

mtb messtechnische briefe

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz

Mircea Cristian Dudescu,
Technische Universität
Cluj-Napoca, Rumänien

Einleitung

Dehnungsmessungen an Holzwerkstoffen mit direkt applizierten elektrischen Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden in der Vergangenheit bereits an verschiedenen Forschungseinrichtungen erfolgreich durchgeführt. So sind in [1] grundlegende Betrachtungen und Anwendungsbeispiele enthalten. Der Aufsatz [2] beschäftigt sich darüber hinausgehend mit Fragen der Zuverlässigkeit und der Messgenauigkeit. In [3] werden DMS-Messungen mit Ergebnissen verglichen, die mittels Moirémessungen gewonnen wurden.

Im Vergleich zur Standardanwendung von DMS auf metallischen Bauteilen treten folgende zusätzliche Probleme auf:

- Naturholz und auch Holzwerkstoffe wie Spanplatten besitzen keine homogene Struktur. Sie sind zellular unregelmäßig aufgebaut, bzw. aus Einzelbestandteilen zusammengesetzt. Damit ergeben sich große lokale Dehnungsunterschiede. Wird die Anzeige eines mittleren Dehnungswertes gewünscht, muss ein DMS mit einer aktiven Messfläche gewählt werden, bei der Länge und Breite wesentlich größer als die Zellstruktur und die Abmessungen der Einzelbestandteile sind.

- Die Installation der DMS, die eine kraftschlüssige Verbindung des DMS-Trägers mit dem Bauteil zum Ziel hat, darf die Materialeigenschaften des Bauteils nicht beeinflussen. Diese Forderung ist bei der Präparation auf Holzwerkstoffe nur näherungsweise erfüllbar, da alle denkbaren Klebstoffe in die poröse Oberfläche eindringen und diese verfestigen.
- Idealerweise folgt ein DMS rückwirkungsfrei der Deformation der Bauteiloberfläche. Auch diese Forderung ist nicht vollständig zu erfüllen. Der für die Steifigkeit des DMS maßgebliche metallische Leiter ist mit $5\ \mu\text{m}$ zwar sehr dünn; sein Elastizitätsmodul ist aber ca. 20 mal so groß wie der von Holz.
- Zur Erfassung der Widerstandsänderung des DMS wird dieser in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung mit konstanter Brückenspeisespannung von üblicherweise $U_B = 0,5 \dots 5\text{V}$ betrieben. Die dabei im DMS erzeugte geringe Wärmemenge fließt in den Untergrund bzw. in die Umgebung ab und spielt bei Messungen an metallischen Bauteilen praktisch keine Rolle. Da Holz ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, wird dieser Ausgleichsvorgang behindert und es kann zu einer nennenswerten Eigenerwärmung der Messstelle und damit zu thermisch begründeten Messfehlern kommen.

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
 Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

- Generell ist die Temperatur selbstkompensation bei Messungen an Holz nur unzureichend möglich. Der thermische Ausdehnungskoeffizient hängt bei Naturholz von der Richtung und der Feuchtigkeit ab. Weiterhin ist zu beachten, dass bei Erwärmung dem Prozess der positiven thermischen Ausdehnung eine negative Dehnung in Folge Schrumpfung entgegenwirkt.

Experimentelle Untersuchungen

Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz wurde eine Versuchseinrichtung aufgebaut, in der Biegebalken aus unterschiedlichen Holzarten einer definierten 4-Punkt-Biegebeanspruchung ausgesetzt werden können (Abb. 1). Im mittleren Teil des Balkens entsteht dabei ein Bereich, in dem die Querkraft verschwindet und nur das Biegemoment auftritt (Abb. 2). Die Biegelinie entspricht in diesem mittleren Bereich einem Kreisbogen. Die Bestimmung der Referenzdehnung kann damit aus der Differenz der Durchsenkungen von drei Messpunkten erfolgen. Die Belastung wird durch eine Gewindespindel realisiert, mit der eine obere Brücke verfahren wird. Dabei erfolgt eine Aufteilung der Gesamtkraft P in die beiden auf den Balken wirkenden Teilkräfte $P/2$.



Abb. 1: Versuchsanordnung für den 4-Punkt-Biegeversuch

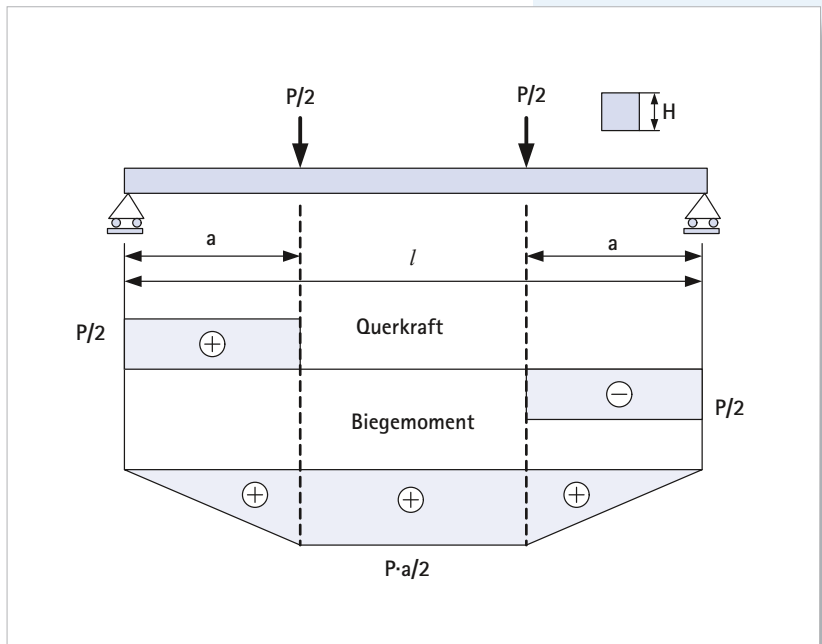


Abb. 2: Querkraft- und Biegemoment-Verläufe

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien



Abb. 3:
Benutzeroberfläche für
die Datenerfassung und
Grenzwertüberwachung
(catman®Easy)

Die Versuchsanordnung enthält die folgenden Aufnehmer zur Erfassung der Gesamtkraft, der Durchsenkung und der Temperatur, wobei die Aufnehmer der mechanischen Größen HBM-Produkte sind.

- ein Kraftaufnehmer (U2B - 10 kN)
- drei Wegaufnehmer (WA-T, Messbereich 0...20 mm)
- ein Temperaturfühler (Pt100).

Alle Aufnehmer und die zu untersuchenden elektrischen Dehnungsmessstreifen sind an einen Messverstärkersystem Spider8 von HBM angeschlossen. Die Messeinstellungen und die Messwertaufnahme erfolgt über die zugehörige Datenerfassungssoftware catman®Easy. Die speziell für diese Untersuchungen erstellte Benutzeroberfläche ist in **Abbildung 3** angegeben. Sehr komfortabel können darin alle gemessenen und berechneten Größen (Kraft, Durchbiegung, Temperatur, Dehnung) beobachtet und aufgezeichnet werden. Zusätzlich werden drei Messparameter – Durchbiegung in der Mitte des Balkens, Kraft- und Dehnungswerte – überwacht, um eine Überlastung des Probekörpers oder die Beschädigung der DMS aufgrund zu hoher Dehnung zu vermeiden.

Probekörper und DMS-Präparation

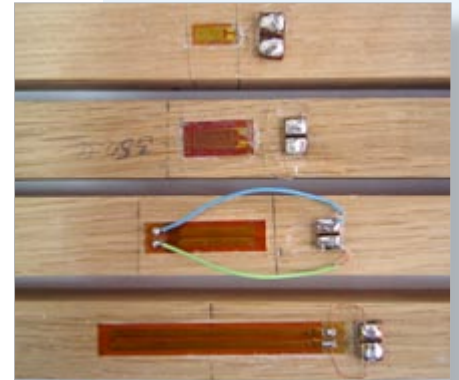
Die Probekörper wurden aus drei unterschiedlichen Holzarten – Eiche (*Quercus robur*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Tanne (*Abies etis*) – exakt auf eine Länge von 300mm und den quadratischen Querschnitt von 20 x 20 mm zugeschnitten.

Die Faserrichtung ist dabei längs zum Probekörper orientiert. Bei Versuchsbeginn besitzen sie sowohl die gleiche Feuchtigkeit als auch die gleiche Temperatur.

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz

Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

Die Präparation der Dehnungsmessstreifen mit den Messgitterlängen 6, 10, 20 und 50 mm erfolgte mit dem Schnellklebstoff X60 jeweils genau in der Mitte der Probekörper. Die DMS sind in Halbbrückenschaltung mit dem Messverstärker verbunden, wobei ein DMS als Dummy für die Temperaturkompensation zuständig ist. Dieser DMS ist auf einem vollkommen gleichartigen Probekörper präpariert, der vor der Versuchseinrichtung platziert ist und mechanisch nicht belastet wird. In **Abbildung 4** sind DMS-Präparationen dargestellt.

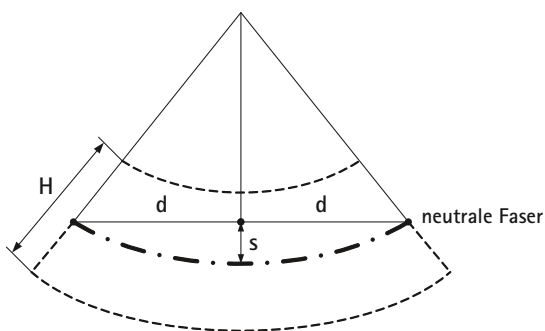


*Abb. 4:
Holzproben mit DMS
unterschiedlicher Länge*

Bestimmung der Referenzdehnung

Die Bestimmung der Referenzdehnung erfolgt auf der Grundlage von an drei Punkten gemessenen Durchsenkungen. Um den Einfluss von Eindrücken der Lager zu minimieren, müssen die Messpunkte im mittleren Bereich liegen und einen gewissen Abstand zu den Kräfteinleitungsstellen besitzen. Die Dehnung der Randfasern ergibt sich durch geometrische Betrachtungen aus der Krümmung. Betrachtet man die Krümmung der neutralen Faser, so ergibt sich die Bestimmungsgleichung (1).

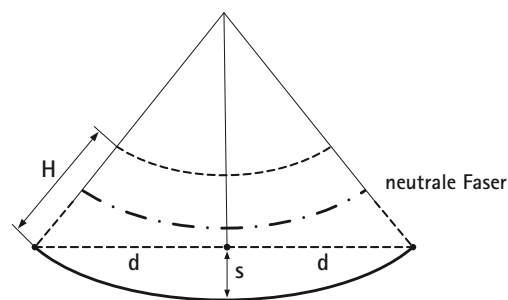
$$\epsilon = \frac{H}{\frac{d^2}{s} + s - H} \quad (1)$$



Darin ist d der Abstand zwischen den Messpunkten (Wegaufnehmern), s die Differenz der Durchsenkungen zwischen dem mittleren und den seitlichen Aufnehmern und H die Höhe des Balkenquerschnitts.

Zu einer ähnlichen Beziehung kommt man, wenn die Krümmung der äußeren Faser betrachtet wird, wobei dieser Fall dem experimentellen Aufbau näher kommt.

$$\varepsilon = \frac{H \cdot s}{s^2 + d^2} \quad (2)$$



Zwischen den beiden Gleichungen besteht bei kleinen Deformationen praktisch kein Unterschied. Die ermittelten Dehnungen weichen weniger als 0,2% voneinander ab. Vorausgesetzt wird dabei, dass die neutrale Faser auf der Hälfte der Querschnittshöhe liegt.

Versuchsprogramm und Ergebnisse

In Voruntersuchungen wurde zunächst die Genauigkeit der Gleichungen (1) bzw. (2), die auf der Auswertung der Krümmung beruhen mit einer weiteren Auswertgleichung

$$\varepsilon = \frac{f \cdot H}{\frac{l^2}{4} - \frac{a^2}{3}} \quad (3),$$

die sich aus der Biegelinie ergibt und die als Messwert lediglich die Durchsenkung f in der Mitte des Balkens erfordert, verglichen. In **Abbildung 5** ist das Ergebnis dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die aus der reinen Durchbiegungsmessung nach Gleichung (3) bestimmten Dehnungswerte deutliche zu groß sind. Diese Abweichung kann durch die unvermeidlichen Eindrücke an den Lasteinleitungsstellen erklärt werden, die eine zu große Dehnung vortäuschen. Deshalb erfolgt die Auswertung in allen nachfolgenden Messungen nach Gleichung (2).

Weiterhin wurde der Einfluss der Speisespannung auf die gemessene Dehnung untersucht. Diese Ergebnisse sind in **Abbildung 6** dargestellt. Der Einfluss der Brückenspeisespannung ist allerdings so gering, dass er in der grafischen Darstellung praktisch nicht sichtbar wird.

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
 Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

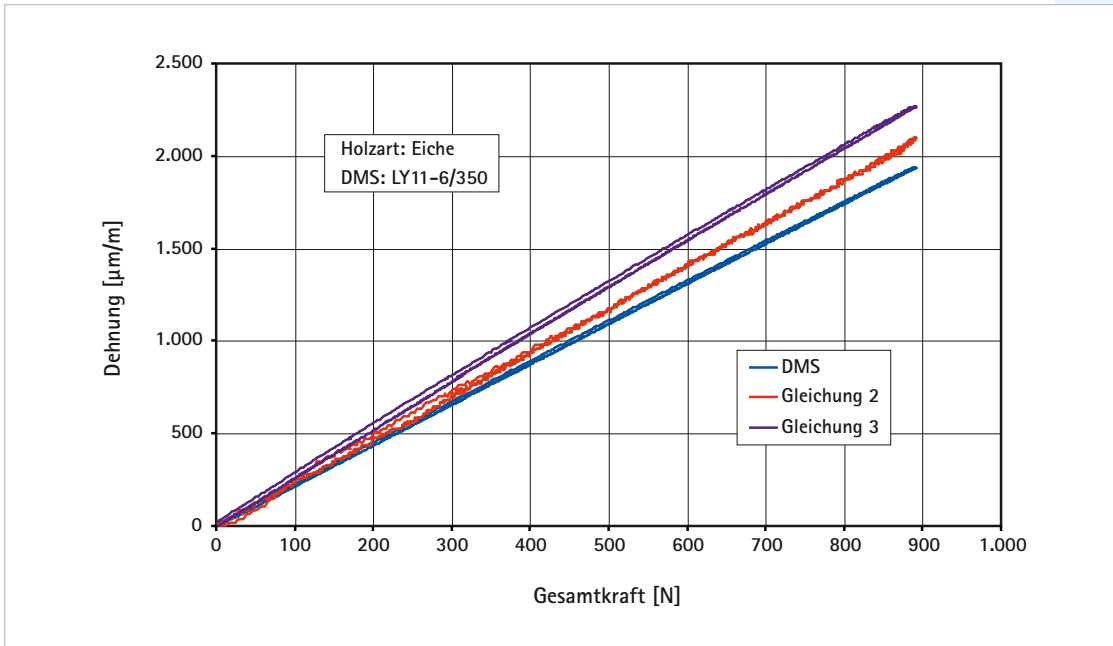


Abb. 5: Dehnungsverlauf nach Gleichungen 2 und 3 sowie einer DMS-Messung

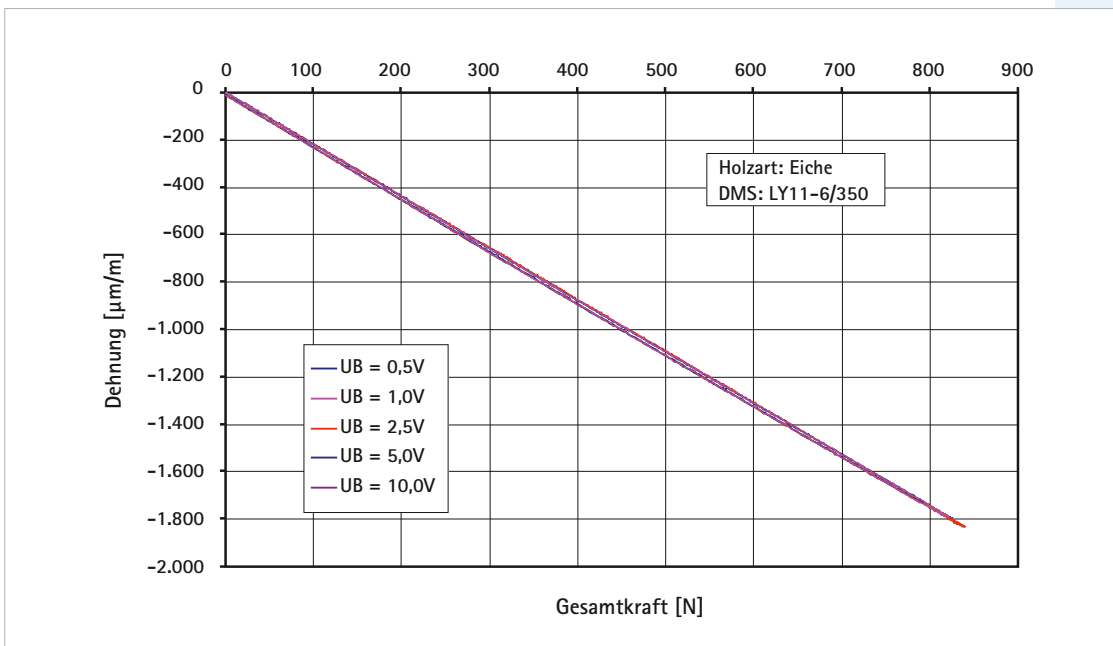


Abb. 6: Dehnungsverlauf in Abhängigkeit von der Brückenspeisespannung U_B

Für die Temperaturkompensation spielt die Eigenerwärmung des DMS eine wesentliche Rolle. Um diesen Einfluss sichtbar zu machen, wurden auf den DMS Temperaturfühler präpariert. In **Abbildung 7** ist die Temperaturerhöhung, ausgehend von der Raumtemperatur, am DMS angegeben.

Wie festgestellt werden kann, ist der Temperaturanstieg sehr gering. Die Auswirkungen auf die gemessene Dehnung könnten zwar berücksichtigt werden, doch die daraus entstehenden Fehler sind sehr klein, so dass sie selbst im Fall einer Viertelbrücke vernachlässigt werden können. Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, dass die Temperaturerhöhung an beiden DMS der Halbbrücke (aktiver

DMS und Dummy) auftritt und der entstehende Fehler praktisch null bleibt.

Zur Untersuchung des Einflusses der DMS-Länge wurden zahlreiche Messungen durchgeführt. So wurden Prüfkörper aus Eiche mit DMS-Längen von 6 mm, 10 mm, 20 mm und 50 mm untersucht. Nach der Auswertung dieser Ergebnisse wurden die anderen Holzarten nur unter Verwendung von DMS der Länge 10 mm geprüft.

Die Ergebnisse sind auszugsweise in den **Abbildungen 8 bis 12** angegeben.

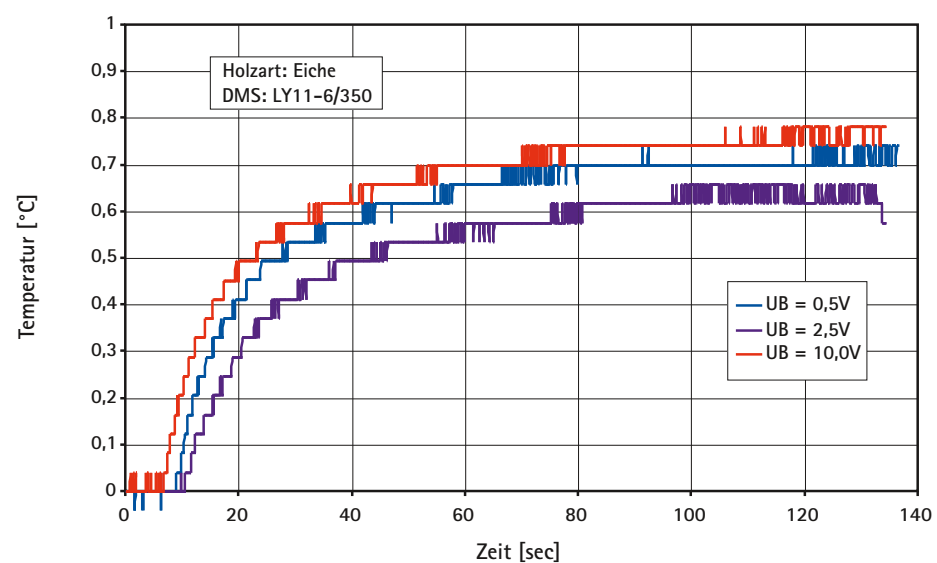


Abb. 7: Temperaturerhöhung am DMS bei unterschiedlicher Speisespannung

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

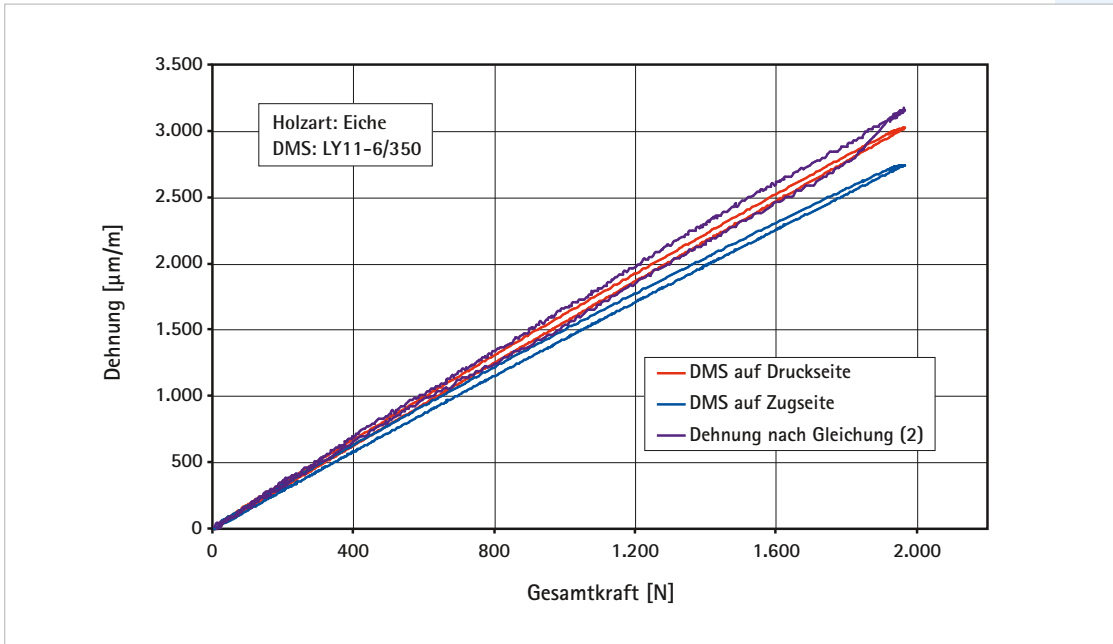


Abb. 8: Belastungs-Dehnungs-Kurven für Eiche. DMS-Länge 6 mm

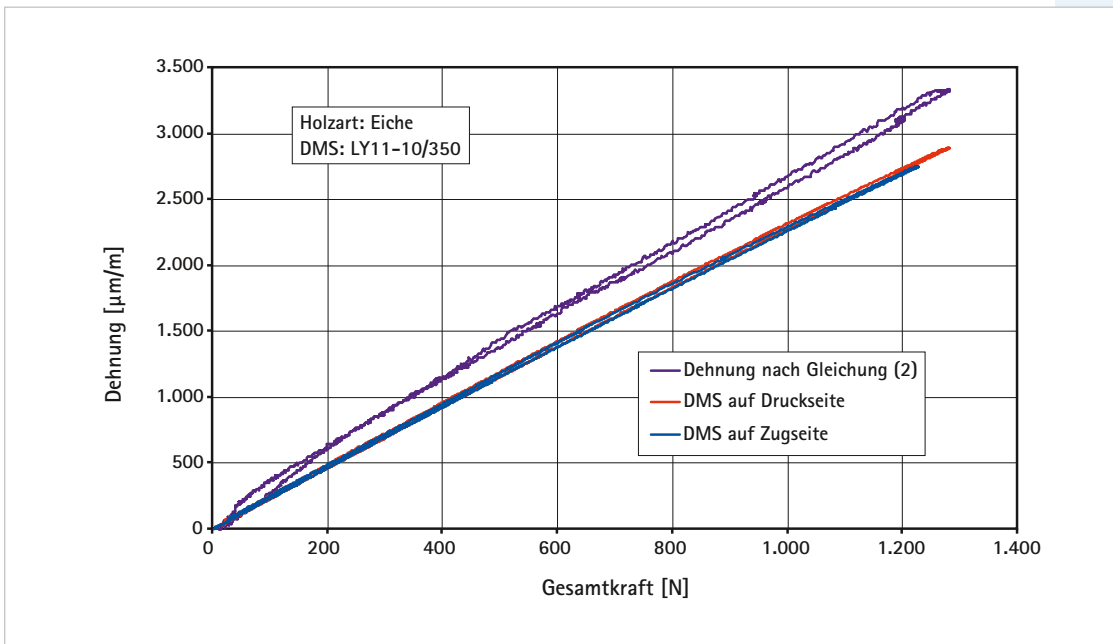


Abb. 9: Belastungs-Dehnungs-Kurven für Eiche. DMS-Länge 10 mm

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
 Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

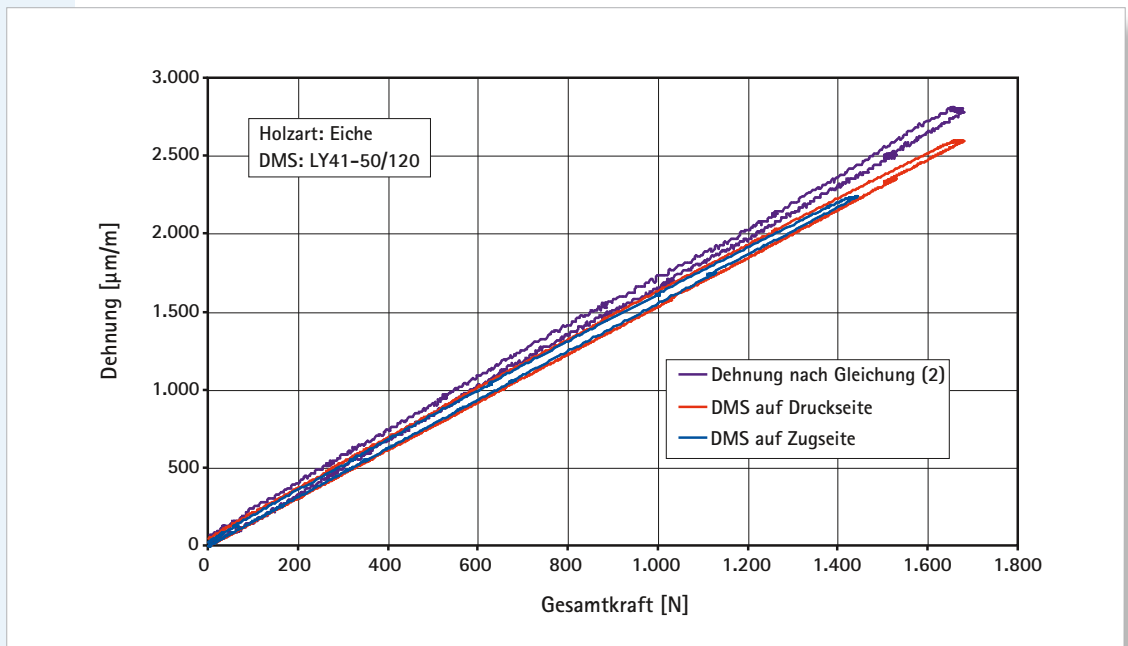


Abb. 10: Belastungs-Dehnungs-Kurven für Eiche. DMS-Länge 50 mm

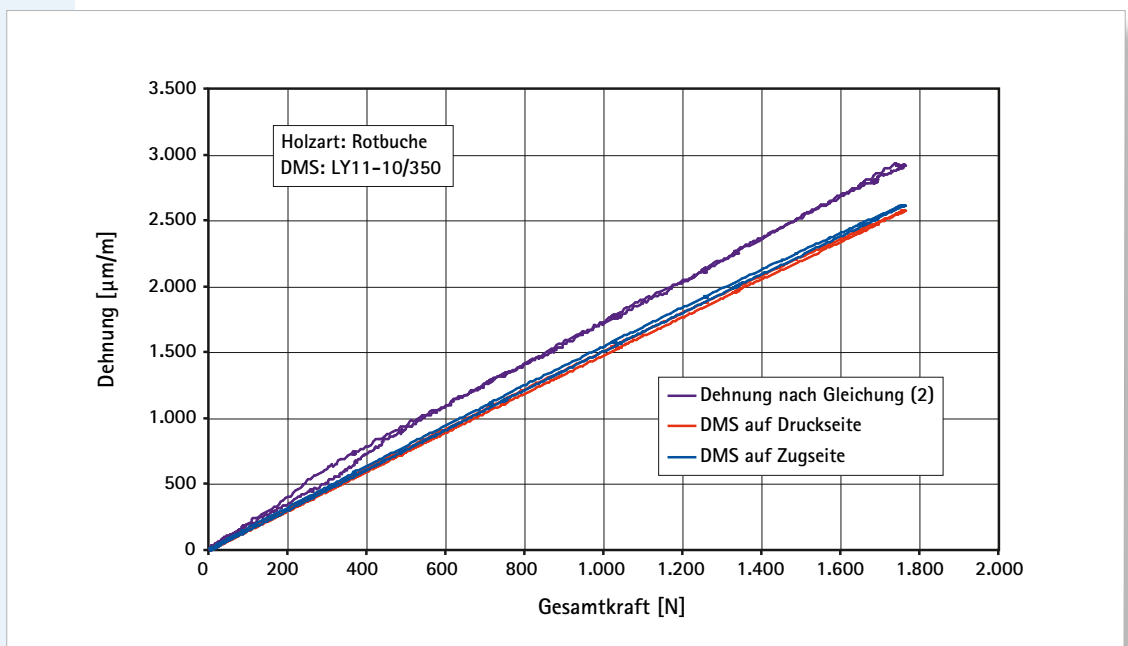


Abb. 11: Belastungs-Dehnungs-Kurven für Rotbuche. DMS-Länge 10 mm

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz

Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

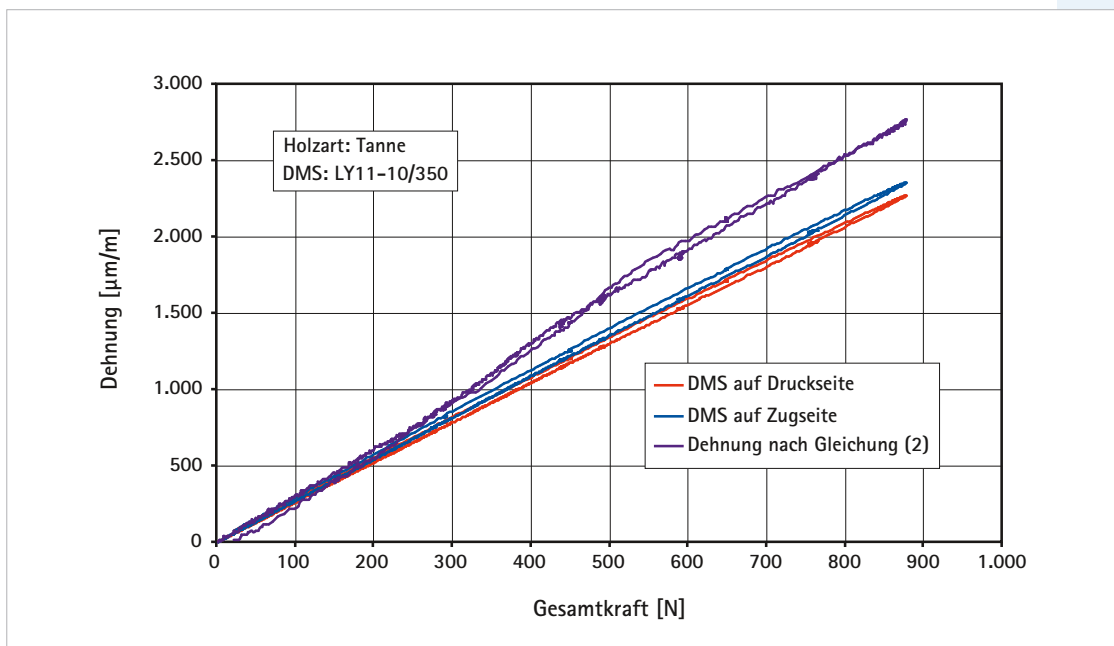


Abb. 12: Belastungs-Dehnungs-Kurven für Tanne. DMS-Länge 10 mm

Numerische Simulationen

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die mit den Dehnungsmessstreifen gemessenen Dehnungen durchgehend kleiner sind als die Referenzdehnung. Eine Ursache dafür kann in der versteifenden Wirkung des Systems DMS-Klebstoff zu finden sein. Aus diesem Grunde wurden ergänzende FEM-Simulationen durchgeführt. Die verwendeten Modelle beinhalten den Probekörper aus Holz, die Klebstoffschicht aus X60 und den Dehnungsmessstreifen. Die elastischen

Eigenschaften der Einzelbestandteile wurden durch die reale Geometrie und durch gemittelte E-Moduli abgebildet.

Klebstoffschicht X60:

$d = 0,1 \text{ mm}$, $E = 3500 \text{ N/mm}^2$

Dehnungsmessstreifen:

$d = 0,075 \text{ mm}$, $E = 6800 \text{ N/mm}^2$

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz
Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

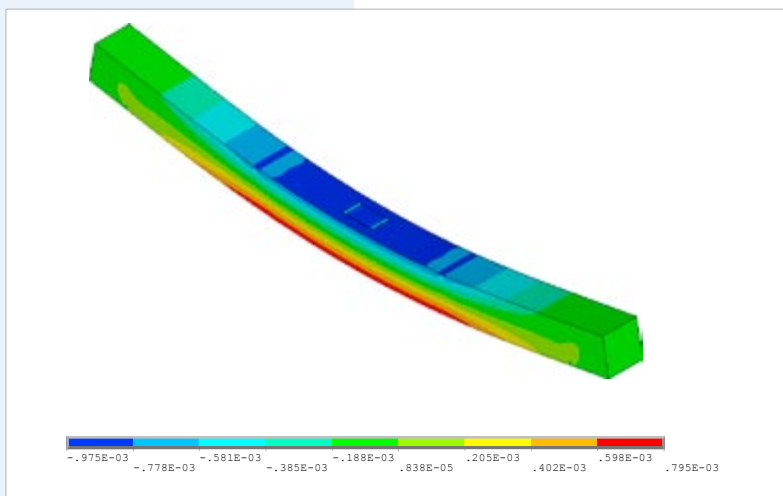


Abb. 13: FE-Simulation, Dehnung in Längsrichtung

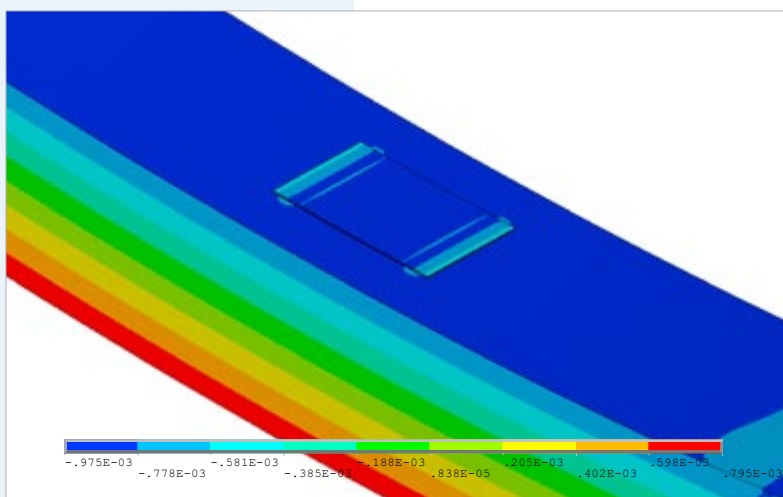


Abb. 14: FE-Simulation, Dehnung in Längsrichtung
(Ausschnitt von Abbildung 13)

In den **Abbildungen 13** und **14** ist die Längsdehnungsverteilung entlang des Balkens und im DMS dargestellt. Die **Abbildungen 15** und **16** zeigen den Verlauf der Längsdehnung in einer Spur, längs durch den Dehnungsmessstreifen für DMS unterschiedlicher Gitterlänge. Dabei wird deutlich, dass die Dehnung im DMS betragsmäßig etwa 2% unter der Dehnung an der Randfaser des Biegebalkens liegt.

Auswertung und Schlussfolgerungen

Ziel der Untersuchung war die Eigenschaftsanalyse von DMS-Messstellen auf Holz. Dabei wurden unterschiedliche Einflüsse wie die Temperaturerhöhung, die Brückenspeisespannung und die DMS-Länge getrennt untersucht. Eine FE-Simulation, in der sowohl der Holzbalken als auch der Klebstoff und der DMS moduliert sind, vervollständigte die Analyse. Damit wurde versucht, die Auswirkungen der lokalen Verstärkung auf die Ergebnisse zu bestimmen und den experimentellen Befund zu erklären.

Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens des Holzes gegenüber Zug und Druck (E-Modul) sind die gemessenen Dehnungswerte an den oberen und unteren Fasern des gebogenen Balkens nicht identisch. Die neutrale Faser verschiebt sich offensichtlich in Richtung der Druckseite. Die Dehnungsunterschiede zwischen den äußeren Fasern nehmen mit abnehmender DMS-Länge zu.

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz

Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

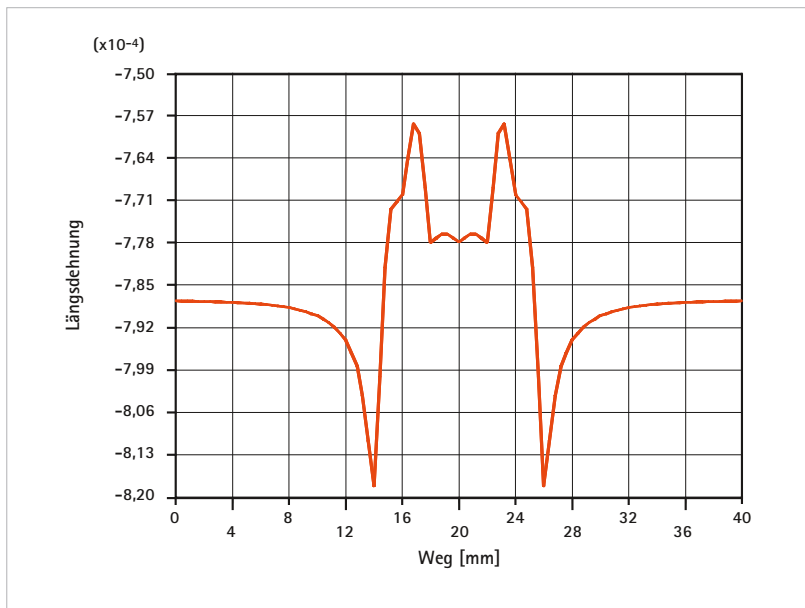


Abb. 15: FE-Simulation, Längsdehnung über den DMS (Gitterlänge 6 mm)

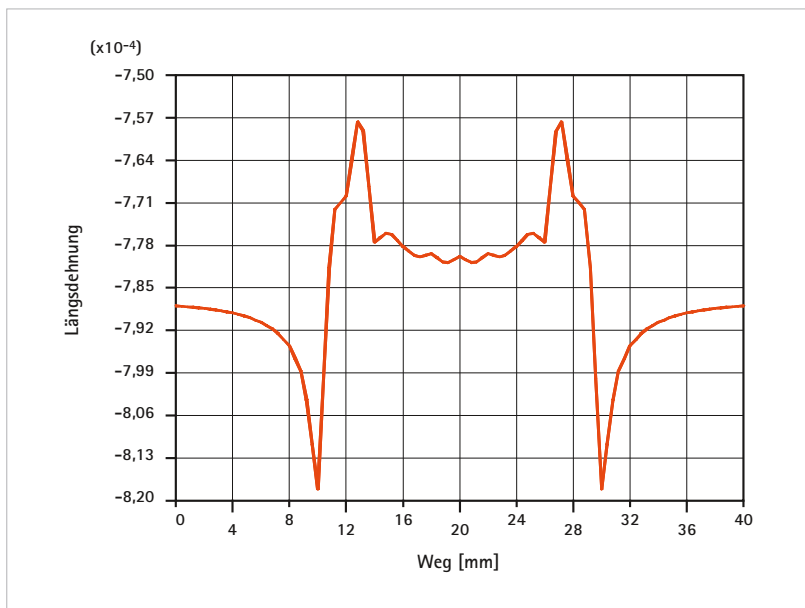


Abb. 16: FE-Simulation, Längsdehnung über den DMS (Gitterlänge 10 mm)

Alle Messungen ergaben kleinere als die tatsächlichen Dehnungswerte. Dies ist auf den lokalen Verstärkungseffekt zurückzuführen, der durch ein auf einem Werkstoff mit geringem E-Modul installierten DMS entsteht. Für korrekte Messungen ist eine erneute Kalibrierung des DMS sinnvoll. Hierzu wurde der tatsächliche Faktor k^* des DMS bestimmt, der von dem vom DMS-Hersteller für metallische Bauteilwerkstoffe geltenden k -Faktor abweicht. In Tabelle 1 sind diese Faktoren k^* für verschiedene untersuchte DMS und Holzarten angegeben.

Tab. 1:
Experimentell bestimmte
 k -Faktoren der DMS bei
Installation auf Holz

Holz	DMS	k	k^*	Differenz [%]
Eiche	LY11-6/350	2,21	1,98	10,4
Eiche	LY11-10/350	2,08	1,81	13,0
Eiche	LY41-20/120	2,1	1,87	10,9
Eiche	LY41-50/120	2,11	1,96	6,6
Rotbuche	LY11-10/350	2,08	1,83	12,0
Tanne	LY11-10/350	2,08	1,73	16,8

Diese Werte stellen den Mittelwert zwischen den Werten dar, die für DMS auf der Druck- und auf der Zugseite gelten. Man kann feststellen, dass k^* von der DMS-Länge und auch vom E-Modul des Holzes abhängt.

In Auswertung der Untersuchungen wurden E-Moduli für die untersuchten Holzarten berechnet. In Tabelle 2 sind diese Werte im Vergleich mit Angaben aus unterschiedlichen Literaturstellen ([4] - [8]) angegeben.

Holzart	DMS-Typ	$E_{\text{Literatur}}$ [N/mm ²]	E_{Biegung} [N/mm ²]	E_{Druck} [N/mm ²]	E_{Zug} [N/mm ²]
Eiche	LY11-6/350	13000 [4]	13699	14382	15747
Eiche	LY11-10/350	10000-13200 [7]	9041	10325	10524
Eiche	LY41-20/120	10500-14500 [6]	14926	16715	10524
Eiche	LY41-50/120	13000 [4]	13606	14661	14477
Tanne	LY11-10/350	10000 [4]	8644	10159	10588
Rotbuche	LY11-10/350	14000-15700 [4,5]	15246	17170	17501

Tab. 2: Gemessene E-Moduli im Vergleich mit Werten aus der Literatur

Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz

Mircea Cristian Dudescu, Technische Universität Cluj-Napoca, Rumänien

Literatur

- [1] F.-W. Bröker: Dehnungsmessungen an Holz mit direkt applizierten DMS, Messtechnische Briefe 21 (1985) Heft 1, Seite 18-23
- [2] R. J. Beer; M. Vanek; H. D. Walden: Zuverlässigkeit einer DMS-Messstelle auf Holz, Kurzzeitstabilität-Langzeitverhalten, Holzforschung und Holzverwertung (Austria) 1990, 42(3) Seite 48-51
- [3] P. Niemz, J. Schreiber, J. Naumann, M. Stockmann. Experimentelle Ermittlung der Dehnungen im Probenquerschnitt bei Biegebelastung von Holzpartikelwerkstoffen, Holz Roh Werkst, 65, pp. 459-468, 2007.
- [4] DIN ; DIN 4076 Teil 1, Oktober 1985 / DIN 68364, November 1979; Beuth-Verlag
- [5] Vorreiter, L.; Holztechnologisches Handbuch; 1. Band; Verlag Georg Fromme & Co.; Wien 1949
- [6] Sell, J.; Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten; 3. Auflage; (Sammlung alter Quellen); Baufachverlag AG; Zürich 1989
- [7] Wagenführ, R., Scheiber, C. ; Holzatlas ; 3. Auflage; VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1989
- [8] www.holzdatenbank.de



mtb messtechnische briefe

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari
und T. Garcia,
Polytechnische Universität
Kataloniens, Barcelona,
Spanien

Einleitung

In Barcelona wird derzeit die als Tunnel auf 2 Ebenen geplante neue U-Bahn-Linie L9 gebaut. Im Dezember 2005 erfolgten dazu Belastungsprüfungen an den Auskleidungssegmenten in einem Erprobungsabschnitt im Maßstab 1:1. Die Auskleidungssegmente wurden aus stahlfaserverstärktem Beton SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) ohne Bewehrungsstäbe gefertigt. Das Hauptziel der eigens für diese Untersuchung konzipierten Belastungsprüfung bestand darin, einen experimentellen Nachweis für das Verhalten der mit SFRC und ohne jede herkömmliche Verstärkung ausgeführten Tunnelauskleidungselemente unter konzentriertem Erddruck zu erhalten. Zur Messung der Belastung wurden dabei Druckaufnehmer von HBM eingesetzt.

Das Projekt L9 umfasst einen Tunnel von ungefähr 40km Länge, der mit einer Tunnelbohrmaschine mit einem Durchmesser von 12m gegraben wird. Die Röhre setzt sich aus 7 + 1 Segmenten mit einer Breite von jeweils 1,8m und einer Dicke von

0,35m zusammen (Abb. 1). Der Einsatz von SFRC in Fertigbetonteilen ist zwar keineswegs üblich, aber er erhöht die Zähigkeit der Segmente und verringert damit die Gefahr von Schäden beim Entformen, beim Transport, beim Anheben und beim Einbau. In diesem Fall wurde der Bewehrungskorb vollständig durch 60kg/m³ Stahlfasern ersetzt. Experimente an Auskleidungssegmenten im 1:1-Maßstab unter Laborbedingungen wurden bereits in den Niederlanden und in Deutschland durchgeführt. Belastungsprüfungen unter realen Baubedingungen vor Ort haben dagegen bisher noch nicht stattgefunden.

Versuchskonzept und Messaufbau

Das Ziel der Belastungsprüfung bestand darin, das Verhalten der SFRC-Tunnelauskleidungssegmente besser zu verstehen. Dabei ist eine Prüfung vor Ort sinnvoll, weil dadurch auch bewertet werden kann, welchen Anteil die angrenzenden Ringe am Verhalten des untersuchten Segmentes besitzen.

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

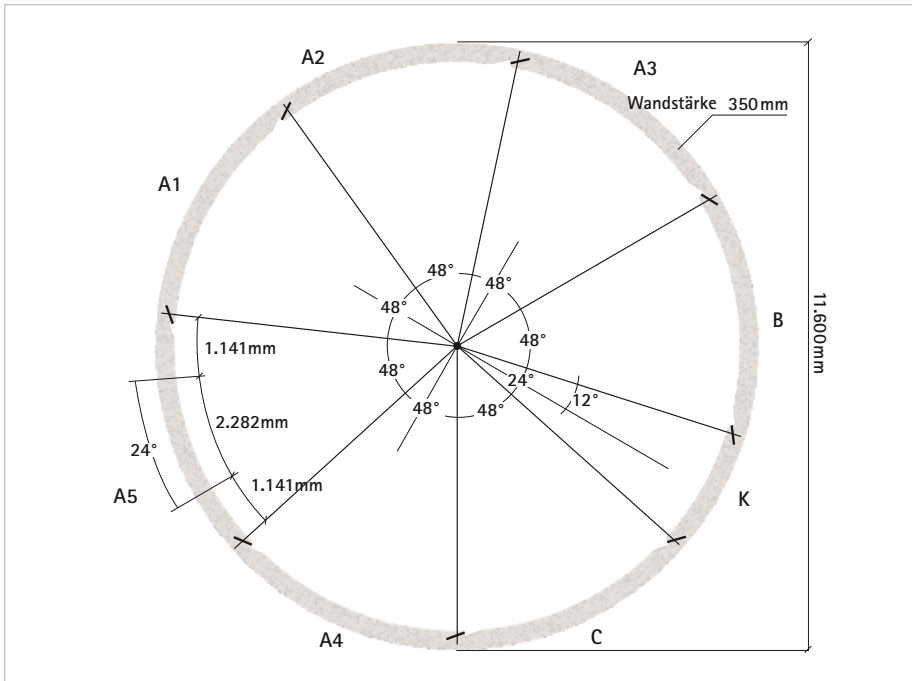


Abb. 1:
Querschnitt der
Auskleidung für die
U-Bahn-Linie L9
(Abschnitt 4a)

Es wird angenommen, dass dies im Wesentlichen von der verbleibenden Druckbeanspruchung in Längsrichtung zwischen den Ringen aufgrund des Axialdrucks der Tunnelbohrmaschine abhängt. Darüber hinaus sind die Ergebnisse sehr wertvoll für die Überprüfung der Lastannahmen und Berechnungsverfahren, die für die statische Berechnung der Auskleidungssegmente verwendet wurden. Ebenso dienen sie zur Beurteilung der Eignung des stahlfaserverstärkten Betons SFRC für den Bau der Segmente.

Das Versuchs-konzept sieht vor, die Belastung durch drei Hydraulik-Flachpressen aufzubringen, die in die äußere Gewölbefläche von zwei Segmenten eines Rings eingebettet wurden. Diese Flachpressen wurden entsprechend **Abbildung 2** so angeordnet, dass sie einen Kreis-ausschnitt von 48° in einer vertikal symmetrischen Anordnung am oberen Ende der Wölbung umspannen.

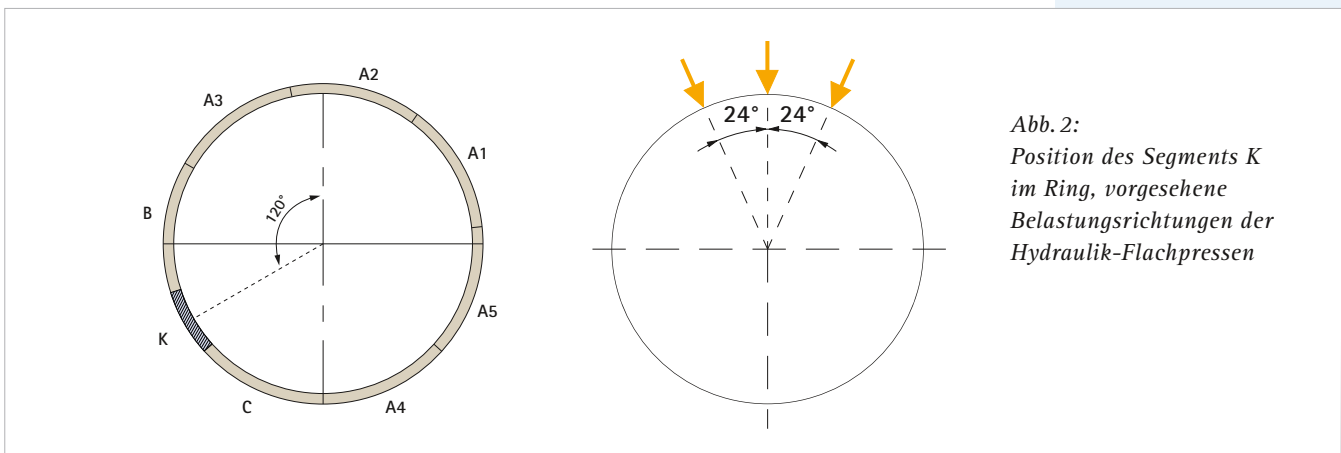


Abb. 2:
Position des Segments K
im Ring, vorgesehene
Belastungsrichtungen der
Hydraulik-Flachpressen

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

In **Abbildung 3** sind die Position der Aussparungen und der Einbau der Flachpressen dargestellt.

Die Entscheidung für eine Prüfung vor Ort fiel aus technischen und wirtschaftlichen Gründen.

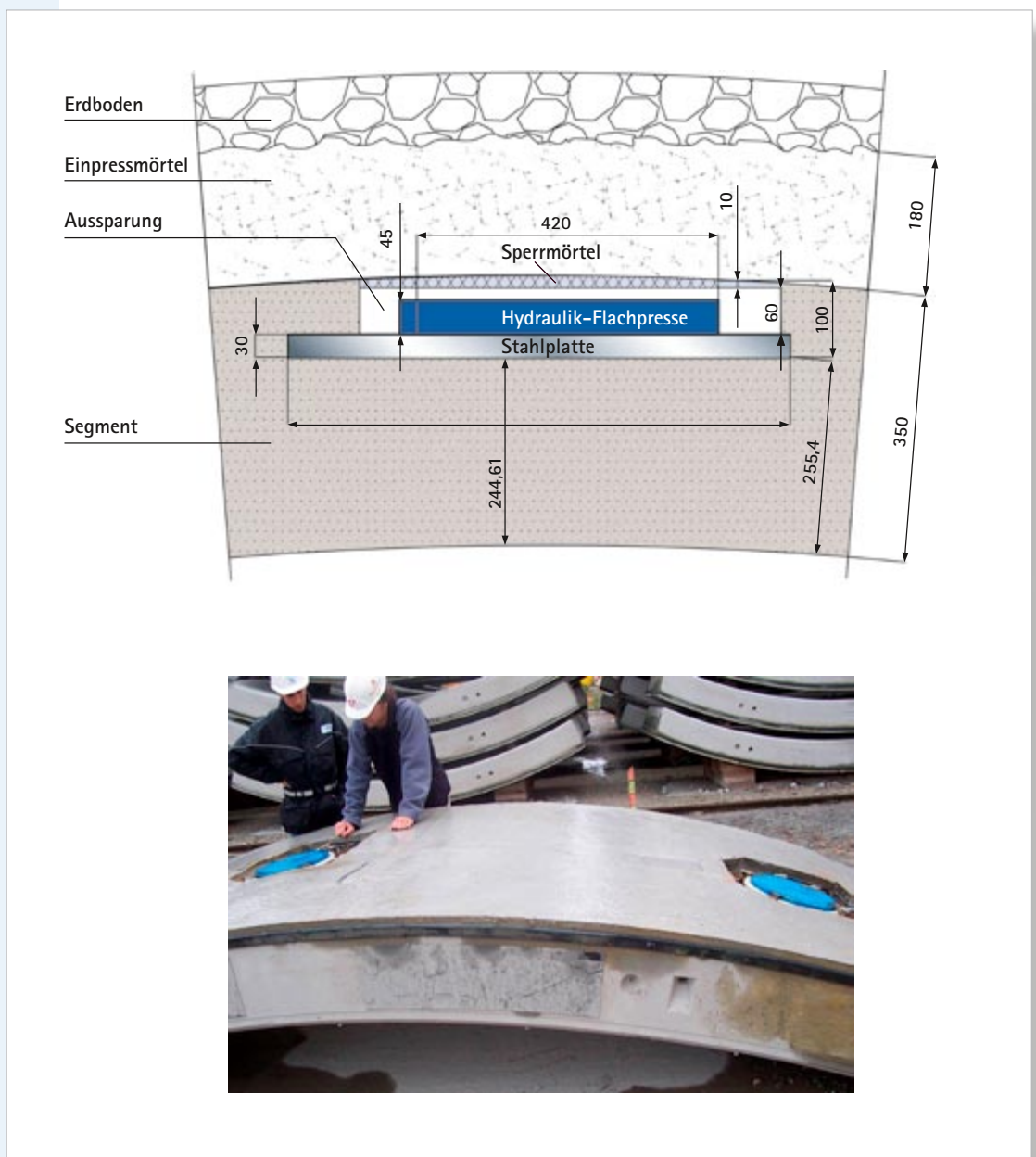


Abb. 3: Position und Einbau der Hydraulik-Flachpressen

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

Die technischen Vorteile sind:

1. Die Reaktion der Betonkonstruktion wird unter den tatsächlich vor Ort herrschenden Bedingungen ermittelt.
2. Der Beitrag aller Elemente geht in die Untersuchung ein, woraus folgt, dass sowohl die tangentielle Komponente des Kontakts zwischen der Auskleidung und dem Erdboden als auch die radiale Komponente berücksichtigt wird.
3. Die Vorspannung in Längsrichtung zwischen den Ringen und ihre Entspannung erfolgt unter realen Bedingungen.
4. Der Spannungs-Dehnungs-Zustand vor der Prüfung entspricht dem „Normalzustand“ im Tunnel, nachdem die Auskleidung in üblicher Weise eingebaut wurde.

Die wirtschaftlichen Vorteile einer Prüfung vor Ort sind:

1. Es wird keine spezielle viel Raum beanspruchende und teure Laborausrüstung benötigt.
2. Die vor Ort verwendeten Messgeräte können auch für andere Zwecke genutzt werden, da mit ihnen während und auch nach der Prüfung gemessen werden kann.

Die Prüfung der Auskleidung vor Ort besitzt in einigen Bereichen auch Nachteile:

1. Es gibt Schwierigkeiten bei der Interpretation der Ergebnisse aufgrund naturgegebener Unsicherheiten im mechanischen Verhalten des Geländes und des Einpressmörtels.
2. Die Messungen erfolgen bei vordefinierten Lastangriffsstellen, da es nicht möglich ist die Position der Spannpressen nachträglich zu verändern.
3. Die Belastungen müssen unter der Bruchlast liegen, um größere Schäden an der Auskleidung zu vermeiden.
4. Der Prüfablauf muss mit den Produktionsbedingungen koordiniert werden.

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

Der in das Experiment einbezogene Abschnitt umfasste 16 SFRC-Ringe (ohne Bewehrungsstäbe), von denen fünf an den Fugen mit eingebetteten Dehnungsmessstreifen (DMS), Druckaufnehmern und Wegaufnehmern ausgestattet waren. Insgesamt wurden zur Überwachung der Prüfung 150 DMS und 18 Druckaufnehmer in diese Ringe eingebettet. Zusätzlich wurden sieben Aufnehmer für die vertikalen Bewegungen (Abbildung 4) und 52 weitere Wegaufnehmer angebracht, um

die tangentialen und vertikalen Bewegungen in den Fugen zwischen den Segmenten zu messen. Das sind vier 2D-Wegaufnehmer in den Fugen zwischen den Ringen (Abbildung 5) und 44 Wegaufnehmer zur Messung der tangentialen Bewegungen in den Fugen zwischen den Segmenten eines Rings. Alle Sensoren wurden vor Beginn der Prüfungen mit außen liegenden Messgeräte verbunden.

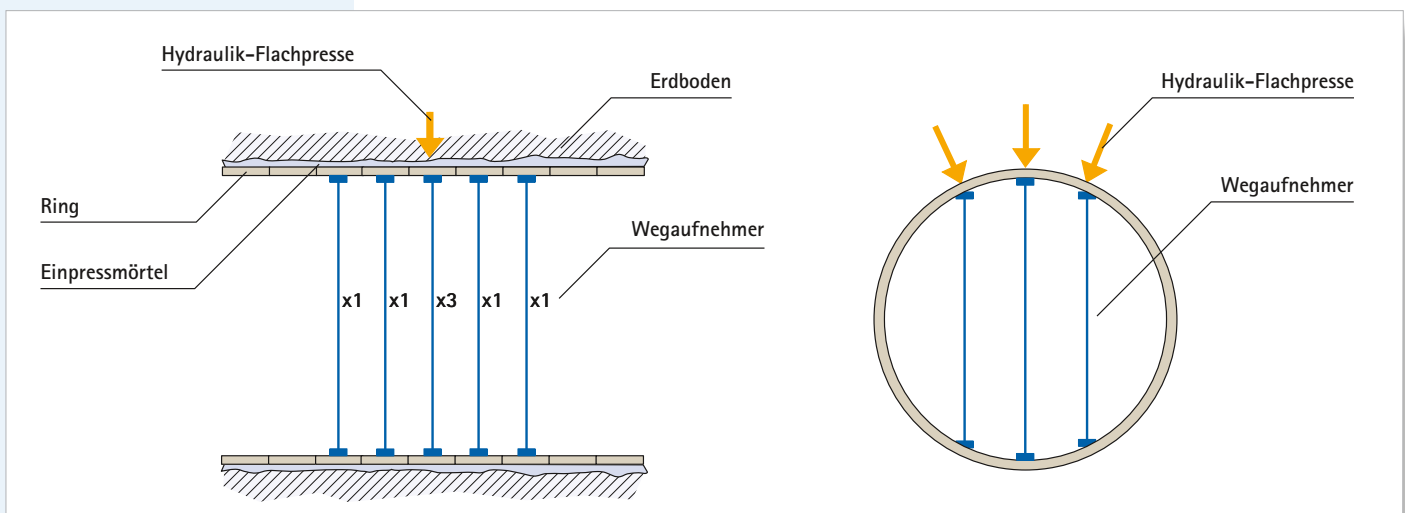


Abb. 4: Messung der Verformung durch Wegaufnehmer

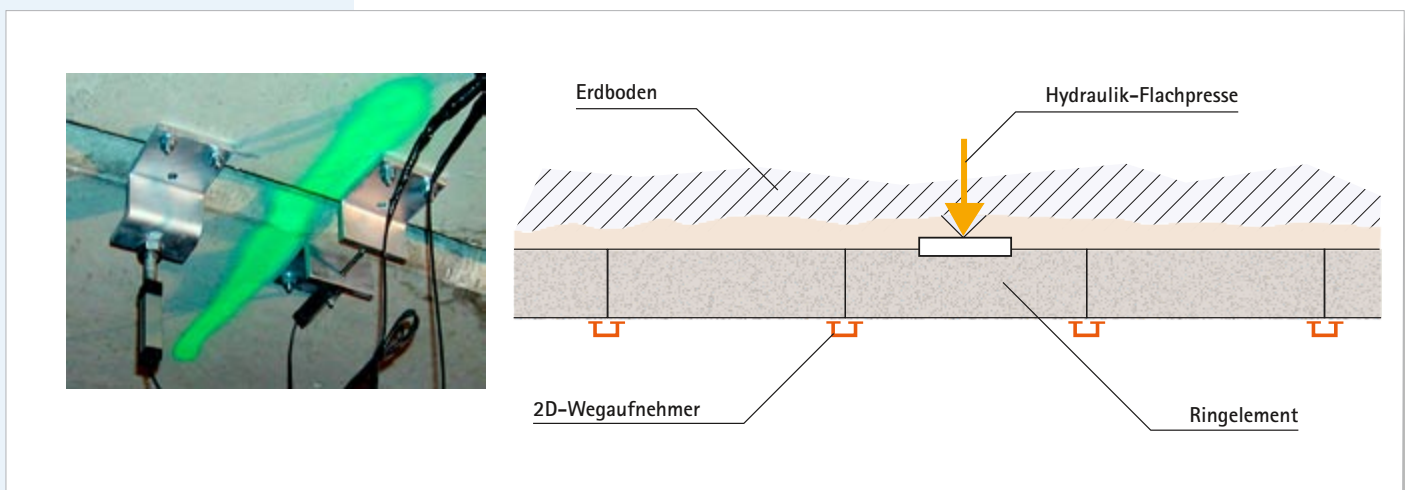


Abb. 5: 2D-Wegaufnehmer (radial und längs) am Scheitelpunkt des Gewölbes zwischen zwei Ringen

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

Hydraulikanlage und Druckaufnehmer

Die drei eingebetteten Flachpressen wurden einzeln über drei handbetätigte Ventile gesteuert, deren alleiniger Zweck darin bestand, die Ölzufuhr zur Presse zu ermöglichen oder zu unterbrechen. Der Druck im Leitungssystem wurde über eine für 900 bar ausgelegte elektrische Ölpumpe erzeugt und geregelt, wobei die Drücke unter Einsatz der Druckaufnehmer vom Typs P2VA1/200 (HBM), die eine sehr hohe Messempfindlichkeit besitzen, gemessen und von einer Datenerfassungseinheit aufgezeichnet werden (**Abbildung 6**); 1 bar in der Presse entspricht einer Kraft von 10 kN. Die technischen Daten der Druckaufnehmer sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Hersteller	HBM
Modell	P2VA1
Arbeitsbereich	bis 200 bar
Druckart	Absolutdruck
Genauigkeitsklasse	0,2 %
Wiederholbarkeit	$< \pm 0,05\%$

Tab. 1: Technische Daten der verwendeten Druckaufnehmer

Aufgrund der Tatsache, dass die Belastung rein statisch und die Wahrscheinlichkeit des Versagens der Konstruktion sehr gering ist, war keine Datenerfassungsanlage mit einer hohen Abtastgeschwindigkeit erforderlich. Vielmehr konnte ein mit Multiplextechnik arbeitendes Datenerfassungssystem (Daten-Logger) mit einer Auflösung von $6 \frac{1}{2}$ Stellen und einer maximalen Abtastgeschwindigkeit von 60 Kanälen/Sekunde verwendet werden. Die Datenerfassung erfolgte mit einer Frequenz von einem Messwert alle zwei Sekunden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckaufnehmer sehr zuverlässig arbeiten. In **Abbildung 6** sind die Ölpumpe, die Ventile und der Druckaufnehmer und in **Abbildung 7** die Anordnung des Hydraulikkreises dargestellt.



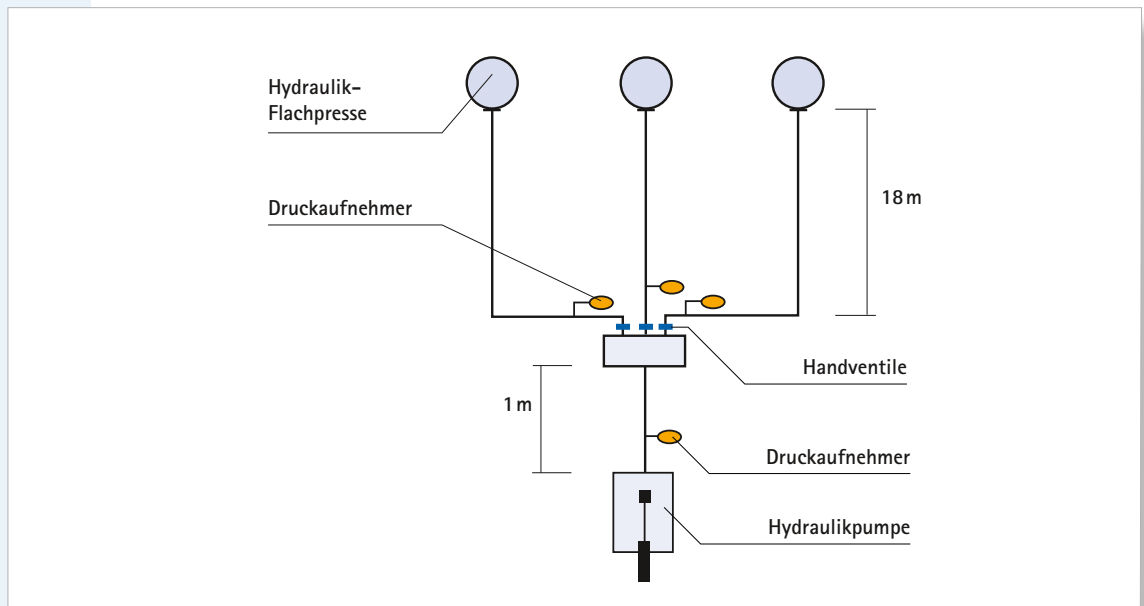
HBM-Druckaufnehmer
P2VA1/200

Abb. 6:
Ölpumpe, Ventile und
Druckaufnehmer

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

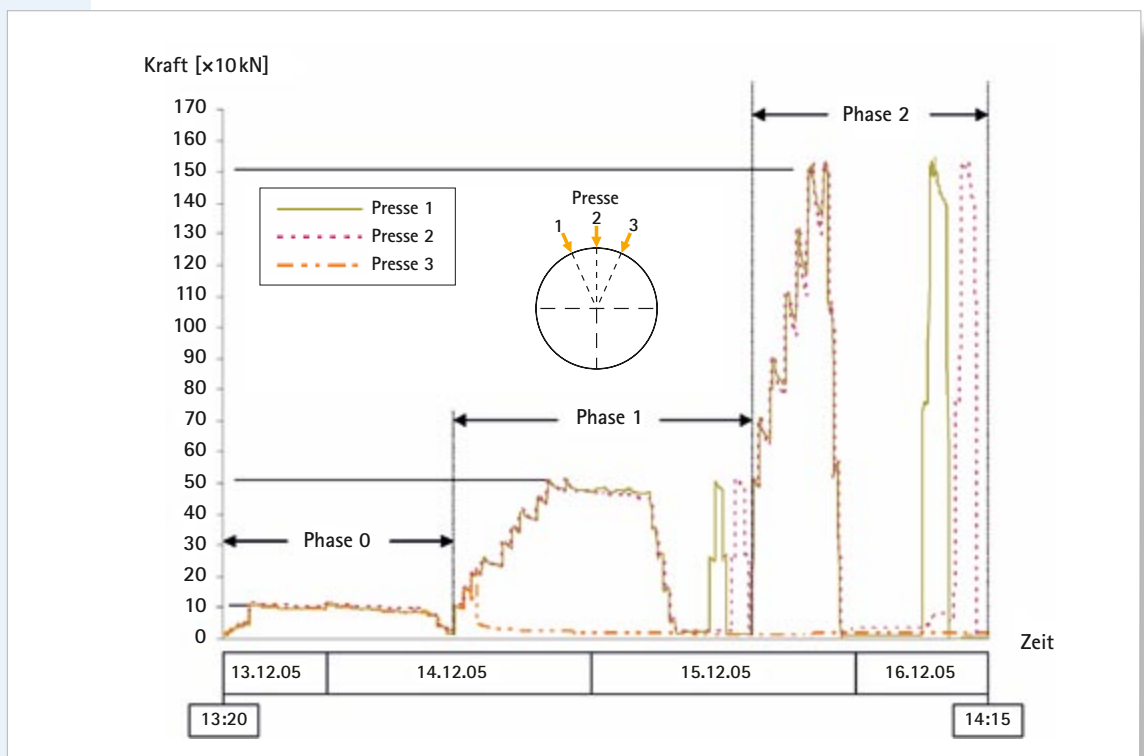
Abb. 7:
Schematische
Darstellung des
Hydraulikkreises



Belastungsvorgang

Der Belastungsvorgang umfasste drei Phasen und ist in **Abbildung 8** dargestellt. In Phase 0 wurde zunächst eine Belastung von 100 kN pro Presse aufgebracht und fast achtzehn Stunden lang aufrechterhalten. Diese Vorbereitungsphase lieferte Informationen über die Entspannung des Drucks der Pressen und den Zustand des Gesamtsystems. In Phase 1 wurde eine Belastung von 500 kN pro Presse aufgebracht. Zu Beginn dieser Phase versagte die Presse Nr. 3. In Phase 2 wurde eine Belastung von 1500 kN durch die Pressen 1 und 2 aufgebracht, und zwar sowohl gleichzeitig als auch getrennt.

Abb. 8:
Kraft-Zeit-Verlauf
während der Prüfung



Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

Messergebnisse

In **Tabelle 2** ist zunächst die vertikale Durchbiegung am Scheitelpunkt des Gewölbes für unterschiedliche Belastungskombinationen angegeben. Die maximale vertikale Durchbiegung von 3,1 mm wird in Phase 2 bei einer Belastung mit der Presse 2 von 1500 kN erreicht. Die nach dem gesamten Belastungsprozess verbleibende vertikale Durchbiegung beträgt 1,2 mm (38% der Durchbiegung bei Belastung).

Phase	Belastung [kN]	Vertikale Durchbiegung [mm]	Verbleibende vertikale Durchbiegung [mm]
1	500 (P1+P2)	0,531	0,231
	500 (P1)	0,222	0,222
	500 (P2)	0,543	0,246
2	1500 (P1+P2)	2,627	0,840
	1500 (P1)	0,585	0,198
	1500 (P2)	3,076	1,220

*Tab. 2:
Maximale und verbleibende vertikale Durchbiegung am Scheitelpunkt*

Weitere Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen dargestellt, bei denen der Druck und die Verformungswege auf den y-Achsen über der Zeit auf der x-Achse dargestellt sind.

Abbildung 9 stellt die Verläufe des Drucks und der radialen Verschiebungen zwischen den Ringen am Scheitelpunkt des Gewölbes in Phase 2 dar, als beide Pressen die Auskleidung so lange belasteten, bis bei jeder 1500 kN erreicht waren. Das ist die maximale Belastung, die während der Prüfung aufgebracht wurde. Die radialen Verschiebungen sind auf beiden Seiten des belasteten Rings (1838) nicht symmetrisch. Zwischen den anderen Ringen sind sie, wie in **Abbildung 9** auch ersichtlich ist, praktisch nicht wahrnehmbar.

Abbildung 10 stellt den Druck und die relative vertikalen Verschiebungen zwischen den Ringen am Scheitelpunkt ebenfalls im Verlauf von Phase 2 dar. Die beiden Pressen bringen auch hier die maximale Belastung auf. Auch in diesem Fall sind die Umfangsverschiebungen an der Längsfuge zwischen den Segmenten A2 und A3 nicht symmetrisch. Diese fehlende Symmetrie kann auf die exzentrische Position der Pressen während des Baus der Segmente zurückgeführt werden.

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

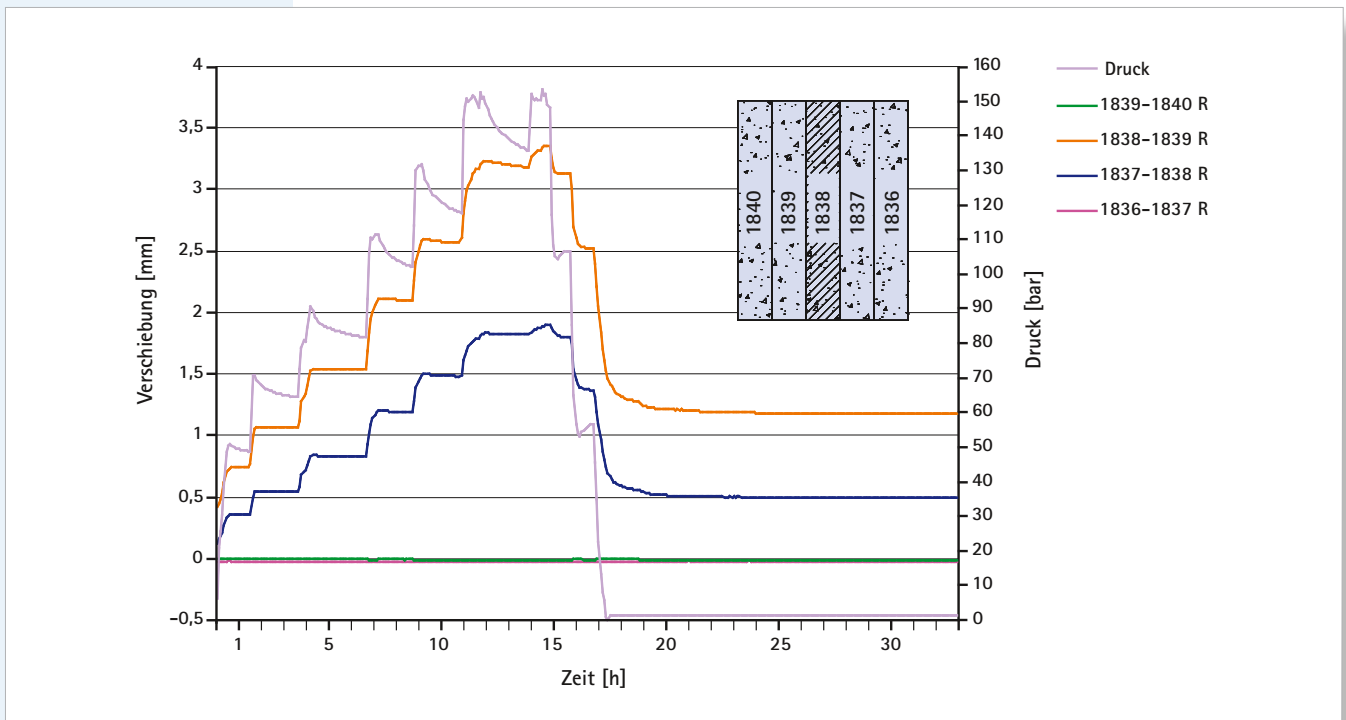


Abb. 9: Druck und Verschiebungen in radialer Richtung zwischen Ringen am Scheitelpunkt des Tunnels (Belastungsphase 2)

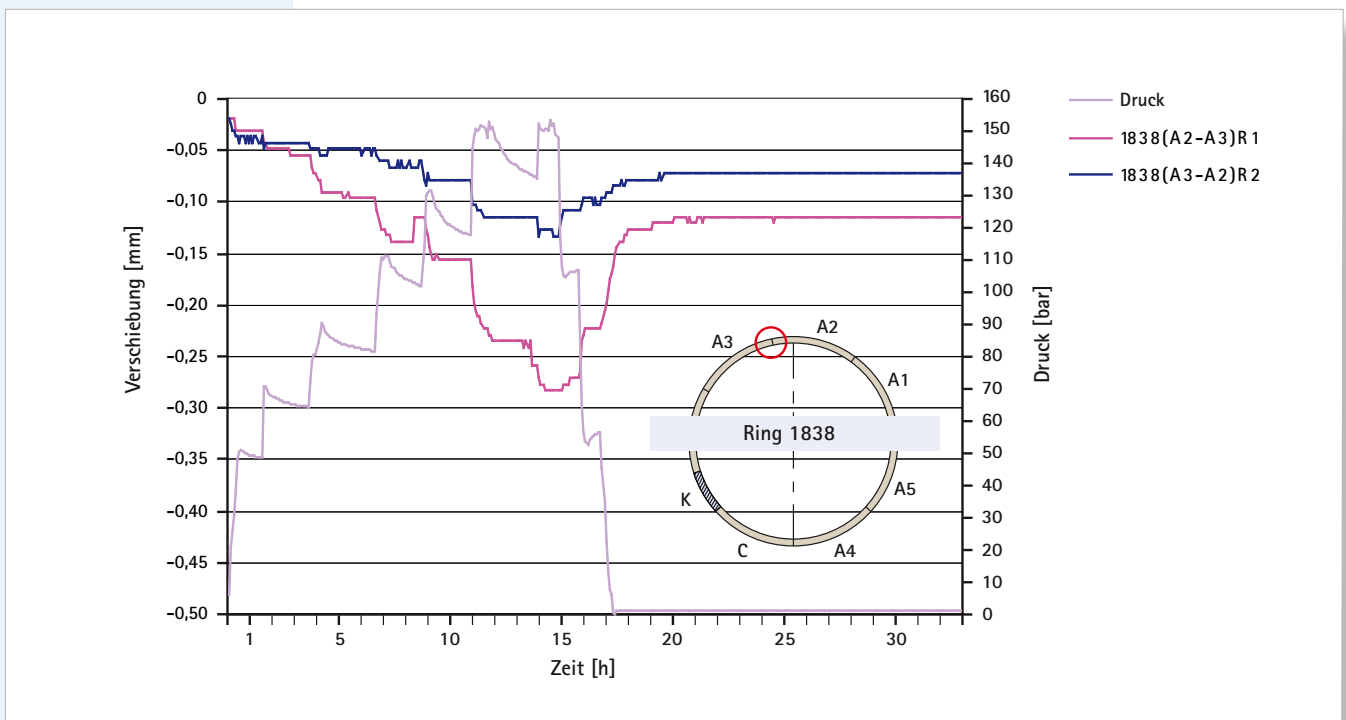


Abb. 10: Druck und Verschiebungen in Umfangsrichtung an der Längsfuge zwischen den Segmenten A2 und A3

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona
 C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

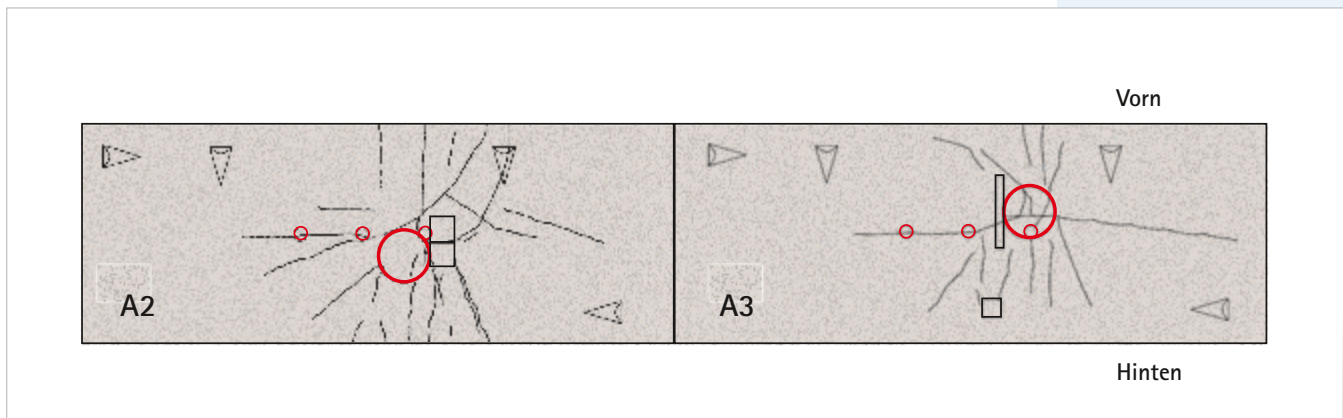


Abb. 11: Rissmuster auf der abgewickelten Gewölbeinnenfläche nach der Beendigung von Phase 2

Der erste Riss trat in der Nähe des Scheitelpunktes des Gewölbes im Segment A2 bei einer Belastung zwischen 400 und 500kN auf, die gleichzeitig durch die beiden Pressen 1 und 2 im Verlauf von Phase 1 aufgebracht wurden. Das Rissmuster bei 1500kN pro Presse ist in **Abbildung 11** dargestellt. Man kann feststellen, dass die Hauptrisse parallel zur Längsachse des Tunnels verlaufen. Dies und die Tatsache, dass sich die angrenzenden Ringe fast nicht bewegt haben, kann so gedeutet werden, dass der belastete Ring den größten Teil der Belastung aufgenommen hat. **Abbildung 12** zeigt die Risse an der Gewölbeinnenseite nach Phase 2. Durch diese Risse sickerte Wasser hindurch. Diese Undichtigkeit war erwartet worden, weil der Grundwasserspiegel zehn Meter über dem Gipfelpunkt des Tunnels liegt.

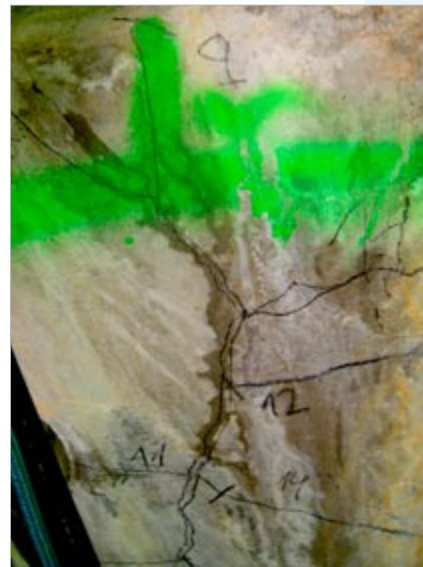


Abb. 12: Risse nach Phase 2

Vor-Ort-Belastungsprüfung der Auskleidungssegmente für den U-Bahn-Tunnel in Barcelona

C. Molins, A. R. Mari und T. Garcia, Polytechnische Universität Kataloniens, Barcelona, Spanien

Schlussbemerkungen

An der Auskleidung der im Bau befindlichen U-Bahn-Linie L9 in Barcelona wurde vor Ort eine Belastungsprüfung durchgeführt. Das Hauptziel der Prüfung bestand darin, einen experimentellen Nachweis für die Tragfähigkeit der SFRC-Segmente unter Betriebsbedingungen zu liefern. Die aufgebrachten Belastungen waren groß genug, um signifikante Rissbildungen in den Segmenten sowie Bewegungen zu erzeugen. An der Auskleidung wurden durch Kombination unterschiedlicher Drücke an den eingesetzten Flachpressen sechs verschiedene Belastungsvarianten realisiert. Die maximale Belastung der Außenfläche des Rings betrug dabei 3000 kN.

Aus den experimentellen Untersuchungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- An der Gesamtreaktion des belasteten Rings sind die angrenzenden Ringe nur geringfügig beteiligt. Eindeutig wurden Verschiebungen zwischen den belasteten Segmenten und den angrenzenden Ringen beobachtet.
- Der von den Belastungen betroffene Bereich blieb auf die obere Hälfte des belasteten Rings begrenzt. Die im unteren Teil des belasteten Rings installierten Aufnehmer (sowohl innen als auch außen) zeigten bei der Belastung kaum Veränderungen an.
- Die Verformung der belasteten Ringe kann hauptsächlich auf eine Rotation an den Längsfugen zwischen den Segmenten zurückgeführt werden.
- Die während der Planungsphase durchgeführten nichtlinearen 2D-Analysen ergaben für einen einzelnen Ring Deformationen, die mit den gemessenen Werten durchaus vergleichbar sind. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können werden weitere Analysen durchgeführt.

Danksagung

Die Verfasser danken dem für die Planung und den Bau der U-Bahn-Linie L9 in Barcelona zuständigen öffentlichen Unternehmen Gestió d'Infraestructures, S.A. (GISA) für die Finanzierung dieser Forschungsarbeiten, die im Fachbereich für Bauingenieurwesen der Technischen Universität von Katalonien UPC durchgeführt wurden. Die Verfasser danken weiterhin allen Mitarbeitern von UTE L9, Payma Cotas und der UPC, die daran beteiligt waren. Dank gilt insbesondere den Mitarbeitern des Labors für Baustatik, Herrn Carlos Hurtado und Herrn Jordi Lafuente sowie Frau Roser Valls, Frau Marta de la Torre und Frau Gemma Viladomat.

Literatur

- [1] Molins, C.: Investigación teórica y experimental del revestimiento de túneles a base de anillos de dovelas prefabricadas: diseño de un ensayo in situ del revestimiento del túnel de la L9 del Metro de Barcelona. Série Investigació: 706-I01-05. Departament de Ingenieria de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona 2005
- [2] Molins, C., Mari, A. R., Aguado, A., P: Proyecto de prueba de carga del revestimiento del túnel a base de dovelas prefabricadas de la L9 del Metro de Barcelona. Proceedings of the III ACHE - Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación de la Asociación, 14. bis 17. November 2005, 893-905, Zaragoza, Spanien

Redaktionelle Beiträge aus der Praxis sind sehr willkommen und werden entsprechend honoriert.

Kontakt:

E-Mail, Redaktion: Martin.Stockmann@Mb.TU-Chemnitz.de

E-Mail, HBM: klaus.bathe@hbm.com

Antwort-Fax an Redaktion: +49 371 531 23419

Name _____

Firma / Abt. _____

Straße _____

PLZ, Ort _____

Telefon _____

Fax _____

E-Mail _____



Ich habe Interesse an einer eigenen Veröffentlichung
in den mtb und bitte um Kontaktaufnahme

Impressum

Herausgeber

HBM GmbH

Im Tiefen See 45

D-64293 Darmstadt

Tel. +49 6151 8030

Fax +49 6151 803 9100

www.hbm.com

Redaktion

Dr.-Ing. habil. Martin Stockmann

Technische Universität Chemnitz

Anfragen zu „messtechnische briefe“ und den
veröffentlichten Aufsätzen richten Sie bitte an den
Herausgeber.

Anfragen zu den HBM-Produkten bitten wir an die
zuständige Vertretung zu richten.

Urheberrecht

Nachdruck ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung der Schriftleitung oder des Herausgebers gestattet. Vervielfältigungen in Form von Fotokopien, Mikrofilm oder anderen Verfahren für gewerbliche Zwecke sind nicht gestattet.

Schutzrechte

Für die beschriebenen Verfahren und Schaltungen sowie für die verwendeten Bezeichnungen wird keine Gewähr bezüglich der Verletzung von Schutzrechten Dritter übernommen.

Satz & Gestaltung

www.contrust-design.de

messtechnische briefe 2/2008

Erscheinungsdatum: September 2008

„messtechnische briefe“ erscheint
zweimal jährlich

ISSN 1614-6719