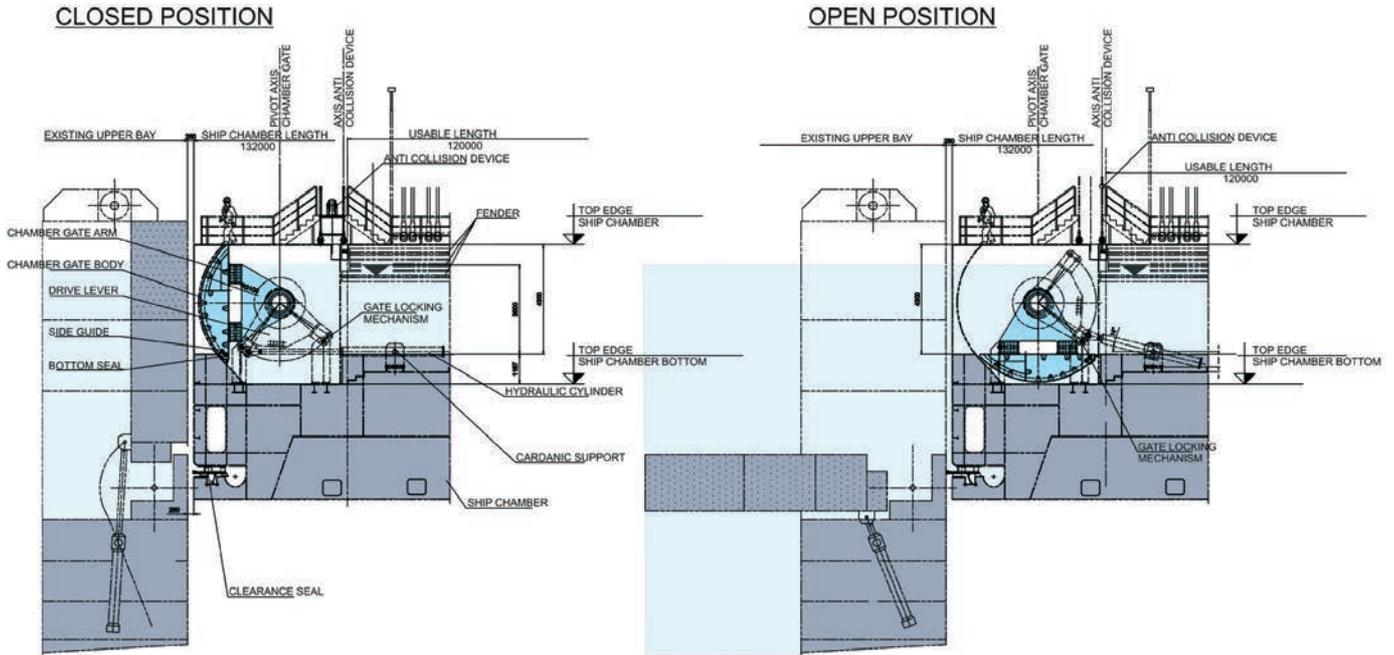


Fig. 10. Ship chamber gate – closed and open

are in this area and extend into the towers so that the forces from the ship chamber can be transferred into the reinforced concrete structure. The transverse guiding system and the safety mechanism (see section 5) are also located here in order to concentrate the mechanical equipment in one area. Two watertight electricity rooms are located below the machine rooms.

The chamber is driven by four pinions that engage with toothed racks built into the towers. Each pinion is driven by two electric motors and is elastically mounted on a bearing bracket in the machine room (Figs. 6 and 9). All drives are interconnected via synchronizing shafts under the chamber so that if a motor in one drive station is out of action, the missing drive moment is transferred by the shafts to the affected area. The shafts are arranged in an H-form and are connected with each other on the chamber axis. This prevents unequal torsion in the shafts.

The pinion is supported by the bracket in such a way that both vertical and horizontal deformations are compensated (Fig. 9). The kinematics of the mounting ensures that only minor relative deformations can occur between the pinion and the toothed rack. Guide carriages behind the toothed rack ensure that the pinion is always gripped by the rack. This purely mechanical configuration renders complex and expensive control technology unnecessary. A vertical prestressed spring is located at the other end of the bracket. This spring is designed for normal operational loads only, such as friction, acceleration forces and small water level differences. In case of higher loads, the spring locks and the safety mechanism starts to react (see section 5).

During the lifting operation, the chamber accelerates at  $0.01 \text{ m/s}^2$  up to a velocity of  $0.2 \text{ m/s}$ . This results in a net drive time of approx. 10 minutes.

#### 4.2 Water level control

To ensure control during operation, the chamber is motor-driven during both ascent and descent. On the ascent, the chamber is moved with a slightly higher water level than

the nominal value of 3.50 m. On the descent, the chamber is slightly less full so that the motors must always be in operation. The construction is, however, designed in such a way that the lift can also be operated in generating mode. Motor-driven mode leads to alternating stresses on the pinions, which were taken into consideration in the design process. After a ship has entered the chamber, the chamber gate is closed and the water level is adjusted to the nominal level within 5 minutes by pumps at a rate of  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ . Once the outer gate is closed, the water in the gap between the gates (around  $100 \text{ m}^3$ ) is evacuated within 90 seconds and temporarily stored in a pipe system below the chamber. While the chamber is moving, the water is pumped steadily back into it, which takes 9 minutes. This keeps the flow speed in the chamber low and avoids additional forces on ship hawsers.

#### 4.3 Vertical locking system

Since the drive cannot support very high loads because of fatigue considerations, an additional vertical locking system has been designed. This locking system ensures stability at the stop position and transfers the additional loads resulting from water level fluctuations in the lower bay (approx.  $50 \text{ cm/h}$ ). An additional locking rod (Fig. 6) is located above the rotary locking rod of the safety mechanism. During the movement of the chamber, this vertical locking rod rotates freely in an internal thread (nut post, see section 5). The rod consists of two separate vertical segments which are spread apart and pressed against the nut post at the stop position. This prevents any vertical movement of the ship chamber and ensures that the connection to the bay is sealed.

#### 4.4 Chamber gates

The chamber gates are designed as segments with a radius of 3.1 m. In the open position, the gate disappears into a recess in the chamber floor (Figs. 8 and 10). The gate is

moved by supporting arms that are located in recesses in the main longitudinal girders. The supporting arms are connected to the gate drive via torsion tubes which pass through the main girders. The gate drives are located in the main girder and are thus protected against external influences. Each gate includes a hollow space so that buoyancy reduces the drive forces required. The gate can be moved into a vertical position for maintenance purposes and is locked mechanically in all end positions.

The gap between ship chamber and upper/lower bay is closed by a clearance sealing mechanism at each end of the chamber. This sealing mechanism consists of a C-shaped steel plate connected to the chamber floor and the main girders. At the stop position, the plate, fitted with an edge seal, is moved outwards and pressed against the gate of the upper/lower bay.

**4.5 Counterweight guiding**

The counterweights must be guided horizontally. This is especially important in the case of seismic loads because otherwise a counterweight group may behave like a pendulum and cause severe damage to the reinforced concrete structure. The guiding system is statically determinate to avoid constraints (Fig. 5): in the transverse direction, the sling frame is supported at two points; in the longitudinal direction, the counterweights are guided on one side only in a way that resists tension and compression forces.

**5 Safety mechanism**

In the event of an accident, a special safety mechanism ensures that the ship chamber is supported vertically in a controlled manner at any height. During normal operation, four short screw sections, which are connected to the ship chamber vertically and are known as rotary locking rods, rotate continuously, synchronously and unloaded in an internal thread (nut post) that is fixed to the towers

over their entire height (Fig. 6). If an accident occurs, this rotation is blocked and traction is achieved that supports the ship chamber independently of the ropes.

The safety mechanism also prevents overloading of the pinion and the brakes in the event of an accident by safely securing the ship chamber to the four nut posts via the four rotary locking rods. This situation may occur if the ship chamber is emptied or overfilled. The ship chamber will be emptied routinely about once a year for maintenance or repair work.

The nut posts each consist of two internal thread segments anchored in the RC towers (Figs. 11 and 12). They

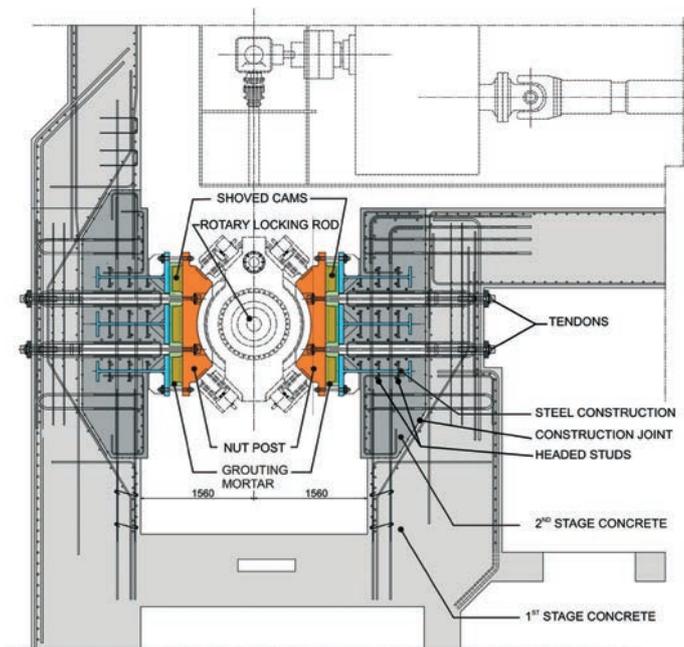


Fig. 11. Embedded nut post for safety mechanism and vertical locking

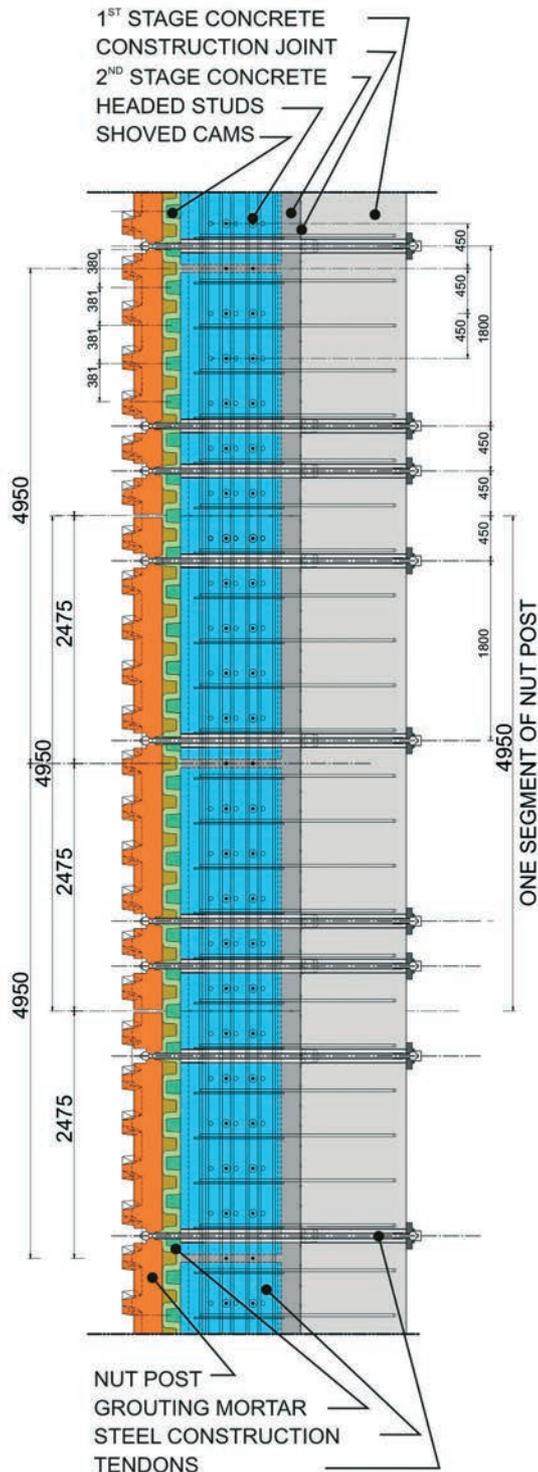


Fig. 12. Nut post, vertical section

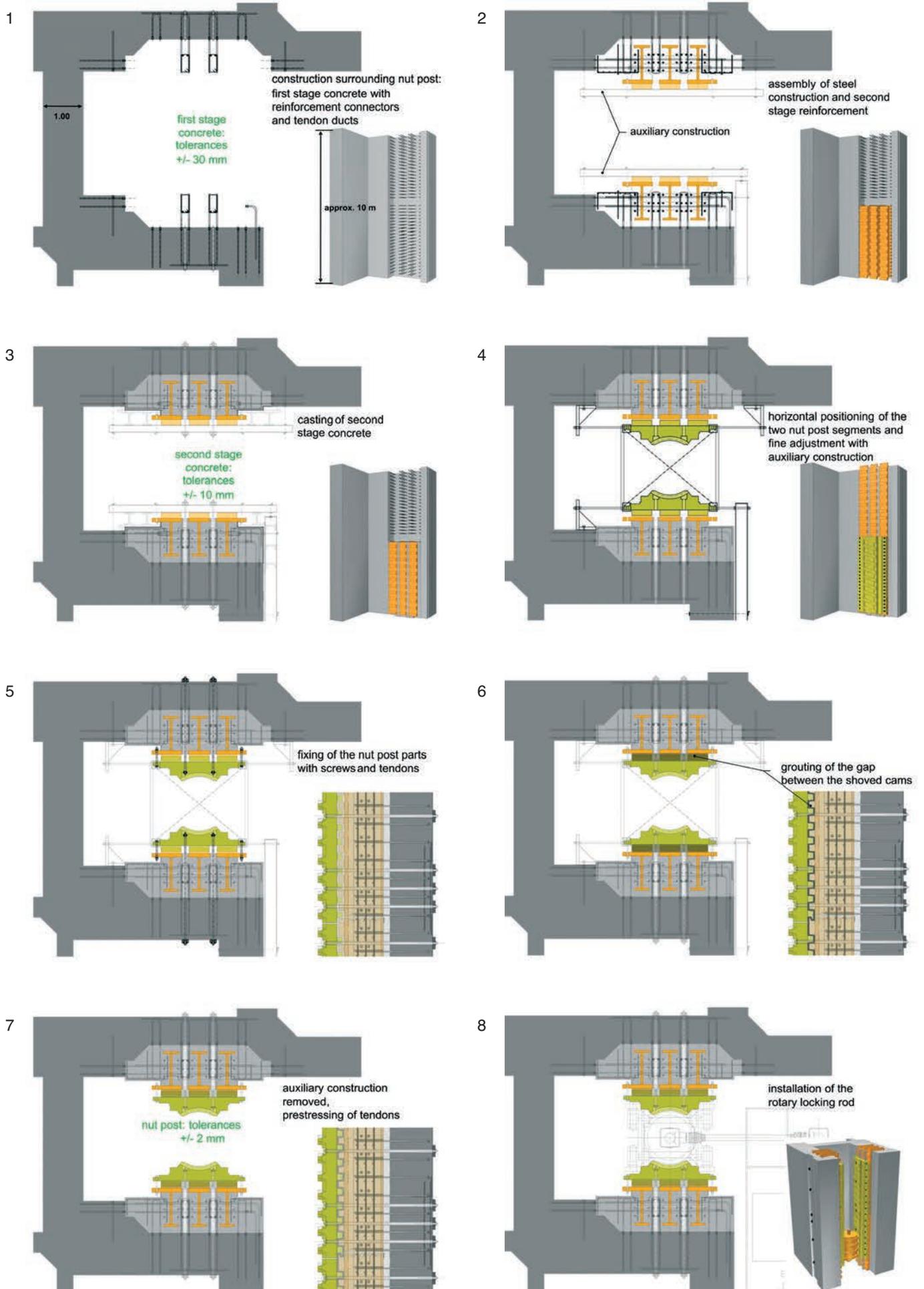


Fig. 13. Nut post erection procedure

are made of GS 25 CrNiMo 4 V cast steel, hardened and tempered in accordance with DIN EN 10083, and have a thread pitch of 450 mm. The four rotary locking rods are made of 42 CrMo 4 V steel, hardened and tempered; they are connected to the ship chamber by hinged columns. They have four thread turns, a height of 1.8 m and an external diameter of 1535 mm.

During normal operation the rotary locking rod rotates freely due to a coupled system of synchronized shafts. The force in the pinion is constantly monitored. The load on the pinion corresponds to the force in the vertical spring, in accordance with the lever principle. If the pinion force increases due to water loss (for example) and reaches the switching point (approx. 1600 kN), chamber movement will be stopped. If the load continues to increase, the prestressing force of the vertical spring will be exceeded (approx. 1650 kN). The pinion will then begin to deflect, preventing the drives and the rotary locking rod from rotating. During the deflection of the pinion, the force in the pinion increases further, up to approx. 2000 kN depending on the characteristics of the spring. Rotation of the pinions is prevented by the stopping brakes. Once the gap between the rotary locking rod and nut post has closed so that traction is achieved, any further load increases will mainly be transferred into the nut post by the safety mechanism.

The maximum design load for the safety mechanism is reached in the case of a ship chamber that is empty due to maintenance and simultaneous unplanned filling of the ship chamber basement with water. In this case the ship chamber is subjected to strong buoyancy with an upward force of up to 123 000 kN that must be resisted by the four safety mechanisms. During normal maintenance, the force on the nut posts will be up to 87 000 kN (upwards). In the case of a sunken ship, the additional load will be 30 000 kN (downwards).

## 6 Embedded parts

It is necessary to connect mechanical parts to the reinforced concrete structure at three main places:

- the toothed rack (cast steel) of the drive with rails on the sides for transverse guiding,
- the sliding plates for longitudinal guiding, and
- the nut posts of the safety mechanism.

The fitting and operation of the drive and the guiding and safety mechanisms place great demands on the construction tolerances for these components. The usual dimensional tolerances for buildings or civil engineering structures must be adjusted to meet mechanical engineering requirements. The expected tolerances for the reinforced concrete construction in the range of  $\pm 40$  mm were reduced to values of  $\pm 2$  mm (as required for the mechanical parts) by means of a construction procedure with first- and second-stage concrete as well as high-strength grouting between the steel substructure and the cast mechanical components.

### 6.1 Mounting of the nut post

The construction procedure is explained below using the nut post as an example (Figs. 11, 12 and 13).

1. Construction of the reinforced concrete towers  
During construction, the four towers with concrete walls that are normally 1.0 m thick (C25/30) are adjusted in accordance with the predicted deformations due to creep and shrinkage. Reinforcement splices and ducts for later prestressed tendons of grade St 950/1050 are provided. An accuracy of  $\pm 30$  mm is expected here.
2. Embedding of steel substructure in second-stage concrete  
Embedded steel parts of grade Q 345 D are installed using positioning devices. These embedded parts transfer their loads via headed studs evenly distributed over the height. Between these, connecting rods are installed and the gaps are filled with second-stage concrete. This reduces the tolerances to  $\pm 10$  mm.
3. Fitting the nut post cast elements  
In a last step to achieve a tolerance  $\pm 2$  mm, the cast sections of the nut post, each of which is 4.95 m long, are fixed to the embedded steel parts using fit-up aids. Both the embedded parts and the nut post have horizontal shoved cams at intervals of 381 mm which are mounted in such a way that they interlock with a gap of 50 mm between them. Fine adjustment is carried out by means of M30 grade 10.9 bolts. The gap is filled with a high-strength, low-shrinkage, low-expansion mortar so that force transmission is possible. Finally, the nut post sections are secured to the concrete structure by prestressed tendons.

## 6.2 Grouting mortar investigations

In the 'buoyancy' loading case (see above), an upward load of up to 15 400 kN may occur on each half of a nut post. For the individual cast elements, i. e. for each half of a nut post, it was shown that the most unfavourable loading point is at the lower end of the section (Fig. 15). In this case, approx. 70 % of the force is borne by the last tooth of the thread.

This loading case has been investigated in detail using FEM calculations with non-linear constitutive equations for the grouted mortar (Fig. 14) and spring elements that take into account the friction between the mortar and the steel, including spring failure in the case of tensile strain. Here, it was observed that due to the high stiffness of the mortar, force transfer through the mortar primarily takes place via only a few shoved cams in the vicinity of the loading point. Furthermore, a horizontal load component results from the friction between the inclined thread of the rotary locking rod and the nut post (friction coefficients of up to  $\mu = 0.2$ ) and this tries to 'peel' the nut post away from the embedded part (Fig. 15). However, it has been shown that the forces do not reach the strength of the mortar ( $> 90$  MPa after 28 days).

To validate this system, a special testing programme was developed for CTGPC that investigates both the handling and the loadbearing capacity of the grouting (Fig. 16). Vertical grouting over a height of more than 4 m was a new challenge even for the manufacturers of such mortars. The tests showed that it is not necessary to install the mortar in layers as originally planned. Adequate distribution of the

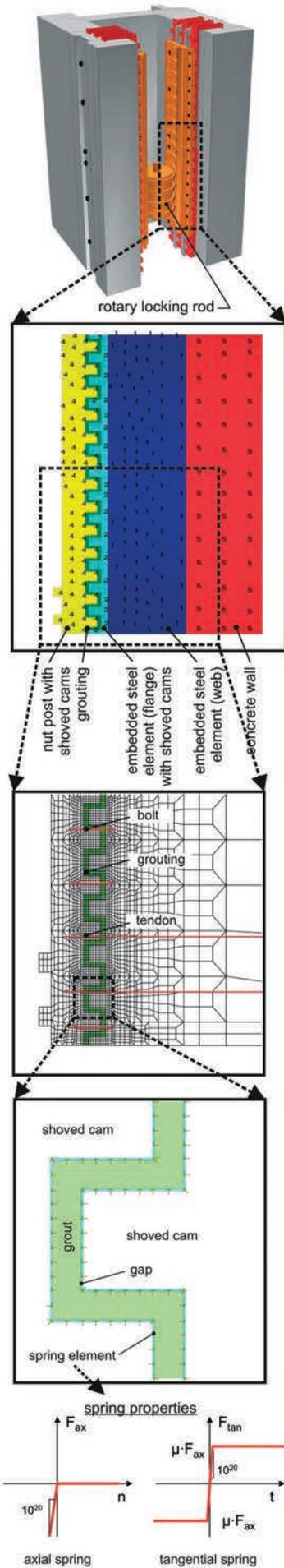


Fig. 14. Non-linear FEM calculation for mortar grouting between embedded steel element and nut post

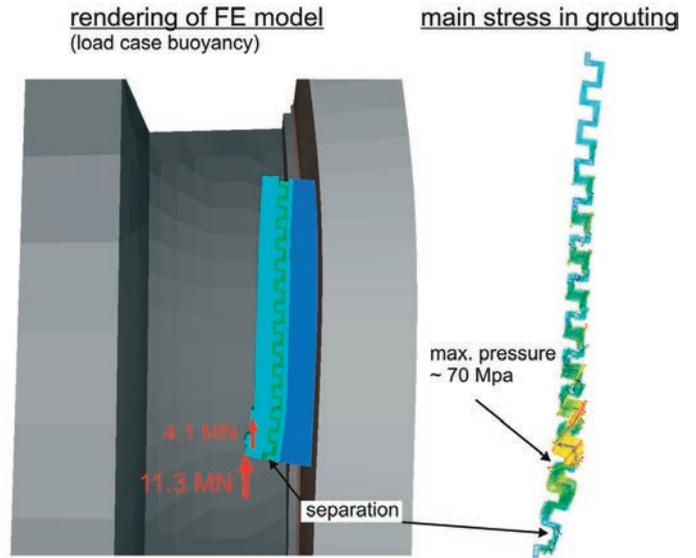


Fig. 15. Results of FEM calculation for mortar grouting

mortar is ensured by designing the grouting channel with a central duct to distribute the mortar, which is injected from below, in conjunction with the chosen distance between the block dowels. Grouting from below prevents separation of the mortar. The only prerequisite is that the construction must be designed for the higher injection pressure. However, this also speeds up the construction process significantly.

This form of jointing using grouted mortar, which is well known from bridge supports, machine foundations in

Table 2. Project Partners

Owner/operator works planning/construction	China Three Gorges Project Corporation, Yichang, China
General planning/project management	Joint venture: Krebs & Kiefer International/Lahmeyer International
Design of RC towers	Lahmeyer International, Bad Vilbel
Structural design: RC towers, ship chamber, earthquakes, embedded parts	Krebs & Kiefer, Karlsruhe
Design of longitudinal guiding system, ropes, counterweights, chamber gates	IRS – Ingenieurbüro Rapsch & Schubert, Würzburg
Design of ship chamber, drive, transverse guiding system, locking mechanism	SBE – Spezialbau Engineering, Magdeburg
Design of electrical equipment	DriveCon, Dettelbach
Validation of design, computational fluid dynamics,	Germanischer Lloyd, Hamburg
Grouting mortar test programme	Krebs & Kiefer Karlsruhe/MPA (Materials Testing Institute), University of Karlsruhe
Advice to the owner	BAW – Federal Waterways Engineering & Research Institute, Karlsruhe

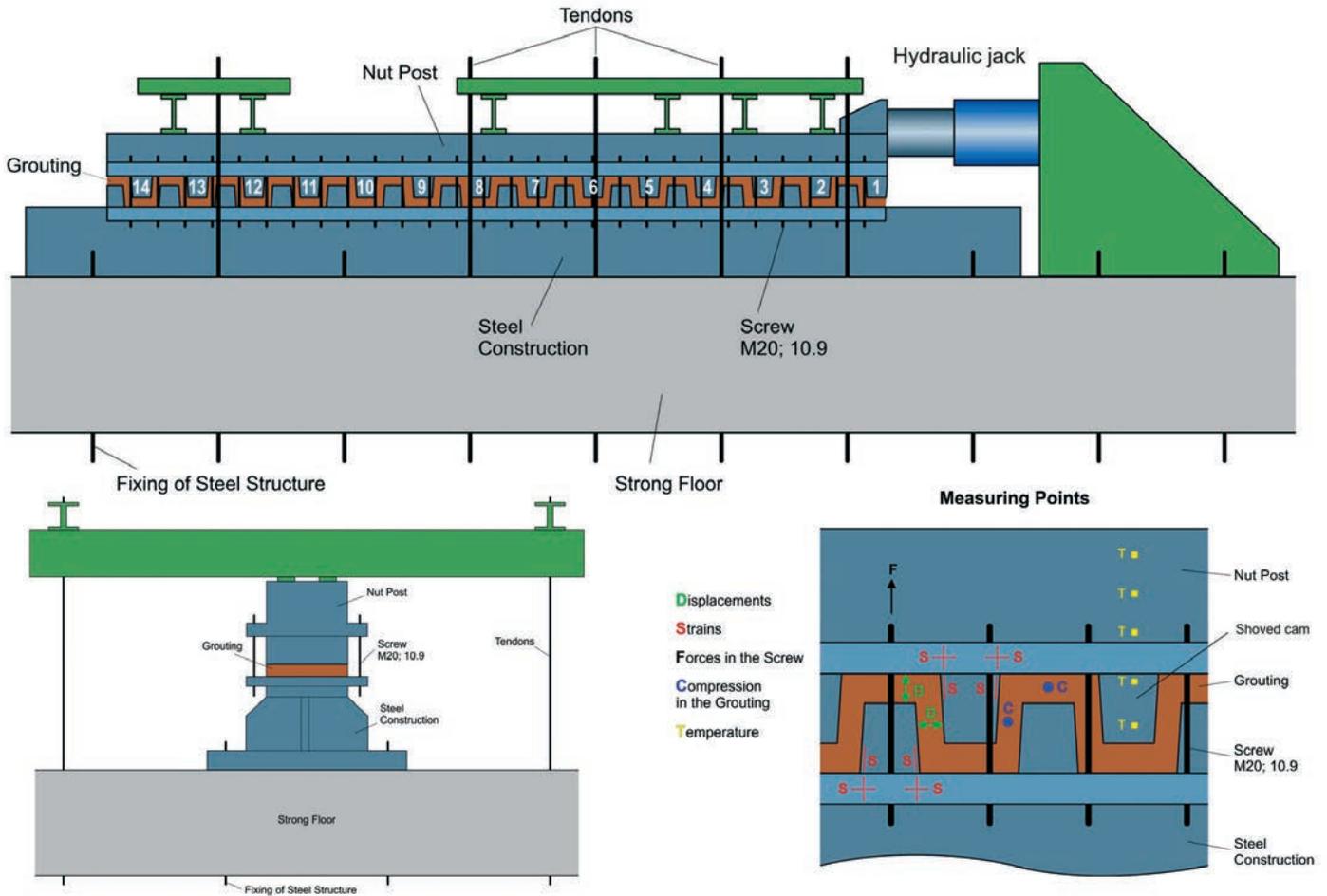


Fig. 16. Testing setup for mortar grouting

plant engineering [4] or point fittings in glass structures, for example, is therefore a worthwhile alternative, not only for load transfers from steel to concrete but also from steel to steel.

## 7 Acknowledgements

The Three Gorges ship lift is a structure that is not only unusual in its purpose, but also in its components. With its enormous dimensions and complex engineering solutions, the ship chamber effectively represents a ‘moveable building’!

A project on this scale can only be successfully realized with the full cooperation of all those involved, not only within the contractor’s general planning team but also on the client side and from external advisers. Many consultancies and institutions (Tab. 2) share responsibility for the design presented here and for many of the details shown. The authors would like to take this opportunity to express their gratitude to all those concerned for their excellent cooperation. We would especially like to thank the owner, China Three Gorges Project Corporation, for its confidence and for its constant promotion of the project. The planning of the work and the construction process will take place under the direction of CTGPC.

In particular, we are deeply indebted to Prof. Dr.-Ing. *Albert Krebs*, who initiated our participation in this challenging project and actively supported the team with the experience gained during his long and successful career in civil engineering.

## References

- [1] *Krebs, D., Runte, T., Strack, G.*: Planung für das Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China. Bautechnik 83 (2006), No. 2, pp. 73–84 (English translation: www.kuk.de → publications).
- [2] Chinese Design Code: Specifications for seismic design of hydraulic structures, DL 5073 – 2000
- [3] *Akkermann, J., Hewener, A.*: Erdbebenbemessung des Schiffshebewerks am Drei-Schluchten-Staudamm, China. Bauingenieur 81 (2006), No. 4, pp. 171–180.
- [4] German RC Committee (DAfStb): Code of Practice, Manufacture and Application of Cement-Bound Grouting Concrete and Grouting Mortar, June 2006

**Keywords:** ship lift; hydraulic steel construction; embedded parts; mortar grouting

## Authors:

Dr.-Ing. Jan Akkermann, Dipl.-Ing. Thomas Runte, Dipl.-Ing. Dorothea Krebs, Krebs und Kiefer, Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Karlstrasse 46, 76133 Karlsruhe, Germany, www.kuk.de

# In Ihrer Nähe. Für Ihr Projekt.

## KREBS+KIEFER DEUTSCHLAND

### BERLIN

T +49 30 217342-0  
E berlin@kuk.de

### FREIBURG

T +49 761 29666-0  
E freiburg@kuk.de

### MAINZ

T +49 6131 21770-0  
E mainz@kuk.de

### BITTERFELD-WOLFEN

T +49 3493 77326  
E bitterfeld-wolfen@kuk.de

### HAMBURG

T +49 40 30373395-0  
E hamburg@kuk.de

### MÜNCHEN

T +49 89 2154511-100  
E muenchen@kuk.de

### DARMSTADT

T +49 6151 885-0  
E darmstadt@kuk.de

### KARLSRUHE

T +49 721 3508-0  
E karlsruhe@kuk.de

### NORDBAYERN

T +49 6026 99889-0  
E nordbayern@kuk.de

### DRESDEN

T +49 351 250968-0  
E dresden@kuk.de

### KÖLN

T +49 221 234757  
E koeln@kuk.de

### STUTTGART

T +49 711 49066377  
E stuttgart@kuk.de

### ERFURT

T +49 361 42064-0  
E erfurt@kuk.de

### LEIPZIG

T +49 341 5830430  
E leipzig@kuk.de

### WÜRZBURG

IRS Stahlwasserbau Consulting AG  
T +49 931 359334-0  
E info@irs-stahlwasserbau.de  
W www.irs-stahlwasserbau.de  
E wuerzburg@kuk.de

## KREBS+KIEFER INTERNATIONAL

### KREBS+KIEFER INTERNATIONAL

GMBH & CO. KG  
DARMSTADT  
T +49 6151 885 252  
E international@kuk.de

### KREBS UND KIEFER & PARTNERS

INTERNATIONAL SARL  
TUNIS  
T +216 71 950 848  
E tunis@kuk.de

### EURL KREBS UND KIEFER ALGÉRIE

ALGIER  
T +213 21 69 24 57  
E algier@kuk.de

### GEING KREBS UND KIEFER

INTERNATIONAL & OTHERS LTD.  
SKOPJE  
T +389 2 3109 795  
E skopje@kuk.de