

Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke (1.3)

Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe anhand von geotechnischen Messungen

Dipl.-Ing. Oliver Stelzer

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1. Bauwerk und Baugrund

Im Zuge der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit (Projekt 17) wurde vom Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg mit dem Bau einer Kanalbrücke über die Elbe und der Doppelsparschleuse Hohenwarthe eine vom Elbewasserstand unabhängige Verbindung zwischen dem Mittellandkanal und dem Elbe-Havel-Kanal geschaffen.

Die Doppelsparschleuse Hohenwarthe mit einer nutzbaren Länge von 190 m besteht aus zwei Schleusenkammern mit je 12,5 m Breite. Sie überwindet eine mittlere Wasserstands-differenz von 18,55 m, wobei der Wasserbedarf beim Schleusen durch Sparbecken um 60 % reduziert wird.

Der Baugrund im Bau-feld der Schleusen-anlage Hohenwarthe besteht bis in eine Tiefe von 80 m unterhalb der Gründungs-sole aus quartären und tertiären Lo-

ckergesteinen. Als oberste Schicht stehen Fluss- und Schmelzwassersande an, die bereichsweise von Kiesen und Geröllen unterlagert sind. Darunter folgen Bänderton und Bänderschlufl, Geschiebemergel, Septarienton und Grünsand (s. Bild 1). Die verschiedenen Schichten weisen über die Länge und die Breite der Gründungs-sole unterschiedliche Mächtigkeiten auf. Darüber hinaus sind lokal abweichende Bodenarten als Linsen eingeschlossen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bänderton- und Bänderschluflschicht unter Strömungsbelastung, insbesondere an der Grenzschicht zu den überlagernden Sanden und Kiesen zur Suffosion (Austrag feiner Bodenpartikel unter Beibehaltung des Korngerüstes) und innerhalb des Bändertons/schluff unter Schwellbelastungen aus dem Schleusenbetrieb zur Kontakterosion (ineinander übergehen vormalig geschichteter grob- und feinkörniger Lockergesteine unter Volumenverlust) neigt. Eine detailliertere Beschreibung der Baugrundverhältnisse kann (Stahlhut et al. (2000)) entnommen werden.

Nach Prüfung der Vor- und Nachteile verschiedener Gründungsvarianten wurde eine Pfahlgründung der monolithischen Sohlplatte, auf der beide Schleusenkammern einschließlich der Mittelmole stehen, ausgeführt. Die insgesamt 1248 Pfähle mit einem Durchmesser von 88 cm sind in einem Raster von 2,85 m x 3,25 m angeordnet und binden in die steifste Schicht, den Geschiebemergel, ein. Eine Optimierung der Pfahllängen konnte mit Hilfe von vor Baubeginn durchgeführten Pfahlprobelastungen erfolgen.

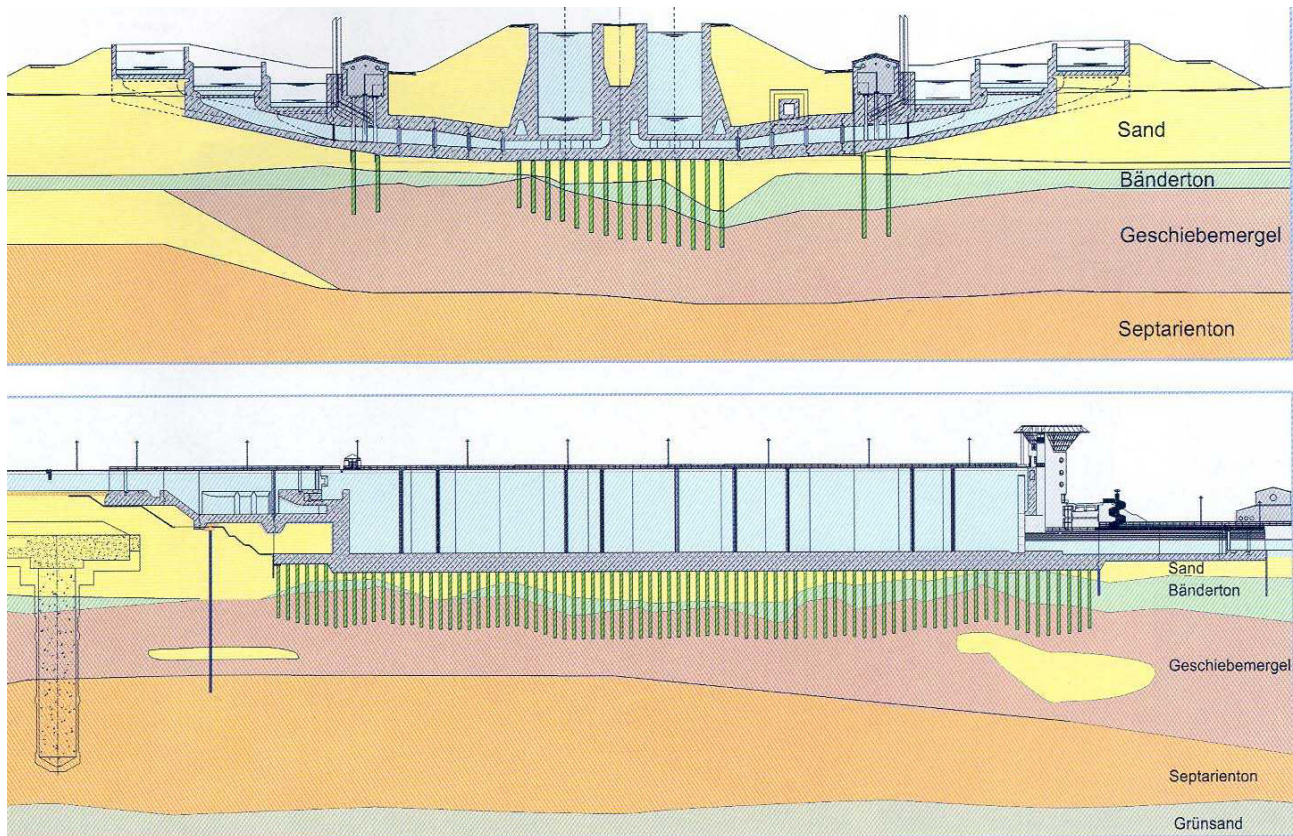


Bild 1: Schleuse und Baugrundsituation im Quer- und Längsschnitt

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe anhand von geotechnischen Messungen

2. Zielsetzung und Umsetzung des geotechnischen Messkonzepts

Zur Überwachung der Schleuse Hohenwarthe wurde ein umfangreiches Messsystem installiert. Das geotechnische Messkonzept wurde vom Baugrundgutachter des Bauherrn, der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), entworfen. Lieferung und Einbau der Messtechnik wurde von der Gesellschaft für Geomechanik und Baumesstechnik (GGB) ausgeführt. Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig wurde von der BAW mit der Überwachung und Dokumentation des Einbaus der geotechnischen Messgeber beauftragt.

Bei der Planung der geotechnischen Messungen wurden folgende Ziele verfolgt:

- Überwachung des errechneten Sicherheitsniveaus der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit, Möglichkeit der Früherkennung von Schäden,
- Aufbau einer Datenbasis für die sichere und wirtschaftliche Erhaltung dieses und möglicherweise auch anderer Bauwerke,
- Erfassung von Messdaten als Grundlage für die Kalibrierung von Finite-Elemente-Berechnungen,
- Forschung zur Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk,
- Forschung zum Verhalten der Schleuse unter zyklischer Belastung.

Wesentliche Anforderungen an das geotechnische Messkonzept waren die Datengewinnung bereits während der Bauphase und die Durchführung von Langzeitmessungen, um auch während des Auftretens der Schwellbelastungen der Schleuse Erkenntnisse über die Baugrund/Bauwerks-Interaktion gewinnen zu können. Für die Bearbeitung der genannten Fragestellungen müssen Daten aus vier Bereichen

erfasst und analysiert werden:

- die Setzungen einzelner Bodenschichten,
- die Grundwasserhydraulik (Porenwasserdrücke),
- die Sohlwasserdrücke und Sohlspannungen,
- das Tragverhalten der Pfahlgründung.

Die Messungen werden in insgesamt sechs Hauptmessquerschnitten innerhalb der Schleusenkammer durchgeführt (vgl. Bild 2), so dass die Ergebnisse möglichst vieler verschiedener Messungen jeweils im Zusammenhang interpretiert und miteinander korreliert werden können. Die Messquerschnitte liegen am Oberhaupt (MQ 1), an den ober- und unterwasserseitigen Sparbeckenzuläufen (MQ A, MQ B), in der Kammermitte (MQ 2) und im Bereich des Unterhauptes (MQ 3, MQ 4). Zusätzliche Messungen werden an den Pumpkanälen, den Sparbeckenzuläufen sowie am Ober- und am Unterhaupt ausgeführt.

Die Ausstattung der einzelnen Messquerschnitte mit den entsprechenden Messgebern ist nachfolgend tabellarisch dargestellt:

	MQ1	MQA	MQ2	MQB	MQ3	MQ4
Extensometer	2 x 4	-	2 x 4	-	2 x 4	1 x 5 1 x 6
Porenwasserdruckgeber	4	-	7	-	5	8
Sohlwasserdruckgeber	2	3	3	1	3	2
Sohlspannungsdruckgeber	4	5	3	5	3	3
Pfahlspitzendruckgeber	2	1	1	3	-	1
Pfahldehnungsgeber	18	30	3	12	10	31
Temperaturgeber in den Pfählen	6	10	-	4	5	11

Tabelle 1: Ausstattung der Messquerschnitte

3. Messergebnisse während der Bauzeit

3.1 Tragverhalten der Pfahlgründung

Um eine Aussage über das Tragverhalten der Pfahlgründung gewinnen zu können, wurden in sechs Messquerschnitten insgesamt 13 Pfähle mit Dehnungsgebern und teilweise auch mit Spitzendruckgebern bestückt.

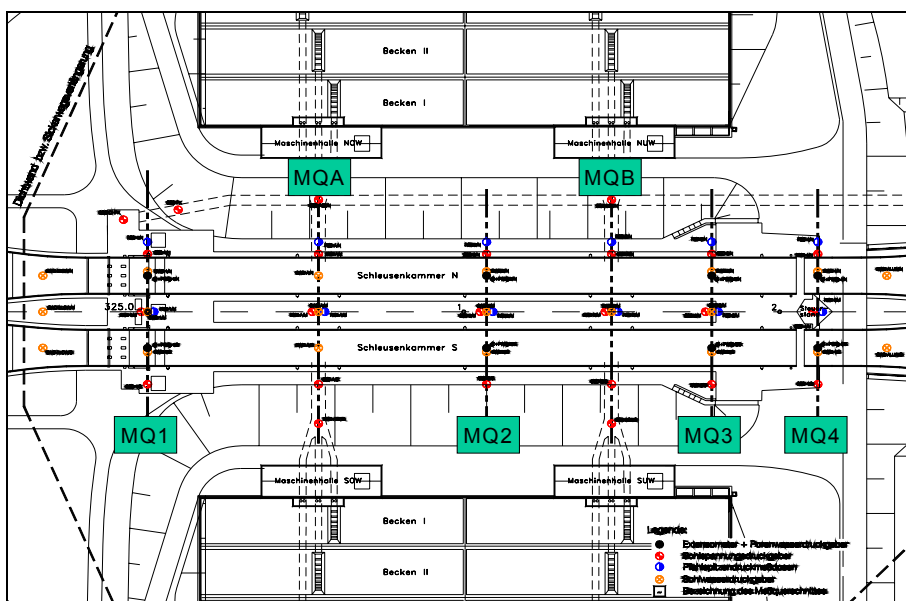


Bild 2: Lage der Messquerschnitte im Grundriss der Schleuse

Bild 3 zeigt die Lage der Messpfähle unterhalb der Sohlplatte und deren Länge. Durch die unterschiedliche Tiefenlage der Geschiebemergelschicht, in die alle Pfähle einbinden, ergeben sich Pfahllängen zwischen 9 m und 22 m.

3.1.1 Zeitliche Entwicklung der Pfahlkräfte

In Bild 4 ist die zeitliche Entwicklung der Pfahlkraft in verschiedenen Tiefen (Messerebenen) unterhalb des Pfahlkopfes für den unter der Südkammer im Messquerschnitt A gelegenen Messpfahl dargestellt. Nach einer kontinuierlichen Zunahme der Pfahlkraft durch die Herstellung der Sohlplatte, der Kammerwände

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe anhand von geotechnischen Messungen

und der seitlichen Anschüttungen an die Schleuse erreicht die Pfahlkraft in der pfahlkopfnahen Messebene 5 im Januar 2003 ein Maximum von etwa 5 MN. Die darauf folgende Abnahme der Pfahlkraft geht mit der in zwei Schritten durchgeführten Entlastung der Schleuse durch das Fluten der Baugrube einher. Der erneute sprunghafte Anstieg der Kurve Anfang September 2003 ist auf die erste Füllung der Schleuse zurückzuführen. Ab diesem Zeitpunkt ist deutlich die Änderung der Pfahlkräfte durch die Füllung bzw. das Entleeren der Schleuse erkennbar, die durch die Mantelreibung mit der Tiefe abnimmt. In der Messebene 5 beträgt diese Pfahlkraftänderung ca. 500 kN, an der Pfahlspitze noch ca. 200 kN. Weiterhin lässt sich eine jahreszeitliche Schwankung der Pfahlkräfte beobachten, die durch Zwängungen im Pfahl hervorgerufen wird und ebenfalls mit zunehmender Tiefe abnimmt. Dies ist auf Temperaturschwankungen im Pfahl bzw. Boden zurückzuführen.

schicht Werte bis zu 220 kN/m², die gut mit den Ergebnissen der Pfahlprobelastungen korrespondieren.

3.1.2 Lastaufteilung Sohlplatte/Pfähle

In der Nähe der Messpfähle wurden Sohlspannungsdruckgeber unter der Sohlplatte angeordnet. Somit kann die Lastaufteilung der vertikalen Gesamtlast zwischen den Gründungspfählen und der Sohlplatte für jeden Messpfahl bestimmt werden. Diese Aufteilung kann in Anlehnung an den bei der Bemessung von kombinierten Pfahlplattengründungen verwendeten Pfahlplatten-Koeffizient α_{KPP} (Katzenbach et al., 2000) folgendermaßen quantifiziert werden:

$$\alpha_{\text{lokal}} = \frac{N_{\text{Pfahlkopf}}}{N_{\text{Pfahlkopf}} + N_{\text{Platte}}} = \frac{N_{\text{Pfahlkopf}}}{N_{\text{Pfahlkopf}} + \sigma_{\text{Sohle,effektiv}} \cdot A_E} \quad [-]$$

Dieser dimensionslose Kennwert (hier lokal für jeden Messpfahl definiert) gibt das Verhältnis der Kraft am Pfahlkopf ($N_{\text{Pfahlkopf}}$) zu der im Bereich einer Einflussfläche A_E des Messpfahles an den Baugrund übertragenen Gesamtlast an. Die Gesamtlast setzt sich aus einem Anteil aus der Pfahlkraft und dem über die Sohlplatte übertragenen Lastanteil (N_{Platte}) zusammen.

Die effektiven Sohlspannungen können aus der Differenz der Messergebnisse der Sohlspannungsdruckgeber (totale Spannungen) und der Sohlwasserdruckgeber ermittelt und als konstant über die Einflussfläche A_E angenommen werden. Als Einflussfläche A_E eines Messpfahles wird die Größe des Pfahlrasters abzüglich der Querschnittsfläche des Pfahles betrachtet:

$$A_E = A_{\text{Pfahlraster}} - A_{\text{Pfahl}} = 3,25 \text{ m} \times 2,85 \text{ m} - \pi \times (D^2/4)$$

In Bild 5 ist die zeitliche Entwicklung von α_{lokal} für die Messpfähle im Messquerschnitt 1 dargestellt. Für beide Pfähle sind nach einem kontinuierlichen Anstieg des Pfahlplatten-Koeffizienten bis etwa März 2001 nur noch schwache Schwankungen und ein leichter Anstieg von ca. 0,9 auf 0,95 zu beobachten. Dies bedeutet, dass die beiden Messpfähle etwa 95 %

der auf ihren Einflussbereich wirkenden Gesamtlast übernehmen.

Die bisher maximalen Normalkräfte am Pfahlkopf sind im Januar 2003 gemessen worden. Zu diesem Zeit-

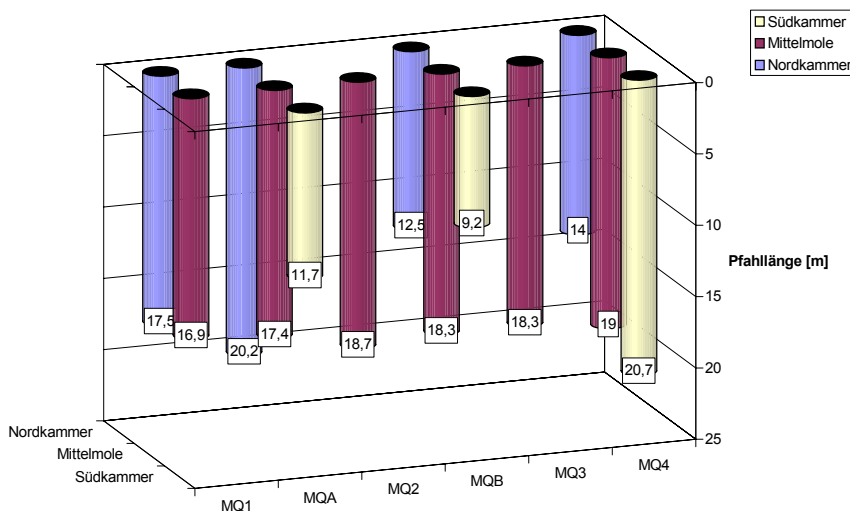


Bild 3: Lage und Länge der Messpfähle

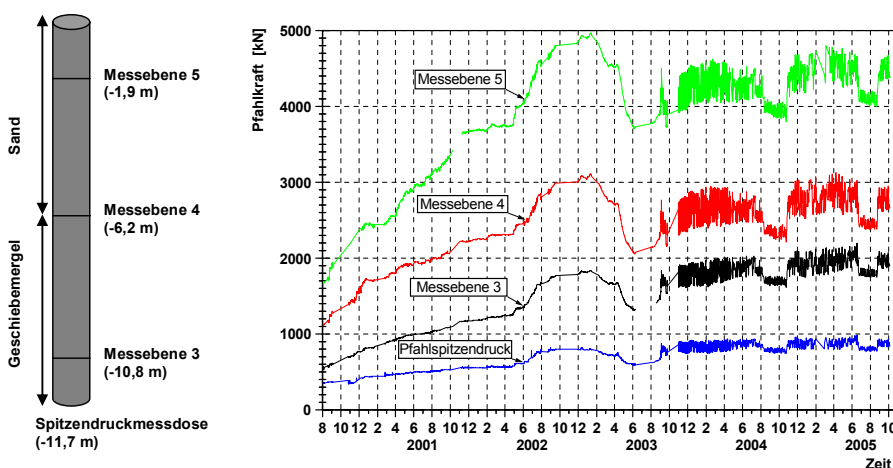


Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Pfahlkräfte in verschiedenen Tiefen (Messquerschnitt A, Südkammer)

Aus der Differenz der Pfahlkräfte in den einzelnen Messebenen lässt sich die mittlere Mantelreibung in den einzelnen Baugrundsichten bestimmen. Dabei ergeben sich für die Sand- und Geschiebemergel-

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe anhand von geotechnischen Messungen

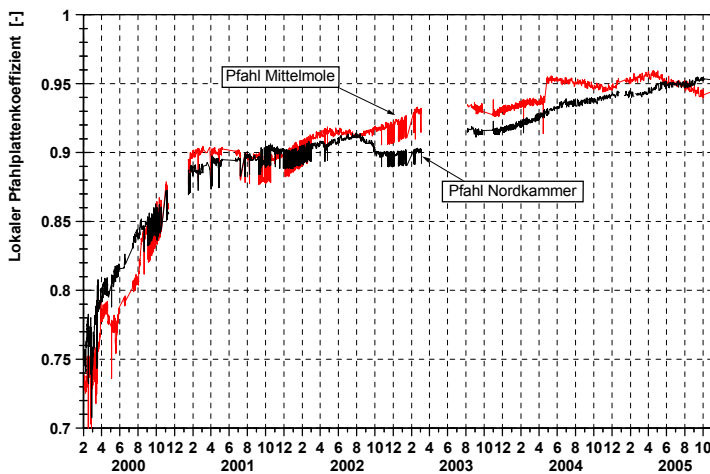


Bild 5: Zeitliche Entwicklung von α_{lokal} im Messquerschnitt 1

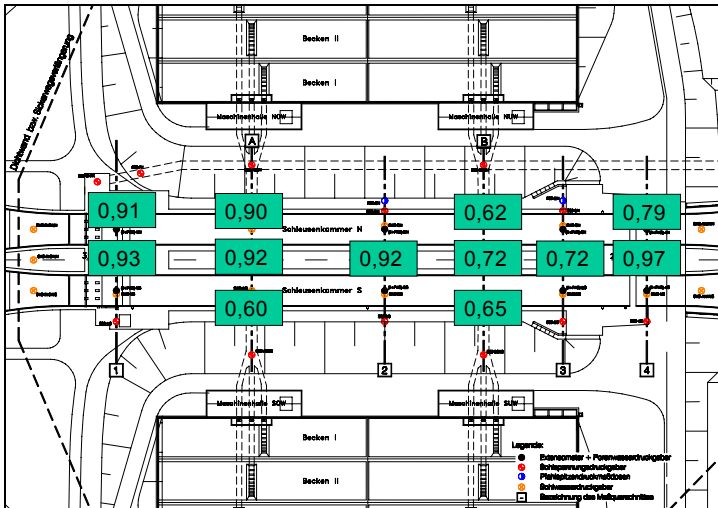


Bild 6: Räumliche Verteilung des lokalen Pfahlplatten-Koeffizienten α_{lokal} (Stand Januar 2003)

punkt war das Schleusenbauwerk nahezu fertig gestellt und die Grundwasserabsenkung innerhalb eines Dichtwandringes noch in Betrieb. In Bild 6 ist für jeden Messpfahl der lokale Pfahlplatten-Koeffizient für diesen Zeitpunkt dargestellt.

Die Darstellung zeigt, dass die Messpfähle 60 – 97 % der Gesamtlast abtragen. Die räumlichen Unterschiede im Tragverhalten lassen sich auf die Baugrundverhältnisse und die unterschiedlichen Längen der Messpfähle zurückführen.

3.2 Setzungsverhalten der Schleuse

In vier Messquerschnitten (jeweils in der Symmetrieachse der nördlichen und südlichen Schleusenkommer)

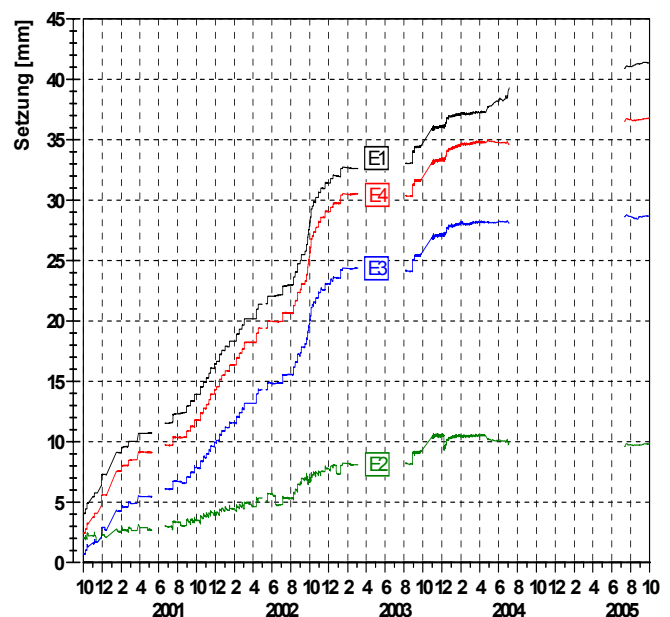
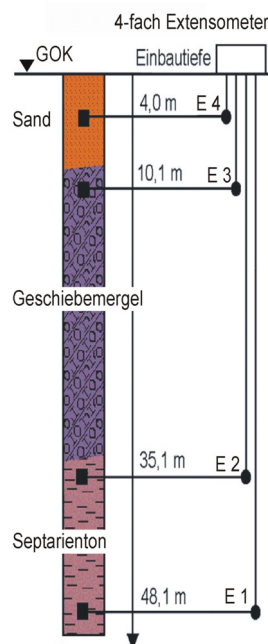


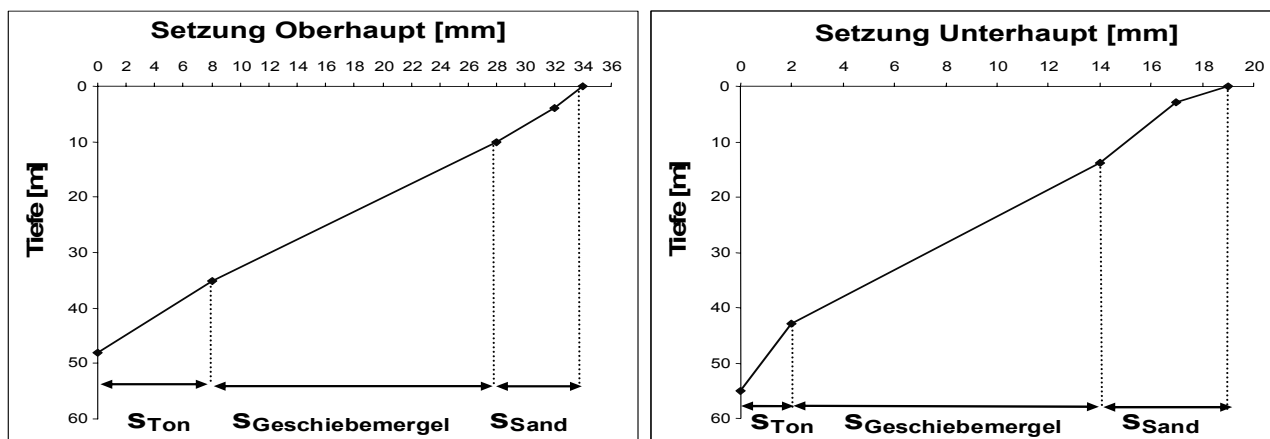
Bild 7: Zeitliche Entwicklung der Setzungen am Oberhaupt (Nordkammer)

werden Setzungsmessungen mit Mehrfachextensometern durchgeführt. Die Absetztiefen der Extensometeranker wurden anhand vorliegender Baugrundaufschlüsse festgelegt und richten sich nach den anstehenden Baugrundsichten (vgl. Bild 7, links). Die am tiefsten liegenden Verankerungspunkte der Extensometer reichen bis in eine Tiefe von maximal 55 m unter der Schleusensole. Diese werden als Fixpunkt betrachtet. Die Porenwasserdruckaufnehmer wurden in korrespondierenden Tiefen zu den Extensometerverankerungen angeordnet. Insbesondere ist hier die Porenwasserdruckentwicklung in den bindigen Schichten unter Berücksichtigung der Grundwasserhydraulik für die Interpretation der auftretenden Setzungen von Bedeutung.

In Bild 7 ist die Setzungsentwicklung am Oberhaupt in vier unterschiedlichen Tiefen für die Extensometer E1 bis E4 dargestellt. Die Messungen begannen mit dem Betonieren der Sohle. Man kann deutlich die hohen Setzungsraten während der Herstellung der seitlichen Bodenschüttungen an die Kammerwände im Jahr 2002 und den Beginn des Schleusenbetriebes im September 2003 erkennen. Im Zeitraum von August 2004 bis Juni 2005 konnten aufgrund defekter Messgeber keine Daten aufgezeichnet werden. Die gemessenen Gesamtsetzungen betragen im September 2005 am Oberhaupt 42 mm und am Unterhaupt 22 mm. Die größeren Setzungen am Oberhaupt sind auf das hohe Eigengewicht der massiven Torlamelle, die in diesem Bereich besonders hohe Belastung infolge der großen Aufschüttungen, die zeitliche Abfolge der Betonage der Schleusenabschnitte und die nicht horizontbeständige Baugrundschiebung zurückzuführen. Ein Vergleich der Setzungen unter der Süd- und Nordkammer zeigt keine signifikante Schiefstellung der Schleuse in Querrichtung.

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe anhand von geotechnischen Messungen



Setzung in Schicht i	Sand		Geschiebemergel		Septarienton	
	OH	UH	OH	UH	OH	UH
absolut s_i [mm]	6	5	20	12	8	2
relativ s_i / s_{gesamt} [%]	17,5	26,5	59	63	23,5	10,5

Bild 8: Setzungsverlauf über die Tiefe und Setzungsanteile der einzelnen Bodenschichten am Oberhaupt (kurz OH, links) und am Unterhaupt (kurz UH, rechts), Stand Herbst 2003

Durch den Einsatz von Mehrfachextensometern können neben der Gesamtsetzung auch die Setzungsanteile einzelner Baugrundsichten ermittelt werden, welche sich aus den Differenzen der gemessenen Setzungen in Höhe der Schichtgrenzen ergeben. In Bild 8 sind der Setzungsverlauf über die Tiefe für das Ober- und Unterhaupt und die Setzungsanteile der Sand-, Geschiebemergel- und Septarientonschicht im Herbst 2003 aufgetragen. An der prozentualen Verteilung der Setzungsanteile der Baugrundsichten an der Gesamtsetzung hat sich seither nichts wesentliches geändert.

Der größte Setzungsanteil mit ca. 60 % der Gesamtsetzungen ist dem Geschiebemergel zuzuordnen, in der Sandschicht sind es 17,5 % bis 26,5 %. Die Septarientonschicht hat vor allem am Unterhaupt mit 2 mm noch sehr geringe Setzungen erfahren. In dieser Schicht werden noch hohe Porenwasserüberdrücke gemessen, so dass mit entsprechenden Zeitsetzungen im Laufe der Konsolidierungsphase zu rechnen ist. Die bisher gemessenen Gesamtsetzungen betragen etwa 10-20 % der rechnerisch prognostizierten Endsetzungen nach 80 Jahren Betriebszeit der Schleuse.

Zusammenfassung und Ausblick

Die geotechnischen Messungen an der Schleuse Hohenwarthe wurden bereits während der Bauphase durchgeführt und konnten somit bereits erste Erkenntnisse zum Trag- und Verformungsverhalten des im Herbst 2003 fertig gestellten Bauwerks liefern. Von besonderem Interesse für die weitere Auswertung der Messergebnisse sind die Erfassung des Langzeittragverhaltens der Pfahlgründung und des zeitabhängigen Setzungsverhaltens infolge Konsolidierung der bindigen Bodenschichten und der Auswirkungen der zyklischen Belastung aus Schleusenbetrieb. Anhand von Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode soll nun die rechnerische Reproduzierbarkeit der Messergebnisse überprüft und eine neue Setzungsprognose erstellt werden.

Literatur

- HUCH, T.; KAUTHER, R.; SCHALLERT, M.: Bau der Doppelsparschleuse Hohenwarthe - Messkonzeption, Erfahrungen und bisherige Ergebnisse. 1. Siegener Symposium Messtechnik im Erd- und Grundbau, Universität Siegen, 2001
- KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C.; KÖNIG, G.; SOUKHOV, D.; AHNER, C.: Richtlinie für den Entwurf, die Bemessung und den Bau von kombinierten Pfahl-Plattengründungen (KPP). Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- KOOP, F., ASAM, P., STELZER, O.: Grundsätzliche Situation und besondere Problemstellung beim Neubau der Doppelkammersparschleuse Hohenwarthe, Baugrundtagung 2004, Leipzig
- STAHLHUT, O., ERNST, U., KAUTHER, R., ROTHENSEE, H.: Geotechnische Messungen an der Doppelsparschleuse Hohenwarthe, Messen in der Geotechnik 2000. Heft Nr. 62, TU Braunschweig, 2000

Verfasser

Dipl.-Ing. Oliver Stelzer
Referat Grundbau
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3170
E-Mail: oliver.stelzer@baw.de