



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

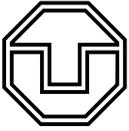
**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 40



Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

## **8. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

---

Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**8. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 40

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine  
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 42 77  
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer  
Korrekturen: Angela Heller  
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan  
Titelfoto: Kathrin Dietz  
Probebelastung an Fahnenstangen am Goldenen Reiter in Dresden

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf [www.qucosa.de](http://www.qucosa.de)

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz  
Veröffentlicht: Dresden, September 2015

ISSN 1613-6934

## Inhalt

DAfStb-Sachstandbericht <i>Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung bestehender Bauwerke</i> <i>Jürgen Schnell, Michael Weber</i> .....	5
Dynamik von Stahlbetonbrücken – Messprojekte aus dem Eisenbahn- und Straßenverkehr <i>Lutz Auersch, Samir Said</i> .....	17
Messtechnische Überlegungen bei Fallversuchen <i>Tino Kühn</i> .....	31
Identifikation dynamischer Strukturparameter von Eisenbahnbrücken mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie <i>Jens Schneider, Matthias Becker, Andrei Firus, Jiny Pullamthara, Michael Drass</i> .....	47
Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse im Bauwesen <i>Stephan Pirskawetz, Julia Wolf, Wolfram Schmidt, Andreas Rogge</i> .....	61
Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann</i> .....	73
Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens Piehler, Michael Hansen, Gerd Kapphahn</i> .....	81
Tragfähigkeitsuntersuchungen an historischen Fahnenmasten <i>Silke Scheerer, Sabine Wellner, Torsten Hampel, Bernd Eckoldt</i> .....	93
Pont Lagunaire, Togo – Experimentelle Tragwerksanalyse einer Stahlfachwerkbrücke zum Nachweis der Restnutzungszeit <i>Marc Gutermann, Werner Malgut, Klaus Ammermann</i> .....	103
Experimenteller Nachweis der Tragfähigkeit an der Kettenbrücke im Goethepark in Weimar <i>Erik Meichsner, Phillip Johann Jung, Oliver Hahn, Stefan Finke</i> .....	117
Untersuchungen und Maßnahmen an setzungsauffälligen Pfeilern der Saale-Elster-Talbrücke der Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle <i>André Koletzko, Sandra Christein</i> .....	123
Bewertung bestehender Brücken unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung durch Bauwerksmonitoring <i>Nico Steffens, Karsten Geißler, Ronald Stein</i> .....	135

Lagrange-Multiplikator-Test zur Detektierung von zunehmender Strukturschädigung:  
Experimentelle Verifikation  
*Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum,  
Detlef Hofmann, Frank Basedau* ..... 147

Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften  
*F. Weisleder, M. Waltering*..... 159

Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken  
*Stefan Kimmich, Eckhard Held* ..... 175

## **Untersuchungen und Maßnahmen an setzungsauffälligen Pfeilern der Saale-Elster-Talbrücke der Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle**

André Koletzko<sup>1</sup>, Sandra Christein<sup>2</sup>

**Kurzfassung.** Im Zuge des Neubaus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Erfurt–Leipzig/Halle im Rahmen des Verkehrsprojektes Deutsche Einheit (VDE) 8.2 wurde die Saale-Elster-Talbrücke zur Querung der Saale-Elster-Aue als längstes Eisenbahn-Brückenbauwerk Deutschlands mit einer Gesamtlänge von ca. 8,6 km und mit insgesamt 216 Pfeilern errichtet. An einigen Pfeilern sind Setzungen im Zuge des Baufortschrittes festgestellt worden, die in dieser Größenordnung so nicht erwartet worden waren. Der Beitrag widmet sich schwerpunktmäßig der Vorgehensweise zur Beurteilung dieser nicht erwarteten großen Setzungen, insbesondere der geotechnischen Untersuchungen sowie der messtechnischen Überwachung und deren ingenieurmäßiger Aus- und Bewertung.

***Investigations and measures on setting conspicuous columns of the Saale-Elster viaduct of the railway line Erfurt–Leipzig/Halle – Abstract.*** *During the construction of the high speed track Erfurt–Leipzig/Halle as part of the German Unity Transport Project (VDE) 8.2, the longest railway bridge construction in Germany with 216 pillars and a total length of about 8.6 kilometres was built to cross the Saale-Elster wetland. During the construction of the Saale-Elster Viaduct some pillars showed settlements in magnitudes which have not been anticipated. The article deals mainly with the procedure for evaluation of these unexpected large settlements, in particular the geotechnical investigations and the procedure of measurements and their engineering analysis and evaluation.*

### **1 Projektbeschreibung**

#### **1.1 Daten und Fakten**

Die Neubaustrecke (NBS) Erfurt–Leipzig/Halle bildet den 2. Abschnitt des Schienenverkehrsprojektes Deutsche Einheit (VDE) 8, mit dem eine Verbindung der Städte Berlin und Nürnberg mit einer Hochgeschwindigkeitsstrecke erzielt wird (Bild 1). Die geplante zweigleisige Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle wird als Hochgeschwindigkeitsstrecke mit einer Entwurfsgeschwindigkeit von 300 km/h für regelspurigen Mischverkehr, das heißt für den Personen- und den Güterverkehr, trassiert und geplant. Als Oberbauart für die NBS Erfurt–Leipzig/Halle kommt das instandhaltungsarme Fahrbahnsystem Feste Fahrbahn zur Anwendung.

Im Zuge des Projektteilabschnittes VDE 8.2 Erfurt–Leipzig/Halle wird im Südraum von Halle die höchsten Umweltaforderungen unterliegende Saale-Elster-Aue mit einem ca. 6,5 Kilometer langen Brückenbauwerk überquert. Die Stadt Halle erhält außerdem mit einem 2,1 Kilo-

---

1 Dipl.-Ing. (FH), ARGE SVG NBS 8.2 / BAUGRUND DRESDEN GmbH

2 Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Kfr. (FH) Sandra Christein, DB Netz AG



Bild 1: VDE 8.2, Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle  
Quelle: DB AG

meter langen Brückenabzweig auch eine Anbindung an das Hochgeschwindigkeitsnetz der Deutschen Bahn AG.

Dieser innerhalb der Brücke angelegte Abzweig und die Ausfädelung für den Anschluss nach Halle sind Besonderheiten der Saale-Elster-Talbrücke (SETB). Das zweigleisige Brückenbauwerk wird im Abzweigbereich nach Halle auf vier Gleise aufgeweitet. Die integrierte Brückenabzweigung verläuft über zwei Ebenen. Einer der abzweigenden Fahrwege wird dabei von einer 110 Meter langen Stabbogenbrücke überspannt.

Die Entwurfsgeschwindigkeit für die zweigleisige Hauptbrücke auf dem Trassenstrang Erfurt–Leipzig beträgt 300 km/h analog zur Trassenführung der Gesamtstrecke VDE 8.2. Für die 2,1 Kilometer lange Abzweigbrücke nach Halle ist eine Entwurfsgeschwindigkeit von 160 km/h vorgesehen.

Im Zuge des Planfeststellungsverfahrens wurden mehrere Varianten zur Trassenführung im Bereich der Saale-Elster-Aue untersucht. Von allen untersuchten Varianten hat sich im Planfeststellungsbeschluss im Jahr

1996 die Variante einer aufgeständerten Trassenführung über die Saale-Elster-Aue durchgesetzt. Das langgestreckte Brückenbauwerk über die Aue, in Bild 2 zu sehen, gewährleistet damit weiterhin das natürliche Überflutungsgeschehen, die ökologisch-hydrologische Funktion der Aue und beansprucht wenig Fläche.

## 1.2 Baugrund- und Gründungssituation

Die entsprechenden Baugrunduntersuchungen und bodenmechanischen Kennwertbestimmungen zur Erstellung des Baugrund- und Gründungsgutachtens erfolgten in den Jahren 1994/95. Im Jahr 2004 erfolgte eine Anpassung des geotechnischen Gutachtens u. a. aufgrund neuer Randbedingungen und Vorschriften.

Zur Erkundung des Untergrundes im Trassenverlauf der SETB wurden 115 Kernbohrungen, 113 Sondierungen mit der schweren Rammsonde, 26 Drucksondierungen und sieben Rammkernsondierungen ausgeführt. Die Bohrungen wurden überwiegend bis in den festen, unverwitterten Buntsandstein abgeteuft. Die Aufschlusstiefe lag zwischen 30 m und 75 m. Die Gründung der Brücke soll in weniger durchlässigen Schichten der Verwitterungszone des Buntsandsteins bzw. der tertiären Sedimente erfolgen. Die Erkundung des Baugrundes zielte deshalb vor allem auf die Bestimmung der Steifigkeiten dieser Schichten ab.



Bild 2: Luftbildaufnahme der Saale-Elster-Talbrücke, Zentralbereich

Quelle: DB AG

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in den Feldversuchen. Es wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit unterschiedlichen bodenmechanischen Versuchstechniken durchgeführt. So wurden an ausgewählten Standorten Bohrlochaufweitungsversuche, Pressiometerversuche und Drucksondierungen ausgeführt.

Der Untergrund im Bereich des Brückenbauwerkes hat vereinfacht einen drei- bis vierschichtigen Aufbau (siehe auch [1]). Die quartären Deckschichten bestehen überwiegend aus Auelehm und Schwemmsanden über Terrassensanden und -kiesen. Darunter folgen tertiäre Sedimente – Sand, Schluff, Ton und Braunkohle – über Buntsandstein, der tiefgründig verwittert ist und sich aus Sand-, Schluff- und Tonstein zusammensetzt. In einem Teil der Brückentrasse fehlen die tertiären Sedimente über dem Buntsandstein.

In Abhängigkeit vom Untergrundaufbau und vom Verformungsverhalten wurde der gesamte Brückenabschnitt in insgesamt neun Homogenbereiche eingeteilt. Sie bildeten die Grundlage für die Baugrundmodelle, mit denen die erdstatischen Berechnungen vorgenommen wurden. Für jeden Homogenbereich wurden Schwankungsbereiche der für das Setzungsverhalten der Brücke maßgebenden Steifemoduln ausgewiesen.

Auf Basis der Baugrunderkundungen sowie unter Berücksichtigung der ökologischen und umweltrechtlichen Rahmenbedingungen wurde ein Gründungskonzept für die SETB entwickelt. Entsprechend dieser Konzeption war eine Gründung aller Pfeiler im Schutze eines dichten Spundwandkastens vorgesehen, der bis in die weniger durchlässigen Schichten der Verwitterungszone des Buntsandsteines bzw. der tertiären Sedimente abgeteuft wird. Innerhalb

dieses Spundwandkastens wird ein Stahlbetonfundament hergestellt, welches mittels Kopfbolzendübel mit dem Spundwandkasten kraftschlüssig verbunden wird (Bild 4 in Abschn. 4.1).

Die Spundwandgründung wird im Zuge der Bauausführung mittels Seilbagger und freireitender Rammtechnik eingebracht. Die Tragfähigkeitsnachweise für die Spundwandkastengründungen erfolgten anhand vom Planer jeweils festgelegter Rammkriterien (Schlagzahl des Rammgeräts in Verbindung mit der Einbindetiefe) gemäß den jeweiligen Rammberichten.

An der SETB wurden im Rahmen der Ausführungsplanung rechnerische Setzungsprognosen für alle Pfeiler in Abhängigkeit relevanter Belastungsstufen erstellt. Diese rechnerischen Prognosen bildeten die Grundlage für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach den hohen Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs.

### **2 Erkenntnisse im Zuge der Bauausführung**

Auf der Grundlage der Gründungskonzeption wurde die Ausführungsplanung erstellt und im Jahr 2007 mit der Bauausführung begonnen. Nach Herstellung der Spundwandkästen mit den eingebundenen Fundamenten und der Pfeiler erfolgte die Betonage der Überbauten, die mittels Traggerüst oder einer Vorschubrüstung hergestellt wurden. Für jede maßgebende Belastungssituation sollten Setzungsmessungen an zuvor an den Pfeilern installierten Messbolzen durchgeführt und diese mit im Vorfeld aufgestellten lastabhängigen Verformungsprognosen verglichen werden.

Im Zuge der Bauausführung wurden an einigen Pfeilerachsen Setzungen festgestellt, die in dieser Größenordnung so nicht zu erwarten waren. Über diesen kritischen Pfeilerachsen befinden sich Überbauten als 2-Feld-Träger-System, die im Falle von Setzungsdifferenzen infolge unterschiedlicher Pfeilersetzungen in dem statisch unbestimmten System eines 2-Feld-Trägers Zwangsbeanspruchungen erfahren. Aufgrund des Setzungsverhaltens an den kritischen Achsen war nicht völlig auszuschließen, dass unzulässig große Setzungsdifferenzen an den betroffenen Überbauten eintreten können, weshalb die Ursachen für dieses Setzungsverhalten bzw. die Abweichungen von den Verformungsprognosen ermittelt werden mussten und darauf aufbauend ggf. zusätzliche Maßnahmen erforderlich waren. Es wurde daher von den Projektbeteiligten entschieden, an den auffälligen Pfeilerachsen ergänzende geotechnische Untersuchungen vorzunehmen und darauf aufbauend ggf. zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen, wobei jeder Pfeiler im Einzelnen zu betrachten gewesen war. Die Baugrundnacherkundungen an den jeweiligen Pfeilern bestanden zunächst im Abteufen von Kernbohrungen und dem Niederbringen von schweren Rammsondierungen einschließlich Ausführung von BDP-Versuchen. Aus den Kernbohrungen wurden darüber hinaus ungestörte und gestörte Bodenproben entnommen, an denen Laborversuche durchgeführt wurden.

Um weitere Erkenntnisse insbesondere auch hinsichtlich der Tragfähigkeit des Baugrundes zu erhalten, wurde zusätzlich an einer Achse eine Probelastung einer gesondert herzustellenden Spundwandbohle durchgeführt. Auf Basis der zusätzlichen geotechnischen Untersuchungen konnte das Baugrundmodell an den jeweiligen Achsen weiter präzisiert werden, um anschließend detaillierte Finite-Elemente-Berechnungen zur Grenztragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für verschiedene Beanspruchungssituationen vornehmen zu können. Die Nacherkundungen und die darauf aufbauenden Finite-Elemente-Berechnungen, die in Ab-

schnitt 4 erläutert werden, bildeten die Grundlage, um weitere Untersuchungen und Maßnahmen an den auffälligen Achsen vorzunehmen.

Aufgrund der festgestellten größeren Verformungen an einigen Pfeilerachsen im Zuge der Bauausführung war u. a. eine Intensivierung der bisherigen messtechnischen Überwachung der Fundamentverformungen sowie eine abgestimmte, weitere Vorgehensweise mit den Projektbeteiligten einschließlich dem Eisenbahnbundesamt erforderlich. Das hierfür aufgestellte Konzept enthielt folgende Schwerpunkte:

- Detaillierte Aus- und Bewertung der bisherigen messtechnischen Überwachung,
- Anwendung der Beobachtungsmethode gemäß Handbuch Eurocode 7, Band 1 [5] mit Erstellung eines angepassten Messprogrammes für die weitere Bauausführung zur detaillierten Erfassung der Verformungen in Abhängigkeit der Belastung sowie ggf. auftreten der Zeitsetzungen und Erstellung von rechnerischen Setzungsprognosen für zukünftige Belastungen auf der Basis der vorliegenden Messergebnisse,
- Überprüfung der ausreichenden Tragfähigkeit der Spundwandkastengründung einschließlich der mittragenden Wirkung des Fundamentes,
- Ermittlung der für den Überbau maßgeblichen Setzungsdifferenzen und Vergleich mit den Verformungsanforderungen des Überbaus,
- Aufzeigen von Regulierungsmöglichkeiten und geeigneten bautechnischen Maßnahmen im Falle unzulässig großer Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen.

### **3 Messtechnische Überwachung der Fundamentverformungen**

Zu Beginn der Bauausführung war an der SETB die Durchführung der messtechnischen Überwachung auf der Grundlage der Vorgaben der Ril 836 [3] bzw. ZTV-Ing [6] vorgesehen. Dort sind Vorgaben zu Art und Umfang sowie Durchführung der Messungen im Zuge der Bauausführung enthalten. Hinsichtlich des Umfangs ist ausgewiesen, dass die Messungen insbesondere vor und nach Lastwechseln vorzunehmen sind. Traggerüste und sonstige Hilfskonstruktionen mit ihren Gründungen sind in die Messungen einzubeziehen. Die Durchführung dieser Messungen oblag der ausführenden Firma (AN). Nachdem Auffälligkeiten hinsichtlich des Setzungsverhaltens einzelner Pfeilerachsen festgestellt worden waren, wurde geprüft, inwieweit die reguläre messtechnische Überwachung der Fundamentverformungen ausreichend ist. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere das Zeitsetzungsverhalten einzelner Achsen mit dem bisherigen Messregime nicht im ausreichenden Maße erfasst werden konnte. Es wurde daraufhin entschieden, von der örtlichen Bauüberwachung (BÜ) ergänzende Messungen auch zwischen einzelnen Lastwechseln im Sinne von Zeitsetzungs-messungen vornehmen zu lassen, um so eine detailliertere Erfassung des Verformungsverhaltens zu ermöglichen. Es lagen somit mehrere Messreihen vor, die zu einem bewerteten Setzungsverlauf zusammengefasst werden mussten. Neben einer grafischen Auswertung des Zeit-Setzungsverlaufes war es u. a. auch erforderlich, eine Gegenüberstellung der Setzungen mit der Zunahme der Belastung darzustellen, um entsprechende Zusammenhänge bewerten zu können. Relevant war es zudem, herauszufinden, inwieweit Zeitsetzungen bzw. Konsolidationssetzungen an dem jeweiligen Brückenpfeiler nach Lastzunahme aufgetreten sind. Die umfangreiche Datenerfassung und die aufwendige Erstellung der jeweiligen Grafiken, die für jeden der 216 Brückenpfeiler vorgenommen werden mussten, erfolgten mit dem Programm MS Excel.

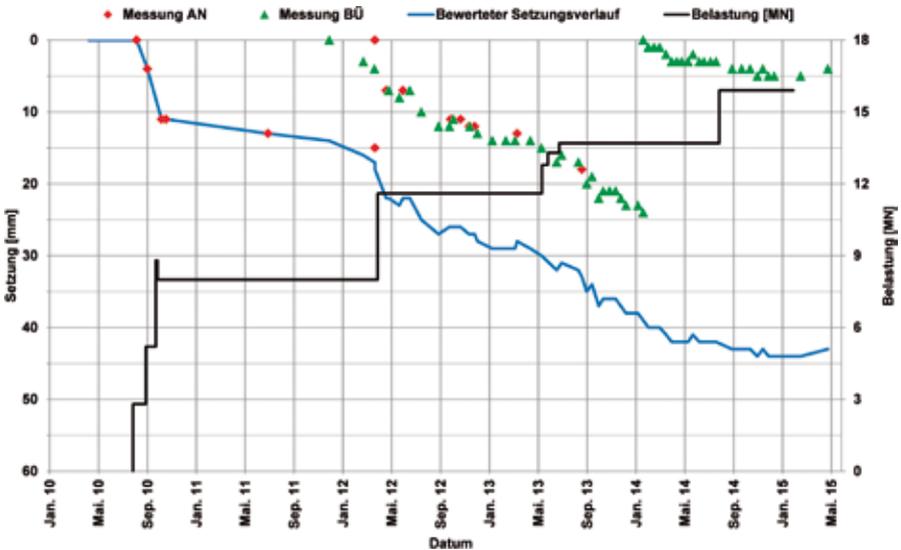


Bild 3: Auswertung der messtechnischen Überwachung für eine Pfeilerachse (Abzweigachse AA01), [2]

Bild 3 zeigt beispielhaft eine Auswertung für die Pfeilerachse AA01. Es erforderte aufgrund der großen und sich ständig aktualisierenden Datenmenge eine sehr disziplinierte und strukturierte Vorgehensweise. Bei der Auswertung für diese Achse musste zudem beachtet werden, dass sowohl bei den Messungen des AN als auch bei den Messungen der BÜ erneute Nullmessungen vorgenommen werden mussten und somit die bisherige Messreihe angehangen werden musste (siehe Sprung in Bild 3). Auf Basis dieser Aus- und Bewertung konnte eine abgesicherte Beurteilung des tatsächlichen Setzungsverhaltens vorgenommen werden. Diese Aus- und Bewertung bildete eine der Grundlagen für weiterführende Untersuchungen und ggf. zusätzliche Maßnahmen.

#### 4 Rechnerische Untersuchungen am Beispiel der Abzweigachse 32

##### 4.1 Zweck und Grundlagen der Berechnungen

An der Abzweigachse (AA) 32 waren aufgrund der festgestellten größeren Setzungen im Zuge der bisherigen Bauausführung die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Gründung erneut detailliert zu untersuchen. Insbesondere war eine Einschätzung des weiteren Setzungsverlaufes sowie des Tragverhaltens der Gründung bei weiterer Lastzunahme zwingend erforderlich. Dazu wurden 3D-Finite-Elemente-Berechnungen (FE-Berechnungen) für die Spundwandkastengründung durchgeführt. Dafür wurde die Software PLAXIS 3D 2011 [7] verwendet.

Für die Beschreibung des Materialverhaltens der Bodenschichten wurde ein bodenmechanisches Stoffmodell der neuesten Generation – das HS-Small-Modell – verwendet. Dieses Stoffmodell berücksichtigt die Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit sowie die unterschiedlichen Steifigkeiten bei Erst-, Ent- und Wiederbelastungsvorgängen analog dem herkömmlichen Hardening-Soil-Modell. Das HS-Small-Modell ist eine Erweiterung des Hardening-Soil-Modells, mit der die erhöhten Steifigkeiten im Bereich kleiner und sehr kleiner Dehnungen berücksichtigt werden. Hierfür sind nur die beiden Parameter  $G_0$  und  $\gamma_{0,7}$  zusätzlich zu den Materialparametern des regulären Hardening-Soil-Modells erforderlich. Zur Ermittlung der beiden Zusatzparameter wurde auf tabellierte dynamische Steifemoduln, Korrelationen sowie auf vorliegende eigene Erfahrungswerte zurückgegriffen. Die Wirkung der erhöhten Steifigkeiten im Bereich kleiner Dehnungen äußert sich bei den vorliegenden Setzungsberechnungen darin, dass sich die Verformungen realitätsnäher stärker um die setzungserzeugenden Belastungen konzentrieren bzw. lokalisieren.

Für den Fundamentbeton sowie für die Spundwandbohlen, die als Plattenelemente mit umgebenden Interface-Elementen modelliert wurden, ist das linear-elastische Stoffmodell verwendet worden. Auf Basis der Nacherkundungen wurde für die Berechnungen das in Bild 4 dargestellte Baugrundmodell erstellt.

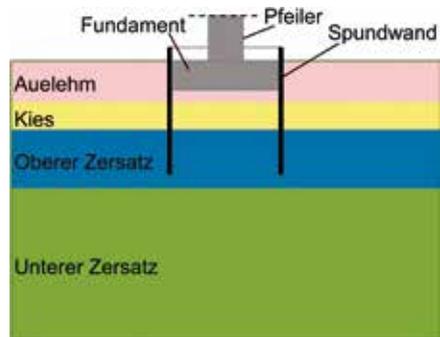


Bild 4: Schema der Gründung und Baugrundmodell AA 32, [2]

Für die Ermittlung der Steifigkeitsparameter des HS-Small-Modells der einzelnen Bodenschichten wurden mit Ausnahme des Buntsandsteinersatzes die entsprechenden Kennwerte dem Baugrundgutachten entnommen. Für die maßgebende Schicht des Buntsandsteines wurden gemäß den Nacherkundungsergebnissen zwei verschiedene Zonen modelliert. Zur Erfassung einer realitätsnahen Steifigkeit wurde in der oberen Zone auf Basis der Messergebnisse bei der jeweiligen Belastung eine Variation der Steifigkeitsparameter vorgenommen. Die Steifigkeitsparameter für die untere Zone des Buntsandsteines wurden auf der Basis des Baugrundgutachtens ermittelt.

Die weiterhin für das HS-Small-Modell erforderlichen Festigkeitsparameter  $\varphi$  und  $c$  wurden dem Baugrundgutachten entnommen. Zur Kalibrierung des Baugrundmodells wurde die im Nahbereich der AA 32 durchgeführte Spundwandprobelastung modelliert und nachgerechnet.

## 4.2 Untersuchungen zur Tragfähigkeit

Die rechnerischen Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Spundwandkastengründung einschließlich der mittragenden Wirkung des Fundamentes wurden für die maximalen charakteristischen ständigen Lasten von  $F_k \approx 24$  MN sowie die maximalen charakteristischen ständigen und veränderlichen Lasten von  $F_k \approx 33$  MN vorgenommen. Es wurde jeweils eine Phi-c-Reduktion durchgeführt, aus der sich ein globaler Sicherheitsfaktor  $\eta$  ermitteln lässt.

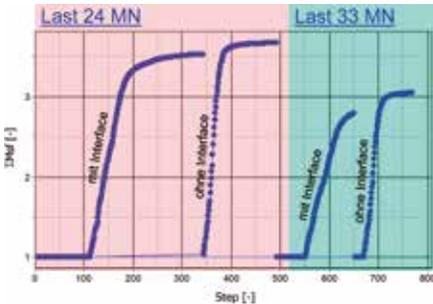


Bild 5: Ergebnisse der Phi-c-Reduktion, [2]

Bild 5 zeigt die Ergebnisse dieser Phi-c-Reduktion in Bezug zu den erfolgten Berechnungsschritten (steps).

Bei einer maximalen Last von  $F_k \approx 33$  MN ergibt sich die kleinste Sicherheit von  $\Sigma M_{sf} \approx 2,8$ , die größer als eine erforderliche globale Sicherheit von  $\eta = 2$  ist. Diese globale Sicherheit entspricht dem geforderten Sicherheitsniveau auf der Grundlage von Teilsicherheiten gemäß den geltenden neuesten Sicherheitsnormen [8]. Anhand der vorliegenden 3D-FE-Berechnungen ist somit der Nachweis der Tragfähigkeit des Gesamttragsystems der Spundwandkastengründung

erbracht. Die Ergebnisse dieser 3D-FE-Berechnungen wurden darüber hinaus auch mittels konventioneller Berechnungen bestätigt.

### 4.3 Ergebnisse der Setzungsprognosen

Anhand des auf Basis der Messergebnisse kalibrierten 3D-FE-Berechnungsmodells wurde eine Verformungsprognose für noch zu erwartende Setzungen im Zuge der weiteren planmäßigen Lastaufbringung erstellt. Bild 6 zeigt beispielhaft das Ergebnis sowie die Gegenüberstellung mit den vorliegenden Messergebnissen sowie den Verlauf der Belastung, die sich um die jeweiligen Laststufen bis zur Endbelastung (ca. 25 MN) infolge ständiger Lasten erhöht.

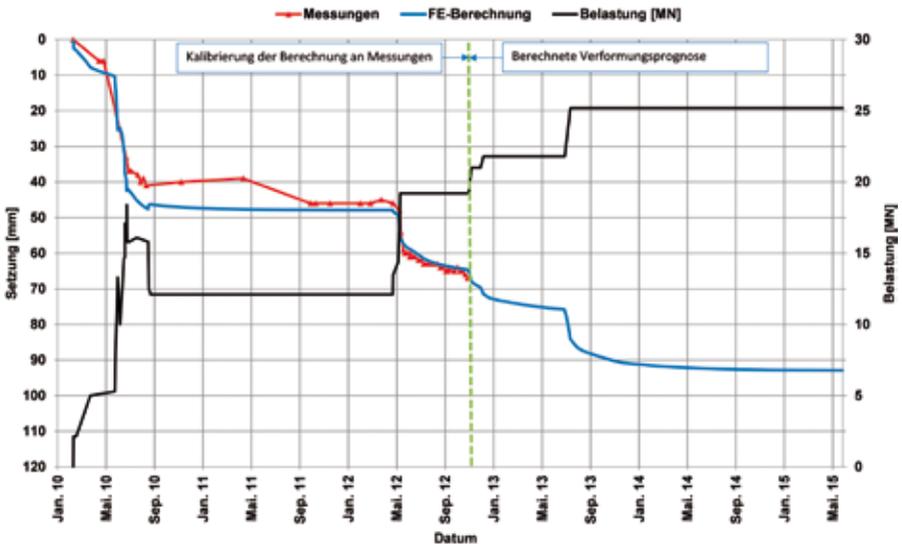


Bild 6: Ergebnis Verformungsprognose AA 32 – ständige Lasten, [2]

Neben den rechnerischen Untersuchungen zum Setzungsverhalten infolge ständiger Lasten wurden auch rechnerische Untersuchungen zu Verformungen infolge dynamischer Zugverkehrsbeanspruchung vorgenommen. Dazu ist anzumerken, dass für die Ermittlung von Verformungen im Baugrund unter sehr oft wiederkehrender dynamischer bzw. zyklischer Belastung kein anerkanntes Berechnungsverfahren existiert. Die Analyse des Spannungs-Verformungs-Verhaltens von Böden bei Beanspruchungen mit sehr großer Zyklenanzahl und verschiedenen Amplituden ist derzeit immer noch Gegenstand umfangreicher wissenschaftlicher Untersuchungen (siehe z. B. [8]). Auf der Basis des vorhandenen Baugrundmodells konnte eine Abschätzung der Verformungen infolge dynamischer Zugverkehrsbeanspruchung durchgeführt werden.

#### 4.4 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen und den rechnerischen Untersuchungen

Die Ergebnisse dieser Verformungsprognosen, die gemäß Bild 6 gut mit den Messergebnissen übereinstimmen, sowie des erbrachten Tragfähigkeitsnachweises bildeten die Grundlage für die Festlegung weiterer Maßnahmen. Es wurde aufgrund der noch zu erwartenden Setzungen für diese Achse entschieden, dass zum Ausgleich von Setzungsdifferenzen eine gemäß der Spannungsreserven der Überbauten schrittweisen Anhebung der Überbauten mittels Pressen vorzunehmen ist. Weiterhin wurde festgelegt, nach Herstellung der Überbauten zur Setzungsvorwegnahme eine außerplanmäßige Vorbelastung an der AA 32 unter Berücksichtigung des Lastbildes LM 71 [4] durchzuführen (Bilder 7 und 8). Diese diente auch zur weiteren Verifizierung der Verformungsprognosen.



Bild 7: Vorbelastung mittels Betonplatten an der AA 32, [2]

Es hat sich gezeigt, dass mit den im Vorfeld angestellten Verformungsprognosen ausreichend genaue Setzungszunahmen bei weiterer Lastaufbringung ermittelt werden konnten (Bild 8). Die Verformungsprognosen konnten somit auf Basis dieser Vorbelastung bestätigt werden. Da auf der Basis von erbrachten Tragfähigkeitsnachweisen ein Versagen der Gründungen der auffälligen Pfeilerachsen ausgeschlossen werden konnte, wurde die weitere Nachweisführung für diese Achsen entsprechend den Grundsätzen der Beobachtungsmethode geführt. In Abschnitt 5 wird auf die Anwendung der Beobachtungsmethode näher eingegangen.

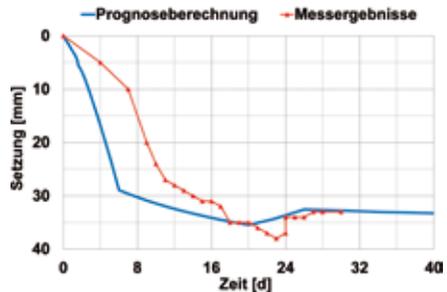


Bild 8: Vergleich der im Vorfeld der Vorbelastung aufgestellten Prognose mit den Messungen an der AA 32, [2]

Eine weitere Schlussfolgerung aus der Aus- und Bewertung der messtechnischen Überwachung war die Durchführung von Belastungsfahrten, die für das gesamte Brückenbauwerk im August 2014 stattgefunden haben. Dazu wurden zwei schwere Güterzüge herangezogen, die 20 Mal mit langsamer Geschwindigkeit über die Brücke gefahren sind. Ziel dieser Belastungsfahrten war die Erreichung einer gleichmäßigen Vorbelastung und der Gewinn von Erkenntnissen hinsichtlich des Setzungsverhaltens für quasi-statische Lasten zur Kalibrierung der Setzungsprognosen für dynamische Lasten. Dazu erfolgte eine messtechnische Überwachung der Pfeilersetzungen vor und nach sowie auch intensiv während dieser Belastungsfahrten.

### 5 Anwendung der Beobachtungsmethode

In dem Handbuch Eurocode 7, Band 1, [5], nachfolgend als EC 7 bezeichnet, ist die Beobachtungsmethode definiert. Die Beobachtungsmethode ist eine Kombination der sich auf die vorhandenen geotechnischen Untersuchungen stützenden rechnerischen Prognosen mit der laufenden messtechnischen Kontrolle des Bauwerkes und des Baugrundes während dessen Herstellung und ggf. auch während dessen Nutzung, wobei kritische Situationen durch die Anwendung geeigneter technischer Maßnahmen beherrscht werden müssen.

Die Beobachtungsmethode kann gemäß EC 7 bei Baumaßnahmen mit hohem Schwierigkeitsgrad im Sinne der Geotechnischen Kategorie GK 3 insbesondere bei Baumaßnahmen mit ausgeprägter Baugrund-Bauwerk-Wechselwirkung zweckmäßig sein. Die SETB ist in die Geotechnische Kategorie 3 einzustufen. Im EC 7 sind Anforderungen und Randbedingungen für die Anwendung bzw. Durchführung der Beobachtungsmethode aufgeführt. Grundlegende Voraussetzungen für die Anwendung der Beobachtungsmethode an den auffälligen Pfeilerachsen der SETB für den Gebrauchszustand sind:

- dass eine ausreichende Duktilität des Bauwerkes, d. h. kein plötzlicher Tragfähigkeitsverlust ohne Erkennbarkeit bzw. rechtzeitig messtechnisch erfassbarer Ankündigung, gegeben ist,
- dass eine ausreichende Prognostizierbarkeit des zu überwachenden Bauwerksverhaltens gegeben ist,
- dass durch die messtechnische Überwachung das zu überwachende Bauwerksverhalten hinreichend genau erfasst werden kann.

Diese Voraussetzungen sind für die SETB erfüllt, weshalb grundsätzlich die Beobachtungsmethode an den auffälligen und deren benachbarten Pfeilerachsen (etwa 30 Pfeilerachsen) der SETB angewendet werden kann. Die Grundsätze für die Nachweisführung der Beobachtungsmethode sind nachfolgend stichpunktartig erfasst:

- Definition der maßgebenden Beanspruchungen/Laststufen,
- Definition und Vorgabe von Alarm- und Grenzwerten,
- Prognosen der zu erwartenden Fundamentverformungen,
- Messtechnische Überwachung der Fundamentverformungen,
- Vergleich der Messungen mit den Prognosen,
- Definition von erforderlichen Maßnahmen bei Überschreitungen des Alarm- und Grenzwertes.

An der SETB wurde diese Art der Nachweisführung für die setzungsauffälligen Pfeiler im Zuge der Bauausführung umgesetzt. Es ist vorgesehen, diese Vorgehensweise auch für den Zeitraum nach der Inbetriebnahme der Eisenbahnstrecke zunächst fortzusetzen.

## Quellen

- [1] Koletzko, A.; Christein, S.; Pampel, A.; Untersuchungen und Maßnahmen an einem setzungsauffälligen Pfeiler der Saale-Elster-Talbrücke der NBS Erfurt–Leipzig/Halle. In: DGGT (Hrsg.): Tagungsband zur 33. Baugrundtagung am 23.–26.9.2014 in Berlin, Berlin, 2014, S. 69–76.
- [2] NBS E–L/H; Saale-Elster-Talbrücke; Projektunterlagen zur geotechnischen Fachberatung, ARGE SVG NBS 8.2 / BAURUND DRESDEN, Zeitraum 2011–2015.
- [3] Ril 836: Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten. DB AG, 2. Aktualisierung vom 01.02.2013.
- [4] DIN FB 101: Einwirkungen auf Brücken. 03/2009.
- [5] DIN (Hrsg.): Normenhandbuch Eurocodes: Handbuch Eurocode 7: Geotechnische Bemessung; Band 1: Allgemeine Regeln. Vom DIN autorisierte Zusammenführung der Regelwerke, 1. Aufl., Berlin: Beuth, 2011 (enthält DIN 1054:2010-12).
- [6] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. 12/2012.
- [7] Manuals Plaxis® 3D 2012, Plaxis b.v., Delft (Niederlande).
- [8] EA Pfähle, Kapitel 13: Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen. Entwurf, DGGT, AK 1.4 Baugrunderdynamik.