

## **PLANUNGEN FÜR DAS NEUE SCHIFFSHEBEWERK AM DREI-SCHLUCHTEN-STAUDAMM IN CHINA**

*Krebs, Dorothea; Ingenieurbüro Krebs und Kiefer, Karlsruhe*

*Kunz, Claus; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe*

*Strack, Gerhard; Lahmeyer International, Bad Vilbel*

*Zhao Xijin, China Three Gorges Project Corporation, Yichang*

### **EINLEITUNG**

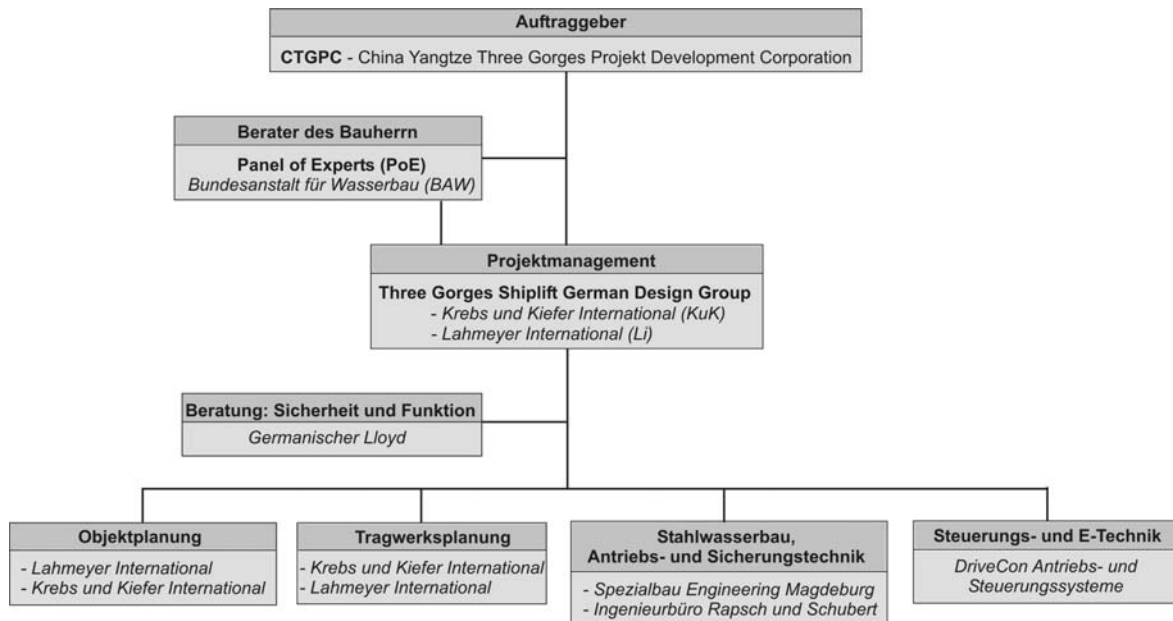
Planungen für ein senkrechtes Schiffshebwerk nach dem Gegengewichtsprinzip führten den Bauherrn und Betreiber des Drei-Schluchten-Staudamms, die China Three Gorges Project Corporation (CTGPC) zwecks Know-How-Transfer nach Deutschland. Deutschland verfügt in Bau und Betrieb von Senkrecht-Schiffshebwerken über langjährige Erfahrungen, wobei derzeit 4 Senkrecht-Schiffshebwerke mit Hubhöhen zwischen 13 m und 38 m in Betrieb sind. Für ein neues, zweites Schiffshebwerk Niederfinow, an der Havel-Oder-Wasserstraße bei Eberswalde, mit einer Hubhöhe von 36 m, wird durch das Wasserstraßen-Neubauamt Berlin die Ausschreibung geplant. Es ergänzt ein vorhandenes Schiffshebwerk, das 1934 gebaut wurde, und sich durch seinen robusten Betrieb bis heute auszeichnet.

CTGPC beauftragte Ende 1999 die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, mit der Ausarbeitung einer Machbarkeitsstudie für ein Antriebs- und Sicherungssystem des geplanten chinesischen Schiffshebwerks. 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-Institutionen beteiligt, die auch bei Vorplanungen für das neue Schiffshebwerk Niederfinow mitwirkten (Krebs und Kiefer; Germanischer Lloyd; Spezialbau Engineering GmbH). Nach intensiver Prüfung der Studie entschied sich CTGPC für die in der Machbarkeitsstudie vorgeschlagenen Lösungen. Nachdem mittlerweile weitere Ingenieurbüros in weiteren Planungsphasen für das Schiffshebwerk Niederfinow eingebunden waren und sind, sollte auf Wunsch von CTGPC sämtliches deutsches Ingenieur-Know-How für Schiffshebwerke bei der Ausschreibungsplanung der chinesischen Anlage gebündelt werden.

Hierzu haben sich die beiden Ingenieurunternehmen Krebs und Kiefer 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 gebunden.

Weiterhin wurde beratend der Germanische Lloyd für die Themen Sicherheit und Funktion in das Joint Venture eingebunden.

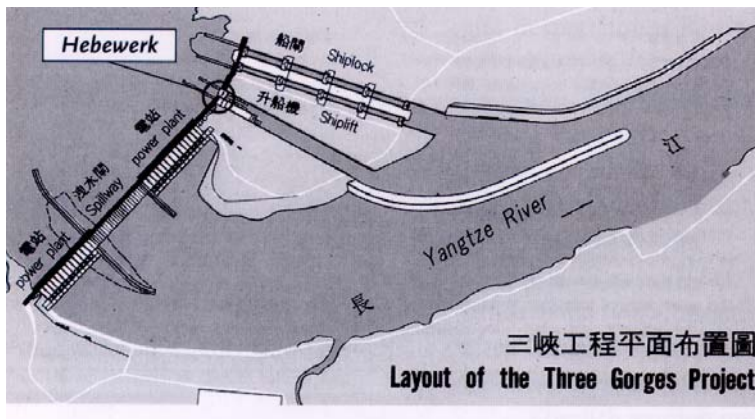
Als Berater des Bauherrn im Sinne eines Panel of Experts agiert die Abteilung Bautechnik der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und übernimmt beratende und koordinierende Funktion.



**Bild 1: Struktur des Joint Venture**

### **DAS PROJEKT "DREI SCHLUCHTEN SCHIFFSHEBEWERK"**

Zur Beförderung von Passagierschiffen am Drei-Schluchten-Staudamm am Yangtse, in der Nähe der Stadt Yichang in der Provinz Hubei, China, ist ein Senkrecht-Schiffshebewerk nach dem Gegengewichtsprinzip vorgesehen.



**Bild 2: Lageplan des Drei-Schluchten-Staudamm-Projekts**

Für die Schifffahrt stehen zur Überwindung von 113 m Hubhöhe eine zweizügige, aus fünf Schleusen bestehende Schleusentreppe, mit Nutzabmessungen von jeweils 280 m Länge, 34 m Breite und 5 m Wassertiefe,

sowie künftig ein Senkrecht-Schiffshebewerk zur Verfügung. Die nutzbaren Abmessungen des Troges des Schiffshebewerks sind mit 120 m Länge, 18 m Breite sowie 3,5 m Wassertiefe vorgesehen (Tabelle 1).

Der Bau des Dammes ermöglicht die Schiffbarkeit des Yangtse auf 660 km Länge von Yichang bis Chongqing für Schiffe bis 10000 BRT.

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

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

- Die Trogabmessungen und dadurch die mit Gegengewichten zu bewegenden Massen (2 x 17250 t) sind größer als bei bisher ausgeführten Anlagen,
- als Teil einer Stauanlage mit Kraftwerken, Hochwasserentlastung und zwei Schleusentreppen ist 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 den oberen und unteren Haltungen,
- vorrangig für die Passagierschifffahrt bestimmt (die Güterschifffahrt soll die Schleusentreppen benutzen), ist ein besonders hoher Sicherheitsstandard erforderlich.

Max. Bauwerksabmessungen (L/B/H)	119,0 m/ 57,8 m/ 169,0 m
Max. Trogabmessungen (L/B/H)	132,0 m/ 39,2 m/ 11,3 m
Max./ min. Hubhöhe	113,0m/ 71,2 m
Max. Wasserstandsunterschiede	Oberwasser 30 m, Unterwasser 12 m
Nutzlänge/ -breite/ -höhe	120,0 m/ 18,0 m/ 18,0 m
Max. Tragfähigkeit	3.000 t
Gesamttraggewicht Bewegte Masse	16.800 t 35.500 t
Fahrtzeit (ohne Ein- und Ausfahrt) Betriebsfahrten/ Tag	21 min (für max. Hubhöhe) 18 Auf- und Abfahrten/ Tag

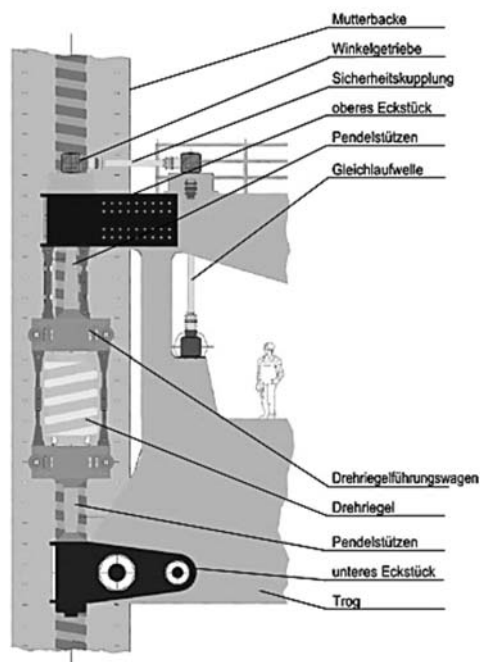
**Tabelle 1: Charakteristische Kenndaten**

Auf der Grundlage der Bewertung von Antrieben bestehender Schiffshebwerke in Deutschland und im Ausland, z.B. Seilwindenantrieb (SHW Strépy Thieu), Zahnstangenzahntrieb (SHW Lüneburg), Mutter mit angetriebener Spindel (SHW Henrichenburg), Spindel mit angetriebener Mutter (SHW Rothensee) und Triebstock-Ritzel (SHW Niederfinow alt), wurde als Vorzugs-Variante für das neue Drei-Schluchten-Schiffshebwerk 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 [2]. Beide Prinzipien haben eine Parallelität zum neu geplanten Schiffshebwerk Niederfinow.

Der Ritzelantrieb zeichnet sich durch seine besondere Robustheit aus. Besondere Bedeutung hat aber die Trogsicherung. Sie verhindert durch ein sicheres Arretieren des Troges am Massivbau das Entstehen unbeherrschbarer Betriebszustände, die als Folge von Havarien auftreten können. Havarielasten treten z.B. bei einer unvorhergesehenen völligen oder auch teilweisen Entleerung des Troges auf. Solche Wasserverluste sind meistens auf größere Undichtigkeiten der Trogverschlüsse oder auf Beschädigungen des Troges zurückzuführen. Bemessungsrelevant ist aber typischerweise der Auftrieb des Troges in unterer Position und im Fall einer z. B. durch ein außergewöhnliches Hochwasser mit

Wasser gefüllten Troganne. In den Schiffshebewerken Lüneburg und Niederfinow haben bisher die Trogsicherungen bei diesen seltenen Lastfällen störungsfrei funktioniert.

Als Trogsicherungssystem des Drei-Schluchten-Projekt Schiffshebewerks soll das Prinzip „Mutterbackensäule mit Drehriegel“ zum Einsatz kommen [2]. vgl. Bild 3. Die Mutterbacke ist eine Säulenkonstruktion, die längs geschlitzt, innen hohl und mit einem Innengewinde versehen ist. In dieser Mutterbackensäule bewegt sich, um sich selbst drehend, eine Spindel. Diese Spindel, auch als Drehriegel bezeichnet, wird direkt vom Trogantrieb ange-



trieben. Bedingt durch die über ein Wellensystem gewährleistete direkte mechanische Kopplung zwischen den Antrieben und den Drehriegeln der Trogsicherung laufen die Drehriegel mit den Trogantrieben synchron mit. Im Havariefall überschreiten die Ritzelkräfte die durch die Ritzelfeder definierte Vorspannkraft, so dass sich der Trog um wenige Zentimeter je nach Belastungsrichtung senkt oder hebt. Wird hierbei das Spiel zwischen Drehriegelgewinde und Mutterbackengewinde überschritten, so legen sich die beiden Gewinde aneinander an und der Trog wird über die Mutterbacke in jeder Höhe sicher gehalten. Evakuierungsmaßnahmen können erfolgen.

Neben den weiteren, in der Machbarkeitsstudie bearbeiteten Punkten, überzeugte CTGPC insbesondere die robusten und sicheren Antriebs- und Sicherungssysteme, so dass die weitere Ausschreibungsplanung auf dieser technischen Grundlage erfolgen sollte.

**Bild 3: Trogsicherung (Systemskizze)**

### PROJEKTBEARBEITUNG IM JOINT VENTURE

Die Vertragsverhandlungen zwischen dem Joint Venture und der chinesischen Seite konnten im April 2004 zu einem erfolgreichen Ende geführt werden. Gegenstand des Ingenieurvertrages der auf dem FIDIC-Vertragsmuster basiert, ist die Erstellung einer aus-schreibungsreifen Planung. Diese Planung soll zum Frühjahr 2006 vorliegen.

Die Planung ist in 4 Leistungsphasen strukturiert:

- Phase A Einarbeitung in das Projekt und Erarbeitung von Entwurfsgrundsätzen
- Phase B Vorplanung
- Phase C Intermediate Design (Zwischenstufe)
- Phase D Ausschreibungsplanung

Die in Phase D erstellten Pläne und Spezifikationen versetzen dann 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 in Planungsergebnisse überprüft und als Grundlage für die nächste Planungsstufe freigegeben werden.

### **MASSIVBAU**

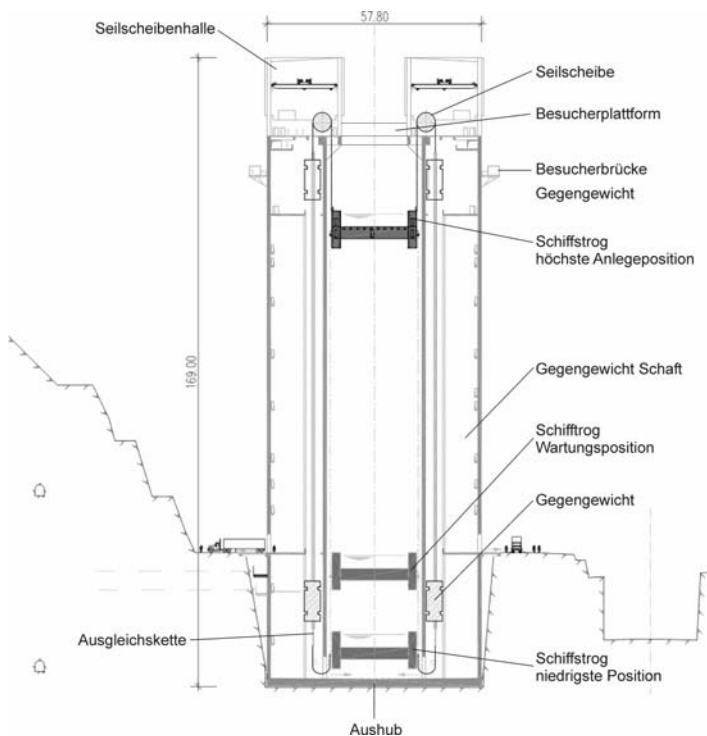
Die Tragkonstruktion des Schiffshebewerkes wird, wie beim neuen Schiffshebewerk Niederfinow, in Stahlbeton ausgeführt. Die Gesamtabmessungen betragen 119 m in der Länge und 57,8 m in der Breite. Auf jeder Seite des Troges werden zwei 150 m hohe Stahlbetontürme hergestellt, die in einem lichten Abstand von 20 m stehen. Die beiden Türme werden am Kopf von einer 20 m hohen Seilscheibenhalle überspannt und sind zusätzlich über die Höhe durch mehrere Riegel miteinander verbunden. In Querrichtung werden die Türme nur am Kopf durch die Besucherplattform bzw. den Bedienstand verbunden und ausgesteift (Bild 4 und 8).

Die Stahlbetontürme haben jeweils Abmessungen von ca. 40 m auf 16 m und bestehen aus zwei seitlichen Schächten (16 m x 9,6 m), in denen die Gegengewichte geführt werden und einem dazwischen liegenden etwas zurückgesetzten Bereich, in dem die Aufzüge und die Treppenhäuser untergebracht sind. In diesem Bereich werden auch die Zahnstange für den Antrieb und die Mutterbackensäule für den Sicherungsmechanismus angeordnet. In diese Nische ragen die Maschinenräume des Troges mit dem Motor für den Trogantrieb und dem Drehriegel, der dann in die Mutterbackensäule greift (Bild 6).

Am Übergang zum Ober- und Unterwasser stehen in Querrichtung einzelne Wandscheiben, die nur über Riegel und die Deckenscheibe der Seilscheibenhalle ausgesteift sind. Zwischen den beiden Türmen ist eine weitere Wandscheibe angeordnet. Die Wandscheiben sind als Auflager für die Seilscheibenträger erforderlich und dienen zusätzlich zur Führung der Gegengewichte. Durch die Auflösung der ansonsten 119 m langen und 150 m hohen Wandscheibe wird im Katastrophenfall ein ausreichender Rauchabzug gewährleistet.

Die Lasten aus dem Trog und den Gegengewichten - in der Summe ca. 350 MN - werden über die Seilscheibenträger am Kopf des Bauwerkes in die Konstruktion eingeleitet. Die Seilscheiben werden als Doppelscheiben ausgeführt und haben einen Durchmesser von 5,0 m. In der Seilscheibenhalle ist ein Kran für Wartungsarbeiten und den Transport von Bauteilen mit bis zu 63 t Gewicht eingebaut.

Die tragenden Wände haben zumeist eine Dicke von 1 m und müssen nur in den Bereichen der Lasteinleitung aus dem Antrieb und der Sicherungsmechanismen verstärkt werden. In den unteren Bereichen und im Bereich der Lasteinleitungen werden Betone der



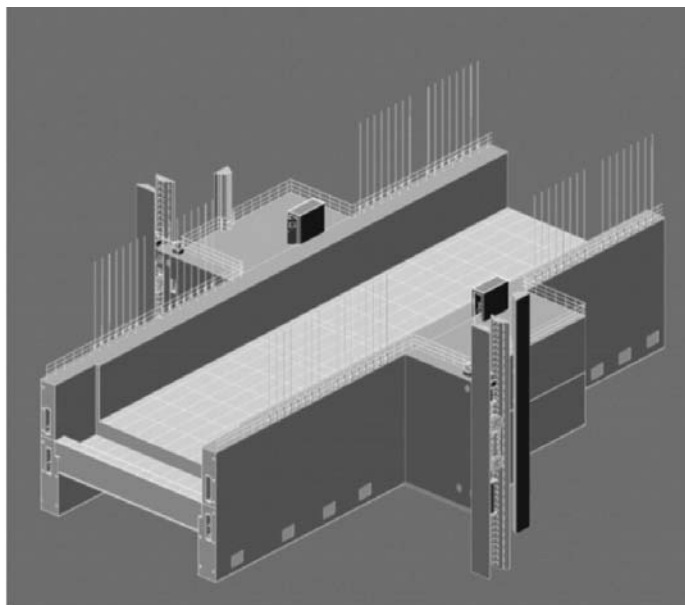
**Bild 4: Querschnitt**

Güte C30/37 verwendet. Die anderen Bereiche werden mit Betonen der Festigkeit C 25/30 ausgeführt.

Die Trogrwanne wird in einer 36 m tiefen Baugrube auf dem sehr steifen Fels ( $E_s = 30.000 \text{ MN/m}^2$ ) flach gegründet. Es werden trotz der hohen Belastungen nur Setzungen im Millimeter-Bereich erwartet. Die Stahlbetonkonstruktion hat weder Kontakt mit dem bereits fertig gestellten Oberwasserbauwerk noch mit der Felswand. Durch diese Maßnahme können sich Verformungen zwängungsfrei einstellen.

### TROGKONSTRUKTION

Bei dem 132 m langen und 23 m breiten Schiffstrog handelt es sich um eine selbsttragende Konstruktion, die kontinuierlich an Seilen aufgehängt ist (Bild 5). Hierüber ist eine sehr gleichmäßige Lasteinleitung in den Trog gewährleistet. Lediglich im Bereich der Antriebe und an den über die Betonkonstruktion überstehenden Enden können keine Seile angeordnet werden.

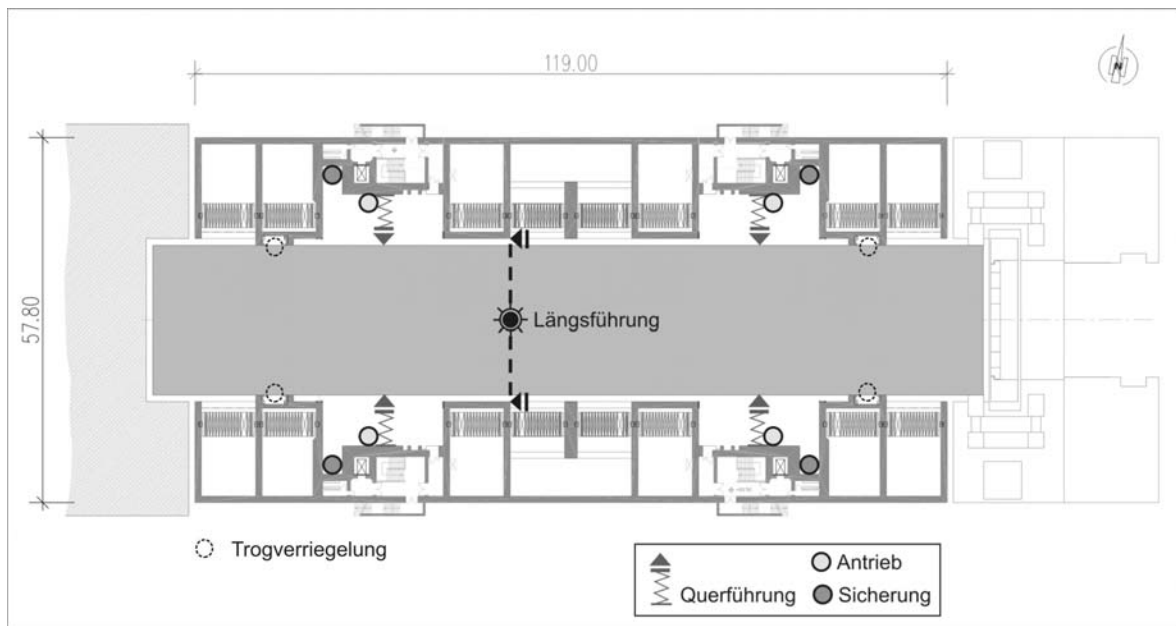


**Bild 5: Trog (nur eine Hälfte dargestellt)**

Die Trogrkonstruktion wird als orthotrope Platte ausgebildet. Die Längssteifen werden als offene Profile ausgebildet, um den Auftrieb, der entsteht, wenn die Trogrwanne bei außergewöhnlichem Hochwasser oder bei Beschädigungen des unteren Haltestores vollläuft, nicht zu erhöhen. Die Hauptlängsträger sind 10 m hoch und 2,3 m breit. Die Seile, an denen der Trog hängt haben einen Durchmesser von ca. 70 mm und werden über Doppelscheiben in

der Seilscheibenhalle umgelenkt und mit den Gegengewichten verbunden. Die Gegengewichte werden in Gruppen zusammengefasst. Die Gegengewichte jeder Gruppe werden über einen Fangrahmen (Absturzsicherung) in den Schächten geführt.

In den Viertelpunkten des Troges sind auf beiden Seiten jeweils die Maschinenräume angeordnet, die in die Betontürme eingreifen. Hier sind die Antriebe und die Sicherungsmechanismen des Troges angeordnet (Bild 6). In der Ebene darunter wird die Elektroinstallation untergebracht.



**Bild 6: Grundriss mit Führungseinrichtungen**

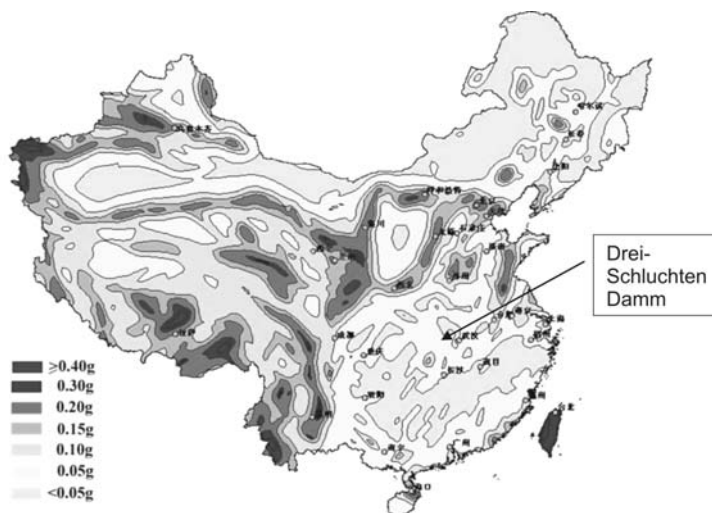
Als Trogabschluss werden Dreh-Segmenttore verwendet. In geöffneter Stellung ist das Tor bündig mit dem Trogboden. Für Revisionszwecke kann das Tor in Überkopf-Stellung gefahren werden.

Der Trog wird in seiner oberen und unteren Halteposition sowohl vertikal als auch horizontal verriegelt. Durch diese Maßnahmen ist sichergestellt, dass zusätzliche Vertikallasten z.B. aus Wasserspiegeländerungen die Ritzel der Antriebe nicht zusätzlich belasten. Die Horizontallasten aus Wasserdruck bei einseitig geöffnetem Tor werden über eine Hartanlage direkt in die Türme abgeleitet.

### **LASTFÄLLE, INSBESONDERE ERDBEBEN**

Massive Bauteile werden als Ingenieurbauteile für die maßgebenden Bemessungssituationen nach ZTV-ING bzw. DIN-Fachberichte 100-102 und Stahlwasserbauteile nach DIN 19704 auf der Grundlage des neuen Normenkonzeptes untersucht. 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.

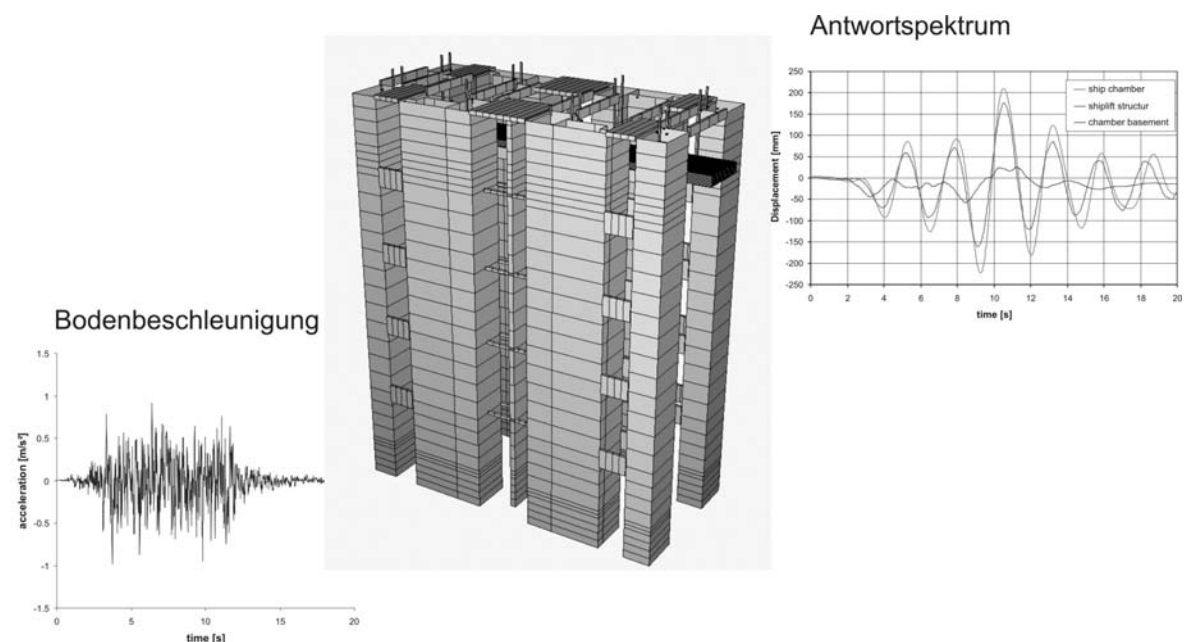
Neben den normalen Lastfällen wie Wasserfüllung, Windlast, Anfahrlasten und Führungskräften müssen zusätzlich ganz spezielle Lastfälle untersucht werden. Zu diesen Lastfällen zählen Schiffsanlegestoß, gesunkenes Schiff und Schiffstrog unter Auftrieb. Von ganz besonderer Bedeutung für das Bauwerk ist 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].



**Bild 7: Erdbebenkarte von China**

Die Festlegung der Einwirkungen für den Lastfall Erdbeben erfolgte nach der Chinesischen Erdbeben-Norm für Wasserbauwerke. Das Bauwerk befindet sich in der Zone VI der Mercalli Skale (Bild 7). Auf Grund der sehr hohen Sicherheitsanforderungen, die an das Bauwerk gestellt werden, erfolgt die Bemessung für die Zone VII mit einer Grundbeschleunigung von 0,1 g ( $1 \text{ m/s}^2$ ), bei einer Wiederholwahrscheinlichkeit von einmal in 5000 Jahren. Da es für dieses Gebiet keine digital aufgezeichneten Erdbeben gibt, werden für die Bemessung künstlich generierte Erdbeben zu Grunde gelegt. Hierfür wird das international anerkannte Programm SIMQKE des Massachusetts Institute of Technology verwendet. Die Bemessung der Bauteile erfolgt nach dem Eurocode 8.

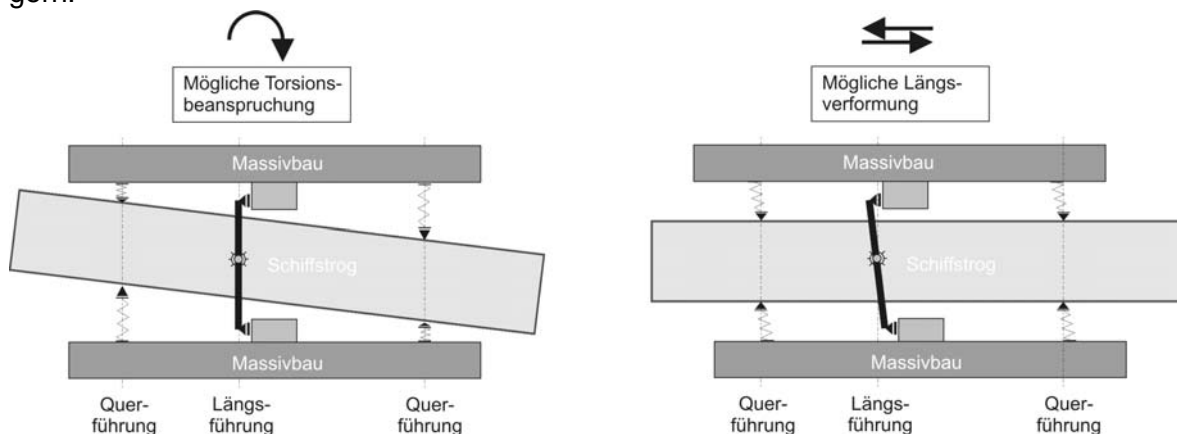
Die Bemessung der Bauteile erfolgt nach dem Eurocode 8.



**Bild 8: Berechnungen mittels Zeitschrittanalysen an einem 3D-Modell**

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

Im Falle eines Erdbebens werden die Kräfte optimal über eine statisch bestimmte Lagerung aufgenommen (Bild 9) – deren Lagerungsmechanismen werden an den Führungseinrichtungen des Troges in einer Weise mit vorgesehen, dass sie nur im Falle eines Erdbebens „greifen“. Somit sind keine zusätzlichen Einbauteile an der Massivkonstruktion erforderlich und unter Normalbetrieb kommt es nicht zum Verschleiß an den Erdbebenlagern.



**Bild 9: Mögliche Torsions- und Längsverformung in Folge Erdbeben**

Aus Erdbebenbelastung ergeben sich in Längsrichtung Kräfte von 33600 kN, in Querrichtung je Lagerpunkt von 4500 kN, die über die Erdbebenführungen sicher in die Massivbaukonstruktion geleitet werden.

## VERFORMUNGEN

Neben den rein statischen Berechnungen der einzelnen Bauteile spielen die Verformungen (Tabelle 2) eine entscheidende Rolle für die Funktionsfähigkeit des Schiffshebwerkes.

Level	$U_{\text{längs}}$	$U_{\text{quer}}$
[-]	[mm]	[mm]
+196 m	259	52.5
+175 m	210	45
+123 m	91	23.3
+62 m	6	2.1

Die Bauteile des Maschinenbaus, insbesondere die Antriebe, die Sicherungsmechanismen und auch die Trogtore 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.

**Tabelle 2: Längs- und Querverformungen des Massivbaus im Erdbebenfall**

### **EINBAUTEILE**

Die Einbauteile, wie Zahnstange und Mutterbackensäule werden aus Gründen der Genauigkeit nicht in Erstbeton eingebaut. Diese sensiblen Bauteile werden in einem Zweitbeton und Vergussmörtel einbetoniert, die mit viel kleineren Toleranzen hergestellt werden können. Durch diese Maßnahme können Verformungen aus Bauungenauigkeiten, Setzungen, Kriechen und Schwinden sowie Verformungen aus dem Baufortschritt ausgeglichen werden.

### **WIE GEHT ES WEITER?**

Nach Abschluss der Ausschreibungsplanung im Frühjahr 2006 ist anschließend die Ausschreibung für das Schiffshebewerk geplant, um 2006 die Vergabe vornehmen zu können.

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

#### Literatur

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