

Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Einzelgabionen mit Steinfüllung

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 180

bast

Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Einzelgabionen mit Steinfüllung

von

Esther Schreck
Wilhelm Decker
Felix Wawrzyniak

Bundesanstalt für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 180

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 2318003

Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen - Teil 2: Einzelgabionen mit Steinfüllung

Fachbetreuung

Esther Schreck
Felix Wawrzyniak

Referat

Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb,
Zivile Sicherheit

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-694-8

Bergisch Gladbach, Juni 2022

Kurzfassung – Abstract

Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Gabionen haben sich in den letzten Jahren als kostengünstige Bauelemente für Stützkonstruktionen etabliert. Bisher existiert allerdings für Stützkonstruktionen aus Gabionen weder ein realitätsnahes rechnerisches Nachweisverfahren für die innere Standsicherheit eines Einzelelements noch ein definiertes Prüfverfahren für Belastungsversuche. Aus diesem Grund sollen die vorhandenen Regelwerke überarbeitet und angepasst werden.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden sechs zentrische Belastungsversuche an 3-seitig gelagerten Gabionen durchgeführt. Die Einzelkörbe wurden analog zum häufigen Vorgehen auf einer Baustelle vor Ort befüllt und handgerichtet. Es wurden drei gleiche Versuche mit Lindlarer Grauwacke und 3 unterschiedliche Versuche mit Füllungen aus Granit durchgeführt. In diesem Bericht werden die Belastungsversuche, sowie das Deformationsverhalten der Gabionen beschrieben und analysiert.

Basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Projektes F1100.2315000 „Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen“ wurden die Erkenntnisse aus den Sandversuchen und die Messtechnik aus den bisherigen Versuchen übernommen.

Die Gabionen reagierten mit großer Verformung des Frontgitters auf die Belastung. Die Distanzhalter wirkten sich positiv auf die Stabilität der Gabione aus. Hohe Zugkräfte in den Distanzhaltern resultierten aus der horizontalen Deformation des Frontgitters und führten zum langsamen Aufbiegen der Distanzhalterhaken, bis diese schließlich versagten.

Eine höhere Steifigkeit der Gabione und somit niedrigere Verformungsraten lassen sich durch die Wahl eines festen, homogenen Füllmaterials mit hohem Reibungswinkel erzielen. Eine Verdichtung des Füllmaterials trägt ebenso dazu bei. Eine hohlraumarme Verfüllung, welche Materialumlagerungen in der Gabione unter Belastung verhindert, ist essentiell für die innere Standsicherheit.

Die Gabionen weisen ein plastisches Verformungsverhalten auf, wodurch ein eindeutiger Bruchpunkt

in der Regel nicht vorliegt. Aus diesem Grund wurde für jeden Versuch eine Bruchfestigkeit aufgrund von anhaltender Deformation des Frontgitters und Stauung der Gabione bzw. eines Aufbiegens der Distanzhalterhaken festgelegt. Für alle Gabionen wurden äquivalente Betondruckfestigkeiten ermittelt.

Die hier untersuchten Gabionen zeichneten sich insgesamt durch niedrige Bruchfestigkeiten aus.

Basierend auf den Erfahrungen aus den durchgeführten Belastungsprüfungen in diesem Forschungsprojekt wurden abschließend Empfehlungen zur Durchführung eines Prüfverfahrens für zentrische Belastungsprüfungen an 3-seitig gelagerten einzelnen Gabionen formuliert.

Preparation of large-scale tests on supporting structures made of gabions – Single gabions with stone filling

In recent years gabions have established themselves as cost-effective construction elements for retaining structures. Up to now, however, there has been neither a realistic computational verification procedure for the internal stability of a single element nor a defined test procedure for load tests. For this reason, the existing regulations are to be revised and adapted.

In the present research project, six centric load tests were carried out on 3-sided supported gabions. The single gabion baskets were filled and hand-erected on site, analogous to the frequent procedure on a construction site. Three identical tests were carried out with greywacke and 3 different tests with granite fillings. This report describes and analyses the loading tests and the deformation behaviour of the gabions.

Based on the results of the previous project F1100.2315000 “Preparation of large-scale tests on supporting structures made of gabions”, the findings from these sand-filled gabion tests were used as a basis and the measurement technique from the previous tests was adopted.

The gabions reacted to the load with large deformation of the front grid. The spacers had a positive effect on the stability of the gabions. High

tensile forces in the spacers resulted from the horizontal deformation of the front grid and led to the spacer hooks slowly bending up until they finally failed.

Higher stiffness of the gabion and thus lower deformation rates can be achieved by choosing a solid, homogeneous fill material with a high friction angle. Compaction of the fill material also contributes to this. Low void fill, which prevents material rearrangement in the gabion under load, is essential for internal stability.

The gabions show plastic deformation behaviour, which means that a definite failure point is generally not measurable. For this reason, a resistance to fracture due to sustained deformation of the front grid and compression of the gabion or bending up of the spacer hooks were determined for each test. Equivalent concrete compressive strengths were determined for all gabions.

The gabions investigated here were characterised overall by a low resistance to fracture.

Based on the experience gained from the load tests carried out in this research project, recommendations were finally formulated for carrying out a test procedure for centric load tests on individual gabions supported on 3 sides.

Summary

Preparation of large-scale tests on supporting structures made of gabions – Part 2: Single gabions with stone filling

Compared to solid structures, gabions can be erected quickly and at low cost. If gabions are designed, constructed and maintained according to the requirements of the construction method and the local conditions, they can fulfill their function for decades. Particularly in the construction of supporting structures, the trend in recent years has been towards ever higher constructions.

Up to now, however, there has been neither a realistic computational verification procedure for the internal stability of an individual element nor a defined test procedure for load tests for supporting structures made of gabions. For this reason, the existing regulations are to be revised and adapted.

Test design

In the present research project, six centric load tests were carried out on 3-sided supported gabions. The single baskets were filled and hand-erected on site, analogous to the frequent procedure on a construction site. Three identical tests were carried out with greywacke and 3 different tests with granite fillings. This report describes the loading tests and describes and analyses the deformation behaviour of the gabions.

Based on the results of the previous project F1100.2315000 "Preparation of large-scale tests on supporting structures made of gabions", the findings

from the sand tests were used as a basis and the measuring technique from the previous tests was adopted.

Six tests were carried out in the project with the specifications listed in Table 1. The numbering starts at 3, since these tests are to be seen in a series with tests zero to two from the previous project F1100.2315000.

The six load tests carried out on individual gabions allow fundamental findings to be derived on the deformation and failure behaviour of stone-filled gabions. The hand-filled gabions have low unit weights between 14.7 and 15.7 kN/m³ and thus have a high porosity between 40 – 44%.

Test results

The gabion reacts to loading with strong deformation and thus differs from a brittle test specimen. The deformation behaviour is due to the interaction between lattice mats, filler material and spacers.

A classic breaking point, as with a concrete specimen, was not observed. Due to this, a resistance to fracture must be determined based on the deformation of the gabion.

The following types of failure were observed:

- permanent deformation of the front grid
- permanent compression of the cage
- bending up of spacer hooks
- breakage of spacers (breakage occurred at inserted weld of a force sensor)
- partial breakage of the filling material

Test number	Filling	Measuring technique	Load mode
V 3	Greywacke	Fully equipped	Manually operated hydraulics
V 4	Greywacke	Fully equipped	Manually operated hydraulics
V 5	Greywacke	Fully equipped	Manually operated hydraulics
V 6	Granite	Fully equipped	Manually operated hydraulics
V 7	Granite	Only external metrology	Hydraulic pressure frame
V 8	Granite	Fully equipped	Manually operated hydraulics

Tab. 1: List of the tests performed

Test number	Resistance to fracture [kPa]	Horizontal elongation [mm]	Horizontal elongation [%]	Vertical compression [mm]	Vertical compression [%]
V 3	210	21	0.021	45	0.045
V 4	185	20	0.020	39	0.039
V 5	185	19	0.019	40	0.040
V 6	160*	7	0.007	30	0.030
V 7	285	18	0.018	32	0.032
V 8	235	17	0.017	41	0.041

Tab. 2: Results of the loading tests

The following did not occur:

- fracture of lattice mats
- fracture at welding points
- fracture of the plug-in rods
- bending up of the plug-in rods

The resistance to fracture and deformation values listed in Table 2 were determined for the individual gabions.

The front grid deformation can be used as a criterion for the serviceability of gabions. Based on the tests carried out here, it seems reasonable to limit the permissible deformation of the front grid to 1.5%.

If the compression is greater, there is a risk of non-uniform deformation of the cover grid. This would impair the load-bearing capacity of a support structure made of gabions.

Recommendations for a test procedure

The following recommendations for a test procedure for load tests can be derived from the BAST test results:

Test setup and bearing

A 3-sided embedding offers the advantage for a test procedure that large deformations can only form on one lattice mat and measurements only have to be taken here. It also simulates the embedding of the individual gabions in a wall. In the BAST tests, the use of a steel frame formwork proved successful in achieving the 3-sided enclosure of the gabion. The cover grid was covered with crushed aggregate and

a thin (5 cm) sand-filled load pad of geotextile was placed on the gabion before the load plate was applied.

Load rate and load duration

The test duration must be informative for comparing the deformation characteristics of the gabion and practical for the feasibility of a test procedure.

The sequence of the specified test procedure should be force-controlled. A test up to a maximum load of 300 kN should be sufficient to evaluate the deformation behaviour of a gabion. Factors for premature test termination are the breakage of stiffening elements (spacers) or lattice mats.

Load steps of 25 or 50 kN with a maximum load duration of 10 minutes can be selected.

Measurement of horizontal deformation

Decisive indications of the failure behaviour of a gabion are provided by the frontal deformation and the compression of the gabion, which are interrelated. In the case of a rearrangement of the filling material, large deformations occur on the non-bedded side of the gabion.

In the BAST tests, the use of trip wire displacement sensors for measuring the horizontal deformation has proved successful. The monitoring of the horizontal deformation should be carried out either selectively via inductive displacement sensors or trip wire displacement sensors. Alternatively, it is also possible to monitor the entire front surface if the technical equipment of the test laboratory permits. The BAST load tests have shown that the largest horizontal deformations in gabions with

stone filling always form in the middle (50;50) of a 1 x 1 x 1 m basket. Sustained horizontal deformation over one load level indicates failure of the cage.

Compression of the gabion

The compression of the gabion should be monitored using inductive displacement sensors in the four corners of the load plate. This allows the detection of a tilted position of the load plate as well as a sustained compression of the gabion during a load step.

Monitoring of the spacer hooks on the front side

Severe bulging of the front grid and compression of the gabion cause the spacer hooks to bend up. The hooks continue to bend up until they are only hanging loosely in the lattice. At this point at the latest, they no longer fulfill their purpose of connecting the meshes to each other.

It is therefore recommended for load tests to visually monitor the spacer hooks on the front of the gabion during the load test.

Welding in force sensors or applying strain gauges, as attempted in the previous project, is too costly for a load test. Welding sensors into the spacers also represents a too great intervention in the system, as it creates additional weak points in the spacers.

Evaluation of the load tests

Three identical load tests should be carried out as part of a standardised test procedure to guarantee a reliable statement on the deformation behaviour. The results should be summarised in a test report.

Inhalt

1	Einleitung	11	4.2.1	Horizontale Deformation.	22
1.1	Stand der Technik.	11	4.2.2	Absenkung der Lastplatte.	23
1.2	Zielsetzung.	12	4.2.3	Kraftsensoren im Boden- und Deckelgitter	24
1.3	Vorgehen	12	4.2.4	Kraftsensoren in den Distanzhaltern ...	24
2	Messtechnik	12	5	Belastungsversuche mit Granitfüllung	26
2.1	Belastungseinrichtung	12	5.1	Versuch 6, Granit (Bayern).	26
2.1.1	Standort	13	5.2	Versuch 7, Verdichteter Granit (Odenwald).	26
2.2	Messtechnik	13	5.3	Versuch 8, Granit (Odenwald)	27
2.2.1	Sensorauswahl und Kalibration	13	5.4	Auswertung der Granit-Versuche	28
2.2.2	Kraftsensoren	13	5.4.1	Granit – Horizontale Deformation.	28
2.2.3	Kraftmessdose und Kugelkalotte	14	5.4.2	Absenkung der Lastplatte.	28
2.2.4	Seilzug-Wegsensoren	14	5.4.3	Kraftsensoren im Boden- und Deckelgitter	29
2.2.5	Induktive Wegsensoren	15	5.4.4	Kraftsensoren in den Distanzhaltern ...	29
2.2.6	Temperatursensor	15	6	Schlussfolgerungen	30
2.2.7	Datenerfassung	15	6.1	Vergleich der durchgeführten Versuche	30
2.2.8	Belastungszyylinder	15	6.2	Erkenntnisse zu Belastungs- prüfungen	33
3	Versuchsaufbau	16	7	Zusammenfassung	34
3.1	Verwendete Materialien	16	Literatur	35	
3.2	Begriffsdefinitionen.	16	Bilder	35	
3.3	Allgemeiner Aufbau	17	Tabellen	36	
3.4	Belastungsregime.	18			
3.5	Anpassungen und Besonderheiten ...	18			
3.5.1	Anpassung der Messtechnik	18			
3.5.2	Versuch 7	19			
3.6	Lage der Sensoren.	19			
4	Belastungsversuche mit Grauwackefüllung	21			
4.1	Versuchsbeschreibung	21			
4.2	Auswertung der Grauwacke- Versuche	22			

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Stand der Technik

Stützkonstruktionen aus Gabionen – mit Gesteinsmaterial verfüllte Drahtgitterbehälter – sind mittlerweile auch an Bundesfernstraßen weit verbreitet (s. Bild 1-1). Diese variablen Drahtgitterelemente besitzen vielfältige Verwendungsformen und lassen sich als Stütz-, Lärmschutz-, Erosionsschutz-, Sichtschutzkonstruktion oder als Verkleidung von Bauwerken nutzen. Die vergleichsweise kostengünstige Bauweise, bei der auf regional verfügbare Gesteine zurückgegriffen werden kann, hat sich in den letzten Jahren weit verbreitet.

Im Vergleich zu Massivbauwerken können Gabionen rasch und kostengünstig errichtet werden. Wenn Gabionen entsprechend den Erfordernissen der Bauweise und den örtlichen Verhältnissen konstruiert, ausgeführt und unterhalten werden, können sie ihre Funktion über Jahrzehnte erfüllen. Besonders bei dem Bau von Stützkonstruktionen geht der Trend in den letzten Jahren zu immer höheren Konstruktionen.

Die Gabionen werden bisher in den Regelwerken nur sehr kurz behandelt. Aufgrund des komplexen Zusammenhanges zwischen Drahtgitterbehälter und Füllmaterial existiert bisher kein rechnerischer Nachweis für die innere Standsicherheit (s. Bild 1-2) von Gabionen. Dieser Umstand führte dazu, dass sich neben der BAST auch diverse andere Forschungseinrichtungen mit dem Thema befassen und dazu forschen.

In der ZTV-ING Teil 2 „Grundbau“ Abschnitt 4 „Stützkonstruktionen“ [1] ist aufgrund des fehlenden



Bild 1-1: Stützmauer aus Gabionen. Rastplatz Funckenhausen an der BAB 1.

Nachweises die sichtbare Höhe von Gabionen auf 6 m beschränkt.

Das 2014 von der FGSV herausgegebene „Merkblatt über Stütz- und Lärmschutzkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen“ (MGab) [2] erlaubt, die innere Standsicherheit über einen Rechenweg oder über Belastungsversuche nachzuweisen. Es wird empfohlen, durch Belastungsversuche eine äquivalente Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [3] für homogen gefüllte Gabionen zu ermitteln. Ein Prüfverfahren zur Durchführung von Belastungsversuchen existiert bisher nicht. Das Merkblatt wird zurzeit überarbeitet und ein eigenes Nachweiskonzept von der FGSV entwickelt.

Im Mai 2017 wurde mit dem ARS Nr. 12/2017 das R1 Regelwerk „Technische Lieferbedingungen für Gabionen im Straßenbau“ (TL Gab-StB16) [4] eingeführt. Das Merkblatt regelt die Anforderungen an die Befüllmaterialien, Drahtmatten und Verbindungselemente.

Aufgrund des vorhandenen Forschungsbedarfs wurden im Jahr 2015 durch Auftragsforschung der BAST durch das ELE im Bericht „Versagen eines Einzelelements bei Stützkonstruktionen aus Gabionen“ [5] bisher vorhandene Untersuchungen zur Forschung an Gabionen zusammengefasst und die Ansätze zu rechnerischen Nachweisverfahren nach WEBER [6] und BUß/WINSELMANN [7] vorgestellt.

Von der BAST wurde 2019 der Forschungsbericht „Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen“ [8] veröffentlicht. In diesem Projekt wurde ein Messkonzept für Belastungsversuche an Einzelkörben aufgestellt und Belastungsversuche an mit Geotextil ausgekleideten und sandgefüllten Gabionen durchgeführt und ausgewertet.

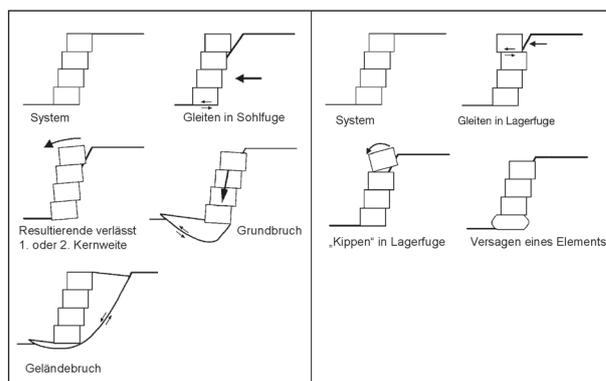


Bild 1-2: Versagensmechanismen bei Schwergewichtsmauern [2]

Die im Jahr 2019 veröffentlichte, sehr ausführliche Dissertation von Dr. A. KRUG „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Gabionenkonstruktionen aus punktgeschweißten Gittern“ [9] befasst sich mit der Auswertung von Belastungsversuchen an Einzelkörben und Wandelementen und stellt ein überarbeitetes empirisches Bemessungsmodell sowie Überlegungen zu Belastungsprüfungen vor.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes „Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Teil 2: Einzelgabionen mit Steinfüllung“ sollen Belastungsversuche an einzelnen, steingefüllten Gabionen vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden.

Basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Projektes F1100.2315000 „Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen“ wurden die Erkenntnisse aus den Sandversuchen und die Messtechnik aus den bisherigen Versuchen übernommen.

Ziel des Projektes ist es, das Deformationsverhalten von steingefüllten Gabionen zu untersuchen und eine Datengrundlage zur Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur inneren Standsicherheit zu erhalten.

Die Versuchsergebnisse sollen außerdem dazu dienen, die Durchführung von Großversuchen vorzubereiten, um zukünftig das Systemtragverhalten von Stützkonstruktionen aus Gabionen untersuchen zu können.

Versuchsnummer	Füllung	Messtechnik	Belastung
3	Grauwacke	Voll ausgestattet	Handhydraulik
4	Grauwacke	Voll ausgestattet	Handhydraulik
5	Grauwacke	Voll ausgestattet	Handhydraulik
6	Granit	Voll ausgestattet	Handhydraulik
7	Granit	Nur äußere Messtechnik	Belastungsrahmen Direktbelastung
8	Granit	Voll ausgestattet	Handhydraulik

Tab. 1-1: Liste der durchgeführten Versuche

1.3 Vorgehen

Im Projekt wurden 6 Versuche mit den in Tabelle 1-1 aufgeführten Spezifikationen durchgeführt. Die Nummerierung beginnt bei 3, da diese Versuche in einer Reihe mit den Versuchen null bis zwei aus dem Vorgängerprojekt F1100.2315000 zu sehen sind. Genauere Informationen zur Füllung finden sich in den Kapiteln 4 und 5.

2 Messtechnik

Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über die für die Versuche eingesetzten Messmittel und deren Vorbereitung gegeben. Die hier gegebene Übersicht über die Messtechnik entspricht den Ausführungen im Abschlussbericht F1100.2315000.

2.1 Belastungseinrichtung

In der BAST gibt es seit 1983 einen Belastungsrahmen, der für diese Versuche verwendet wurde. Der Belastungsrahmen wurde durch die Fa. Eubel KG, Troisdorf, konstruiert und hergestellt. Die Fa. Stalvoss GmbH & Co. KG, Köln, hatte in den Jahren 2014/2015 die Federführung bei der Instandsetzung und Modernisierung des Belastungsrahmens. Der Belastungsrahmen besteht aus einem Stahlrahmen, der auf Laufschienen in Hallenlängsrichtung verfahren und für die Lastaufbringung arretiert werden kann. Am Riegel des Rahmens kann eine Laufkatze mit dem Belastungszylinder in Hallenquerrichtung verfahren werden. Die Versuchseinrichtung in ihrer heutigen Ausführung (s. Bild 2-1) kann statische Lasten von 100 kN bis 2.000 kN aufbringen und es ist möglich mittels eines zusätzli-



Bild 2-1: Belastungsrahmen in Halle 7 der BAST

chen Hydraulikaggregates und des Dynamikmoduls dynamische Lasten von 50 kN in einer Frequenz von 0 bis 5 Hz aufzubringen. Für die aktuellen Belastungsversuche an einzelnen Gabionen wurden lediglich statische Lasten aufgebracht.

Zwischen den Schienen für den Belastungsrahmen befindet sich eine Versuchsgrube mit den lichten Abmessungen von 7,5 m x 20 m. Deren größte Abmessung ist parallel zur Hallenlängsrichtung orientiert. Der Boden der Versuchsgrube weist ein Gefälle auf. Die maximale Tiefe der Grube beträgt bezogen auf die Oberfläche des Hallenbodens 3,2 m. Aktuell ist diese Grube verfüllt. Für den Auf- und Abbau der Versuche wurde die ebenfalls in der Halle 7 vorhandene Kranbahn mit einem Kran der Fa. Demag, Tragkraft 10 t, genutzt. Die Schienen der Kranbahn sind auf den Stützen der Hallenkonstruktion aufgelagert und verlaufen in Hallenlängsrichtung.

2.1.1 Standort

Als Standort für die Versuche wurde der südliche Bereich der Versuchsgrube nahe dem zentralen Steuerschrank für den Belastungsrahmen ausgewählt. Zum Zeitpunkt der Versuche befanden sich dort eine ca. 2,4 m mächtige Schicht aus Kiessand 0/8 und darüber eine ca. 0,5 m mächtige Schicht aus gebrochenem Frostschutzmaterial in der Grube. Bei der Verfüllung wurde auf der Oberfläche des Kiessandes ein Mindestverformungsmodul von $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$ und auf der Oberfläche des Frostschutzmaterials von $E_{v2} = 120 \text{ MN/m}^2$ nachgewiesen. Nach der Verfüllung der Grube wurden in diesem Bereich Versuchskörper aus Stahlbeton gelagert, die vor der Herrichtung des Standortes entfernt wurden. Unter Berücksichtigung der erreichten Verformungsmoduln und der vorherigen Lagerung der Versuchskörper wurden relevante Setzungen der Grubenfüllung infolge der Belastungsversuche als unwahrscheinlich eingeschätzt.

2.2 Messtechnik

Im folgenden Kapitel werden zunächst die für die Versuche verwendeten Sensoren erläutert und abschließend die in den jeweiligen Versuchen angewandten Messmethoden beschrieben.

2.2.1 Sensorauswahl und Kalibration

Für die Versuche wurden die nachfolgend genannten Sensoren ausgewählt und entsprechend kalibriert. Die Positionierung der Sensoren bei den einzelnen Versuchen ist den jeweiligen Lageplänen (s. Kapitel 3.6) zu entnehmen.

2.2.2 Kraftsensoren

Zur Bestimmung der Kräfte in den Gittern und Distanzhaltern der Gabione wurden Kraftsensoren des Typs KM16z (Abmessungen: Durchmesser 18 mm, Länge 40 mm) eingeschweißt. Hersteller: ME-Messsysteme GmbH. Dieser Kraftsensor basiert auf einer DMS-Vollbrücke (Kennwert 1 mV/V) und erfasst Zug- und Druckkräfte bis zu 5 kN.

In die Verbindungsleitung der Sensoren ist jeweils ein Messverstärker mit Steuereingang für Nullabgleich (Tara) (Typ GSV-6K) mit kleinstmöglichen Abmessungen, integriert im Steckergehäuse, eingebaut worden. Die Spannungsversorgung beträgt 12 bis 24 VDC. Das Ausgangssignal liegt bei $\pm 10 \text{ VDC}$.

Für die Kalibrierung auf Zug wurden die Sensoren mit speziell gefertigten Kopfstücken ausgestattet und schrittweise mit der Zugprüfmaschine belastet (s. Bild 2-2).

Für die Kalibrierung auf Druck wurde der Sensor mit speziellen Zylinderenden versehen und in der zuvor genannten Zugprüfmaschine zwischen zwei Stahlblöcke eingesetzt. Das Kalibrieren erfolgte durch das Anfahren in genannten Kraftstufen und



Bild 2-2: Kraftsensor bei der Kalibrierung

Kraftstufen Zug [N]	Kraftstufen Druck [N]
0	0
-100	100
-200	-
-400	400
-600	600
-800	800
-1.000	1.000
-2.000	2.000
-3.000	-
-4.000	-

Tab. 2-1: Kraftstufen bei der Kalibrierung der Kraftsensoren (Zug wird vom Sensor als negativer Wert erfasst)

die Notation des jeweiligen Spannungswertes. Vor Beginn der jeweiligen Belastung wurde der Nullwert im unbelasteten Zustand gemessen. Weil von einer wesentlich geringeren Druckbelastung ausgegangen werden konnte, wurden bei der Druckkalibrierung weniger Kraftstufen als bei der Zugkalibrierung angefahren (s. Tabelle 2-1).

Zur Vorbereitung der Versuche wurden die Gitter und Distanzhalter an den für die Kraftsensoren vorgesehenen Positionen aufgetrennt. An diesen Positionen wurden dann die mit entsprechenden Endhülsen versehenen Kraftsensoren unter ausreichender Kühlung eingeschweißt.

2.2.3 Kraftmessdose und Kugelkalotte

Für alle Versuche wurde die zum Belastungsrahmen gehörige Kraftmessdose C6/200t der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH zur Messung der eingeleiteten Kraft verwendet. Zur Sicherstellung einer lotrechten Lasteinleitung in die Lastplatte wurde zusätzlich zur Kraftmessdose die Kugelkalotte 1-C6/200T/ZK des gleichen Herstellers eingesetzt.

Diese Kraftmessdose ist für Kräfte bis zu 2.500 kN ausgelegt. Sie wird an einen Verstärker angeschlossen, der die gemessene Kraft auf 0,1 kN genau anzeigt und das Ausgangssignal von 0 bis 10 VDC an die Datenerfassung weiterleitet. Die Messkette wurde vollständig herstellerseits nach DIN EN ISO 10012 kalibriert.

Die Werte dieser Kraftmessdose fließen in die programmierbare Steuerung des Belastungsrahmens ein und regeln somit die in die Gabione eingeleiteten Kräfte.

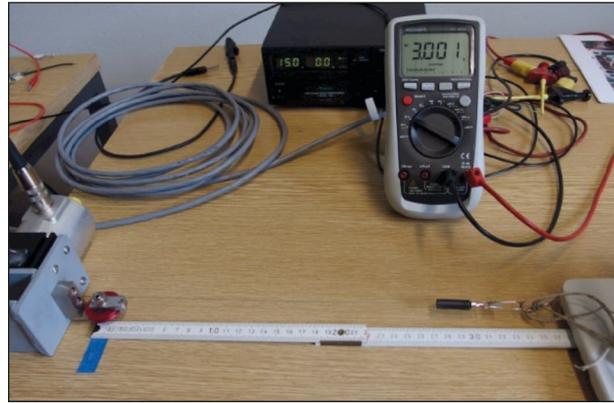


Bild 2-3: Kalibrierung der Seilzugwegsensoren

2.2.4 Seilzug-Wegsensoren

Um die Verformung der Front der Gabione bestimmen zu können, wurden 9 Seilzug-Wegsensoren der Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (Serie WDS, Baureihe P60) mit Messbereichen von 500 mm und 1.000 mm am Frontgitter angebracht (Spannungsversorgung 14 – 27 VDC, Ausgangssignal 0 bis 10 VDC).

Es sollte jeweils die Ausbauchung im Vergleich zum unbelasteten Zustand gemessen werden. Am anderen Ende waren die Sensoren auf einer in der jeweiligen Höhe befestigten Stahlschiene angeschraubt.

Für die Kalibrierung wurde der in Bild 2-3 dargestellte Versuchsaufbau gewählt.

- 1) Der Seilzug-Wegsensor wurde an einer Kalibrationsunterlage fixiert.
- 2) Das Messseil wurde an einem Stativ eingehängt, sodass das Seil parallel zur Unterlage verlief.
- 3) An das Seil wurde ein Gliedermaßstab angelegt.
- 4) Der Sensor wurde an die Spannungsversorgung und an ein Spannungsmessgerät angeschlossen.
- 5) Das Seil wurde schrittweise ausgezogen und die Länge sowie die gemessene Spannung notiert.
- 6) Auftragung der Kalibrierkurve Länge gegen Spannung.
- 7) Kalibrierung des Verstärkers und der Programmierung.

Kalibrierte Weglänge bei einem Messbereich von 500 mm [cm]	Bei einem Messbereich von 1.000 mm zusätzlich [cm]
0	60
12	70
20	80
30	90
40	100
50	-

Tab. 2-2: Kalibrierung der Seilzug-Wegsensoren

Dabei wurden als Kalibrierschritte die in Tabelle 2-2 aufgelisteten Werte verwendet.

2.2.5 Induktive Wegsensoren

Für die genaue Betrachtung der Versuchsumstände ist es unerlässlich, die Position der Schalung und der Lastplatte stetig zu überwachen. In den Versuchen wurde dies durch den Einsatz von induktiven Wegsensoren (IWS) gewährleistet. Hierbei kamen 10 Sensoren vom Typ WA (Spannungsversorgung: 15 bis 30 VDC, Ausgangssignal: 0,5 bis 10 VDC) mit einem Messbereich von 0 bis 100 mm Weg zum Einsatz.

Die induktiven Wegsensoren wurden vom Hersteller Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH werkskalibriert geliefert und auf den eigenen Verstärker nachkalibriert. Bei der Kalibrierung wurde aufgrund einer Limitierung des Kalibriermittels nur ein Weg von 50 mm kalibriert. Der Sensor wurde gegen eine Feinmessschraube eingespannt und die ausgehende Spannung in Abhängigkeit zum eingestellten Weg ermittelt (s. Bild 2-4). Hierbei wurden die in Tabelle 2-3 aufgeführten Messabstände gewählt.

2.2.6 Temperatursensor

Die Umgebungstemperatur wurde während des Versuchs mit einem Platin-Messwiderstand PT1000 erfasst.

2.2.7 Datenerfassung

Zur Erfassung der analogen Messdaten aller Sensoren und Weitergabe an den Rechner wurden die Analog-Digital-Messkarte NI USB-6225 OEM und die Programme NI-LabView 14 und NI-MAX von National Instruments Germany GmbH verwendet.

Messlängen im Bereich bis 10 mm [mm]	Messlängen im Bereich 10 bis 50 mm [mm]
0	10
1	15
2	20
3	25
4	30
5	35
6	40
7	45
8	50
9	-

Tab. 2-3: Kalibrierschritte für induktive Wegsensoren

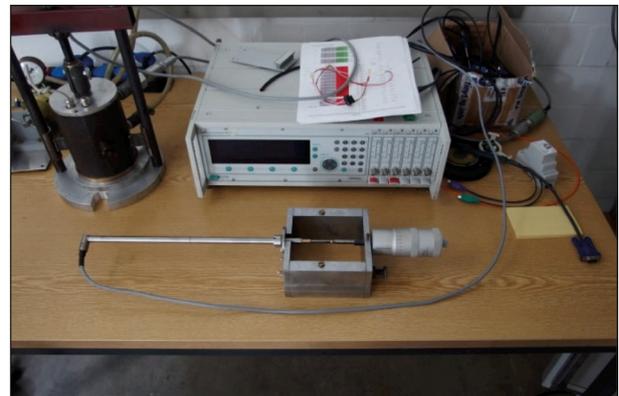


Bild 2-4: Kalibrierung induktive Wegsensoren

Die Software für die Datenerfassung wurde mit NI-LabView 14 erstellt. Mit NI-MAX erfolgte die Skalierung der Sensoren. Die Messkarte verfügt über eine Kapazität von 80 analogen Messkanälen und kann mit einer Abtastrate von bis zu 250 kHz die Daten erfassen.

Bei allen Versuchen wurden die Messdaten aller Sensoren mit einer Abtastrate von 1 Hz erfasst.

2.2.8 Belastungszyylinder

Da der Belastungsrahmen erst ab einer Laststufe von 100 kN zuverlässig die Last anfahren und halten kann, wurde ein Belastungszyylinder ENERPAC DUO RC 506 (s. Bild 2-5) für die Aufbringung der Last verwendet. Der Belastungsrahmen dient hierbei als Widerlager, gegen das der Belastungszyylinder drückt. Im Folgenden sind die technischen Daten des verwendeten Belastungszyinders aufgeführt (s. Tabelle 2-4).

Belastungszyylinder ENERPAC DUO RC 506	Technische Daten
Bauhöhe, eingefahren [mm]	282
Max. Hub [mm]	159
Max. Druckkraft [kN]	498
Max. Betriebsdruck [bar]	700
Gewicht [kg]	23,1

Tab. 2-4: Daten des Belastungszyinders ENERPAC



Bild 2-5: Belastungszyylinder ENERPAC DUO RC506

3 Versuchsaufbau

Das folgende Kapitel behandelt zunächst allgemein die Materialien und den Aufbau eines Versuchs sowie die Positionierung der Sensorik und geht dann auf die Besonderheiten bei einzelnen Versuchen ein.

3.1 Verwendete Materialien

Für die Durchführung der Belastungsversuche wurden folgende Materialien ausgewählt und beschafft:

- 10 Gabionen „Quicky Forte 2000®“ der Fa. Hoy Geokunststoffe GmbH, Kesselsdorf, Abmessungen L x B x H = 1,0 x 1,0 x 1,0 [m], Maschenweite 5 x 10 [cm], Drahtdurchmesser der elektrisch punktgeschweißten und rundum mit Ösen versehenen Stahlgittermatten 4,5 mm, Drahtdurchmesser der Steckstäbe 6,0 mm, Drahtdurchmesser der Distanzhalter 5 mm, Ösen- und Drahtzugfestigkeit mindestens 450 N/mm², Zink-Aluminium-Legierung mit Aluminiumanteil von mindestens 10 %,
- Spielsand „Red Sun“ und Spielsand „Sahara“, 25 kg – Sackware, für die Herstellung eines Aus-

gleichspolsters zwischen Gabione und Lastplatte,

- geotextiler Vliesstoff „Galatex GRK 2/F-22“ aus Polypropylen, Rollenbreite 2 m, Flächengewicht 120 g/m², zur Einfassung des Ausgleichspolsters,
- Stahlrahmenschalung „Raster“ inkl. Zubehör (Höhe der Rasterelemente 1,25 m) der Fa. Paschal-Werk G. Maier GmbH, Steinach, zur seitlichen Dehnungsbehinderung der Gabionen, rückseitige Elemente aufgrund permanenter Verformungen ab Versuch 6 erneuert,
- Lastplatte mit den Abmessungen 0,98 x 0,98 x 0,06 [m], Baustahl S 235, zur Lasteintragung in die Gabionen,
- umlaufender Rahmen aus Profilen HEB 200 mit den Außenabmessungen 1,80 x 1,80 [m], Baustahl S 235, zur Anbringung der Aufnahmevorrichtungen Wegsensoren,
- Grauwacke, mit Korngröße 80/150 mm als Füllmaterial für die Gabione bei den Versuchen 3 bis 5,
- Grauwacke, mit Korngröße 16/32 mm als Auffüllmaterial zwischen Deckelgitter und Ausgleichspolster,
- Granit, mit Korngröße 80/250 mm als Füllmaterial für die Gabione bei Versuch 6,
- Granit, mit Korngröße 60/170 mm als Füllmaterial für die Gabione bei den Versuchen 7 und 8 und
- „Nomazip“ Rohrisolierungen 15-18, 1 m, Außendurchmesser 5 cm, Innendurchmesser 22 mm, aus Polyethylenschaum, als Quetschschutz für die Sensorik.

3.2 Begriffsdefinitionen

Die Bestandteile der Gabione werden mit folgenden Fachbegriffen betitelt:

- Gabionengitter/Gittermatte:
Aus über Kreuz verschweißten Stahlstäben hergestellte Gitter, die als Wände, Deckel und Boden der Gabione fungieren.
- Distanzhalter:
Stahlstab, der in der Gabione in zwei der Gitter

eingehängt wird und für die stabile Form der Gabione sorgt.

- **Steckstab:**
Stahlstab, der zur Verbindung zweier Gitter verwendet wird. Die Steckstäbe bilden die äußeren Kanten des Gabionenkorbes.

3.3 Allgemeiner Aufbau

Für den Aufbau einer Gabione wurde der im Folgenden beschriebene Ablauf durchlaufen.

Alle Sensoren wurden kalibriert. Die kalibrierten Kraftsensoren wurden mit Schweißenden versehen und entsprechend den Lageplänen (s. Kapitel 3.6) in die Gitter und Distanzhalter eingeschweißt.

Die Aufstellfläche wurde begradigt und der dort vorhandene Sand leicht angefeuchtet.

Die Gitter von Rückseite, Front und Boden wurden mit den Seitengittern über Steckstäbe zusammengesetzt. Zum Schutz der Sensoren und der Leitungen wurden die Sensoren in den Gittern mit den „Nomazip“ Rohrisolierungen (im Weiteren Schutzrohre genannt) ummantelt. Die Leitungen der Sensoren von Boden und Rückseite wurden, ebenfalls ummantelt, rückseitig aus der Gabione geführt. Die Leitungen der Frontsensoren wurden über die Front geführt.

Die Sensoren im Deckelgitter wurden ebenfalls mit Schutzrohren ummantelt und die Leitungen so vorbereitet, dass sie später auf der Frontseite aus der Gabione geführt werden konnten.

Dann wurde die Gabione am Versuchsort aufgestellt und auf allen vier Seiten mit einer Behelfsschalung aus Holz eingefasst. Hierbei wurden die Leitungen durch die vorgesehenen Löcher herausgeführt.

An den Rändern des Korbs beginnend wurde der Boden mit dem Füllmaterial langsam bedeckt. Hierbei wurden die Steine händisch eingefüllt, um eine möglichst hohlraumarme Verfüllung zu erreichen.

Nach dem Bedecken des Bodengitters mit Füllmaterial wurden die Kraftsensoren im Boden- und Frontgitter sowie im rückwärtigen Gitter an die Datenerfassungseinheit angeschlossen und deren Signale abgefragt. Während des Einbaus der weiteren Sensoren wurden diese ebenfalls Zug um Zug angeschlossen und abgefragt.

Bei einem Füllstand von etwa 20 cm wurden die Distanzhalter der ersten Lage eingebaut. Hierfür mussten die Gitter kurzzeitig zusammengedrückt werden, um das Einhängen der Distanzhalter zu ermöglichen.

Die Höhe der Enden der Distanzhalter wurde nivelliert und der Zustand der umgebogenen Enden fotografisch festgehalten.

Die Kraftsensoren wurden ebenfalls in Schutzrohre verpackt, die Leitungen durch Schutzrohre geschützt und jeweils auf dem kürzesten Weg aus der Gabione geführt.

Beim weiteren Verfüllen der Gabione wurde besonderer Wert daraufgelegt, die Distanzhalter möglichst hohlraumarm mit Steinen zu unterfüttern, um ein Durchbiegen und eventuelles Brechen der Schweißstellen zu verhindern.

Bei einem Füllstand von etwa 50 cm wurden die Distanzhalter der zweiten Lage eingebaut. Mit ihnen wurde ebenso verfahren wie mit denen der ersten Lage.

Bei einem Füllstand von etwa 95 cm wurde das Deckelgitter an der Front montiert. Der verbleibende Hohlraum wurde nun gezielt mit passenden Steinen aufgefüllt. Sobald die Hohlräume unter dem Deckelgitter weitestgehend gefüllt waren, wurde das Deckelgitter auf allen vier Seiten befestigt.

Die Gabione wurde nun mit der Grauwacke der kleineren Korngröße leicht überfüllt, um eine möglichst ebene Oberfläche zu erzeugen und noch verbliebene Hohlräume zu füllen.

Dann wurde die Behelfsschalung gegen die Stahlrahmenschalung ausgetauscht. Da diese Stahlrahmenschalung die die Gabione in Realität umgebende Hinterfüllung und weitere Gabionen abbilden soll, wurde an der Front auf Schalungselemente verzichtet.

Im Zuge des Austauschs der Behelfsschalung durch die Stahlrahmenschalung wurden alle Anschlusskabel für die Sensoren von der Datenerfassungseinheit getrennt, durch die jeweilige Schalung hindurchgeführt und wieder an die Datenerfassungseinheit angeschlossen. Die Anschlusskabel der Kraftsensoren wurden dabei auf der Rückseite des Versuchsaufbaus mit den zugehörigen Einkanalverstärkern verbunden.

Die Stahlrahmenschalung wurde so ausgerichtet und über Gewindestangen fixiert, dass die Abstän-

de zwischen den seitlichen Elementen gleich waren.

Dann wurden die oberen Ecken der Gabione nivelliert (Nivellierpunkte 10 bis 15, s. Bild 3-1).

Sobald der Austausch der Schalung abgeschlossen war, wurden zunächst das vliesumhüllte Lastkissen aus Sand und anschließend die stählerne Lastplatte aufgebracht und positioniert.

Nach dem Einbau des vliesumhüllten Lastkissens aus Sand wurde durch die Schlosserei etwa mittig auf der Frontseite an den oberen Steckstab eine Sensoraufnahme für den induktiven Wegsensor Wx-4 angeschweißt.

Die restlichen Punkte des äußeren Aufbaus wurden nach dem Nivellierplan (s. Bild 3-1) nivelliert.

Die induktiven Wegaufnehmer und die Seilzugwegaufnehmer wurden außen an der Gabione angebracht, ausgerichtet und getestet.

Der Versuchsaufbau wurde schließlich mit dem Aufbau der Handhydraulikeinheit auf der Lastplatte und mit dem entsprechenden Positionieren des Belastungszylinders des Belastungsrahmens komplettiert. Unter dem Belastungszylinder des Belastungsrahmens wurden zuvor die Kraftmessdose

C6/200t und die Kugelkalotte 1-C6/200T/ZK befestigt.

Vor Beginn des Versuchs wurde noch einmal die Funktion aller Sensoren und der Eingang aller Messsignale über die Datenerfassung geprüft.

Nach Abschluss des Versuchs wurden beim Abbau wieder alle Punkte, die beim Aufbau nivelliert wurden, erneut nivelliert.

3.4 Belastungsregime

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde das in Projekt F1100.2315000 verwendete Belastungsregime für die Versuche dieses Projekts übernommen.

Beginnend mit einer Vorlast von 10 kN und mit jedem Schritt um 25 kN gesteigert wurden die Gabionen belastet. Die einzelnen Lastschritte wurden jeweils für 10 min gehalten.

3.5 Anpassungen und Besonderheiten

Im Laufe der Versuchsserie ergaben sich die im Folgenden geschilderten Anpassungen des allgemeinen Versuchsaufbaus.

3.5.1 Anpassung der Messtechnik

Ab Versuch 4 wurde der Sensor mittig im rückseitigen Gitter (Kx-21) weggelassen, um eine Zerstörung des Sensors zu vermeiden. Die Stahlrahmenschalung engte den Sensor zu sehr ein und aufgrund des an dieser Stelle befindlichen Ausgleichselements der Schalung war es nicht möglich, dem Sensor mittels eines Lochs Bewegungsspielraum zu geben.

Ab Versuch 6 wurde auf den induktiven Wegsensor in der Mitte des Frontgitters verzichtet, da nicht gewährleistet werden konnte, dass die Sensoraufnahme sich parallel zur Lastplatte bewegt.

Bei den Vorbereitungen zu Versuch 6 wurden beim Einbau 12 der Kraftsensoren beschädigt und mussten ersetzt werden. Ab Versuch 6 kamen daher 12 neue Sensoren zum Einsatz. Diese wurden genau wie ihre Vorgänger entsprechend kalibriert.

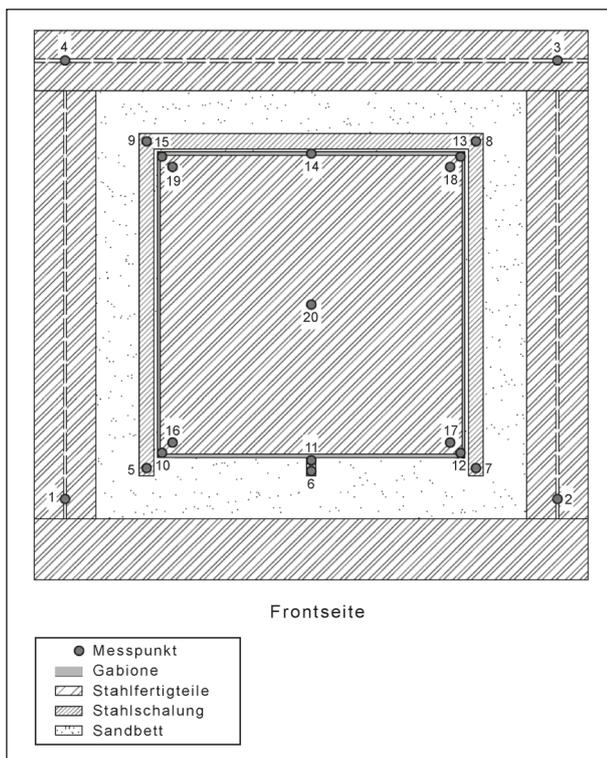


Bild 3-1: Übersichtsplan Nivellierpunkte (Draufsicht auf den Versuchsaufbau)

3.5.2 Versuch 7

Bei Versuch 7 sollte ermittelt werden, welche Belastung eine gut befüllte Gabione aushalten kann. Da die Handhydraulikpumpe auf eine Druckkraft von 498 kN beschränkt ist, wurde der Einsatz des Belastungsrahmens beschlossen.

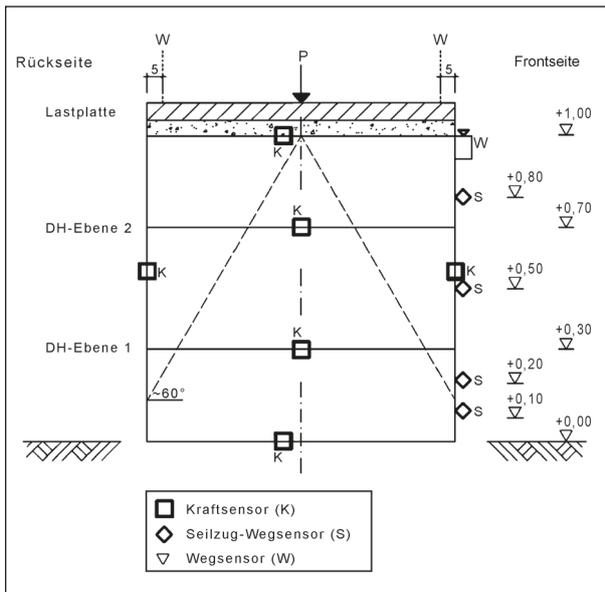


Bild 3-2: Schnitt Mittelachse, Lage der Sensoren und Distanzhalterebenen (Versuch 3)

Zudem sollte die Gabione so dicht wie möglich gepackt sein. Dies wurde durch den Einsatz einer Rüttelplatte beim Einbau der Füllung erreicht (s. Bild 5-2).

Damit beim Einbau durch die Vibration der Rüttelplatte und durch die anschließende höhere Belastung mit dem Belastungsrahmen die Kraftsensoren nicht beschädigt werden konnten, wurde auf den Einbau der inneren Sensorik für Versuch 7 verzichtet.

Die Belastung in Versuch 7 begann mit einer Vorlast von 100 kN, da der Belastungsrahmen in einem Bereich unter 100 kN nicht ausreichend differenzierbar einstellbar ist. Dann wurde das Belastungsregime, wie in Kapitel 3.4 erläutert, durchgeführt. Die höchste Laststufe lag hierbei bei 435 kN.

3.6 Lage der Sensoren

Die für die Versuche verwendeten Kraftsensoren wurden in das Front-, Boden-, Deckel- und rückseitige Gitter sowie die Distanzhalter eingeschweißt. Die genaue Lage innerhalb der Gabione kann wie auch die Position der externen Sensorik den Bildern 3-2 bis 3-8 entnommen werden. Die Übersicht enthält exemplarisch nur die Zeichnungen für den Versuch 3.

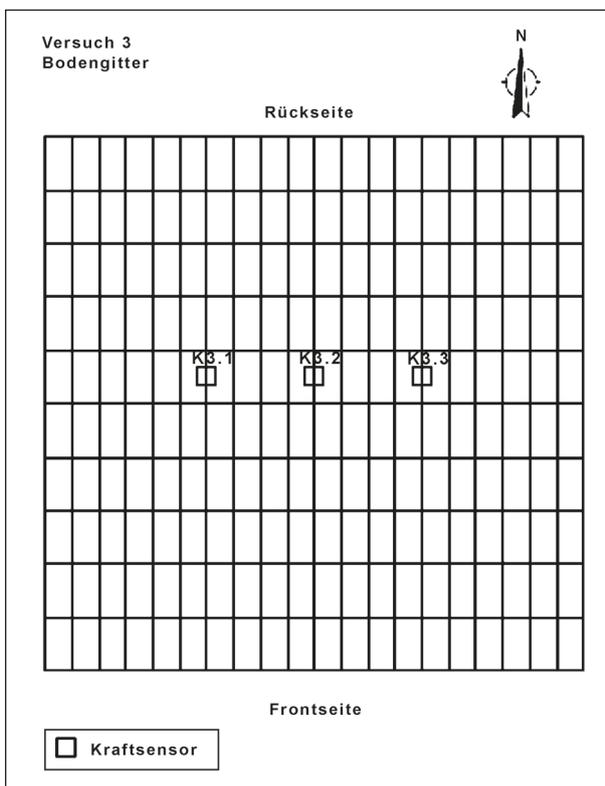


Bild 3-3: Kraftsensoren im Bodengitter

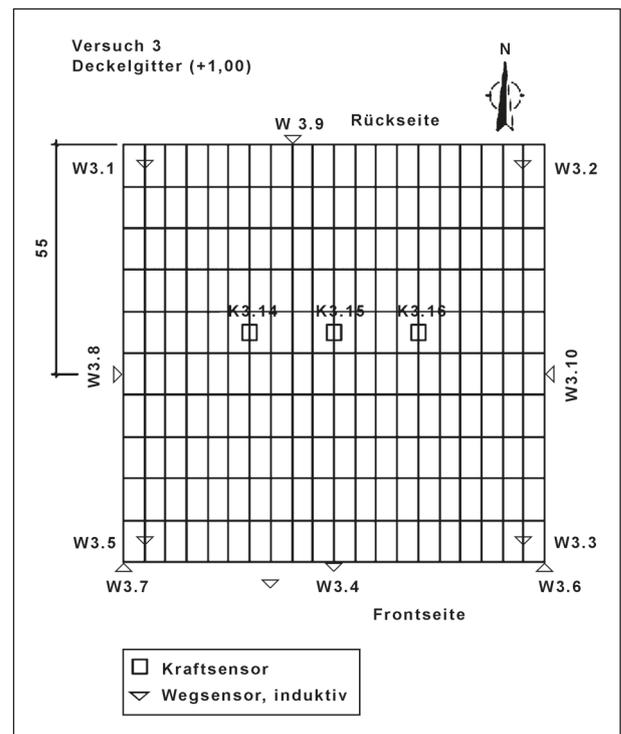


Bild 3-4: Kraftsensoren im Deckelgitter

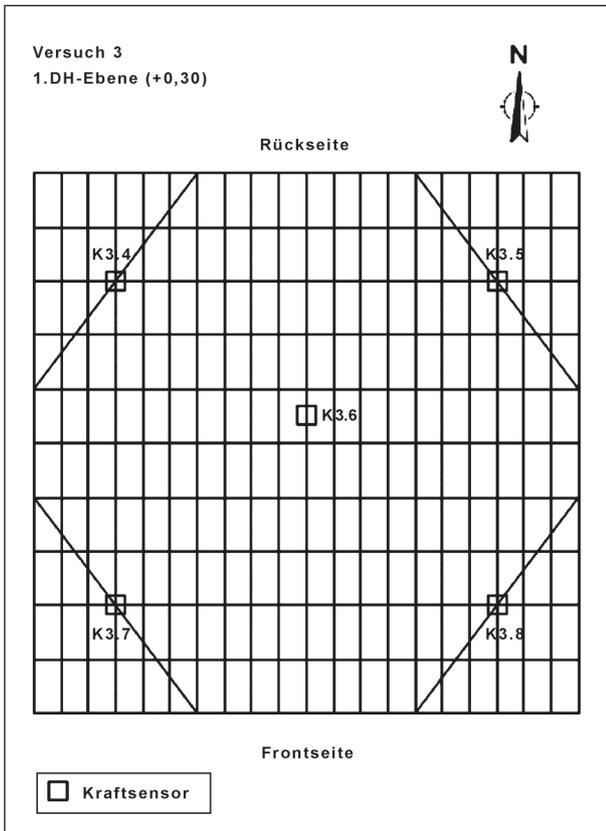


Bild 3-5: Kraftsensoren in 1. DH-Ebene, 0,3 m Höhe

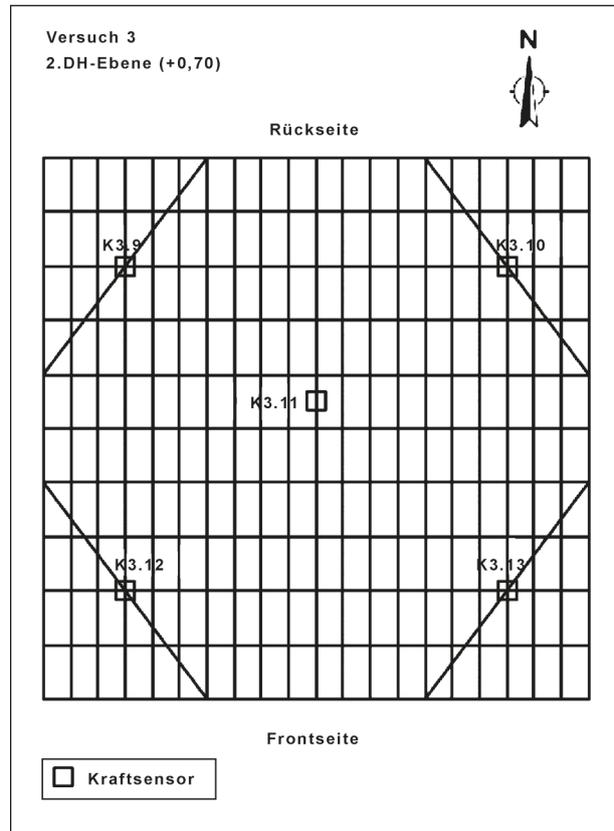


Bild 3-6: Kraftsensoren in 2. DH-Ebene, 0,7 m Höhe

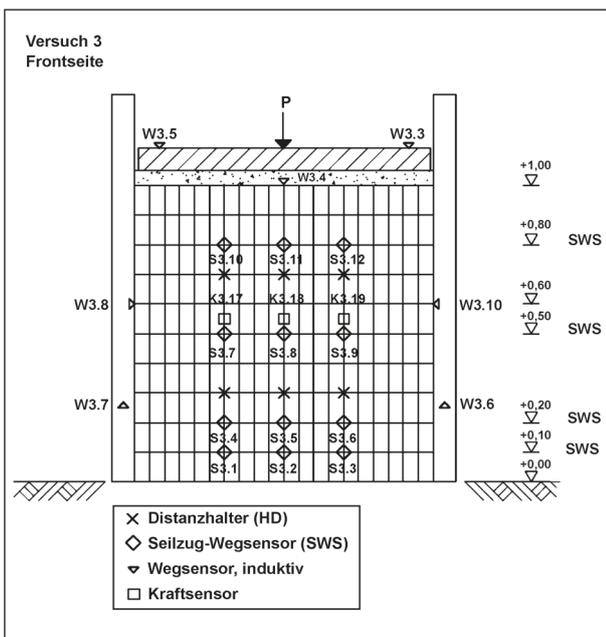


Bild 3-7: Seilzugwegsensoren und Kraftsensoren am Frontgitter

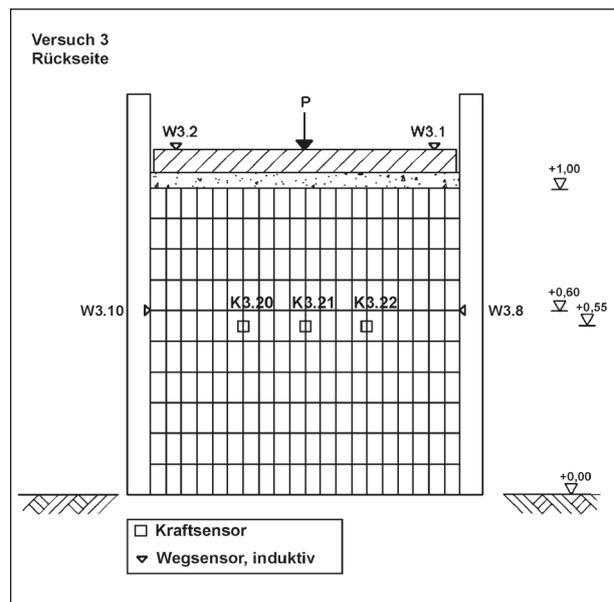


Bild 3-8: Kraftsensoren im rückwärtigen Gitter

4 Belastungsversuche mit Grauwackefüllung

4.1 Versuchsbeschreibung

Es wurden drei Belastungsversuche mit Lindlarer Grauwacke durchgeführt. Das Material wurde von der Fa. Schömig angeliefert. Gesteinsfestigkeit und Dichte vom Lieferanten wurde durch einen Prüfbericht des Instituts für Straßenwesen des RWTH Aachen (ISAC) belegt [10]. Die Druckfestigkeit wurde nach DIN 1926 an zylindrischen Probekörpern ermittelt. Die Materialkennwerte der Gabionen sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Ziel der drei Versuche mit gleicher Befüllung war es, grundlegende Erfahrungswerte für die im Gitter der Gabione wirkenden Kräfte zu erhalten. Aufbau und Belastung der drei Versuchsaufbauten erfolgte aufbauend auf den Erfahrungen mit den sandgefüllten Gabionen des vorherigen Projektes. Es erfolgte bei allen Versuchen eine zentrische Belastung an einer 3-seitig eingehüllten Gabione. Das Gesteinsmaterial wurde in den Drahtgitterkorb geschüttet und händisch nachsortiert. Die Kabel der in den Distanzhaltern eingeschweißten Kraftsensoren wurden durch eine Ummantelung mit Isoliermaterial vor Kabelbruch durch die Gesteinsfüllung geschützt (s. Bild 4-1 und Bild 4-2). Auf den geschlossenen Korbdeckel wurde eine Ausgleichschicht aus Brechkorn 16/32 mm aufgeschüttet und ein Lastpolster bestehend aus einer 5 cm Sandschicht aufgebracht und anschließend die Lastplatte und der Belastungszyylinder platziert. Die einzelnen Laststufen wurden per Handhydraulik aufgebracht. Nach dem Aufbringen einer Vorlast von 10 kN wurde die Kraft jeweils um 25 kN erhöht. Die individuellen Laststufen wurden jeweils 10 Minuten beibehalten. Eine Übersicht

über die Lokationen der einzelnen Sensoren wird in Lage der Sensoren in Kapitel 3.6 gegeben.

Die drei Belastungsdiagramme mit Lindlarer Grauwacke werden in direktem Vergleich dargestellt (s. Tabelle 4-1). Die detaillierten Diagramme der Messwerte sind im Anhang abgebildet.



Bild 4-1: Isolierte Kabel im Bodengitter



Bild 4-2: Schutz der Kabel der Kraftsensoren in den Distanzhaltern

Lindlarer Grauwacke			
	Versuch3	Versuch 4	Versuch 5
Korngröße	80/150 mm	80/150 mm	80/150 mm
Rohdichte	2.576 kg/m ³	2.576 kg/m ³	2.576 kg/m ³
Druckfestigkeit σ_c	104,5 MPa	104,5 MPa	104,5 MPa
Wichte	1.461,7 N/m ³	1.459,7 N/m ³	1.473,6 N/m ³
Füllgrad	56 %	57 %	57 %

Tab. 4-1: Kennwerte der mit Lindlarer Grauwacke befüllten Gabionen in den Versuchen 3 bis 5

Versuch 3

Der vollständige Versuchsaufbau ist in Bild 4-3 zu sehen.

Der erste Belastungsversuch mit Steinfüllung wurde nach einer Vorbelastung von 10 kN bis zu einer Auflast von 310 kN in Schritten von 25 kN durchgeführt. Ab 160 kN zeigten sich deutliche Ausbauchungen in der Mitte des Frontgitters. Bei 235 kN wurde sichtbar, dass sich der vordere Distanzhalter K3.7 aufbiegt. Umlagerungen des Füllmaterials und auch Knackgeräusche der Gesteinsfüllung wurden bei zunehmender Belastung beobachtet.

Versuch 4

Versuch 4 wurde analog zu Versuch 3 begonnen. Bereits bei 60 kN wurden deutliche Ausbauchungen



Bild 4-3: Versuch 3, Grauwacke, vollständiger Versuchsaufbau

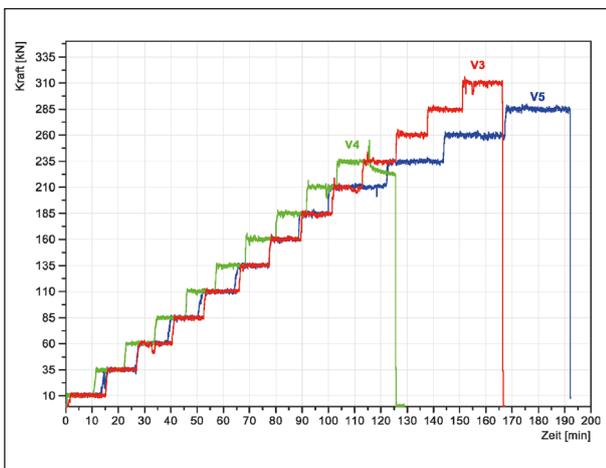


Bild 4-4: Belastungsdiagramme der Versuche mit Grauwacke. Versuch 4 wurde nach Bruch einer Schweißnaht von K4.13 frühzeitig beendet.

im Frontgitter sichtbar. Bei steigender Belastung nahmen auch die Knackgeräusche des Gesteins weiter zu. Es zeigten sich charakteristische Frontverformungen in der Mitte des Frontgitters. Bei 255 kN erfolgte ein lauter Knall, der auf den Bruch des Distanzhaltes K4.13 hindeutet. Der vordere Haken wurde aus dem Gitter hinausgeschoben. Beim Abbau der Gabione wurde sichtbar, dass der Distanzhalter an der hinteren Schweißnaht des Kraftsensors abgebrochen war. Der Belastungsversuch wurde nach dem Bruch des Distanzhalters beendet.

Versuch 5

Der letzte Belastungsversuch mit Grauwacke wurde bis 285 kN durchgeführt. Aufgrund der anhaltenden Deformation des Frontgitters bei Laststufe 210 kN wurde die Haltedauer von 10 auf 20 Minuten erhöht. Bei den Kraftsensoren K5.4 und K5.5 wurde ein Ausfall verzeichnet. Hinsichtlich der eingeschweißten Sensoren muss erwähnt werden, dass Kraftsensor K 5.1 im Bodengitter und K5.4 und K5.5 in den kurzen Distanzhaltern in Höhe 0,3 m von Versuchsbeginn an keine Daten geliefert haben. Eine Frontverformung von 20 mm wurde bei Seilzugwegsensor 5.8 bei 210 kN überschritten.

4.2 Auswertung der Grauwacke-Versuche

4.2.1 Horizontale Deformation

Die neun an der Frontseite in den Gitterknoten der Gabione eingehängten Seilzugensoren zur Ermittlung der Frontgitterdeformation funktionierten problemlos. Die Seilzugensoren bieten eine einfache Möglichkeit, die punktuelle Deformation des Frontgitters während des gesamten Versuchs zu überwachen. Bei allen drei Versuchen traten die größten horizontalen Verformungen in der Mitte (Stich) des Frontgitters (Position 50;50) auf (s. Bild 4-5). Die Ausbauchungen im unteren und oberen Bereich des Frontgitters sind deutlich geringer und weisen ähnliche Werte auf. Eine Verformung von 20 mm wurde bei allen drei Versuchen mit der Grauwackefüllung überschritten. Die Deformation des Frontgitters nimmt mit zunehmender Auflast immer schneller zu. Bei höheren Lasten kommt die Verformung nach Erreichen der Laststufe nicht mehr zum Erliegen, sondern hält weiter an (s. Bild 4-6).

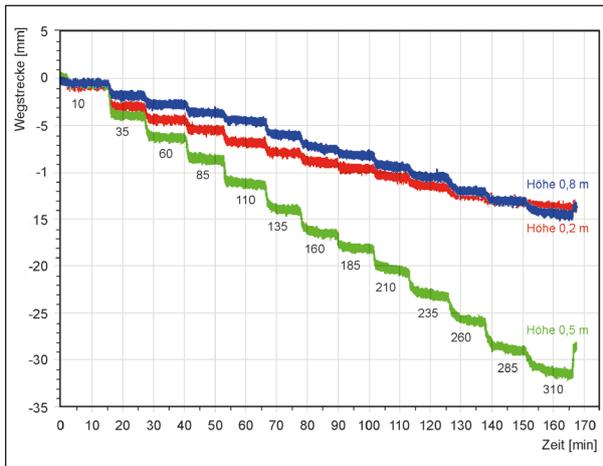


Bild 4-5: Gemessene Deformation des Frontgitters in den Ebenen 0,2 m, 0,5 m und 0,8 m bei Versuch 3. Die Verformungen in der Mitte des Gitters sind deutlich höher als in den anderen Ebenen.

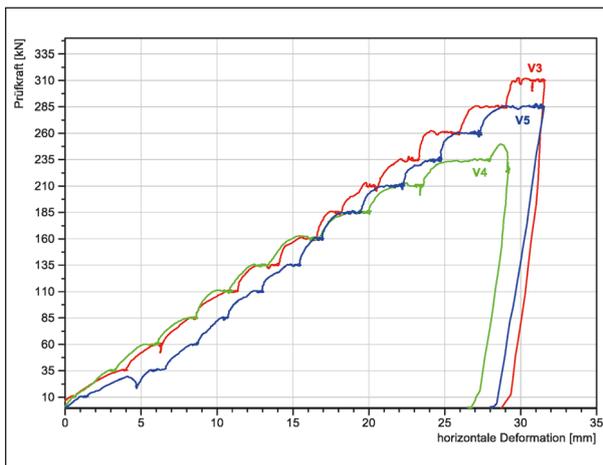


Bild 4-6: Kraft-Verformungsdiagramm der drei Belastungsversuche mit Grauwacke. Bei Versuch 4: Bruch von DH 4.13 an einer Schweißnaht des Kraftsensors. Abgebildet ist die horizontale Deformation im Stich in Höhe von 50 cm.

Bei Versuch 4 fällt eine nicht abklingende Deformation des Frontgitters auf, bevor es zum Bruch des Distanzhalters kam, der vermutlich auf Materialumlagerungen zurückzuführen ist.

Der stabilisierende Einfluss der Distanzhalter auf das Frontgitter wird in Bild 4-7 von Versuch 3 deutlich.



Bild 4-7: Ausbauchung des Frontgitters zwischen den Ebenen der Distanzhalter (0,3 m und 0,7 m) während Versuch 3.

4.2.2 Absenkung der Lastplatte

Die Absenkung der Lastplatte wurde mittels vier induktiver Wegaufnehmer in den vier Ecken gemessen.

Das Stauchungsverhalten der drei mit Grauwacke gefüllten Gabionen ist sehr ähnlich. Die Lastplatte erreichte bei Versuch 3 eine maximale Absenkung von 63 mm bei einer Belastung von 310 kN. Es bildete sich nur eine minimale Neigung zur Rückseite der Gabione im Laufe des Versuchs aus. Bei den hohen Belastungsstufen hält die Stauchung des Korbes während einer Laststufe an. Eine Stauchung von 50 mm wird bei den mit Grauwacke gefüllten Körben bei 260 kN überschritten.

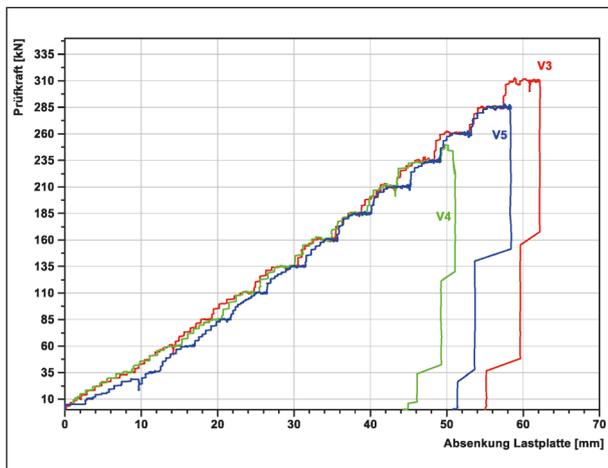


Bild 4-8: Mittlere Absenkung der Lastplatte in den Versuchen 3 bis 5

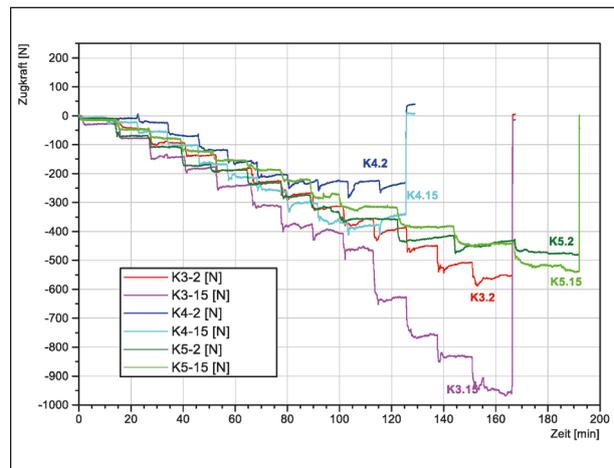


Bild 4-9: Gemessene Zugkräfte in Boden- und Deckelgittern in den Versuchen V3 bis V5

Messpunkt	Absenkung bei 310 kN in [cm]	Stauchung (Nivellement) in [cm]
W3.1	6,3	5,5
W3.2	6,3	5,6
W3.3	6,1	5,6
W3.5	6,1	5,6

Tab. 4-2: Vergleich der Absenkung der Lastplatte bei Versuch 3 bei 310 kN und der gemessenen Stauchung nach Versuchsende

Um das elastische Verhalten des Korbes zu dokumentieren, wurden die Messpunkte auf der Lastplatte (vgl. Bild 3-4) vor und nach dem Versuch nivelliert. Bei der Entlastung nach Versuchsende zeigt sich das elastische Verhalten des Gabionkorbes durch die Anhebung der Lastplatte (s. Tabelle 4-2). Dieses Verhalten war bei allen Versuchen in unterschiedlichem Ausmaß zu erkennen.

4.2.3 Kraftsensoren im Boden- und Deckelgitter

Im Boden- und Deckelgitter wurden jeweils 3 Kraftsensoren eingeschweißt, um die in den Gittern infolge der Belastung auftretenden Zugkräfte zu messen. Die Lage der Sensoren ist Bild 3-3 und Bild 3-4 zu entnehmen.

In Bild 4-9 werden aus Gründen der Übersicht die jeweils mittleren Kraftsensoren (50,50) in den Boden- und Deckelgittern verglichen.

In beiden Gittern nehmen die Zugkräfte mit steigender Belastung zu. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass die Deckelgitter mit zunehmender

Belastung entweder ähnlichen oder sogar deutlich höheren Zugkräften ausgesetzt sind als die Bodengitter.

Insbesondere die Deckelgitter wurde im Laufe der Belastungsversuche erheblich deformiert. Ein Bruch von Gittermaschen oder Schweißpunkten wurde bei keinem der Versuche beobachtet.

4.2.4 Kraftsensoren in den Distanzhaltern

Zur Ermittlung der Zugkräfte wurden Kraftsensoren mittig in alle 10 Distanzhalter eingeschweißt. In den hier verwendeten Gabionen verbinden 1 m lange Distanzhalter in den Korbhöhen 0,3 m und 0,7 m das Front- und Rückgitter miteinander.

Die langen Distanzhalter sind in Gittermitte in Höhe 0,3 m (K 3.6, K4.6, K5.6) und in Höhe 0,7 m (K3.11, K4.11, K5.11) eingehängt.

Die Kraftsensoren in den Distanzhaltern verzeichnen mit zunehmender Belastung steigende Zugkräfte. In den langen Distanzhaltern wurden bei allen Versuchen mit Grauwacke in der unteren Ebene (0,3 m) niedrigere Zugkräfte als in der oberen Ebene (0,7 m) gemessen (s. Bild 4-10). Die Haken der Distanzhalter in der oberen Ebene öffneten sich eher als die in der unteren Ebene.

Bei Versuch 4 brach DH 4.13 (Höhe 0,7 m, rechts vorne) bei 255 kN an der hinteren Schweißstelle (s. Bild 4-11). Vermutlich führten Materialumlagerungen dazu, dass sich unterhalb des Distanzhalters ein Hohlraum bildete, welcher letztendlich den Bruch an der eingefügten Schwachstelle (Schweißnaht) herbeiführte.

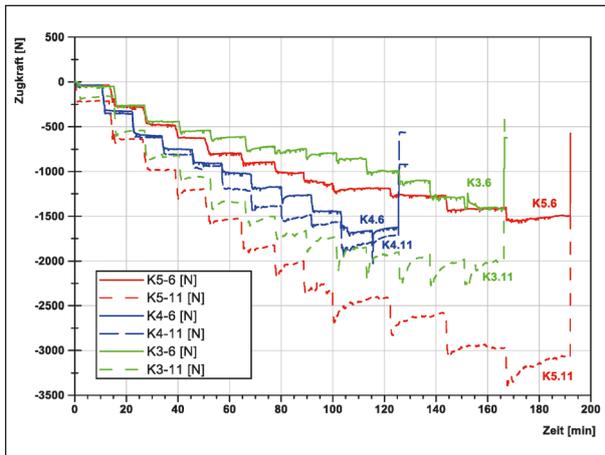


Bild 4-10: Vergleichende Darstellung aller langen Distanzhalter der Versuche 3 bis 5. Distanzhalter der unteren Ebene: K3.6, K4.6 und K5.6, Distanzhalter der oberen Ebene K3.11, K4.11 und K5.11.

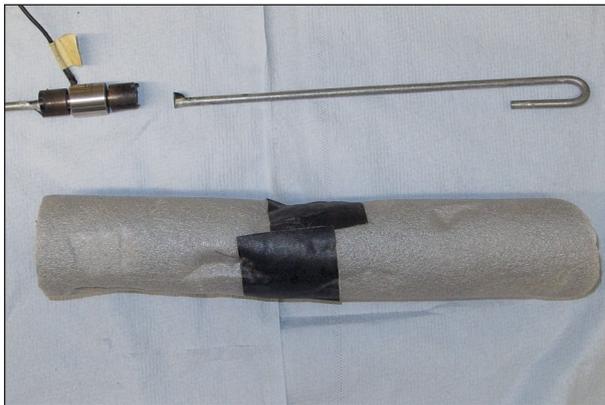


Bild 4-11: DH 4.13 brach bei 255 kN an einer Schweißstelle.

Der Belastungsversuch wurde daraufhin abgebrochen. Beim Abbau der Gabione zeigte sich, dass bis zu diesem Zeitpunkt die Haken der langen Distanzhalter (K4.11 & K4.6 (komplett)) geschlossen geblieben waren.

Anhand des Kurvenverlaufs der gemessenen Zugkräfte ist erkennbar, wann sich die Haken eines Distanzhalters zu öffnen beginnen. Der Kraftsensor misst dann einen zackigen Verlauf der Zugkräfte nach Erhöhung der Belastungsstufe. Bleiben die Haken geschlossen, stiegen die Zugkräfte lediglich mit zunehmender Belastung an. Dieses Verhalten ist sehr gut in Bild 4-10 anhand der Sensordaten von K5.6 und K 5.11 zu erkennen. K5.11 beginnt sich ab einer Auflast von 185 kN (ab 100 Minuten) zu öffnen.

Vier kurze Distanzhalter verbinden pro Ebene jeweils Front-/Rückgitter mit den Seitenelementen.



Bild 4-12: Aufgebogener Distanzhalterhaken 4.7 an der Frontseite der Gabione nach Versuchsende

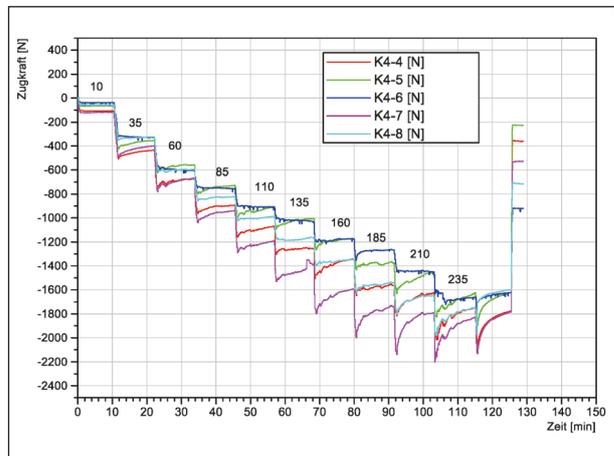


Bild 4-13: Messwerte aller Distanzhalter der unteren Ebene (0,3 m) von Versuch 4

In Bild 4-13 ist zu sehen, dass auch die kurzen Distanzhalter erhebliche Zugkräfte aufnehmen, die z. T. deutlich über den Kräften in den langen Distanzhaltern (hier K4.6) liegen.

In Bild 4-12 ist allerdings zu sehen, dass sich der kurze DH 4.7 an der Frontseite gegen Versuchsende aufgebogen hat und nur noch eine Restfestigkeit aufweist. Beim Abbau der Gabione wurde dies bestätigt.

5 Belastungsversuche mit Granitfüllung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden drei weitere Versuche mit einer Granitfüllung durchgeführt. Die höhere Gesteinsfestigkeit und eine größere Korngröße sollten hierbei einen Kontrast zur Grauwacke darstellen. Für Versuch 6 wurde ein Granit aus Bayern verwendet und für die Versuche 7 und 8 ein Granit aus dem Odenwald. Die Rohdichte und die einaxiale Druckfestigkeit des Materials wurde durch das Gesteinslabor der BAST nach DIN 1926 bestimmt [11].

5.1 Versuch 6, Granit (Bayern)

Bei Versuch 6 (V6) wurde ein grober Granit zur Füllung der Gabione verwendet (s. Bild 5-1). Aufgrund der groben Korngröße war es nicht möglich, die Distanzhalter hohlraumarm zu unterfüttern. Auch diese Gabione weist einen recht hohen Hohlraumgehalt auf (s. Tabelle 5-1). Die Belastung der Gabio-



Bild 5-1: Befüllung der Gabione mit Granit 80/250 und Einbau der 2. Distanzhalterebene

Granit (Bayern)	
Korngröße	80/250 mm
Rohdichte	2.663 kg/m ³
Druckfestigkeit σ_c	165 MPa
Wichte	1.520 N/m ³
Füllgrad	57 %

Tab. 5-1: Versuch 6 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit

ne wurde analog zu den Versuchen mit Grauwacke durchgeführt.

Bei 160 kN brach Distanzhalter K6.9 (Höhe 0,7 m, links hinten s. Bild 3-6) an der hinteren Schweißnaht. Der Versuch wurde trotz des Bruchs nicht beendet, da dies als einziger Versuch mit grobem Material vorgesehen war und das Verformungsverhalten mit Grobschlag beobachtet werden sollte.

Direkt im Anschluss an den Bruch des Distanzhalters wurde auch eine leichte Zunahme in der Horizontalverformung sichtbar.

Das Kabel von K6.4 wurde bei 117 Minuten Versuchslaufzeit durch Materialumlagerungen eingeklemmt und lieferte keine Daten mehr.

Die Ausbauchungen des Frontgitters waren bei Versuch 6 mit einem Wert von 13 mm bei Laststufe 285 kN am niedrigsten von allen Versuchen. Aufgrund der groben Körnung des Granits waren größere Materialumlagerungen nicht möglich. Beim Abbau der Gabione wurde sichtbar, dass sich keiner der Distanzhalterhaken aufgebogen hatte. Zwei Distanzhalter waren allerdings durch den Druck des Gesteins verbogen. Der Bruch von DH 6.9 ist vermutlich auf einen Hohlraum unter dem Distanzhalter zurückzuführen. Ein Distanzhalter ohne eingebaute Schwachstelle (hier Schweißnaht) wäre vermutlich nicht gebrochen.

5.2 Versuch 7, Verdichteter Granit (Odenwald)

Bei Versuch 7 (V7) sollte ermittelt werden, welche Belastung eine gut befüllte Gabione aushalten kann. Da die Handhydraulikpumpe auf eine Druckkraft von 498 kN beschränkt ist, wurde die Belastung mit dem Belastungsrahmen durchgeführt.

Zudem sollte die Gabione so dicht wie möglich gepackt sein. Dies wurde durch den Einsatz einer Rüttelplatte beim Einbau der Füllung erreicht (s. Bild 5-2).

Damit beim Einbau durch die Vibration der Rüttelplatte und durch die anschließende höhere Belastung mit dem Belastungsrahmen die Kraftsensoren nicht beschädigt werden konnten, wurde auf den Einbau der inneren Sensorik für Versuch 7 verzichtet.



Bild 5-2: Versuch 7 – Verdichtung des Füllmaterials mittels Rüttelplatte

Granit (Odenwald)	
Korngröße	60/170 mm
Rohdichte	2.640 N/m ³
Druckfestigkeit σ_c	242,6 MPa
Wichte	1.574 kg/m ³
Füllgrad	60 %

Tab. 5-2: Versuch 7 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit

Wie bei allen anderen Versuchen wurde jedoch die Absenkung der Lastplatte mit induktiven Wegaufnehmern und die punktuelle Verformung des Frontgitters mithilfe von Seilzugwegsensoren erfasst (s. Bild 5-3).

Die Belastung in Versuch 7 begann mit einer Vorlast von 100 kN, da der Belastungsrahmen in einem Bereich unter 100 kN nicht ausreichend differenzierbar einstellbar ist. Dann wurde das Belastungsregime, wie in Kapitel 3.3 erläutert, durchgeführt. Die höchste Laststufe lag hierbei bei 435 kN.



Bild 5-3: Versuch 7 – Befüllte Gabione ohne eingeschweißte Kraftsensoren

Granit (Odenwald)	
Korngröße	60/170 mm
Rohdichte	2.640 N/m ³
Druckfestigkeit σ_c	242,6 MPa
Wichte	1.555 kg/m ³
Füllgrad	59 %

Tab. 5-3: Versuch 8 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit

Ab einer Auflast von 210 kN wurde deutlich, dass der Belastungsrahmen nicht in der Lage war, die Auflastspannung konstant aufrecht zu erhalten. Dies zeigte sich durch starkes Nachregeln (d. h. bei einer Unterschreitung hydraulischer Drücke im Klemmsystem des Belastungsrahmens kann es dazu kommen, dass das System diese selbsttätig anpasst, um die Klemmkraft aufrechtzuerhalten.) Eine Überschreitung von 20 mm Horizontalverformung wurde bei 335 kN erreicht. Die anhaltende Verformung des Frontgitters kam nicht mehr zum Erliegen. Eine maximale Deformation von 35 mm im Stich wurde bei 435 kN erreicht.

5.3 Versuch 8, Granit (Odenwald)

Für Versuch 8 (V8) wurde das gleiche Material wie für Versuch 7 verwendet. Es wurde jedoch auf eine Verdichtung des Materials verzichtet, um die Auswirkungen der Verdichtungsmaßnahme zu dokumentieren. Die Wichte der Gabione ist leicht niedriger als von Versuch 7 (s. Tabelle 5-3). Bei Versuch 8 wurden wieder Kraftsensoren in den Distanzhaltern eingeschweißst. Der Belastungsversuch verlief störungsfrei. Ab einer Auflast von 235 kN wurden

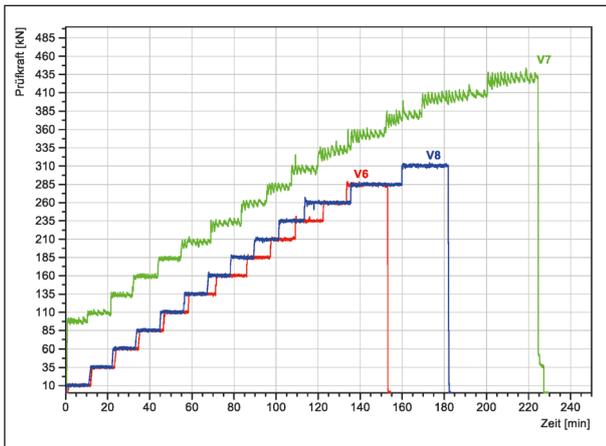


Bild 5-4: Kraft-Zeit Diagramme der Versuche 6 bis 8. Aufgrund des Einsatzes des Belastungsrahmens ist die erste Laststufe bei Versuch 7 100 kN.

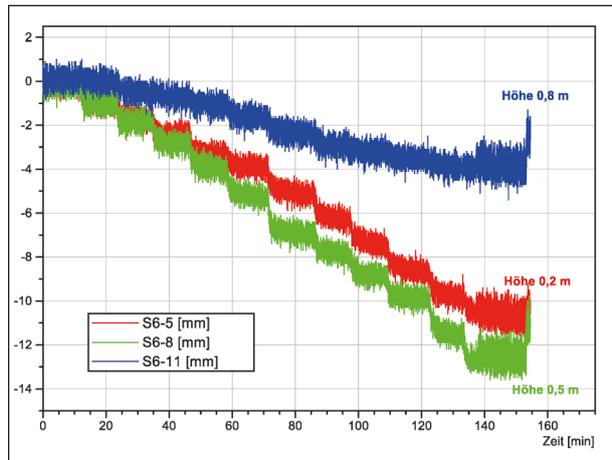


Bild 5-6: Bei Versuch 6 werden in der Mitte (0,5 m) und im unteren Bereich der Gabione (0,2 m) ähnliche Verformungen gemessen.

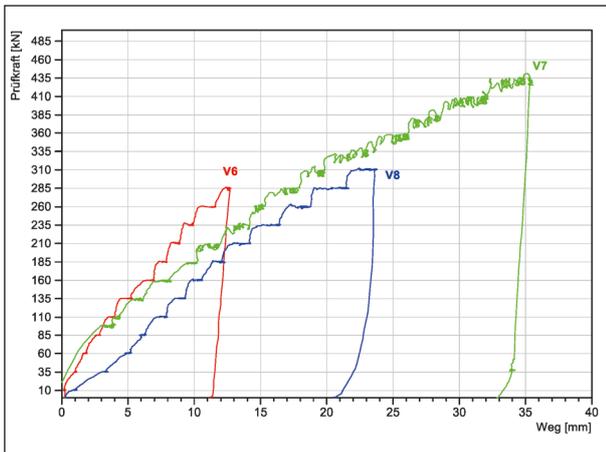


Bild 5-5: Vergleich der Verformung des Frontgitters im Stich der Gabione bei Versuchen 6 bis 8

erhebliche Deformationen am Frontgitter sichtbar. Aufgrund der anhaltenden Verformung des Frontgitters wurde die Dauer der Laststufe 260 kN von 10 Minuten auf 25 Minuten verlängert (s. Bild 5-4). Bei 310 kN Belastung reichte auch diese Zeit nicht mehr aus, um die Deformation zum Erliegen zu bringen. Der Versuch wurde daher beendet.

5.4 Auswertung der Granit-Versuche

5.4.1 Granit – Horizontale Deformation

Bei Versuch 6 wurde die niedrigste Deformation des Frontgitters verzeichnet (s. Bild 5-5), da es aufgrund der Korngröße des Granits nicht zu Umlagerungen des Füllmaterials kommen konnte. Versuch 6 erreicht bei 285 kN nur eine maximale Deformation von 12 mm. Die Verformung des Frontgitters unterscheidet sich aufgrund der niedrigen Werte von al-

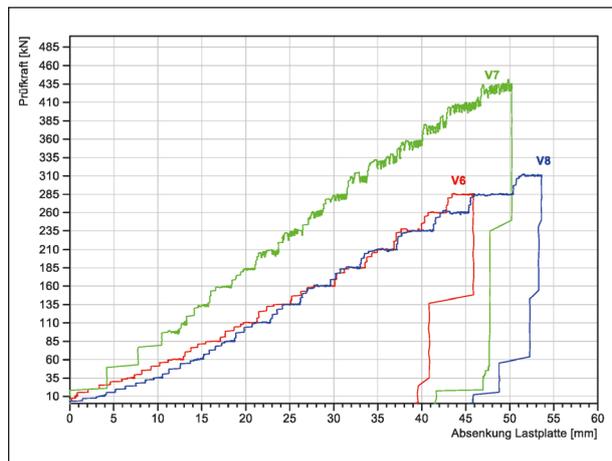


Bild 5-7: Absenkung der Lastplatte im Laufe der Versuche 6 bis 8

len anderen Versuchen. Versuch 6 ist der einzige, bei dem in der Mitte des Gitters und in den unteren Messebenen (0,2 m) ähnliche Verformungswerte aufgezeichnet wurden (s. Bild 5-6).

Interessant ist der direkte Vergleich von V7 und V8. Bei Laststufe 110 kN ist die Verformung des Frontgitters von V8 doppelt so hoch wie bei V7.

Ab 210 kN ist erkennbar, dass die Verformung des Frontgitters über die gesamte Belastungsdauer anhält und das Frontgitter zu kriechen beginnt.

5.4.2 Absenkung der Lastplatte

Bei allen Belastungsversuchen mit Granitfüllung wurde die Absenkung der Lastplatte mit induktiven Wegsensoren gemessen. Im Vergleich der Granitversuche fällt hier Versuch 7 auf, der bei 285 kN die niedrigste Absenkung der Lastplatte aufweist. V7

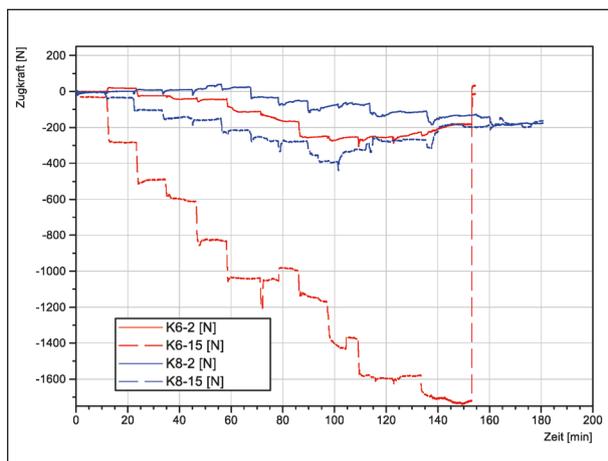


Bild 5-8: Zugkräfte in Deckel- und Bodengitter von Versuch 6 und Versuch 8

zeigt auch die niedrigste Absenkung pro Auflast. Versuch 8 verzeichnet bei 285 kN die größte Stauchung der Gabione mit über 50 mm.

5.4.3 Kraftsensoren im Boden- und Deckelgitter

Im Boden- und Deckelgitter wurden bei den Versuchen 6 und 8 jeweils 3 Kraftsensoren eingeschweißt, um die in den Gittern infolge der Belastung auftretenden Zugkräfte zu messen. Die Lage der Sensoren ist Bild 3-3 und Bild 3-4 zu entnehmen.

In Bild 5-8 werden aus Gründen der Übersicht die jeweils mittleren Kraftsensoren (50,50) in den Boden- und Deckelgittern verglichen.

In beiden Gittern nehmen die Zugkräfte mit steigender Belastung zu. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass die Deckelgitter mit zunehmender Belastung entweder ähnlichen oder sogar deutlich höheren Zugkräften ausgesetzt sind als die Bodengitter.

Insbesondere das Deckelgitter von Versuch 6 wurde im Laufe des Belastungsversuchs erheblich deformiert. Ein Bruch von Gittermaschen oder Schweißpunkten wurde bei keinem der Versuche beobachtet.

Die Deformation des Deckelgitters bei Versuch 6 geht einher mit der hohen Absenkung der Lastplatte.

Die hohen Zugkräfte sind das Resultat davon, dass das Deckelgitter auf die Granitblöcke gedrückt wur-



Bild 5-9: Deformiertes Deckelgitter nach Belastungsversuch 6

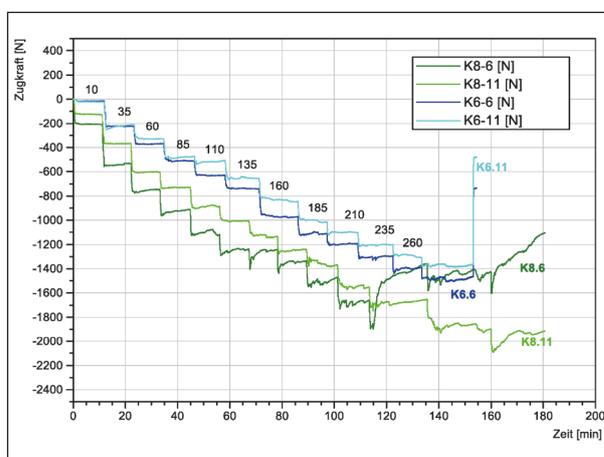


Bild 5-10: Zugkräfte in den langen Distanzhaltern der Versuche 6 und 8

de und es zu großen Verformungen der Deckelgittermatte kam (s. Bild 5-9).

Aus diesem Grund sind die gemessenen Zugfestigkeiten im Deckelgitter von Versuch 6 um ein Vielfaches höher als bei Versuch 8. Bei Versuch 8 werden auch höhere Zugkräfte im Deckelgitter als im Bodengitter verzeichnet.

5.4.4 Kraftsensoren in den Distanzhaltern

Nur in den Versuchen 6 und 8 waren die Distanzhalter mit Kraftsensoren ausgestattet worden. Versuch 6 ist besonders interessant, da hier Rückschlüsse auf den Zusammenhang von Frontgitterdeformation und den Zustand der Distanzhalterhaken erkennbar sind.

Versuch 6 stellt zudem eine Abweichung dar, da in allen anderen Versuchen die Zugkräfte in der oberen Distanzhalterebene (0,7 m) höher waren. In Bild 5-10 fällt auf, dass die Zugfestigkeit von K8.6 bei



Bild 5-11: Distanzhalterhaken von K8.6 an der Frontseite ist komplett aufgebogen.



Bild 5-12: Distanzhalterhaken an der Rückseite von K8.6 ist geschlossen.

235 kN plötzlich deutlich abnimmt. Dies ist mit dem Versagen des Distanzhalters zu erklären. Der vordere Haken von Distanzhalter 8.6 biegt sich bei Laststufe 235 kN komplett auf und liegt nur noch auf dem Gitter auf (s. Bild 5-11), während der hintere Haken komplett geschlossen blieb (s. Bild 5-12).

6 Schlussfolgerungen

6.1 Vergleich der durchgeführten Versuche

Im Vergleich zu den im vorherigen Projekt F1100.2315000 „Vorbereitung von Großversuchen and Stützkonstruktionen aus Gabionen“ durchgeführten Belastungsversuchen an sandgefüllten Gabionen trägt der Reibungswinkel der Steinfüllung zu einem anderen Deformationsmuster der Gabionen bei. Während die mit Vlies ausgekleideten, sandgefüllten Gabionen mit charakteristischen Ausbauchungen in den unteren 20 cm der Gabione auf die

Belastung reagierten, treten bei steingefüllten Gabionen die größten Verformungen in der Mitte des Frontgitters auf. Ähnlichkeiten zu den sandgefüllten Gabionen sind im duktilen Verformungsverhalten zu erkennen.

Durch die sechs durchgeführten Belastungsversuche an einzelnen Gabionen lassen sich grundlegende Erkenntnisse zum Deformations- und Versagensverhalten von steingefüllten Gabionen ableiten. Die von Hand befüllten Gabionen besitzen niedrige Wichten zwischen 14,7 und 15,7 [kN/m³] und weisen somit einen hohen Hohlraumgehalt zwischen 40 – 44 % auf.

Die Gabione reagiert auf Belastung mit starker Deformation und unterscheidet sich somit von einem spröden Prüfkörper. Das Deformationsverhalten ist auf die Interaktion zwischen Drahtgittermatten, Füllmaterial und Aussteifungsmittel zurückzuführen.

Ein klassischer Bruchpunkt wie bei einem Betonprüfkörper wurde nicht beobachtet. Aufgrund dessen muss eine Bruchfestigkeit anhand der Verformung der Gabione festgelegt werden.

Folgende Arten des Versagens wurden beobachtet:

- anhaltende Deformation des Frontgitters
- anhaltende Stauchung des Korbes
- Aufbiegen von Distanzhaltern
- Bruch von Distanzhaltern (Bruch trat an eingefügter Schweißnaht eines Kraftsensors auf)
- teilweiser Bruch des Füllmaterials

Es traten nicht auf:

- Bruch der Drahtgittermatten
- Bruch an Schweißpunkten
- Bruch der Steckstäbe
- Aufbiegen der Steckstäbe

In Tabelle 6-1 sind die ermittelten Bruchfestigkeiten und die Art des Versagens für alle 6 Versuche zusammengefasst.

Die drei gleichartigen Belastungsversuche mit Lindlarer Grauwacke (Versuch 3 bis Versuch 5) zeichnen sich durch große Materialumlagerungen in der Steinfüllung und starke Verformungen der Gabione aus und besitzen ähnliche Bruchfestigkeiten (Tabel-

le 6-1). Deckel- und Bodengitter nehmen große Zugspannungen auf, wobei im Deckelgitter höhere Zugspannungen gemessen werden als im Bodengitter. Die Aussteifungselemente (Distanzhalter) wirken sich stabilisierend auf das Frontgitter aus. Aufgrund der großen Zugspannungen, die bei steigender Belastung aus der anhaltenden Deformation und Stauchung der Gabione resultieren, kommt es schlussendlich zum Aufbiegen der Distanzhalterhaken in der Distanzhalterebene bei 0,7 m Höhe.

Bei Versuch 6 (Granit 80/250) traten die niedrigsten Verformungswerte aller Belastungsversuche auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es aufgrund der Korngröße und des Reibungswinkels nicht zu Materialumlagerungen in der Steinfüllung kommen konnte. Aufgrund der gemessenen niedrigen horizontalen und vertikalen Verformungen müsste Versuch 6 von allen die höchste Bruchfestigkeit aufweisen, da der Bruch des Distanzhalters auf die Schweißstellen des Kraftsensors K6.9 zurückzuführen ist und somit nicht die echte Bruchfestigkeit der Gabione widerspiegelt. Die hohe Korngröße der Granitfüllung führte allerdings dazu, dass das Deckelgitter stark deformiert wurde.

Die Distanzhalter der oberen Ebene sind in der Regel höheren Zugkräften ausgesetzt, daher biegen sich deren Distanzhalterhaken eher auf. Dies trifft insbesondere zu, wenn durch Materialumlagerungen ein Hohlraum unter einem Distanzhalter entstanden ist.

Die Kopplung von Frontgitterdeformation und Distanzhalterversagen ist in Versuch 7, bei dem eine Gabione bis 435 kPa belastet wurde, zu beobachten. Bei der maximalen Belastungsstufe wurde eine

Frontgitterverformung von 35 mm erreicht. Beim Abbau der Gabione wurde zudem erkennbar, dass sich die meisten Distanzhalterhaken aufgebogen hatten.

Bei den hier untersuchten handverfüllten Gabionen mit hohem Hohlraumgehalt ist der unterschiedliche Einfluss von Korngröße und Reibungswinkel in der horizontalen Deformation des Frontgitters erkennbar (Bild 6-1).

Eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse im Spannungs- und Dehnungsdiagramm verdeutlicht das Verformungsverhalten der Gabionen sehr anschaulich (s. Bild 6-1).

In Bild 6-1 ist erkennbar, dass die mit grobem, rauem Granit verfüllte Gabione von Versuch 6 das steifste Verformungsverhalten aller getesteten Gabionen aufweist und im starken Gegensatz zu den Gabionen mit Grauwacke-Füllung steht.

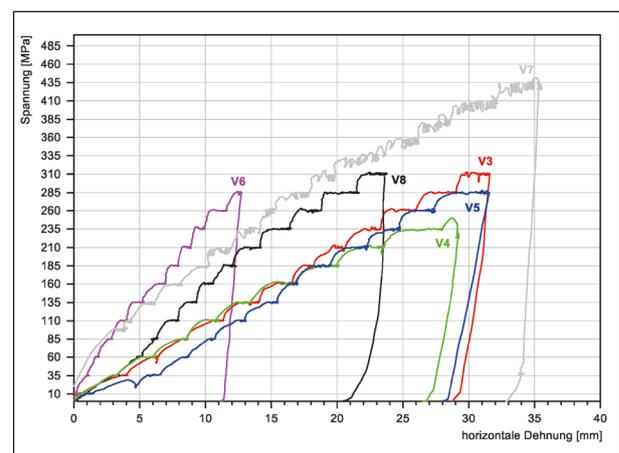


Bild 6-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich aller sechs Versuche, horizontale Deformation in der Mitte (50:50) des Frontgitters

Versuchsnummer	Bruchfestigkeit aus Versuch	Art des Versagens
V3 – Grauwacke	210 kPa	Anhaltende Deformation (Versagen von DH 3.7 bei 235 kPa)
V4 – Grauwacke	185 kPa	Anhaltende Frontgitterdeformation (Bruch an Schweißstelle von Distanzhalter 4.13 bei 254 kPa)
V5 – Grauwacke	185 kPa	Anhaltende horizontale Deformation und Stauchung
V6 – Granit (By)	160 kPa*	Bruch an hinterer Schweißstelle von Distanzhalter 6.9 (stellt nicht die reale Bruchfestigkeit dar) Versuchsende bei 285 kPa, max. Frontverformung 12 mm
V7 – Granit (Od), leicht verdichtet	285 kPa	Anhaltende Deformation des Frontgitters, Materialumlagerungen, Aufbiegen DH
V8 – Granit (Od)	235 kPa	Aufbiegen DH 8.6

Tab. 6-1: Bruchfestigkeiten der 6 untersuchten Gabionen

Die Nutzung eines Füllmaterial mit so großer Korngröße wie in Versuch 6 ist trotzdem nicht empfehlenswert, da es nicht verdichtet werden kann und große Hohlräume bleiben, die zum Bruch von Distanzhaltern führen können.

Bereits bis zu einer Belastung von 285 kN ist eindeutig erkennbar, wie sich die Gabione unter Belastung verhält.

Als entscheidend für die innere Standsicherheit sind schlussendlich eine hohlraumarme Verfüllung, Material mit hohem Reibungswinkel sowie eine angemessene Anzahl von Distanzhaltern.

Aufgrund der Interaktion zwischen Füllmaterial, Drahtgittermatten und Aussteifungselementen ist die Durchführung von Belastungsversuchen zur Ermittlung einer Gabionenfestigkeit an einer Probegabione sinnvoll, da die Bauausführung elementar für die innere Standsicherheit ist.

Aufgrund der durchgeführten Versuche lassen sich folgende Schlussfolgerungen zu den Nachweisverfahren in den aktuell geltenden Regelwerken treffen:

Äquivalente Betondruckfestigkeit

Das Merkblatt der FGSV 555 MGab [2] erlaubt die Ermittlung einer äquivalenten Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [3] mittels Belastungsversuchen mit folgender Formel:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

mit Beiwert für die Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit $\alpha_{cc} = 0,85$

und Teilsicherheitsbeiwert für Beton $\gamma_c = 1,5$

Für die sechs durchgeführten Belastungsversuche ergeben sich die in Tabelle 6-2 dargestellten Werte.

Die ermittelten Bruchfestigkeiten der hier untersuchten Gabionen gehen z. T. mit hohen Deformationen des Frontgitters und hoher Stauchung einher (s. Tabelle 6-3). Besonders die Grauwacke-Füllung fällt hier negativ auf. Aufgrund dessen wäre hier hinsichtlich der horizontalen Deformation insbesondere auch die Gebrauchstauglichkeit zu beachten. Die hier ermittelten Festigkeiten sind als eher niedrig einzustufen.

Gebrauchstauglichkeit (SLS) und Tragfähigkeit (ULS) nach DIN EN 1992-1-1[12]

Aufgrund des duktilen Verhaltens der Gabionen im Belastungsversuch muss die Gebrauchstauglichkeit für Gabionen näher untersucht und definiert werden. Für die Gabionen gibt es nach [12] dazu bisher keine definierten Grenzwerte. Als Kriterium hierfür kann die in Belastungsversuchen ermittelte

Versuchsnummer	Gesteinsart	f_{ck} [kPa]	f_{cd} [kPa]
V 3	Grauwacke (80/150)	210	119
V 4	Grauwacke (80/150)	185	105
V 5	Grauwacke (80/150)	185	105
V 6	Granit (80/250)	160*	91*
V 7	Granit (60/170)	285	162
V 8	Granit (60/170)	235	133

Tab. 6-2: Berechnung der äquivalenten Betondruckfestigkeit f_{cd} nach [3]

Versuchsnummer	Bruchfestigkeit [kPa]	Horizontale Dehnung [mm]	Horizontale Dehnung [%]	Vertikale Stauchung [mm]	Vertikale Stauchung [%]
V 3	210	21	0,021	45	0,045
V 4	185	20	0,020	39	0,039
V 5	185	19	0,019	40	0,040
V 6	160*	7	0,007	30	0,030
V 7	285	18	0,018	32	0,032
V 8	235	17	0,017	41	0,041

Tab. 6-3: Bruchfestigkeiten in Relation zur Dehnung und Stauchung am Bruchpunkt

Frontgitterverformung der Gabione herangezogen werden.

In den durchgeführten Belastungsversuchen wurde beobachtet, dass Frontgitterverformungen größer als 1 % sehr deutlich als Ausbauchungen mittig zwischen den Distanzhalterebenen zu erkennen sind und optisch sehr auffallen. Die Tragfähigkeit wird dadurch nicht beeinträchtigt.

In Tabelle 6-3 ist die ermittelte Bruchfestigkeit der Verformung und Stauchung der Gabione gegenübergestellt.

Bei einer größeren Stauchung ist zudem die Gefahr einer ungleichmäßigen Absenkung der Lastplatte größer, welche wiederum aus der Deformation des Deckelgitters resultiert. Dies würde dazu führen, dass die Tragfähigkeit einer Stützkonstruktion aus Gabionen beeinträchtigt würde.

Basierend auf den hier durchgeführten Versuchen erscheint es sinnvoll, die zulässige Deformation des Frontgitters auf 1,5 % zu beschränken.

6.2 Erkenntnisse zu Belastungsprüfungen

Bisher existiert kein festgelegtes Prüfverfahren für die Belastungsprüfung von einzelnen Gabionenkörben. Aus den Versuchen der BAST lassen sich jedoch Empfehlungen zu zentrischen Belastungen ableiten. Diese betreffen die folgenden Aspekte:

- Versuchsaufbau und Lagerung der Gabione
- Belastungsrate und Belastungsdauer
- Messung der Horizontalverformung
- Messung der Stauchung
- Überwachung der Distanzhalterhaken an der Frontseite
- Versuchsanzahl und Auswertung der Ergebnisse

Versuchsaufbau und Lagerung

Eine 3-seitige Einfassung bietet für ein Prüfverfahren den Vorteil, dass sich große Deformationen nur an einer Gittermatte ausbilden können und nur hier Messungen erfolgen müssen. Es simuliert zudem die Einbettung der einzelnen Gabione in eine Wand. Bei den Versuchen der BAST hat sich der Einsatz einer Stahlrahmenschalung bewährt, um die 3-seitige Einfassung der Gabione zu erreichen. Das Deckelgitter wurde mit Brechkorn überschüttet und ein dünnes (5 cm) sandgefülltes Lastpolster aus Geotextil auf der Gabione platziert, bevor die Lastplatte aufgebracht wurde.

Belastungsrate und Belastungsdauer

Die Versuchsdauer muss aufschlussreich zum Vergleich der Verformungseigenschaften der Gabione und praktisch für die Durchführbarkeit eines Prüfverfahrens sein.

Der Ablauf des vorgegebenen Prüfablaufs sollte kraftgesteuert erfolgen. Eine Prüfung bis maximal 300 kN sollte ausreichend sein, um das Verformungsverhalten einer Gabione beurteilen zu können. Faktoren für einen vorzeitigen Versuchsabbruch sind der Bruch von Aussteifungselementen (Distanzhaltern) oder Gittermatten.

Als Belastungsstufen können Schritte von 25 oder 50 kN gewählt werden mit einer Belastungsdauer von maximal 10 Minuten.

Messung der Horizontalverformung

Entscheidende Hinweise auf das Versagensverhalten einer Gabione liefern die Frontverformung und die Stauchung der Gabione, die miteinander zusammenhängen. Kann sich Füllmaterial umlagern, führt dies zu großen Verformungen an der nicht gebetteten Seite der Gabione.

Bei den Versuchen der BAST hat sich der Einsatz von Seilzugwegensensoren zur Messung der Horizontalverformung bewährt. Die Überwachung der Horizontalverformung sollte entweder punktuell über induktive Wegaufnehmer oder Seilzugwegenaufnehmer erfolgen. Alternativ ist auch eine flächige Überwachung der gesamten Front möglich, wenn die technische Ausrüstung des Prüflabors es zulässt. Bei den Belastungsversuchen der BAST hat sich gezeigt, dass sich die größten Horizontalverformungen bei Gabionen mit Steinfüllung immer in der Mitte (50;50) eines 1 x 1 x 1 [m] Korbes ausbilden.

Eine anhaltenden Horizontalverformung über eine Laststufe deutet auf ein Versagen des Korbes hin.

Stauchung der Gabione

Die Stauchung der Gabione sollte mithilfe von induktive Wegsensoren in den vier Ecken der Lastplatte überwacht werden. Dies ermöglicht das Erkennen einer Schiefstellung der Lastplatte sowie einer anhaltenden Stauchung der Gabione während einer Belastungsstufe.

Überwachung der Distanzhalterhaken an der Frontseite

Eine starke Ausbauchung des Frontgitters und die Stauchung der Gabione führen zum Aufbiegen der Distanzhalterhaken. Die Haken beginnen sich zunächst langsam aufzubiegen, erfüllen allerdings so lange ihren Zweck, die Gittermatten miteinander zu verbinden, bis sie plötzlich versagen.

Es wird daher für Belastungsprüfungen empfohlen, die Distanzhalterhaken an der Frontseite der Gabione während der Belastungsprüfung optisch zu überwachen.

Das hier im Projekt eingesetzte Einschweißen von Kraftsensoren oder das Aufbringen von DMS, wie im Vorgängerprojekt versucht (vgl. [8]), ist für eine Belastungsprüfung zu aufwendig. Das Einschweißen von Distanzhaltern stellt zudem einen zu großen Eingriff in das System dar, da es zusätzliche Schwachstellen in den Distanzhaltern erzeugt.

Auswertung der Belastungsprüfungen

Im Rahmen eines standardisierten Prüfverfahrens sollten drei gleiche Belastungsversuche durchgeführt werden, um eine verlässliche Aussage zum Deformationsverhalten zu garantieren. Die Ergebnisse sollten in einem Prüfbericht zusammengefasst werden.

7 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Teil 2: Einzelgabionen mit Steinfüllung“ wurden 6 Belastungsversuche an steingefüllten Einzelgabionen durchgeführt. Für die Versuche wurde die Gabione

Quicky Forte 2000 der Fa. Hoy mit den Abmessungen 1 x 1 x 1 [m] verwendet. Die Gabione enthält insgesamt 10 Aussteifungselemente in den Höhen 0,3 m und 0,7 m, die Drahtgittermatten miteinander verbinden und für zusätzliche Stabilität sorgen. Es wurden 3 Versuche mit einer Füllung aus Lindlarer Grauwacke und 3 Versuche mit 2 verschiedenen Granitsorten durchgeführt. Die Wichten der Gabionen lagen zwischen 14,7 und 15,7.

Die Belastung der Gabione erfolgte zentrisch und unter 3-seitiger Begrenzung der Gabione. Zu diesem Zweck wurde eine Stahlrahmenschalung verwendet. Die Deformation der Gabione unter Belastung wurde durch induktive Wegsensoren auf der Lastplatte und Seilzugwegsensoren an der freiliegenden Gittermatte gemessen.

Die Gabionen reagierten mit großer Verformung des Frontgitters auf die Belastung. Die Distanzhalter wirkten sich positiv auf die Stabilität der Gabione aus. Hohe Zugkräfte in den Distanzhaltern resultierten aus der horizontalen Deformation des Frontgitters und führten zum langsamen Aufbiegen der Distanzhalterhaken, bis diese schließlich versagten.

Eine höhere Steifigkeit der Gabione und somit niedrigere Verformungsraten lassen sich durch die Wahl eines festen, homogenen Füllmaterials mit hohem Reibungswinkel erzielen. Eine Verdichtung des Füllmaterials trägt ebenso dazu bei. Eine hohlraumarme Verfüllung, die Materialumlagerungen in der Gabione unter Belastung verhindert, ist essenziell für die innere Standsicherheit.

Die Gabionen weisen ein plastisches Verformungsverhalten auf, wodurch ein eindeutiger Bruchpunkt in der Regel nicht vorliegt. Aus diesem Grund wurde für jeden Versuch eine Bruchfestigkeit aufgrund von anhaltender Deformation des Frontgitters und Stauchung der Gabione bzw. eines Aufbiegens der Dis-

tanzhalterhaken festgelegt. Für alle Gabionen wurden äquivalente Betondruckfestigkeiten ermittelt.

Die hier untersuchten Gabionen zeichneten sich insgesamt durch niedrige Bruchfestigkeiten aus.

Basierend auf den Erfahrungen aus den durchgeführten Belastungsprüfungen in diesem Forschungsprojekt wurden abschließend Empfehlungen zur Durchführung eines Prüfverfahrens für zentrische Belastungsprüfungen an 3-seitig gelagerten einzelnen Gabionen formuliert.

Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 2 – „Grundbau“, Abschnitt 4 „Stützkonstruktionen“
- [2] FGSV 555 (2014): Merkblatt über Stütz- und Lärmschutzkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen und Gabionen – M Gab (R2)
- [3] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken – Teil 1:1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [4] FGSV (2016): Technische Lieferbedingungen für Gabionen im Straßenbau – TL Gab-StB 16 (R1)
- [5] PLACZEK, D. & C. POHL (2015): Versagen eines Einzelelements bei Stützkonstruktionen aus Gabionen, BAST-Bericht B113
- [6] WEBER, T. (2012): Vergleichsberechnungen zur inneren Standsicherheit bei Gabionenwänden
- [7] BUß, J. & D. WINSELMANN (2012): Innere Standsicherheit von Gabionen
- [8] BLOSFELD, J.; SCHRECK, E.; DECKER, W. & F. WAWRZYNIAK (2019): Vorbereitung von Großversuchen an Gabionen, Berichte der BAST, Heft B147, Carl Schünemann Verlag
- [9] KRUG, A. (2019): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Gabionenkonstruktionen aus punktgeschweißten Gittern, Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus
- [10] Institut für Straßenwesen (isac) (2016): Prüfzeugnis 1612191 – Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine: Grauwackensteinbruch Lindlar, Laborbericht, unveröffentlicht
- [11] BAST (2020): Laborbericht Referat S2 – Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit nach DIN EN1926, unveröffentlicht
- [12] DIN EN 1997-1 (2009): Eurocode 7. Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil1: Allgemeine Regeln: Deutsche Fassung EN 1997-1:2004/NA, 2010

Bilder

Bild 1-1: Stützmauer aus Gabionen. Rastplatz Funckenhausen an der BAB 1.

Bild 1-2: Versagensmechanismen bei Schwergewichtsmauern [2]

Bild 2-1: Belastungsrahmen in Halle 7 der BAST

Bild 2-2: Kraftsensor bei der Kalibrierung

Bild 2-3: Kalibrierung der Seilzugwegsensoren

Bild 2-4: Kalibrierung induktive Wegsensoren

Bild 2-5: Belastungszylinder ENERPAC DUO RC506

Bild 3-1: Übersichtsplan Nivellierpunkte (Draufsicht auf den Versuchsaufbau)

Bild 3-2: Schnitt Mittelachse, Lage der Sensoren und Distanzhalterebenen (Versuch 3)

Bild 3-3: Kraftsensoren im Bodengitter

Bild 3-4: Kraftsensoren im Deckelgitter

Bild 3-5: Kraftsensoren in 1. DH-Ebene, 0,3 m Höhe

Bild 3-6: Kraftsensoren in 2. DH-Ebene, 0,7 m Höhe

Bild 3-7: Seilzugwegsensoren und Kraftsensoren am Frontgitter

- Bild 3-8: Kraftsensoren im rückwärtigen Gitter
- Bild 4-1: Isolierte Kabel im Bodengitter
- Bild 4-2: Schutz der Kabel der Kraftsensoren in den Distanzhaltern
- Bild 4-3: Versuch 3, Grauwacke, vollständiger Versuchsaufbau
- Bild 4-4: Belastungsdiagramme der Versuche mit Grauwacke. Versuch 4 wurde nach Bruch einer Schweißnaht von K4.13 frühzeitig beendet.
- Bild 4-5: Gemessene Deformation des Frontgitters in den Ebenen 0,2 m, 0,5 m und 0,8 m bei Versuch 3. Die Verformungen in der Mitte des Gitters sind deutlich höher als in den anderen Ebenen.
- Bild 4-6: Kraft-Verformungsdiagramm der drei Belastungsversuche mit Grauwacke. Bei Versuch 4: Bruch von DH 4.13 an einer Schweißnaht des Kraftsensors. Abgebildet ist die horizontale Deformation im Stich in Höhe von 50 cm.
- Bild 4-7: Ausbauchung des Frontgitters zwischen den Ebenen der Distanzhalter (0,3 m und 0,7 m) während Versuch 3.
- Bild 4-8: Mittlere Absenkung der Lastplatte in den Versuchen 3 bis 5
- Bild 4-9: Gemessene Zugkräfte in Boden- und Deckelgittern in den Versuchen V3 bis V5
- Bild 4-10: Vergleichende Darstellung aller langen Distanzhalter der Versuche 3 bis 5. Distanzhalter der unteren Ebene: K3.6, K4.6 und K5.6, Distanzhalter der oberen Ebene K3.11, K4.11 und K5.11.
- Bild 4-11: DH 4.13 brach bei 255 kN an einer Schweißstelle.
- Bild 4-12: Aufgebogener Distanzhalterhaken 4.7 an der Frontseite der Gabione nach Versuchsende
- Bild 4-13: Messwerte aller Distanzhalter der unteren Ebene (0,3 m) von Versuch 4
- Bild 5-1: Befüllung der Gabione mit Granit 80/250 und Einbau der 2. Distanzhalterebene
- Bild 5-2: Versuch 7 – Verdichtung des Füllmaterials mittels Rüttelplatte
- Bild 5-3: Versuch 7 – Befüllte Gabione ohne eingeschweißte Kraftsensoren
- Bild 5-4: Kraft-Zeit Diagramme der Versuche 6 bis 8. Aufgrund des Einsatzes des Belastungsrahmens ist die erste Laststufe bei Versuch 7 100 kN.
- Bild 5-5: Vergleich der Verformung des Frontgitters im Stich der Gabione bei Versuchen 6 bis 8
- Bild 5-6: Bei Versuch 6 werden in der Mitte (0,5 m) und im unteren Bereich der Gabione (0,2 m) ähnliche Verformungen gemessen.
- Bild 5-7: Absenkung der Lastplatte im Laufe der Versuche 6 bis 8
- Bild 5-8: Zugkräfte in Deckel- und Bodengitter von Versuch 6 und Versuch 8
- Bild 5-9: Deformiertes Deckelgitter nach Belastungsversuch 6
- Bild 5-10: Zugkräfte in den langen Distanzhaltern der Versuche 6 und 8
- Bild 5-11: Distanzhalterhaken von K8.6 an der Frontseite ist komplett aufgebogen.
- Bild 5-12: Distanzhalterhaken an der Rückseite von K8.6 ist geschlossen.
- Bild 6-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich aller sechs Versuche, horizontale Deformation in der Mitte (50;50) des Frontgitters

Tabellen

- Tab. 1-1: Liste der durchgeführten Versuche
- Tab. 2-1: Kraftstufen bei der Kalibrierung der Kraftsensoren (Zug wird vom Sensor als negativer Wert erfasst)
- Tab. 2-2: Kalibrierung der Seilzug-Wegsensoren
- Tab. 2-3: Kalibrierschritte für induktive Wegsensoren
- Tab. 2-4: Daten des Belastungszyllinders ENERPAC

-
- Tab. 4-1: Kennwerte der mit Lindlarer Grauwacke befüllten Gabionen in den Versuchen 3 bis 5
- Tab. 4-2: Vergleich der Absenkung der Lastplatte bei Versuch 3 bei 310 kN und der gemessenen Stauchung nach Versuchsende
- Tab. 5-1: Versuch 6 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit
- Tab. 5-2: Versuch 7 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit
- Tab. 5-3: Versuch 8 – Kennwerte der befüllten Gabione mit Granit
- Tab. 6-1: Bruchfestigkeiten der 6 untersuchten Gabionen
- Tab. 6-2: Berechnung der äquivalenten Betondruckfestigkeit f_{cd} nach [3]
- Tab. 6-3: Bruchfestigkeiten in Relation zur Dehnung und Stauchung am Bruchpunkt

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.