

Verstellbarer nachgiebiger Tübbingausbau

R. Podjadtke, G. Weidig

Im Tunnelbau bereiten nach wie vor Gebirgsverhältnisse mit hohen Druckbereichen Probleme, die bedingt durch geringe geologische Festigkeitsverhältnisse oder hohe Lockergesteinsüberlagerungen auftreten. Die Bochumer Eisenhütte Heintzmann hat nun den verstellbaren nachgiebigen Tübbingausbau mit Stauchelementen entwickelt, die in der 2. Röhre des Tauerntunnels erfolgreich erprobt wurde.

Der maschinelle Vortrieb im Tunnelbau hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Diese Vortriebsmethode z. B. mit einer Schildmaschine bietet für die Tunnelbaumannschaft ein hohes Maß an Sicherheit. Zudem sind bei homogenen, kontinuierlichen Gebirgsverhältnissen durch die Automation hohe Vortriebsleistungen möglich, die die Wirtschaftlichkeitsaspekte mehr und mehr stützen. Auch wenn in Bereichen verminderter Gebirgsqualität Sondermaßnahmen erforder-

lich werden, rechnet sich vermehrt diese Vortriebsvariante.

Probleme bereiten bislang aber nach wie vor Gebirgsverhältnisse mit hohen Druckbereichen bedingt durch geringe geologische Festigkeitsverhältnisse oder hohe Lockergesteinsüberlagerungen. Solche und ähnliche Gebirgsverhältnisse können den maschinellen Vortrieb erheblich stören, sie können zu Vortriebsunterbrechungen oder im schlimmsten Fall sogar zu längeren Stillstandszeiten führen. Setzt sich eine Maschine bei solchen Vortriebsverhältnissen komplett fest, sind alle Wirtschaftlichkeitskonzepte in Frage gestellt.

Im konventionellen Tunnelbau, beim Spreng- oder Bagervortrieb der NATM ist eine permanente Anpassung des Ausbausystems an die vorgefundenen geologischen Formationen möglich. Der Vortrieb über Ulmenstollen, temporäre

Adjustable flexible segment lining

R. Podjadtke, G. Weidig

In tunnelling, geological ground conditions with high-pressure areas caused by weak rock conditions or high layers of loose rock continue to present a challenge. Heintzmann of Bochum, Germany, has developed the adjustable flexible segmental lining method using compressible elements. This method was tested successfully in the second tube of the Tauern tunnel.

Mechanical tunnelling has gained increasing importance over the past years. This tunnelling method, e.g. with a shield machine, provides a high degree of security for the tunnelling team. With homogeneous, continuous rock conditions, automation provides high tunnelling speeds and cost efficiency. Even though special measures may have to be taken under poor rock conditions, this tunnelling method is becoming increasingly viable.

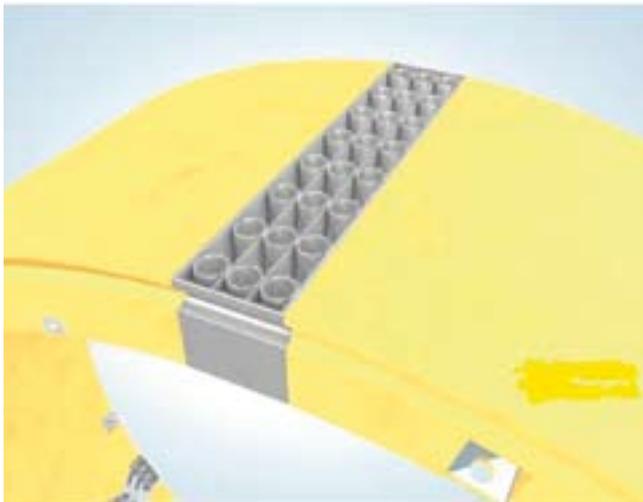
However, geological ground conditions with high-pressure areas caused by weak rock conditions or thick layers of loose rock still lead to problems. Such rock conditions may adversely impact mechanical excavation and may even interrupt excavation or cause prolonged standstills. If a machine gets stuck under such conditions, cost-efficiency becomes questionable.

In conventional tunnelling, blasting or when using excava-

tors as in the NATM, it is possible to continuously adjust the segment lining system to the actual geological formations. Through the use of side-walls or temporary top heading inverts as well as increased use of anchors, varying anchor lengths etc., it is possible to adapt the lining method to the rock and excavation situation. In addition to the known tunnelling variants, flexible (compressible) elements have been developed for problematic pressure zones, creating rock deformation routes and reducing rock tension, thereby re-

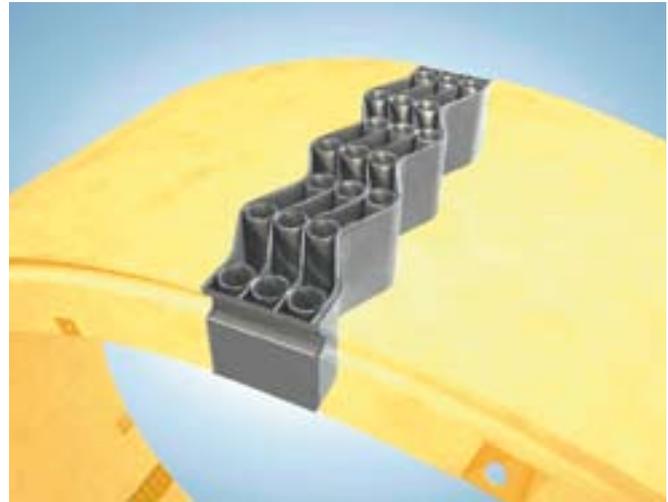
Dipl.-Ing. Rudi Podjadtke, Prokurist für den Stahl- und Tunnelausbau, Bochumer Eisenhütte Heintzmann GmbH & Co. KG, Bochum/D
Dipl.-Ing. Günther Weidig, Vertriebsingenieur, Bochumer Eisenhütte Heintzmann GmbH & Co. KG, Bochum/D

Dipl.-Ing. Rudi Podjadtke, authorised officer for steel and tunnel construction, Bochumer Eisenhütte Heintzmann GmbH & Co. KG, Bochum/D
Dipl.-Ing. Günther Weidig, sales engineer, Bochumer Eisenhütte Heintzmann GmbH & Co. KG, Bochum/D



1 Nachgiebigkeitselement nach dem Wabenbauprinzip

1 Flexible element based on the honeycomb principle



2 Nachgiebigkeitselement nach dem Wabenbauprinzip in Wellenform

2 Flexible element based on the honeycomb principle in wave form

Kalottensohlen, verstärkter Ankerersatz, die Variation der Ankerlängen usw. ermöglichen die Anpassung der Ausbaumethode an die vorhandene Gebirgs- und Vortriebssituation. Neben den bislang bekannten Vortriebsvarianten wurden beim konventionellen Tunnelbau zudem für schwierige Druckverhältnisse so genannte Nachgiebigkeitselemente (Stauchelemente) entwickelt, die dem Gebirge Deformationswege ermöglichen, Gebirgsspannungen abbauen und somit zu einer Entspannung und hierdurch Abminderung der Druckverhältnisse bis hin zum Spannungs- bzw. Kräftegleichgewicht ermöglichen. Die 2. Röhre des Tauerntunnels konnte nicht zuletzt Dank der Stauchelemente in den extremen Störbereichen erfolgreich vorgetrieben werden. Der Bochumer Eisenhütte Heintzmann gelang es mit den innovativen Wabenelementen angepasst an die Spritzbetonaushärtung einen individuellen, in seinem Widerstand lokal abgestimmten, flexiblen Ausbauwiderstand zu realisieren.

Bemühungen, die Gebirgsdruckverhältnisse bei einem maschinellen Vortrieb zu be-

herrschen, existieren bislang nur ansatzweise. Derzeit beschränkt sich der Tübbingausbau auf die Aufnahme erhöhter Drücke und Verschiebungen im Ringspalt oder verweist auf ein zusätzliches Deformationsmaß durch die Verwendung von Rippentübbing. Nachgiebigkeitselemente, ähnlich derer aus dem konventionellen Tunnelbau, gibt es bislang beim maschinellen Tunnelvortrieb noch nicht. Es gibt theoretische Ansätze, jedoch keine praktischen Erfahrungswerte.

Anlässlich der Baumaschinenmesse bauma im Frühjahr 2010 in München hat die Bochumer Eisenhütte Heintzmann, basierend auf dem Gedanken der Nachgiebigkeitselemente „Wabe“, ein Konzept für nachgiebige und verstellbare Tübbinge vorgestellt.

Neue Technik

Für Situationen mit dynamischen, hohen Drücken, Störzonen im Gebirge bzw. großem Konvergenzverhalten sollten die Tübbinge in der Lage sein, über an den Stoßflächen der Tübbingelemente integrierte Nachgiebigkeitselemente dem

ducung pressure until an equilibrium of tensions and forces is achieved. The second tube of the Tauern tunnel could be excavated successfully in extreme fault zones not least thanks to the flexible elements. Using innovative honeycomb elements, Bochumer Eisenhütte Heintzmann has succeeded in creating a flexible lining resistance that is adapted to both the local conditions and the shotcrete hardening process.

There have been few attempts at controlling rock pressure conditions in mechanical excavation. Segmental lining methods are currently limited to compensating high pressure and shifts in the annular gap or indicating additional deformation potential through the use of ribbed segments. In mechanical tunnelling, there are currently no flexible (compressible) elements of the type used in conventional tunnelling. There are theoretical approaches, but no practical experience.

At the bauma construction machine fair in early 2010, Bochumer Eisenhütte Heintzmann, a steel manufacturing company based in Bochum, Germany, introduced a concept

for flexible, adjustable lining segments based on the honeycomb flexible (compressible) elements.

New technology

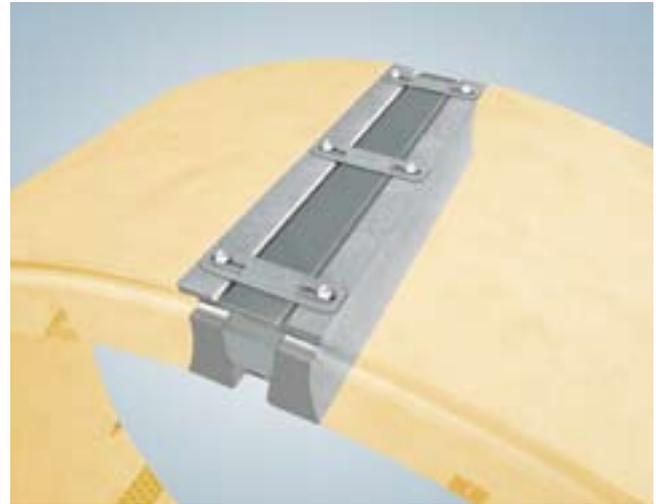
In situations with dynamic, high pressures, fault zones or significant convergence, the segments should be able to yield to the rock, avoid the pressure exerted by the rock and reduce the circumference by means of flexible elements integrated in the segment contact surface. Such flexible elements were developed by Bochumer Eisenhütte Heintzmann based on their experience with honeycomb compressible elements in conventional tunnelling. The resistance of the flexible elements is designed to take up the rock impact in order to reach equilibrium before the reinforced concrete is destroyed. Fig. 1 to 3 show different variants for possible flexible elements.

Similar to the compressible elements used in shotcrete lining, the steel elements are designed as honeycomb-type tubes or grids, allowing for adjustability (increasing/reducing



3 Nachgiebigkeitselement in einer konischen Ausführung als Schlussstein

3 Flexible element in conical design as keystone



4 Verstellelement Typ Längskeil

4 Longitudinal wedge type adjustable element

Gebirge nachzugeben, dem Gebirgsdruck auszuweichen und im Gesamten den Umfang zu verkleinern. Solche Nachgiebigkeitselemente, basierend auf den Erfahrungen mit den Waben-Stauchelementen beim konventionellen Tunnelbau, wurden von der Bochumer Eisenhütte Heintzmann entwickelt. Die Nachgiebigkeitselemente sind in ihrer Widerstandsgröße so ausgelegt, dass sie vor der Zerstörung des bewehrten Betons die Gebirgs- einwirkungen aufnehmen, bis sich ein Kräftegleichgewichtszustand einstellt. Unterschiedliche Varianten für mögliche Nachgiebigkeitselemente zeigen die Bilder 1 bis 3.

Die Stahlelemente sind in Anlehnung an die Stauchelemente der Spritzbetonanwendung wabenförmig als Rohre oder Rastergitter ausgelegt und so konstruiert, dass auch eine Verstellbarkeit (Ringvergrößerung/-verkleinerung) möglich ist. Bei den Verstell- und Nachgiebigkeitselementen handelt es sich um Stahlkonstruktionen, die zwischen zwei Druck- bzw. Kontaktplatten angeordnet und dem Tübbing in seiner Abmessung angepasst sind. Ge-

meinsam mit den Tübbingsegmenten und dem konischen Schlusselement bilden sie einen geschlossenen Tübbingring. Die Nachgiebigkeit wird über Rohrstücke oder Raster- bzw. Kassettenausbildungen erzielt. Die Verstellbarkeit wird über Längskeile oder Doppelkeile erreicht.

Die Anordnung der Elemente kann beliebig gewählt und in der Tübbingringkonstruktion der Wirkungsweise entsprechend platziert werden. Die Nachgiebigkeitselemente sind in der Widerstandsgröße so ausgelegt, dass sie vor der Zerstörung des bewehrten Betons die Gebirgs- einwirkungen aufnehmen und sich deformieren, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Das System ermöglicht ein optimal zusammenstellbares Baukastenprinzip. Eine Anpassung an die TBM-Maschinenteknik entfällt für dieses Ausbausystem, da der Tübbingsteinversatz in gleicher Weise erfolgt wie bei Tübbing- ohne Nachgiebigkeitselemente.

Unterschiedliche Ausführungen für verstellbare Nachgiebigkeitselemente zeigen die Bilder 4 und 5.

the size of the ring). The adjustable/flexible elements are made of steel and are positioned between two pressure or contact plates; they are adapted to the dimensions of the segment. Together with the segments and the conical keystone they form a complete segment ring. The flexibility is achieved using tube segments or grid or coffered structures. Adjustability is achieved using longitudinal or double wedges.

The elements can be arranged in any order. They can be incorporated into the segment ring design according to the desired action. The resistance of the flexible elements is designed to take up the rock impact and to deform in order to reach equilibrium before the reinforced concrete is destroyed. With this system, it is possible to combine the elements required like building blocks. The system does not need to be adapted to TBM technology because segments are handled in the same way as segments with no flexible elements.

Figs 4 and 5 show different designs for adjustable flexible elements.

As a rule, the flexible and the adjustable flexible parts can be incorporated into the segment

concrete reinforcement on one side or on both sides using the building block system (Fig. 6). In this case, the concrete faces are screwed together. In extreme cases, all components can be screwed together. The faces are fitted with embedded sealing joints.

There are various fastening options designed to ensure that the segments can move in longitudinal direction. While allowing spatial movement, these options position the segments with respect to each other (Fig. 7 and 8).

Tightness of the longitudinal joints is ensured today by means of a trapezoid-shaped rubber seal with air chambers which is embedded in a groove running around the segment. The pressure exerted by the screw connections is sufficient to achieve the degree of tightness required.

This method may not be adequate if segments move relative to each other. When there are extreme offsets between segments, they should be fitted with a rubber tube seal. This rubber tube seal can be inflated with a medium, similar to a bicycle tube (Fig. 9). It would be possi-



5 Verstellelement Typ Doppelkeil

5 Double wedge type adjustable element

Allgemein können über das Baukastensystem (Bild 6) die ausschließlich nachgiebigen als auch die nachgiebigen Verstellbauteile einseitig über die Bewehrung im Tübbingbeton oder beidseitig eingebaut werden. In diesem Fall werden die Betonstirnseiten miteinander verschraubt. Ebenso können im Extremfall alle Bauteile untereinander verschraubt werden. Die jeweiligen Stirnseiten erhalten hierbei eingelassene Dichtungen.

Damit die Tübbingsegmente untereinander in Längsrichtung an ihren Stoßflächen verschiebbar bleiben, sind verschiedene Befestigungsmöglichkeiten vorgesehen, die eine räumliche Bewegung zulassen, die Segmente jedoch untereinander positionieren (Bild 7 und 8).

Die Dichtheit der Längsfugen untereinander z. B. gegen Wasserdruck wird heute durch eine trapezförmige, mit Luftkammern versehene Gummidichtung



6 Anordnungsmöglichkeiten der Elemente

6 Element arrangement options

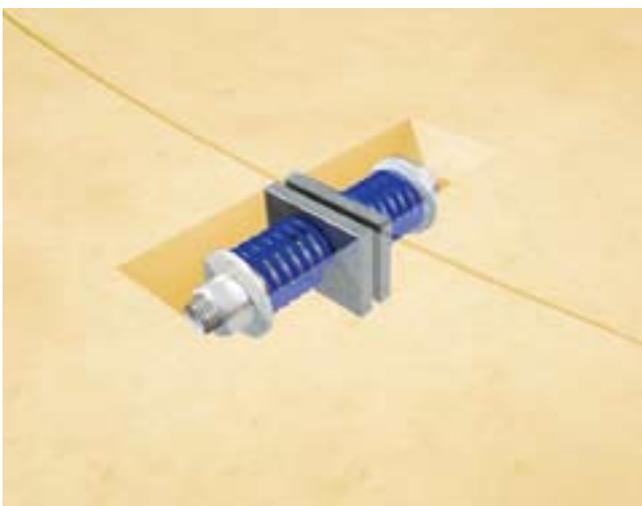
ble to press the segments together later using a valve system. Using this type of sealing, it would no longer be necessary to depend on the joint pressure between the segments alone. Tests of this are already being carried out.

into account pressure conditions for tunnels at great depths or tunnels with high loose rock loads.

Geomechanical conditions are used to calculate the cutting forces present in order to determine the load conditions of a segment. Displacement and lining resistance are defined according to the characteristic curve method. As the support pressure is reduced, the rock behaves elastically until a critical lining support pressure is

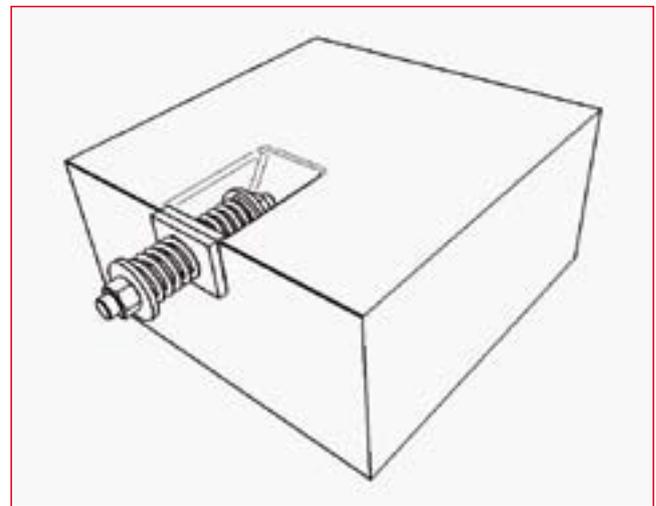
Static requirements, element design and tests

The static analysis initially determines typical loads for the segment lining ring and takes



7 Befestigungstechnik

7 Fastening technology



8 Technische Darstellung

8 Technical representation

zung erreicht, die in einer Umlaufnut des Tübbings eingebettet ist. Der Anpressdruck durch die Verschraubungen reicht aus, den notwendigen Dichtheitsgrad zu erzielen.

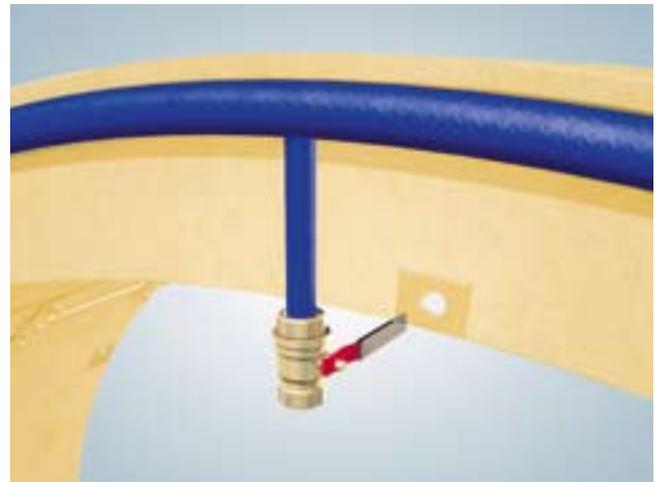
Bei Bewegungen der Tübbingsteine untereinander reicht unter Umständen diese Methode nicht mehr aus. Bei extremen Verschiebungen der Tübbingsegmente untereinander sollten sie mit einer schlauchförmigen Ringdichtung versehen werden. Diese Schlauchdichtung kann mit einem Medium ähnlich einem Fahrradschlauch aufgepumpt werden (Bild 9). Im Nachgang wäre ein Nachverpressen über eine Ventilkonstruktion möglich. Durch diese Abdichtungsart wäre man nicht mehr ausschließlich auf den Fugendruck der Tübbingringe untereinander an-

gewiesen. Versuche hierzu werden bereits durchgeführt.

Statische Anforderungen, Elementauslegungen und Versuche

Die Statik ermittelt zunächst die typischen Belastungen für den Tübbingausbau unter Berücksichtigung druckhafter Bedingungen für tiefliegende Tunnelbauwerke bzw. solche mit hohen Lockergesteinauflasten.

Für die Ermittlung der Belastungszustände eines Tübbingrings werden geomechanische Bedingungen als Grundlage für die Berechnung der vorhandenen Schnittkräfte herangezogen. Die Festlegung der Verschiebungen und des Ausbauwiderstandes erfolgt nach

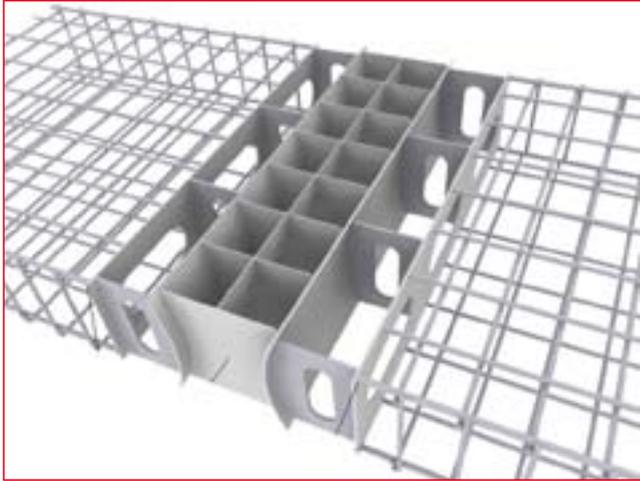


9 Abdichtungsmethode

9 Sealing method

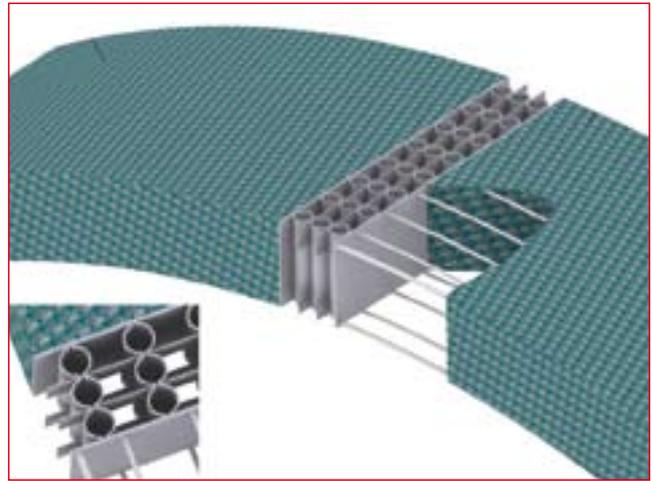
reached. However, if the pressure goes below this threshold, the material begins to become plastic.

The functionality of the flexible honeycomb elements in the segment lining can be described as creating an addition-



10 Möglicher Bewehrungsanschluss

10 Example of a reinforcement connection



11 Bewehrungsanschlussvariante

11 Reinforcement connection variant

dem Kennlinienverfahren. Bei der Verminderung des Stützdrucks verhält sich das Gebirge bis zu einem kritischen Ausbaustützdruck elastisch. Wird dieser Druck jedoch unterschritten, kommt es zu einem plastischen Materialverhalten.

Die Funktionsweise der nachgiebigen Wabelemente im Tübbingausbau kann als Schaffung eines zusätzlichen Ringspalts für die Deformationen des Gebirges umschrieben werden. Durch den gezielten Einsatz eines Nachgiebigkeitselementes im Tübbingausbau können Deformationen im System aufgenommen und wirksame Radialspannungen abgebaut werden. Der Tübbing muss nach dem Zusammenstauchen des Elementes den notwendigen Ausbauwiderstand aufbringen und die Wabe verliert nach kompletter Stauchung ihre Funktion. Sie überträgt die herrschenden Normalkräfte zwischen den einzelnen Tübbingsegmenten. Die Auslegung und Dimensionierung der Nachgiebigkeitselemente erfolgt entsprechend dem Verlauf der ermittelten Kennlinie.

Um die theoretischen Ansätze in einem praxisnahen Versuch simulieren zu können, muss nach der Berechnung der

zu erwarteten Kräfte im Tübbingring eine Vordimensionierung und somit Einstellung der Nachgiebigkeitselemente erfolgen. Die Elemente müssen in Ihrem Ausbauwiderstand so ausgelegt werden, dass sie die berechnete Statik in der Praxis erfüllen (Bild 10 und 11). Der Deformationsweg in Abhängigkeit zum Ausbauwiderstand muss gewährleistet werden. Hierfür werden an der Ruhruniversität Bochum Versuchsreihen gefahren, bei denen unterschiedliche Elementauslegungen erprobt werden.

Schlusswort

Durch das Baukastenprinzip mit unterschiedlichen Elementvarianten ist es möglich, sich den planerischen und statischen Erfordernissen jederzeit anzupassen. Die Vielzahl der Ausführungsmöglichkeiten und Formanpassungen ermöglicht ein situationsgerechtes Angleichen an die Anforderungen des Tübbings. 

an annular gap for rock deformation. By using flexible elements in segment lining, deformations in the system can be compensated and radial tensions reduced. Following compression of the flexible element, the segment must provide the necessary resistance, while the honeycomb loses its functionality following complete compression. It will transmit the normal forces present between the different segments. The flexible elements are designed and dimensioned according to the characteristic that has been determined.

In order to simulate these theoretical approaches in a realistic test, the flexible elements must be pre-dimensioned and adjusted following calculation of the forces to be expected in the segment ring. The lining resistance of the elements must be designed to meet the static specifications in practice (Fig. 10 and 11). It must be ensured that the deformation path corresponds to the lining resistance. Ruhruniversität Bochum is currently testing different element designs.

Conclusion

The building block system with its different element variants is able to continuously adapt to planning and static requirements. Thanks to the wide range of design options and shapes, the system can be adapted to segment requirements in any situation. 