

Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 180

bast

Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

von

Thorsten Kathmann
Thorsten Hermes
Uwe Kucera
Jörg Stöver

DTV-Verkehrsconsult GmbH
Aachen

Johannes Neumann
Jan Lehmkuhl
Jan Mirco Pfeifer

ISAC GmbH
Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 180

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0316

Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Fachbetreuung

Dirk Jansen

Referat

Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

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 978-3-95606-708-2

Bergisch Gladbach, September 2022

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

In diesem Forschungsprojekt FE 04.0316/2018/ORB „Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton“ werden die RDO Beton quelloffen und zukunftssicher implementiert. Grundlage sind die RDO Beton 09 in der Entwurfsfassung vom 7. Mai 2018, welche im Folgenden nur noch RDO Beton genannt werden. Das Programm wird in JavaScript unter Verwendung gängiger Standards und Praktiken implementiert und soll unter der freien Software-Lizenz GPLv3 veröffentlicht werden. Besonderes Augenmerk liegt auf der guten Dokumentation und Modularität, was allen interessierten Fachleuten die einfache Benutzung, Wartung und Erweiterung der Software ermöglicht.

Das Projekt gliedert sich dabei in Literaturrecherche zu den RDO Beton, Definition und Dokumentation von Anforderungen, Implementierung von Rechenkern und grafischer Benutzeroberfläche (GUI) sowie die Erstellung der Dokumentation für die Anwender.

Eine ausführliche Recherche zu den Hintergründen der für die Nachweisführung verwendeten Momente in den RDO Beton verbessert die Dokumentation des Verfahrens. Insbesondere wird die Formel für das Moment aus Verkehrsbelastung auf seine korrekte Herkunft zurückgeführt. Zur Herkunft der verwendeten Anpassungsfaktoren wird nicht recherchiert. Die Literaturrecherche liefert damit die Grundlage zur verfahrenssicheren Implementierung der RDO Beton.

Die Zusammenstellung der Anforderungen an die Software erfolgt im Lastenheft, das sowohl die Grundlage für dieses Projekt als auch eine Vorlage für ähnliche Vorhaben darstellen soll. Es besteht daher aus einem allgemeinen Teil, der Rahmenbedingungen der Software-Entwicklung beschreibt, und einem spezifischen Teil, der sich mit der Implementierung der RDO Beton befasst. Beide Teile sind darüber hinaus modular aufgebaut, damit der Auftraggeber in zukünftigen Ausschreibungen für Softwareprojekte die Erstellung eines Lastenhefts einfacher und zielsicher selber leisten kann. Das

Lastenheft wurde durch Erstellung eines darauf basierenden Pflichtenhefts validiert.

Die Implementierung wurde modular realisiert, so dass der eigentliche Rechenkern und die Benutzeroberfläche eigenständige Teile sind und nur über einheitlich strukturierte Datenobjekte kommunizieren. Die Daten können im textbasierten, kompakten und menschenlesbaren JSON-Datenformat eingelesen und gespeichert werden. Durch ein ebenfalls umgesetztes Kommandozeilen-Interface kann der Rechenkern ohne GUI verwendet werden, um eine einfache Einbindung in andere Software zu ermöglichen, oder direkt über die Kommandozeile ausgeführt zu werden.

Der Quellcode des Rechenkerns ist derart konzipiert und dokumentiert, dass Fachleute mit rudimentären Programmierkenntnissen sich schnell im Code zurechtfinden können.

Die Kompilierung des Quellcodes des Rechenkerns ist nicht nötig. Damit sind kleinere Änderungen am Quellcode, wie beispielsweise die Aktualisierung von Faktoren aus den Tabellen der RDO Beton, in wenigen Sekunden durchgeführt. Weiterhin ist der Rechenkern so modularisiert, dass bspw. die Berechnung eines einzelnen Momentes durch eine andere Funktion ersetzt werden kann. Wartungsarbeiten und Erweiterungen gestalten sich dementsprechend einfach. In Kombination mit einer Versionsverwaltungssoftware bleiben jegliche Änderungen am Quellcode transparent und alte Versionen wiederherstellbar. Auch die Vorhaltung verschiedener Softwareversionen, etwa für unterschiedliche Fassungen der RDO Beton, ist somit leicht realisierbar.

Ein wesentlicher Bestandteil der entwickelten Software ist die grafische Oberfläche, die unter Nutzung moderner Technologien und Erkenntnisse im Bereich Benutzerschnittstellen entworfen wurde. Die Oberfläche wird im Webbrowser dargestellt, wodurch die Anwendung über Intraoder Internet angeboten werden kann. Dadurch arbeiten alle Benutzer stets mit einer einheitlichen, aktuellen Version. Das Programm kann aber auch ohne Administrator-Rechte auf Arbeitsplatzrechnern installiert und ausgeführt werden. Die Verwendung des gängigen Material Designs stellt sicher, dass Nutzer bekannte Bedienelemente und -symbole erkennen und diese intuitiv nutzen können.

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Bestandteile sowie ihr Zusammenspiel werden mithilfe einer automatisierten Testumgebung sichergestellt. Hierdurch lassen sich auch bei zukünftigen Änderungen mögliche unerwünschte Seiteneffekte schnell feststellen.

Eine Bereitstellung für weite Nutzerkreise erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Inkompatibilitäten, Programmfehler und/oder Fehler in der zugrundeliegenden Methodik aufgedeckt werden. Bei Bereitstellung des Quellcodes können Benutzer sich direkt an der Weiterentwicklung beteiligen.

Die strikte Trennung zwischen Eingabe und Berechnung ermöglicht die Erweiterung zu einer Client-Server-Architektur. Damit könnten offizielle Referenzimplementierungen angeboten und deren Nutzung sichergestellt werden.

Development of an up-to-date tool for mathematical dimensioning according to the RDO Beton

In this research project FE 04.0316/2018/ORB "Development of an up-to-date tool for mathematical dimensioning according to the RDO Beton", the RDO Beton are implemented in an open-source and future-proof manner. The foundations are the RDO Beton 09 employing the draft version of 7th May 2018, which will be referred to only as RDO Beton in the following. The programme is implemented in JavaScript using common standards and practices and is to be published under the free software licence GPLv3. Special attention is paid to good documentation and modularity, which will allow all interested professionals to easily use, maintain and extend the software.

The project is divided into literature research on RDO Beton, definition and documentation of requirements, implementation of the calculation core as well as the graphical user interface (GUI).

Detailed research on the background of the moments used for the proofs in the RDO Beton enhances the documentation of the procedure. In particular, the formula for the torque from traffic load is traced back to its correct origin. No research is carried out on the origin of the adjustment factors used. The literature research thus provides the foundation for the procedurally reliable implementation of the RDO Beton.

The requirements for the software are compiled in the requirement specification, which is intended both as the foundation for this project and as a template for similar projects. It therefore consists of a general part, which describes the framework conditions for software development, and a specific part, which deals with the implementation of the RDO Beton. In addition, both parts have a modular structure, so that the client can more easily and accurately prepare the specifications himself in future calls for software projects. The requirement specification was validated by creating a target specification based on it.

The implementation was performed in a modular way so that the actual calculation core and the user interface are independent parts and only communicate via uniformly structured data objects. The data can be read and written in the text-based, compact and human-readable JSON data format. The calculation core can be used without a GUI to allow easy integration into other software, or executed directly, via an additionally implemented command line interface.

The source code of the calculation core is designed and documented in such a way that experts with rudimentary programming skills can quickly find their way around the code. There is no need to compile the source code of the calculation core. Therefore, minor changes to the source code, such as updating factors within the RDO Beton, can be carried out within seconds. Furthermore, the calculation core is modularised in such a way that, for example, the calculation of a single moment can be replaced by a different function. Maintenance works and extensions are therefore simple. In combination with version control software, any changes to the source code remain transparent and previous versions can be restored. The provision of different software versions, for example for different versions of the RDO Beton, is thus also easily realisable.

An essential component of the developed software is the graphical user interface, which is designed using current technologies and best practices in the field of user interfaces. The interface is rendered in a web browser, which allows for providing the application via intra- or internet. This guarantees that all users always work with the same up-to-date version. However, the programme can also be installed and executed on workstations without administrator rights. The use of the well-established

material design ensures that users recognise familiar operating controls and symbols and can understand and use them intuitively.

The functionality of the individual components and their interactions are verified by means of an automated test environment. Hereby, possible undesirable side effects are easily discovered even in the event of future changes.

A broad user group increases the likelihood to reveal incompatibilities, programme errors and/or errors in the underlying methodology. Users can participate directly in further development if the source code will be disclosed.

The strict separation between input and calculation allows for an extension towards a client-server architecture. This would offer the possibility to provide an official reference implementation and enforce its usage.

The project goal of creating a reusable template for future tenders in the form of a modular system for specifications was fully realised. The creation of an open source software with the help of open source tools were both achieved.

Summary

Development of an up-to-date tool for mathematical dimensioning according to the RDO Beton

1 Introduction

In this research project FE 04.0316/2018/ORB 'Development of an up-to-date tool for mathematical dimensioning according to the RDO Beton', the RDO Beton are implemented in an open-source and future-proof manner. The implementation in JavaScript includes a calculation core, a command line application and a graphical user interface. At the same time, a template for future calls for software project is to be generated with a modular requirement specification.

Detailed research improves the documentation of the calculation method, in particular the formula for the torque from traffic load is traced back to its correct origin. The literature research thus provides the basis for the procedurally reliable implementation of the RDO Beton.

The requirement specification consists of a general part, which describes the framework conditions of the software development, and a specific part, which deals with the implementation of the RDO Beton. In addition, both parts have a modular structure so that the client can more easily and accurately prepare the specifications himself in future calls for software projects.

The implementation was done in a modular way so that the actual calculation core and the user interface are independent parts and only communicate via uniformly structured data objects. The source code of the calculation core is designed and documented in such a way that experts with rudimentary programming skills can quickly find their way around the code. This means that minor changes to the source code, such as updating factors from the RDO Beton, can be carried out in a matter of seconds.

An essential part of the developed software is the graphical user interface, which was designed using current technologies and knowledge in the field of user interfaces. The interface is rendered in a web browser, which allows for providing the application via intra- or internet. The use of the well-established material design ensures that users recognise

familiar operating controls and symbols and can understand and use them intuitively.

2 Literature Research

One problem of the RDO Beton Entwurfsfassung (2018) is the insufficient documentation of the procedure. The considerations on which the formulae and parameters contained in the RDO Beton are based and which restrictions they underly is not comprehensible in large parts.

First, it is shown that all three torques used are calculated by the equation

$$M = \frac{1}{6} \sigma h^2 \quad (1)$$

from the tensile bending stresses or from the strength. There is no advantage in using torques rather than stresses. The torque from temperature loading neglects the plate effect and actually applies to a bar or slender beam. The torque from traffic loading is based on the following equation from WESTERGAARD (1948), here for a circular area of load application

$$\sigma_e = \frac{3(1 + \nu)F}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) + 1,84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1 - \nu}{2} + 1,18(1 + 2\nu)\frac{r}{l} \right] \quad (2)$$

This also clarifies that the underlying load case is not that of a semicircular area of load application at the edge of the slab, but that of a full circle tangent to the edge of the slab, see figure 1.

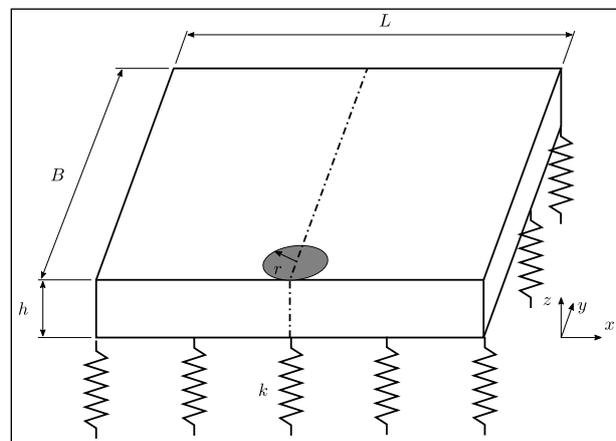


Fig. 1: Model of the slab with liquid foundation and edge loading according to WESTERGAARD (1948, Case 3) with the special case of a circular area of load application.

3 Creation of the requirement specification

The requirement specifications were drafted by the contractor in accordance with DIN 69901-5 (2009) as the totality of the client's requirements. In order to avoid potential implicit information assumptions, the drafting and editing of the requirements specification was carried out by a separate employee.

As part of this project, not only a specific requirement specification was drafted, but a modular system consisting of both a general and a specific part. Especially in the general part, the specifications and requirements are designed in such a way that the basic structure and individual building blocks can be reused for future software projects, which allows for a simpler and more ordered creation of requirement specifications.

The specific part of the requirements specification deals with the concrete specification of the software product required in the project at hand. The software architecture is specified and, in particular, aspects that deviate from the general part are explained. Functionality and confinements of scope are exhaustively listed here.

The general part of the requirements specification describes universal aspects and quality characteristics of the product to be delivered and, in order to satisfy the already described use for further projects, offers choices between different options that seem to be reasonable and can be chosen for other projects.

4 Creation of the target specification

The target specification was drafted by the contractor according to DIN 69901-5 (2009) as an implementation proposal based on the requirement specification. In order to prevent potential implicit information assumptions, the creation and editing of the target specification was also carried out by a separate employee.

During the implementation work, various findings arose that were not compatible with the planned implementation. In cooperation between the client and the contractor, these led to changes in the

requirement specification and target specification, which were implemented retroactively.

On the side of the calculation core, these changes primarily include bounds to areas of the RDO Beton that were not defined or only partially defined; on the side of the graphical user interface, changes resulted mainly in the details of the cross-section display. Furthermore, there were several changes in technical aspects such as parameter names and grouping, output data formats as well as support of browser versions.

5 Implementation

The implementation of the entire project was realised in the programming language JavaScript. The functionality was divided into modules to enable better maintenance and debugging as well as easy use of the individual modules in other potential contexts.

In the entire implementation, high priority was given to the use of existing standards, best practices and open source solutions. For this reason, the extremely widespread JSON format was chosen as the data exchange format. Thus, the parameter files are stored in a human-readable text format, which any interested user can open with a text editor.

The programme code is documented directly in the source files using block comments and the industry standard for code documentation, JSDoc. This means that even a novice programmer can make changes and further developments to the programme code with minimal training.

To improve correctness, facilitate debugging and prevent errors in advance in future developments, the entire programme code is subjected to automated checks as part of the automated building process of the software. These checks are performed by the open source tools JSHint, ESLint as well as Jest, each of which checks the programme files for different aspects.

The calculation core was developed in JavaScript on the basis of a prototype realised in Matlab, whereby care was taken to ensure that this part of the programme code in particular is under-standable and comprehensible even with rudimentary programming knowledge. The source code is documented and contains references to the relevant sources from the RDO Beton, so that an editor is



Fig. 2: The final WebRoDeo design

supported as much as possible in the search for sources, justifications or methods for certain aspects of the calculation. In particular, the variable names used in the RDO Beton are used as analogously as possible and distributed to corresponding files.

The graphical user interface is based on an initial application concept, for which feedback from the client and the project participants was obtained and incorporated in interim meetings. Different user guidance models were demonstrated and tested for typical workflows. In this way, a user control system was iteratively developed that was adapted to the user's requirements.

In order to provide a modern interface that allows users to use familiar elements and operations, the user interface was based on the freely published Material Design developed by Google LLC. Material Design is used by a large number of websites and applications, so that the typical user has a basic familiarity with the operating elements. In specific aspects such as the cross-sectional representation, Material Design was deviated from in order to meet the specific requirements of the problem to be solved.

An essential part of the graphical interface is the open source library React, which enforces a structured division of responsibility of code parts, as well as the support for Material Design provided via the component library React-MD.

6 Documentation

Due to the already mentioned use of familiar controls, the produced software seems to be sufficiently self-explanatory to at least question the creation of a dedicated user manual. No damage can be caused by incorrect entries, and wrong or problematic settings are reported back to the user.

Therefore, the originally planned manual is put on hold until an evaluation of the software by the client has taken place.

Since the client has not yet decided how the software should be made available, installation instructions could not yet be provided.

Advanced users and developers will find more detailed documentation in the source files, as well as specific README files that explain individual aspects such as the compilation of the programme files in detail. This advanced information is not of interest to the typical user and is therefore not directly accessible from the user interface.

Due to the ongoing Covid-19 situation and the pending feedback from the users on the part of the Federal Highway Research Institute, no concrete planning for a possible training course has been carried out yet.

7 Conclusion

The requirement specification were originally intended as a template for comparable projects and have proved very successful in this respect. Only a few subsequent changes were necessary, especially to the general part, so that the plan to use the developed specifications as a foundation stone for further software projects can be implemented in the future.

In order to allow the publication of the produced software, one of the objectives of the project was to use open source libraries and tools. This could be achieved as the open software offer turned out to be more than satisfactory both in quality and flexibility. Instructions for obtaining detailed information on the software licences of the software used can be found in the main report.

The objective of creating an open source software could be fully met. The desired characteristics with regard to the software's ease of use and convenience can only be finally answered by the Federal Highway Research Institute after evaluation, so that this section can only be completed after feedback.

Inhalt

1	Recherche zu den Grundlagen der RDO Beton	11	3.2	Produktdaten.....	26
1.1	Kalibrierung an den RStO.....	11	3.2.1	Eingabedaten.....	26
1.2	Moderne Nachweisführung.....	11	3.2.2	Ausgabedaten.....	26
1.2.1	Dimensionierung nach Grenzzuständen.....	11	4	Implementierung	27
1.2.2	Semi-probabilistisches Konzept.....	12	4.1	Modulübergreifende Aspekte der Implementierung.....	27
1.3	Berechnung des aufnehmbaren Moments.....	12	4.1.1	Dokumentation.....	27
1.4	Temperaturbelastung.....	13	4.1.2	Nachvollziehbarkeit mit Git.....	28
1.4.1	Anpassungsfaktoren.....	14	4.1.3	Tests.....	28
1.5	Verkehrsbelastung.....	14	4.1.4	Lizenzen.....	29
1.5.1	Kirchhoff-Lovesche-Plattentheorie.....	15	4.2	Implementierung Rechenkern.....	30
1.5.2	Bodenmodelle.....	16	4.2.1	Aufbau.....	30
1.5.3	Lösung der Plattengleichung für Verkehrsbelastung.....	16	4.3	Implementierung Grafische Oberfläche (GUI).....	31
1.5.4	Zu Formelzeichen und Einheiten.....	17	4.3.1	Verlauf.....	31
1.5.5	Westergaard 1926 und 1933.....	17	4.3.2	Anleitung.....	32
1.5.6	Teller & Sutherland 1935.....	19	4.3.3	Bibliotheken.....	34
1.5.7	Westergaard 1948.....	20	4.3.4	Erkenntnisse aus der Implementierung der grafischen Oberfläche.....	34
1.5.8	Zurückführung des Moments aus Verkehrsbelastung auf Westergaard.....	20	4.4	Implementierung Bereitstellung.....	34
1.5.9	Ansatz zur Aufarbeitung.....	21	4.4.1	Bereitstellung via GitLab.....	34
1.5.10	Kommentar zur Gültigkeit.....	21	5	Dokumentation & Schulung	35
1.5.11	Software zur Dimensionierung von Betonverkehrsflächen.....	21	5.1	Dokumentation.....	35
1.6	Software zur Dimensionierung von Betonverkehrsflächen.....	22	5.1.1	Benutzerhandbuch.....	35
2	Erstellung des Lastenheftes (AP200)	22	5.1.2	Dokumentation für fortgeschrittene Anwender und Entwickler.....	35
2.1	Spezifischer Teil.....	23	5.2	Schulung.....	36
2.1.1	Rechenkern.....	23	6	Fazit	36
2.1.2	Grafische Oberfläche.....	23	6.1	Lasten- und Pflichtenheft.....	36
2.2	Allgemeiner Teil.....	23	6.2	Open-Source-Ressourcen.....	36
3	Erstellung des Pflichtenheftes	24	6.3	Open-Source-Implementierung.....	36
3.1	Änderungen.....	24	Literatur	36	
3.1.1	Rechenkernfunktionen.....	24	Bilder	40	
3.1.2	GUI-Funktionen.....	26			

Die Anlagen „Lasten- und Pflichtenheft“ zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Die zum Bericht gehörige Software „RoDeO Beton“ ist in Vorbereitung (voraus. Fertigstellung Anfang 2023). Nach Fertigstellung wird auf der BAST-Seite - beim Hinweis auf diesen Bericht - vermerkt, wann und wo die Software veröffentlicht worden ist.

1 Recherche zu den Grundlagen der RDO Beton

Leider ist es in großen Teilen nicht nachvollziehbar, auf welchen Überlegungen die in den RDO Beton enthaltenen Formeln und Parameter basieren und welchen Einschränkungen diese unterworfen sind. Dies stellt zum einen bei innovativen Bauweisen ein Problem dar, da häufig nicht klar ist, wann die Grenzen der Modellbildung erreicht sind. Zum anderen behindert es die Weiterentwicklung. Auch eine Anpassung der Methodik, z. B. an geänderte Verkehrsbedingungen, wird erschwert, da nicht immer klar ist, welche Parameter durch geänderte Randbedingungen überarbeitet werden müssten.

Der AN hat versucht die Hintergründe des Formelwerks der RDO Beton durch eine tiefgehende Literaturrecherche sowie Kontaktaufnahme zu an der Erstellung beteiligten Personen aufzudecken. Weiterhin werden Lücken in der Theorie aufgezeigt und die Formel für das Moment aus Verkehrsbelastung auf seine korrekte Herkunft zurückgeführt.

1.1 Kalibrierung an den RStO

Mit dem „Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 18/2020“ wurde der Anwendungsbereich der RDO Beton (2009) auf konventionelle Bauverträge ausgeweitet. Darin wird erläutert, dass der Referenzfall für die rechnerische Dimensionierung durch die Bauweise „Betondecke auf Schottertragschicht (STSuB)“ gemäß RStO (2012, Tafel 2, Zeile 3) dargestellt wird. Für diesen Fall soll die RDO Beton (2009) unter im genannten Rundschreiben angegebenen Parametern eine Deckendicke von $h_d = 290$ mm berechnen. Für die im vorliegenden Projekt umgesetzte Fassung gilt dies nicht, es wird eine Deckendicke von $h_d = 288$ mm errechnet. Durch welche(n) Parameter die Kalibrierung vorgenommen wird, ist dem AN nicht bekannt.

Im genannten ARS wird in Anlage 1, Seite 2, eine Ergänzung der RDO Beton (2009) vorgenommen:

Die Berechnung der Solldicke erfolgt in [mm].
Zur Angabe des Dimensionierungsergebnisses wird dieser Wert auf volle 5 mm aufgerundet.

Diese Angabe ist nicht Bestandteil der dem Projekt zugrundeliegenden RDO Beton Entwurfsfassung (2018). Gemäß Pflichtenheft wird h_d auf 1 mm genau bestimmt. Es findet keine Rundung statt, da die

Deckendicke iterativ in 1 mm-Schritten erhöht wird, bis die Nachweise erfüllt sind.

1.2 Moderne Nachweisführung

Ein wesentlicher Bestandteil der RDO Beton ist das durch die Eurocodes im Bauwesen eingeführte semiprobabilistische Bemessungsverfahren. Die DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung (2010) legt Prinzipien und Anforderungen zur Gebrauchstauglichkeit, Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken fest. Sie beruht auf dem Konzept der Bemessung nach Grenzzuständen mit Teilsicherheitsbeiwerten.

Diese Teilsicherheitsbeiwerte beziehen sich beispielsweise auf die Verkehrsbeanspruchung, Temperaturgradienten, Materialeigenschaften, Randbedingungen und Geometrie. Sie wurden aus statistischen Untersuchungen hergeleitet. Da sich allerdings die zugrundeliegende Datenbasis, wie etwa die Verkehrsbeanspruchung über die Zeit, ändern kann, sind regelmäßige Kontrollen ihrer Gültigkeit und die etwaige Überarbeitung notwendig.

Der Nachweis der Dimensionierung gilt als erbracht, wenn die Summe aus einwirkendem Moment aus Verkehrsbelastung und einwirkendem Moment aus Temperaturbelastung kleiner oder gleich dem aufnehmbaren Moment ist.

$$M_{EV} + M_{ET} \leq M_R \quad (1.1)$$

1.2.1 Dimensionierung nach Grenzzuständen

Dieser Nachweis der Gleichung 1.1 muss für sechs verschiedene Fälle erbracht werden (RDO Beton Entwurfsfassung 2018, Kapitel 8). Jeweils an Längskante und Querfuge müssen drei verschiedene Nachweise in verschiedenen Grenzzuständen erbracht werden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Nach DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung (2010) ist ein Tragwerk so zu dimensionieren, dass es

- tragfähig,
- gebrauchstauglich und
- dauerhaft

ist. Für die Dimensionierung von Betonfahrbahnen im deutschen Sprachraum wurde das Verfahren

spätestens durch die TGL 33468 (TGL 33468/01 1986) adaptiert, siehe dazu auch der Kommentar von PFEIFER (1986a). Die ersten beiden Anforderungen werden durch Erbringung von drei Nachweisen erfüllt bei

- quasidynamischer Last im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT),
- quasidynamischer Last im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) sowie unter
- Ermüdungsbelastung, ebenfalls im GZT.

Beim Überschreiten des GZT tritt Tragwerksversagen ein, die Betonplatte bricht. Im Gegensatz zum Hochbau hat das Tragwerksversagen meist nicht den Einsturz zur Folge, obwohl das in Kombination mit Baugrundversagen möglich ist. Ein Bruch aufgrund von Ermüdung hat ebenfalls Tragwerksversagen zur Folge. Beim Überschreiten des GZG tritt kein Tragwerksversagen auf, aber die Verformungen, Rissweiten, Spannungen oder Momente überschreiten zulässige Werte, sodass das Tragwerk für den bestimmungsgemäßen Gebrauch nicht mehr geeignet ist. Der Nachweis der Dauerhaftigkeit ist im Rahmen der RDO Beton nicht zu erbringen. Hier geht es vor allem um die Einhaltung von Konstruktionsregeln, die Einhaltung von Materialqualitäten und eine gute Bauausführung. Die zugrundeliegenden Formeln für die einwirkenden Momente und des aufnehmbaren Momentes bleiben dabei unverändert, allerdings ändert sich die Parametrisierung je nach Nachweis.

Die Parametrisierung unterscheidet sich natürlich für Querrufe oder Längskante, aber auch an ein und demselben Ort werden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten Sicherheitsbeiwerte verwendet. Anstelle eines globalen Sicherheitsbeiwertes werden Teilsicherheitsbeiwerte verwendet. Diese werden nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Kapitel 4.1) unterschieden in Beiwerte aus

- Einwirkungen (Lasten),
- Materialien und
- Anpassungen.

Anpassungsfaktoren ergeben sich vor allem aus Abweichungen der Modellvorstellung (vereinfachende Annahmen) von der Realität. Um ebenjene Modellvorstellung kritisch zu hinterfragen, werden im Folgenden die Hintergründe der in Gleichung 1.1 enthaltenen Momente analysiert. Auffallend ist dabei zunächst, dass die im Folgenden genannten grund-

legenden Arbeiten zur Dimensionierung von Betonverkehrsflächen Spannungen verwenden. Warum die RDO Beton hier abweichen, ist nicht bekannt. Beispielsweise EISENMANN (1979) verwendet noch Spannungen. Wie gezeigt werden wird, liegt aufgrund der Annahme einer linearen Spannungsverteilung über die Deckendicke h allerdings immer eine simple Umrechnungsmöglichkeit vor.

1.2.2 Semi-probabilistisches Konzept

Das semi-probabilistische Konzept äußert sich darin, dass für verschiedene Größen in den RDO Beton Quantile der Eintretenswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Dies geschieht sowohl auf einwirkender Seite durch Erhöhung über den Erwartungswert als auch auf widerstehender Seite durch Verringerung unter den Erwartungswert.

k_{bt}	Widerstehend. Der Materialfaktor verringert bei der Dimensionierung von Autobahnen und Bundesstraßen den Grundwert der Berechnungsfestigkeit.
$f_{ctk,sp}$	Widerstehend. 5 %-Quantil der Spaltzugfestigkeit am Bohrkern nach 56 Tagen.
h	Einwirkend & Widerstehend. 10 %-Quantil der Deckendicke der Betonfahrbahn.
C_1	Einwirkend. Der Faktor berücksichtigt die Quantile der Eintretenswahrscheinlichkeiten verschiedener Temperaturgradienten. 99,7 %-Quantil für den quasistatischen GZT, 90 %-Quantil für den quasistatischen GZG und Median für den Ermüdungsfall im GZT.
$q_{B,b}$	Einwirkend. Lastkollektivquotient, in Abhängigkeit der Bezugsachslast A_b definiert. A_b ist das 90 %-Quantil der Einzel-Achslasten.

1.3 Berechnung des aufnehmbaren Moments

Das aufnehmbare Moment M_R nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Gleichung 7-1) erhält man unter den Annahme, dass die ebenen Normalspannungen linear über die Dicke verteilt sind und einen Nulldurchgang in der Plattenmitte (neutrale Fläche) aufweisen.

Es handelt sich nicht um ein echtes Moment mit der Einheit Kraft mal Hebelarm, da nicht über eine Fläche integriert wird, sondern nur über die Plattendicke. Daher handelt es sich um das Moment eines infinitesimalen Streifens. Das ist im Rahmen der Plattenmechanik üblich, siehe BECKER und GROSS (2002, Formel 5.7). Hierbei ist zu beachten, dass die Einheit Moment pro Länge einer Kraft entspricht. Physikalisch handelt es sich jedoch nicht um eine Kraft.

Die Biegemomente in x oder y-Richtung erhält man durch Multiplikation der ebenen Normalspannungen σ_x oder σ_y mit dem Hebelarm z und Integration über die Plattendicke h :

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz, \quad M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dy. \quad (1.2)$$

Im Weiteren beschränken wir uns aufgrund der Identität der Biegemomente auf eine Koordinatenrichtung. Da es unter Annahme von Isotropie nur eine skalare Festigkeit gibt, existiert auch nur eine Formel für das aufnehmbare Moment. Die Funktion für die Spannung, die die oben genannten Anforderungen erfüllt, lautet:

$$\sigma(z) = \sigma_{max} z \frac{h}{2}. \quad (1.3)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 1.2 und symbolische Integration erhält man:

$$M = \frac{1}{6} \sigma_{max} h^2. \quad (1.4)$$

Mithilfe dieser Formel lassen sich Normalspannungen und Biegemomente direkt ineinander umrechnen. Es erwächst keinerlei Vorteil durch die Verwendung von Momenten.

Der Grenzzustand tritt ein, wenn σ_{max} die Berechnungsfestigkeit f_d erreicht:

$$M_R = \frac{1}{6} f_d h^2. \quad (1.5)$$

Die Berechnungsfestigkeit ergibt sich aus der Spaltzugfestigkeit nach den AL Sp-Beton und verschiedenen Faktoren bezüglich der Versagenswahrscheinlichkeit, der Nacherhärtung und der Beanspruchungsart.

1.4 Temperaturbelastung

Die RDO Beton behandeln die einwirkende Belastung aus ungleichmäßiger Temperaturverteilung über die Dicke im Gebrauchszustand. Das exotherme Erhärungsverhalten des Betons und die damit eng verbunden, Längsspannungen aus gleichmäßiger Temperaturverteilung über die Dicke im Gebrauchszustand werden nicht berücksichtigt.

Bereits WESTERGAARD leitete Formeln für die Plattenbiegung aufgrund ungleichmäßiger Erwärmung von Ober- und Unterseite her (WESTERGAARD 1927). Diese Methodik wird heute allerdings meist BRADBURY (1938) zugeschrieben.

Die in den RDO Beton verwendete Methodik zur Berücksichtigung der durch ungleichmäßige Erwärmung der Platten einwirkenden Momente geht wohl auf EISENMANN (1970) zurück. Der Temperaturverlauf wird dabei als linear idealisiert. Die sich aus ungleichmäßiger Temperaturänderung ergebende ungestörte Wölbspannung in der Platte beträgt nach EISENMANN (1970, Formel 6a):

$$\sigma_w = E\alpha_T \frac{h\delta T}{2(1-\nu)}, \quad (1.6)$$

mit dem Temperaturgradienten δT in $\frac{K}{mm}$. Ungestört heißt dabei, dass die Plattenlänge, größer ist als die 1,1-fache kritische Plattenlänge was zum Aufliegen der Plattenmitte führt, siehe EISENMANN (1970, Bild 8).

Für einen Stab erhält man die Wölbspannung unter Vernachlässigung der Querkontraktion (EISENMANN 1970, Formel 7a):

$$\sigma_w = E\alpha_T \frac{h\delta T}{2}. \quad (1.7)$$

Diese Formel lässt sich aus dem Elastizitätsgesetz des Stabes herleiten (SCHNELL u. a. 1995, Abschnitt 4.9)

$$\sigma = E\epsilon - E\alpha_T \Delta T. \quad (1.8)$$

Hierbei besteht ΔT im Allgemeinen aus einem Anteil aus gleichmäßiger Erwärmung, ΔT_{const} , und einem Anteil aus linear verteilter ungleichmäßiger Erwärmung, $\Delta T_{lin} = T_o - T_u$. Wie zuvor beschrieben wird der Anteil aus gleichmäßiger Erwärmung vernachlässigt. Unter Verwendung des Temperaturgradienten

$$\delta T = \frac{\Delta T_{Lin}}{h} \quad (1.9)$$

kann für die linear über die Höhe verteilte Normalspannung

$$\sigma(z) = E\epsilon - E\alpha_T\delta Tz \quad (1.10)$$

geschrieben werden. Bei verhinderter Wölbung durch Überschreiten der kritischen Länge entfällt der erste Term und man erhält

$$\sigma(z) = -E\alpha_T\delta Tz. \quad (1.11)$$

Durch Auswerten bei $z = \pm h/2$ erhält man als positiven Extremwert die Wölbspannung im Stab nach Gleichung 1.7. Durch Einsetzen von Gleichung 1.11 in Gleichung 1.2 und symbolische Integration erhält man

$$M_{ET} = \alpha_T E \frac{h_d^3 \delta T}{12}, \quad (1.12)$$

also das Moment infolge Temperatur nach RDO Beton Entwurfssfassung (2018, Gleichung 6-14) bis auf die Anpassungsfaktoren. Für eine Platte müsste diese Formel $(1-\nu)$ im Nenner stehen haben (EISENMANN 1970; FOOS 2006; LECHNER 1996). Warum die Querkontraktion vernachlässigt wird ist unklar. Aufgrund der in den RDO Beton verwendeten Querkontraktionszahl, $\nu = 0,2$, liefert die Betrachtung eines Balkens um 25 % niedrigere Ergebnisse als die Betrachtung einer Platte. Laut BIRMAN (1981, Seite 20) kann, unter Berufung auf EISENMANN (1979), „in erster Näherung“ ein Balken angenommen werden.

1.4.1 Anpassungsfaktoren

Der Unterschied zwischen Gleichung 1.12 und dem Moment infolge Temperatur nach RDO Beton Entwurfssfassung (2018, Gleichung 6-14) besteht in den Anpassungsfaktoren.

γ_{tot} Berücksichtigung des durch Relaxation verringerten E-Moduls des Betons.

m_{T1} Anpassung auf Überlagerung von Temperaturbeanspruchung und Schwerverkehr zu bestimmten Tageszeiten.

m_{T2} Anpassung der Belastung auf aktuelle Plattendimensionen. Ausgehend von der kritischen Länge.

m_{T3} Anpassung des Temperaturgradienten an verschiedene Temperaturgebiete (KiSTZonen, siehe FE 89.0305 (AUGTER und KAYSER 2016)). Aktuell noch deaktiviert durch $m_{T3} = 1,0$.

1.5 Verkehrsbelastung

Das Moment aus Verkehrsbelastung wird in den RDO Beton nur für die Plattenkante bestimmt. Die Last gilt als an der Kante befindlich, falls sie sich in beträchtlichem Abstand zu einer Ecke befindet. Als Bodenmodell kommt dabei das Winklersche Federmodell (WINKLER 1867) zum Einsatz. Einige Details im Verhalten von Betonfahrbahnen entziehen sich jedoch einer analytischen Lösung. Die drei wichtigsten sind Lastübertragung in Fugen durch Verbinder (Anker, Dübel), die Auswirkungen von Unterschieden in der Lagerung sowie das Verhalten unter dynamischen Lasten (DAVIDS u. a. 2003, Seite 92). Weiterhin sind auch die Modellierung von über die linear-isotrope Elastizität (Hooke) hinausgehendem Materialverhalten sowie nichtlinearer Temperaturverläufe, nicht möglich. Für einen Überblick der Entwicklung sei auf IOANNIDES (2006) sowie auf das Arbeitspapier zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen B2: Plattentheorie verwiesen (FGSV 2011). Die in den RDO Beton Entwurfssfassung (2018, Gleichung 6-2) enthaltene Variante lautet

$$M_{EV} = m_{bL} \times m_{bD} \times F \times 1000 \times \left[0,55 \times \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 0,1 \times \frac{b}{l} - 0,011 \right] \quad (1.13)$$

Hierbei sind m_{bL} und m_{bD} Anpassungsfaktoren für die Lagerungsart und Lastübertragung in Fugen. l ist die elastische Länge¹ nach WESTERGAARD (1926, Formel 1) oder RDO Beton Entwurfssfassung (2018, Gleichung 6-8)

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}}. \quad (1.14)$$

l ist ein Maß dafür, wie schnell die Einflüsse von Lasten mit steigendem horizontalem Abstand ab-

¹ Engl.: radius of relative stiffness

klingen. Dafür werden die Steifigkeit der Betondecke E und der Bettungsmodul k in ein Verhältnis gesetzt.

Damit sind z. B. die Momente infolge einer Radlast auf einer gebetteten Platte auch ohne Computer schnell ermittelt.

b ist der Radius der Ersatzaufstandsfläche² nach WESTERGAARD (1926, Formel 8) beziehungsweise RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Gleichung 6-11)

$$b = \sqrt{1,6r^2 + h^2} - 0,675h . \quad (1.15)$$

Zwar wird in den RDO Beton bezüglich der Herkunft von Gleichung 1.13 angegeben:

Für die Berechnungen wird das WESTERGAARD-Verfahren und dessen Weiterentwicklungen für die Verkehrsbelastung durch TELLER und SUTHERLAND [...] verwendet (RDO Beton Entwurfsfassung (2018)),

allerdings enthält die entsprechende Veröffentlichung von TELLER und SUTHERLAND (1935) diese Formel nicht, selbst dann nicht, wenn man berücksichtigt, dass die ursprünglichen Arbeiten zur Verkehrsbelastung Spannungen anstatt von Momenten verwenden.

Im Folgenden wird zunächst die zugrundeliegende Theorie rekapituliert. Anschließend werden die ursprünglichen Formeln für die Spannungen aus Verkehrsbelastung zusammengestellt. Abschließend wird gezeigt, dass Gleichung 1.13 auf WESTERGAARD (1948) zurückgeht.

1.5.1 Kirchhoff-Lovesche-Plattentheorie

Die zugrundeliegende Plattentheorie ist die sogenannte Kirchhoff-Love-Platte. Sie stellt die Erweiterung der Balkentheorie nach Euler und Bernoulli dar und nimmt an, dass die Mittelebene einer Platte verwendet werden kann, um die eigentlich dreidimensionale Platte als zweidimensionale Struktur zu idealisieren. Sie führt auf eine partielle Differentialgleichung 4ter Ordnung für die Plattendurchbiegung. Die wichtigsten kinematischen Annahmen lauten folgendermaßen (BECKER und GROSS 2013; TIMOSHENKO und WOINOWSKY-KRIEGER 1987):

- Die Verschiebung w eines Punktes P ist unabhängig von z : $w = w(x, y)$. Daher ändert sich die Dicke nicht: $E_z = 0$.
- Normalen zur Plattenmitte bleiben auch nach Deformation normal (dünn, schubstarr) und
- die Normalspannung in Dickenrichtung σ_z ist vernachlässigbar klein. Es gilt näherungsweise ein ebener Spannungszustand. Dies stellt streng genommen einen Widerspruch dar, da die Dehnung und die Spannung in Dickenrichtung aufgrund der Querkontraktion nicht beide gleichzeitig verschwinden können.

Die Erfahrung zeigt, dass die durch diese Annahmen entstehenden Fehler bei dünnen Platten und kleinen Deformation vernachlässigbar sind. Als Daumenregel für die Gültigkeit sind die folgenden Verhältnisse bekannt (HOLM ALTENBACH 2016, Seite 13):

- Länge & Breite mindestens 10 mal größer als Dicke,
- Dicke mindestens 10 mal größer als die Verschiebung.

Unter Zuhilfenahme von Gleichgewicht, Kinematik und Konstitutivgesetz lässt sich die Kirchhoff-Lovesche Plattengleichung herleiten (FGSV 2011, Gleichung 2-2) (BECKER und GROSS 2002, Abschnitt 5.1.1)

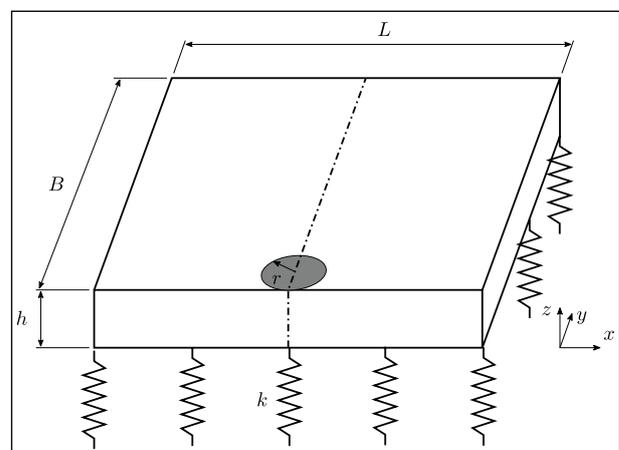


Bild 1.1: Modell der schwimmend gelagerten Platte (Winkler-Bettung) und des Lastfalls Kante nach WESTERGAARD (1948, Case 3) mit Spezialfall der kreisförmigen Lastfläche.

² Engl.: equivalent radius

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = \quad (1.16)$$

$$= p \text{ bzw. } D\Delta\Delta w = p.$$

Hierbei ist D die sogenannte Plattensteifigkeit:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (1.17)$$

Für die elastisch gebettete Platte muss nun die flächige Bodenreaktion (Bettungsdruck) q berücksichtigt werden

$$D\Delta\Delta w = p - q. \quad (1.18)$$

1.5.2 Bodenmodelle

Grundsätzlich ist das Verhalten von Böden nichtlinear und wird stark von den hydraulischen Verhältnissen beeinflusst (TAYLOR 1948). Die meisten Modellierungen fußen auf der Annahme, dass Setzvorgänge, also plastische Deformationen, während der ersten Belastungszyklen stattfinden und sich die Struktur auf ein elastisches Verhalten einspielt. Das Materialverhalten ist nach Setzvorgängen in guter Näherung als „hypoelastisch“ zu beschreiben, d. h. materiell nichtlinear, aber mit kleinen (linearen) Verformungen (TACIROGLU und HJELMSTAD 2002). Es existieren zahlreiche Vorschläge, um dieses Verhalten abzubilden. Beispielsweise das sogenannte $k - \theta$ -Modell von HICKS und MONISMITH (1971), das Modell von LADE und NELSON (1987) oder die Modelle von UZAN (UZAN 1985, 1992; UZAN u. a. 1985) und QUECK (1992) und WELLNER (1993).

Durch die lastverteilende Wirkung der steifen Betonplatte wird im Allgemeinen eine geringe Beanspruchung des Unterbaus erzielt. Bei ausreichend tragfähigem und verdichtetem Unterbau ist daher eine linear-elastische Materialmodellierung des Bodens ausreichend genau. Weltweit, und insbesondere auch in Deutschland, sind allerdings wenig tragfähige Böden weitverbreitet, etwa im Bereich von Mooren, Seen, Flüssen und Küstengebieten. Darüber hinaus sind die Bodenverhältnisse lokal und zeitlich stark schwankend. Im geometrischen Sinne kann der Untergrund als Halbraum (unendlich in der Ebene und der Tiefe) angesehen werden. Da jedoch die strenge Behandlung als Halbraum verschiedenlich Probleme mit sich bringt und der Einfluss von Randbedingungen in der Ebene und in die

Tiefe rasch abklingt, wurden unterschiedlichste Ansätze entwickelt.

Für die Bodenreaktion wird in den RDO Beton die Federlagerung nach Winkler angenommen, d. h. $q = kw$, mit der Bettungszahl k in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$. Die Lagerungsbedingung kann als parallele Anordnung unabhängiger Federn konstanter Steifigkeit gesehen werden, ergo wird die Schubsteifigkeit nicht modelliert, was der Modellvorstellung einer Fluidbettung entspricht. Demnach ist die Bettungskraft (der Auftrieb) proportional zur Durchbiegung, oder Einsenkung. Diese Art der Bettung wird WINKLER (1867) und HERTZ (1884) zugeschrieben, wobei das Konzept schon vorher Anwendung fand, beispielsweise durch Nikolaus Fuss und Leonhard Euler, und generell auf dem archimedischen Prinzip gründet (SELVADURAI 1979). Allerdings stellt dies eine grobe Vereinfachung eines realen Bodens dar, der besser als ein Festkörper modelliert werden kann. Da die Bettungszahl eigentlich keine Konstante ist, sondern das Verhältnis von Sohlspannungen zu Setzungen darstellt (siehe BARTH und RUSTLER 2013, S. 289), ist diese Größe u. a. von der Dicke der Bodenschichten abhängig und variiert dazu noch in der Tiefe. Es ergibt sich eine nichtlineare Beziehung, die streng genommen einer Setzberechnung bedarf Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (siehe etwa 2009, Abschnitt 6.2). Die RDO Beton spezifizieren auf gebundenen Tragschichten eine Bettungszahl $k = 0,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$, auf ungebundenen Tragschichten wird die Bettungszahl aus dem E_{V2} -Wert berechnet: $k = \frac{E_{V2}}{1250}$ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009, Abschnitt 6.2.9). Die Äquivalenz von k und E_{V2} gilt damit für eine Bodendicke von 1250 mm. BARTH und RUSTLER (2013) halten zum Bettungszahlverfahren fest:

Auf Grund der [...] Unzulänglichkeiten ist dieses Modell den heutigen Anforderungen nicht mehr gewachsen und steht in krassm Widerspruch zu den sich ständig weiterentwickelnden Tragwerksmodellen und einer immer präziseren Tragwerksanalyse.

1.5.3 Lösung der Plattengleichung für Verkehrsbelastung

Es gilt also Gleichung 1.18 mit Winklerschem Bettungsmodell

$$D\Delta\Delta w = p - kw \quad (1.19)$$

unter der Randbedingung einer Verkehrsbelastung zu lösen. Es ist den Autoren unbekannt, wie hieraus die im Straßenwesen verwendeten analytischen Lösungen für σ_e und w entstehen. Es wäre bedauerlich, falls dieses Wissen verloren ginge. Die gefundenen Arbeiten von WESTERGAARD geben hierzu wenig Auskunft, verweisen jedoch teilweise auf andere Arbeiten. Eventuell sind auch die Ansätze aus BECKER und GROSS (2002, Abschnitt 5.3) oder TIMOSHENKO und WOINOWSKY-KRIEGER (1987, Abschnitt 8) zielführend. Auch die Arbeitspapiere zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen, Reihe B: Berechnungsmodelle, Teil B 2: Methode der Plattentheorie bei der Dimensionierung enthalten weitere Informationen sowie Literaturverweise. Zur Herleitung hält GOLDSCHMIDT (1990) fest:

WESTERGAARD begann seine Untersuchung mit der Annahme, dass eine Reihe von Einzellasten entlang einer halbunendlich ausgedehnten Platte wirken. Zur Lösung der Differenzialgleichung brachte er trigonometrische Reihen in den Ansatz, ließ den Abstand der Einzellasten gegen unendlich wachsen und führte einen Lastfaktor ein, der die Wirkung der Flächenlast berücksichtigt.

GOLDSCHMIDT bezieht sich an dieser Stelle auf WESTERGAARD (1943) und WESTERGAARD (1948). Da WESTERGAARD unterschiedliche Ansätze verwendete und seine Ergebnisse mehrfach selbst überarbeitete, besteht einiger Anlass zur Verwirrung.

In jedem Fall sind die bahnbrechenden analytischen Lösungen von Harold Malcolm WESTERGAARD die Grundlage vieler Dimensionierungsverfahren für Betonfahrbahnen seit den 1920er Jahren. Die grundsätzliche Modellvorstellung nach WESTERGAARD ist die der schwimmend gelagerten Platte, siehe Bild 1.1.

Neben dem Verfahren von WESTERGAARD eignen sich prinzipiell auch die Verfahren von HOGG und BURMISTER für die Dimensionierung von Betonverkehrsflächen, diese werden in den RDO Beton jedoch nicht verwendet. Eine Begründung liefert EISENMANN (1970, Seite 36):

HOGG geht von einer auf einem Halbraum satt gelagerten Platte ohne Verbund aus. BURMISTER gibt eine Lösung für ein zweischichtiges System, wobei auch ein Verbund der beiden Schichten berücksichtigt ist. Wegen der bei die-

sen Verfahren getroffenen Annahme einer satten Auflagerung erhält man hiermit bei der Spannungsberechnung in Betondecken keine höhere Genauigkeit. Da zudem der Rechenaufwand größer ist und nur der Lastfall Plattenmitte behandelt wird, wird für Betondecken das [...] Verfahren von WESTERGAARD vorgezogen.

1.5.4 Zu Formelzeichen und Einheiten

In WESTERGAARD (1926) wird als Beispiel für die Last vielfach $P = 10000$ pounds gegeben, was streng genommen einer Masse entspricht. Weiterhin wird für die Größen Spannung sowie Druck und E-Modul „pounds per square inch“ verwendet. Diese Verwendung findet sich auch bei TELLER und SUTHERLAND (1935), WESTERGAARD (1948) und IOANNIDES u. a. (1985), wobei letztere für Spannung sowie Druck und E-Modul nur „psi“ angeben.

Diese Definitionen sind unsauber, waren aber vermutlich üblich. Vermutlich sollen P in „pound force“ (lbf) und Spannungen, Drücke und E-Moduln in „pound force per square inch“ (psi) angegeben sein.

In Westdeutschland war anscheinend lange Zeit die Verwendung des Formelzeichens Q für die Radlast üblich (EISENMANN und LEYKAUF 1975, 1981; EISENMANN 1970). Hier ist allerdings immer von einer Kraft als Belastungsgröße ausgegangen worden. Die inzwischen nicht mehr zulässige Einheit „kilopond“ gehorcht dabei folgender Umrechnung in SI-Einheiten: $1 \text{ Kilopond} = 9,806 65 \text{ N} \approx 10 \text{ N}$.

Die TGL 33468/01 1986, PFEIFER (1986b) und insbesondere die RDO Beton verwenden für die Radlast das übliche Formelzeichen F mit der Einheit N . Diese Konvention wird im Folgenden übernommen.

1.5.5 Westergaard 1926 und 1933

Die Westergaardschen Lösungen für die Biegezugspannungen sowie die Durchbiegungen, setzen eine Reihe weiterer vereinfachender Annahmen voraus. Diese sind u. a.

- die kontinuierliche Bettung, kein Abheben von der Unterlage,
- kein Lastübertrag von/auf benachbarte Platten und
- eine einzelne Radlast.

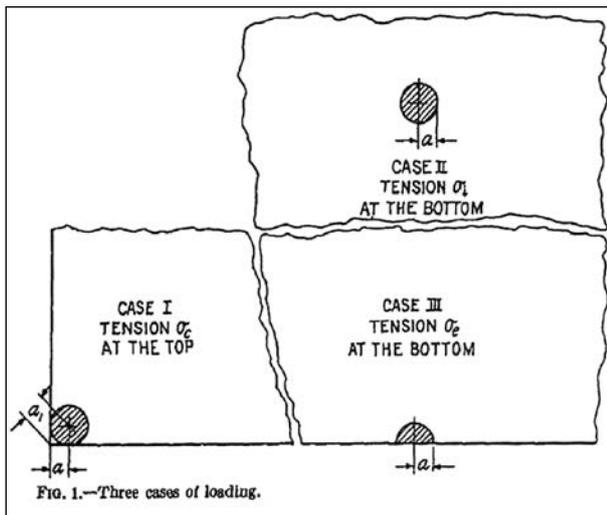


Bild 1.2: Die drei ursprünglichen Lastfälle nach WESTERGAARD (1926, Bild 1).

Weiterhin gelten diese Lösungen nur für drei spezielle Einzellastfälle, nämlich Plattenmitte, -ecke, und -rand (siehe Bild 1.2) und setzen darüber hinaus unendliche, oder halb-unendliche, Plattendimensionen voraus. Dimensionierungsrelevant ist in den RDO Beton allerdings nur der Lastfall „Rand“, jeweils für die Quer- und die Längsfuge.

Bemerkenswert ist, dass auf alle in Bild 1.2 gezeigten Lasteinleitungsflächen die gleiche Kraft wirken soll. Der Lastfall „Rand“ wird bei identischem Radius, also nicht etwa mit gleichem Druck und halber Kraft, sondern mit doppeltem Druck und gleicher Kraft gerechnet wie die anderen beiden Lastfälle.

Die ursprüngliche Variante der Formel für die Belastung bei Kantenbefahrung wurde für konkrete Zahlenwerte von $E = 20,68 \text{ GPa}^3$ und $\nu = 0,15$ hergeleitet (WESTERGAARD 1926, Formel 12).

$$\sigma_e = 0,572 \frac{F}{h^2} [\log_{10}(h^3) - 4 \log_{10}(b) - \log_{10}(k) + 5,767] \quad (1.20)$$

Laut TELLER und SUTHERLAND (1935, Seite 125) wurde Gleichung 1.20 später verallgemeinert. Mutmaßlich ist das in WESTERGAARD (1933) dokumentiert, allerdings konnte dieser Artikel nicht gefunden werden. Die verallgemeinerte Variante lautet nach TELLER und SUTHERLAND (1935, Gleichung 9)

$$\sigma_e = 0,529 (1 + 0,54\nu) \left(\frac{F}{h^2} \right) \left[\log_{10} \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right] \quad (1.21)$$

³ $E = 3 \cdot 10^6 \text{ psi}$

Diese Formel verwendet die sogenannte „special theory“, siehe Kapitel 1.5.5.1. Aufgrund verschiedener getroffener Annahmen ergaben sich Abweichungen im Vergleich mit Versuchen. Laut TELLER und SUTHERLAND (1935) gilt diese Formel nur für „full subgrade support“. IOANNIDES u. a. (1985) pflichten LOSBERG (1960) bei, dass Gleichung 1.21 nicht korrekt sei und daher nicht verwendet werden dürfe.

1.5.5.1 Virtuelle Ersatzaufstandsfläche

WESTERGAARD (1926) unterscheidet zwischen einer „ordinary theory“ und einer „special theory“ bezüglich des Radius der Lastaufstandsfläche.

Die ordinary theory arbeitet direkt mit dem Radius der Lastaufstandsfläche r . Die special theory verwendet stattdessen die Ersatzaufstandsfläche b , siehe Gleichung 1.15.

Die virtuelle Ersatzaufstandsfläche berücksichtigt die vertikale Spannungsumlagerung innerhalb der Betonplatte, siehe Bild 1.3. Das Kernproblem ist, dass die zugrundeliegende Plattentheorie sowohl ebene Dehnung ($\epsilon_{zz} = 0$) als auch ebene Spannung annimmt ($\sigma_{zz} = 0$). Dies stellt wie in Kapitel 1.5.1 beschrieben einen Widerspruch dar. Problematisch wird diese Tatsache, da die senkrechten Komponenten von Dehnung und Spannung (Normal und Schub) nicht beschrieben werden können, obwohl sie aufgrund der senkrecht wirkend angenommenen Radlast auftreten müssten und dies in der Realität natürlich auch tun. Diese Vernachlässigung führt zu einer Singularität der Biegezugdehnungen unter der Annahme einer konzentriert wirkenden Last (Punktlast). Warum in der ordinary theory dennoch ein finiter Radius der Lastaufstandsfläche r verwendet wird, ist dem AN unklar.

WESTERGAARD war sich bewusst, dass das Problem im gewählten Ansatz liegt und streng genommen nur durch eine Relaxation der Annahmen gelöst werden kann. Die von ihm beschriebenen minimalen Annahmen (WESTERGAARD 1926, Seite 31) der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes und der materiellen Kontinuität verhindern allerdings nach Wissen des AN analytische Lösungen und lassen nur die Lösung beispielsweise mittels FEM zu, die damals noch nicht zur Verfügung stand.

Um dieses Problem zu lösen, führte WESTERGAARD 1926), basierend auf Arbeiten von NADAI (1925) sogenannte „cones of equivalent distribution of pressure“ ein. Gleichung 1.15 beschreibt, dass die Spannungsverteilung auf der Unterseite der Platte durch die Umlagerung beschränkt bleibt, selbst wenn r gegen Null tendiert, da b nicht in selbem Maße gegen Null geht, siehe Bild 1.4

Die special theory gilt, falls die Aufstandsfläche relativ klein ist in Bezug zur Deckendicke, also $r < 1,724h_d$. Ansonsten kann mit der ordinary theory gearbeitet werden.

Die RDO Beton verwenden die special theory und fügen einen Sprung um $h_d/2$ hinzu, falls $r < h_d/2$. Das gilt meist nur für relativ dicke Platten, so tritt er bei einem Radius der Ersatzaufstandsfläche von 150 mm bei 300 mm Plattendicke auf. Der Hintergrund liegt in der Dimensionierung von Sonderverkehrsflächen, etwa von Containerumschlagplätzen, wo es kleine Aufstandsflächen gibt. Ein entsprechender Hinweis fehlt in den RDO Beton (2009), ist allerdings in den RDO Beton Entwurfssfassung (2018) enthalten. Siehe Formeln 6-5 & 6-6 auf den Seiten 17 & 18 der RDO Beton 09 sowie Formeln 6-11 & 6-12 der Entwurfssfassung 2018.

1.5.6 Teller & Sutherland 1935

Über die Zeit versuchten verschiedene Forscher die Einschränkungen von WESTERGAARDS Originalformeln zu umgehen sowie auf Basis von Beobachtungen in der Realität zu verbessern. Daher sind in der einschlägigen Literatur eine Vielzahl an unterschiedlichen Formeln zu finden. So geben TELLER und SUTHERLAND (1935, Formel 19) eine auf Basis von Untersuchungen empirisch ermittelte Formel an:

$$\sigma_e = 0,529(1 + 0,54\nu) \frac{F}{h^2} \left[\log_{10} \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) + \log_{10} \left(\frac{b}{1 - \nu^2} \right) - 1,0792 \right] \quad (1.22)$$

Diese Formel wurde für die beim Aufschüsseln nicht kontinuierliche Auflage in Kombination mit schlechten (feucht, Tauwetter) Bodenverhältnissen bestimmt. Gleichung 1.22 findet sich auch bei EISENMANN (1970, Formel 19) mit einem + anstatt einem - im Nenner des mittleren Terms der Klammer. In EISENMANN und LEYKAUF (1975, Bild 1) ist sie korrekt enthalten, daher ist zu vermuten, dass es sich bei der Verwendung des + um ein Versehen

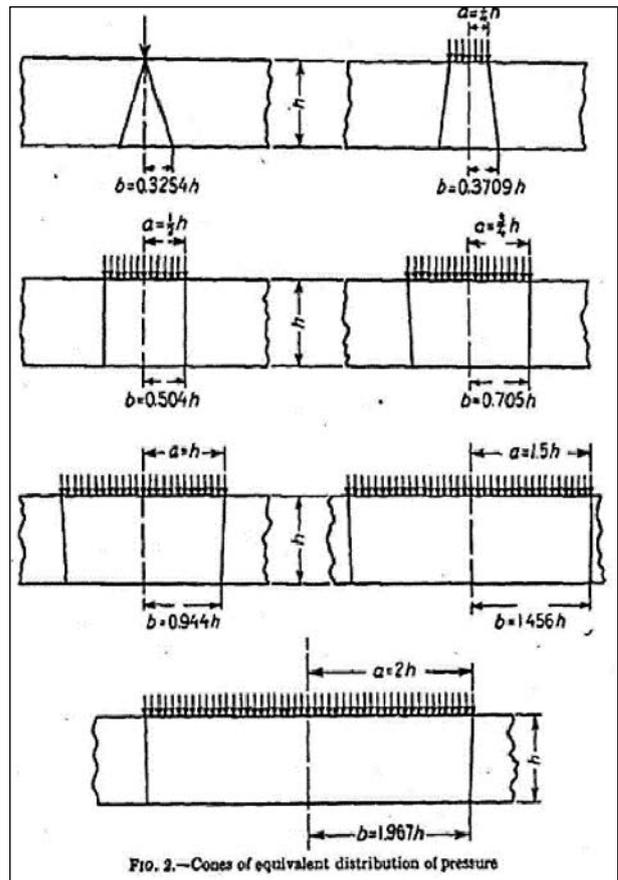


Bild 1.3: Spannungsumlagerung innerhalb der Betondecke. Quelle: WESTERGAARD 1926).

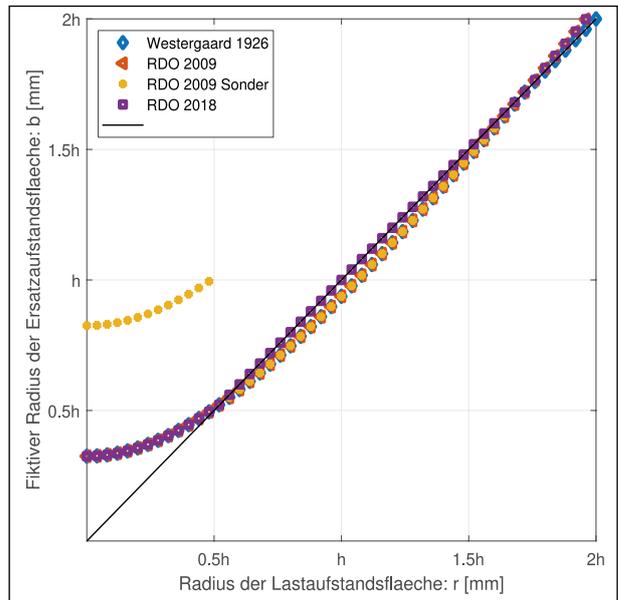


Bild 1.4: Der fiktive Radius der Ersatzaufstandsfläche. Vergleiche WESTERGAARD 1926, Bild 3). handelt. In EISENMANN (1979, Formel 20b), EISENMANN und Leykauf (1981) sowie im Arbeitspapier zur Plattentheorie ist die Formel mit dem zusätzlichen Faktor 0,1 im Zähler des mittleren Terms der Klammer enthalten, vgl. FGSV (2011, Gleichung 4.15). Welche Gründe in der Verwendung des Fak-

tors 0,1 lagen oder ob es sich um ein Versehen handelt, vermag der AN nicht zu sagen.

1.5.7 Westergaard 1948

WESTERGAARD selbst verbesserte seine Formeln stetig weiter, so beispielsweise in einer Veröffentlichung, die sich eigentlich mit Spannungen in Oberflächen aus Beton von Flugplätzen beschäftigt: H. M. WESTERGAARD (1948). „New Formulas for Stress in Concrete Pavements of Airfields“. In: American Society of Civil Engineers Transactions 113, S. 425–444. Die Fälle, für die dort Lösungen angegeben sind, unterscheiden sich subtil von früheren Lösungen:

Case 3. The load is next to an edge or next to a joint that has no capacity for load transfer. [...] The total load P is distributed uniformly over the area of an ellipse which is tangent to the edge or joint [...]. The tensile stress at the bottom along the edge or joint directly under the point of tangency of the ellipse [...] may be computed [...] by the formula

$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100k\left(\frac{a+b}{2}\right)^4} \right) + 1,84 - \frac{4}{3}\nu + (1+\nu)\frac{a-b}{a+b} + 2(1-\nu)\frac{ab}{(a+b)^2} + 1,18(1+2\nu)\frac{b}{l} \right]. \quad (1.23)$$

Hierbei ist zu beachten, dass b in Gleichung 1.23 nicht die Ersatzaufstandsfläche nach Gleichung 1.15 meint, sondern a und b die Halbachsen einer ellipsoiden Aufstandsfläche definieren. Weiterhin gilt diese Formel also nicht für eine halbkreisförmige Lasteinleitungsfläche wie in Bild 1.2, sondern für einen Vollkreis (oder eine Ellipse) der die Plattenkante tangiert, siehe Bild 1.1. Anmerkend sei erwähnt, dass WESTERGAARD den Fall des mittig über der Fuge stehenden Rades am Plattenrand ebenfalls berücksichtigte:

Case 4. — As in Case 3, the load is again next to an edge or next to a joint that has no capacity for load transfer, but the total load P is now distributed uniformly over the area of one half of an ellipse. The ellipse has the principal radii a and b, and the diameter 2a is along the edge or joint. This condition may occur when one half of the footprint of the tire is outside the panel under

consideration; P is then one half of the total pressure transmitted through the tire.

Laut IOANNIDES u. a. (1985) ist Gleichung 1.23 diejenige, die auch im Straßenbau verwendet werden sollte. Im Fall einer kreisförmigen Lasteinleitungsfläche $a = b = r$ wird diese Formel zu

$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)F}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) + 1,84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1-\nu}{2} + 1,18(1+2\nu)\frac{r}{l} \right] \quad (1.24)$$

und entspricht damit IOANNIDES u. a. (1985, Formel 2c). Gleichung 1.24 wird auch in der niederländischen Dimensionierungs-Software Vencon 2.0 verwendet (STET 2004, Formel 3.26). Im Folgenden wird gezeigt, dass die in den RDO Beton verwendete Gleichung für das Moment aus Verkehrsbelastung (Gleichung 1.13) auf Gleichung 1.24 basiert.

1.5.8 Zurückführung des Moments aus Verkehrsbelastung auf Westergaard

In den RDO Beton wird eine Querkontraktionszahl von $\nu = 0,2$ angenommen. Wenn diese in Gleichung 1.24 eingesetzt wird, erhält man

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{F}{h^2} \frac{9}{8\pi} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) + \frac{46}{25} - \frac{4}{15} + \frac{4}{10} + 1,652\frac{r}{l} \right] \\ &= \frac{F}{h^2} \frac{9}{8\pi} \left[\frac{1}{\log_{10} e} \log_{10} \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) + \frac{296}{150} + 1,652\frac{r}{l} \right]. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Dabei gilt mithilfe von Gleichung 1.14 die folgende Identität

$$\begin{aligned} &\log_{10} \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) \\ &= \log_{10} \left(\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)kr^4} \right) - \log_{10}(100) + \log_{10} [12(1-\nu^2)] \\ &= \log_{10} \left(\frac{l}{r} \right)^4 - 2 + \log_{10}(11,52) \\ &= 4\log_{10} \left(\frac{l}{r} \right) - 0,938\,548. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 1.26 in Gleichung 1.25 erhalten wir

$$\begin{aligned} &= \frac{F}{h^2} \frac{9}{8\pi} \left[\frac{1}{\log_{10} e} \left(4\log_{10} \left(\frac{l}{r} \right) - 0,938\,548 \right) + \frac{296}{150} + 1,652\frac{r}{l} \right] \\ &= \frac{F}{h^2} \frac{9}{8\pi} \left[9,210\,34\log_{10} \left(\frac{l}{r} \right) + 1,652\frac{r}{l} - 0,187\,754 \right]. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Das Einsetzen der Biegezugspannung in Gleichung 1.4 liefert das Biegemoment

$$M_e = F \left[0,549\,702 \log_{10} \left(\frac{l}{r} \right) + 0,098\,596 \left(\frac{r}{l} \right) - 0,011\,206 \right] \quad (1.28)$$

welches bis auf Unterschiede in der Rundung, den Anpassungsfaktoren und der Verwendung von r anstatt von b der Formel der RDO Beton (Gleichung 1.13) entspricht. Die Bedeutung von b wird in Kapitel 1.5.5.1 erläutert. Damit ist erwiesen, dass Gleichung 1.13 nicht auf TELLER und SUTHERLAND (1935), sondern auf WESTERGAARD (1948) zurückgeht.

1.5.9 Ansatz zur Aufarbeitung

In Westdeutschland wurde anscheinend bis in die 80er Jahre Gleichung 1.22 verwendet. Dass Gleichung 1.24 als Ausgangsbasis für Gleichung 1.13 dient, scheint aus Arbeiten aus der ehemaligen DDR zu stammen.

GOLDSCHMIDT (1990, Formel 23) und TGL 33468/01 (1986, Formel 7) ähneln der für M_{EV} stark (0,099 anstatt 0,1). In PFEIFER (1986b, Seite 240) wird auf die „Formulierung von Weitlandt“ verwiesen. Leider findet sich jedoch kein Weitlandt in den Referenzen. Es wird angenommen, dass es sich bei der Arbeit um WEITLANDT, G.: „Bemessung und Konstruktion bewehrter und unbewehrter Zementbeton. [sic] Deckschichten auf massiven Straßenbrücken“, Diplomarbeit, Hochschule für Verkehrswesen, Dresden, 1974, handelt. Der Punkt im Titel ist vermutlich ein OCR Artefakt. Diese Quellenangabe entstammt den Ergänzungen zur TGL 20003: VERCH (1982, Letzte Seite). Der Verfasser dieser Ergänzungen hat wohl nach der Wende die VIC-GmbH in Potsdam gegründet und ist im März 2019 verstorben⁴. Der G. ist vermutlich ein Gerhard, zumindest gab es 1984 zwei einschlägige Veröffentlichungen unter diesem Namen (WEITLANDT 1984; WELLMITZ und WEITLANDT 1984).

Durch Recherchen des AN konnten die Identität des Autors sowie die Titelangaben der Diplomarbeit bestätigt werden. Die Diplomarbeit selbst konnte nicht gefunden werden.

Es darf vermutet werden, dass Herr WEITLANDT die in Kapitel 1.5.8 dargestellte Umformulierung vornahm und zusätzlich, inspiriert durch WESTER-

GAARD (1926), r durch b ersetzte. Warum die Wiedereinführung der special theory geschah, ist nicht nachvollziehbar. PFEIFER (1986b, Seite 1) trifft bezüglich M_{EV} die folgende Aussage:

Die empirisch abgeleiteten Veränderungen der ursprünglichen Formeln von WESTERGAARD durch ihn selbst und durch TELLER und SUTHERLAND sowie die von PICKET und RAY abgeleiteten Einflussflächen wurden dabei abhängig vom Anwendungsfall in das Berechnungsverfahren einbezogen.

Im Lichte der Zurückführung auf WESTERGAARD (1948) erscheint diese Aussage nur zum Teil haltbar.

1.5.10 Kommentar zur Gültigkeit

Es ist bekannt, dass die Ergebnisse von Berechnungen z. B. mittels FEM von den Resultaten von Gleichung 1.13 abweichen können. Einschlägige Ergebnisse finden sich bei IOANNIDES u. a. (1985, Seite 17) und VILLARET u. a. (2019, Tabelle 6-1).

1.5.11 Software zur Dimensionierung von Betonverkehrsflächen

International existieren unterschiedliche Verfahren zur Dimensionierung von Betonfahrbahnen und damit eine Reihe von Softwarelösungen, darunter das auf dem US-amerikanischen „Mechanistic Empirical Pavement Design Guide“ basierende AASHTOWare Pavement ME (Sowohl Asphaltals auch Betonbauweise: <https://me-design.com/MEDesign/S> oftware. aspx) und weiterhin

- Illi-Slab (IOANNIDES u. a. 1984; KOROYESIS 1990)
- JSLAB (MASAD u. a. 1996; OZBEKI u. a. 1985)
- QualiDim 2.4.0
- KenPave (MASAD u. a. 1996)
- EverFE (DAVIDS 2019; DAVIDS u. a. 2003)
- VENCON 2.0 (CROW 2004; STET 2004; STET u. a. 2006; VAN LEEST u. a. 2005)

Die derzeitig verfügbare Software zur Dimensionierung gemäß den RDO Beton ist das Programm AWDSTAKO, siehe dazu auch PFEIFER u. a. (2002, 2005).

⁴ [http://www.vic-gmbh.de/vic-potsdam/aktuelles/ Abgerufen am 26.01.2020](http://www.vic-gmbh.de/vic-potsdam/aktuelles/Abgerufen%20am%2026.01.2020)

1.6 Software zur Dimensionierung von Betonverkehrsflächen

International existieren unterschiedliche Verfahren zur Dimensionierung von Betonfahrbahnen und damit eine Reihe von Softwarelösungen, darunter das auf dem US-amerikanischen „Mechanistic Empirical Pavement Design Guide“ basierende AASHTOWare Pavement ME (Sowohl Asphalt- als auch Betonbauweise: <https://me-design.com/MEDesign/Software.aspx>) und weiterhin:

- Illi-Slab (IOANNIDES u. a. 1984; KOROVESIS 1990)
- JSLAB (MASAD u. a. 1996; OZBEKI u. a. 1985)
- QualiDim 2.4.0
- KenPave (MASAD u. a. 1996)
- EverFE (DAVIDS 2019; DAVIDS u. a. 2003)
- VENCON 2.0 (CROW 2004; STET 2004; STET u. a. 2006; VAN LEEST u. a. 2005)

Die derzeit verfügbare Software zur Dimensionierung gemäß den RDO Beton ist das Programm AWDSTAKO, siehe dazu auch PFEIFER u. a. (2002, 2005).

2 Erstellung des Lastenheftes (AP200)

Das Lastenheft beschreibt gemäß DIN 69901-5 2009 die:

[...]vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages.

Die Anforderungen in einem Lastenheft sollten durch ihre Formulierung so allgemein wie möglich und so einschränkend wie nötig formuliert werden. Hierdurch hat der Auftragnehmer die Möglichkeit, optimale Lösungen zu erarbeiten, ohne durch zu konkrete Anforderungen in seiner Lösungskompetenz eingeschränkt zu sein.

Eng verwandt mit dem Lastenheft ist die Leistungsbeschreibung. Sie wird üblicherweise im Bauprojektmanagement verwendet und ist dementsprechend in der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) Teil A, § 7 definiert:

Die Leistung ist eindeutig und so erschöpfend zu beschreiben, dass alle Unternehmen die Beschreibung im gleichen Sinne verstehen müssen und ihre Preise sicher und ohne umfangreiche Vorarbeiten berechnen können.

In der Softwareentwicklung ist der Begriff „Lastenheft“ üblich. Der Detailgrad eines Lastenheftes, so wie der Auftragnehmer es versteht, ist deutlich höher als die typischen Leistungsbeschreibungen der BASt. Daher wurde angeboten, im Rahmen dieses Projekts ein Lastenheft zu erstellen, das sowohl die konkret zu entwickelnde Software zur Dimensionierung gemäß RDO Beton näher spezifiziert, aber auch für zukünftige Softwareentwicklungsprojekte als Ausschreibungsbestandteil herangezogen werden kann.

Aus diesem Grund wird das Lastenheft modular konzipiert: Die einzelnen Punkte sind soweit möglich als in sich abgeschlossene Bausteine formuliert, sodass sich zukünftige Lastenhefte nach dem Baukastenprinzip aus bestehenden und ggf. noch zu erstellenden Teilen zusammenstellen lassen. Technisch wird dies durch Ablage in separaten Dateien realisiert. Ein sogenanntes Master-Dokument verwaltet den Import dieser Einzeldateien und erstellt ein übergreifendes Inhaltsverzeichnis.

Als zu verwendendes Dateiformat für die einzelnen Bausteine wurde das unkomprimierte, XML-basierte FODT-Format festgelegt, da dieses auf einem offenen Standard beruht und sich deshalb auch mit freien, von einzelnen Herstellern unabhängigen Textverarbeitungsprogrammen lesen und bearbeiten lässt. Weiterhin lässt es sich aufgrund seiner textbasierten Struktur besser in Versionskontrollsystemen verwalten als Binärformate.

Eine hierarchische Gliederung des Lastenheftes dient dabei sowohl der Strukturierung des resultierenden Dokuments in Form von Kapiteln als auch der Übersichtlichkeit der Dateiablage: Die Bausteine sind in entsprechend benannten Unterverzeichnissen einsortiert.

Auf oberster Ebene der Hierarchie wird unterschieden zwischen einem allgemeinen Teil und einem spezifischen Teil.

Der allgemeine Teil ist auf ein großes Spektrum von Software-Projekten übertragbar und definiert Anforderungen an Architektur, Lizenz, Dokumentation usw. Der spezifische Teil hingegen ist auf die RDO Beton, die hieraus abgeleiteten funktionalen Anforder-

derungen und die vorliegenden Rahmenbedingungen zugeschnitten. Dabei werden alle Anforderungen bei der Aufnahme in das Lastenheft dahingehend geprüft, ob sie sich in allgemeine und spezifische Teile trennen lassen. So gibt es allgemeingültige Festlegungen für Programme, die Berechnungen durchführen oder eine grafische Oberfläche anbieten; der nicht wiederverwendbare spezifische Teil wird daher bewusst minimiert.

2.1 Spezifischer Teil

Der konkrete fachspezifische Teil des Lastenhefts wird unterteilt in die Module „Berechnung“ sowie „Grafische Oberfläche“. Im Vorfeld angestellte Architekturüberlegungen lassen aus verschiedenen Gründen eine Trennung des eigentlichen Berechnungskerns von der Benutzeroberfläche sinnvoll erscheinen: So kann ein unabhängiger Rechenkern beispielsweise auch für automatisierte Vergleiche mit verschiedenen Eingangsparametern aus anderen Programmen heraus direkt angesteuert werden oder es können unterschiedliche Rechenkern für verschiedene Versionen der RDO Beton vorgehalten werden.

Die aus dieser Trennung resultierenden Teilsysteme, die über klar definierte Schnittstellen miteinander kommunizieren, lassen sich leichter spezifizieren und im weiteren Verlauf der Entwicklung einfacher umsetzen, testen, weiterentwickeln, warten, austauschen oder (insbesondere bei Anwendung für neue Aufgabenstellungen) anpassen.

Weiterhin werden im spezifischen Teil Anforderungen an die Installation und die Einweisung in das Programm gestellt.

2.1.1 Rechenkern

Grundlage für die konkrete Umsetzung des Projektes ist die Entwurfsfassung der RDO Beton, Ausgabe 2018 (RDO Beton Entwurfsfassung 2018).

2.1.2 Grafische Oberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche (graphical user interface: GUI) soll über Möglichkeiten zur Darstellung von Querschnittsbildern, Systembilder für Sonderlasten verfügen. Sie soll übersichtlich und einfach zu verwenden sein. Die Datenverwaltung wird durch konsequente Verwendung von textbasierten Ein- und Ausgabedateien einfach und übersichtlich

gehalten. Eine Druckfunktion ermöglicht die übersichtliche und umfassende Erstellung von Berichten der Dimensionierungsrechnungen.

2.2 Allgemeiner Teil

Der allgemeine Teil des Lastenhefts soll die Ausschreibung ähnlicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte erleichtern. Selbst bei stark abweichenden Aufgabenstellungen und Themen sollten viele der Inhaltsblöcke sowie die Grundstruktur wiederverwendbar sein. Dabei werden an einigen Stellen Festlegungen getroffen, die sich aus der Projektausschreibung oder Abwägungen während der Projektlaufzeit ergeben. Wahlmöglichkeiten innerhalb der Bausteine, z. B. in Form von anzukreuzenden Optionen, werden nur an einzelnen Stellen vorgesehen, wo der Bedarf bereits jetzt konkret absehbar ist.

Im Rahmen der Startsituation am 18.06.2019 wurden verschiedene Systemarchitekturen skizziert und hinsichtlich ihrer Möglichkeiten, ihres Umsetzungs-, Wartungs- und Betriebsaufwands und ihres zukünftigen Ausbaupotenzials gegenübergestellt. Die letztlich gewählte Architektur beinhaltet eine im Webbrowser lauffähige Anwendung ohne Netzwerkfähigkeit (d. h. keine Client-/Server-Anwendung).

Aus der Laufzeitumgebung Webbrowser (ohne Nutzung von Plugins oder Beschränkung auf bestimmte Betriebssysteme und Browser) ergeben sich bereits gewisse Einschränkungen bezüglich der nutzbaren Programmiersprachen. Es wurde beschlossen, das gesamte System in ECMAScript/JavaScript zu realisieren und diese Programmiersprache im Rahmen des allgemeinen Lastenhefts auch zum Standard für zukünftige Projekte zu erklären. Eine möglichst einheitliche Software-Landschaft erleichtert die Wiederverwendung von Quellcode und Bibliotheken und reduziert den langfristigen Wartungsaufwand.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Programms und seiner Nutzung in der Forschung könnten auch aufwändige, mit spezieller Hardware beschleunigte physikalische Simulationen zur Anwendung kommen, wofür andere Programmiersprachen besser geeignet bzw. sogar erforderlich wären. Deshalb wurde hier einerseits der Ausbau der Anbindungsmöglichkeiten vorgesehen (Client-/Server-Architektur) als auch im entsprechenden Block des Lastenhefts verschiedene Optionen zur Festlegung der

Programmiersprache vordefiniert, selbst wenn diese im gegenständlichen Projekt noch nicht zur Anwendung kommen.

In ähnlicher Weise wurden auch mögliche Datenaustauschformate gegenübergestellt (XML, JSON, Binärformate) und hierzu ebenfalls Festlegungen getroffen, die in das Lastenheft eingegangen sind.

3 Erstellung des Pflichtenheftes

Das Pflichtenheft beschreibt gemäß DIN 69901-5 (2009) die

vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben aufgrund der Umsetzung des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenhefts.

Die Anforderungen des zuvor ausgearbeiteten Lastenhefts werden darin mit konkreten technischen Festlegungen seitens des Auftragnehmers verknüpft. Das Pflichtenheft sollte vom Auftraggeber bestätigt werden und erst anschließend sollten die eigentlichen Entwicklungs-, beziehungsweise Implementierungsarbeiten beginnen.

3.1 Änderungen

Während des Projektverlaufs ist das Pflichtenheft mehrfach überarbeitet worden. Dies geschah aufgrund von neuen Erkenntnissen, die sich erst im weiteren Projektverlauf ergaben, allerdings auch aufgrund von zwischenzeitlichen Absprachen zwischen AG und AN. Die genannten Änderungen wurden in Absprache mit dem AG vorgenommen.

3.1.1 Rechenkernfunktionen

Während der Implementierung ergaben sich einige Probleme nicht-technischer Natur. Die für die RDO Beton relevanten Probleme und der im Projekt verfolgte Umgang damit werden im Folgenden dokumentiert.

3.1.1.1 Plattenbreiten

Generell definieren die RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 4.6) eine untere Plattenbreite von 1200 mm. Für Platten schmaler als 2000 mm existiert in Tabelle 7-2 allerdings kein Querverteilungsfaktor, der für den Lastfall Ermüdung relevant ist. Es ist aus Sicht des AN fragwürdig, den Lastfall

Ermüdung anders zu behandeln als die beiden quasidynamischen Lastfälle.

Nur die quasidynamischen Einzelnachweise können mit $1200 \text{ mm} \leq B_p \leq 2000 \text{ mm}$ berechnet werden.

Die Definition der maximalen Plattenbreite ist fragwürdig, siehe RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 4.6). Mit $1200 \text{ mm} \leq L_p \leq 7500 \text{ mm}$ und $0,4 \leq B_p/L_p \leq 2,5$ würde gelten: $1200 \text{ mm} \leq B_p \leq 18750 \text{ mm}$, es sei denn Richtungsfahrbahn, dann $B_p \leq 4500 \text{ mm}$. Nach Meinung des AN verfügen zumindest die Straßenklassen Bundesautobahn und Bundesstraße über Richtungsfahrbahnen, eine Definition findet sich allerdings in den RDO Beton nicht. Die ZTV RDO Beton-Stb (2020, Abschnitt 3.3.2) lassen hingegen eine Plattenbreite $B_p \leq 4750 \text{ mm}$ zu. Eine Einschränkung auf Richtungsfahrbahnen findet sich dort nicht.

Als maximal zulässige Plattenbreite werden 4500 mm verwendet.

3.1.1.2 Straßenklassen

In den RDO Beton wird vielfach nach der Straßenklasse differenziert. Durchgängig ist dabei die Verwendung von Bundesautobahn, Bundesstraße, Landesstraße, Kreisstraße und Gemeindestraße. Es kommen aber auch andere Straßenklassen vor, deren Verwendung nur sporadisch ist. Dazu zählen: Sonderbeanspruchung, zusätzlich (Tabelle 6-6), nicht zuordnungsfähige Verkehrsflächen (Tabelle 6-6), Sonderverkehrsflächen, Sonderbedingungen (Tabelle 6-7), Flächen mit geringem Qualitätsanspruch (Tabelle 7-3), Flächen mit anderem Qualitätsanspruch (Tabelle 7-4).

Aufgrund der nicht durchgängigen Verwendung anderer Straßenklassen wurden lediglich die Straßenklassen Bundesautobahn, Bundesstraße, Landesstraße, Kreisstraße und Gemeindestraße implementiert.

3.1.1.3 Berechnung der äquivalenten Achsübergänge

Es wird ausschließlich die Gleichung 7-3 der RDO Beton implementiert, die größtenteils der Methode 1.1 der RStO entspricht. Die Berechnungsverfahren nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018) und RStO (2012) unterscheiden sich jedoch in zwei Punkten. Einerseits werden verschiedene Lastkol-

lektivquotienten verwendet: $q_{B,b}$ in den RDO Beton und q_{Bm} in den RStO. Andererseits unterscheiden sich auch die Wertebereiche des Achszahlfaktors f_A . Als zulässiger Wertebereich wurde abweichend von RDO Beton Entwurfsfassung (2018, S. 7.1) der Wertebereich der RStO verwendet. Dieser enthält denjenigen der RDO Beton als Teilmenge vollständig.

Die Unterscheidung erfolgt über den Achszahlfaktor.

- Wenn f_A entsprechend RStO gewählt wird, werden der Achszahlfaktor nach RStO (2012, Tabelle A 1.1) und der Lastkollektivquotient nach RStO (2012, Tabelle A 1.2) in Abhängigkeit von der Straßenklasse gewählt.
- Wenn für f_A eine Gleitkommazahl angegeben wird, wird der Lastkollektivquotient nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Tabelle 7-1) in Abhängigkeit von der Straßenklasse gewählt.

3.1.1.4 Sonderlasten

Laut Vorhabensbeschreibung war gefordert: Systembilder für Sonderlasten sind darzustellen und die Lastbilder (Footprints) in den Berechnungsalgorithmus einzubinden. Derartige Systembilder sind nicht Bestandteil der RDO Beton. In FE 08.160/2000/CRB (PFEIFER u. a. 2002, Tabelle 5-17) sind Darstellungen von Achskonfigurationen und daraus resultierende γ_{E3} -Faktoren genannt. Ein auf FE 08.160/2000/CRB basierendes Verfahren scheint in AWDStako implementiert zu sein. Was dort implementiert ist, ließ sich nicht nachvollziehen. AWDStako bemerkt bei den meisten Auswahlmöglichkeiten von Sonderlasten auch, dass die Methodik über die RDO hinausgehe.

Aus Sicht des AN ist das Verfahren der RDO Beton hier unklar. Zur Berechnung von M_{EV} ist nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Gleichung 6-2) die Berechnungsraddlast F_d notwendig. Es ist nicht ersichtlich, wie F_d im Falle von Sonderbelastung bestimmt werden soll. Tabelle 6-8 geht nur von der Normraddlast aus. Falls F_d durch Umrechnung aus der Normraddlast F_n berechnet werden soll, fehlt der Faktor für die maßgebende Raddlast im Sonderfall, γ_{E3} . Dieser Faktor könnte PFEIFER u. a. (2002, Tabelle 5-17) entnommen werden, allerdings ist unklar, wie die Werte in Klammern zu verstehen sind. Andererseits suggeriert die RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 6.2.11), dass die direkte Angabe einer Raddlast bei Sonderbeanspruchung, F_S und eines

Kontaktdrucks möglich sein kann. Eine Definition, wann $F_d = F_S$ gilt, ergeht aus den RDO Beton nicht.

Weiterhin erscheinen die übrigen Faktoren, die in die Berechnungsraddlast eingehen, problematisch.

γ_{E1} Zum Reifenfaktor halten die RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 6.2.3) fest:

Ohne Detailkenntnis der Verkehrszusammensetzung und der zugehörigen Radanordnung und Reifenausstattung ist der differenzierte Ansatz des Reifenfaktors γ_{E1} [...] zu verwenden.

Es verbleibt unklar, was im Falle einer vorliegenden Detailkenntnis, wie sie PFEIFER u. a. (2002, Tabelle 5-17) suggeriert, zu tun ist.

γ_{E2} Der AN versteht RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 6.2.6) so, dass bei Sonderbeanspruchung γ_{E3} anstatt von γ_{E2} verwendet werden soll. Inwiefern kommt dann die Spalte „Sonderbeanspruchung, zusätzlich“ der Tabelle 6-6 zum Einsatz und wie soll die Ermittlung konkreter Zahlenwerte erfolgen? Handelt es sich bei der Betondecke beispielsweise eines Containerterminals um eine nicht zuordnungsfähige Verkehrsfläche? Was ist F_{max} ? Wie sind die Fußnoten zu verstehen?

γ_{E4} Der AN nimmt an, dass es sich bspw. bei Containerverkehrsflächen um Langsamfahrbereiche handelt. Was sticht in Tabelle 6-7?

Absprache mit AG und Abweichung durch den AN

In Absprache mit dem AG wurde die Möglichkeit der wahlfreien Eingabe für $F_d = F_S$ und für p festgelegt.

Nach reiflicher Überlegung entschloss sich der AN jedoch, diesen Weg nicht zu verfolgen, da Probleme auf Seiten des aufnehmbaren Moments gesehen werden.

- Der Materialfaktor k_{bt} (RDO Beton Entwurfsfassung 2018, Tabelle 7-3) ist für Sonderbelastungen nicht definiert.
- Im Lastfall Ermüdung basiert die Berechnung von B_n auf Bezugsachslasten und Achszahlfaktoren, die vermutlich nicht für Sonderbelastungen aufgestellt wurden. Damit würde das aufnehmbare Moment falsch berechnet.

3.1.2 GUI-Funktionen

3.1.2.1 Querschnittsdarstellungen

Die alleinige Darstellung der Plattenbreite (und evtl. Länge) ist mit den bestehenden Parametern der RDO Beton Entwurfsfassung (2018) möglich. Aufgrund fehlender Bezugsgrößen und fehlender Umgebungsdarstellung erschien dies dem AN nicht sinnvoll und es wurde eine aufwändigere Lösung umgesetzt. Diese bildet teilweise die Umgebung der zu dimensionierenden Platte ab. Die Darstellung von Querschnitten beschränkt sich auf die Darstellung des Hauptfahrstreifens und im Falle von Autobahnen auf die angrenzenden Rand- und Seitenstreifen nach den Entwurfsklassen 1 – 3 nach RAA (2008, Kapitel 4.3).

Diskussionsbedarf ergab sich insbesondere aus der Formulierung:

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Längsfugen des maßgebenden Plattenstreifens außerhalb der Längsmarkierung angeordnet werden. (RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Abschnitt 4.6))

Der AN verstand dies zunächst so, dass die Fahrbahnbegrenzung nach links und die Leitlinie nach rechts von der jeweiligen Fuge des Hauptfahrstreifens abgerückt werden sollten. Die Abrückung wurde so interpretiert, dass der Abstand jeweils zwischen benachbarten Längskanten von Fuge und Markierungsstrich gilt. Dies hätte mit einer Forderung der RMS-A (2019) in Konflikt gestanden:

Leitlinien und Fahrstreifenbegrenzungen werden in der Regel mit ihrer Mitte auf die Grenze zwischen den Fahrstreifen markiert. Befinden sich dort Fugen in Betondecken [...], so sind die Leitlinien um eine halbe Strichbreite, möglichst in Fahrtrichtung links, von der Fuge abzurücken. (RMS-A (2019, Abschnitt A2.2(5)))

Nach Rücksprache mit dem AK 4.5.7 ergab sich die Klarstellung, dass „außerhalb“ lediglich „neben“ bedeutet. Um eine Präzisierung in den RDO Beton wurde gebeten.

Bezüglich der RMS-A (2019) verbleibt die Frage, wie mit der Abrückung von Fahrbahnbegrenzungen umzugehen ist. Hier wurde die Vereinbarung getroffen, dass die oben genannte Formulierung sinngemäß gilt, sodass Breitstriche um 15 cm von Längsfugen abzurücken sind.

Diese Funktionalität geht über die der RDO Beton Entwurfsfassung (2018) hinaus. Sie dient nur Visualisierungszwecken und ist nicht dimensionierungsrelevant.

3.1.2.2 Sonderlasten

Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 3.1.1.4 verfügt die GUI nicht über eine grafische Darstellung für Sonderlasten.

3.2 Produktdaten

Die für den Anwender der Software relevanten Daten sind die Eingabedaten und die Ausgabedaten. Weitere Grunddaten sind solche, für die nach den RDO Beton keine Wahlmöglichkeit besteht.

3.2.1 Eingabedaten

Für einige der im Pflichtenheft aufgeführten Parameter der RDO Beton konnten wider Erwarten keine Wertebereiche festgelegt werden. In erster Linie bedeutet dies, dass Definitionslücken in den RDO Beton existieren, die geschlossen werden sollten. Insbesondere führte eine Nachfrage beim FGSV Arbeitskreis 4.5.7 „Überarbeitung RDO Beton“ nicht zu einer vollständigen Spezifikation. Im Pflichtenheft und in der Hilfe sind undefinierte Wertebereiche mit einem „?“ gekennzeichnet.

3.2.2 Ausgabedaten

Es wird jeweils eine Ausgabedatei im JSON-Format pro Nachweis geschrieben bzw. zum Speichern angeboten. Dies erschien aus zwei Gründen sinnvoll. Erstens besteht die Möglichkeit einen einzelnen Nachweis zu rechnen. Zweitens unterscheiden sich interne Variablen, Zwischenergebnisse sowie Warn- und Fehlermeldungen der einzelnen Nachweise. Weiterhin sind etliche Parameter hartkodiert, daher sichert diese getrennte Ausgabe die Nachverfolgung.

Die Wertegruppe „Interne Variablen“ ist in die Gruppe „Ergebnis“ aufgenommen worden. Dort werden zahlreiche interne Variablen und Zwischenergebnisse ihren jeweiligen Momenten zugeordnet aufgeführt.

4 Implementierung

Die entwickelte Software gliedert sich in die drei Module Rechenkern, KommandozeilenInterface (CLI) und Grafische Oberfläche (GUI).

4.1 Modulübergreifende Aspekte der Implementierung

Zur Vereinfachung der Entwicklung und Wartung werden in den drei Modulen identische Techniken und Bibliotheken eingesetzt, z. B. für Tests. Auch das Datenformat, über das GUI oder CLI mit dem Rechenkern kommunizieren, entspricht zugleich dem Import-/Export-Format.

Datenaustauschformat JSON

JSON (Standard ECMA 404: The JSON Data Interchange Syntax. 2nd edition. 2017), kurz für JavaScript Object Notation, ist ein offenes Format, was Repräsentation von Daten in Textform erlaubt. So können die Programmparameter und -ergebnisse in für Menschen lesbaren Textdateien gespeichert und geladen werden. Dies erlaubt eine hohe Transparenz im Bezug auf die verwendeten Daten und Er-

gebnisse sowie einfache Einbindung der Software in zukünftige Entwicklungen und Projekte.

Beispiel für einen Parameter-Block aus den Eingangsdaten siehe ①.

Eine Beschreibung der Blockstruktur mit den jeweils definierten Schlüsseln, Wertetypen und -be- reichen ist innerhalb die GUI jederzeit einblendbar.

4.1.1 Dokumentation

Die Dokumentation des Quellcodes wird durch den Quellcode selber geleistet. Das heißt, alle wichtigen Klassen, Methoden und Funktionen sind mit einer allgemeinen Beschreibung und der Spezifikation der Übergabeparameter versehen. Da die Quellcode-Dokumentation von jedem Entwickler zusammen mit den Berechnungen aktualisiert werden kann ist diese Vorgehensweise die beste Lösung, um Quelltext und Dokumentation synchron und aktuell zu halten. Auf eine detaillierte Beschreibung des Quellcodes wird daher an dieser Stelle verzichtet, da diese Dokumentation besser und sinnvoller im Quelltext aufgehoben ist.

Beispiel für Quellcode-Header aus src/core/getCalculations.js siehe ②.

①

```

1      "Konstruktion": {
2          "Strassenklasse": "bundesautobahn",
3          "Strassenbetonklasse": "StC 30/37",
4          "Spaltzugfestigkeit": 3.7,
5          "VerformungsmodulUnterlage": 150,
6          "Plattenbreite": 4000,
7          "Plattenlaenge": 5000,
8          "Unterlage": "schotterTragSchicht",
9          "Querkraftuebertragung": {
10             "Querfuge": "mitDuebel",
11             "Laengsfuge": "mitAnker"
12         },
13         "AnteilGebrochenerGesteinskoernung": 0.3,
14         "Regelquerschnitt": "keiner",
15         "AbrueckungLeitlinieVonFuge": "rechts",
16         "AbrueckungFahrbahnbegrenzungVonFuge": "links"
17     }

```

②

```

1  // -----
2  //
3  // |-----| /-----| ^ /-----| /-----| | | | | |
4  // | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
5  // | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
6  // | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
7  // |-----| /-----| ^ /-----| /-----| | | | | |
8  //
9  // Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen Aachen mbH
10 // https://isac-gmbh.com/
11 //
12 // Purpose: Function, running the calculation of the RDO Beton in class RDOCalc.js
13 // Author(s): Jan Lehmkuhl, Johannes Neumann, Jan Mirco Pfeifer
14 //
15 // Description:
16 // This functions is the main interface to execute the calculation of the RDO Beton.
17 // It is called by startRDO.js within the CLI or by the Web-GUI.
18 // The main calculation routines are described in the method >calcThickness< of the
19 // class RDOCalc.js
20 // -----

```

```

③ 1  calcThickness(input) {
    2      // -----
    3      // This method calculates the needed thickness of a concrete slab using the
    4      // RDO Beton 2018 with an iterative scheme.
    5      // This calculates the load/torque induced by traffic and temperature and
    6      // the potential resistance.
    7      // The iterative comparision of loading and resistance torque leads to
    8      // the sufficient slab thickness (h_d)
    9      //
   10     // Args    1:  parsed input object literal
   11     // Effects 1:  changes the state of RDOCalc object properties
   12     // Return 1:  none
   13     // -----

```

Beispiel einer Methoden-Dokumentation aus `src/core/RDOCalc.js` siehe ③.

4.1.2 Nachvollziehbarkeit mit Git

Nachvollziehbarkeit von gespeicherten Ergebnisse im JSON-File war in den projektbegleitenden Gesprächen von hoher Wichtigkeit. Die implementierte Lösung protokolliert jetzt alle Änderungen am Quellcode, ohne dass das JSON-File um weitere Parameter anwächst. Im JSON-File gibt es einen Schlüssel „CodeStatus“, welcher den Commit-Hash enthält, der die aktuelle Version eindeutig spezifiziert. Eine Versionsnummer würde sich auch nur auf genau so einen Hash beziehen. Gibt es im Berechnungscode Änderungen, werden alle Änderungen im Sub-Key „diffSrcFolder“ aufgelistet. Hierfür wird die Standard-Ausgabe des Versionsverwaltungstools Git verwendet.

Da die GUI den Rechenkern fest integriert, wird dort der Quellcode-Status beim Kompilieren ermittelt und in der erzeugten ausführbaren JavaScript-Datei hinterlegt. Alle mit dieser GUI-Rechenkern-Kombination exportierten Berechnungsergebnisse werden anschließend diese Angaben enthalten. Der Git-Commit-Hash wird auch in der Fußzeile hinter der Versionsnummer eingeblendet.

Das interpretiert ausgeführte Kommandozeilen-Interface (CLI) hingegen ermittelt den Code-Status dynamisch bei jedem Aufruf und fügt diese Information beim Schreiben der JSON-Dateien hinzu.

4.1.3 Tests

Um zukünftige Arbeiten, Erweiterungen und Änderungen zu erleichtern, wurde ein ausführliches Testkonzept erarbeitet. Dabei stand neben der Wartbarkeit des Softwareproduktes auch vorallem die Belastbarkeit und die Korrektheit der Berechnungen im Vordergrund. Die Tests sollen bei der Implementierung von neuen oder geänderten

Code-Elementen helfen und vor fehlerhaften Implementierungen schützen. Hierfür wurden drei grundsätzliche Testarten implementiert und kombiniert.

Auf der konzeptuell unteren Ebene stehen die Syntax- und Lintertests. Diese Tests decken Prüfungen einzelner Programmstellen ab, und werden vor allem eingesetzt, um bei der fortschreitenden Entwicklung Fehler wie Flüchtigkeits- und Tippfehler, aber auch Sprachsyntaxfehler sowie Nutzung veralteter Sprachelemente zu vermeiden. Weiterhin werden hier kontinuierlich Regeln eingearbeitet, die sicherstellen, dass der Softwarecode den neusten technischen Erkenntnissen und Empfehlungen entspricht. Dieser Testbereich wird durch zwei Werkzeuge realisiert: JSHint (The JSHint Team 2021) deckt den Sprachbereich des reinen JavaScripts ab, während ESLint (OpenJS Foundation 2021) auch den Sprachbereich des GUI-spezifischen React-Codes testet. Zusammen kann so eine hohe Abdeckung erreicht werden.

Für die Testung im Mittel- und Oberbereich wurde für dieses Projekt das in der JavaScript-Entwicklung führende Werkzeug Jest (Facebook Inc. 2021a) eingesetzt, da durch die hohe Nutzung und Verbreitung sicher gestellt werden konnte, ein belastbares, zuverlässiges und zukunftsicheres Testsystem zu erstellen.

Im Mittelbereich stehen Unittests, deren Aufgabe es ist, Programmteile und -module in Isolation zu testen. Bei dieser Testart werden einzelne Programmsektionen unabhängig vom Hauptprogramm geladen und ausgeführt. Die Ergebnisse der Ausführung werden danach z. B. mit vorher erzeugten Snapshots verglichen, die den Soll-Zustand der Rückgabewerte festhalten. So können viele Aspekte der Programmierung, Entwicklung und Weiterentwicklung abgesichert werden, da durch die Vielzahl der Unittests sichergestellt wird, dass eine Änderung an einem Teil des Programm-

```

$ npm run eslint
> webrodeo@0.0.1 eslint /webrodeo
> eslint -f summary src tests ./*.js --ext .cjs --ext .js --ext .jsx --no-fix

✖ Summary of failing ESLint rules
errors 1 warnings 0 rule: eqeqeq
errors 0 warnings 1 rule: dot-location
errors 0 warnings 2 rule: indent
errors 1 warnings 0 rule: semi
🔥 5 problems in total (2 errors, 3 warnings)

/webrodeo/src/gui/components/Construction.jsx
220:32 error Expected '===' and instead saw '==' eqeqeq

/webrodeo/src/gui/container/OutputContainer.js
11:18 warning Expected dot to be on same line as property dot-location
12:1 warning Expected indentation of 6 spaces but found 4 indent
14:1 warning Expected indentation of 6 spaces but found 4 indent
18:4 error Missing semicolon semi

```

Bild 4.1: Beispielausgabe von ESLint

codes keine unbeabsichtigten, unbewussten oder ungewollten Verhaltensänderungen an anderen Programmteilen verursachen kann. Weiterhin werden bewusst syntaktisch oder semantisch ungültige Eingangsparameter gewählt, um anschließend die korrekte Fehlererkennung und -behandlung des Programms zu verifizieren.

An oberster Ebene stehen die Integrationstests, bei denen das Zusammenspiel mehrerer Module oder sogar der komplette Programmablauf simuliert wird. Auch hier werden wie bei den Unittests explizite Überprüfungen von Sollzuständen, Soll/Ist-Vergleiche der Rückgabewerte und Prüfungen der Fehlerbehandlung durchgeführt. Auf Ebene der GUI zählen zu den Integrationstests, auch Simulationen von Benutzerinteraktionen. Hierzu wird eine Ausgangssituation dargestellt, vordefinierte Auswahlen und Eingaben ausgeführt und die anschließende korrekte Aktualisierung sowohl der Datenhaltung als auch der dargestellten Oberfläche verifiziert.

Für verschiedene Sätze von Eingangsparametern wurden Ergebnisse für sogenannte Regressionstests angelegt. Die Korrektheit der Referenzwerte muss durch Dritte sichergestellt werden. Mit dem Befehl

```
1 npm run test
```

werden alle hinterlegten Tests durchgeführt und es wird in der Konsolenausgabe quittiert, ob und welche Werte sich im Vergleich zu den Referenzwerten geändert haben. Diese Systemtests decken auch die Unittests ab und testen die Änderungen von Revision zu Revision. Sollen durch Codeänderungen bewusste Änderungen der Ergebnisse in den Code integriert werden, müssen somit auch in einem bewussten Schritt die Referenzwerte angepasst werden.

4.1.3.1 Nutzung von Tests im Entwicklungsprozess

Wird die Software wie vorgesehen und empfohlen in einer GitLab-Umgebung gehostet und richtig integriert, werden diese Tests bei jeder Codeänderung in sogenannten Pipeline-Tests ausgeführt. Zur Absicherung des Codes können diese Änderungen auch nur in den Hauptzweig aufgenommen werden, wenn die Pipeline-Tests erfolgreich waren. Diese Vorgehensweise verhindert viele vermeidbare Fehler, bevor sie freigegeben werden.

4.1.4 Lizenzen

Die erstellte Software soll gemäß der Vorgaben unter der „GNU General Public License, Version 3“ veröffentlichbar sein. Hierzu muss sichergestellt sein, dass die verwendeten Bibliotheken dem nicht entgegenstehen. Dabei kann die Betrachtung auf jene Bibliotheken beschränkt werden, die mit dem Programm ausgeliefert und zur Laufzeit benötigt werden. Werkzeuge zum Erstellen und Testen der Applikation, die selbst nicht mit ausgeliefert werden, liegen außerhalb des Geltungsbereichs der GPLv3.

Der Rechenkern importiert keine externen Abhängigkeiten. Das Kommandozeilen-Interface (CLI) nutzt nur Funktionen der vorausgesetzten node-Laufzeitumgebung. Diese steht unter der MIT-Lizenz, welche zur Nutzung in GPLv3-Software kompatibel ist. Daher ist die folgende Betrachtung insbesondere für die GUI relevant.

Da Bibliotheken rekursive Abhängigkeiten zu anderen Bibliotheken haben können, die sich zudem mit jedem Update ändern könnten, ist eine manuelle Prüfung nicht zielführend. Daher wird hier auf die in jeder direkt oder indirekt importierten Bibliothek maschinenlesbar hinterlegten Lizenzinformationen zu-

rückgegriffen und diese mit dem Werkzeug license-checker aggregiert. Mit folgenden Befehlen werden (nur) die Produktions-Abhängigkeiten installiert und deren Lizenzen ermittelt:

```
1 npm ci --only=prod
2 npx license-checker --summary
```

Die resultierende Liste enthält keine Lizenzen, die einer Verteilung unter der GPLv3 entgegenstehen würden:

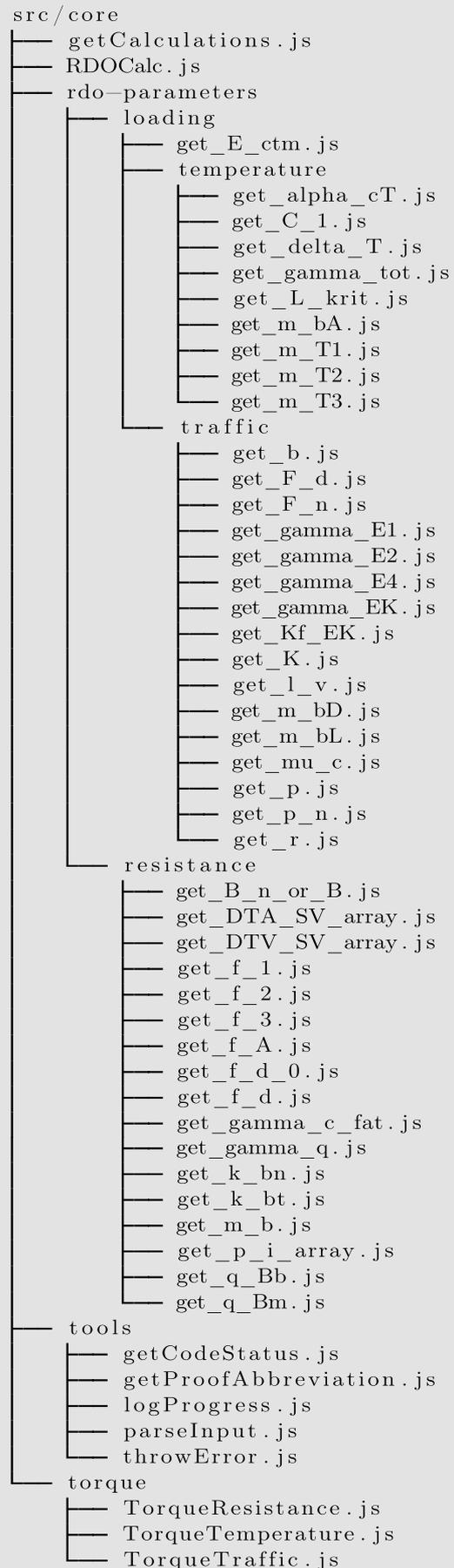
```
├─ MIT: 104
├─ BSD-2-Clause: 5
├─ BSD-3-Clause: 3
├─ ISC: 2
├─ BSD*: 1
├─ Apache-2.0: 1
└─ GPL-3.0-or-later: 1
```

4.2 Implementierung Rechenkern

Der Rechenkern beinhaltet alle Routinen, die nötig sind, um eine Berechnung gemäß den RDO Beton durchzuführen. Die vorliegende Implementierung des Rechenkerns in JavaScript ist auf Basis eines Prototypen in **Matlab** geschrieben worden, um auf einer bewährten Struktur neu aufzusetzen. Der Quellcode sollte auch für JavaScriptNeulinge mit rudimentären Programmierkenntnissen ausreichend verständlich dokumentiert sein. Bezüglich der Ergebnisse der Literaturrecherche und bei der Implementierung aufgefallener Unstimmigkeiten in den RDO Beton wurden Lösungen in Abstimmung mit dem AG in den Code eingearbeitet. Startpunkt ist die Datei `src/core/getCalculations.js` von der man sich über die Funktionsbeschreibungen weiter in die detaillierten Funktionen begibt.

4.2.1 Aufbau

`getCalculations` in `src/core` (siehe Kasten rechts) ist die Schnittstelle zur Außenwelt und wird von CLI-Funktionen (hier: `startRDO.js`) oder der Web-GUI aufgerufen. **`getCalculations`** übernimmt das Input-Parsing und den Aufruf der Hauptmethode zur Berechnung **`calcThickness`** in der Klasse **`RDOCalc`**. In **`calcThickness`** werden die Iterationsschleifen zur RDO Beton-spezifischen Berechnung durchgeführt, die in einem ersten Schritt die Momente berechnet. Für die Berechnung der einzelnen Momente sind die **`torque*`**-Klassen im Unterordner **`src/core/torque`** zuständig. Die zugehörigen einzelnen Parameter sind in **`get*`**-Funktionen in **`src/core/rdo-parameters`** und können dort eingesehen und verändert werden.



4.3 Implementierung Grafische Oberfläche (GUI)

4.3.1 Verlauf

Die Ausarbeitung des grafischen Benutzerinterfaces der WebRoDeO-Anwendung wurde bewusst dynamisch und in enger Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen koordiniert. Eine moderne Benutzerführung war ein explizites Ziel der Entwicklung und eine Entscheidung gegen eine Anlehnung an existierende Programme mit einem älteren Erscheinungsbild wurde bewusst getroffen. So

bestand bei der Ausarbeitung die Freiheit, Komponenten und Bedienelemente frei umzuordnen und zu ändern.

Bei den jeweiligen Zwischentreffen wurden die aktuellen Implementierungen vorgeführt und Rückmeldungen der Projektteilnehmer eingeholt, die daraufhin in die bei der nächsten Präsentation gezeigte Version eingearbeitet wurden. So konnte von Anfang an auf die Bedürfnisse der Nutzer eingegangen und der Arbeitsablauf berücksichtigt werden.

In der als erstes präsentierten Variante wurden die verschiedenen zur Berechnung notwendigen Para-

The screenshot shows a web application interface with a blue navigation bar at the top containing the following tabs: **Projekt**, **Basisdaten**, **A - DTV-SV Daten**, **Material / Konstruktion**, and **Ausgabe**. The main content area is titled "Auf welche Weise wird die Belastung berechnet?" and contains two radio button options: **A** (checked) "Auf Grundlage von DTV-SV Werten wahlweise auch mit Sonderlasten" and **B** "Auf Grundlage detaillierter Achslastdaten". On the left side, there are several dropdown menus for "Straßenart, Verkehrsflächen", "Verkehrsverteilung", "Geschwindigkeit", "Beanspruchungsfall", and "Temperaturgebiete".

Bild 4.2: Der erste WebRoDeO-Entwurf

The screenshot shows a more advanced web application interface. It features a blue sidebar on the left with a navigation menu including: **Start / Verwaltung**, **Projekt**, **Streckeninformation**, **Belastungsinformationen**, **DTV-SV Daten**, **Material**, **Konstruktion**, and **Ausgabe**. The main content area is titled "RDO-Beton" and contains several input fields and checkboxes. Key sections include:

- Summe der gewichteten äquivalenten 10-t-Achsübergänge [Mio.] (gemäß RStO)** with an input field containing "0".
- Lastkollektivquotient für Bezugsachse** with an input field containing "0".
- Berechnungslastwechselzahl** with an input field containing "0".
- Materialinformationen** section with sub-sections for **Oberbau** (F1 Boden) and **Unterbau** (Unmittelbare Unterlage der Betondecke). The Oberbau section has checkboxes for "anstehend", "aufgeschüttet", and "verfestigt", each with input fields for "Verformungswert [MPa]" and "Dicke [cm]". The Unterbau section has checkboxes for "ungebunden" and "Schottertragschicht unter Betondecke (STSuB)", along with a note "für Verkehrsbelastungen B < 0,8 Mio:" and checkboxes for "F1-Boden (Bodengruppen)", "weit- und intermittierend gestuftes Baustoffgemisch", and "enggestuftes Baustoffgemisch".

Bild 4.3: Der zweite WebRoDeO-Entwurf

meter durch sogenannte Reiter in aktivierbaren dezidierten Ansichtsseiten wie in Bild 4.2 gruppiert. Das generelle Konzept des Benutzerinterfaces wurde an das von Google entwickelte und veröffentlichte Designkonzept „Material Design“ angelehnt, so dass Nutzer eine vertraute Oberfläche mit bekannten Bedienelementen vorfinden.

Schon früh in der Abstimmung wurde erkannt, dass der Wechsel zwischen Ansichtsseiten im normalen Arbeitsablauf unintuitiv war. Deshalb wurde statt dessen ein SinglePage-Konzept erarbeitet, bei dem alle Parameterfelder in einer einzigen, scrollbaren Seite präsentiert werden. Eine Navigation durch ein auf der linken Seite andockendes Menü ist immer noch möglich (Bild 4.3); die einzelnen Abschnittspunkte erfüllen die Funktion von Lesezeichen, die bei Benutzung die Seite grafisch mitvollziehbar zum ausgewählten Abschnitt navigieren.

Ein strukturelles Durcharbeiten der Gesamtliste der Parameter ist so möglich und intuitiv und ein Nutzer, der eine Sektion überspringt, wird auf natürlichem Wege darauf aufmerksam, dass noch unbearbeitete Felder übersprungen wurden. Das lineare Eingeben der Parameter für eine komplett neue Berechnung wird so genauso effektiv unterstützt wie das selektive Springen zu und Ändern von einzelnen Parametern, um eine bereits konfigurierte Berechnung nachträglich zu ändern.

Schlussendlich wurde das Benutzerinterface nach guter Rezeption durch die Bundesanstalt für Straßenwesen auf die zwischenzeitlich erschienene Version 2 des ReactMD-Frameworks (Facebook Inc. 2021b) angehoben und in einer finalen Form (Bild 4.4) verfestigt.

Die Version 2.0 des React-MD-Frameworks beinhaltet im wesentlichen modernere Technik und Programmcodeorganisation sowie viele subtile Änderungen an Benutzerelementen wie Menüs, Knöpfe und Maussteuerungen, die dem endgültigen Produkt ein noch moderneres Bedingefühl verleihen.

4.3.2 Anleitung

4.3.2.1 Ausführung

Die grafische Oberfläche wurde unter dem Aspekt entwickelt, eine möglichst einfache Benutzung zu ermöglichen. Daher wurde darauf verzichtet, die Software mit einer Installationsroutine auszustatten. Stattdessen wird die Software als einfaches Archiv produziert, dass der Anwender sofort starten kann. Dazu muss nur nach dem Entpacken die Datei WebRoDeO.html im Browser der Wahl geöffnet werden, entweder durch einen Doppelklick auf die Datei oder ein Ziehen der Datei in einen schon offenen Webbrowser.



Bild 4.4: Der finale WebRoDeO-Entwurf

4.3.2.2 Kompilation

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Kompilation des Programmcodes, z. B. nach Änderungen am Quellcode durch den Bearbeiter. Dies ist für die normale Verwendung nicht notwendig, sondern ist für Weiterentwicklungen und Forschungsexperimente vorgesehen. Eine für Endnutzer relevante Anleitung zur reinen Ausführung findet sich unter 4.3.2.1.

Der Programmcode wurde unter Einbindung moderner Bibliotheken und Frameworks (Details unter 4.3.3) entwickelt. Diese werden kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert, auch Fehlerbehandlung und Sicherheitsaspekte werden fortlaufend verbessert. Daher ist ein statisches Einbinden der externen Codeteile nicht sinnvoll, sondern es wird die NPM-Paketverwaltung genutzt, um die jeweils aktuellsten Versionen zu beschaffen und einzubinden.

NodeJS sowie der Node-Paketmanager NPM müssen also zur Kompilation installiert sein. Weiterhin ist das Projekt auf die Versionen NodeJS v14 sowie NPM v6.14 angewiesen und ein ordnungsgemäßes Funktionieren der Anwendung kann nur mit diesen Versionen sichergestellt werden.

Die installierten Versionen von NodeJS und NPM können über die Softwareverwaltung des Betriebs-

systems ermittelt oder über die Kommandozeile abgefragt werden, hier dargestellt ist jeweils ein Paar aus Befehl und Ausgabe:

```
1 node --version
2 v14.15.4
3
4 npm --version
5 6.14.10
```

Die Installation von den entsprechenden NodeJS und NPM-Versionen ist abhängig vom verwendeten Betriebssystem, der Betriebssystemversion sowie von lokalen ITRichtlinien und ist daher nicht Teil dieser Beschreibung.

Die Programmabhängigkeiten können betriebssystemunabhängig mit dem Befehl **npm install** installiert werden (Bild 4.5).

Die hierbei angezeigten Warnungen beziehen sich auf für das aktuelle Betriebssystem nicht benötigte Abhängigkeiten und begründen daher keinen Handlungsbedarf. Bei jeder Installation werden nur die für das aktuelle Betriebssystem genutzten Bibliotheken installiert.

Der zweite Schritt der der Kompilation ist der Aufruf des Webpack-Werkzeugs. Dafür ist im Programm schon eine Konfiguration hinterlegt, die mit dem Befehl `npm run webpack-prod` ausgelöst werden kann.

```
benutzer@host $ npm install
npm WARN optional SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: fsevents@2.3.1 (node_modules/fsevents):
npm WARN notsup SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: Unsupported platform for fsevents@2.3.1: wanted {"os":"darwin","arch":"any"} (current: {"os":"linux","arch":"x64"})
npm WARN optional SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: fsevents@1.2.13 (node_modules/jest-haste-map/node_modules/fsevents):
npm WARN notsup SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: Unsupported platform for fsevents@1.2.13: wanted {"os":"darwin","arch":"any"} (current: {"os":"linux","arch":"x64"})
npm WARN optional SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: fsevents@1.2.13 (node_modules/watchpack-chokidar2/node_modules/fsevents):
npm WARN notsup SKIPPING OPTIONAL DEPENDENCY: Unsupported platform for fsevents@1.2.13: wanted {"os":"darwin","arch":"any"} (current: {"os":"linux","arch":"x64"})

audited 1501 packages in 11.044s

84 packages are looking for funding
  run `npm fund` for details

found 0 vulnerabilities
```

Bild 4.5: Installation der Abhängigkeiten mit „npm install“

```
Child mini-css-extract-plugin node_modules/css-loader/dist/cjs.js??ref--5-1!./src/css/react-md.css 1.92 KiB {0} [built]
  + 1 hidden module
Child mini-css-extract-plugin node_modules/css-loader/dist/cjs.js??ref--6-1!node_modules/sass-loader/dist/cjs.js??ref--6-2!src/scss/main.scss:
  Entrypoint mini-css-extract-plugin = *
  [0] ./node_modules/css-loader/dist/cjs.js??ref--6-1!./node_modules/sass-loader/dist/cjs.js??ref--6-2!./src/scss/main.scss 793 KiB {0} [built]
  [3] ./src/fonts/roboto/Roboto-Light.ttf 62 bytes {0} [built]
  [4] ./src/fonts/roboto/Roboto-Regular.ttf 64 bytes {0} [built]
  [5] ./src/fonts/roboto/Roboto-Medium.ttf 63 bytes {0} [built]
  [6] ./src/fonts/roboto/Roboto-Bold.ttf 61 bytes {0} [built]
  [11] ./src/fonts/material-icons/MaterialIcons-Regular.woff2 57.7 KiB {0} [built]
  [12] ./src/fonts/material-icons/MaterialIcons-Regular.woff 75.1 KiB {0} [built]
  [13] ./src/fonts/material-icons/MaterialIcons-Regular.ttf 71 bytes {0} [built]
  + 6 hidden modules
Child mini-css-extract-plugin node_modules/css-loader/dist/cjs.js??ref--6-1!node_modules/sass-loader/dist/cjs.js??ref--6-2!src/scss/styles.scss:
  Entrypoint mini-css-extract-plugin = *
  [0] ./node_modules/css-loader/dist/cjs.js??ref--6-1!./node_modules/sass-loader/dist/cjs.js??ref--6-2!./src/scss/styles.scss 4.63 KiB {0} [built]
  + 1 hidden module
```

Bild 4.6: Kompilation des Programms mit „npm run webpack-prod“

Von der sehr umfangreichen Ausgabe des Webpack-Programms werden hier nur die letzten Zeilen eines erfolgreichen Programmlaufs dargestellt (Bild 4.6).

4.3.3 Bibliotheken

4.3.3.1 React

React (Facebook Inc. 2021b) ist das zur Zeit am meisten genutzte JavaScript-Framework. Durch die hohe Nutzung und Verbreitung kann von einer langen Unterstützung ausgegangen werden. Grundprinzipien des React-Frameworks sind strenge und modulare Trennungen von einzelnen Komponenten, was dem Entwicklungskonzept des vorliegenden Projekts entgegenkommt.

4.3.3.2 Webpack

Die Aufgabe von Webpack (webpack team 2021) ist das Zusammenführen und Packen der einzelnen Elemente und Module von Softwareprojekten. In diesem Projekt übernimmt Webpack die Erzeugung des endgültigen Dateiarchivs, mit allen von der Software genutzten Bibliotheken und Abhängigkeiten, sodass der Endnutzer nur das Archiv selber braucht und keine weiteren Abhängigkeiten oder Programme installieren muss.

4.3.4 Erkenntnisse aus der Implementierung der grafischen Oberfläche

Aufgrund der ausführlichen und gründlichen Vorarbeit in Lastenheft und Pflichtenheft zeigte sich die Entwicklung generell wie erwartet. Bei einigen Aspekten ergaben sich jedoch im Entwicklungsprozess Erkenntnisse, die zu Änderungen führten, die entsprechend im Lasten- und Pflichtenheft angepasst wurden.

4.3.4.1 Parameterprüfung

Bei der Projektplanung wurde konzipiert, Parameter auf zulässige Werte, Bereiche und Kombinationen sowohl in der grafischen Oberfläche als auch im Rechenkern zu prüfen. Dies erwies sich während der Implementierung als nicht sinnvoll. Bei der sukzessiven Eingabe von Parametern in der grafischen Oberfläche kann bei Parametern oft noch nicht über die Korrektheit entschieden werden, da in vielen Fällen die Prüfungen von den Kombinationen aus anderen, oft noch nicht eingegebenen Parametern

abhängig ist. Aus diesem Grund werden Parameter von der Software nicht während der Eingabe geprüft, sondern erst bei Betätigung der „Berechne-Schaltfläche“. Die Überprüfungen des Rechenkerns werden daraufhin in der GUI angezeigt.

4.3.4.2 Undo-Funktion in der grafischen Oberfläche

Da alle Webbrowser bereits einen Undo-Schritt für Eingaben als Standardfunktion (Steuerung + Z) bereitstellen, zeigte sich weitergehende Undo-Funktionalität als unintuitiv und bei typischer Nutzung als nicht hilfreich. Die endgültige Weboberfläche enthält daher keine über die Browserfunktion hinausgehende Undo-Mechanik.

4.3.4.3 Navigation über Reiter/Parameterseiten

Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, erwies sich die Navigation über traditionelle Reiter-Dynamik als ineffizient und fehleranfällig im Vergleich zu der Single-Page-Dynamik der im zweiten Meeting mit der Bundesanstalt für Straßenwesen vorgestellten Variante. Daher wurde die neue Benutzerführung in die grafische Oberfläche übernommen.

4.3.4.4 Funktionalität in Microsoft Internet Explorer 11

Der von Microsoft früher entwickelte Internet Explorer 11, kurz IE11, wird seit geraumer Zeit nur noch im Wartungsmodus betrieben. Microsoft selbst hat begonnen, bei eigener Websoftware keine Kompatibilität mit IE11 mehr zu halten (MS Teams ab November 2020, MS Office 365 ab August 2021). Daher haben sich während der Projektlaufzeit viele Software- und Bibliotheksanbieter davon gelöst, ihre Produkte abwärtskompatibel zu gestalten. Auch die von diesem Projekt genutzten Bibliotheken funktionieren in aktueller Version nicht mehr fehlerfrei bei Nutzung in IE11. Aufgrund dieser Entwicklungen wird eine Unterstützung für Internet Explorer 11 nicht umgesetzt.

4.4 Implementierung Bereitstellung

4.4.1 Bereitstellung via GitLab

Für die Bereitstellung sowohl für Endnutzer als auch zukünftige Entwickler hat der Auftragnehmer verschiedene Optionen evaluiert. Das Ergebnis der Auswertungen der existierenden Möglichkeiten führt zu der Empfehlung, die Bereitstellung durch

die Software Git, GitLab und optional den Anbieter GitLab Inc. zu realisieren.

GitLab ist eine Softwarelösung, die gleichzeitig Entwicklungshistorie, Bereitstellung von Quellcode und Kompilat sowie Verwaltungsaufgaben wie Zugriffsberechtigung anbietet. Dabei sind alle Leistungen optional und können nach Wunsch zu- bzw. abgeschaltet werden.

GitLab Inc. bietet kostenloses Hosting unter der Domain <https://www.gitlab.com>, bei dem Wartung, Aktualisierung und Bereitstellung der Software GitLab kostenlos übernommen werden.

Der Auftragnehmer empfiehlt vorbehaltlos die Nutzung der Software GitLab sowie der Nutzung des Hostings auf <https://www.gitlab.com> zur Umsetzung der Bereitstellung.

In diesem Sinne sind im Rahmen der Entwicklung entsprechende Vorbereitungen getroffen worden. Konfigurationsdateien sind so angelegt, dass ein Upload entweder auf eine interne GitLab-Instanz oder die durch GitLab Inc. angebotene öffentliche Instanz sofort möglich ist. Automatisierte Testung und automatisierte Erstellung der kompilierten Software sind Teil der fertigen und vom Auftragnehmer vorbereiteten Konfiguration.

In den folgenden Dateien befinden sich für die Nutzung von Git und GitLab vorgesehene Konfigurationsdaten:

```
1 .gitlab-ci.yml
2 .gitignore
3 .gitattributes
4 cli-output/.gitignore
```

5 Dokumentation & Schulung

5.1 Dokumentation

Die Dokumentation des entwickelten Programms zielt auf verschiedene Zielgruppen ab und umfasst daher verschiedene inhaltliche Ebenen an unterschiedlichen Stellen in jeweils passenden Darbietungsformen.

5.1.1 Benutzerhandbuch

Für Anwender, denen das Programm bereitgestellt wird, stehen Informationen zur Bedienung und fachliche Fragen im Vordergrund. Die Bedienung ist durch die Einhaltung etablierter Standards der

Oberflächengestaltung und eine verhältnismäßig simple, sequentielle Struktur sehr intuitiv. Da durch Fehleingaben auch kein Schaden angerichtet werden kann, sondern schlimmstenfalls Fehlermeldungen direkt nach der Eingabe oder bei der Berechnung erscheinen, wird eine experimentelle Herangehensweise ohne vorheriges Handbuchstudium ausdrücklich unterstützt. Inhaltliche Fragen zu Datentypen und ggf. Wertebereichen der einzelnen Felder werden durch die integrierte Daten-Referenz beantwortet, die sich über das Fragezeichen-Symbol neben jedem Eingabefeld aufrufen lässt. Darin sind auch Verweise in die entsprechenden Regelwerke (RDO Beton 2009; RDO Beton Entwurfsfassung 2018; RStO 2012) enthalten, die entsprechenden Schlüssel im JSON-Import/Export-Format werden benannt und einige Felder näher erläutert. Aus Sicht des AN stellt sich daher die Frage, inwiefern ein zusätzliches klassisches Benutzerhandbuch noch sinnvoll ist. Diese Frage lässt sich vermutlich erst nach Evaluation des nun fertiggestellten Programms durch die Bundesanstalt für Straßenwesen abschließend beantworten.

Ein weiteres, ursprünglich für das Benutzerhandbuch vorgesehenes Kapitel war die Installationsanleitung. Die gewählte webbasierte Lösung ermöglicht verschiedene Formen der Bereitstellung, inklusive eines Hostings auf den Webseiten des AG, wodurch eine Installation beim Anwendenden hinfällig wäre. Die Frage der Bereitstellung wurde seitens des Bundesanstalt für Straßenwesen noch nicht entschieden.

5.1.2 Dokumentation für fortgeschrittene Anwender und Entwickler

Die Nutzung des CLI ist aufgrund der interpretierten Natur von JavaScript mit Zugriff auf den Quellcode verbunden. Hierin finden sich neben der schon im GUI verlinkten Daten-Referenz weitere README-Dateien im Markdown-Format, das sowohl direkt menschenlesbar ist, aber zugleich von geeigneten Werkzeugen wie GitLab grafisch formatiert dargestellt werden kann. Diese Dateien beschreiben z. B. im Hauptverzeichnis die Installation der benötigten Werkzeuge und die Ausführung der vorbereiteten Skripte. Im Testverzeichnis wird Aufbau und Ausführung der Tests erläutert, sodass je nach Interessenlage die jeweils relevanten Informationen naheliegender auffindbar sind, ohne ein Gesamtdokument zu überfrachten.

Aufgrund der einfachen Modifizierbarkeit insbesondere des Rechenkerns wird die Grenze zwischen Anwender und Entwickler vermutlich fließend verlaufen. Die nächsten Dokumentationsebenen findet sich somit im Quellcode selbst: Auf Dateiebene werden die jeweils realisierten Funktionalitäten kurz zusammengefasst, innerhalb des Programmcodes wird auf einzelne Funktionen und bei Bedarf auf spezielle Aspekte der Realisierung näher eingegangen.

5.2 Schulung

Aufgrund der andauernden COVID-19 Pandemie sind Schulungsform und -zeitpunkt noch offen. Während der Projektbearbeitung wurde eine Videokonferenzlösung bereits zur Vorführung und Abstimmung der Oberfläche genutzt. Auf Basis dieser Erfahrungen scheint auch eine Schulung in dieser Form realisierbar.

Die sinnvollerweise mit einer Schulung kombinierte Installation auf den Rechnern der Anwender sofern erforderlich hängt weiterhin von der Entscheidung des AG bezüglich der Bereitstellungsform der Software ab. Auch hierbei könnte angesichts des kleinen vorgesehenen Teilnehmerkreises eine technische Fernunterstützung im Rahmen einer Online-Schulung erfolgen.

6 Fazit

6.1 Lasten- und Pflichtenheft

Die Projektausrichtung in mehrere Teile hat als ursprüngliche Zielsetzung unter anderem auch die Erstellung von Vorlagen in Form eines modularen Lastenheftes (Kapitel 2) sowie eines Pflichtenheftes (Kapitel 3), die für zukünftige Ausschreibungen für vergleichbare Projekte gedacht sind.

Aufgrund dieser Zielsetzung wurden die Dokumente im Verlauf des Projekts rückschauend betrachtet und entsprechend verfeinert. In dieser Hinsicht hat sich das Konzept sehr gut bewährt. Besonders am allgemeinen Teil waren nur wenige nachträgliche Änderungen erforderlich, sodass der Plan, das erarbeitete Lastenheft als Grundstein für weitere Softwareprojekte zu nutzen, in Zukunft ohne weiteres umgesetzt werden kann.

6.2 Open-Source-Ressourcen

Um die Veröffentlichung der produzierten Software zu erlauben, war eine der Zielsetzungen des Projektes, Open-Source-Bibliotheken und -Werkzeuge einzusetzen. Ein weiterer Vorteil ist die kontinuierliche Wartung und Weiterentwicklung von Open-Source-Werkzeugen durch die Gemeinschaft, was einen hohen Sicherheitsstand bei minimalem Wartungsaufwand bietet.

Dieses Ziel konnte voll erreicht werden, da das Angebot von offener Software sich sowohl in Qualität als auch Flexibilität als mehr als zufriedenstellend heraus gestellt hat.

Informationen zu den konkret verwendeten Softwarelösungen findet sich in Kapitel 4.3.3.

Instruktionen, um detaillierte Informationen über die Softwarelizenzen der eingesetzten Software zu erhalten, finden sich in Kapitel 4.1.4.

6.3 Open-Source-Implementierung

Die Zielsetzung, eine quelloffene Software zu erstellen, konnte vollumfänglich erfüllt werden. Es wurde keine Nutzung proprietärer Softwareteile benötigt, sodass die erstellte Software ausnahmslos für eine Veröffentlichung durch die Bundesanstalt für Straßenwesen geeignet ist.

Die angestrebten Eigenschaften hinsichtlich einfach und komfortabel nutzbarer Software kann abschließend nur durch die Bundesanstalt für Straßenwesen nach Evaluierung beantwortet werden, sodass dieser Abschnitt erst nach Rückmeldung ergänzt werden kann. Die im Projektverlauf an unterschiedlichen Stellen eingeholten Rückmeldungen der verschiedenen Projektteilnehmer waren positiv und konstruktiv.

Literatur

- ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; NAUMENKO, K. (4. Nov. 2016). Ebene Flächentragwerke. Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten. 2. Aufl. Springer-Verlag GmbH. ISBN: 978-3-662-47229-3. doi: 10.1007/978-3-662-472309.

- AUGTER, G.; KAYSER, S. (13. Sep. 2016). FE 89.0305/2015: „Erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO“. Forschungsber. 92 S.
- BARTH, C.; RUSTLER, W. (1. Jan. 2013). *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis*. Beuth Verlag. 388 S. ISBN: 978-3410234517.
- BECKER, W.; GROSS, D. (2002). *Mechanik elastischer Körper und Strukturen*. Springer, S. 200. (2013). *Mechanik elastischer Körper und Strukturen*. Springer-Verlag.
- BIRMANN, D. (1981). „Einfluss hydraulisch gebundener Tragschichten auf die Beanspruchung von Betondecken. Experimentelle und theoretische Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Randbelastung.“ Diss. TU München.
- BRADBURY, R. D. (1938). *Reinforced Concrete Pavements*. The Wire Reinforcement Institute.
- CROW (1. Dez. 2004). Vencon 2.0. url: https://www.crow.nl/onlinekennis_tools/vencon-2-0-dimensioneringsprogramma-voor-betonw.
- DAVIDS, W. (2019). EverFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements. Version 2.26. url: <https://civil.umaine.edu/everfe-2/> (besucht am 18. 02. 2020).
- DAVIDS, W. u. a. (2003). „Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2“. In: *Transportation Research Record* 1853, S. 92–99. doi: 10.3141/1853-11.
- DIN 69901-5 (2009). *Projektmanagement Projektmanagementsysteme Teil 5: Begriffe*. Techn. Ber. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung (2010). Deutsches Institut für Normung. url: <https://www.beuth.de/de/norm/din.en.1990/134861786>.
- Direction générale des autoroutes et routes, Service public de Wallonie (27. März 2013). *QualiDim 2.4.0*. url: <http://qc.spw.wallonie.be/fr/quali-routes/qualidim.html> (besucht am 19. 11. 2019).
- EISENMANN, J.; LEYKAUF, G. (1975). „Bemessung von Betondecken — Theorie und Praxis“. In: *Straßenbau-Technik* 28 (23), S. 17–23. ISSN: 0039-2200.
- EISENMANN, J.; LEYKAUF, G. (1981). „Design of Concrete Pavements Considering Pavement Deflection“. In: *tbc*, S. 21–43.
- EISENMANN, J. (1970). „Bemessung von Zementbetondecken“. In: *Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen* 82. Hrsg. von Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.
- EISENMANN, J. (1979). *Betonfahrbahnen*. Ernst, Wilhelm & Sohn. 305 S. ISBN: 978-3433008478.
- Facebook Inc. (2021a). Jest. url: <https://jestjs.io> (besucht am 09. 02. 2021).
- Facebook Inc. (2021b). React. A JavaScript library for building user interfaces. url: <https://reactjs.org/> (besucht am 09. 02. 2021).
- FGSV (2011). *Arbeitspapiere zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen, Reihe B: Berechnungsmodelle, Teil B 2: Methode der Plattentheorie bei der Dimensionierung*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. ISBN: 978-3-941790-89-6.
- FOOS, S. (2006). „Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen“. Diss. TH Karlsruhe. 207 S.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009). *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO Asphalt)*.
- GOLDSCHMIDT, J. (1990). „Westergaards Gleichungen nochmals analysiert“. In: *Die Strasse* 30.11, S. 341–343.
- HAMANO, J. C. u. a. (2021). git. url: <https://git-scm.com/> (besucht am 11. 02. 2021).
- HERTZ, H. (1884). „Ueber das Gleichgewicht schwimmender elastischer Platten“. In: *Annalen der Physik* 258 (7), S. 449–455. doi: 10.1002/andp.18842580711.
- HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. (1971). „Factors Influencing the Resilient Response of Granular

- Materials“. In: Highway Research Record (345), S. 15–31.
- IOANNIDES, A. M. u. a. (1984). Analysis of Slabs-On-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions. Report. url: <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA150965>.
- IOANNIDES, A. M. (2006). „Concrete pavement analysis: the first eighty years“. In: International Journal of Pavement Engineering 7 (4), S. 233–249. doi: 10.1080/10298430600798481.
- IOANNIDES, A. M.; THOMPSON, M. R.; BARENBERG, E. J. (1985). „Westergaard Solutions Reconsidered“. In: Transportation Research Record (1043), S. 13–23.
- KOROVESIS, G. T. (1990). „Analysis of slab-on-grade pavement systems subjected to wheel and temperature loadings“. Diss. University of Illinois at Urbana-Champaign. url: <http://hdl.handle.net/2142/20751>.
- LADE, P. V.; NELSON, R. B. (1987). „Modelling the elastic behaviour of granular materials“. In: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 11, S. 521–542. doi: 10.1002/nag.1610110507.
- LECHNER, B. (1996). „Der Temperaturgradient als Bemessungsgröße bei der Dimensionierung von dicken Betondecken“. Diss. TU München.
- LOSBERG, A. (1960). „Structurally reinforced concrete pavements“. Diss. Chalmers Tekniska Högskola. ISBN: 99-0510713-4. url: <https://research.chalmers.se/en/publication/177735>.
- MASAD, E.; TAHA R.; MUHUNTHAN, B. (1996). „Finite-Element Analysis of Temperature Effects on Plain-Jointed Concrete Pavements“. In: Journal of Transportation Engineering 122 (5), S. 388–398. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:5(388).
- NADAI, A. (1925). Die elastischen Platten. Die Grundlagen und Verfahren zur Berechnung ihrer Formänderungen und Spannungen sowie die Anwendungen der Theorie der ebenen zweidimensionalen Theorie auf praktische Aufgaben. Springer. ISBN: 9783540042884.
- OpenJS Foundation (2021). ESLint. Find and fix problems in your JavaScript code. url: <https://eslint.org> (besucht am 09. 02. 2021).
- OZBEKI, M. A.; KILARESKI W. P.; ANDERSON, D. A. (1985). „Evaluation Methodology for Jointed Concrete Pavements“. In: Transportation Research Record (1043), S. 1–8.
- PFEIFER, L. (1986a). „Überarbeitung der Vorschriften für den Betonstraßenbau; Teil 2: Lastannahmen im Standard TGL 33468/01 „Betonbau; Lastannahmen, Berechnung, Nachweisführung“. In: Die Straße 26 (6), S. 181–185.
- PFEIFER, L. (1986b). „Überarbeitung der Vorschriften für den Betonstraßenbau; Teil 3: Die Biegemomente infolge Verkehr und auf sie einwirkende Einflüsse aus Konstruktion und Unterlage“. In: Die Straße 26 (8), S. 240–244.
- PFEIFER, L.; KIEHNE, A.; VILLARET, S. (2002). „Bemessungsverfahren für Betonoberbau (FE 08.160/2000/CRB)“. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 856. ISSN: 0344-0788.
- PFEIFER, L. u. a. (2005). „Baustoffrelevante Eingangsgößen für die Bemessung von Betonfahrbahnen“ Teilthema: Bemessungsverfahren AWDSTAKO für kontinuierlich bewehrte Betondecken. Forschungsber. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- QUECK, U. (1992). „Grundlagen zur Berechnung der Spannungs-Verformungszustände ungebundener Konstruktionsschichten als Teil flexibler Befestigungen im Straßenbau“. Diss. TU Dresden.
- RAA (2008). Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf.
- RDO Beton (2009). Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO Beton). Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- RDO Beton Entwurfsfassung (7. Mai 2018). Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Betondecken (RDO Beton) Entwurfsfassung. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. url: https://portal.fgsv.de/Gremien/4_5_7/Arbeitsdokumente/RDO%20Beton%202018%20-%20redaktionelle%20

- %C3%9Cberarbeitung/RDO%20BetonEntwurf2018-05-07.pdf.
- RMS-A (9. Dez. 2019). Richtlinien für die Markierung von Straßen, Teil A: Autobahnen. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement.
- RStO (2012). Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement“.
- SCHNELL, W.; GROSS, D.; HAUGER, W. (1995). Technische Mechanik 2: Elastostatik. 5. Aufl. Springer Verlag. ISBN: 3-540-58696-2.
- SELVADURAI, A. P. S. (1979). Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction. Elsevier Science. ISBN: 978-0444564078.
- Standard ECMA 404: The JSON Data Interchange Syntax. 2nd edition. (Dez. 2017). ECMA International. url: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>.
- STET, M. J. A. (Juli 2004). Vencon 2.0 Software voor de dimensionering van elastisch ondersteunde verhardingen van ongewapend en doorgaand-gewapend beton. Techn. Ber. Crow.
- STET, M. J. A. u. a. (2006). „Dutch Design Tool for Jointed and Continuously Reinforced Concrete Road Pavements“. In: 10th International Symposium on Concrete Roads, Brussels, Belgium.
- TACIROGLU, E.; HJELMSTAD, K. D. (2002). „Simple Nonlinear Model for Elastic Response of Cohesionless Granular Materials“. In: Journal of Engineering Mechanics 128 (9), S. 969–978. doi: 10.1061/(asce)0733-9399(2002)128:9(969).
- TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- TELLER, L. W.; SUTHERLAND, E. C. (1935). „The Structural Design of Concrete Pavements“. In: Public Roads 16.8.
- TGL 33468/01 (1986). Betonbau; Deckschichten für Straßenverkehrsflächen: Lastannahmen, Berechnung, Nachweisführung. Techn. Ber.
- The JSHint Team (2021). JSHint. url: <https://jshint.com/about/> (besucht am 09. 02. 2021).
- TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1987). Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill College. ISBN: 9780070647794.
- UZAN, J. (1985). „Characterization of Granular Material“. In: Transportation Research Record (1022), S. 52–59. url: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1985/1022/1022-007.pdf>.
- UZAN, J. (1992). „Resilient characterization of pavement materials“. In: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 16 (6), S. 453–459. doi: 10.1002/nag.1610160605.
- UZAN, J.; SIDES, A.; PERL, M. (1985). „Viscoelastoplastic Model for Predicting Performance of Asphaltic Mixtures“. In: Transportation Research Record (1043), S. 78– 89.
- VAN LEEST, A. J.; STET, M. J. A.; FRÉNAV, J. W. (2005). „VENCON 2.0: A Fast and Reliable Design Tool for Concrete Road Pavements (Jointed and Continuously Reinforced Applications)“. In: Eighth International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs CO, United States.
- VERCH, W. (1982). Erläuterungen, Begründungen und Ergänzungen zum Standard TGL 20003. url: https://katalog.ub.uni-weimar.de/tgl/TGL_20003+Erg%C3%A4nzungen_11-1982.pdf (besucht am 31. 01. 2020).
- VILLARET, S. u. a. (2019). Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton. Bd. S 127. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Carl Ed. Schünemann, S. 76. ISBN: 978-3-95606-425-8.
- Villaret Ingenieurgesellschaft mbH (2018). AWDS-TAKO. url: http://www.villaret.de/de/32_inhalt.php.
- VOB/A (31. Jan. 2019). Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) Teil A. Hrsg. von Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen. url: <https://dejure.org/gesetze/VOB-A>.
- webpack team (2021). webpack. url: <https://webpack.js.org/> (besucht am 09. 02. 2021).

- WEITLANDT, G. (1984). „Bemessung von Befestigungen für Flugbetriebsflächen“. In: Die Straße 24 (11), S. 330–331.
- WELLMITZ, H.; WEITLANDT, G. (1984). „Herstellung von Flugbetriebsflächen in Zementbauweise — Grundinstandsetzung der Start- und Landbahn des Flughafen Leipzig-Schkeuditz“. In: Die Straße 24 (11), S. 331–336.
- WELLNER, F. (1993). „Grundlagen zur Bemessung flexibler Straßenkonstruktionen mit Tragschichten ohne Bindemittel“. Habilitation. TU Dresden.
- WESTERGAARD, H. M. (1943). „Stress Concentrations in Plates Loaded Over Small Areas“. In: Transactions of the American Society of Civil Engineers.
- WESTERGAARD, H. M. (1926). „Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis“. In: Public Roads 7.2, S. 25–35. ISSN: 0033-3735. url: <https://trid.trb.org/view/97833>
- WESTERGAARD, H. M. (1927): „Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature“. In: Highway Research Board Proceedings 6, S. 201–215
- WESTERGAARD, H. M. (1933): „Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements“. In: Public Roads 14 (10), S. 185–188
- WESTERGAARD, H. M. (1948): „New Formulas for Stress in Concrete Pavements of Airfields“. In: American Society of Civil Engineers Transactions 113, S. 425–444
- WINKLER, E. (1867). Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit. mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik. H. Dominicus.
- ZTV RDO Beton-Stb (26. Okt. 2020). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen bei Anwendung der RDO-Beton. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).

Bilder

- Bild 1.1 Modell der schwimmend gelagerten Platte (Winkler-Bettung) und des Lastfalls Kante nach WESTERGAARD (1948, Case 3) mit Spezialfall der kreisförmigen Lastfläche.
- Bild 1.2 Die drei ursprünglichen Lastfälle nach WESTERGAARD (1926, Bild 1).
- Bild 1.3 Spannungsumlagerung innerhalb der Betondecke.
- Bild 1.4 Der fiktive Radius der Ersatzauflastfläche.
- Bild 4.1 Beispielausgabe von ESLint
- Bild 4.2 Der erste WebRoDeO-Entwurf
- Bild 4.3 Der zweite WebRoDeO-Entwurf
- Bild 4.4 Der finale WebRoDeO-Entwurf
- Bild 4.5 Installation der Abhängigkeiten mit „npm install“
- Bild 4.6 Kompilation des Programms mit „npm run webpack-prod“

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**
Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**
Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**
Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**
Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**
Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: **Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**
Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: **Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**
Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**
Koukoulidou, Birle, Cudmani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: **Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums**
Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: **Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze**
Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: **Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken**
Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: **Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ**
Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

S 154: **Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)**

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

S 155: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte**
Villaret, Augter, Kayser, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: **Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**
Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: **Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW**
Schipek, Steffen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: **Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette**
Cudmani, Henzinger, Birle, Barka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: **Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**
Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: **Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton**
Rigo, Unterderweide
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: **Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz**
Kathmann, Schroeder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: **Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013**
Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: **NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie**
Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: **Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff**
Cudmani, Heyer, Birle, Möller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: **Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen**
Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: **Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel**
Demond, Reiche, Haas, Schmidt

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

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe

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

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauasphalt

Gehrke, Stephan, Weigel

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

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

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

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

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

2022

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

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, 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 Tragsschichten 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 Asphaltsschichten

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, Birle, 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 Fugenvergussmassen

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

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.