

Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBASt

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 198

bast

Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST

von

Tim Alte-Teigeler
Otto Alte-Teigeler GmbH
Bietigheim

Thorsten Britz
Heinz Schnorpfeil Bau GmbH
Treis-Karden

Michael Kispert
BTE stelcon GmbH
Germersheim

Axel Riwe
Ingenieurbüro Dr. A. Riwe
Anklam

Tanja Tschernack
Stephan Villaret
Villaret Ingenieurgesellschaft mbH
Hoppegarten

Heinzpeter Lüdike
Hochschule Anhalt
Dessau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 198

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 08.0253
Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf der duraBASt

Fachbetreuung
Christoph Becker

Referat
Betonbauweisen

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 0943-9323
ISBN 978-3-95606-766-2

Bergisch Gladbach, Dezember 2023

Kurzfassung – Abstract

Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST

Im Bereich der Erhaltung kamen Fertigteile schon seit einigen Jahren vermehrt zum Einsatz. Die Technologie eignet sich aber auch zum Neubau bzw. der Erneuerung von Verkehrsflächen.

Dieses Forschungsvorhaben wurde initiiert, um hierzu die vorhandenen Grundlagen zu verbessern und die Praxistauglichkeit von Fertigteilen im Neubau nachzuweisen.

Im Rahmen dessen wurden zu Beginn theoretische Betrachtungen zur Anwendung der Bauweise gemacht. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Querkraftübertragung von Fertigteilen untereinander und zur Höhenjustierung erörtert. Weiterhin wurde ein FEM-Modell erstellt, das der Berechnung der Spannungen in Fertigteilen infolge verschiedener Belastungen und somit auch der Dimensionierung von Fertigteilen dient.

Weiterer Kernbestandteil des Forschungsvorhabens war die praktische Umsetzung der Bauweise in Form eines Demonstrators. Auf dem duraBAST wurde eine Versuchsstrecke mit den Abmessungen ca. 30 m x 3,90 m angelegt. Hierzu wurde vorab ein Konzept erstellt, bei dem die Varianten der Querkraftübertragung, die Höhenjustiersysteme, die Oberflächentextur und die Unterlage variiert wurden. Nach Herstellung der Fertigteile wurden diese auf die Baustelle geliefert, verlegt, höhenmäßig ausgerichtet und die Hohlräume unter den Fertigteilen und teilweise in den Kopplungssystemen mit Unterpressmaterial dauerhaft verfüllt.

Der fertiggestellte Demonstrator diente sodann dem Nachweis der Dauerhaftigkeit und zur Kalibrierung des FEM-Modells. Hierzu wurde die Untersuchungsstrecke durch die BAST mit dem MLS30 belastet. Im Anschluss an die jeweiligen Belastungen wurden unter anderem FWD-Messungen und visuelle Begutachtungen durchgeführt.

Testing of precast concrete elements for new construction and fundamental renewal on duraBAST

For some years precast concrete slabs are used in case of rehabilitation of concrete pavements. But the technology can also be applied to build new traffic areas or for a complete renewal of concrete pavements.

This research project was initiated in order to improve the existing database and technical basics as well as proving the practicability of precast concrete slabs for new constructions.

In this context, theoretical considerations on the application of the construction method were made at the beginning. Different possibilities for the transverse force transmission of precast slabs from one to another and for height adjustment were discussed. Furthermore, an FEM model was created to calculate the stresses in precast slabs due to different loads and thus the model can also be used for the dimensioning of precast slabs.

Another core component of the research project was the practical implementation of the construction method in form of a demonstrator. A test section measuring approx. 30 m x 3.90 m was set up on the duraBAST. For this purpose, a concept was developed in which the variants of the transverse force transmission, the height adjustment systems, the surface texture and the subbase were varied. After the precast elements had been produced, they were delivered, laid, aligned in terms of height and permanently bedded and fixed with injection material.

The completed demonstrator was then used to verify the durability and to calibrate the FEM model. For this purpose, the test section was loaded by BAST with the MLS30. Following the loads, FWD measurements and visual inspections were carried out, among other things.

Summary

Testing of precast concrete elements for new construction and fundamental renewal on duraBAST

1 Task/objective

The aim of the research project was to investigate and test an innovative system with precast concrete slabs for newly built traffic areas. The experiences from previous projects on the subject of precast concrete slabs were to serve as a basis, even though these had so far been mainly focused on the rehabilitation of concrete pavements. With the help of an FEM model, it should be possible to calculate the stress conditions in precast concrete slabs precisely for dimensioning. It was planned to research aids and techniques for the installation of precast concrete slabs in a larger scope for newly built pavements as well as to work out various possibilities for the connection between adjacent precast slabs. Finally, the practicability of the different variants was to be demonstrated by building a demonstrator on the duraBAST. Different surface textures were to be applied and tested for their manufacturability. The transverse force transmission and thus the effectiveness of the connection systems were to be determined by FWD measurements. The previously created FEM model was to be calibrated with the help of the FWD measurement results. After completion of the research project, the necessary tools should be available for dimensioning, manufacturing the precast slabs with different surfaces and connection systems and for installation of the precast slabs in the context of newly built traffic pavements. This can lead to a new construction method that guarantees high and consistent quality of the components, independent of weather conditions, due to optimal framework conditions during the production of the prefabricated concrete slabs. The construction of the road pavement (installation of the precast concrete slabs) is also less dependent of the weather than is the case with conventional construction methods using concrete or asphalt. The result would be a durable, long-lasting and high-quality road surface with all its economic advantages.

2 Procedure/methodology

The central point of this research project was the construction of a demonstrator to prove the feasibility of a newly built pavement with precast slabs and to calibrate and update the FEM model. The plan was to build a 30 m long and 3.90 m wide field. Precast slabs with different surfaces were produced in order to represent different design variants. In addition to the standard construction method for motorways, exposed aggregate concrete, surfaces with broom finish and porous concrete were also produced. In order to be able to provide a partial area with an porous concrete surface, a round precast element was planned, which was to be installed in a previously laid precast slab. Different height adjustment systems were to be tested for laying the precast elements. These had to allow an alignment in height of the precast slabs independently of the adjacent support conditions of the existing structure. In order to be able to determine the effect of different base layers, in some areas an asphalt base course was constructed in addition to the existing gravel base course.

Within the project, FEM volume models were created which can illustrate the slab behaviour close to reality. The modelling of the slabs as volume blocks made it possible to consider different material layers across the slab cross-section. Non-linear temperature curves could also be simulated without any problems. In order to be able to cover the interaction of the different precast systems with each other, several slabs including the bearing courses were recorded in a model.

The interaction of the slabs with the base course was described using contact formulations, which also allow partial lifting of the slab from the subgrade in the model. The lower base courses were defined as a volume block, which protrudes beyond the edge of the modelled precast slabs. Thus, also the co-supporting effect of the adjacent areas of the substructure was taken into consideration. The calculations thus provided considerably more precise results than, for example, when using the subgrade reaction modulus method. The different layers of the substructure could be defined as differentiated as necessary.

In addition to the bedding and the material characteristics, hygric and thermal loads were to be taken into account as well as the usual mechanical

loads from the manufacturing, transport and installation conditions and the traffic loads.

The geometries of the individual precast slabs were defined according to the available area (30.00 m x 3.90 m), taking into account economic transport widths as well as transport and installation loads. The boundary conditions resulted according to the vehicles and equipment available for transport and on the construction site.

After determining the geometries of the precast slabs, the formwork and reinforcement plans required for the production of the precast slabs were drawn. The results of the investigations into possible connection systems (anchors, dowels, tongue and groove, etc.) and height adjustment elements were included. For the production of the precast slabs, a procedure instruction was created that describes the individual steps, starting with the production of the formwork and reinforcement up to the application of the different surfaces. The procedure for the different connection and height adjustment systems was also described.

Different height adjustment systems were to be used. On the one hand, an existing system was to be tested for its suitability for the large-area use of precast slabs. This was the "HESTER-KOMBI" system, for which a patent application had already been filed (AZ: 102016111921.0). On the other hand, further adjustment possibilities were to be discussed and tested. The aim was to have

different tools available at the end of the research project to fix precast slabs on different sub-layers independently of the support possibilities of neighbouring existing slabs both in the vertical and in the horizontal position in such a way that they can subsequently be fixed by injecting silicate resin under the slabs.

For the construction, the boundary conditions such as space conditions, supports, adjacent pavements, etc. had to be determined. Based on the collected data, a rough planning for the laying pattern/joint grid with the different surface, connection and laying variants was created.

Based on the rough planning of the demonstrator, the exact execution plans and a construction schedule coordinated with the boundary conditions were created. In particular, the local conditions such as space on the construction site, possible parallel measures on the duraBAST site and access to resources (water, electricity, etc.) had to be taken into account.

In the planned paving area on the duraBAST site, a 16 cm thick asphalt base course existed. This was removed by milling and then the underlying gravel base course was prepared for the installation of the precast elements. In one section, the gravel base course was removed to such an extent that an asphalt base course could be installed as a second support variant for the precast slabs.

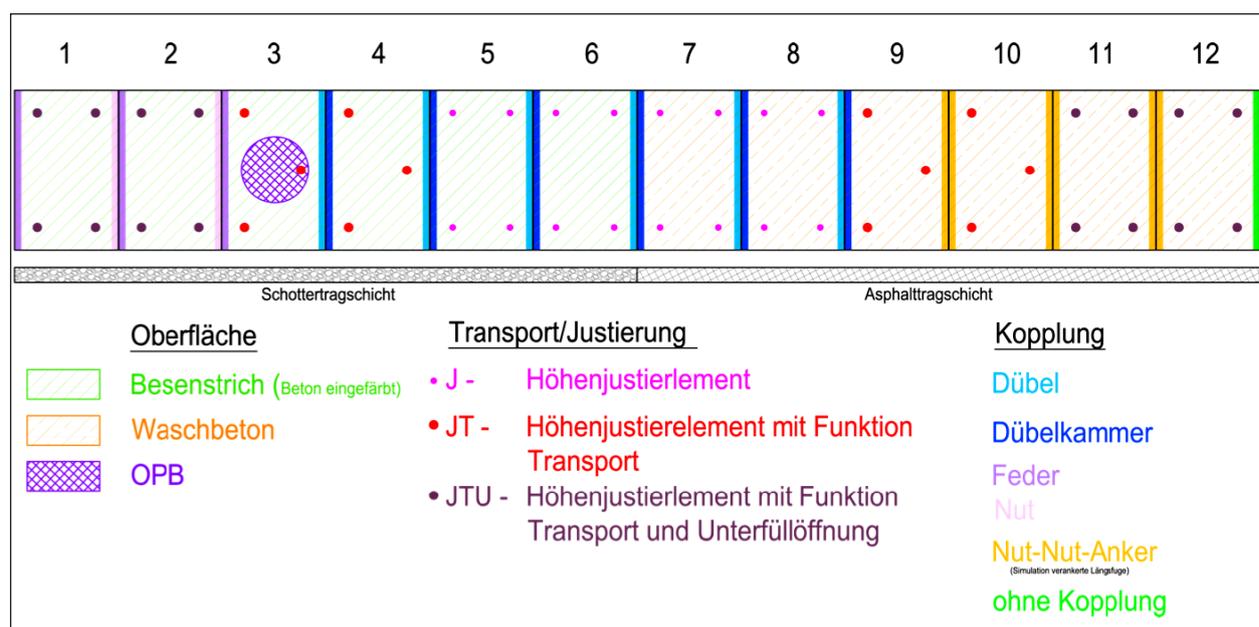


Fig. 1: Set of precast slabs

According to the formwork and reinforcement plans, the precast slabs were produced, whereby different surfaces (broom finish, exposed aggregate concrete, porous concrete) and different connection systems were implemented. The different height adjustment variants were attached or installed on the precast slabs according to the planning. After delivery of the precast slabs to the construction site, they were laid on the prepared base course and aligned in height with the help of the different systems. Subsequently, the cavities between the precast slabs and the subbase as well as the different connection systems had to be filled with silicate resin in order to ensure a all-over and uniform support and the force-fit connection between the precast slabs. Finally, the joints were filled to prevent water from penetrating into the subbase. The joints had to ensure that the usual movements from the thermal and mechanical loads could be absorbed without damage.

During the installation, the execution was monitored by an engineering team. All work steps were recorded and documented photographically in order to identify potential for improvement.

After completion of the construction phase, the condition of the newly built pavement was metrologically examined and documented. In particular, the load-bearing capacities, the connections between the precast slabs, the evenness between adjacent slabs, the condition of the joints and the all-over and uniform filling of all cavities (between slab/subbase and in connecting systems) were examined in order to be able to follow the development in the subsequent monitoring.

The bearing capacity measurements were carried out with the Falling Weight Deflectometer (FWD) with an impact load of 50 kN, 75 kN and 100 kN in the centre of the slab and at the transverse joints. The evaluation of the FWD measurement results provided the equivalent deformation modulus E_a on the top of the concrete slab, the subgrade reaction modulus E_0 and the effectiveness index of the shear force transfer at the transverse joints. The results of the FWD measurements served, on the one hand, as quality control of the load-bearing capacity of the entire structure immediately after installation of the precast slabs and, on the other hand, as test values for the FEM model. Evenness between the adjacent slabs was measured by means of battens, and the joints were visually assessed. The deflections on the top of the precast element in the centre of the

slab and at the joints determined by FWD were used to calibrate the FEM model. In particular, the influences of the different coupling systems and the support conditions were considered.

In order to assess the durability of the precast slabs, a monitoring of the test area was carried out. For this purpose, after the measurements on the newly built pavement further measurements of the same characteristic values were carried out. The measurements were carried out after the pavement has been stressed with the MLS30 owned by BAST. The results of the load-bearing capacity measurements could thus also be used to calibrate and adjust the FEM model.

3 Results

Within the research project, a traffic pavement was constructed with precast concrete slabs with different surface textures, which was designed in accordance with quality standards, aligned in terms of height and fixed in position, irrespective of existing adjacent pavements or other boundary conditions. Durability was proven by loading with the MLS. The system is therefore suitable for use in newly built or replaced pavements.

To determine the stress conditions in the precast system, a suitable FEM model (3D volume element system) was used as a dimensioning basis. Various technical devices and procedures for height adjustment and for connecting the precast slabs with each other were discussed and tested within the framework of the demonstrator on the duraBAST. FWD measurements after the various load phases were used to verify the effect of the connection systems and to generate measurement results with which the FEM model could be calibrated. Due to the more precise input parameters in the FEM model, practice-relevant calculation results could be achieved.

The necessary tools are now available for the dimensioning, production of precast slabs with various surfaces and connection systems and for the installation of precast slabs in the context of newly built pavements. This means that precast elements with all their advantages, such as high and consistent quality due to production under protected conditions, almost weather-independent installation in situ, elimination of setting times of

concrete after construction of the traffic pavement and high durability, can also be used for the construction of newly built traffic pavements.

4 Conclusions for the practice

The research project has shown that an innovative production of traffic pavements using precast slabs is possible. Prefabricated slabs can therefore also be used in newly built or replaced pavements and improve the sustainability of those through their advantages and durability. The rapid re-availability of the traffic facility is a great advantage.

After the development and validation of the system on a small scale by means of the demonstrator on the duraBAST, the foundations have now been laid to be able to use precast slabs in practice. A broad use would be desirable in order to establish the construction method as an alternative.

For example, precast slabs have already been used in the renovation of a heavily loaded intersection/access-road to a highly frequented industrial plant. Here, not only were the connection and height adjustment systems used investigated within the research project, but complicated transverse and longitudinal gradients with corresponding changes also had to be realised. The decisive factor for choosing the construction method with precast slabs was the short construction time and immediate re-opening to traffic, which shortened the disruption to operations and thus minimised the indirect costs resulting from the construction measure.

A guideline of the FGSV (German Research association for road and traffic affairs) on the use of precast slabs for the repair and renewal of traffic pavements is currently being prepared, so that the results of the research project can also be incorporated.

Inhalt

1	Aufgabenstellung	11	3.6.6	Verbesserungspotenzial bei der Verlegung der Fertigteile	25
1.1	Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik	11	3.7	Unterpressen der Fertigteile	26
1.2	Gesamtziel	11	3.7.1	Hinweise zum Unterpressen	26
1.3	Methodik des Vorgehens	11	3.7.2	Verbesserungspotenziale im Zuge des Unterfüllvorgangs	27
2	Konzept Fertigteile	14	3.8	Fugenschluss	27
2.1	Geometrie, Dimensionierung und Fertigungspläne	14	3.8.1	Hinweise zum Fugenschluss	27
2.2	Höhenjustiersysteme	15	3.8.2	Verbesserungspotenziale im Zuge des Fugenschlusses	27
2.2.1	HESTER-Kombi (JT)	15	4	Monitoring	28
2.2.2	Höhenjustierung mit integriertem Unterpresskanal (JTU)	15	4.1	Belastung mit MLS	28
2.2.3	Höhenjustierelement (J)	15	4.2	Messtechnische Untersuchung Neuzustand	28
2.2.4	Weitere Justiersysteme	15	4.3	Monitoring (FWD, Versätze, Fugen etc.)	29
2.3	Kopplung der Fertigteile untereinander	16	5	FE-Modell zur Berechnung des Beanspruchungsverhaltens der verlegten Fertigteile	37
2.4	Oberflächen	16	5.1	Zielstellung	37
2.5	Unterlage/Tragschichten	16	5.2	Grundsätzliche Vorgehensweise	37
2.6	Konzept	16	5.3	Anforderungen an das Modell	37
2.7	Ausführungspläne/Bauablaufplan	16	5.4	Modellkonzept	37
3	Demonstrator – Vorbereitung und Herstellung	17	5.4.1	Modellumfang	37
3.1	Vorbereitung und Koordinierung	17	5.4.2	Platten	37
3.2	Unterlage/Tragschichten	17	5.4.3	Fugen	38
3.3	Herstellung der Fertigteile	19	5.4.4	Verpressmaterial	39
3.4	Verfahrensanleitung zur Herstellung von Fertigteilen	21	5.4.5	Unterbau	39
3.5	Transport	21	5.4.6	Interaktion der Volumenblöcke	39
3.6	Verlegen der Fertigteile	21	5.4.7	Lagerungen	40
3.6.1	Transport mit Gurten	21	5.4.8	Einwirkungen	40
3.6.2	Höhenjustierung	22	5.4.9	Inputdatei	41
3.6.3	Abstandshalter	23	5.4.10	Software	41
3.6.4	Kopplung	23	5.5	Optimierung der Modellparameter am vereinfachten Modell	41
3.6.5	Einbau des runden Fertigteils	24			

5.5.1 Zielstellung und Vorgehensweise.	41
5.5.2 Modelldefinition	41
5.5.3 Optimierung der Größe der Plattenelemente	42
5.5.4 Optimierung der Elementgröße der Unterpressschicht	44
5.5.5 Optimierung der Breite des Überstandes des Unterbaublocks	44
5.5.6 Optimierung der Dicke des Unterbaues.	45
5.5.7 Optimierung der Elementgröße des Unterbaues	45
5.5.8 Optimierung der Kontaktparameter	46
5.6 Berechnungsmodell (Basismodell).	47
5.7 Kalibrierung	48
5.7.1 Datengrundlage	48
5.7.2 Vorgehensweise	48
5.7.3 Ergebnisse	53
5.7.4 Zusammenfassung der Modellparameter	57
6 Fazit zum Forschungsvorhaben	58
6.1 Zusammenfassende Bewertung.	58
6.2 Ausblick	58
Literatur	60
Tabellen	61
Bilder	61

Die Anhänge 1-5 zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Aufgabenstellung

1.1 Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik

Erfahrungen zu Instandsetzungsmaßnahmen mithilfe von Fertigteilssystemen bestanden zunächst insbesondere in den USA. Seit 2001 wird diese Bauweise regelmäßig vor allem dort angewendet, wo längere Sperrzeiten aufgrund hoher Verkehrsbelastung nicht möglich sind oder Sperrzeiten auf eine nur geringe Akzeptanz stoßen. Über den großflächigen Einsatz von Fertigteilen im Neubau oder der grundhaften Erneuerung liegen nur wenige Informationen vor. Es existieren verschiedene Systeme zur Sanierung, die sich vor allem in der Vorbereitung der Unterlage für das Fertigteil und der technischen Lösung für die Querkraftübertragung unterscheiden.

In Deutschland kam die Fertigteilbauweise bereits in vereinzelt Fällen zur Anwendung, ein regelmäßig und großflächig angewendetes Fertigteilssystem existierte aber bislang noch nicht.

Im Rahmen der Forschungsvorhaben FE 08.0217/2012/ERB, FE 89.0279/2012 und FE 89.0283/2013 wurden für die Instandsetzungsmethode unter Verwendung von Betonfertigteilen theoretische Grundlagen erarbeitet und erste praktische Erfahrungen gesammelt. Weiterhin wurde im Jahr 2014 ein Pilotversuch zum Einbau von Fertigteilen über die gesamte Fahrbahnbreite auf der BAB A1 in Rheinland-Pfalz durchgeführt, der auf die Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Fertigteilen in Entspannungsbereichen [RIWE 2014] beruhte.

Das Forschungsvorhaben „Einsatz von Fertigteilen für die dauerhafte Instandsetzung sowie die Schaffung von Entspannungsbereichen an Betonfahrbahndecken“ (FE 08.0236/2015/ERB, Auftragsforschung BAST) befasste sich mit dem Einsatz von Fertigteilen zur Sanierung von Hitzeschäden, Schaffung von Entspannungsbereichen sowie mit der Ausbildung von Endbereichen in Betondecken.

Als weitere Forschungsvorhaben, die sich mit Fertigteilen als Sanierungsmethode beschäftigten, sind „Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe – HESTER“ des BMBF und „Schnelle Reparatur der Betonfahrbahndecke mit Fertigteilen – SPEED-FT“ der österreichischen FFG zu nennen.

1.2 Gesamtziel

Das Forschungsvorhaben hatte das Ziel, ein innovatives Fertigteilssystem für den Neubau zu erfordern und zu erproben. Als Basis sollten die Erfahrungen aus diversen vorhergehenden Projekten zum Thema Fertigteile dienen, auch wenn diese bislang hauptsächlich auf Sanierungsvarianten ausgerichtet waren. Mithilfe eines FEM-Modells sollten die Spannungszustände in Fertigteilen zur Dimensionierung zielgenau berechnet werden können. Es wurden Hilfsmittel und Techniken zur Verlegung der Fertigteile im größeren Verbund für den Neubau erforscht sowie verschiedene Kopplungsmöglichkeiten zwischen angrenzenden Fertigteilen erarbeitet. Durch die Herstellung eines Demonstrators auf dem duraBASt sollte schließlich die Praxistauglichkeit der verschiedenen Varianten nachgewiesen werden. Hierbei kamen auch verschiedene Oberflächentexturen zum Einsatz und konnten auf ihre Herstellbarkeit überprüft werden. Durch FWD-Messungen wurden die Querkraftübertragung und somit die Wirksamkeit der Kopplungselemente ermittelt und mithilfe dieser Ergebnisse das zuvor erstellte FEM-Modell kalibriert. Nach Abschluss der Forschungsarbeit sollten die notwendigen Hilfsmittel zur Verfügung stehen, die zur Dimensionierung, Herstellung der Fertigteile mit verschiedenen Oberflächen und Kopplungsmöglichkeiten und zur Verlegung der Fertigteile im Rahmen von Neubaumaßnahmen erforderlich sind. Hierdurch konnte eine neue Bauweise entstehen, die durch optimale Rahmenbedingungen während der Herstellung der Fertigteile witterungsunabhängig eine hohe und gleichbleibende Qualität der Bauteile gewährleistet. Auch das Herstellen der eigentlichen Fahrbahn (verlegen der Fertigteile) ist von der Witterung unabhängiger als es bei den herkömmlichen Bauverfahren in Beton- oder Asphaltbauweise der Fall ist. Eine dauerhafte, langlebige und qualitativ hochwertige Fahrbahndecke mit all ihren wirtschaftlichen Vorteilen war das Ergebnis.

1.3 Methodik des Vorgehens

Das Vorgehen im Forschungsvorhaben wurde vorab in einzelne Arbeitspakete und weitere untergeordnete Punkte aufgeteilt, die im Folgenden aufgeführt sind.

AP 1 Konzepterstellung

- AP 1.1 Konzept Fertigteil mit Oberflächen, Kopplung und Höhenjustierung

Zentraler Punkt dieses Forschungsvorhabens war der Bau eines Demonstrators, um die Realisierbarkeit eines Neubaus mit Fertigteilen nachzuweisen und das FE-Modell zu kalibrieren und fortzuschreiben. Hierfür musste ein Konzept entwickelt werden, das der Anforderung genügt, sowohl verschiedene Oberflächenarten als auch Kopplungsmethoden neben- und hintereinander liegender Fertigteile zu erproben. Geplant war die Herstellung eines 30 m langen und 3,90 m breiten Feldes, das zur Hälfte mit Längsfuge ausgeführt werden sollte. Hierdurch sollte sich eine Möglichkeit ergeben, neben der Ausbildung der verdübelten Querfugen in verschiedenen Varianten auch unterschiedliche Verankerungen der Längsfuge zu untersuchen.

Es sollten Fertigteile mit verschiedenen Oberflächen hergestellt werden, um auch verschiedene Ausführungsvarianten abbilden zu können. Angedacht waren neben der Standardbauweise für Autobahnen, dem Waschbeton, auch verschiedene Besenstriche und ein offenporiger Beton. Für das Verlegen der Fertigteile sollten unterschiedliche Höhenjustiersysteme weitergeführt und erprobt werden. Diese mussten eine von den angrenzenden Auflagerbedingungen des Bestandes unabhängige Fixierung der Fertigteile in der korrekten Lage ermöglichen. Um die Auswirkung unterschiedlicher Unterlagen ermitteln zu können, sollte neben der vorhandenen Schottertragschicht in Teilbereichen auch eine Asphalttragschicht hergestellt werden. Bei Erstellung des Konzepts musste insbesondere darauf geachtet werden, dass der Planung keine bestehenden Patentrechte entgegenstehen.

- AP 1.2 Entwicklung FE-Modell

Im Rahmen des Projekts sollten FE-Volumenmodelle genutzt werden, welche das Plattenverhalten realitätsnah abbilden. Die Modellierung der Platten als Volumenblöcke erlaubt es, verschiedene Materialsichten über den Plattenquerschnitt zu berücksichtigen. Auch nichtlineare Temperaturverläufe können problemlos simuliert werden. Um die Interaktion der verschiedenen Fertigteilsysteme untereinander erfassen zu können, sollten in einem Modell mehrere Platten einschließlich der unteren Tragschichten erfasst werden. Für die zunächst noch geplanten kleineren Fertigteilelemente (mit

Längsfuge verlegt), sollte das Modell 4 Platten und für die größeren mindestens 3 Platten umfassen.

Die Interaktion der Platten mit dem Untergrund sollte über Kontaktformulierungen beschrieben werden, welche auch ein partielles Abheben der Platte von der Unterlage im Modell zulassen. Die unteren Tragschichten sollten als Volumenblock definiert werden, welcher über den Rand der modellierten Fertigteile hinausragt. Damit konnte auch die mittragende Wirkung der angrenzenden Bereiche des Unterbaus erfasst werden. Die Berechnungen sollten damit erheblich präzisere Ergebnisse als beispielsweise bei Nutzung des Bettungsmodulverfahrens liefern. Es war vorgesehen, die verschiedenen Schichten des Unterbaues so differenziert wie notwendig zu definieren.

Neben der Bettung und den Materialkennwerten sollten hygrische und thermische Belastungen genauso Eingang finden wie die üblichen mechanischen Belastungen aus Herstellungs-, Transport- und Einbauzustand sowie den Verkehrslasten.

- AP 1.3 Festlegung Geometrie, Dimensionierung und Fertigungspläne

Zur Herstellung sollten anschließend die erforderlichen Fertigungspläne zur Schalung und Bewehrung angefertigt werden.

Die Geometrien der einzelnen Fertigteile sollten entsprechend der vorhandenen Fläche (30,00 m x 3,90 m) unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Transportbreiten sowie Transport- und Montagelasten definiert werden. Die Randbedingungen ergaben sich entsprechend der für den Transport und auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Fahrzeuge und Geräte.

In die Schal- und Bewehrungspläne sollten auch die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu möglichen Kopplungssystemen (Anker, Dübel, Nut, Feder, etc.) und Höhenjustierelemente einfließen.

- AP 1.4 Verfahrensanweisung zur Herstellung von Fertigteilen

Es war vorgesehen, für die Herstellung der Fertigteile eine Verfahrensanweisung zu erstellen, die die einzelnen Schritte beschreibt, beginnend mit der Herstellung der Schalung und Bewehrung bis hin zur Ausbildung der unterschiedlichen Oberflächen. Auch die Vorgehensweise für die unterschiedlichen

Kopplungs- und Höhenjustiersysteme sollte beschrieben werden. Zudem sollte auf Gefahren bei der Herstellung und dem Transport der Fertigteile hingewiesen werden.

- AP 1.5 Testung/Entwicklung Höhenjustiersystem

Im Rahmen des Projektes sollten verschiedene Höhenjustiersysteme zum Einsatz kommen. Zum einen sollte ein vorhandenes System auf seine Tauglichkeit für den großflächigen Fertigteileinsatz überprüft werden. Hierbei handelte es sich um das System „HESTER-KOMBI“, das der Unterauftragnehmer Stelcon bereits zum Patent (AZ: 102016111921.0) angemeldet hatet. Zum anderen sollten weitere Justiermöglichkeiten getestet werden. Ziel war es, am Ende des Forschungsvorhabens verschiedene Werkzeuge zur Verfügung zu haben, um Fertigteile auf verschiedensten Untergründen, unabhängig von Auflagermöglichkeiten auf benachbarten Bestandsplatten, sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen Lage so zu fixieren, dass sie im Anschluss durch Unterpressen festgelegt werden können.

- AP 1.6 Planung Demonstrator

Zentraler Punkt des Forschungsvorhabens war der Bau eines Demonstrators auf der Fläche des duraBAST, der, wie unter AP 1.1 beschrieben, dem Nachweis der Realisierbarkeit sowie der Kalibrierung des FE-Modells dienen soll. Zur Bauausführung sollten die Randbedingungen wie z. B. Platzverhältnisse, Auflager, angrenzende Flächen, etc. ermittelt werden. Auf Basis der gesammelten Daten sollte eine Grobplanung für das Verlegemuster/Fugenraster mit den verschiedenen Oberflächen-, Kopplungs- und Verlegevarianten erstellt werden.

- AP 1.7 Erstellung Ausführungspläne/ Bauablaufplan

Auf Basis der Grobplanung des Demonstrators sollten schließlich die genauen Ausführungspläne sowie ein auf die Randbedingungen abgestimmter Bauablaufplan erstellt werden. Insbesondere waren hier die örtlichen Gegebenheiten wie Platz auf der Baustelle, eventuell parallel laufende Maßnahmen auf dem duraBAST-Gelände und Zugänge von Ressourcen (Wasser, Strom, etc.) zu berücksichtigen. Die Planung reichte von der Vorbereitung des Un-

tergrundes, über die Lieferung der Fertigteile und das Verlegen bis zu den abschließenden Arbeiten wie Unterpressen und Fugenverschluss.

AP 2 Herstellung Demonstrator

- AP 2.1 Vorbereitung und Koordinierung

Anhand der Ausführungspläne und des Bauablaufplanes sollte die gesamte Fertigungskette von Herstellung der Fertigteile über Transport bis zum Verlegen und Unterpressen der Fertigteile vorbereitet werden. Der gesamte Herstellungsprozess sollte kontinuierlich überwacht und die einzelnen Arbeitsschritte entsprechend des Fortschritts koordiniert werden.

- AP 2.2 Wissenschaftliche Begleitung und Dokumentation

In einer ingenieurtechnischen Begleitung der Einbaumaßnahme sollten sämtliche Arbeitsschritte erfasst und dokumentiert und somit mögliche Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden.

- AP 2.3 Vorbereitung vorhandener Oberbaukonstruktion

Auf dem duraBAST war zunächst eine 16 cm starke Tragdeckschicht aus Asphalt vorhanden. Diese sollte durch Fräsen entfernt werden. Anschließend war vorgesehen, die darunterliegende Schottertragschicht für den Einbau der Fertigteile vorzubereiten bzw. zu ersetzen. Nach Profilierung und Verdichtung der Schottertragschicht sollte zur Verdichtungskontrolle ein Lastplattendruckversuch gemäß DIN 18134 durchgeführt werden. Es war vorgesehen, in einem Teilbereich die Schottertragschicht so weit auszubauen, dass eine Asphalttragschicht als zweite Auflagervariante für die Fertigteile eingebaut werden kann.

- AP 2.4 Herstellung, Transport und Einbau der Fertigteile

Die Fertigteile sollten auf Basis der Schalungs- und Bewehrungspläne hergestellt werden. Hierbei sollten unterschiedliche Oberflächen (Besenstriche, Waschbeton, Offenporiger Beton) und unterschiedliche Kopplungssysteme realisiert werden. Des Weiteren sollten die verschiedenen Höhenjustierungsvarianten gemäß Planung an den Fertigteilen

angebracht bzw. bei Erfordernis eingebaut werden. Nach Fertigstellung sollten die Fertigteile auf die Baustelle geliefert, auf der vorbereiteten Unterlage ausgelegt und über die verschiedenen Systeme in ihrer Lage fixiert werden. Im Anschluss sollten die Hohlräume zwischen Fertigteil und Untergrund sowie der verschiedenen Kopplungssysteme mit Silikatharz verfüllt werden, damit eine vollflächige und gleichmäßige Auflage und die kraftschlüssige Verbindung zwischen den Fertigteilen gewährleistet ist. Abschließend sollten die Fugen verfüllt werden, um das Eindringen von Wasser in den Untergrund zu verhindern. Bei der Fugenausbildung war darauf zu achten, dass die üblichen Bewegungen aus den thermischen und mechanischen Belastungen schadlos aufgenommen werden können.

- AP 2.5 Messtechnische Untersuchung Neuzustand

Nach Abschluss der Bauphase sollte der Neuzustand messtechnisch untersucht und dokumentiert werden. Hier wurden insbesondere die Tragfähigkeiten, die Verbindungen zwischen den Fertigteilen, die Ebenheit der Übergänge zwischen benachbarten Platten, der Zustand der Fugen sowie die vollständige und gleichmäßige Verfüllung aller Hohlräume (zwischen Platte/Untergrund und an Kopplungselementen) betrachtet, um die Entwicklung im anschließenden Monitoring verfolgen zu können.

Es war vorgesehen, die Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) mit einer Stoßbelastung von 50 kN, 75 kN bzw. 100 kN in Plattenmitte sowie an den Quer- und Längsfugen durchzuführen. Die Auswertung der FWD-Messergebnisse sollte den äquivalenten Verformungsmodul E_a auf OK Betonplatte, den Bettungsmodul E_0 und den Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung an den Querschnitten liefern. Die Ergebnisse der FWD-Messungen sollen einerseits der Qualitätskontrolle der Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion unmittelbar nach Einbau der Fertigteile und andererseits als Prüfwerte für das FE-Modell dienen.

Die Ebenheit zwischen den benachbarten Platten sollte mittels Latte gemessen und die Fugen optisch beurteilt werden. Für die Überprüfung der vollständigen Verfüllung der Hohlräume sollten an ausgewählten Stellen Bohrkerne gezogen werden.

- AP 2.6 Kalibrierung FE-Modell

Die mittels FWD (Messung Neuzustand AP 2.5 sowie im Rahmen des Monitorings AP 2.7) ermittelten

Deflexionen auf OK Fertigteil in Plattenmitte und an den Fugen sollten der Kalibrierung des FE-Modells dienen. Betrachtet werden sollten insbesondere die Einflüsse der unterschiedlichen Kopplungssysteme und der Auflagerbedingungen.

- AP 2.7 Monitoring (FWD-Messung, Höhenlage, Fugen etc.)

Zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit der Fertigteil-Fahrbahn war vorgesehen, im weiteren Verlauf des Projekts ein Monitoring der Versuchsfläche durchzuführen. Hierzu sollten nach den Messungen im Neuzustand (AP 2.5) im Halbjahresrhythmus weitere Messungen derselben Kennwerte erfolgen und somit die Entwicklung des hergestellten Demonstrators dokumentiert werden. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen sollten zudem der Kalibrierung und Anpassung des FE-Modells dienen.

2 Konzept Fertigteile

Zentraler Punkt dieses Forschungsvorhabens war der Bau eines Demonstrators, um die Realisierbarkeit eines Neubaus mit Fertigteilen nachzuweisen und das geplante FE-Modell zu kalibrieren und fortzuschreiben. Hierfür wurden ein Konzept entwickelt, das verschiedene Oberflächenarten, Justiersysteme und Kopplungsmethoden berücksichtigte.

2.1 Geometrie, Dimensionierung und Fertigungspläne

Für den Bau des Demonstrators wurden die Abmessungen der Fertigteile, die Oberflächenausbildung und die verschiedenen Kopplungs- und Höhenjustiersysteme bestimmt. Auf Basis der Abmessungen der Probefläche wurden die Geometrien mit $L \times B \times H$ 2,505 m x 3,90 m x 0,24 m festgelegt. Ursprünglich waren kleinere Platten mit einer Länge von 2,47 m geplant. Dies stellt aus verkehrsrechtlicher Sicht die maximale Breite für Standardtransporte dar, die aus wirtschaftlicher Sicht für Baumaßnahmen mit Fertigteilen anzustreben wäre. Da der auf dem duraBASt zur Verfügung stehende Einbaubereich jedoch etwas länger als 30 m war und voll ausgenutzt werden sollte, musste die Plattenlänge jedoch derart angepasst werden, dass weder die Fugen noch die Anschlussbereiche zum Bestand zu breit wurden.

Um die Kopplung von Fertigteilen sowohl in Querschnitt als auch in Längsrichtung untersuchen und auch eine Belastung aufbringen zu können, wurde in einer Querfuge eine Verankerung simuliert und auf daher die Ausbildung mehrzeiliger und mehrspaltiger Fertigteile verzichtet.

Die Fertigteile wurden auf diese Geometrien dimensioniert, die Fertigungspläne (Schalung und Bewehrung) entsprechend angefertigt (siehe Anhang 1) und dem Hersteller übermittelt. Die Pläne beinhalteten neben der notwendigen Bewehrung auch jeweils die Lage der gewählten Kopplungselemente und Höhenjustiersysteme.

2.2 Höhenjustiersysteme

Wie in der Aufgabenstellung vorgesehen, sollten im Rahmen des Demonstratorbaus verschiedene Höhenjustierungen zum Einsatz kommen, um deren Anwendbarkeit auf der Baustelle zu erproben.

Zur Höhenjustierung kamen verschiedene Systeme zum Einsatz:

- Das bekannte HESTER-Kombi-System wird als 3-Punkt-Lagerung verwendet.
- Das HESTER-Kombi-Element wird abgeändert, sodass gleichzeitig auch eine Unterpressöffnung integriert ist.
- Die dritte Variante ist ein Justiersystem, bei dem an der Oberfläche lediglich eine Öffnung für einen Inbusschlüssel zur Höheneinstellung verbleibt. Das Verlegen erfolgt über Gurtbänder, die unter dem Fertigteil durchgeführt werden, sodass keine Transportanker erforderlich sind.

Ziel war es, die Anzahl an Öffnungen an der Oberseite der Fertigteile so gering wie möglich zu halten. Dies war bei den Transportmöglichkeiten (Gurte unter Platte) und den Höhenjustiersystemen zu beachten. Über die 3-Punkt-Lagerung wird die Anzahl der großen Öffnungen verringert, bei der Justierung inklusive Verpressöffnung kann auf einige Kanäle für das Unterpressen verzichtet werden. Bei der Variante Inbus werden die Öffnungen größtmäßig minimiert.

Weitere Varianten für die Kopplung von Fertigteilen sowie die Höhenjustierung wurden nur theoretisch betrachtet.

Die einzelnen Elemente werden im Nachfolgenden beschrieben.

2.2.1 HESTER-Kombi (JT)

Als erstes Element kam das von der Firma BTE Stelcon patentierte HESTER-Kombi zum Einsatz. Es dient der Justierung und dem Transport (JT). Entgegen der bisherigen Vorgehensweise sollte jedoch getestet werden, inwiefern die Lagerung auf vier Punkten durch eine Dreipunktauflagerung ersetzt werden könnte. Hierdurch sollte zum einen die Anzahl großer Öffnungen an der Oberfläche reduziert werden. Zum anderen konnte man in der Vergangenheit teilweise beim Justieren der Fertigteile ein Kippen feststellen, da offenbar nicht sichergestellt werden kann, dass alle Auflagerpunkte gleichmäßig auf Spannung sind. Da die Auflagerebene jedoch durch drei Auflagerpunkte definiert wird, kann hierdurch ein Kippen verhindert werden.

2.2.2 Höhenjustierung mit integriertem Unterpresskanal (JTU)

Zur weiteren Minimierung der Öffnungen an der Oberseite der Fertigteile wurde das System HESTER-Kombi um die Funktion der Unterpressöffnung ergänzt (JTU). Hierdurch konnten vier Verpressöffnungen in der Platte eingespart werden. Der Transport der Fertigteile konnte mithilfe der Transportanker gewohnt problemlos erfolgen, da die Fertigteile an diesen definierten Punkten angehoben werden konnten.

2.2.3 Höhenjustierelement (J)

Die dritte Variante war ein Justiersystem, bei dem an der Oberfläche lediglich eine Öffnung für einen Inbusschlüssel zur Höheneinstellung verbleibt. Da hier keine Transporter im Fertigteil verbaut werden, musste das Verlegen selbst über Gurtbänder erfolgen, die unter dem Fertigteil durchgeführt wurden. Hierfür wurden an den Unterseiten der Fertigteile Gurtführungs Kanäle geplant.

2.2.4 Weitere Justiersysteme

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten weitere Höhenjustiersysteme theoretisch betrachtet werden. Eine Version mit einer Schnecke aus Teflon sollte im Rahmen des Demonstratorbaus erprobt werden. Recherchen haben ergeben, dass das Material unter Last ggf. zu fließen beginnt und die erforderliche Verformungsbeständigkeit nicht gegeben ist. Hinzu kam, dass die Lieferzeiten so groß

waren, dass der geplante Einbau der Fertigteile nicht hätte gehalten werden können. Aus diesen Gründen wurde dieses System nicht weiter betrachtet. Weitere Ideen waren beispielsweise die Höhenjustierung über Ständer, die im Bereich von Plattenecken/Fugenkreuzen angeordnet und so über die Fuge eingestellt werden könnten oder Keile, die im Bereich der Fugen entsprechend der notwendigen Höhe unterschiedlich weit unter die Platte eingedrückt werden. Die Alternativen wurden nach Diskussion der Randbedingungen und Möglichkeiten aber als nicht umsetzbar verworfen.

2.3 Kopplung der Fertigteile untereinander

Um alle Fugen mit dem MLS30 belasten zu können, wurde festgelegt, auch die geplante Längsfugenausbildung (verankert) in Querrichtung auszuführen. Eine zunächst geplante Teilung der Fertigteile in Längsrichtung entfällt somit. Als Ankervariante wird ein Nut-Nut-System mit VS-Boxen verbaut. Für verdübelte Fugen, die den realen Querfugen entsprechen sollen, kommen zwei Systeme zur Erprobung: Nut-Feder und Dübel mit Dübeltasche. Die Fugen zwischen den Platten sollen mit einer maximalen Breite von 12 mm inkl. Fase ausgeführt werden.

2.4 Oberflächen

Bei den Oberflächen wurde festgelegt, dass die Gesamtfläche zur Hälfte mit Waschbeton und zur anderen Hälfte mit einer Besenstrichstruktur versehen wird. Zum Nachweis der Machbarkeit von Fertigteilen mit offenporigem Beton wird in die Fläche im Nachgang ein kreisrundes Fertigteil mit OPB eingebaut. Hierfür war bereits bei der Planung der eckigen Fertigteile eine geeignete Stelle vorzusehen und die Bewehrung entsprechend zu planen, um das spätere Herstellen der runden Aussparung nicht zu erschweren.

2.5 Unterlage/Tragschichten

Als Untergrund kamen eine Schottertragschicht und eine Asphalttragschicht zum Einsatz. Die Untergrundvorbereitung erfolgte vor dem eigentlichen Einbautermin. Der Demonstratorbau war für den 13./14.11.2017 eingeplant.

2.6 Konzept

Die zur Verfügung stehende Fläche auf dem dura-BASt war ~30 m lang und 3,90 m breit. Die Breite der Fertigteile war somit bereits vorgegeben. Die Länge eines einzelnen Fertigteils war hinsichtlich der Transportgrenzen auf maximal 2,55 m zu beschränken, um Sondertransporte zu vermeiden.

Insgesamt sollten daher 12 Fertigteile mit den Abmessungen von ~2,505 m x 3,90 m x 0,24 m hergestellt und eingebaut werden.

Wie zuvor aufgeführt, wurden Kopplungs- und Höhenjustierelemente variiert. Zudem erhielten die Fertigteile verschiedene Oberflächen und wurden auf unterschiedlichen Tragschichten verlegt. In Bild 2-1 sind die Variationen in den einzelnen Fertigteilen dargestellt.

Die Fertigteile schließen mit dem Fertigteil 1 (siehe Bild 2-1) an eine bereits bestehende Fertigteilreihe an und werden über ein Nut-Feder-System miteinander gekoppelt. Am Ende der Fertigteilreihe erfolgt der Übergang auf eine Asphaltkonstruktion, weshalb hier keine Kopplung vorgesehen werden musste.

2.7 Ausführungspläne/Bauablaufplan

Auf Basis der Grobplanung wurde mit den Beteiligten ein Bauablaufplan erstellt. Insbesondere die Zeitkette von Erstellung der Schal- und Bewehrungspläne, Herstellung der Fertigteile, Transport der Fertigteile sowie das Verlegen, Ausrichten, Unterpressen und Verfugen wurde geplant. Parallel laufende Baumaßnahmen mussten nicht beachtet werden. Lediglich für das Aufstellen des Mobilkranes musste geklärt werden, ob dieser neben der Einbaufläche auf dem offenporigen Asphalt stehen darf. Da dies nicht möglich war, musste die Aufstellung so erfolgen, dass die Fertigteile rückwärts bis an den Kran rangefahren wurden. Eine Durchfahrt war für andere Fahrzeuge aufgrund der schmalen und mit dem Kran zugestellten Fahrgasse nicht möglich.

Die Untergrundvorbereitung wurde bereits vorab ausgeführt und musste in diese Planung nicht eingeschlossen werden.

Im Nachgang an die großflächige Verlegung der rechteckigen Fertigteile in der Fahrgasse sollte der Einbau des runden Fertigteils mit einer Oberfläche

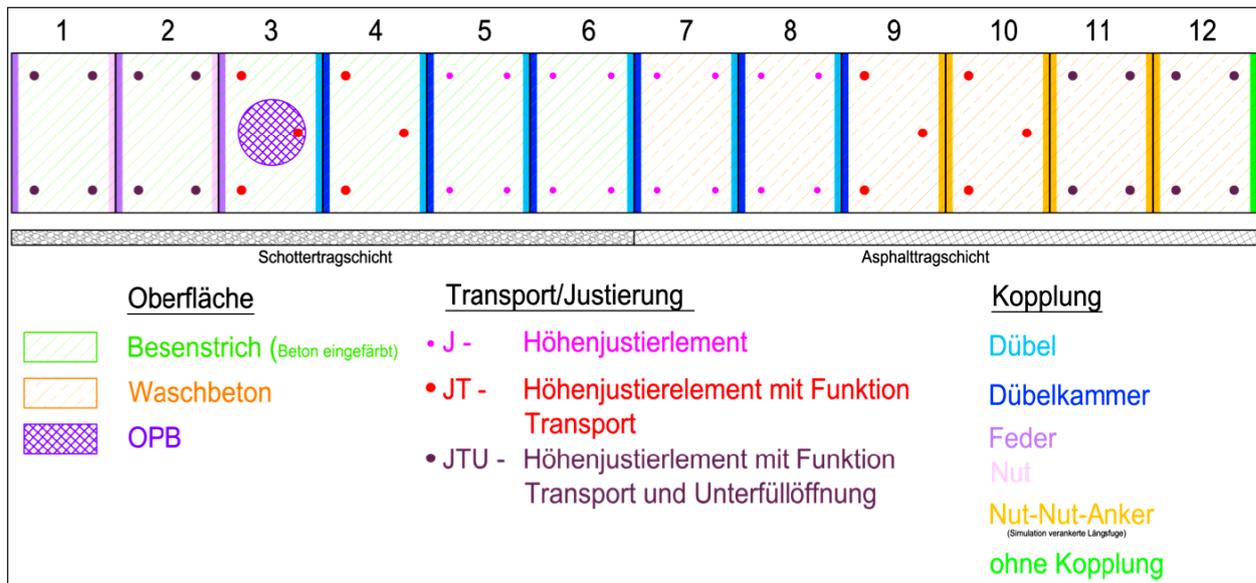


Bild 2-1: Fertigteileihe

aus offenporigem Beton erfolgen. Nachdem die Bedingungen beispielsweise an die Verlegung, den Anschluss an den Bestand und die Entwässerung geklärt waren, wurden die Pläne entsprechend erstellt. Für den Einbau war der 18.+19.04.2018 vorgesehen.

3 Demonstrator – Vorbereitung und Herstellung

3.1 Vorbereitung und Koordinierung

Anhand der Ausführungspläne und des Bauablaufplanes wurde die gesamte Fertigungskette von Erstellung der Pläne über Herstellung der Fertigteile und den Transport bis zum Verlegen und Unterpressen der Fertigteile vorbereitet. Der gesamte Herstellungsprozess wurde kontinuierlich überwacht und die einzelnen Arbeitsschritte entsprechend dem Fortschritt koordiniert.

Die Eröffnung des dura-BASt Areal sollte bereits vor dem Einbau der Fertigteile erfolgen. Aus diesem Grund musste die für die Fertigteile vorbereitete Grube zunächst wieder verfüllt werden. Diese wurde jedoch rechtzeitig zum Einbau der Fertigteile wieder hergestellt.

Um einen reibungslosen Ablauf sicher zu stellen, musste bereits vor dem Einbau festgelegt werden, zu welchem Zeitpunkt welcher Auftragnehmer Arbeiten ausführen soll. Auf diese Weise konnten lan-

ge Stillstandzeiten vermieden und der Vorteil der Bauweise herausgestellt werden.

Auf der Baustelle waren die Arbeitsabläufe entsprechend zu organisieren. Zudem sollte auf unvorhergesehene Situationen schnell reagiert werden, damit der Einsatz zu einem erfolgreichen Ergebnis führt.

Der nachfolgende Einbau des runden Fertigteils musste ebenso entsprechend geplant und durchgeführt werden.

3.2 Unterlage/Tragschichten

Hierzu wurde im ersten Schritt die vorhandene Asphaltbefestigung mittels Großfräse entfernt und fachgerecht entsorgt. Daraufhin wurde in einem weiteren Schritt die vorh. Schottertragschicht durch Fräsen aufgenommen und für den Wiedereinbau seitlich zwischengelagert.

Von Station 0 bis 15 (Fertigteil 12 bis 7) wurde eine Asphalttragschicht 0/32 CS (Hohlraumgehalt < 6 Vol.-%) in einer Stärke von 10 cm mit einem Radfertiger als Unterlage für die Betonfertigteile eingebaut. Von Station 15 bis 30 (Fertigteil 6 bis 1) wurde eine Schottertragschicht 0/32 in einer Stärke von 12 cm mittels Fertiger eingebaut. Die Verdichtung erfolgte mittels Tandemwalze mit einem Betriebsgewicht von ca. 10 t. Der Untersuchungsbericht zur Herstellung der Tragschichten sowie zu den durchgeführten Untersuchungen ist in Anhang 2 aufgeführt.

Für die Schichten ohne Bindemittel wurde nach [EN 13286-47] ein Tragindex (CBR-Wert) von 55 % ermittelt (Bild 3-1).

Das Material entsprach den Anforderungen gem. den. ZTV SoB-StB 04/07 an eine Schottertragsschicht 0/32. Der nach DIN 18121, Teil 1 durch Ofentrocknung zum Zeitpunkt der Probenahme ermittelte natürliche Wassergehalt betrug 1,1 %. Zur Erzielung einer guten Materialverdichtung wurde die STS vor der Hauptverdichtung gewässert. Die

nach DIN 18127 ermittelte Proctordichte betrug 1,965 g/cm³ bei einem optimalen Wassergehalt von 4,6 %.

Kurz nach dem Verdichtungsvorgang wurde das dynamische Verformungsmodul gemäß den [TP BF-StB Teil B 8.3] ermittelt. Hierbei ergab sich ein arithmetisches Mittel von 74 MN/m².

In Anlehnung an die [ZTV Asphalt-StB 07] für Asphalttragschichten unter Beton wurde als Unterlage für die zu verlegenden Fertigteile eine Asphalttragschicht mit einem Größtkorn von 32 mm ausgewählt. Das Material entspricht einer AC 32 TS nach den TL Asphalt-StB 07/13. Gemäß den Anforderungen an Asphalttragschichten unter Beton wurde eine Rezeptur mit einem Hohlraumgehalt < 5 Vol.-% ausgewählt.

Vor dem eigentlichen Einbau wurde die vorhandene Frostschutzschicht profiliert und nachverdichtet.

Die Andienung des Tragschichtmaterials erfolgte mit einem 4-Achser. Für den Einbau wurde eine Vögele Radfertiger vom Typ 1803-3 verwendet, welcher mit einer Hochverdichtungsbohle mit einer Pressleiste ausgestattet ist. Die Hauptverdichtung erfolgte mittels Tandemwalze von der Firma Bomag, Typ BW 174 AP, welche die Tragschicht in einer Stärke von ca. 10 cm mit 3 Walzgängen verdichtete.

Noch vor Beginn der Einbauarbeiten wurde für den offiziellen Eröffnungstermin der duraBAST-Fläche die Versuchsfläche für dieses Projekt (mit vorbereiteten Tragschichten) bis auf OK Kabelkanal mit Frostschutzmaterial aufgefüllt. Dieses überschüssige Material wurde für den Verlegertermin entfernt und die Schottertragsschicht nachverdichtet. Aufgrund der ungünstigen Witterung und durch das erneute Verdichten mit einhergehender Kornverfeine-

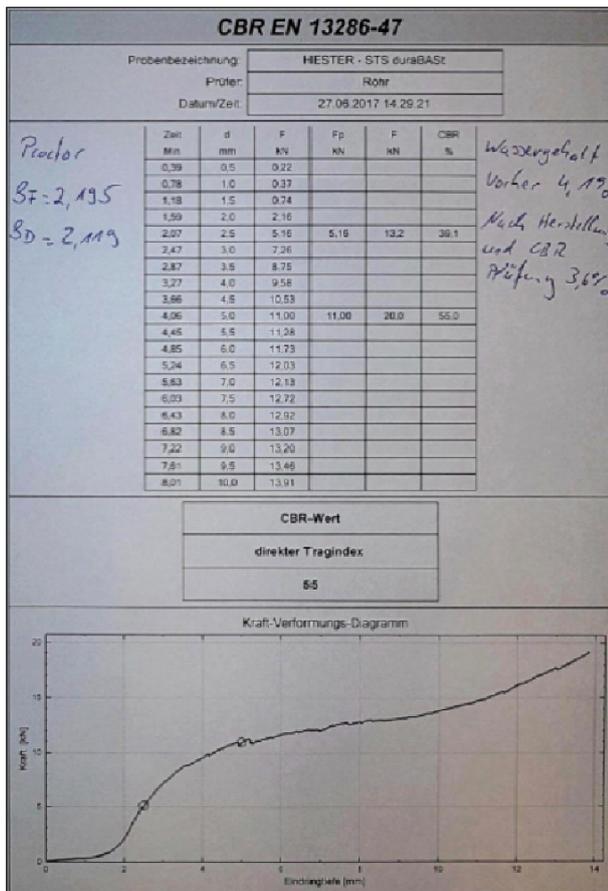


Bild 3-1: Protokoll CBR-Versuch Schottertragsschicht



Bild 3-2: Vorbereitetes Baufeld mit Schotter- und Asphalttragschicht

rung ließen sich nur noch mäßige Tragfähigkeitswerte ermitteln. Die Prüfung erfolgte mittels dynamischen Lastplattendruckversuch, welcher im Mittel bei 54,6 MN/m² lag. Die geringe Wasserdurchlässigkeit des nachverdichteten FS-Materials war am Einbautag durch stehendes Regenwasser im Bau- feld, welches abgepumpt werden musste, deutlich zu erkennen. Die Asphalttragschicht war trotz Nachfräsens mittels Elektrofräse im Übergangsbereich zum ungebundenen Oberbau überhöht. Hierdurch mussten angrenzende Platten außerplanmäßig angehoben werden. Insbesondere der Rückenstützenbeton beim verlegten Kabelkanal führte aufgrund des unterschiedlichen Setzungs- und Verdichtungsverhalten zu einer Imperfektion der Randzone.

In Bild 3-2 ist das vorbereitete Bau- feld dargestellt.

3.3 Herstellung der Fertigteile

Die Fertigteile wurden im Stelcon Werk Pirna gefertigt. Die Grundschalungen wurden als Positivschalung aufgebaut. Gefertigt wurden 6 Fertigteile, eingefärbt mit Besenstrichtextur und 6 Fertigteile mit Waschbetontextur.

Der Produktionsablauf beinhaltet die folgenden Punkte:

- Einschalen
- Seitenschalungen fixieren und sichern
- Trennmittel auftragen
- Aussparungskörper einbauen und mit Sonder- trennmittel behandeln
- Justierelemente einbauen



Bild 3-3: Schablone zur Fixierung der Justierelemente

- Schablonen zur Fixierung der Justierelemente an der Fertigteiloberfläche bereithalten (Bild 3-3)
- Bewehrung mit Abstandhaltern einbauen
- Rückhänge – und Schrägzugbewehrung im Bereich der Justierelemente mit Transportankerfunktion einbauen (Bild 3-4)
- Beton einbauen, bei Waschbeton 2-schichtig mit ca. 5 cm Waschbetonhöhe
- Hochfrequenzverdichten während der Beton- einbringung
- nach Füllung der Schalung Einbauteile mit Schablonen an der Oberfläche positionieren
- nach Betonierabschluss definiertes, überwach- tes Hochfrequenzverdichten

Die Oberflächenbearbeitung beinhaltet die folgen- den Punkte:

- Abziehen der Oberfläche
- Abscheiben der Oberfläche mit elektrischer Tellerscheibe
- erneutes Abziehen, um entstandene Uneben- heiten zu korrigieren
- manuelles Nachglätten
- Ebenheitskontrolle

Da unterschiedliche Oberflächentexturen herge- stellt werden sollten, waren auch eine unterschied- liche Vorgehensweise bei der Nachbehandlung zu berücksichtigen:

- Besenstrichtextur: Das Aufbringen des Besen- striches erfolgte mit einem Anschlaglineal. Auf-



Bild 3-4: Bewehrung im Bereich der Transportanker

grund optischer Veränderungen muss bei Farbzugabe zum Beton auf das Aufbringen eines Nachbehandlungsmittels verzichtet werden. Die Nachbehandlung wurde durch einen abgeschlossenen Folientunnel nahe der Oberfläche realisiert.

- Waschbetontextur: Das Aufbringen des Oberflächenverzögerers – Pantarhol OVZ10 (Ha-Be) erfolgte mit Drucksprühgeräten. Nach Vorversuchen stellte sich eine Wartezeit von ca. 6 Stunden zwischen Betonieren und Ausbürsten als optimal heraus. Die Oberfläche wurde manuell mit Stahlbesen ausgebürstet. Die fertige Oberfläche wurde mit Acrytekt (Cemex- Admixtures) nachbehandelt.

Das Ausschalen der Fertigteile erfolgte jeweils am Folgetag der Betonage. Alle Fertigteile wurden im Werk in auf ca. 15 °C temperierten Hallen gelagert. Nach dem Ausschalen wurden die Fertigteile optisch, auf Maßhaltigkeit und auf Funktion der Ver-

gusskanäle und der Justiereinrichtungen kontrolliert. Waren keine weiteren Nacharbeiten erforderlich, erfolgte die Kennzeichnung mit dem teilzugehörigen Etikett (Bild 3-5).

Etwa 2 bis 3 Tage nach dem Ausschalen erreichte der Beton die zum Sandstrahlen ausreichende Festigkeit. Die Stirnseiten der Fertigteile wurden sandgestrahlt. Im Anschluss erfolgte das Schleifen der oberen 2/2 mm Fase mit einem drehzahlregulierbaren Winkelschleifer und einer weichen Topfscheibe (Bild 3-6).

Zur Vorbereitung der Folierung, die als Schutz der Fertigteile vor allem während des Unterpressens erfolgte, wurde das Fertigteil durch Abblasen mit Druckluft gereinigt. Dabei waren auch alle Aussparungen zu reinigen. Die Schutzfolie wurde mit umlaufendem doppelseitigem Klebeband auf der Fertigteiloberfläche fixiert. Nach verschiedenen Versuchen zeigte eine Kombination aus gut klebendem Band auf Schaumbasis an der Fertigteiloberfläche mit aufgebrachtem gewebeverstärktem Klebeband die bisher beste Lösung zu guter Klebekraft und akzeptablen Ablöseverhalten beim Abziehen.

Zusätzliches Klebeband um die Vergussöffnungen sollte in Kombination mit der Folierung eine Verschmutzung der Fertigteiloberfläche beim Unterpressen verhindern bzw. verringern.

Im Nachgang zu der Hauptlieferung der rechteckigen Fertigteile wurde am 07.04.2018 ein rundes Fertigteil mit einer Oberfläche aus offenporigem Beton hergestellt. Hierzu wurde im Negativ-Verfahren erst der offenporige Beton in die Schalung eingefüllt, dann die Bewehrung eingelegt (Bild 3-7) und frisch in frisch die untere Betonschicht aufgebracht. Zur Entwässerung der OPB-Schicht wurde die



Bild 3-5: Beispielticket vom 29.11.2017



Bild 3-6: Herstellung der Fase



Bild 3-7: Herstellung rundes Fertigteil

Grenze zwischen den beiden Betonarten kegelförmig ausgeführt, damit sich das Wasser in der Mitte sammeln kann. Nach Aushärtung des Fertigteils wurden durch den dichten Beton Kernbohrungen gesetzt, damit das anfallende Wasser später durch den Untergrund abfließen kann.

3.4 Verfahrensanweisung zur Herstellung von Fertigteilen

Die Fertigteile wurden auf Basis der Fertigungspläne hergestellt. Während der Herstellung wurden die einzelnen Arbeitsschritte dokumentiert. Eine Verfahrensanweisung zur Herstellung von Betonfertigteilen wurde erstellt (Anhang 3). Diese fand bereits Eingang in die Entwurfsversion des Regelwerks M BEB-StB im FGSV Arbeitsausschuss 8.5 Erhaltung Betonbauweisen, das sich derzeit in der Überarbeitung befindet.

3.5 Transport

Die Liefertermine, Uhrzeiten und die Lieferfolge wurden mit dem Montagepartner abgestimmt. Die notwendigen Lastaufnahmemittel sowie Verladungsdetails zur geplanten Gurtentladung bei den Teilen 5 bis 8 wurden besprochen und umgesetzt.

Aufgrund der Fertigteilgeometrie (Grenzabmaße größer als 2,47 m) konnten die Fertigteile nicht in



Bild 3-8: Auf Lkw verladene Fertigteile

geschlossenen Fahrzeugen transportiert werden. Die Verladung fand am Donnerstag, den 09.11.17 und am Freitag, den 10.11.17 statt (Bild 3-8).

Die Lieferung des runden OPB-Fertigteils erfolgte am 18.04.2018.

3.6 Verlegen der Fertigteile

Der Einbau der Fertigteile auf dem Gelände des duraBASt erfolgte am 13. und 14. November 2017, wobei am ersten Tag alle Fertigteile verlegt und justiert und diese dann am zweiten Tag mit Silikatharz unterfüllt wurden. Insgesamt wurden 12 Fertigteile mit den Abmessungen von ~2,505 m x 3,90 m x 0,24 m hergestellt und eingebaut.

Ziel war es unter anderem, neue Höhenjustiersysteme in der Praxis zu testen, die unabhängig vom Bestand die höhenmäßige Anpassung ermöglichen. Ein zum Einsatz gekommenes Höhenjustiersystem war das bereits vorhandene HESTER-Kombi, das im Zuge eines anderen Verbundforschungsvorhabens erarbeitet wurde.

3.6.1 Transport mit Gurten

Einige der Platten wiesen auf der Unterseite Gurtkanäle für eine Verlegung mit Hochleistungsgurtbändern auf. Dies war erforderlich, da Justierele-



Bild 3-9: Gurtschlaufen nach Verlegung des Fertigteils

mente eingesetzt wurden, die lediglich der Höhenjustierung dienen sollten, aber keine Transportfunktion erfüllten.

Bei der Verladung der Fertigteile auf Lkws mit Verlegevorrichtungen für Gurte ist darauf zu achten, dass die Kanäle für die Gurte gut zugänglich bleiben und nicht durch Kanthölzer o. ä. blockiert werden, da so ein Anlegen der Gurte nicht mehr oder nur schwer möglich ist. Ggf. kann dieser Vorgang durch ein werksseitig angebrachtes Zugseil vereinfacht werden. Bei ausreichender Fugenbreite ist ein Herausziehen der Gurte aus der verlegten Platte unproblematisch, bei engen Fugen besteht die Gefahr des Kantenabbruchs durch Verkanten der Gurt-schlaufen (Bild 3-9).

3.6.2 Höhenjustierung

Zur Höhenjustierung des Fertigteils wurde die zuvor erwähnte Hohlschraube verwendet. Vor Einbau der Platte mussten im Bereich der Gewinde Stahlplatten in die Schottertragschicht eingedrückt werden, damit die Schrauben eine stabile Auflage hatten. Anschließend konnte die Fertigteilplatte mit einem Schraubenschlüssel angehoben oder gesenkt und auf die richtige Höhe gesetzt werden.

Problematisch an dieser Justiermethode war die Verwendung von zu kleinen Stahlplatten (8x10 cm) sowie einer zu kleinen Aufstandsfläche der Schraubengewinde. Durch die Drehbewegung verschob sich zum einen das gesamte Betonfertigteil aus seiner Lage, zum anderen wurde die Stahlplatte in den Untergrund gedrückt oder ebenfalls in eine andere Position verschoben, sodass teilweise der Kontakt zwischen Stellschraube und Unterlegplatte nicht mehr sicher gewährleistet werden konnte.

Für das HESTER-Kombi-Element (JT) konnte durch den Bau des Demonstrators nachgewiesen werden, dass auch drei Punkte als Aufstellfläche zur Lastverteilung und Höhenjustierung ausreichend sind. Ein Kippen konnte in diesen Platten nicht festgestellt werden. Die Justierung in der Höhe ist jedoch anspruchsvoller, da sich eine Justierung an nur einem Auflagerpunkt wesentlich stärker auf die gesamte Platte auswirkt, als dies bei einer Vierpunktlagerung der Fall ist. Bei dem Ausrichten sind diese Auswirkungen zu beachten. Um einen Höhenversatz zweier benachbarter Platten zu eliminieren, kann es beispielsweise besser sein, einen entfernteren Stellpunkt zu bedienen und nicht den direkt neben dem unebenen Plattenübergang.

Beim Höhenjustierelement mit integriertem Unterpresskanal (JTU) stellte sich die Höhenjustierung in einigen Bereichen als schwierig heraus. Da die Schrauben mit Unterpressöffnung unten geöffnet waren musste eine Stahlscheibe als Auflager unter das Justierelement gelegt werden, um zu verhindern, dass die Öffnungen der Schraube in der Tragschicht verschwinden. Die Schraubenunterseite bohrte sich jedoch aufgrund der scharfkantigen Ausführung in die untergelegte Stahlplatte ein. Hierdurch kam es in einzelnen Fällen zu horizontalen Verschiebungen der Platte während der Höhenjustierung. In einem Fall (Platte 2) lag die Stahlplatte entweder nicht an der richtigen Stelle oder sie ist im Zuge der Justierung verrutscht bzw. wurde verschoben. Hierdurch war eine Höhenjustierung an dieser Stelle unmöglich und musste über eine provisorische Lösung erfolgen. Bei der Höhenjustierung ist folglich weiterer Optimierungsbedarf vorhanden. Das Unterpressen verlief dann jedoch problemlos. Es hat sich gezeigt, dass die Modifizierung des bekannten HESTER-Kombi durchaus Potenzial für eine breitere Anwendung bietet, wenn die beobachteten Defizite beseitigt werden.

Das Verlegen mit Gurten verlief ohne Probleme. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass beim Verladen der Fertigteile auf den Lkw darauf zu achten ist, dass die Gurtkanäle gut zugänglich sind, damit die Platten auf der Baustelle problemlos bewegt werden können. Bei der Höhenjustierung mit reinen Höhenjustierelementen (J) gab es vereinzelt Schwierigkeiten. Da es sich bei den Höhenjustierungen um ein ähnliches System handelt wie bei dem problemlos eingesetzten HESTER-Kombi, ist die Ursache nicht klar erkennlich. Denkbar ist, dass sich die Stahlplatten als Auflager verschoben haben und sich somit die Schraube in den Untergrund bohren konnte. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Unterlage so tief lag, dass die Schraube in kompletter Höhe aus dem Gewinde rausgedreht wurde und somit kein zusätzlicher Hubweg mehr vorhanden war. Hier bedarf es noch weiterer Ursachenforschung.

Es ist festzuhalten, dass unabhängig von der vorhandenen Tragschicht bei allen verwendeten Höhenjustiersystemen Stahlplatten als direkte Unterlage unter dem System genutzt werden sollten, um ein Eindrehen des Justierelements in die Tragschicht zu vermeiden. Diese Platten sind in geeigneter Güte, Dicke und Größe auf der Baustelle vorzuhalten und entsprechend einzusetzen, um ein Verschieben und Durchstanzen zu verhindern. Die

Die Dicke der Stahlplatten ist bei der Planung des Spaltes unterhalb der Platten zu berücksichtigen, um zusätzliche Arbeiten (teilweiser Ausbau von Tragschichtmaterial) und entsprechenden zeitlichen Mehraufwand zu vermeiden.

3.6.3 Abstandshalter

Zur Einhaltung der Fugenabstände kamen Holzkeile, Holzbrettchen, Gummipplatten sowie Kantenschoner zum Einsatz. Mit Holzkeilen ließ sich eine variable Fugenbreite einstellen und sichern, während mit den Kantenschonern aus Blech ein Anprallschutz beim Verlegen von darauffolgenden Platten bestand.

Die letzten Fertigteile wurden etwa eine Woche vor Verlegung im Werk hergestellt. Durch die Verwendung von Holzkeilen, einem Abstandshalter mit kleiner Belastungsfläche, kam es bereits durch die eingebrachten Torsionskräfte im Zuge der Ausrichtungsarbeiten zu Kantenabplatzungen (Bild 3-10) am noch jungen Beton.

Es ist für einen besseren Kantenschutz eine größere Lastverteilungsfläche, durch Verwendung der Kantenschoner in Verbindung mit Keilen anzustreben. In diesem Hinblick sollte auch ein möglichst

großer Nacherhärungszeitraum zwischen Fertigteilherstellung und -einbau liegen, um so die Widerstandsfähigkeit der Kanten zu erhöhen.

3.6.4 Kopplung

Zur Verbindung der Platten untereinander wurde eine Kombination aus werkseitig hergestellten Aussparungen (im bereits verlegten Teil) und Dübelkammern (im anzuschließenden Teil) verwendet. In die Aussparungen wurden Dübel eingesteckt und somit bereits in der passenden Höhenlage fixiert. Der Hohlraum zwischen Dübelkammer und Dübel wurde beim Unterpressen anschließend verfüllt und somit der Kraftschluss hergestellt. Der Durchmesser der Aussparungen sollte dem Dübeldurchmesser entsprechen und war leicht konisch. Durch Sandeinlagerungen in der Aussparung, eines etwas zu knapp ausgeführten Durchmessers sowie dem Luftschluss beim Einstecken des Dübels, konnte dieser nicht weit genug eingeschoben werden. Infolgedessen ragte dieser zu weit aus der Aussparung heraus, um in der Dübelkammer Platz zu finden und musste vor dem Einsetzen der nächsten Platte gekürzt werden (Bild 3-11). Eine zur Querkraftübertragung erforderliche Mindesteinbindelänge der Dübel war jedoch weiterhin gegeben.



Bild 3-10: Beim Einbau abgeplatzte Betonkante



Bild 3-11: Kürzen eingebrachter Dübel

Zwei alternative Verbindungsmöglichkeiten waren ein Nut- und Feder- bzw. ein Nut-Nut-System. Dabei wurden die Fertigteile ineinandergesteckt oder einfach nebeneinandergelegt und die Hohlräume nach dem Verlegen ebenfalls verpresst.

Zur Verankerung kam ein Nut-Nut-System mit beidseitig angebrachten Stahlschlaufen (VS-Box) zum Einsatz, um eine in den Quertugen die Funktion einer Längsfuge simulieren zu können.

3.6.5 Einbau des runden Fertigteils

Im Nachgang zu den Arbeiten im November 2017 fand am 18. und 19. April 2018 das Verlegen des runden Fertigteils mit offenporigem Beton (Bild 3-12) statt. Das Fertigteil wurde in die Platte Nr. 3 eingesetzt. Hierfür wurden bereits bei der Planung dieser Platte die Bewehrung entsprechend ausgespart, damit mittels einer Kernbohrung der notwendige Raum für das runde Fertigteil geschaffen wird. Es kam ein Spezialkernbohrgerät (Bild 3-13) zum Ein-



Bild 3-12: Rundes Fertigteil mit OPB-Oberfläche



Bild 3-13: Bohren der Aussparung für rundes Fertigteil

satz, dass mit einer Bohrkronen mit einem Durchmesser von 162 cm bestückt werden kann. Beim Bohren traten jedoch massive Probleme auf. Der Vortrieb der Bohrkronen war sehr gering und etwa auf halber Tiefe verlor die Bohrkronen sämtliche Diamantsegmente. Dies führte dazu, dass die Arbeiten am Nachmittag eingestellt werden mussten, um die Bohrkronen mit neuen Segmenten bestücken zu lassen. Auch am zweiten Tag gingen die Bohrarbeiten nur langsam voran. Erneut wurden sämtliche Segmente so sehr belastet, dass sie von der Bohrkronen abbrachen. Nachdem die Bestandsplatte zum größten Teil bereits durchbohrt war, erfolgte der Ausbau des Bohrkerns mittels Presslufthammer. Da die Bohrung bereits bis in eine ausreichende Tiefe ausgeführt werden konnte, waren die Kanten der Aussparung im oberen Bereich geradlinig hergestellt, sodass der Beton hier sauber entfernt werden konnte. Beim Ausbau stellte sich die Ursache für die Probleme beim Bohren heraus. Die Flächenbewehrung des ersten Fertigteils wurde zwar im Bereich des späteren runden Fertigteils ausgespart, jedoch eine Platte mit Drei-Punkt-Auflagerung gewählt. Dies hatte zur Folge, dass einer der Schwerlastanker, der zum Verlegen der rechteckigen Fertigteile notwendig war, im herauszutrennenden Bereich lag. Somit lief die massive Rückhängebewehrung des Flachstahlankers direkt durch die Schnittfläche der Bohrkronen. Aufgrund des 45° Winkels nach unten erhöhte sich die zu durchtrennende Stahlfläche



Bild 3-14: Entwässerungseinrichtung für rundes Fertigteil



Bild 3-15: Eingesetztes rundes Fertigteil

noch weiter, wodurch ein Durchschneiden unmöglich war.

Nach dem Ausbruch des Bohrkerns wurde der Untergrund vorbereitet. In die Mitte des Bohrloches wurde zur besseren Entwässerung durch die Schottertragschicht ein Rohr DU 150 durchgestoßen und das im Inneren vorhandene Material durch Filterkies ersetzt (Bild 3-14). Um das Eindringen von Unterpressmaterial in die Entwässerungsöffnung zu verhindern, wurde zur Abdichtung am oberen Rand des Rohres eine Dichtlippe aus Kunststoffmaterial angebracht. Anschließend wurde das Fertigteil mittels Gurtschlaufen eingehoben (Bild 3-15). Die höhenmäßige Ausrichtung erfolgte über eine reine Justiervorrichtung (s. Kapitel 2.2.3 Höhenjustierelement) an drei Auflagerpunkten. Das Silikatharz wurde schließlich über die Fugen eingebracht.

3.6.6 Verbesserungspotenzial bei der Verlegung der Fertigteile

Verbesserungspotenzial besteht weiterhin im Schutz der Kanten vor Kantenabplatzungen im Zuge des Fertigteil einbaus. Die hier als Abstandhalter verwendeten Holzkeile führen häufig zu Abplatzungen (Bild 3-16) unterschiedlicher Ausprägung an der Oberfläche der Fertigteile, die sich insbesondere auf das Erscheinungsbild der Gesamtoberfläche negativ auswirken. Zukünftig sollten kantenschonendere Systeme entwickelt und verwendet werden, um Abplatzungen zu vermeiden. Erste positive Erfahrungen wurden mit einem Metallprofil (siehe Bild 3-17) mit aufgeklebter Gummimatte gemacht, die in kleiner Anzahl auf der Baustelle vorhanden waren.

In den Fertigteilen 3 bis 8 wurden Aussparungen vorgesehen, in welche Dübel zur Kopplung mit den anschließenden Fertigteilen eingesetzt werden sollten. Nach dem Einsetzen der ersten Dübel wurde



Bild 3-16: Abplatzung am Plattenrand durch Holzkeil

festgestellt, dass diese nicht bis zu der vorgesehenen Länge in die Aussparungen passten. Daraufhin wurden die Aussparungen gesäubert (siehe Bild 3-18), um lose Teile zu entfernen, was jedoch nicht den gewünschten Erfolg brachte. Da der Überstand der Dübel weiterhin zu groß für die Dübeltaschen war, mussten die Dübel gekürzt werden (siehe Bild 3-19). Aus diesem Grund sollte im Zuge der Herstellung der Fertigteile verstärkt auf die Maßhal-



Bild 3-17: Metallprofil zum Kantenschutz



Bild 3-18: Säubern der Aussparungen für die Dübel



Bild 3-19: Abtrennen der Dübel



Bild 3-20: Teil des Höhenjustierelements JTU

tigkeit der Aussparungskörper geachtet werden, um somit Zusatzarbeiten zu vermeiden.

Das erstmals getestete Höhenjustiersystem JTU, das die Funktionen Justierung, Transport und Unterpressen miteinander kombiniert, wird an der Unterseite des Fertigteils auf eine Stahlplatte aufgesetzt, um ein Eindrehen in den Untergrund zu vermeiden. Aufgrund der scharfkantigen Ausführung am unteren Ende (siehe Bild 3-20) verkantete sich der Bolzen beim Drehen (Justieren) mit dieser Platte, was dazu führte, dass durch jede weitere Drehung die Stahlplatte verschoben wurde. Auf diese Weise wurde an einer Stelle diese so weit verschoben, dass sie nicht mehr als Auflagefläche genutzt werden konnte. Da das betroffene Fertigteil aufgrund eines Nut-Feder-Systems an einer Fertigteilseite nicht mehr ausgehoben werden konnte, musste eine alternative Justierlösung hergestellt werden. Als Sofortmaßnahme wurden die unteren Enden der Bolzen geglättet, um ein Einschrauben in die Stahlplatten zu vermeiden. Bei der zukünftigen Verwendung des Höhenjustiersystems JTU sollte daher darauf geachtet werden, dass ein Verschieben und Durchstanzen der Stahlplatten verhindert wird. Dies könnte zum Beispiel durch die Verwendung von dickeren Stahlplatten und/oder Platten höherer Güte erfolgen.

Generell sollte beim Verlegen der Fertigteile darauf geachtet werden, Beschädigungen auf der Baustelle an den Fertigteilen oder benachbarten Bauteilen zu vermeiden.

3.7 Unterpressen der Fertigteile

3.7.1 Hinweise zum Unterpressen

Am 14.11.2017 wurden die am Vortag verlegten Fertigteile in der Höhe feinjustiert. Die Platten wurden anschließend entgegen der Verlegerichtung

von Platte 12 ausgehend unterpresst. Begonnen wurde im höhenmäßigen Tiefpunkt des Abschnitts, um zu verhindern, dass das Unterpressmaterial unkontrolliert in Gefällerrichtung unter den Platten verläuft und so keine vollflächige Auflagerung der Fertigteile erreicht werden kann. Die Höhenjustierung und das Unterpressen erfolgten teilweise auch parallel. Während des Unterpressens wurde die Höhe der Platten durchgehend über ein Lasernivellement überwacht, um bei Bewegungen der Platten in der Vertikalen entsprechend reagieren zu können.

Bei Platte 12 ist bei einem der JTU das Material durch das gesamte Gewinde bis an die Oberfläche ausgetreten. Die Ursache dafür konnte nicht gefunden werden. Bei allen anderen JTU verlief das Unterpressen planmäßig und durch die Schutzmatte wurde eine Verschmutzung der Oberfläche durch Silikatharz vermieden.

Bei Platte 11 wurde eine der JTU nicht verwendet, da das Unterpressmaterial bereits durch die Fugen und die Nachbaröffnungen austrat. Hier wurde von einer vollständigen Unterfüllung ausgegangen. Beim Herausdrehen der nicht zum Unterpressen genutzten Schraube wurde allerdings festgestellt, dass diese sauber waren und keinerlei Hinweise auf Unterpressmaterial vorlagen. An dieser Stelle besteht daher die Möglichkeit eine punktuellen Hohllage. Beim Unterpressen sollten daher immer alle vorgesehenen Unterfüllöffnungen genutzt werden, um eine vollflächige Auflagerung zu erhalten.

In der Platte 10 wurden die Justierelemente nur geringfügig herausgedreht. Der Asphalt war also sehr dicht an der Unterseite der Fertigteile.

Auf Platte 8 wiederum mussten die Schrauben teilweise so weit herausgedreht werden, dass es ein Knackgeräusch gab. Dies geht vermutlich auf einen zu hohen Höhenunterschied zwischen Auflage und Fertigteil zurück, der dazu führte, dass die Schraube aus dem Gewinde gedreht wurde. Hier war eine Höhenjustierung nicht mehr möglich und es entstand eine Stufe zu den Nachbarplatten.

Neben der bereits oben erwähnten Problematik der Höhenjustierung an der Platte 2 gab es keine weiteren Besonderheiten.

Sämtliche Höhenjustierelemente wurden nach dem Unterpressen entspannt, sodass die Auflage auf dem Silikatharz sichergestellt wurde. Punktlasten auf den Justiereinrichtungen sollten nicht vorhanden sein.

3.7.2 Verbesserungspotenziale im Zuge des Unterfüllvorgangs

Verbesserungspotenziale beim Unterfüllvorgang sind weniger beim Vorgang an sich zu finden, sondern eher beim Schutz der Oberfläche vor auslaufendem bzw. sich ausbreitendem Silikatharz. Die auf der Oberfläche aufgebrachte Folie reicht oftmals nicht aus, um die Oberfläche von austretendem Silikatharz zu schützen. Insbesondere konnte bei der Baumaßnahme beobachtet werden, dass sich das Silikatharz um die Verpressöffnung herum unter der Folie ausbreitet (siehe Bild 3-22). In Zukunft muss daher eine geeignete Schutzmaßnahme gefunden werden, um das Verlaufen des Silikatharzes an der Oberfläche zielsicher und einfach zu vermeiden.

Des Weiteren musste festgestellt werden, dass durch das auf die Oberfläche um die Verpressöffnungen herum aufbrachte Klebeband Teile der Oberfläche abgerissen wurden (siehe Bild 3-21). Um solche Beschädigungen zu vermeiden, sollte zukünftig angestrebt werden, möglichst lange Zeit zwischen der Herstellung und dem Einbau der Fertigteile zu erhalten.



Bild 3-21: Abplatzung an Oberseite des Fertigteils beim Entfernen des Klebestreifens



Bild 3-22: Silikatharz läuft unter der Folie entlang

Vielversprechend war jedoch der Einsatz der JTU-Elemente, deren Öffnung an der Oberseite lokal mit einer Moosgummiplatte geschützt wurde, um so die Oberfläche vor austretendem Silikatharz zu schützen. Die Elemente sind leicht aufzulegen, rückstandslos zu entfernen und weitgehend wiederverwendbar.

3.8 Fugenverschluss

3.8.1 Hinweise zum Fugenverschluss

Im Anschluss an die Unterpressarbeiten wurden die zu vergießenden Fugen verfüllt. Für die Fuge am Kabelkanal wurde kalt verarbeitbare Fugenmasse genutzt. Die Fuge zum Asphalt wurde mit bituminöser Fugenmasse verfüllt. Die Asphaltflanke war abgeschragt, sodass kein paralleler Flankenverlauf, wie bei herkömmlichen Baumaßnahmen üblich, vorlag. Die Fugenbreiten variierten daher zwischen 4 und 7 cm. Der Verguss erfolgte in zwei Lagen.

Für die Querfugen wurde der Verschluss mit Fugenprofilen gefordert, der am 16.11.2017 ausgeführt wurde. Trotz des Versuchs die Fertigteile genau auszurichten, waren dennoch Breitenschwankungen im Verlauf der Fugenlänge vorhanden. Da Fugenprofile eine hohe Anforderung an die Genauigkeit der Fugenbreite haben, mussten sämtliche Fugen nachgeschnitten werden, wobei sich am breiten Fugenende orientiert werden musste. Die Fugen mussten auf 12 mm aufgeweitet werden. Anschließend wurden die Fugenprofile eingebaut. Das Ziel einer maximalen Fugenbreite (inkl. Fase) von insgesamt 12 mm konnte leider nicht erreicht werden. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die aus der Verlegung resultierenden Fugen spalten bereits zu breit waren. Zum anderen mussten die Fugen aufgrund der Gleichmäßigkeit nachgeschnitten werden, was eine zusätzliche Breite verursachte. Bei einem Fugenverschluss mit flüssigen Fugenfüllstoffen wären weitgehend geringere Fugenbreiten realisierbar gewesen.

3.8.2 Verbesserungspotenziale im Zuge des Fugenverschlusses

Für die Fugenvergussarbeiten bzw. für den Einbau des Profils waren keine Verbesserungsvorschläge ableitbar. Lediglich ist anzumerken, dass es für Fugen mit ungleichmäßigen Breiten besser erscheint, flüssige Fugenfüllstoffe zu verwenden. Beim Verle-

gen besteht noch Optimierungsbedarf, was die Fugenjustierung angeht. Das Problem mit ungleichmäßigen Fugen wird aber insbesondere bei mehreren Fertigteilbahnen nebeneinander verstärkt auftreten. Damit ist auch zu rechnen, wenn Fertigteile nicht in einer geraden Strecke, sondern in Radien verlegt werden. Flüssige Fugenfüllstoffe sind daher zu bevorzugen, da keine exakten Maße eingehalten werden müssen.

Nach jedem Belastungszyklus wurden die Tragfähigkeiten ermittelt, um die Auswirkungen der Belastungen auf die Konstruktion abschätzen und das FE-Modell somit kalibrieren zu können.

Es war vorgesehen, die Fertigteile an insgesamt vier Stellen zu belasten, um so unterschiedliche Kopplungs- und Tragschichtvarianten abbilden zu können. Bild 4-2 zeigt die Stellen der Fertigteilreihe, die mit dem MLS30 belastet wurden.

4 Monitoring

4.1 Belastung mit MLS

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) führte zeitraffende Belastungen auf den Fertigteilen mithilfe des Großversuchsstands Mobile Load Simulator MLS30 (Bild 4-1) durch.



Bild 4-1: MLS30 auf den Fertigteilplatten

4.2 Messtechnische Untersuchung Neuzustand

Vor dem Einbau der Fertigteile wurde die Tragfähigkeit der beiden Tragschichten mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) gemessen. Die vollständige und gleichmäßige Verfüllung aller Hohlräume (zwischen Platte/Untergrund und an Kopplungselementen) wurde während des Unterpressens in den Fugen und den offenen Rändern beobachtet. Nach dem Ausrichten der Platten und nach dem Unterpressen wurden die Platten höhenmäßig vermessen. Unmittelbar nach Abschluss der Bauphase wurde der Neuzustand messtechnisch untersucht und dokumentiert. Hier wurden insbesondere die Tragfähigkeiten, die Verbindungen zwischen den Fertigteilen, die Ebenheit der Übergänge zwischen benachbarten Platten und der Zustand der Fugen betrachtet.

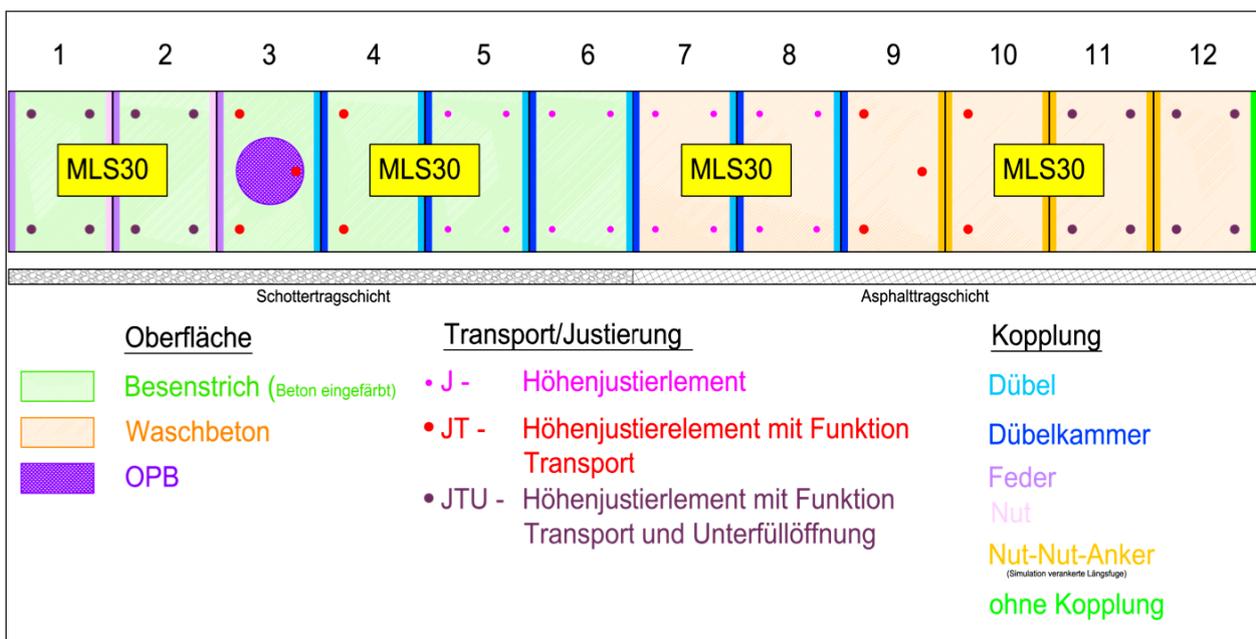


Bild 4-2: Belastungsstellen MLS30

Die Tragfähigkeitsmessungen erfolgten mit dem FWD mit einer Stoßbelastung von 50 kN, 75 kN bzw. 100 kN.

Die Auswertungen der Messungen sind in Anhang 5 enthalten.

Nachdem beim Einbau das Unterpressmaterial in den jeweils benachbarten Fugen und teilweise Verpressöffnungen austrat und auch die FWD-Messungen ein sehr gleichmäßiges Bild ergab, konnte von einer gleichmäßigen Verteilung des Silikatharzes und einer vollflächigen Auflage ausgegangen werden, sodass auf die Entnahme von Bohrkernen verzichtet werden konnte.

Die Nivellierung vor und nach dem Unterpressen ergab, dass die Lage generell sehr gut war. Die Höhenjustierung funktionierte weitestgehend, was daran zu erkennen war, dass es nur geringe Stufen gab, die meistens deutlich unter 4,0 mm betragen. Auf der rechten Seite zwischen Platte 2 und Platte 3 war die Höheneinstellung nur suboptimal gelungen und die Stufe betrug zunächst ca. 7,7 mm. Hier gab es beim Einbau der Fertigteile Probleme mit dem Justiersystem. Eine Stellschraube konnte nicht zur Höheneinstellung verwendet werden, da sie sich vermutlich durch die Stahlplatte durchgestanzt hatte. Hier musste über einen Träger, der auf der Nachbarplatte auflag, eine improvisierte Höhenjustierung erfolgen, sodass die Stufe nach den Unterpressarbeiten nur noch 1,1 mm betrug. Nach Abschluss der Unterpressarbeiten konnte festgestellt werden, dass alle bis auf eine Stufe die Anforderungen von maximal 4,0 mm erfüllten. Meist lagen die Werte der Stufen sogar unter 3 mm. Lediglich zwischen den Platten 4 und 5 war die Stufe am linken Rand 6,1 mm groß.

4.3 Monitoring (FWD, Versätze, Fugen etc.)

Durch die BAST wurden mehrere Belastungszyklen auf dem Testfeld mit dem MLS30 durchgeführt. Neben der oben genannten Messung im Neuzustand wurden nach 175.000, 250.000 und 500.000 Überrollungen jeweils weitere FWD-Messungen durchgeführt, um die Entwicklung der Auflagerbedingungen und der Querkraftübertragung der Fertigteile zu analysieren. Die Messergebnisse fanden weiterhin Eingang in die Kalibrierung des FE-Modells. Die Untersuchungsberichte zu den FWD-Messungen sind in der Anhang 5 enthalten.

Die FWD-Messungen wurden zu den Zeitpunkten gemäß Tabelle 4-1 durchgeführt.

In Bild 4-3 bis 4-9 sind außerdem zur Veranschaulichung der Messergebnisse die Gesamtmittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a , des Bettungsmoduls E_0 , des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung und der Relativdeflexion $\Delta D = D_8 - D_9$ ohne die Messergebnisse an der Querfuge und der Plattenecke am FT 12 sowie an der Querfuge am runden FT 13 einander gegenübergestellt.

Grundsätzlich ergibt sich auf OK Fertigteile auf Schottertragschicht eine geringere Tragfähigkeit E_a als auf OK Fertigteile auf Asphalttragschicht (Bild 4-3).

Diese Unterschiede können darauf zurückgeführt werden, dass auch der Bettungsmodul E_0 unter den Fertigteilen auf STS niedriger ist als unter den Fertigteilen auf ATS (Bild 4-4).

Prinzipiell ist der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung (Bild 4-5) vom Herbst 2017 bis zum Sommer 2019 zurückgegangen. Die Orientierungswerte des Wirksamkeitsindex an den Querfugen nach [AP Trag C2.2] für Betondecken auf ATS von

Datum der Messungen	Uhrzeit der Messungen	Lufttemperatur	Oberflächentemperatur	Zeit nach FT-Einbau	Lastwechsel mit MLS30
14.11.2017	16:30 bis 17:30 Uhr	10,4 °C bis 10,7 °C	11,0 °C bis 12,4 °C	1 Std.	0
16.10.2018	16:55 bis 18:00 Uhr	24,2 °C bis 25,3 °C	23,3 °C bis 28,7 °C	336 Tage	175.000 auf FT 4 + 5 und FT 8 + 9
08.11.2018	07:45 bis 08:45 Uhr	12,5 °C bis 12,9 °C	12,8 °C bis 15,0 °C	359 Tage	250.000 auf FT 1 + 2 und FT 4 + 5 sowie auf FT 8 + 9 und FT 10 + 11
29.04.2019	11:45 bis 12:45 Uhr	16,7 °C bis 21,2 °C	18,6 °C bis 21,7 °C	531 Tage 1,45 Jahre	500.000 auf FT 1 + 2 und FT 4 + 5 sowie auf FT 8 + 9 und FT 10 + 11
15.08.2019	11:00 bis 12:00 Uhr	21,5 °C bis 22,7 °C	22,8 °C bis 24,0 °C	639 Tage 1,75 Jahre	750.000 auf FT 1 + 2 und FT 4 + 5 sowie auf FT 8 + 9 und FT 10 + 11

Tab. 4-1: Zeitpunkte der FWD-Messungen

$W \geq 90\%$ bzw. auf ToB von $W \geq 83\%$ werden annähernd eingehalten.

Bezogen auf die unterschiedlichen Fugenausführungen ergibt sich Bild 4-6.

Der äquivalente Verformungsmodul ist wegen des unterschiedlichen Bettungsmoduls E_0 (Bild 4-7) an den Querfugen und Plattenecken auf OK Fertigteile auf STS geringer als auf OK Fertigteile auf ATS (Bild 4-6). Daher sind die verschiedenen Fugenausführungen nur bei gleicher Tragschicht miteinander vergleichbar.

Hiernach weist die Nut-Feder-Fuge auf STS trotz geringeren Bettungsmoduls etwa das gleiche Tragverhalten wie die Dübeltaschen-Fuge auf STS.

Die Anschlussfuge des runden Fertigteils auf STS zeigt im Sommer 2019 trotz des etwas geringeren Bettungsmoduls ungefähr die gleiche Tragfähigkeit wie die Nut-Feder-Fuge auf STS.

Auch auf den Fertigteilen auf Asphalttragschicht wurde im Sommer 2019 auf der Nut-Nut-Fuge trotz etwas geringeren Bettungsmoduls ein etwas höherer äquivalenter Verformungsmodul als auf der Dübeltaschen-Fuge festgestellt.

An der Anschlussfuge zum Asphalt auf ATS wurde trotz etwa gleichen Bettungsmoduls ein geringerer äquivalenter Verformungsmodul E_a als an den Dübeltaschen-Fugen und Nut-Nut-Fugen ermittelt.

Auch hinsichtlich der Querkraftübertragung kann die Nut-Feder-Fuge auf STS besser bewertet werden als die Dübeltaschen-Fuge auf STS, da letztere den Orientierungswert des [AP Trag C 2.2] für ΔD überschreitet (Bild 4-8 und Bild 4-9).

An der Anschlussfuge des runden Fertigteils auf STS wurde andererseits eine Querkraftübertragung gemessen, die sich zwischen der Querkraftübertragung der Nut-Feder-Fuge und der der Dübeltaschen-Fuge befindet.

Analog zum äquivalenten Verformungsmodul ist auch die Querkraftübertragung der Dübeltaschen-Fuge auf ATS geringer als die der Nut-Nut-Fuge auf ATS.

Zur Abschätzung des Einflusses der Lastwechsel des MLS 30 auf das Tragverhalten sind nachfolgend in Bild 4-10 bis Bild 4-13 die Tragfähigkeitsparameter der belasteten Querfugen und zugehörigen Plattenecken grafisch dargestellt.

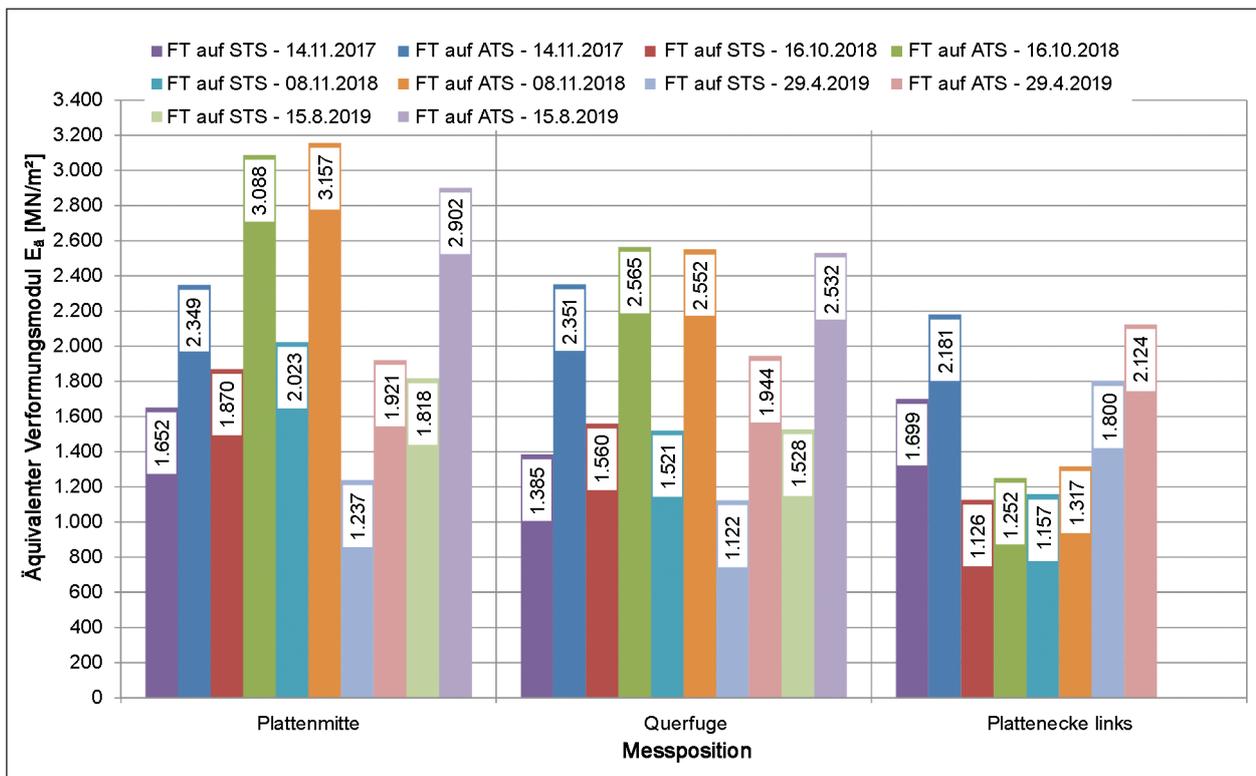


Bild 4-3: Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a [MN/m²] (ohne Querfuge und Plattenecke am FT 12 sowie Querfuge am runden FT 13)

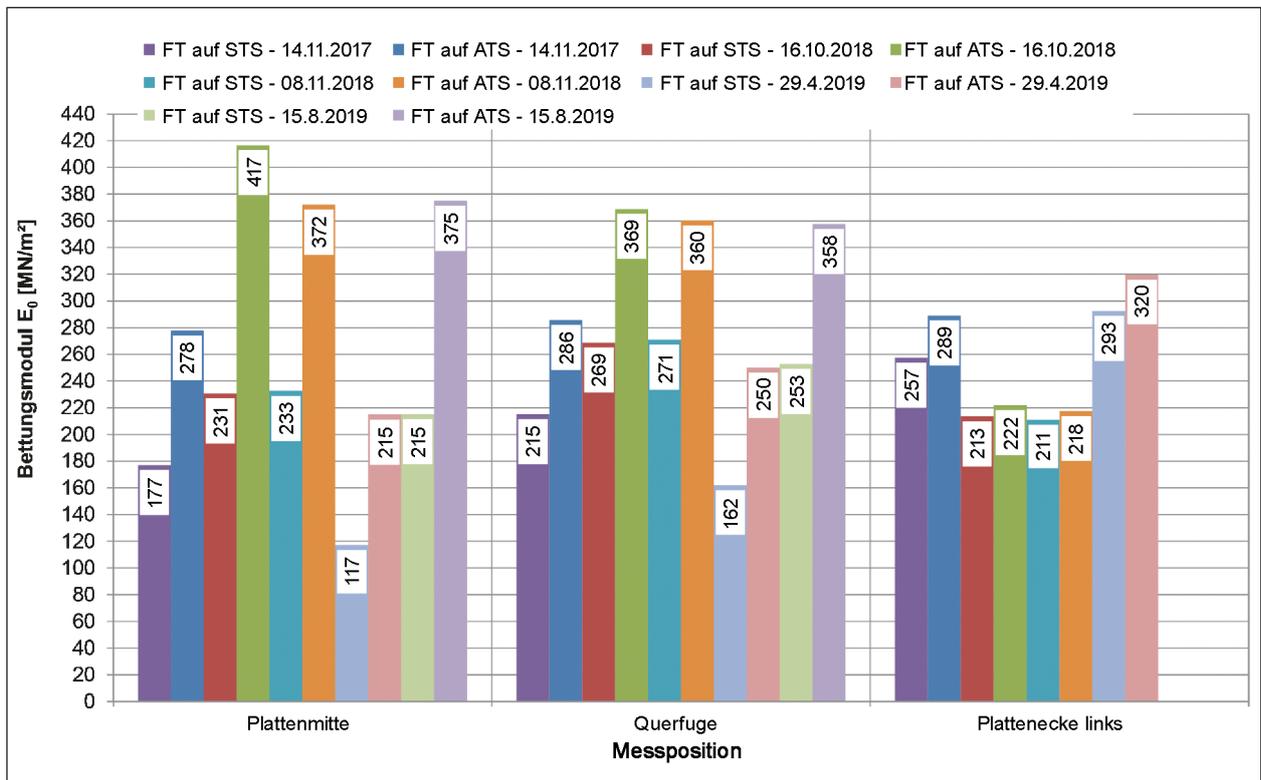


Bild 4-4: Mittelwerte des Bettungsmoduls E_0 [MN/m²] (ohne Querfuge und Plattenecke am FT 12 sowie Querfuge am runden FT 13)

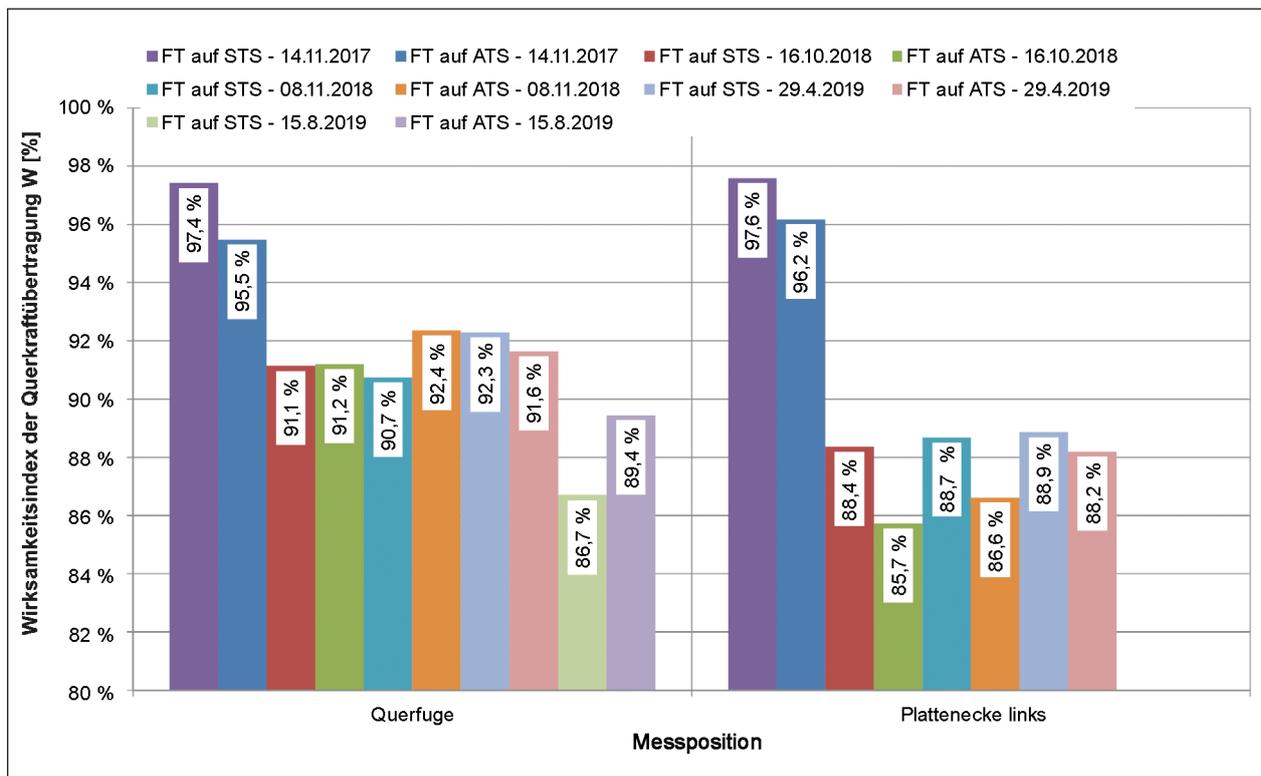


Bild 4-5: Mittelwerte des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung [%] (ohne Querfuge und Plattenecke am FT 12 sowie Querfuge am runden FT 13)

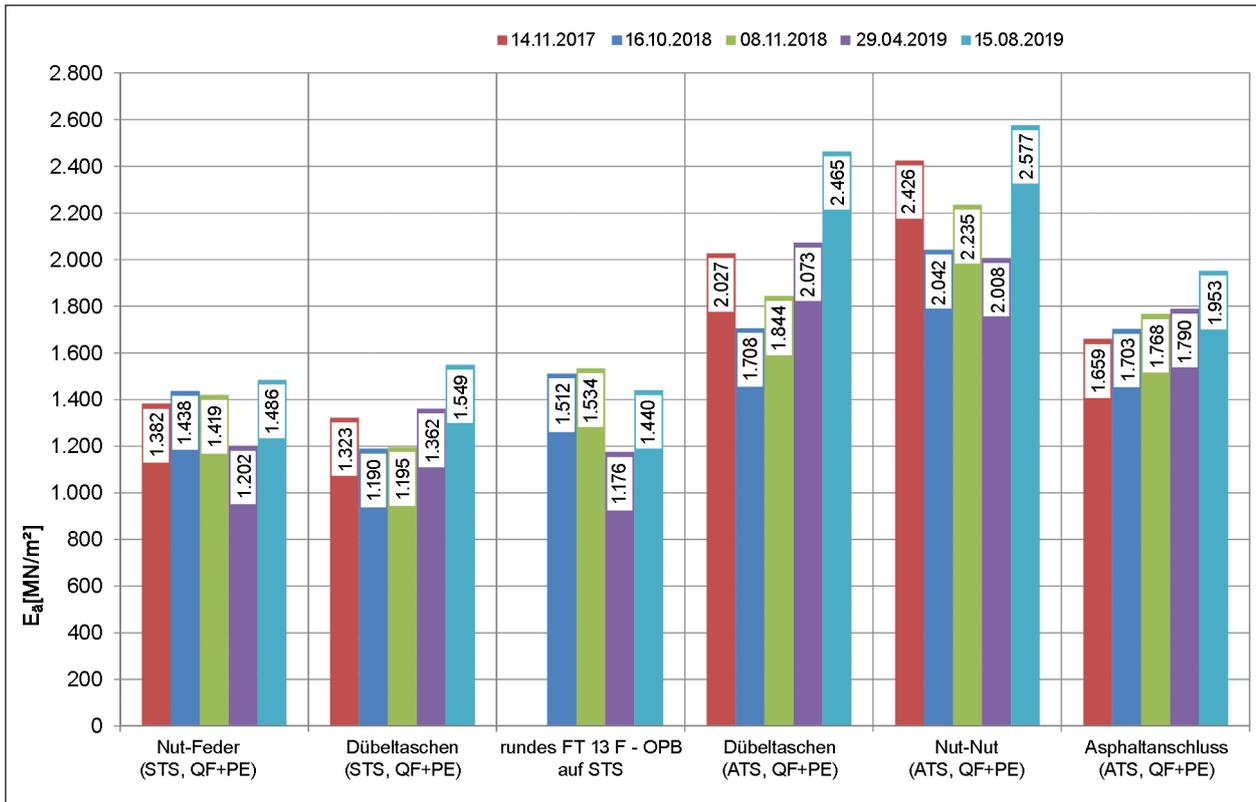


Bild 4-6: Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a [MN/m²] für die verschiedenen Fugenausführungen

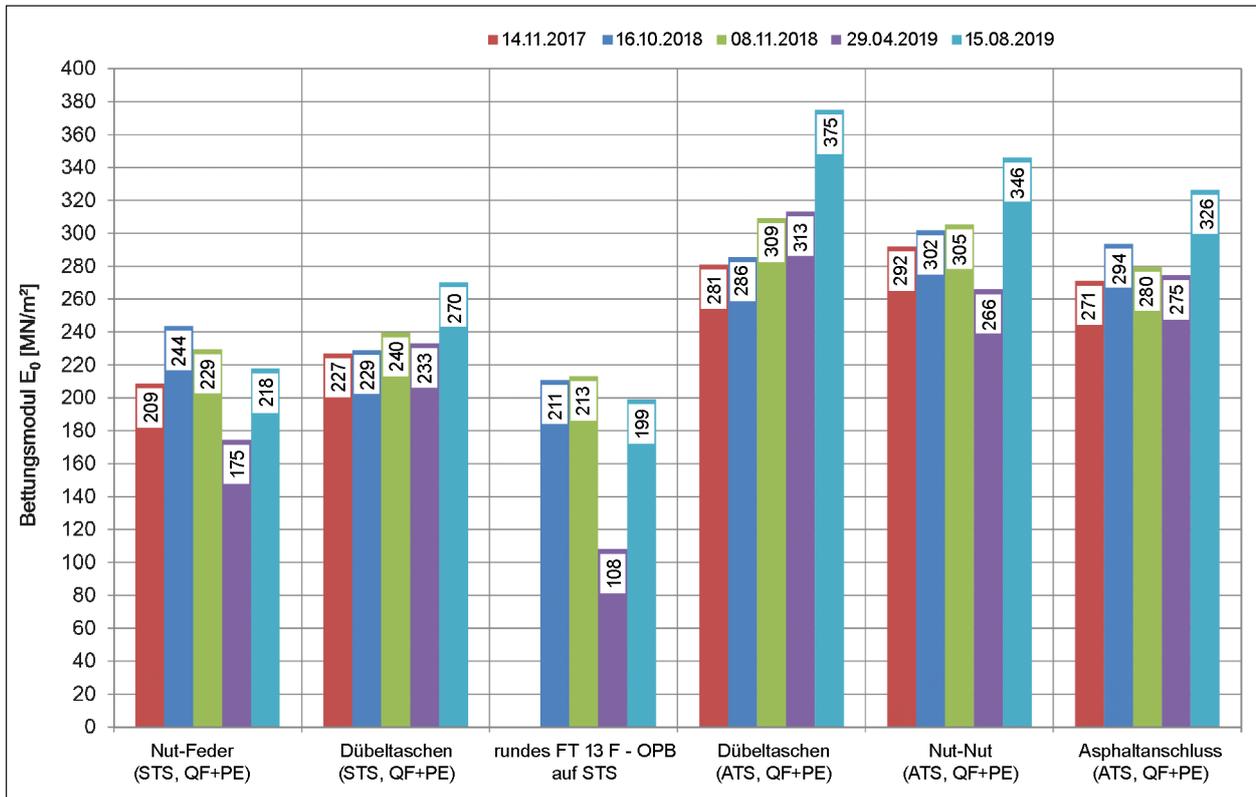


Bild 4-7: Mittelwerte des Bettungsmoduls E_0 [MN/m²] für die verschiedenen Fugentypen

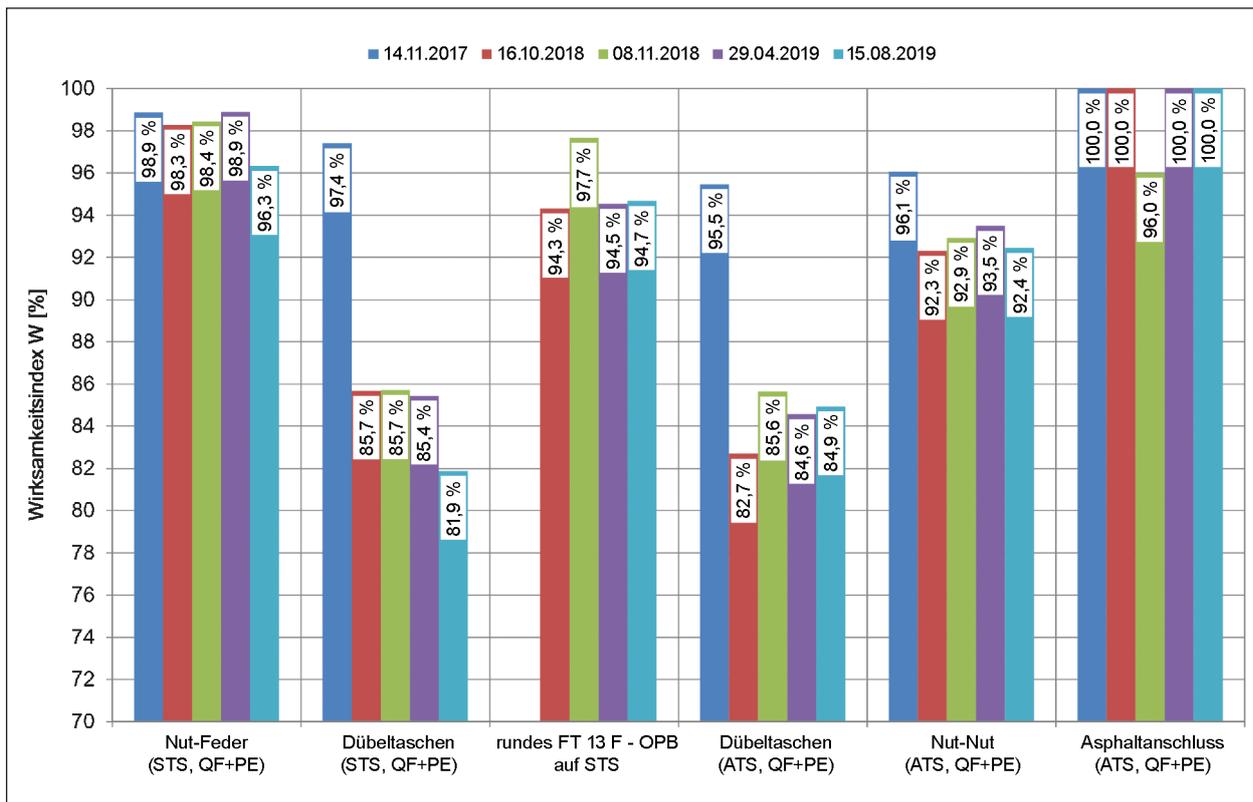


Bild 4-8: Mittelwerte des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung [%] für die verschiedenen Fugenausführungen

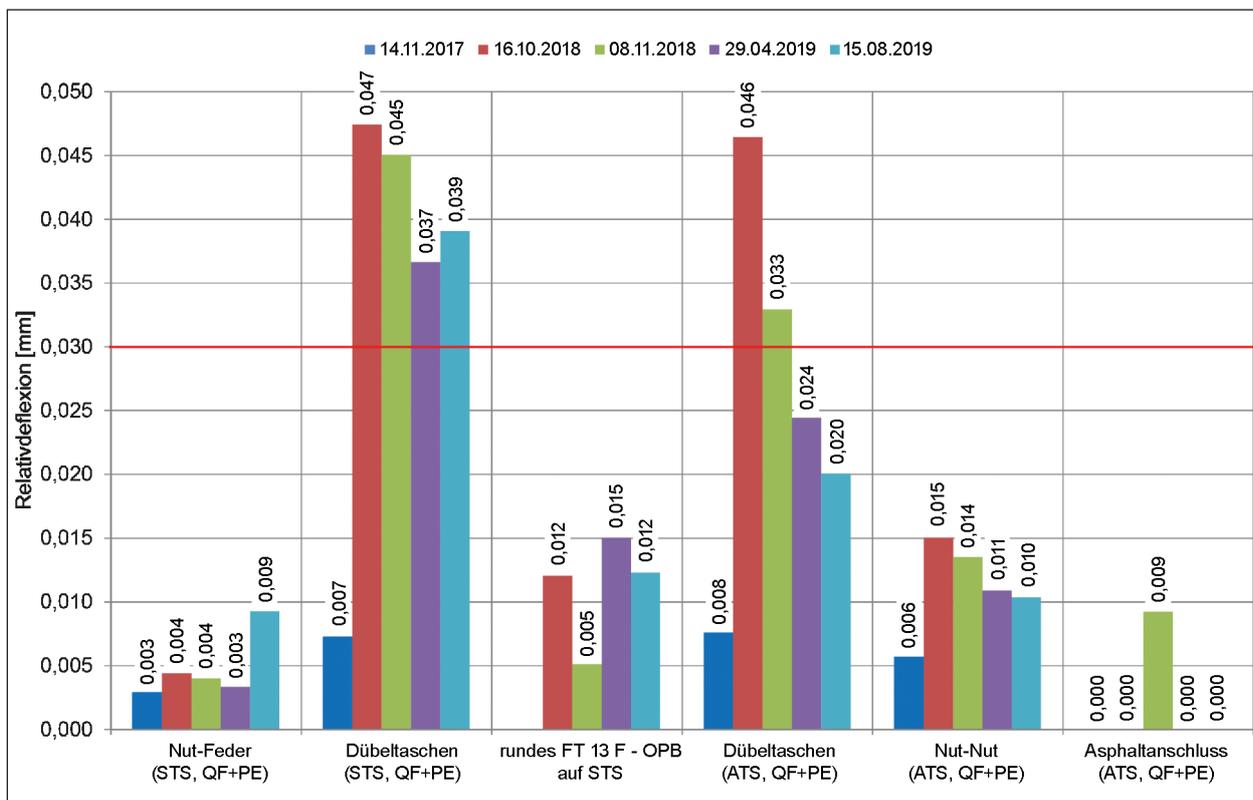


Bild 4-9: Mittelwerte der auf 50 kN bezogenen Relativdeflexion an den Querfugen bzw. Plattenecken benachbarter Fertigteile [mm] für die verschiedenen Fugenausführungen

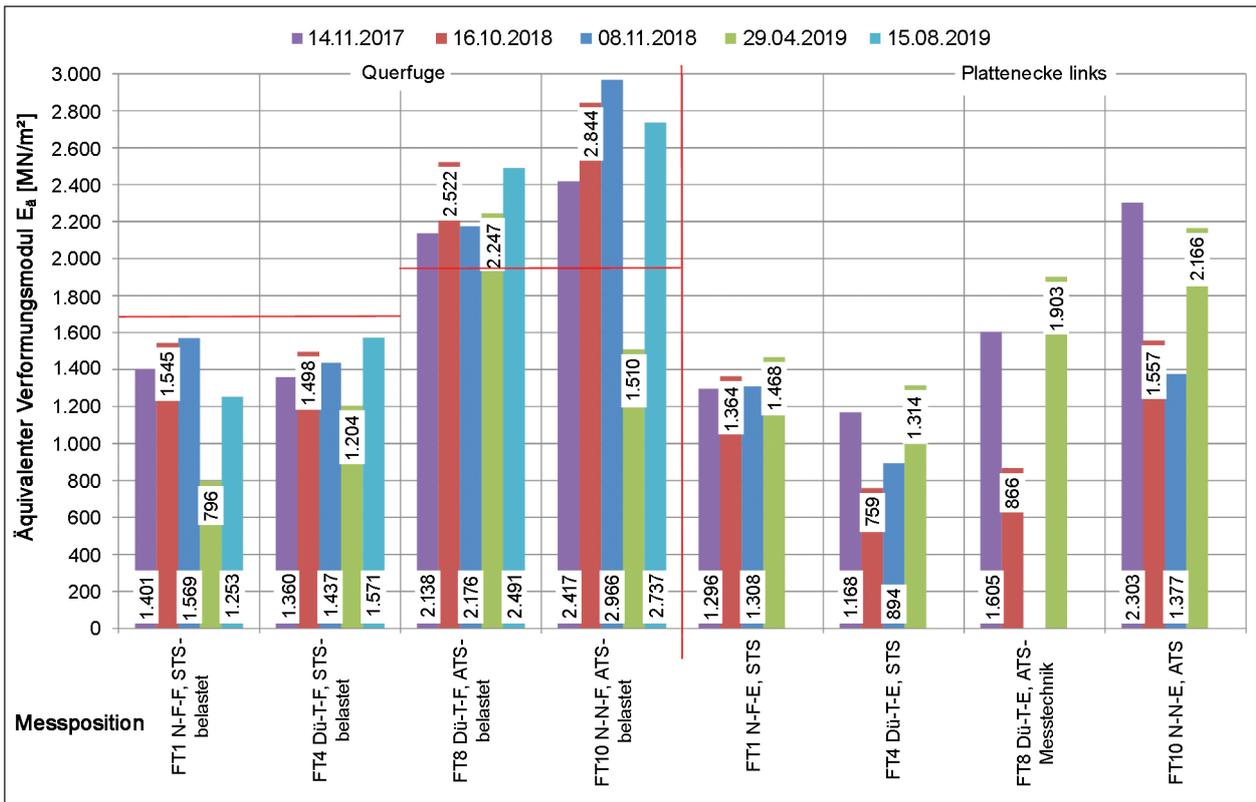


Bild 4-10: Äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] an den belasteten Querfugen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10

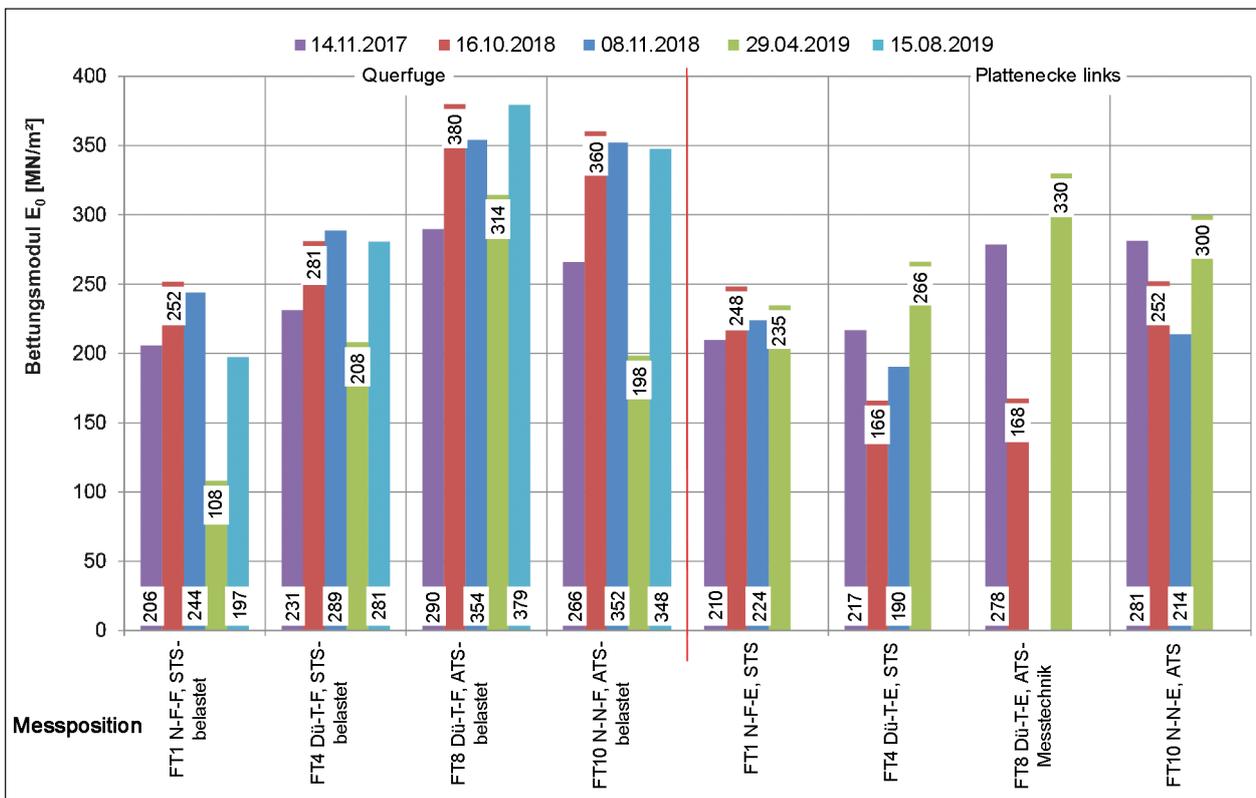


Bild 4-11: Bettungsmodul E_0 [MN/m²] an den belasteten Querfugen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10

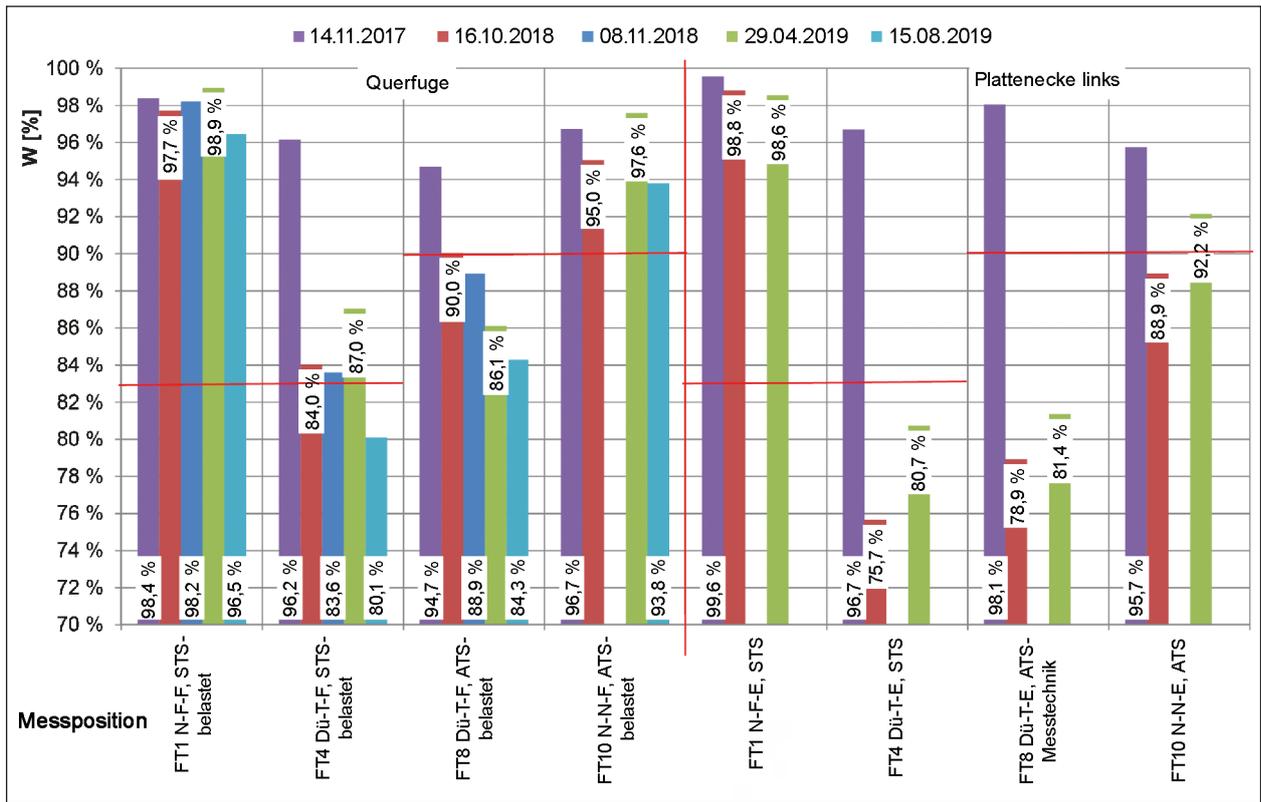


Bild 4-12: Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] an den belasteten Querfugen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10

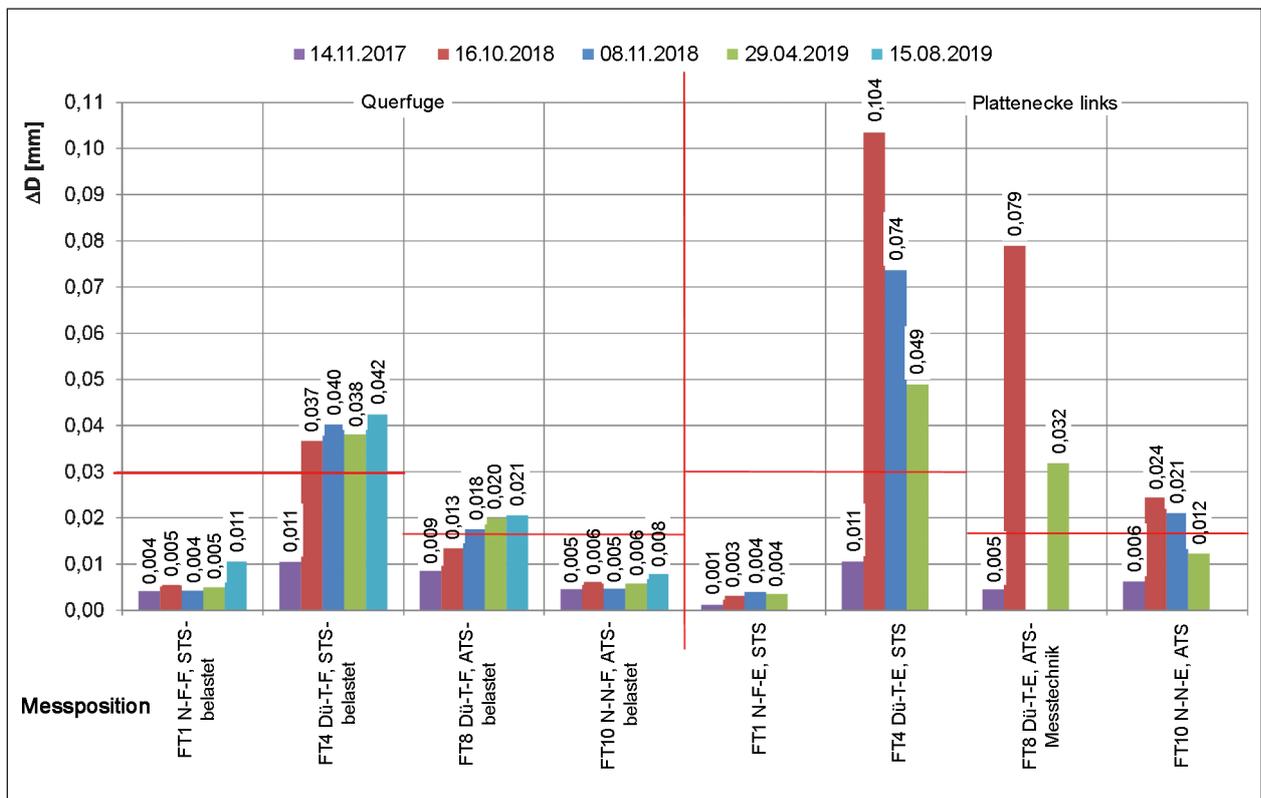


Bild 4-13: Relativdeflexion ΔD [mm] bezogen auf 50 kN Stoßkraft an den belasteten Querfugen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10

Nach 750.000 Lastwechsel durch MLS 30 hat sich der äquivalente Verformungsmodul der Nut-Feder-Fuge auf STS im Sommer 2019 wegen des besseren Bettungsmoduls gegenüber der Frühjahrsmessung 2019 wieder erhöht.

Dies trifft bei der Dübeltaschen-Fuge auf STS (FT4) ebenfalls zu.

Allerdings sind ein geringerer Wirksamkeitsindex sowie eine höhere Relativdeflexion im Vergleich zur Nut-Feder-Fuge auf STS vorhanden.

Wenig wirkte sich hingegen die Belastung durch MLS 30 auf das Tragverhalten der Dübeltaschen-Fuge auf ATS (FT8) aus. Der äquivalente Verformungsmodul ist im Sommer 2019 mit $E_a = 2.491 \text{ MN/m}^2$ deutlich höher als auf der Dübeltaschen-Fuge auf STS (FT4). Der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung ist dagegen bei beiden Trag-schichtarten mit $W = 84,3 \%$ bzw. $W = 80,1 \%$ vergleichbar.

Bei der Nut-Nut-Fuge auf ATS (FT 10) ist der äquivalente Verformungsmodul von $E_a = 2.966 \text{ MN/m}^2$ im Herbst 2018 auf $E_a = 2.737 \text{ MN/m}^2$ im Sommer 2019 etwas zurückgegangen. Dies ist ebenso wie bei Nut-Feder-Fuge (FT 1) auf den Rückgang des Bettungsmoduls zurückzuführen. Der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung hat sich jedoch nur minimal verringert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Dübeltaschen-Fugen sowohl auf STS als auch auf ATS nach Belastung durch das MLS 30 bezüglich der Querkraftübertragung etwas ungünstiger verhalten als die Nut-Feder-Fuge auf STS und die Nut-Nut-Fuge auf ATS.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung von Fugenkonstruktionen – Ermittlung realer Beanspruchungen des Fugensystems“ [FE 08.0244/2015/FRB] wurde nach Zählweise dieses Berichts zwischen den Fertigteilen 8 und 9 (im Bericht zu [FE 08.0244/2015/FRB] zwischen Platten 4 und 5) Sensorik eingebaut, um die Fugenbewegungen zu detektieren. Hierbei wurden sowohl Dehnung und Stauchung der Fuge infolge Temperaturänderungen als auch Vertikalbewegungen während der Belastung durch den MLS festgehalten. Die temperaturbedingten Bewegungen fanden im erwarteten Ausmaß statt. Die Vertikalbewegungen wurden bis 100.000 Überrollungen aufgezeichnet. Es wurde festgestellt, dass die Bewegungen sich von anfangs $20 \mu\text{m}$ ständig erhöhten und nach ca. 11.000 Überrollungen etwa $50 \mu\text{m}$ betrug. Ab ca. 50.000

Überrollungen stagnierte der Zuwachs der Vertikalbewegung und betrug ca. $60 \mu\text{m}$.

Bei den einzelnen Begehungen war zu jederzeit ein guter Zustand der Fertigteile festzustellen. Es gab einen Kantenschaden, der vermutlich auf äußere Einwirkungen zurückzuführen ist. Im Bereich des runden Fertigteils mit offenporigem Beton konnten am linken Rand Verfärbungen, einzelne Kornablösungen und eine Schleierspur auf dem umgebenden Fertigteil 3 zur linken Kante hin festgestellt werden. Auch dies war auf äußere Einwirkungen und nicht auf das System selbst zurückzuführen. Die Fugen zwischen den einzelnen Fertigteilen befanden sich in gutem Zustand. Die Bilder 4-14 bis 4-16 zeigen die Fertigteile bei einer Begehung zu Beginn des Jahres 2022.



Bild 4-14: Blick auf die Fertigteilreihe (im Vordergrund Fertigteil 12)

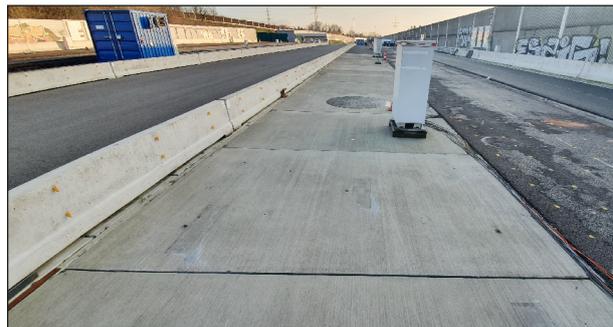


Bild 4-15: Fertigteile mit Besenstrichtextur

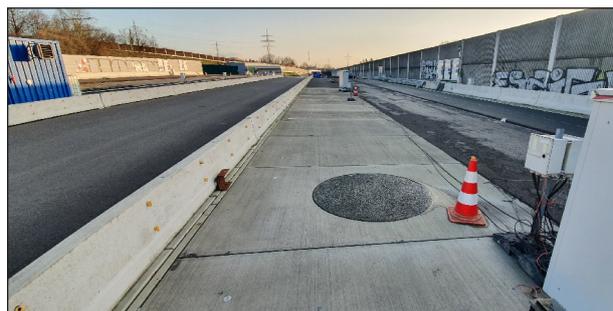


Bild 4-16: Rundes Fertigteil mit offenporigem Beton

5 FE-Modell zur Berechnung des Beanspruchungsverhaltens der verlegten Fertigteile

5.1 Zielstellung

Das Finite-Elemente-Modell soll es ermöglichen, die Spannungen und Verformungen der verlegten Fertigteile unter unterschiedlichen Belastungskonstellationen realitätsnah zu berechnen. Mit einer Kalibrierung des Systems an den Ergebnissen der vor Ort durchgeführten Messungen wurde die Verlässlichkeit der Berechnungsergebnisse erhöht.

Das fertige Modell erlaubt es, durch Variation ausgewählter Parameter die Konstruktion zu optimieren bzw. Schwachstellen des Systems aufzudecken.

5.2 Grundsätzliche Vorgehensweise

Um das Berechnungsmodell in der erforderlichen Qualität zu realisieren, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Definition der Anforderungen an das Modell
- Erstellung der Konzeption für ein Modell, welches den Anforderungen genügt
- Optimierung ausgewählter Modellparameter an einem vereinfachten Modell
- Erstellung des vollständigen Berechnungsmodells
- Kalibrierung ausgewählter Modellparameter an Messergebnissen.

5.3 Anforderungen an das Modell

Um der formulierten Zielstellung gerecht zu werden, muss das Berechnungsmodell folgende grundlegende Anforderungen erfüllen:

- Möglichkeit der Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrslasten in beliebiger Stellung
- Möglichkeit der Berücksichtigung beliebiger Temperaturzustände im Plattenvolumen
- Möglichkeit der Berücksichtigung hygrischer Einflüsse

- Adäquate Modellierung des mechanischen Verhaltens im Fugenbereich
- Realitätsnahe Modellierung der Interaktion zwischen Platte und Unterlage (mögliches bereichsweises Abheben)
- Berücksichtigung der Mitwirkung der angrenzenden Bereiche der Unterlage
- Erfassung des Verpressmaterials als separate Schicht der Unterlage
- Möglichkeit der hinreichend genauen Kalkulation des Spannungs- und Verformungszustandes
- Möglichkeit der Variation ausgewählter Parameter.

5.4 Modellkonzept

5.4.1 Modellumfang

Die Erfüllung der in Kapitel 5.3 definierten Anforderungen war nur mit einem Volumenmodell möglich. Entsprechend ergab sich ein komplexes Modell mit vergleichsweise hohen Anforderungen an die Software und Hardware.

Da das mechanische Verhalten jeder einzelnen Platte in relevanter Weise durch die Nachbarplatten beeinflusst wird, war es notwendig, im Modell drei Platten zu erfassen. Diese ruhen auf einer dünnen Schicht aus Verpressmaterial, welche ebenfalls Bestandteil des Modells ist. Die darunterliegenden Schichten wurden als einheitlicher Volumenblock modelliert.

Jeder Volumenblock reicht über die seitlichen Begrenzungen des darüber liegenden Blocks hinaus. Damit wurde sichergestellt, dass die real vorhandene Tragwirkung der angrenzenden Bereiche erfasst wird.

5.4.2 Platten

Die Platten wurden vollständig aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Diese haben eine Quaderform. Zusätzlich zu den Eckknoten gibt es in der Mitte jeder Kante einen Knoten (Bild 5-1). Der Spannungsverlauf im Element wird mit einer quadratischen Ansatzfunktion beschrieben.

Gegenüber den einfacheren 8-Knoten-Brickelementen mit linearer Ansatzfunktion ergibt sich ein

erheblich höherer Rechenaufwand. Die Verwendung der 8-Knotenelemente ist aber nicht möglich, weil sich unter bestimmten Bedingungen auf Grund der linearen Ansatzfunktion innerhalb der Elemente hohe rechnerische Schubspannungen ergeben. Dies führt insbesondere bei Biegeproblemen zu einer rechnerischen Versteifung des Modells und einem vorzeitigen Abbruch der Iteration. Der Effekt ist als Shearlocking bekannt. Die Verwendung der 8-Knoten-Elemente ist damit für das vorliegende Modell ausgeschlossen.

Um Temperatur und Spannungsverläufe über den Plattenquerschnitt hinreichend detailliert zu erfassen, ist die Platte über die Querschnittshöhe in mehrere Elemente zu unterteilen. Für das Modell werden 6 Elemente gewählt. Damit ist die Elementhöhe auf 4 cm festgelegt. Für die Modellierung eines nichtlinearen Temperaturverlaufes stehen somit über die Querschnittshöhe 13 Knoten zur Verfügung.

Weil das Seitenverhältnis der Brickelemente nicht beliebig erhöht werden kann, ist durch die Festlegung der Elementhöhe auch bereits die Elementlänge, bzw. -breite begrenzt. Unbeschadet dessen ist es aber erstrebenswert, die Ausdehnung der Elemente so groß wie möglich zu wählen, um damit die Elementanzahl zu reduzieren. Eine entsprechende Optimierung wurde mit einem vereinfachten Modell durchgeführt.

Das Material für die Platten wurde als linear elastisch definiert.

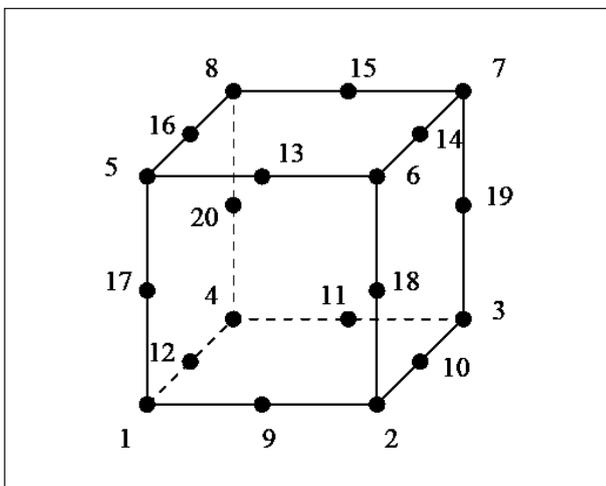


Bild 5-1: 20-Knoten-Brickelement

5.4.3 Fugen

Alle drei Platten des Berechnungsmodells wurden in einem zusammenhängenden Volumenblock modelliert. Im Fugenbereich wird lediglich die Länge der Elemente (in Fahrtrichtung) auf 1 cm begrenzt (siehe Bild 5-2).

Die Steifigkeit der Fugenelemente (E-Modul) wurde so gewählt, dass sich ein plausibler Wirksamkeitsindex für Querkraftübertragung einstellt. Eine genauere Kalibrierung erfolgte mit den FWD-Messungen.

Das Fugenmaterial wurde außerdem als COMPRESSION_ONLY-Material definiert, d. h. es werden nur in begrenztem Maße Zugspannungen übertragen. Mit der Festlegung der maximal möglichen Zugspannung kann die Momentenübertragung in der Querruge gesteuert werden.

Damit besteht die Möglichkeit, die Übertragung von Querkraften und Momenten an der Querruge beliebig einzustellen und das Modell damit flexibel dem tatsächlichen Systemverhalten anzupassen.

Die Modellierung der Fuge zielt also nicht darauf ab, die reale Situation möglichst genau nachzubilden. Vielmehr soll mit einer geeigneten Idealisierung das mechanische Verhalten der Platten in diesem Bereich hinreichend genau gefasst werden.

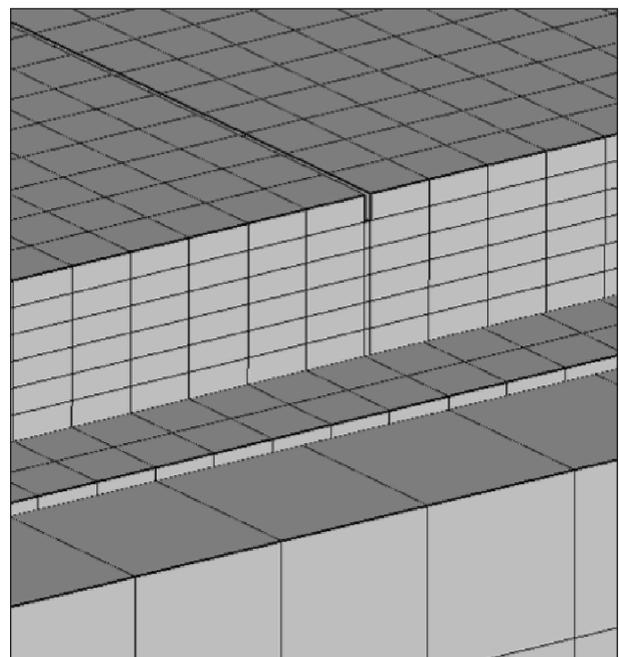


Bild 5-2: Modellierung Fugenbereich

5.4.4 Verpressmaterial

Das Verpressmaterial liegt als Volumenblock direkt unter den Platten. Weil die Schicht vergleichsweise dünn ist, wird sie in Vertikalrichtung mit einem einzigen Element modelliert. Auch hier kommen die 20-Knoten-Brickelemente zur Anwendung. Bezüglich der Horizontalausdehnung der Elemente ergab sich ähnlich wie bei den Plattenelementen Optimierungsbedarf.

Die Steifigkeit des Verpressmaterials (Silikatharz) war aus Laborversuchen bekannt. Es kann $E = 500 \text{ MPa}$ in den Berechnungen angesetzt werden. Eine Präzisierung erfolgt im Rahmen der Kalibrierung. Die weiteren Materialparameter sind für die Berechnungen von untergeordneter Bedeutung. Sie wurden der Einfachheit halber entsprechend den Betonwerten angesetzt.

5.4.5 Unterbau

Der Spannungsverlauf im Unterbau ist von untergeordnetem Interesse. Der betreffende Volumenblock konnte deshalb aus größeren Elementen modelliert werden. Da Biegungen hier in geringerem Maße auftreten, ist der Einsatz der einfacheren 8-Knoten-Elemente denkbar. Um Shearlocking-Effekte aber sicher auszuschließen, wurden auch für den Unterbau die 20-Knoten-Elemente verwendet. Die mögliche Größe der Elemente wurde durch Vergleichsrechnungen mit einem kleineren Modell ermittelt.

Gleiches gilt für die vertikale und horizontale Ausdehnung des Unterbaublocks. Die Maße sind so zu wählen, dass die durch die Platten verursachten Spannungen an den Grenzen des Unterbaublocks nicht mehr relevant sind.

Wenn der Unterbau seine Aufgabe dauerhaft erfüllen soll, darf durch einen einzelnen Lastübergang keine Veränderung eintreten. Dies ist aber gerade das Kennzeichen eines elastischen Verhaltens. Der Unterbau ist also als elastischer Volumenblock zu definieren. Der E-Modul wurde so gewählt, dass sich realistische Werte für die Vertikalverformung ergeben. Auch hier erfolgte eine Präzisierung im Rahmen der Kalibrierung. Die Querdehnzahl kann mit 0,4 bis 0,5 angenommen werden, hat aber kaum Einfluss auf das Berechnungsergebnis.

5.4.6 Interaktion der Volumenblöcke

Die Platten liegen im Berechnungsmodell frei auf der darunterliegenden Silikatharzschicht auf. Diese liegt wieder auf dem Volumenblock des Unterbaus. Die Interaktion zwischen den Volumenblöcken wird im Berechnungsmodell über eine Kontaktformulierung erfasst. Diese beschreibt die Spannungsübertragung zwischen den Kontaktflächen in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand. Programmintern werden Federelemente generiert, sobald ein bestimmter Mindestabstand der Kontaktflächen unterschritten wird (Bild 5-3). Wenn eine rechnerische Durchdringung der Flächen erfolgt, erhöht sich die Federkonstante (K) auf einen vorher definierten Wert (Bild 5-3).

Eine Durchdringung der Körper in der Kontaktzone wird also rechnerisch zugelassen. Ebenso eine Übertragung von Zugspannungen über einen Spalt hinweg. Um hinreichend korrekte Berechnungsergebnisse zu erzielen, muss der Anstieg der Druckspannungen bei der Durchdringung der Körper so eingestellt werden, dass die resultierende Durchdringung sehr klein bleibt. Ebenso muss die Übertragung von Zugspannungen so weit begrenzt werden, dass im Ergebnis keine relevanten Zugkräfte in der Sohlfuge übertragen werden.

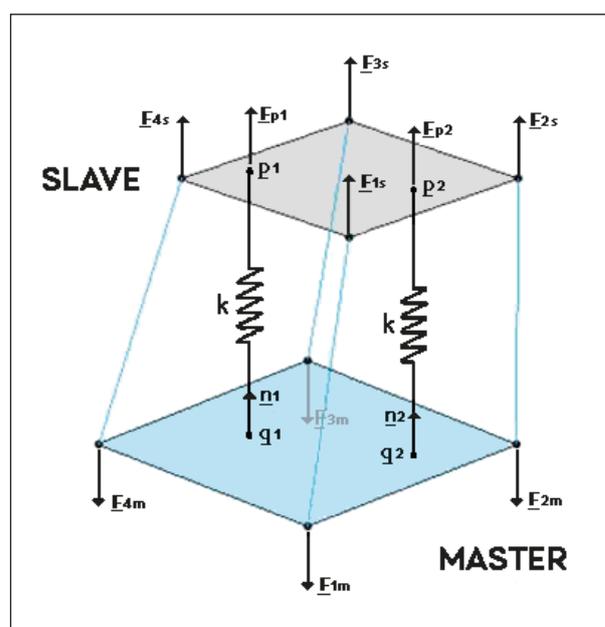


Bild 5-3: Programmintern erzeugte Federn zur Simulation des Kontaktes (Bild aus [DHONDT 2016])

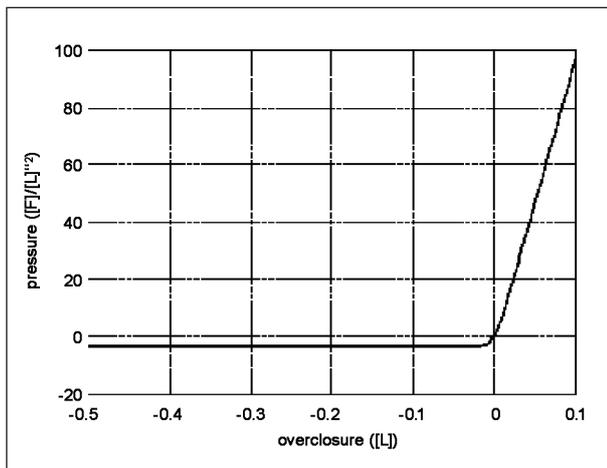


Bild 5-4: Kontaktspannung in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktflächen (Bild aus [DHONDT 2016])

In der Kontaktfläche werden neben den senkrecht zur Auflagerfläche wirkenden Druckkräften auch horizontal wirkende Reibkräfte übertragen. Die Reibung wird durch Relativbewegungen zwischen den Kontaktflächen aktiviert.

Die Kontaktformulierung führt zu einem hochgradig nichtlinearen Modellverhalten. Entsprechend sensibel reagiert der Berechnungsalgorithmus auf die Kontaktparameter. Die Eliminierung des Reibungsparameters wirkt sich diesbezüglich positiv aus. Im Zuge der Modelloptimierung wurde geprüft, ob die Reibung im Berechnungsmodell Berücksichtigung finden muss.

Die Kontaktparameter sind sorgfältig zu wählen. Je weicher der Kontakt definiert wird, desto besser ist die Konvergenz des Lösungsalgorithmus. Damit einhergehend steigt aber auch die Durchdringungstiefe der Kontaktflächen. Die Federkonstante ist also so zu wählen, dass die gegenseitige Durchdringung der Kontaktflächen im realitätsnahen Bereich bleibt und gleichzeitig die Konvergenz des Berechnungsverfahrens gesichert bleibt.

5.4.7 Lagerungen

Die Lagerung des Gesamtmodells wird realisiert, indem alle Knoten an der Unterseite des Unterbaublocks in allen drei Richtungen fixiert werden. Die Knoten an den Seitenflächen des Unterbaublocks werden jeweils horizontal in beiden Richtungen gehalten. Gleiches gilt für die Knoten an den Seiten des Silikatharzblockes.

Die Betonplatten werden nicht in dieser Weise fixiert, weil eine realitätsnahe Simulation des Plattenverhaltens eine freie Beweglichkeit der Plattenränder erfordert. Es werden lediglich die vier unteren Eckknoten des Volumenblockes mit weichen Federelementen gehalten. Damit wird eine frei horizontale Beweglichkeit ausgeschlossen, welche die Konvergenz der Berechnung gefährden würde.

5.4.8 Einwirkungen

Allen drei Volumenblöcken des Modells wird über den Dichteparameter ein Eigengewicht zugewiesen. Damit entsteht eine volumenbezogene Kraft, welche in den Berechnungen berücksichtigt wird.

Um Radlasten in einer bestimmten Position zu simulieren, werden alle Elementknoten an der Plattenoberseite, welche innerhalb der Radaufstandsfläche liegen, mit einer Einzelkraft beaufschlagt. Prinzipiell ist es so möglich, beliebig viele Radlasten in beliebigen Konstellationen zu erfassen.

Für die Eingabe von Temperaturzuständen ist es zunächst erforderlich, eine Nullspannungstemperatur vorzugeben. Anschließend kann jedem Knoten des Modells eine Temperatur zugewiesen werden. Es ist also möglich, beliebige dreidimensionale Temperaturfelder zu definieren. Bei der Berechnung der Spannungs- und Verformungszustände wird allein die mechanische Wirkung der Temperatur berücksichtigt, welche sich durch Materialausdehnung (positiv bzw. negativ) ergibt. Probleme des Wärmeflusses werden im FEM-Modell nicht betrachtet.

Die hygrischen Einwirkungen entfalten ihre mechanische Wirkung durch ein Quellen oder Schwinden des Materials, also eine Ausdehnung bzw. Schrumpfung des Volumens. Es gibt also diesbezüglich eine Analogie zur mechanischen Wirkung der Temperatur. Damit ergibt sich die Möglichkeit, hygrische Einwirkungen über die Eingabe von Temperaturfeldern zu berücksichtigen.

Für die Belastungen aus Montage und Transport sind die Platten als Stahlbetonbauteile zu betrachten und entsprechend zu bemessen (siehe [FE 89.0279/2012], Kapitel 3.7.2.2). Für diese Aufgabe steht eine Vielzahl kommerzieller Bemessungsprogramme mit integrierten FEM-Modellen bereit.

5.4.9 Inputdatei

Die Übergabe des FE-Modells an den FEM-Solver erfolgt über eine Inputdatei. Dabei handelt es sich um eine Textdatei, welche eine vollständige Beschreibung des Modells enthält. Es ist leicht ersichtlich, dass die Input-datei schon für kleine Modelle so umfangreich ist, dass eine manuelle Erstellung nicht möglich ist. Für viele FEM-Solver gibt es leistungsfähige Präprozessoren, welche eine grafikgestützte Konstruktion des Berechnungsmodelles unterstützen. Für das fertige Modell kann im Anschluss automatisch die Inputdatei generiert werden.

Diese Vorgehensweise erlaubt eine vergleichsweise komfortable Erstellung des Modells. Es ist aber nicht möglich, das Modell durch Parametrisierung flexibel zu gestalten. Eine Modelländerung erfordert in der Regel eine Neukonstruktion. Ebenso entfällt die Möglichkeit, detailliert Vorgaben auf Elementebene zu realisieren. Damit sind grafikgestützte Präprozessoren für die vorliegende Aufgabenstellung ungeeignet.

Die übliche und auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisierte Alternative besteht darin, ein maschinenlesbares Script zu erstellen, welches den Aufbau der Inputdatei steuert.

5.4.10 Software

Für die Durchführung der Berechnungen wird der im Open Source Bereich verfügbare FEM-Solver [CalculiX] verwendet. Das zugehörige Input Deck Format ist kompatibel zum kommerziellen System ABAQUS.

Für die Erstellung des Scripts zur Generierung der Inputdatei wurde die Programmiersprache Python verwendet.

5.5 Optimierung der Modellparameter am vereinfachten Modell

5.5.1 Zielstellung und Vorgehensweise

Wie in Kapitel 5.4 erläutert, ist es notwendig, das Modell so detailliert zu gestalten, dass die Berechnungsergebnisse hinreichend aussagekräftig sind. Gleichzeitig muss die Komplexität des Modells soweit reduziert werden, dass akzeptable Rechenzeiten möglich sind. Es ist also notwendig, ein Optimum bezüglich möglicher Idealisierung und not-

wendiger Komplexität zu finden. Diese Optimierung kann separat für einzelne Modellparameter erfolgen. Weil der Optimierungsprozess für jeden untersuchten Parameter mehrere Berechnungen mit jeweils variierendem Eingangswert erfordert, ist es aus zeitökonomischen Gründen erforderlich, an dieser Stelle ein vereinfachtes Modell zu verwenden. Der grundsätzliche Modellaufbau ist in jedem der hier zu untersuchenden Fälle gleich (Betonplatte auf Zwischenschicht und Unterbau). Deshalb können die Einzelergebnisse der Optimierung des vereinfachten Modells problemlos auf komplexere Modelle übertragen werden. Es wurden folgende Parameter mit dem vereinfachten Modell optimiert:

- Seitenverhältnisse der Elemente für die Platten,
- Seitenverhältnisse der Elemente für die Unterpressschicht,
- Breite des horizontalen Überstandes des Unterbaues,
- Dicke des Unterbaues,
- Elementgröße im Unterbau,
- Kontaktparameter.

Für jede Optimierung wurde von einer Parametergröße ausgegangen, welche mit Sicherheit ausreichend ist. In der Folge wurden Berechnungen mit schrittweise veränderten Modellparametern durchgeführt. Sobald sich die Berechnungsergebnisse in relevantem Maße änderten, war die zulässige Größe für den Parameterwert überschritten.

5.5.2 Modelldefinition

Das vereinfachte Modell wurde als 1-Platten-Modell definiert. Es umfasst die Volumenblöcke Platte, Verpressschicht und Unterbau. Die Elementtypen entsprechen jeweils dem Hauptmodell (Kapitel 5.4).

Die Platte wurde mit den Abmessungen 1 m x 1 m x 0,12 m modelliert. Dabei wurden jeweils drei Elemente übereinander angeordnet.

Die Verpressschicht wurde 2 cm dick angenommen und an jeder Seite 20 cm über den Plattenrand hinausgeführt.

Der Unterbau wurde jeweils 1 m über die Plattenränder hinausgeführt und 1 m dick modelliert. Die Lagerungsbedingungen entsprechen in allen Punkten dem Hauptmodell.

Es wurden jeweils zwei Berechnungsfälle untersucht:

- Einzellast + linearer Temperaturverlauf in der Betonplatte mit einer Differenz von 12 K (oben-unten)
- Einzellast + linearer Temperaturverlauf in der Betonplatte mit einer Differenz von -12 K (oben-unten)

Die temperaturbedingte Vorverformung der modellierten Platte entspricht im ersten Fall einer Aufwölbung und im zweiten Fall einer Aufschüsselung.

Die Einzellast wurde in beiden Fällen in der Mitte eines Plattenrandes positioniert. Es wurde ein Knoten an der Plattenoberseite mit 30 kN belastet.

Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse wurden jeweils die maximalen Biegespannungen an der Plattenunterseite unter der Einzellast und die maximalen Vertikalverformungen (nach unten) verglichen.

Die Materialparameter wurden wie folgt angenommen:

E-Modul: 46.000 MPa

Querdehnzahl: 0,2

Wärmedehnzahl: $1,15 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Dichte: 24 kN/m³

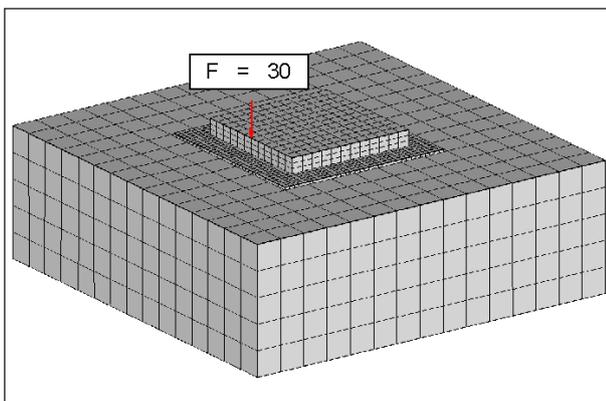


Bild 5-5: Basismodell für die Optimierung

5.5.3 Optimierung der Größe der Plattenelemente

Für FEM-Modelle gilt allgemein, dass mit einer Verkleinerung der definierten Elemente eine größere Genauigkeit der Berechnung erzielt werden kann. Die Verwendung kleinerer Elemente führt aber naturgemäß zu einer entsprechenden Vergrößerung der Elementanzahl und damit zu überproportional steigenden Rechenzeiten. Entsprechend ist in diesem Punkt jeweils eine Optimierung der Elementgröße notwendig. Bei der Berechnung von Straßenplatten können für die meisten Aufgabenstellungen bei hinreichender Genauigkeit relativ große Elemente verwendet werden. In Vertikalrichtung, also zur Modellierung der Plattendicke, sollten aber mehrere Elemente übereinander angeordnet werden, um z. B. nichtlineare Temperaturzustände oder die Verteilung der Spannungen unterhalb einer Lasteintragung hinreichend genau zu erfassen. Damit wird es wünschenswert, stark abgeplattete Elemente zu verwenden, also Elemente mit einer, im Vergleich zu den horizontalen Abmaßen, deutlich kleineren Dicke. Solche stark abgeplatteten Elemente können aber infolge numerischer Effekte zu verfälschten Ergebnissen führen. Es ist also vorteilhaft, diesbezüglich eine Optimierung durchzuführen. Mit diesem Ziel wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Dabei wurde zunächst mit einem bekanntermaßen zulässigen Seitenverhältnis für die Elemente gerechnet. Die dabei erzielten Ergebnisse bildeten die Referenzwerte, mit denen alle weiteren Berechnungsergebnisse verglichen wurden.

Für die Plattenelemente wurde als Ausgangspunkt ein Seitenverhältnis von 2:1 angenommen. Bei dieser Geometrie können Lockingeffekte ausgeschlossen werden. Nachfolgend wurden die horizontalen Seitenlängen der Elemente schrittweise erhöht.

Tabelle 5-1, sowie Bild 5-6 bis Bild 5-9 zeigen die Berechnungsergebnisse (Spannung und Verformung) und die jeweiligen Abweichungen zum korrekten Ergebnis (Seitenverhältnis 2:1).

Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Spannungen wie auch die Verformungen von Anfang an abnehmen. Dies dürfte zunächst vorwiegend auf die detailliertere Erfassung der Spannungsspitze bei feinerer Elementierung zurückzuführen sein. In jedem Fall ist festzustellen, dass es nicht gerechtfertigt ist, das Seitenverhältnis der Elemente wesentlich über den Wert 2:1 zu erhöhen.

Abmessungen Element [mm]	Seiten- verhältnis	Berechnungsfall 1				Berechnungsfall 2			
		Spannung		Verformung		Spannung		Verformung	
		Betrag [MPa]	Abwei- chung [%]	Betrag [mm]	Abwei- chung [%]	Betrag [MPa]	Abwei- chung [%]	Betrag [mm]	Abwei- chung [%]
80 x 80 x 40	2:1	7,10		0,297		5,36		0,392	
100 x 100 x 40	2,5:1	6,96	1,97 %	0,286	3,70 %	5,21	2,80 %	0,381	2,81 %
125 x 125 x 40	3:1	6,77	4,65 %	0,275	7,41 %	5,01	6,53 %	0,370	5,61 %
167 x 167 x 40	4:1	6,42	9,58 %	0,264	11,11 %	4,63	13,62 %	0,359	8,42 %
250 x 250 x 40	6:1	5,51	22,39 %	0,251	15,49 %	3,71	30,78 %	0,346	11,73 %
500 x 500 x 40	12:1	3,15	55,63 %	0,241	15,49 %	1,65	69,22 %	0,327	16,58 %

Tab. 5-1: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung des Seitenverhältnisses der Elemente

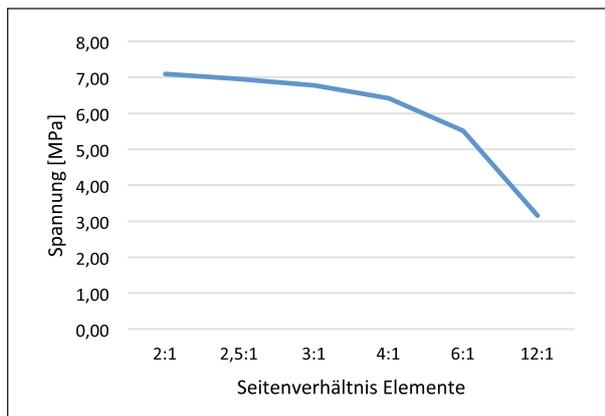


Bild 5-6: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 1

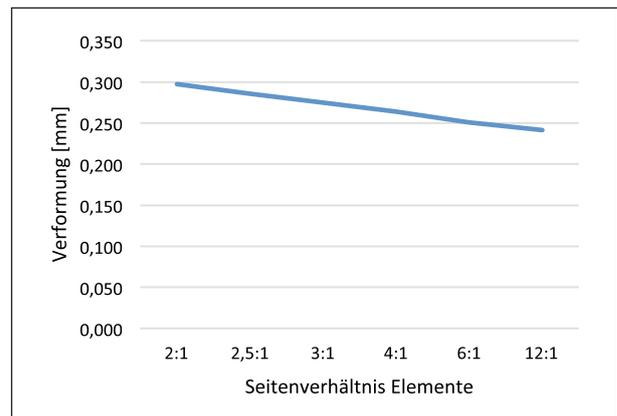


Bild 5-8: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1

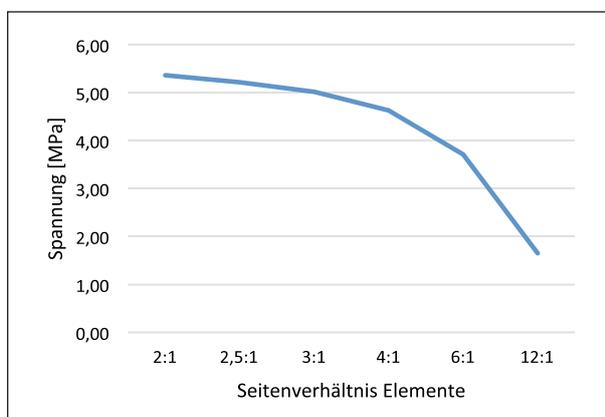


Bild 5-7: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 2

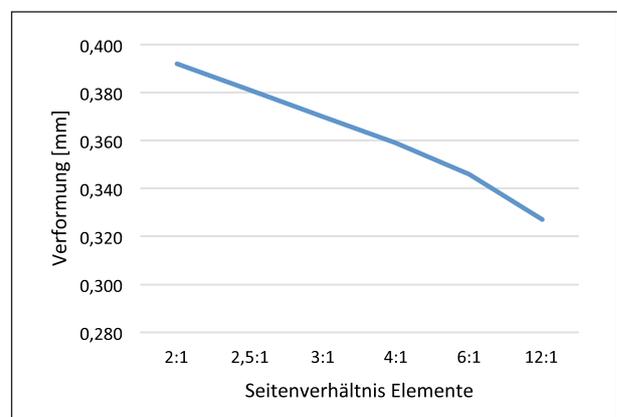


Bild 5-9: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2

Abmessungen Element [mm]	Seiten- verhältnis	Berechnungsfall 1		Berechnungsfall 2	
		Spannung		Spannung	
		Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]
40 x 40 x 20	2:1	7,10		5,36	
50 x 50 x 20	2,5:1	7,10	0,00 %	5,35	0,19 %
60 x 60 x 20	3:1	7,03	0,99 %	5,23	2,43 %
80 x 80 x 20	4:1	7,02	1,13 %	5,21	2,80 %
100 x 100 x 20	5:1	7,10	0,00 %	5,32	0,75 %
120 x 120 x 20	6:1	7,03	0,99 %	5,17	3,54 %
140 x 140 x 20	7:1	7,08	0,28 %	5,18	3,18 %

Tab. 5-2: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung des Seitenverhältnisses der Elemente

5.5.4 Optimierung der Elementgröße der Unterpressschicht

Die Unterpressschicht ist sehr dünn. Damit sind zwangsläufig kleine Elemente zu verwenden. Entsprechend groß ist die Anzahl der für die Modellierung erforderlichen Elemente. Es lohnt sich, deshalb eine gesonderte Optimierung für diesen Teil des Objektes durchzuführen. Bei den Berechnungen wurde wiederum mit einem Seitenverhältnis von 2:1 gestartet und nachfolgend eine schrittweise Erhöhung durchgeführt. Ein Vergleich der Durchbiegung macht in diesem Fall wenig Sinn, weil diese in jedem Fall durch das mechanische Verhalten der Platte bestimmt wird. Deshalb wurden jeweils nur die Spannungen verglichen. Die Ergebnisse zeigten sich wie in Tabelle 5-2 dargestellt.

Es ist erkennbar, dass es keine stetige Veränderung der Spannungswerte gibt. Für die Elemente der Verpressschicht kann also ein größeres Seitenverhältnis gewählt werden.

5.5.5 Optimierung der Breite des Überstandes des Unterbaublocks

Der Überstand des Unterbaublocks ist notwendig, um die mittragende Wirkung der angrenzenden Unterbaubereiche zu erfassen. Für die Optimierung wurde mit einem Überstand von 1 m begonnen, welcher schrittweise verkleinert wurde.

Es ist deutlich erkennbar, dass nur die Verformungswerte relevante Veränderungen zeigen. Es ist allerdings anzunehmen, dass die Biegespannung senk-

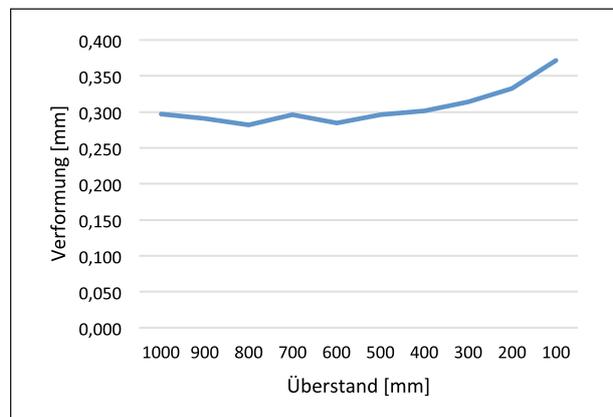


Bild 5-10: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1

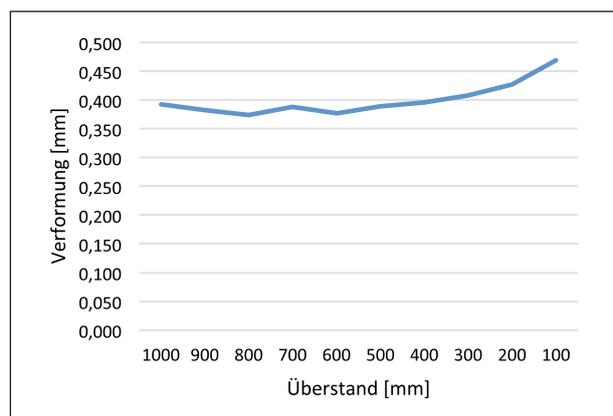


Bild 5-11: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2

recht zum belasteten Rand mit diesen Verformungen korreliert.

Bild 5-10 und Bild 5-11 lassen erkennen, dass der Überstand auf ca. 0,5 m reduziert werden kann.

Überstand [mm]	Berechnungsfall 1				Berechnungsfall 2			
	Spannung		Verformung		Spannung		Verformung	
	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]
1.000	7,10		0,297		5,36		0,392	
900	7,07	0,42 %	0,291	2,02 %	5,25	2,05 %	0,382	2,55 %
800	7,07	0,42 %	0,282	5,05 %	5,26	1,87 %	0,374	4,59 %
700	7,10	0,00 %	0,296	0,34 %	5,33	0,56 %	0,388	1,02 %
600	7,07	0,42 %	0,285	4,04 %	5,20	2,99 %	0,377	3,83 %
500	7,11	-0,14 %	0,296	0,34 %	5,31	0,93 %	0,389	0,77 %
400	7,09	0,14 %	0,302	-2,03 %	5,35	-0,38 %	0,396	-2,06 %
300	7,09	0,14 %	0,314	-6,08 %	5,35	-0,38 %	0,408	-5,15 %
200	7,06	0,56 %	0,333	-12,50 %	5,35	-0,38 %	0,427	-10,05 %
100	7,01	0,85 %	0,372	-30,53 %	5,41	-4,04 %	0,469	-24,40 %

Tab. 5-3: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung des Überstandes

Dicke Unterbau [mm]	Berechnungsfall 1				Berechnungsfall 2			
	Spannung		Verformung		Spannung		Verformung	
	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]
1.000	7,10		0,297		5,36		0,392	
900	7,09	0,14 %	0,285	4,04 %	5,34	0,37 %	0,379	3,32 %
800	7,08	0,28 %	0,275	7,41 %	5,34	0,37 %	0,369	5,87 %
700	7,08	0,28 %	0,265	10,77 %	5,34	0,37 %	0,359	8,42 %
600	7,07	0,42 %	0,255	14,14 %	5,32	0,75 %	0,348	11,22 %
500	7,05	0,70 %	0,244	17,85 %	5,30	1,12 %	0,336	14,29 %

Tab. 5-4: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung des Überstandes

5.5.6 Optimierung der Dicke des Unterbaues

Um die Dicke des Unterbaues zu optimieren, wurden die Berechnungen mit einer Dicke von 1 m gestartet. Nach schrittweiser Reduzierung bis auf 0,5 m ergaben sich die in Tabelle 5-4 dargestellten Ergebnisse.

Die stetige Abnahme der Verformungswerte ist im Wesentlichen auf die reduzierte Wirkung der Eigenlast des Unterbaublocks zurückzuführen. Obwohl keine relevante Änderung der Spannungswerte feststellbar ist, erscheint es nicht ratsam, die Dicke des Unterbaues auf weniger als 75 cm zu reduzieren.

5.5.7 Optimierung der Elementgröße des Unterbaues

Die lastverteilende Wirkung der Betonplatte führt dazu, dass im Unterbau keine konzentrierten Biegespannungsspitzen zu erwarten sind. Es ist deshalb gerechtfertigt, hier größere Elemente zu verwenden.

Für die entsprechende Optimierung wurden die Elementgrößen schrittweise von 200 mm x 200 mm x 200 mm auf 500 mm x 500 mm x 500 mm erhöht. Dabei wurde die Dicke des Unterbaus immer mit 1 m beibehalten. Die Berechnungen lieferten die in Tabelle 5-5 zusammengestellten Ergebnisse.

Elementgröße [mm]	Berechnungsfall 1				Berechnungsfall 2			
	Spannung		Verformung		Spannung		Verformung	
	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]
200 x 200 x 200	7,10		0,297		5,36		0,392	
250 x 250 x 250	7,11	-0,14 %	0,289	2,69 %	5,34	0,37 %	0,381	2,81 %
330 x 330 x 330	7,05	0,70 %	0,279	6,06 %	5,23	2,43 %	0,368	6,12 %
500 x 500 x 500	7,09	0,14 %	0,263	11,45 %	5,19	3,17 %	0,350	10,71 %

Tab. 5-5: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung der Elementgröße

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Seitenlänge der Elemente nicht über 250 cm erhöht werden sollte.

5.5.8 Optimierung der Kontaktparameter

Wie bereits oben erläutert, haben die Kontaktparameter einen großen Einfluss auf die Konvergenz des Berechnungsalgorithmus. Dies gilt speziell für die Federkonstante K . Da die Durchdringung der Kontaktflächen ein theoretisches Konstrukt ist, ist zunächst einmal eine kleine Durchdringung, also eine große Federkonstante anzustreben. In [DHONDT 2016] werden Federkonstanten empfohlen, die etwa dem 5-fachen bis 50-fachen des E-Moduls der angrenzenden Materialien entsprechen. Das wären also Werte bis zu ca. 2.000.000 N/mm. Andererseits kann bei einer gewissen Oberflächenrauigkeit der Kontaktflächen davon ausgegangen werden, dass tatsächlich eine gewisse durchschnittliche Durchdringung auftritt. Für diesen Fall ergeben die Empfehlungen aus [DHONDT 2016] einen Federwert von ca. 0,5 N/mm. Es zeigt sich also, dass die Empfehlungen aus der Fachliteratur hier wenig hilfreich sind. Die Wahl eines günstigen Parameterwertes muss mit eigenen Optimierungsrechnungen unterstützt werden. Eigene Erfahrungen mit der Berechnung von Betonfahrbahnplatten haben gezeigt, dass ein Federwert von 1.000 N/mm in jedem Fall ausreichend ist, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Für die Optimierung wurde deshalb mit einem Federwert von 1.000 N/mm² gestartet. Anschließend wurde dieser Wert schrittweise verkleinert.

Im Zuge der Reduzierung der Federkonstante verkürzte sich die Rechenzeit von 15 min auf 4 min. Eine spürbare Verkürzung der Rechenzeit trat aber erst auf, als auch deutliche Auswirkungen auf die Spannungswerte zu verzeichnen waren.

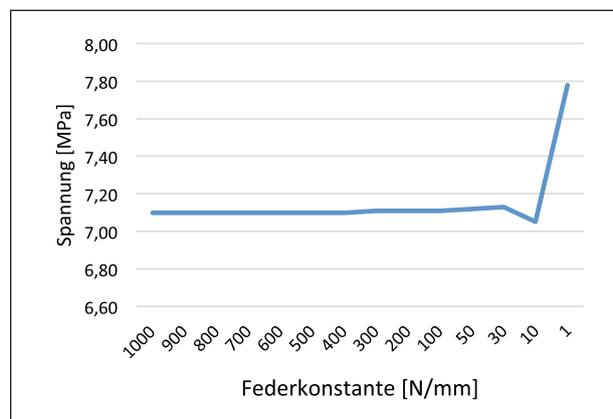


Bild 5-12: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 1

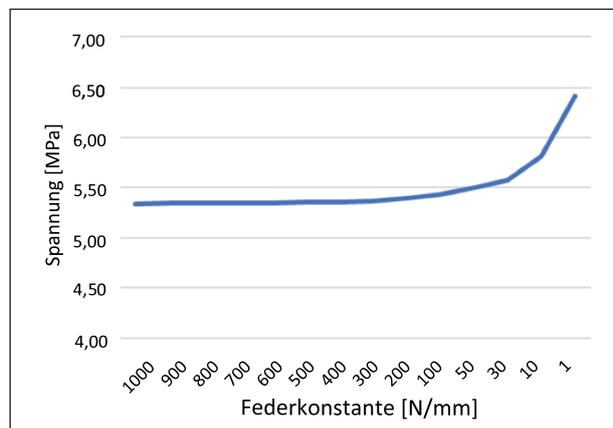


Bild 5-13: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 2

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass sich die Federkonstante bis auf ca. 100 N/mm reduzieren lässt, ohne dass die Berechnung wesentlich beeinflusst wird.

Die Berechnungen zeigten außerdem, dass die Reibung in der Kontaktfläche keinen relevanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat. Die Reibung braucht also im Modell nicht berücksichtigt werden.

Feder- konstante [N/mm]	Berechnungsfall 1				Berechnungsfall 2			
	Spannung		Verformung		Spannung		Verformung	
	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]	Betrag [MPa]	Abweichung [%]
1.000	7,10		0,290		5,34		0,383	
900	7,10	0,00 %	0,290	0,00 %	5,35	-0,19 %	0,383	0,00 %
800	7,10	0,00 %	0,291	-0,34 %	5,35	-0,19 %	0,383	0,00 %
700	7,10	0,00 %	0,291	-0,34 %	5,35	-0,19 %	0,384	-0,26 %
600	7,10	0,00 %	0,291	-0,34 %	5,35	-0,19 %	0,384	-0,26 %
500	7,10	0,00 %	0,291	-0,34 %	5,36	-0,37 %	0,384	-0,26 %
400	7,10	0,00 %	0,291	0,00 %	5,36	-0,19 %	0,385	-0,26 %
300	7,11	-0,14 %	0,293	-0,69 %	5,37	-0,37 %	0,386	-0,52 %
200	7,11	-0,14 %	0,294	-1,03 %	5,39	-0,75 %	0,388	-1,04 %
100	7,11	-0,14 %	0,299	-2,75 %	5,43	-1,50 %	0,393	-2,34 %
50	7,12	-0,14 %	0,307	-4,78 %	5,50	-2,42 %	0,403	-4,95 %
30	7,13	-0,28 %	0,316	-7,85 %	5,58	-3,91 %	0,415	-8,07 %
10	7,05	0,84 %	0,373	-27,30 %	5,81	-8,19 %	0,475	-23,70 %
1	7,78	-9,42 %	1,130	-284,35 %	6,42	-19,11 %	1,240	-222,92 %

Tab. 5-6: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung der Federkonstante

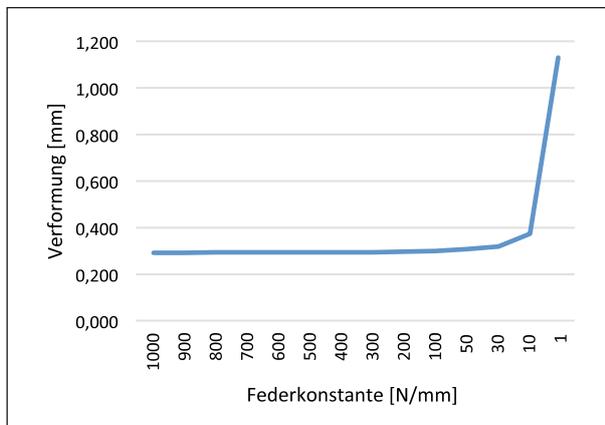


Bild 5-14: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1

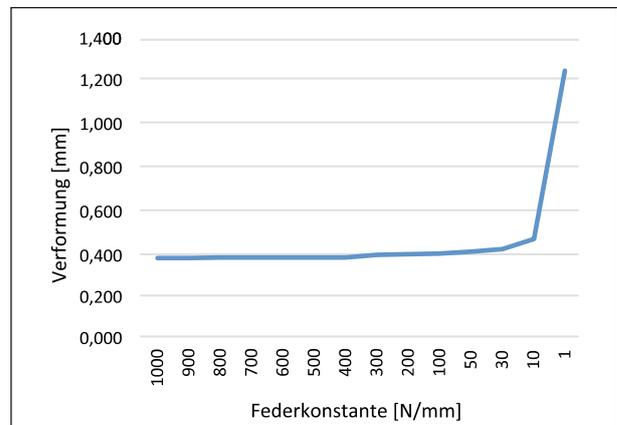


Bild 5-15: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2

5.6 Berechnungsmodell (Basismodell)

Auf der Grundlage der oben definierten Modellbestandteile (Kapitel 5.4) wurde das Berechnungsmodell definiert und vollständig in einem lauffähigen Programmscript beschrieben (Bild 5-16).

Auf Basis der Ergebnisse der Optimierung der Modellparameter (Kapitel 5.5) wurden die in Tabelle 5-7 zusammengestellten Parameterwerte für das Modell festgelegt.

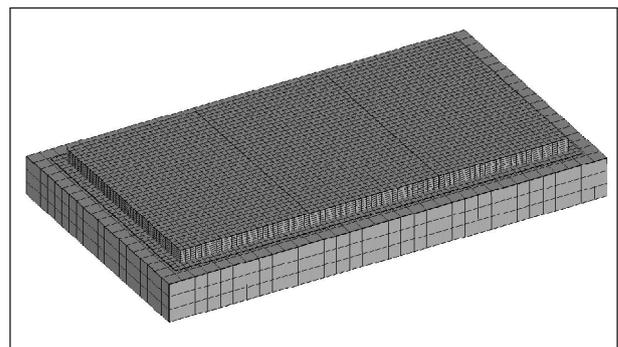


Bild 5-16: FEM-Modell für die Platten der duraBAST-Strecke

Modellparameter	Gewählter Wert
E-Modul Silikatharz	300 MPa
Elementtyp für das gesamte Modell	20-Knoten-Brick
Anzahl der Elementschichten in der Betonplatte	6
Seitenverhältnis der Elemente in der Betonplatte	1 : 1 : 0,4 (Länge : Breite : Dicke)
Anzahl der Elementschichten für Silikatharz	1
Dicke der Silikatharzschiicht	20 mm
Seitenverhältnis der Elemente im Silikatharz	1 : 5 : 5 (Länge : Breite : Dicke)
Überstand des Unterbaublocks	50 cm
Anzahl der Elementschichten im Unterbau	3
Seitenverhältnisse der Elemente im Unterbau	1 : 1 : 1
Dicke des Unterbaublocks	75 cm
Federkonstante für Kontaktdefinition	500 MPa

Tab. 5-7: Parameter Berechnungsmodell

Die Steifigkeitswerte für den Plattenbeton, den Unterbau und die Fugenfüllung wurden erst im Ergebnis der Kalibrierung festgelegt.

5.7 Kalibrierung

5.7.1 Datengrundlage

Für die Kalibrierung des Modells standen die Ergebnisse der FWD-Messungen zur Verfügung, welche durch die Hochschule Anhalt durchgeführt wurden (Anhang 5). Verwendet wurden die Messwerte aus dem ersten, dem dritten und dem vierten Untersuchungsbericht ([FWD 2017], [FWD 3 2019], [FWD 4 2019]).

Die FWD-Messungen wurden jeweils in Plattenmitte und am Plattenrand (mittig) ausgeführt. Da für die Dimensionierung der Platten die Spannungen am Rand maßgebend sind und im Rahmen des Forschungsvorhabens die Querkraftübertragung an der Fuge von besonderem Interesse ist, wurden die Daten der Randmessung für die Kalibrierung herangezogen. Hier gab es Ergebnisse für eine Stoßbelastung mit 50 kN, 75 kN und 100 kN. Die Auswertung der Messungen zeigte, dass die Stoßkraft keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hat (siehe [FWD 3 2019], Seite 10). Für die Kalibrierung wurden die 50 kN-Werte verwendet.

Der erste Untersuchungsbericht beinhaltete die Auswertung von FWD-Messungen, welche unmittelbar nach der Fertigstellung der Strecke durchgeführt wurden. Die auf der Grundlage dieser Ergeb-

nisse kalibrierten Modelle repräsentierten damit die neu hergestellte, noch unbelastete Strecke.

Im dritten Untersuchungsbericht waren die Auswertungsergebnisse von Messungen zusammengefasst, welche parallel bzw. im Anschluss an Belastungsserien mit dem Gerät MLS30 durchgeführt wurden. Für eine erneute Kalibrierung der Modelle wurden die Ergebnisse verwendet, welche an den belasteten Platten (FT 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10 und 11) nach Abschluss der Belastungsserien ermittelt wurden. Damit repräsentierten die so kalibrierten Modelle die bereits belastete Strecke.

5.7.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der Kalibrierung wurde angestrebt, den bei der FWD-Messung gemessenen Deflexionsverlauf auch im FEM-Modell bei analoger Belastung zu erzeugen. Dabei wurden die Messwerte benutzt, welche an den Quertugen generiert wurden. In diesem Bereich waren die größten Deflexionen zu erwarten und es traten die maßgebenden Spannungen auf. Als notwendige Randbedingung wurde die Einhaltung realistischer Werte für den Wirksamkeitsindex bei der Querkraftübertragung definiert.

Um die angestrebte Übereinstimmung bezüglich des Deflexionsverlaufs zu erreichen, wurden die Steifigkeitswerte (E-Modul) für den Plattenbeton und den Unterbau variiert. Die Variation weiterer Parameter (z. B. des Temperaturzustandes) wäre theoretisch möglich gewesen. Die entsprechenden Annahmen wären aber rein spekulativ und der Prak-

tikabilität des Modells nicht dienlich gewesen. Es ist zu betonen, dass die bei der Kalibrierung ermittelten Materialparameter eine optimale Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den zur Verfügung stehenden Messwerten lieferten. Die unter dieser Prämisse bestimmten Werte für den E-Modul müssen nicht zwingend mit den tatsächlichen Materialwerten übereinstimmen. Dies wäre nur der Fall, wenn das Modell in allen Einzelheiten die Realität perfekt wiedergeben würde. In der vorliegenden Untersuchung ergaben sich aber im Zuge der Kalibrierung ausschließlich Materialwerte, welche auch tatsächlich für das betreffende Material als realistisch gelten können. Diese spricht für die allgemeine Qualität des Modells.

Der sich bei den Berechnungen ergebende Wirkungsindex kann allein über die Vorgabe der Materialsteifigkeit des Fugenfüllmaterials gesteuert werden. Hierbei handelt es sich um ein rein virtuelles Material (siehe Kapitel 5.4.3). Ein Vergleich mit der tatsächlichen Fugenfüllung ist also nicht möglich. Durch Variation des E-Moduls wurde eine maximale Übereinstimmung mit den Werten aus den FWD-Messungen erreicht.

Für die Beschreibung des Deflexionsverlaufs wurden drei Punkte herangezogen: Lastmittelpunkt, 90 cm Abstand und 210 cm Abstand (siehe Bild 5-17).

Die Messwerte für die Platte FT12 wurden für die Kalibrierung nicht herangezogen, weil hier ein freier Plattenrand vorhanden ist und damit die Vergleich-

barkeit mit den anderen Messwerten nicht gegeben ist.

Bild 5-18 zeigt die Deflexionsverläufe, welche sich bei den FWD-Messungen für die einzelnen Platten der neu hergestellten Strecke ergaben.

Es ist deutlich erkennbar, dass zwei Gruppen zu unterscheiden sind: die Platten, welche auf einer Schottertragschicht (STS) liegen (Platte FT1-FT6) und die Platten, welche auf einer Asphalttragschicht (ATS) liegen (Platte FT7 bis FT12). Auffällig sind leicht erhöhte Einsenkungswerte für Platte FT5. Ein Grund hierfür konnte, auch unter Heranziehung der anderen Messwerte (FWD-Messung auf Tragschicht) nicht gefunden werden.

Für die Kalibrierung wurde aus beiden Gruppen jeweils ein mittlerer Deflexionsverlauf (Bild 5-19) berechnet. Eine weitere Differenzierung entsprechend der konstruktiven Ausführung der Querkraftübertragung erscheint nicht sinnvoll, weil die Unterschiede bezüglich der Plattenverformung relativ klein sind.

Bild 5-20 zeigt die Deflexionsverläufe, welche sich an den Platten nach 500.000 Übergängen mit dem Belastungsgerät MLS30 ergaben. Aufgeführt sind nur die Platten, für die eine entsprechende Wechselbelastung durchgeführt wurde.

Die deutliche Unterteilung zwischen den Bauweisen (STS, ATS), welche an der neuen Strecke vorhanden war, ist jetzt nicht mehr so ausgeprägt. Dies ist möglicherweise auf einen Nachverdichtungseffekt in der Schottertragschicht zurückzuführen. Trotz-

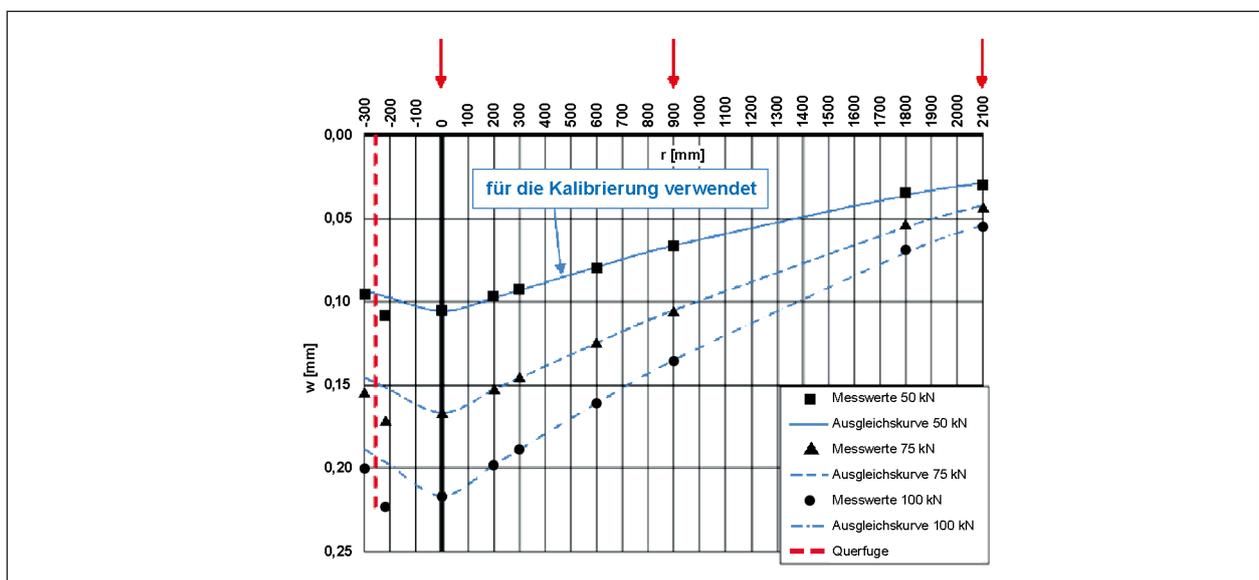


Bild 5-17: FWD-Messpunkte, welche für die Kalibrierung verwendet wurden

dem ist aber auch für die belastete Strecke zu konstatieren, dass die Deflexionen auf der Schottertragschicht höher sind als auf der Asphalttragschicht. Deshalb ist für die Kalibrierung auch bezüglich der schon belasteten Strecke eine Unterscheidung der Bauweisen angebracht. In Bild 5-21 sind die Deflexionsverläufe dargestellt, welche sich für die beiden Bauweisen jeweils aus den gemittelten Werten ergeben.

Bis August 2019 wurden weitere 250.000 Lastwechsel aufgebracht, sodass sich eine Gesamtwechselzahl von 750.000 ergab. Die anschließend bei FWD-Messungen ermittelten Deflexionsverläufe sind in Bild 5-22 dargestellt.

Die Gruppierung entsprechend der Unterlage ist ähnlich ausgeprägt wie in der ersten Messreihe (vor der Verkehrsbelastung). Entsprechend lassen sich wieder die Gruppen STS und ATS bilden. Die zugehörigen repräsentativen Deflexionsverläufe zeigt Bild 5-23.

Um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Deflexionsverläufen

zu erzielen, wurden im Modell die Steifigkeitswerte der Platten und des Unterbauvolumens variiert. Die Steifigkeit des Unterbaues wirkt sich besonders auf Absolutwerte der Durchbiegung aus. Mit der Plattensteifigkeit lässt sich die Form der Mulde beeinflussen. Die Variation der Fugensteifigkeit beeinflusst speziell die Deflexion direkt an der Fuge.

Generell ist festzuhalten, dass auch durch die Kalibrierung keine perfekte Übereinstimmung mit der Wirklichkeit erreichbar ist. Ein Berechnungsmodell bleibt immer eine Idealisierung. Das gilt auch und besonders im vorliegenden Fall, wo wesentliche Einflussfaktoren (z. B. der Temperaturzustand und der Schwindeinfluss) nur unzureichend bekannt sind. Trotzdem erhöht sich durch die Kalibrierung die Verlässlichkeit der Berechnungsergebnisse wesentlich.

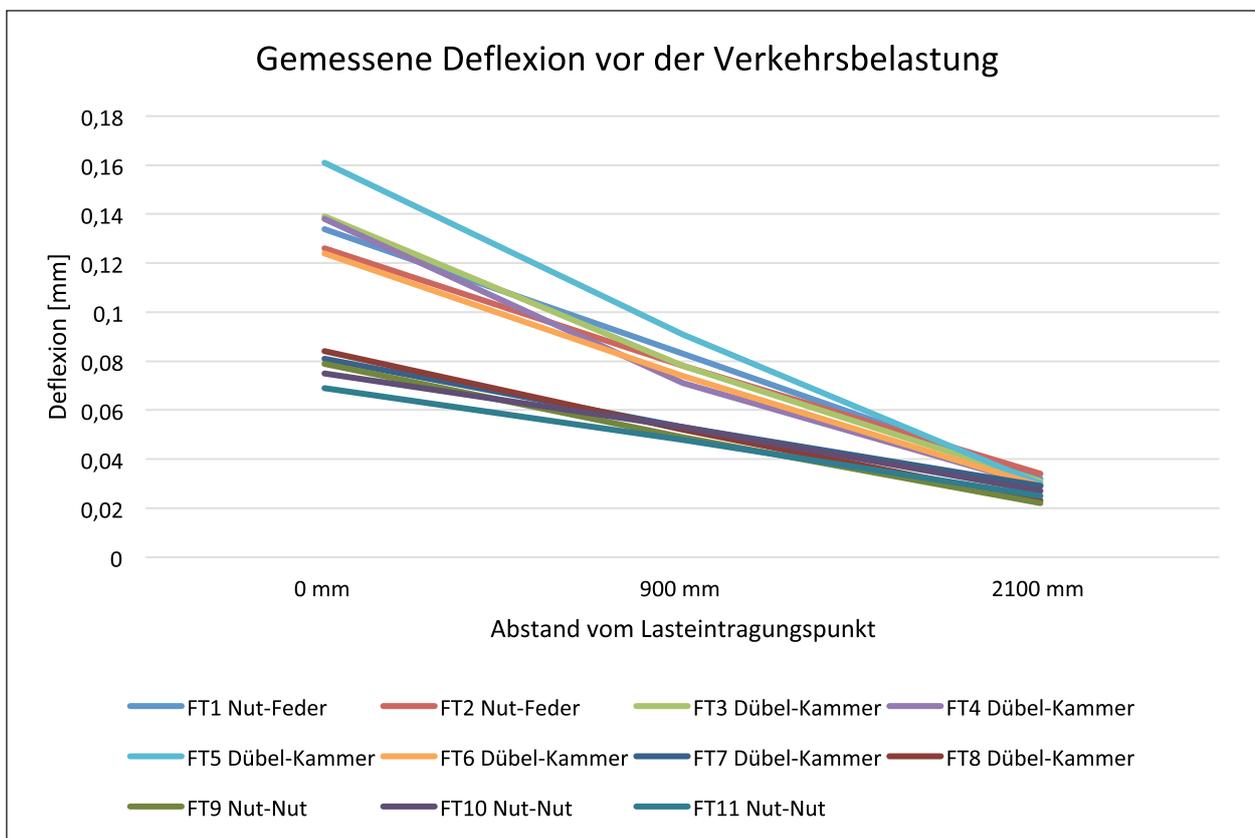


Bild 5-18: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe vor der Verkehrsbelastung

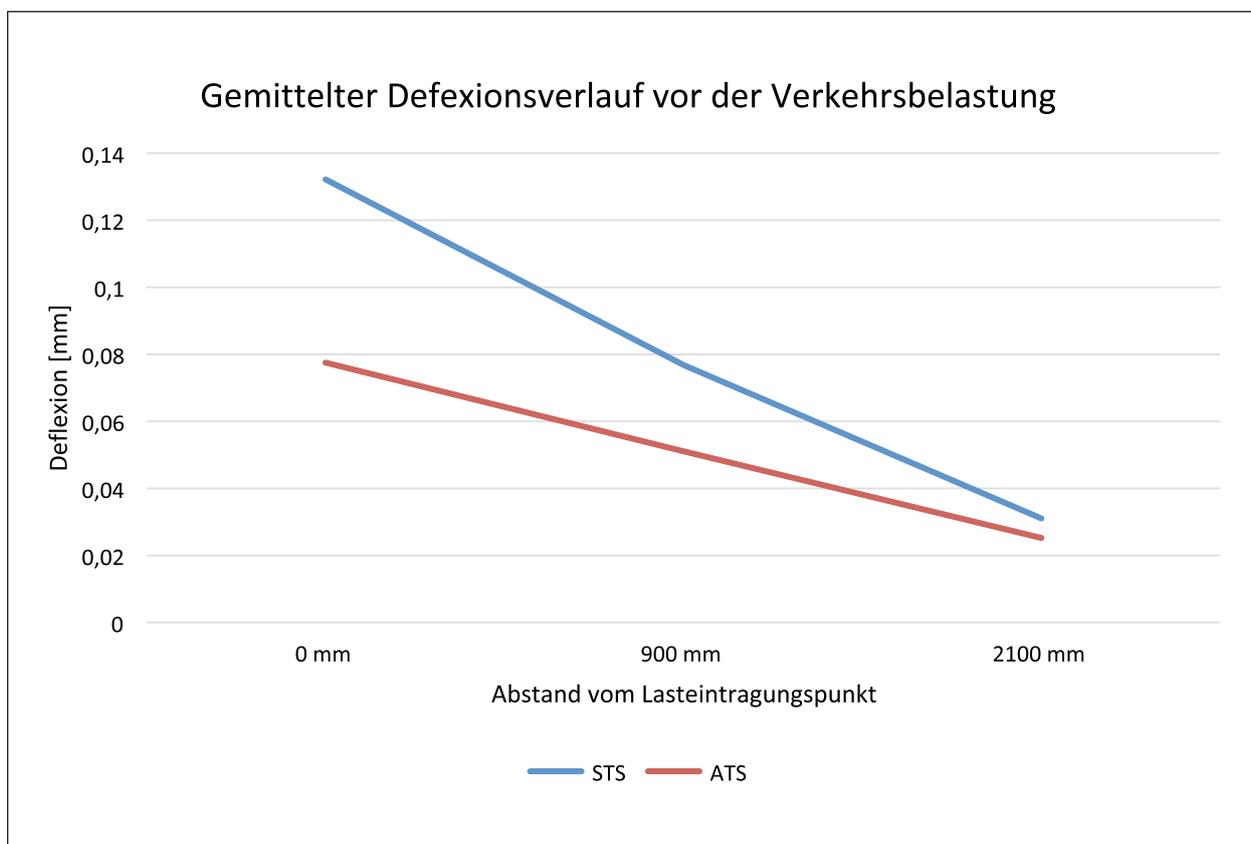


Bild 5-19: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht vor der Verkehrsbelastung

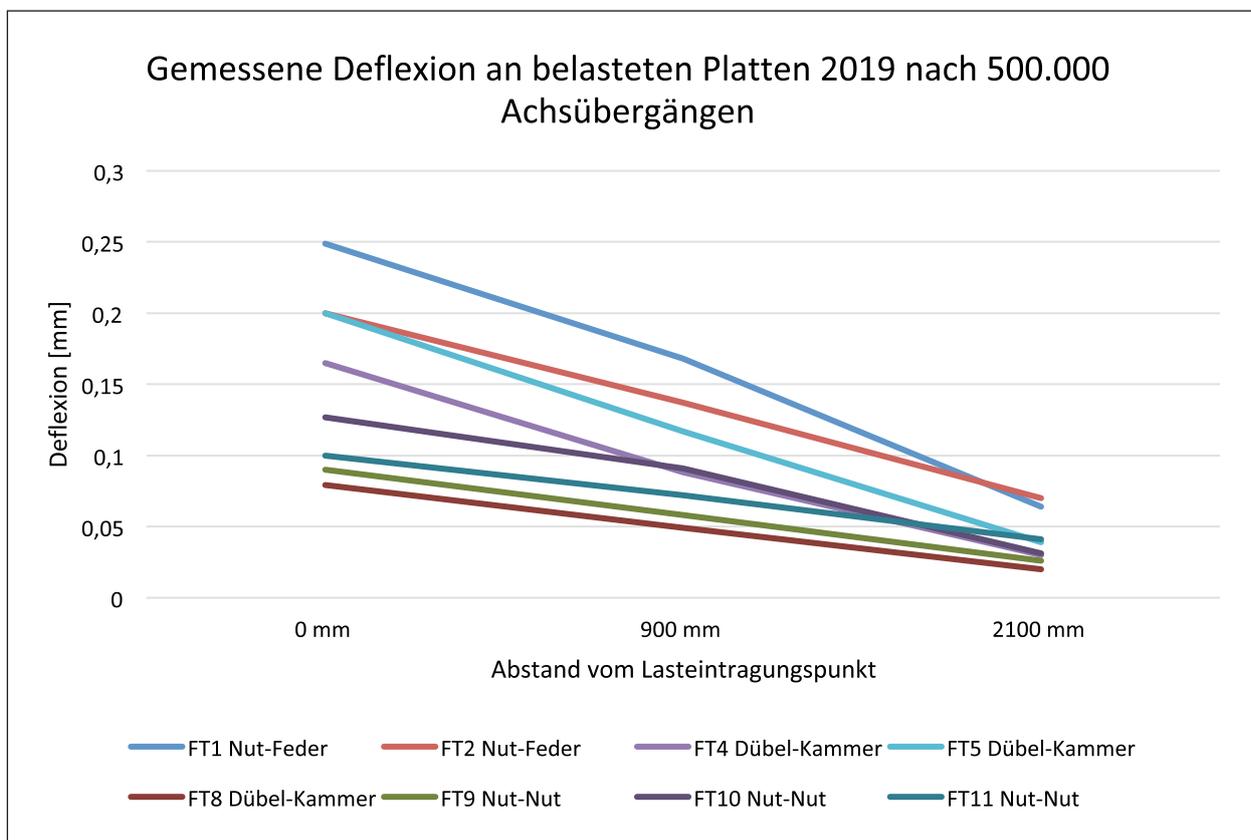


Bild 5-20: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe nach 500.000 Achsübergängen

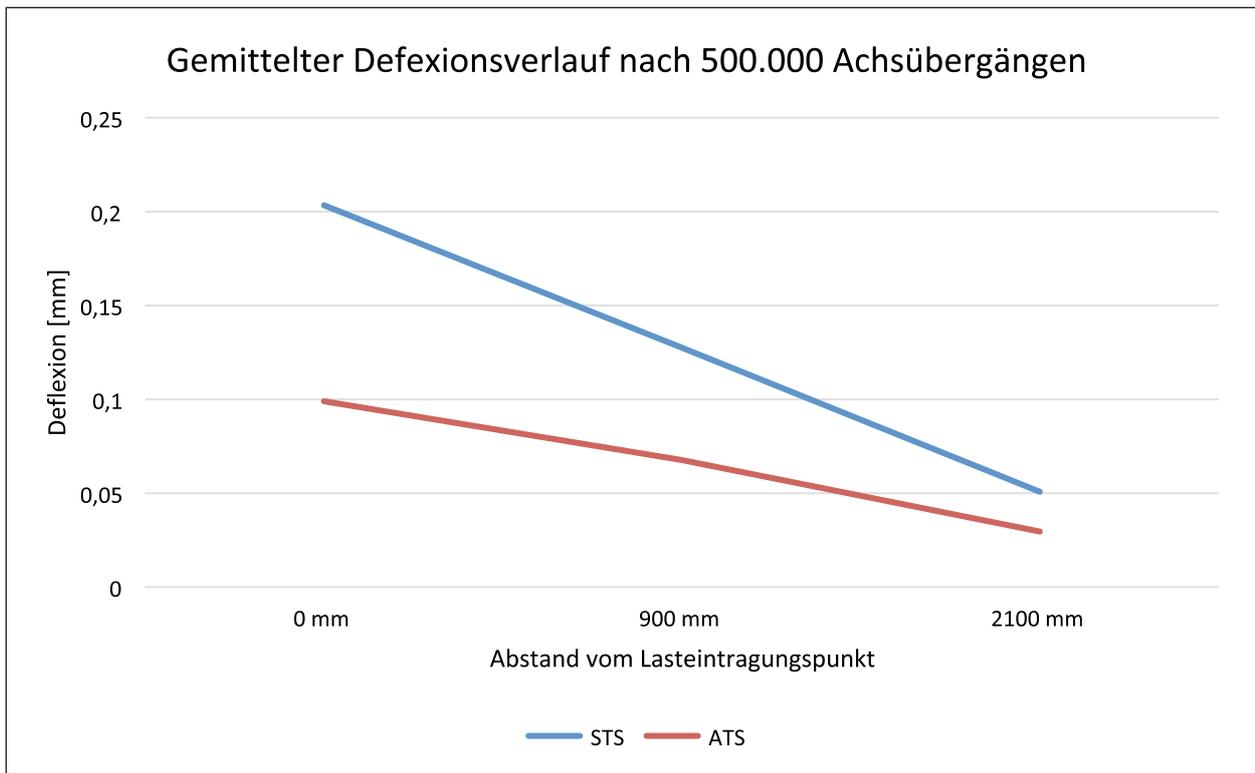


Bild 5-21: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht nach 500.000 Achsübergängen

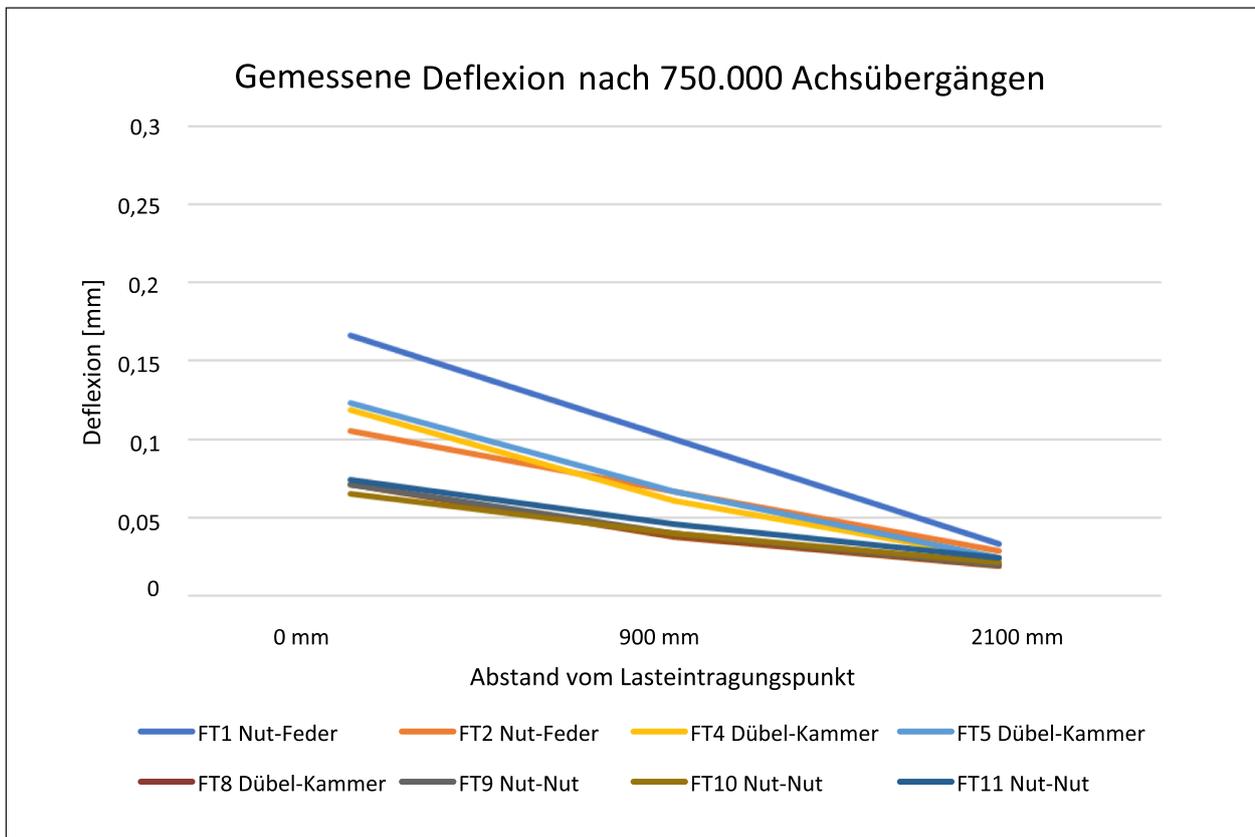


Bild 5-22: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe nach 750.000 Achsübergängen

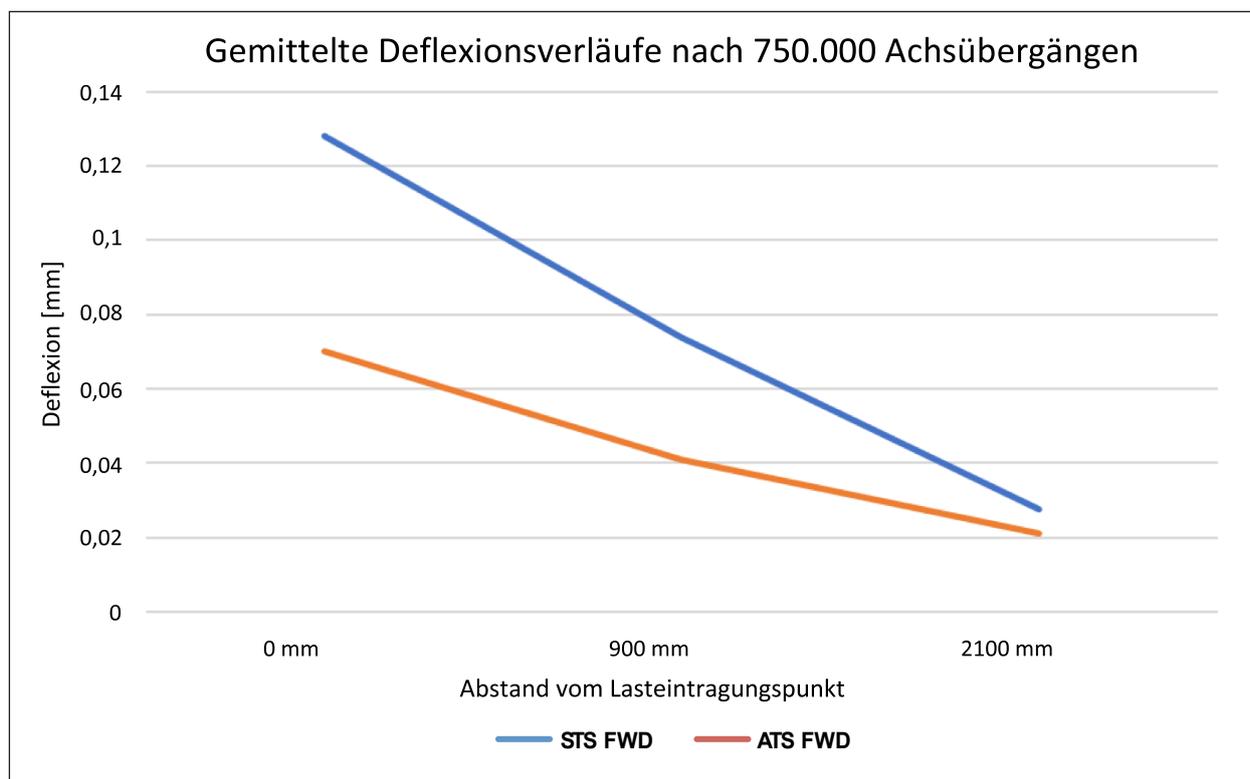


Bild 5-23: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht nach 750.000 Achsübergängen

5.7.3 Ergebnisse

Eine befriedigende Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den Messwerten wurden mit den in Tabelle 5-8 dargestellten Steifigkeitswerten erzielt.

In Tabelle 5-9 sind die gemessenen und berechneten Deflexionswerte zusammengefasst und gegenübergestellt.

In Bild 5-24 bis Bild 5-26 sind die Übereinstimmungen visualisiert.

Aus den Deflexionswerten an der Fuge wurde der jeweilige Wirksamkeitsindex berechnet. Die hierfür benutzte Formel lautet:

$$I_w = \frac{2 \cdot u_{oB}}{u_{oB} + u_{mB}} \quad (5-1)$$

I_w – Wirksamkeitsindex

u_{oB} – Deflexion an der Seite ohne Belastung

u_{mB} – Deflexion an der Seite mit Belastung

Die berechneten Deflexionswerte und die sich daraus ergebenden Werte für den Wirksamkeitsindex sind in Tabelle 5-10 zusammengestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit der Kalibrierung eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den verfügbaren Messwerten erreichbar ist. Bei der Einschätzung der größeren relativen Abweichungen im äußersten Messpunkt (2,1 m von der Fuge) ist zu beachten, dass es sich hier um sehr geringe Absolutwerte handelt. Die absoluten Differenzwerte betragen wenige 1/1000 Millimeter. Theoretisch ließe sich durch Variation weiterer Modellparameter jeweils eine nahezu perfekte Übereinstimmung erzielen. Dies würde allerdings eine Exaktheit suggerieren, welche mit dem Genauigkeitsniveau der weiteren Randbedingungen nicht kompatibel wäre.

Vor der Verkehrsbelastung			
	E-Modul Betonplatten	E-Modul Unterbau	E-Modul Fugenbereich
STS Modell	39.000 MPa	115 MPa	500 MPa
ATS Modell	39.000 MPa	210 MPa	500 MPa
Nach 500.000 Achsübergängen			
	E-Modul Betonplatten	E-Modul Unterbau	E-Modul Fugenbereich
STS Modell	38.000 MPa	70 MPa	100 MPa
ATS Modell	38.000 MPa	150 MPa	200 MPa
Nach 750.000 Achsübergängen			
	E-Modul Betonplatten	E-Modul Unterbau	E-Modul Fugenbereich
STS Modell	38.000 MPa	132 MPa	100 MPa
ATS Modell	38.000 MPa	250 MPa	200 MPa

Tab. 5-8: Steifigkeitswerte für die kalibrierten Modelle

vor der Verkehrsbelastung				
		Abstand von Fuge		
		0 mm	900 mm	2.100 mm
STS	FWD	0,132	0,077	0,031
	Modell	0,124	0,085	0,036
	Abweichung	-6,51 %	10,94 %	14,68 %
ATS	FWD	0,078	0,051	0,025
	Modell	0,081	0,051	0,018
	Abweichung	4,12 %	0,20 %	-28,57 %
nach 500.000 Achsübergängen				
		Abstand von Fuge		
		0 mm	900 mm	2.100 mm
STS	FWD	0,204	0,128	0,051
	Modell	0,198	0,130	0,057
	Abweichung	-2,85 %	1,96 %	11,72 %
ATS	FWD	0,099	0,068	0,030
	Modell	0,111	0,069	0,026
	Abweichung	12,02 %	2,53 %	-11,86 %
nach 750.000 Achsübergängen				
		Abstand von Fuge		
		0 mm	900 mm	2.100 mm
STS	FWD	0,128	0,074	0,028
	Modell	0,128	0,078	0,029
	Abweichung	-0,19 %	5,76 %	5,45 %
ATS	FWD	0,070	0,041	0,021
	Modell	0,080	0,046	0,015
	Abweichung	13,24 %	10,98 %	-29,05 %

Tab. 5-9: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Ergebnisse

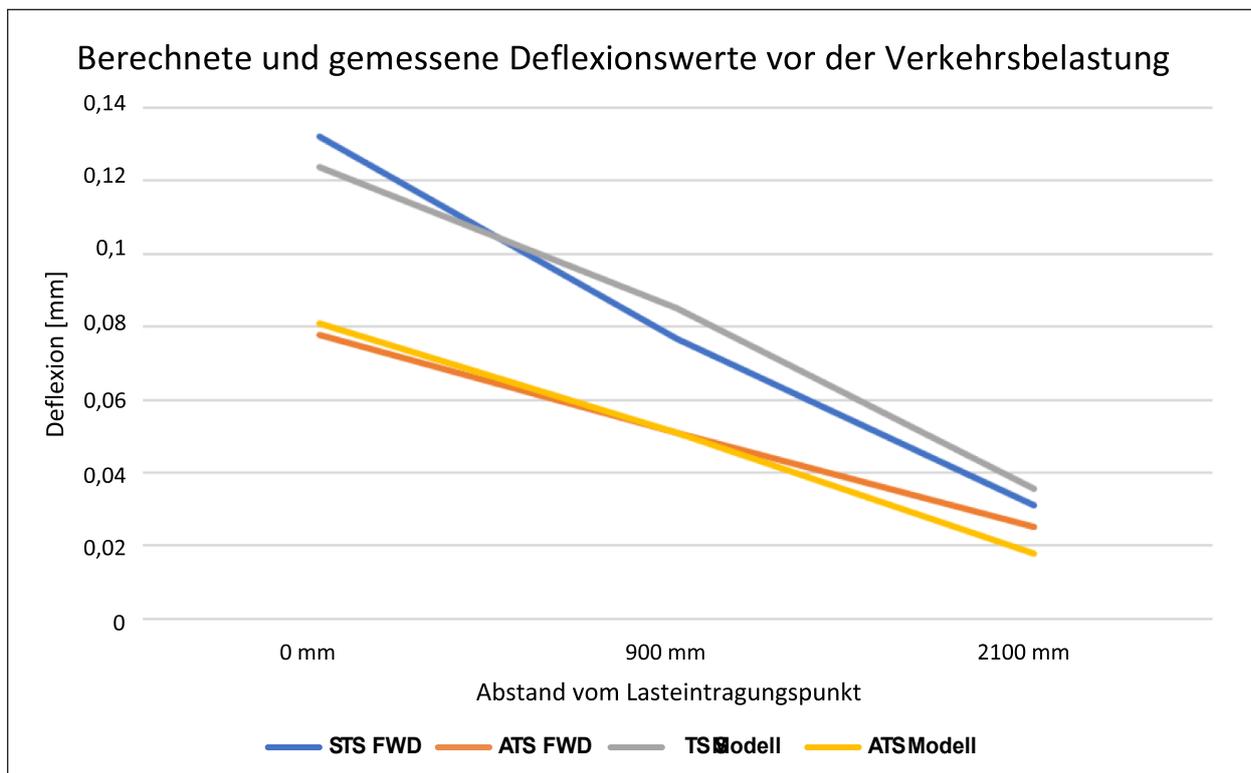


Bild 5-24: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte vor der Verkehrsbelastung

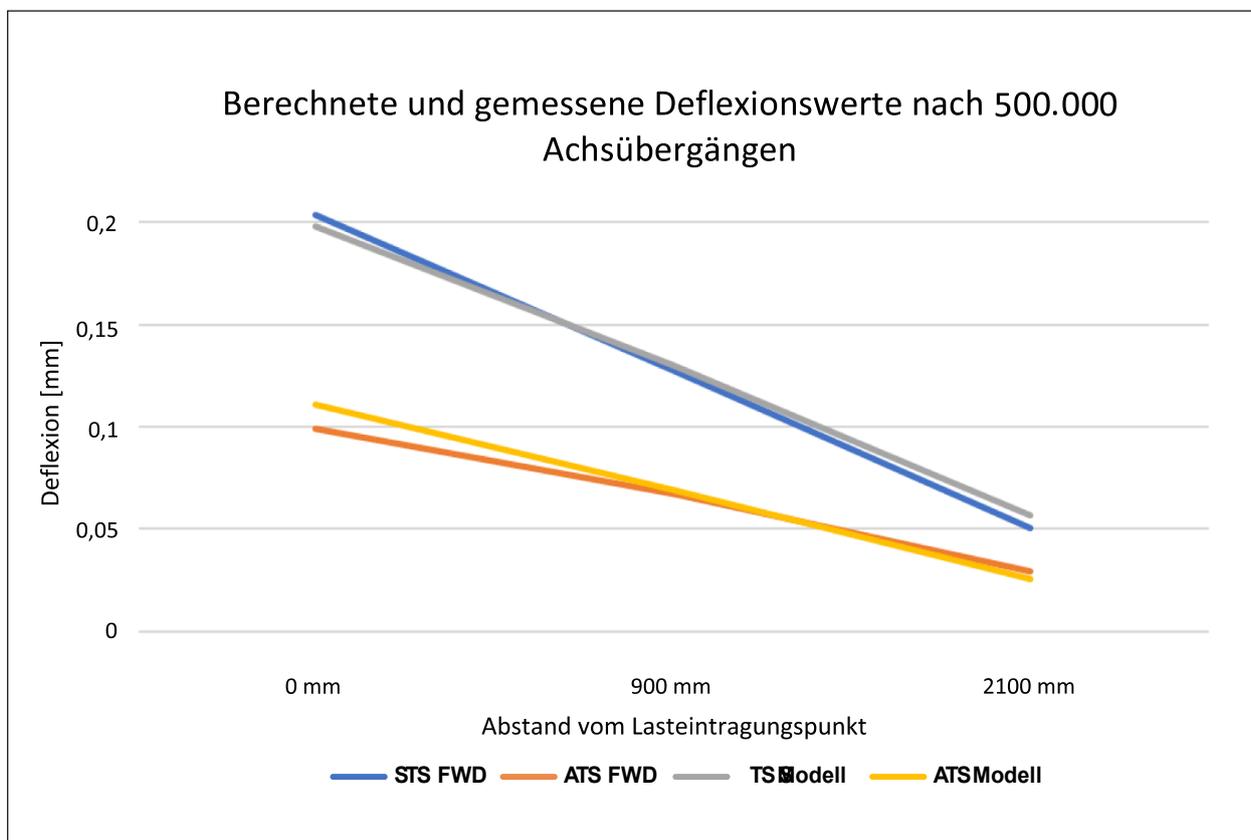


Bild 5-25: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte nach 500.000 Achsübergängen

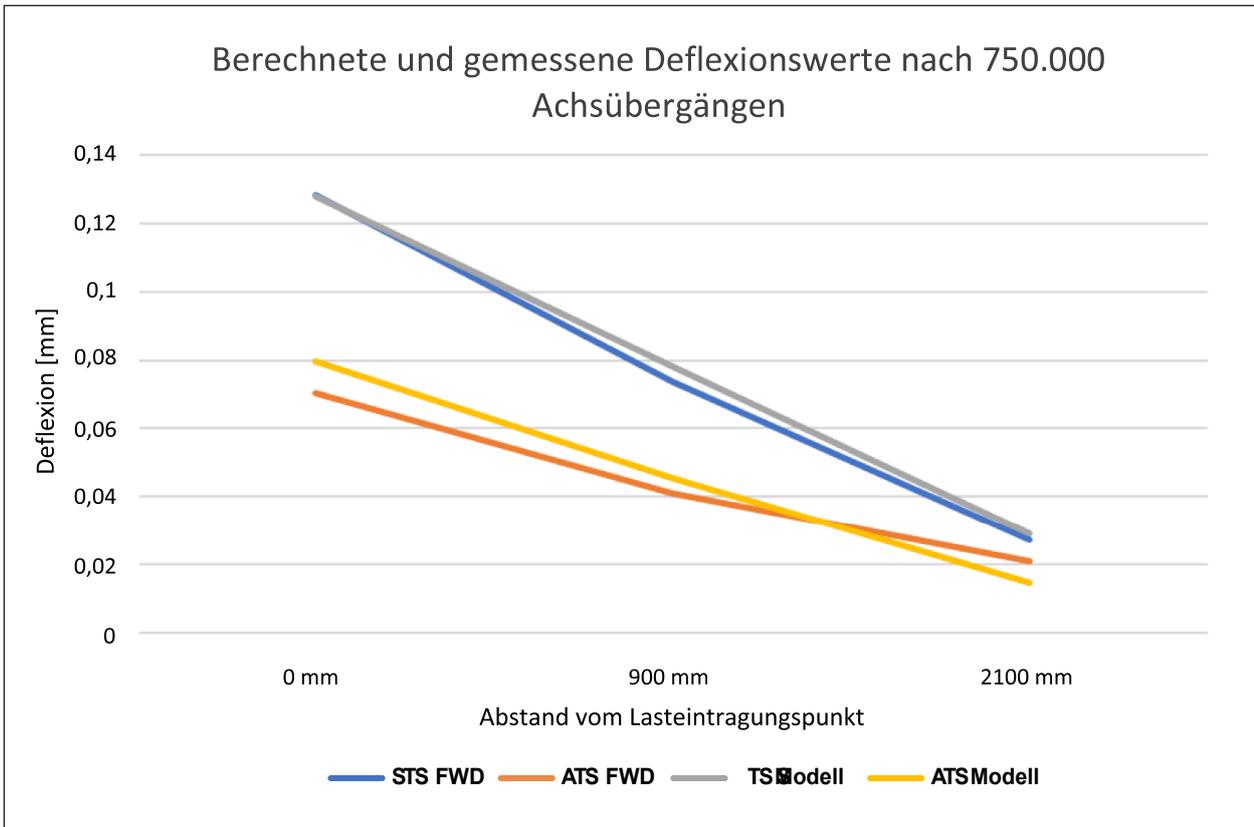


Bild 5-26: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte nach 750.000 Achsübergängen

Vor der Verkehrsbelastung			
	Deflexion an belasteter Seite	Deflexion an unbelasteter Seite	Wirksamkeitsindex
STS Modell	0,1236 mm	0,1155 mm	97 %
ATS Modell	0,0808 mm	0,0733 mm	95 %
Nach 500.000 Achsübergängen			
	Deflexion an belasteter Seite	Deflexion an unbelasteter Seite	Wirksamkeitsindex
STS Modell	0,1977 mm	0,1710 mm	93 %
ATS Modell	0,1109 mm	0,0959 mm	93 %
Nach 750.000 Achsübergängen			
	Deflexion an belasteter Seite	Deflexion an unbelasteter Seite	Wirksamkeitsindex
STS Modell	0,128 mm	0,104 mm	90 %
ATS Modell	0,0795 mm	0,0655 mm	90 %

Tab. 5-10: Berechneter Wirksamkeitsindex

5.7.4 Zusammenfassung der Modellparameter

Die im Kapitel 5.7.3 angegebenen Ergebniswerte erlauben es, eine allgemeine Empfehlung für den Parameteransatz des Berechnungsmodells zu geben. Eine Unterscheidung der Zustände nach 500.000 und 750.000 Achsübergängen ist dabei nicht sinnvoll, weil der Zustand mit 500.000 Achsübergängen offensichtlich ein kurzes Übergangsstadium darstellt. Für die Berechnung eines Systems nach relevanter Verkehrsbelastung wird der Zustand nach 750.000 Lastwechseln als maßgebend angesehen.

Die Parameter des optimierten und kalibrierten Berechnungsmodells sind in Tabelle 5-11 zusammengestellt.

Das Bild 5-27 zeigt das unter dem Einfluss der Last verformte Modell.

Das Berechnungsmodell stellt ein Analysewerkzeug dar, welches sich gegenüber anderen Berechnungskonzepten (analytische Formeln, ebene FEM-Modelle) durch eine wesentlich größere Realitätsnähe auszeichnet. Weil bei der Modelloptimierung

auch Temperatureinflüsse berücksichtigt wurden, kann auch die Wirkung unterschiedlicher Temperaturzustände erfasst werden. Die feinteilige Modellierung der Platten erlaubt dabei auch die realistische Abbildung nichtlinearer Temperaturverläufe in allen drei Dimensionen. Ebenso ist eine Differenzierung bezüglich der Materialparameter im Plattenvolumen möglich (z. B. Oberbeton/Unterbeton).

Durch eine Veränderung der Parameter kann das Modell modifiziert werden. Die Verwendung des Modells ist damit nicht an die hier betrachtete dura-

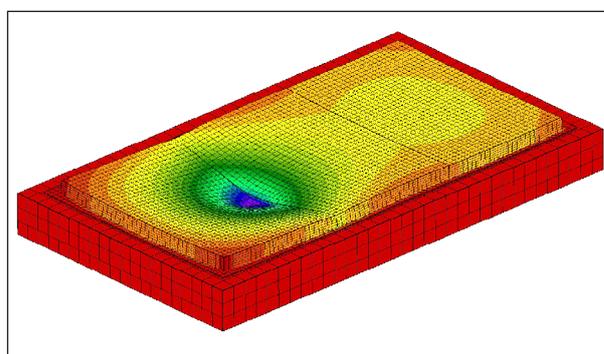


Bild 5-27: Verformtes Modell

	Platten auf STS nach Herstellung	Platten auf ATS nach Herstellung	Platten auf STS nach Belastung	Platten auf ATS nach Belastung
E-Modul Plattenbeton	39.000 MPa		38.000 MPa	
E-Modul Unterbaublock	115 MPa	210 MPa	65 MPa	150 MPa
E-Modul Fugenbereich	500 MPa	500 MPa	130 MPa	250 MPa
E-Modul Silikatharz	300 MPa			
Elementtyp für das gesamte Modell	20-Knoten-Brick			
Anzahl der Elementschichten in der Betonplatte	6			
Seitenverhältnis der Elemente in der Betonplatte	1 : 1 : 0,4 (Länge : Breite : Dicke)			
Anzahl der Elementschichten für Silikatharz	1			
Dicke der Silikatharzschiicht	20 mm			
Seitenverhältnis der Elemente im Silikatharz	1 : 5 : 5 (Länge : Breite : Dicke)			
Überstand des Unterbaublocks	50 cm			
Anzahl der Elementschichten im Unterbau	3			
Seitenverhältnisse der Elemente im Unterbau	1 : 1 : 1			
Dicke des Unterbaublocks	75 cm			
Federkonstante für Kontaktdefinition	500 MPa			

Tab. 5-11: Parameter für das kalibrierte Modell

BASSt-Strecke gebunden. Die entsprechenden Modellanpassungen sind über den Script-gesteuerten Modellaufbau komfortabel realisierbar.

Durch den hohen Differenzierungsgrad des Modells ergibt sich ein entsprechend großes zu verarbeitendes Datenvolumen. Daraus resultieren längere Bearbeitungszeiten bei der rechnerischen Analyse. Auch bei Verwendung leistungsfähiger PC-Technik sind Rechenzeiten von mehr als 2 Stunden zu erwarten. Bei der Berücksichtigung von Temperaturlastfällen wird sich der Zeitbedarf weiter erhöhen.

6 Fazit zum Forschungsvorhaben

6.1 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Verkehrsfläche aus Fertigteilen mit unterschiedlichen Oberflächentexturen errichtet, die unabhängig von Bestandsflächen oder anderweitigen Randbedingungen qualitätskonform ausgelegt, höhenmäßig ausgerichtet und in der Lage fixiert wurde. Die Dauerhaftigkeit wurde durch Belastungen mit dem MLS nachgewiesen. Das System eignet sich folglich für den Einsatz im Neubau oder Ersatzneubau.

Es stehen nunmehr die notwendigen Hilfsmittel zur Verfügung, die zur Dimensionierung, Herstellung der Fertigteile mit verschiedenen Oberflächen und Kopplungsmöglichkeiten und zur Verlegung der Fertigteile im Rahmen von Neubaumaßnahmen erforderlich sind. Hierdurch können Fertigteile mit all ihren Vorteilen wie hohe und gleichbleibende Qualität durch Herstellung unter geschützten Bedingungen, weitestgehend witterungsunabhängiger Einbau in situ, Wegfall der Aushärtezeiten nach Errichtung der Verkehrsfläche sowie eine hohe Dauerhaftigkeit auch zur Herstellung von Verkehrsflächen im Neubau eingesetzt werden. Somit steht eine weitere Alternative zu den herkömmlichen Bauverfahren in Beton- oder Asphaltbauweise zur Verfügung.

Der Einbau des Demonstrators hat gezeigt, dass Flächen mit Betonfertigteilen im Neubau hergestellt werden können. Beim Einbau selbst haben sich die verschiedenen Tragschichten, die Höhenjustierelemente und die Kopplungselemente als gleichwertig erwiesen. Lediglich der Einbau des Nut-Feder-Systems erfordert größere Aufmerksamkeit beim Einfädeln, um eine Beschädigung der Feder zu vermei-

den. Die Auswertung der FWD-Messungen hat gezeigt, dass mit Hinblick auf den Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung die Systeme Nut/Nut-Anker und Nut/Feder bessere Werte lieferten als das System Dübel/Dübelkammer. Zudem haben die Messungen ergeben, dass sich das System Dübel/Dübelkammer sowohl auf Schottertragschicht als auch auf Asphalttragschicht nach der Belastung ungünstiger darstellte als bei den untersuchten Nut-Nut- oder Nut-Feder-Verbindungen.

Für den Verschluss der Fugen haben sich Vergussmassen als vorteilhaft gegenüber Fugenprofilen herausgestellt, da sich diese hinsichtlich des Einsatzes bei variierenden und

Zur Ermittlung der Spannungszustände im Fertigteilssystem wurde als Dimensionierungsgrundlage ein geeignetes FEM-Modell (3D Volumen-Elemente System) verwendet. Verschiedene technische Vorrichtungen und Vorgehensweisen zur Höhenjustierung und zur Kopplung der Fertigteile untereinander wurden diskutiert und im Rahmen des Demonstrators auf dem duraBASSt erprobt. Durch FWD-Messungen nach den verschiedenen Belastungsphasen wurde zum einen die Wirkung der Kopplungselemente nachgewiesen und zum anderen wurden Messergebnisse generiert, mit denen das FEM-Modell kalibriert werden konnte. Durch die präzisierten Eingangsparameter in das FEM-Modell konnten praxisrelevante Berechnungsergebnisse erzielt werden.

6.2 Ausblick

Das Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass eine innovative Herstellung von Verkehrsflächen mit Fertigteilen möglich ist. Mit Vorlage der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens können Fertigteile auch im Neu- bzw. Ersatzneubau zum Einsatz kommen und durch ihre Vorteile und Dauerhaftigkeit die Nachhaltigkeit der Verkehrsflächen verbessern. Dabei ist die schnelle Wiederverfügbarkeit der Verkehrsanlage von großem Vorteil.

Nach der Entwicklung und Validierung des Systems im kleinen Rahmen mittels Demonstrator auf dem duraBASSt sind nunmehr die Grundlagen geschaffen, um Fertigteile auch in der Praxis anwenden zu können. Eine breite Nutzung wäre dabei wünschenswert, um die Bauweise als Alternative etablieren zu können.

Im Rahmen der Sanierung eines hochbelasteten Kreuzungs- bzw. Einfahrbereiches zu einem hochfrequentierten Industriebetrieb wurden Fertigteile beispielsweise bereits angewandt. Hier kamen nicht nur die im Forschungsverfahren erforschten Kopplungs- und Höhenjustiersysteme zum Einsatz, sondern es mussten zudem komplizierte Quer- und Längsgefälle mit entsprechenden Wechsellösungen realisiert werden. Ausschlaggebend zur Wahl der Fertigteilbauweise war die kurze Bauzeit und unmittelbare Verkehrsfreigabe, wodurch die Störung des Betriebes verkürzt und somit die mittelbaren Kosten infolge der Baumaßnahme minimiert werden konnten.

Literatur

- [AP Trag C2.2] Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen – Teil C 2.2, Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen – Betonbauweisen – AP Trag Teil C 2.2, FGSV-Arbeitspapier, Ausgabe 2017
- [BUCH et al. 2010] BUCH, N. et al.: “Precast Concrete Pavement for Intermittent Concrete Pavement Repair Applications”; 7. International DUT-Workshop, Carmona, 2010
- [BUCH et al. 2011] BUCH, N. et al.: “Technical and Construction Considerations for Jointed Precast Concrete Pavement Applications”, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Edmonton, Alberta, 2011
- [DHONDT 2016] DHONDT, G.: CalculiX CrunchiX USER'S MANUAL Version 2.11, 2016
- [EN 13286-47] DIN EN 13286-47:2012-07, ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes; Deutsche Fassung EN 13286-47:2012
- [FE 08.0217/2012/ERB] WIELAND, M.: „Instandsetzung partiell geschädigter Betonfahrbahndecken mittels Betonfertigteilen“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2012
- [FE 08.0236//2015/ERB] VILLARET, S. et al.: „Einsatz von Fertigteilen für die dauerhafte Instandsetzung sowie die Schaffung von Entspannungsbereichen an Betonfahrbahndecken“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2017
- [FE 08.0244/2015/FRB] HOPPE, J.; PIRSKAWETZ, S.; RECKNAGEL, CH.; SPITZER, S.; WENZEL, N.: „Optimierung von Fugenkonstruktionen – Ermittlung realer Beanspruchungen des Fugensystems“ im Rahmen des Forschungsprojektes FE 08.0244/2015/FRB, Bundesanstalt für Straßenwesen 2019
- [FE 89.0279/2012] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.: „Machbarkeitsstudie zum Einsatz von vorgefertigten Betonfertigteilen zur schnellen Sanierung lokaler Schadstellen“ im Rahmen des Forschungsprojektes FE 89.0279/2012, Bundesanstalt für Straßenwesen 2012
- [FE 89.0283/2013] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.: „Weiterentwicklung und Erweiterung der theoretischen Grundlagen für die Instandsetzungsmethode mittels Betonfertigteilen“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2014
- [FWD 2017] LÜDIKE, H.; WEINGART, W.: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer im Rahmen des Forschungsprojektes FE 08.0253/2017/ERB, Hochschule Anhalt 2017
- [FWD 3 2019] LÜDIKE, H.; WEINGART, W.: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer im Rahmen des Forschungsprojektes FE 08.0253/2017/ERB, 3. Untersuchungsbericht, Hochschule Anhalt 2019
- [FWD 4 2019] LÜDIKE, H.; WEINGART, W.: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer im Rahmen des Forschungsprojektes FE 08.0253/2017/ERB, 4. Untersuchungsbericht, Hochschule Anhalt 2019
- [KOHLER 2009] KOHLER, E.; HARVEY, J.; DUPLESSIS, L.; MOTUMAH, L.: “Comparison of Precast and Cast-in-Place Concrete Pavements Responses under Heavy Vehicle Simulator Loads“, 8th International Conf on Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields, Champaign, Illinois, June 2009
- [KWIKSLAB 2006] KWIK SLAB Roadway Repair Solutions: Produktbroschüre auf <http://www.kwikslab.com/media/brochure.pdf> (01.08.2012)
- [LANE 2011] LANE, B., KAZMIEROWSKIE, T.: “Performance of Precast Concrete Pavement Repairs on an Urban Freeway in Toronto“, Paper prepared for presentation at the Session: Innovative Developments in Sustainable Pavements of the 2011 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Edmonton, Alberta
- [MERRITT 2012] MERRITT, D.; TYSON, S.: “Precast Prestressed Concrete Pavements for Sustainable Pavement Rehabilitation in the USA“, 10th International Conference on Concrete Pavements, Quebec 2012
- [PFEIFER 1972] PFEIFER, L.: „Baustraßen aus Fertigteilen“, Die Straße, Ausgabe Heft 9, 1972
- [PFEIFER 1982] PFEIFER, L.: „Großflächige Betonfertigteile für Verkehrsflächen“, Die Straße, Ausgabe Heft 5, 1982

[RIWE 2014] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.: „Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Fertigteilen für die dauerhafte Ausführung von Entspannungsbereichen in Betonfahrbahndecken“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2014

[ROMAN ROAD 2011] BRODAL, A.: “Precast Concrete Paving Slabs: Built to Last and Install Fast” auf <http://precast.org/2011/05/precast-concrete-paving-slabs-built-to-last-and-install-fast/> (01.08.2012), Bilder Eigentum der Roman Stone Construction.Co

[ROMAN STONE] BRODAL, A.: “A brief overview of Roman Stone Construction Companys method of precast concrete pavement repair” auf <http://precast.org/wp-content/uploads/docs/8/RomanStonePrecastConcrete.pdf> (01.08.2012)

[SERUGA 2012] SERUGA, A.; SZYLOWSKI, R.: “Experiences resulted from construction of two-way posttensioned concrete pavement”, 10th International Conference on Concrete Pavements, Quebec 2012

[SMITH 2009] SMITH, P. J.: Main Street, “Jointed Precast Pavement Slabs reach mainstream acceptance status”, Precast Solutions 2009

[TP BF-StB Teil B 8.3] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz, Ausgabe 2012, FGSV, Köln

[ZTV Asphalt-StB 07] Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, ZTV Asphalt, Ausgabe 2007, Fassung 2013, FGSV, Köln

Tabellen

Tab. 4-1: Zeitpunkte der FWD-Messungen

Tab. 5-1: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung des Seitenverhältnisses der Elemente

Tab. 5-2: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung des Seitenverhältnisses der Elemente

Tab. 5-3: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung des Überstandes

Tab. 5-4: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung des Überstandes

Tab. 5-5: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Erhöhung der Elementgröße

Tab. 5-6: Berechnungsergebnisse bei der schrittweisen Reduzierung der Federkonstante

Tab. 5-7: Parameter Berechnungsmodell

Tab. 5-8: Steifigkeitswerte für die kalibrierten Modelle

Tab. 5-9: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Ergebnisse

Tab. 5-10: Berechneter Wirksamkeitsindex

Tab. 5-11: Parameter für das kalibrierte Modell

Bilder

Bild 2-1: Fertigteilreihe

Bild 3-1: Protokoll CBR-Versuch Schottertragschicht

Bild 3-2: Vorbereitetes Baufeld mit Schotter- und Asphalttragschicht

Bild 3-3: Schablone zur Fixierung der Justierelemente

Bild 3-4: Bewehrung im Bereich der Transportanker

Bild 3-5: Beispieticket vom 29.11.2017

Bild 3-6: Herstellung der Fase

Bild 3-7: Herstellung rundes Fertigteil

Bild 3-8: Auf Lkw verladene Fertigteile

Bild 3-9: Gurtschlaufen nach Verlegung des Fertigteils

Bild 3-10: Beim Einbau abgeplatzte Betonkante

Bild 3-11: Kürzen eingebrachter Dübel

Bild 3-12: Rundes Fertigteil mit OPB-Oberfläche

Bild 3-13: Bohren der Aussparung für rundes Fertigteil

- Bild 3-14: Entwässerungseinrichtung für rundes Fertigteil
- Bild 3-15: Eingesetztes rundes Fertigteil
- Bild 3-16: Abplatzung am Plattenrand durch Holzkeil
- Bild 3-17: Metallprofil zum Kantenschutz
- Bild 3-18: Säubern der Aussparungen für die Dübel
- Bild 3-19: Abtrennen der Dübel
- Bild 3-20: Teil des Höhenjustierelements JTU
- Bild 3-21: Abplatzung an Oberseite des Fertigteils beim Entfernen des Klebestreifens
- Bild 3-22: Silikatharz läuft unter der Folie entlang
- Bild 4-1: MLS 30 auf den Fertigteilplatten
- Bild 4-2: Belastungsstellen MLS30
- Bild 4-3: Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a [MN/m²]
- Bild 4-4: Mittelwerte des Bettungsmoduls E_0 [MN/m²]
- Bild 4-5: Mittelwerte des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung [%]
- Bild 4-7: Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a [MN/m²] für die verschiedenen Fugenausführungen
- Bild 4-8: Mittelwerte des Bettungsmoduls E_0 [MN/m²] für die verschiedenen Fugentypen
- Bild 4-9: Mittelwerte des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung [%] für die verschiedenen Fugenausführungen
- Bild 4-10: Mittelwerte der auf 50 kN bezogenen Relativdeflexion an den Quertrennungen bzw. Plattenecken benachbarter Fertigteile [mm] für die verschiedenen Fugenausführungen
- Bild 4-10: Äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] an den belasteten Quertrennungen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10
- Bild 4-11: Bettungsmodul E_0 [MN/m²] an den belasteten Quertrennungen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10
- Bild 4-12: Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] an den belasteten Quertrennungen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10
- Bild 4-13: Relativdeflexion ΔD [mm] bezogen auf 50 kN Stoßkraft an den belasteten Quertrennungen und zugehörigen Plattenecken der FT 1, 4, 8 und 10
- Bild 4-14: Blick auf die Fertigteilreihe (im Vordergrund Fertigteil 12)
- Bild 4-15: Fertigteile mit Besenstrichtextur
- Bild 4-16: Rundes Fertigteil mit offenporigem Beton
- Bild 5-1: 20-Knoten-Brickelement
- Bild 5-2: Modellierung Fugenbereich
- Bild 5-3: Programmintern erzeugte Federn zur Simulation des Kontaktes (Bild aus [DHONDT 2016])
- Bild 5-4: Kontaktspannung in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktflächen (Bild aus [DHONDT 2016])
- Bild 5-5: Basismodell für die Optimierung
- Bild 5-6: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 1
- Bild 5-7: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 2
- Bild 5-8: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1
- Bild 5-9: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2
- Bild 5-10: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1
- Bild 5-11: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2
- Bild 5-12: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 1
- Bild 5-13: Entwicklung der Maximalspannungen im Berechnungsfall 2
- Bild 5-14: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 1

-
- Bild 5-15: Entwicklung der Verformungen im Berechnungsfall 2
- Bild 5-16: FEM-Modell für die Platten der duraBAST-Strecke
- Bild 5-17: FWD-Messpunkte, welche für die Kalibrierung verwendet wurden
- Bild 5-18: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe vor der Verkehrsbelastung
- Bild 5-19: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht vor der Verkehrsbelastung
- Bild 5-20: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe nach 500.000 Achsübergängen
- Bild 5-21: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht nach 500.000 Achsübergängen
- Bild 5-22: Bei den FWD-Messungen ermittelte Deflexionsverläufe nach 750.000 Achsübergängen
- Bild 5-23: Gemittelte Deflexionsverläufe für die Platte auf Schottertragschicht und auf Asphalttragschicht nach 750.000 Achsübergängen
- Bild 5-24: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte vor der Verkehrsbelastung
- Bild 5-25: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte nach 500.000 Achsübergängen
- Bild 5-26: Vergleich der berechneten und der gemessenen Deflexionswerte nach 750.000 Achsübergängen
- Bild 5-27: Verformtes Modell

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

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

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

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

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergusmassen

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

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

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

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

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

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkühl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

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

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

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

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

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

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

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

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

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

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

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

S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

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

S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens

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

S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummiantellen

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

S 192: Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen

Čičković, Bald, Middendorf

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

S 193: Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses

Bolz, Wellner, Lindner, Schulze

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

S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

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

S 195: Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement

Berthold, Großmann

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

S 196: Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau

Huber, Birle, Heyer, Demond

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

S 197: Lösungsstudie zur Umsetzung der ASR A5.2 im Kontext mit der Herstellung von Betonfahrbahndecken

Tschernack, Gebhardt, Villaret

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

S 198: Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundlegende Erneuerung auf dem duraBAST

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdike

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.