

# **Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 173**

**bast**

# **Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise**

von

Stephan Villaret  
Thomas Beckenbauer  
Axel Riwe  
Tanja Tschernack

Villaret Ingenieurgesellschaft mbH  
Hoppegarten

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 173**

**bast**



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

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

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

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

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

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

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 08.0223**  
Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

**Fachbetreuung**  
Alexandra Spilker

**Referat**  
Betonbauweisen

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-668-9

Bergisch Gladbach, Februar 2022

---

## **Kurzfassung – Abstract**

### **Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise**

Aufgrund des Klimawandels muss auch in Deutschland zukünftig damit gerechnet werden, dass Witterungsextreme häufiger und stärker ausfallen. Schon allein durch die prognostizierte Klimaveränderung sind Auswirkungen auf die Nutzungseigenschaften der Betonfahrbahnen zu erwarten. Im Kontext mit einer signifikanten Erhöhung der Belastung durch Schwerverkehr sowie mit erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit ergibt sich die Notwendigkeit, die Regelbauweise zu überprüfen und ggf. zu modifizieren.

Es hat sich herausgestellt, dass bei der Dimensionierung die Witterungsbelastung von Betondecken mit einer Erhöhung der mittleren Plattentemperatur von 2 K und durch ungünstigere positive Temperaturverläufe bzw. Temperaturgradienten berücksichtigt werden berücksichtigt werden sollte. Zudem muss die Lage der Längsfugen nicht nur in den Kontext zur Markierung gebracht werden sondern auch gewährleisten, dass mit Berücksichtigung neuer Anforderungen eine Aufrechterhaltung des Verkehrs mindestens eines Fahrstreifens im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen möglich bleibt. Aus diesem Grund und mit Blick auf die Dauerhaftigkeit ist es sinnvoll, die Plattengeometrien signifikant zu verkleinern, wodurch Plattenverformungen und Spannungen reduziert werden können. Resultat kleinerer Plattengeometrien sind zudem kleinere Fugenöffnungsweiten, was sich einerseits positiv auf die Langlebigkeit der Fugenfüllung auswirkt und andererseits eine deutlich verbesserte Lärminderung ergibt, wenn gleichzeitig die Fugenausbildung schmaler ausgeführt wird.

Für den Beton selbst, der hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Konstruktion sowie für die Erreichung dauerhafter Gebrauchseigenschaften eine entscheidende Rolle spielt, ist bei der Konzipierung anzustreben, einen geringen E-Modul und eine geringere Wärmedehnzahl zu erhalten, wobei die Festigkeit (Zugfestigkeit) ein gewisses Niveau nicht unterschreiten sollte.

### **Analysis of the effects of extreme weather conditions on existing concrete pavements**

As a result of climate change, it must be expected that extreme weather events will become more frequent and more severe in Germany as well. The predicted climate change alone is expected to have an impact on the usage properties of concrete pavements. In the context of a significant increase of heavy traffic as well as increased demands on availability, there is a need to modify the standard construction method.

It turned out that for dimensioning the weathering load of concrete pavements should be taken into account with an increase in the average slab temperature of 2 K and through unfavourable positive temperature curves or temperature gradients. In addition, the position of the longitudinal joints must not only be brought into relation to the traffic markings but also ensure that it is possible to maintain traffic in at least one lane during maintenance measures according to the latest requirements. For this reason and with regard to durability, it is useful to significantly reduce the plate geometries, which can reduce plate deformation and stresses. Smaller slab geometries also results in smaller joint opening widths, which on the one hand has a positive effect on the durability of the joint filling and on the other hand results in a significantly improved noise reduction with smaller joints at the same time. For the concrete itself, which plays a decisive role with regard to the durability of the construction as well as for the realization of durable service properties, a low E-modulus and a lower coefficient of thermal expansion should be achieved. The strength (tensile strength) should not be below a certain level.

## Summary

### **Analysis of the effects of extreme weather conditions on existing concrete pavements**

#### **1 Task**

The strong influence of humans on long-term climate developments and the associated global warming in the coming decades has been scientifically proven and, from today's point of view, only its extent is not precisely determined. As a result, extreme weather events can be expected in Germany, which will increase in frequency and maybe even permanently. These are leading to a higher load on the pavement. In concrete pavements, this not only concerns slab deformation due to different temperatures on the upper and lower sides of the concrete slabs (curling and warping), but also an increase in the influences with regard to longitudinal and also transverse expansion behaviour.

If these changes are not taken into account, the safety level in dimensioning is assumed to decrease, which leads to a reduction in durability and a higher maintenance intensity.

The effects of changing climatic conditions with simultaneous heavy load traffic have not yet been sufficiently investigated, so that a significant increase in damage would be expected in the future if they were not taken into account. In addition, the previous design must be checked for its suitability with regard to these increased requirements. Special attention must be paid to areas requiring intensive maintenance, such as the joint construction.

#### **1 Method**

##### **1.1 Theoretical basics**

At the beginning, the effects of global and national climate scenarios were determined from existing research studies and presented for discussion. Based on this, two projection models were developed to predict temperature gradient distributions and mean temperature distributions in concrete road pavements. In addition, projected distributions for temperature gradients and mean slab temperatures were derived from existing literature resources.

The climate data recorded in the BAB network were evaluated with regard to their annual and daily time curves in order to link and verify the meteorological measurement data from 6 selected BAB measuring stations with the observation values from neighbouring measuring stations of the DWD.

This was followed by the determination of realistic, future relevant mean and extreme temperature conditions in concrete pavements as well as a realistic traffic load for the considered time period.

The state of the art in practice and research of concrete road construction was elaborated in particular with regard to different constructions or construction details such as joint design, slab dimensions, anchor and dowel systems and layer structures. The construction aspects were evaluated with regard to their functionality, practicality and durability.

In order to optimize the construction in concrete road engineering, objective functions were formulated, whereby the overall objective was the maximization of positive pavement characteristics for both the road user and the road operator while minimizing the maintenance effort.

##### **1.2 Model calculations on climate-induced stresses and deformations/distortions of the pavement system**

Using variation matrices of constructive input parameters for model calculation, relevant different joint formations, slab dimensions, anchor and dowel arrangements, pre-deformations due to shrinkage and creep as well as layer structures were examined in calculations with the finite element method (FE model). Fur-

thermore, the variation matrices of material parameters were collected for model calculations. For this purpose, the laboratory results of road tests for selected material parameters provided by BAST were evaluated and processed in order to obtain material parameters relevant for FE models.

With the help of these design and material options, the relevant stresses / phenomena modeled for the stress distortion investigations were identified.

Basically, the longitudinal and lateral expansion behaviour, the hollow bearing due to curling and warping, the lateral force transmission using dowels and anchors, the maximum distortions (expansion/compression) of the joint material, the evenness of the road surface and the noise emission in tyre-road contact were investigated.

In addition, 3D finite element models for the structural detail problems, the noise emission and the slab system were developed or improved.

After evaluation parameters for the calculation results with regard to the functional properties of the road surface and the availability / service life of the construction were put together, a parameter study could be prepared and performed for the different climate scenarios. For the simulation of the tyre-road noise the deformed surfaces were taken as a basis for the simulation.

### **1.3 Investigations for general construction optimization**

Afterwards, the focus was placed on development of new or improved construction details regarding the joint area, lateral force transmission and slab dimensions. Further investigations also included the layer structure and other construction details with regard to different load and usage scenarios as well as the objective functions for optimizing concrete road structures.

For the acoustic evaluation of the constructions, the surfaces of the simulated deformed surfaces were exported. These were used as a basis for the simulation of the tyre-road noise.

### **1.4 Recommendations for modifying the construction and developing a pilot concept**

Finally, a new/improved design was developed, with which the previously established target functions can be achieved. The favoured design should be implemented in a pilot application. In this regard, the specification documents for dimensioning and construction as well as a concept for the measurements during construction were prepared. A concept for the subsequent monitoring after traffic release was also developed.

## **2 Results**

The concrete construction method is one of the traditionally proven technical solutions in road construction. This is especially valid for highly stressed stretches. As a result of the continuous increase in heavy traffic on German motorways, it is necessary to continue using the advantages of this technology. It is important to take a complete view of the requirements in the future and to fulfil them. It is therefore necessary to adapt the construction method accordingly through specific further developments.

Within the present study, specific objective functions were defined for this purpose. It was also shown that the predicted climate change alone is likely to have a significant influence on the properties of the concrete pavement. Specific changes in engineering and technology are therefore already necessary today to maintain the existing level. Increased requirements for availability partially require a modification of the standard construction method.

The results of this research project have shown that both the increased climate-induced loads on the superstructures with concrete pavement and a number of building technology, material and design aspects require a systematic development of the construction method. It is important to combine the desired material and using properties in a meaningful way, while also keeping an eye on the availability of the individual roads.

The following results are given in detail:

- The climate development shows that the consideration of the weather load should be taken into account with an increase of the average slab temperature of 2 K when dimensioning concrete pavements. Also, unfavourable positive temperature curves or temperature gradients (increase of 10 K/m for positive gradients) must be taken into account.
- With regard to availability in the operating period, longitudinal joints especially for two-lane roadways are to be arranged in such a way that, taking into account [ASR 5.2 2018] and [RSA 1995], it is possible to maintain traffic on at least one lane during maintenance measures.
- With regard to the durability of pavements with concrete slabs and the improvement of the service properties, it is useful to significantly reduce the slab geometries, which not only reduces the slab deformations but also the stresses.
- Smaller slab geometries also lead to smaller joint opening widths. On the one hand, this has a positive effect on the durability of a joint filling. On the other hand, a significantly improved noise reduction is achieved if the joint design is made narrower in this context (less than 10 mm incl. chamfer). However, with shorter transverse joint spacings, the demands on the quality of the pavement in the joint area also increase for acoustic reasons. Due to the increase in the frequency of rolling over adjacent slabs with shorter transverse joint distances, the mechanical energy introduced into the tyre also increases. When using small slabs (3 m joint spacing), if the joints are executed according to requirements, the increase in level due to the increased number of joint noise events is so small that it is compensated by the smaller deformations of the smaller slabs.
- The aim is to create concretes that have a low modulus of elasticity and a lower coefficient of thermal expansion. A relatively hard concrete surface is desirable in order to preserve the texture as long as possible.

In addition to the short-term realization of already specific proposed measures, in the short and medium term it is necessary to further improve the construction method in various points. The most important problems or research priorities have been identified.

### 3 Conclusions for practice

In addition to the specific proposed changes to the standard construction method, long-term further development of the concrete construction method should also be attempted.

A fundamental orientation for the further development of the standard construction method is given by the formulated objective functions. Any change in the standard construction method should be associated with a better fulfilment of one or more objective functions. As the calculations showed, however, moderate effects can already be expected due to the expected climate change. This applies in particular to the basic requirements "good user experience" and "economic efficiency". A further development of the standard construction method therefore is already necessary today.

On the basis of the analyses and calculations carried out within the present project, it was possible to formulate measures that are suitable for better fulfilment of the objective functions.

#### (1) Better consideration of climatic conditions in the production process

The measures currently used in construction practice to try to influence the hydration and hardening process in the desired way should be further developed. It is recommended to identify climate constellations which can be considered as particularly harmful. With appropriate building contract regulations, production under these conditions should be prevented or appropriate compensation measures should be required.

#### (2) Target-oriented control of the material parameters of the concrete

The mathematical analysis clearly showed that a high modulus of elasticity and a high coefficient of thermal expansion have a negative effect on the stress and deformation condition. As the effects mentioned above are mainly caused by temperature-induced loads, the influence described will become even stronger in the course of the predicted general temperature increase.

Against this background, the neglect of these material parameters no longer seems acceptable. In the future, uniform measuring methods should be defined for these material values and the concrete mix designs should be investigated accordingly. The parameters determined in this way should be taken into account for dimensioning.

### (3) Improvement of the joint construction

The joint, especially the transverse joint, is known to be a weak point in the road construction. Many damage processes, but also an increase in tyre/road noise compared to the (imaginary) jointless concrete pavement have their initial point here.

The first step is to improve the regular construction. The aim should be to ensure the mobility of each joint. However, in order to fundamentally improve the design of the concrete pavement in this respect, a fundamental redesign of the joint is required. It is assumed that a joint that is permanently tight under various climatic conditions can only be achieved with a permanently prestressed sealing material. For acoustic reasons, it is essential to avoid any overhang of the joint filler material beyond the areas of the concrete pavement adjacent to the joint. Outstanding joint filling material is much more disadvantageous in terms of sound than sunken material. This becomes increasingly important the shorter the concrete slabs and the smaller the joint opening widths become.

### (4) Targeted dimensioning

A construction adapted to specific local conditions and material properties can only be realized with a mathematical dimensioning. The existing dimensioning system should be further developed in such a way that the calculation models used gradually approach the real conditions. An important measure in this sense is the application of the Finite Element Method (FEM) for the calculation of stresses and deformations. The FEM models should be defined in such a way that an extension and specification is possible without fundamental changes.

## Literature

- [FE 08.0237/2015] VILLARET S., FREUDENSTEIN, FROHBÖSE, EGER, PICHOTTKA, RIWE, VILLARET K.: FE 08.0237/2015/ARB  
„Informationssystem - Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken“, unveröffentlichter Schlussbericht (Entwurf) 09/2017
- [FE 08.0254/2017] VILLARET; RIWE; AUGTER; KAYSER: FE 08.0254/2017/KRB  
“KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte“, laufendes FE-Thema, Zwischenbericht, BASt, Bergisch Gladbach
- [FE 09.0188/2011] VILLARET, ST.; VILARET, K.; KIEHNE, A.; RIWE, A.:  
Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton, BASt, 2014
- [FE 08.0232/2014] BECKENBAUER, T., ALTREUTHER, A., ERTSEY, M., OTTO, T., SCHUBERT, S., KROPP, W., HOEVER, C.: FE 08.0232/2014/FRB  
Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsprojekt FE 08.0232/2014, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018

## Used regulations

- [ASR 5.2 2018] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2, Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Baustellen im Grenzbereich zum Straßenverkehr – Straßenbaustellen, Ausgabe 2018
- [RDO Beton 09] FGSV: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO-Beton 09, Ausgabe 2009
- [RSA 1995] Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, Ausgabe 1995, 6. überarbeitete Auflage Stand Juni 2017

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>12</b>
1.1	Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik.....	12
1.2	Gesamtziel .....	12
1.3	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung .....	12
1.4	Methodik des Vorgehens .....	13
1.4.1	Arbeitspaket 1 – Theoretische Grundlagen.....	13
1.4.2	Arbeitspaket 2 – Modellrechnungen zu klimainduzierten Spannungen und Verformungen/Verzerrungen des Deckensystems.....	14
1.4.3	Arbeitspaket 3 – Untersuchungen zur allgemeinen Optimierung der Konstruktion.....	14
1.4.4	Arbeitspaket 4 – Empfehlungen zur Modifizierung der Konstruktion und Erstellung eines Pilotkonzepts .....	15
1.4.5	Arbeitspaket 5 – Literaturrecherche und Dokumentation; Abstimmungen und Termine, Zwischen- und Schlussberichte.....	15
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>16</b>
2.1	Klimaszenarien und Verkehrsbelastung .....	16
2.1.1	Globale und nationale Klimaszenarien sowie Möglichkeiten zur Bestimmung von relevanten zukünftigen Temperaturzuständen von Betondecken .....	16
2.1.2	Betrachtungszeitraum (Prognosezeitraum) für Klimawandeleinfluss sowie Ermittlung relevanter Temperaturverläufe für diesen Zeitraum.....	21
2.1.3	Auswertung Temperaturmessdaten ausgewählter BAB-Messstationen und Verknüpfung dieser mit den DWD-Klimadaten .....	27
2.1.4	Abgrenzung sowie Bestimmung zukünftig relevanter mittlerer und extremer Temperaturzustände in Betondecken.....	34
2.1.5	Verkehrsbelastung für den Betrachtungszeitraum .....	34
2.2	Aktueller Stand der Betonbauweise in der Praxis .....	37
2.2.1	Allgemeines .....	37
2.2.2	Dimensionierung.....	38
2.2.3	Baustoff Beton .....	38
2.2.4	Oberbau .....	41
2.2.5	Plattengeometrien.....	43
2.2.6	Fugen .....	45
2.2.7	Endbereiche .....	48
2.2.8	Oberflächen.....	49
2.2.9	Herstellungstechnologie.....	50
2.2.10	Materialeigenschaften sowie die zugehörigen Materialprüfungen .....	50
2.3	Aktueller Stand der Betonbauweise in der Forschung.....	53
2.3.1	Forschungsergebnisse zur Dimensionierung .....	53
2.3.2	Forschungsergebnisse zur Konstruktion.....	54
2.3.3	Forschungsergebnisse zu den Materialeigenschaften .....	54
2.3.4	Forschungsergebnisse zu Fugenkonstruktion und Fugenfüllstoffen .....	55
2.3.5	Forschungsergebnisse zu Herstellung und Messung von Oberflächeneigenschaften.....	56
2.3.6	Forschungsergebnisse zur Fertigteilbauweise .....	57



---

2.4	Mechanismen und Zielfunktionen im konstruktiven Betonstraßenbau .....	59
2.4.1	Zielfunktionen bei der Optimierung der Konstruktion im Betonstraßenbau .....	59
2.4.2	Wirkungsmechanismen und relevante Effekte im konstruktiven Betonstraßenbau .....	65
<b>3</b>	<b>Modellrechnungen zu klimainduzierten Spannungen und Verformungen/Verzerrungen des Deckensystems .....</b>	<b>76</b>
3.1	Variationsbreiten der konstruktiven Eingangsparameter für die Modellrechnung.....	76
3.1.1	Fugenausbildung .....	76
3.1.2	Plattenabmaße .....	81
3.1.3	Schichtenfolgen .....	83
3.1.4	Vorverformung durch Schwinden und Kriechen.....	84
3.1.5	Zusammenstellung der zu variierenden konstruktiven Parameter für die FEM-Berechnung .....	84
3.2	Variationsbreiten der Materialparameter für die Modellrechnung .....	84
3.2.1	Auswertung von BAST-Laborergebnissen von Streckenbeprobungen für ausgewählte Materialkennwerte .....	84
3.2.2	Ermitteln von ggf. benötigten weiteren Materialkennwerten und/oder Messergebnissen zur Bestimmung weiterer Materialkennwerte aus anderen Quellen.....	87
3.2.3	Materialkennwerte für die Verwendung innerhalb der FEM-Berechnungen .....	88
3.3	Identifizierung der relevanten Beanspruchungen/Phänomene sowie Modellierungskonzepte.....	88
3.3.1	Längs- und Querdehnungsverhalten .....	88
3.3.2	Hohllagerung infolge Aufschüsseln und Aufwölben .....	90
3.3.3	Querkraftübertragung Dübel und Anker.....	92
3.3.4	Maximale Verzerrungen (Dehnung/ Stauchungen) des Fugenmaterials.....	95
3.3.5	Ebenheit der Fahrbahn .....	96
3.3.6	Lärmemission im Reifen-Fahrbahnkontakt .....	97
3.3.7	Weitere Phänomene wie z. B. Zwangspunkte und Endbereiche .....	101
3.4	Entwicklung dreidimensionaler Finite Elemente Modelle entsprechend der Konzepte.....	102
3.4.1	Finite Elemente Modelle für strukturelle Detailprobleme .....	102
3.4.2	Finite Elemente Modell für Lärmemission.....	104
3.4.3	Finite Elemente Modell für das Plattensystem .....	110
3.5	Bewertung konstruktiver und technologischer Maßnahmen bezüglich der Zielfunktionen.....	113
3.6	Parameterstudie .....	113
3.6.1	Problemlage und Zielstellung .....	114
3.6.2	Plattenverformung im Querfugenbereich .....	114
3.6.3	Untersuchung des Einflusses des Querfugenabstandes.....	121
3.6.4	Untersuchung des Einflusses von Hohllagerungen im Querfugenbereich .....	133
3.6.5	Untersuchung des Einflusses der Betonparameter .....	141
3.6.6	Untersuchung des Einflusses der Fugenöffnung .....	168
3.6.7	Rechnerische Analyse der Querkraftübertragung mit Dübeln (Regelbauweise) .....	169
3.6.8	Simulation der Lärmemissionen und Auswertung .....	185
3.7	Bewertung der Parameterstudie und Vorschläge für ein verbessertes System der Nachweisführung für die Dimensionierung und/oder die Substanzbewertung .....	204
<b>4</b>	<b>Untersuchungen zur allgemeinen Optimierung der Konstruktion .....</b>	<b>207</b>
4.1	Aspekte der Verfügbarkeit.....	207
4.1.1	Regelwerke zur Verkehrsführung .....	207

---

4.1.2	Richtungsfahrbahnen mit 2 Fahrstreifen.....	209
4.1.3	Richtungsfahrbahnen mit 3 Fahrstreifen.....	219
4.2	Entwicklung neuer / verbesserter Konstruktionsdetails .....	229
4.2.1	Neue Plattengeometrien .....	229
4.2.2	Fugenkonstruktionen .....	245
4.2.3	Schichtenfolge .....	252
4.3	Strukturbewertung sowie teilweise Simulation der Konstruktionen hinsichtlich auftretender Last- und Nutzungsszenarien .....	259
4.3.1	Dimensionierung der neuen Konstruktion.....	259
4.3.2	Fugenbewegung bei kurzen Platten .....	264
4.3.3	Bewertung .....	267
4.4	Benötigte Materialeigenschaften und deren experimentelle Ermittlung .....	268
4.4.1	Unterlage.....	268
4.4.2	Fugenmaterial.....	268
4.4.3	Beton.....	268
<b>5</b>	<b>Empfehlungen zur Modifizierung der Konstruktion und Pilotkonzept.....</b>	<b>270</b>
5.1	Vorstellen der verbesserten Konstruktion .....	270
5.1.1	Konstruktion .....	270
5.1.2	Simulation der Lärmemission bei kleinen Platten.....	270
5.2	Zusammenstellen von relevanten Aspekten, die bei der weiteren Regelwerks-erstellung zu beachten sind .....	274
5.3	Entwurf einer Pilotanwendung inklusive Ausschreibungsunterlagen für Dimensionierung und Konstruktion .....	277
5.3.1	Textteile Baubeschreibung.....	277
5.3.2	Textteile Leistungsverzeichnis .....	285
5.4	Konzeption von Messtechnik und Messbegleitung des Piloten sowie anschließendes Monitoring .....	288
<b>6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>291</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>294</b>
	<b>Verwendete Regelwerke .....</b>	<b>301</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>303</b>
	<b>Bilder .....</b>	<b>305</b>

# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik

Der starke Einfluss des Menschen auf die langfristigen Klimaentwicklungen sowie die damit einhergehende Klimaerwärmung in den nächsten Jahrzehnten sind wissenschaftlich belegt und aus heutiger Sicht nur noch in Ihrem Ausmaß nicht genau bestimmt. Für Deutschland sind daraus abgeleitet auch Witterungsextreme zu erwarten, die in ihrer Häufigkeit und gegebenenfalls auch dauerhaft ansteigen werden. Diese führen zu einer höheren Beanspruchung des Straßenoberbaus. Beim Betonstraßenbau betrifft dies nicht nur die Plattenverformung infolge unterschiedlicher Temperaturen an der Ober- und Unterseite der Betonplatten (Aufschüsseln und Aufwölben), sondern auch die Erhöhung der Einflüsse hinsichtlich des Längs- und ggf. auch des Querdehnungsverhaltens.

Lässt man diese Veränderungen unberücksichtigt, sinkt voraussichtlich das Sicherheitsniveau bei der Dimensionierung, was zu einer Verringerung der Dauerhaftigkeit und zu einer höheren Erhaltungsintensität führt.

Die Auswirkungen von sich ändernden klimatischen Verhältnissen bei gleichzeitiger Schwerverkehrsbelastung sind bislang nicht hinreichend untersucht worden, sodass bei Nichtberücksichtigung zukünftig ggf. eine signifikante Schadenszunahme zu erwarten ist. Zusätzlich muss die bisherige Konstruktion auf ihre Eignung hinsichtlich dieser erhöhten Anforderungen überprüft werden. Dabei sind den erhaltungsintensiven Bereichen wie zum Beispiel der Fugenkonstruktion besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

## 1.2 Gesamtziel

Die mittlere Erwärmung sowie die Auswirkungen von Witterungsextremen werden zu einer Erhöhung des Belastungsniveaus bei Bauweisen mit Betondecke im Straßenbau in den nächsten Jahrzehnten führen. Im Kontext mit einer signifikanten Erhöhung der Belastung durch Schwerverkehr ergeben sich neue Herausforderungen an die Dimensionierung und Konstruktion, um die Dauerhaftigkeit der Betondecke als wesentlichen Teil des Straßenoberbaus gewährleisten zu können. Von gleicher Bedeutung ist die Sicherstellung dauerhafter Oberflächeneigenschaften. Hier ist vor allem die Wechselwirkung zwischen einer dauerhaften Oberflächentextur und dem Baustoff Beton zu beachten.

Die Anforderungen an die Substanz- und Oberflächeneigenschaften stehen in einer Wechselwirkung zur Verfügbarkeit der Verkehrsanlage während des gesamten Lebenszyklus. Daher werden hinsichtlich der Verfügbarkeit nicht nur Lösungen für den Neubau sondern auch für Erhaltungsmaßnahmen benötigt.

Ziel der Forschungsarbeit ist es daher, die bisherigen Dimensionierungs- und Konstruktionsansätze im Kontext mit den Oberflächeneigenschaften zu diskutieren und Alternativen für die Praxis aufzuzeigen. Dabei sollen erfolgsversprechende Ansätze letztlich für einen Pilotversuch ingenieurtechnisch vorbereitet werden. Abschließend wird ein Monitoring-Konzept entwickelt und für die Umsetzung im Pilotversuch vorbereitet.

## 1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Die grundsätzliche Diskussion des Oberbaus mit Betondecke soll Alternativen aufzeigen, die zu dauerhaften und erhaltungsarmen Lösungen im Betonstraßenbau führen. Dabei müssen die künftigen Belastungen aus Witterung und Verkehr berücksichtigt werden.

Ein wesentlicher Faktor sind die dauerhaften Gebrauchseigenschaften der Betondecke, die die Nutzer der Verkehrsanlage erwarten. Hier sind insbesondere die Ebenheit, die Griffigkeit und die Lärminderung zu nennen.

Eine erhaltungsarme Konstruktion führt zudem automatisch auch zu einer höheren Verfügbarkeit der Verkehrsanlage, die von den Nutzern ebenfalls gewünscht ist.

Mit der Herstellung sehr guter Substanz- und Gebrauchseigenschaften wird der Weg zu einer kundenorientierten Verkehrsanlage geebnet, sodass die zuständigen Verwaltungen als guter Dienstleister in Erscheinung treten können.

## 1.4 Methodik des Vorgehens

Die für die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung vorgesehene methodische Vorgehensweise sowie die zugehörigen Arbeitspakete (AP) werden nachfolgend ausführlich erläutert. Die übergeordneten Arbeitspakete sind der in der Ausschreibung geforderten Struktur entlehnt. Aufgrund des großen Projektumfangs wurde ein sehr detaillierter Arbeitsplan entwickelt.

### 1.4.1 Arbeitspaket 1 – Theoretische Grundlagen

Zu Beginn der Forschungsarbeit werden die Auswirkungen globaler und nationaler Klimaszenarien aus vorliegenden Forschungsarbeiten eruiert und zur Diskussion gestellt. Basierend darauf werden zwei Projektionsmodelle zur Prognose der Temperaturgradientenverteilungen und der Verteilungen der mittleren Temperatur in Betonfahrbahnplatten erarbeitet. Die Vorrecherche hat ergeben, dass die Testreferenzjahre des DWD [DWD 2016 TRJ] für die Zeiträume 1985-2012 und 2030-2060 hinsichtlich ihrer Temperaturgradientenverteilungen und der Verteilungen der mittleren Plattentemperatur anhand von Modellrechnungen ausgewertet werden können. Aus dem Vergleich dieser Verteilungen können Trends berechnet werden, mit denen die aktuellen Verteilungen auf den dimensionierungsrelevanten Zeitraum bis 2060 projiziert werden. Zum anderen werden auf Basis des [FE 09.0177/2011/ERB] und weiterer Literatur zu extremen Witterungsereignissen in Deutschland, wie beispielsweise [DWD\_Extrem], projizierte Verteilungen für Temperaturgradienten und mittlere Plattentemperaturen abgeleitet.

Die im BAB Netz aufgezeichneten Klimadaten werden hinsichtlich Ihrer Jahres- und Tagesganglinien ausgewertet, um die meteorologischen Messdaten von 6 ausgewählten BAB-Messstationen mit den Beobachtungswerten des DWD von benachbarten Messstationen des DWD zu verknüpfen und zu überprüfen.

Im Anschluss werden die Ergebnisse bewertet und die Bestimmung realistischer, zukünftig relevanter mittlerer und extremer Temperaturzustände in Betondecken durchgeführt. Auf Basis von Erkenntnissen aus der Literatur und den Ergebnissen von [FE 04.0285/2014] wird mit den Achslastverteilungen sowie Prognosen zur Schwerverkehrsentwicklung eine realistische Verkehrsbelastung für den Betrachtungszeitraum bestimmt.

Es werden der Stand der Praxis und der Forschung des Betonstraßenbaus insbesondere hinsichtlich unterschiedlicher Konstruktionen bzw. Konstruktionsdetails wie z. B. Fugenausbildung, Plattenabmaße, Anker- und Dübel und Schichtenfolgen herausgearbeitet und soweit möglich auch mit den zugrundeliegenden Überlegungen verknüpft.

Im Anschluss werden die konstruktiven Aspekte hinsichtlich Ihrer Funktionalität, Zweckmäßigkeit und Dauerhaftigkeit anhand von Veröffentlichungen und Praxiserfahrungen bewertet. Im gleichen Zug werden die derzeit geforderten Materialeigenschaften sowie die durchgeführten Materialprüfungen eruiert und hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit für die rechnerischen Verfahren zur Dimensionierung und Substanzbewertung bewertet. Anhand der Literaturrecherche sollen weitere benötigte bzw. sinnvoll verwertbare Materialeigenschaften und die möglichen zugehörigen Materialprüfungen eruiert und bewertet werden.

Wirkungsmechanismen und relevante Effekte werden erörtert, die im konstruktiven Betonstraßenbau vorherrschend und zu beachten sind, da sie bei unsachgemäßer Konstruktion zu verfrühtem Ausfall der Betonfahrbahn führen können. Es werden Zielfunktionen formuliert, die zur Optimierung der Konstruktion im Betonstraßenbau notwendig sind. Übergeordnetes Ziel ist hierbei die Maximierung der Kundenzufriedenheit der Verkehrsteilnehmer und der Betroffenen bei Minimierung des Instandhaltungsaufwands.

Die zusammengetragenen Erkenntnisse werden mit vorangegangenen Forschungen zur Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Betonfahrbahndecken in Kontext gesetzt, um eine Bewertung bezüglich der Verwertbarkeit der Forschungsergebnisse vorzunehmen.

### 1.4.2 Arbeitspaket 2 – Modellrechnungen zu klimainduzierten Spannungen und Verformungen/Verzerrungen des Deckensystems

Auf Basis von Arbeitspaket 1 werden Variationsmatrizen der konstruktiven Eingangsparameter für die Modellrechnung gebildet, um relevante unterschiedliche Fugenausbildungen, Plattenabmaße, Anker- und Dübelanordnungen, Vorverformungen durch Schwinden und Kriechen sowie Schichtenfolgen in den Finite Elemente Berechnungen zu untersuchen.

Im Anschluss werden die Variationsmatrizen der Materialparameter für die Modellrechnungen zusammengestellt. Hierfür werden die von der BAST bereitgestellten Laborergebnisse von Streckenbeprobungen für ausgewählte Materialkennwerte ausgewertet. Weitere benötigte Materialkennwerte und / oder Messergebnisse zur Bestimmung weiterer Materialkennwerte werden aus der Literatur entnommen. Hierbei ist zu beachten, dass die Messwerte aus Materialprüfungen meist nicht direkt in 3D Finite Elemente Berechnungen eingespeist werden können. Aus diesem Grund werden die Materialkennwerte aus den Laboruntersuchungen aufbereitet, um geeignete Parameter für die Implementierung in Berechnungsmodelle zu erhalten. Diese Aufbereitung beinhaltet meist eine „Nachmodellierung“ des Laborversuchs und eine Simulation der Prüfung. Benötigte, aber nicht vorhandene Modelle zur Interpretation von Laborprüfungen werden (insofern praktikabel) nachmodelliert.

Nachdem die Konstruktions- und Materialvarianten bestimmt worden sind, werden die relevanten Beanspruchungen / Phänomene zusammengestellt, die für die Spannungs-Verzerrungsuntersuchungen zu modellieren sind. Die zugehörigen Modellierungskonzepte für die Detail- und Plattensystemsimulationen werden ebenfalls erarbeitet.

Grundsätzlich werden das Längs- und Querdehnungsverhalten, die Hohlagerung infolge von Aufschüßelung und Aufwölbung, die Querkraftübertragung mittels Dübel und Anker, die maximalen Verzerrungen (Dehnung / Stauchungen) des Fugenmaterials, die Ebenheit der Fahrbahn und die Lärmemission im Reifen-Fahrbahnkontakt untersucht.

Die Entwicklung der 3D Finite Elemente Modelle für die strukturellen Detailprobleme, die Lärmemission und das Plattensystem entsprechend der Konzepte erfolgt anschließend.

Nachdem die Bewertungsgrößen für die Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Funktionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche und der Verfügbarkeit / Lebensdauer der Konstruktion zusammengestellt wurden, kann eine Parameterstudie zusammengestellt und für die unterschiedlichen Klimaszenarien durchgeführt werden. Im Verlauf der Simulationen werden die Finite Elemente Modelle anpasst / verbessert. Für die Simulation der Lärmemissionen werden die verformten Oberflächen exportiert und für die Simulation der Lärmemissionen verwendet. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Simulationen tabellarisch und graphisch ausgewertet. Anhand der Bewertung der Parameterstudie werden Vorschläge für ein verbessertes System der Nachweisführung für die Dimensionierung und die Substanzbewertung abgeleitet.

### 1.4.3 Arbeitspaket 3 – Untersuchungen zur allgemeinen Optimierung der Konstruktion

Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Optimierung der Konstruktion war die notwendige Verfügbarkeit der Verkehrsanlage. Dies betrifft insbesondere die Erhaltungsmaßnahmen während der Nutzungszeit. Es werden zunächst Untersuchungen angestellt, bei denen unter Beachtung der [RSA 1995] und der [ASR A5.2 2018] mögliche Plattengeometrien ermittelt werden, um ein hohes Maß an Verfügbarkeit zu gewährleisten.

Nachdem die bestehenden Konstruktionen modelliert und simuliert wurden, soll die Konstruktion teilweise und nach Möglichkeit auch grundsätzlich in Frage gestellt werden. Hierbei wird verstärkter Fokus auf die Entwicklung neuer bzw. verbesserter Konstruktionsdetails im Fugenbereich, zur Querkraftübertragung und den Plattenabmaßen gelegt. Aber auch die Schichtenfolge soll hinsichtlich der unterschiedlichen Last- und Nutzungsszenarien sowie der Zielfunktionen zur Optimierung von Betonstraßenkonstruktionen untersucht werden.

Hierbei sind insbesondere Wechselwirkungen der einzelnen Konstruktionsaspekte zu beachten. Beispielsweise kann durch geringere Schnitttiefen bei der Scheinfugenherstellung die Hitzeschadenbeständigkeit erhöht werden. Das damit oft einhergehende Paketreißen führt jedoch zu längeren, zusammenhängenden

Platten, deren angrenzende gerissene Fugen bei Abkühlung stärker geöffnet werden und somit schmutzempfindlicher sind. Somit steigt die Hitzeschädenempfindlichkeit mit der Zeit wieder. Des Weiteren kann eine Gefügeschädigung oder Schrägreißen bei geringen Schnitttiefen nicht ausgeschlossen werden.

Zur akustischen Bewertung der Konstruktionen werden die simulierten, verformten Oberflächen exportiert und für die Simulation der Lärmemissionen verwendet.

Für die neuen / verbesserten Konstruktionen werden die benötigten Materialeigenschaften insbesondere der Unterlage, des Betons und des Fugenmaterials berechnet und Möglichkeiten für deren experimentelle Ermittlung eruiert und bewertet.

#### **1.4.4 Arbeitspaket 4 – Empfehlungen zur Modifizierung der Konstruktion und Erstellung eines Pilotkonzepts**

Abschließend werden die neuen / verbesserten Konstruktionen vorgestellt und Vorschläge erarbeitet, wie die Forschungsergebnisse in der weiteren Regelwerkserstellung beachtet werden sollten.

Weiterhin soll die favorisierte Konstruktion ggf. in einer Pilotanwendung umgesetzt werden. Hierfür werden ein Konzept sowie die Ausschreibungsunterlagen für Dimensionierung und Konstruktion erstellt. Für die baubegleitenden Messaufgaben und das anschließende Monitoring wird ebenfalls ein Konzept erstellt, damit Messdaten für eine Validierung der Berechnungen erhoben werden können.

#### **1.4.5 Arbeitspaket 5 – Literaturrecherche und Dokumentation; Abstimmungen und Termine, Zwischen- und Schlussberichte**

Während des gesamten Projekts erfolgt eine begleitende Literaturrecherche und Dokumentation.

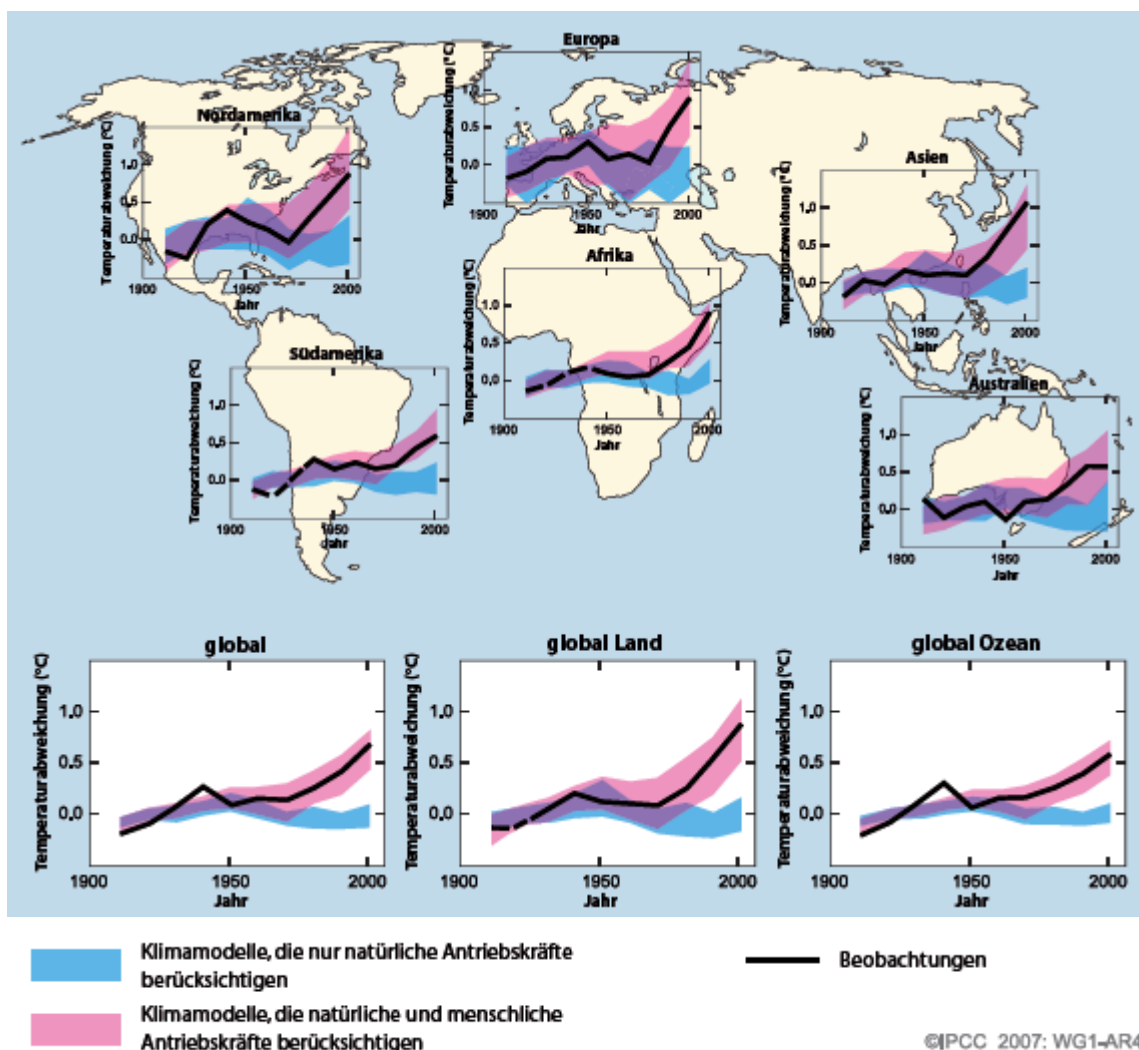
## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Klimaszenarien und Verkehrsbelastung

#### 2.1.1 Globale und nationale Klimaszenarien sowie Möglichkeiten zur Bestimmung von relevanten zukünftigen Temperaturzuständen von Betondecken

Basierend auf den Studien und Untersuchungen von einer Vielzahl von Klimaforschern wird weltweit ein Anstieg der mittleren Temperatur der Erdoberfläche (GMST) von 1,8 - 4,0 °C bis zum Jahr 2100 prognostiziert. Diese Angaben beziehen sich auf die Referenzperiode zwischen 1961 und 1990 [IPCC 2007].

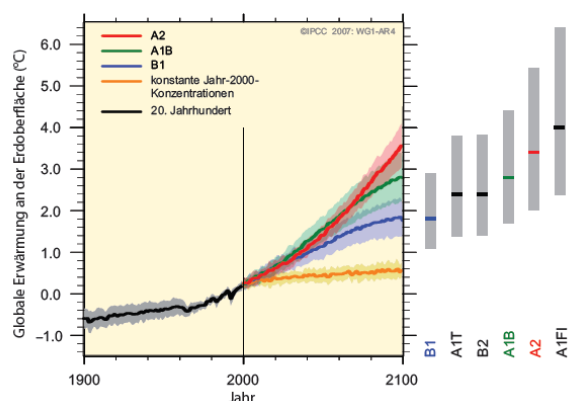
Im gleichen Bericht werden die globalen und kontinentalen Temperaturänderungen (siehe Bild 2.1) des letzten Jahrhunderts aufgezeigt.



**Bild 2.1:** Vergleich der beobachteten Änderungen der Erdoberflächentemperatur auf kontinentaler und globaler Skala mit den von Klimamodellen auf Grund natürlicher und anthropogener Antriebe berechneten Resultaten. Die Jahrzehnt-Mittel der Beobachtungen sind für den Zeitraum 1906–2005 (schwarze Linie) im Zentrum des Jahrzehnts und relativ zum entsprechenden Mittel von 1901–1950 eingezeichnet. Die Linien sind gestrichelt, wenn die räumliche Abdeckung weniger als 50% beträgt. Blau schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 19 Simulationen von 5 Klimamodellen, welche nur die natürlichen Antriebe durch Sonnenaktivität und Vulkane berücksichtigen. Rot schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 58 Simulationen von 14 Klimamodellen unter Verwendung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen Antriebe. [IPCC 2007]

Des Weiteren werden in diesem Bericht verschiedene Prognoseszenarien behandelt, die sich mit der mittleren globalen Erwärmung an der Erdoberfläche auseinandersetzen (Bild 2.2). Alle Szenarien besitzen eine

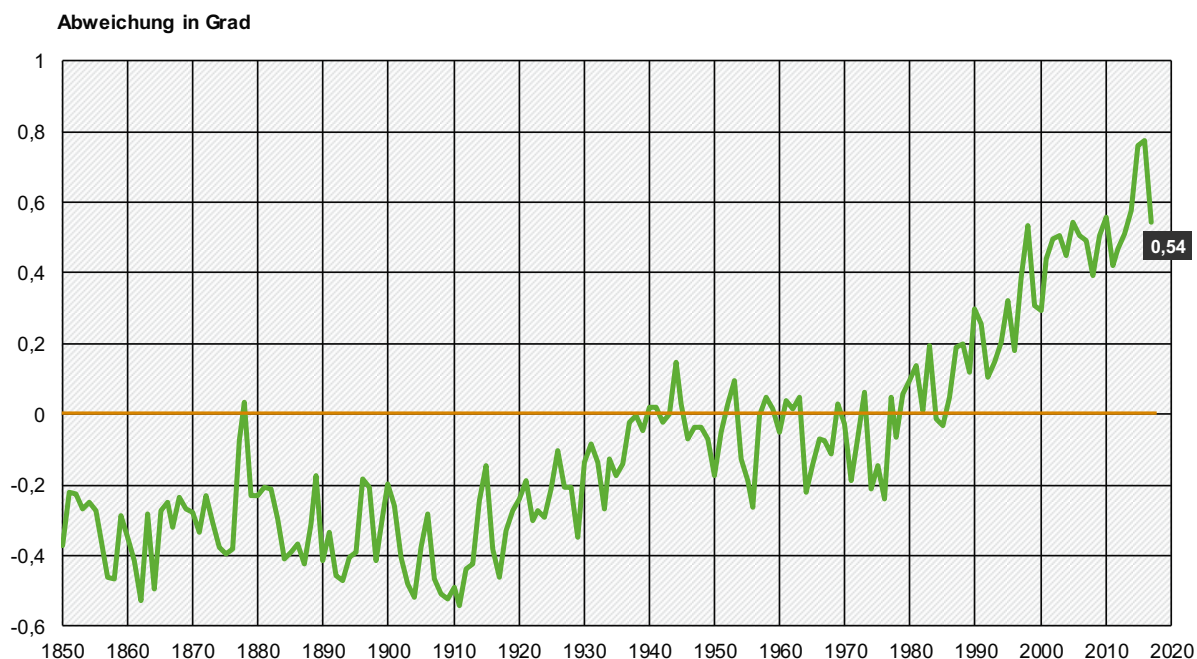
sogenannte beste Schätzung und eine zugehörige wahrscheinliche Bandbreite. Das niedrige Szenario (B1) hat eine beste Schätzung von 1,8 °C bei einer wahrscheinlichen Bandbreite von 1,1 °C bis 2,9 °C. Für das hohe Szenario (A1FI) beträgt die beste Schätzung 4,0 °C bei einer Bandbreite von 2,4 °C bis 6,4 °C.



**Bild 2.2:** Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche

Alle Szenarien zeigen also eine deutliche Erwärmung in diesem Jahrhundert. Diese globalen Daten zeigen den weltweiten Trend, sind aber nicht geeignet für eine Einschätzung der Klimaentwicklung in Deutschland.

Ein Bericht des Umweltbundesamts beschäftigt sich aktuell (letzte Bearbeitung 06.08.2018) mit den steigenden Durchschnittstemperaturen [UBA 2018]. Weltweit ist ein ansteigender Trend der globalen Lufttemperatur zu verzeichnen. Die folgende Grafik (Bild 2.3) zeigt, dass die globale Durchschnittstemperatur im Jahr 2017 um 0,54 °C über dem langjährigen Mittelwert der Referenzperiode (1961 bis 1990) lag. Die 20 wärmsten Jahre seit Aufzeichnungsbeginn liegen alle in der jüngsten Zeit, also nach 1990.



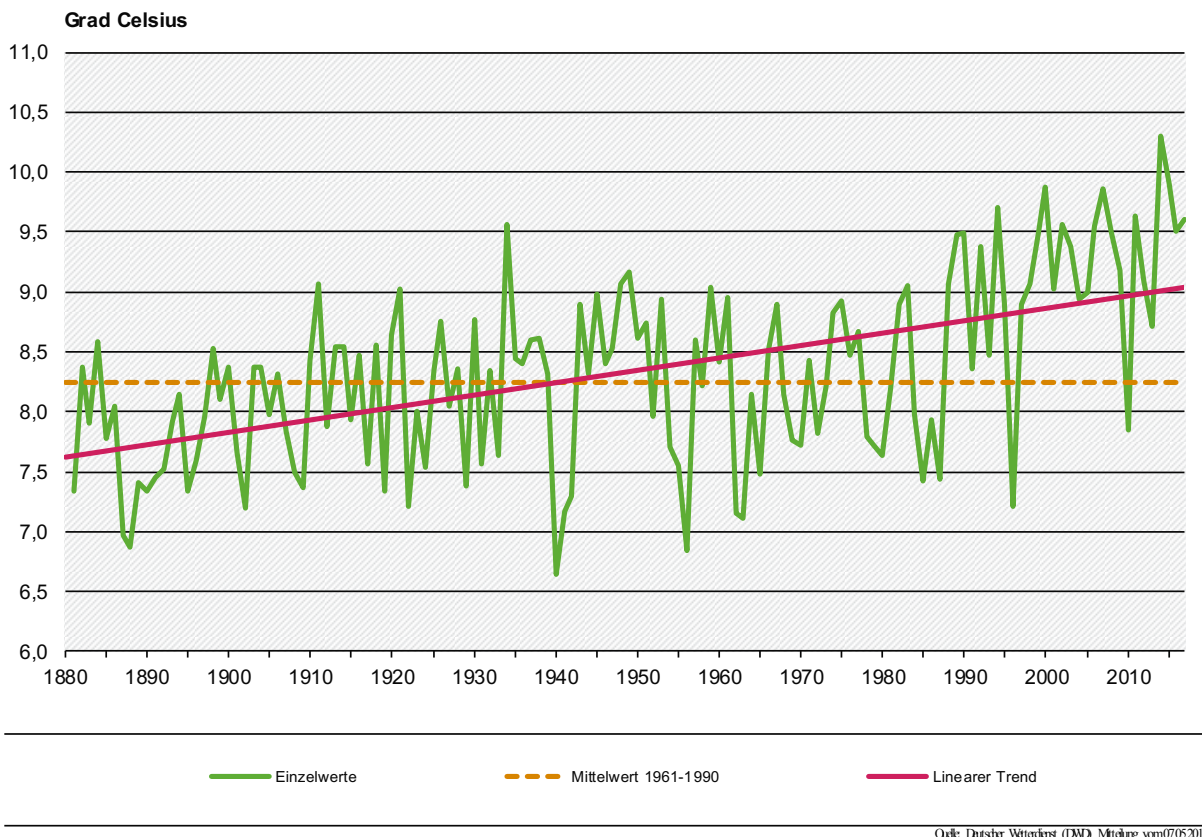
\* Die Nulllinie entspricht dem globalen Temperaturdurchschnitt der Jahre 1961 bis 1990. Dieser liegt bei 14,0 °C. Der globale Temperaturdurchschnitt im Jahr 2017 lag also bei rund 14,5 °C.

Quelle: Mt Office Hadley Centre Climate Reseach Unit; Modell HadCRUT4500; Mittel der 100 berechneten Zetahren

**Bild 2.3:** Abweichung der globalen Lufttemperatur vom Durchschnitt 1961 bis 1990 (Referenzperiode)

Die Entwicklung der jährlichen mittleren Tagesmitteltemperatur in Deutschland zeigt das Bild 2.4. Die Trendlinie weist den kontinuierlichen Anstieg der jährlichen mittleren Tagesmitteltemperaturen nach.





Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 07.05.2018

**Bild 2.4:** Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland

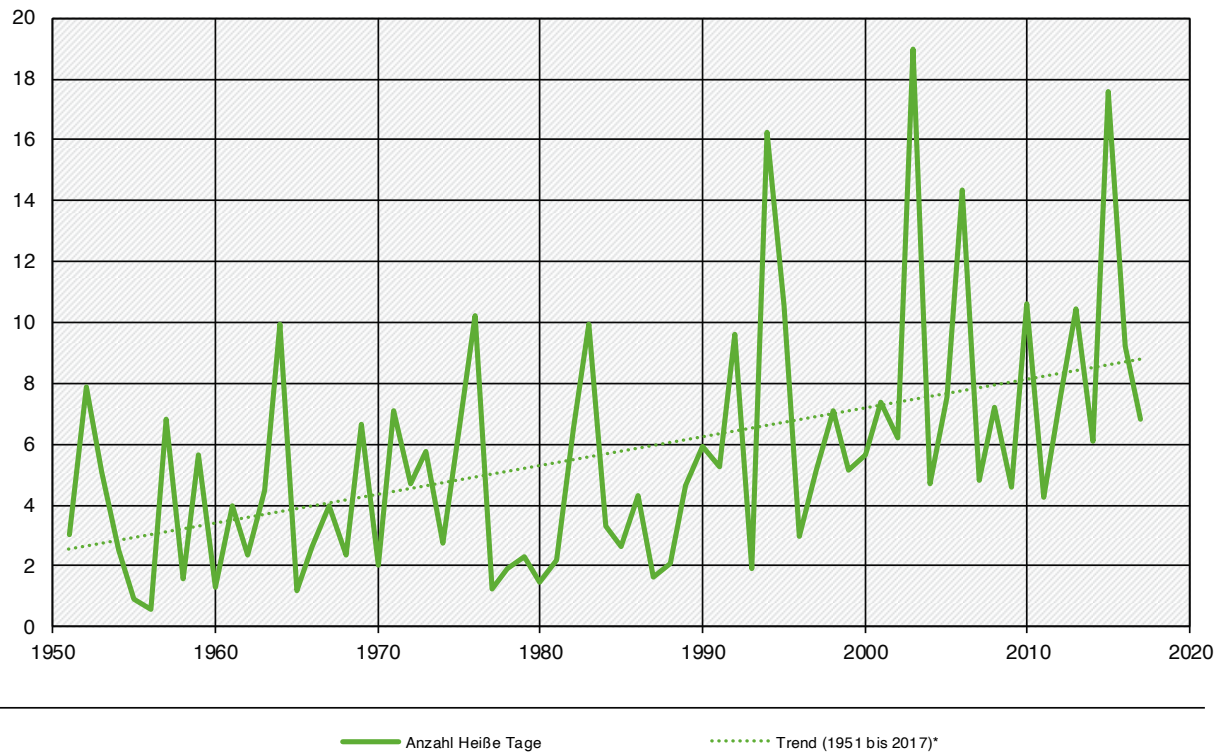
Die Grafen der 4 Jahreszeiten zeigen ein ähnliches Bild, wobei die Erwärmung in der kühlen Jahreszeit tendenziell etwas größer ist. Die Tab. 2.1 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse.

<b>Frühling (März, April, Mai)</b>	1,5 °C
<b>Sommer (Juni, Juli, August)</b>	1,3 °C
<b>Herbst (September, Oktober, November)</b>	1,4 °C
<b>Winter (Dezember, Januar, Februar)</b>	1,5 °C
<b>Jahr</b>	1,4 °C

Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 07.05.2018

**Tab. 2.1:** Lineare Trends der Lufttemperatur (Differenzwerte zwischen 1881 und 2017 bezogen auf die Trendlinie, Bild 2.4)

Mit Blick auf zukünftig relevante Temperaturzustände von Betondecken interessieren die Zu- oder Abnahme von Witterungsextremen in der Vergangenheit. Der Deutsche Wetterdienst hat „heiße Tage“ definiert. Demnach ist jeder Tag, an dem die höchste Temperatur oberhalb von 30 °C liegt, ein heißer Tag. Das Bild 2.5 zeigt eine Auswertung von 1951 bis 2017. Die Auswertung ist eine Mittelung über ganz Deutschland (Gebietsmittel). Lokal können also noch mehr heiße Tage aufgetreten sein. Der Trend ist aber eindeutig. Klimamodellierungen zeigen, dass in Deutschland zukünftig mit noch mehr heißen Tagen zu rechnen ist.

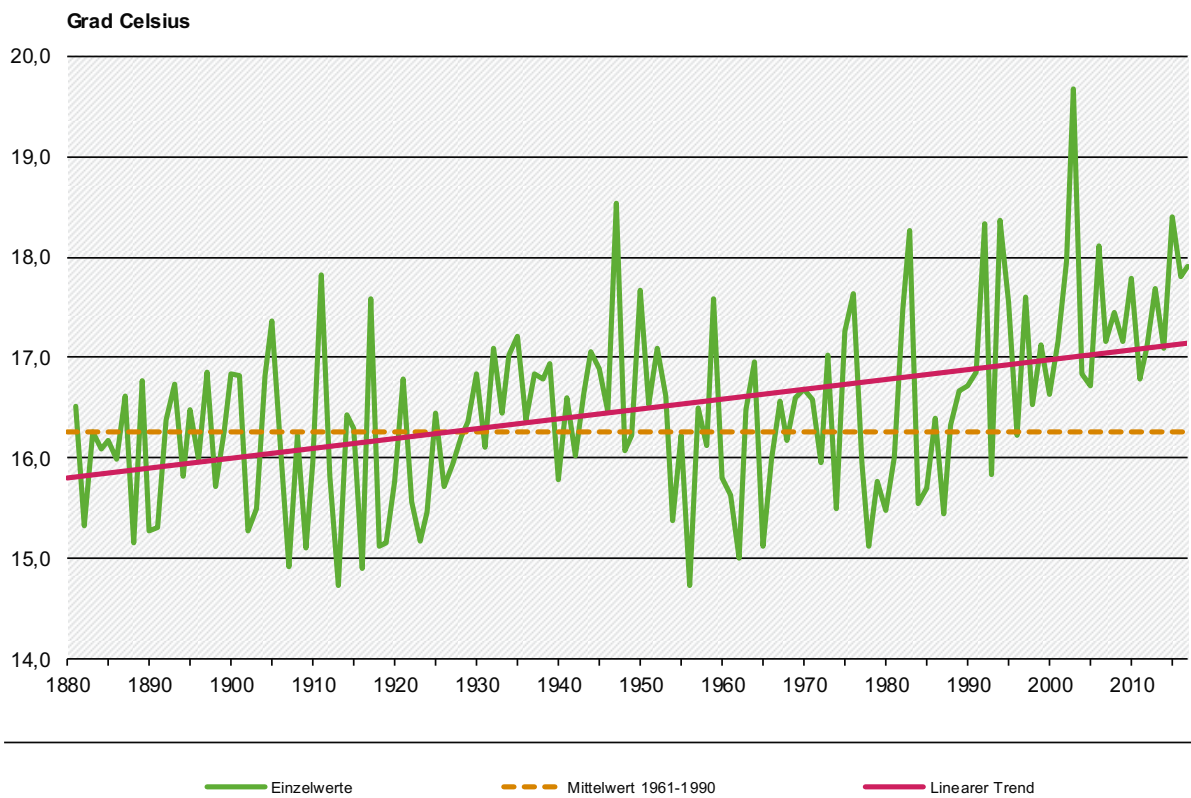


\* lineare Regressionsgerade über alle dargestellten Indikator-Werte

Quelle: Datschur Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 07/05/2018

**Bild 2.5:** Anzahl der Tage mit einem Lufttemperatur-Maximum über 30 °C

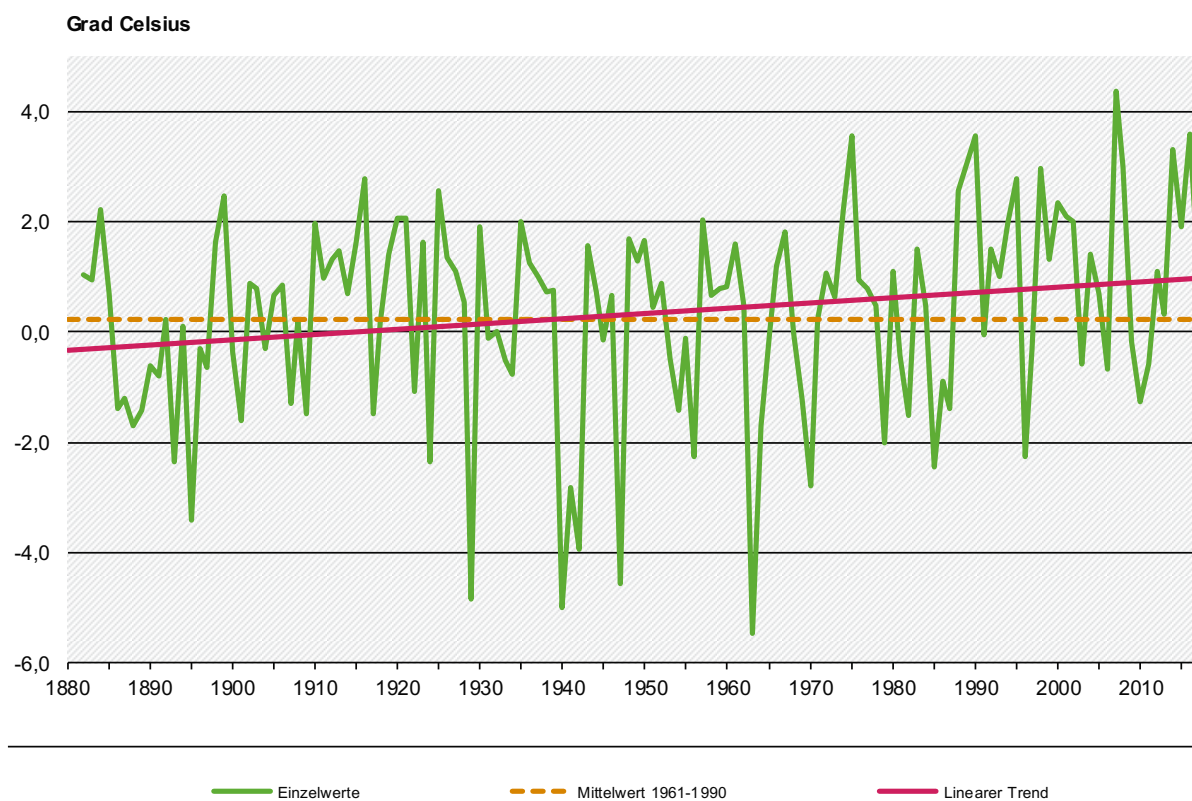
Die mittleren Tagesmitteltemperaturen im Sommer in Deutschland (Bild 2.6) verzeichnen einen Anstieg um 1,3 °C und unterscheiden sich nur wenig vom Jahrestrend mit 1,4 °C (Bild 2.4).



Quelle: Dutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 07/05/2018

**Bild 2.6:** Mittlere Tagesmitteltemperatur im Sommer in Deutschland 1881 bis 2017

Auch die mittleren Tagesmitteltemperaturen zeigen eine Erwärmung über den Beobachtungszeitraum, die jedoch schwächer ausfällt (Bild 2.7). Das bedeutet, dass die Winter in Deutschland tendenziell milder geworden sind.



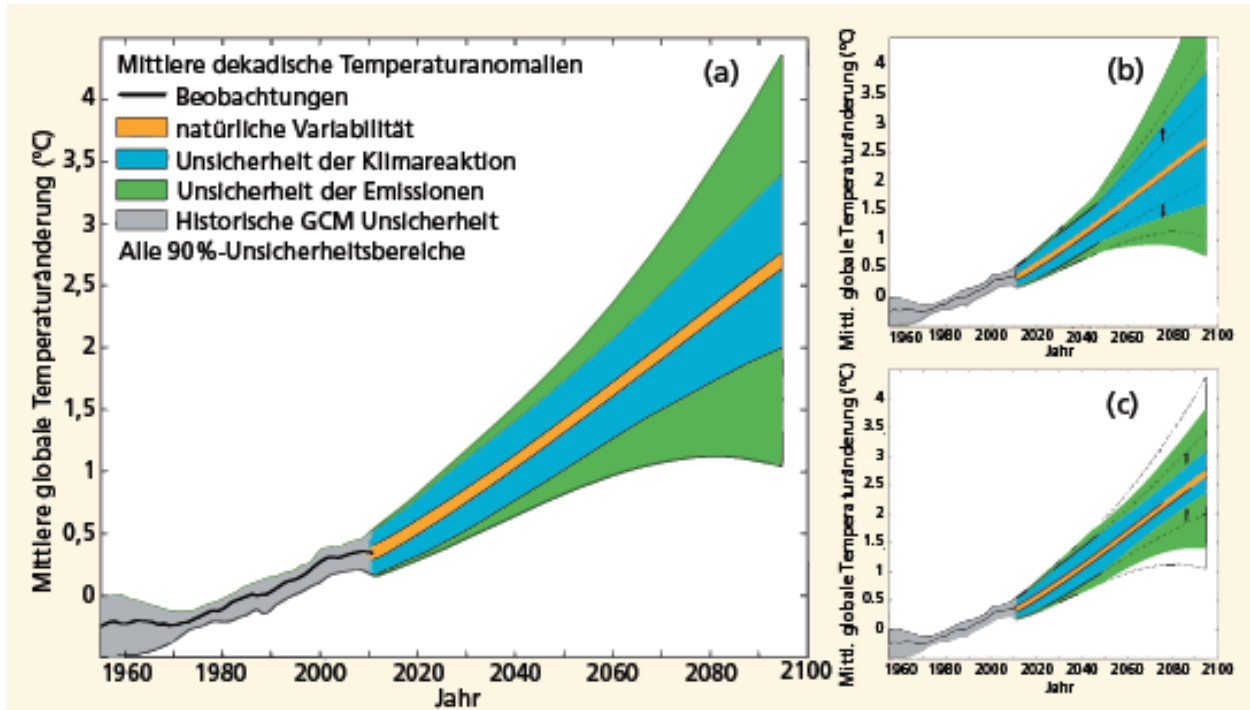
Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 07/05/2018

**Bild 2.7:** Mittlere Tagesmitteltemperatur im Winter in Deutschland 1881 bis 2017

Zusammenfassend kann für Deutschland festgestellt werden, dass extreme Wärmeereignisse seit 1881 zugenommen haben und Kälteereignisse weniger werden. Beide Trends zeigen einen linearen Verlauf.

### 2.1.2 Betrachtungszeitraum (Prognosezeitraum) für Klimawandeleinfluss sowie Ermittlung relevanter Temperaturverläufe für diesen Zeitraum

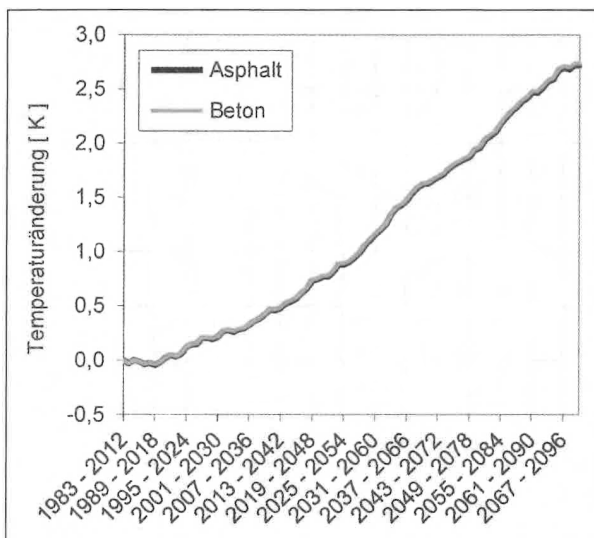
Der Prognosezeitraum der meisten Studien für den Klimawandel geht bis zum Jahr 2100. Dabei streuen die Ergebnisse hinsichtlich des Temperaturanstiegs naturgemäß erheblich, umso weiter der Prognosezeitpunkt entfernt liegt. Wie aus Bild 2.8 gut zu erkennen ist, gibt es einen orangenen Bereich, der die natürliche Variabilität darstellt. Demnach ist die wahrscheinlichste Zunahme der mittleren globalen Temperatur zwischen 2,5 und 3,0 °C anzusetzen. Durch die Unsicherheiten aus der Klimareaktion (blau) und der der Emissionen (grün) kann die Erwärmung im Jahr 2100 aber durchaus zwischen 1,0 bis über 4,0 °C liegen. Der angegebene Unsicherheitsbereich von 90 % sagt aus, dass die berechnete Temperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % in diesem Bereich liegt.



**Bild 2.8:** Schematische Darstellung der relativen Bedeutung verschiedener Unsicherheitsquellen und ihrer Entwicklung über die Zeit [IPCC, 2014]

Der Dimensionierungshorizont für Betondecken liegt nach den gültigen Regelwerken [RStO 12] und [RDO Beton 09] für den Anwendungsbereich des öffentlichen Straßenverkehrs derzeit bei 30 Jahren. Geht man vom Jahr 2020 aus, wäre demzufolge das Jahr 2050 von Interesse. Wenn künftige Straßenkonstruktionen in Betonbauweise dauerhafter ausgebildet werden können, ist auch ein Nutzungszeitraum von bis zu 50 Jahren denkbar. Ausgehend vom Jahr 2020 wäre das das Jahr 2070. Das Jahr 2100 kann hier ebenfalls mitbetrachtet werden, da die meisten relevanten Klimaprognosen dort enden.

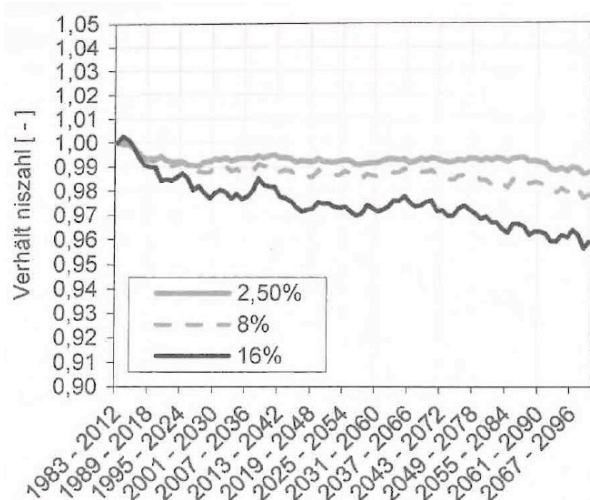
In [Heft 1128] wurde der Einfluss des Klimawandels auf die Dimensionierung von Straßenbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise untersucht. Ausgehend von einem ähnlichen Verlauf der Zunahme der Jahresmitteltemperaturen wurde hier durch Simulationsrechnungen die wahrscheinliche Änderung der Oberflächentemperatur für Asphalt- und Betonstraßen ermittelt. Das Bild 2.9 zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Befestigungsarten hinsichtlich der Temperaturänderungen der jeweiligen Oberflächen, obwohl sich die thermophysikalischen Eigenschaften deutlich unterscheiden.



**Bild 2.9:** Änderung der 30-jährigen mittleren Oberflächentemperaturen (Durchschnitt aller untersuchten Varianten und Emissionsszenarien) bezogen auf die Temperaturen des Zeitraums 1983-2012 (Normierungszeitraum) - [Heft 1128]

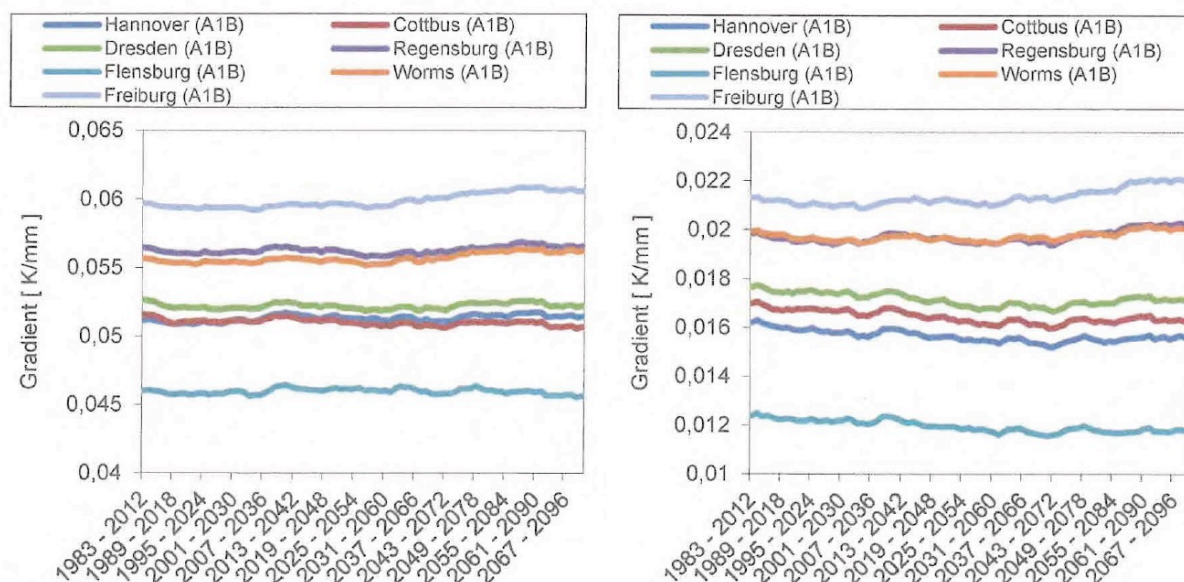
Bis zum Jahr 2100 wird nach [Heft 1128] eine durchschnittliche Erhöhung der Oberflächentemperaturen um 2,7 K projiziert. Vor dem Hintergrund der Studien zur Lufttemperaturerhöhung scheinen die Ergebnisse in einem plausiblen Bereich zu liegen.

Weiter wird in [Heft 1128] für die Betonbauweise nach dem derzeit angewendeten semiprobabilistischen Verfahren bei Überschreitungshäufigkeiten 2,5 %, 8,0 % und 16,0 % (Nachweise 1 bis 6) die Änderung der simulierten maßgebenden Temperaturgradienten vorgenommen. Während bei Überschreitungshäufigkeiten von 2,5 % und 8,0 % bis zum Jahr 2100 der Verlauf der Gradienten als nahezu konstant angesehen werden kann, wird bei der Überschreitungshäufigkeit von 16,0 % (Ermüdungsnachweise) eine Verringerung um max. 4 % festgestellt (Bild 2.10). Der Ermüdungsnachweis ist in fast allen Anwendungsfällen entscheidend.



**Bild 2.10:** Relative Änderung der auf den Zeitraum 1983-2012 normierten Gradienten, Mittelwert aller untersuchten Varianten und Emissionsszenarien [Heft 1128]

Die regionalen Unterschiede werden in [Heft 1128] anhand ausgewählter Standorte ebenfalls für Überschreitungshäufigkeiten von 2,5 % und 16,0 % betrachtet. Auf den Lastfall mit 4,0 % Überschreitungshäufigkeit wurde verzichtet, da dieser so gut wie nie maßgebend wird.



**Bild 2.11:** Mittlere Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit von 2,5 % (links) und 16,0 % (rechts) jeweils beim Emissionsszenario A1B, alle Belastungsklassen und Bauweisen [Heft 1128]

In Bild 2.11 ist gut zu erkennen, dass die regional unterschiedlichen Klimaeinflüsse zu abweichenden mittleren maßgebenden Gradienten führen, aber einen geringen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung haben.

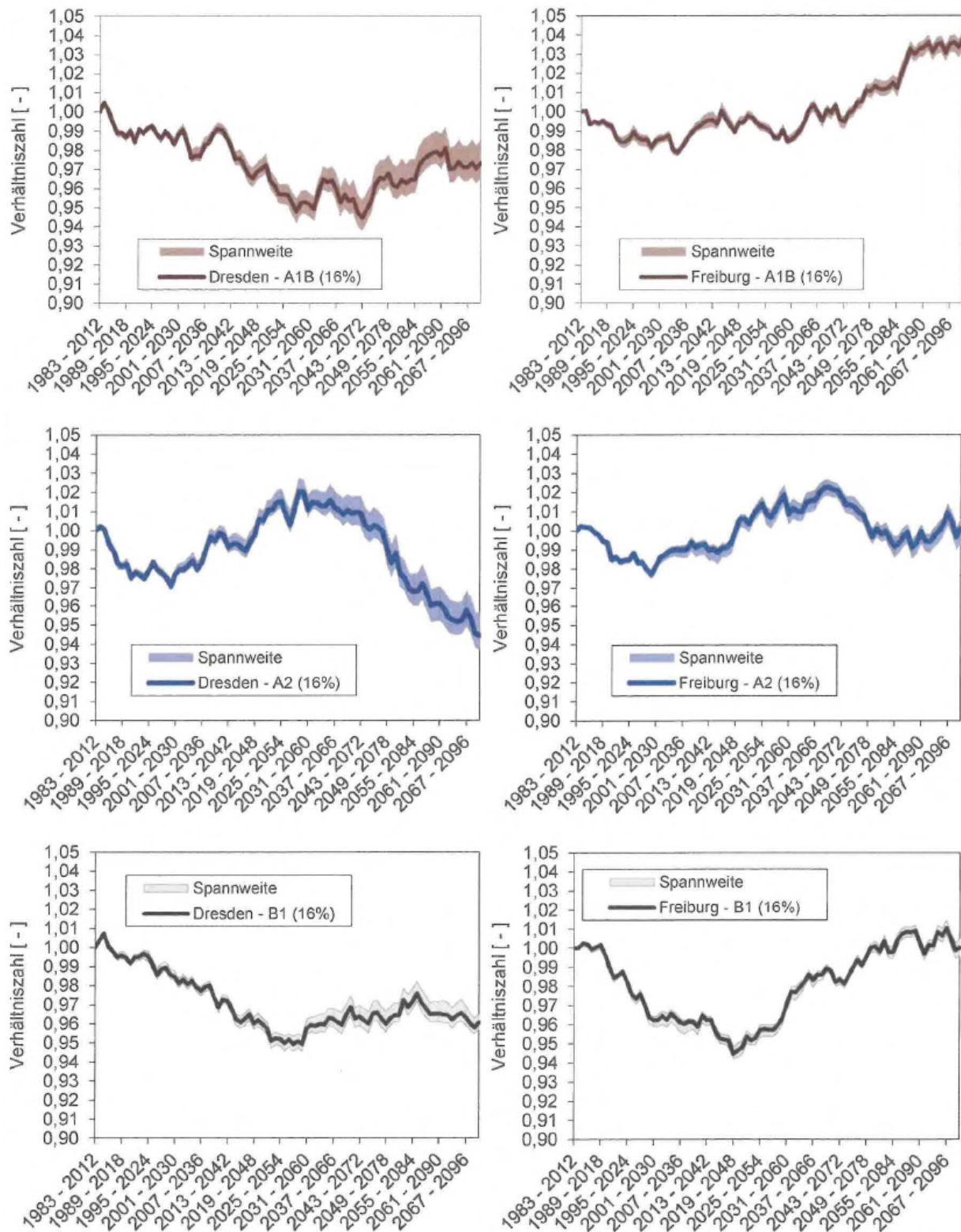
Das jeweils verwendete Klimaszenario (siehe hierzu auch Bild 2.2) spielt hingegen eine große Rolle. Ein Vergleich der Standorte Dresden und Freiburg bei einer Überschreitungshäufigkeit von 16,0 % zeigt dies

eindrucksvoll. Weiterhin ist auch zu erkennen, dass die Änderungen aller untersuchten Emissionsszenarien und Überschreitungshäufigkeiten in Freiburg stets höher sind als in Dresden (Bild 2.12).

Die projizierten klimatischen Veränderungen haben also einen regional unterschiedlichen Einfluss hinsichtlich der Betonbauweise, wobei es im Mittel nur zu geringen Veränderungen der maßgebenden Gradienten über den Betrachtungszeitraum kommt.

Die thermodynamischen Materialparameter sowie die Belastungsklassen und Bauweisen haben nur einen geringen Einfluss auf die zeitliche Veränderung der Temperaturgradienten.





**Bild 2.12:** Vergleich der Standorte Dresden (links) und Freiburg (rechts) - Relative Änderung der auf den Zeitraum 1983-2012 normierten Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit 16,0 % in Abhängigkeit der Emissionsszenarien nach [Heft 1128]

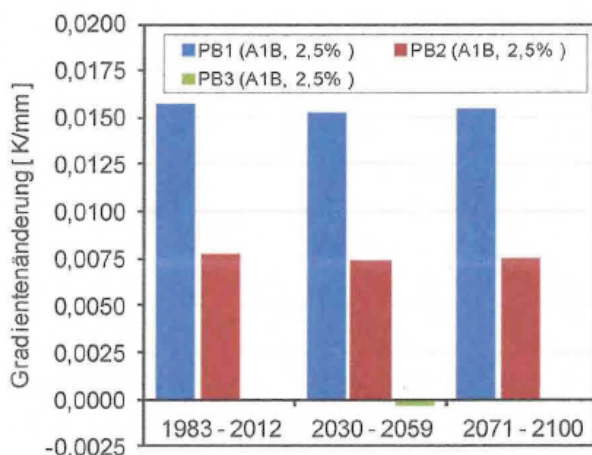
Naturgemäß haben die thermophysikalischen Materialeigenschaften grundsätzlich einen erheblichen Einfluss auf die mittleren Gradienten. In [Heft 1128] wurden folgende Parameter variiert:



Parameter der Betondecke	PB1	PB2	PB3
Wärmeleitfähigkeit [W/m × K]	1,650	1,825	2,000
Spez. Wärmekapazität [J/(kg × K)]	880	940	1.000
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2.200	2.300	2.400
Temperaturleitfähigkeit [cm <sup>2</sup> /h]	30,000	30,389	30,682
Albedo, kurzwellig [-]	0,100	0,225	0,350
Albedo, langwellig [-]	0,030	0,035	0,040

**Tab. 2.2:** Thermophysikalische Materialkennwerte für Beton in Abhängigkeit von den untersuchten Parametervarianten aus [Heft 1128]

Ein Vergleich der Parameterkombinationen zeigt, dass sich die Gradienten zwar maßgeblich, aber nicht in der zeitlichen Prognose bezüglich eines Emissionsszenarios (Bild 2.13) unterscheiden. Das Verhältnis zwischen den Varianten der Parameterkombination bleibt nahezu gleich.



**Bild 2.13:** Änderung der mittleren Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit von 2,5 % bezogen auf den Mittelwert der Parameterkombination PB3 des Zeitraums 1983-2012, Emissionsszenario A1B aus [Heft 1128]

Des Weiteren wurden auch die Spannweiten der Gradienten im zeitlichen Verlauf bei Verwendung der drei Klimaszenarien verglichen und kein qualitativer Unterschied zwischen den mittleren Gradienten und den Spannweiten detektiert.

Es konnte also festgestellt werden, dass die thermophysikalischen Materialparameter die Temperaturzustände und somit die Gradienten maßgeblich beeinflussen, jedoch kaum Einfluss auf die zeitlichen Änderungen infolge eines Klimaszenarios haben.

Hinsichtlich der bislang angewandten Bauweisen und Belastungsklassen wurde in [Heft 1128] festgestellt, dass die Ergebnisse der simulierten Temperaturzustände im Mittel keine signifikanten Veränderungen der Gradienten, bezogen auf die maßgebenden Gradienten des Bezugszeitraums 1983-2012, ergeben.

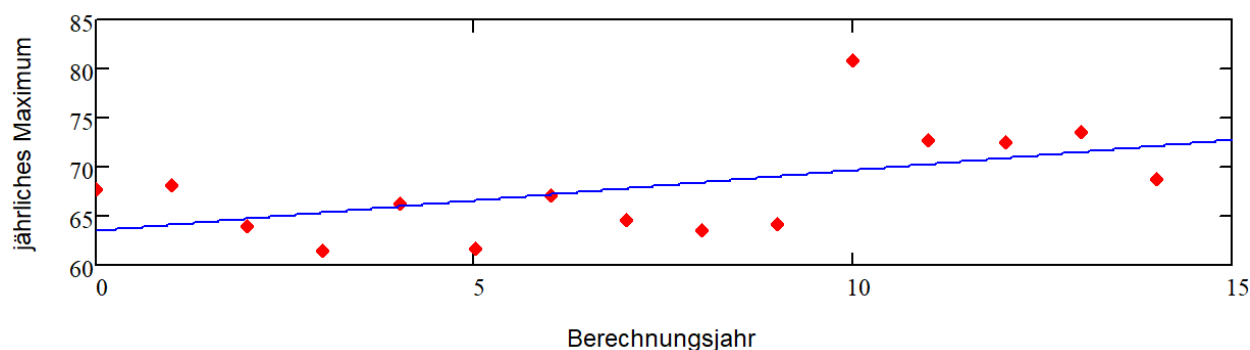
In der Dimensionierung und der Substanzbewertung spielen zwei klimatisch bedingte Parameter die entscheidende Rolle, zum einen die mittlere Plattentemperatur und zum anderen die Temperaturgradienten in der Betondecke [FE 08.0254/2017]. Beide Parameter sind nicht nur von den klimatischen Bedingungen abhängig, sondern auch von der Betondeckendicke und den baustofflichen Parametern. Für ein und dieselbe Betondecke sind die Dicke und die baustofflichen Parameter jedoch als konstant hinsichtlich der Fragestellung anzunehmen, so dass der aus der Luft abgeleitete Wertebereich der Oberflächentemperatur der entscheidende Parameter ist.

### 2.1.3 Auswertung Temperaturmessdaten ausgewählter BAB-Messstationen und Verknüpfung dieser mit den DWD-Klimadaten

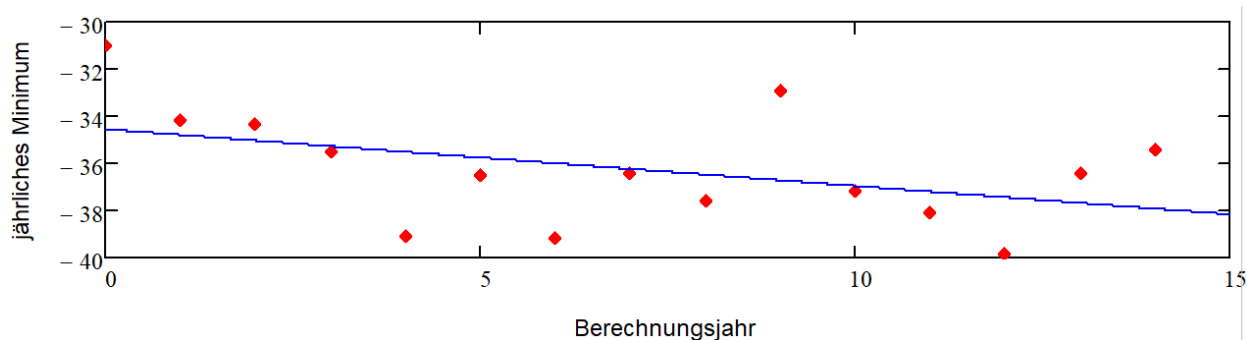
Im Zuge der Bearbeitung des aktuell noch nicht abgeschlossenen Forschungsvorhabens FE 08.0254/2017/KRB der BASt wurde eine das gesamte Bundesgebiet abdeckende Datengrundlage für die Temperaturzustände in Betonstraßenplatten geschaffen. Dabei wurden über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren (2001-2015) die stündlichen Temperaturzustände in einer 30 cm dicken Betonfahrbahnplatte simuliert. Aus diesen Temperaturwerten wurden jeweils der mechanisch äquivalente Temperaturgradient und die mittlere Plattentemperatur berechnet. Als mechanisch äquivalenter Temperaturgradient ist dabei der Gradientenwert definiert, welcher die gleiche Plattenbiegung erzeugt wie der tatsächlich in der Platte vorhandene Temperaturzustand.

Als Grundlage für die Simulationsrechnungen dienten die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. Die Berechnungen wurden für 328 über das Bundesgebiet verteilte Stationen durchgeführt. Die so generierte Datenbasis stellt die beste derzeit verfügbare empirische Grundlage für die Prognose temperaturbedingter Belastungen von Straßenbetonplatten dar.

Von besonderer Bedeutung für die Dimensionierung von Betonfahrbahnen sind die extremen Werte des Temperaturgradienten im Plattenquerschnitt. Um eine Vorstellung über die zeitliche Entwicklung dieser Extremwerte zu erlangen, wurden die jährlichen Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Stationen betrachtet. Bild 2.14 und Bild 2.15 zeigen dies am Beispiel der Station 164 (Angermünde).



**Bild 2.14:** Jährliche Maxima der Gradientenwerte für die Station 164 (Angermünde)



**Bild 2.15:** Jährliche Minima der Gradientenwerte für die Station 164 (Angermünde)

Es ist deutlich ersichtlich, dass über den Betrachtungszeitraum an der Station 164 die jährlichen Maximalwerte größer und die jährlichen Minimalwerte kleiner werden. Die extremen Temperaturzustände nehmen also zu. Eine Quantifizierung für diese Tendenz liefert jeweils der Anstieg der linearen Regressionskurve (blau).

Um einen allgemeinen Trend für das Gebiet der Bundesrepublik sichtbar zu machen, wurden entsprechende Auswertungen für alle 328 Stationen durchgeführt.

Dabei ergaben sich für 297 Stationen (90 % aller Stationen) positive Anstiegswerte der Regressionsgeraden für die Maximalwerte. Der durchschnittliche Anstiegswert betrug 0,4. Das bedeutet, dass der durchschnittliche jährliche Anstieg des maximal auftretenden Temperaturgradienten bei 0,4 K/m lag.

Ein anderes Bild ergab sich in Bezug auf die Minimalwerte. Hier zeigte sich, dass der für die Station 164 sichtbare Trend nicht repräsentativ für das Bundesgebiet ist. Nur für 163 Stationen (50 % aller Stationen) wurde ein negativer Anstieg der Regressionsgeraden für die Minimalwerte ermittelt. Der durchschnittliche Anstiegswert lag bei  $-0,01$ . Es ist also festzustellen, dass es bei den minimalen Extremwerten keine relevante Veränderung gab.

In einem weiteren Analyseschritt wurden die Überschreitungshäufigkeiten extremer Gradientenwerte untersucht. Als Schwellenwerte wurden dabei 60 K/m für die Maximalwerte und  $-30$  K/m für die Minimalwerte gewählt.

Tab. 2.3 zeigt die über alle Stationen gemittelten Werte für die jährlichen Überschreitungshäufigkeiten. In Bild 2.16 und Bild 2.17 werden die Trends visualisiert.

Berechnungsjahr	Mittlere Anzahl der stündlichen Überschreitungen des oberen Schwellenwertes	Mittlere Anzahl der stündlichen Unterschreitungen des unteren Schwellenwertes
1	19,75	32,10
2	19,32	34,83
3	18,83	94,27
4	12,54	35,71
5	28,67	53,43
6	16,42	52,61
7	22,89	60,65
8	13,25	31,46
9	11,69	66,42
10	24,37	44,73
11	24,49	56,43
12	27,63	71,46
13	47,31	45,35
14	40,72	37,15
15	56,51	81,01

Tab. 2.3: Mittlere Anzahl der stündlichen Überschreitungen der Schwellenwerte

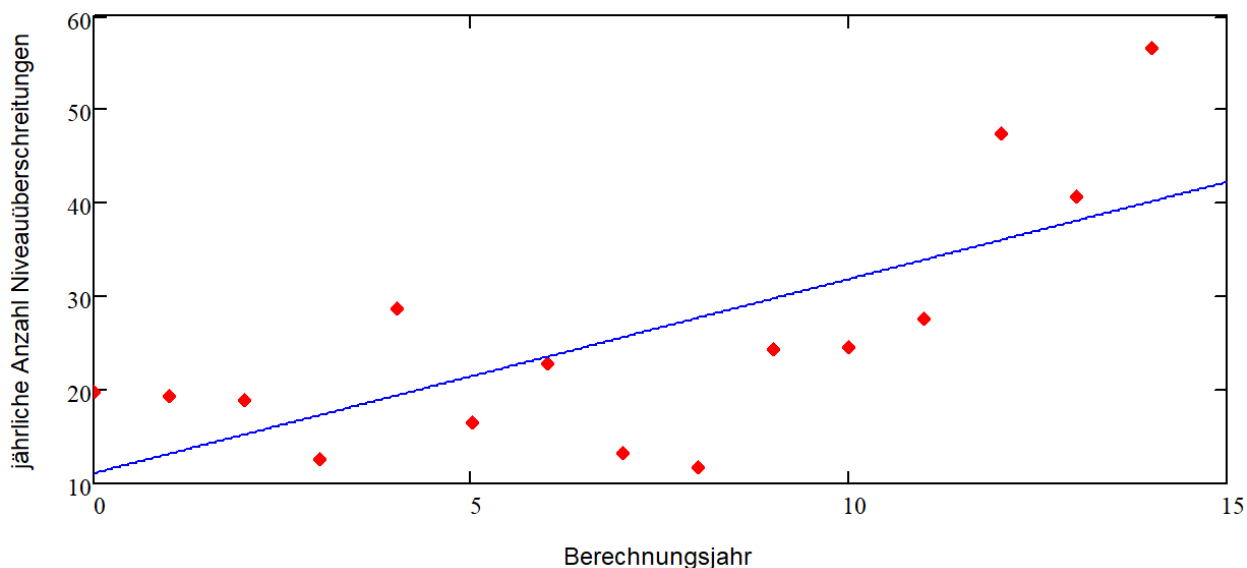
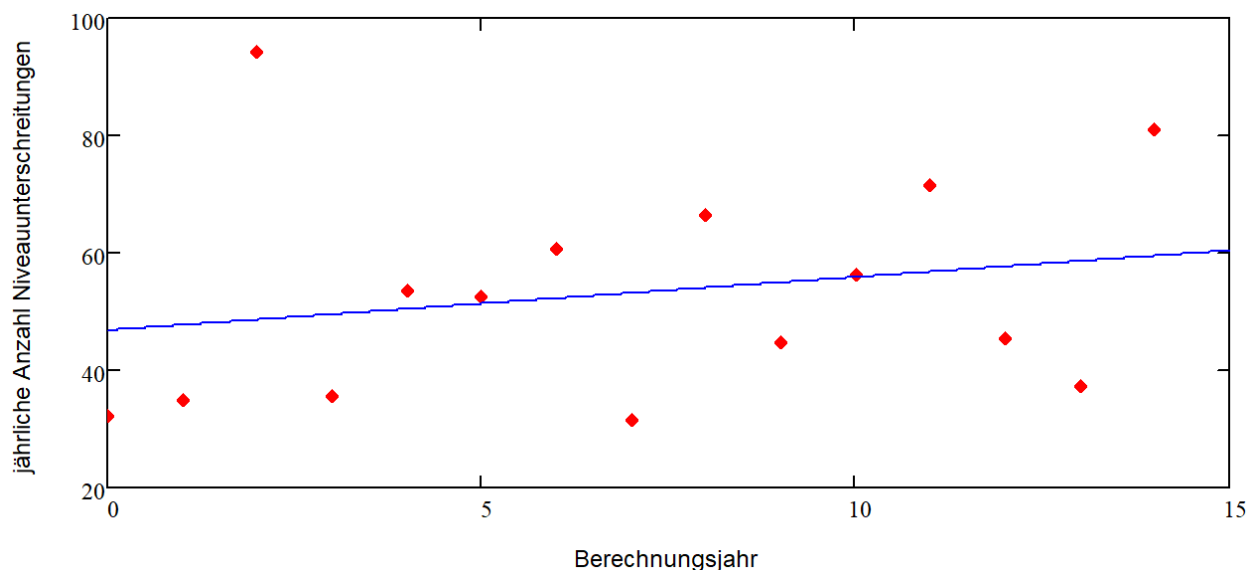


Bild 2.16: Mittlere Anzahl der jährlichen Niveauüberschreitungen

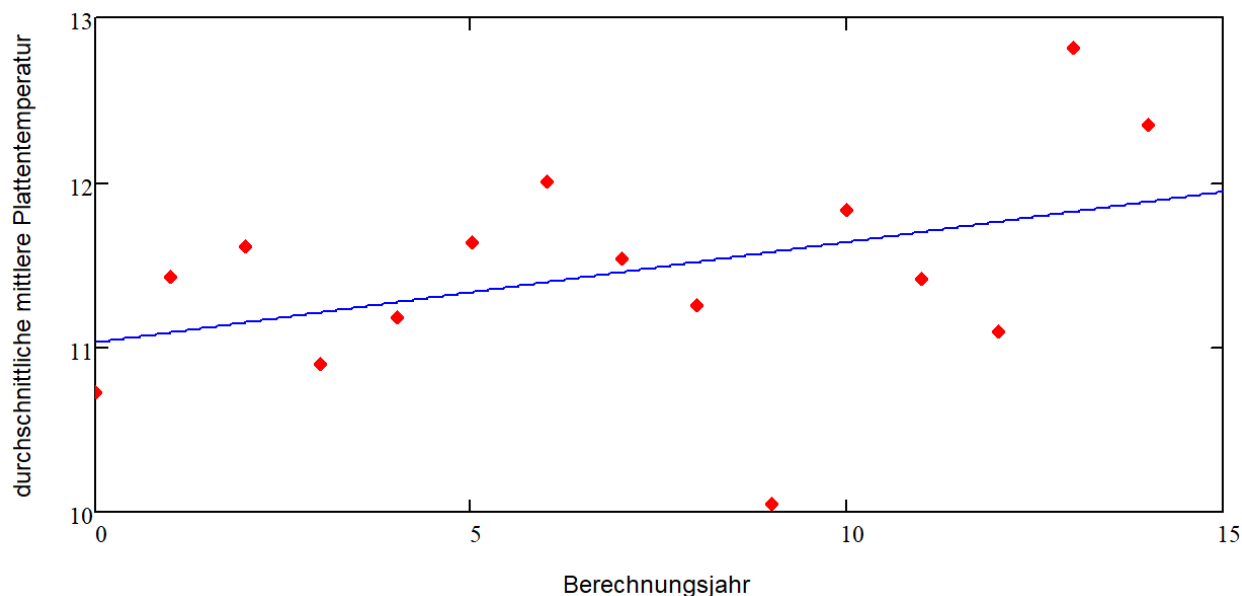


**Bild 2.17:** Mittlere Anzahl der jährlichen Niveauunterschreitungen

Es ist deutlich erkennbar, dass sich die mittlere Anzahl der Überschreitungen des gewählten Schwellenwertes im Betrachtungszeitraum tendenziell erhöht. Der mittlere Anstieg beträgt 2 Stundenwerte pro Jahr.

Für die Unterschreitungshäufigkeit des unteren Schwellenwertes ist ebenfalls ein Anstieg erkennbar. Er fällt mit ca. 0,9 Stundenwerten pro Jahr aber deutlich kleiner aus.

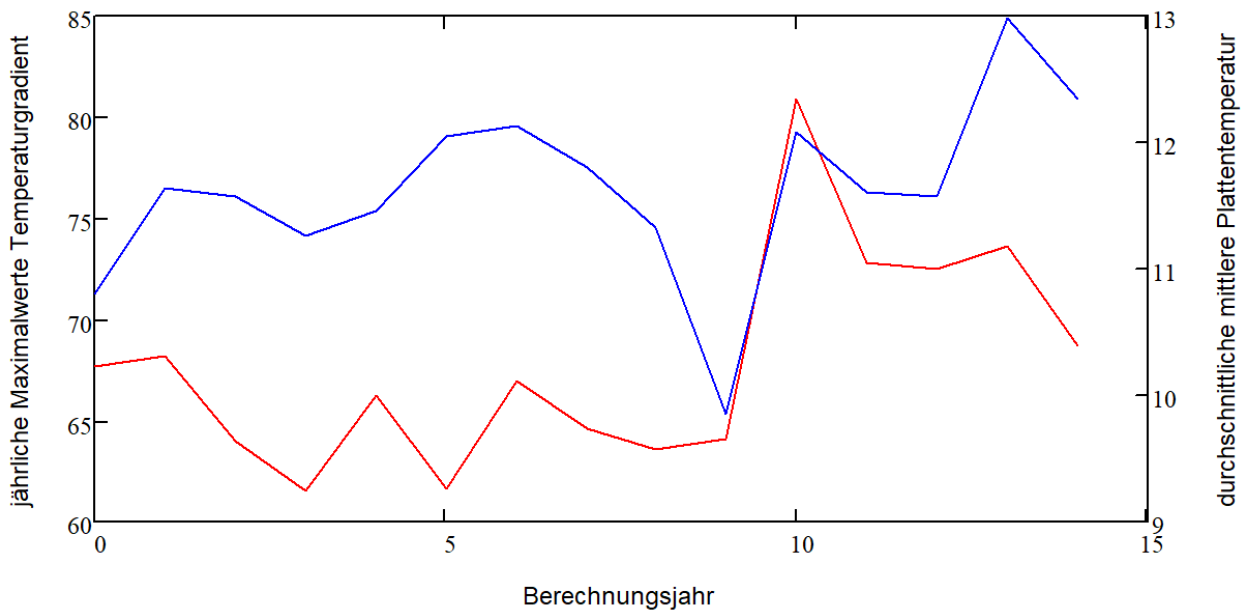
Um eine Korrelationsbetrachtung mit der Entwicklung der Lufttemperatur zu ermöglichen, wurden auch die Werte für die mittlere Plattentemperatur analysiert. Dazu wurden die jährlichen Durchschnittswerte berechnet. In Bild 2.18 sind die Ergebnisse zusammengefasst.



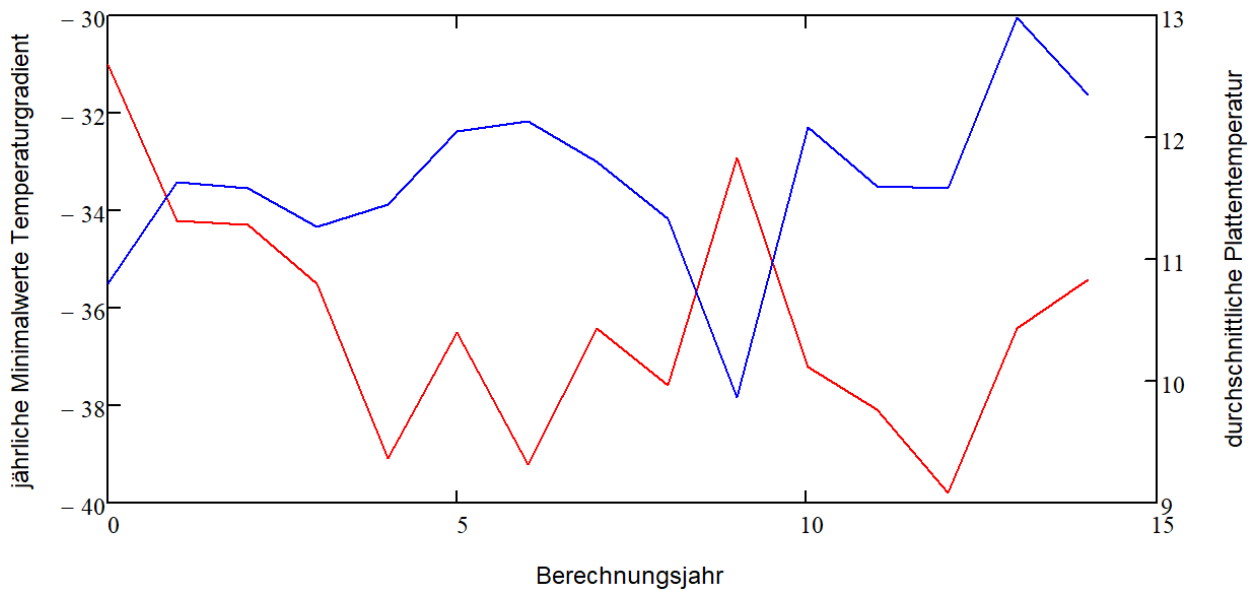
**Bild 2.18:** Durchschnittswerte der mittleren jährlichen Plattentemperatur

Der deutlich sichtbare Anstieg der mittleren Plattentemperatur beträgt 0,06 K pro Jahr.

Dass die mittlere Plattentemperatur mit einer allgemeinen Klimaerwärmung korreliert ist, erscheint evident. Die gezeigten Analysen lassen vermuten, dass damit auch eine Zunahme der Intensität und Anzahl extremer Temperaturgradienten einhergeht. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wurde zunächst beispielhaft für die Station 164 die Korrelation der jährlichen Extremwerte für die Temperaturgradienten mit den durchschnittlichen mittleren Plattentemperaturen analysiert. Bild 2.19 und Bild 2.20 zeigen die betreffenden Kurvenverläufe.



**Bild 2.19:** Verlauf der jährlichen Maximalwerte der Temperaturgradienten (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde)

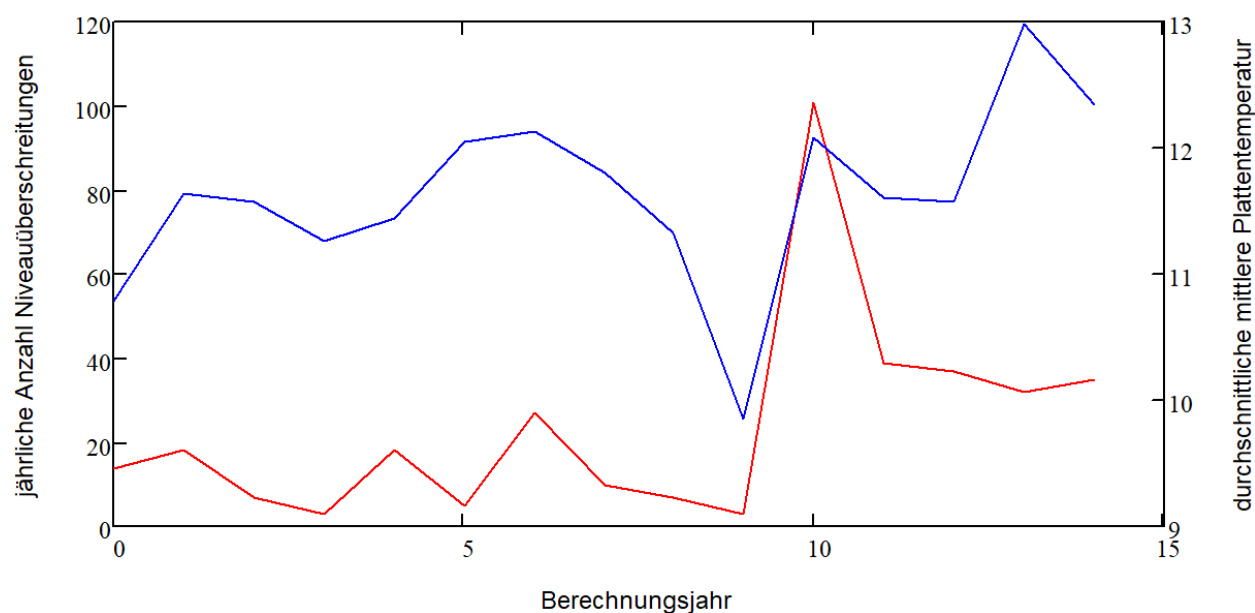


**Bild 2.20:** Verlauf der jährlichen Minimalwerte der Temperaturgradienten (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde)

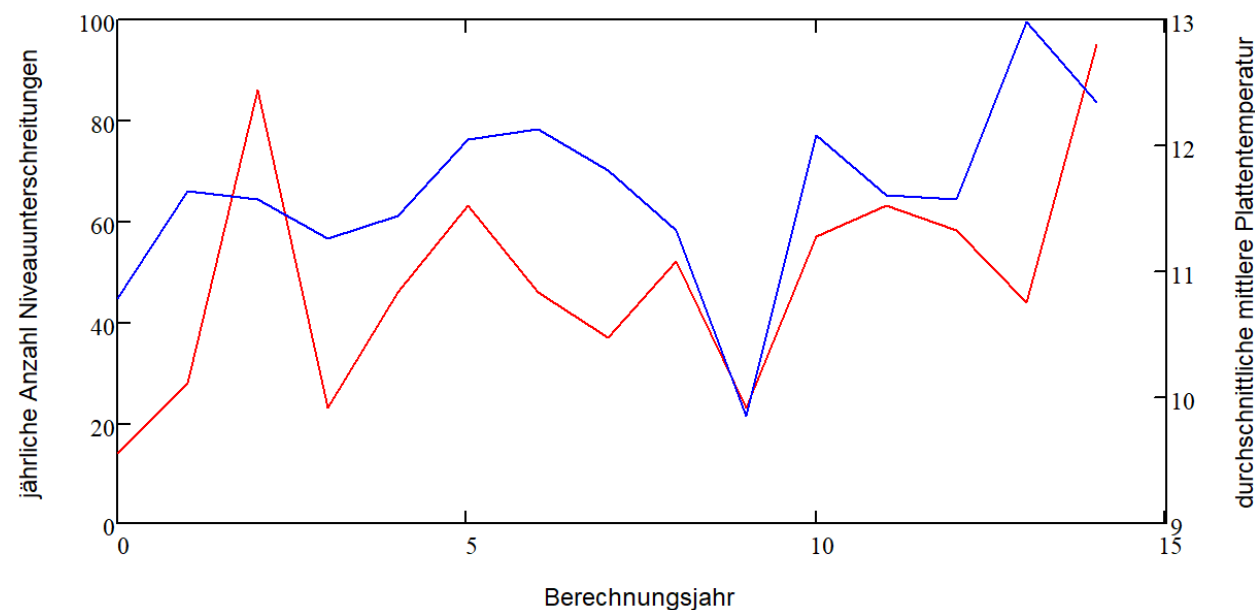
Die Kurvenverläufe zeigen eine gewisse Korrelation. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,4 bzw. -0,46, was auf einen vorhandenen, aber nicht sehr starken Zusammenhang hindeutet.

Um eine für das gesamte Bundesgebiet gültige Aussage treffen zu können, wurden die Korrelationskoeffizienten für alle 328 Stationen bestimmt. Bezüglich der maximalen Gradientenwerte ergab sich ein durchschnittlicher Korrelationskoeffizient von 0,355. Die Spanne reichte dabei von -0,63 bis 0,79, wobei die meisten Werte im Bereich zwischen 0,4 und 0,6 lagen. Die Korrelation zwischen der mittleren jährlichen Plattentemperatur und den jährlichen Extremwerten der Temperaturgradienten ist also vorhanden, wenn auch nicht sehr stark. Noch schwächer ist der Zusammenhang bezüglich der negativen Extremwerte. Hier beträgt der durchschnittliche Korrelationskoeffizient -0,16 bei einer Spanne von -0,75 bis 0,59. Es ist aber zu beachten, dass es sich bei den Extremwerten um Einzelwerte handelt, welche durch singuläre Ereignisse erzeugt werden. Dies erklärt auch die enorme Spannweite bei den Korrelationskoeffizienten.

Eine statistisch besser untermauerte Aussage ist bei Betrachtung der Überschreitungshäufigkeiten zu erwarten. Bild 2.21 und Bild 2.22 zeigen beispielhaft die Zusammenhänge für die Station 164. Die gewählten Schwellenwerte sind wiederum 60 K/m und -30 K/m.



**Bild 2.21:** Verlauf der jährlichen Niveauüberschreitungen (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde)



**Bild 2.22:** Verlauf der jährlichen Niveauunterschreitungen (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde)

Die Korrelationskoeffizienten liegen bei 0,42 und 0,5. Der Zusammenhang ist also etwas stärker als bezüglich der Extremwerte.

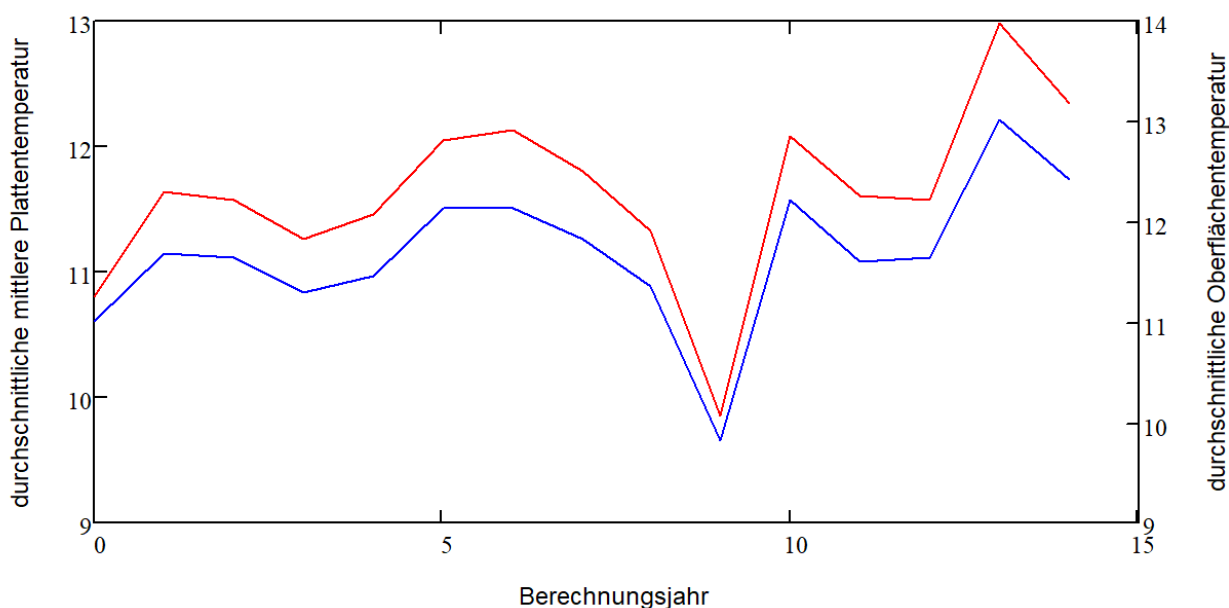
Die Analyse sämtlicher 328 Stationen ergab einen durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von 0,34 für die jährlichen Überschreitungshäufigkeiten der Schwelle von 60 K/m. Die Spanne reichte von -0,56 bis 0,79.

Bezüglich der jährlichen Unterschreitungshäufigkeiten des Schwellenwertes von -30 K/m ergab sich ein durchschnittlicher Korrelationskoeffizient von 0,25, mit einer Spanne von -0,33 bis 0,76.

Die Intensität des Zusammenhanges zwischen den Überschreitungshäufigkeiten und der mittleren Plattentemperatur liegt also etwa in der gleichen Größenordnung wie die Korrelation bezüglich der Extremwerte.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Analyse der vorliegenden Daten sowohl einen Anstieg der mittleren Plattentemperaturen wie auch eine Zunahme der extremen Gradientenwerte zeigt. Die untersuchte Zeitspanne von 15 Jahren ist aber zu kurz, um hier bereits eine quantitative Aussage zu den absolut zu erwartenden Erhöhungswerten zu treffen. Der Zusammenhang zwischen der Erhöhung der mittleren Plattentemperatur und einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität extremer Gradientenwerte kann aber als nachgewiesen gelten. Im untersuchten Zeitabschnitt kam es zu einem durchschnittlichen jährlichen Anstieg des maximal auftretenden Temperaturgradienten um ca. 0,4 K/m (siehe oben). Der jährliche Anstieg der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur lag bei 0,06 K (siehe oben). Das bedeutet, dass bei einem Anstieg der mittleren Plattentemperatur von 1 K mit einer Erhöhung des maximalen Gradientenwertes um 6,7 K/m zu rechnen ist.

Um einen Zusammenhang mit den in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Trendwerten zur Oberflächentemperatur herzustellen, wurde die Korrelation zwischen der Oberflächentemperatur und der mittleren Plattentemperatur untersucht. Bild 2.23 zeigt die Verläufe der jährlichen mittleren Plattentemperaturen und die zugehörigen durchschnittlichen mittleren Plattentemperaturen für die Station 164.

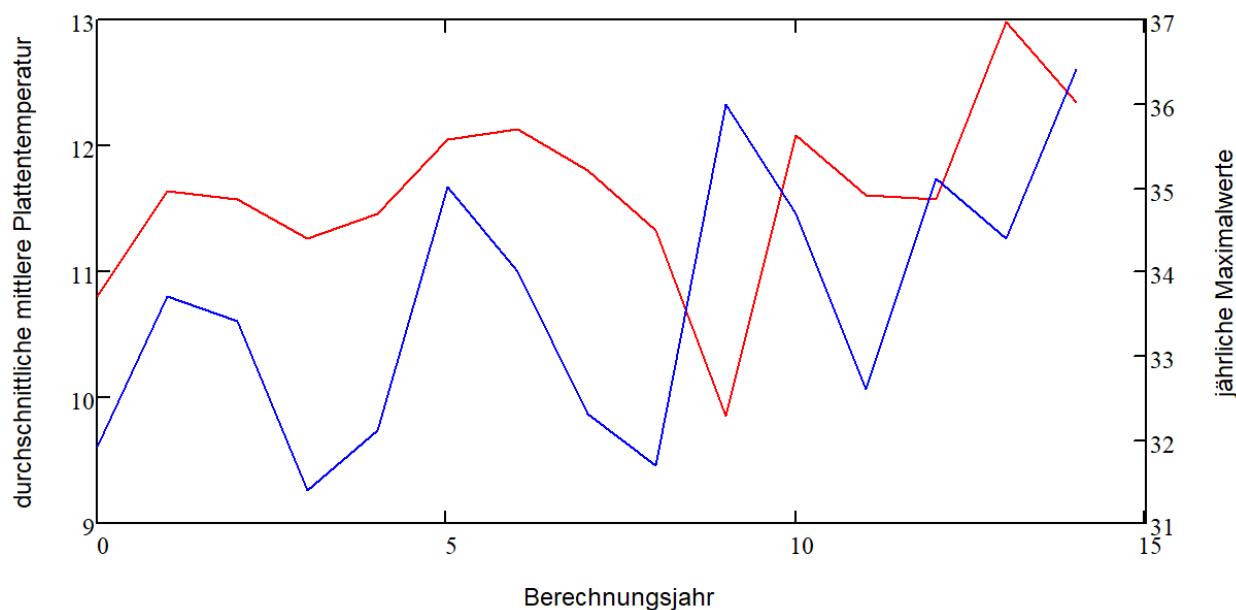


**Bild 2.23:** Verlauf der jährlichen Werte der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (rot) und der durchschnittlichen Oberflächentemperatur (blau)

Die Korrelation der dargestellten Temperaturverläufe ist offenkundig. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,996. Ein Anstieg der durchschnittlichen jährlichen Oberflächentemperatur von 1 K führt zu einem Anstieg der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur von 0,93 K.

Für alle 328 Stationen ergibt sich ein ähnliches Bild. Der durchschnittliche Korrelationskoeffizient beträgt 0,998. Der Minimalwert liegt mit 0,995 nur knapp darunter. Die Korrelation zwischen der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur und der durchschnittlichen Oberflächentemperatur ist also sehr eng.

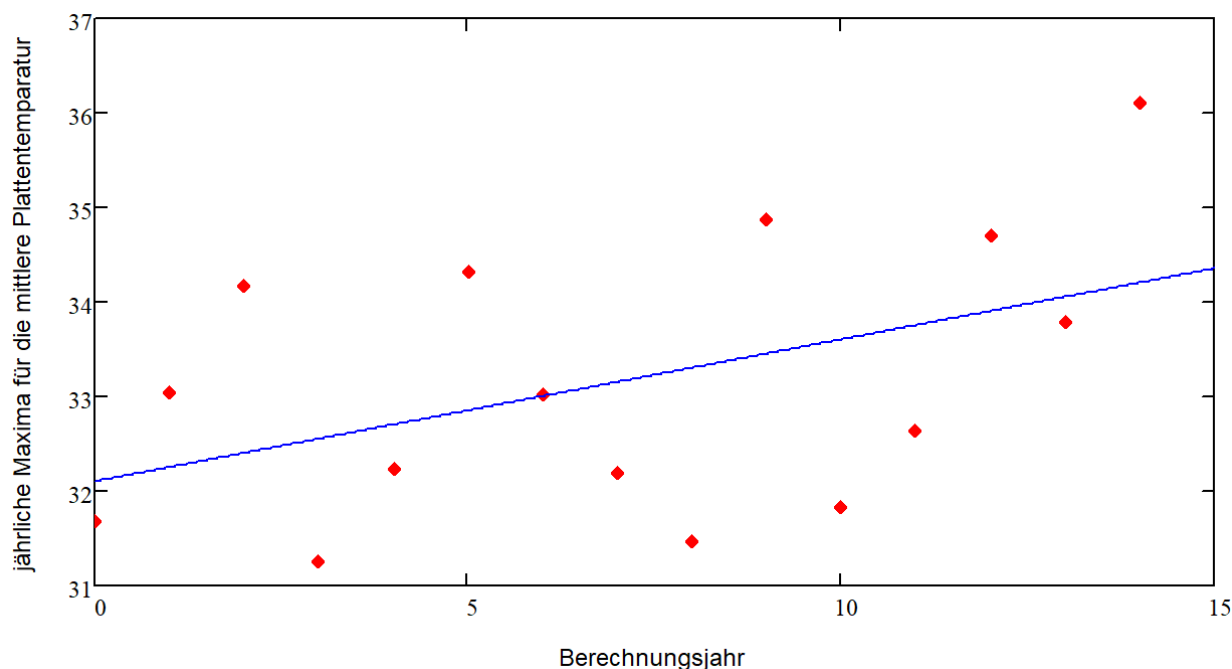
Interessant ist der Zusammenhang zwischen durchschnittlicher mittlerer Plattentemperatur und den jährlichen Extremwerten für die mittlere Plattentemperatur. In Bild 2.24 sind die zeitlichen Verläufe dieser Werte jeweils wieder für die Station 164 dargestellt.



**Bild 2.24:** Verlauf der jährlichen Werte der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (rot) und der jährlichen Maximalwerte für die mittlere Plattentemperatur (blau)

Die Korrelation ist relativ schwach (Korrelationskoeffizient: 0,18). Eine hohe jährliche Durchschnittstemperatur kann auch durch einen milden Winter bedingt sein und führt deshalb nicht zwangsläufig auch zu hohen Extremwerten. Der Trend zu höheren Temperaturen ist aber, sowohl bei den Mittelwerten, wie auch bei den Extremwerten unverkennbar.

Betrachtet man die über alle 328 Stationen gemittelten Werte für die jährlichen Extrema der mittleren Plattentemperatur, so ergibt sich der in Bild 2.25 dargestellte Zusammenhang.



**Bild 2.25:** Verlauf der über 328 Stationen gemittelten Werte für die Jährlichen Maximalwerte der mittleren Plattentemperatur

Ein Vergleich mit Bild 2.18 zeigt, dass die Maximalwerte überdurchschnittlich ansteigen. Ein Anstieg der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur von 1 K führt zu einem Anstieg der Maximalwerte um 2,5 K.



### 2.1.4 Abgrenzung sowie Bestimmung zukünftig relevanter mittlerer und extremer Temperaturzustände in Betondecken

Als ein für das vorliegende Forschungsthema geeigneter Prognosezeitraum werden 50 Jahre angesehen. Dieser Zeitraum ist langfristig genug, um für die jetzt und in näherer Zukunft anstehenden Dimensionierungsaufgaben relevant zu sein. Andererseits würde ein noch längerer Betrachtungszeitraum die Unsicherheit der Prognose deutlich erhöhen.

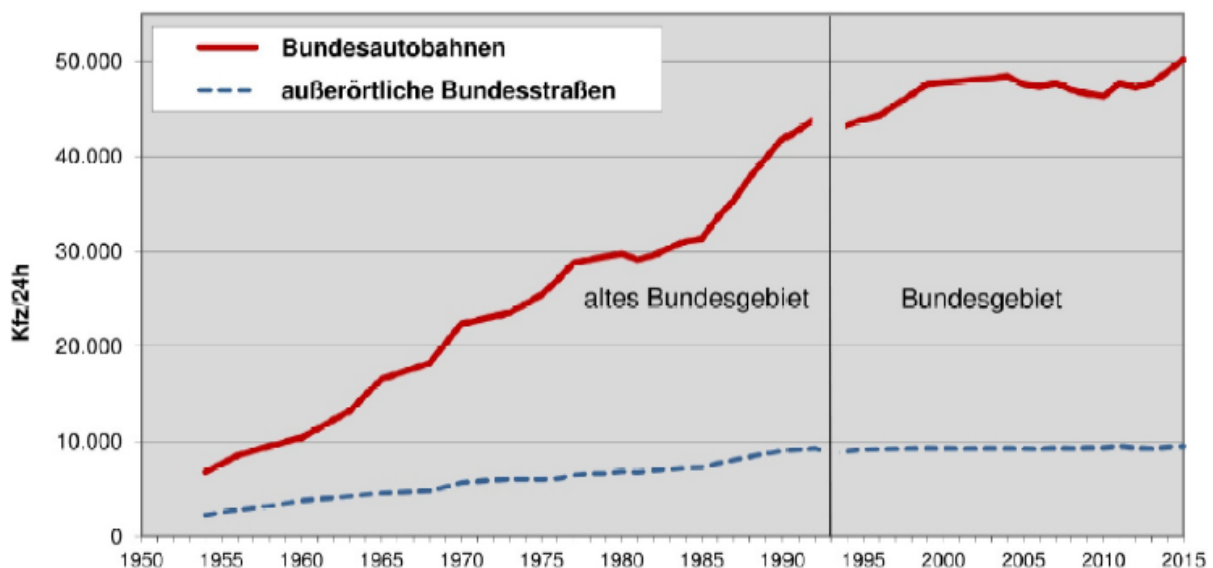
Die in Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 erläuterten Untersuchungsergebnisse erlauben eine begründete Voraussage zu den künftig zu erwartenden Temperaturzuständen in den Betondecken. Kapitel 2.1.2 liefert dabei schwerpunktmäßig Aussagen zu den längerfristigen Klimaentwicklungen und der damit verbundenen Entwicklung der Oberflächentemperatur. Die Analysen in Kapitel 2.1.3 beziehen sich auf einen kürzeren Betrachtungszeitraum, liefern aber auf einer sehr breiten Datenbasis gut abgesicherte Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen der Oberflächentemperatur und anderen Temperaturwerten.

Wie Kapitel 2.1.2 zu entnehmen ist, ist in den nächsten 50 Jahren mit einem Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur der Betondecken von 1,5 K zu rechnen (Bild 2.9). In Kapitel 2.1.3 wurde dargestellt, dass die Entwicklung der mittleren Plattentemperatur fast identisch verläuft. Es kann also angenommen werden, dass sich die durchschnittliche mittlere Plattentemperatur ebenfalls um 1,5 K erhöht. Der in Kapitel 2.1.3 berechnete Zusammenhang zwischen mittlerer Plattentemperatur und maximalen Gradientenwerten zeigt, dass sich damit für die jährlichen Maximalwerte der Temperaturgradienten eine Erhöhung von 10 K/m ergibt. Die jährlichen Maximalwerte für die mittleren Plattentemperaturen würden sich um 3,75 K erhöhen. Für die mittleren Temperaturgradienten ist keine relevante Veränderung zu erwarten.

### 2.1.5 Verkehrsbelastung für den Betrachtungszeitraum

Die Entwicklung der Verkehrsbelastung ist ein Spiegelbild der allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung. Darüber hinaus haben aber auch politisch determinierte Randbedingungen und Veränderungen der Infrastruktur einen signifikanten Einfluss. So rückte Deutschland nach den politischen Umwälzungen Anfang der neunziger Jahre von einer Randlage in das Zentrum der EU. Entsprechend ergab sich eine Zunahme des Transitverkehrs vor allem in Ost-West-Richtung. Andererseits wurde durch den Neubau zunächst wenig befahrener Autobahnstrecken (z. B. BAB A20) die durchschnittliche DTV-Zahl auch gesenkt. Politische Steuerungsmaßnahmen (LKW-Maut) hatten ebenfalls einen Einfluss. Eine Aussage über die allgemeine Entwicklung der Verkehrsbelastung ist daher nur bei Betrachtung längerer Zeitabschnitte möglich.

In den regelmäßig von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) herausgegebenen Berichten zur Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen ([FITSCHEN/NORDMANN 2018] u. a.) sind längere Zeitreihen aufgeführt (Tab. 2.4, Bild 2.26).



**Bild 2.26:** Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen in der Bundesrepublik seit 1950 (aus [FITSCHEN/NORDMANN 2018])

Jahr	Autobahnen			außerörtliche Bundesstraßen		
	Netzlänge 1. Juli [km]	DTV [Kfz/24h]	JFL [Mrd. Kfz-km]	Netzlänge 1. Juli [km]	DTV [Kfz/24h]	JFL [Mrd. Kfz-km]
<b>gesamtes Bundesgebiet</b>						
2015	12.971	50.200	237,6	31.139	9.450	107,4
2014	12.933	48.900	230,8	31.366	9.390	107,5
2013	12.898	47.700	225,0	31.552	9.220	106,5
2012	12.862	47.200	221,4	31.705	9.310	107,8
2011	12.832	47.700	223,3	31.683	9.490	109,7
2010	12.816	46.300	216,8	31.701	9.320	107,9
2009	12.729	46.600	216,4	31.807	9.320	108,2
2008	12.620	47.000	217,3	31.917	9.230	107,8
2007	12.563	47.700	218,8	32.020	9.300	108,7
2006	12.447	47.300	214,8	32.127	9.180	107,7
2005	12.269	47.600	213,3	32.117	9.210	107,9
2004	12.109	48.400	214,6	32.067	9.270	108,8
2003	12.015	48.200	211,5	32.056	9.270	108,4
2002	11.886	48.100	208,6	31.990	9.230	107,8
2001	11.749	47.900	205,6	31.917	9.210	107,3
2000	11.614	47.800	203,4	31.879	9.270	108,2
1999	11.473	47.600	199,5	31.859	9.280	108,0
1998	11.368	46.500	193,1	31.838	9.240	107,3
1997	11.278	45.400	187,1	31.830	9.200	106,9
1996	11.218	44.300	181,7	31.888	9.150	106,8
1995	11.167	43.900	179,1	31.994	9.130	106,7
1994	11.111	43.300	175,7	32.124	8.970	105,2
1993	11.046	42.700	172,2	32.232	8.710	102,4
<b>altes Bundesgebiet</b>						
1992	9.110	44.000	146,6	24.271	9.250	82,2
1991	9.020	42.800	140,8	24.348	9.110	81,0
1990	8.890	41.800	135,6	24.428	9.010	80,3
1989	8.772	39.800	127,4	24.481	8.730	78,0
1988	8.670	37.800	119,9	24.500	8.420	75,3
1987	8.528	35.400	110,2	24.559	8.030	72,0
1986	8.394	33.600	102,9	24.513	7.690	68,8
1985	8.274	31.300	94,5	24.596	7.240	65,0
1980	7.415	29.700	80,6	25.142	6.790	62,5
1975	5.981	25.400	55,4	25.439	6.000	55,7

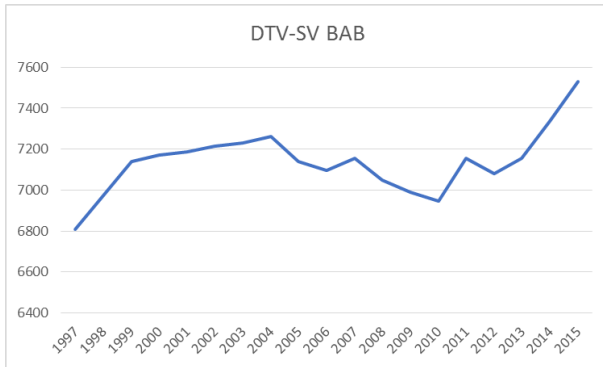
Tab. 2.4: Verkehrsentwicklung in Zahlen (aus [FITSCHEN/NORDMANN 2018])

Deutlich ist ein allgemeiner Anstieg der Verkehrsbelastung erkennbar, welcher aber von singulären Ereignissen wie z. B. Wirtschaftskrisen oder politischen Entwicklungen überlagert wird.

Die in Tab. 2.4 bzw. Bild 2.26 angegebenen Zahlenreihen beziehen sich auf den Gesamtverkehr, also alle Fahrzeugklassen. Für die substantielle Beanspruchung der Fahrbahnen und damit auch für die Dimensionierung sind aber nur die Fahrzeuge des Schwerverkehrs von Bedeutung. Ihr Anteil am Gesamtverkehrsaufkommen beträgt über die letzten 10 Jahre konstant etwa 15 % (vgl. [FITSCHEN/NORDMANN 2010...2018], [FITSCHEN/KOßMANN 2005]). Damit lässt sich die Entwicklung des Schwerverkehrs berechnen. Tab. 2.5 zeigt die entsprechenden Zahlenwerte für den Zeitraum von 1997 bis 2015.

Jahr	DTV <sup>(SV)</sup> BAB
1997	6.810
1998	6.975
1999	7.140
2000	7.170
2001	7.185
2002	7.215
2003	7.230
2004	7.260
2005	7.140
2006	7.095
2007	7.155
2008	7.050
2009	6.990
2010	6.945
2011	7.155
2012	7.080
2013	7.155
2014	7.335
2015	7.530

Tab. 2.5: Entwicklung des DTV<sup>(SV)</sup> auf bundesdeutschen Autobahnen von 1997 bis 2015



**Bild 2.27:** Entwicklung des DTV<sup>(SV)</sup> auf bundesdeutschen Autobahnen von 1997 bis 2015

Deutlich sind der Einfluss der Finanzkrise 2008/2009 sowie die Einführung der LKW-Maut 2005 erkennbar.

Aufschlussreich ist ein Vergleich mit der in den deutschen Regelwerken unterstellten Verkehrsentwicklung. In [RStO 2012] wird die Zunahme des Schwerververkehrs mit folgender Formel erfasst:

$$f_z = \frac{(1 + p)^N - 1}{p \cdot N} \quad (2-1)$$

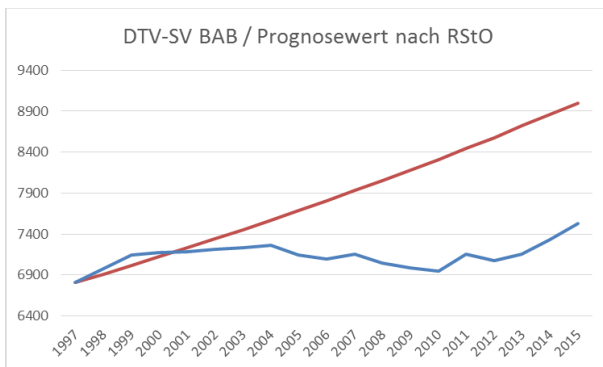
$f_z$  – Erhöhungsfaktor

$N$  – Anzahl der Jahre

$p$  – mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs

Für die Bundesautobahnen ist eine jährliche Zunahme von 3 % anzusetzen.

Bild 2.28 zeigt die nach [RStO 2012] prognostizierte Verkehrsentwicklung im Vergleich mit dem tatsächlich ermittelten Schwerverkehr.

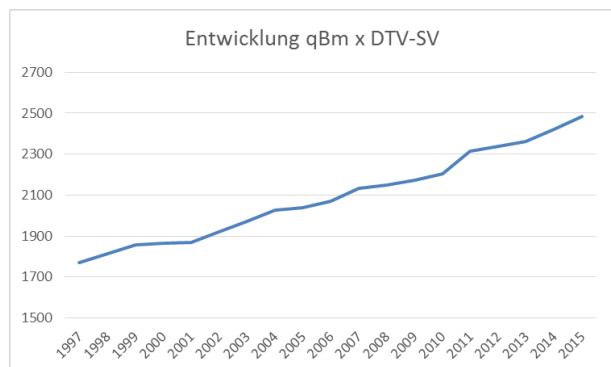


**Bild 2.28:** Entwicklung des DTV<sup>(SV)</sup>, Vergleich der Prognose nach RStO 2012 (orange) mit den tatsächlichen Werten (blau)

Die Prognosewerte für den DTV<sup>(SV)</sup> nach RStO 2012 liegen offensichtlich weit auf der sicheren Seite.

Für die Beanspruchung der Fahrbahnen ist aber nicht allein die Anzahl der Fahrzeuge, sondern die Anzahl und Größe der Achslasten entscheidend. Diese Einflussgrößen werden durch die B-Zahl erfasst. Diese berücksichtigt über den Faktor  $f_A$  die Anzahl der Achsen pro Fahrzeug und über den Faktor  $q_{Bm}$  die Achslasten. Während sich der Achszahlfaktor  $f_A$  von 4,2 auf 4,5 erhöhte, stieg der Lastkollektivquotient  $q_{Bm}$  von 0,26 in den RStO 2001 auf 0,33 in den RStO 2012 (Werte für BAB).

Um die Entwicklung der Verkehrsbelastung zu beurteilen, ist es also zielführend, den DTV<sup>(SV)</sup>-Wert mit dem jeweils aktuellen  $q_{Bm}$ -Wert zu multiplizieren. Die zeitliche Entwicklung dieses Produktwertes ist in Bild 2.29 dargestellt. Die Entwicklung des  $q_{Bm}$ -Wertes wurde dabei über die Jahre 2001 bis 2012 gleichmäßig verteilt.



**Bild 2.29:** Entwicklung des Produktes  $q_{Bm} \times DTV^{(SV)}$

Es ist interessant, dass der Anstieg des so berechneten Produktwertes sehr gut mit dem nach RStO 2012 prognostizierten Anstieg des  $DTV^{(SV)}$ -Wertes korrespondiert. Man kann also sagen, dass der Faktor  $f_z$  den Anstieg der mittleren Achslasten miterfasst.

Für eine Prognose der weiteren Entwicklung der Verkehrsbelastung ist zu beachten, dass auf hochbelasteten Strecken bereits gegenwärtig die Kapazitätsgrenze erreicht ist. Eine weitere Steigerung des  $DTV^{(SV)}$  wird also notwendigerweise degressiv verlaufen. Für eine weitere Steigerung der mittleren Achslasten wird allerdings noch Potenzial gesehen. Die tendenzielle Steigerung der B-Zahlen sollte sich also fortsetzen, wenn auch zwangsläufig langfristig degressiv.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass auf Basis der vorliegenden Zahlen von einer grundsätzlich unveränderten Fortsetzung der Entwicklung der letzten 20 Jahre auszugehen ist. Für einen Planungshorizont von 30 Jahren ist also mit einer Steigerung der B-Zahlen von 30 bis 40 % auszugehen. Die Extrapolation dieser Entwicklung auf noch längere Betrachtungszeiträume (z. B. 50 Jahre) ist problematisch. Da die Verkehrsentwicklung in starkem Maße von kaum voraussehbaren Ereignissen, wie z. B. politischen Entscheidungen abhängt, sind solche Prognosen aber äußerst spekulativ.

## 2.2 Aktueller Stand der Betonbauweise in der Praxis

### 2.2.1 Allgemeines

Die Entwicklung des modernen Betonstraßenbaus begann weltweit vor ca. 150 Jahren. Nach den heutigen Quellen gab es erste Versuche in Schottland, Frankreich, den USA und Deutschland. Dabei handelte es sich um die sogenannte Plattenbauweise (jointed concrete pavement – JCP), deren Konstruktionsgrundlagen im Folgenden beschrieben werden. Alternativ entwickelte sich seit 1921 eine Betonbauweise, bei der auf die Anordnung von Querfugen verzichtet werden kann. Diese Bauweise wird als durchgehend bewehrte Bauweise (continuous reinforced concrete pavement – CRCP) bezeichnet und wird, da es sich nicht um eine Regelbauweise in Deutschland handelt, unter Punkt 2.3 beschrieben.

Für den Betonstraßenbau in Deutschland gelten im Wesentlichen die Regelwerke, die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) herausgegebenen werden:

- [RStO 12] „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“, die
- [RDO Beton 09] „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“, die
- [TL Beton-StB 07] „Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“, die
- [ZTV Beton-StB 07] „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“, die
- [TP B-StB] „Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen“ und die
- [TL Gestein-StB] „Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau“

Aus der europäischen Normung ist die DIN EN 13877 „Fahrbahnbefestigungen aus Beton“, Teil 1 bis 3 zu erwähnen, die sich mit den Baustoffen, den funktionalen Anforderungen an Fahrbahnbefestigungen aus Beton sowie den Anforderungen an Dübel für Betonfahrbahnbefestigungen befasst.

Weiterhin sind Betonausgangsstoffe europäisch genormt. Zurzeit gelten für die Ausgangsstoffe des Straßenbetons folgende Normen und Regelwerke:

- Zement: [DIN EN 197-1] sowie zusätzlich erklärte Leistung (na)
- Gesteinskörnungen: [EN 12620] Gesteinskörnungen für Beton, [EN 13242] Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische im Ingenieur- und Straßenbau und [EN 16236] Bewertung der Konformität von Gesteinskörnungen – Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle
- Zugabewasser: [DIN EN 1008]
- Betonzusatzmittel: [DIN EN 934-2] und [DIN 1045-2]

Grundlage für den Straßenbeton sind die [DIN EN 206-1] sowie die [DIN 1045-2] jeweils in der aktuellen Fassung und in Verbindung mit den [TL Beton-StB 07] bzw. [ZTV Beton-StB 07].

### 2.2.2 Dimensionierung

Eine regelkonforme Konstruktion bildet die Voraussetzung für eine dauerhafte und wirtschaftliche Lösung. Die konstruktive Durchbildung umfasst dabei neben der Auswahl der Baustoffe, der Spezifikation des gesamten Oberbaus und der Festlegung der Plattengeometrie auch die eindeutige Festlegung technischer Details.

Dabei spielt die angestrebte normative Nutzungsdauer eine große Rolle. In diesem Zeitraum müssen die Belastungen aus Verkehr und Witterung aufgenommen werden. Bis zum Ende der normativen Nutzungsdauer wird zudem eine rechnerische Ausfallrate unterstellt, die bei fachgerechter Fertigung und zugehöriger turnusmäßiger Instandhaltung während der Nutzungszeit maximal eintreten kann. Dabei werden die richtige Wahl der Baustoffe und die fachgerechte Ausführung vorausgesetzt.

Auf der Grundlage der gewählten Konstruktion erfolgt die Dimensionierung, also die Festlegung der Dicke der Betondecke. Eine rechnerische Dimensionierung bietet die Möglichkeit, nicht nur die Konstruktion zu optimieren (wirtschaftliche Dimensionierung), sondern vielmehr auch Unterdimensionierungen zu vermeiden.

Die Durchbildung des Straßenoberbaus ist in Deutschland möglich

- nach standardisierten Vorgaben gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ [RStO 12] oder
- mittels einer rechnerischen Dimensionierung entsprechend den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Betondecken“ [RDO Beton 09].

Eine rechnerische Dimensionierung setzt voraus, dass die Belastungen aus Verkehr und Witterung wirklichkeitsnah ermittelt und prognostiziert werden. Das Ergebnis der Dimensionierung mit der Zuordnung der geeigneten Konstruktion ist dann besonders erfolgreich, wenn ihr ein Erhaltungskonzept über die Nutzungsdauer zugeordnet wird.

### 2.2.3 Baustoff Beton

An Beton für Verkehrsflächenbefestigungen werden hohe Anforderungen gestellt. Diese leiten sich aus den Belastungen einer Betondecke während der Nutzungszeit ab:

- Verkehrsbelastung (insbesondere Schwerverkehr)
- Belastung aus Witterung (insbesondere unterschiedliche Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Ober- und Unterseite der Betondecke)
- Frost-Tausalz-Beanspruchung der Oberfläche

- 
- Mechanischer Abrieb

Daraus abgeleitet wurden bislang folgende Frischbetoneigenschaften aufgestellt:

- Hohe Gleichmäßigkeit
- Gute Verarbeitbarkeit
- Ausreichende Verarbeitbarkeitszeit
- Ausreichende Grünstandfestigkeit beim Einsatz von Gleitschalungsfertigern

Folgende Festbetoneigenschaften werden momentan in der Praxis gefordert:

- Hohe Druck- und Biegezugfestigkeit
- Hoher Verschleißwiderstand
- Hoher Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand
- Gute Oberflächeneigenschaften hinsichtlich der Ebenheit, der Griffigkeit, des Reifen-Fahrbahn-Geräusches, der Farbe und Lichtreflektion sowie der Ableitung des Oberflächenwassers

Geeignete und zugelassene Betonrezepturen richten sich zurzeit nach den [TL Beton-StB 07] in Verbindung mit dem [ARS 04/2013]. Neben anderen Eigenschaften gilt die Betonklasse C 30/37 als Mindestanforderung.

Erfolgt eine rechnerische Dimensionierung nach [RDO Beton 09] und eine Vergabe nach [ZTV RDO Beton (Entwurf)], so werden erweiterte Anforderungen an den Baustoff Beton gestellt. Diese beziehen sich auf eine geforderte charakteristische Spaltzugfestigkeit, die in der Erstprüfung und später am Bauwerk nachgewiesen werden muss.

Die nachfolgende Tab. 2.6 zeigt die erweiterten Straßenbetonklassen und den zugehörigen E-Modul.

Straßenbetonklasse <sup>1)</sup>	$f_{ctk,core}$ [MPa]	$E_{ctm}$ [MPa]
Für Verkehrsflächen mit niedrigeren Expositionsklassen als XF4 und XM2		
StC 20/25 – 2,4	2,4	
StC 20/25 – 2,7	2,7	
StC 25/30 – 2,7	2,7	35.000
StC 25/30 – 3,0	3,0	37.000
StC 25/30 – 3,3	3,3	39.000
Für Verkehrsflächen mit Expositionsklassen XF4 mit XM2 und XF4 ohne XM2		
StC 30/37 – 3,0	3,0	37.000
StC 30/37 – 3,3	3,3	39.000
StC 30/37 – 3,7	3,7	41.000
StC 35/45 – 3,3	3,3	39.000
StC 35/45 – 3,7	3,7	41.000
StC 35/45 – 4,0	4,0	42.000
StC 40/50 – 4,0	4,0	42.000
StC 40/50 – 4,3	4,3	43.000
StC 40/50 – 4,6	4,6	44.000
StC 45/55 – 4,3	4,3	
StC 45/55 – 4,6	4,6	
StC 45/55 – 5,0	5,0	
StC 50/60 – 4,6	4,6	
StC 50/60 – 4,8	4,8	
StC 50/60 – 5,0	5,0	

Hierin bedeutet StC = Straßenbetonklasse, wobei

- der erste Wert die charakteristische Mindestdruckfestigkeit an Zylindern  $f_{ck,cyl}$ ,
- der zweite Wert die charakteristische Mindestdruckfestigkeit an Würfeln  $f_{ck,cube}$  und
- der dritte Wert die charakteristische Mindestspaltzugfestigkeit von Zylinderscheiben  $f_{ctk,core}$

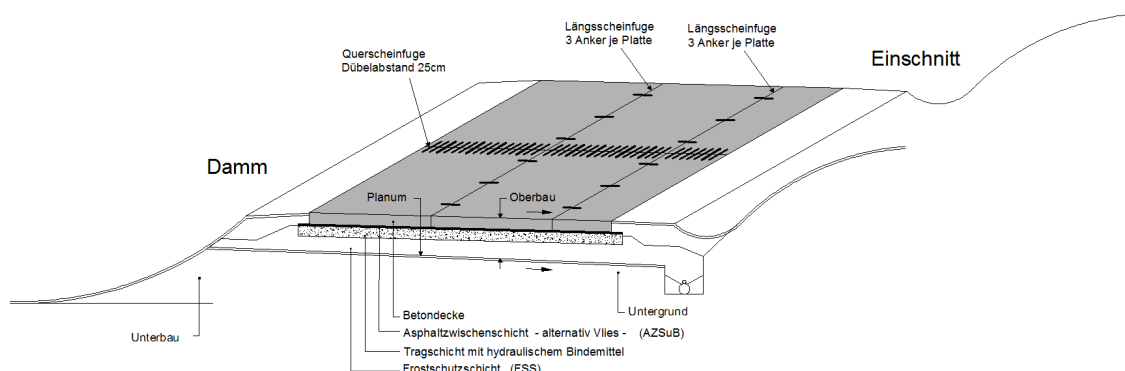
aus oberen bzw. – gesondert davon – aus unteren Prüfzylinder-/Bohrkernscheiben darstellt.

1) Die Einhaltung nicht dimensionierungstechnisch begründeter Betoneigenschaften, wie z. B der Frostbeständigkeit bei Verkehrsflächen im Freien, muss den hierfür maßgebenden Regelwerken entsprechen.

**Tab. 2.6:** Straßenbetonklassen mit charakteristischer Spaltzugfestigkeit  $f_{ctk,core}$  ermittelt an Prüfzylinder-/Bohrkernscheiben (nach [TP B-StB], 3.1.05)

## 2.2.4 Oberbau

Der prinzipielle Deckenaufbau von Verkehrsflächen mit Betondecke wird in (Bild 2.30) gezeigt.



**Bild 2.30:** Betondecke nach den RStO bzw. RDO Beton

Es handelt sich dabei um eine unbewehrte Plattenbauweise. Die Bauweise gilt gleichermaßen als raumfugenlos, wobei an den Übergangsbereichen zur benachbarten Befestigung gegebenenfalls Raumfugen angeordnet werden.

Der konstruktive Aufbau ist gekennzeichnet durch eine eindeutige Schichtentrennung zwischen Betondecke und Unterlage,

- Betondecke auf Asphaltzwischen- oder Vlies mit darunter liegender hydraulisch gebundener Tragschicht / Verfestigung, (Bild 2.30)
- Betondecke auf Asphalttragschicht und
- Betondecke auf ungebundener Tragschicht (bei höherer Verkehrsbelastung auf Schottertragschicht STSuB)

Demzufolge dient die Schicht unter der Betondecke der Auflagerung. An die Tragschichten werden gemäß [ZTV Beton-StB 07] Mindestanforderungen bezüglich der Festigkeit (bei hydraulisch gebundenen Tragschichten) und der Tragfähigkeit (bei ungebundenen Tragschichten) gestellt. Eine adäquate Forderung an Asphalttragschichten existiert nicht. Für alle Tragschichtarten werden Anforderungen an die Mindestdicke sowie an die profilgerechte Lage, die planmäßige Querneigung und an die geometrischen Abmessungen gestellt.

Hervorragende Auflagerungsbedingungen für die Betondecke liefern Asphaltzwischen- und Vlies-Schichten, die im Kontext mit darunter liegenden Tragschichten für eine Langlebigkeit der Konstruktion sorgen.

Hydraulisch gebundene Tragschichten und Verfestigungen mit Zement werden für die Regelaufbauten nach [RStO 12] und [RDO Beton 09] nicht gekerbt, da eine konstruktive Schichtentrennung vorgesehen ist.

Die Funktion der unter der Tragschicht befindlichen Frostschutzschichten und des Planums wird hinsichtlich der Tragfähigkeit durch einzuhalten der Mindestverformungsmoduln ( $E_{v2}$ ) sichergestellt.

Die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus wird nach den [RStO 12] berechnet. Dabei soll sichergestellt werden, dass während der Frost- und Auftauperioden keine schädlichen Verformungen entstehen.

Die Dicke der Betondecke und der darunter liegenden Tragschicht ist maßgeblich von der Verkehrsbelastung abhängig, aber auch von der Plattengeometrie (siehe Punkt 2.2.5) und der Festigkeit des Betons (siehe Punkt 2.2.3).

In der derzeitigen Praxis werden hauptsächlich Oberbauten nach den [RStO 12] festgelegt. Das bedeutet, dass die Verkehrsbelastung berechnet wird, jedoch eine typische Plattengeometrie und eine erforderliche Betonfestigkeit nur unterstellt werden.

Im nachfolgenden Bild 2.31 sind die Bauweisen mit Betondecke gemäß Tafel 2 der [RStO 12], abhängig von der Belastungsklasse, dargestellt.



(Dickenangaben in cm;  $\nabla$   $E_{v2}$ -Mindestwerte in MN/m<sup>2</sup>)

Zeile	Belastungsklasse		Bk100				Bk32				Bk10				Bk3,2				Bk1,8				Bk1,0				Bk0,3														
	Aquivalente 10-t-Achsübergänge in Mio.	B	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3																																
Dicke des frostsich.Oberbaues <sup>1)</sup>			55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65											
<b>Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln auf Frostschutzschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material</b>																																									
1.1	Betondecke		27																																						
	Vliesstoff <sup>8)</sup>		15																																						
	Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)		120 Σ42																																						
	Frostschutzschicht		45																																						
Dicke der Frostschutzschicht		-	-	33 <sup>2)</sup>	43	-	24 <sup>3)</sup>	34	44	-	25 <sup>3)</sup>	35	45	-	-	26 <sup>3)</sup>	36	-	-	27 <sup>3)</sup>	37																				
1.2	Betondecke		27																																						
	Vliesstoff <sup>8)</sup>		20																																						
	Verfestigung		45																																						
	Schicht aus frostunempfindlichem Material –weit- oder intermittierend gestuft gemäß DIN 18196–		20																																						
Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material		8 <sup>4)</sup>	18 <sup>4)</sup>	28	38	14 <sup>4)</sup>	24	34	44	15 <sup>4)</sup>	25	35	45	6 <sup>4)</sup>	16 <sup>4)</sup>	26	36	-	-	27 <sup>3)</sup>	37																				
1.3	Betondecke		27																																						
	Vliesstoff		25																																						
	Verfestigung		45																																						
	Schicht aus frostunempfindlichem Material –enggestuft gemäß DIN 18196–		25																																						
Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material		3 <sup>4)</sup>	13 <sup>4)</sup>	23	33	9 <sup>4)</sup>	19	29	39	10 <sup>4)</sup>	20	30	40	1 <sup>4)</sup>	11 <sup>4)</sup>	21	31	2 <sup>4)</sup>	12 <sup>4)</sup>	22	32	10 <sup>4)</sup>	20	30	40	-	10 <sup>4)</sup>	20	30												
<b>Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht</b>																																									
2	Betondecke		26																																						
	Asphalttragschicht		120 Σ36																																						
	Frostschutzschicht		45																																						
	Dicke der Frostschutzschicht		-	29 <sup>3)</sup>	39	49	-	30 <sup>2)</sup>	40	50	-	31 <sup>2)</sup>	41	51	-	-	32 <sup>2)</sup>	42	-	25 <sup>3)</sup>	35	45																			
<b>Schottertragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material</b>																																									
3.1	Betondecke		29																																						
	Schottertragschicht		150 Σ59																																						
	Schicht aus frostunempfindlichem Material		45																																						
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material		Ab 12 cm aus frostunempfindlichem Material, geringere Restdicke ist mit dem darüber liegenden Material auszugleichen																																						
<b>Schottertragschicht auf Frostschutzschicht</b>																																									
3.2	Betondecke		29																																						
	Schottertragschicht		120 Σ49																																						
	Frostschutzschicht		45																																						
	Dicke der Frostschutzschicht		-	-	26 <sup>1)</sup>	36	-	-	27 <sup>1)</sup>	37	-	-	28 <sup>1)</sup>	38	-	-	19 <sup>1)</sup>	29	-	-	21 <sup>1)</sup>	31																			
<b>Frostschutzschicht</b>																																									
4	Betondecke		21																																						
	Frostschutzschicht		45																																						
Dicke der Frostschutzschicht																										24 <sup>3)</sup>	34	44	54	14 <sup>3)</sup>	24	34	44								

- 1) Bei abweichenden Werten sind die Dicken der Frostschutzschicht bzw. des frostunempfindlichen Materials durch Differenzbildung zu bestimmen, siehe auch Tabelle 8
- 2) Mit rundkörnigen Gesteinskörnungen nur bei örtlicher Bewehrung anwendbar
- 3) Nur mit gebrochenen Gesteinskörnungen und bei örtlicher Bewehrung anwendbar
- 4) Nur auszuführen, wenn das frostunempfindliche Material und das zu verfestigende Material als eine Schicht eingebaut werden
- 8) Anstelle des Vliesstoffes kann eine Asphaltzwischen-schicht gewählt werden, siehe Abschnitt 3.3.4
- 18) Bei örtlicher Bewehrung 25 cm

Bild 2.31: Standardisierte Bauweisen (nach [RStO 12], Tafel 2)

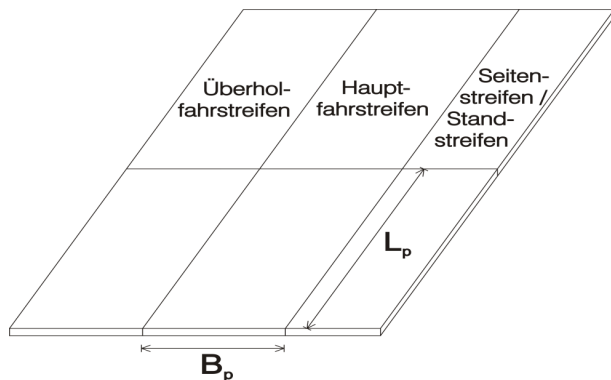
## 2.2.5 Plattengeometrien

Die Standardisierung [RStO 12] setzt mit ihrer belastungsklassenabhängigen Festlegung von Deckendicken gewisse Plattengeometrien voraus, für die die Dickenangaben zutreffend sind.

Bei Verwendung der in Tafel 2 der [RStO 12] angegebenen Deckendicken sind die zugrunde gelegten Plattengeometrien wie folgt zu berücksichtigen:

- Plattenbreite im Hauptfahrstreifen 4,0 bis 4,5 m
  - Belastungsklassen Bk3,2 bis Bk100  
typische Plattenlänge 5,0 m
  - Belastungsklassen Bk0,3 bis Bk1,8  
typische Plattenlänge 4,0 bis 4,5 m
- Plattenbreite im Hauptfahrstreifen 3,0 bis 4,0 m
  - alle Belastungsklassen  
typische Plattenlänge 4,0 m

Bei der rechnerischen Dimensionierung [RDO Beton 09] sind die Abmessungen der Platten variierbar (Bild 2.32). Dabei ist in vielen Fällen die gewählte Plattenlänge und -breite des Hauptfahrstreifens für die Plattendicke maßgebend. Die Plattenlänge ( $L_p$ ) ist für alle Fahrstreifen gleich zu wählen, wobei ein Versatz der Querfugen nicht zugelassen wird.



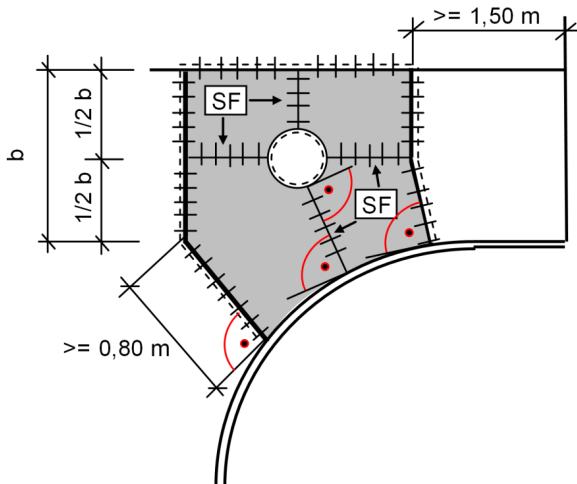
**Bild 2.32:** Plattengeometrie gemäß [RDO Beton 09]: Plattenlänge  $L_p$  und Plattenbreite  $B_p$

Die Plattengeometrie ist gemäß den [RDO Beton 09] in folgender Weise zu berücksichtigen:

- Es erfolgt eine Unterscheidung in quadratische und rechteckige Platten.
- Die Mindestplattenbreite bzw. -plattenlänge beträgt 1,20 m.
- Als quadratisch definiert dürfen auch Platten mit den Abmessungen  $0,90 \text{ m} < L_p, B_p < 1,20 \text{ m}$  näherungsweise mit  $L_p, B_p = 1,20 \text{ m}$  dimensioniert werden.
- Das Verhältnis Plattenlänge zu Plattenbreite sowie Plattenbreite zu Plattenlänge muss  $L_p/B_p$  oder  $B_p/L_p < 2,5$  sowie  $L_p/B_p$  oder  $B_p/L_p > 0,4$  sein.
- Die größte Plattenlänge wird aus Gründen des Anstiegs zusätzlicher reibungsbedingter Zugkräfte und der nicht mehr zu gewährleistenden dauerhaften Verschleißbarkeit der Querfugen mit 7,50 m festgelegt. Diese Plattenlänge führt bereits zu großen Plattendicken.
- Das Dimensionierungsverfahren gilt für Fahrstreifen – einschließlich Randstreifen, die für Fahrzeuge im Richtungsverkehr vorgesehen sind –, bei Plattenbreiten  $\leq 4,50 \text{ m}$ . Dabei wird vorausgesetzt, dass die Längsfugen des maßgebenden Plattenstreifens außerhalb der Längsmarkierung angeordnet werden. Bei der Dimensionierung für Befestigungen von Plätzen u. ä. kann es unter Beachtung der zu erwartenden Lastkonstellationen und Fahrrichtungen sinnvoll sein, die genannte Breite zu überschreiten.
- Fahrstreifenbreite und Plattenbreite stimmen in der Regel nicht überein.
- Bei der Ermittlung der auf die Längsfuge bzw. Längskante entfallenden Wiederholungen der Befahrung im Richtungsverkehr ist das streifenbreiten- und abstandsabhängige, auf den Rand einwirkende Momentenkollektiv zu berücksichtigen.

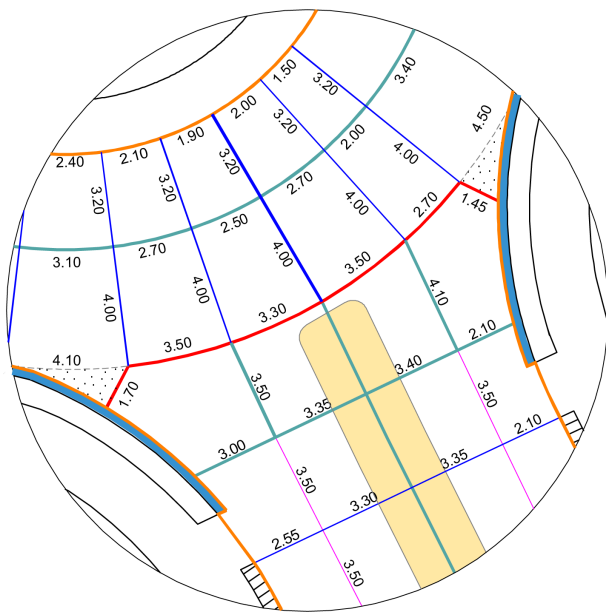
Bei speziellen Anwendungsfällen – wie z. B. in Kreisverkehrsflächen, bei Einbauten wie Schächten oder Abläufen und an niveaugleichen Kreuzungsbereichen – sind besondere Plattengeometrien erforderlich.

Diese sind so auszubilden, dass durch eine Mindestplattengeometrie die Plattentheorie anwendbar bleibt. Spitzwinklige Ecken sind zu vermeiden (beispielhaft zeigen dies Bild 2.33 und Bild 2.34).



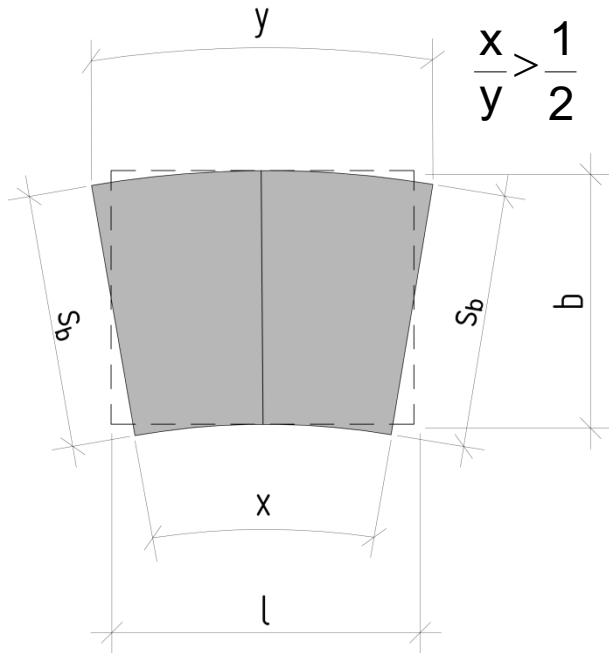
**Bild 2.33:** Eckplatte an einer Kreuzung mit konstruktiver Fugenausbildung am Schachtdeckel [MVaB-Teil 1]

Die konstruktiven Fugenausbildungen am Schachtdeckel bzw. am Ablauf sind erforderlich, um Rissbildungen an den Einbauten vorzubeugen.



**Bild 2.34:** Ausführungsbeispiel eines Fugenplans im Detailbereich eines Kreisverkehrs mit unbewehrter Decke nach [MVaB, Teil 1]

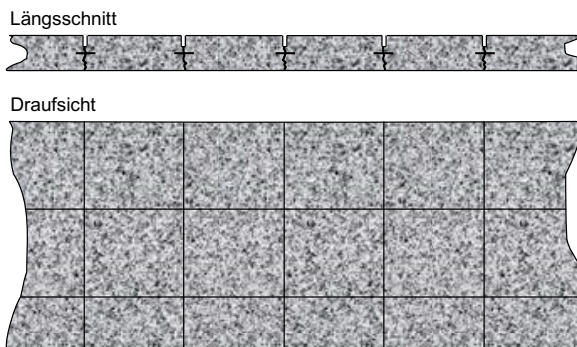
In Kreisverkehren sollten die Platten als Kreissegmente so ausgebildet werden, dass sie möglichst in der Dimensionierung als quadratische Platten angenähert werden können. Die Annäherung als Rechteckplatte ist ebenfalls möglich, wobei das Verhältnis zwischen Länge und Breite günstig sein sollte.



**Bild 2.35:** Kreissegment und Ersatzrechteck

## 2.2.6 Fugen

Zur Vermeidung von wilden Rissen und zum Ausgleich der Längenänderung durch Abkühlung und Erwärmung ist die Fahrbahndecke aus Beton durch Fugen in einzelne Platten zu unterteilen. Obwohl seit 1926 bereits häufig erprobt, hat sich erst in den 70er Jahren die Bauweise mit kurzen Platten bzw. kurzen Fugenabständen (~5m) als Regelbauweise durchgesetzt. Der an der Fugenlänge orientierte höhere Unterhaltungsaufwand wird durch die günstigere Querkraftübertragung, die geringere Beanspruchung der Fugenfüllstoffe und durch die Vermeidung von wilden Rissen mehr als ausgeglichen.



**Bild 2.36:** Anordnung von Fugen

Man unterscheidet

- Quer- und Längsscheinfugen,
- Raum- und Gleitfugen sowie
- Pressfugen.

Scheinfugen sind Sollbruchstellen in einer Betondecke, die durch Querschnittsschwächung an der Oberseite der Decke hervorgerufen werden.

Raum- und Gleitfugen trennen eine Betondecke in ihrer ganzen Dicke voneinander. Bei Raumfugen ermöglicht der breite, vorgebildete Spalt eine zwängungsfreie bzw. zwängungsgeminderte Wärmedehnung der Platte. Bei Gleitfugen wird lediglich die Längsbewegung, also in Richtung der Fuge, ermöglicht.

Pressfugen (Arbeitsfugen) trennen die Platten ebenfalls in ihrer ganzen Dicke voneinander. Sie lassen aber im Gegensatz zu den Raumbfugen keinen Raum für eine Ausdehnung der Platten über ihre ursprüngliche Länge hinaus zu.

Der Abstand der Schein- und Pressfugen darf gemäß ZTV Beton-StB das 25-fache, bei quadratischen Platten das 30-fache der Plattendicke nicht überschreiten. Das sind bei 30 cm Plattendicke 7,50 m Fugenabstand. Zu bemerken ist, dass sich andererseits die erforderliche Deckendicke bei Platten geringerer Abmessungen deutlich reduzieren kann. Bei Anwendung der Standardisierung (RStO) sind die typischen Plattengeometrien zu beachten. Im Autobahnbau sind 5 m Querfugenabstand bei 4,00 bis 4,25 m Plattenbreite üblich. In Tunnelstrecken empfehlen die ZTV Beton-StB verringerte Plattenabmessungen von maximal dem 20-fachen der Plattendicke.

Raumbfugen werden allein dann erforderlich, wenn Betonfahrbahnen an feste Einbauten angrenzen oder bei Endbereichen (siehe Punkt 2.2.7). Die Bauweise mit in regelmäßigem Abstand angeordneten Raumbfugen (z. B. jede zweite bis zehnte Querfuge) hat sich nicht bewährt, da sie fehleranfällig ist und sich außerdem alle dazwischen liegenden Platten bei Erwärmung verschieben.

Decken in Straßenflächen mit mehr als 4,5 m Breite erhalten eine Längsfuge, solche mit mehr als 9 m Breite mindestens zwei Längsfugen. Abhängig von der Fertigungsbreite sind diese Schein- oder Pressfugen.

Die Längsfugen sollen nicht im Bereich der Radspuren liegen und möglichst auf die Markierung der Fahrstreifen abgestimmt werden. Durch diese Anordnung wird der Lastfall Plattenrand bei normalem Straßenverkehr in seiner Dimensionierungsrelevanz „entschärft“.

Querfugen werden in der Regel rechtwinklig zur Straßenachse angeordnet. Sie dürfen im Bereich von Längsfugen nicht gegeneinander versetzt sein. Im Bereich von Bauwerken, zum Beispiel bei schiefen Brücken, können sie jedoch auch schräg zur Straßenachse verlaufen.

Zwickel und spitz verlaufende Platten sind ungünstig und verursachen ein erhöhtes Bruchrisiko (Belastungsfall Plattenecke). Sie sollten deshalb weitestgehend vermieden werden.

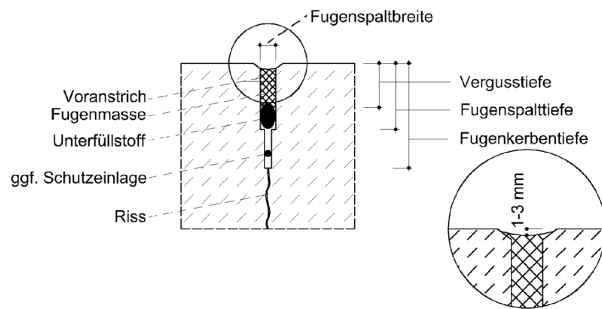
Fugen müssen möglichst dicht sein, um das Eindringen von Wasser und Feststoffen zu vermeiden. Unter die Decke gelangendes Wasser kann im Laufe der Zeit den gesamten Oberbau schädigen, indem die Tragschichten durch Pumpen der Plattenenden erodieren und dadurch die Auflagerverhältnisse der Decke nachteilig verändern. Eingedrungene Feststoffe können zu Kantenabbrüchen führen. Daher sollte durch eine zweckmäßige Ausbildung und Füllung der Fugen sowie durch eine rechtzeitige, d. h. turnusmäßige, Fugenpflege das Eindringen von Oberflächenwasser und Feststoffen verhindert werden.

Scheinfugen werden in Betondecken als Quer- und Längsscheinfugen ausgebildet. Der Querschnitt der Betondecke wird soweit geschwächt, dass sich der zu erwartende Riss an dieser Stelle durch die ganze Platte ausbildet, aber die natürliche Rissverzahnung für die Mitwirkung bei der Kraftübertragung von Platte zu Platte hinreichend beiträgt.

Zum Reißen der Querscheinfugen müssen die Kerben an der Deckenoberseite mindestens 25 %, jedoch höchstens 30 % der Deckendicke tief sein. Diese Schwächung reicht für Längsscheinfugen nicht aus. Die Kerben der Längsscheinfugen müssen aufgrund der geringeren Zugspannung infolge Schwindens und Abkühlung in einer Tiefe von mindestens 40 % und höchstens 45 % der Deckendicke ausgebildet werden.

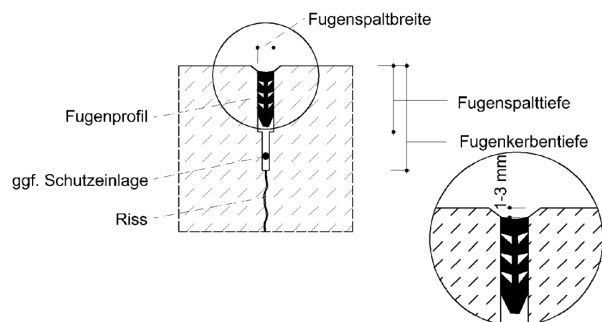
Für die gezielte Rissbildung ist die Breite der Kerbe unerheblich. Sie wird im Allgemeinen 3 mm breit eingeschnitten. Nachfolgend müssen die Fugen im oberen Bereich aufgeweitet (Herstellung eines Fugenspalts) und gegen eindringendes Wasser und Fremdstoffe abgedichtet werden. Als Fugenfüllstoffe kommen heiß und kalt verarbeitbare Fugenmassen sowie Fugenprofile in Frage. In allen Fällen muss die Fugengeometrie auf den jeweiligen Fugenfüllstoff abgestimmt werden. Maßnahmen zur Haftung des Füllstoffs an der Betonwandung sind den Anwendungsvorschriften des Lieferanten zu entnehmen.

Die Füllung geschnittener Querfugen mit einer Fugenmasse wird nach Bild 2.37 ausgeführt.



**Bild 2.37:** Regelausführung einer geschnittenen Querscheinfuge mit Fugenmassen [ZTV Fug-StB]

Soll hingegen die Querscheinfuge mit einem elastischen Fugenprofil abgedichtet werden, erfolgt die Ausführung nach Bild 2.38.



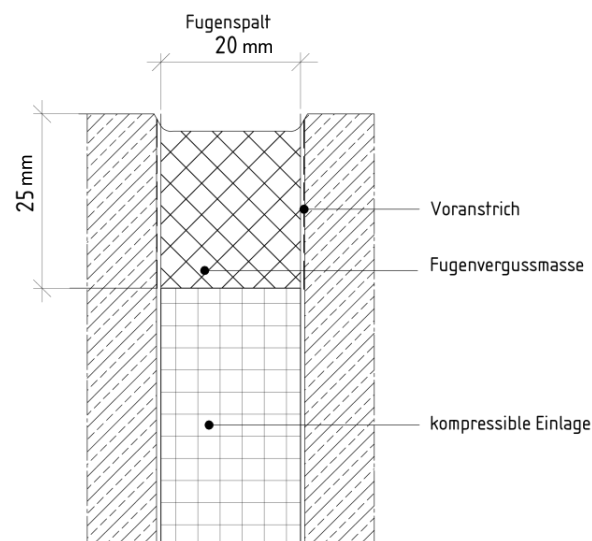
**Bild 2.38:** Querscheinfuge mit Fugenprofil [ZTV Fug-StB]

Werden Platten oder Fertigungsstreifen im zeitlichen Abstand aneinander betoniert, entsteht eine Pressfuge. Pressfugen müssen immer senkrecht zur Fahrbahnoberfläche ausgebildet werden, um Spannungen infolge Erwärmung gefahrlos aufnehmen zu können. Auch das Ende eines Tagesabschnitts wird als senkrechte Pressfuge ausgebildet.

Zur Verhinderung des Eindringens von Wasser in die Unterkonstruktion müssen auch Pressfugen zuverlässig abgedichtet werden.

Sie erhalten im oberen Teil einen Fugenspalt, der in Breite und Tiefe auf den vorgesehenen Fugenfüllstoff abgestimmt werden muss.

Zur ungehinderten bzw. wenig behinderten Ausdehnung der Betondecke an Ein- und Anbauten sowie bei Endbereichen werden Raumfugen gemäß Bild 2.39 angeordnet.



**Bild 2.39:** Beispiel einer Raumfuge

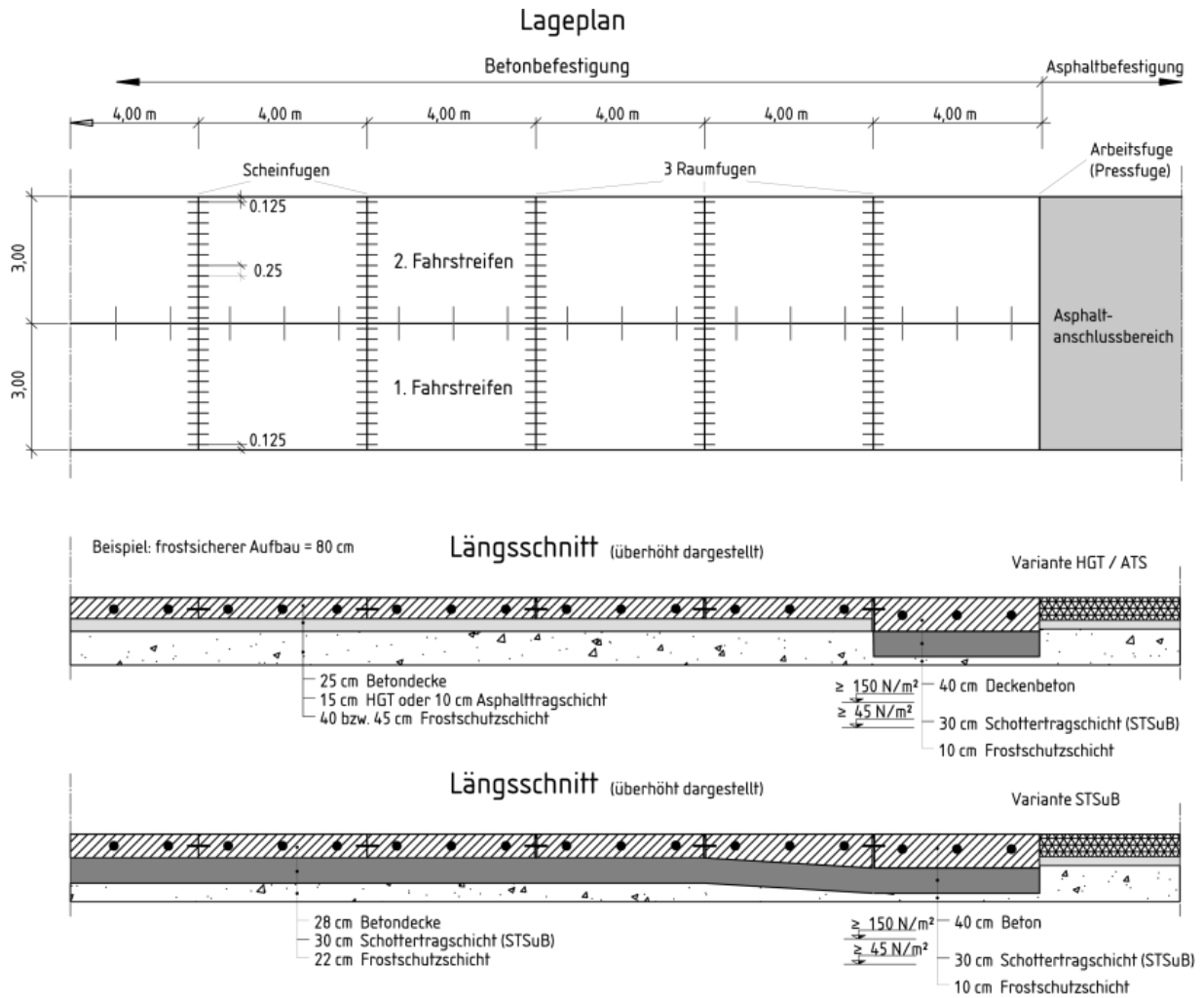
Der Fugenspalt der Raumfuge wird durch eine stark kompressible Einlage ausgefüllt. Die Dicke der Einlage beträgt mindestens 18 mm bei Decken der Belastungsklassen Bk100 bis Bk3,2, ansonsten mindestens 13 mm. Die Einlagen werden im Regelfall vor dem Betonieren verlegt (kip- und aufschwimmsicher aufgestellt). Sie müssen überall auf der Unterlage aufstehen und mit der Seitenschalung bündig abschließen, damit eine Brückenbildung des Betons und im Bewegungsfall Abplatzungen vermieden werden. Die durch die Fugeneinlage geschobenen Dübel müssen verschiebungssicher auf Dübelkörben befestigt werden. Die Dübelhülsen müssen eine Längsbewegung ermöglichen, die mindestens der Breite der Raumfugeneinlage entspricht.

Die Einlagen werden bei der Herstellung und dem Abziehen der Betonoberfläche mit Beton überdeckt. Die Betonüberdeckung ist jedoch auf maximal 5 mm zu begrenzen und wird nach dem Erhärten des Betons einschließlich des oberen Teils der Raumfugeneinlage aufgeschnitten. Zur Abdichtung von Raumfugen gegen eindringendes Wasser und Feststoffe muss der obere Teil der Raumfuge mit einem geeigneten Fugenfüllstoff dichtend ausgefüllt werden. Der Schnitt für den zu verfüllenden Fugenspalt muss mindestens 2 mm breiter als die Einlage sein und in seiner Tiefe auf den Fugenfüllstoff abgestimmt werden. Im Allgemeinen beträgt die Tiefe des zu füllenden Fugenspalt das 1,5-fache der Fugenspaltbreite.

### **2.2.7 Endbereiche**

Derzeit wird in den [ZTV Beton-StB 07] kein Bezug auf die Endbereiche genommen. Lediglich werden Endfelder betrachtet und dafür gefordert, dass die letzte Platte (Plattenreihe in Querrichtung) durch geeignete Maßnahmen gesichert werden soll. Nach diesem Regelwerk können solche Maßnahmen entweder die Verstärkung der letzten Platte (mindestens um die Dicke der gebundenen Tragschicht bzw. auf 40 cm bei Schottertragschichten) oder die Anordnung eines Endsporns sein. Letzterer wird seit vielen Jahren nicht mehr praktiziert, da er sich nicht bewährt hat. Die Verstärkung der letzten Platte (Plattenreihe) wird in der Praxis ausgeführt, wobei damit nur das Problem erhöhter Spannungen am freien Plattenrand zum benachbarten Oberbau gelöst ist. Horizontale Verschiebungen können mit der verstärkten Platte nicht aufgehalten werden.

Eine zunehmende Zahl von Bundesländern lässt daher Endbereiche mit verdübelten Raumfugen ausführen (Bild 2.40).



**Bild 2.40:** Endbereich mit verdübelten Raumfugen

Die Raumfugen können die temperaturinduzierten horizontalen Verschiebungen aufnehmen. Die verstärkte letzte Plattenreihe sorgt für eine Verringerung der Randspannungen am freien Plattenrand.

## 2.2.8 Oberflächen

Bis 2006 wurde die frische Betonoberfläche mit einem nachgeschleppten Jutetuch oder Kunstrasen in Längsrichtung texturiert. Danach ist als neue Referenzbauweise bei Bundesfernstraßen für Fahrbahndecken aus Beton die so genannte „Waschbetonbauweise“ (Entfernung des Oberflächenmörtels bei einer frisch eingebauten Betondecke) eingeführt worden. Mit dieser Bauweise kann sowohl die Forderung nach einer lärmarmen Textur als auch nach einer griffigen Oberfläche dauerhaft erfüllt werden.

Nach Fertigstellung des fertig eingebauten, verdichteten und geglätteten Oberbetons wird auf die Oberfläche ein dünner Film eines Oberflächenverzögerers oder eines Kombinationsmittels (Oberflächenverzögerer mit Nachbehandlungsmittel) gleichmäßig aufgesprüht. Der Oberflächenverzögerer hat die Aufgabe, das Erhärten in der oberen Randzone des Betons für eine begrenzte Zeit bis in eine definierte Tiefe zu verzögern. Dadurch wird das spätere mechanische Ausbürsten des Oberflächenmörtels ermöglicht. Der Zeitpunkt dieses Ausbürstens richtet sich im Wesentlichen nach den Witterungsbedingungen (Temperatur, Wind etc.).

Nach ausreichender Erhärtung und Befahrbarkeit des Betons wird das Gerüst der groben Gesteinskörnung durch Ausbürsten so freigelegt, dass die Oberfläche aus in gleichmäßigen Abständen angeordneten sichtbaren groben Gesteinskörnungen besteht. Die durch das Ausbürsten entstehende Texturtiefe soll zwischen 0,6 und 1,1 mm liegen.



Zur Oberflächenstrukturierung können im geeigneten Fall (keine lärmindernde Wirkung erforderlich) weiterhin Stahlbesenstrich und nachgeschleppter Kunstrasen (dauerhafte Griffigkeit ist nur bei geringer Verkehrsbelastung zu erwarten) angewendet werden.

Weiterhin wird das Grindingverfahren im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen eingesetzt, z. B. zur Verbesserung der Griffigkeit oder der Ebenheit der Fahrbahnoberfläche.

### **2.2.9 Herstellungstechnologie**

Die Betondecke kann je nach Anwendungsfall ein- oder zweischichtig hergestellt werden. Zweischichtig bedeutet, dass die Betondecke aus zwei Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung besteht. Für diesen Fall wird in Ober- und Unterbeton unterschieden.

Wird einschichtig eingebaut, muss der gesamte Beton der Qualität eines Oberbetons entsprechen.

Die Konsistenz des Frischbetons wird maßgeblich von der Einbautechnologie bestimmt.

Bei größeren zusammenhängenden Flächen erfolgt der Einbau vorzugsweise mit einem Gleitschalungsfertiger. Dieser Fertigertyp kann auch ohne Gleitschalung verwendet werden, wenn eine stehende Schalung zum Einsatz kommt. Die Vorzüge dieses Fertigertyps liegen in der guten Verteilung und Verdichtung des Frischbetons sowie der großflächigen ebenen Herstellung der Oberfläche. In den meisten Fällen sind diese Fertiger mit automatischen Anker- und Dübelverlegesystemen ausgestattet. Zum Fertigstellen der Oberfläche muss als letztes Glättelement ein Längsglätter zum Einsatz kommen.

Kleinere Flächen können mit einem Walzenfertiger ausgeführt werden. Hierbei ist es erforderlich, zuvor die Anker bzw. Dübel auf Körben zu verlegen.

In einigen Fällen ist bei kleinen Flächen auch ein Handeinbau erforderlich, bei dem auch die Anker- und Dübelverlegung auf Körben erfolgt. Die Verdichtung erfolgt mittels Rüttelflaschen, die von Hand geführt werden. Das Glätten der Oberfläche erfolgt ebenfalls per Hand.

Unmittelbar nach dem Glätten der Oberfläche erfolgt die Texturierung. Die möglichen Verfahren richten sich nach den [M OB] und sind unter Punkt 2.2.8 aufgeführt.

Zur Vermeidung wilder Risse wird die Betonoberfläche mittels Kerbschnitten in künftige Platten unterteilt. Der Kerbschnitt muss rechtzeitig erfolgen, jedoch auch nicht zu früh, um ein Ausfransen der Schnittkanten zu vermeiden. Die Tiefe der Kerbschnitte erfolgt gemäß [ZTV Beton-StB 07].

### **2.2.10 Materialeigenschaften sowie die zugehörigen Materialprüfungen**

Zur Herstellung einer Betonstraße und für die Gewährleistung ihrer Dauerhaftigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit im Nutzungszeitraum ist eine hohe Qualität der Bauvorbereitung und -ausführung notwendig.

Hinsichtlich der Materialeigenschaften sind die einzelnen Bauteile einer Betonstraße zu identifizieren:

- (1) Betondecke
- (2) Fugen
- (3) Vliesunterlage
- (4) Asphaltzwischen-schicht
- (5) Hydraulisch gebundene Tragschicht bzw. Verfestigung
- (6) Asphalttragschicht
- (7) Ungebundene Tragschichten

In der Praxis werden in Deutschland Anforderungen an die Materialien und die fertige Leistung gestellt. Diese sind in verschiedenen Regelwerken verankert.

Bauteil	Anforderung in Regelwerk
Betondecke	ZTV Beton-StB 07 TL Beton-StB 07 in Verbindung mit ARS 04/2013 TL Gestein-StB 04/07
Fugen	ZTV Fug-StB 15 TL Fug-StB 15
Vliesunterlage	
Asphaltzwischen-schicht	RDO Beton 09 in Verbindung mit ZTV Asphalt-StB 07 und TL Asphalt-StB 07
Hydraulisch gebundene Tragschicht bzw. Verfestigung	ZTV Beton-StB 07 TL Beton-StB 07
Asphalttragschicht	RDO Beton 09 in Verbindung mit ZTV Asphalt-StB 07 und TL Asphalt-StB 07
Ungebundene Tragschichten	ZTV SoB-StB TL SoB-StB TL Gestein-StB 04/07

Bezüglich der Materialuntersuchungen unterscheidet man in Prüfverfahren für

- Ausgangsstoffe
- Baustoffgemische / Einbaugemische
- Festkörper
- Verbund
- Fertige Leistung.

Im Kontext zu der hier zu behandelnden Thematik interessieren nur die Materialeigenschaften am Festkörper, ggf. Verbund und an der fertigen Leistung. Bezüglich des Deckenbetons sind die Prüfungen am Festbeton in der Tab. 2.7 aufgeführt. Diese zeigt, dass im Vorfeld eine ganze Reihe von Materialeigenschaften geprüft wird, jedoch an der fertigen Leistung zurzeit nur die Rohdichte und Druckfestigkeit des Betons. Hinsichtlich der Einschätzung der Herstellung dauerhafter Gebrauchs- und Substanzeigenschaften ist der Prüfumfang an der fertigen Leistung unzureichend. Außerdem ist diesbezüglich die Prüfgröße Druckfestigkeit kein signifikanter Indikator. Nach heutigem Wissenstand sind folgende Materialprüfungen von Interesse:

- Spaltzugfestigkeit
- Frost-Tausalz-Widerstand
- Abriebfestigkeit.

	Erstprüfung		Werkseigene Produktionskontrolle	
	TL Beton-StB	Abschnitt TP B-StB <sup>1)</sup> bzw. TP Beton-StB <sup>2)</sup>	TL Beton-StB	Abschnitt TP B-StB <sup>1)</sup> bzw. TP Beton-StB <sup>2)</sup>
Festbeton				
a) Rohdichte und Druckfestigkeit	in jedem Fall	3.2.3.1 <sup>2)</sup>		4.2.4.1 <sup>2)</sup>
b) LP-Gehalt, Mikro-Luftporengehalt und Abstandsfaktor (bei zweischichtigen Decken nur Oberbeton <sup>3)</sup> )	ggf. bei Verwendung von BV oder FM und LP-Mittel, siehe Tabelle 5 der TL Beton-StB	3.1.08 <sup>1)</sup>		
c) Biegezugfestigkeit <sup>3)</sup>	in jedem Fall	3.1.04 <sup>1)</sup>		
d) Waschbeton: mittlere Texturtiefe und Wirksamkeit des verwendeten Oberflächenverzögerers <sup>3)</sup>	Herstellung einer mind. 900 cm <sup>2</sup> großen Musterplatte mit den vorgesehenen Mitteln nach dem vorgesehenen Verfahren und Bestimmung der mittleren Texturtiefe	3.2.3.4 <sup>2)</sup>		
e) Spaltzugfestigkeit		3.1.05 <sup>1)</sup>		

1) Abschnitt der TP B-StB

2) Abschnitt der TP Beton-StB

3) Prüfung entfällt für Beton für Tragschichten

**Tab. 2.7:** Erstprüfung und WPK-Prüfung (nach TP Beton-StB bzw. TP B-StB)

Nach Herstellung von Verkehrsflächen mit Betondecke sind die erreichten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften von großem Interesse. Sie sind einerseits Abnahmekriterium für die Bauleistung und gleichzeitig Startwert für die Kontrolle des Langzeitverhaltens während der Nutzungsdauer. Dabei gibt es nicht zu allen wichtigen Gebrauchs- und Substanzeigenschaften geeignete bzw. genormte Prüfverfahren. Die zurzeit angewendeten Prüfungen nach Herstellung bzw. während der Nutzungsdauer sind in (Tab. 2.8) aufgeführt.

Es ist zu erkennen, dass für einige Gebrauchseigenschaften keine Prüfvorschriften vorhanden sind und somit diese Eigenschaften nicht bewertet werden können (z. B. Zustand Schichten unter Betondecke, Auflagerungsbedingungen Betondecke). Andere Prüfungen sind teilweise messtechnisch flächendeckend nicht umsetzbar (z. B. Tragfähigkeit, Textur). Bezüglich des Oberflächenbildes ist eine technische Prüfvorschrift in Bearbeitung.

Des Weiteren sind grundsätzlich die Auswerte- und Bewertungsregeln aller Prüfverfahren kritisch zu diskutieren, da sie oftmals für lokale Einzelprüfungen konzipiert wurden und nicht für eine Gesamtaussage ganzer Abschnitte.

Gebrauchseigenschaften	Prüfvorschrift
Längsebenheit	TP Eben – Berührende Messungen (FGSV 404/1), EN 13036-7:2003 TP Eben – Berührungslose Messungen (FGSV 404/2), EN 13036-5:2010
Querebenheit	
Griffigkeit	TP Griff-StB (SKM)(FGSV 408/1) TP Griff-StB (SRT)(FGSV 408/2) AL GripTester (FGSV 411)
Oberflächenbild	-
Lärminderung	DIN EN ISO 11819
Textur	DIN EN ISO 13473-1
Substanzeigenschaften	
Zustand der Schichten unter der Betondecke	-
Auflagerungsbedingungen der Betondecke	-
Betondeckendicke	TP D-StB (FGSV 774) TP B-StB (FGSV 893/0.2) AP Georadar (FGSV 443 A)
Tragfähigkeit (Auswahl)	AP Tragfähigkeit (FGSV 433 B2.2) AP Tragfähigkeit (FGSV 433 C2.2)
Funktion der Koppelung zwischen den Betonplatten (Auswahl)	AP Tragfähigkeit (FGSV 433 B2.2) AP Tragfähigkeit (FGSV 433 C2.2)
Oberflächenbild	-
Festigkeit des Betons (Auswahl)	TP B-StB (FGSV 893/3.1.05) TP B-StB (FGSV 893/0.2)

Tab. 2.8: Prüfvorschriften für Gebrauchs- und Substanzeigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

## 2.3 Aktueller Stand der Betonbauweise in der Forschung

In diesem Kapitel werden Forschungsarbeiten aufgeführt, die eine Relevanz zu diesem Forschungsthema besitzen. Dabei sind vor allem Themen der Dimensionierung und Konstruktion, der Fugenkonstruktion und Fugenfüllstoffe, der Herstellung und Messung von Oberflächeneigenschaften sowie ausgewählte Materialuntersuchungen zu nennen.

### 2.3.1 Forschungsergebnisse zur Dimensionierung

[FE 04.0433/2009] [Heft 1072], [RIWE 2015], [INNO 2012], [FE 09.0188/2011]

Die Berechnung der notwendigen Deckendicke für eine vorgesehene normative Nutzungsdauer erfolgt mittels rechnerischer Dimensionierung nach dem Verfahren der [RDO Beton 09]. Die dort formulierten theoretischen Grundlagen/Grundsätze sollen künftig zur Bewertung der strukturellen Substanz und somit zur rechnerischen Abschätzung der Restsubstanz herangezogen werden.

Für die Bewertung der strukturellen Substanz erfolgte eine rechnerische Überprüfung der Dimensionierung. Die Restsubstanzermittlung führte in ihrer rechnerischen Prognose zu immer unsicherer werdenden Ergebnissen, je größer der Prognosezeitraum angesetzt wurde. Daher wurde das Verfahren mit einem alternativen Ansatz zur Ermittlung der prognostischen Ausfallrate versehen. Mit Hilfe der Hazard-Funktion wurde der qualitative Schadensverlauf, der aus der Praxis bekannt ist, mathematisch gefasst.

Eine eingehende Analyse der Methodik zeigte, dass das Berechnungsverfahren nur für das Beanspruchungsniveau, welches bei der Dimensionierung angestrebt wird, realistische Ergebnisse liefert. Eine Anwendung in der Substanzbewertung ist also ohne Modifikation nicht möglich. Als Hauptursache für diese Problematik wurde die zeitliche Veränderung der Modell- und Materialparameter identifiziert. Eine Hauptforschungsrichtung für die Zukunft stellt damit die Erforschung der zeitlichen Entwicklung von Material- und Modelleigenschaften dar.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Berechnung des Anteils versagender Platten im Betrachtungszeitraum. Gegenwärtig wird diese Ausfallrate nur von der Streuung der Betonfestigkeit abgeleitet. Probabilistische Berechnungsverfahren, welche die zeitlich varianten Streuungen mehrerer Einflussgrößen berücksichtigen, wurden in [Heft 1072] und [RIWE 2015] entwickelt.

Ein dritter Schwerpunkt der Entwicklung ist die Integration eines Finite-Elemente-Modells in das Dimensionierungssystem.

#### International:

Ein für die allgemeine Anwendung eingeführtes Dimensionierungsverfahren für Betonecken gibt es nur in wenigen Ländern.

Besonders erwähnenswert ist das in den letzten Jahren in den USA entwickelte Verfahren [M-E D 2008]. Es handelt sich dabei um eine Kombination von mechanischen Berechnungsmodellen mit empirischem Ingenieurwissen. Besondere Kennzeichen des Verfahrens sind die Nutzung eines FEM-Modelles, die Berücksichtigung verschiedener Laststellungen und Achskonfigurationen, die Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankungen der Temperatur und Feuchtigkeit sowie die Nutzung eines Metasystems (neuronales Netz). In einem nächsten Entwicklungsschritt soll die permanente Vorverformung der Platten berücksichtigt werden.

### **2.3.2 Forschungsergebnisse zur Konstruktion**

#### **[FE 89.0269/2011]**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Wirksamkeit der standardisierten Endbereichskonstruktion (Endsporn) analysiert. Dabei wurde nachgewiesen, dass diese Konstruktion ihre Funktion nicht erfüllen kann. Die Untersuchung alternativer Lösungen zeigte, dass sehr große Spornkonstruktionen notwendig sind, um die Längsverschiebung am Ende einer Betonstrecke zu verhindern. Es wurden Lösungen empfohlen, welche eine kontrollierte Realisierung der Verschiebungen ermöglichen.

#### International:

Der grundsätzliche konstruktive Aufbau von Betonfahrbahnen wird in der internationalen Forschung kaum hinterfragt. Die Forschung konzentriert sich auf die Anwendung neuer Baustoffe (z. B. offenporiger Beton, Hochleistungsbeton) und auf Bauweisen für die Rehabilitierung geschädigter Strecken (White-Topping).

### **2.3.3 Forschungsergebnisse zu den Materialeigenschaften**

#### **[FE 04.0433/2009], [FE 08.197/2008]**

Mit den Forschungsprojekten wurde die Entwicklung der Betoneigenschaften im Laufe der Nutzung untersucht.

Das Projekt [FE 04.0433/2009] befasste sich mit der Festigkeit (Nacherhärtung, Schwinden). Auf der Grundlage hochzyklischer Ermüdungsversuche (Spaltzugbelastung) und theoretischer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die Betonfestigkeit im Verlauf der Ermüdung kaum verändert. Erst kurz

vor dem Ermüdungsbruch kommt es zu einem signifikanten Abfall der Festigkeitswerte. Die Betonfestigkeit ist damit nicht als Indikator für den Ermüdungszustand geeignet.

Mit Versuchsreihen zum Studium der Nacherhärtung (Spaltzug-, Druck- und Biegezugversuche) wurde gezeigt, dass die Nacherhärtung bezüglich der Zugfestigkeit etwas anders verläuft als für die Druckfestigkeit. Weiter wurde auch für die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit bestätigt, dass die mit modernen Zementen hergestellten Betone nicht mehr so ein ausgeprägtes Nacherhärtungsverhalten zeigen, wie in früheren Jahrzehnten.

Im Forschungsprojekt [FE 08.197/2008] wurde die Steifigkeitsentwicklung im Ermüdungsprozess näher untersucht. Es zeigte sich, dass eine kontinuierliche Steifigkeitsabnahme für die Betonermüdung charakteristisch ist. Der Elastizitätsmodul kommt also eher als Indikator für die Ermüdung in Frage.

Aktuelle Forschungen der BAST befassen sich mit der Bestimmung relevanter Materialparameter, welche standardmäßig in der Baupraxis nicht geprüft werden (z. B. Wärmedehnzahl).

Darüber hinaus gibt es Forschungen zu neuartigen Betonen mit besonderen Eigenschaften. Offenporiger Beton ist bezüglich des Lärmschutzes und als Drainbeton interessant. Hier gibt es bereits praktische Erprobungen. Die Entwicklungen zu duktilem Beton sind noch nicht praxisreif. Versuche mit Faserbeton im Rahmen des Verbundprojektes [HESTER 2018] haben zu keinen positiven Ergebnissen geführt.

#### International:

Die internationalen Forschungsaktivitäten zum Materialverhalten des Straßenbetons, befassen sich prinzipiell mit den gleichen Problembereichen wie die deutschen Forschungen. Erwähnenswert ist die relativ große Anzahl an Forschungsarbeiten, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Bruchmechanik, Ermüdung und Maßstabeffekt beschäftigt ([BAZANT 2000], [BAZANT 2009], [GAEDICKE 2009]).

In verschiedenen Veröffentlichungen wird berichtet, dass die dissipierte Bruchenergie eng mit dem Ermüdungszustand korreliert ist. Bis zum Ermüdungsbruch wird so viel Energie dissipiert, wie für einen Bruch des nicht ermüdeten Materials notwendig ist (siehe dazu auch [PFANNER 2003]).

### **2.3.4 Forschungsergebnisse zu Fugenkonstruktion und Fugenfüllstoffen**

#### **[FE 08.0228/2013]**

Fugenvergussmassen werden im Zuge der planmäßigen Beanspruchung großen Relativdehnungen unterworfen. Auf die damit zusammenhängende Problematik der Volumenkompression wird in Abschnitt 2.4.2 eingegangen.

Damit die Fugen während der gesamten Nutzungszeit der Fahrbahn dicht bleiben, muss das Fugenmaterial sämtliche Dehnungen, alle auftretenden Temperaturen ohne Schädigung ertragen können und gleichzeitig sicher mit den Fugenflanken verklebt bleiben. In [FE 08.0228/2013] wird allerdings berichtet, dass die zulässigen Verformungen des Füllmaterials vielfach bereits bei normaler Beanspruchung überschritten werden.

Weiterhin führen die atmosphärischen Einflüsse (UV-Strahlung, starke Erhitzung im Sommer, möglicherweise Tausalzbelastung) zu einer allmählichen Veränderung der Materialeigenschaften.

Ebenso bedeutsam, wie die dauerhafte Unversehrtheit des Dichtstoffes selbst, ist die Haftung an den Fugenflanken. Ein Abreißen der Füllmasse (adhäsives Versagen) ist in der Praxis oft zu beobachten. Es sollte beachtet werden, dass an hydrophoben (basischen) Gesteinen eine bessere Haftung erreicht wird als an hydrophilen (sauren).

Die Weiterentwicklung von Fugenfüllsystemen stellt eine große Herausforderung dar, um sämtliche Beanspruchungen sicher und dauerhaft ertragen zu können. Ein weiterer vielversprechender Ansatz besteht in der Begrenzung der Fugenbewegung. Dies gilt umso mehr, weil im Sinne einer Lärmreduzierung kleinere Fugenweiten anzustreben sind. Insbesondere die Bildung von Paketfugen sollte verhindert werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von speziell konstruierten Fugenbändern.

**[FE 08.0232/2014]**

„Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton“

In Feldmessungen wurde deutlich, dass Querscheinfugen im Moment des Überrollens kurzzeitig zu einer starken Anhebung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs führen können und die akustischen Eigenschaften einer Betonfahrbahndecke aufgrund des wiederholten Auftretens der Fugengeräusche entlang der Fahrbahn insgesamt verschlechtern können. Im Projekt wurde der Einfluss der bautechnischen Eigenschaften von Querscheinfugen auf die Rollgeräuschenstehung untersucht und Empfehlungen für die schalltechnische Optimierung bei der baupraktischen Ausführung von Querscheinfugen gegeben.

Anhand umfangreicher CPX-Messungen wurden 600 Fugen unterschiedlicher Ausführung und unterschiedlichen Zustands auf Betonfahrbahnen im deutschen Autobahnnetz schalltechnisch untersucht. An sechs ausgewählten Fugen wurden Detailuntersuchungen der Fugengeometrie und der Oberflächenstruktur sowohl der Fugen als auch der angrenzenden Fahrbahnoberflächen durchgeführt und durch detaillierte Messungen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs ergänzt.

Neben der messtechnischen Analyse des Zusammenhangs zwischen Fugeneigenschaften und Rollgeräusch wurden die Messergebnisse dazu benutzt, ein bestehendes Rechenmodell für Reifen-Fahrbahn-Geräusche zu erweitern, zu validieren und für eine Parameterstudie zum Einfluss der Fugeneigenschaften auf das Rollgeräusch einzusetzen.

Messungen und Parameterstudie zeigen, dass der Fugeneinfluss auf das Rollgeräusch umso größer wird, je leiser das Rollgeräusch aufgrund akustisch günstiger Oberflächentexturen zwischen den Fugen wird. Akustisch ungünstige Fugeneigenschaften begrenzen dann die Geräuschminderung einer Betonfahrbahndecke. Für die Parameter Fugenöffnungsweite, Anstellwinkel und Höhenversatz und für die Eigenschaften der Fugenfüllung wurden konkrete Empfehlungen für eine schalltechnische Optimierung gegeben.

International:

Aus dem internationalen Bereich sind keine Entwicklungen bekannt, welche weit über den deutschen Standard hinausgehen. Ein guter Überblick über den Stand der Praxis und Forschung in den USA wird in [VOIGT 2010] gegeben.

### **2.3.5 Forschungsergebnisse zu Herstellung und Messung von Oberflächeneigenschaften**

**[FE 08.0219/2012]**

Erstmals wurde in Deutschland auf Basis von zwei verschiedenen Oberbetonen die Texturierung einer neuerbauten Betonfahrbahn mittels Grinding im Feldversuch durchgeführt. Hierbei sollte neben den Eigenschaften Ebenheit und Griffigkeit gezielt eine Lärminderung angestrebt werden.

Anhand von zuvor durchgeführten Simulationsrechnungen (z. B. mittels SPERoN®) konnte eine Texturgeometrie ausgewählt werden, die entsprechende Lärminderungseigenschaften erwarten lässt.

Die Schneidwerkzeuge sollten hinsichtlich der Schleiftiefen, Steg- und Rillenbreiten auf die erforderliche Texturgeometrie angepasst werden.

Die nach den ermittelten Vorgaben erfolgte Texturierung sollte die Anforderungswerte für die Ebenheit und Griffigkeit nach [ZTV Beton-StB 07] für einen Neubau erfüllen.

Die Prüfungen sowie weitere Messungen lieferten folgende Ergebnisse:

- Das nach dem Verfahren der Mehrfachabtastung mittels Laser-Abstands-Sensoren erzeugte Höhenlängsprofil ist für die Beurteilung der Längsebenheit einer Grindingtextur nicht geeignet. Weitere Ebenheitsmessergebnisse lagen nicht vor.
- Die Griffigkeitswerte der Grindingabschnitte lagen deutlich über den Werten auf der sich anschließenden Waschbetonoberfläche und liegen deutlich über dem Sollwert bei Abnahme.
- Die mittels CPX-Verfahren gemessene lärmmindernde Wirkung des Grindings ist mit 6 dB(A) gegenüber dem Vergleichswert als positiv zu bewerten.

- Nach dem SPB-Verfahren konnte trotz der nicht anforderungsgerechten Standortvoraussetzungen der Messungen eine Lärminderung von 2 dB(A) erreicht werden.
- Die repräsentativ erfasste Texturtiefe ist in Bezug auf eine anforderungsgerechte Griffigkeit und auf die erzielte Lärminderung als gut zu bewerten.
- Der Einsatz eines Oberbetons mit stetiger Sieblinie führt durch den Grindingprozess zu einem einheitlicheren Niveau der Griffigkeit und Texturtiefe als ein Oberbeton mit Ausfallkörnung.

#### **[FE 08.0220/2012]**

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer lärmtechnisch optimalen Grindingtextur auf Grundlage existierender theoretischer Berechnungsmodelle und dem Einsatz optimierter Oberbetone.

Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Forschungsthemen, den zusätzlich zu Testzwecken auf der A 92, der A 93 und der A 13 hergestellten Grinding- und Groovingtexturen, den im Labor für das Grinding entwickelten optimierten Betonrezepturen und den Texturen auf der ersten Erprobungsstrecke auf der A 12 wurden in Computersimulationen mit dem Rechenmodell SPERoN® Grindingtexturen mit optimalen lärmindernden Eigenschaften entwickelt.

Nach kritischer Abwägung der theoretischen Berechnungen hinsichtlich der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die zu erzielende Griffigkeit der Texturen wurden für eine zweite Erprobungsstrecke auf der A 5 drei verschiedene Grindingvarianten ausgewählt und auf drei verschiedenen Oberbetonen hergestellt.

In Zusammenarbeit mit der BAST wurden auf allen in die Untersuchungen einbezogenen Grindingabschnitten umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung der

- schalltechnischen Eigenschaften,
- anforderungsgerechten Griffigkeit,
- anforderungsgerechten Ebenheit,
- Dauerhaftigkeit der erzeugten Textur,
- Dauerhaftigkeit hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Oberbetons

durchgeführt.

Aus den Ergebnissen aller untersuchten Streckenabschnitte lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

Eine signifikante Lärminderung durch das Grinding ist bei Einhaltung der vorab definierten Grindingparameter möglich.

Der Einfluss der Oberbetone auf die Lärmentwicklung ist als eher gering einzustufen.

Aus akustischer Sicht verhalten sich die Abschnitte der Erprobungsstrecken mit kombinierten Grinding-Grooving-Texturen neutral.

Der Grindingvorgang sollte nicht zu früh nach der Betonherstellung erfolgen, damit nicht durch die geringe Anfangsfestigkeit des Oberbetons vermehrt Kornausbrüche verursacht werden.

Ein langfristiges Monitoring zur Entwicklung des Lärm- und Griffigkeitsverhaltens und zur Dauerhaftigkeit der erzeugten Texturen ist notwendig.

### **2.3.6 Forschungsergebnisse zur Fertigteilbauweise**

In Deutschland wurden in den letzten Jahren mehrere Forschungsthemen mit dem Schwerpunkt der Fertigteilbauweise bearbeitet. Aufbauend auf dem **[FE 08.0217/2012/ERB]**, sollte im **[FE 89.0279/2012]** zunächst die prinzipielle Machbarkeit zum Einsatz von vorgefertigten Betonfertigteilen zur schnellen Sanierung lokaler Schadstellen untersucht werden. Ziel war es, durch den Einsatz von Fertigteilen eine technologische Alternative zum Schnellbeton zu erhalten und dadurch eine schnelle Verkehrsfreigabe nach Instandsetzung zu ermöglichen. Die durchgeführten theoretischen Untersuchungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz der Fertigteile auch die Beanspruchung der angrenzenden Fahrbahnplatten verändert wird, so dass das Tragverhalten der verbleibenden Restplatten und der angrenzenden Platten bereits bei der Planung untersucht werden sollte. Im Projekt wurden erste technische Lösungen für die Querkraftübertragung und die Bettung der Fertigteile erarbeitet, die Grundlage für eine erste Praxiserprobung waren.



Die theoretischen Grundlagen wurden im **[FE 89.0283/2013]** weiterentwickelt, um aufbauend auf den Erfahrungen aus den genannten Forschungsvorhaben ein kreisrundes Fertigteil zu entwickeln und praktisch zu erproben. Im Zusammenwirken mit neu entwickelter Schneidtechnik konnte durch diese neue Fertigteilgeometrie eine beträchtliche Steigerung der Effizienz bei der Sanierung von Schäden im Fugenkreuzbereich erzielt werden.

Es wurde jedoch ermittelt, dass der Einbau von Fertigteilen in einer Reihe aufeinanderfolgender Fugenkreuze zu einer Störung des temperaturabhängigen Verformungsverhaltens der Plattenreihe führen kann. Dies ist besonders im Hinblick auf die Gefahr eines temperaturbedingten Stabilitätsversagens (Hitzeaufbruch) bedeutsam. Zur Analyse dieses Problem wurden daher Simulationsrechnungen an einem Finite-Elemente-Modell durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die zusätzlichen Spannungen durch Verwendung entsprechend geeigneter Fugenfüllstoffe abgebaut werden können.

Im folgenden Forschungsprojekt **[FE 08.0236/2015/ERB]** wurde untersucht, inwieweit sich Entspannungs- bzw. Dehnbereiche mit dem Einbau von Fertigteilen in einer Betondecke herstellen lassen. Dabei wurden insgesamt drei verschiedene Anwendungsfälle betrachtet. Zum einen sollten die im Zuge der Hitzeschadenproblematik hergestellten provisorischen Asphaltstreifen dauerhaft durch den Einsatz von Fertigteilen ersetzt werden. Zum anderen sollte im zweiten Anwendungsfall vorgesehen werden, die Fertigteile in eine nicht spannungsreduzierte Betondecke einzubauen und somit durch den Einbau mehrerer Raumfugen die temperaturbedingte horizontale Ausdehnung der Betondecke zu ermöglichen. Zum Einsatz kamen daher auch im Fertigteil integrierte Raumfugen. Bei dem dritten Anwendungsfall war die Anwendbarkeit der Fertigteiltechnologie in Endbereichen im Zuge einer Neubaumaßnahme eingehender zu betrachten. Entgegen der herkömmlichen Bauweise konnte somit eine qualitativ hochwertige Herstellung von Betonbereichen mit verdübelten Raumfugen sichergestellt werden. Alle Anwendungsfälle wurden in der Praxis umgesetzt.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde seit dem Jahr 2015 das Verbundforschungsvorhaben „Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe“ **[HESTER 2018]** bearbeitet. Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung eines neuartigen Fertigteilensystems, das aufbauend auf der Verwendung neuer Materialien den Einsatzbereich der Fertigteilbauweise ausweitet. Hierbei war insbesondere der innerstädtische Bereich zu nennen, bei dem dadurch lang andauernde Sperrungen vermieden und eine langlebige Fahrbahnbefestigung geschaffen werden kann. Auch war die Möglichkeit von Aufgrabungen und eine Wiederverwendung der Materialien Bestandteil der Forschung. Ein wesentliches Ergebnis war die Erarbeitung eines neuen Höhenjustiersystems, das das Ausrichten der Fertigteilplatte unabhängig von der vorhandenen Fahrbahn ermöglicht. Dadurch wurden neue Anwendungsbereiche möglich. In einem ersten Demonstrator wurde die Fahrbahn einer Bushaltestelle innerhalb eines Tages erneuert, so dass ein Befahren bereits am nächsten Tag möglich gewesen wäre. Auch der Einbau von Fertigteilplatten im Rahmen eines weiteren Demonstrators, bei dem unter anderem das bereits weiterentwickelte Höhenjustiersystem zum Einsatz kam, war erfolgreich.

Zeitlich parallel wurde das **[FE 08.0253/2017/ERB]** begonnen, bei dem basierend auf den Ergebnissen bereits abgeschlossener und noch laufender Projekte durch einen hohen Praxisbezug Betonfertigteile für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST entwickelt und getestet wurden.

#### International:

Auch international werden Forschungsthemen zur Fertigteiltechnologie bearbeitet. Im Projekt **[SPEED-FT]** wurde in einer Kooperation von deutschen und österreichischen Partnern die Möglichkeit des Einsatzes der Fertigteiltechnologie auf den österreichischen Autobahnen entwickelt. Grundlage dafür bilden die in den deutschen Forschungsprojekten bereits erzielten Ergebnisse. Maßgebliches Ziel war es in diesem Fall, die Fertigteile so zu konzipieren, dass auf eine Bewehrung weitgehend verzichtet werden kann. Zudem sollte eine Methode entwickelt werden, um auf die beim Fertigteilereinbau auf Autobahnen zur Kopplung erforderlichen Dübelkammern verzichten zu können.

In den USA werden Fertigteile im Stahlbetonbau in größerem Maße angewendet als in Deutschland. Entsprechend gibt es auch mehr Praxiserfahrung und Forschungsaktivitäten. Die Qualitätsanforderungen, z. B. an die Ebenheit der Fahrbahn, liegen allerdings oftmals unter dem deutschen Standard. Interessant sind Berichte über vorgespannte und nachträglich verspannte Platten ([MISHRA 2010], [SEGURA 2012]). Diese Technologien ermöglichen es, die Anzahl der Fugen zu reduzieren. Allerdings ergeben sich in den verbleibenden Fugen entsprechend größere Öffnungsweiten.

In den Niederlanden wurde 2011 eine Versuchsstrecke auf einer regulär befahrenen Autobahn errichtet. Das System Modieslab beinhaltet mehrere innovative Bestandteile. Die Fertigteile sind als Stahlbetonbauteile konzipiert und ruhen auf Einzelfundamenten. Die Oberbetonschicht ist aus offenporigem Beton hergestellt. Die bisherigen Praxiserfahrungen sind sehr gut.

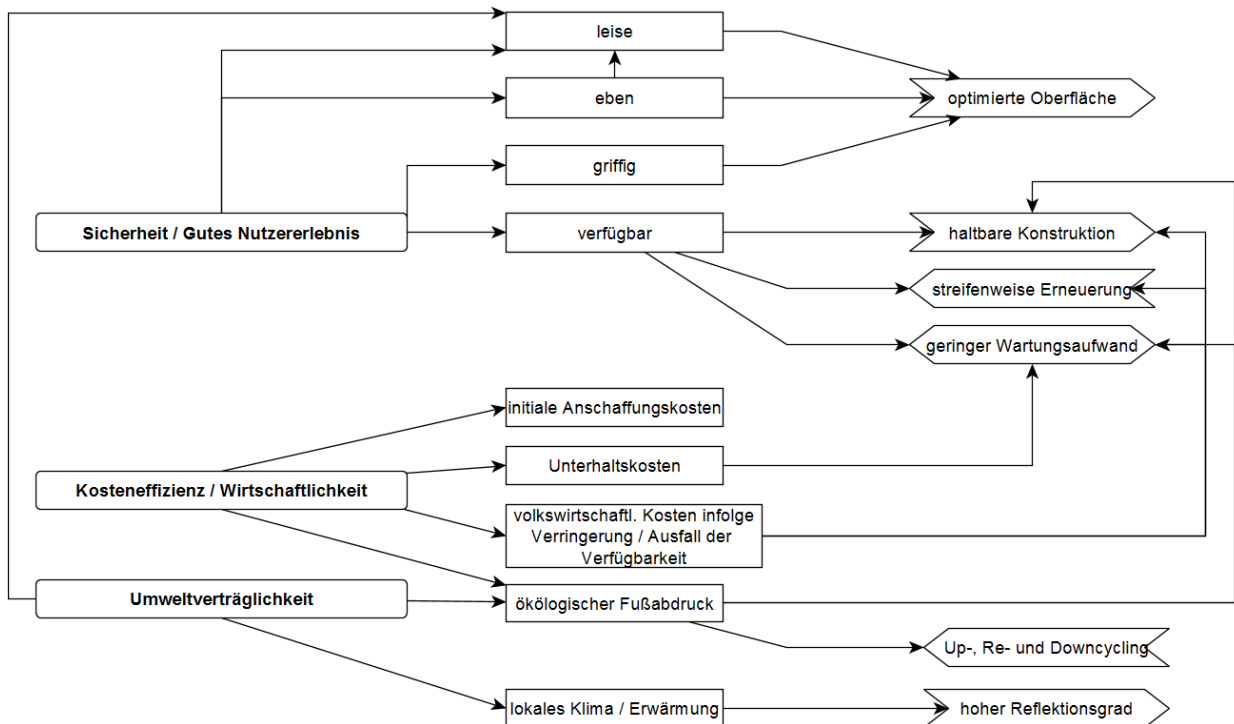
## 2.4 Mechanismen und Zielfunktionen im konstruktiven Betonstraßenbau

### 2.4.1 Zielfunktionen bei der Optimierung der Konstruktion im Betonstraßenbau

An eine Betonfahrbahn sind drei grundlegende Anforderungen zu stellen:

- Sicherheit / Gutes Nutzererlebnis
- Kosteneffizienz / Wirtschaftlichkeit
- Umweltverträglichkeit.

Bild 2.41 zeigt die zu diesen Anforderungsgruppen zugehörigen Zielfunktionen, die im Nachfolgenden einzeln diskutiert werden.



**Bild 2.41:** Anforderungsgruppen und Zielfunktionen

Die Sicherheit der Fahrbahn wird wesentlich durch verschiedene Faktoren beeinflusst, welche nicht spezifisch für die Betonbauweise auszugestaltet sind (z. B. die Linienführung oder die Ausstattung mit Rückhaltesystemen). Diese Aspekte bleiben hier außer Betracht.

Alle den Fahrkomfort betreffenden Parameter (z. B. die Ebenheit) werden ab einer bestimmten Ausprägung bzw. Fahrgeschwindigkeit sicherheitsrelevant. Damit kann die Forderung nach gutem Fahrkomfort hier unter der Sicherheitsanforderung subsummiert werden.

Die Forderung nach Wirtschaftlichkeit, also nach geringen Kosten, ist auf den gesamten Lebenszyklus der Fahrbahn zu beziehen. Zu betrachten sind Herstellungskosten, Reparaturkosten, Wartungskosten und Abbruchkosten (einschließlich Entsorgung). Die Forderung nach Wirtschaftlichkeit umfasst also auch die Forderung nach Dauerhaftigkeit.

Bezüglich der Umweltverträglichkeit ist ebenfalls der gesamte Lebenszyklus zu betrachten. Hier können die Gesamtenergiebilanz und die CO<sub>2</sub> Bilanz als aussagekräftige Parameter herangezogen werden.

Die grundlegende Zielfunktion kann also als Maximierung der drei Grundforderungen beschrieben werden:

Sicherheit + Wirtschaftlichkeit + Umweltverträglichkeit → Max! (ZF G)

Eine explizite Beschreibung der Zielfunktion im mathematischen Sinne ist nicht möglich, weil es keine einheitliche Bezugsgröße gibt. Zwar wurden in der Vergangenheit Versuche unternommen, die Sicherheit mit wirtschaftlichen Größen, also letztendlich Geldbeträgen, zu erfassen (siehe z. B. [RACKWITZ 2006]), es verbleiben aber ethische Fragen zu denen es keinen allgemeinen Konsens gibt. Bezüglich der Umweltverträglichkeit sind die Versuche einer monetären Erfassung weiter vorangeschritten und teilweise in Gesetzesform vorhanden (Ausgleichsmaßnahmen für Eingriffe in die Natur). Ein allgemein akzeptiertes, umfassendes Bewertungsverfahren fehlt aber. Im praktischen Baugeschehen geht es bezüglich der Umweltverträglichkeit ohnehin vorwiegend um die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, welche vielfach auf Grund politischer Vorgaben definiert wurden. Der Versuch einer konsistenten Beschreibung der Zielfunktion ist also wenig erfolgversprechend. Vielmehr ist es angebracht, Zielfunktionen für konkrete technische Parameter zu definieren und die Zielkonflikte zwischen den drei Grundforderungen, welche sich ggf. ergeben, am konkreten Fall zu entscheiden.

In vielen Fällen ist es möglich, eine allgemein formulierte Zielfunktion (z. B.: Vermeidung von Hitzeschäden) weiter zu konkretisieren. Das ist dann der Fall, wenn die Veränderung eines Parameters in eine bestimmte Richtung immer der Erreichung des übergeordneten Zieles dient. So wirkt sich eine Reduzierung der Wärmedehnzahl immer positiv bezüglich der Problematik der Hitzeschäden aus. Die Reduzierung der Tiefe des Fugenschnittes kann dagegen auch schädlich sein. Bei geringer Schnitttiefe kann es zu Paketrisen kommen, welche durch die größere Öffnungsweite die Fugenverschmutzung fördern.

### Grundforderung Sicherheit

Die für die Sicherheit relevanten technischen Parameter bzw. Konstruktionsdetails sind:

- (1) Fahrbahnebenheit (Längs-, Quer-)
- (2) Stufenbildung an den Fugen
- (3) Griffigkeit der Oberfläche
- (4) Drainagevermögen
- (5) Sicherheit gegen Hitzaufbruch

(1) Unebenheiten erzeugen Vertikalbeschleunigungen am Fahrzeug. Dies vermindert den Fahrkomfort und vermindert temporär den Anpressdruck und damit die Reibung des Reifens auf der Fahrbahn. In extremen Fällen kann der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn vollständig verloren gehen.

Tendenziell behindern Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche den Abfluss von Regenwasser. Dies wirkt sich vor allem in Bereichen mit geringer Längs- und Querneigung aus. Die Gefahr von Aquaplaning wird damit erhöht.

Einen Sonderfall stellen Unebenheiten dar, welche durch unplanmäßige Risse in den Platten entstehen. Diese werden in der vorliegenden Betrachtung der Grundforderung „Wirtschaftlichkeit“ (Dauerhaftigkeit) zugeordnet.

Das Ziel bezüglich der Fahrbahnebenheit muss also darin bestehen die Unebenheiten zu minimieren.

Zielfunktion:

Fahrbahnunebenheiten → Min! (ZF S E)

(2) Die Stufenbildung an den Fugen kann durch die vorherrschende Regelbauweise (verdübelt Querfugen) hinreichend beschränkt werden. Gleichwohl ist diese Forderung auch für alle alternativen Fugenkonstruktionen zu stellen.

Zielfunktion:

Stufenbildung an Fugen → Min! (ZF S SF)

(3) Die Griffigkeit der Oberfläche verstärkt die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Dies führt auch zu erhöhtem Abrieb am Reifen. Insofern besteht ein Zielkonflikt mit der Grundforderung „Umweltverträglichkeit“. Bezüglich der Verkehrssicherheit muss aber eindeutig die Forderung nach einer Maximierung der Griffigkeit gestellt werden.

Zielfunktion:

Griffigkeit der Oberfläche → Max! (ZF S G)

(4) Das Drainagevermögen der Fahrbahn beschreibt die Fähigkeit zur schnellen und sicheren Ableitung von Oberflächenwasser. Wesentlichen Einfluss auf das Drainagevermögen hat die Querneigung, die Oberflächentextur und, wie bereits oben erläutert, auch die Ebenheit. Im Sinne der Verkehrssicherheit sollte das Drainagevermögen möglichst hoch sein.

Zielfunktion:

Drainagevermögen → Max! (ZF S D)

(5) Eine besonders starke Gefährdung des Straßenverkehrs stellt ein Hitzaufbruch dar. Es ist deshalb anzustreben, diese Ereignisse vollständig zu vermeiden.

Zielfunktion:

Hitzaufbruch → Min! (ZF S H)

### Grundforderung Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der Fahrbahn wird durch alle Faktoren bestimmt, welche die Herstellungskosten, die Dauerhaftigkeit und schließlich die Abbruch- und Entsorgungskosten beeinflussen. Damit tangiert die Wirtschaftlichkeitsforderung nahezu alle Aspekte der Konstruktion und Herstellung. Es ist deshalb im Allgemeinen kaum möglich, zu konkreten Parametern, z. B. der Plattenlänge, eine allgemeingültige Zielfunktion zu definieren. So gibt es gute fachliche Argumente für eine Bauweise mit kurzen, wie auch mit langen Platten oder auch für den völligen Verzicht auf Fugen. Es kommt hier allein darauf an, durch die entsprechende Ausgestaltung der anderen Randbedingungen, ein schlüssiges Gesamtkonzept zu entwerfen. Eine allgemeingültige Zielfunktion für die Plattenlänge kann also nicht formuliert werden. Ähnlich verhält es sich mit anderen konkreten Konstruktionsdetails. Für die Angabe von Zielfunktionen müssen also etwas allgemeinere Forderungen formuliert werden. Naturgemäß werden damit auch die Aussagen etwas banaler. Als wesentliche Aspekte, welche für die Wirtschaftlichkeit der Betonfahrbahn relevant sind, sind zu nennen:

- (1) Dimensionierung
- (2) Kosten der Baustoffe
- (3) Entsorgungskosten der Baustoffe
- (4) Herstellungstechnologie
- (5) Eigenschaften der Baustoffe
- (6) Eigenschaften der Konstruktion bezüglich der Dauerhaftigkeit
- (7) Betreiberkosten
- (8) Nutzerkosten
- (9) Abbruchkosten der Fahrbahn

(1) Die Dimensionierung der Fahrbahn verfolgt das Ziel, ein wirtschaftliches Optimum bezüglich Herstellungskosten und Dauerhaftigkeit unter Berücksichtigung der Erhaltungskosten während der Nutzungsdauer zu erzielen. Die Erreichung dieses Zieles setzt die umfassende Kenntnis aller relevanten Einflussfaktoren und deren Wirkmechanismen voraus. Es ist offenkundig, dass diese Voraussetzung gegenwärtig nicht erfüllbar ist. Da eine Dimensionierung aber in jedem Fall stattfinden muss, sei es erfahrungsbasiert oder durch willkürliche Festlegung des Deckenaufbaues, kann das Ziel nur darin bestehen, die relevanten Zusammenhänge weiter zu erforschen und die Berechnungsmodelle schrittweise zu verbessern. So wird man schrittweise in die Lage versetzt, den Fahrbahnoberbau so zu konzipieren, dass er genau den Zielvorgaben bezüglich Beanspruchbarkeit und Dauerhaftigkeit entspricht.

Die Zielfunktion für die Dimensionierung lautet:

Dimensionierung → Zielgenau! (ZF W D)

(2) Die Kosten der Baustoffe wirken sich direkt auf die Herstellungskosten aus. Deshalb ist die Zielfunktion naheliegend. Das Ziel der Kostenminimierung für die Baustoffe steht vielfach, aber nicht grundsätzlich, in Konkurrenz zum Ziel der Beständigkeit (Dauerhaftigkeit).

Zielfunktion:

Baustoffkosten → Min! (ZF W BK)

(3) Die Entsorgungskosten für die Baustoffe werden vielfach nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt. Hier ist die Recyclingfähigkeit von besonderer Bedeutung. Es ist aber zu beachten, dass gerade bei der Langlebigkeit der Betonstraßen die Entsorgungskosten über einen langen Zeitraum zu prognostizieren sind. Die Recyclingfähigkeit korrespondiert mit der Grundforderung nach Umweltverträglichkeit.

Zielfunktion:

Entsorgungskosten → Min! (ZF W BE)

(4) Es wird vorausgesetzt, dass die Herstellungstechnologie geeignet ist, die Fahrbahn in der geforderten Qualität zu realisieren. Unter dieser Voraussetzung ist anzunehmen, dass die Herstellung umso kostengünstiger wird, je einfacher sie ist. Ziel muss also eine einfache Technologie sein.

Zielfunktion:

Technologie → Einfach! (ZF W T)

(5) Die verschiedenen Eigenschaften der Baustoffe können sich positiv oder negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. In vielen Fällen gibt es aber Korrelationen zwischen verschiedenen Baustoffparametern (z. B. zwischen E-Modul und Festigkeit), sodass sich positive und negative Effekte nicht eindeutig separieren lassen. Gelegentlich wirkt sich auch die gleiche Eigenschaft, je nachdem welchen Aspekt des Bauteilverhaltens man betrachtet, sowohl positiv wie auch negativ aus. So ist z. B. ein steifer Unterbau wünschenswert, weil die verkehrsbedingten Verformungen minimiert werden. Andererseits verkleinert sich aber auch die Auflagerfläche bei temperaturbedingten Verformungen der Betondecke, was wiederum zu erhöhten Spannungen führt.

Es ist also in jedem Fall notwendig, die Konstruktion und Dimensionierung so zu gestalten, dass sie im Zusammenspiel mit den spezifischen Baustoffeigenschaften eine funktionierende Einheit bilden. Diese Abstimmung bleibt aber nur so lange erhalten, wie sich die Parameter des Baustoffes nicht in relevantem Maße ändern. Wenn der Beton z. B. durch chemische Veränderung seine Festigkeit verliert, ist die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn nicht mehr gegeben und damit die Wirtschaftlichkeit insgesamt verloren gegangen. Als allgemeine Zielforderung für die Baustoffe kann deshalb die zeitliche Unveränderlichkeit (Beständigkeit) formuliert werden.

Zielfunktion:

Baustoffe → Beständigkeit! (ZF W B)

(6) Die die Dauerhaftigkeit betreffenden Konstruktionseigenschaften sind sehr vielfältig. Prinzipiell gilt das in Punkt (5) zu den Baustoffeigenschaften Gesagte. Es sind verschiedene, teilweise gegensätzliche konzeptionelle Ansätze möglich. Entscheidend ist die Funktion des Gesamtkonzeptes. Die Korrektheit der konstruktiven Gestaltung und der damit zusammenhängenden Dimensionierung vorausgesetzt, ist das Produkt dauerhaft, wenn sich Baustoffe und Konstruktion unter dem Einfluss der planmäßigen Einwirkungen nicht signifikant verändern. Eine Schottertragschicht ist z. B. grundsätzlich als eine brauchbare Tragschicht anzusehen. Wenn sie sich aber durch Erosion an den Fugen verändert, ist die Dauerhaftigkeit nicht mehr gegeben. Von der Konstruktion ist also, ebenso wie von den Baustoffen, ganz allgemein Beständigkeit zu fordern.

Zielfunktion:

Konstruktion → Beständigkeit! (ZF W K)

Zusätzlich lassen sich konkretere Zielfunktionen angeben.

Die Deckendicke kann im Zuge der Dimensionierung so festgelegt werden, dass sie im Kontext mit den anderen Parametern der Konstruktion ausreichend ist. Da der Beton aber in der Regel der teuerste Baustoff

im Fahrbahnoberbau ist, ist unter Beachtung der gewünschten Dauerhaftigkeit eine möglichst dünne Betondecke anzustreben.

Zielfunktion:

Deckendicke Beton  $\rightarrow$  Min (ZF W DB)

Es ist bekannt, dass die Fugen eine potentielle Schwachstelle in der Betondecke sind. Sie sind bezüglich Herstellung und Erhaltung ein Kostenfaktor. Eine Minimierung der Fugenanzahl ist deshalb wünschenswert.

Zielfunktion:

Fugenanzahl  $\rightarrow$  Min (ZF W FA)

Es steht außer Zweifel, dass durch die Fugen eindringendes Wasser die Dauerhaftigkeit der Konstruktion beeinträchtigt. Die Fugen sollten also möglichst dicht sein.

Zielfunktion:

Dichtheit Fugen  $\rightarrow$  Max (ZF W FD)

Eine gute Querkraftübertragung in den Fugen erhöht die Dauerhaftigkeit und ermöglicht eine Reduzierung der Deckendicke. Die Querkraftübertragung sollte deshalb möglichst wirksam sein.

Zielfunktion:

Querkraftübertragung Fugen  $\rightarrow$  Max (ZF W FQ)

(7) Die Betreiberkosten umfassen alle Maßnahmen, die für die bauliche Unterhaltung der Fahrbahn notwendig sind. Dies betrifft die Kosten für planmäßig notwendige Arbeiten (Instandhaltung), wie auch für unplanmäßige Ereignisse (Instandsetzung). Es wäre deshalb möglich, die Betreiberkosten allgemein unter dem Punkt Konstruktionseigenschaften zu subsumieren. Eine Abgrenzung zu Punkt 6 ist aber sinnvoll, weil es offenbar möglich ist, für die Betreiberkosten eine allgemeingültige Zielfunktion anzugeben. Es ist offensichtlich, dass im Sinne der Wirtschaftlichkeit möglichst geringe Betreiberkosten anzustreben sind.

Zielfunktion:

Betreiberkosten  $\rightarrow$  Min! (ZF W BK)

(8) In eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung sind auch die Nutzerkosten einzubeziehen. Die Benutzung der Fahrbahn ist in Deutschland zwar in aller Regel kostenlos, die Fahrt ist aber zwangsläufig mit Treibstoffverbrauch und einem Verschleiß am Fahrzeug verbunden. Die Höhe dieser Kosten wird direkt durch den Reifenabrieb und den Rollwiderstand beeinflusst. Es ist deshalb möglich, die allgemeine Forderung nach niedrigen Nutzerkosten durch konkretere Forderungen nach geringem Reifenabrieb und Rollwiderstand zu untersetzen.

Von großer Bedeutung für den Nutzer ist außerdem die Verfügbarkeit der Fahrbahn. Instandhaltung und besonders Instandsetzungsarbeiten führen zu Sperrungen und Staus, welche effektiv Zusatzkosten erzeugen. Die im Sinne der Betreiberkosten erhobene Forderung nach einem geringen Bedarf an baulichen Unterhaltungsmaßnahmen muss also auch für die Nutzerkosten gelten.

Zielfunktion:

Nutzerkosten  $\rightarrow$  Min! (ZF W NK)

Rollwiderstand  $\rightarrow$  Min! (ZF W RW)

Reifenabrieb  $\rightarrow$  Min! (ZF W RA)

(9) Es ist offenkundig, dass die Abbruchkosten für die Fahrbahn zum Zeitpunkt der Herstellung nur schwer einzuschätzen sind. Die Zielfunktion ist deshalb von geringer praktischer Bedeutung.

Zielfunktion:

Abbruchkosten  $\rightarrow$  Min! (ZF W A)

### Grundforderung Umweltverträglichkeit

Die Forderung nach Umweltverträglichkeit lässt sich etwas konkreter untersetzen. Zu nennen sind:

- (1) Energiebilanz für die gesamte Lebensdauer
- (2) CO<sub>2</sub>-Bilanz für die gesamte Lebensdauer
- (3) Lärmemission
- (4) Reifenabrieb
- (5) Recyclingfähigkeit der Baustoffe

(1) Bei der Energiebilanz sind die Energiebedarfe für die Herstellung (einschließlich der Herstellung der Baustoffe), den Betrieb und den Abbruch der Fahrbahn zu berücksichtigen. Außerdem muss auch der Energiebedarf der Fahrzeuge, welche die Fahrbahn benutzen, in die Betrachtung einfließen. Die allgemeine Forderung nach einer Minimierung des Energieverbrauchs kann also mit einer etwas konkreten Forderung nach geringem Rollwiderstand ergänzt werden.

Zielfunktion:

Energieverbrauch → Min! (ZF U E)

Rollwiderstand → Min! (ZF U ER)

(2) Die CO<sub>2</sub>-Bilanz ist ähnlich zu betrachten wie die Energiebilanz. Da CO<sub>2</sub>-Emission und Energieverbrauch eng verbunden sind, gibt es einen Zusammenhang aber keine Identität. Das rechtfertigt die Definition einer gesonderten Zielfunktion.

Zielfunktion:

CO<sub>2</sub>-Emission → Min! (ZF U C)

Rollwiderstand → Min! (ZF U CR)

(3) Die Lärmemission ist in starkem Maße durch die Oberflächentextur bestimmt. Hier können verschiedene Texturgestaltungen im Sinne einer Lärminderung wirksam sein. Eine allgemein gültige Zielfunktion für einen Texturparameter ist deshalb nicht anzugeben.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Fugenbreite. Hier ist bekannt, dass sich schmalere Fugen lärmindernd auswirken. Es kann also ergänzend zur allgemeinen Forderung nach Minimierung der Lärmemission eine Forderung nach Minimierung der Fugenweite formuliert werden.

Außerdem ist offensichtlich eine Stufenbildung an den Fugen lärmfördernd. Folglich sollte die Zielstellung sein, diese Stufenbildung zu verhindern. Hier existiert eine Zielidentität zum Bereich der Sicherheitsforderungen.

Zielfunktion:

Lärmemission → Min! (ZF U L)

Fugenweite → Min! (ZF U LF)

Stufenbildung an Fugen → Min! (ZF U LS)

(4) Der auf der Fahrbahn verbleibende Reifenabrieb ist zweifellos eine Umweltbelastung und sollte minimiert werden. Es ist zu vermuten, dass die Griffigkeit der Fahrbahn mit dem Abrieb korreliert ist. Es ist aber noch nicht klar, ob dieser Zusammenhang in jedem Fall existiert. Deshalb wird als Zielfunktion vorerst nur die allgemeine Forderung nach Minimierung des Reifenabriebs formuliert.

Zielfunktion:

Reifenabrieb → Min! (ZF U R)

(5) Ein Baustoff kann nur dann wiederverwendet werden, wenn er keine Schadstoffe enthält. Die Recyclingfähigkeit der Baustoffe wurde bereits in der Kategorie „Wirtschaftlichkeit“ als wichtiges Kriterium identifiziert. Da aber nicht davon ausgegangen werden kann, dass das ggf. vorhandene Gefährdungspotenzial eines Baustoffes in jedem Fall durch die monetäre Bewertung adäquat erfasst wird, wird die Recyclingfähigkeit im Sinne des Umweltschutzes an dieser Stelle als eigenständiges Ziel definiert.

Zielfunktion:

Recyclingfähigkeit → Max! (ZF U RC)

## 2.4.2 Wirkungsmechanismen und relevante Effekte im konstruktiven Betonstraßenbau

Um die unter Abschnitt 2.4.1 formulierten Ziele zu erreichen, ist es notwendig, die Wirkungsmechanismen zu kennen, welche letztendlich für die konkrete Ausprägung der genannten Parameter entscheidend sind. Auf Beschreibung der rein ökonomisch ausgerichteten Zielfunktionen wird an dieser Stelle verzichtet.

### Zielfunktion ZF S E (Fahrbahnebenheit)

Die Fahrbahnebenheit kann mit verschiedenen Kenngrößen beschrieben werden. (siehe [KIM 2006]). Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche können auf zwei Ursachen zurückzuführen sein:

Mängel in der Herstellung

Verformungen der Betonplatte

(1) Mit der heute verfügbaren Technik im Bereich der Fahrbahnfertiger ist die Herstellung einer hinreichend ebenen Fahrbahnoberfläche normalerweise kein Problem.

(2) Wie auch andere Materialien unterliegt der Beton einer temperaturabhängigen Volumenänderung. Zusätzlich wird das Betonvolumen auch von der Feuchtigkeit des Materials beeinflusst.

Besonders gravierend ist die Feuchtigkeitsänderung naturgemäß während des Hydratationsprozesses. Folglich kommt es auch in dieser Phase zu einer besonders großen Volumenänderung, in diesem Fall zu einer Schrumpfung (Schwinden). Da die Feuchtigkeitsabnahme aber in Abhängigkeit vom örtlichen Hydratationsfortschritt bzw. Austrocknungszustand verläuft, ist das Schwindmaß nicht gleichmäßig über das Plattenvolumen verteilt. Überlagert wird dieser Prozess durch kontinuierliche, örtlich wechselnde Temperaturzustände im Plattenvolumen. Im Ergebnis tritt die Erstarrung des Betons innerhalb des Plattenvolumens bei unterschiedlichen Ausdehnungszuständen des Materials ein. Dies führt zu Eigenspannungen und Plattenbiegungen, welche der Platte nach Abschluss der Betonerhärtung praktisch lebenslang eingeprägt sind. Normalerweise wird die bei der Betonerhärtung anfallende Hydratationswärme über die Oberfläche abgegeben. Gleichzeitig trocknet der Beton über die Oberfläche aus. Dadurch schwindet die Oberseite der Platte stärker als die Unterseite. Im Ergebnis kommt es zu einer Aufschüsselung der Plattenränder. Dies ist die typische, permanent eingeprägte Vorverformung einer Betonfahrbahnplatte.

Bei Laborversuchen an Platten üblicher Größe wurden von PFEIFER [PFEIFER 1973] bleibende Anhebungen der Plattenecken von bis zu 3 mm gemessen. Bei ähnlichen Versuchen wurden von FOOS [FOOS 2006] Anhebungswerte von bis zu 5 mm gemessen, welche sich im Verlauf von 2 Jahren wieder auf ca. 3 mm zurückstellten. SONDAG und SNYDER berichten von Eckhebungswerte von bis zu 10 mm [SONDAG 2006]. Generell ist festzuhalten, dass die permanente Vorverformung der Betonplatten von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt. Von besonderer Bedeutung sind offensichtlich die Betonrezeptur, die Witterung zum Zeitpunkt der Hydratation und die Nachbehandlung. Da die permanente Vorverformung zu jedem Zeitpunkt durch die aktuelle Vorverformung überlagert wird, ist eine exakte messtechnische Ermittlung problematisch. Das gilt umso mehr, als dass infolge von Kriechprozessen auch eine zeitliche Entwicklung zu verzeichnen ist.

Um die permanente Vorverformung der Platten für die mathematische Modellierung einfacher handhabbar zu gestalten, ist es möglich, einen fiktiven Temperaturgradienten zu definieren, welcher eine äquivalente Aufschüsselung der Plattenränder erzeugen würde. Soweit hinreichend viele Messwerte und leistungsfähige Berechnungsmodelle für die Temperatur und Feuchteverhältnisse im Platteninneren zur Verfügung stehen, können die theoretischen Verformungen berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen werden. Die dabei ermittelte Differenz kann auf die permanente Vorverformung zurückgeführt werden. Durch Rückrechnung gewinnt man den zugeordneten fiktiven Temperaturgradienten. Mit dieser Methodik wurde für das amerikanische Dimensionierungsmodell ein fiktiver Temperaturunterschied zwischen Plattenober- und -unterseite von 5,56 K (10 F) ermittelt (siehe [M-E D 2004]). Eine Beschreibung der Berechnungsmodelle findet sich bei [NASSIRI 2006].

Noch bedeutender als die permanente Vorverformung ist die Verformung der Platten, welche sich durch die aktuellen Temperatur- und Feuchteverhältnisse einstellt. Die physikalischen Zusammenhänge sind hier



analog. Die Plattenverformung ist wiederum auf die Volumenveränderung durch Feuchte- und Temperatureinflüsse zurückzuführen. Die Überlagerung der aktuellen mit der permanenten Vorverformung kann zu einer verstärkten oder verminderten Plattenverformung führen.

Wenig erforscht ist der Effekt durchfeuchteter Fugen. Es ist anzunehmen, dass undichte Scheinfugen langanhaltend durchfeuchtet bleiben, weil eine Austrocknung hier nur langsam von statten geht. Entsprechend ist mit einem Quellen des Betons im Fugenbereich zu rechnen, was zu einer lokal begrenzten Volumenvergrößerung und damit zu einer leichten Erhöhung an der Fahrbahnoberfläche neben den Fugen führt. Ob dieser Effekt tatsächlich in relevanter Größenordnung auftritt, ist allerdings nicht bekannt.

Empirisch belegt ist dagegen, dass es in nicht seltenen Fällen zu einer horizontalen Rissbildung (Delamination) in der Dübelebene oder auch darüber kommt. Ursächlich sind vermutlich Zwangsspannungen im frühen Betonalter. Bei ungenügender Abdichtung der Fuge herrscht im Riss dauerhaft ein feuchtes Milieu mit einer gewissen chemischen Aggressivität. Bei entsprechender chemischer Disposition kann es zu treibenden Reaktionen kommen, welche sich ebenfalls an der Oberfläche durch Erhöhungen in Fugennähe zeigen. Möglicherweise sind auffällige Unebenheiten im Fugenbereich sogar als Indikator für die beschriebenen Risse zu betrachten.

#### Zielfunktion ZF S SF (Stufenbildung)

Wenn eine Fuge überfahren wird, wird schlagartig ein Plattenrand entlastet und der benachbarte Plattenrand belastet. In ungebundenen Tragschichten wird Luft und ggf. auch Wasser vom belasteten Bereich in den entlasteten Bereich gedrückt. Dieser Strom reißt Feinbestandteile der Tragschicht mit sich. Da die Fuge immer nur in einer Richtung befahren wird, erfolgt auch der Materialtransport immer nur in einer Richtung. Mit der Zeit wird dadurch ein Plattenrand angehoben und der andere Rand abgesenkt. Wenn keine konstruktiven Maßnahmen getroffen werden, um diesen Mechanismus zu unterbinden, können sich Stufen von mehreren Zentimetern Höhe bilden.

Die gegenwärtig praktizierte Standardbauweise mit verdübelten Scheinfugen verhindert die Stufenbildung in hinreichendem Maße. Für neue konstruktive Lösungen ist der entsprechende Nachweis zu erbringen.

#### Zielfunktion ZF S G (Griffigkeit)

Die Griffigkeit der Oberfläche ist im Wesentlichen von der Fahrbahtextur und der Polierfähigkeit der verwendeten Gesteinskörnung abhängig.

Da davon auszugehen ist, dass die Oberflächentextur durch die ständige Befahrung eine gewisse Einebnung erfährt und eine Politur der Gesteinskörnung nicht vollständig verhindert werden kann, ist damit zu rechnen, dass die Griffigkeit der Fahrbahn mit der Zeit abnimmt.

#### Zielfunktion ZF S D (Drainagevermögen)

Es ist offenkundig, dass das Drainagevermögen durch eine große Querneigung und eine ebene Oberfläche gefördert wird. Ebenso erscheint auch eine glatte Oberfläche günstig für einen schnellen Wasserabfluss. Dies widerspricht jedoch der Forderung nach Griffigkeit (ZF S G). Es ist aber möglich, durch eine planmäßige Texturierung der Oberfläche, z. B. mit einer Grindingtextur, beiden Forderungen gerecht zu werden.

#### Zielfunktion ZF S H (Hitzeaufbruch)

Bei steigenden Temperaturen kommt es durch die Volumenvergrößerung der Betonplatten zunächst zu einem allgemeinen Fugenschluss und anschließend zum Aufbau von Druckspannungen im Betonquerschnitt. Durch den Fugenschnitt besteht an den Quertugen eine einseitige Querschnittseinengung. Dies bedingt ein Versatzmoment, welches zusätzlich zu den Druckspannungen Biegespannungen erzeugt. Es bildet sich eine eng begrenzte Spannungsspitze an der Unterkante des Fugenschnittes. Bei entsprechend hohen Temperaturen kann die Spannung an dieser Stelle die Festigkeit überschreiten und es kommt zur Rissbildung. Dabei wird gewöhnlich ein Betonstück nach oben hin abgesprengt. Der genaue Rissverlauf ist von den örtlichen Randbedingungen (z. B. vorhandenen lokale Vorschädigungen) abhängig. In seltenen

Fällen wir die Kontaktfläche an der Fuge durch den Betonausbruch so verändert, dass sich das Versatzmoment umdreht und die Fahrbahn nach oben ausknickt (Blowup).

Der Hitzeschaden entsteht also primär durch ein Festigkeitsversagen des Betons. Vielfache Versuche, dieses Problem als Stabilitätsfall zu beschreiben, waren deshalb nur begrenzt erfolgreich (siehe u.a. [KERR 1984]).

In [FÖRSTER 2005] und [VILLARET 2014-2] wird die Analyse des Problems mit Finite-Elemente-Modellen beschrieben. Praktische Versuche wurden von EISENMANN und GNAD (siehe [EISENMANN 1973]) durchgeführt.

Umfangreiche Untersuchungen in den letzten Jahren ([VILLARET 2014-1], [VILLARET 2014-2]) haben gezeigt, dass Hitzeaufbrüche nur auftreten, wenn Vorschädigungen vorliegen bzw. durch mangelhafte Wartung oder fehlerhafte Reparaturmaßnahmen ungünstige Randbedingungen geschaffen wurden. Eine besondere Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Verschmutzung der Fugen.

### Zielfunktion ZF W D (Dimensionierung)

Die Dimensionierung erfordert im Allgemeinen ein Berechnungsmodell (1), mit dem die Beanspruchung der Platte ermittelt werden kann. Mit einem theoretischen Schädigungsmodell (2) lässt sich die Schädigung infolge der Plattenbeanspruchung quantifizieren. Durch Vergleich mit einem Schädigungskriterium (3) wird entschieden, ob die angenommene Dimensionierung ausreichend ist.

(1) Das Berechnungsmodell für die Beanspruchung der Platte, muss alle relevanten Einflüsse in hinreichender Genauigkeit abbilden. Nach derzeitigem Erkenntnisstand müssen mindestens folgende Einflüsse erfasst sein:

- Materialeigenschaften
- Plattengeometrie
- Schichtenaufbau
- Verkehrslasten
- Temperatureinflüsse
- Feuchtigkeitseinflüsse
- Permanente Vorverformungen
- Interaktion der Platten
- Interaktion der Platten mit dem Untergrund.

Die Plattenbeanspruchung wird normalerweise durch die Spannungen repräsentiert. Damit ist das Berechnungsmodell ein Modell zur Berechnung der Spannungen. Eine hinreichend genaue Berechnung erfordert die Verwendung von Finite-Elemente-Modellen. Umfassende Hinweise für die Modellierung finden sich z. B. in [FE 09.0188/2011] und [Hammonds 1998]. Einen Überblick über vorhandene Berechnungsmodelle bietet [AMADEUS 1999].

Vorhandene und in der praktischen Anwendung befindliche Systeme verwenden mehrheitlich ebene Elemente. Zukünftige Entwicklungen sollten sich aber auf Volumenmodelle konzentrieren, weil nur diese die Möglichkeit bieten, alle relevanten Einflüsse realitätsnah zu erfassen.

Voraussetzung für eine zutreffende Berechnung der Plattenbeanspruchung ist die hinreichend genaue Modellierung der Einwirkungen. Die Betonfahrbahn betreffend sind Witterungs- und Verkehrseinwirkungen relevant.

Die Einwirkung durch Verkehrslasten kann offensichtlich sehr mannigfaltig sein. Die möglichen Achslastwerte haben eine große Bandbreite und die Achskonstellationen können ebenfalls sehr unterschiedlich sein. Die Laststellung auf dem Plattensystem ist praktisch beliebig möglich. Eine besondere Herausforderung ist deshalb darin zu sehen, die maßgebenden Lastkonstellationen zu identifizieren und extreme Lasten zu prognostizieren.

Die Einwirkungen durch Temperatur und Feuchte sind insofern ähnlich, als dass sie jeweils zu Volumenänderungen führen und dadurch mechanische Relevanz gewinnen. Entsprechend ist es naheliegend, diese

Einwirkungen im Modell zusammenzufassen. Entsprechende theoretische Ansätze haben gewöhnlich die Zielstellung eine fiktive Temperatureinwirkung zu definieren, welche auch den Feuchteinfluss adäquat erfasst. (siehe z. B. [YINGHONG 2014])

Da normalerweise nicht auf die erforderliche Menge an Messergebnissen zum Temperatur- und Feuchtezustand von Fahrbahnplatten zurückgegriffen werden kann, ist es notwendig, zur Definition maßgebender Belastungszustände auf Simulationsrechnungen zurückzugreifen. Damit ist es möglich, längere Zeitreihen zu erzeugen, welche auch die jahreszeitlichen Schwankungen und die geografischen Unterschiede abbilden (siehe u.a. [KAYSER 2007]).

(2) Eine Zerstörung der Fahrbahn kann durch eine einmalige extreme Überbeanspruchung erfolgen. Sofern die Beanspruchung der Platten realitätsnah berechnet werden kann, ist dieser Fall relativ einfach zu erfassen.

Typischerweise erfolgt die Zerstörung der Fahrbahn aber nicht durch einmalige extreme Belastung, sondern durch allmähliche Schädigung infolge eines komplexen Prozesses. Die Definition eines Schädigungsmodelles ist deshalb als echte Herausforderung zu betrachten.

Vielfach wird die Schädigung sehr vereinfachend als Materialermüdung des Betons beschrieben. Tatsächlich ist die Materialermüdung nur ein Teil einer komplexen Veränderung des Gesamtsystems. Um den Prozess der sukzessiven Veränderung und fortschreitenden Schädigung des Systems hinreichend genau zu erfassen, ist es notwendig, die Ermüdung nicht nur hinsichtlich einer ertragbaren Lastwechselzahl zu beschreiben, sondern auch den kontinuierlichen Steifigkeitsverlust zu berücksichtigen.

Gebräuchlich ist ferner die Verwendung einer abstrakten Schädigung, z. B. im Zusammenhang mit der Miner-Hypothese. In der Diskussion befinden sich außerdem auf der Bruchmechanik basierende Schädigungsmodelle.

Generell ist festzustellen, dass eine zutreffende Beschreibung der Schädigung die zeitliche Veränderung des gesamten Systems erfassen muss.

(3) Da die Fahrbahn, im Unterschied z. B. zu einer Brückenplatte auch nach einem Bruch einzelner Fahrbahnplatten noch benutzbar ist, ist die Definition eines Schädigungskriteriums für die Dimensionierung nicht trivial. Hier wird normalerweise der Anteil gebrochener Platten als Entscheidungskriterium verwendet. Dies setzt voraus, dass zuvor ein mechanisch begründetes Kriterium für den Bruch definiert wurde. Weil es in diesem Fall um die Feststellung des tatsächlichen eintretenden Bruches und nicht um dessen sichere Vermeidung geht, ist auch die Definition dieses Kriterium nicht trivial. Eine einfache Festlegung einer einachsigen Spannungsgrenze ist in Anbetracht der komplexen mechanischen Vorgänge, welche einem Bruch vorausgehen (Plastifizierung, Umlagerung usw.) nicht ausreichend.

Ferner setzt die Berechnung des Anteiles gebrochener Platten voraus, dass die Streuung aller Einflussparameter bekannt ist und in der Dimensionierung Berücksichtigung findet. Es ist also eine probabilistische Berechnung notwendig (siehe hierzu u.a. [SPAETHE 1992], [RACKWITZ 2006], [VILLARET 2012], [RIWE 2015]).

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erläutert, ist die gegenwärtige Dimensionierungspraxis von den hier skizzierten Ansprüchen noch weit entfernt. Auch ist zu vermuten, dass wesentliche Einflüsse existieren, welche gegenwärtig noch gar nicht systematisch erfasst werden.

### Zielfunktion ZF W T (Technologie)

Für die Herstellung der Betonfahrbahn sind zwei Grundsatztechnologien zu unterscheiden:

- (1) Monolithische Herstellung
- (2) Fertigteilmontage.

Umfassender betrachtet handelt es sich dabei um unterschiedliche Bauweisen, weil auch jeweils die Konstruktion unterschiedlich ist.

(1) Die monolithische Herstellung erfolgt im Autobahnbau ausschließlich mit Gleitschalungsfertigern. Diese Technologie zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad aus. Vorrichtungen für das Verteilen, Formen, Verdichten und Glätten des Betons, sowie das Anker- und Dübelsetzen sind in den Fertiger integriert. Der Beton wird in plastischem Zustand auf der Baustelle angeliefert und kontinuierlich verarbeitet.

Der Fertiger bewegt sich dabei entlang einer lage- und höhenmäßig vorgegebenen Führung und führt die Schalung gleitend mit. Das bedeutet, dass an die zielgenaue Herstellung des Betons erhöhte Anforderungen gestellt werden können. Der Beton muss bei Beibehaltung aller weiteren geforderten Eigenschaften eine Konsistenz haben, welche sowohl eine gute Verarbeitbarkeit wie auch ausreichende Standfestigkeit beim Verlassen der Schalung garantiert.

Kleinere Abschnitte werden auch mit stehender Schalung betoniert. Dabei erhöht sich der Anteil zeitaufwendiger Handarbeit.

Besondere Bedeutung kommt bei der monolithischen Herstellung der Nachbehandlung zu. Die Hydratation und Erhärtung des Betons ist ein sehr komplexer Prozess, welcher durch vielfältige Faktoren beeinflusst wird. Wechselnde Temperatur- und Feuchteverhältnisse erzeugen Zwangsspannungen im Beton, welche nur geringen Festigkeitswerten gegenüberstehen (siehe z. B. [RÖHLING 2005], [HINTZEN 20011]). Da der Beton bei der monolithischen Herstellung auch in dieser sensiblen Phase der Witterung frei ausgesetzt ist, ist es notwendig, alles Mögliche zu tun, um durch eine fachgerechte Nachbehandlung eine Schädigung zu vermeiden. Die auf Betonfahrbahnen anzutreffenden Schadensbilder legen die Vermutung nahe, dass vielfache Frühschäden ursächlich sind, welche mutmaßlich in der ersten Nacht entstanden sind.

(2) Obwohl die monolithische Bauweise der Standardfall ist, wird in den letzten Jahren auch in Deutschland der Fertigteilbauweise erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt (siehe [FE 089.0279/2012], [FE 089.0283/2013], [FE 08.0236/2015]).

Die Forschungen der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass einer zielgenauen Betonherstellung unter kontrollierten Bedingungen eine entscheidende Bedeutung für die Qualität der Fahrbahn zukommt. Diesen Anforderungen muss im Betonwerk in deutlich höherem Maße Rechnung getragen werden als auf der Baustellung. Maßgebliche Experten sehen deshalb die Zukunft des Betonstraßenbaues in der Fertigteilbauweise (siehe hierzu z. B. [MOLENAAR 2014]).

### Zielfunktion ZF W B (Baustoffe)

Die Hauptbaustoffe für die Herstellung einer Betonfahrbahn sind:

- (1) Beton
- (2) Ungebundene Tragschicht
- (3) Gebundene Tragschicht (Beton, HGT, Asphalt)

(1) Der Straßenbeton hat idealerweise folgende Eigenschaften:

- hohe Zugfestigkeit
- geringe Steifigkeit (niedriger E-Modul)
- hohe Duktilität
- geringe Wärmedehnzahl
- umfassende Beständigkeit

Wie schon unter Punkt 2.4.1 erläutert, ist die Beständigkeit die wichtigste Eigenschaft. Werden andere der gewünschten Eigenschaften nicht erreicht, so kann man durch eine entsprechend angepasste Konstruktion (z. B. größere Deckendicken) trotzdem ein funktionierendes Fahrbahnsystem realisieren. Wenn aber die beim Entwurf der Konstruktion vorausgesetzten Eigenschaften verloren gehen, kann die Funktion des Systems nicht aufrechterhalten werden.

Den Beton betreffend ist eine Konstanz der wesentlichen physikalischen Eigenschaften über den Nutzungszeitraum offensichtlich nicht erreichbar. Vorgänge wie Nacherhärtung, Relaxation, Kriechen und Schwinden sind nicht vermeidbar, können aber minimiert werden. Wichtig ist es, diese Effekte kalkulierbar zu machen, damit sie bei Entwurf und Dimensionierung der Fahrbahnkonstruktion adäquat berücksichtigt werden können.

Die Forderungen nach hoher Festigkeit begründet sich offensichtlich mit der damit einhergehenden Möglichkeit einer Reduzierung der Deckendicke.

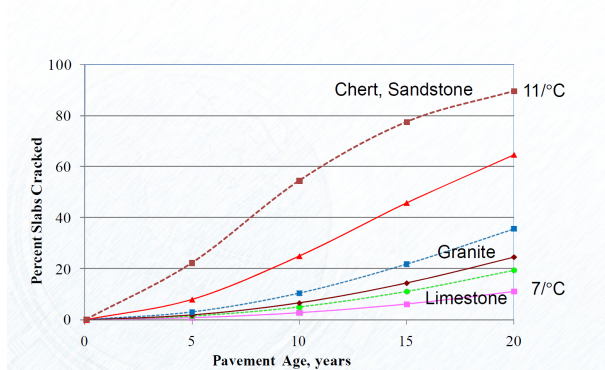
Eine Minimierung der Deckendicke ist ebenfalls möglich, wenn ein niedriger E-Modul vorliegt. Eine geringe Materialsteifigkeit führt zu einer Reduzierung der Spannungen. Das gilt primär für Zwangsspannungen, aber bei einer elastisch gebetteten Platte auch für die Biegespannungen aus Verkehrslast.

Die Forderungen nach hoher Festigkeit und geringer Steifigkeit stehen aber offensichtlich in Konkurrenz, weil beide Parameter im Allgemeinen korreliert sind. Höhere Festigkeiten führen auch zu höheren Steifigkeiten. Der Zusammenhang ist aber nicht so stark, dass eine Optimierung an dieser Stelle nicht sinnvoll wäre. Über Möglichkeiten zur Senkung des E-Moduls im Beton ist bislang wenig bekannt. Gegenwärtig wird diesem Parameter im Betonbau kaum Beachtung geschenkt.

Gleiches gilt für die Wärmedehnzahl. Dies ist umso unverständlicher, als dass eine niedrige Wärmedehnzahl gleich in mehrfacher Hinsicht wünschenswert ist. Die Wärmedehnung des Betons führt zu temperaturbedingten Spannungen, Fugenbewegungen, Plattenverformungen und schließlich zur Gefährdung durch Hitzeaufbrüche. Da die Wärmedehnung durch die Wärmedehnzahl in direkter Weise beeinflusst wird, ist an dieser Stelle mit Sicherheit eine Verbesserung zu erzielen.

Amerikanische Untersuchungen zeigen einen starken Zusammenhang zwischen der Wärmedehnzahl und der Ausfallrate der Betonplatten (Bild 2.42).

### Sensitivity: Coef Thermal Exp vs. Cracking



**Bild 2.42:** Anzahl gebrochener Platten in Abhängigkeit vom Alter und der Wärmedehnzahl [DARTER 2018]

Aus Versuchen der Bundesanstalt für Straßenwesen ist bekannt, dass die Wärmedehnzahlen für unterschiedliche Betonrezepturen erheblich variieren. Aus diesem Grund wird hier ein erhebliches Verbesserungspotential für verschiedene Problemfelder des Betonfahrbahnbaues gesehen.

Die Duktilität ist eine außerordentlich wünschenswerte Eigenschaft für den Beton. Die im praktischen Einsatz befindlichen Betone zeigen allerdings ein ausgeprägt sprödes Verhalten. Die Herstellung duktiler und hochduktiler Betone ist mittlerweile aber bereits möglich (siehe u.a. [Mechtcherine 2015]). Einem breiten Einsatz in der Praxis stehen allerdings noch ein hoher Herstellungsaufwand mit entsprechenden Kosten und die mangelnde Langzeiterfahrung entgegen.

(2) Ungebundene Tragschichten zeigen normalerweise kein rein elastisches Tragverhalten. Dies ist aber notwendig, weil ansonsten jede Überfahrt einer Radlast zu einer Veränderung der Tragschicht führen würde.

Es ist also notwendig, ein nahezu elastisches Verhalten herzustellen. Dies wird zum einen damit erreicht, dass die ungebundenen Schichten als untere Tragschichten verhältnismäßig gering belastet sind. Zum anderen werden die Gesteinskörnungen so abgestimmt, dass nach wiederholten Belastungen auf dem Niveau der Gebrauchslast die plastischen Verformungen asymptotisch gegen Null gehen (Shakedownbereich A, vgl. [NUMRICH 2003], [WERKMEISTER 2003]).

Die Beständigkeit der Tragschichten ohne Bindemittel ist von besonderer Bedeutung. Eine häufige Ursache für die Schädigung einer Fahrbahn ist die Veränderung der Tragschicht. Durch Erosion bzw. Umlagerung, besonders im Fugenbereich entstehen Hohlstellen, durch die eine homogene Auflagerung der Platten nicht mehr gegeben ist. Eine entscheidende Anforderung an die ungebundenen Tragschichten ist damit die Erosions- und Umlagerungsbeständigkeit.

Außerdem muss die Steifigkeit der Schicht im elastischen Verformungsbereich so groß sein, dass die Plattenverformungen im akzeptablen Bereich bleiben. Andererseits ist eine im Vergleich zu gebundenen Tragschichten geringere Steifigkeit auch durchaus von Vorteil, weil damit die Auflagerfläche bei vorverformten Platten erhöht wird.

(3) Die gebundenen Tragschichten zeigen im Unterschied zu den ungebundenen Schichten über einen hohen Belastungsbereich ein linear-elastisches Verhalten.

Für diese Schichten ist die Frostbeständigkeit von besonderer Bedeutung. Wenn eine gebundene Tragschicht durch Frosteinwirkung in Verbindung mit Wasser und Tausalz erodiert, dann entsteht im Ergebnis ein ungebundenes Material. Dieses verfügt aber über keine abgestimmte Körnung und entsprechende Verdichtung. Es kommt folglich zu Umlagerungen und Hohlräumbildungen. Die homogene Plattenlagerung ist damit zerstört.

### Zielfunktion ZF W K (Konstruktion)

Als Hauptkonstruktionsbestandteile der Betonfahrbahn sind zu nennen:

- (1) Plattengeometrie
- (2) Deckendicke
- (3) Schichtenaufbau
- (4) Fugenkonstruktion.

(1) Die Betonfahrbahn wird durch Quer- und Längsfugen in regelmäßige Abschnitte, die Platten, geteilt. Dies ist notwendig, um ein ungesteuertes Reißen des Betons infolge temperatur- oder feuchtebedingter Volumenschrumpfung zu verhindern. Die Fugenherstellung erfordert allerdings einen gewissen technologischen Aufwand. Im Nutzungszeitraum werden außerdem Wartungsarbeiten erforderlich. Darüber hinaus zeigt die praktische Erfahrung, dass der Fugenbereich als potentieller Ausgangspunkt für mannigfaltige Schädigungsprozesse anzusehen ist. Aus diesen Gründen erscheint es erstrebenswert, möglichst lange Platten herzustellen, um die Anzahl der Fugen zu minimieren. Mit steigender Plattenlänge erhöht sich aber die Gefahr für das Auftreten wilder Schwindrisse.

Außerdem führen große Plattenlängen zu erhöhten Zwangsspannungen. Die temperatur- und feuchtebedingten Vorverformungen der Platten werden bei langen Platten durch das Eigengewicht vollständig zurückgestellt, sodass die Verformung praktisch vollständig in Biegespannung umgesetzt wird.

Aber auch die aus der Verkehrsbelastung resultierenden Biegespannungen werden bei langen Platten erhöht. Dies ergibt sich einerseits aus rein mechanischen Zusammenhängen, andererseits aber auch daraus, dass mehr Achsen auf eine einzelne Platte passen.

Unter Beachtung dieser Zusammenhänge wurde von COVARRUBIAS und anderen ein Konzept zur Optimierung der Plattenlänge mit dem Ziel einer Spannungsminimierung entwickelt (siehe [COVARRUBIAS 2010]). Die optimierten Platten sind mit 2,5 m sehr kurz, was zu einer entsprechend hohen Fugenanzahl führt.

Die übliche Bauweise stellen ca. 5 m lange Platten dar. Eine kritische Hinterfragung dieser Praxis erscheint aber durchaus geboten, zumal kurze Platten sich auch aus anderer Hinsicht positiv auswirken würden (Fugenbewegung, Vorverformung).

(2) Der Deckendicke, obwohl im mathematischen Sinne zur Geometrie gehörig, kommt eine besondere Bedeutung zu. Ziel der Dimensionierung ist es, die notwendige Deckendicke zu bestimmen. Da die Deckendicke in die Berechnung des Widerstands- und Trägheitsmomentes mit der zweiten bzw. dritten Potenz eingeht, bestimmt sie maßgeblich den Spannungs- und Verformungszustand der Platte.

Zu beachten ist, dass auch das thermische Verhalten der Betonstraßenplatte wesentlich durch die Dicke beeinflusst wird. Mit wachsender Dicke der Betondecke steigt zwar tendenziell auch die Temperaturdifferenz, der eine Biegung erzeugende Temperaturgradient nimmt aber ab (siehe [KAYSER 2007]). Die für die Dimensionierung maßgebenden temperaturbezogenen Lastannahmen sind also von der Deckendicke abhängig.

(3) Der Schichtenaufbau ist so abzustimmen, dass das Gesamtsystem funktioniert. Es ist ein Oberbau zu realisieren, welcher insgesamt elastisch auf die Verkehrslast reagiert, frostsicher, erosions- und umlageunbeständig ist.

Nach derzeitigem Erkenntnisstand haben die Tragschichten, bei fachgerechter Ausführung eine untergeordnete Bedeutung für die Beanspruchung der Betonplatte.

(4) Die Fugenkonstruktion hat allein die Aufgabe, die Volumenänderungen der Platten zu ermöglichen.

An die Fuge sind zwei grundlegende Anforderungen zu stellen:

- Dichtigkeit gegen Eindringen von Schmutz und Wasser
- Übertragung von Querkräften.

Die temperatur- und feuchtebedingten Volumenänderungen des Betons sind der eigentliche Grund für die Notwendigkeit zur Herstellung von Fugen. Unter typischen Bedingungen muss sich an der Fuge ein Dehnweg von ca. 1 mm bis 2 mm realisieren können. Die tatsächliche zu erwartenden Fugenbewegung hängt aber nicht nur von der Plattendehnung ab, sondern wird auch maßgeblich durch das Verhalten des Gesamtsystems beeinflusst. Reibungen (Platte – Unterlage, Dübel – Beton) und Plattenbewegungen spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle. Da die entsprechenden Parameter nicht an jeder Platte ermittelt, sondern nur statistisch erfasst werden können, müssen theoretische Modelle zur Vorhersage des Fugenspiels probabilistischer Natur sein. Bekannt ist in diesem Zusammenhang das Lee-Stoffels-Modell [LEE 2001].

Da ein Eindringen von Wasser in die Fuge langfristig fast immer zu einer Schädigung der Konstruktion führt, ist die Fuge möglichst wasserdicht zu verschließen. Die entsprechende Dichtung muss in der Lage sein, sich den jeweiligen Veränderungen der Fugenweite anzupassen. Dabei ist zu beachten, dass die erforderlichen relativen Dehnungen für das Dichtmaterial von der ursprünglich hergestellten Fugenweite abhängen. In einer nur 2 mm breit hergestellten Fuge müsste also das Dichtmaterial Dehnungen von ca. 100 % realisieren ohne seine Dichtwirkung einzubüßen. Derartig extreme Anforderungen sind kaum erfüllbar. Dies gilt umso mehr, als das gerade Materialien mit einem hohen elastischen Dehnvermögen kaum volumenkompensierbar sind (Querdehnzahl ca. 0,5). Im Fugenraum muss also ein entsprechendes Reservoir zur Volumenaufnahme bei Kompression vorgehalten werden. Eine detaillierte Darstellung dieser Zusammenhänge findet sich unter anderem in [VOIGT 2010].

Damit die Fugen während der gesamten Nutzungszeit der Fahrbahn dicht bleiben, muss das Fugenmaterial sämtliche Dehnungen, aus allen auftretenden Temperaturen ohne Schädigung ertragen können und gleichzeitig sicher mit den Fugenflanken verklebt bleiben. In [FE 08.0228/2013] wird allerdings berichtet, dass die zulässigen Verformungen des Füllmaterials vielfach bereits bei normaler Beanspruchung überschritten werden.

Weiterhin führen die atmosphärischen Einflüsse (UV-Strahlung, starke Erhitzung im Sommer, möglicherweise Tausalzbelastung) zu einer allmählichen Veränderung der Materialeigenschaften.

Ebenso bedeutsam wie die dauerhafte Unversehrtheit des Dichtstoffes selbst, ist die Haftung an den Fugenflanken. Ein Abreißen der Füllmasse (adhäsives Versagen) ist in der Praxis oft zu beobachten. Es sollte beachtet werden, dass an hydrophoben (basischen) Gesteinen eine bessere Haftung erreicht wird als an hydrophilen (sauren).

Da die Herstellung eines Fugenfüllmaterials, welches sämtliche Beanspruchungen sicher und dauerhaft ertragen kann, eine große Herausforderung darstellt, ist es angeraten, ein stärkeres Augenmerk auf die Begrenzung der Fugenbewegungen zu legen. Dies gilt umso mehr, weil im Sinne einer Lärmreduzierung kleinere Fugenweiten anzustreben sind. Insbesondere die Bildung von Paketfugen sollte verhindert werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von speziell konstruierten Fugenbändern.

Generell ist festzuhalten, dass eine Minimierung der Fugenbewegung wünschenswert ist. Auf den Zusammenhang mit der Plattenlänge und der Wärmedehnzahl sei an dieser Stelle noch einmal hingewiesen.

Die genaue Lage einer Fuge als planmäßige Position für die Rissbildung wird mit einem Fugenschnitt festgelegt. Dieser muss ausreichend tief sein, um ein zuverlässiges Reißen des Betons am Schnitt zu sichern. Andererseits erzeugt der Fugenschnitt ein Versatzmoment sobald horizontale Druckkräfte im Querschnitt

auftreten. Wie bereits weiter oben erläutert, begünstigt dies die Entstehung von Hitzeaufbrüchen. Der Fugenschnitt ist damit ein systemimmanenter Problempunkt in der gegenwärtig in Anwendung befindlichen Regellösung für die Fuge.

Die Querkraftübertragung im Fugenbereich dient einerseits dazu, den abrupten Belastungswechsel am Plattenrand kontinuierlicher zu gestalten. Damit wird der weiter oben beschriebene Pumpeffekt mit nachfolgender Stufenbildung minimiert. Andererseits wird auch die Plattenbeanspruchung reduziert. Durch die Mitwirkung der benachbarten Platte bei der Lastabtragung werden die maximalen Biegespannungen in der belasteten Platte verkleinert. Berechnungen mit Finite-Elemente-Modellen zeigen, dass die Querkraftübertragung in den Fugen die Biegespannungen um 20 % bis 40 % reduzieren kann.

Bei einer komplexen Betrachtung der Querkraftübertragung muss berücksichtigt werden, dass die Interaktion der benachbarten Platten nicht nur auf direktem Wege erfolgt, sondern auch über die unteren Tragschichten. Bei der Belastung eines Plattenrandes wird in der darunter liegenden Tragschicht eine Setzungsmulde erzeugt, welche sich bis unter die Nachbarplatte erstreckt. Die auf die nicht durch eine Radlast belastete Platte übertragene Querkraft kann damit diese Platte leichter verformen.

Die in Deutschland, aber auch international angewendete Regellösung für die Querkraftübertragung besteht in der Anordnung von Stahldübeln. Diese sind mit einer speziellen Beschichtung versehen, um die Reibung zwischen Beton und Dübel zu minimieren und so die Fugenbewegung zu ermöglichen. In der praktischen Anwendung sind die Dübel allerdings vielfach nicht hinreichend exakt in Fahrbahnrichtung ausgerichtet. Die daraus resultierende Verkantung erhöht die Reibung beträchtlich. Laborversuche von PRABHU, VARMA und BUCH [PRABHU 2006] zeigten, dass schon kleine Drehungen von ca. 3 ° zu deutlichen Erhöhungen der Auszugkraft führen. Vielfach wird in der Praxis die Fugenbewegung vollkommen verhindert, was zu entsprechend größeren Fugenbewegungen in den angrenzenden Fugen führt. Ebenfalls häufig anzutreffen ist eine ungenaue Positionierung der Dübel (vgl. [FREUDENSTEIN 2001]). Dies führt zu entsprechenden Reduzierungen der planmäßigen Einbindelänge. Genauere Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Querkraftübertragung fast vollständig über die erste Hälfte der Dübeleinbindelänge realisiert wird. Hier sind also entsprechende Toleranzmaße möglich.

Gelegentlich verwendet werden Fugenkonstruktionen, welche eine Querkraftübertragung durch Profilierung der Fugenflanken realisieren. Hier ist anzumerken, dass von einer korrekten Funktion nur ausgegangen werden kann, wenn die für die Querkraftübertragung vorgesehenen Flächen exakt horizontal ausgerichtet sind. Im gegenteiligen Fall kommt es entweder zu einer Verhinderung der Fugenbewegung oder zu einem Kontaktverlust bei Fugenöffnung. Der Einsatz von Sinus- oder Trapezprofilen erscheint deshalb nicht sinnvoll. Nut-Feder-Konstruktionen sind dagegen theoretisch funktionsfähig aber schwer auf der Baustelle in der notwendigen Exaktheit realisierbar. Bessere Möglichkeiten eröffnen hier Fertigteillösungen. Im Rahmen des Verbundprojektes HESTER [HESTER 2018] wurden entsprechende technische Lösungen getestet.

#### Zielfunktion ZF W BK (Betreiberkosten)

Die Betreiberkosten werden maßgeblich durch den erforderlichen Aufwand für Instandhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten bestimmt. Beides kann wesentlich durch die Konstruktion und die Qualität der Bauausführung beeinflusst werden.

So kann z. B. durch die Wahl der Plattengeometrie (kurze Platten), die Auswahl der Betonrezeptur (niedrige Wärmedehnzahl) und eine sorgfältige Ausrichtung der Dübel ein gleichmäßiges und relativ kleines Fugenspiel erzielt werden. Die Belastung für die Fugendichtung wird damit minimiert und der Instandhaltungsbedarf sinkt. Andererseits erhöht sich durch die Herstellung kurzer Platten auch die Anzahl der Fugen. Hier liegt also offensichtlich ein Optimierungsproblem vor.

Reparaturmaßnahmen sind normalerweise nicht notwendig, wenn eine Konstruktion fehlerfrei konzipiert und planungsgerecht ausgeführt ist. Da aber diese Forderungen praktisch nie vollständig erfüllt werden können und außerdem auch Fehler in der Nutzung vorkommen (z. B. Unfälle), sind schon in der Planungsphase Reparaturmaßnahmen einzukalkulieren. Eine reparaturfreundliche Konzeption kann hier erhebliche Kosten sparen.



#### Zielfunktion ZF W NK (Nutzerkosten)

Die Fahrbahn hat für den Nutzer Einfluss auf die Kosten für den Verschleiß am Fahrzeug (Reifenabrieb) und den Treibstoffverbrauch (Rollwiderstand).

Bedeutsam sind aber auch Kosten, welche durch Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen entstehen (Staus, Umleitungen). Es besteht hier eine Zielgleichheit mit dem Problemkreis der Betreiberkosten. Schnelle und zuverlässige Reparaturmethoden (z. B. Auswechslung von Einzelplatten mit Fertigteilen) können hier zielführend sein.

#### Zielfunktion ZF U E, ZF U C (Energiebilanz, CO<sub>2</sub>-Bilanz)

Die Erreichung der definierten Ziele erfordert komplexe Untersuchungen. Die entsprechenden Problemfelder sind nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit.

#### Zielfunktion ZF U ER, ZF U CR, ZF W RW (Rollwiderstand)

Der Rollwiderstand wird durch die Oberflächentextur, die Fahrbahnebenheit und die Fugenausbildung beeinflusst.

#### Zielfunktion ZF W RA, ZF U R (Reifenabrieb)

Der Reifenabrieb wird maßgeblich durch die Oberflächentextur bestimmt. Es gibt damit einen engen Zusammenhang mit den Zielfunktionen ZF U ER, ZF U CR, ZF W RW (Rollwiderstand), ZF U L (Lärmemission), ZF S G (Griffigkeit) und ZF S D (Drainagevermögen).

#### Zielfunktion ZF U L, ZF U LF, ZF U LS (Lärmemission)

Die Lärmemission kann durch die Oberflächentextur (1) und die Fugengestaltung (2) beeinflusst werden.

(1) Untersuchungen zur Herstellung einer geräuschabsorbierenden Fahrbahnoberfläche gibt es seit geraumer Zeit. Analog zur offenporigen Asphaltbauweise werden offenporige Betondeckschichten getestet. Das Problem der Porenverschmutzung ist hier leichter beherrschbar als im Asphaltbau, weil das Bindemittel keine Verklebung fördert. Die Herstellung der entsprechenden Betone ist aber technologisch anspruchsvoll und kostenintensiv.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt eher praxisrelevant sind Lösungen mit speziell lärmoptimierten Grindingtexturen. Die Möglichkeit einer relevanten Lärmreduzierung wurde praktisch nachgewiesen ([FE 08.0220/2012]). Es ist jeweils sicher zu stellen, dass die hergestellte Grindingtextur unter ständiger Verkehrsbelastung dauerhaft erhalten bleibt.

(2) Systematische Untersuchungen der Lärmemission an Betonfahrbahnen haben gezeigt, dass die Fugengestaltung in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle spielt (siehe [[FE 08.0232/2014]. Eine lärmindernde Oberflächentextur kommt in ihrer Wirkung nicht signifikant zum Tragen, wenn eine ungünstige Fugengestaltung diese Maßnahme konterkariert. Der Zusammenhang zwischen großer Fugenöffnungsweite und erhöhter Lärmemission ist empirisch belegt. Ideal sind Öffnungsweiten unter 1 cm. Auch eine Fugenausrichtung schräg zur Fahrbahnachse zeigt positive Wirkungen. Hier ist allerdings zu beachten, dass eine unsymmetrische Fugenführung zu horizontalen Abtriebskräften rechtwinklig zur Fahrbahnachse führt.

Von Bedeutung sind auch die Fugenform (Fasen) und -tiefe (Abstand Betonoberfläche – OK Fugenfüllung), sowie die Steifigkeit des Füllmaterials.

Die Stufenbildung an den Fugen ist offensichtlich von Bedeutung. Der in diesem Punkt üblicherweise im Betonstraßenbau erreichte Qualitätsstandard ist bezüglich der Lärmemission aber als ausreichend anzusehen.

Zielfunktion ZF U RC (Recyclingvermögen)

Beton, als Hauptbaustoff im Betonstraßenbau ist normalerweise gut wiederverwendbar. Die Bedingungen und Anwendungsgrenzen für die Verwendung von Betonrecycling sind im technischen Regelwerk definiert.

Gleiches gilt für die Baustoffe, welche für die Tragschichten Verwendung finden. Allein bei innovativen Materialien für die Dichtung und Fugenfüllung und ggf. die Unterpressung von Fahrbahnplatten sind Fragenstellungen der Wiederverwendbarkeit zu klären. Gleiches gilt für die Verwendung von Vliesstoff unter der Betondecke.

Generell kann aber festgestellt werden, dass die für den Betonstraßenbau notwendigen Massenbaustoffe recyclingfähig sind. Die entsprechende Zielfunktion wird also schon jetzt gut erfüllt.

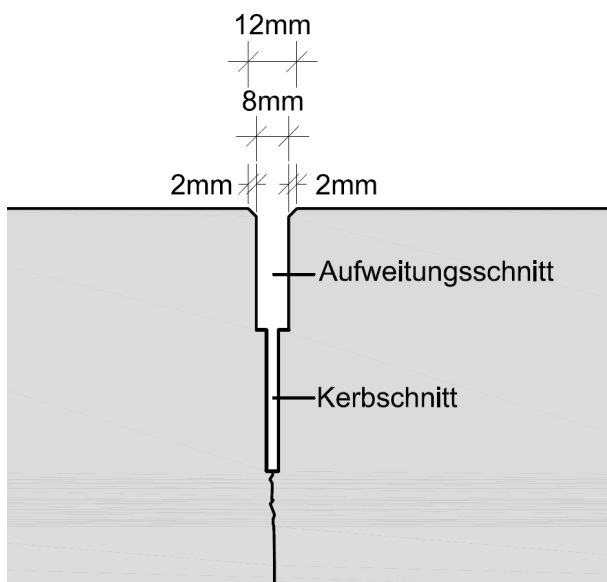
### 3 Modellrechnungen zu klimainduzierten Spannungen und Verformungen/Verzerrungen des Deckensystems

#### 3.1 Variationsbreiten der konstruktiven Eingangsparameter für die Modellrechnung

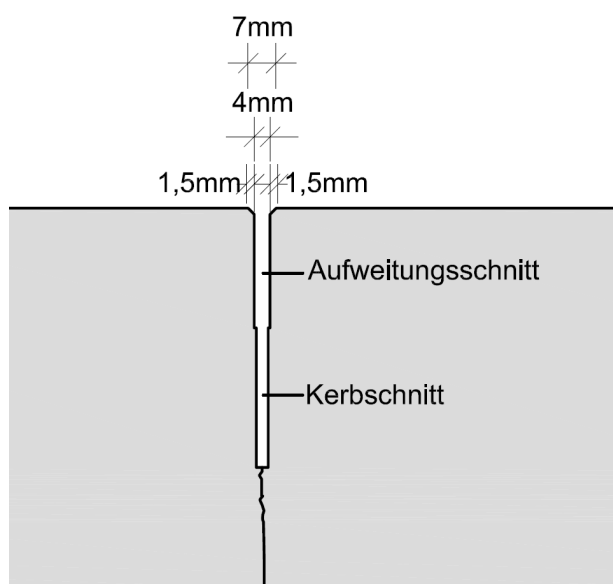
##### 3.1.1 Fugenausbildung

###### Verbesserung der klassischen Fugenausbildung

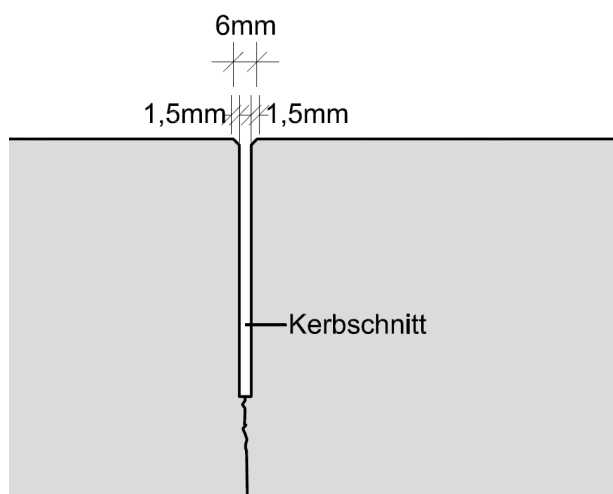
Ein erster Ansatz zur Optimierung der Ausbildung der Scheinfugen könnte die Verringerung der Breite oder der Verzicht des Aufweitungsschnittes bedeuten, so dass die Fugenspaltbreite 3 bzw. 4 mm (ohne Abfasung) betragen würde. Dabei wäre zu prüfen, inwieweit eine Abfasung der Betonkanten erforderlich ist. Gegebenenfalls wäre diese zu minimieren, so dass eine Gesamtfugenbreite von 6-7 mm entstünde. Die Fugenspaltbreite steht im Kontext mit der zu erwartenden Plattendehnung /-stauchung, so dass die Plattengeometrie geprüft werden muss. Letztlich sind auch neue Fugenfüllsysteme zu eruieren, die einerseits dauerhaft die Dehnungen und Stauchungen aufnehmen können und andererseits in das schmale Fugensystem appliziert werden können.



**Bild 3.1:** Klassische Querscheinfugenausbildung nach [ZTV Fug-StB] bei 5 m Plattenlänge



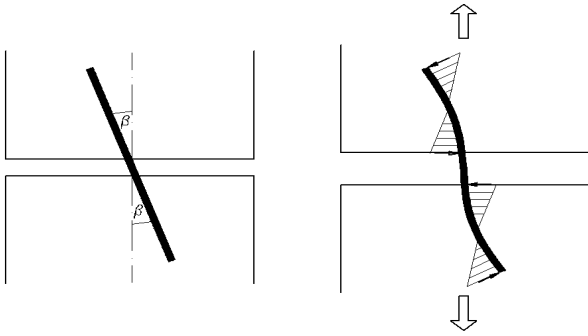
**Bild 3.2:** Alternative Querschnittsfugenausbildung bei reduzierter Plattenlänge (ca. 2,50 m)



**Bild 3.3:** Alternative Querschnittsfugenausbildung ohne Aufweitungsschnitt bei reduzierter Plattenlänge (ca. 2,50 m)

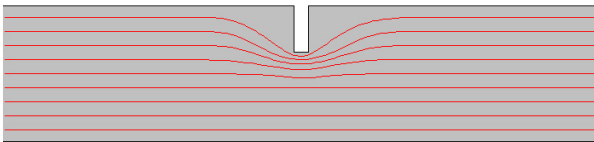
Die im Betonstraßenbau standardmäßig angewendete Fugenausbildung mit Ankern und Dübel wurde in verschiedenen Studien eingehend untersucht (z. B. [EOM 2000]). In den letzten Jahren rückten Schadensfälle in den Blickpunkt, welche die Frage aufwerfen, ob durch Querschnittsverdrehungen am Plattenrand Horizontalrisse in der Dübelebene erzeugt werden können. Die Querschnittsverdrehungen können sich aus temperaturbedingten Plattenverformungen und auch aus Schwindverformungen ergeben. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Zeitspanne der ersten Stunden und Tage nach Hydratationsbeginn, weil hier die Schwindprozesse besonders dynamisch verlaufen und durch Temperaturänderungen überlagert werden. Gleichzeitig weist der Beton in dieser Phase erst geringe Festigkeiten auf. Für die Simulation dieser Zusammenhänge ist ein FEM-Volumenmodell geeignet, das einen einzelnen Dübel enthält, welcher ebenfalls als Volumenkörper modelliert ist.

Das gleiche Modell kann benutzt werden, um die Wirkung von Fehlausrichtungen der Dübel zu analysieren. Dazu werden verschiedene Winkelabweichungen der Dübel vorgegeben.



**Bild 3.4:** Dübilverformung bei Fehlausrichtung

Mit Hilfe eines 2-Plattenmodelles mit simuliertem Kerbschnitt kann die Kerbschnitttiefe optimiert werden. Zur Vermeidung von Paketfugen ist ein tiefer Kerbschnitt erstrebenswert. Es ist aber zu beachten, dass bei hohen temperaturbedingten Druckspannungen unterhalb des Kerbschnittes eine Spannungsspitze entsteht. Diese kann zum Ausgangspunkt für Hitzeschäden im Fugbereich werden (Bild 3.5 zeigt den Verlauf der Spannungstrajektorien im betreffenden Bereich.).

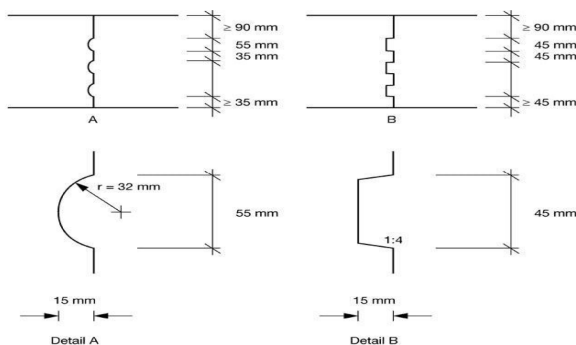


**Bild 3.5:** Verlauf der Spannungstrajektorien im Kerbschnittbereich

Die betreffenden Zusammenhänge wurden bereits in [VILLARET 2014-2] mit umfangreichen Simulationsrechnungen untersucht. Es wurde grundsätzlich festgestellt, dass bei normgerecht hergestellten und gewarteten Fahrbahnen keine Gefährdung besteht. Diese Aussage hat auch bei tendenziell steigenden Lufttemperaturen bestand.

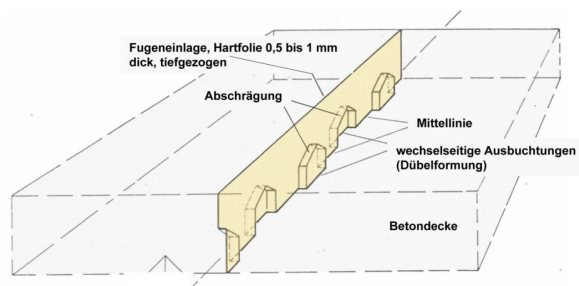
### Profilierte Fugeneinlagen

Vor ca. 40 Jahren wurde in Deutschland eine profilierte Fugeneinlage entwickelt und in den Folgejahren mehrfach erprobt. Abgeleitet wurde das Prinzip aus der Längspressfugenausbildung für Flugbetriebsflächen. Die profilierten Fugeneinlagen sollen dabei auch für eine Querkraftübertragung sorgen, ohne dass Anker bzw. Dübel verwendet werden. Das Wirkprinzip folgt dem Nut-Feder-Prinzip, wobei die wechselseitigen Konsolprofile einen Abstand zueinander haben und somit nicht durchgehend wirken.

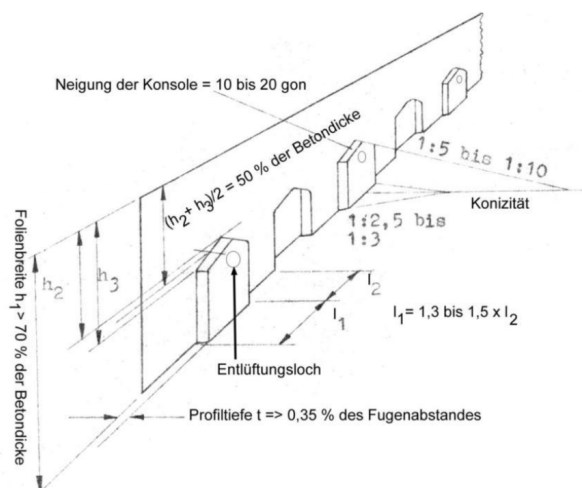


**Bild 3.6:** Querkraftübertragende Längspressfugenausbildung für Flugbetriebsflächen als Nut- und Feder-Profile [WEINGART 2017]

Die profilierten Fugeneinlagen besitzen eine Höhe von ca. 70 % der Plattendicke. Je nach Konsistenz des Betons werden diese Fugeneinlagen mittels Fugenschwerter eingedrückt bzw. eingerüttelt. Auch hier erfolgt nach Herstellung eine Rissbildung, jedoch nach oben und unten. Im Regelfall ist der Riss an der Oberseite geradlinig und sehr fein, so dass auf eine Fugenfüllung verzichtet werden kann.



**Bild 3.7:** Fugeneinlage mit wechselseitig ausgeformten Konsolen Typ 1 [WEINGART 2017]

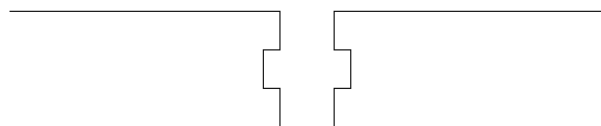


**Bild 3.8:** Konstruktionsdetails der Fugeneinlage mit unten offenen wechselseitig ausgeformten Konsolen (Variante zu Typ 1 mit Entlüftungsöffnungen) [WEINGART 2017]

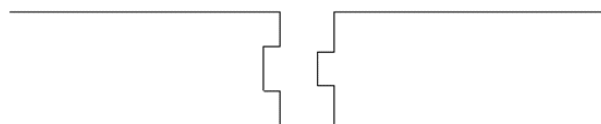
Für die rechnerische Analyse der mechanischen Zusammenhänge ist wiederum ein FEM-Volumenmodell geeignet. Dabei ist die hinreichend detaillierte Modellierung der Fugenbereiche wichtiger als die Erfassung ganzer Plattensysteme.

### Weitere alternative Fugenausbildungen

Im Projekt [HESTER 2018] wurden verschiedene Kopplungssysteme für Betonfertigteileplatten im Verkehrswegebau erforscht und getestet. Im Ergebnis konnte allen Varianten ein gutes bis sehr gutes Querkraftübertragungsverhalten testiert werden. Für eine monolithische Herstellung der Betondecke sollen innerhalb dieses Projekts zwei dieser Varianten diskutiert werden, wobei die bautechnologische Lösung zunächst zurückgestellt wird.



**Bild 3.9:** Variante 1 – Nut-Nut-System



**Bild 3.10:** Variante 2 – Nut-Feder-System

Der Formschluss wird hier nicht über Fugenschwerte hergestellt, sondern über eine nachträgliche Verpressung der Fugen. Die Fugen werden also zunächst so hergestellt, dass planmäßig ein ausreichend großer Spalt verbleibt, welcher in einem zweiten Arbeitsgang mit einem geeigneten Material gefüllt wird.

Eine rechnerische Analyse der Systeme wurde bereits im Rahmen des Projektes [HESTER 2018] durchgeführt. Mit einer Erweiterung des Modells können Aspekte betrachtet werden, welche bisher unbeachtet geblieben sind.

### Fugenabdichtung

Wie bereits erwähnt, gibt es national und international Scheinfugenausbildungen, bei denen die Rissbildung an der Oberseite sichtbar wird und unbehandelt bleibt.

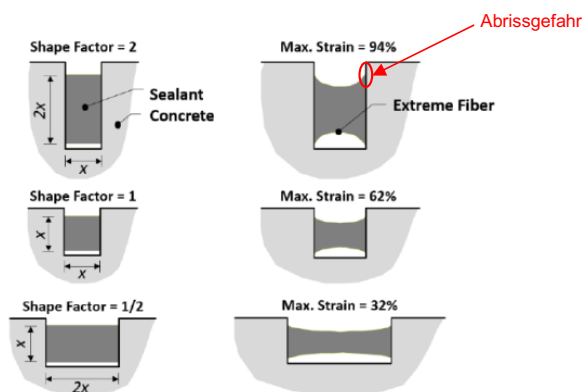
Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einer solchen Ausbildung ist zu bedenken, dass bei starker Schwerverkehrsbelastung ggf. in Kombination mit größeren Rissöffnungsweiten ( $> 0,2$  mm) eine Rissverzweigung und damit auch das Ausplatzen von Betonteilen während der Nutzungsdauer möglich ist. Je nach Funktion der Straße ist daher zu prüfen, ob die Ausbildung eines solchen Schadensbilds akzeptabel ist.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des gebundenen Oberbaus ist ein Eindringen von Oberflächenwasser weitgehend zu verhindern. Bei Rissbreiten  $> 0,2$  mm ist jedoch mit dem Eindringen von Oberflächenwasser zu rechnen.

Diese Überlegung führt dazu, dass in den meisten Anwendungsfällen ein Fugenschnitt an der Oberseite vorteilhaft ist, wenn dieser mit einer geeigneten Fugenfüllung abgedichtet wird.

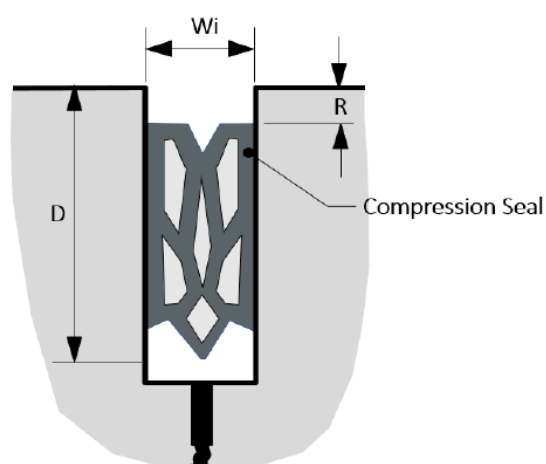
Das Hauptproblem stellt dabei die Plattenverkürzung bei Abkühlung dar, wodurch die Fugenweite vergrößert wird. Bei den derzeit verwendeten Plattenlängen von 5 m im Autobahnbau ist mit einer maximalen Erhöhung der Fugenspaltbreite von ca. 2 mm zu rechnen. Dieses Maß ist natürlich abhängig von der Herstelltemperatur und dem Anfangsschwindmaß. Eine Halbierung der Plattenlänge würde demzufolge die maximale Erhöhung der Fugenspaltbreite auf ca. 1 mm reduzieren.

Bei der Anordnung von schmaleren Fugen ist zu bedenken, dass es zu einer erhöhten Dehnung des Dichtmaterials führt. Bisher verwendete Materialien sind im Allgemeinen nicht volumenkompribel ( $\mu=0,5$ ). Demzufolge kommt es bei einer Dehnung zu starken Einschnürungen und zu hohen Randzugspannungen an der Verklebungsfläche (siehe Bild 3.11).



**Bild 3.11:** Einschnürung des Fugenfüllmaterials infolge Dehnung [VOIGT 2010]

Es muss also ein geeignetes Fugenfüllmaterial gefunden werden, wenn der Fugenspalt verkleinert werden soll. Eine Lösungsmöglichkeit wird von [VOIGT 2010] vorgeschlagen, indem vorgespannte Fugenbänder (Bild 3.12) zum Einsatz kommen.



**Bild 3.12:** Vorgespannte Fugenbänder [VOIGT 2010]

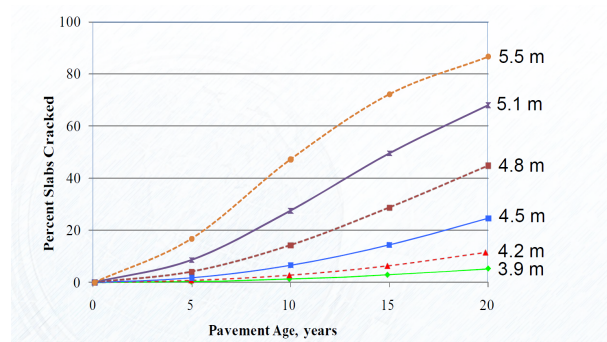
Von besonderem Interesse ist die Berechnung der maximalen Haftspannung am Rand. Da es sich beim Dichtmaterial aber nicht um ein linear-elastisches Material handelt, ist für eine realitätsnahe Simulationsrechnung die Verwendung komplexerer Materialgesetze (z. B. Mooney-Rivlin, Ogden oder Neo-Hook) unumgänglich. Die Anwendung dieser Materialbeschreibungen erfordert die Kenntnis spezifischer Parameter, die das dreidimensionale Spannungs-Dehnungsverhalten beschreiben. Die Realisierbarkeit der Berechnungen ist von der Verfügbarkeit dieser Parameter abhängig.

### 3.1.2 Plattenabmaße

Die derzeit üblichen Plattenabmaße wurden unter Punkt 2.2.5 beschrieben. Für viereckige Platten sind des Weiteren auch Mindestabmaße und maximale Längen/Breiten angegeben. Zudem ist das Verhältnis von Plattenbreite zu Plattenlänge und umgekehrt begrenzt. Da es sich bei den viereckigen Platten um den weitaus größten Anwendungsfall handelt, sollen sich die nachfolgenden Betrachtungen auf diese Fälle beziehen. Fünf- oder sechseckige Platten sowie Kreissegmentplatten bilden die Ausnahme.

Die Plattenabmaße von rechteckigen oder quadratischen Platten haben einen erheblichen Einfluss auf das Dimensionierungsergebnis. So führen im Regelfall kleine Plattenlängen und -breiten zu kleineren Randspannungen und somit zu geringen Plattendicken. Allerdings erhöht sich dadurch die Anzahl der Fugen.

Auch Erfahrungen aus den USA (Bild 3.13) zeigen, dass eine kleinere Plattengeometrie sich positiv auf die Dauerhaftigkeit von Betondecken auswirkt.



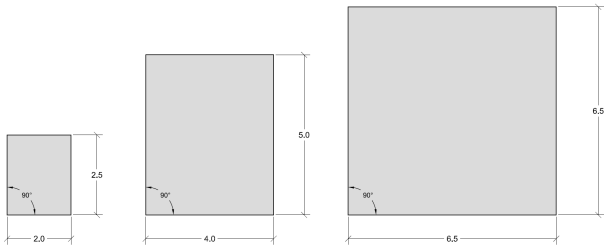
**Bild 3.13:** Dauerhaftigkeit von Betonplatten in Abhängigkeit zur Plattenlänge [DARTER 2018]

Betrachtet man die Gebrauchseigenschaften einer Betondecke, könnte die Verwendung kleiner Platten hinsichtlich der Ebenheit von Vorteil sein, da ein anfängliches, nicht reversibles Aufschüsseln der Platten infolge Schwindens deutlich geringer ausfallen wird. Bezüglich möglicher Fugenöffnungsweiten reduzieren sich diese linear mit abnehmender Plattenlänge und -breite.

In Abhängigkeit von konstruktiven Gesichtspunkten haben sich bestimmte Standardmaße herausgebildet. Bild 3.14 zeigt einzelne Beispiele:



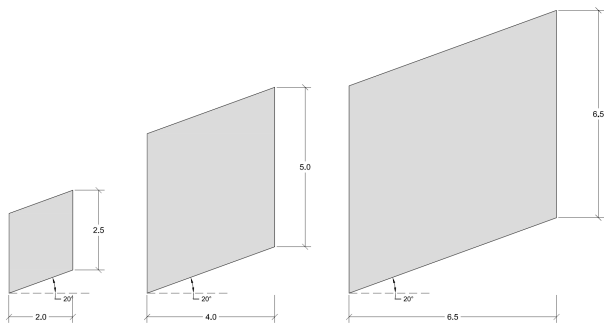
- a) Breite 2 m, Länge 2,5 m (Halbierung der derzeitigen Standardfalls)
- b) Breite 4 m, Länge 5 m (derzeitiger Standardfall Hauptfahrstreifen)
- c) Breite 6,5 m, Länge 6,5 m (RQ 31 mit einer Längsfuge)



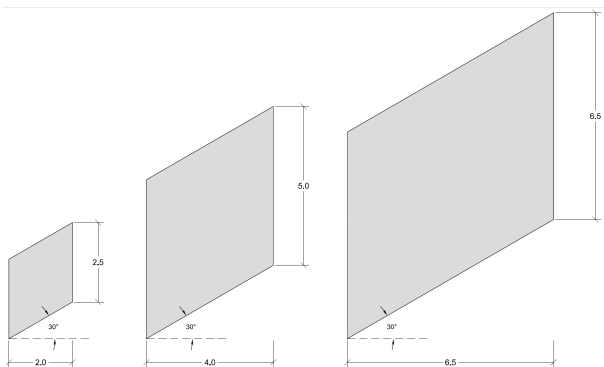
**Bild 3.14:** Plattenabmaße a) bis c)

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der akustischen Gebrauchseigenschaften wäre die Anordnung schräger Querscheinfugen. Der Winkel müsste jedoch ausreichend groß sein, damit die Räder einer Fahrzeugachse nicht gleichzeitig die Quersfuge überrollen. Aus dimensionierungstechnischer Sicht ist die Anordnung schräger Fugen jedoch ungünstig, da mit einer Spannungszunahme insbesondere in spitzen Ecken der Platte zu rechnen ist. Bild 3.15 und Bild 3.16 zeigen mögliche Varianten:

- i) 90 °(siehe oben)
- ii) 20 °
- iii) 30 °



**Bild 3.15:** Plattenabmaße a) bis c) mit Winkel ii) 20 °



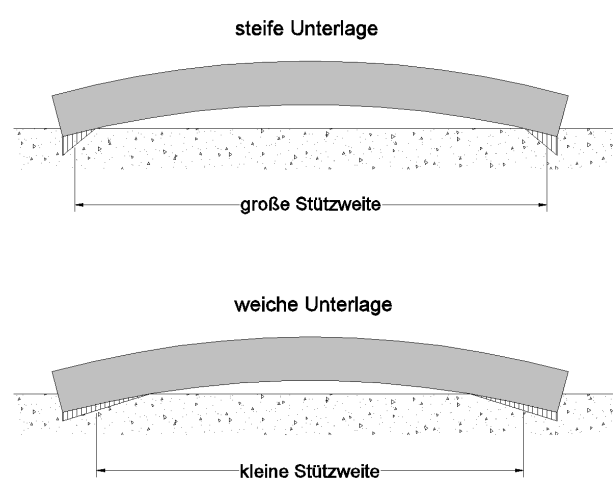
**Bild 3.16:** Plattenabmaße a) bis c) mit Winkel iii) 30 °

Die Herstellung schräger Fugen ist allerdings mit erheblichen technologischen Problemen verbunden. Aus diesem Grund wurde auf eine genauere rechnerische Analyse dieser Gestaltungsvariante verzichtet.

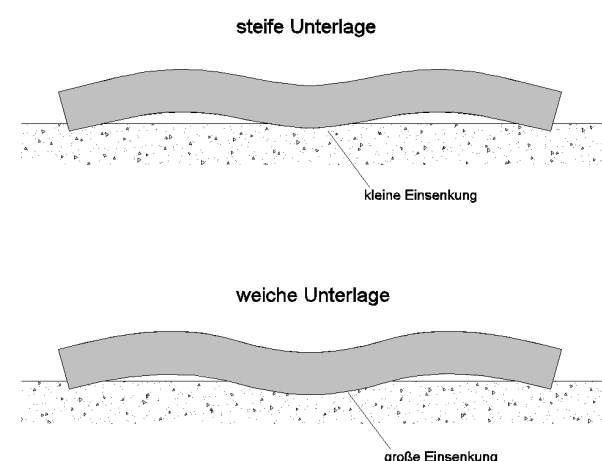
### 3.1.3 Schichtenfolgen

Die Tragschichten unter der Betondecke werden durch die planmäßigen Belastungen der Fahrbahnplatte nur in geringem Maße beansprucht. Damit wird das elastische Verhalten der Plattenunterlage sichergestellt. Insgesamt reagiert die Fahrbahnplatte auf eine Variation der mechanischen Kennwerte der Tragschichten nicht sehr sensitiv. Ein zu beachtender Einfluss ist aber gleichwohl vorhanden.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Verkehrslast im Regelfall auf eine vorverformte Platte trifft. Im Falle der Aufwölbung steht die Radlast also auf einer Platte, welche nur an den Ecken aufgelagert ist. Im Falle der Aufschüsselung ergeben sich an den Ecken Kragarme, welche am Ende über die Fugenverdübelung gelenkig mit der Nachbarplatte verbunden sind. Je steifer die Unterlage ist, desto ausgeprägter sind die entsprechenden Stützweiten bzw. Kragarmlängen. Eine weichere Unterlage wirkt sich hier also günstig aus. Sobald die Vorverformung aber zurückgestellt ist, wird durch eine steifere Unterlage die weitere Plattenverformung stärker behindert, als durch eine weichere Unterlage. Hier wirkt die steifere Unterlage also spannungsbegrenzend. In Bild 3.17 und Bild 3.18 sind diese Zusammenhänge beispielhaft für eine aufgewölbte Platte verdeutlicht.



**Bild 3.17:** Änderung des statischen Systems in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Unterlage, Fall Aufwölbung



**Bild 3.18:** Verformungsbehinderung durch eine steifere Unterlage

Es ist also nicht klar erkennbar, welche Steifigkeit der Unterlage bezüglich der Plattenbeanspruchung das Optimum darstellt. Systematische Berechnungen mit verschiedenen Parameterkonstellationen können hier eine Klärung herbeiführen.

Innerhalb der Modellbildung für Betonstraßenplatten ist es üblich, die einzelnen Schichten der Unterlage zu einem Volumenblock zusammenzufassen. Dabei wird unterstellt, dass die unteren Schichten infolge der geringen Beanspruchung (bei normgerechter Ausführung) keinen signifikanten Einfluss auf die Plattenbeanspruchung haben. Es soll geklärt werden, ob diese Annahme richtig ist und welche Steifigkeitswerte für solche zusammengefassten Volumenblöcke anzusetzen sind.

### 3.1.4 Vorverformung durch Schwinden und Kriechen

Die grundlegenden Zusammenhänge zu dieser Problematik wurden bereits im Kapitel 2.4.2 erläutert.

Eine praktikable Möglichkeit zur Berücksichtigung der durch den Schwindprozess bedingten Vorverformung besteht in der Definition eines äquivalenten Temperaturgradienten, welcher eine ähnliche Plattenverformung erzeugt. In der amerikanischen Dimensionierungsvorschrift ([M-E D 2004], Appendix KK) wird eine Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite von  $-10\text{ °F}$  (entspricht  $-5,56\text{ K}$ ) angegeben, welche angesetzt werden soll, um die eingeprägte Vorverformung zu berücksichtigen.

Dieser Temperaturgradient erzeugt bei typischen Parameteransätzen allerdings nur Verformungswerte von ca.  $0,7\text{ mm}$ . In der internationalen Fachliteratur wird dagegen von eingepägten Vorverformungen von ca.  $2,5\text{ mm}$  (vgl. [SONDAG 2006]) berichtet. Durch zusätzliche Überlagerung mit ungünstigen Temperatur- und Feuchteverhältnissen können bis zu  $10\text{ mm}$  gemessen werden. Vor diesem Hintergrund erscheint die empfohlene Temperaturdifferenz als zu klein. Es ist aber zu berücksichtigen, dass mit diesem Ansatz der nach der aktuellen deutschen Dimensionierungsvorschrift [RDO Beton 09] für den Ermüdungslastfall anzusetzende Temperaturgradient mehr als verdoppelt wird. Der Ansatz einer deutlich größeren Temperaturdifferenz würde also zu unrealistischen Dimensionierungsergebnissen führen.

Es ist zu vermuten, dass der Ansatz eines äquivalenten Temperaturgradienten nur bedingt geeignet ist, die tatsächlich an der Plattenoberfläche vorhandenen Vorverformungen zu erfassen. Auf die Möglichkeit einer verstärkten Verformung in Fugennähe wurde schon in Kapitel 2.4.2 eingegangen.

Da der Einfluss der Vorverformung bedeutend ist, sollten für rechnerische Analysen die entsprechenden Parameter möglichst realitätsnah bestimmt werden.

### 3.1.5 Zusammenstellung der zu variierenden konstruktiven Parameter für die FEM-Berechnung

Auf der Grundlage der in den obenstehenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen wurden die in Tab. 3.2 zusammengestellten konstruktiven Parameter für die FEM-Berechnungen definiert.

Konstruktionsdetail			
Fugenausbildung	4 + 1,5 + 1,5 mm	6 + 2 + 2 mm	12 + 2 + 2 mm
Plattenabmaße	2,50 m x 2,50 m	3,50 m x 3,50 m	4,00 m x 5,00 m
Schichtenfolge	Schottertragschicht, HGT, Asphalttragschicht, Asphaltzwischen-schicht auf Verfestigung		
Vorverformung aus Schwinden und Kriechen	Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite von $-5,56\text{ K}$		

Tab. 3.1: konstruktive Parameter für die FEM-Berechnung

## 3.2 Variationsbreiten der Materialparameter für die Modellrechnung

### 3.2.1 Auswertung von BAST-Laborergebnissen von Streckenbeprobungen für ausgewählte Materialkennwerte

#### Zielstellung

Die im Rahmen der Planung und Bauausführung durchzuführenden Laboruntersuchungen beinhalten im Allgemeinen nicht die Untersuchung der Parameter zur Steifigkeit und Wärmedehnung des Betons. Folglich musste für rechnerische Analysen diesbezüglich auf Tabellenwerte aus der Literatur zurückgegriffen werden. Um diese Informationsquelle insbesondere durch Werte zu ergänzen, welche aktuellen Betonrezepturen zuzuordnen sind, wurden verfügbare Laborergebnisse der BAST ausgewertet.

#### Datengrundlage

Grundlage für die statistische Auswertung sind Materialdaten, welche in den Jahren 2015/2016 im Rahmen der Bewertung der strukturellen Substanz von Bundesautobahnen in Sachsen-Anhalt gewonnen wurden.

Im Zuge der damit einhergehenden Beprobung wurden 1.496 Bohrkerne aus verschiedenen Streckenabschnitten entnommen. An 166 Bohrkernen wurden die Wärmedehnzahl und der Elastizitätsmodul bestimmt. Für alle anderen Bohrkerne wurden Festigkeitswerte ermittelt.

### Wärmedehnzahl

Da die Bohrkerne aus einer Vielzahl verschiedener Streckenabschnitte stammen, ist davon auszugehen, dass die Betonrezepturen nicht identisch sind. Die Wärmedehnzahl betreffend sind besonders die Gesteinsorten, aus denen die Zuschlagstoffe hergestellt wurden von Bedeutung. Diesbezüglich liegen aber keine Angaben vor. Entsprechend gestaltet sich die Definition von Grundgesamtheiten für die statistische Auswertung problematisch. Eine Visualisierung der Daten zeigte keine auffälligen Gruppierungen. Aus diesem Grund wurden alle vorliegenden Daten zu einer Grundgesamtheit zusammengefasst.

Für die vorliegende Stichprobe wurden folgende statistische Parameter ermittelt:

Mittelwert:  $10,56 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Standardabweichung:  $0,57 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Variationskoeffizient: 0,05

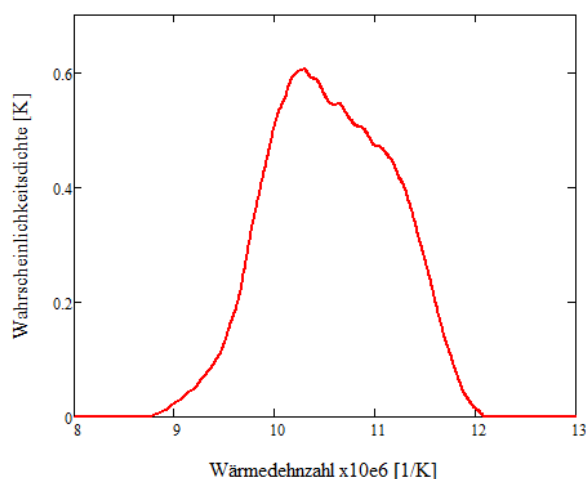
Kleinster Einzelwert:  $9,20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Größter Einzelwert:  $11,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

94 % aller Werte liegen zwischen  $9,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  und  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Auffällig ist die relativ geringe Streuung. Insgesamt liegen die ermittelten WDW-Werte im unteren Bereich des zu erwartenden Spektrums. Die [RDO Beton 09] geben als Regelfall einen Wert von  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  an und sehen im Maximum eine WDW von  $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  vor. Bei Beprobungen bayerischer Autobahnabschnitte im Jahr 2013 wurden allerdings ebenfalls WDW-Werte ermittelt, welche mehrheitlich zwischen  $9,20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  und  $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  lagen. Die DIN für den Stahlbetonbau [DIN EN 1992-1-1] gibt für die Wärmedehnzahl einen Wert von  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  an. Die vorliegenden Messwerte lassen also vermuten, dass die in den [RDO Beton 09] angegebenen Werte etwas auf der sicheren Seite liegen. Für eine gesicherte Beurteilung ist die Datenbasis aber noch nicht ausreichend.

Bild 3.19 zeigt eine Visualisierung der Gesamtstichprobe mit einem Epanechnikov-Kerndichteschätzer.

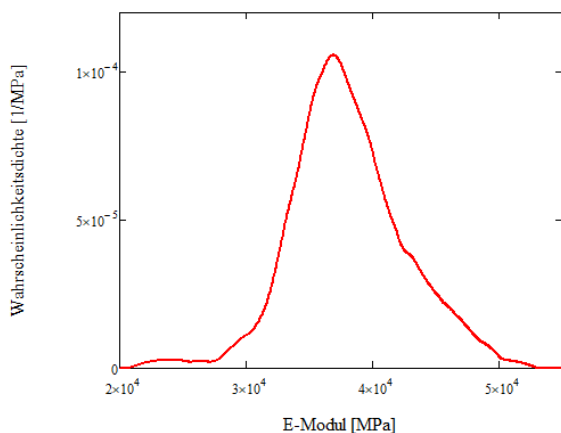


**Bild 3.19:** Visualisierung der Verteilung der gemessenen WDW-Werte

Es ist erkennbar, dass eine Beschreibung der Streuung mit einer Normalverteilung zwar möglich, aber nur begrenzt aussagefähig ist. Die Bildung homogener Stichproben in Abhängigkeit von der Betonrezeptur erscheint hier zielführend.

## E-Modul

Die Gesamtheit der untersuchten Bohrkerns war hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften recht homogen. Auf Grund der bekannten Korrelation zwischen Festigkeit und E-Modul konnte also vermutet werden, dass auch bezüglich des E-Moduls keine systematischen Unterschiede bestehen. Es ist damit gerechtfertigt, alle untersuchten Bohrkerns bezüglich des E-Moduls zu einer Grundgesamtheit zusammenzufassen. Bild 3.20 zeigt eine Visualisierung der Stichprobe.



**Bild 3.20:** Visualisierung der Verteilung aller gemessenen Elastizitätsmodul-Werte

Auffällig ist eine geringe Anzahl besonders kleiner Werte. Statistisch betrachtet handelt es sich hierbei um Ausreißer (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Auch der größte gemessene Wert ist als statistischer Ausreißer zu betrachten. Ob es sachgerecht ist, diese Werte aus der Stichprobe zu entfernen, kann auf der Grundlage der vorhandenen Informationen nicht entschieden werden. Die Stichprobe wurde deshalb zunächst unter Berücksichtigung aller Messwerte ausgewertet.

Für die vorliegende Gesamtstichprobe wurden folgende statistische Parameter ermittelt:

Mittelwert:	38.019 MPa
Standardabweichung:	4.328 MPa
Variationskoeffizient:	0,11
Kleinster Einzelwert:	23.903 MPa
Größter Einzelwert:	49.800 MPa

90 % aller Werte liegen zwischen 30.000 MPa und 45.000 MPa.

Die gemessenen Werte liegen damit in dem zu erwartenden Bereich. Die Streuung liegt in der gleichen Größenordnung wie die Streuung der Spaltzugfestigkeit.

Bemerkenswert ist, dass die in den [RDO Beton 09] angegebenen und hier empirisch bestätigten Werte um ca. 20 % über den in [DIN EN 1992-1-1] angegebenen Werten liegen.

Eine statistische Auswertung der Stichprobe ohne Berücksichtigung der Ausreißer ergab folgende statistische Parameter:

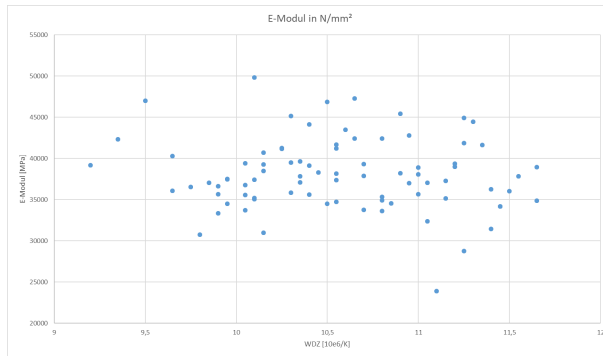
Mittelwert:	38.048 MPa
Standardabweichung:	3.872 MPa
Variationskoeffizient:	0,10

Die Aussonderung der statistischen Ausreißer hatte also lediglich auf die Standardabweichung eine signifikante Auswirkung.

### Zusammenhang zwischen E-Modul und WDZ

Bei den vorliegenden Beprobungen wurden E-Modul und WDZ jeweils am gleichen Probekörper bestimmt. Aus diesem Grund bietet es sich an, einen eventuell vorhandenen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen zu untersuchen.

Im Bild 3.21 sind die gemessenen Parameterwerte als Koordinatenpunkte dargestellt.



**Bild 3.21:** Ermittelte Werte für E-Modul und Wärmedehnzahl

Es lässt sich deutlich erkennen, dass keinerlei Zusammenhang zwischen den beiden untersuchten Materialwerten besteht.

### **3.2.2 Ermitteln von ggf. benötigten weiteren Materialkennwerten und/oder Messergebnissen zur Bestimmung weiterer Materialkennwerte aus anderen Quellen**

#### Dichte

Die Dichte des Betons wird im Allgemeinen mit  $24 \text{ kN/m}^3$  angesetzt. Dieser Wert wird auch in [DIN EN 1991-1-1] (Tab.A1) angegeben. In der Straßenbaupraxis werden Werte zwischen  $23 \text{ kN/m}^3$  und  $24,5 \text{ kN/m}^3$  gemessen.

Das Eigengewicht der Fahrbahnplatten hat zwar einen spürbaren aber keinen bestimmenden Einfluss auf das mechanische Verhalten der Platten. Da die Streuung der Werte in der Praxis nicht sehr groß ist, kann mit einem Wert von  $24 \text{ kN/m}^3$  gerechnet werden.

#### Querdehnzahl

Die Querdehnzahl des Betons wird im Allgemeinen mit 0,2 angenommen. Dieser Wert findet sich auch in [DIN EN 1992-1-1] (Kap. 3.1.3). In der Fachliteratur werden Werte zwischen 1,5 und 2,5 angegeben. Eine Bestimmung der Querdehnzahl wird in der Betonbaupraxis nur sehr selten durchgeführt. Der VdZ teilte auf Nachfrage mit, dass bei einer stichprobenartigen Überprüfung der Wert von 0,2 mit guter Genauigkeit bestätigt werden konnte.

Bei Fragestellungen die eine dreidimensionale Betrachtungsweise der Spannungs-Dehnungszustände erfordern (z. B. Lasteinleitungspunkte) kann die Querdehnzahl eine große Rolle spielen. Bezüglich der Biegebeanspruchungen, welche bei Betonstraßenplatten von Interesse sind, ist der Wert aber nicht sehr sensitiv. Es kann in jedem Fall mit einer Querdehnzahl von 0,2 gerechnet werden.

#### Steifigkeit der Bettung

Für eine realitätsnahe Berechnung des mechanischen Verhaltens von Betonfahrbahnplatten ist es erforderlich, auch die Bettung der Platte als Volumenblock zu modellieren. Das mechanische Verhalten der Tragschichten lässt sich im Allgemeinen nicht als linear-elastisch beschreiben. Es ist aber festzuhalten, dass die Beanspruchung der Tragschichten relativ gering ist und mit zunehmender Tiefe schnell auf ein zu vernachlässigendes Niveau sinkt. Im Zuge der Bearbeitung des noch nicht abgeschlossenen Forschungsvorhabens der BAST FE 08.0253/2017/ERB („Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundlegende Erneuerung auf der duraBAST“) wurden systematische Vergleichsrechnungen durchgeführt,

welche zu dem Ergebnis führten, dass der Volumenblock der Unterlage nicht dicker als 75 cm modelliert werden muss.

Auch wenn, wie bereits oben bemerkt, die für die Auflagerung der Betonplatten verwendeten Baustoffe oftmals in weiten Beanspruchungsbereichen kein elastisches Verhalten zeigen, muss doch davon ausgegangen werden, dass bei geringem Beanspruchungsniveau eine elastische Belastungsreaktion erfolgt. Es kann vorausgesetzt werden, dass die Fahrbahnaufbauten so dimensioniert sind, dass dieses geringe Beanspruchungsniveau nicht überschritten wird. Andernfalls würde jeder Lastübergang zu einer Veränderung (plastischen Verformung) der Fahrbahn führen. Dass auch die Annahme eines linearen Materialverhaltens in diesem Beanspruchungsbereich zulässig ist, kann vermutet werden, ist aber nicht belegt.

Die Kalibrierung eines Berechnungsmodells an FWD-Messwerten, welche im Zuge der Bearbeitung von FE 08.0253/2017/ERB durchgeführt wurde, ergab, dass bei einer Schottertragschicht mit einem E-Modul von 115 MPa und bei einer Asphalttragschicht von 220 MPa gerechnet werden kann.

### Reibung

Sofern kein Verbund zwischen Betondecke und Unterlage besteht, spielt die Reibung für das mechanische Verhalten der einzelnen Platte keine signifikante Rolle.

## 3.2.3 Materialkennwerte für die Verwendung innerhalb der FEM-Berechnungen

Auf der Grundlage der in den obenstehenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen wurden die in Tab. 3.2 zusammengestellten Parameterbereiche für die Berechnungsmodelle definiert.

Material	E-Modul [MPa]	Querdehnzahl	Wärmedehnzahl [1/K]	Dichte [kN/m <sup>3</sup> ]
Beton	25.000-50.000	0,2	$0,9 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-5}$	24
Untere Tragschichten	100 - 500	0,5	$2 \cdot 10^{-4}$	24
Stahl	200.000	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$	78

Tab. 3.2: Materialparameter

## 3.3 Identifizierung der relevanten Beanspruchungen/Phänomene sowie Modellierungskonzepte

### 3.3.1 Längs- und Querdehnungsverhalten

Die hier betrachtete Dehnung der Betonplatten ist nicht auf mechanische Einwirkungen, sondern auf die Änderung des Temperatur- oder Feuchtezustandes zurückzuführen. Sie erfolgt gleichmäßig in alle Richtungen und ist damit eigentlich eine Volumenänderung. Die hier benutzte Bezeichnung „Dehnung“ unterstellt, dass der Betrag der Dehnung auch negativ sein kann (Schrumpfung).

Sofern die Dehnung nicht behindert wird, erfolgt kein Spannungsaufbau. Dies ist ein rein theoretischer Fall. Von praktischer Bedeutung sind aber Konstellationen, in denen die Dehnbehinderung so klein ist, dass sie praktisch vernachlässigt werden kann. Für bestimmte Fragestellungen ist es aber auch möglich, die Komponenten des Temperaturzustandes, welche eine annähernd ungehinderte Dehnung erzeugen, separat zu betrachten.

Grundsätzlich gibt es zwei Vorgehensweisen, um die Wirkung der Plattendehnung zu berechnen:

- (1) Nutzung von ein- bzw. zweidimensionalen statischen Modellen
- (2) Nutzung von Finite-Elemente-Volumenmodellen

(1) Die Betrachtung der Betonplatte als ein- oder zweidimensionale Körper beinhaltet starke Idealisierungen. Diese Modellierung ist immer dann von Vorteil, wenn eine integrale Betrachtung des Dehnungsverhaltens ausreichend ist, wenn also vor allem der Dehnungszustand der gesamten Platte von Interesse ist.

Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Öffnungsweiten der Fugen berechnet werden sollen. Je nach Fragestellung sind hier Einzelplatten oder ganze Systeme zu betrachten. Die theoretische Änderung der Öffnungsweite einer Fuge kann mit einer einfachen Formel berechnet werden:

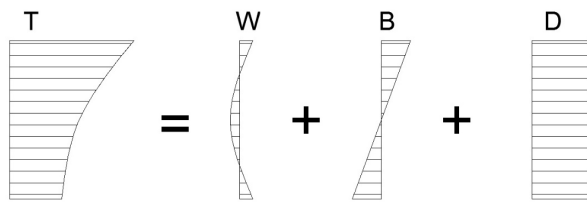
$$\Delta L = L_P \cdot \alpha_T \cdot \Delta T \quad (3-1)$$

- $\Delta L$  – Längenänderung der Platte = Änderung der Fugenöffnungsweite
- $L_P$  – Länge der Platte vor Dehnung
- $\alpha_T$  – Wärmedehnzahl des Betons
- $\Delta T$  - Temperaturänderung des Plattenbetons

Die Reibung der Platte auf der Unterlage wird dabei vernachlässigt, was für Einzelplatten im Allgemeinen zulässig ist. Weiter wird vorausgesetzt, dass die Dehnung nicht durch Fugenverschmutzung und Dübelreibung behindert wird. Diese Voraussetzungen sind in der Praxis oftmals nicht erfüllt. Die Formel liefert also nur eine obere Grenze für die mögliche Fugenbewegung infolge Temperaturänderung.

Die Wirkung der Betonfeuchte kann ebenfalls mit dieser Formel erfasst werden, wenn man die daraus resultierende Volumenänderung in eine äquivalente Temperaturänderung umrechnet. Dies setzt voraus, dass eine analytische Beziehung zwischen Betonfeuchte und -dehnung bekannt ist.

Die Anwendung der Formel (3-1) setzt weiter voraus, dass die Temperaturänderung im gesamten Plattenvolumen gleich ist. Dies kann für die horizontalen Richtungen näherungsweise als zutreffend gelten, für die vertikale Richtung ist es aber im Allgemeinen nicht der Fall. Es ist aber möglich, den Temperaturzustand über den Plattenquerschnitt virtuell in drei Bestandteile aufzuspalten: den konstanten Anteil (D), den linearen Anteil (B) und den nichtlinearen Anteil (W) (siehe Bild 3.22).



**Bild 3.22:** Aufteilung des Temperaturzustandes in Komponenten

Für die Änderung der Fugenöffnungsweite ist allein der über die Querschnittshöhe konstante Anteil D von Bedeutung.

Um die Fugenbewegung zielgenau zu berechnen, ist es notwendig die praktisch auftretenden Behinderungen der Plattendehnung zu berücksichtigen. Diese werden vor allem durch die Reibung der Dübel im Beton verursacht. Selbst bei guter Ausrichtung in Fahrbahnrichtung sind etwa 5 bis 10 kN Zugkraft pro Dübel notwendig, um eine Fugenbewegung zu realisieren (vgl. [PRABHU 2006]). Bei stärkerer Winkelabweichung steigt diese Kraft weiter an und kann ggf. die Fugenbewegung völlig verhindern. Im Ergebnis sind von Fuge zu Fuge unterschiedliche Kräfte notwendig, um eine Fugenbewegung auszulösen. Das führt dazu, dass unterschiedliche Normalkräfte an den Plattenenden angreifen. Sobald die Differenz dieser Kräfte größer ist als die widerstehende Reibung in der Sohlfuge, wird die Platte verschoben. Da die Behinderung der Fugenbewegung sich von Fuge zu Fuge graduell unterscheidet, ist nur eine Betrachtung des Gesamtsystems unter Beachtung der Streuungen der Werte für die Dehnbehinderung und Reibung sinnvoll. Im Ergebnis solcher Berechnungen können relative Wahrscheinlichkeiten für Fugenöffnungsweiten auf einem bestimmten Streckenabschnitt angegeben werden. Entsprechende Berechnungsmodelle wurden von LEE und STOFFELs veröffentlicht (siehe [LEE 2001], [LEE 2003]).

(2) Wenn der vollständige Einfluss der Plattendehnung auf den Spannungszustand im Beton berechnet werden soll, ist die Nutzung der Finite-Elemente-Methode (FEM) unumgänglich. Die Methode ermöglicht es, bei entsprechend detaillierter und umfänglicher Modellgestaltung, alle Aspekte der temperaturbedingten Spannungsbeeinflussung mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Es sind dies:

- Biegespannungen, welche durch die Rückstellung der temperaturbedingten Plattenverformung durch Eigengewicht und Verkehrslast entstehen



- Zwangsspannungen, welche durch Behinderung der Dehnung innerhalb des Plattenquerschnittes entstehen
- Normal- und Biegespannungen, welche durch die Behinderung der Plattendehnung durch die Nachbarplatten anstehen.

Das erstgenannte Phänomen ist Gegenstand des nächsten Abschnittes und soll hier nicht näher erörtert werden.

Zwangsspannungen ergeben sich immer dann, wenn der Dehnungszustand im Beton nicht vollständig in eine Plattenverformung umgesetzt werden kann. Das ist z. B. bei jedem nichtlinearen vertikalen Temperaturverlauf über den Plattenquerschnitt der Fall. Der lineare Anteil (Anteil B in Bild 3.22) kann in Biegung umgesetzt werden, der nichtlineare Anteil (Anteil W in Bild 3.22) führt zu einer Querschnittsverwölbung, welche aber nicht ausreicht, um die temperaturbedingten Dehnungen vollständig zu realisieren. Die verhinderte Dehnung erzeugt dann die Zwangsspannung.

Bei Verwendung eines FEM-Volumenmodelles ist es möglich, diese Spannungs- und Verformungszustände realitätsnah zu modellieren. Die Modelle erlauben es, jedem Elementknoten eine Temperatur zuzuweisen. Damit können beliebige Temperaturzustände im Modell erfasst werden. Über eine Kontaktformulierung ist es möglich, die Interaktion der Platte mit der Unterlage zu beschreiben. Das Modell simuliert auf diese Weise realitätsnah die verformungsabhängigen Auflagerpressungen an der Plattenunterseite. Auch ein bereichsweises Abheben der Platte von der Unterlage ist im Modell möglich, d. h. die Auflagerbedingungen ändern sich in Abhängigkeit vom Verformungszustand der Platte (nichtlineares Modellverhalten).

Die horizontale Plattendehnung wird behindert, sobald sich die Fugen zu den angrenzenden Platten schließen. In Querrichtung spielt dies keine Rolle, weil normalerweise nur eine Platte angrenzt, welche relativ leicht verschoben werden kann. In Fahrtrichtung sind die angrenzenden Platten aber im Allgemeinen unverschieblich, wodurch die Dehnung vollständig behindert wird. In der Folge werden enorme Druckkräfte aufgebaut (mehr als 1000 kN pro Platte sind möglich). Die dazu gehörenden Druckspannungen im Querschnitt sind aber trotzdem moderat und weit unterhalb der normalen Druckfestigkeit eines Straßenbetons. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Druckspannungen keine Gefährdung darstellen und sich reduzierend auf die gefährlicheren Zugspannungen auswirken.

Durch den Fugenschnitt erzeugen die Druckkräfte allerdings auch ein Versatzmoment, welches zusätzlich Biegespannungen, also Zug- und Druckspannungen erzeugt. Auch diesen Effekt kann man mit einem FEM-Volumenmodell erfassen. Der Fugenschnitt kann mit einer entsprechenden Einkerbung des Volumenblocks modelliert werden. Indem man für den Fugenbereich ein Material definiert, welches nur Druckspannungen überträgt, ermöglicht man auch eine vollständige oder auch nur partielle Öffnung der Fuge.

Ein FEM-Volumenmodell ist also geeignet, alle relevanten Aspekte der Plattendehnung zu beschreiben. Das Modell muss mehrere Platten umfassen, um auch die Interaktion mit den Nachbarplatten simulieren zu können.

### 3.3.2 Hohlagerung infolge Aufschüsseln und Aufwölben

Der Mechanismus, welcher zum Aufschüsseln und Aufwölben der Betonplatten führt, wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 ausführlich beschrieben. Wenn der Beton sich infolge einer Erhöhung der Temperatur oder des Feuchtegehaltes an der Oberseite mehr ausdehnt als an der Unterseite, so wölbt sich die Platte auf. Im umgekehrten Fall kommt es zu einer Aufschüsselung.

Die so entstehenden Plattenverformungen erzeugen für sich genommen noch keinerlei Spannungen. Praktisch gibt es aber Einwirkungen auf das vorverformte System.

Das Eigengewicht wirkt in jedem Fall und führt zu einer teilweisen Rückstellung der Verformung. Dadurch entstehen Biegespannungen. Bei Überschreitung einer kritischen Plattenlänge sinkt die aufgewölbte Platte infolge ihres Eigengewichtes auf die Unterlage zurück. Im wieder aufliegenden Plattenbereich ist die Vorverformung damit vollständig zurückgestellt und in Spannung umgesetzt. An den Rändern des aufliegenden Bereiches, gibt es sogar eine Umkehrung der Krümmungsrichtung. Hier ergeben sich noch höhere Spannungen. Eine Analyse dieser Zusammenhänge führt zu elementaren Formeln, welche es erlauben, die Spannungen, die aus der Wirkung des Eigengewichtes auf die vorverformte Platte resultierenden, mit befriedigender Genauigkeit zu berechnen (siehe [PFEIFER 1973], [EISENMANN 2003], [LECHNER 1996]).

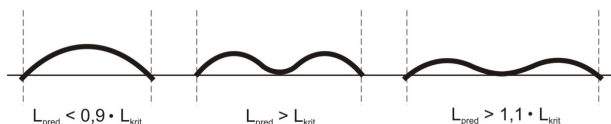


Verformung der Betonplatte bei nachfolgender Erwärmung



**Bild 3.23:** Konkave Verformung bei Austrocknung (Schwinden) von oben, sowie Verformung bei nachfolgender Erwärmung [RDO Beton 09]

Verformung der Betonplatte bei Erwärmung von oben ohne Vorverformung

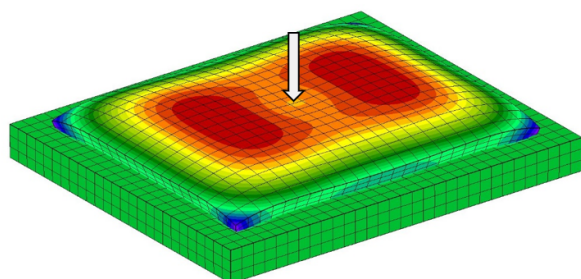


**Bild 3.24:** Ohne konkave Vorverformung - bei Erwärmung von oben [RDO Beton 09]

Von noch größerer Bedeutung ist die Vorverformung bezüglich der Wirkung von Verkehrslasten. Wenn die Radlast auf eine vorverformte Platte trifft, dann wird zunächst die Vorverformung zurückgestellt, d. h. die Platte auf die Unterlage gedrückt. Die unmittelbar stützende Wirkung der Unterlage ist also zunächst nicht vorhanden. Bei kleinen Plattenlängen ist es oft so, dass die Radlast oft nicht ausreicht, um die Verformung vollständig aufzuheben. Eine unmittelbare Weiterleitung der Radlast in die Unterlage findet also gar nicht statt. Dadurch wird die mechanische Wirkung der Radlast auf die Platte wesentlich erhöht. Die Biegespannungen, welche die Radlast in einer vorverformten Platte erzeugt, betragen ein Mehrfaches der Spannungen in Platten ohne Vorverformung.

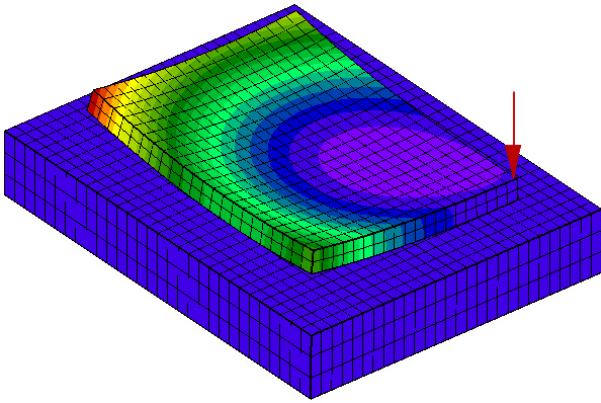
Die Berechnung dieser Spannungszustände auf direktem Wege, unter Verwendung einfacher Formeln ist nicht möglich. Indem die Radlast die Vorverformung verändert, ändern sich auch die aufgelagerten Bereiche der Platte und damit das statische Modell. Das Modell zeigt ein nichtlineares Verhalten. Es ist deshalb erforderlich, den Spannungs- und Verformungszustand iterativ zu berechnen. Dies ist mit hinreichender Genauigkeit mit der Finite-Elemente-Methode möglich.

Die Auflagerung der Platte wird vielfach durch den Ansatz von Bettungsfedern beschrieben (Bettungsmodulverfahren). Diese sogenannte Wincklerbettung liefert aber nicht in jedem Fall befriedigende Ergebnisse. Das Modellierungsverfahren erfasst nur die stützende Wirkung der Unterlage direkt unter der Platte. Die mittragende Wirkung der angrenzenden Bereiche wird nicht erfasst. Damit wird die Unterstützung in den Randbereichen zu weich angenommen. Eine bessere Alternative bietet das Steifezifferverfahren, welches die gesamte Setzungsmulde betrachtet. Die größte Realitätsnähe hat aber ein Volumenmodell, welches die Unterlage so abbildet, dass der Unterbau an allen Seiten über das Plattenmodell herausragt. Beispielhaft ist so ein Modell in Bild 3.25 gezeigt.



**Bild 3.25:** Volumenmodell mit vorverformter Platte, Auflast und Unterlage

In Abhängigkeit von Vorverformung und Laststellung sind Ein-Platten-Modelle oder Mehrplattenmodelle erforderlich. In den meisten Fällen ist jedoch eine Platte nicht ausreichend. Eine Radlast im Randbereich einer aufgeschüsselten Platte führt beim Ein-Platten-Modell beispielsweise zu einer Plattenbewegung. Die Platte kippt in Richtung der Last (siehe Bild 3.26).



**Bild 3.26:** Plattenbewegung bei Eckbelastung einer aufgeschüsselten Einzelplatte

Diese Bewegung wird in der Praxis durch die Verdübelung mit den angrenzenden Platten verhindert, wodurch sich ein deutlich anderes Spannungsbild ergibt.

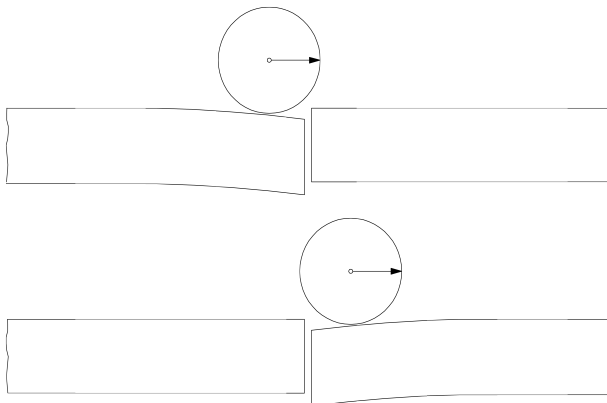
Aber auch bei aufgewölbten Platten kann die Interaktion mit den Nachbarplatten im Allgemeinen nicht vernachlässigt werden. Die Querkraftübertragung über die Fugen führt zu einer deutlichen Beeinflussung des Spannungszustandes.

Als angemessenes Berechnungsmodell für die Beschreibung der Wirkungen der Plattenvorverformung ist ein Mehrplatten-Volumenmodell anzusehen. Nähere Beschreibungen finden sich in [FE 09.0188/2011].

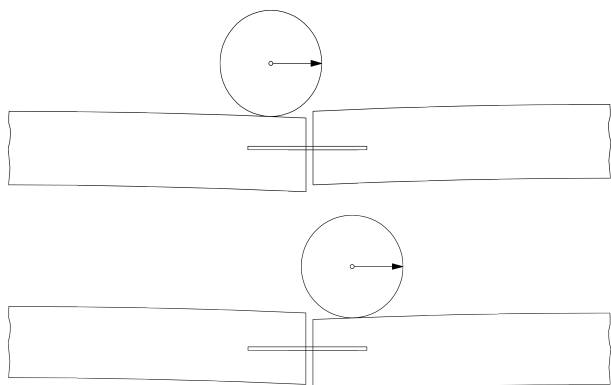
### 3.3.3 Querkraftübertragung Dübel und Anker

Die Querkraftübertragung in den Fugen dient dazu, die Beanspruchung der Betonplatte zu reduzieren und den Lastübergang an den Plattenrändern weicher zu gestalten. Da mit einer wirksamen Querkraftübertragung eine deutliche Reduktion der maximalen Biegespannungen am Plattenrand möglich ist, kommt diesem Konstruktionselement große Bedeutung zu.

Die Querkraftübertragung in den Querfugen erfolgt planmäßig über Dübel. Wenn bei hohen Temperaturen ein vollständiger Fugenschluss realisiert ist, wird zusätzlich eine Reibungskraft im Rissbereich der Fuge wirksam. Da die Rissflanken naturgemäß sehr rau sind und die Druckspannung hoch sein kann, ist auf diesem Weg die Übertragung beträchtlicher Querkräfte möglich.



**Bild 3.27:** Einsenkung des Fugenrandes ohne Dübel



**Bild 3.28:** Einsenkung des Fugenrandes mit Dübel

Die Längsfuge wird mit Anker zusammengehalten. Dadurch ist die Rissverzahnung unabhängig vom Temperaturzustand kontinuierlich gesichert. Die Querkraftübertragung erfolgt hier planmäßig über die Reibung im Bereich der Rissflanken der Fuge.

Das primäre Ziel der Querkraftübertragung ist die Reduzierung der Spannungen am Plattenrand. Die Übertragung der Querkräfte ist also nur Mittel zum Zweck. Es ist deshalb auch nicht zielführend, den Betrag der über die Dübel übertragenen Kraft als Maßstab für die Wirksamkeit der Querkraftübertragung anzusehen. Dies gilt umso mehr, als dass die Querkraftübertragung nicht nur über den Dübel realisiert wird, sondern auch über die Tragschicht. Eine Untersuchung dieser Zusammenhänge findet sich z. B. in [EOM 2000].

Letztendlich liefert nur ein Vergleich der maximalen Betonspannungen eine eindeutige Aussage über die Wirksamkeit der Querkraftübertragung. Praktisch ist dieser Vergleich aber nur mit einer aufwendigen Anordnung entsprechender Messgeräte zu realisieren. In der Praxis hat sich deshalb der Vergleich der Vertikalverformungen am belasteten und unbelasteten Plattenrand als Maßstab für die Querkraftübertragung herausgebildet. Aus den Messwerten für die beiden Vertikalverformungen kann der sogenannte Wirksamkeitsindex berechnet werden. Es gilt die Formel:

$$W = \frac{2 \cdot y_{nb}}{y_{nb} + y_b} * 100\% \quad (3-2)$$

- W – Wirksamkeitsindex
- $y_{nb}$  – Einsenkung des nicht belasteten Fugenrandes
- $y_b$  – Einsenkung des belasteten Fugenrandes

Nach der heutigen Regelbauweise errichtete Betonstraßen weisen auch nach jahrelanger Verkehrsbelastung normalerweise einen Wirksamkeitsindex > 90 % auf.

Als relevant für die Effizienz der Querkraftübertragung über Anker und Dübel sind folgende Einflüsse von Interesse:

- (1) Dübelabstand
- (2) Einbindelänge
- (3) Kontakt zwischen Dübel und Beton
- (4) Dübelfehllagen
- (5) Fugenöffnungsweite

Für die aufgeführten Problempunkte liegen bereits aussagekräftige Forschungsarbeiten und anwendbare Modellierungskonzepte vor. Im Einzelnen sind zu nennen:

Zu (1): Der Dübelabstand, also die Anzahl der Dübel pro Fuge hat ganz offensichtlich einen Einfluss auf die Wirksamkeit der Querkraftübertragung. Eine quantitative Analyse ist mit Mehrplattenmodellen einfach

möglich. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Frage, wie viele Dübel sich an der Lastübertragung beteiligen. Über eine entsprechende Untersuchung wird in [MAITRA 2009] berichtet.

Zu (2): Die mechanisch notwendige Einbindelänge eines Dübels lässt sich mit einem Ein-Dübel -Modell ermitteln. Hier sind auch bereits einfache FEM-Modelle aufschlussreich. Aus entsprechenden Untersuchungen ist bekannt, dass ca. 12 cm, also etwa die Hälfte der regulären Einbindelänge, ausreichend sind (z. B.: [FREUDENSTEIN 2001]).

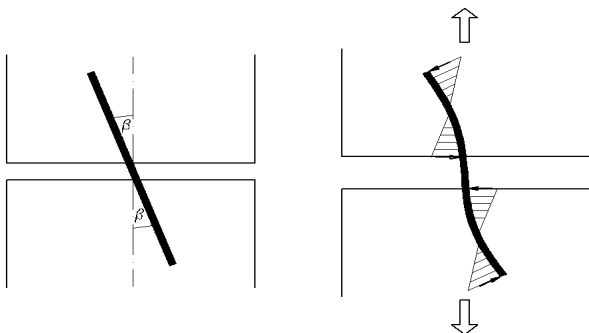
(3) Der Kontakt zwischen Dübel und Beton wurde schon in mehreren Studien eingehend untersucht ([DAVIDS 1998], [PRABHU 2006], [EOM 2000]). Dabei wurde besonders auf den Einfluss einer allmählichen oder bereits beim Einbau vorhandenen Lockerung der Dübel eingegangen.

(4) Dübelfehllagen können die Positionierung in jeder Richtung und die Ausrichtung betreffen. Auch hierzu liegen verschiedene Untersuchungen vor ([FREUDENSTEIN 2001], [VOIGT 2010], [PRABHU 2006]). Die Positionierung (Lage in Fahrbahnrichtung, Höhe und Querrichtung) betreffend sind offenbar größere Toleranzen akzeptabel. Der exakten Ausrichtung sollte aber größere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

(5) Es ist zu vermuten, dass eine größere Öffnungsweite der Fugen die Wirksamkeit der Querkraftübertragung vermindert. In [SII 2014] wird über entsprechende Untersuchungen berichtet. Die Ergebnisse zeigen aber, dass auch bei größeren Öffnungsweiten noch eine effektive Querkraftübertragung möglich ist.

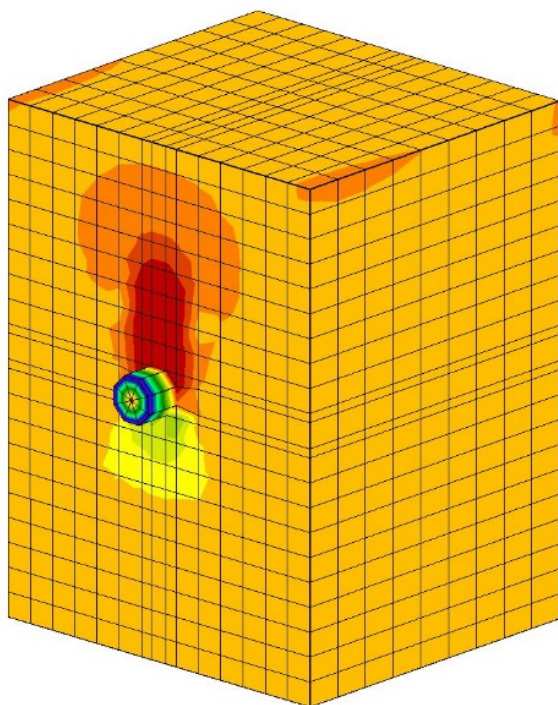
Die im Betonstraßenbau standardmäßig angewendete Fugenausbildung mit Ankern und Dübeln wurde in verschiedenen Studien eingehend untersucht (z. B. [EOM 2000]). In den letzten Jahren rückten Schadensfälle in den Blickpunkt, welche die Frage aufwarfen, ob durch Querschnittsverdrehungen am Plattenrand Horizontalrisse in der Dübelebene erzeugt werden können. Die Querschnittsverdrehungen können sich aus temperaturbedingten Plattenverformungen und auch aus Schwindverformungen ergeben. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Zeitspanne der ersten Stunden und Tage nach Hydratationsbeginn, weil hier die Schwindprozesse besonders dynamisch verlaufen und durch Temperaturänderungen überlagert werden. Gleichzeitig weist der Beton in dieser Phase erst geringe Festigkeiten auf. Für die Simulation dieser Zusammenhänge ist ein FEM-Volumenmodell geeignet, das einen einzelnen Dübel enthält, welcher ebenfalls als Volumenkörper modelliert ist (siehe Bild 3.30).

Das gleiche Modell kann benutzt werden, um die Wirkung von Fehlausrichtungen der Dübel zu analysieren. Dazu werden verschiedene Winkelabweichungen der Dübel vorgegeben.



**Bild 3.29:** Dübelverformung bei Fehlausrichtung

Für die Analyse der genannten Problemfelder bietet sich die Nutzung der Finite-Elemente-Methode an. In der Regel sind dabei Volumenmodelle vorteilhaft. Dabei ist die Analyse der Wirkung der Querkraftübertragung auf die Gesamtplatte von der Untersuchung von Detailspekten zu unterscheiden. Im ersten Fall sind Mehrfachplattenmodelle zu benutzen. Für das Studium von technischen Detailfragen (z. B. die Betonspannung im Dübeleinbindebereich) ist es besser, einen einzelnen Dübel als Volumenkörper zu modellieren. Ein entsprechendes Beispiel zeigt Bild 3.30.



**Bild 3.30:** FEM-Volumenmodell für einen einzelnen Dübel im Beton

Für spezielle Fragestellungen kann es sinnvoll sein, zwischen Beton und Dübel spezielle Interface-Elemente zu definieren.

In Modellen, welche ganze Plattensysteme umfassen, können die Dübel nicht als Volumenkörper modelliert werden. Hier ist die Verwendung von Stabelementen erforderlich. Diese können mit Elementknoten des Betonmodells verbunden werden. Es ist aber zu beachten, dass die Biegung eines punktförmig aufgelagerten Stabes ein anderes mechanisches Verhalten zeigt, als die Biegung eines kontinuierlich gelagerten Stabes. Entsprechend ist eine Kalibrierung der Steifigkeit des Dübelmodells notwendig. Einen systematischen Vergleich der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten für Dübelstäbe bietet [DAVIDS 1998].

### 3.3.4 Maximale Verzerrungen (Dehnung/ Stauchungen) des Fugenmaterials

Fugenvergussmassen werden im Zuge der planmäßigen Beanspruchung großen Relativdehnungen unterworfen. Auf die damit zusammenhängende Problematik der Volumenkompression wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 eingegangen.

Eine rechnerische Simulation der Kompression und Dehnung des Fugenmaterials ist mit FEM-Volumenmodellen möglich. Bei den großen, real auftretenden Verzerrungen ist aber kein linear-elastisches Materialmodell mehr anwendbar. Für gummiähnliche Materialien kann im Allgemeinen das Mooney-Rivlin Materialmodell verwendet werden (siehe [HOLZAPFEL 2010]).

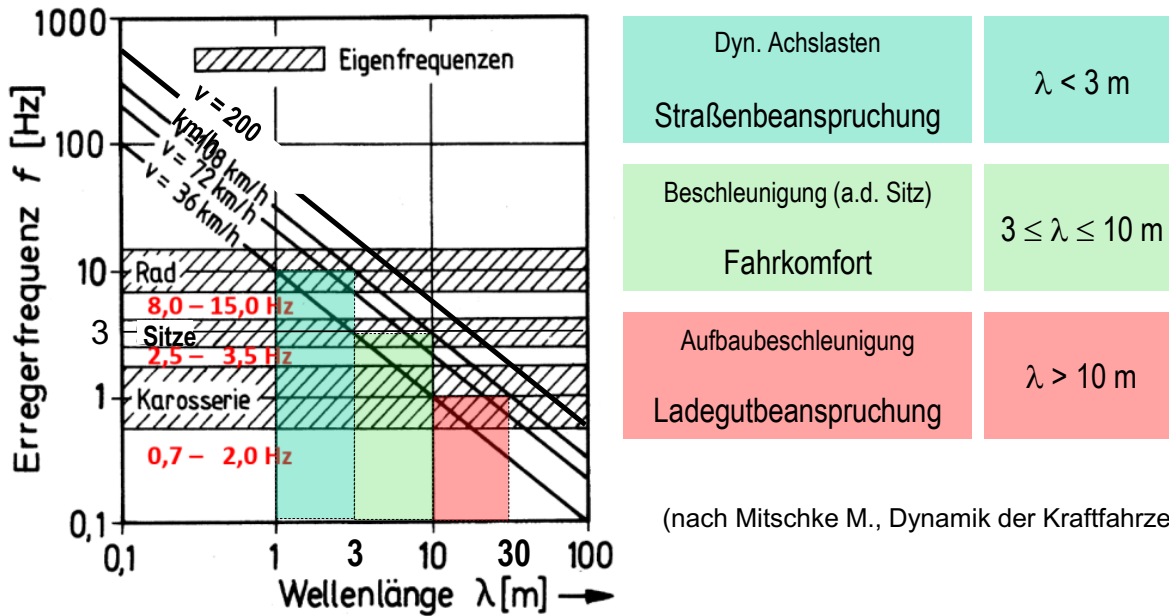
Die Haftung an den Fugenflanken kann mit Kontaktelementen simuliert werden, denen eine begrenzte Zugfestigkeit zugewiesen wird.

Derartige Berechnungsmodelle sind aber aufgrund der nichtlinearen Modell- und Materialeigenschaften äußerst komplex und erfordern eine sorgfältige Kalibrierung. Darüber hinaus ist die Kenntnis spezieller Materialparameter erforderlich, welche in aufwendigen Laborversuchen ermittelt werden müssen. Der erforderliche Aufwand geht also weit über den Umfang des hier vorliegenden Projektes hinaus. Es wird deshalb als zielführend angesehen, auf eine FEM-Modellierung der Fugenfüllstoffe zunächst zu verzichten und schwerpunktmäßig die Möglichkeiten einer Minimierung und Steuerung der Fugenbewegungen zu betrachten. Die maximalen Verzerrungen des Fugenfüllmaterials sind in einem nächsten Schritt mit elementaren Methoden abzuschätzen.

### 3.3.5 Ebenheit der Fahrbahn

Die Ebenheitsanforderungen in Längs- und Querrichtung des derzeit gültigen Regelwerks in Deutschland sind begrenzt auf max. 4 mm Unebenheit bezogen auf eine 4 m Messstrecke. Formal wird des Weiteren gefordert, dass periodische Unebenheiten zu vermeiden sind.

Das Bild 3.31 zeigt die für den Straßenverkehr maßgeblichen Wellenlängen und Fahrzeug-Eigenfrequenzen. Demnach sind für die Straßenbeanspruchung Wellenlängen im Bereich von 1 bis 3 m maßgebend, die dynamische Achslasten erzeugen. Für den Fahrkomfort sind Wellenlängen zwischen 3 und 10 m maßgebend, die sich auf die Beschleunigung des Fahrersitzes, insbesondere von Fahrzeugen des Schwerverkehrs, auswirken und dadurch gesundheitliche Schäden beim Fahrer hervorrufen können. Wellenlängenbereiche größer 10 m führen zu einer Ladegutbeanspruchung durch Aufbaubeschleunigung.



(nach Mitschke M., Dynamik der Kraftfahrzeuge)

Bild 3.31: Fahrerdynamisch relevante Wellenlängen

Aufgrund dieser Tatsache ist es nicht ausreichend, nur eine Wellenlänge bis 4 m zu berücksichtigen. Vielmehr ist anzustreben, ein Wellenlängenspektrum zu betrachten.

Eine gute Messmethodik ist die berührungslose Messung des Längsprofils mit Lasertechnik und anschließender Auswertung nach der Methodik des bewerteten Längsprofils. Bei diesem Verfahren werden alle relevanten Wellenlängenbereiche angesprochen und gewichtet ausgewertet.

Das Bild 3.32 zeigt das insgesamt relevante Wellenlängenspektrum von Fahrbahnoberflächen und deren Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften. Der für die Längsebenheit relevante Wellenlängenbereich liegt zwischen 20 cm und etwa 100 m.

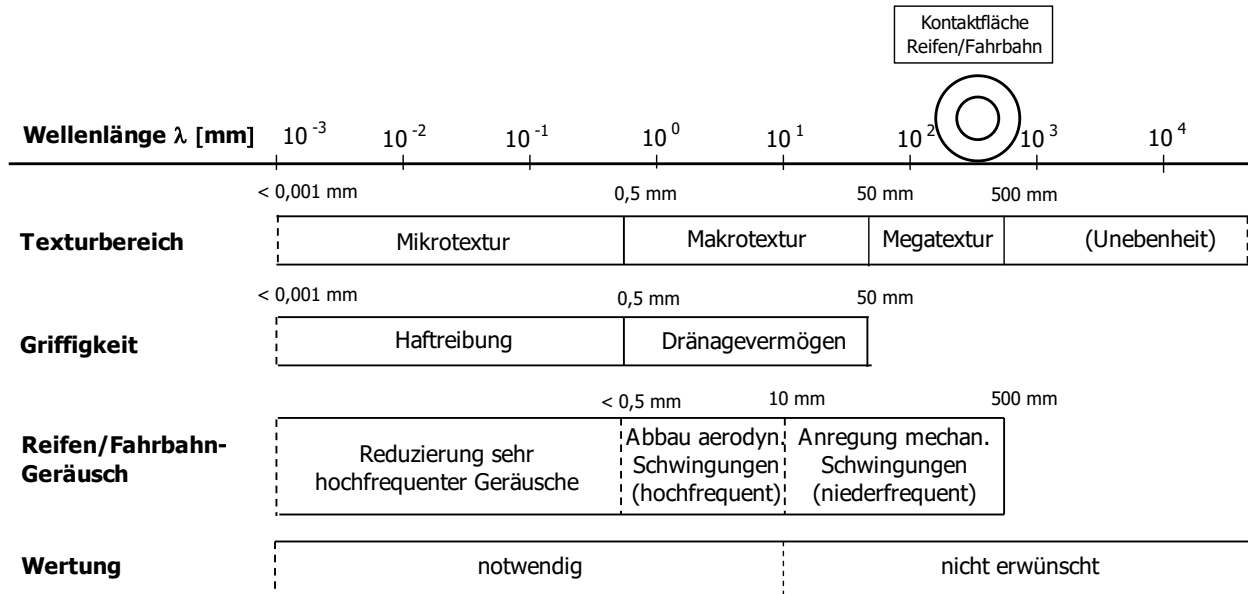


Bild 3.32: Texturbereiche und deren Auswirkungen, nach [PIARC 1995]

Messtechnisch noch anspruchsvoller ist die Aufnahme und Auswertung von Unebenheiten, die durch die Plattenverformung (Aufschüsselung bzw. Aufwölbung) auftreten können. Diese sind in ihrer Amplitude meist nur wenige Millimeter hoch, sind aber durch ihr periodisches Auftreten systemrelevant. Das Bild 3.33 zeigt, dass durch das periodische Auftreten die dynamischen Radlasten deutlich über den statischen Radlasten liegen.

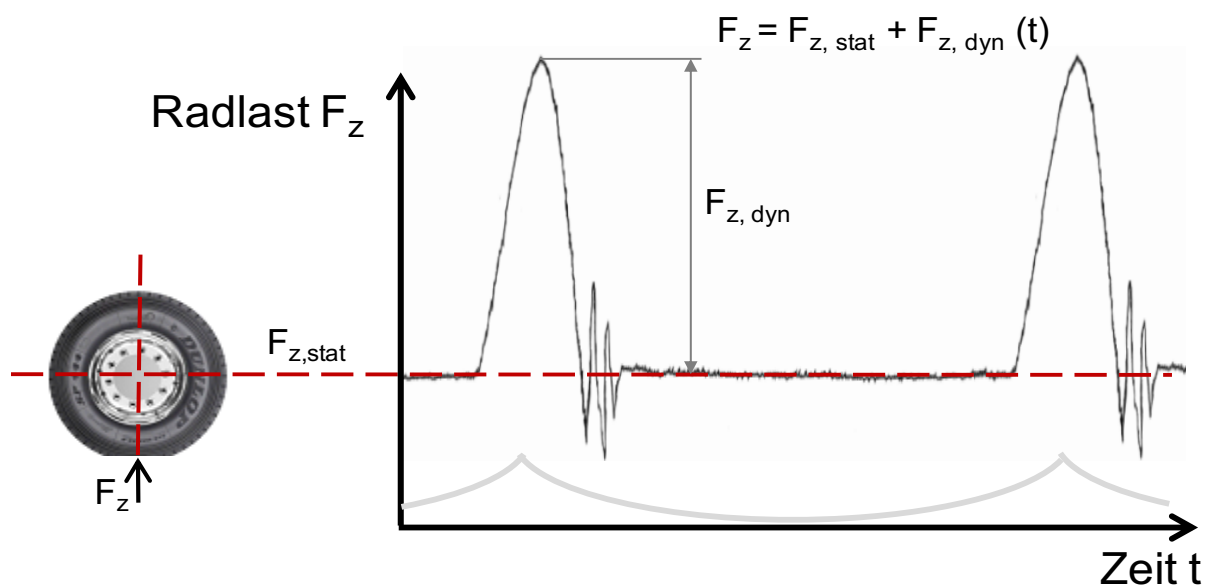


Bild 3.33: Plattenverformung und Überhöhte Darstellung der statischen und dynamischen Radlast  $F_{z, \text{stat}}$  und  $F_{z, \text{dyn}}$  bei der Überfahrt über das Plattensystem

### 3.3.6 Lärmemission im Reifen-Fahrbahnkontakt

Die Lärmemission infolge des Abrollens des Reifens auf der rauen Fahrbahnoberfläche entsteht durch:

- Anregung mechanischer Schwingungen des Reifens
- Aerodynamische Vorgänge in der Kontaktfläche.

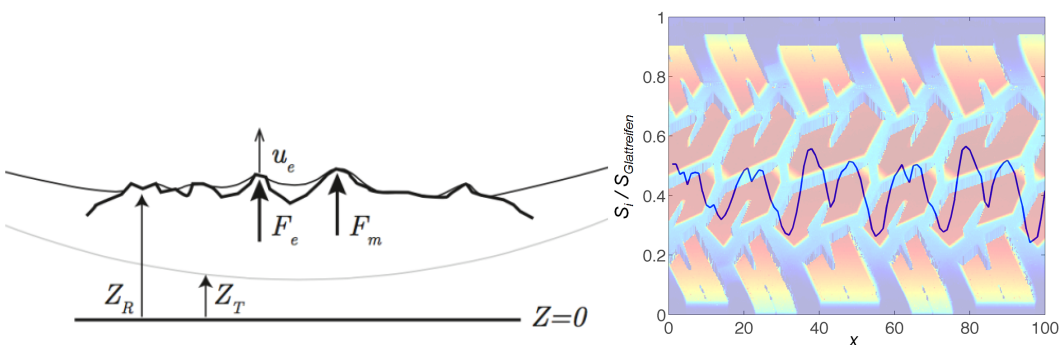
Dabei betrifft die mechanische Schallanregung im Wesentlichen die Verformung der Profilklötze und der Lauffläche bzw. der Seitenwand des Reifens im Kontaktbereich Reifen/Fahrbahn unter Einwirkung hoher



tangentialer und radialer dynamischer Kräfte. Die aerodynamische Schallanregung entsteht durch Strömung, Kompression und Entspannung der Luft im Kontaktbereich von Reifen und Fahrbahn. Zusätzlich treten an der Karosserie geschwindigkeitsabhängige Strömungsgeräusche auf, die ab etwa 140 km/h die Geräusche eines Personenwagens, unabhängig vom Reifen/Fahrbahngeräusch, bestimmen.

Im Reifen-Fahrbahn-Kontakt trifft das elastisch verformbare Reifenmaterial auf die starre und raue Fahrbahnoberfläche. Die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche dringt in die Reifenlauffläche ein und verformt diese lokal. Diese lokale Verformung führt zur Entstehung lokaler Kontaktkräfte, die der statischen Auflagekraft des Reifens überlagert sind. Die Auslenkung der Reifenlauffläche führt aufgrund der InkompRESSIBILITÄT des Reifengummis zu einer lokalen Formänderung der Reifenkontur und damit zu einer Änderung der Kontaktfläche. Die resultierende Kontaktkraft ist proportional zum Inhalt der Kontaktfläche. Dies führt seinerseits zu einer nicht linearen Abhängigkeit der Kontaktsteife im Querschnitt des Reifen-Fahrbahn-Kontakts von der Rauigkeitsverteilung des Belags in diesem Querschnitt.

Bild 3.34 zeigt ein Beispiel des Reifen-Fahrbahn-Kontakts in einem Längsschnitt (links) und die Fluktuation der Kontaktsteife  $S_i(x)$  pro Querschnitt  $x$  für einen profilierten Reifen (rechts) in Bezug zur Steife  $S_{\text{Glattreifen}}$ , die sich ergäbe, wenn der Reifen profillos wäre.



**Bild 3.34:** Links: Reifen-Fahrbahn-Kontakt.  $Z_T$ : nicht verformte Reifenkontur (grau),  $Z_R$ : Fahrbahnrauigkeit,  $F_e$  und  $F_m$ : Kontaktkräfte an den Punkten  $e$  und  $m$ ,  $u_e$ : dynamische Auslenkung der Reifenkontur im Punkt  $e$ . Rechts: ortsabhängige Steifigkeit  $S_i(x)$  mit dem zugrunde liegenden realen Reifenprofil im Hintergrund.

Wird nun der Reifen in Bewegung gesetzt, findet quasi eine Abtastung der ortsveränderlichen Steifigkeit  $S_i(x)$  im Zeitbereich statt. Der Reifen „folgt“ Stellen unterschiedlicher Steifigkeit. Auf diese Weise entstehen geschwindigkeitsabhängige hochfrequente Wechselkräfte, die dazu in der Lage sind, die Reifenstruktur in Schwingungen zu versetzen. Das System reagiert dabei nicht rückwirkungsfrei. Die Schwingungsanregung hängt einerseits von den Wechselkräften ab, andererseits wirken die Schwingungen auch zurück auf den Kontakt der Reifenlauffläche mit der Fahrbahnoberfläche, was wiederum Einfluss auf die Kontaktkräfte hat.

Die Schwingungen an der Reifenoberfläche werden schließlich als hörbarer Schall abgestrahlt. Der hervorgerufene Schalldruck steht dabei in einem linearen Zusammenhang mit den hochfrequenten Wechselkräften.

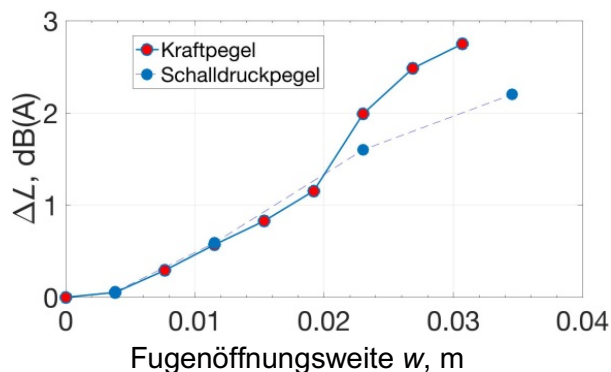
Konzepte zur Verminderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche müssen darauf abzielen, die Änderung der Kontaktsteife entlang des Rollkontakts so gering wie möglich zu halten. Dies gelingt dann am besten, wenn sich die Kontaktfläche entlang des Abrollweges so wenig wie möglich ändert. Kann sich die Gesamtkraft außerdem gleichmäßig auf viele Kontaktpunkte verteilen, wird die lokale Kraft pro Kontaktfläche kleiner und damit die lokale Schwingungsanregung geringer. Damit wird aber auch deutlich, dass jede Unstetigkeit in der Fahrbahnoberfläche zu einer Störung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts und einer entsprechenden Reaktion des Reifens auf diese Störung in Form einer Änderung der lokalen Kontaktkräfte führt. Auf Fahrbahndecken aus Beton betrifft dies insbesondere die Querscheinfugen und deren realen Zustand. Auf Fugen, deren Füllmaterial beispielsweise die Fuge nicht bis zur Oberkante des Fugenschnitts ausfüllt, verliert der Reifen kurzzeitig den Kontakt mit der Fahrbahn, was zu einer drastischen Änderung der Kontaktsteife und damit zu einer impulsartigen Änderung der Kontaktkraft führt. Auch Unstetigkeiten in Form von überstehendem Fugenfüllmaterial oder ungleichen Plattenhöhen an der Querscheinfuge stellen solche Störungen dar.

Eine Sensitivitätsanalyse soll hier zunächst aufzeigen, welche Parameter der Fahrbahn aus akustischer Sicht zu betrachten sind, wenn signifikante Ergebnisunterschiede erreicht werden sollen (Bild 3.38). Ausgangspunkt sind zunächst konstruktive Gegebenheiten der Fahrbahnoberfläche wie der Verlauf bezüglich der Fahrtrichtung und die Öffnungsweite von Querscheinfugen sowie der Oberflächenzustand, ausgedrückt

durch die dreidimensionale Verzerrung der ansonsten planebenen Oberfläche einer Platte aufgrund ihrer Verformung. Hierbei spielt auch der gegenseitige Versatz an den Rändern aufeinanderfolgender Platten in Rollrichtung des Reifens eine Rolle. Die dreidimensionale Beschreibung der verschiedenen Konstruktionen und Oberflächenzustände liefert Modelldaten, die sich in z-Richtung, also in der Vertikalen, auf einer Millimeter- und Zentimeterskala abbilden lassen. Auf dieser Skala der Oberflächeneigenschaften spielen folgende Parameter die wichtigste Rolle [FE 08.0232/2014]:

- Fugenöffnungsweite  $w$  der Querscheinfuge
- Schrägstellung  $\Phi$  der Querscheinfuge
- Füllhöhe  $h_F$  des Fugenfüllmaterials
- Oberflächentextur des Fugenfüllmaterials
- Steifigkeit  $s$  des Fugenfüllmaterials
- Höhenversatz  $h$  zwischen den an die Fuge angrenzenden Betonplatten in den beiden Radrollspuren

Die Fugenöffnungsweite ist unter allen Parametern einer der wichtigsten. Bild 3.35 zeigt die Veränderung des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels als Funktion der Öffnungsweite  $w$ . Die Pegeländerung steigt fast linear mit der Fugenbreite. Die Auswertung der Kontaktkräfte ergibt einen sehr ähnlichen Verlauf, abgesehen von den sehr breiten Fugen.



**Bild 3.35:** Veränderung des A-bewerteten Kontaktkraftpegels und Schalldruckpegels des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs als Funktion der Fugenöffnungsweite [FE 08.0232/2014].

Die Wertebereiche (Mindestbereiche) für die Oberflächenparameter der Millimeter- und Zentimeterskala für die Erzielung signifikanter Ergebnisunterschiede in der Simulation von mindestens 0,5 dB Pegelunterschied des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels der Reifen-Fahrbahn-Geräusche ergeben sich folgendermaßen:

1. Fugenöffnungsweite  $w$  an der Oberfläche, also inklusive Aufweitungsschnitt mit Fase  
 $8 \text{ mm} \leq w \leq 24 \text{ mm}$   
 Schrittweite der Parametervariation: 4 mm
2. Schrägstellung  $\Phi$   
 $0^\circ \leq \Phi \leq 30^\circ$   
 Schrittweite der Parametervariation:  $10^\circ$
3. Steifigkeit  $s$  des Fugenfüllmaterials  
 $0 \text{ N/m (keine Füllung)} < s \leq 2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$   
 Parametervariation mit folgenden Werten: 0,  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^4$ ,  $2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
4. Füllhöhe  $h_F$  des Fugenfüllmaterials, bezogen auf den oberflächlichen Fugenrand, bei allen Betriebs- und Temperaturbedingungen  
 $-1 \text{ mm} < h_F \leq +2 \text{ mm}$   
 Schrittweite der Parametervariation: 0,5 mm

- 5. Höhenversatz  $h$  zwischen einzelnen Deckenfeldern bzw. Platten in einer Radrollspur  
 $0 \text{ mm} \leq h \leq 2 \text{ mm}$   
 Schrittweite der Parametervariation: 0,5 mm

Für die Berechnung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche muss eine weitere Skala hinzugefügt werden. Die für die Rollgeräusentstehung relevante Oberflächenrauigkeit muss im Millimeter- und Mikrometerbereich beschrieben und der dreidimensionalen Beschreibung der Konstruktion und des Oberflächenzustands abgebildet werden. Alle Konstruktions- und Oberflächenmerkmale werden dann für die akustische Sensitivitätsanalyse überlagert.

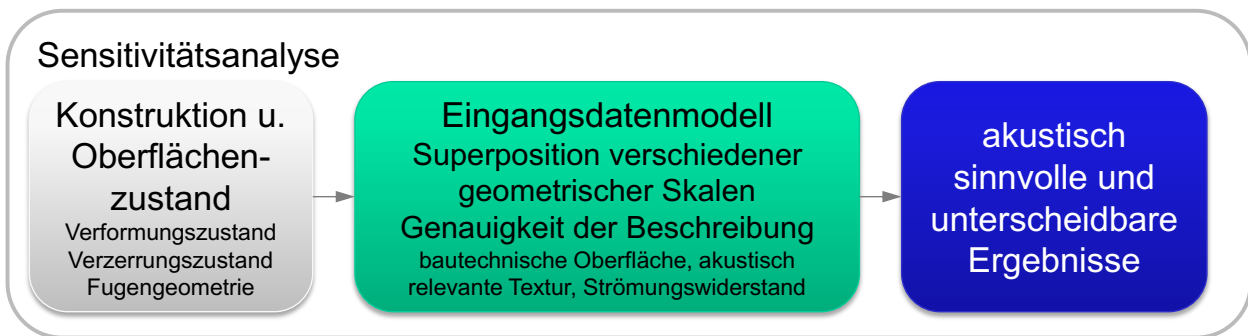


Bild 3.36: Schema der Sensitivitätsanalyse

In Bild 3.37 ist die Schnittstelle zwischen der bautechnischen Simulation und der Modellierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche nochmals bildhaft wiedergegeben.

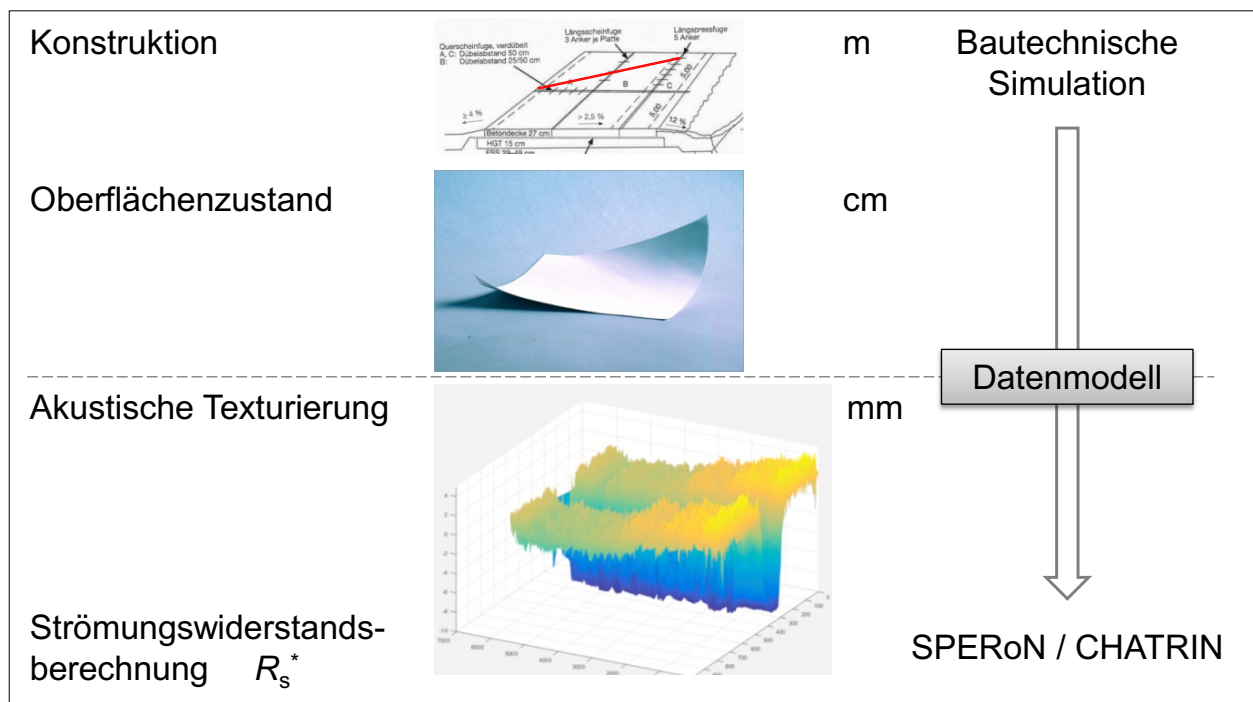
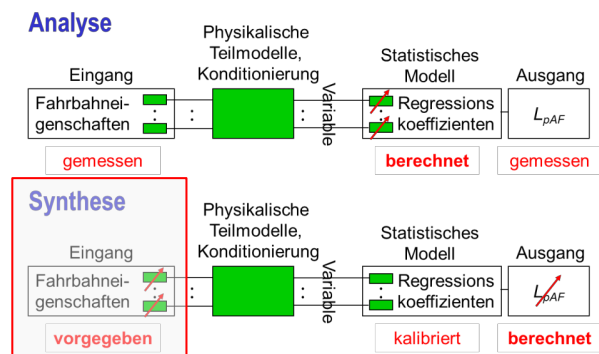


Bild 3.37: Zusammenwirken der bautechnischen mit der akustischen Simulation

Die wesentliche Modellierungsgrundlage bildet das validierte Rollgeräuschmodell SPERoN/CHATRIN, das auch in der Lage ist, den Einfluss der Fugenöffnungsweiten zu berücksichtigen [FE 08.0232/2014]. SPERoN/CHATRIN stellt eine Erweiterung des bisherigen Rollgeräuschmodells SPERoN um weitere physikalische Teilmodelle dar. Das Modell wurde in mehreren Projekten durch Berechnung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche anhand von Messdaten der Fahrbahnoberflächeneigenschaften und direktem Vergleich der berechneten mit gemessenen Vorbeirollgeräuschpegeln für dieselben Reifen und Fahrbahnbeläge, die auch in die Berechnung eingingen, validiert. Für die Prognose wird das Rechenmodell mit den aus den bautechnischen Modellen stammenden berechneten Daten für die Fahrbahnoberfläche gespeist. Dieser

Vorgang wird hier als Synthese der Reifen-Fahrbahn-Geräusche bezeichnet. Bild 3.38 zeigt das Schema des Rechenmodells für Analyse und Synthese.



**Bild 3.38:** Anwendung des Modells in der Validierung (Analyse) und für die Prognose von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen (Synthese)

Neben der erforderlichen exakten Beschreibung der Fahrbahnoberfläche ist die Modellierung des Reifens ein wesentlicher Aspekt. Im Rollgeräuschmodell CHATRIN wird der Reifen mit seinen Materialeigenschaften und seinem Profil in Umfangsrichtung segmentweise durch ein FE-Modell beschrieben. Die Berechnung der Schwingungsentstehung durch das Einwirken äußerer Kräfte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt und deren Ausbreitung auf der Reifenoberfläche erfolgt auf der Grundlage der Physik des Wellenleiters analytisch. Das Modell ist im Detail in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

### 3.3.7 Weitere Phänomene wie z. B. Zwangspunkte und Endbereiche

Am Ende eines Abschnitts mit Betondecke kann die temperaturbedingte Ausdehnung in den Sommermonaten weitgehend realisiert werden. Eine angrenzende Asphaltdecke setzt der wärmeinduzierten Horizontaldehnung der Betondecke keine relevante Widerstandskraft entgegen. Entsprechend werden die Platten dauerhaft verschoben. In den Wintermonaten ergeben sich deutlich größere Fugenöffnungsweiten, als in den übrigen Streckenbereichen. Eine detaillierte Darstellung der betreffenden Zusammenhänge findet sich in [FE 89.0269/2011].

Um der Herausbildung von Endbereichen bzw. der damit einhergehenden Plattenverschiebung entgegenzuwirken, wurden traditionell Endsporne angeordnet (siehe auch Kapitel 2.2.7), die sich jedoch nicht bewährt haben. In [FE 89.0269/2011] wurde nachgewiesen, dass nicht erwartet werden kann, dass Endsporne die Plattenbewegung in relevanter Weise behindern. Der Endsporn bildet einen Zwangspunkt, an welchem enorme Horizontalkräfte wirken. Diese können von den üblichen Konstruktionen nicht aufgenommen werden. Besser ist es, die Plattenbewegung zuzulassen und auf mehrere Raumfugen zu verteilen. Die Herstellung und Wartung dieser Dehnungsfugen ist allerdings technologisch aufwendig.

Perspektivisch sollte eine grundlegende, konstruktive Änderung der Querfugen angestrebt werden. Diese sollte es ermöglichen, dass sich die temperaturbedingte Längenänderung an jeder einzelnen Platte realisieren kann. Damit würde jede Platte dauerhaft an der gleichen Stelle verbleiben. Endbereiche könnten systembedingt nicht mehr entstehen.

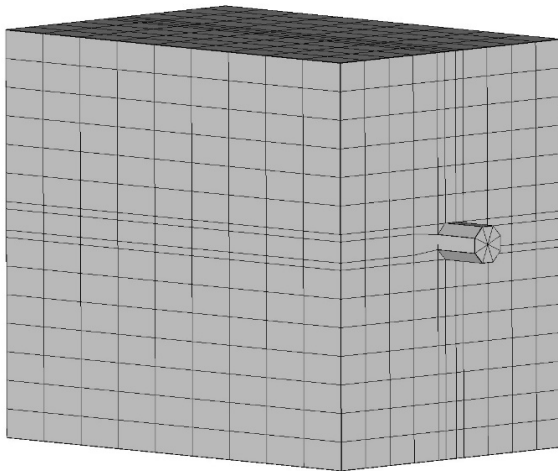
Für die rechnerische Analyse der Fugenbewegungen und Plattenverschiebungen in Endbereichen stehen analytische Formeln zur Verfügung (siehe [FE 89.0269/2011]). Von Bedeutung ist hier u. a. die Reibung zwischen Platte und Unterlage. Für die genauere Analyse der Spannung an Zwangspunkten (Endsporne, Einbauten, Ingenieurbauwerke) sind FEM-Modelle zu verwenden.

## 3.4 Entwicklung dreidimensionaler Finite Elemente Modelle entsprechend der Konzepte

### 3.4.1 Finite Elemente Modelle für strukturelle Detailprobleme

#### FEM-Modell zur Analyse der klassischen Fugenkonstruktion (Anker/Dübel)

Für eine detaillierte Analyse der Interaktion zwischen Dübel und Beton ist es notwendig, einen im Beton eingebetteten Dübel zu modellieren. Der Dübel selbst ist dabei auch als Volumenkörper aus einzelnen Elementen aufzubauen. Bei der Erstellung des Modells konnte auf konzeptionelle Vorarbeiten zurückgegriffen werden, welche im Zusammenhang mit dem Forschungsthema [HESTER 2018] durchgeführt wurden.



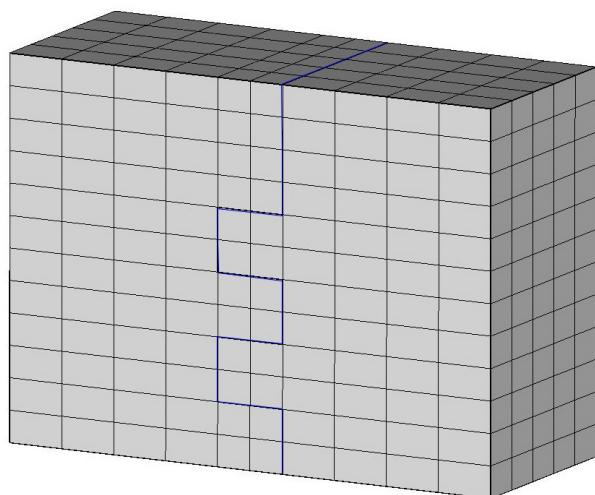
**Bild 3.39:** FEM-Volumenmodell für einen Betonblock mit integriertem Dübel

Das Modell kann aus 20-Knoten-Brick-Elementen und 15-Knoten-Wedge-Elementen aufgebaut werden. Die Interaktion zwischen Dübel und Beton ist durch eine Kontaktformulierung zu steuern. Damit ist es möglich, auch die Reibung und Kohäsion in der Kontaktzone zu simulieren. Auch eine geringfügige Horizontalverschiebung des Dübels im Beton kann erfasst werden. Besonders die genannten Effekte in der Kontaktzone führen zu einem hochgradig nichtlinearen Modellverhalten, welches lange Rechenzeiten bedingt.

Die Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens (z. B. an der Kante der Dübeleinbindung) ist prinzipiell möglich. Denkbar wäre eine Simulation der Betonplastifizierung mit einem Ramberg-Osgood-Gesetz. Ob ein derartiges Vorgehen zielführend ist, ist aber durch Testrechnungen zu prüfen.

#### FEM-Modell für eine profilierte Fugeneinlage

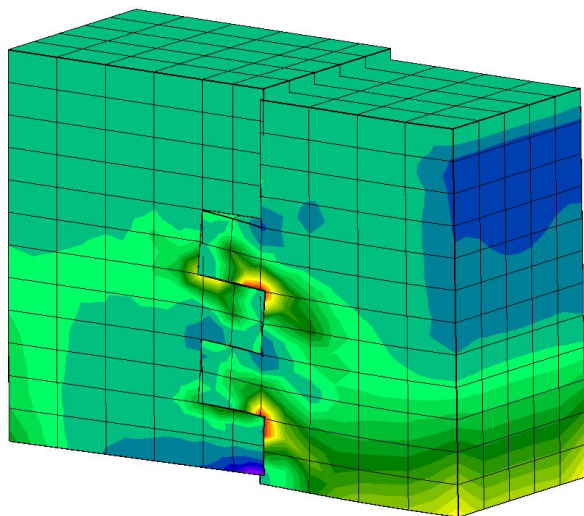
Um die konstruktiven Gegebenheiten adäquat abzubilden, ist auch hier eine sehr detaillierte Modellierung erforderlich. Entsprechend muss das Modell auf einen kleinen Ausschnitt der Konstruktion beschränkt werden. Wichtig ist die zutreffende Beschreibung der Kontaktflächen. Hier sind auch geringfügige Neigungswinkel von Bedeutung. Ggf. sind Reibung und die mögliche Zugkraftübertragung zu beachten. Bild 3.40 und Bild 3.41 zeigen ein Modell, welches sich auf eine in Kapitel 3.1.1 vorgestellte Konstruktionsvariante mit Nut und Feder bezieht.



**Bild 3.40:** FEM-Volumenmodell zur Analyse der Fugenkonstruktion entsprechend Kapitel 3.1.1

Der linksseitige Volumenblock ist vollständig fixiert. Durch einen Lastansatz auf der rechten Seite können beliebige Schnittkraftkonstellationen für den Fugenbereich erzeugt werden. Die Kraftübertragung in den Kontaktflächen wurde durch eine adäquate Kontaktformulierung definiert. Damit ist auch sichergestellt, dass im Berechnungsmodell keine Zugspannungen in den Kontaktflächen übertragen werden.

Das Modell wurde aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Alle relevanten Parameter wurden durch einen scriptgesteuerten Modellaufbau variabel gestaltet. Die Rechenzeit beträgt wenige Minuten. Probenrechnungen haben gezeigt, dass das mechanische Verhalten realistisch abgebildet wird (Bild 3.41).

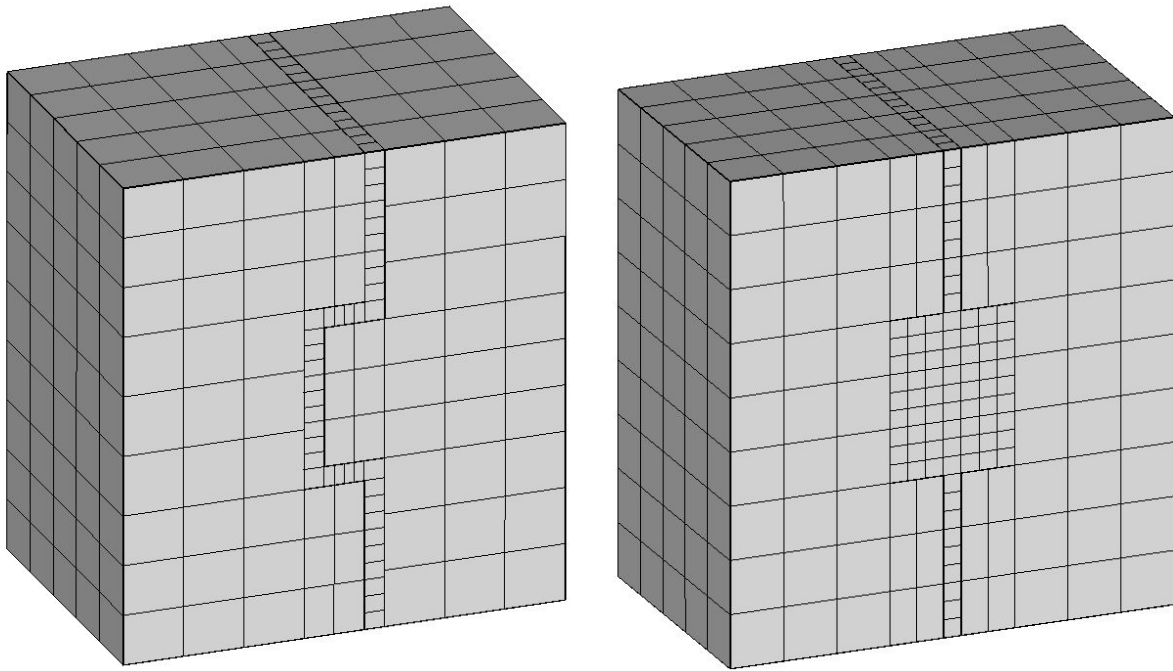


**Bild 3.41:** Unter Belastung verformtes System

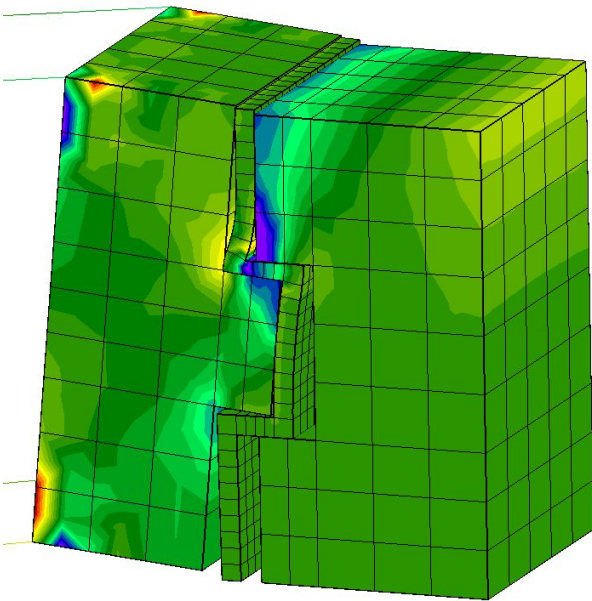
### **FEM-Modell für Nut-Feder bzw. Nut-Nut-Konstruktionen mit Fugenverfüllung**

Beinhaltet die zu untersuchende Fugenkonstruktion ein Verpressmaterial, so ist auch dieses hinreichend realistisch zu modellieren. Insbesondere ist ein Abreißen des Flankenkontaktes zwischen Verpressmaterial und Beton im Modell zuzulassen. Letztendlich ergeben sich in der Regel kleine verbleibende Kontaktflächen für die Spannungsübertragung. Die hier entstehenden Spannungsspitzen sind von besonderem Interesse. Bild 3.42 und Bild 3.43 zeigen Modelle für Fugenkonstruktionen aus dem Projekt [HESTER].





**Bild 3.42:** FEM-Volumenmodell zur Analyse der Fugenkonstruktion entsprechend Kapitel 0



**Bild 3.43:** Verformtes System mit Verdrehung der Fugenflanken

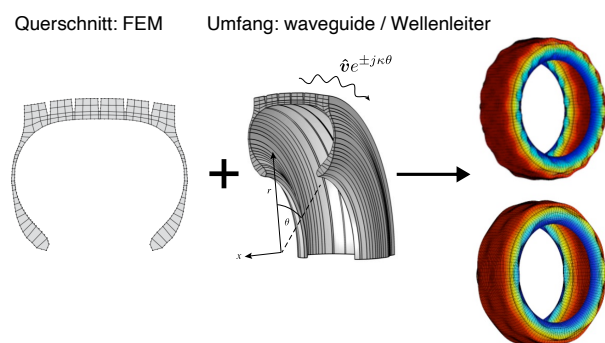
### 3.4.2 Finite Elemente Modell für Lärmemission

Das vom Institut für angewandte Akustik an der Chalmers Universität Göteborg zusammen mit Müller-BBM entwickelte Rechenmodell für Reifen-Fahrbahn-Geräusche SPERoN wurde im Rahmen der Forschungsverbundprojekte „Leiser Straßenverkehr 2“ und „Leiser Straßenverkehr 3“ zum Modell CHATRIN (**CH**almers **Tyre/Road IN**teraction Model) erheblich weiterentwickelt und anhand umfangreicher Messkampagnen von Müller-BBM auch für die Rollgeräuschenstehung auf Fahrbahnen aus Beton und hier insbesondere für den Einfluss der Querscheinfugen validiert. [LEISTRA-1 2016] [LEISTRA-2 2016]. In [FE 08.0232/2014] wurde die Abbildung von kleinräumigen Diskontinuitäten im Reifen-Fahrbahn-Kontakt im Zeitsignal der Kontaktkräfte durch ein Teilmodell für die zusätzliche Berücksichtigung der dynamischen Federsteifigkeit der im Reifentorus eingeschlossenen Luft deutlich verbessert.

Das Modell ist modular aufgebaut, d. h. beliebige Reifenmodelle, Kontaktmodelle und Abstrahlungsmodelle können miteinander kombiniert werden. Außerdem ist das Kontaktmodell im Zeitbereich formuliert. Dies erlaubt, die Physik des nichtlinearen Kontaktes detailgetreu abzubilden. Der modulare Aufbau und die Zeitbereichsformulierung machen das Modell zudem sehr recheneffizient. Die Rechendauer für das Berechnen von Kontaktkräften während ca. 10 Reifenumdrehungen dauern ca. 15 Minuten auf einem Standard PC. Den meisten Rechenaufwand verursacht das Abstrahlmodell mit ca. 6 Stunden für die Berechnung des Schalldrucks während einer Reifenumdrehung. Im Folgenden wird der mathematische Hintergrund der verschiedenen Modelle kurz erklärt.

### Reifenmodell

Das Reifenmodell basiert auf dem so genannten Waveguide Finite Element Ansatz (WFE). Bei der WFE-Modellierung wird ein Finite-Elemente-Ansatz über den Reifenquerschnitt mit einem Wellenansatz in Umfangsrichtung kombiniert.



**Bild 3.44:** Kombination des Finite Element Modells für den Reifenquerschnitt und das Wellenleitermodell für die Ausbreitung der Reifenschwingungen entlang des Reifenumfangs mit der Zielgröße der Schwingsschnelle  $v$  auf der Reifenoberfläche. Rechts: Beispiele für Schwingungsformen.

In einem zylindrischen Koordinatensystem ist somit die Auslenkungskomponente  $u_i$  einer Raumrichtung für den Punkt  $(r, x, \phi)$  auf dem Reifen gegeben durch

$$u_i(r, x, \phi) = \mathbf{N}(r, x) \mathbf{v}_i(\phi) \quad (3-3)$$

Hierbei ist  $\mathbf{N}$  der Vektor der Formfunktionen über den Reifenquerschnitt, während  $\mathbf{v}_i$  die entsprechenden Freiheitsgrade, also die an einem Knoten voneinander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten, die von der Umfangskoordinate  $\phi$  abhängen. Aus Gleichung (3-4) ergibt sich ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem:

$$\left[ -\mathbf{A}_{11} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + (\mathbf{A}_{01} - \mathbf{A}_{10}) \frac{\partial}{\partial \phi} + \mathbf{A}_{00} - \omega^2 \mathbf{M} \right] \mathbf{v}(\phi) = \mathbf{f}(\phi) \quad (3-4)$$

Die Steifigkeitsmatrizen  $\mathbf{A}_{nm}$  und die Massematrix  $\mathbf{M}$  folgen aus der potentiellen respektive der kinetischen Energie des Reifens.  $\mathbf{f}$  ist ein externer Kraftvektor und  $\omega$  die Kreisfrequenz der Schwingung im Zeitbereich, für die die Gleichung gelöst wird. Für den homogenen Fall  $\mathbf{f} = 0$  und eine gegebene Kreisfrequenz  $\omega$  sind die Lösungen gegeben als Exponentialfunktionen der Form

$$\mathbf{v}(\phi) = \hat{\mathbf{v}} e^{i\kappa\phi} \quad (3-5)$$

Diese lassen sich physikalisch als Wellen deuten, die sich mit der Querschnittsschwingungsform  $\hat{\mathbf{v}}$  und einer Kreiswellenzahl  $\kappa$  in Umfangsrichtung ausbreiten. Die Kreiswellenzahl  $\kappa$  ist das Verhältnis der Kreisfrequenz der Schwingung im Ortsbereich zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in Umfangsrichtung. Durch Einsetzen von (3-5) in (3-4) erhält man ein Eigenwertproblem, dessen Lösung die Eigenfrequenzen und Eigenformen für eine spezifische Wellenzahl ergibt. Das inhomogene Differentialgleichungssystem für den Fall der erzwungenen Anregung mit  $\mathbf{f} \neq 0$  kann zum Beispiel durch eine „assumed modes procedure“ oder modale Summation gelöst werden.

Das Wichtigste bei jeder Art von Modellierung ist die Generierung korrekter Eingangsdaten für Material- und Geometrieparameter. Dabei sind zwei Schwierigkeiten zu bewältigen. Erstens sind die Eigenschaften der im Reifen benutzten Materialien nach dem Vulkanisierungsprozess verändert, weitestgehend unbekannt und nicht mehr zu rekonstruieren. Zweitens sind die Materialdaten immer auch eine Funktion des gewählten Modellansatzes, da diese – durch Messungen angepasst – immer auch die Defizite des Modells

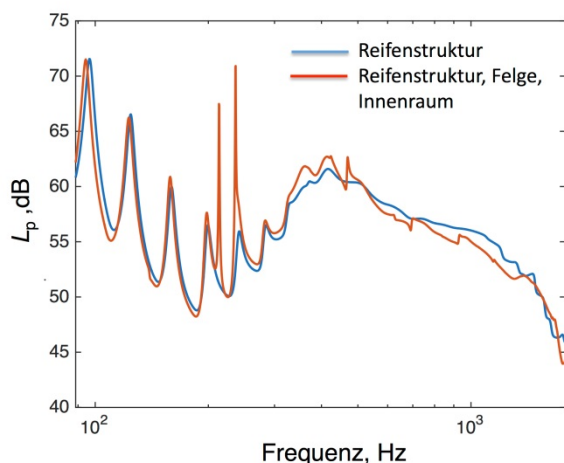


ausgleichen. Das bedeutet, dass die Materialdaten immer modellspezifisch sind. Eine ausführliche Diskussion dieser Umstände erfolgte im Abschlussbericht zu Teilprojekt II im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 3“. Für CHATRIN stehen momentan drei ausgearbeitete Reifenmodelle mit entsprechenden Materialdaten zur Verfügung, die in Zusammenarbeit mit einem Reifenhersteller erstellt und auch mit entsprechenden Schwingungsmessungen validiert wurden. Diese Reifen sind in Bild 3.45 dargestellt.



**Bild 3.45:** Die drei Reifen mit vollständigen und validierten WFE-Modellen in CHATRIN.

Wird der Reifen über die gesamte Reifenbreite mit einer Kraft angeregt (beispielsweise durch eine Stoßanregung, indem man den Reifen auf dem Boden aufspringen lässt), nimmt man ein sehr tonales und auch relativ schwach gedämpftes Signal wahr. Simuliert man diesen Vorgang, ergibt sich ein erheblicher Unterschied zwischen den berechneten Schalldruckpegeln für die Fälle mit und ohne Berücksichtigung des luftgefüllten Innenraums zwischen Felge und Reifenstruktur (Bild 3.46). Der Fall ohne Berücksichtigung des Innenraums gibt das praktisch ausgeführte Experiment nicht richtig bzw. nicht vollständig wieder.

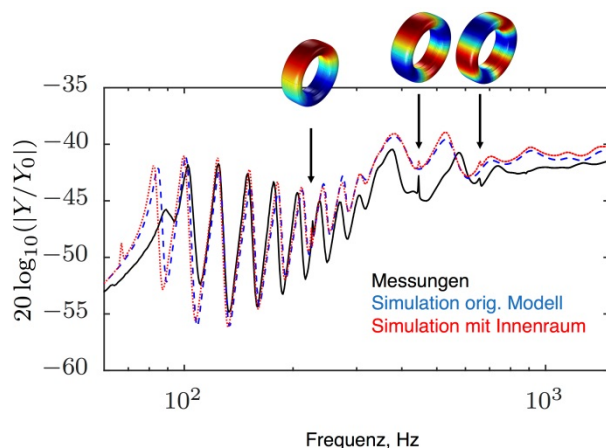


**Bild 3.46:** Abgestrahlter Schalldruckpegel  $L_p$  in Abhängigkeit der Frequenz für einen Reifen mit Stoßanregung über die gesamte Reifenbreite, simuliert mit dem Reifenmodell ohne (blau) und mit (rot) luftgefülltem Innenraum.

Regt man den Reifen mit Hilfe eines Schwingerregers mit sinusförmigen Schwingungen an und misst die eingeleitete Kraft  $\underline{F}$  und Schwingschnelle  $\underline{v}$  an der Reifenoberfläche in Abhängigkeit der Frequenz, lassen sich beide zur sogenannten Punktmobilität  $Y$  mit

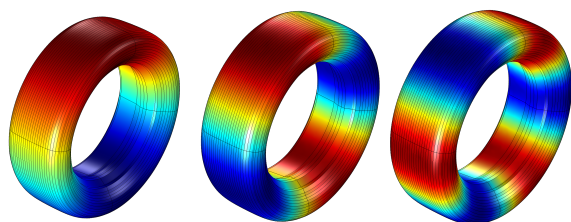
$$\underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}}$$

verrechnen und als Funktion der Frequenz darstellen. Die Ergebnisse von Messungen und Berechnungen der Punktmobilität für denselben Reifen sind an einem Beispiel in Bild 3.47 dargestellt. In den Messungen machen sich die ersten Resonanzen des Innenraums auch in der Schnelle auf der Reifenoberfläche bemerkbar. Nur bei Berücksichtigung des luftgefüllten Innenraums im Reifenmodell zeigen sich diese Resonanzen auch in der Berechnung.



**Bild 3.47:** Vergleich der gemessenen Punktmobilität (schwarz) mit zwei berechneten Punktmobilitäten mit (rot) und ohne (blau) Berücksichtigung des Innenraums.

Bei den in Bild 3.47 hervorgehobenen Schwingungsformen handelt es sich um die stark angeregten Moden im luftgefüllten Innenraum des Reifens. Es sind die ersten drei Umfangsmoden, die über den ganzen Querschnitt des Reifens den gleichen Schalldruck aufweisen, also in Querrichtung keine lokalen Schalldruckminima auftreten. Die Schwingungszustände sind in Bild 3.48 für die ersten drei Moden nochmals separat dargestellt.



**Bild 3.48:** Die ersten drei Moden des luftgefüllten Innenraums eines Reifens. Typische Resonanzfrequenzen liegen bei ca. 220 Hz, 450 Hz und 680 Hz.

Neben diesen ersten drei Moden gibt es zwei zusätzliche reine Umfangsmoden in der Nähe des interessierenden Frequenzbereiches bei ca. 900 Hz und 1.125 Hz.

Die Berücksichtigung des luftgefüllten Innenraums verbessert die Prognose der Rollgeräusche auf Fahrbahndecken aus Beton deutlich. Nur dadurch werden die kurzen stoßförmigen mechanischen Anregungen bei der Überrollung der Querscheinfugen auch akustisch adäquat abgebildet.

Um den luftgefüllten Reifeninnenraum im WFE-Modell zu berücksichtigen, beinhaltet das Modell folgende zusätzliche Komponenten:

- 1 WFE-Elemente für Fluide (neben den WFE-Elementen für die Reifenstruktur als Festkörper)
- 2 WFE-Elemente für die Schwingungskopplung zwischen Struktur (Reifeninnenwand) und Luft

Die triangulären WFE-Fluidelemente mit linearen Anpassungsfunktionen basieren auf dem Schnellepotential  $\psi$ , das eine Verbindung zwischen dem Schalldruck  $p$ , der Änderung der Dichte  $\rho_a$  und der Auslenkung der Fluidpartikel  $\mu$  im Reifeninnenraum herstellt:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} = -\mu \nabla \psi \quad (3-6)$$

$$\rho_a = \mu \frac{\rho_f}{c_f^2} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3-7)$$

$$p = \mu \rho_f \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3-8)$$

$\rho_f$  und  $c_f$  sind die Dichte und die Schallgeschwindigkeit des Fluids (Luft),  $\mu$  ist eine numerische Skalierungskonstante.

Zur Berücksichtigung der Kopplung zwischen Struktur und Fluid bei einer bestimmten Kreisfrequenz  $\omega$  über die gemeinsame Oberfläche  $S$  werden das Hamilton'sche Prinzip und die Variationsrechnung für  $\delta B_c$  benutzt. Sie ergibt sich als

$$\delta B_c(\omega) = j\omega\mu \int_S \rho_f [\delta\psi^*(\omega)w(\omega) - \delta w^*(\omega)\psi(\omega)] dS \quad (3-9)$$

wobei \* für "konjugiert komplex" steht und  $w$  die Auslenkung der Struktur im Fluid in Normalenrichtung ist. Die Struktur-Fluid-Kopplung wurde jedoch nicht benutzt, um auch den Reifeninnendruck abzubilden. Dieser ist – wie im Modell ohne Berücksichtigung des luftgefüllten Innenraums – in der Vorspannung der Strukturelemente enthalten.

Unter der Annahme, dass keine externen Kräfte auf das Fluid wirken, kann Gleichung (3-9) für die Fluid-Struktur-Kopplung wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{A}_{00} - jn\mathbf{A}_{01} + jn\mathbf{A}_{10} + n^2\mathbf{A}_{11} + j\omega\mathbf{M}_{sf} - \omega^2\mathbf{M}] \mathbf{v}_n(\omega) \\ & = \mathbf{F}_n(\omega) \end{aligned} \quad (3-10)$$

mit

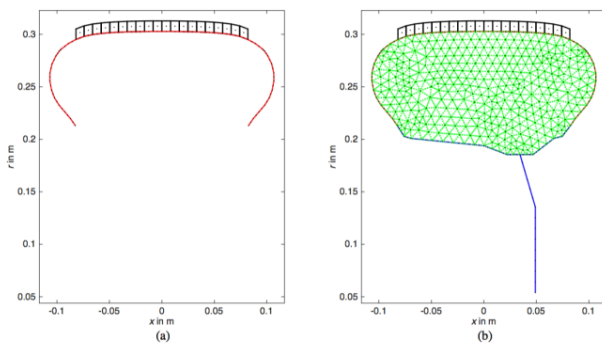
$$\mathbf{A}_{ll} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ll}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ll}^f \end{bmatrix} \quad (l = 0, 1); \quad \mathbf{A}_{kl} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{kl}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (k, l = 0, 1)$$

und

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^f \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_{sf} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M}^{sf} \\ -\mathbf{M}^{sf} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$s$  und  $f$  bezeichnen Struktur und Fluid,  $M^{sf}$  ist die Kopplungsmatrix.

Für diese Gleichung ist die Annahme der proportionalen Dämpfung (ein Wert pro Frequenz) nicht mehr korrekt, da sich Struktur und Fluid stark in der Dämpfung unterscheiden. Daher ist statt einer modalen Lösung eine direkte Lösung notwendig. Statt einer modalen Summation wird für jede Wellenzahl eine Matrixinversion durchgeführt und die direkte Lösung berechnet. Bild 3.49 zeigt, dass zusätzliche Strukturelemente zur Modellierung der Felge benutzt wurden. Die Felge ist an der Achse blockiert.



**Bild 3.49:** WFE-Gitter des 205/55 R16 Reifens. (a) Fall ohne luftgefülltem Innenraum; (b) Fall mit luftgefülltem Innenraum und Felge. Nodes markiert mit •, Shellelemente für Seitenwand und Gürtel in rot, Festkörperelemente der Lauffläche in schwarz, Shellelemente der Felge in blau und Elemente für das Fluid in grün [FE 08.0232/2014].

### Kontaktmodell

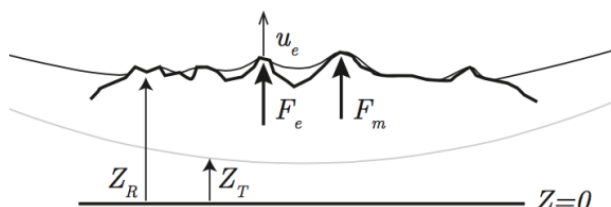
Das Modell für den Kontakt zwischen Fahrbahnoberfläche und Reifenoberfläche basiert auf einem Faltingsansatz. Die zeitabhängige Position eines Punktes  $e$  auf der Reifenoberfläche kann beschrieben werden als

$$Z_e(t) = Z_{T,e}(t) + u_e(t) \quad (3-11)$$

wobei  $Z_{T,e}(t)$  die Reifenkontur ist (siehe Bild 3.50). Aktuelle und vergangene Kräfte verursachen eine Reifenschwingung  $u_e(t)$ , gegeben als

$$u_e(t) = \sum_m \int_{-\infty}^{\infty} F_m(\tau) g_{m,e}(t - \tau) d\tau \quad (3-12)$$

mit  $g_{m,e}$  als Green'sche Funktion für die Auslenkung des Punktes  $e$  aufgrund einer Kraft  $F_m$  am Punkt  $m$ . Man erhält  $g_{m,e}$  durch inverse Fourier-Transformation der Eingangs- und Transfermobilitäten des WFE-Reifenmodells. Unter Mobilität wird hier die Beweglichkeit des Reifens an einem Punkt, im Falle der Transfermobilität an einem Punkt bei Anregung an einem räumlich entfernten Punkt verstanden und als Kehrwert der mechanischen Impedanz ausgedrückt.



**Bild 3.50:** Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Die nicht verformte Reifenkontur (grau) ist  $Z_T$  und die Fahrbahnrauigkeit  $Z_R$ .  $F_e$  und  $F_m$  sind die Kontaktkräfte an den Punkten  $e$  und  $m$ .  $u_e$  ist die dynamische Auslenkung in Punkt  $e$ .

Die zeitdiskrete Version für  $t_N = N\Delta t$  und alle möglichen Kontaktpunkte  $e = 1 \dots M$  ist

$$\mathbf{u}(t_N) = \mathbf{G}_0 \mathbf{F}(t_N) + \mathbf{u}_{old}(t_N) \quad (3-13)$$

Bei  $G_0$  handelt es sich um eine  $M \times M$  Matrix mit den Werten der Green'schen Funktionen für  $t = 0$ . Der Term  $u_{old}$  in (3-13) repräsentiert vergangene, bekannte Werte der Kontaktkräfte und kann in jedem Zeitschritt als bekannt angenommen werden. Aus den Randbedingungen an der Reifen-Fahrbahn-Grenze folgt weiterhin

$$\begin{aligned} \mathbf{d}(t_N) &= \mathbf{Z}_R(t_N) - \mathbf{Z}_T(t_N) - \mathbf{u}(t_N) \\ F_e(t_N) &= k d_e(t_N) \cdot \mathcal{H}\{d_e(t_N)\} \end{aligned} \quad (3-14)$$

wobei  $d$  die Entfernungen  $d_e$  zwischen Reifenkontur und Fahrbanoberfläche beinhaltet. Für  $d_e > 0$  penetriert die Fahrbahn den Reifen am Kontaktpunkt  $e$ .  $H$  ist der Heaviside-Operator und  $k$  die Steife einer Kontaktfeder, die an jedem Punkt  $e$  zwischen Reifen und Fahrbahn hinzugefügt wird. Diese Feder wird zur Berücksichtigung kleinmaßstäblicher Texturdetails unterhalb der örtlichen Auflösung des Kontaktmodells benötigt.

Gleichungen (3-11) und (3-12) formulieren ein nicht-lineares 3D-Kontaktproblem welches iterativ für jeden Zeitschritt gelöst wird, um die Kontaktkräfte zu erhalten. Nach der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich können diese dann als Anregung für das WFE-Reifenmodell benutzt werden. Ergebnis ist das Schnellefeld des auf der Fahrbahn rollenden Reifens, welches wiederum als Eingangsgröße zur Berechnung der Schallabstrahlung benutzt werden kann.

### Abstrahlmodell

Die Schallabstrahlung des Reifens wird mittels Halbraum Boundary Element Method (Halbraum-BEM) berechnet. Bei dieser Variante der Randelementemethode wird der Boden nicht diskretisiert. Die Schallreflexionen am Boden werden stattdessen durch spezielle Green'sche Funktionen berücksichtigt.

Eingangsgröße für die BEM-Berechnungen ist das Schnellefeld des Reifens. Dessen räumliche Auflösung ist durch das Querschnittsmesh in der WFEM und die Auflösung der Kontaktberechnung in Umfangsrichtung gegeben. Für die Schallabstrahlungsberechnungen wird das Mesh zur Reduzierung des numerischen Aufwandes auf 31 Elemente im Querschnitt und 151 Segmente über den Umfang reduziert. Dies ist ausreichend für Frequenzen bis zu 2,5 kHz, der oberen Grenze des für Reifen-Fahrbahn-Geräusche maßgeblichen Frequenzbereichs. Zur korrekten Berücksichtigung des Horneffektes, also der akustischen Wirkung des von Fahrbahn und Reifenkontur gebildeten Schalltrichters, basiert das Mesh auf der durch die Achslast verformten Reifengeometrie. Die offenen Reifenseiten werden im Standardmodell durch starre Deckel geschlossen. Zwölf CHIEF-Punkte zur Vermeidung von Innenraumresonanzen sind im Reifeninnenraum verteilt.

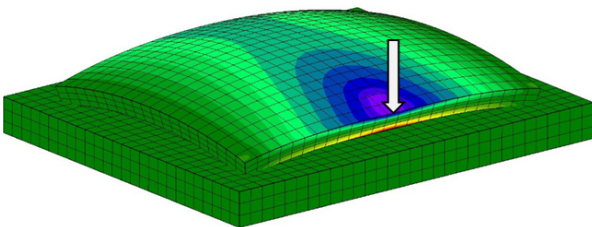
### 3.4.3 Finite Elemente Modell für das Plattensystem

Um das thermisch-mechanische Verhalten von Betonfahrbahnplatten innerhalb wissenschaftlicher Studien adäquat abzubilden, ist es im Allgemeinen erforderlich, Finite-Elemente-Volumenmodelle zu verwenden. Generell gilt aber, dass die Zielstellung der Analyse die Modellbildung bestimmen muss. So kann es in bestimmten Fällen sinnvoll sein, auf einfachere Modelle, z. B. ebene Plattenmodelle mit elastischer Bettung zurückzugreifen.

Für die hier interessierenden Fragestellungen ist aber normalerweise die Erstellung von Volumenmodellen notwendig. So ist z. B. die Berücksichtigung nichtlinearer Temperaturverläufe oder die Untersuchung der Spannungsausbreitung unter Radlasten nur möglich, wenn das betreffende Bauteil auch als Volumen beschrieben wird.

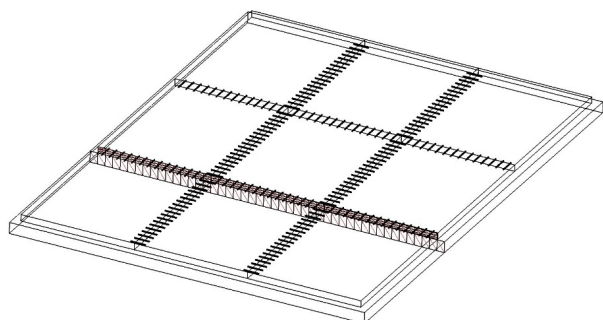
Der Modellaufbau wird über eine Input-Datei gesteuert. Dabei handelt es sich um eine Textdatei, in welcher das Modell in allen Einzelheiten vollständig beschrieben ist. Die Inputdatei wird schon für einfache Modelle so umfangreich, dass eine manuelle Erstellung nicht möglich ist. Sie wird deshalb über ein Steuerungsscript erstellt, welches üblicherweise mit Hilfe der Programmiersprache Python erzeugt wird. Diese Vorgehensweise ist zunächst aufwändig. Sie erlaubt aber die Definition praktisch beliebig gestalteter Modelle. Mit einer zweckmäßigen Konzipierung des Steuerungsscriptes lassen sich die relevanten Modellparameter leicht variieren.

Die für das vorliegende Projekt entwickelten Volumenmodelle bestehen aus einzelnen Volumenblöcken, welche die Betonplatten und die Tragschichten sowie den Baugrund repräsentieren. Die Interaktion zwischen Platten und Unterlage wird dabei durch eine Kontaktformulierung beschrieben, welche die Härte der Auflagerung und die Reibung definiert. Die Kontaktformulierung steuert außerdem, in welchem Maße Zugspannungen über die Kontaktfläche übertragen werden können. Sobald die zulässigen Zugspannungen in diesem Modellbereich überschritten werden, wird ein Aufreißen der Fuge simuliert. Das in der Praxis stattfindende bereichsweise Abheben der Platten von der Unterlage wird also auch im Modell erfasst. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine realitätsnahe Erfassung des thermischen-mechanisch Verhaltens der Fahrbahnplatten. Bild 3.51 zeigt ein unter Temperatureinwirkung aufgewölbtes 1-Platten-Modell, welches durch eine Einzellast wieder teilweise zurückverformt ist.



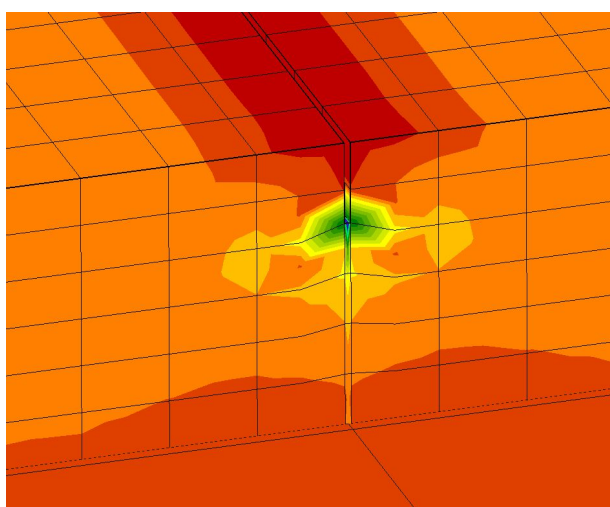
**Bild 3.51:** Volumenmodelle einer Einzelplatte unter Temperatureinwirkung und Einzellast

Die Interaktion der Platten untereinander kann durch die Modellierung von Dübeln und Ankern beschrieben werden. Dabei ist es nicht unbedingt erforderlich, die Bauteile in ihrer realen Größe und mit ihren tatsächlich vorhandenen Materialparametern abzubilden. Entscheidend ist, dass die mechanische Wirksamkeit mit hinreichender Genauigkeit den realen Verhältnissen entspricht. So ist es auch möglich, innerhalb des Modells auf die Modellierung der Anker und Dübel ganz zu verzichten und stattdessen dünne Plattenbereiche zu modellieren, deren Materialparameter so kalibriert werden, dass die Übertragung von Querkräften und Momenten über die Fuge den in der Praxis auftretenden Werten entspricht (z. B. Wirksamkeitsindex 0,9...0,95). Das Material im Fugenbereich kann als „tension-only“ definiert werden. Damit ist auch die Übertragung von Zugkräften steuerbar. Die teilweise oder vollständige Öffnung der Fuge wird also auch erfasst. Welche dieser Modellierungsoptionen zu bevorzugen ist, hängt von der konkreten Fragestellung ab. Die dübellose Variante ist einfacher zu handhaben. Wenn allerdings z. B. die Wirkung unterschiedlicher Dübelabstände analysiert werden soll, ist die Modellierung von Dübeln zwingend erforderlich. Für das hier vorliegende Projekt wurden FE-Modelle erstellt, welche beide Möglichkeiten beinhalten. Bild 3.52 zeigt die in einem 9-Platten-Modell modellierten Dübel.



**Bild 3.52:** Modellierte Fugen in einem 9-Platten-Modell

Für bestimmte Fragestellungen ist es notwendig, auch den Kerbschnitt an der Fuge zu modellieren. Dies trifft zum Beispiel für Modelle zu, mit denen die Wirkung temperaturbedingter Druckspannungen im System untersucht werden soll. In diesen Fällen ist die Modellierung im Fugenbereich entsprechend kleinteilig zu gestalten. In Bild 3.53 ist die Spannungsverteilung an einem Kerbschnitt zu sehen.



**Bild 3.53:** Spannungsverteilung an einem modellierten Kerbschnitt

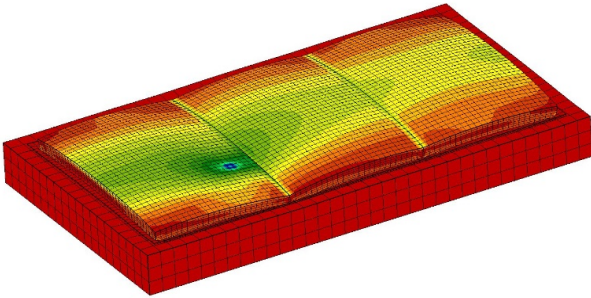
Eine mechanische Last wird im Rahmen eines FEM-Modells im Allgemeinen durch Kräfte auf Knotenpunkte oder Spannungen auf Elementflächen berücksichtigt. Eine Flächenlast (z. B. Radaufstandsfläche) muss also im ersten Fall auf eine bestimmte Anzahl Einzelkräfte umgerechnet werden. Definiert man Pressungen auf Elementflächen, so ist die Pressung auf eine Fläche umzurechnen, welche durch die Elemente definiert ist. Die Elemente sind also in jedem Fall so zu konzipieren, dass die Lasten mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Prinzipiell ist es möglich, Lasten in beliebiger Anzahl und an beliebiger Stelle zu positionieren.

Die Berücksichtigung von Temperatureinwirkungen erfolgt, indem bestimmten Elementen oder Knoten Temperaturen zugeordnet werden. Damit es möglich, praktisch beliebige Temperaturfelder zu definieren. Da die Temperatur über die Wärmedehnzahl direkt mit der Baustoffdehnung gekoppelt ist, können über Temperatureingaben auch Schwindverformungen simuliert werden.

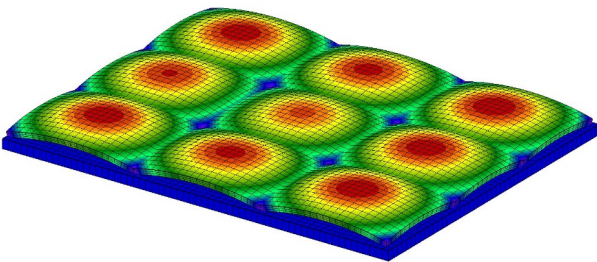
In Abhängigkeit von der konkreten Fragestellung ist es notwendig, Ein- oder Mehrplattensysteme zu modellieren. Da die Fahrbahnplatten im Allgemeinen im Fahrbahnsystem interagieren, ist die Betrachtung einer einzelnen Platte normalerweise nicht geeignet, um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Für spezielle Lastfälle oder auch für vergleichende Untersuchungen über die Wirkung eines Parameters kann aber auch das 1-Platten-System hinreichende Ergebnisse liefern. In den meisten Fällen ist aber die mechanische Wirkung mehrerer gekoppelter Platten zu berücksichtigen. In vielen Fällen ist es ausreichend, zusätzlich zu der durch eine Verkehrslast belastete Platte die Nachbarplatte zu modellieren, welche an dem am höchsten belasteten Rand angrenzt. In Abhängigkeit von der Laststellung und dem Genauigkeitsanspruch sind weitere angrenzende Platten zu modellieren. In [FE 09.0188/2011] sind hierzu weitergehende Hinweise zu finden. Mit einem 9-Platten-Modell werden alle Nachbarplatten einer belasteten Platte erfasst.



Noch umfangreichere Modelle können notwendig werden, um das mechanische Verhalten mehrerer belasteter Platten zu analysieren. Derart umfangreiche Modelle zwingen aber auch zu Kompromissen bezüglich der Detailliertheit.



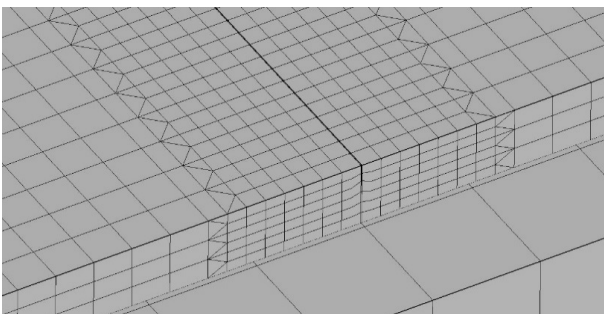
**Bild 3.54:** Unter Verkehrslast und Temperatur verformtes 3-Platten-Modell



**Bild 3.55:** 9-Platten-Modell mit temperaturbedingter Verformung

In sämtlichen Volumenmodellen wurden alle Betonplatten aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Die Spannungs-Verzerrungsbeziehung innerhalb dieses Elementes wird mit einem quadratischen Funktionsansatz beschrieben. Damit sind Loggingeffekte (shear-logging) innerhalb der hier relevanten Parameterbereiche weitgehend ausgeschlossen (siehe [FE 09.0188/2011]). Für die Volumenblöcke des Unterbaues ist es im Allgemeinen ausreichend, 8-Knoten-Brickelemente mit linearer Ansatzfunktion zu verwenden. Weil hier die Biegebeanspruchung von untergeordneter Bedeutung ist, sind auch kaum Lockingeffekte zu erwarten.

Es ist bekannt, dass die Seitenverhältnisse der Elemente nicht beliebig groß sein dürfen. Eine zu starke Abplattung der Brickelemente führt zu einer Verfälschung der Ergebnisse. In der Literatur werden zulässige Verhältniswerte für die Kantenlängen von 1:2 bis 1:6 angegeben. Eigene systematische Vergleichsrechnungen ergaben, dass das Seitenverhältnis nicht größer als 1:2 sein sollte. Entsprechend wurden die Elementgrößen für den Plattenaufbau definiert. In der Konsequenz führt die Einhaltung der zulässigen Seitenverhältnisse dazu, dass die Anzahl der Elemente in jeder Dimension erhöht werden muss, wenn eine feinere Elementierung einer Dimension notwendig wird. So ergeben sich sehr schnell hohe Elementzahlen und damit verbunden hohe Rechenzeiten. Um dieses Problem zu lösen, muss ggf. die feinere Elementierung auf den relevanten Bereich beschränkt werden. Dies erfordert die Definition eines Übergangsbereiches von kleineren zu größeren Elementen. Dabei ist sicher zu stellen, dass keine freien Elementknoten entstehen. Das Steuerungsscript für den Modellaufbau wird dadurch deutlich komplizierter. Bild 3.56 zeigt einen derartigen Übergangsbereich, welcher unter Verwendung von 15-Knoten-Wedge-Elementen generiert wurde.



**Bild 3.56:** Übergangsbereich zwischen kleineren und größeren Elementen im Fugenbereich

### 3.5 Bewertung konstruktiver und technologischer Maßnahmen bezüglich der Zielfunktionen

Die Zunahme von Witterungsextremen führt in Verbindung mit der prognostizierten Schwerverkehrszunahme zu einer Erhöhung der Belastung der Straßenbefestigungen. Dies führte im Kontext mit den Aspekten der Nachhaltigkeit zu einer Reihe von Zielfunktionen, die hier zusammengefasst und bewertet werden.

Mit einer Optimierung der Konstruktion, sowie einer Verbesserung der Technologie und Dimensionierung soll eine weitere Annäherung an die formulierten Ziele erreicht werden.

Die nachfolgende Übersicht zeigt, wie sich einzelne Maßnahmen ggf. auswirken würden. Im Einzelfall hängt die Wirkung auch von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahme ab. So kann z. B. ein neuer Fugenfüllstoff durchaus die Entsorgungskosten erhöhen, wenn er als Sondermüll einzustufen ist. Die dargestellten Zusammenhänge sind also teilweise Prognosen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit. Viele Zusammenhänge sind aber als gesichert anzunehmen.

Auffällig ist, dass eine Optimierung des Betons bezüglich der Wärmedehnzahl in vielfacher Hinsicht positive Auswirkungen und kaum negative Konsequenzen hätte. Umso erstaunlicher ist, dass es diesbezüglich weder national noch international nennenswerte Aktivitäten gibt.

	konstruktive Maßnahmen						Technologische Maßnahmen		Planung
	Reduzierung Plattenlänge	Grinding	Minimierung Wärmedehnzahl	Erhöhung der Betonfestigkeit	Reduzierung E-Modul Beton	Optimierung Fugenfüllstoff	Verbesserung der Nachbehandlung	Einsatz Fertigteile	Verbesserung Dimensionierung
Fahrbahnebenheiten $\rho$ Min!	+	+	++				+	-	
Stufenbildung an Fugen $\rho$ Min!		+						-	
Griffigkeit der Oberfläche $\rho$ Max!		+						+	
Drainagevermögen $\rho$ Max!		+							
Hitzeaufbruch $\rho$ Min!	++		++	+	+	+	+	+	
Dimensionierung $\rho$ Zielgenau!								+	++
Baustoffkosten $\rho$ Min!			-			-		+	
Entsorgungskosten Baustoffkosten $\rho$ Min									
Technologie $\rho$ Einfach!	-	-					-		
Konstruktion $\rho$ Beständigkeit!			+			++	++	+	++
Deckendicke Beton $\rho$ Min	+	--	++	++	+				++
Fugenanzahl $\rho$ Min	--		+			++		-	
Dichtheit Fugen $\rho$ Max	++		++						
Querkraftübertragung Fugen $\rho$ Max			+				+	-	
Betreiberkosten $\rho$ Min!	-		+						
Nutzerkosten $\rho$ Min!									
Rollwiderstand $\rho$ Min!	-	+	+						
Reifenabrieb $\rho$ Min!									
Abbruchkosten $\rho$ Min!				-					
Energieverbrauch $\rho$ Min!	-								
CO <sub>2</sub> -Emission $\rho$ Min!	-			-					
Lärmemission $\rho$ Min!		+	+						
Fugenweite $\rho$ Min!	++		++					+	
Recyclingfähigkeit $\rho$ Max!				+				+	

- ++ deutlich positiver Einfluss
- + schwach positiver Einfluss
- deutlich negativer Einfluss
- schwach negativer Einfluss

Tab. 3.3: Auswirkungen einzelner Maßnahmen

### 3.6 Parameterstudie

Die Änderung der klimatischen Bedingungen führen nicht nur zu einer Erhöhung der mittleren Plattentemperaturen sondern auch zu einer Erhöhung der positiven Temperaturgradienten. Letztere erhöhen die Plattenverformungen, so dass eine Schwerverkehrsbelastung auf ein größer verformtes Plattensystem trifft. Die Parameterstudie soll mit Hilfe detaillierter Belastungsansätze für die Witterung und den Verkehr die quantitativen Größenordnungen aufzeigen.

Für die Parameterstudie wird ein 3D Volumen FEM-Modell verwendet, um möglichst genaue Ergebnisse erzielen zu können. Des Weiteren wird mit nichtlinearen Temperaturverläufen statt mit Temperaturgradienten



ten gerechnet. Diesen präzisen Ansätzen folgend, wird auch die Verkehrsbelastung nicht mehr als Einzelpunktlast abgebildet. Stattdessen erfolgt der Verkehrslastansatz durch die Lastkonstellation einer Dreifachachse der in der Praxis dominierenden Fahrzeugart 98 (siehe Bild 3.70 bis Bild 3.72).

### 3.6.1 Problemlage und Zielstellung

Die Zielstellung der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen bestand darin, die weitgehend bekannten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren im System Betonstraße näher zu quantifizieren. Untersucht wurde dabei die nach der aktuellen Regelbauweise hergestellte Fahrbahn. Die Ergebnisse sollten Aufschluss darüber geben, welche Konstruktionsparameter als Ansatzpunkt für eine Verbesserung des Systems besonders wirksam sein können.

Wie bereits weiter oben beschrieben sind die relevanten Faktoren sehr vielfältig und sie beeinflussen sich teilweise gegenseitig. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit relativ komplexe Berechnungsmodelle zu definieren. Nur so ist es möglich das Systemverhalten hinreichend realistisch zu beschreiben. Um Erkenntnisse zu gewinnen, die über die schon bekannten, eher allgemeinen Zusammenhänge hinausgehen, wird es zudem erforderlich eine relativ detaillierte Modellierung vorzunehmen. Andererseits führt die Vielzahl der relevanten Einflussfaktoren, die wünschenswerte und teilweise unbedingt notwendige Detailliertheit sowie die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten sehr schnell zu Modelldimensionen, die den Rahmen dieser Studie bei weitem überschreiten.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen konzentrieren sich deshalb auf die Analyse bestimmter Fragestellungen und Zusammenhänge, welche abgeleitet von den in Abschnitt 2 beschriebenen prinzipiellen Zusammenhängen als besonders relevant erscheinen. Der oben beschriebene Konflikt zwischen Komplexität und Praktikabilität der Modelle zwang jeweils dazu für jede Fragestellung ein gesondertes Modell zu definieren und die untersuchten Einflussfaktoren und Variationsmöglichkeiten auf ein handhabbares Maß zu beschränken.

Die FEM-Berechnungen liefern jeweils für jeden Knoten den vollständigen Verschiebungsvektor und den vollständigen Spannungstensor. Es sind also sehr vielfältige Auswertungen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jeweils die Ergebniswerte zusammengestellt, welche im Sinne der allgemeinen Zielstellung interessante Zusammenhänge widerspiegeln und quantifizieren. Die Ergebnisdateien wurden aber für jeden Berechnungsfall vollständig archiviert. Gleiches gilt für die Scripte zum Modellaufbau und die Inputdateien. Damit bleibt die Möglichkeit erhalten das generierte Datenmaterial zu einem späteren Zeitpunkt für weitere Auswertungen zu nutzen.

Die im Folgenden angegebenen Zahlenwerte wurden nicht automatisiert aus den Ergebnisdateien extrahiert, sondern aus den grafischen Ergebnisdarstellungen abgeleitet. Damit war eine Plausibilitätsprüfung in jedem Fall gegeben. Modellbedingte Spannungsspitzen, welche allerdings sehr selten auftraten, wurden von der Bewertung ausgeschlossen. Verschiedentlich wurde die Richtung der maximalen Hauptspannung angegeben. Damit ist nicht die exakte Richtungsangabe gemeint, welche praktisch nie mit einer Koordinatenachse übereinstimmt. Die Richtungsangabe stellt vielmehr eine Information über die ungefähre horizontale Ausrichtung dar. Damit soll sichtbar gemacht werden, wie sich bei der Änderung eines Parameters ggf. auch die Richtung der Hauptspannung verändert.

### 3.6.2 Plattenverformung im Querfugenbereich

#### Problemstellung

Bei der rechnerischen Dimensionierung von Betonfahrbahnen wird aktuell der Einfluss von linearen Temperaturverläufen über den Plattenquerschnitt berücksichtigt. Dieser führt zu einer Plattenbiegung (Aufwölbung bzw. Aufschüsselung). Die praktisch auftretenden Temperaturzustände sind aber gewöhnlich nichtlinear. Sie zu Querschnittsverwölbungen, welche im Plattenvolumen aber weitgehend blockiert werden und damit Zwangsspannungen erzeugen. An den Plattenrändern können die Querschnittsverwölbungen aber

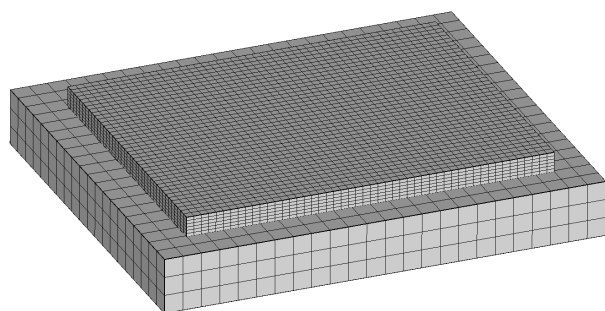
weitgehend realisiert werden. Dies führt im Ergebnis zu einer verstärkten Vertikalverformung am Plattenrand. In gleichem Sinne wirken hygrische Einflüsse, welche ein Quellen bzw. Schwinden des Betons bewirken und so ähnlich wie eine temperaturbedingte Materialdehnung wirksam werden.

Von besonderem Interesse ist der Verformungsfall „Aufschüsselung“, weil hier die temperaturbedingte Verformung, die eingeprägte Vorverformung (siehe Abschnitt 2.4.2), sowie die Schwindverformung durch Austrocknung in gleichem Sinne wirken. Bei der Überfahung des so verformten Querfugenbereichs wird eine Vertikalbeschleunigung im Rad erzeugt, welche den Fahrkomfort beeinträchtigt und die Lärmemission erhöht.

Eine rechnerische Abschätzung der Randverformung wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt.

### Berechnungsmodell

Die erforderliche Genauigkeit der Berechnungsergebnisse war nur mit der Verwendung eines Finite-Elemente-Volumenmodelles erreichbar. Um möglichst allgemein gültige Aussagen zu gewinnen, wurden für das Modell Parameter verwendet, welche als typisch für Fahrbahnplatten gelten können. Das gesamte Modell umfasst zwei Volumenblöcke: die Betonplatte und die Unterlage (Bild 3.57).



**Bild 3.57:** FEM-Volumenmodell zur Berechnung der Plattenverformung im Randbereich

Beide Volumenblöcke sind aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Der für die hinreichend genaue Berechnung der Plattenverformung erforderliche Detaillierungsgrad führt zu einer relativ feinteiligen Elementierung. Die Plattenelemente haben eine Größe von 10 cm x 10 cm x 4,5 cm. Damit liegt das Größenverhältnis der Kantenlängen in einem günstigen Bereich. In Vertikalrichtung sind genug Knoten vorhanden, um einen nichtlinearen Temperaturverlauf abbilden zu können.

Für die Unterlage war eine so detaillierte Elementierung nicht erforderlich. Hier konnten größere Elemente mit den Abmessungen 25 cm x 25 cm x 25 cm verwendet werden.

Die Interaktion zwischen den Volumenblöcken wird mit einer Kontaktformulierung gesteuert. Damit kann das bereichsweise Abheben der Platte von der Unterlage realitätsnah erfasst werden.

Die Plattengeometrie wurde mit 5,0 m x 4,0 m x 0,27 m angenommen. Der Volumenblock für die Unterlage reicht jeweils 50 cm über den Rand der Platte hinaus.

### Berechnungsfälle

Es wurden zwei Berechnungsfälle unterschieden:

- (1) typischer Fall
- (2) ungünstiger Fall.

Der typische Fall soll einen bezüglich der Plattenverformung häufig vorkommenden Zustand repräsentieren. Der zweite Berechnungsfall wurde so konzipiert, dass durch die Kombination ungünstiger Parameterwerte größere Verformungen zu erwarten sind. Die Betrachtung extremer Verformungswerte erscheint in diesem Zusammenhang wenig sinnvoll, weil entsprechende Zustände nur selten und kurzzeitig auftreten

und somit bezüglich der Lärmemission und Fahrkomfort von untergeordneter Bedeutung sind. Entsprechend wurde auf die Definition eines derartigen Berechnungsfalles verzichtet.

### Einwirkungen

Die Verformung der Betonstraßenplatten ist im Wesentlichen auf die Wirkung des Betonschwindens und auf temperaturbedingte Materialdehnungen zurückzuführen. Prinzipiell sind zwei Grundformen der Plattenverformung zu unterscheiden: Aufwölbung (die Plattenmitte hebt von der Unterlage ab) und Aufschüsselung (die Randbereiche heben von der Unterlage ab). Während die Temperatureinwirkung, in Abhängigkeit vom Gradientenverlauf zu beiden Grundformen führen kann, bewirkt die Schwindverformung in der Regel eine permanente Aufschüsselung. Wie aus verschiedenen Untersuchungen ([PFEIFER 1973], [FOOS 2006], [SONDAG 2006]) bekannt ist, dominiert dieser Verformungseinfluss soweit, dass im Randbereich fast immer ein Aufwärtsverformung (Aufschüsselung) verbleibt. Folglich ist es sinnvoll die theoretischen Untersuchungen auf die Grundform der Aufschüsselung zu konzentrieren.

Eine temperaturbedingte Plattenaufschüsselung entsteht, wenn ein negativer Temperaturgradient im Plattenquerschnitt vorherrscht. Dieser Zustand tritt typischerweise in den Nachtstunden ein, wenn sich die Platte von oben her abkühlt. Um ein unter Normalbedingungen praktisch vorkommendes Temperaturprofil zu bestimmen, wurde eine thermische Simulationsrechnung unter Verwendung einer Energiebilanzmethode durchgeführt. Dafür wurden folgende Bedingungen vorgegeben:

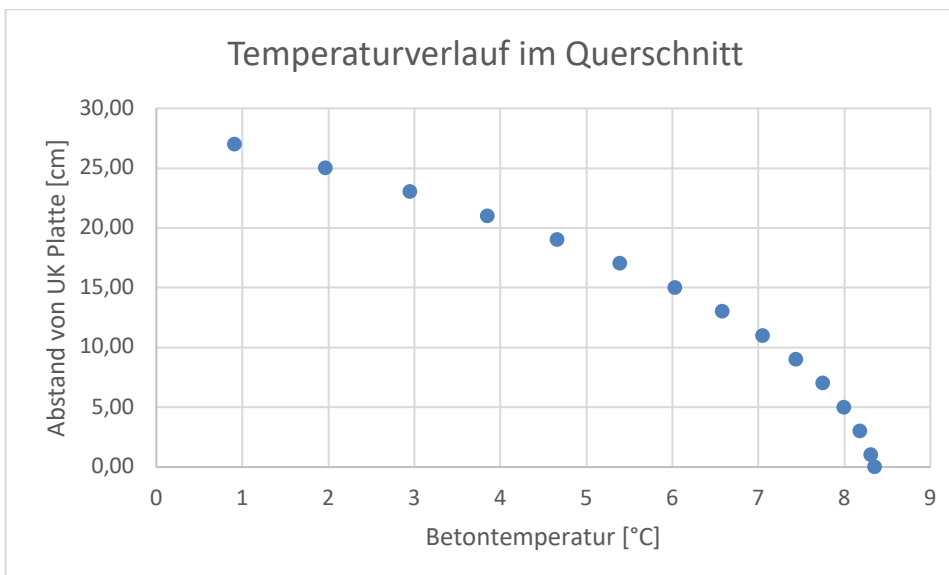
Standort: Berlin

Jahreszeit: April

Jahresgang Lufttemperatur: 0°C...10°C

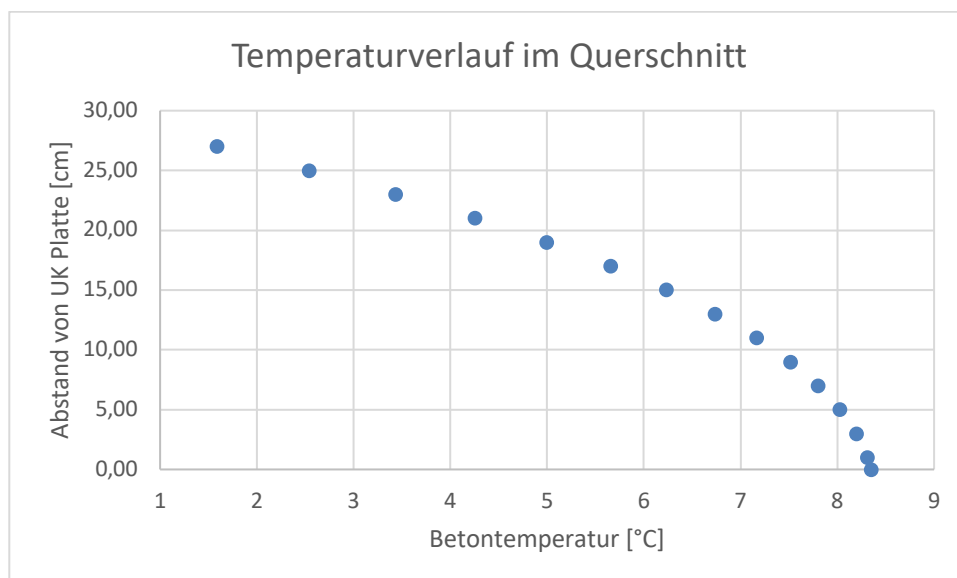
kein Niederschlag.

Als Eingangsgröße für die mechanische Berechnung wurde das Temperaturprofil ausgewählt, welches sich in der Simulationsrechnung für 2:00 Uhr nachts einstellte. Der entsprechende Temperaturverlauf im Betonquerschnitt ist in Bild 3.58 dargestellt.



**Bild 3.58:** Temperaturprofil für den Berechnungsfall 1

Im Berechnungsfall 1 wurde dieses Temperaturprofil unverändert angesetzt. Für den Berechnungsfall 2 wurde das Temperaturprofil in der Weise modifiziert, dass die Differenz vom niedrigsten zum höchsten Temperaturwert um 10% erhöht wurde (Bild 3.59).



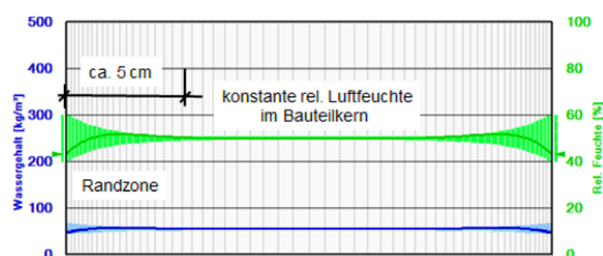
**Bild 3.59:** Temperaturprofil für den Berechnungsfall 2

Neben den durch die aktuellen Klimabedingungen induzierten Plattenverformungen sind auch die während des Erstarrungsprozesses des Betons im Plattenvolumen vorhandenen Temperaturzustände weiter wirksam. Die während des Hydratationsprozesses auftretenden Temperaturdifferenzen im Plattenvolumen führen zu Dehnungsdifferenzen und damit zu Verformungen, welche dauerhaft in die Platte eingepreßt sind. In [M-E D 2004] wird empfohlen diesen Einfluss durch Ansatz eines Temperaturgradienten zu berücksichtigen, welcher zu einer Temperaturdifferenz von 5,56 K zwischen Ober- und Unterseite der Betonplatte führt. Für den Berechnungsfall 1 wurde dieser Empfehlung gefolgt. Im Berechnungsfall 2 wurde der Gradient um 10 % erhöht.

Bei der Betrachtung der im Betonquerschnitt wirksamen Schwindverformung ist zwischen langfristig wirksamen Verformungen und kurzfristigen Einflüssen zu unterscheiden. Die kurzfristigen Einflüsse sind von der aktuellen Witterung abhängig und bleiben hier ohne Beachtung.

Bezüglich der langfristigen Wirkung ist es notwendig die Schwindmaßdifferenzen im Betonquerschnitt zu betrachten. Da das Schwindmaß im Wesentlichen vom Feuchtezustand des Betons bestimmt wird, ist zunächst eine Betrachtung der Feuchteverteilung im Betonvolumen hilfreich.

In der Literatur (z. B. [MÜLLER 2016]) wird angegeben, dass sich im Inneren von Betonbauteilen nach mehreren Jahren eine nahezu konstante Feuchtigkeit einstellt. Nur in einem Randbereich von ca. 5 cm Tiefe kommt es infolge der äußeren Bedingungen zu abweichenden Feuchtigkeitswerten (Bild 3.60).



**Bild 3.60:** Feuchtigkeitsverteilung im Bauteil (aus [MÜLLER 2016])

Da für die Plattenverformung nur die Unterschiede in den Schwinddehnungen interessant sind, waren damit nur die beiden oberen Knotenebenen im Plattenmodell zu betrachten. Hier waren die aus den unterschiedlichen Feuchteverhältnisse resultierenden Dehnungsdifferenzen abzuschätzen. Die dritte Knotenebene, mit einem Abstand von 4,5 cm zur Plattenoberseite, konnte bereits zu dem Bereich mit konstanter Feuchte gerechnet werden. Für die Kalkulation der feuchtebedingten Betondehnungen wurde ein in [FOOS 2006] angegebenes Verfahren benutzt.

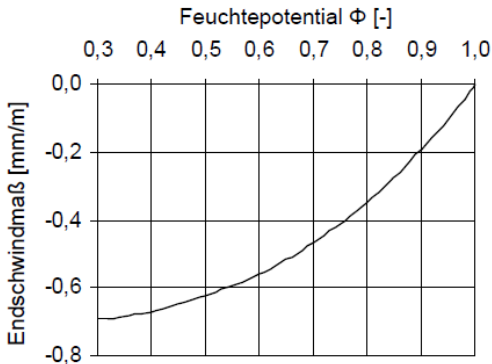
Analog zur Wärmedehnzahl kann eine Feuchtedehnzahl  $\kappa_s(\phi)$  definiert werden (siehe [FOOS 2016]). Es gilt:

$$\Delta\varepsilon_s(\phi) = \kappa_s(\phi) \cdot \Delta\phi \quad (3-15)$$

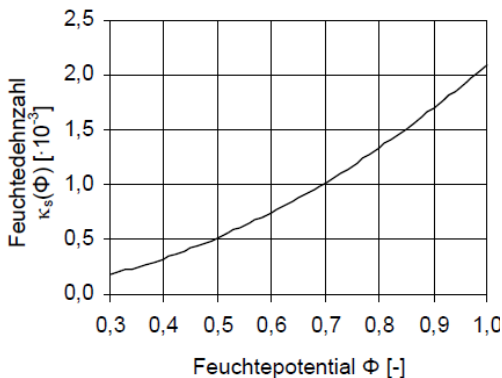
$\phi$  - Feuchtigkeitspotential

$\Delta\varepsilon_s(\phi)$  - aus Feuchtigkeitsänderung resultierende Dehnung bei einem Feuchtigkeitspotential  $\phi$

In [FOOS 2006] ist die Zusammenhänge zwischen Feuchtigkeitspotentials und Endschwindmaß, sowie zwischen Feuchtepotential und Feuchtedehnzahl angegeben.



**Bild 3.61:** Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Endschwindmaß (aus [FOOS 2006])



**Bild 3.62:** Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Feuchtedehnzahl (aus [FOOS 2006])

Das Endschwindmaß würde sich mit dem im Model Code [MC 90] angegebenen Verfahren berechnen.

Unter Beachtung der in Bild 3.61 und Bild 3.62 dargestellten Zusammenhänge ergaben sich die in Tab. 3.4 zusammenfassten Werte.

	rel. Feuchte [%]	Endschwindmaß [mm/m]	Feuchtepotential	Feuchtedehnzahl
oben	40	0,3792	0,773	$1,276 \cdot 10^{-3}$
In 2.25 cm Tiefe	46	0,3657	0,782	$1,306 \cdot 10^{-3}$
Ab 4,5 cm Tiefe	50	0,3545	0,789	$1,33 \cdot 10^{-3}$

**Tab. 3.4:** Rechenwerte zur Ermittlung der Dehnungsdifferenzen

Damit lassen sich die feuchteinduzierten Dehnungen berechnen.

Für die obere Knotenebene:

$$\Delta\varepsilon_{1,s} = 1,276 \cdot 10^{-3} \cdot (0,773 - 0,789) = 2,04 \cdot 10^{-5}$$

Für die zweite Knotenebene:

$$\Delta\varepsilon_{2,s} = 1,306 \cdot 10^{-3} \cdot (0,782 - 0,789) = 9,14 \cdot 10^{-6}$$

Die hier berechneten Dehnungen mussten im FEM-Modell über Temperaturzuweisungen erfasst werden. Unter Zugrundelegung der im Modell verwendeten Wärmedehnzahl ergaben sich folgende Temperaturwerte:

$$\delta_{1,t,s} = \frac{2,04 \cdot 10^{-5}}{1,05 \cdot 10^{-5} K^{-1}} = 1,94 K$$

$$\delta_{2,t,s} = \frac{9,14 \cdot 10^{-6}}{1,05 \cdot 10^{-5} K^{-1}} = 0,87 K$$

Für den Berechnungsfall 2 wurden die Werte um 10 % erhöht.

### Material

Entsprechend der für die Berechnungsfälle formulierten Zielstellung wurden für den Berechnungsfall 1 übliche Parameterwerte für die Betonplatte angenommen:

- E-Modul Beton: 38.000 MPa
- WDZ:  $10,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Für den Berechnungsfall 2 wurde eine Differenzierung zwischen Ober- und Unterbeton vorgenommen. Dabei wurden die Materialparameter für den Oberbeton so gewählt, dass die Wirkungen der Dehnungsdifferenzen auf die Plattenverformung verstärkt werden. Konkret wurden folgenden Materialparameter angesetzt:

Oberbeton:

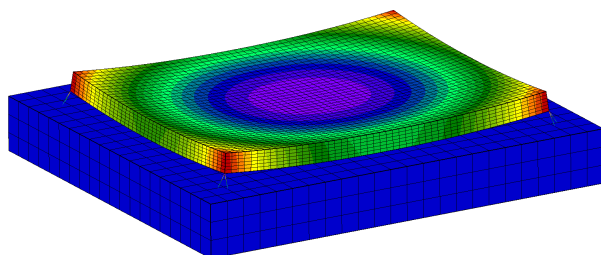
- E-Modul Beton: 40.000 MPa
- WDZ:  $12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Unterbeton:

- E-Modul Beton: 38.000 MPa
- WDZ:  $10,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

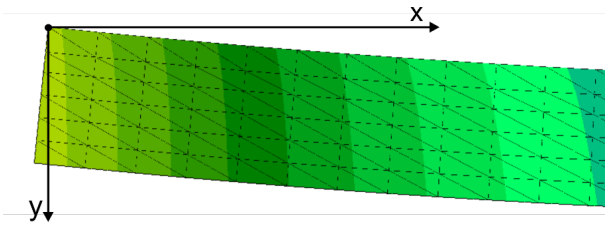
### Ergebnisse

Die modellierte Platte zeigte unter den beschriebenen Einwirkungen die erwartete Aufschüsselung (siehe Bild 3.63).



**Bild 3.63:** Verformtes Berechnungsmodell

Eine detaillierte Auswertung der Vertikalverschiebungen im Querfugenbereich wurde in einem Abstand von 1 m zur Plattenachse für beide Belastungsfälle durchgeführt. Die maximale hier berechnete Vertikalverschiebung (am Plattenrand) betrug 1,135 mm für den Berechnungsfall (1) und 1,637 mm für den Berechnungsfall (2). Die ermittelten Verformungswerte im Bezug zum Plattenrand (siehe Bild 3.64) sind in Tab. 3.5 zusammengestellt. Alle Werte beziehen sich auf die angenommene Fahrspur des Rades.



**Bild 3.64:** Definition der Werte in Tab. 3.5

X [mm]	Berechnungsfall 1	Berechnungsfall 2
	y [mm]	
0	0,00	0,00
100	0,105	0,143
200	0,203	0,277
300	0,296	0,404
400	0,384	0,524
500	0,467	0,638
600	0,545	0,745
700	0,625	0,846
800	0,686	0,940
900	0,750	1,028
1000	0,808	1,110

**Tab. 3.5:** Berechnete Verformungswerte am Plattenrand

Die gefundene Plattenverformung lässt sich für beide Berechnungsfälle in guter Näherung mit einem Polynom zweiten Grades beschreiben:

$$s_v(s_h) = a_1 \cdot s_F^2 + a_2 \cdot s_Q^2 + s_{v0} \quad (3-16)$$

$s_v$  – Verschiebung in Vertikalrichtung

$s_F$  – Abstand vom Plattenmittelpunkt in Fahrrichtung

$s_Q$  – Abstand vom Plattenmittelpunkt in Querrichtung

$a_1, a_2$  - Koeffizienten

$s_{v0}$  - Vertikalverschiebung in Plattenmitte (-0,242mm bzw. -0,282mm für Berechnungsfall (1) bzw. (2))

Dabei liegt der Koordinatenursprung per Definition in Plattenmitte.

Der Abstand  $s_F$  kann als vom Rad zurückgelegte Strecke interpretiert werden und lässt sich durch die Fahrgeschwindigkeit ausdrücken:

$$s_F = v_R \cdot t_R \quad (3-17)$$

$v_R$  – Geschwindigkeit des Rades

$t_R$  – Zeit, welche das Rad für die Strecke  $s_F$  benötigt hat

Damit ergibt sich für die Vertikalverschiebung des Rades in der Fahrspur in Abhängigkeit von der Zeit:

$$s_v(t_R) = a_1 \cdot (v_R \cdot t_R)^2 + a_2 \cdot (1000\text{mm})^2 + s_{v0} \quad (3-18)$$

Für die Vertikalbeschleunigung gilt:

$$\ddot{s}_v(t_R) = 2 \cdot a_1 \cdot v_R^2 \quad (3-19)$$

Die Anpassung des Polynoms an die berechneten Verformungswerte liefert die in Tab. 3.6 angegebenen Koeffizienten.

Berechnungsfall	$a_1$ [1/mm]	$a_2$ [1/mm]
(1) typisch	$2,022 \cdot 10^{-7}$	$1,454 \cdot 10^{-7}$
(2) ungünstig	$2,771 \cdot 10^{-7}$	$1,782 \cdot 10^{-7}$

Tab. 3.6: Koeffizientenwerte für die Polynome

Bild 3.65 zeigt beispielhaft für den Berechnungsfall (1) die Anpassung des Polynoms an die Verformungswerte.

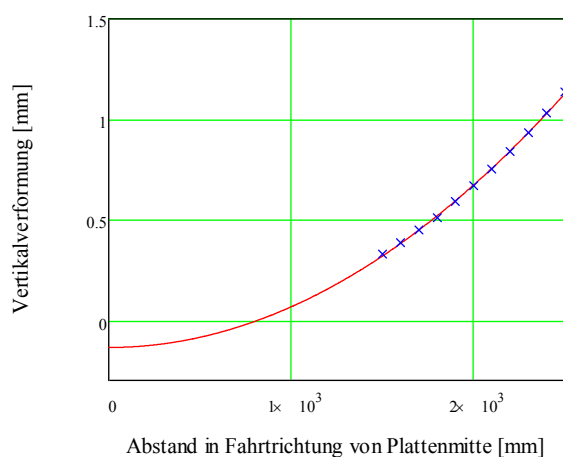


Bild 3.65: Verformungswerte (blau) und angepasstes Polynom (rot) in der Fahrspur des Rades

Nimmt man eine Radgeschwindigkeit von 130 km/h an (dies entspricht 36.111 mm/s), dann lässt sich die Vertikalbeschleunigung leicht mit Formel (3-19) berechnen. Für den Berechnungsfall 1 gilt:

$$\dot{s}_v = 2 \cdot 2,022 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-1} \cdot \left( 36111 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)^2 = 536 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} = 0,527 \text{ m/s}^2$$

Für den Berechnungsfall 2 ergibt sich:

$$\dot{s}_v = 2 \cdot 2,771 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-1} \cdot \left( 36111 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)^2 = 789 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} = 0,723 \text{ m/s}^2$$

Obwohl für die Berechnung des zweiten Falles die Parameter gegenüber dem ersten Fall nur relativ geringfügig (ca. 10 %) geändert wurden, zeigt sich hier eine Erhöhung der Vertikalbeschleunigung um fast 40 %. Eine Optimierung der entsprechenden Einflussfaktoren (E-Modul, WZ, Schwindneigung des Betons, eingeprägte Vorverformung) können an dieser Stelle also einen spürbaren Effekt erzielen.

### 3.6.3 Untersuchung des Einflusses des Querfugenabstandes

#### Zielstellung

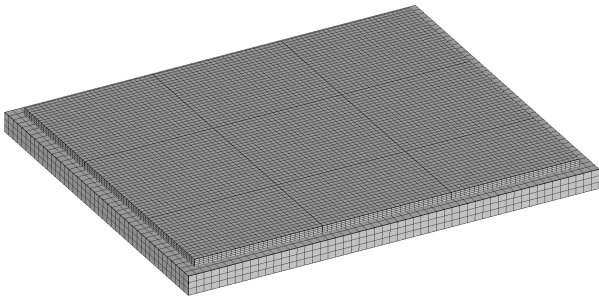
Es ist bekannt, dass die Plattengeometrie einen wesentlichen Einfluss auf das mechanische Verhalten der Fahrbahn hat. Für die Wahl der Plattenbreiten sind dabei normalerweise konstruktive Gesichtspunkte ausschlaggebend. Der Querfugenabstand kann aber frei gewählt werden. Dabei sprechen wirtschaftliche Erwägungen eher für einen großen Abstand. Lange Platten führen aber tendenziell zu einer höheren mechanischen Beanspruchung des Betons.



Mit einer Serie von Berechnungen sollte näher quantifiziert werden wie sich der Quertugenabstand auf die Plattenbeanspruchung, sowie die Plattenverformung auswirkt. Dazu wurde eine typische Belastungssituation für eine Betonstraßenplatte simuliert und für verschiedenen Quertugenabstände jeweils die maximale Hauptspannung und die maximale Vertikalverformung berechnet.

### Berechnungsmodell

Die Berechnungen wurden mit Hilfe eines Finite-Elemente-Volumenmodelles realisiert. Um auch die Interaktion zwischen den einzelnen Platten eines Straßenabschnittes im Modell abzubilden, wurden zusätzlich zu der mit einer Verkehrslast belasteten Platten alle angrenzenden Platten modelliert. Im Ergebnis umfasst das Gesamtmodell neun Platten (siehe Bild 3.66) Die Tragschicht wird durch einen weiteren Volumenblock modelliert.

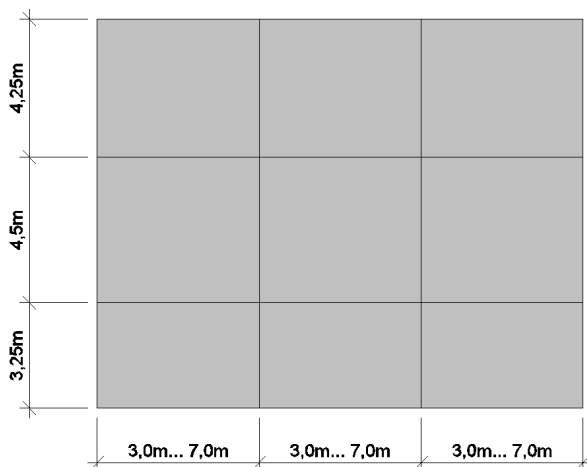


**Bild 3.66:** Berechnungsmodell

Alle Volumenblöcke sind aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Die Elementgeometrie wurde für alle Platten so festgelegt, dass das Verhältnis der Kantenlängen in einem Element nicht größer als 1:2,5 wird. In vertikaler Richtung wurde die Platte in vier Elemente unterteilt- damit stehen über den Querschnitt 9 Knotenebenen für die Festlegung nichtlinearer Temperaturverläufe zur Verfügung

Die Interaktion zwischen den Volumenblöcken wird mit einer Kontaktformulierung gesteuert. Damit kann das bereichsweise Abheben der Platte von der Unterlage realitätsnah erfasst werden.

Für die Plattenbreiten wurden praxisübliche Werte gewählt. Im Ergebnis entsteht eine Gesamtbreite der modellierten Fahrbahn von 12,0 m (siehe Bild 3.67). Für alle Platten wurde eine Dicke von 28 cm vorgegeben. Der Volumenblock für die Unterlage reicht jeweils 50 cm über den Rand der Platte hinaus (Bild 3.66).



**Bild 3.67:** Plattengeometrien

Das Fugenvolumen (Längs- und Quertugen) wurde ebenfalls jeweils mit Brickelementen modelliert. Platten- und Fugenelemente sind im Modell fest verbunden. Für die Fugenelemente wurde dabei aber ein

Material vorgegeben, welches nur Druckkräfte überträgt (COMPRESSION\_ONLY). Damit ist die Übertragung von Biegemomenten über die Fugen hinweg nur sehr eingeschränkt möglich. Die Steifigkeit des Fugenmaterials wurde so gewählt, dass das mechanische Verhalten der modellierten Fuge bezüglich Querkraft- und Momentenübertragung realitätsnah ist.

### Einwirkungen

Für alle modellierten Platten wurde jeweils ein Temperaturzustand vorgegeben. Gleichzeitig wurde für die zentrale Platte eine Verkehrslast simuliert. Dabei wurden für beide Einwirkungen hohe aber nicht extreme Werte gewählt.

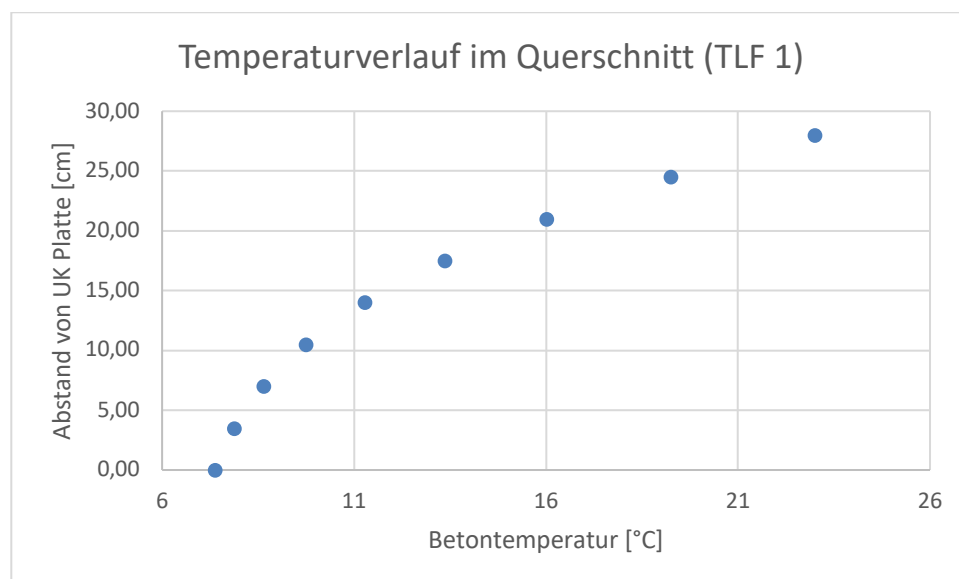
#### Temperatureinwirkung

Um die beiden, grundsätzlich unterschiedlichen temperaturbedingten Verformungsfiguren der Platten (Aufwölben, Aufschüsseln) zu erfassen, wurden zwei verschiedene Temperaturverläufe angesetzt. Diese repräsentieren eine jeweils von der Plattenoberkante ausgehende Erwärmung (Temperaturlastfall TLF 1) bzw. Abkühlung (Temperaturlastfall TLF 2). Der Fall TLF 1 tritt typischerweise in den Vormittagsstunden und am frühen Nachmittag auf, TLF 2 in den Abend- und Nachtstunden.

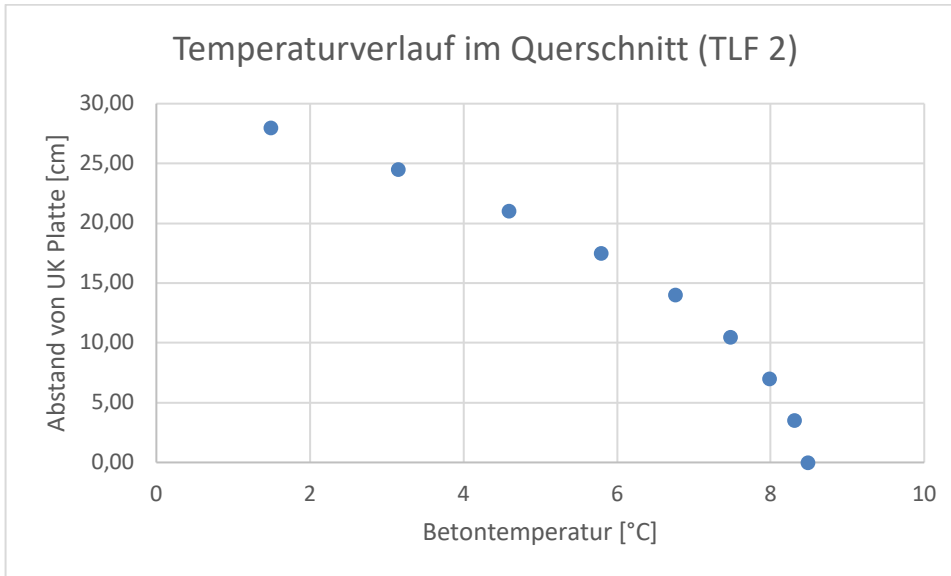
Um möglichst realistische Temperaturverläufe für die Berechnungen ansetzen zu können, wurden thermische Simulationsrechnung unter Nutzung eines Energiebilanzverfahrens durchgeführt. Dafür wurden für mehrere aufeinanderfolgende Tage die folgenden Bedingungen vorgegeben:

- Standort: Berlin
- Jahreszeit: April
- Tagesgang Lufttemperatur: 0°C...10°C
- kein Niederschlag
- Luftfeuchtigkeit: 70%
- Bewölkungsgrad 10%
- Wind 2,2 m/s.

Als Eingangsgröße für die mechanische Berechnung wurden die für 13:00Uhr (TLF 1) bzw. 2:00 Uhr (TLF 2) berechneten Temperaturprofile gewählt. Der entsprechenden Temperaturverläufe im Betonquerschnitt sind in Bild 3.68 und Bild 3.69 dargestellt.



**Bild 3.68:** Temperaturprofil für den Temperaturlastfall 1



**Bild 3.69:** Temperaturprofil für den Temperaturlastfall 2

Die eingepprägten bzw. durch Schwindprozesse zu erwartenden Vorverformungen wurden analog zu Abschnitt 3.6.2 (Plattenverformung im Querfugenbereich) berücksichtigt. Zur Erfassung der eingepprägten Vorverformung wurde eine Temperaturdifferenz von 5,56 K (Unterseite wärmer) angesetzt.

Die Schwindverformung infolge Austrocknung an der Plattenoberseite wurde berücksichtigt indem für die beiden oberen Knotenebenen zusätzlich eine Temperaturabsenkung (1,9 K bzw. 0,5 K) vorgegeben wurde.

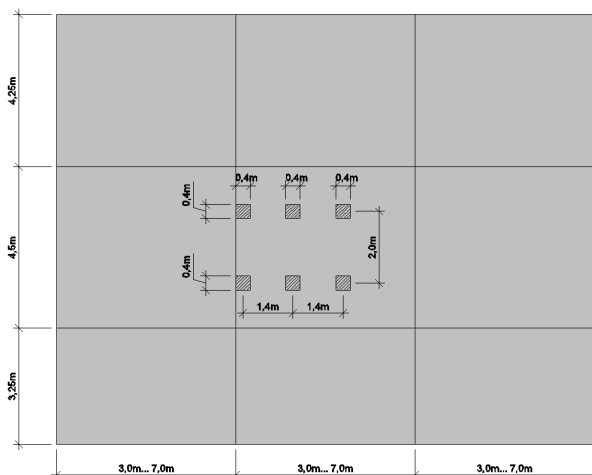
### Verkehrslast

Als Ausgangspunkt für den Verkehrslastansatz wurde die in der Praxis dominierende Fahrzeugart 98 gewählt. Dieses Fahrzeug verfügt über eine Dreifachachse. Entsprechend wurde eine 3-fach-Achslast modelliert. Für alle Räder wurde eine Last von 50 kN vorgegeben, welche sich jeweils auf eine Aufstandsfläche von 0,4 m x 0,4 m verteilt.

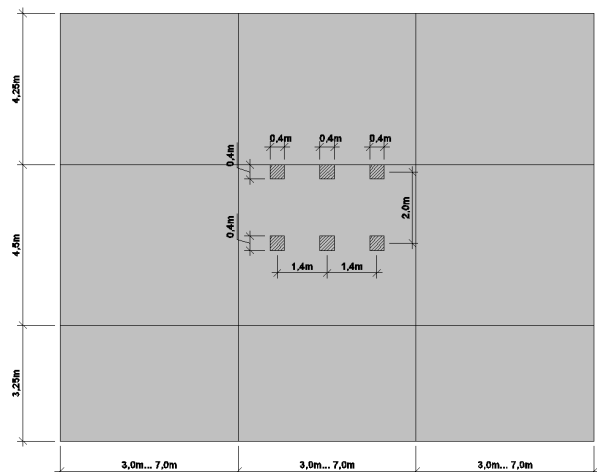
Ins gesamt wurden drei Laststellungen untersucht:

- Mitte Querfuge (Verkehrslastfall VLF 1)
- Mitte Längsfuge (Verkehrslastfall VLF 2)
- Ecke (Verkehrslastfall VLF 3).

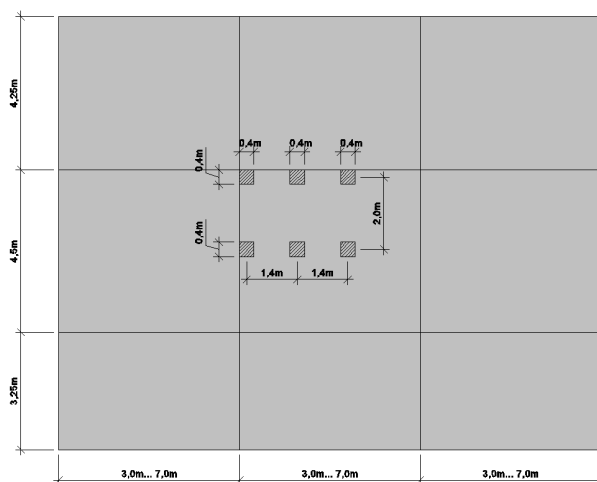
Die entsprechenden Lastbilder sind in Bild 3.70 bis Bild 3.72 dargestellt.



**Bild 3.70:** Laststellung VLF 1



**Bild 3.71:** Laststellung VLF 2



**Bild 3.72:** Laststellung VLF 3

### Material

Für die Berechnungen wurden praxisübliche Materialparameter verwendet:

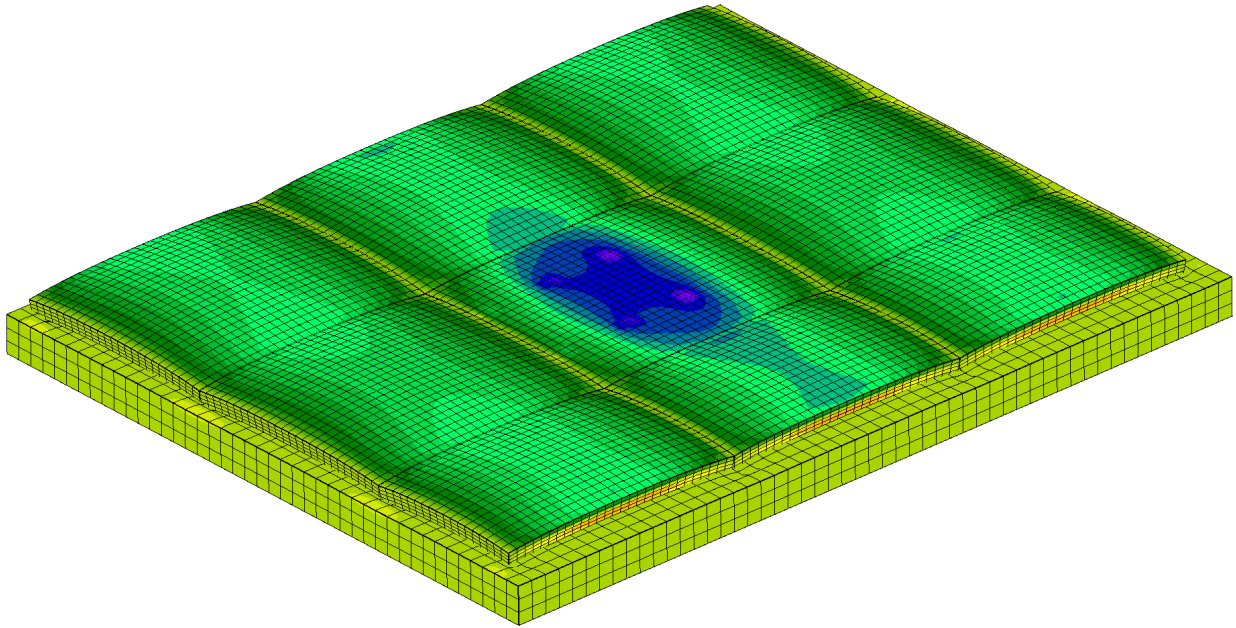
- WDZ Beton:  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- E-Modul Beton: 41.000 MPa
- E-Modul Tragschicht: 200 MPa

### Berechnungsfälle

Es wurden zwei Temperaturlastfälle, drei Verkehrslastfälle und neun unterschiedliche Querfugenabstände kombiniert. Damit ergaben sich 54 Berechnungsfälle.

### Ergebnisse

Die Berechnungen liefern jeweils die vollständige Beschreibung des Verformungs- und Spannungszustandes des gesamten Systems. Bild 3.73 zeigt beispielhaft die Spannungen in x-Richtung an der Oberseite des Systems. Dargestellt ist der Fall VLF 1 und TLF 1 bei 5 m Querfugenabstand.



**Bild 3.73:** Spannungen in x-Richtung, an der Oberseite des Systems

In Tab. 3.7 bis Tab. 3.12 sind für alle Berechnungsfälle die maximalen Hauptspannungen in der durch die Verkehrslast belasteten Platte und die maximale Vertikalverformung dieser Platte vor der Belastung durch die Verkehrslast angegeben.

Die maximale Hauptspannung ( $\max PS_1$ ) ist identisch mit der höchsten Zugspannung. Für das untersuchte System kann angenommen werden, dass ein Versagen eintritt, wenn die maximale Hauptspannung die Zugfestigkeit des Betons überschreitet. Damit gibt die maximale Hauptspannung Auskunft über die Auslastung der Tragfähigkeit der Platte.

Die maximale Vertikalverformung ( $\max D_3$ ) der Platte ist für den Fahrkomfort und die Lärmemission von Bedeutung. Da die Verformung von der Verkehrslast teilweise zurückgestellt wird, ist es hier aufschlussreich die Verformungswerte vor der Belastung durch die Verkehrslast zu betrachten.

Querfugenabstand	VLF1, TLF1				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	1,39	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,48	Mitte Platte
3,50	1,44	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,55	Mitte Platte
4,00	1,47	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,61	Mitte Platte
4,50	1,49	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,67	Mitte Platte
5,00	1,68	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
5,50	1,84	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,70	Mitte Platte
6,00	2,02	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
6,50	2,14	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
7,00	2,24	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,66	Mitte Platte

Tab. 3.7: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 1 + Temperaturlastfall 1

Querfugenabstand	VLF2, TLF 1				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	1,64	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,48	Mitte Platte
3,50	1,54	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,55	Mitte Platte
4,00	1,58	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,61	Mitte Platte
4,50	1,65	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,67	Mitte Platte
5,00	1,74	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,69	Mitte Platte
5,50	1,87	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,70	Mitte Platte
6,00	2,03	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
6,50	2,16	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
7,00	2,23	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,66	Mitte Platte

Tab. 3.8: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 2 + Temperaturlastfall 1

Querfugenabstand	VLF 3, TLF 1				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	1,70	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,48	Mitte Platte
3,50	1,70	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,55	Mitte Platte
4,00	1,67	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,61	Mitte Platte
4,50	1,67	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,67	Mitte Platte
5,00	1,68	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,69	Mitte Platte
5,50	1,80	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,70	Mitte Platte
6,00	1,95	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
6,50	2,03	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,69	Mitte Platte
7,00	2,14	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,66	Mitte Platte

Tab. 3.9: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 3 + Temperaturlastfall 1

Querfugenabstand	VLF 1, TLF 2				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	3,59	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,42	Ecke
3,50	3,60	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,60	Ecke
4,00	3,63	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,77	Ecke
4,50	3,66	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,96	Ecke
5,00	3,76	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,15	Ecke
5,50	3,99	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,34	Ecke
6,00	4,19	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,50	Ecke
6,50	4,38	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,64	Ecke
7,00	4,58	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,72	Ecke

Tab. 3.10: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 1 + Temperaturlastfall 2

Querfugenabstand	VLF 2, TLF 2				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	3,53	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,42	Ecke
3,50	3,53	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,60	Ecke
4,00	3,55	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,77	Ecke
4,50	3,59	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,96	Ecke
5,00	3,63	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,15	Ecke
5,50	3,72	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,34	Ecke
6,00	3,98	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,50	Ecke
6,50	4,16	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,64	Ecke
7,00	4,36	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,72	Ecke

Tab. 3.11: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 2 + Temperaturlastfall 2

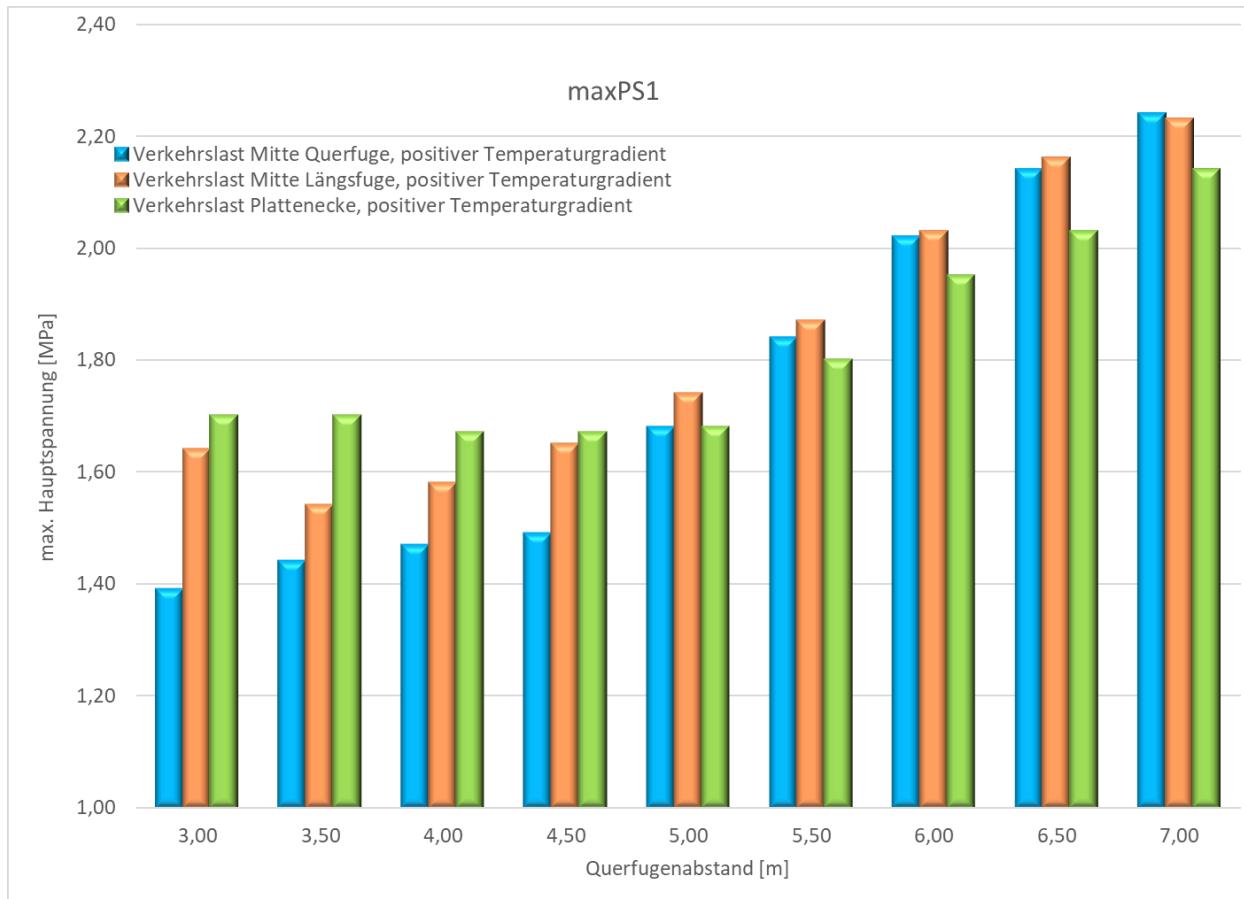
Querfugenabstand	VLF 3, TLF 2				
	maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[m]	[MPa]			[mm]	
3,00	3,53	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,42	Ecke
3,50	3,54	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,60	Ecke
4,00	3,55	Oberseite Mitte Platte	y-Rtg.	1,77	Ecke
4,50	3,58	Oberseite Mitte Platte	x/y-Rtg.	1,96	Ecke
5,00	3,84	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,15	Ecke
5,50	4,08	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,34	Ecke
6,00	4,26	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,50	Ecke
6,50	4,43	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,64	Ecke
7,00	4,60	Oberseite Mitte Platte	x-Rtg.	2,72	Ecke

Tab. 3.12: Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 3 + Temperaturlastfall 2

In Bild 3.74 ist die die Entwicklung der maximalen Hauptspannungen in Abhängigkeit vom Querfugenabstand für den Temperaturlastfall 1 dargestellt. Es ist auffällig, dass sich für Querfugenabstände < 5,0 m kaum eine Erhöhung der Spannungen feststellen lässt. Dies erklärt sich daraus, dass für kurze Platten die



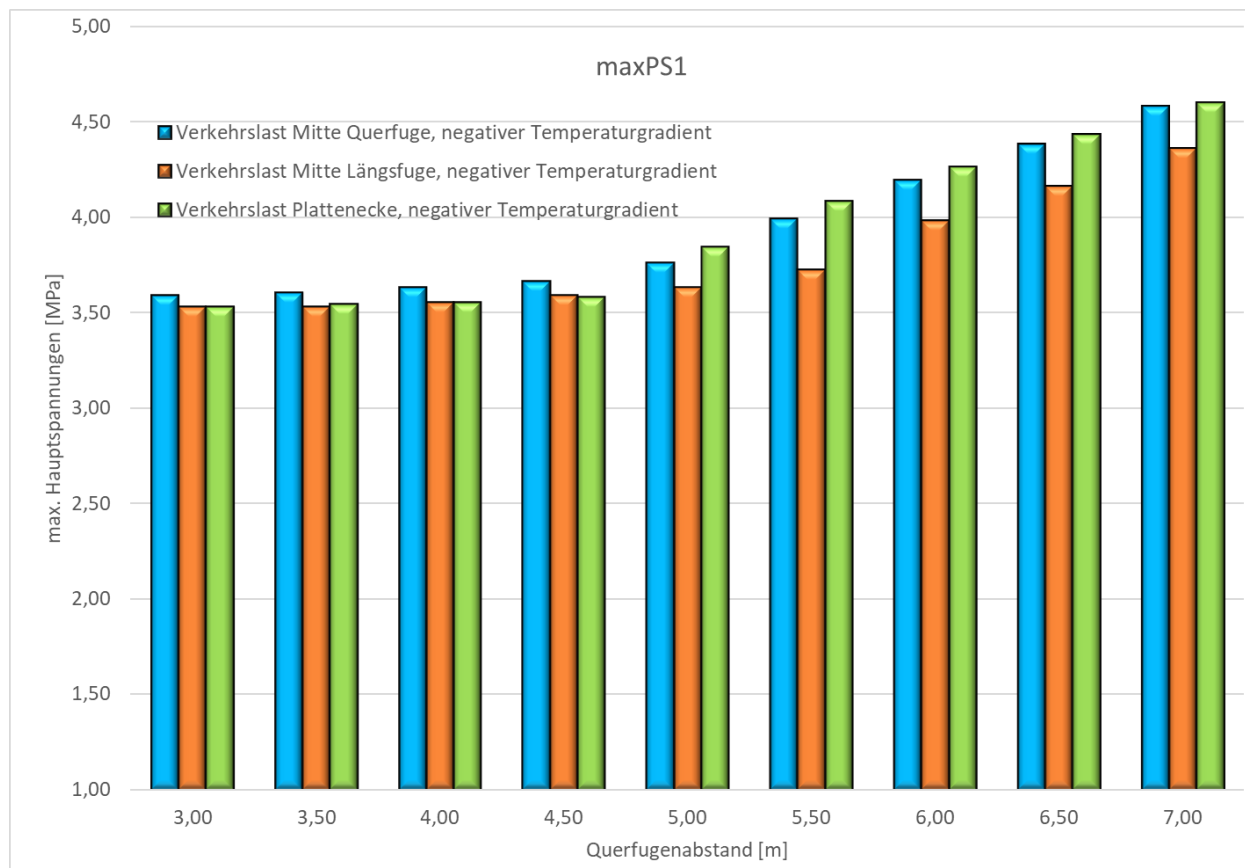
Spannung in Querrichtung (y-Richtung) maßgebend wird (siehe Tabelle 3.6 bis 3.8). Erst wenn der Querfugenabstand die Größe der Breite erreicht dreht sich die Richtung der maximalen Hauptspannung und die Spannung in Fahrtrichtung (x-Richtung) wird maßgebend. Dann wird auch der Querfugenabstand (die Plattenlänge) für die Größe der Hauptspannung relevant. Die Vergrößerung des Querfugenabstandes von 4,5 m auf 7,0 m erhöht die maximale Hauptspannung 50 % (VLF 1), 35 % (VLF 2) bzw. 28 % (VLF 3).



**Bild 3.74:** Maximale Hauptspannungen für den Temperaturlastfall 1

Ein ähnliches Bild zeigt sich für den Temperaturlastfall 2 (Bild 3.75). Auch hier ist die Spannungsentwicklung bis zu einer Plattenlänge von 5,0 m kaum spürbar. Aber auch bei größeren Querfugenabständen verläuft die Entwicklung moderater als im Temperaturlastfall 1. Von der 4,5 m langen Platte bis zur 7,0 m langen Platte ergibt sich eine Steigerung von lediglich 25 % (VLF 1), 21 % (VLF 2) bzw. 28 % (VLF 3). Dies erklärt sich aus der Verformungsfigur, welche der Temperaturzustand erzeugt. Der Temperaturzustand 1 beinhaltet einen positiven Temperaturgradient und erzeugt damit eine Aufwölbung der Platte. Mit wachsender Plattenlänge erhöht sich die Spannweite und bis zu einer bestimmten, kritischen Länge auch die Aufwölbungshöhe. Damit verstärkt sich die Wirkung der Verkehrslasten. Im Temperaturzustand 2 wird ein negativer Temperaturgradient wirksam, welcher zu einer Aufschüsselung führt. Es bilden sich also Kragarme an den Plattenrändern und besonders ausgeprägt an den Plattenecken. Die Kragarmlänge wächst aber nicht in gleichem Maße wie die Plattenlänge, weil immer im mittleren Bereich eine flächenhafte Auflagerung verbleibt.

Beim Vergleich der Temperaturlastfälle fällt auf, dass der Fall TLF 2 zu deutlich höheren Spannungen führt. Dies ist vor Allem darauf zurückzuführen, dass die berücksichtigten Einflüsse aus Schwindverformung und eingepprägter Vorverformung so angesetzt wurden, dass sie der Aufwölbung im TLF 1 entgegenwirken und die Aufschüsselung im TLF 2 verstärken. Dies entspricht nach derzeitigem Erkenntnisstand zwar dem Normalfall (vgl. u.a. [PFEIFER 1973], [FOOS 2006], [SONDAG 2006]), kann im Einzelfall aber auch anders sein.



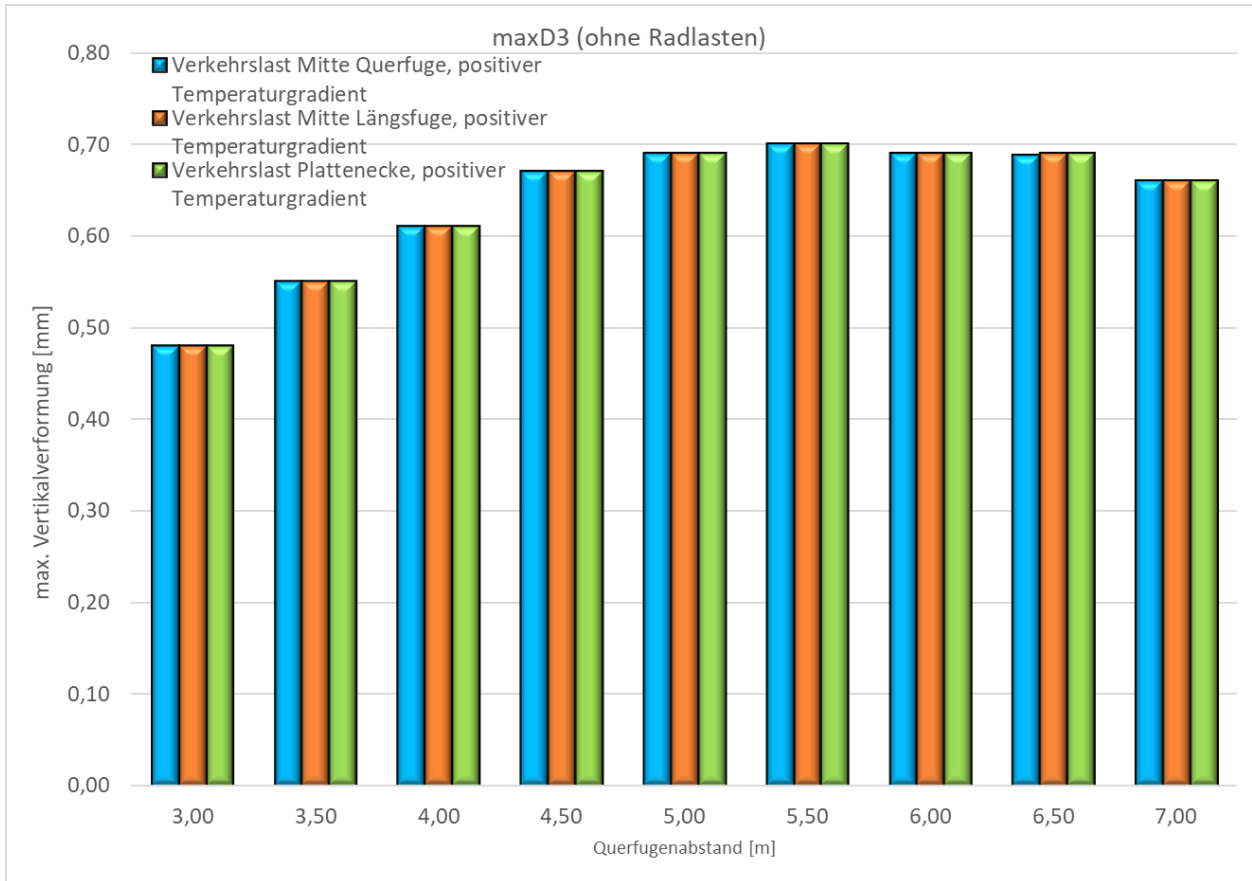
**Bild 3.75:** Maximale Hauptspannungen für den Temperaturlastfall 2

Bild 3.76 und Bild 3.77 zeigen die Entwicklung der maximalen Vertikalverformung in Abhängigkeit vom Querfugenabstand. Da die Verformung für den Zustand ohne Verkehrslast berechnet wurde, spielt der Verkehrslastfall hier naturgemäß keine Rolle.

Für den Temperaturlastfall 1 entspricht das Verformungsbild immer einer Aufwölbung. Die Maximalverformung realisiert sich also in Plattenmitte.

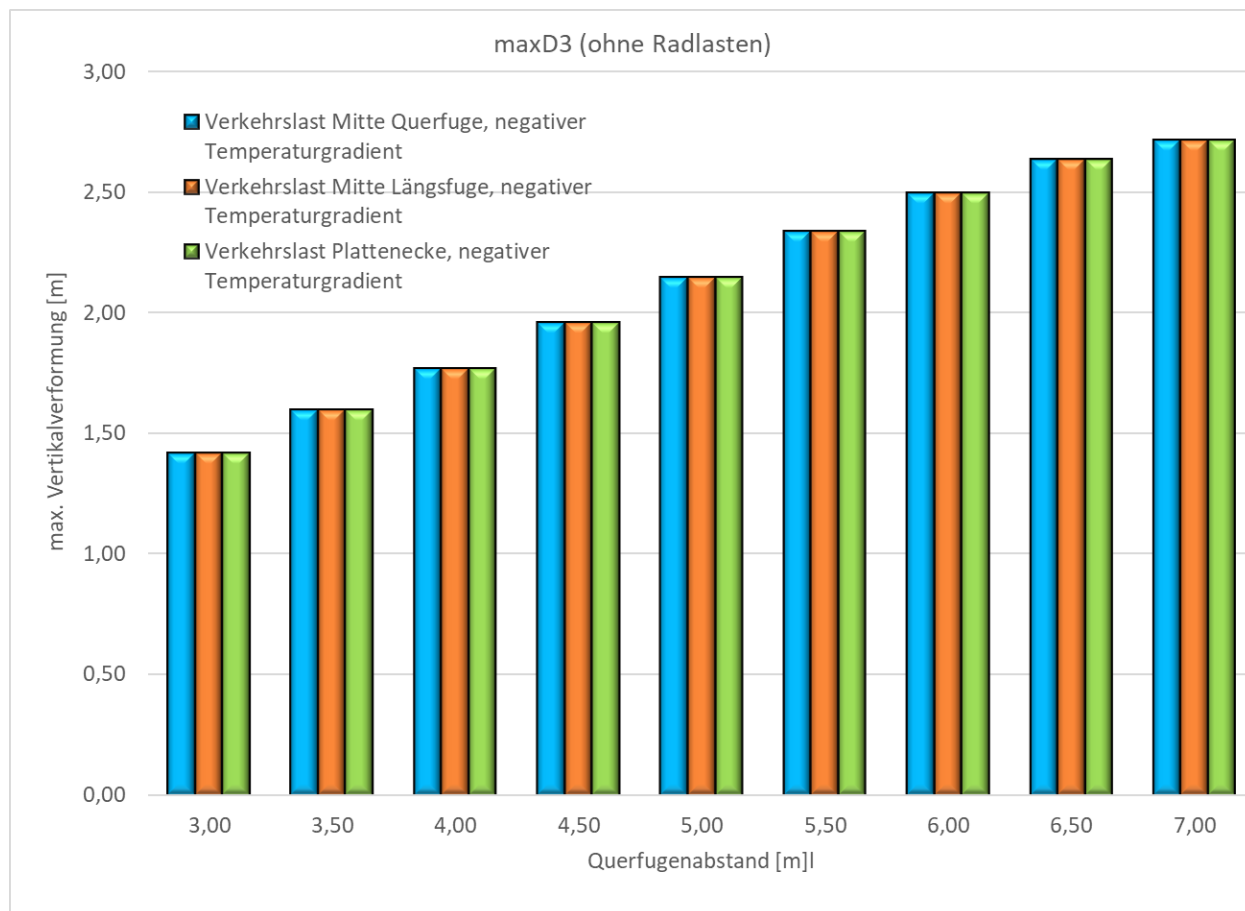
Die Auswertung der Ergebnisse zeigt eine stetige Zunahme der Vertikalverformung bis zu einer Plattenlänge von ca. 5 m (Bild 3.76). Danach kommt es zu einer Abflachung und dann sogar zu einer Abnahme. Die Plattenlänge nähert sich offenbar der kritischen Länge, für welche ein Durchsacken der Aufwölbung in Plattenmitte zu erwarten ist.

Bei kurzen Platten ist im TLF 1 der Einfluss der Plattenlänge auf der Verformung sehr stringent. Der Zusammenhang ist nahezu linear. Die Vergrößerung des Querfugenabstandes von 3,0 m auf 4,5 m bewirkt eine Erhöhung der maximalen Verformung um 40 %.



**Bild 3.76:** Maximale Vertikalverformung für den Temperaturlastfall 1

Für den Temperaturlastfall 2 ist die Aufschüsselung charakteristisch. Die Maximalverformung ist damit an den Plattenecken lokalisiert. In Bild 3.77 zeigt sich ein quasi-linearer Zusammenhang zwischen Plattenlänge und Vertikalverformung für nahezu den gesamten untersuchten Wertebereich. Nur für die längste untersuchte Platte (7,0 m) gibt es eine leichte Abflachung des Anstiegs. Das Maß der Plattenaufschüsselung nimmt also mit steigender Plattenlänge zu. Vom kleinsten (3,0 m) bis zum größten (7,0 m) untersuchten Querfugenabstand wurde eine Zunahme der maximalen Plattenverformung von 91 % festgestellt.



**Bild 3.77:** Maximale Vertikalverformung für den Temperaturlastfall 2

Die Untersuchung zeigt, dass die auf Erfahrungswerten basierende Regelplattenlänge von 5,0 m bezogen auf die mechanische Plattenbeanspruchung (Spannungen) tatsächlich ein günstiger Wert ist.

Im Hinblick auf die Verformungswerte sind aber kleinere Querfugenabstände zu favorisieren. Dies gilt besonders, da die vorhergehenden Analysen gezeigt haben, dass die Plattenverformung einen hohen Einfluss auf die Vertikalbeschleunigung der Räder hat.

Es wird deshalb empfohlen den Querfugenabstand auf 4,5 m oder 4,0 m zu verkürzen. In Tab. 3.13 sind die damit verbundenen Effekte zusammengestellt.

Querfugenabstand	maxPS1 [MPa]						maxD3 [mm]	
	TLF 1			TLF 2			TLF 1	TLF 2
	VLF 1	VLF 2	VLF 3	VLF 1	VLF 2	VLF 3		
4,0m	12,5%	9,2%	0,6%	3,5%	2,2%	7,6%	11,6%	17,7%
4,5m	11,3%	5,2%	0,6%	2,7%	1,1%	6,8%	2,9%	8,9%

**Tab. 3.13:** Anteilmäßige Reduzierung der Hauptspannungen bzw. Verformungen bei einer Veränderung des Querfugenabstandes von 5,0 m auf 4,0 m bzw. 4,5 m

### 3.6.4 Untersuchung des Einflusses von Hohlagerungen im Querfugenbereich

#### Zielstellung

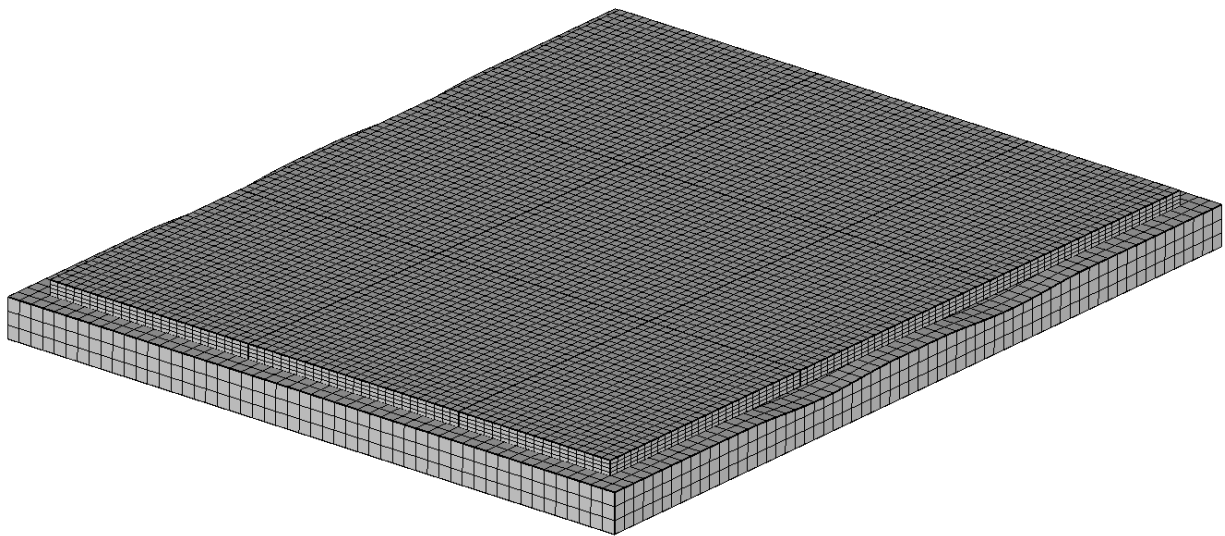
Ein verbreitetes Schadensmuster bei Betonstraßen ist die Erosion der Tragschicht im Bereich der Querfugen. Ausgangspunkt ist häufig eine unzureichende Abdichtung der Fugen. Eindringendes Wasser führt in Verbindung mit ständiger mechanischer und thermischer Wechselbeanspruchung zur allmählichen Schä-

digung des Tragschichtmaterials im Bereich unter der Fuge. Die durch die Radlasten induzierten Vertikalbewegungen der Plattenränder erzeugen eine Pumpwirkung welche zu einem allmählichen Austrag von feinkörnigem Material führt. Im Ergebnis bilden sich im Fugenbereich Hohlstellen unter den Platten.

Zielstellung dieser Untersuchung war es, den Einfluss dieser Hohlagerungen auf die Plattenbeanspruchung zu quantifizieren. Dazu wurde eine Serie von Simulationsrechnungen durchgeführt, in denen die Größe der angenommenen Hohlagerung variiert wurde.

#### Berechnungsmodell

Für die Berechnungen konnte das in Abschnitt 3.6.3 (Querfugenabstand) beschriebene FEM-Modell benutzt werden. Der Querfugenabstand betrug dabei 5 m. Unter den Querfugen wurde jeweils ein Hohlraum modelliert, indem in der Tragschicht an den entsprechenden Stellen Mulden definiert (siehe Bild 3.78) wurden.



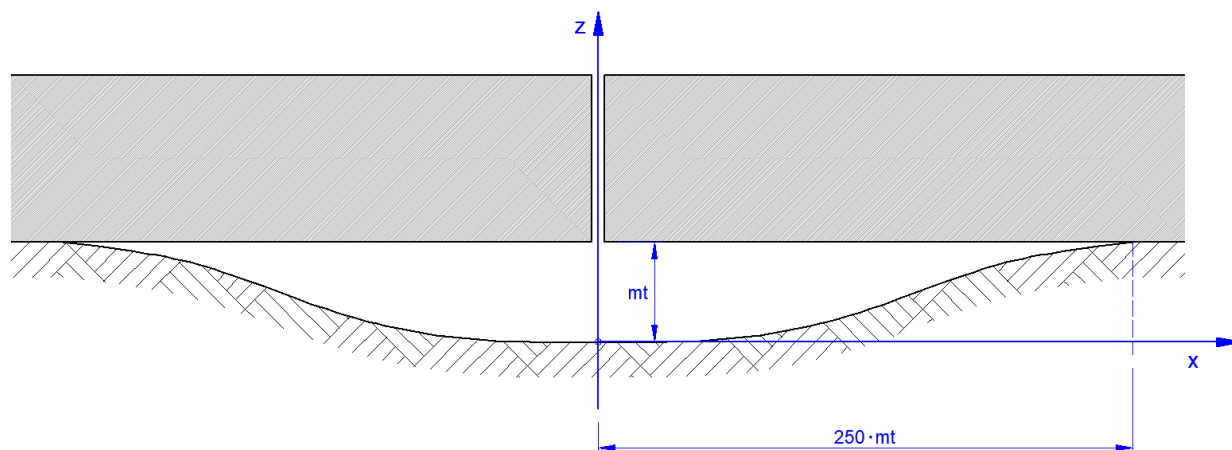
**Bild 3.78:** FEM-Modell mit Hohlräumen unter den Querfugen (Darstellung der Hohlräume 10-fach überhöht)

Die Form der Mulden wurde mit einer Sinusfunktion beschrieben (siehe Bild 3.79):

$$z(x) = mt \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{250 \cdot 2 \cdot mt} - \frac{\pi}{2}\right) - mt \quad (3-20)$$

mt - Muldentiefe

Entsprechend dieser Definition wächst die horizontale Ausdehnung der Mulde mit ihrer Tiefe. Die Muldenform bleibt unverändert.



**Bild 3.79:** Hohlraum im Fugenbereich

In Tab. 3.14 sind die untersuchten Muldenparameter zusammengefasst.

Berechnungsfall	Muldentiefe	max. Ausdehnung ab Querfuge
MT0	0 mm	-
MT1	1 mm	250 mm
MT2	2 mm	500 mm
MT3	3 mm	750 mm
MT4	4 mm	1000 mm
MT5	5 mm	1250 mm
MT6	6 mm	1500 mm

**Tab. 3.14:** Für die Berechnungen angesetzte Muldenparameter

Die Definition der Einwirkungen wurde aus der Studie zum Querfugenabstand (Abschnitt 3.6.3) übernommen. Dies betrifft die Verkehrslasten, wie auch die Temperatureinwirkungen.

Die Materialparameter wurden ebenfalls unverändert aus Abschnitt 3.6.3 übernommen.

### Berechnungsfälle

Die definierten Muldentiefen wurden jeweils mit zwei verschiedenen Temperaturzuständen und drei unterschiedlichen Laststellungen kombiniert. Damit ergaben sich insgesamt 42 Berechnungsfälle.

### Ergebnisse

Die im Berechnungsmodell definierte Mulde erzeugt einen Kragarm am Plattenrand, welcher nur partiell über die Verdübelung von der Nachbarplatte gestützt wird. Es ist zu vermuten, dass sich bei entsprechender Belastung des Kragarms relevante Zugspannungen an der Plattenoberseite herausbilden. Aus den Ergebnisdatensätzen wurden deshalb die Werte für die Maximalspannungen an der Plattenoberseite extrahiert. Außerdem sind die maximalen Hauptspannungen von Interesse, weil sie die Auslastung der Plattentragfähigkeit anzeigen.

In einem ersten Auswertungsschritt wurden nur die Ergebnisse ohne Berücksichtigung einer temperaturbedingten Verformung analysiert. Tab. 3.15 bis Tab. 3.17 zeigen die berechneten Werte für die maximale Hauptspannung und die maximale Spannung an der Plattenoberseite in Abhängigkeit von der Muldenausprägung.

VLF 1				
Berechnungsfall	Eigengewicht + Verkehrslast			
	maxPS1			max SXX an Oberseite
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag
	[MPa]			[MPa]
MT0	0,83	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,29
MT1	0,87	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,30
MT2	0,93	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,41
MT3	0,99	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,48
MT4	1,06	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,63
MT5	1,14	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,97
MT6	1,29	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	1,29

Tab. 3.15: Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 1 ohne Temperatureinfluss

VLF 2				
Berechnungsfall	Eigengewicht + Verkehrslast			
	maxPS1			max SXX an Oberseite
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag
	[MPa]			[MPa]
MT0	0,75	Unterseite Längsfuge unter Rad	x-Rtg.	0,17
MT1	0,73	Unterseite Längsfuge unter Rad	x-Rtg.	0,18
MT2	0,67	Unterseite Längsfuge unter Rad	x-Rtg.	0,24
MT3	0,65	Unterseite Plattenmitte unter Rad	y-Rtg.	0,32
MT4	0,65	Unterseite Plattenmitte unter Rad	y-Rtg.	0,53
MT5	0,72	Oberseite Längsfuge zwischen Rad	x-Rtg.	0,72
MT6	1,05	Oberseite Längsfuge zwischen Rad	x-Rtg.	1,05

Tab. 3.16: Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 2 ohne Temperatureinfluss

VLF 3				
Berechnungsfall	Eigengewicht + Verkehrslast			
	maxPS1			max SXX an Oberseite
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag
	[MPa]			[MPa]
MT0	0,81	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,39
MT1	0,85	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,39
MT2	0,90	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,50
MT3	0,94	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,67
MT4	1,00	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,82
MT5	1,07	Unterseite Querfuge unter Rad	y-Rtg.	0,91
MT6	1,33	Oberseite Längsfuge zwischen Rad	x-Rtg.	1,33

Tab. 3.17: Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 3 ohne Temperatureinfluss

In Bild 3.80 ist der Zusammenhang zwischen den maximalen Hauptspannungen und der Größe der Mulde unter der Querfuge visualisiert.

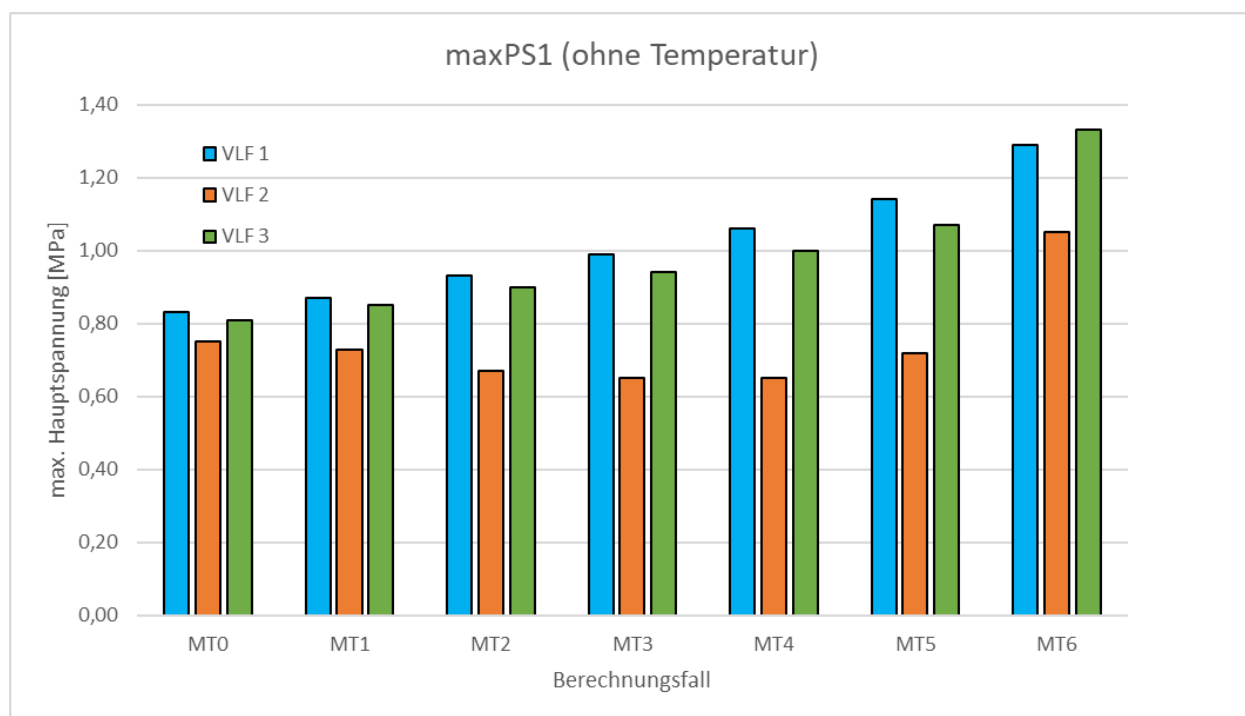
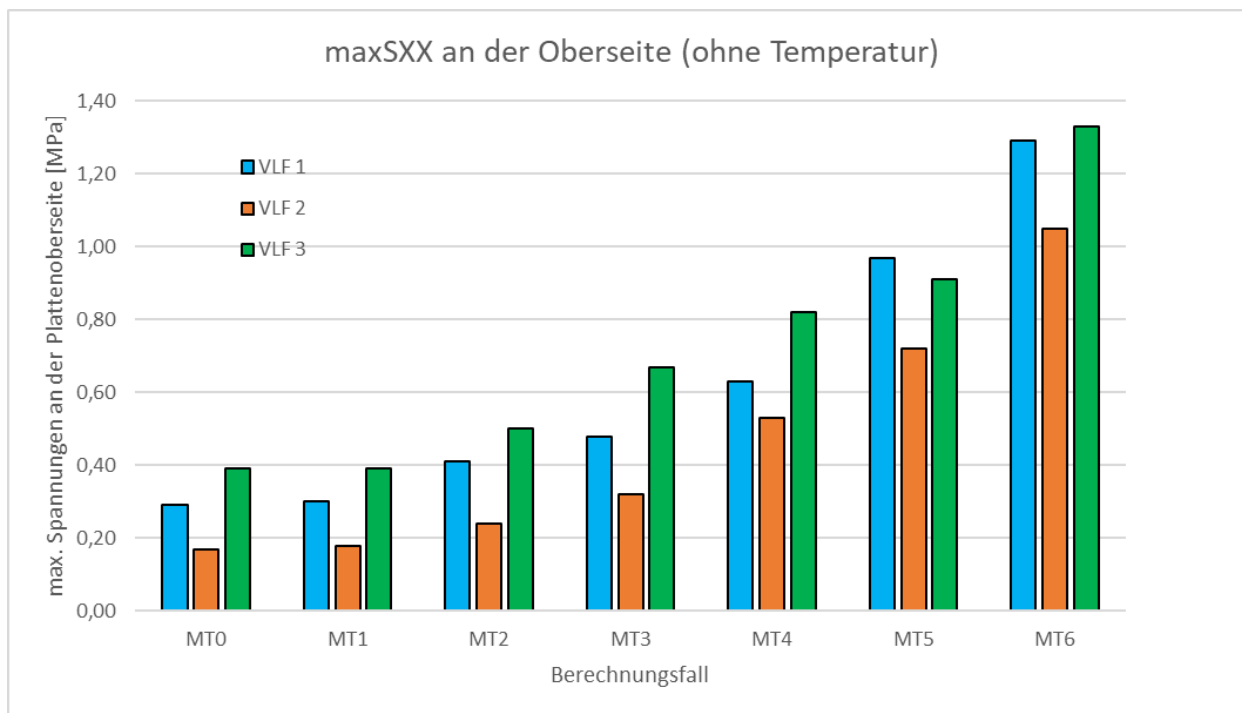


Bild 3.80: Maximale Hauptspannungen in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)



Generell ist der zu erwartende Trend erkennbar. Mit wachsender Muldengröße steigen die Spannungen an. Vom Ausgangsfall (kein Hohlraum) bis zum Maximalfall (6 mm Muldentiefe und 1,5 m beidseitige horizontale Ausdehnung) ergibt sich ein Anstieg von ca. 60 %. Für den Verkehrslastfall 2 ergibt sich zunächst eine Ermäßigung der maximalen Hauptspannungen. Dies ist dadurch erklärbar, dass diese Spannungen im Ausgangsfall an der Unterseite der Platte, in Plattenmitte lokalisiert sind. Der Hohlraum an der Quertuge erzeugt aber Zugspannungen an der Oberseite. Erst wenn diese Spannungen dominierend werden (ab Berechnungsfall MT5) steigt auch die maximale Hauptspannung.

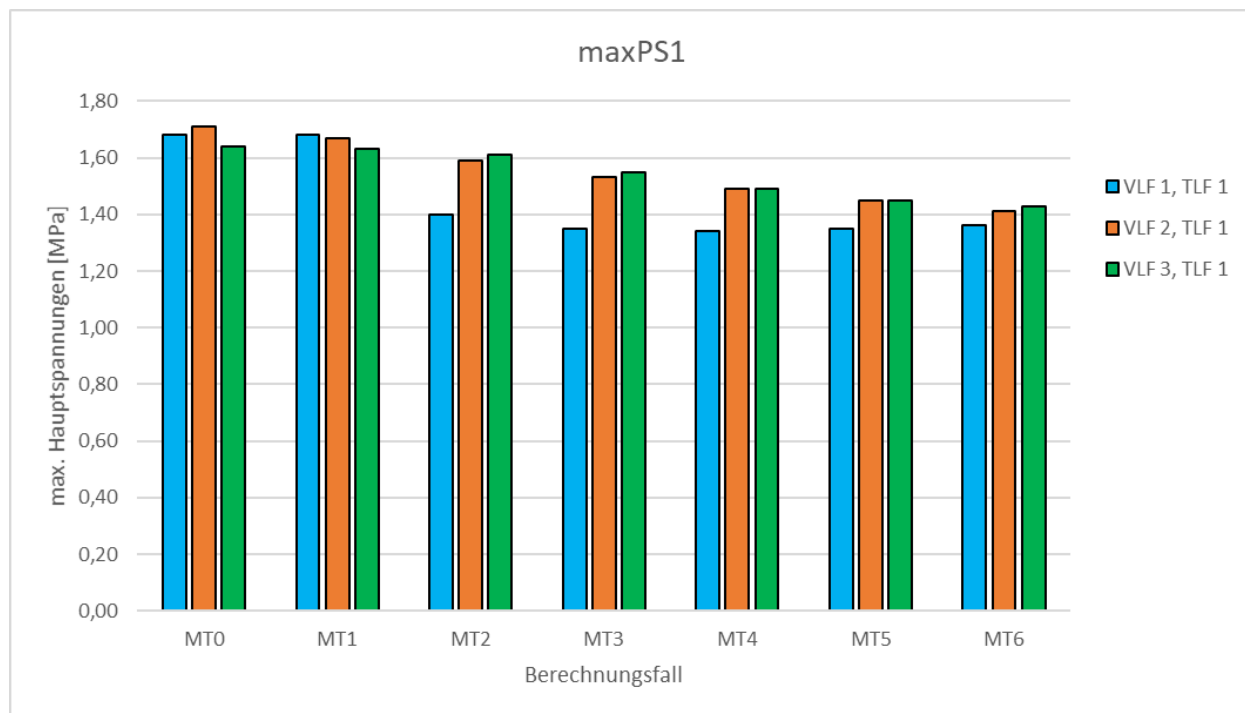
Der Zusammenhang zwischen den maximalen Zugspannungen an der Plattenoberseite und der Größe der Mulde unter der Quertuge ist in Bild 3.81 dargestellt.



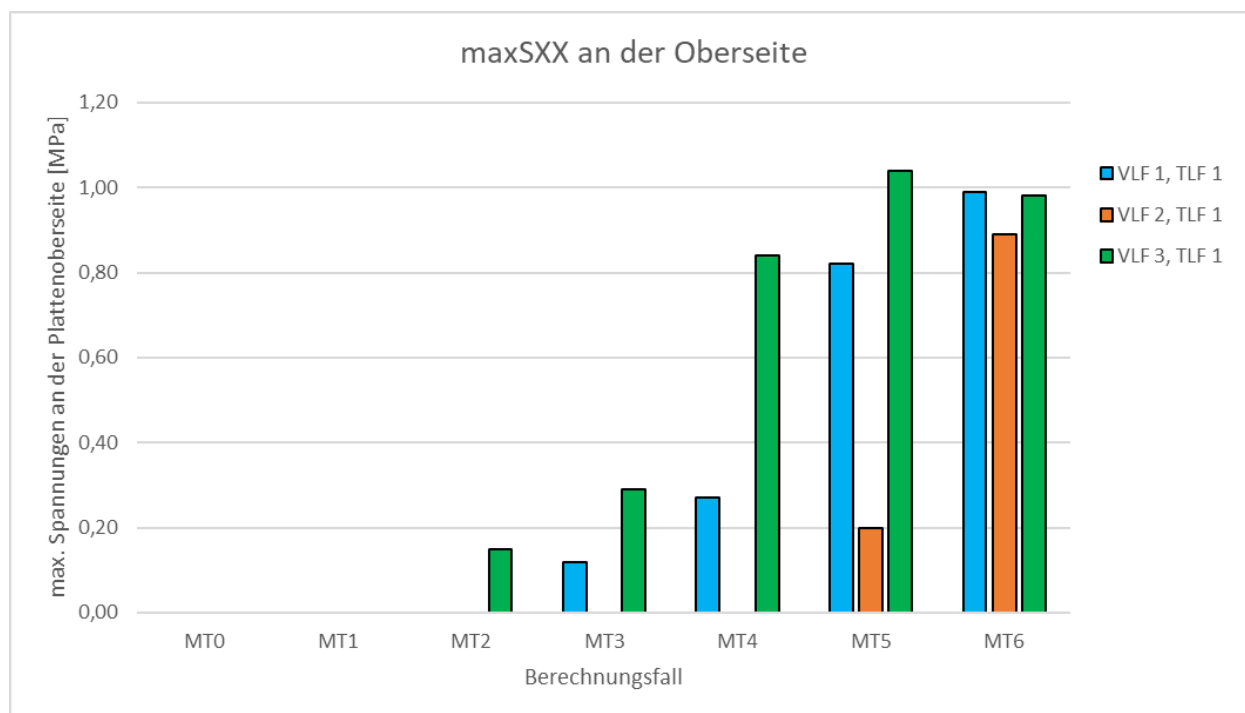
**Bild 3.81:** Maximale Spannungen an der Plattenoberseite in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)

Hier ist auffällig, dass eine kleine Mulde (1 mm Tiefe, 25 cm beidseitige horizontale Ausdehnung) offenbar noch keinen signifikanten Einfluss hat. Insgesamt ist aber, wie zu erwarten, ein steiler Spannungsanstieg zu verzeichnen. Für die untersuchten Fälle beträgt die maximale Steigerung mehr als 200 % bis 500 %.

Bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Temperatureinfluss und Verkehrslast ergibt sich ein differenziertes Bild. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Bild 3.82 bis Bild 3.85 dargestellt.

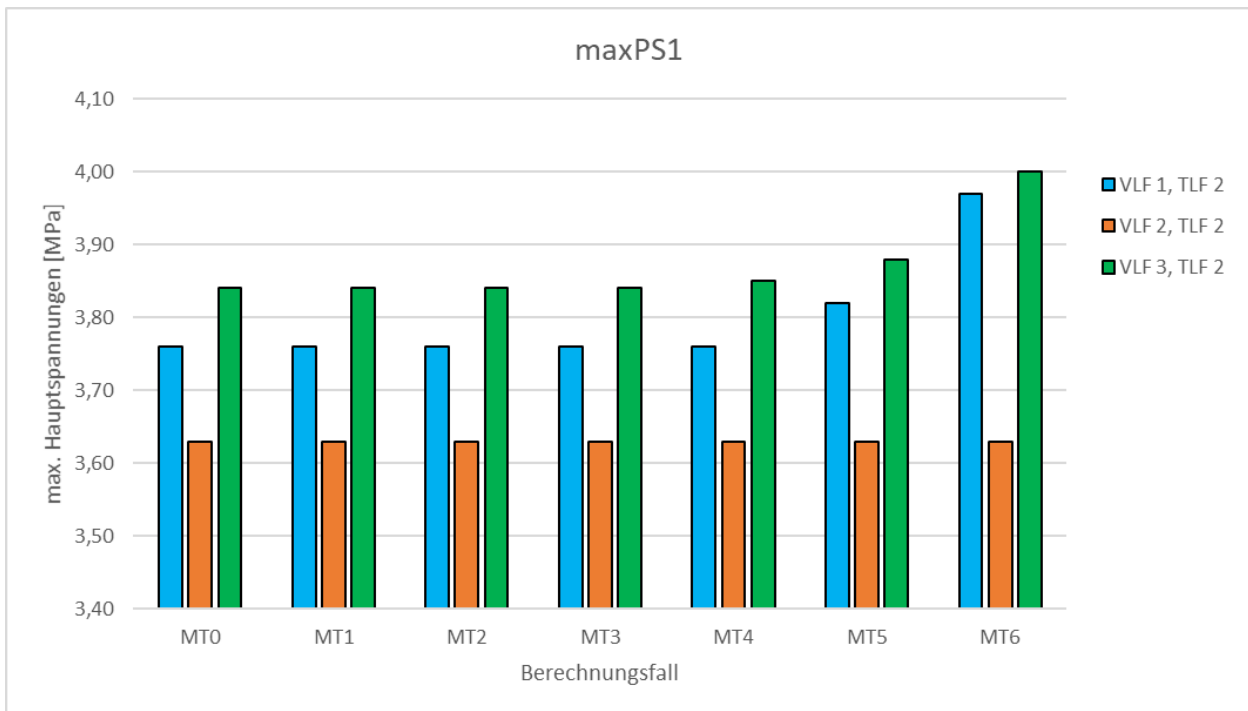


**Bild 3.82:** Maximale Hauptspannungen im TLF 1 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)

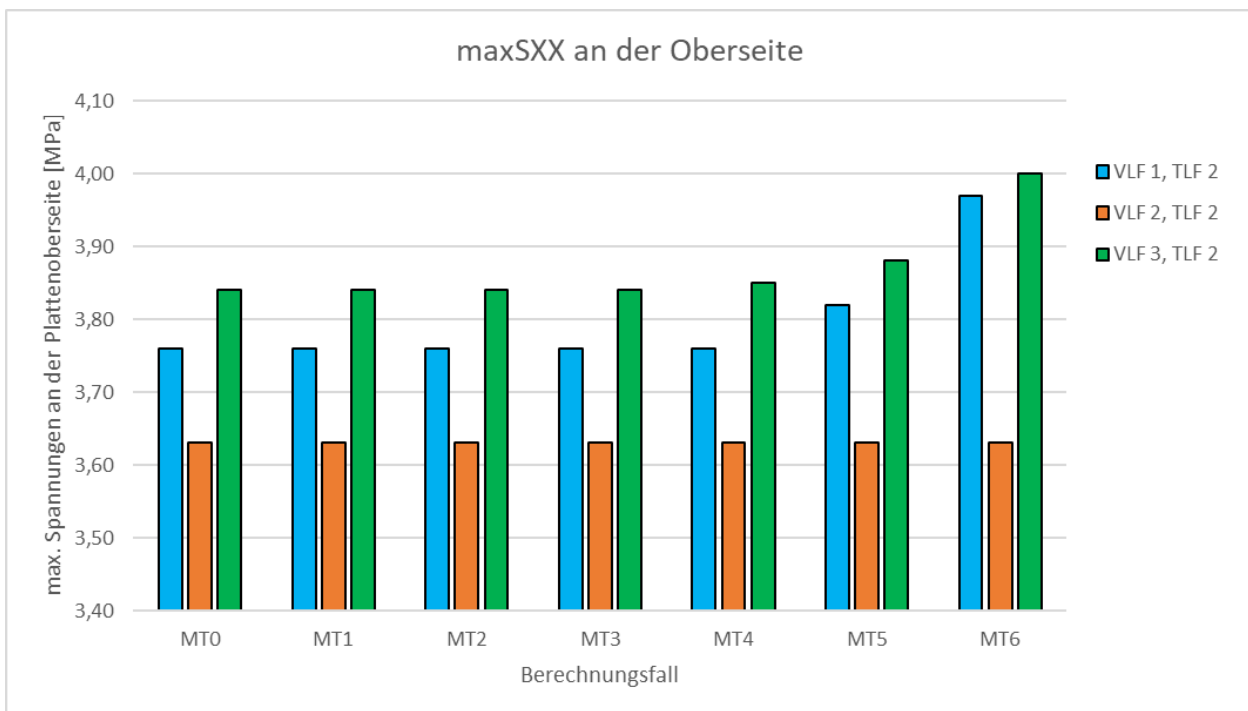


**Bild 3.83:** Maximale Spannungen an der Plattenoberseite im TLF 1 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)

Die Bilder lassen erkennen, dass es infolge der Hohllagerung an der Querfuge zu einer Ermäßigung der maximalen Hauptspannungen kommt (Bild 3.82). Dieser zunächst überraschende Befund ist dadurch erklärbar, dass sich im untersuchten Temperaturlastfall eine Aufwölbung der Platte herausbildet. Die Mulde an der Querfuge passt sich damit dem Verlauf der verformten Platte an. Die Auflagerungsfläche der Platte wird größer. Außerdem sind die durch die Verkehrslast erzeugten Zugspannungen immer an der Plattenunterseite lokalisiert. Der Kragarm an der Querfuge erzeugt aber Druckspannungen an der Unterseite. Die Zugspannungen an der Oberseite, welche durch den Kragarm bedingt sind, nehmen erst bei größeren Mulden relevante Werte an (Bild 3.83), werden aber nie maßgebend.



**Bild 3.84:** Maximale Hauptspannungen im TLF 2 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)



**Bild 3.85:** Maximale Spannungen an der Plattenoberseite im TLF 2 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)

Betrachtet man den Temperaturlastfall 2 so fällt auf, dass die Bilder für die maximale Hauptspannung und die maximale Spannung an der Oberseite identisch sind. Die maximale Hauptspannung befindet sich also immer an der Plattenoberseite. Die Hohlagerung an der Querfuge hat erst dann Auswirkungen, wenn die horizontale Ausdehnung der Mulde mehr als 1,0 m ab Querfuge erreicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Hohlagerungen an den Querfugen kaum Auswirkungen auf die maximale Plattenbeanspruchung haben. Dies ist zunächst überraschend, erklärt aber, warum es bei einer Erosion der Tragschicht im Fugenbereich nicht sofort zum Versagen der Platte kommt. Andererseits ist aber festzuhalten, dass es bei vielen Lastkonstellationen sehr wohl zu einer signifikanten Erhöhung der

Plattenbeanspruchung kommt (siehe Bild 3.80). Die Materialermüdung wird damit beschleunigt. Es ist auch darauf hinzuweisen, dass die negativen Auswirkungen der unvermeidlicher Weise ungleichmäßigen Ausbildung der Erosionsmulde hier unberücksichtigt blieben.

### 3.6.5 Untersuchung des Einflusses der Betonparameter

#### Zielstellung

Die Untersuchung sollte klären, wie sich die Materialparameter des Betons auf die Plattenbeanspruchung sowie auf die Plattenverformung auswirken. Zielstellung war es, die entsprechenden Zusammenhänge in verschiedenen Belastungssituationen genauer zu quantifizieren. Von besonderem Interesse waren in diesem Zusammenhang die Zwangsspannungen, welche durch eine Dehnungsbehinderung innerhalb des Betonvolumens entstehen. Ursächlich hierfür sind vor allem nichtlineare Temperaturverläufe im Betonquerschnitt und unterschiedliche Materialeigenschaften innerhalb einer Platte. Schwindverformungen wirken in gleichem Sinne, bleiben bei dieser Untersuchung aber unberücksichtigt.

Um die Problemlage zu analysieren, wurde eine Berechnungsserie mit einem geeigneten FEM-Modell durchgeführt, welche in ihrer Konzeption an Berechnungen anknüpft, die bereits im Rahmen einer Auftragsbearbeitung für die Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt wurden [RIWE 2019].

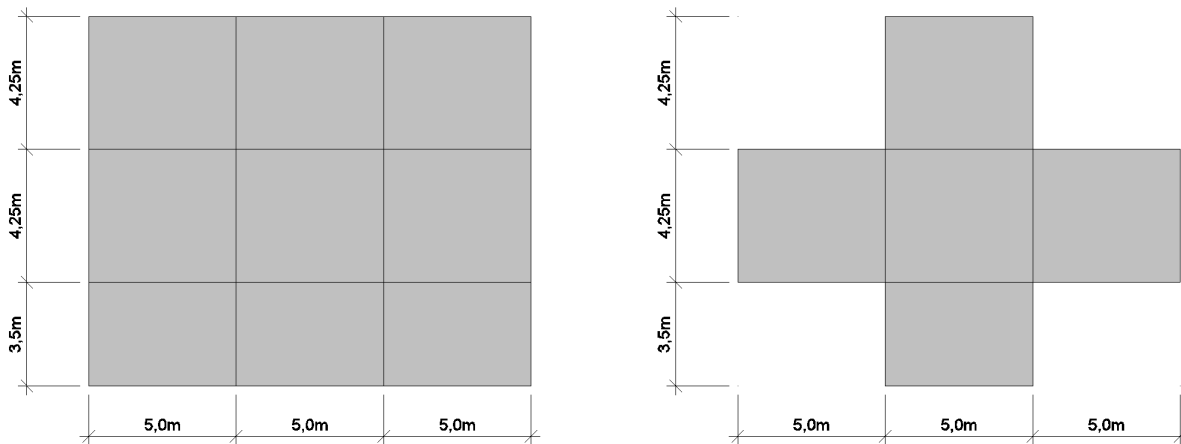
#### Berechnungsmodell

Die Zielstellung erforderte eine relativ detaillierte Abbildung des realen Plattensystems sowie der real vorkommenden Einwirkungen im Berechnungsmodell. Diese Anforderungen konnten nur mit einem Finite-Elemente-Volumenmodell erfüllt werden. Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus [RIWE 2019] sicherzustellen, wurden die Geometrie des Berechnungsmodells, die Werte der Materialparameter, die Definition der Temperaturzustände, sowie die Festlegung der Berechnungsfälle vollständig übernommen. Eine Weiterentwicklung des Modells erfolgte im Bereich der Quer- und Längsfugen. Hier wurden Anker und Dübel modelliert. Die Kombination der Fugenmodellierung aus [RIWE 2019] mit den modellierten Ankern und Dübeln ermöglichte es, auch Vergleichsrechnungen mit offener bzw. geschlossener Fuge durchzuführen. Zusätzlich zu den Berechnungen in [RIWE 2019] erfolgten Simulationsrechnungen mit einer real vorkommenden Verkehrslastkonstellation (3-fach-Achse).

Der hohe Detaillierungsgrad der Modellierung machte es erforderlich, das Gesamtmodell auf fünf Platten zu reduzieren. In [RIWE 2019] wurde nachgewiesen, dass die Berechnungsergebnisse dadurch nur unwesentlich verfälscht werden. Bild 3.86 zeigt das vollständige 9-Platten-Modell und das verwendete Modell mit fünf Platten. Man sieht, dass im Modell nur auf die Platten verzichtet wurde, welche lediglich indirekt mit der interessierenden Platte in der Mitte interagieren.

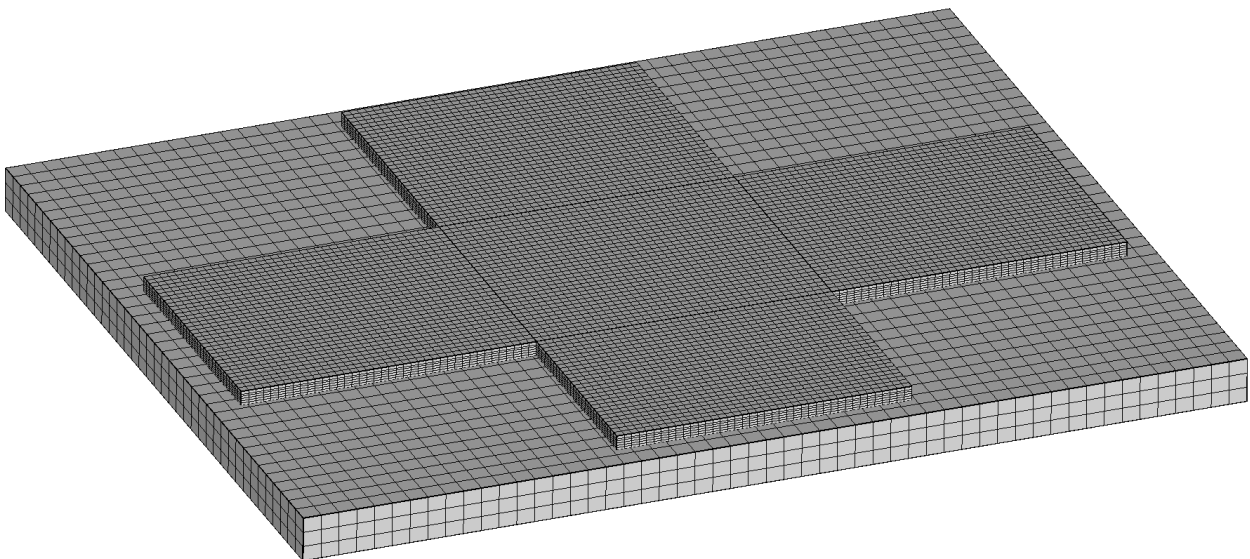
Für die Plattendicke wurden zwei Fälle unterschieden:

- (1) Dünne Platte: 24,5 cm Plattendicke
- (2) Dicke Platte: 30,5 cm Plattendicke.



**Bild 3.86:** Platten im vollständigen 9-Platten-Modell und im verwendeten 5-Platten-Modell (aus [RIWE 2019])

Für die Auflagerung der Platten wurde ein Volumenblock definiert, welcher jeweils über die Platten hinausreicht. Damit kann auch die mittragende Wirkung der angrenzenden Tragschichtbereiche erfasst werden (siehe Bild 3.87).

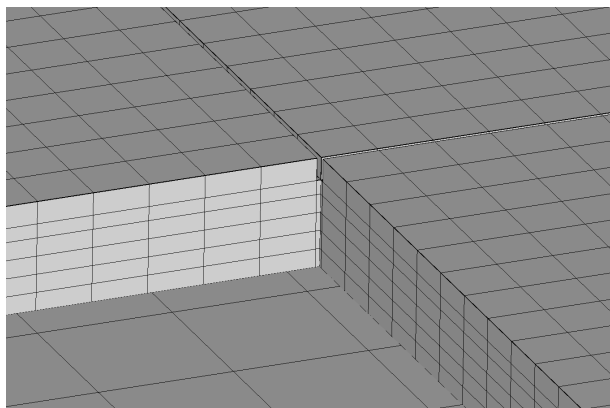


**Bild 3.87:** Verwendetes FEM-Volumenmodell (Platten und Unterbau)

Alle Volumenblöcke (Platten und Unterbau) wurden aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Für diese Elemente wird eine quadratische Ansatzfunktion verwendet. Damit ist die Gefahr des Auftretens von Loggingeffekten minimiert. Die Elementgeometrie wurde für alle Platten so festgelegt, dass bei einem noch akzeptablen Verhältnis der Kantenlängen (maximal 1:3) sechs Elemente übereinander angeordnet werden können.

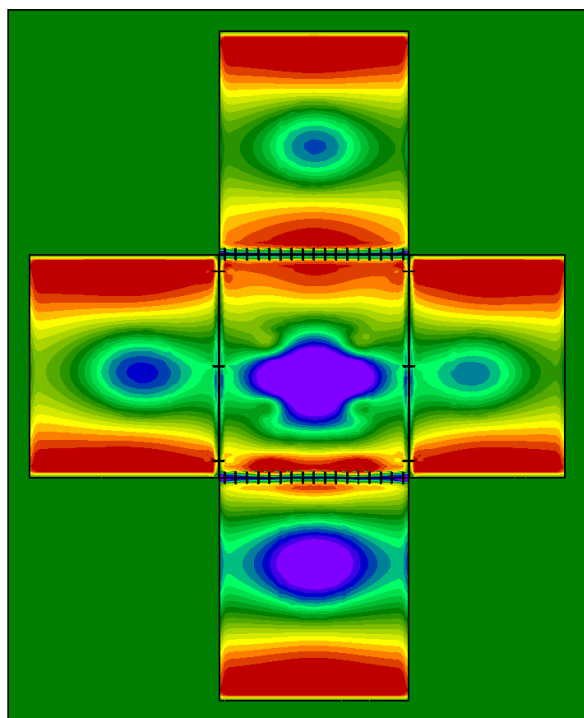
Die Interaktion zwischen Platten und Unterlage wird mit einer Kontaktformulierung gesteuert. Damit ist auch ein bereichsweises Abheben der Platte von der Unterlage im Modell möglich.

Die Fugenbereiche wurden zunächst mit Brickelementen modelliert, welche mit den modellierten Betonplatten fest verbunden sind. Den Fugenelementen wurde ein Material zugeordnet, welches nur Druckspannungen überträgt (COMPRESSION\_ONLY). Damit findet auch im Modell eine Fugenöffnung statt, sobald Zugspannungen in der Fuge auftreten. Der Fugenschnitt wurde im Modell ebenfalls abgebildet (Bild 3.88).



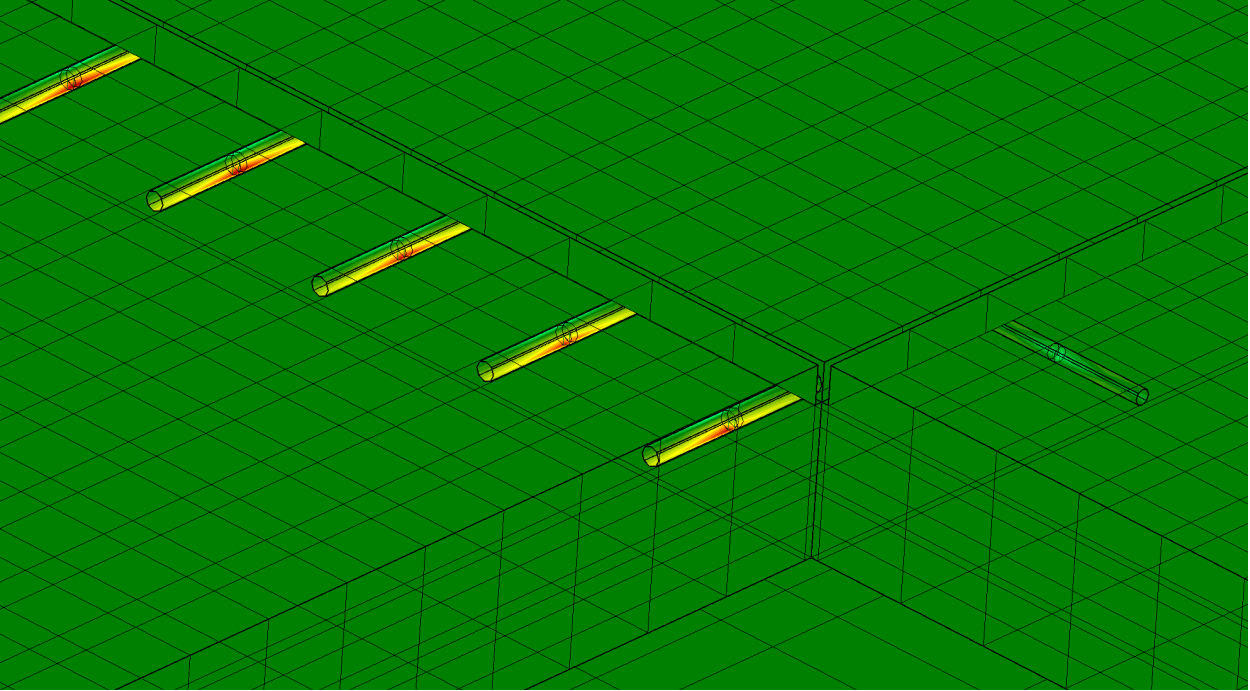
**Bild 3.88:** Fugenschnitt im Modell

In einem weiteren Schritt wurden Anker und Dübel modelliert (siehe Bild 3.89). Die Spannungsübertragung über die Fugenelemente kann als Wirkung der Rissverzahnung interpretiert werden. Damit ist es möglich, durch Variation der Parameter des Fugenmaterials eine offene Fuge (keine Wirkung der Rissverzahnung) und eine geschlossene Fuge (Wirksamkeit der Rissverzahnung) zu simulieren. Die Steifigkeit des Fugenmaterials wurde so kalibriert, dass sich für den Fall der geschlossenen Fuge ein Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung von ca. 97 % einstellt. Beim Ansatz eines praktisch unwirksamen Fugenmaterials (sehr weich) ergibt sich ein Wirksamkeitsindex von ca. 90 %. In Bild 3.89 werden die Spannungen an den Plattenunterseiten gezeigt. Die modellierten Anker und Dübel werden damit sichtbar.



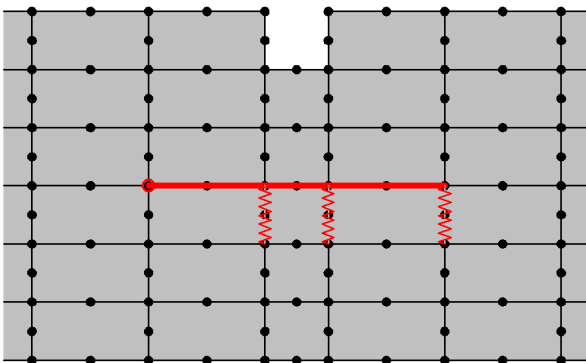
**Bild 3.89:** Gesamtmodell mit Darstellung der Spannungen an der Plattenunterseite

Bild 3.90 zeigt die Biegespannungen, welche im Dübelmaterial auftreten. Dargestellt sind die Spannungen in x-Richtung (Fahrtrichtung).



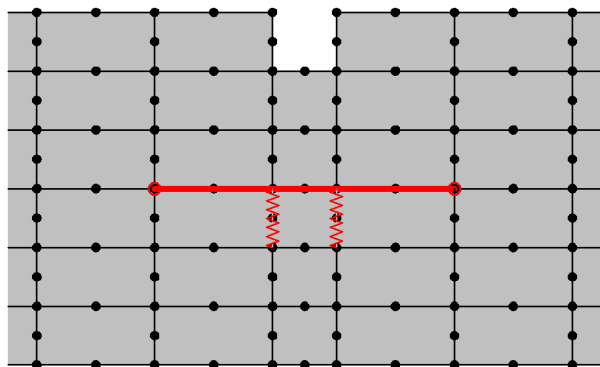
**Bild 3.90:** Dübelspannungen (Fahrtrichtung)

Die Dübels wurden mit 3-Knoten-Beam-Elementen modelliert. Dabei bilden jeweils drei Elemente einen Dübel. Die beiden äußeren Elemente befinden sich jeweils in den Platten und das mittlere Element im Fugenraum. Der erste Knoten eines modellierten Dübels ist jeweils ein Knoten aus der Betonplatte. Dübel und Platte sind an dieser Stelle also fest verbunden. Die weiteren Anfangs- bzw. Endknoten der Beam-Elemente eines Dübels gehören nicht zu den Knoten aus dem Plattenmodell. Sie sind aber jeweils durch ein senkrecht verlaufendes Federelement (SPRING-Element) mit einem Plattenknoten verbunden (siehe Bild 3.91). Das Dübelsmodell ist also an diesen Stellen nur vertikal gehalten. Der letzte Knoten ist über eine Feder, welche horizontal und quer zur Dübelschse ausgerichtet ist, wieder mit einem Plattenknoten verbunden. Damit überträgt der modellierte Dübel in Achsrichtung keine Kräfte von einer Platte zur nächsten. Die Federn wurden durch Definition einer hohen Federkonstante so steif ausgelegt, dass in Vertikalrichtung praktisch eine starre Kopplung zwischen Dübel und Platte gegeben ist.



**Bild 3.91:** Prinzip der Dübelsmodellierung (Fugenbreite überhöht)

Die Ankermodellierung erfolgte analog. Im Unterschied zum Dübelsmodell wurde hier aber an beiden Enden eine Verbindung zum Plattenbeton definiert (Bild 3.92). Der Anker überträgt damit in Achsrichtung Kräfte von einer Platte zur nächsten.



**Bild 3.92:** Prinzip der Ankermodellierung (Fugenbreite überhöht)

Für die Anker und Dübel wurden kreisrunde Querschnitte angenommen. Die Durchmesser waren so zu wählen, dass sich realistische Werte für die Querkraftübertragung (Wirksamkeitsindex) ergeben. Dies war für die in der Praxis zur Anwendung kommenden Durchmesser der Fall. Somit wurde für die Dübel ein Durchmesser von 2,5 cm und für die Anker ein Durchmesser von 2,0 cm angenommen.

Die so modellierten Anker und Dübel sind zwischen den Stützstellen (Endpunkte der Beam-Elemente) frei beweglich. Dies entspricht offensichtlich nicht den tatsächlichen Gegebenheiten bei einer Einbettung in den Beton. Auch ist die modellierte Fuge mit 10 mm unrealistisch breit. Beides führt dazu, dass die Dübel bzw. Anker im Modell weicher reagieren als die real eingebauten Bauteile. Andererseits führt die als starr angenommene Stützung an den Fugenrändern, welche die real vorhandenen Auflockerungszonen ignoriert, zu einer gewissen Kompensation dieses Effektes. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass mit dem Modell die realen Spannungszustände in Ankern und Dübeln berechnet werden können. Dafür sind detailliertere Modelle speziell für diese Situation erforderlich (siehe Abschnitt 3.6.7). Für die hier interessierende Problematik ist nur von Bedeutung, dass im Modell die Querkraft- und Momentenübertragung hinreichend genau abgebildet wird. Dies wurde erreicht, indem die Momentenübertragung mittels geeigneter Materialdefinition und Kerbschnittmodellierung auf einen kleinen Betrag beschränkt wurde und der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung durch die Wahl geeigneter Materialparameter des Fugenmaterials kalibriert wurde.

### Einwirkungen

Für das konzipierte Berechnungsmodell wurden Temperatur- und Verkehrseinwirkungen definiert. Dabei wurden die Einwirkungen so gewählt, dass ein möglichst deutlicher Einfluss der Materialparameter auf die Plattenbeanspruchung zu erwarten ist.

#### Temperatureinwirkung

Die Temperatureinwirkungen wurden aus [RIWE 2019] übernommen. Hier wurden drei Temperaturlastfälle unterschieden:

- (1) Schnelle Abkühlung (TLF 1)
- (2) Langsame Abkühlung (TLF 2)
- (3) Langsame Erwärmung (TLF 3)

Für alle drei Fälle wurde eine Folge von heißen Sommertagen als Ausgangspunkt angenommen, weil sich in dieser Situation die Temperaturverläufe mit den maximalen Auswirkungen auf die Plattenbeanspruchung einstellen. Typischerweise erfolgt an solchen Tagen in den Vormittagsstunden eine von der Plattenoberseite ausgehende Aufheizung des Betons. Diese Situation wird durch den dritten Temperaturlastfall repräsentiert. In den späten Nachmittagsstunden beginnt sich die Platte von der Oberseite ausgehend abzukühlen. Der dabei entstehende Temperaturverlauf wird durch den Temperaturlastfall (2) repräsentiert.

Der Temperaturverlauf (1) zeigt eine nur gelegentlich auftretende Situation, welche aber zu hohen Zwangsspannungen im Betonvolumen führt. Hier wird davon ausgegangen, dass die maximal aufgeheizte Betonoberfläche durch ein Regenereignis (z. B. ein sommerliches Gewitter) abgekühlt wird.



Um realitätsnahe Temperaturverläufe zu gewinnen, wurden thermische Simulationsrechnungen durchgeführt. Dafür wurden für mehrere aufeinanderfolgende Tage die folgenden Bedingungen vorgegeben:

- Standort: Berlin
- Jahreszeit: Juli
- Tagesgang Lufttemperatur: 18°C...32°C
- kein Niederschlag (Variante 1 und 2)
- am 6. Tag Niederschlag ab 14:00Uhr (Variante 3)
- Luftfeuchtigkeit: 60%
- Bewölkungsgrad 0,0%
- Wind 1,0m/s.

Für die Berechnung der Temperaturverläufe wurde ein Energiebilanzverfahren verwendet.

Die für die Temperaturberechnung relevanten Parameter wurden wie folgt angenommen:

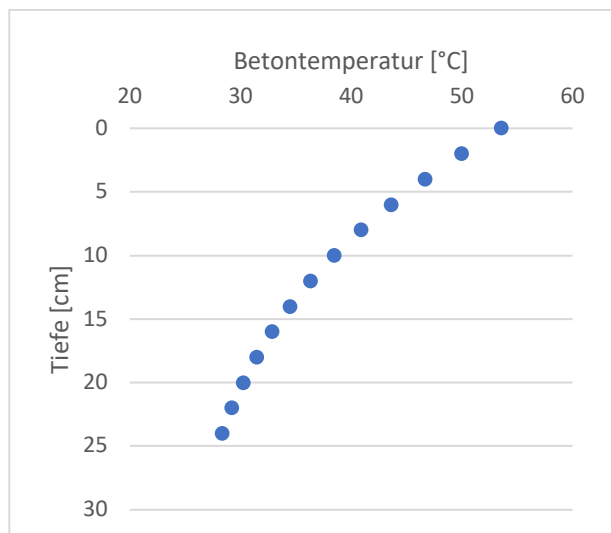
<i>Parameter</i>	Beton	Untere Tragschichten
<i>Dichte</i>	2400kg/m <sup>3</sup>	2000kg/m <sup>3</sup>
Wärmedehnzahl	11,5 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	10 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit	2,00 W/(m*K)	2,00 W/(m*K)
Spez. Wärmekapazität	0,95 kJ/(kg · K)	0,95 kJ/(kg · K)
Emissionskoeffizient für langwellige Strahlung	0,90	-
Reflexionszahl für langwellige Strahlung	0,05	-
Reflexionszahl für kurzwellige Strahlung	0,20	-

**Tab. 3.18:** Materialparameter für die Berechnung der Temperaturverläufe (aus [RIWE 2019])

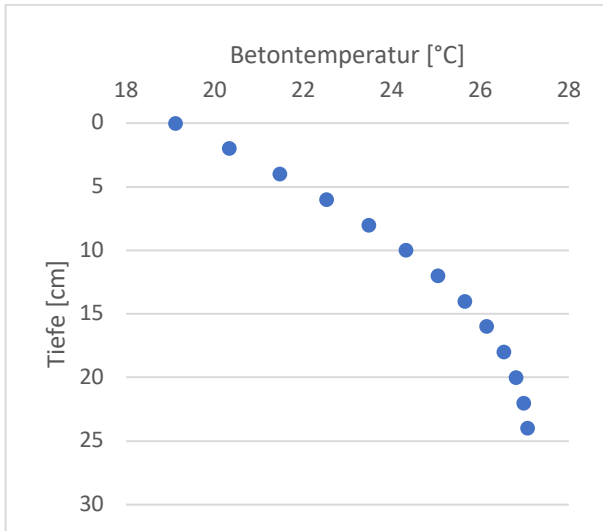
Die Temperatursimulationen ergeben die nachfolgend aufgeführten Temperaturverläufe:

Tiefe [cm]	Betontemperatur [°C]		
	langsame Erwärmung	langsame Abkühlung	schnelle Abkühlung
0	53,518	19,11	42,504
2	49,961	20,328	45,502
4	46,642	21,474	46,277
6	43,614	22,526	45,127
8	40,889	23,475	43,056
10	38,463	24,313	40,773
12	36,326	25,037	38,591
14	34,459	25,646	36,603
16	32,84	26,141	34,824
18	31,446	26,526	33,246
20	30,25	26,805	31,857
22	29,227	26,984	30,64
24	28,354	27,069	29,578

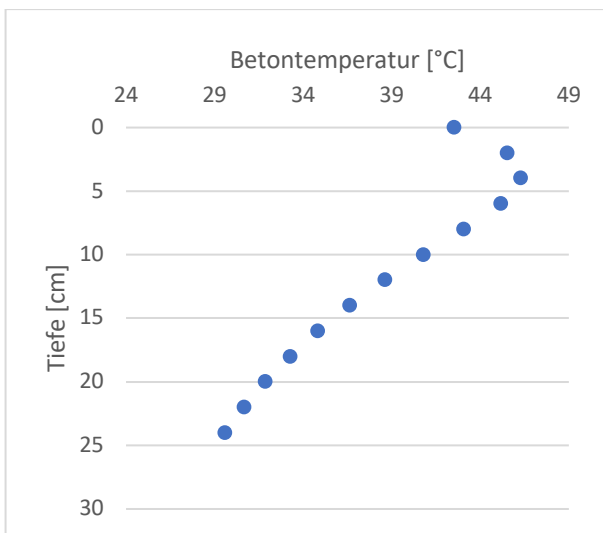
**Tab. 3.19:** Temperaturverläufe für die 24,5 cm dicke Betondecke (aus [RIWE 2019])



**Bild 3.93:** Temperaturverlauf für langsame Erwärmung und 24,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])



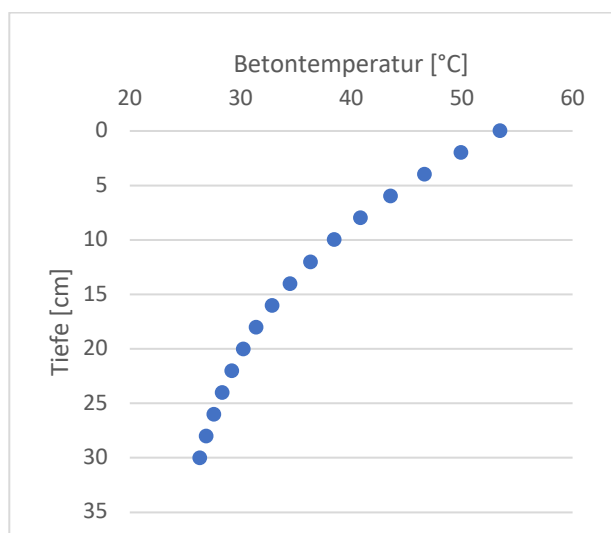
**Bild 3.94:** Temperaturverlauf für langsame Abkühlung und 24,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])



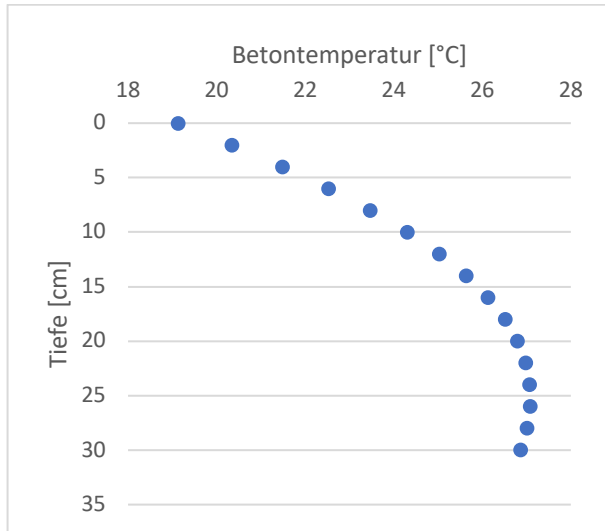
**Bild 3.95:** Temperaturverlauf für schneller Abkühlung und 24,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])

Tiefe [cm]	Betontemperatur [°C]		
	langsame Erwärmung	langsame Abkühlung	schnelle Abkühlung
0	53,433	19,129	42,458
2	49,889	20,34	45,445
4	46,581	21,48	46,215
6	43,564	22,527	45,067
8	40,848	23,47	43,001
10	38,429	24,304	40,723
12	36,297	25,025	38,545
14	34,433	25,631	36,559
16	32,816	26,126	34,78
18	31,422	26,511	33,2
20	30,224	26,792	31,806
22	29,196	26,974	30,581
24	28,315	27,065	29,509
26	27,557	27,072	28,57
28	26,901	27,002	27,747
30	26,327	26,864	27,024

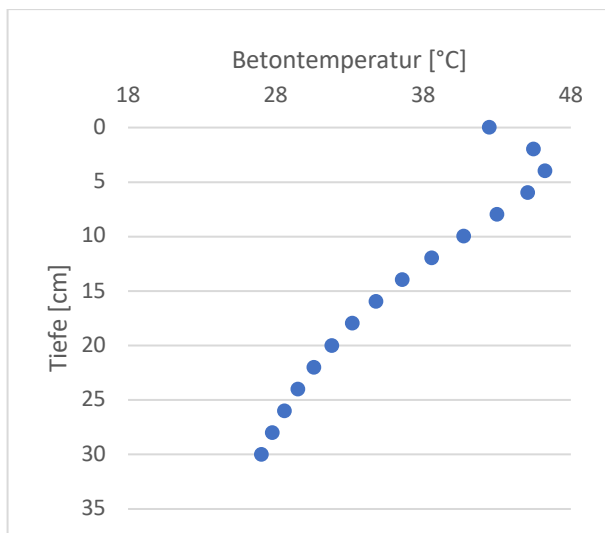
**Tab. 3.20:** Temperaturverläufe für die 30,5 cm dicke Betondecke (aus [RIWE 2019])



**Bild 3.96:** Temperaturverlauf für langsame Erwärmung und 30,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])



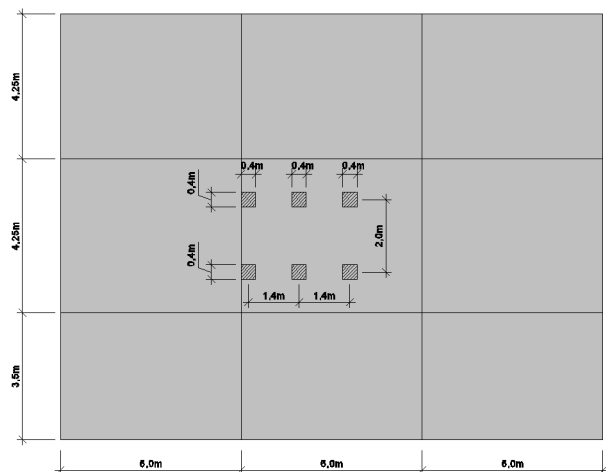
**Bild 3.97:** Temperaturverlauf für langsame Abkühlung und 30,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])



**Bild 3.98:** Temperaturverlauf für schnelle Abkühlung und 30,5 cm Deckendicke (aus [RIWE 2019])

### Verkehrslast

Als Verkehrslastansatz wurde die in der Praxis häufig vorkommende Dreifachachse angesetzt. Diese wurde in allen Berechnungslastfällen so positioniert, dass die erste Achse an der Querruge steht und das Fahrzeug, auf die Querrichtung bezogen, in Mitte Platte steht (Bild 3.99). Für alle Räder wurde eine Last von 50 kN vorgegeben, welche sich jeweils auf eine Aufstandsfläche von 0,4 m x 0,4 m verteilt.



**Bild 3.99:** Stellung Verkehrslast

### Material

Die Materialparameter wurden so angenommen, dass die Grenzen des üblichen Wertespektrums erfasst sind. Um der Zielstellung der Untersuchung gerecht zu werden, wurden zwei verschiedene Materialkombination definiert: Eine Materialkombination, welche besonders sensitiv auf Temperatureinwirkungen reagiert, und eine Materialkombination, welche diesbezüglich wenig sensitiv ist.

Materialkombination 1 (sensitiv):

- WDZ Beton:  $13,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- E-Modul Beton: 50.000 MPa

Materialkombination 2 (wenig sensitiv):

- WDZ Beton:  $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- E-Modul Beton: 25.000 MPa

Für die Anker und Dübel wurde als Material Bewehrungsstahl angenommen:

- E-Modul: 200.000 MPa

Eine Temperaturdehnung wurde für die Anker und Dübel nicht berücksichtigt.

### Berechnungsfälle

Analog zu [RIWE 2019] wurden die in Tab. 3.21 zusammengestellten Berechnungsfälle definiert. Zusätzlich zu den Berechnungen in [RIWE 2019] wurden die Verkehrslasten berücksichtigt.

Berechnungsfall	Parameter	Werte
V1	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V2	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V3	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V4	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V5	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V6	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V7	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V8	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V9	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V10	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10 <sup>-6</sup> /K

	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V11	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V12	Dicke Platte	24,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V13	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V14	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V15	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V16	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V17	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V18	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V19	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V20	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>



	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V21	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	13,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	9,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung
V22	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	schnelle Abkühlung
V23	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Abkühlung
V24	Dicke Platte	30,5 cm
	E-Modul Oberbeton	25.000 N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul Unterbeton	50.000 N/mm <sup>2</sup>
	Wärmedehnzahl Oberbeton	9,0 x 10-6/K
	Wärmedehnzahl Unterbeton	13,0 x 10-6/K
	Situation Temperaturverlauf	Langsame Erwärmung

Tab. 3.21: Berechnungsfälle (aus [RIWE 2019])

Weiterhin wurden Vergleichsrechnungen mit offener und mit geschlossener Fuge durchgeführt.

### Ergebnisse

In Tab. 3.22 und Tab. 3.23 sind zunächst die ausgewerteten Ergebnisse für die Lastfälle „Eigengewicht + Temperatur“ sowie „Eigengewicht + Temperatur + Verkehrslast“ zusammengestellt.

Berechnungsfall	Eigengewicht + Temperatur						
	maxPS1 (horizontal)			maxD3		maxSZZ	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle	Betrag	Stelle
	[MPa]			[mm]		[MPa]	
V1	4,25	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	3,50	Plattenmitte	1,24	Ecke
V2	3,10	Oberseite Plattenmitte	x/y-Rtg.	1,45	Ecke	1,03	Ecke
V3	2,45	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	4,94	Plattenmitte	0,15	unter Dübel
V4	1,60	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	1,25	Plattenmitte	0,41	Ecke
V5	1,48	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,49	Ecke	0,48	unter Anker
V6	3,63	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	2,10	Plattenmitte	0,21	unter Anker
V7	2,92	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	3,70	Plattenmitte	0,97	Ecke
V8	1,65	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,67	Ecke	0,53	unter Anker
V9	2,62	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	5,43	Plattenmitte	0,1	unter Dübel
V10	3,75	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	2,15	Plattenmitte	1,70	Ecke
V11	1,72	Oberseite Plattenmitte	x/y--Rtg.	1,22	Ecke	0,90	am Anker
V12	1,97	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	2,80	Plattenmitte	0,76	am Anker
V13	3,38	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	3,40	Plattenmitte	1,05	Ecke
V14	3,21	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	1,12	Ecke	1,19	unter Anker
V15	3,26	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	4,20	Plattenmitte	0,2	unter Dübel
V16	1,32	Oberseite Nähe Ecke	x-Rtg.	1,52	Plattenmitte	0,56	am Anker
V17	1,53	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,44	Ecke	0,53	am Anker
V18	1,82	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	2,00	Plattenmitte	0,35	unter Dübel
V19	2,98	Oberseite Rand	y-Rtg.	3,31	Plattenmitte	0,95	Ecke
V20	2,72	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,59	Ecke	0,60	am Anker
V21	3,50	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	4,39	Plattenmitte	0,2	unter Dübel

---

V22	3,52	Oberseite Nähe Ecke	x-Rtg.	2,51	Plattenmitte	1,71	Ecke
V23	1,77	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,95	Ecke	1,04	unter Anker
V24	2,89	Mitte Quer- schnitt Randbereich	y-Rtg.	2,97	Plattenmitte	0,78	am Anker

**Tab. 3.22:** Ergebnisse für den Lastfall Eigengewicht + Temperatur

Berechnungsfall	Eigengewicht + Temperatur + Verkehrslast				
	maxPS1			maxSZZ	
	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
	[MPa]			[MPa]	
V1	4,14	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	1,30	Ecke
V2	3,60	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	1,03	am Anker
V3	3,90	Mitte Querschnitt Randbereich	y-Rtg.	1,13	unter Dübel
V4	3,44	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x/y-Rtg.	0,60	Ecke
V5	1,73	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,45	am Anker
V6	2,99	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	1,20	unter Anker
V7	2,67	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	0,96	Ecke
V8	3,04	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,50	am Anker
V9	4,0	Mitte Querschnitt Randbereich	y-Rtg.	0,68	unter Anker
V10	5,50	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	1,80	über mittlerem Anker
V11	2,07	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	0,78	am Anker
V12	4,55	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	0,95	am Anker
V13	3,36	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	0,99	Ecke
V14	3,52	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	1,16	am Anker
V15	3,38	Mitte Querschnitt Randbereich	y-Rtg.	0,80	unter Dübel
V16	2,35	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	0,53	am Anker
V17	1,65	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	0,54	am Anker
V18	1,97	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	0,47	unter Anker
V19	2,95	Oberseite Ecke	y-Rtg.	1,18	Ecke
V20	2,93	Oberseite Plattenmitte	x/y-Rtg.	0,61	am Anker

V21	3,38	Mitte Querschnitt Randbereich	y-Rtg.	0,89	unter Dübel
V22	3,42	Oberseite Nähe Ecke	x/y-Rtg.	1,53	am Anker
V23	1,98	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	1,03	am Anker
V24	2,46	Unterseite Plattenmitte unter Rad	x-Rtg.	0,98	unter Anker

Tab. 3.23: Ergebnisse für den Lastfall Eigengewicht + Temperatur + Verkehrslast

Bild 3.100 zeigt den Einfluss der Plattendicke auf die maximalen Hauptspannungen im Lastfall „Eigenlast + Temperatur“.

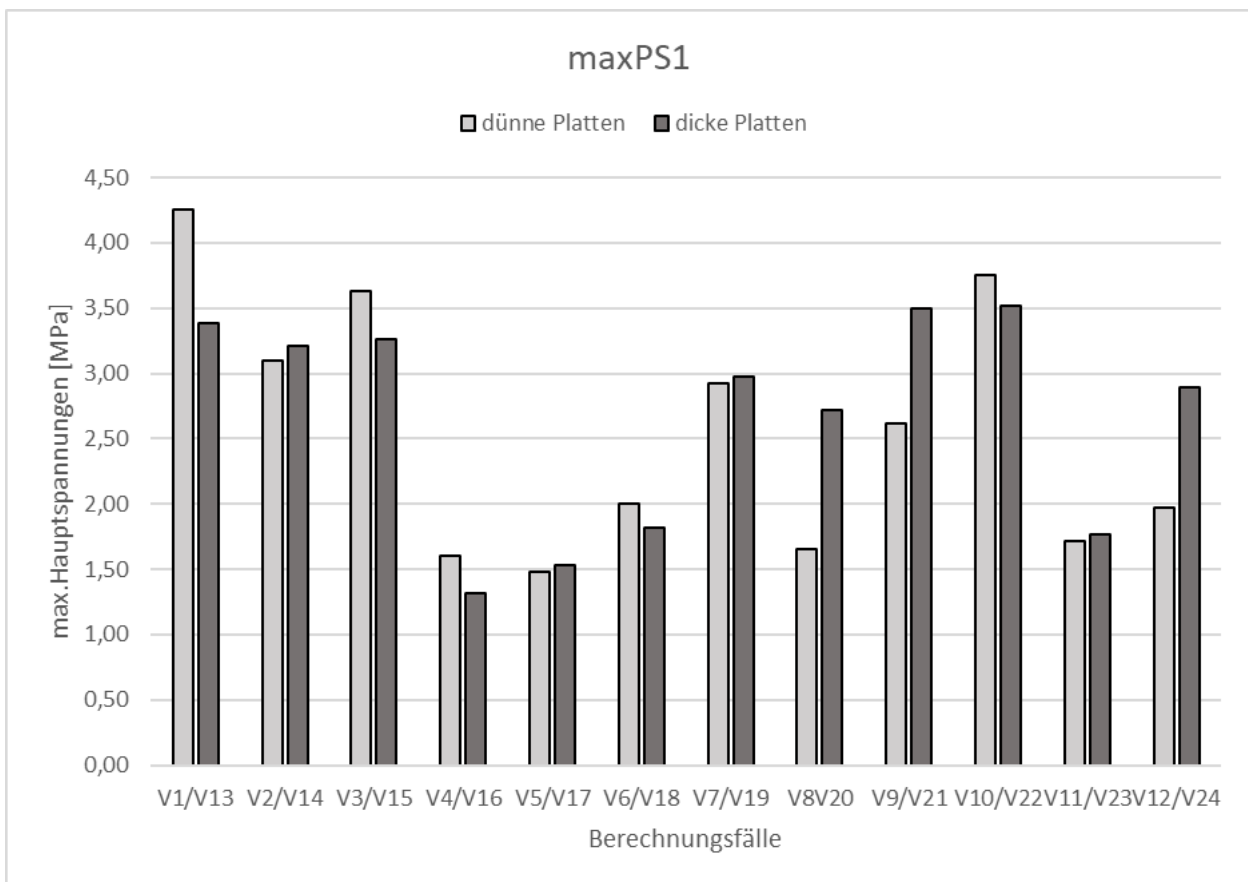
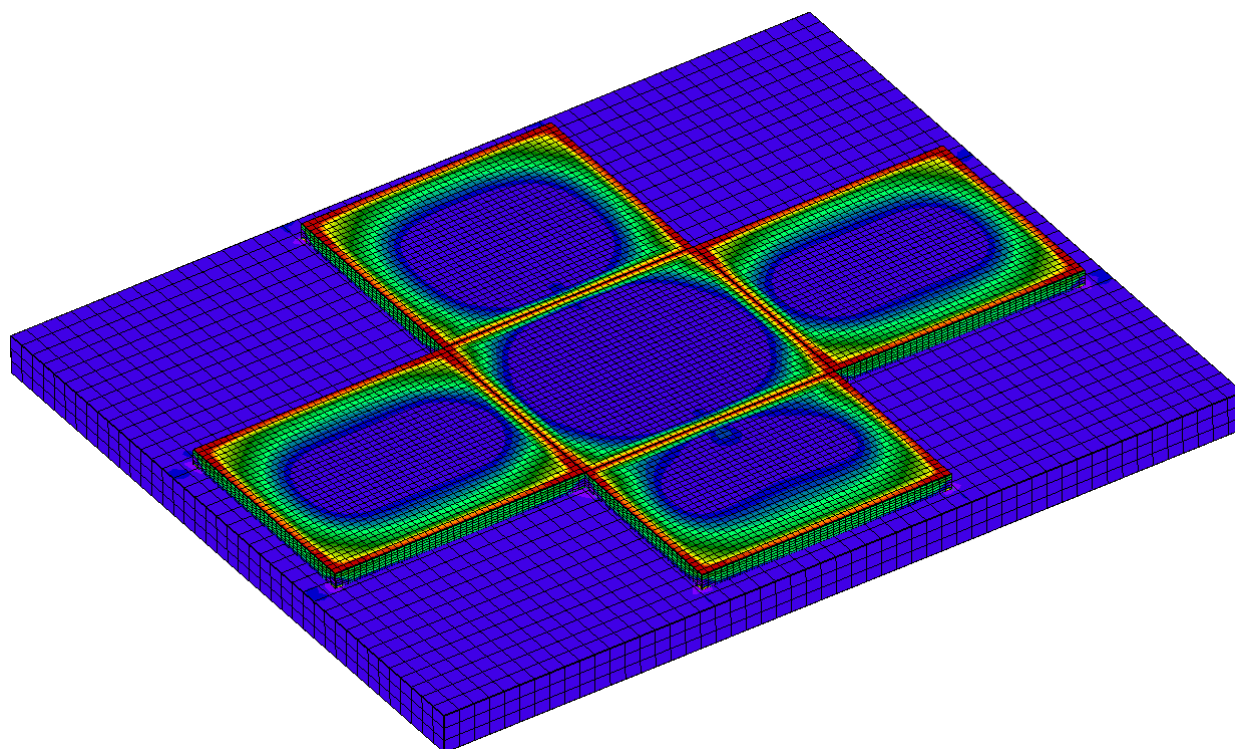


Bild 3.100: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur

Es ist zu erwarten, dass die Spannungen infolge Eigengewicht und temperaturbedingter Biegung bei dicken Platten geringer sind als bei dünnen Platten. In der Darstellung ist aber erkennbar, dass für dicke Platten teilweise deutlich größere maximale Hauptspannungen berechnet wurden. Dies sind zweifellos Auswirkungen der Zwangsspannungen, welche sich bei nichtlinearen Temperaturzuständen und inhomogenen Materialwerten herausbilden. Die Zwangsspannungen entstehen, wenn sich unterschiedliche Bereiche einer Betonplatte in ihrer Verformung gegenseitig behindern. Dies tritt z. B. auf, wenn sich die Materialeigenschaften oder der Temperaturgradient über den Plattenquerschnitt ändern. Die spannungserzeugenden Kräfte werden also nicht von außen in das System eingetragen, sondern im Plattenvolumen selbst produziert. Es ist zu erwarten, dass von einem größeren Volumen (dicke Platte) größere Kräfte erzeugt werden, als von einem kleineren Volumen (dünne Platte). Bei den hier untersuchten Berechnungsfällen waren teilweise die Materialparameter von Unter- und Oberbeton unterschiedlich definiert. Im Falle der dünnen Platte behindert der 5 cm dicke Oberbeton die Verformung des 19,5 cm dicken Unterbetons. Bei der dicken Platte ist der Oberbeton ebenfalls 5 cm dick und behindert die Verformung des jetzt 25,5 cm dicken Unterbetons.

Es ist offensichtlich, dass in diesem Fall größere Kräfte in den Oberbeton eingetragen werden und auch größere Spannungen entstehen. In Bild 3.101 sind die maximalen Hauptspannungen für den Berechnungsfall V19 visualisiert.

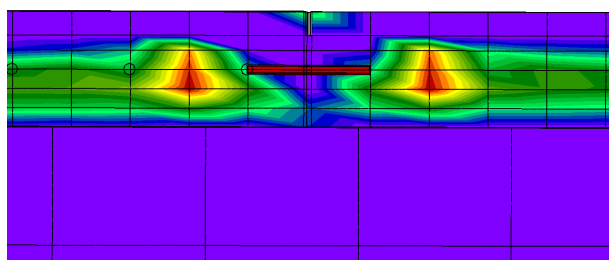


**Bild 3.101:** Maximale Hauptspannungen für den Berechnungsfall V19 (Eigengewicht + Temperatur)

Deutlich sind die Spannungsspitzen in den Randbereichen. Im Inneren der Plattenoberfläche werden die Zugspannungen durch die aus der Biegung resultierenden Druckspannungen überlagert.

In ihrer Gesamtheit zeigen die Ergebnisse, dass die Zwangsspannungen einen wesentlichen Einfluss auf die Plattenbeanspruchung haben. Eine Vernachlässigung dieser Spannungen bei der Dimensionierung, wie derzeit allgemein praktiziert, erscheint nicht gerechtfertigt.

In einzelnen Berechnungsfällen wurden Spannungen maßgebend, die durch die Anker bzw. Dübel induziert wurden. Bild 3.102 zeigt ein solches Beispiel.

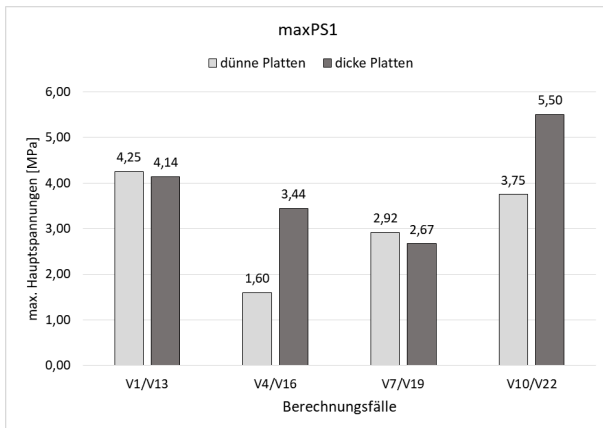


**Bild 3.102:** Spannungsspitze am Ende eines Ankers

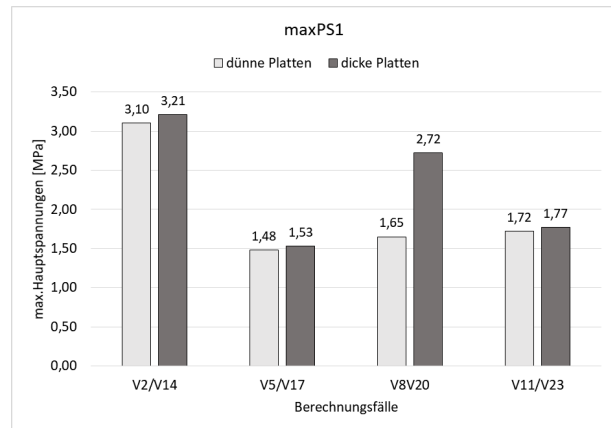
Hier werden die Zugkräfte aus dem Anker in den Beton übertragen. In Anbetracht der weiter oben beschriebenen Idealisierungen, welche mit der Modellierung der Anker und Dübel einhergingen, ist es fraglich, ob die berechnete Spannungsspitze wirklich in der berechneten Größenordnung auftritt. Andererseits ist die Übertragung der Zugkräfte in den Beton unzweifelhaft real vorhanden. Bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse wurde die beschriebene Spannungsspitze berücksichtigt. Ob dies letztendlich korrekt ist,

lässt sich auf der Basis der vorliegenden Informationen nicht beantworten. Da die untersuchte Fragestellung auf den Einfluss der Materialparameter abzielt, ist es aber letztendlich entscheidend, dass die Auswertungen immer nach gleichen Prinzipien erfolgen. Dies wurde realisiert.

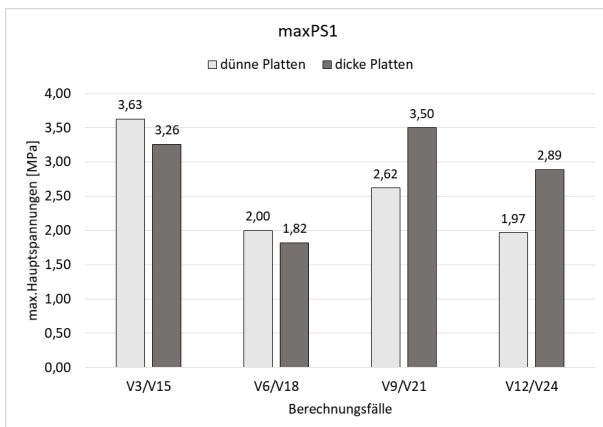
In den folgenden Bildern werden die maximalen Hauptspannungen aus Berechnungslastfällen gegenübergestellt, welche sich nur durch die Materialparameter unterscheiden, also jeweils identische Temperaturzustände aufweisen.



**Bild 3.103:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1



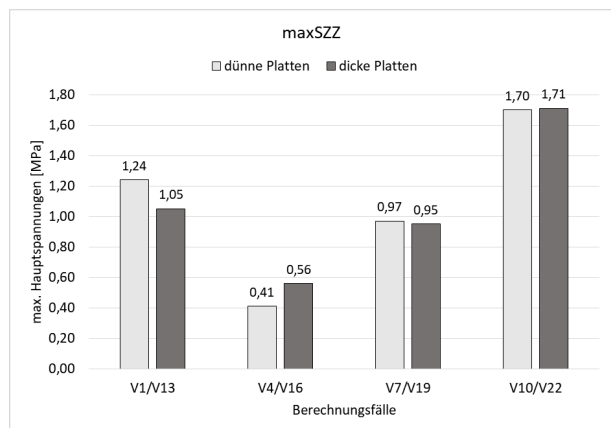
**Bild 3.104:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2



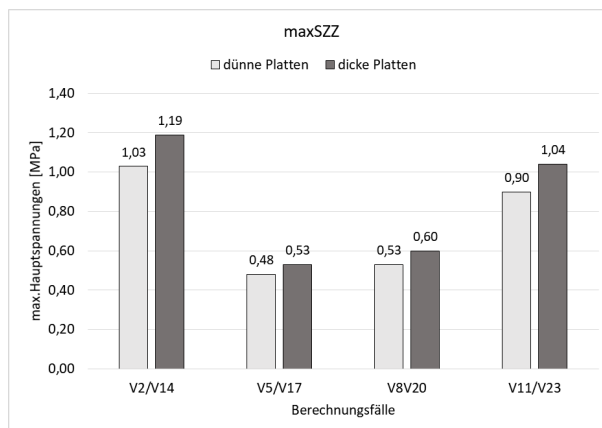
**Bild 3.105:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

Es ist deutlich, dass die Materialparameter einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungen haben. Ein temperatursensitives Material kann zu einer Erhöhung der maximalen Hauptspannungen um über 100 % führen (vgl. z. B.: V1 / V4). Auch hier ist festzuhalten, dass dieser Effekt zum größten Teil durch die Zwangsspannungen bewirkt wird. Zu besonders hohen Spannungen führt der Temperaturlastfall 1. Als besonders ungünstig erweist es sich, wenn der Unterbeton temperatursensitiver ist als der Oberbeton (siehe V22).

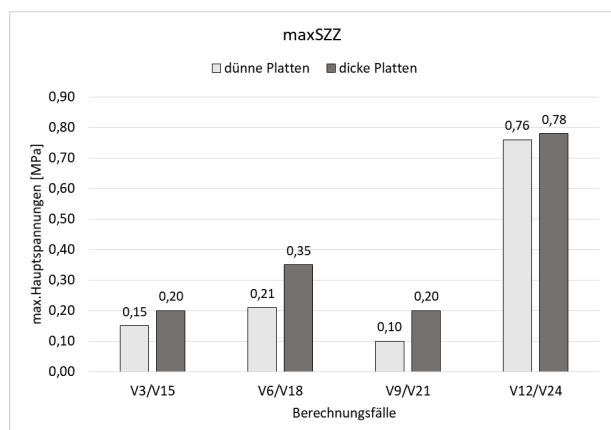
Eine analoge Auswertung für die maximalen Vertikalspannungen ist in Bild 3.106 bis Bild 3.108 visualisiert.



**Bild 3.106:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1



**Bild 3.107:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2

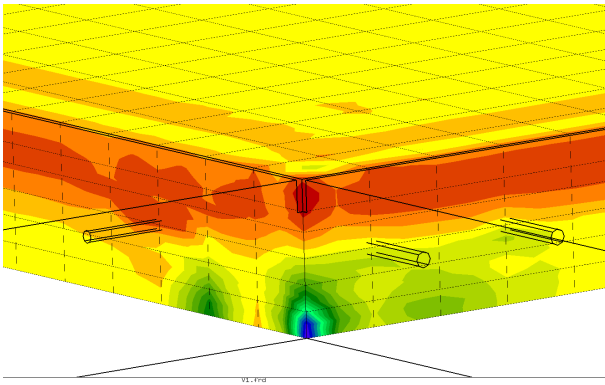


**Bild 3.108:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

Hier zeigt sich ebenfalls ein großer Einfluss der Materialparameter. Die Vertikalspannungen, welche fast nur aus Zwangsspannungen resultieren sind stark von E-Modul und Wärmedehnzahl des Betons abhängig. Der Spannungsunterschied kann mehrere 100 % betragen. Besonders hohe Werte liefert der Temperaturlastfall 1 (schnelle Abkühlung). Hier führt die Umkehrung des Temperaturgradienten im oberen Bereich dazu, dass der Oberbeton ein andere Verformungsfigur (Aufschüsselung) anstrebt als der Unterbeton (Aufwölbung). Damit kommt es am Plattenrand zwangsläufig zu positiven Vertikalspannungen. Dies gilt besonders für den Eckbereich. Der Effekt wird noch verstärkt, wenn der Unterbeton temperatursensitiver ist als der Oberbeton. Da entsprechend Zwangsbeanspruchungen aus Temperatur- und Schwindenfluss auch bereits im Erhärtungsprozess des Betons auftreten, kann es sein, dass entsprechende Spannungen entstehen, welche die noch geringen Betonfestigkeitswerte überschreiten. Es wird vermutet, dass Delaminationsrisse, welche in der Praxis beobachtet wurden, hier ihre Ursache haben.

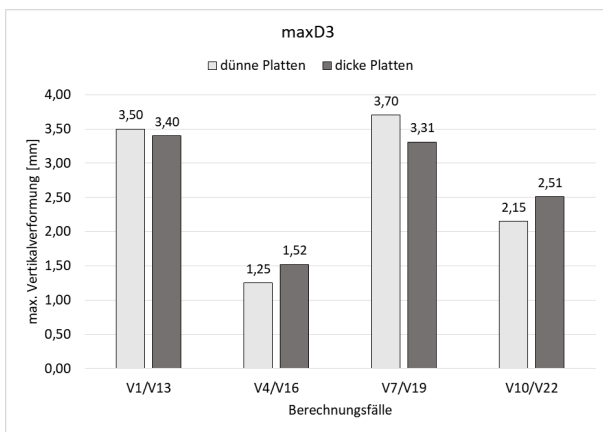
In Bild 3.109 wird beispielhaft das beschriebene Spannungsbild im Rand- und Eckbereich gezeigt.



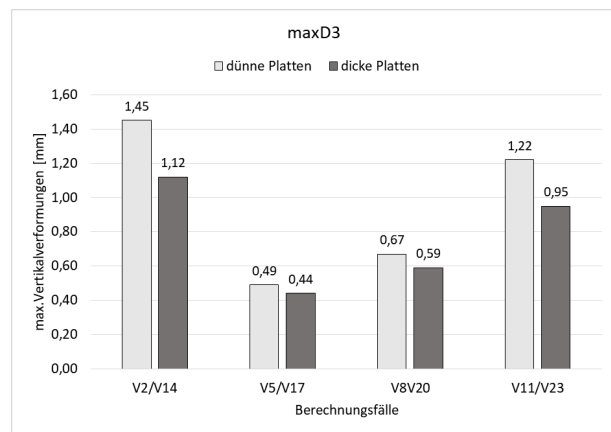


**Bild 3.109:** Vertikalspannungen im Randbereich der Platte (V1, Eigengewicht + Temperatur)

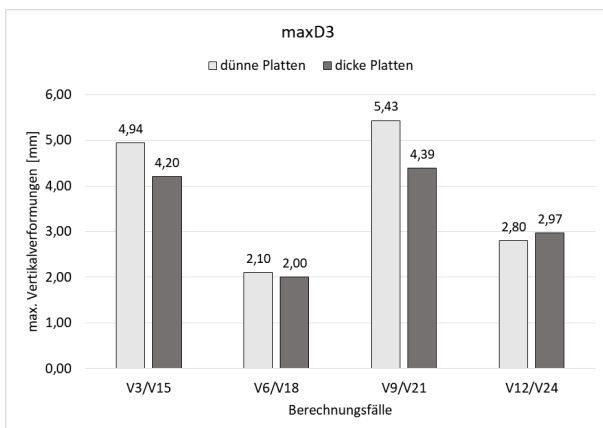
Bild 3.110 bis Bild 3.112 zeigen den Einfluss der Materialparameter auf die Plattenverformung.



**Bild 3.110:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1



**Bild 3.111:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2

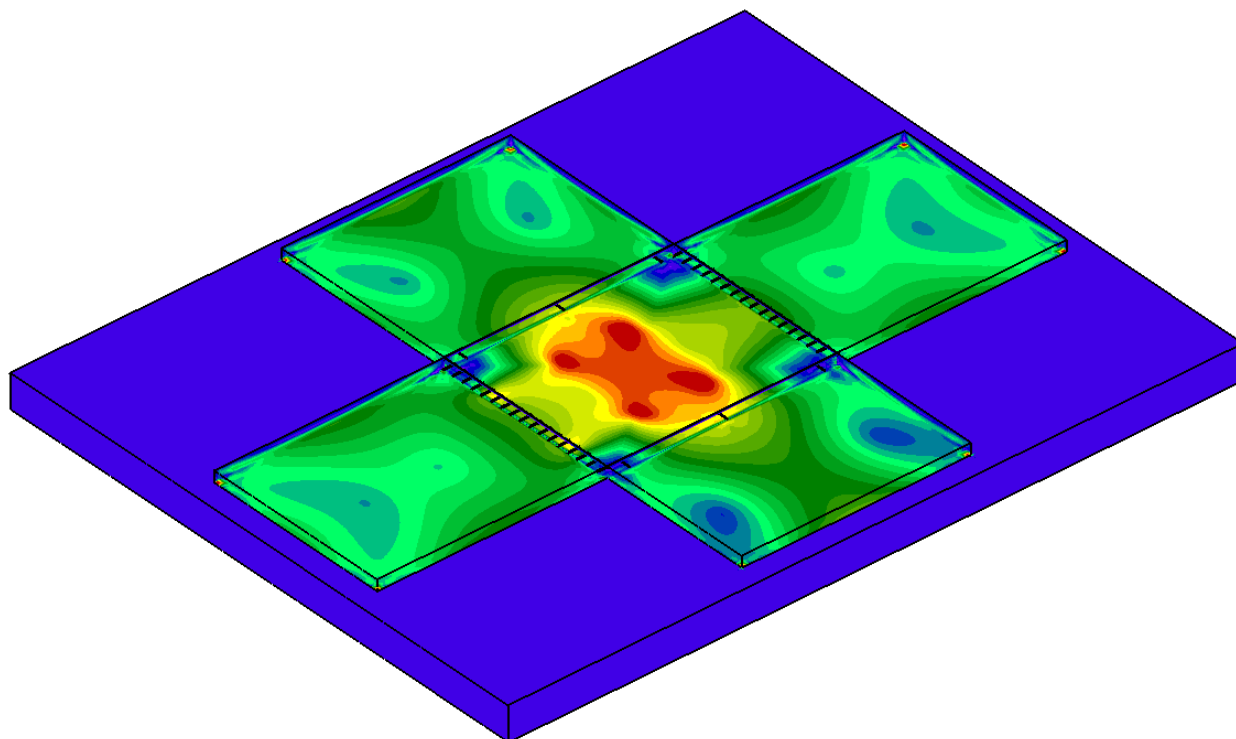


**Bild 3.112:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

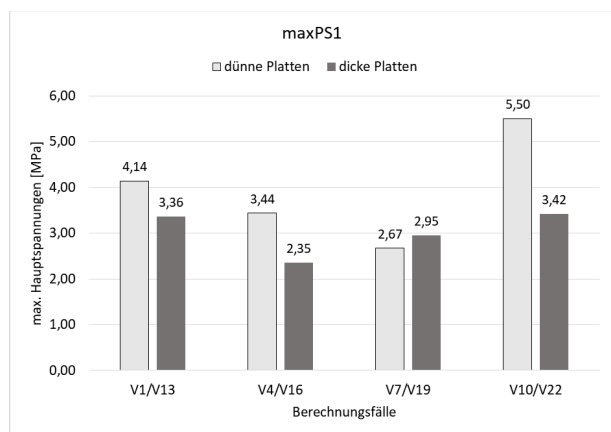
Es ist deutlich erkennbar, dass die Materialparameter die Größe der Plattenverformung entscheidend mitbestimmen. Die maximalen Unterschiede betragen in jedem Temperaturlastfall mehr als 100 %, im Extremfall mehr als 300 % (vgl. V2/V5).

In der Praxis ergeben sich die maßgebenden Spannungswerte normalerweise durch eine Überlagerung von Temperatureinwirkungen und Verkehrslasten. Für alle Berechnungsfälle wurde deshalb zusätzlich der Spannungs- und Verformungszustand ausgewertet, welcher sich bei gleichzeitiger Belastung mit einer Verkehrslast ergibt. Der Einfluss der Materialparameter auf die maximale Hauptspannung für diese

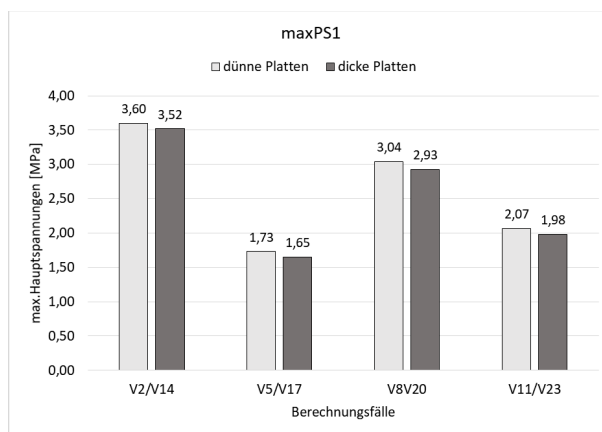
kombinierte Belastung wird in Bild 3.114 bis Bild 3.116 gezeigt. Bild 3.113 zeigt beispielhaft die maximalen Hauptspannungen an der Plattenunterseite für den Berechnungsfall V6.



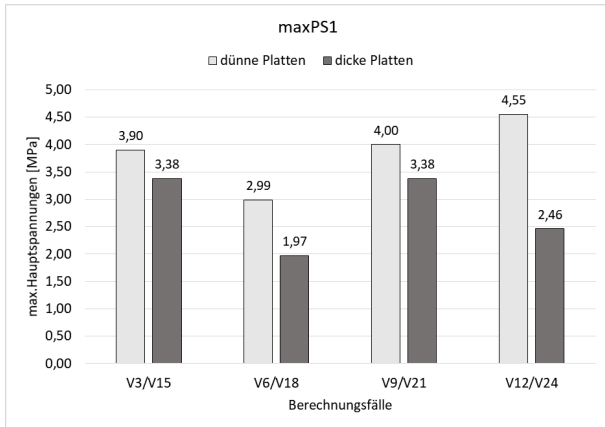
**Bild 3.113:** Maximale Hauptspannungen an der Plattenunterseite im Berechnungsfall V6 (mit Verkehrslast)



**Bild 3.114:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast



**Bild 3.115:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast

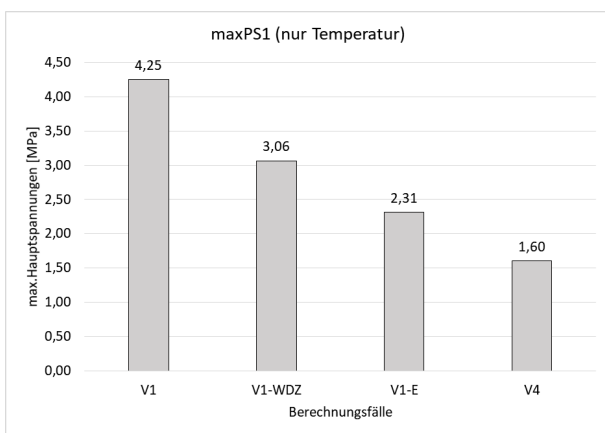


**Bild 3.116:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast

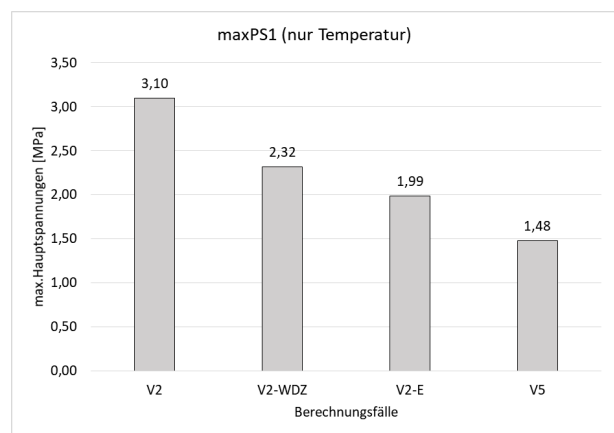
Die große Bedeutung der Materialparameter zeigt sich auch in diesem Fall. Durch eine Veränderung der Plattenverformung (Bild 3.114 bis Bild 3.116) wird die Wirkung der Verkehrslast beeinflusst. Es zeigen sich für alle Temperaturlastfälle Spannungsunterschiede von ca. 100 %.

Für sämtliche hier beschriebenen Berechnungsvarianten wurde vorausgesetzt, dass E-Modul und Wärme-dehnzahl das mechanische Verhalten im gleichen Sinne beeinflussen. Diese Annahme basiert auf den bereits bekannten thermomechanischen Zusammenhängen, welche durch analytische Formeln beschrieben werden können. Ungeklärt blieb dabei die Frage, welcher der beiden Einflussfaktoren eine stärkere Wirkung hat. Um diesbezüglich eine Aussage treffen zu können, wurden Berechnungen durchgeführt, für die nur jeweils einer der interessierenden Materialparameter variiert wurde.

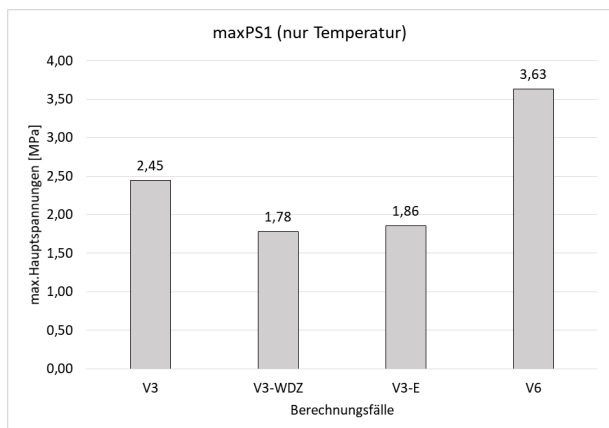
Da die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass sich dünne und dicke Platten nicht grundlegend in ihrem me- chanischen Verhalten unterscheiden, wurde die Analyse auf die dünne Platte (24,5 cm Dicke) beschränkt. Konkret wurden die drei ersten Berechnungsfälle (V1 bis V3) derart variiert, dass jeweils nur der E-Modul oder nur die Wärmedehnzahl für Ober- und Unterbeton auf den kleinen Wert gesetzt wurden. Bild 3.117 bis Bild 3.131 zeigen die Entwicklung der Spannungen bzw. Verformungen vom Ausgangslastfall (V1 bis V3) über die Lastfälle mit jeweils einem geänderten Parameter bis zu den bereits berechneten Lastfällen für die beide Parameter geändert wurden (V4 bis V6).



**Bild 3.117:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigen- gewicht + Temperatur bei TLF 1



**Bild 3.118:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigen- gewicht + Temperatur bei TLF 2

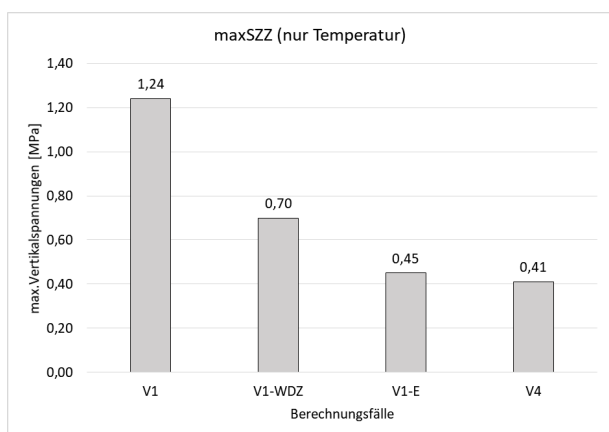


**Bild 3.119:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

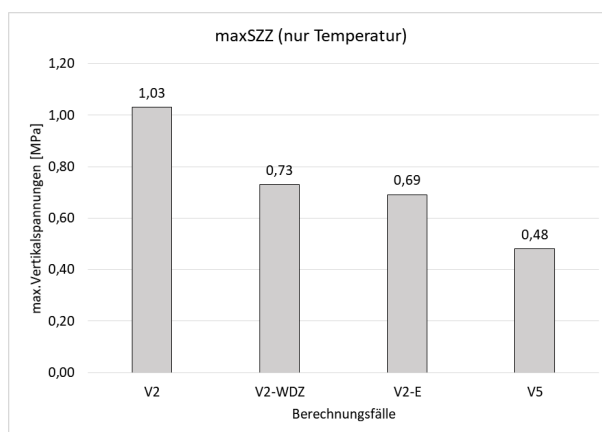
Für die Temperaturlastfälle TLF 1 und TLF 2 zeigt sich übereinstimmend eine stetige Entwicklung der maximalen Hauptspannung vom Ausgangsfall (V1 bzw. V2) über die Fälle mit geringerer Wärmedehnzahl (V1-WDZ bzw. V2-WDZ) und die Fälle mit geringerem E-Modul (V1-E bzw. V2-E) zu den Fällen mit geringen Werten für E-Modul und Wärmedehnzahl (Bild 3.117 bis Bild 3.120). Sowohl E-Modul, wie auch Wärmedehnzahl haben also einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der maximalen Hauptspannung. Die Größe des E-Moduls wirkt sich aber deutlich stärker aus.

Für den Temperaturlastfall 3 ist das Bild eher widersprüchlich. Eine klare Tendenz ist nicht erkennbar. Hier ist allerdings anzumerken, dass die maximale Hauptspannung in diesem Fall lokal begrenzt am Ende des Ankers auftritt. Es ist auch nicht auszuschließen, dass die entsprechende Spannungsspitze maßgeblich durch die Modellbildung beeinflusst wurde. Man kann davon ausgehen, dass sich die Biegespannungen in der Platte prinzipiell ähnlich verhalten, wie in den Temperaturfällen 1 und 2. Diese Vermutung wird auch durch die Entwicklung der maximalen Verformungen gestützt (siehe Bild 3.123 bis Bild 3.125), welche für alle drei Temperaturfälle gleichartig verläuft.

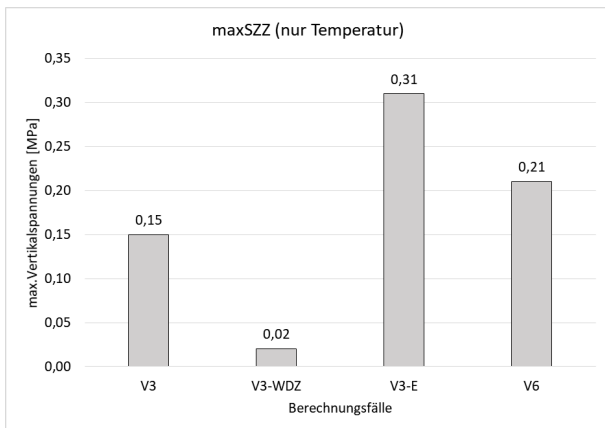
Ähnliche Aussagen sind zu treffen, wenn man die Entwicklung der maximalen Vertikalspannungen betrachtet (Bild 3.120 bis Bild 3.122).



**Bild 3.120:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1



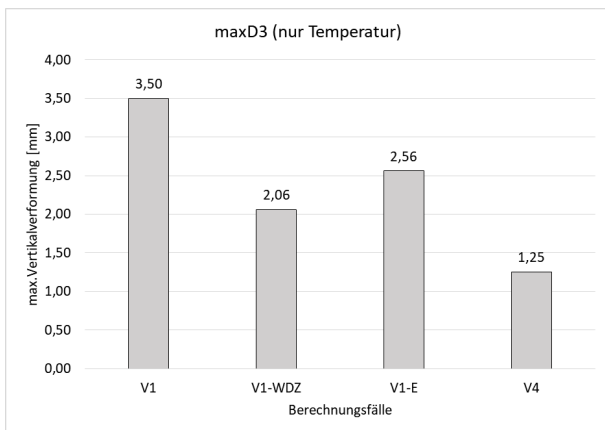
**Bild 3.121:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2



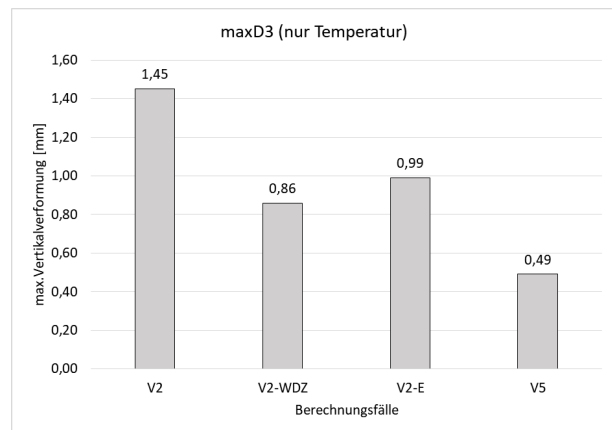
**Bild 3.122:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

Bei der Interpretation der Ergebnisse für den Temperaturfall 3 ist zu berücksichtigen, dass es sich insgesamt um betragsmäßig kleine Werte handelt, welche lokal begrenzt auftreten. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Lastfall kaum positive Vertikalspannungen auftreten und somit keine Korrelation zu den Materialparametern angegeben werden kann. Für die anderen beiden Temperaturfälle gilt wieder, dass der Einfluss der untersuchten Materialparameter deutlich ist und die Spannung noch etwas sensitiver auf Änderungen des E-Moduls reagiert.

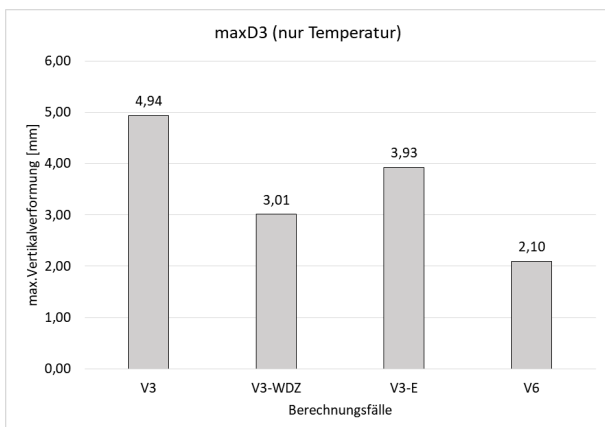
Bezüglich der Entwicklung der maximalen Verformungen ist das Bild für alle drei Temperaturfälle sehr einheitlich (siehe Bild 3.123 bis Bild 3.125).



**Bild 3.123:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1



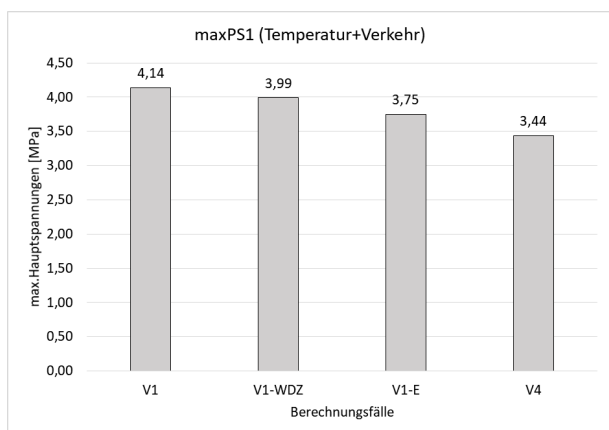
**Bild 3.124:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2



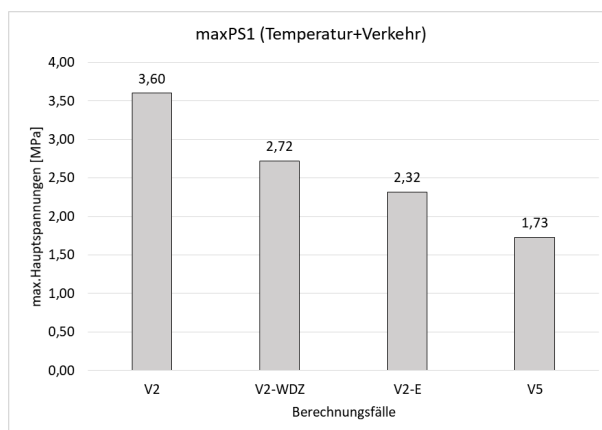
**Bild 3.125:** Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3

Der Einfluss beider Materialparameter ist wieder deutlich. Im Unterschied zu den Spannungswerten, reagieren die Verformungen aber auf eine Veränderung der Wärmedehnzahl etwas sensitiver, als auf eine Veränderung des E-Moduls.

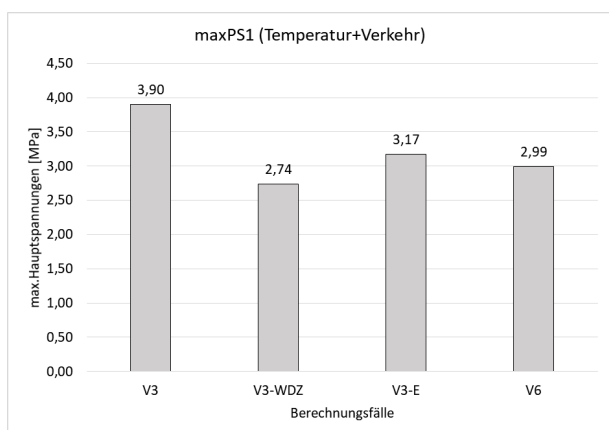
Werden zusätzlich zu den Temperatureinflüssen Verkehrslasten berücksichtigt, so ergeben sich die in Bild 3.126 bis Bild 3.131 dargestellten Spannungswerte.



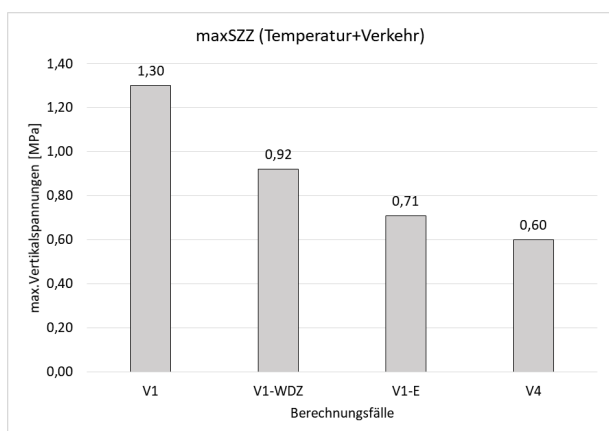
**Bild 3.126:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast



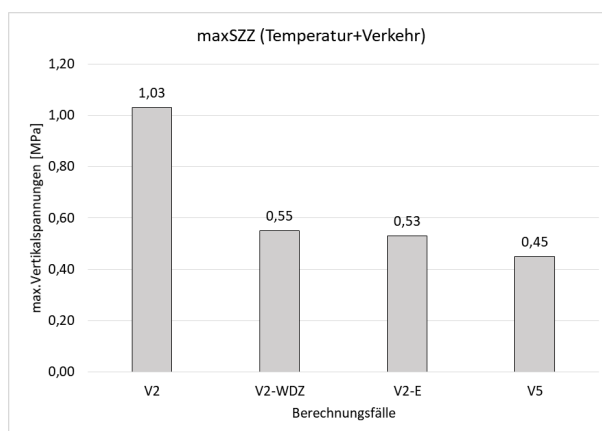
**Bild 3.127:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast



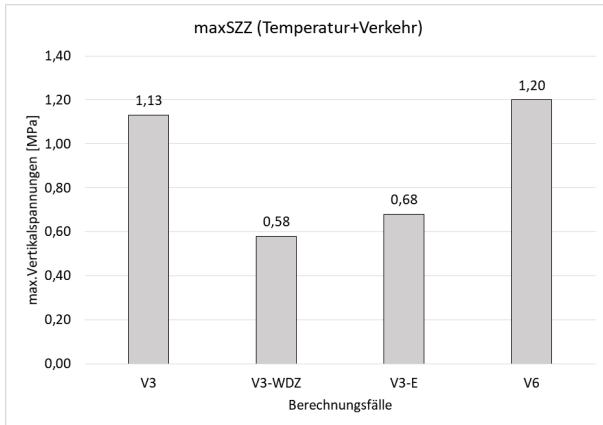
**Bild 3.128:** Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast



**Bild 3.129:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast



**Bild 3.130:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast



**Bild 3.131:** Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast

Bezüglich der Ergebnisse für den Temperaturfall 3 gelten wieder die weiter oben erläuterten Einschränkungen. Ansonsten ist ersichtlich, dass die beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Werten der Materialparameter und den Spannungen auch dann gelten, wenn Verkehrslasten berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Elastizitätsmodul und Wärmedehnzahl des Betons einen großen Einfluss auf die Plattenbeanspruchung und -verformung haben. Ein Beton mit geringer Temperatursensitivität (niedrige Wärmedehnzahl) und niedriger Steifigkeit (niedriger E-Modul) wird im Gebrauchszustand durch wesentlich geringere Spannungen beansprucht, als ein Beton mit durchschnittlichen oder hohen Werten. Auch die Plattenverformung kann durch die entsprechende Steuerung der Materialeigenschaften positiv beeinflusst werden, womit auch der Fahrkomfort verbessert wird.

### 3.6.6 Untersuchung des Einflusses der Fugenöffnung

Unter Benutzung des in Abschnitt 3.6.5 beschriebenen Berechnungsmodells wurden Vergleichsrechnungen mit offener und geschlossener Fuge durchgeführt. Als „offen“ wurde in diesem Zusammenhang eine Fuge definiert, welche sich so weit geöffnet hat, dass die Rissverzahnung nicht mehr für die Querkraftübertragung wirksam wird. Dabei wurde festgestellt, dass sich bei vorverformten Platten kaum Unterschiede in den Spannungs- und Verformungswerten ergeben. Sobald die Plattenränder nicht mehr auf der Unterlage aufliegen, ist die Querkraftübertragung über die Dübel offenbar ausreichend und eine Mitwirkung der Rissverzahnung in der Fuge erbringt keine wesentliche Verbesserung. Werden Platten ohne Vorverformung betrachtet (ohne Temperatureinfluss), so ergibt sich aber der zu erwartende Effekt. Die Spannungen an der Querruge sind dann in jedem Berechnungsfall deutlich höher, wenn die Fuge offen ist. In Tab. 3.24 sind die entsprechenden Werte zusammengestellt.

Berechnungsfall	max PS1			max SYY an Querfuge		
	geschlossene Fuge	offene Fuge	Abweichung	geschlossene Fuge	offene Fuge	Abweichung
	[MPa]	[MPa]		[MPa]	[MPa]	
V1	0,85	1,04	22,35%	0,85	1,04	22,35%
V4	0,77	0,91	18,18%	0,74	0,91	22,97%
V7	0,69	0,85	23,19%	0,69	0,85	23,19%
V10	0,94	1,12	19,15%	0,91	1,12	23,08%
V13	0,62	0,77	24,19%	0,61	0,77	26,23%
V16	0,55	0,67	21,82%	0,55	0,67	21,82%
V19	0,50	0,63	26,00%	0,50	0,63	26,00%
V22	0,67	0,83	23,88%	0,65	0,83	27,69%

Tab. 3.24: Spannungen bei offener und geschlossener Fuge

Im Allgemeinen erhöhen sich die Spannungen durch das Öffnen der Fuge um 20 bis 25 %. Eine wirksame Querkraftübertragung ist aber auch bei offener Fuge noch gegeben. Bild 3.132 zeigt beispielhaft die Hauptspannungen an der Plattenunterseite für den Berechnungsfall V1.

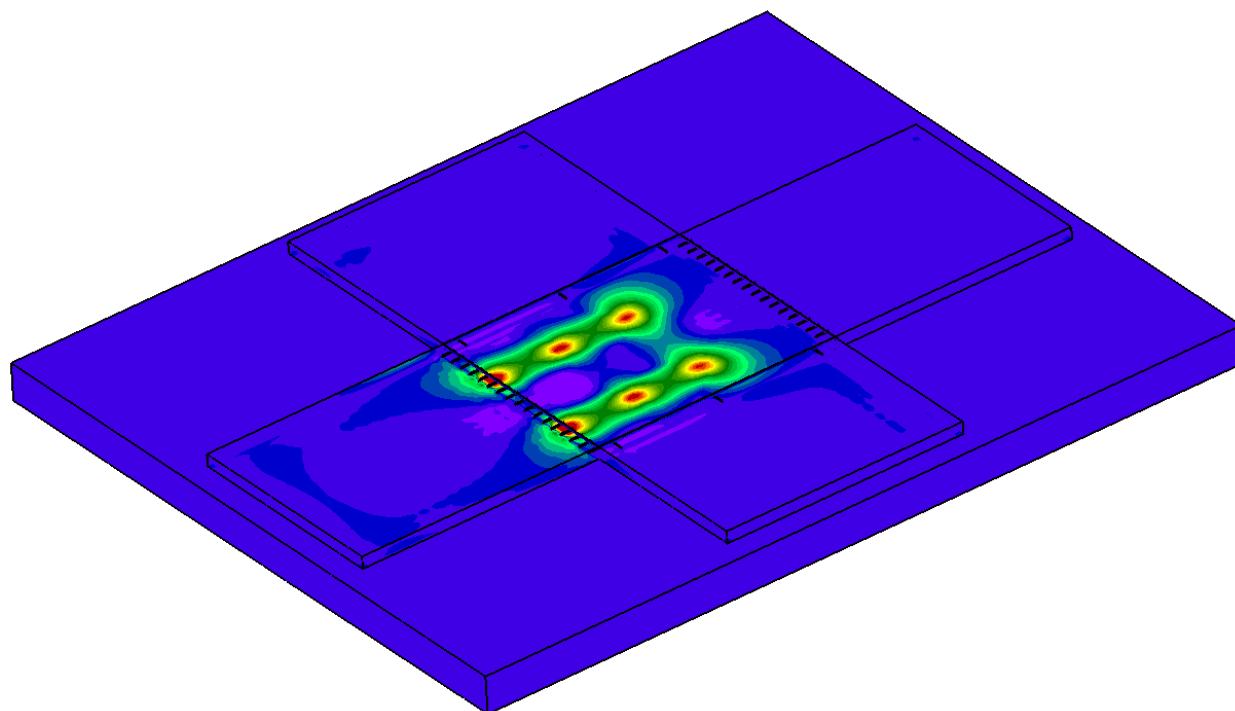


Bild 3.132: Maximale Hauptspannungen an der Plattenunterseite bei offener Fuge

Es ist deutlich erkennbar, dass auch in der angrenzenden Platte Biegespannungen an der Querfuge erzeugt werden. Die Nachbarplatte wird also an der Lastabtragung beteiligt.

### 3.6.7 Rechnerische Analyse der Querkraftübertragung mit Dübeln (Regelbauweise)

#### Kenntnisstand und offene Fragen

Die Querkraftübertragung mit einbetonierten Dübeln stellt national, aber auch international die Regelbauweise dar. Das System hat sich in der Praxis bewährt und wurde im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten eingehend untersucht ([MAITRA 2009], [FREUDENSTEIN 2001], [EOM 2000], [DAVIDS 1998],



[SADEGHI 2017] u. a.). Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den relevanten Parametern sind damit bekannt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden ergänzend folgende Detailfragen untersucht:

- (1) Betonspannung im Bereich der Dübeleinbindung infolge Querkraftbelastung
- (2) Betonspannung im Bereich der Dübeleinbindung infolge Biegung
- (3) Einfluss einer mangelhaften Dübelausrichtung auf die Fugenbeweglichkeit.

Die Betonspannungen in den Einbindebereichen (Punkte 1 und 2) sind von Interesse, weil verschiedentlich horizontale Risse in der Dübelebene von Fahrbahnplatten gefunden wurden. Es galt damit die Hypothese zu prüfen, dass diese Risse durch Dübelkräfte erzeugt wurden. Die rechnerische Analyse sollte zeigen, ob im entsprechenden Bereich allein durch die planmäßige Nutzung Spannungen entstehen, welche zur Rissbildung führen können.

Die exakte Ausrichtung der Dübel in Richtung der Fahrbahnachse ist offensichtlich von Bedeutung für die Beweglichkeit der Fuge. Es ist evident, dass eine wesentliche Winkelabweichung von der Solllage zu einem Blockieren der Fugenbeweglichkeit führen muss. Dies führt zwangsläufig zur Bildung von Paketfugen, welche durch ihre vergrößerte Öffnungsweite negative Auswirkungen auf die Lärmemission und die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn haben. Die rechnerische Analyse sollte zeigen, welche Genauigkeitsanforderungen bezüglich der Dübelausrichtung gestellt werden müssen, um ein Blockieren der Fugenbeweglichkeit zu vermeiden.

#### (1) Dübel unter Querkraftbelastung

##### FEM-Modell

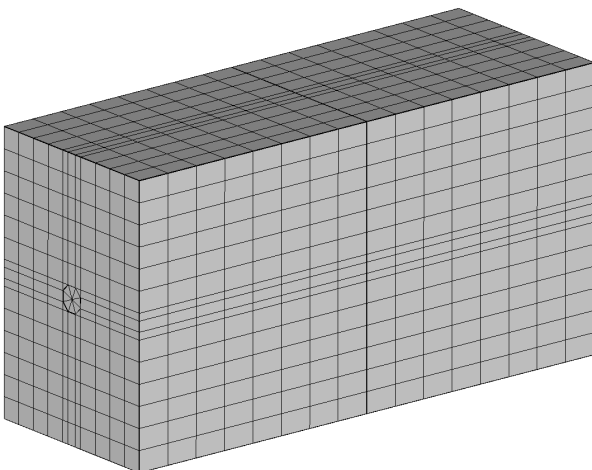
Für die rechnerische Simulation der mechanischen Zusammenhänge im Einbindebereich der Dübel wurde ein FEM-Volumenmodell definiert. Das Gesamtmodell besteht aus drei Volumenkörpern (Bild 3.133):

- ein Betonblock auf der linken Seite
- ein Betonblock auf der rechten Seite
- ein Dübel.

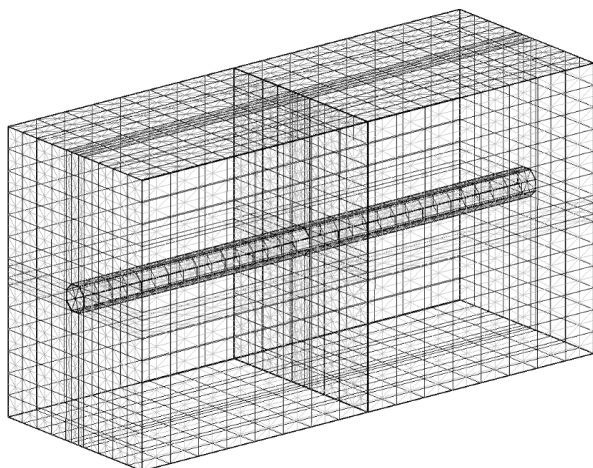
Die modellierten Betonblöcke sind jeweils 25 cm lang und 18,5 cm breit und 26,5 cm dick. Der modellierte Dübel ist 50 cm lang.

Für den Modellaufbau wurden generell Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet (20-Knoten-Brick-Elemente, 15-Knoten-Wedge-Elemente). Damit sollen Locking-Effekte verhindert und die Konvergenz der Berechnung verbessert werden.

Der Dübelkörper ist aus jeweils acht radial angeordneten Wedge-Elementen aufgebaut. Damit wird der runde Dübelquerschnitt mit einem Achteck angenähert. Die Fläche des Achtecks entspricht einer Kreisfläche mit einem Durchmesser von 2,5 cm.



**Bild 3.133:** FEM-Volumenmodell: Betonblöcke und Dübel



**Bild 3.134:** FEM-Volumenmodell: Betonblöcke und Dübel (Gitterdarstellung)

Die Interaktion zwischen Beton und Dübel wird über eine Kontaktformulierung beschrieben. Diese wurde so definiert, dass ein harter Kontakt (geringe rechnerische Durchdringung der Kontaktflächen) vorliegt und nur sehr kleine Zugspannungen übertragen werden können. Für die Reibung zwischen Dübel und Beton wurde ein Reibungsbeiwert von 1 angenommen.

Zwischen den Betonblöcken wurde ein Spalt von 1 mm Breite definiert. Eine direkte Kraftübertragung zwischen den Betonkörpern wird also ausgeschlossen. Die Berechnung betrifft also ausschließlich den Fall einer vollständig geöffneten Fuge, bei der die gesamte Querkraftübertragung über den Dübel realisiert wird.

Für die Lagerung bzw. Dehnbehinderung der Modellkörper wurden folgende Festlegungen getroffen:

- die Unterseite des rechten Betonkörpers ist in Vertikalrichtung gehalten
- die der Fuge gegenüberliegenden Seiten beider Betonkörper sind jeweils in Fahrtrichtung gehalten
- die parallel zum Dübel liegenden Seitenflächen beider Betonkörper sind quer zur Fahrtrichtung gehalten

Die Vertikalkraft (Verkehrslast) wird gleichmäßig verteilt auf die Oberseite des linken Betonkörpers aufgebracht. Da der linke Betonkörper keine vertikale Lagerung hat, wird die gesamte aufgebrachte Querkraft auf den Dübel übertragen. Das Eigengewicht der Modellkörper wird nicht berücksichtigt.

Für die Materialeigenschaften wurden häufig vorkommende Parameterwerte gewählt:

- E-Modul Beton: 41.000 MPa (StC 35/45-3,7 nach [RDO Beton 09])
- Querdehnzahl Beton: 0,2
- E-Modul Stahl: 200.000 MPa
- Querdehnzahl Stahl: 0,3

Die charakteristische Zugfestigkeit des Betons ist mit der Wahl der Betonklasse festgelegt. Wenn man einen Variationskoeffizienten von 0,1 für die Spaltzugfestigkeit unterstellt, ergibt sich für die mittlere Spaltzugfestigkeit ein Wert von:

$$f_{ctm,SP} = \frac{3,7MPa}{(1 - 0,1 \cdot 1,645)} = 4,43MPa$$

Es ist zu vermuten, dass sich unmittelbar am Beginn der Dübeleinbindung eine Spannungsspitze ausbildet. Dies konnte durch entsprechende Berechnungsläufe auch bestätigt werden. Erwartungsgemäß lagen die berechneten Spannungswerte deutlich über der Zugfestigkeit. Gleichzeitig war festzustellen, dass die Spannungsspitze lokal eng begrenzt ist. Damit steht ein deutliches Umlagerungspotential zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass die Spannungsspitze durch Plastifizierung weitgehend abgebaut wird. Um diesen Effekt bei den Simulationsrechnungen zu berücksichtigen, wurde die aufnehmbare Zugfestigkeit des Betons im Berechnungsmodell auf 4,0 MPa begrenzt.

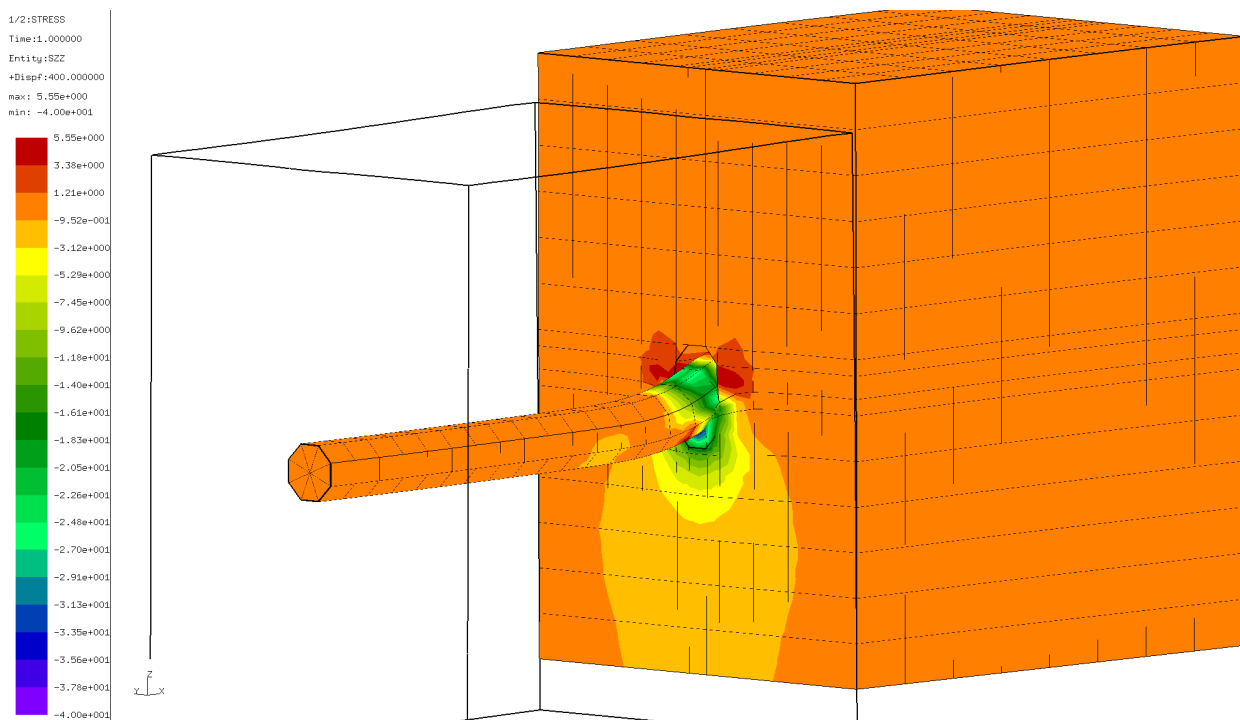
### Querkraft pro Dübel

Es wird angenommen, dass der Dübel eine maximale Belastung erfährt. Dies ist der Fall, wenn die Radlast sich direkt über dem Dübel befindet. Die Verteilung der Querkräfte auf Dübelgruppen wurde in verschiedenen Arbeiten untersucht. [FREUDENSTEIN 2010] gibt einen Wert von 14,6 % der Radlast an. In [MAITRA 2009] ist eine Formel angegeben, welche in Abhängigkeit von verschiedenen Parameterwerten Ergebnisse in ähnlicher Größenordnung liefert. Davon ausgehend wurden für die Berechnungen mit dem hier vorliegenden Modell 15 % der Berechnungsrادlast angesetzt. Nach [RDO Beton 09] kann diese Radlast mit ca. 80 kN angenommen werden. Damit gilt für die anzunehmende Querkraft auf den Dübel:

$$V_d = 0,15 \cdot 80 \text{ kN} = 12 \text{ kN}$$

### Ergebnisse

Bild 3.135 zeigt die berechneten vertikalen Spannungen im Einspannbereich des Dübels am verformten Modell. Um den Dübel sichtbar zu machen, wurde der belastete Betonblock ausgeblendet.

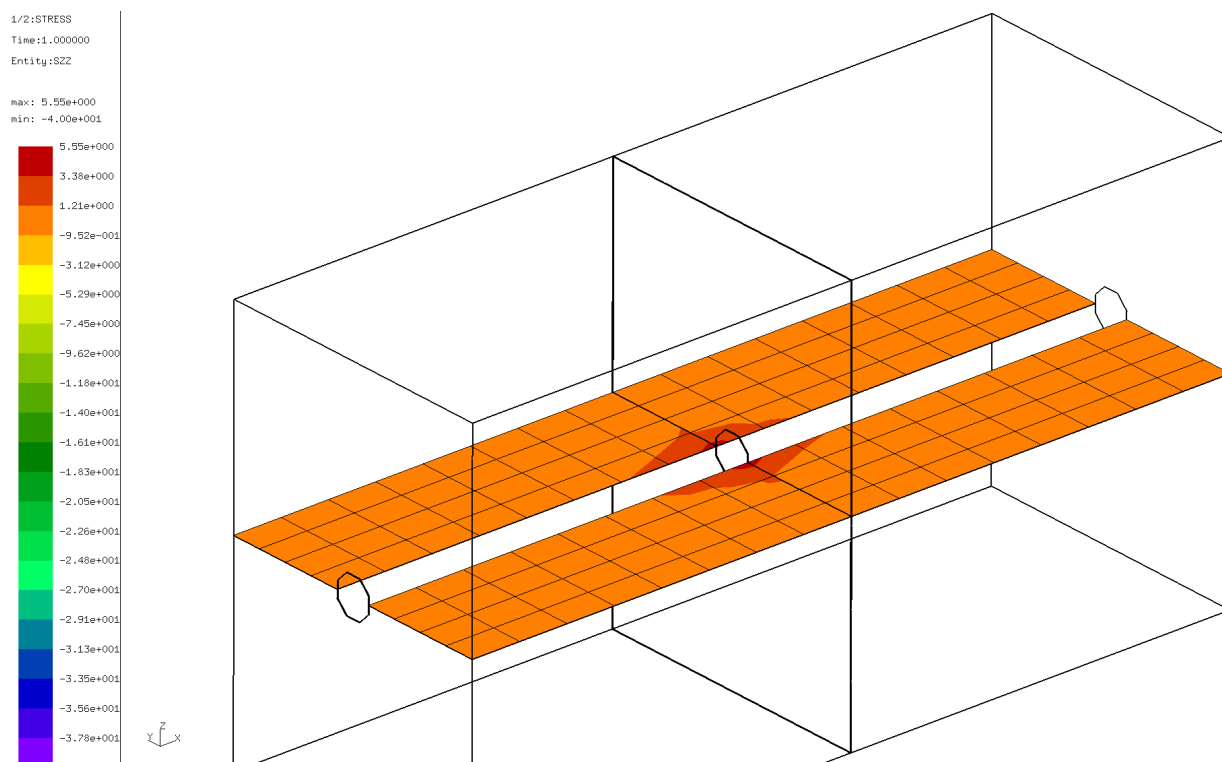


**Bild 3.135:** Berechnete Vertikalspannungen

Deutlich erkennbar sind die Spannungsspitzen unmittelbar neben dem Dübel. Die maximalen Zugspannungen im Beton sind hier kein aussagekräftiger Wert, weil die aufnehmbaren Spannungen als Materialparameter mit 4,0 MPa vorgegeben wurden. Die mit 5,55 MPa ausgewiesene Maximalspannung tritt im Dübelmaterial auf.

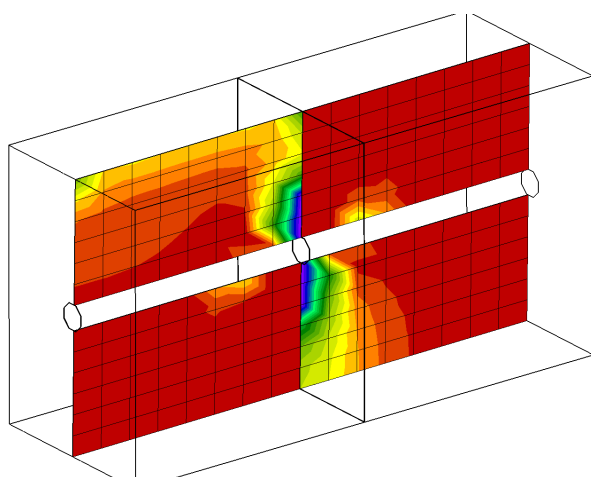
Für eine Bewertung der Berechnungsergebnisse ist die räumliche Ausdehnung des plastifizierten Bereiches entscheidend. Wie deutlich zu sehen ist, bleibt dieser Bereich (mit Spannungswerten über ca. 4 MPa) eng begrenzt. Die Spannungsspitze wird also effektiv abgebaut und es gibt kein großflächiges Betonversagen.

Bild 3.136 zeigt einen Schnitt durch das Modell in Dübelebene. Es ist deutlich ersichtlich, dass der plastifizierte Bereich (dunkelrot) auch in Dübellebensrichtung eng begrenzt bleibt.



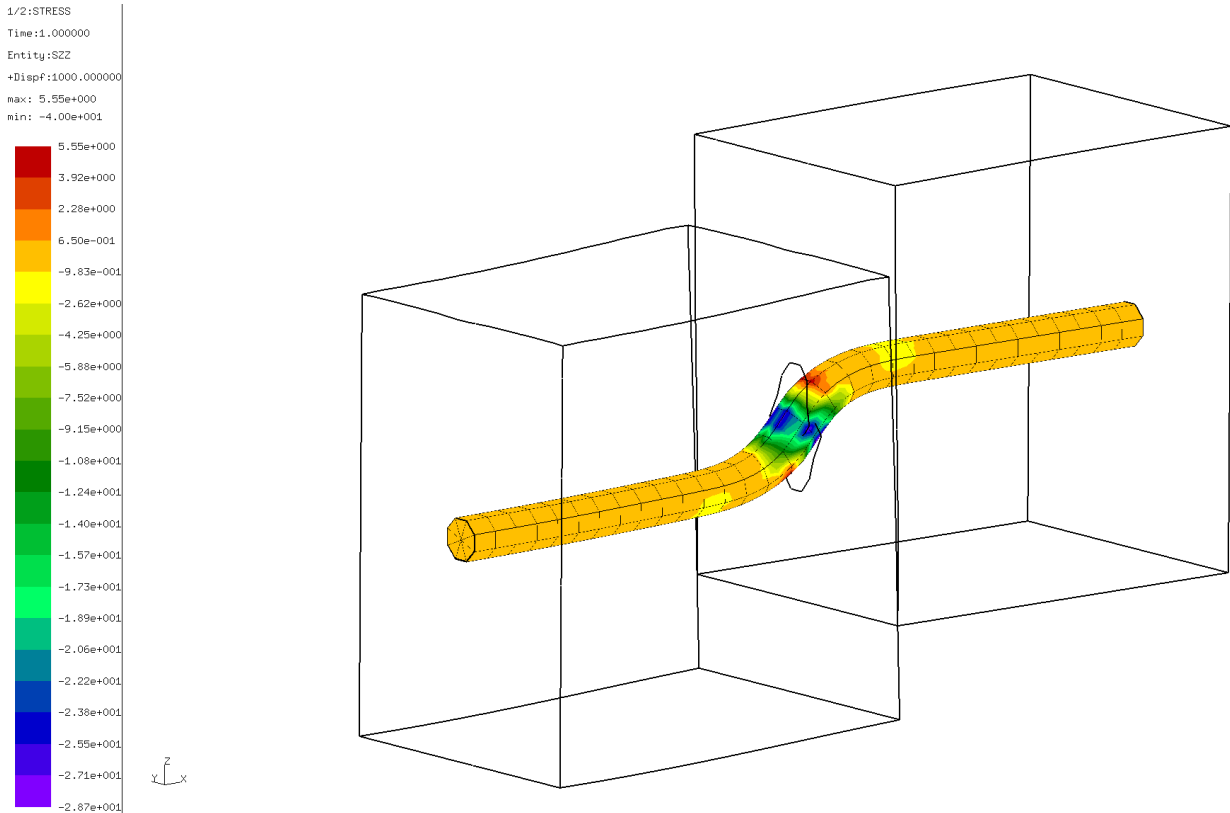
**Bild 3.136:** Verechnete Vertikalspannungen im Beton (horizontaler Schnitt in Dübelebene)

In Bild 3.137 ist ein vertikaler Schnitt zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Druckspannungen vor Allem unmittelbar am Beginn des Einbindereiches zwischen Dübel und Beton übertragen werden. Einen weiteren, aber ungleich schwächer ausgeprägten Druckbereich gibt es ca. 10 cm im Beton auf der jeweils gegenüberliegenden Seite. Noch weiter innen werden keine nennenswerten Druckspannungen mehr erzeugt. Damit wird die bereits vielfach belegte Vermutung, dass die Dübelkräfte auf der ersten Hälfte der Einbindelänge in den Beton übertragen werden, ein weiteres Mal bestätigt.



**Bild 3.137:** Berechnete Vertikalspannungen im Beton (vertikaler Schnitt in Dübelebene)

Die Spannungen im Dübelmaterial sind in Bild 3.138 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Spannungen im Dübel sicher aufgenommen werden. Die Festigkeit des Bewehrungsstahls liegt mit 500 MPa deutlich über den Spannungswerten.



**Bild 3.138:** Spannungen in Dübellängsrichtung

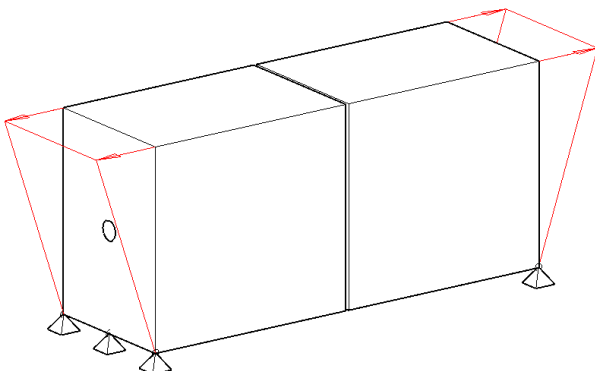
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die planmäßige Verkehrsbelastung nur in einem eng begrenzten Bereich (bis ca. 1 cm vom Beginn der Dübeleinbindung) zu Plastifizierung und Mikrorissbildung führt. Es ist unwahrscheinlich, dass weitreichende Horizontalrisse in Dübelebene allein durch die Verkehrsbelastung erzeugt werden.

## (2) Dübel unter Biegebeanspruchung

### FEM-Modell

Das FEM-Modell entspricht in weiten Teilen dem oben beschriebenen Modell. Unterschiede gibt es in der Lagerung und in der Lastdefinition.

Beide Betonkörper sind an den hinteren, unteren Kanten in vertikaler Richtung und in Fahrtrichtung gehalten. Die Lastaufbringung erfolgt an den jeweils der Fugenflanke gegenüberliegenden Fläche. Die Last ist so definiert, dass sich jeweils eine in Fahrtrichtung wirkende, positive bzw. negative Flächenlast ergibt, welche linear von der Oberkante zur Unterkante auf Null ausläuft (siehe Bild 3.139).



**Bild 3.139:** Lagerung und Belastung der Volumenkörper im Modell

### Lastansatz

Die an den Endflächen der Betonkörper aufzubringende Last musste so gewählt werden, dass die daraus resultierende Schrägstellung der Körper der Neigung der Oberfläche der vorverformten Platten in Fugennähe entspricht. Daraus ergibt sich, dass zunächst ein repräsentativer Wert für die Plattenneigung in Fugennähe zu bestimmen war.

Mit dieser Zielstellung wurde ein 1-Platten-Volumenmodell definiert, für welches die Verformung infolge ungleichmäßiger Erwärmung, Schwinden, eingepprägtem Temperaturgradienten und Eigengewicht berechnet wurde. Die Modellparameter wurden so gewählt, dass eine möglichst große Verformung zu erwarten ist, gleichzeitig aber auch eine Praxisrelevanz gegeben ist. Die Grundform für die Verformung wurde mit „Aufschüsselung“ festgelegt. Die wesentlichen Modellparameter sind im Folgenden zusammengestellt:

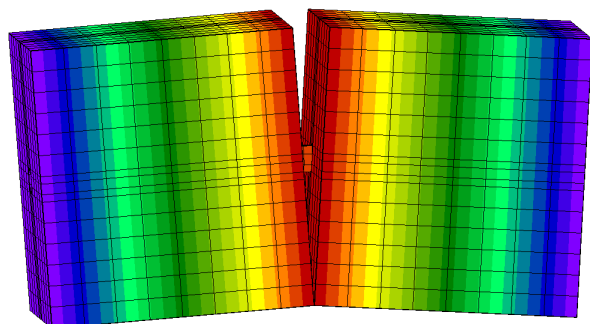
- Plattengeometrie: 5,0 m x 4,0 m x 0,27 m (Länge x Breite x Dicke)
- Freie Auflagerung auf einem Volumenblock
- Plattenelemente: 20-Knoten-Brickelemente (10cm x 10cm x 4,5cm)
- Dicke Oberbeton: 4,5 cm
- E-Modul Unterbeton: 38.000 MPa
- Wärmedehnzahl Unterbeton:  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$
- E-Modul Oberbeton: 40.000 MPa
- Wärmedehnzahl Oberbeton:  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$

Um die angestrebte Verformungsfigur zu erzeugen, ist ein negativer Temperaturgradient anzusetzen. In [FE 08.0254/2017] wurde ermittelt, dass 95 % aller Temperaturgradienten in Straßenbetonplatten größer als ca.  $-0,02 \text{ K/mm}$  sind. Der Ansatz dieses Gradientenwertes liefert also eine hohe Verformung, ist aber noch als realistisch anzusehen. Der eingepprägte Temperaturgradient kann nach [M-E 2004] mit dem Ansatz einer zusätzlichen Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterkante von 5,56 K berücksichtigt werden. Die Schwindverformung kann simuliert werden, indem die obere Knotenebene zusätzlich um 2 K und die zweite Ebene um 0,9 K abgekühlt wird (siehe Abschnitt 3.6.2).

Eine mit den oben beschriebenen Parametern und Lastansätzen durchgeführte Berechnung ergab für die Mitte des kurzen Plattenrandes eine Vertikalverformung von 1,14 mm. In 25 cm Abstand vom Rand betrug die Vertikalverformung 0,97 mm. Für den Neigungswinkel am Plattenrand ergab sich damit:

$$\tan(\alpha) = \frac{1,14\text{mm} - 0,97\text{mm}}{250\text{mm}} = 6,8 \cdot 10^{-4}$$

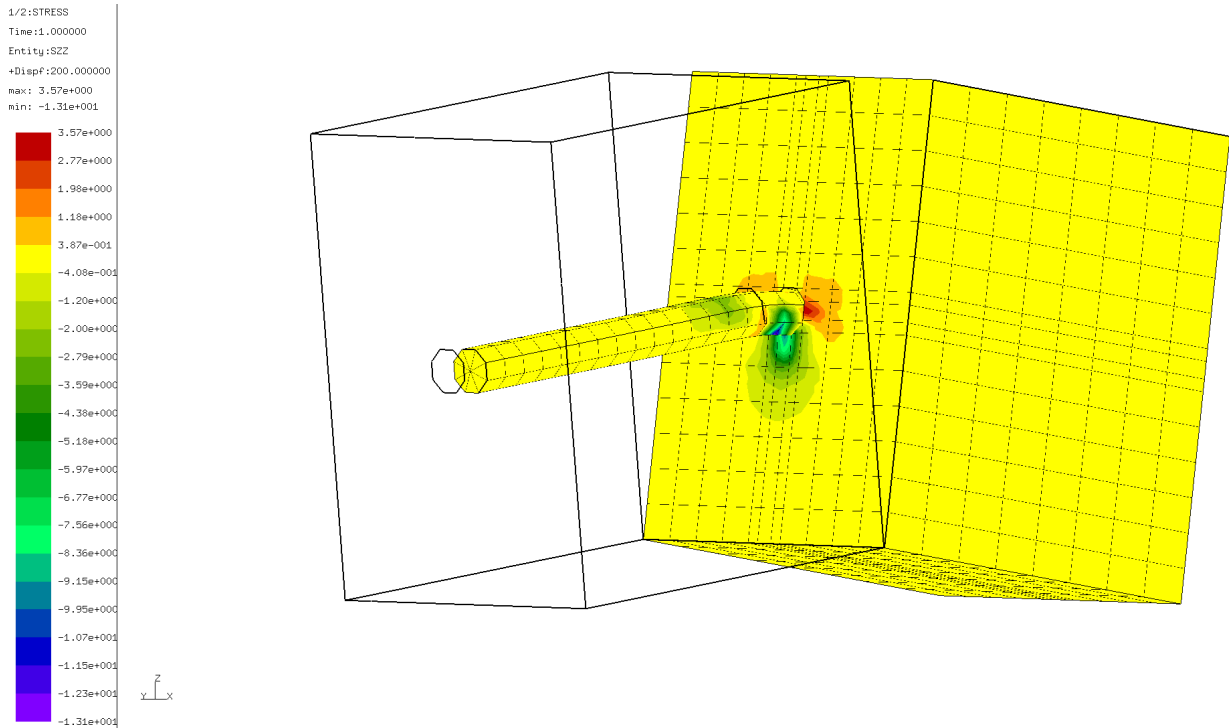
Die Horizontalbelastung an den Enden der modellierten Betonblöcke wurde iterativ so kalibriert, dass sich für die Betonblöcke dieser Neigungswert einstellte. Bild 3.140 zeigt das verformte Modell.



**Bild 3.140:** Verformtes Modell

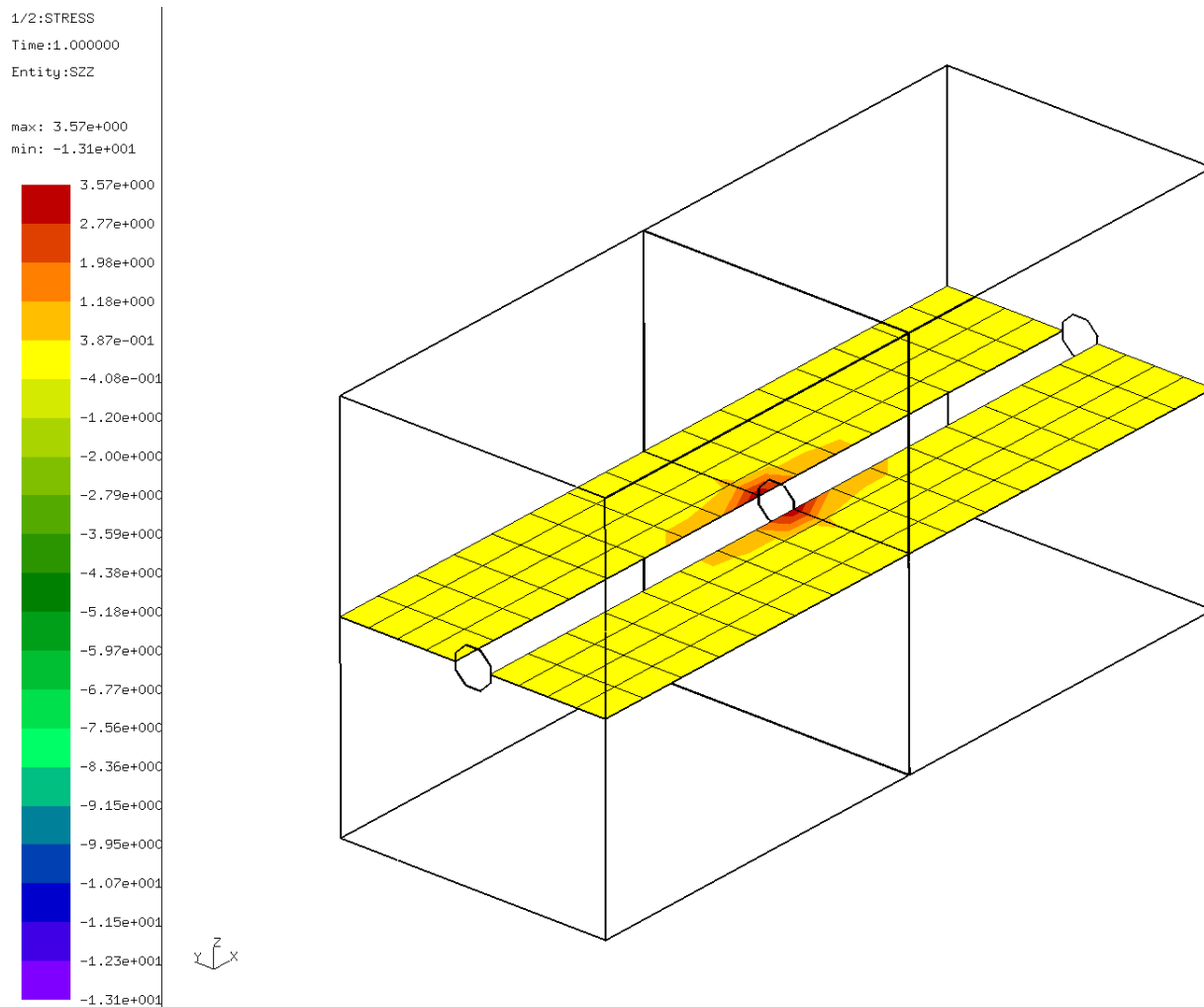
### Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse zeigen auch in diesem Fall eine ausgeprägte Spannungsspitze am Beginn des Einbindungsbereiches neben dem Dübel (Bild 3.141).



**Bild 3.141:** Berechnete Vertikalspannungen

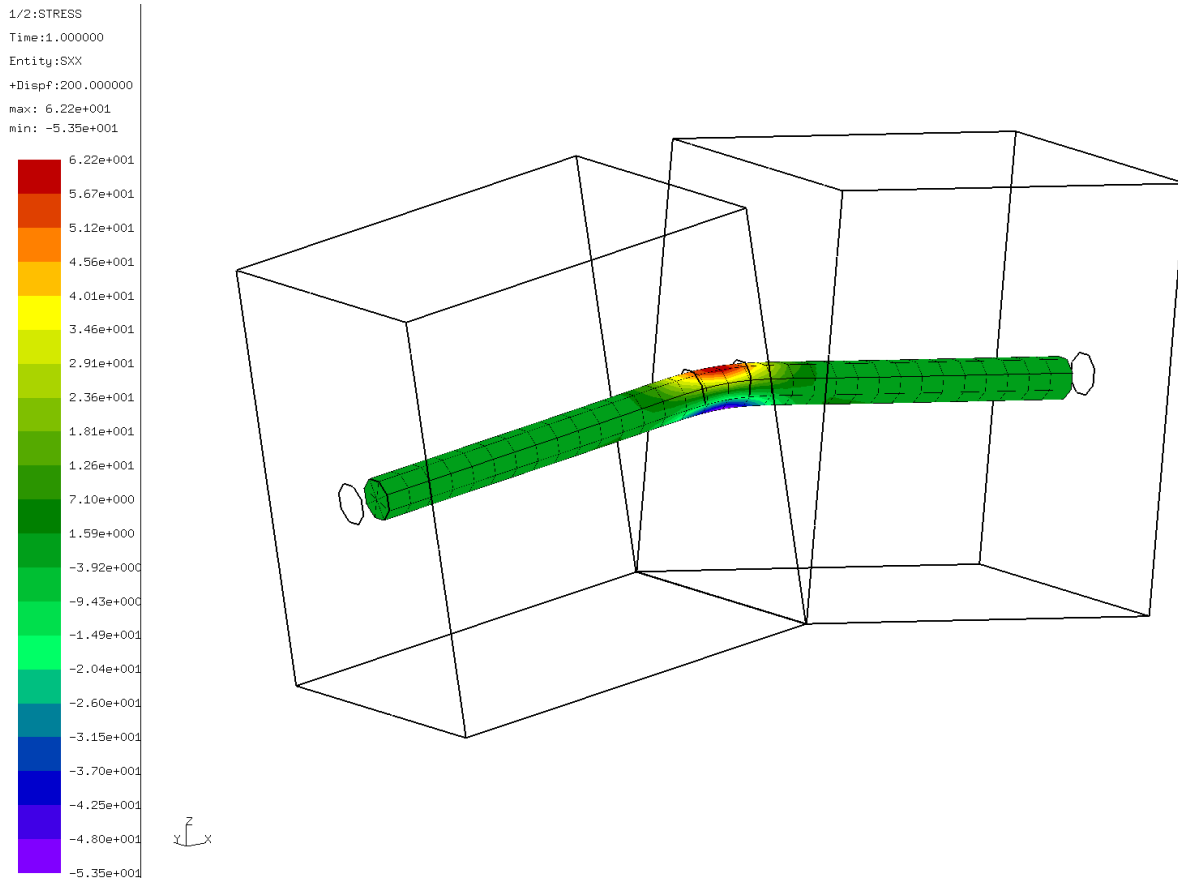
Da auch in diesem Fall die aufnehmbaren Zugspannungen für den Beton auf 4,0 MPa begrenzt wurden ist auch hier die Größe der maximalen Zugspannungen ohne Belang. Von Bedeutung ist dagegen die Größe des plastifizierten Bereiches (Zugspannung  $\approx 4,0$  MPa). Wie deutlich erkennbar ist, ist dieser Bereich sehr klein. Das gilt auch bezüglich der Ausdehnung in die Platte hinein (Bild 3.142).



**Bild 3.142:** Berechnete Vertikalspannungen im Beton (horizontaler Schnitt in Dübelebene)

Die Biegespannungen im Dübel erreichen ca. 60 MPa (Bild 3.143) und bleiben damit deutlich unterhalb der Festigkeit des Bewehrungsstahls (500 MPa). Ein Fließen des Dübelstahls bzw. ein Bruch sind also nicht zu erwarten.





**Bild 3.143:** Spannungen in Dübellängsrichtung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass bei erreichter Normfestigkeit, allein durch die Plattenvorverformung ausgeprägte Horizontalrisse in der Dübelebene entstehen. Allenfalls kann es in einem eng begrenzten Bereich, direkt am Beginn der Einbindung des Dübels in den Beton zu Plastifizierungen und Mikrorissbildungen kommen.

Die Plattenvorverformung tritt allerdings, anders als die Verkehrsbelastung, auch bereits kurz nach der Herstellung der Fahrbahn auf. Die Dübel behindern diese Verformung und es werden Dübelkräfte auf den Beton übertragen. Bei noch geringer Betonfestigkeit kann es dann zur Herausbildung von Horizontalrisse in relevanter Größe kommen.

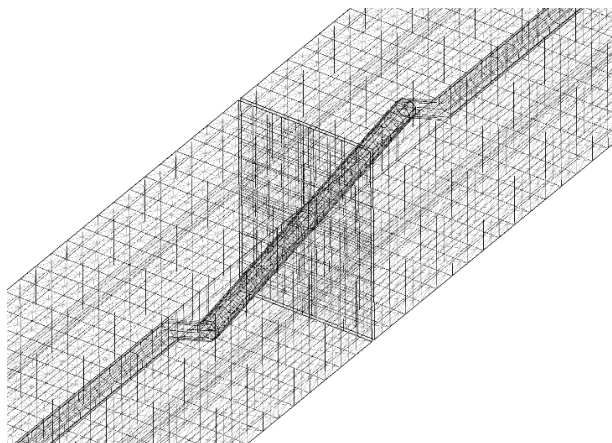
Ausgehend von den Berechnungsergebnissen wird vermutet, dass die beobachteten Horizontalrisse in der Dübelebene in einem frühen Stadium der Betonerhärtung entstanden sind. Dies unterstreicht die Bedeutung von betontechnologischen Maßnahmen zur Minimierung von Zwangsspannungen unmittelbar nach der Fertigstellung der Fahrbahn. Eine zeitliche Abstimmung der Fahrbahnherstellung auf geeignete Witterungslagen wäre nützlich, erscheint aber kaum praktikabel. Die Identifizierung besonders brisanter Witterungskonstellationen ist aber sinnvoll. Als wichtig wird in der Optimierung der Betonrezepturen mit dem Ziel der Verringerung der Schwindneigung gesehen.

#### (4) Untersuchung der Wirkung einer fehlerhaften Dübelausrichtung

##### FEM-Modell

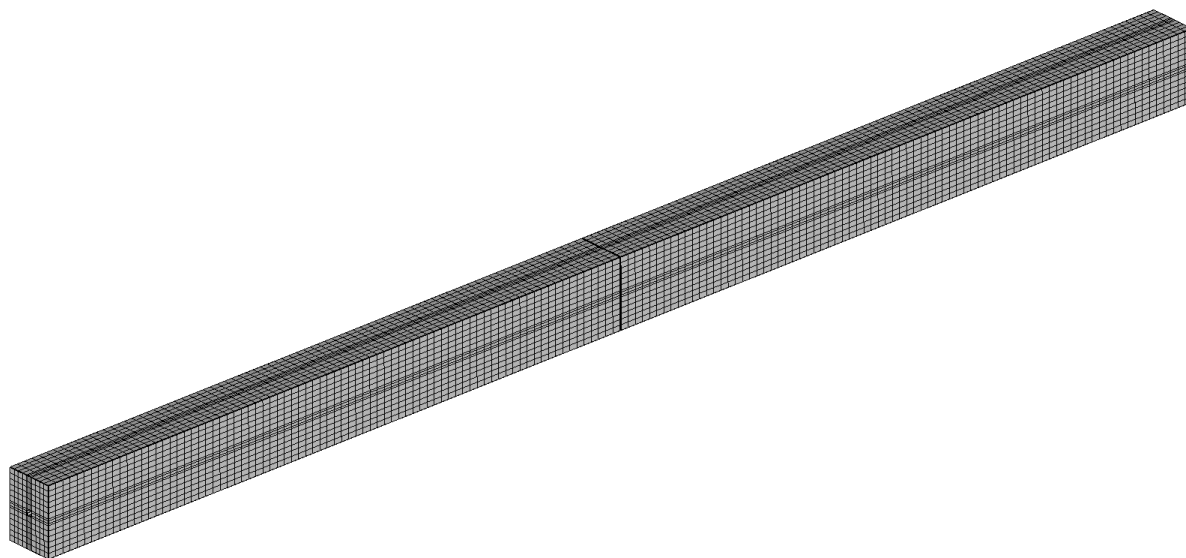
Das FEM-Modell entspricht in seinem grundsätzlichen Aufbau dem bereits beschriebenen Modell. Unterschiede gibt es in der Lagerung, der Ausdehnung in Fahrtrichtung, der Dübelausrichtung und in der Lastdefinition.

Die mit Hilfe des Modells durchzuführenden Untersuchungen verfolgten das Ziel, die Auswirkungen einer Dübelfehlausrichtung zu studieren. Folglich war es notwendig, verschiedene Winkelabweichungen bezüglich der Dübellage im Modell zu realisieren. Das Python-Script für den Modellaufbau wurde so modifiziert, dass Verdrehungen der Dübellage entsprechend vorgegebener Winkelwerte möglich wurden (siehe Bild 3.144). Die Drehachse wurde dabei als senkrecht in Dübelmitte liegend definiert. Die simulierte Verdrehung erfolgt also in jedem Fall innerhalb der horizontalen Ebene.



**Bild 3.144:** Dübel mit von der Fahrtrichtung abweichender Winkellage

Eine Modifikation der Länge der modellierten Betonkörper war notwendig, weil das Verhältnis von absoluter Längenänderung und Materialdehnung bei dem betrachteten Problem für das Berechnungsergebnis essentiell ist. Die temperaturinduzierte Längenänderung des Betons wird nur durch die Reibung zwischen Beton und Dübel behindert. Jede Längenänderung, die realisiert wird, also nicht durch die Reibung verhindert wird, führt zu einem Abbau der Dehnungen im Beton. Es ist evident, dass die Auswirkung einer bestimmten absoluten Längenänderung auf den Dehnungszustand des Betons von der Länge des Betonkörpers abhängt. Aus diesem Grunde mussten die Betonkörper mit den tatsächlich vorkommenden Längen bis zum Dehnungsnullpunkt modelliert werden. Beide Betonkörper wurden mit einer Länge von 2,5 m modelliert. Das entspricht der halben Länge einer typischen Straßenplatte (Bild 3.145).



**Bild 3.145:** Gesamtmodell (2 x 2,5 m Länge)

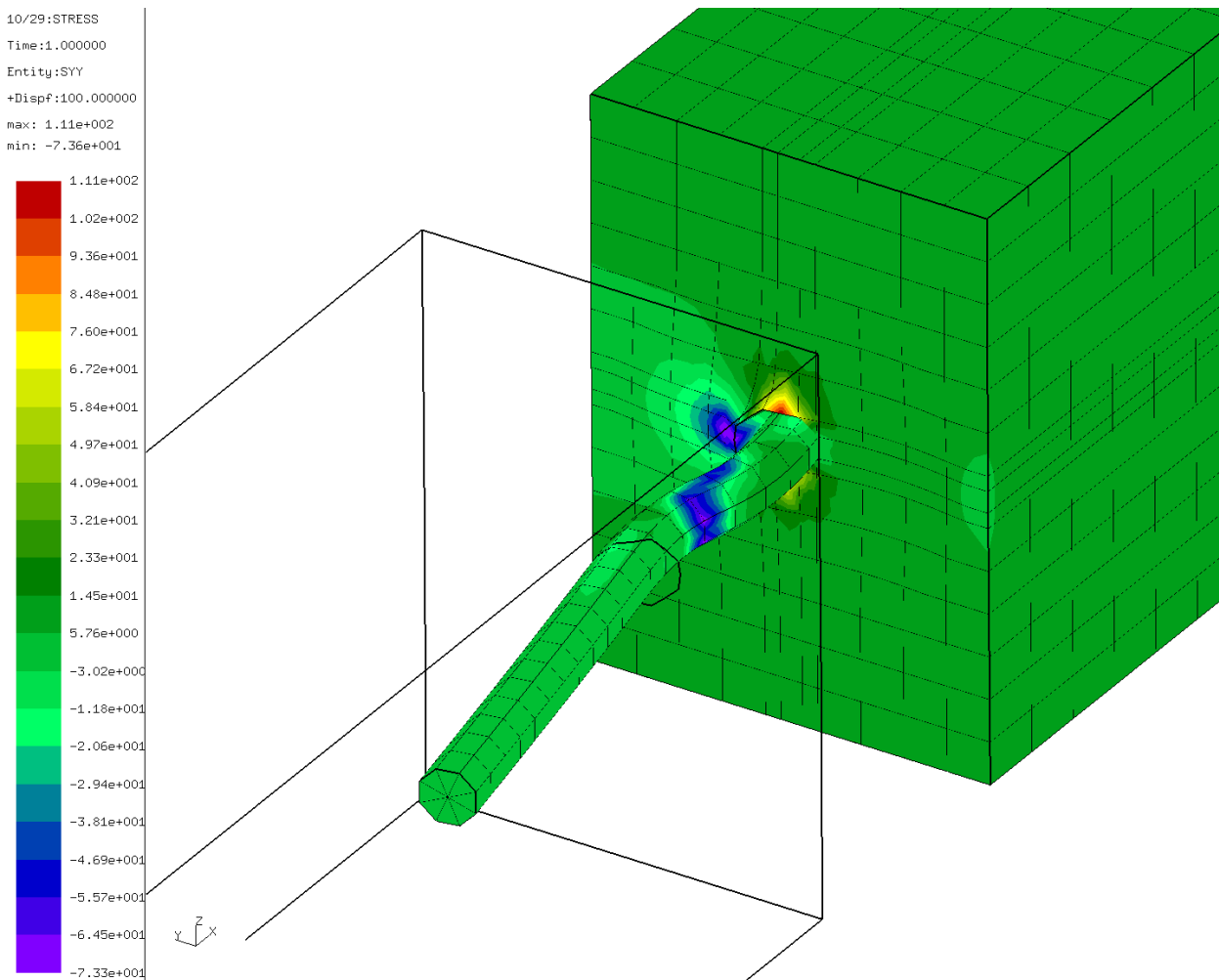
Eine weitere Modifikation im Modellaufbau besteht darin, dass hier beide Betonkörper an der Unterseite in vertikaler Richtung gehalten sind.

### Lastansatz

Um die Fugenöffnung zu simulieren, wurde für beide Betonkörper eine Abkühlung um 20 K vorgegeben. Dies führt zu einer negativen Materialdehnung, welche durch die Reibung zwischen Beton und Dübel behindert wird. Da die Betonkörper jeweils an den der Fugen gegenüberliegenden Seiten gehalten sind, ergeben sich Reaktionskräfte an den Knoten in den fixierten Flächen. Die Summe dieser Reaktionskräfte entspricht der Reibungskraft am Dübel. Dies ist die Kraft mit der die Fugenöffnung behindert wird.

### Ergebnisse

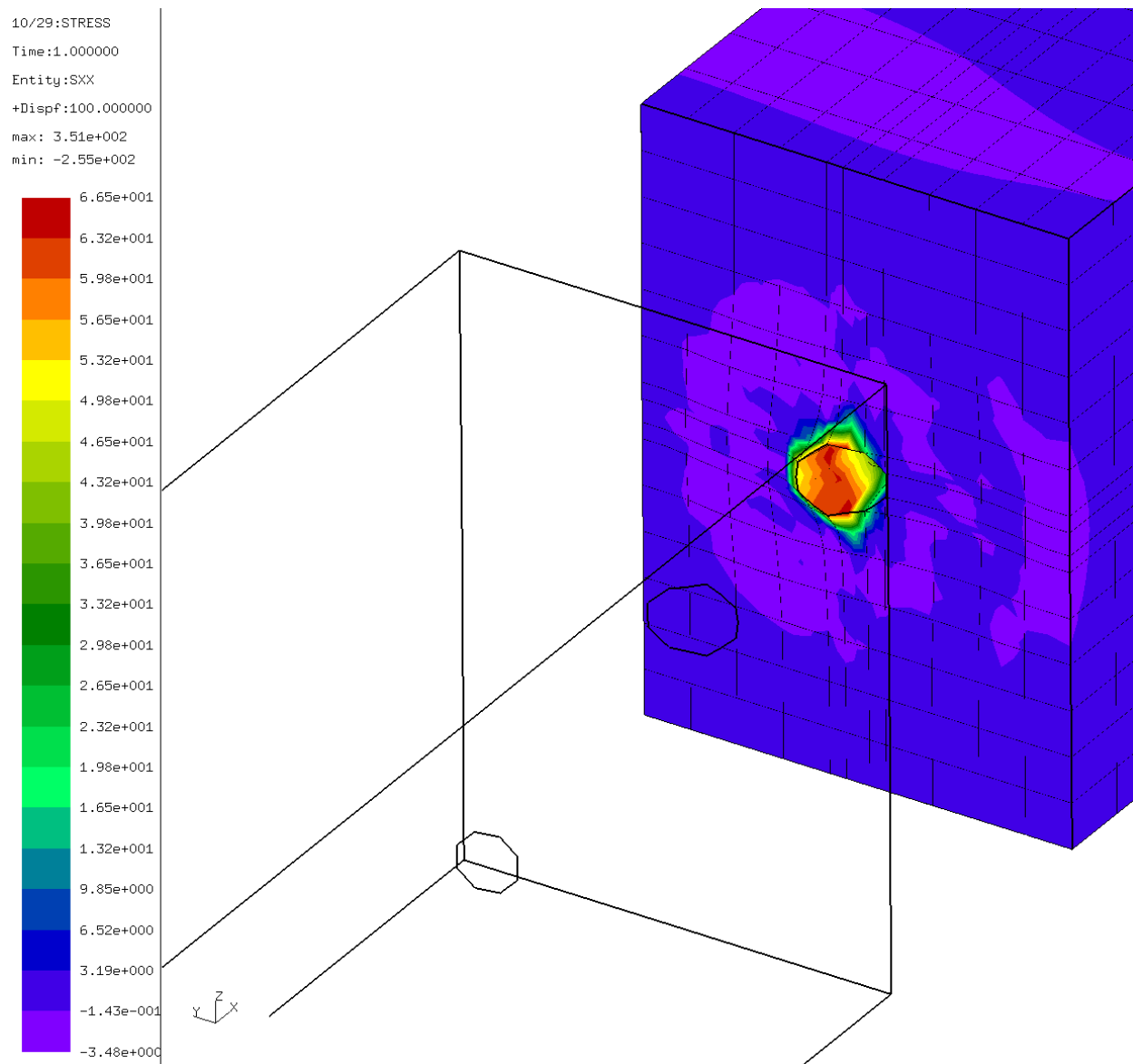
Im Zuge der Simulationsrechnungen wurde die Winkelabweichung der Dübel schrittweise von  $0^\circ$  auf  $10^\circ$  erhöht. Bild 3.146 zeigt die Spannungen in Querrichtung bei einer Winkelabweichung von  $10^\circ$ .



**Bild 3.146:** Spannungen in y-Richtung bei einer Winkelabweichung des Dübels von  $10^\circ$

Das Modell weist die zu erwartende Verformungsfigur auf. Die Spannungsspitzen im Beton liegen sowohl bezüglich der Druck- wie auch der Zugspannung über den Festigkeitswerten.

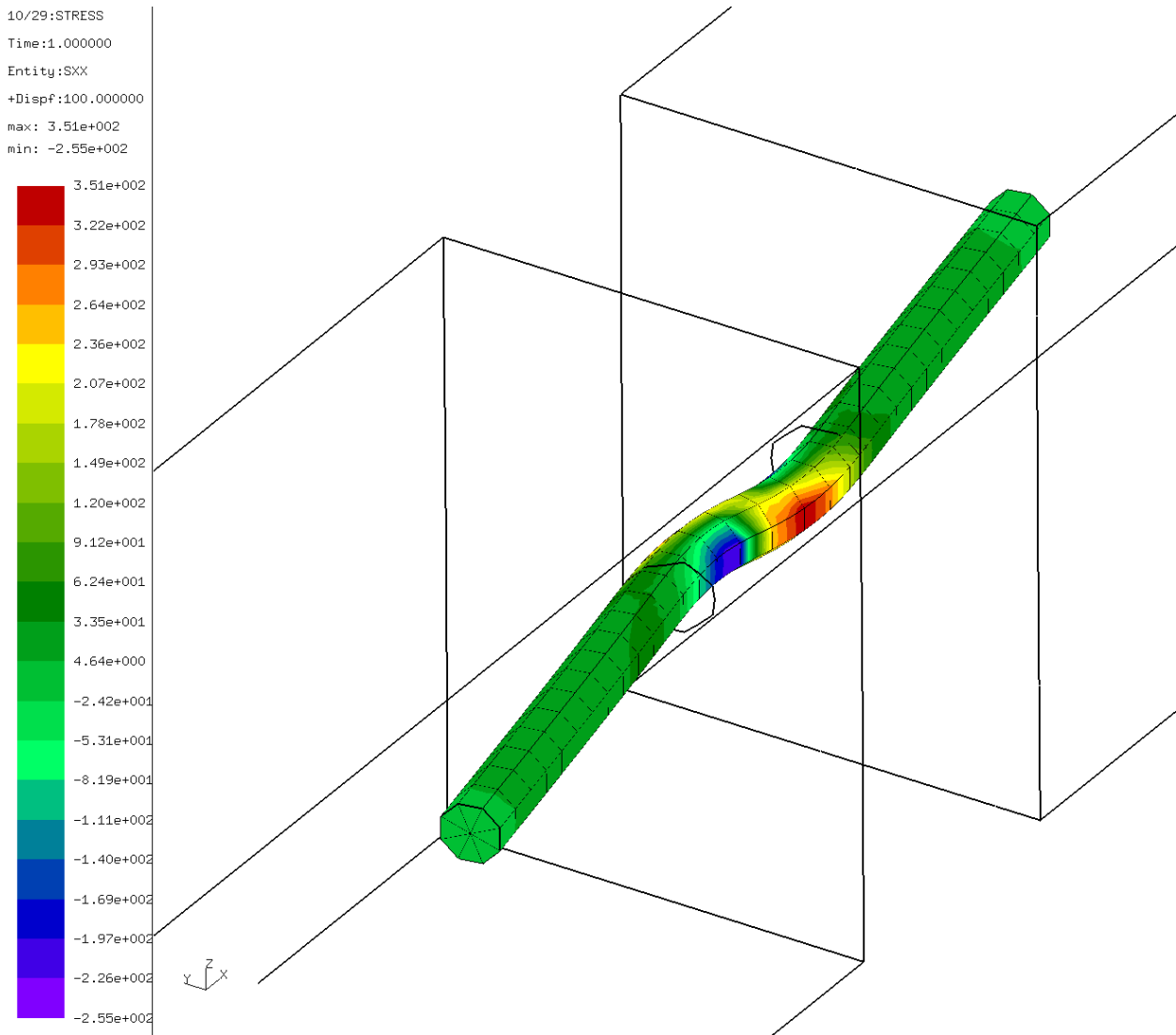
Die Betonspannungen in X-Richtung (Fahrtrichtung) sind in Bild 3.147 zu sehen.



**Bild 3.147:** Betonspannungen in x-Richtung bei 10° Winkelabweichung

Auffällig ist die Spannungsspitze in einem Abstand von ca. 2-3 cm von der Fugenflanke. Hier ist ein Betonausbruch sehr wahrscheinlich. Die Schädigung, im Zusammenspiel mit lokal begrenzten Entfestigungen (Plastifizierung, Mikrorissbildung) im Einspannbereich, beeinträchtigt die Wirksamkeit der Querkraftübertragung. Bei kleineren Winkelabweichungen ( $< 4^\circ$ ) sind diese Spannungen deutlich moderater und entsprechende Schäden nicht zu erwarten.

In Bild 3.148 sind die Biegespannungen im Dübel bei einer Winkelabweichung von 10° dargestellt.



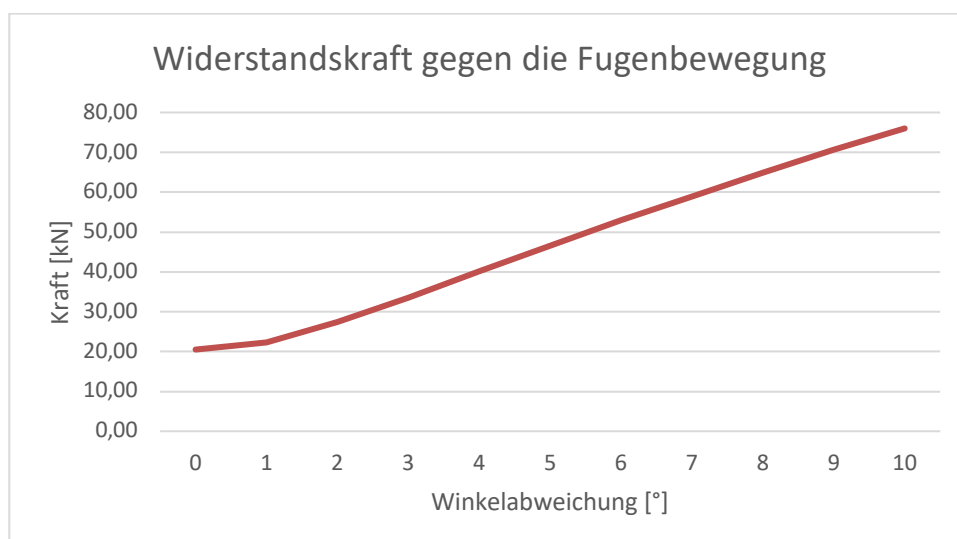
**Bild 3.148:** Biegespannungen am Dübel bei einer Winkelabweichung von  $10^\circ$

Wie zu sehen ist, bleiben die Biegespannungen unter der Fließgrenze des Bewehrungsstahls (500 MPa). Man kann also davon ausgehen, dass auch bei sehr großen Winkelabweichungen keine plastischen Verformungen des Dübels entstehen. Auffällig ist weiterhin, dass, ähnlich wie bei der Querkraftübertragung, fast die gesamte Interaktion zwischen Beton und Dübel im vorderen Viertel des Einspannbereiches stattfindet.

Von besonderem Interesse sind die Widerstandskräfte, welche eine freie Fugenbewegung behindern. Die berechneten Werte sind in Tab. 3.25 zusammengestellt.

Winkelabweichung	Widerstandskraft gegen die Fugenbewegung
[°]	[kN]
0	20,50
1	22,30
2	27,50
3	33,60
4	40,10
5	46,60
6	52,90
7	58,90
8	64,90
9	70,60
10	76,00

**Tab. 3.25:** Widerstandskräfte gegen die Fugenbewegung bei unterschiedlicher Winkelabweichung



**Bild 3.149:** Widerstandskräfte gegen die Fugenbewegung bei unterschiedlicher Winkelabweichung

Die Ergebnisse zeigen, dass allenfalls eine Winkelabweichung von  $1^\circ$  als unbedeutend gelten kann. Eine weitere Vergrößerung des Winkels zwischen Soll- und Istlage führt zu einer nahezu linearen Erhöhung der Widerstandskraft gegen eine Fugenbewegung.

Die negativen Auswirkungen einer Blockade der Fuge bestehen darin, dass die verhinderte Fugenbewegung an einer anderen Fuge realisiert wird, welche weniger Widerstand leistet. In dieser Hinsicht ist also nicht die Größe der Widerstandskraft von Bedeutung, sondern die Unterschiede zwischen den Fugen. Wenn eine Fuge blockiert wird und die Bewegung stattdessen an der Nachbarfuge stattfindet, dann muss die Widerstandskraft der Fuge die Reibungskraft der Platte mit dem Untergrund aufnehmen. Im Gleichgewichtsfall nimmt der blockierende Dübel also die Dübelkraft aus der Nachbarfuge und die Reibungskraft aus der Platte auf. Ein Blockieren der Fuge findet also immer dann statt, wenn der Unterschied der Widerstandskraft an zwei aufeinanderfolgenden Fugen die Reibungskraft der Platte auf der Unterlage übersteigt. Unterstellt man einen Reibungsbeiwert von 1,0, so ergibt sich pro Dübel eine Reibungskraft aus der Platte von:

$$F_R = 1,0 \cdot 0,27m \cdot 0,25m \cdot 5m \cdot \frac{24kN}{m^3} = 8,1kN$$

Da 1° Winkelabweichung die Widerstandskraft um ca. 6 kN erhöhen (siehe Tab. 3.25), entspricht die Reibungskraft einer zusätzlichen Winkelabweichung von ca. 1,3°. D. h. wenn sich bei zwei aufeinanderfolgenden Fugen die Winkelabweichung um mehr als 1,3° unterscheidet, kommt es zu einer Blockade in der Fuge mit der größeren Winkelabweichung.

Weil die Dübel innerhalb einer Fuge immer zusammenwirken, ist es nicht zielführend, die Winkelabweichung des einzelnen Dübels zu betrachten. Aussagekräftiger ist die Analyse der mittleren Winkelabweichung aller Dübel in der Fuge.

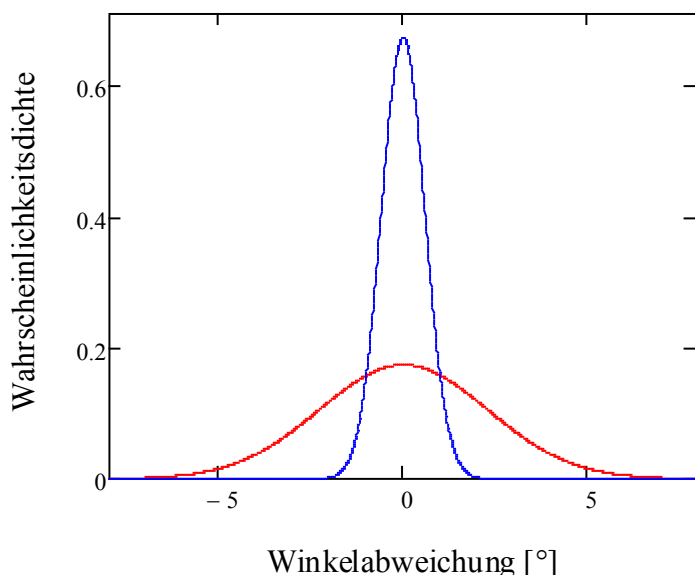
Die senkrechte Abweichung der Dübel von der Solllage kann als Zufallsgröße aufgefasst werden. Die Standardabweichung für diese Zufallsgröße kann mit 20 mm abgeschätzt werden (siehe [FREUDENSTEIN 2010], Bild 20). Das entspricht einem Winkel von

$$\alpha_{w,s} = \arctan\left(\frac{20mm}{500mm}\right) = 2,3^\circ$$

Die in einer Fuge zusammenwirkenden Dübel können als Stichprobe aus der Verteilung aufgefasst werden. Unterstellt man eine Normalverteilung, so sind die Mittelwerte der Stichproben ebenfalls normalverteilt. Bei 15 Dübeln pro Fuge gilt für die Standardabweichung:

$$\sigma_{\alpha,SP} = \frac{2,3^\circ}{\sqrt{15}} = 0,6^\circ$$

Die Verteilungen der Winkelabweichungen und der Mittelwerte der Stichproben sind in Bild 3.150 dargestellt.



**Bild 3.150:** Dichtefunktionen der Streuungen der Winkelabweichungen der einzelnen Dübel (rot) und der Mittelwerte der Winkelabweichungen der Dübel in einer Fuge

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die mittlere Winkelabweichung in zwei aufeinanderfolgenden Fugen größer als 1,3° kann Formel berechnet werden, indem die Wahrscheinlichkeiten aller Winkelkombinationen aufsummiert werden, die eine Differenz größer als 1,3° aufweisen.

Für den Fall, dass beide Winkelwerte positiv sind, gilt offensichtlich

$$P1_B = \int_{1,3}^3 \int_0^{x-1,3} f_{SM}(x) \cdot f_{SM}(y) dy dx \quad (3-21)$$

P1<sub>B</sub> – Wahrscheinlichkeit dafür, dass die mittlere Winkelabweichung in zwei aufeinanderfolgenden Fugen größer als 1,3° (Blockade der Fuge), bei positiven Werten für beide Winkel

f<sub>SM</sub> – Dichtefunktion der Stichprobenmittelwerte (Stichproben mit n=15)

Ist der große Winkel positiv und der kleine Winkel negativ orientiert, so ergibt sich:

$$P2_B = \int_{1,3}^3 \int_{-(x-1,3)}^0 f_{SM}(x) \cdot f_{SM}(y) dy dx \quad (3-22)$$

P2<sub>B</sub> – Wahrscheinlichkeit dafür, dass die mittlere Winkelabweichung in zwei aufeinanderfolgenden Fugen größer als 1,3° (Blockade der Fuge), bei unterschiedlicher Orientierung der Winkel (großer Winkel positiv, kleiner Winkel negativ)

Aus Symmetriegründen müssen sich für die umgekehrten Fälle (beide Winkel negativ bzw. großer Winkel negativ und kleiner Winkel positiv) die gleichen Wahrscheinlichkeiten ergeben.

Damit gilt:

$$P_B = 2 \cdot (P1_B + P2_B) \quad (3-23)$$

P<sub>B</sub> – Wahrscheinlichkeit dafür, dass die mittlere Winkelabweichung in zwei aufeinanderfolgenden Fugen größer als 1,3° (Blockade der Fuge)

Mit den oben angegebenen Parametern ergibt sich eine Blockadewahrscheinlichkeit von

$$P_B = 7,3 \cdot 10^{-3}$$

Das bedeutet, dass im Durchschnitt eine von 137 Fugen blockiert ist.

Erhöht sich die mittlere Winkelabweichung um 1° auf 3,3°, so ergibt sich für die Blockadewahrscheinlichkeit bereits ein Wert von ca. 4 %. In diesem Fall ist bereits von 25 Fugen eine blockiert.

Die Berechnung zeigt die Wichtigkeit einer exakten Fugenausrichtung. Schon bei einer leicht erhöhten Streuung der Winkelausrichtung erhöht sich die Anzahl der blockierten Fugen signifikant.

Obleich die hier abgeleiteten Aussagen zur Bedeutung einer exakten Winkelausrichtung der Dübel als gut begründet gelten können, muss darauf hingewiesen werden, dass das zugrundeliegende mechanische Problem sehr komplex ist und die theoretische Beschreibung zu hochgradig nichtlinearen Berechnungen führt. Speziell der Zusammenhang zwischen Adhäsion, Haft- und Gleitreibung kann ohne Kalibrierung an Versuchsergebnissen nicht zuverlässig modelliert werden. Die berechneten Absolutwerte für die Widerstandskräfte können deshalb nicht als hinreichend gesichert gelten.

### 3.6.8 Simulation der Lärmemissionen und Auswertung

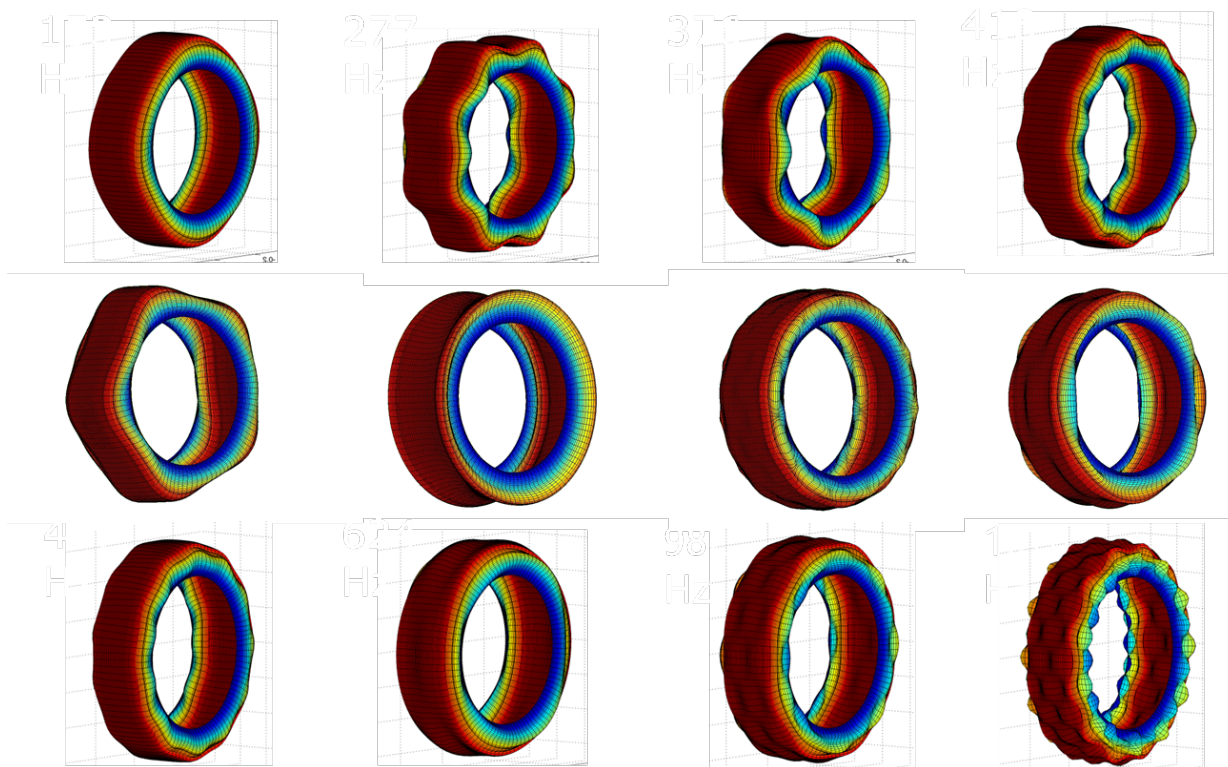
#### Vorbereitungen

Im Rahmen der akustischen Simulationen wurden über 700 Fälle untersucht. Um die Rechenzeit für einen Fall weiter zu verkürzen, wurde das in Abschnitt 3.4.2 beschriebene Modell, mit dem pro Fall von einer Rechenzeit von rund 6,5 Stunden auszugehen war, weiter optimiert. Andernfalls hätte die Parameterstudie zu einer reinen Rechenzeit von einigen Monaten geführt und Änderungen an den Parametern hätten nicht ohne lange Wartezeiten auf das Ergebnis durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Schritt dabei war,



die Schallabstrahlung nicht für jeden Fall zeitaufwändig neu berechnen zu müssen, sondern auf ein Kollektiv vorberechneter Übertragungsfunktionen zwischen Kontaktkräften und Schalldrücken an den einzelnen CPX-Positionen zurückgreifen zu können, die jedem Rechenfall unverändert zugrundegelegt werden können. Dies gelingt deshalb, weil zwischen Kontaktkraft und Schalldruck ein linearer Zusammenhang besteht und nur die Kontaktkräfte von den Oberflächeneigenschaften der Fahrbahn abhängen. Hat man die Kontaktkräfte für jeden Fall berechnet, kann man durch Anwendung der vorberechneten Übertragungsfunktionen die Schalldruckpegel an den einzelnen CPX-Positionen schnell ableiten.

Die Ermittlung der Übertragungsfunktionen geht von der Zerlegung der Reifenschwingungen in einzelne Schwingungsmoden aus und berechnet für jede dieser Eigenschwingungsformen die Kräfte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Dies führt zum Prinzip der „modalen Kräfte“. In Bild 3.151 sind einige Schwingungsformen dargestellt. Die tatsächlichen Kräfte setzen sich aus der Gesamtheit der modalen Kräfte zusammen.

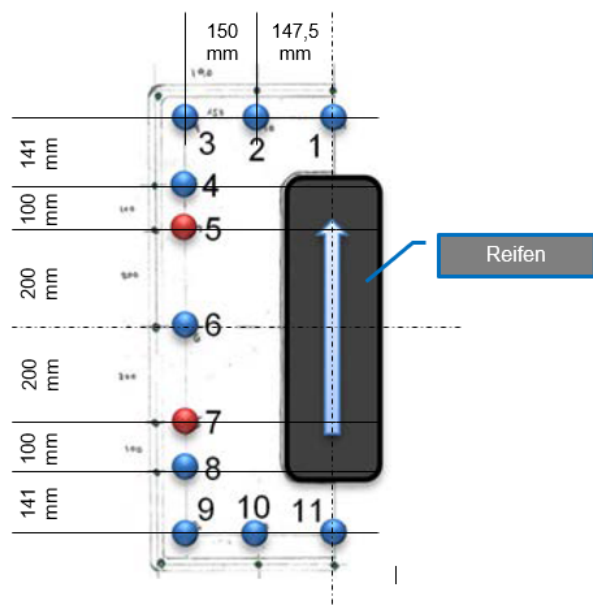


**Bild 3.151:** Beispiele für Schwingungsformen des Reifens

Um die tatsächlichen Schalldrücke an den CPX-Positionen richtig abzubilden, ist die Berücksichtigung einer größeren Anzahl von Übertragungsfunktionen und damit auch Moden erforderlich. Im Modell werden 25 Moden in Umfangsrichtung und 20 Quermoden berücksichtigt. Die Moden in Umfangsrichtung sind dadurch gekennzeichnet, dass die Auslenkung der Reifenoberfläche (Schwingungsrichtung) in radialer Richtung an allen Punkten eines Reifenquerschnitts gleich ist (beispielsweise die zweite Schwingungsform in der ersten Reihe in Bild 3.151). Bei Quermoden findet eine Aufteilung der Schwingungsrichtung auch in Querrichtung statt (beispielsweise die Schwingungsform ganz rechts unten in Bild 3.151).

Durch Implementation des Prinzips der modalen Kräfte reduziert sich die Rechenzeit pro Fall auf etwa 20 Minuten, so dass ein Kollektiv von 500 Fällen in rund 660 Stunden bzw. 27,5 Tagen reiner Rechenzeit berechnet werden konnte. Die Simulation liefert sowohl Zeitfunktionen der Kontaktkräfte und Schalldrücke als auch Schmalband- und Terzspektren dieser Größen. Gerade mit Hilfe der Zeitfunktionen können die Auswirkungen der Parametervariationen anschaulich gemacht werden. Die Abtastfrequenz in der Simulation beträgt 5.790 Hz. Der Frequenzbereich der dargestellten Spektren reicht von 315 Hz bis 2 kHz worin alle für das Reifen-Fahrbahn-Geräusch wichtigen Frequenzen enthalten sind. Die Positionen, an denen die Schalldrücke berechnet werden, entsprechen den Messpositionen der Rundummessungen nach dem

CPX-Verfahren, wie es in [FE 08.0232/2014] zur Anwendung kam. Die Mikrofon- bzw. Berechnungspositionen sind in Bild 3.152 nochmals im Detail dargestellt. Die Höhe der Berechnungspositionen über der Fahrbahn beträgt in allen Fällen 0,1 m. Die in rot eingetragenen Positionen entsprechen den in der [ISO 11819-2:2017] vorgegebenen Messpositionen für CPX-Messungen.



**Bild 3.152:** Positionen für die Berechnung der Schalldrücke des Reifen-Fahrbahn-Geräusches in der Umgebung des Reifens.

### Aufbereitung der Eingangsdaten für die akustische Simulation

Die akustische Simulation benötigt als Eingangsdaten eine umfassende dreidimensionale Topographie der Fahrbahnoberfläche inklusive der Makrotextur im Wellenlängenbereich zwischen 1 mm und 500 mm. Die hierzu generierten Fahrbahnoberflächenmodelle folgen dabei konsequent der in Kapitel 3.3.6 „Geräuschemission im Reifen-Fahrbahn-Kontakt“ und in Bild 3.37 beschriebenen Vorgehensweise der schrittweisen Überlagerung der Fugengeometrie, der Verformung der einzelnen Platten und der Oberflächenmakrotextur. Grundmodell jeder einzelnen betrachteten Oberfläche (Rechenfall) ist dabei die vollständig ebene und texturlose Oberfläche. Diese führt per se zu den geringsten Reifen-Fahrbahn-Geräuschen und wird als Referenzfall betrachtet.

Die größte Parametervielfalt entstand durch die Variation der Fugengeometrie und des Übergangs aufeinanderfolgender Platten. Diesbezüglich wurden folgende Parameter variiert:

- Abstand der Querscheinfugen in Fahrtrichtung (Plattenlänge)
- Fugenöffnungsweite der Querscheinfugen
- Ausbildung des Fugenrandes (Anfasung)
- Füllhöhe der Fugenfüllung
- Steifigkeit der Fugenfüllung
- Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten am Fugenübergang

Die Parametervariationen der Fugengeometrie, der Plattenverformung und der Oberflächentextur sind nachfolgend detailliert beschrieben.

### Plattenlänge

Die Auswahl der variierten Plattenlängen, d. h. der Abstände der Querscheinfugen, orientiert sich an den bautechnischen Modellrechnungen. In Kap. 3.6.3 „Untersuchung des Einflusses des Quersfugenabstandes“ sind die Modellergebnisse für Plattenverformungen und Spannungszustände beschrieben. Die dort untersuchten Plattenlängen (Quersfugenabstände) betragen

- 3,0 m – 3,5 m – 4,0 m – 4,5 m – 5,0 m – 5,5 m – 6,0 m – 6,5 m – 7,0 m.

Diese Plattenlängen führen zu den in Tab. 3.26 eingetragenen maximalen Verformungen  $maxD3$  einer Platte gegenüber der völlig ebenen Platte. Die Werte sind für zwei Temperaturlastfälle mit positivem und negativem Temperaturgradienten innerhalb der Betondecke in vertikaler Richtung, ausgehend von der Plattenoberkante, angegeben. Die beiden Temperaturgradienten führen aufgrund ihres unterschiedlichen Vorzeichens im ersten Fall zu einer Wölbung der Betonplatte (Betonplatte oben warm, unten kalt, Temperaturlastfall 1), im zweiten zu einer Aufschüsselung (Betonplatte oben kalt, unten warm, Temperaturlastfall 2). Die angegebenen maximalen Verformungen  $maxD3$  (siehe Tab. 3.26) geben den Wert in Plattenmitte gegenüber dem Plattenrand an der Querscheinfuge in der Radrollspur an.

Quersfugenabstand	$maxD3$	
	Temperaturlastfall 1 (Wölbung)	Temperaturlastfall 2 (Aufschüsselung)
3,0 m	0,5 mm	1,4 mm
3,5 m	0,6 mm	1,6 mm
4,0 m	0,6 mm	1,8 mm
4,5 m	0,7 mm	2,0 mm
5,0 m	0,7 mm	2,2 mm
5,5 m	0,7 mm	2,3 mm
6,0 m	0,7 mm	2,5 mm
6,5 m	0,7 mm	2,6 mm
7,0 m	0,7 mm	2,7 mm

Tab. 3.26: Maximale Plattenverformungen  $maxD3$  in mm.

In Kap. 3.7 „Bewertung der Parameterstudie“ ist beschrieben, dass zur Minimierung der maximalen Spannungen innerhalb der Betonplatten ein Regelabstand von 4,0 m bis 4,5 m günstig ist. Kürzere Platten führen zu keiner wesentlichen Reduzierung der Spannungen. Bei längeren Abständen kommt es dagegen zu einer Erhöhung um bis 50 %. Für die Plattenverformung gilt dagegen: Je kleiner der Quersfugenabstand desto kleiner die Verformung. Der maximale Verformungswert einer 7,0 m langen Platte ist fast doppelt so groß wie der einer 3,0 m langen Platte.

Ausgehend von der kürzesten Plattenlänge von 3,0 m nehmen die maximalen Verformungen der Betonplatte mit zunehmender Plattenlänge zu. Auf der Grundlage dieser bautechnischen Ergebnisse wurden für die akustische Simulation folgende Quersfugenabstände resp. Plattenlängen festgelegt:

1. 3,0 m
2. 4,0 m
3. 5,0 m

### Öffnungsweite der Querscheinfugen

Die Dehnung  $\Delta L$  der Betonplatten in m folgt den Temperaturverhältnissen in einem linearen Zusammenhang:

$$\Delta L = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot L$$

mit

- $\alpha_T$  Wärmedehnzahl in 1/K
- $\Delta T$  Temperaturdifferenz in K
- $L$  Ausgangslänge der Betonplatte (Länge nach der Herstellung) in m

Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist der Unterschied der mittleren Temperatur der Betonplatte zu einem gegebenen Zeitpunkt bezogen auf die Nullspannungstemperatur bei der Herstellung der Betondecke kurz nach der Erhärtung (Beispiel: Nullspannungstemperatur 0 °C, eine mittlere Betontemperatur zum Zeitpunkt  $t$  von 40 °C ergibt eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von 40 K).

Die Wärmedehnzahl  $\alpha_T$  ist materialabhängig und wird hier mit den beiden Eckwerten aus Tab. 3.21 zugrunde gelegt:

1.  $9 \cdot 10^{-6}$  1/K
2.  $13 \cdot 10^{-6}$  1/K

Dies führt in Kombination mit den oben festgelegten Plattenlängen und Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  von 20 K und 40 K zu den in Tab. 3.27 genannten Plattendehnungen  $\Delta L$ :

Plattenlänge	$\alpha_T$			
	$9 \cdot 10^{-6}$ 1/K		$13 \cdot 10^{-6}$ 1/K	
	$\Delta T$		$\Delta T$	
	20 K	40 K	20 K	40 K
3,0 m	0,5 mm	1,1 mm	0,8 mm	1,6 mm
3,5 m	0,6 mm	1,3 mm	0,9 mm	1,8 mm
4,0 m	0,7 mm	1,4 mm	1,0 mm	2,1 mm
5,0 m	0,9 mm	1,8 mm	1,3 mm	2,6 mm

**Tab. 3.27:** Dehnung  $\Delta L$  der Betonplatten in Abhängigkeit von der Plattenlänge (Ausgangslänge), der Wärmedehnzahl  $\alpha_T$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ .

Die Nennfugenöffnungsweite beträgt bei klassischer Querscheinfugenausbildung 12 mm (Bild 3.1). Für kürzere Plattenlängen (4,0 m und 3,0 m), wie sie hier in den Parametervariationen untersucht wurden, ergibt sich die in Bild 3.2 dargestellte Querscheinfugenausbildung mit kleinerem Fugenspalt. Anhand dieser Betrachtungen gingen in die akustische Simulation, in Kombination mit der entsprechenden Plattenlänge, folgende Fugenöffnungsweiten (inklusive Anfasung) ein:

1. Plattenlänge 3,0 m Fugenöffnungsweiten (5 mm), (7 mm), 10 mm
2. Plattenlänge 4,0 m Fugenöffnungsweiten 8 mm, 12 mm
3. Plattenlänge 5,0 m Fugenöffnungsweiten 9 mm, 12 mm, 15 mm

In den hier beschriebenen Simulationen fanden die in Klammer angegebenen Fugenöffnungsweiten bei einer Plattenlänge 3,0 m keine Berücksichtigung.

### Fugenausbildung

Nach Regelwerk wird der Aufweitungsschnitt an der Oberkante beidseitig zusätzlich noch mit Fasen versehen. In der akustischen Parameterstudie wurden alle Fälle mit Fase (2 mm in Draufsicht) untersucht.

### Plattenverformung

Der Fall der ebenen Platte ohne Verformung wird der akustischen Parameterstudie als Referenzfall zugrunde gelegt. Zusätzlich werden die Plattenverformungen „Aufschüsselung“ und „Aufwölbung“ in die Parameterstudie eingespeist. Pro Verformungstyp wird jedoch nur ein „extremer“ Verformungszustand zugrunde gelegt, um sozusagen das „obere Ende“ des Einflusses von Plattenverformungen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch abzubilden.

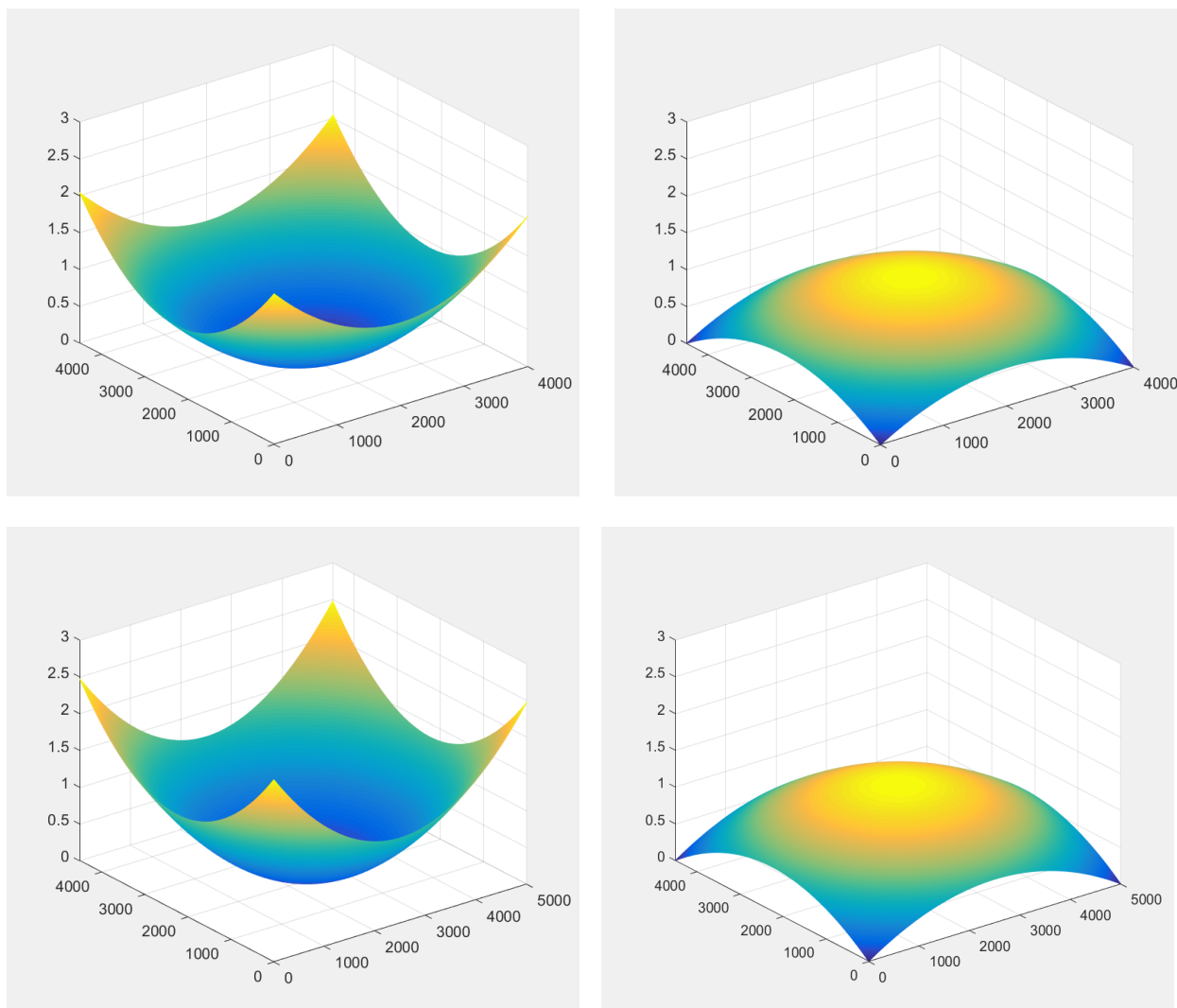
Die Verformungen jeweils einer Platte sind in Bild 3.153 an zwei Beispielen dreidimensional dargestellt. Die Aufschüsselung einer Platte wurde für die akustische Simulation mit einer Funktion zweiten Grades gemäß Gleichung (3-16) und den in Tab. 3.28 eingetragenen Koeffizienten mit einer Auflösung von 0,2 mm berechnet. Die Plattenbreite wurde mit 4,5 m angenommen.

Berechnungsfall	Plattenlänge l [m]	$a_1$ [1/mm]	$a_2$ [1/mm]	sv0 [mm]
Aufschüsselung	4,0	$2,298 \cdot 10^{-7}$	$2,222 \cdot 10^{-7}$	0,264
	5,0	$2,108 \cdot 10^{-7}$	$2,293 \cdot 10^{-7}$	0,322
Aufwölbung	4,0	$1,301 \cdot 10^{-7}$	$1,070 \cdot 10^{-7}$	0,598
	5,0	$9,467 \cdot 10^{-8}$	$1,185 \cdot 10^{-7}$	0,671

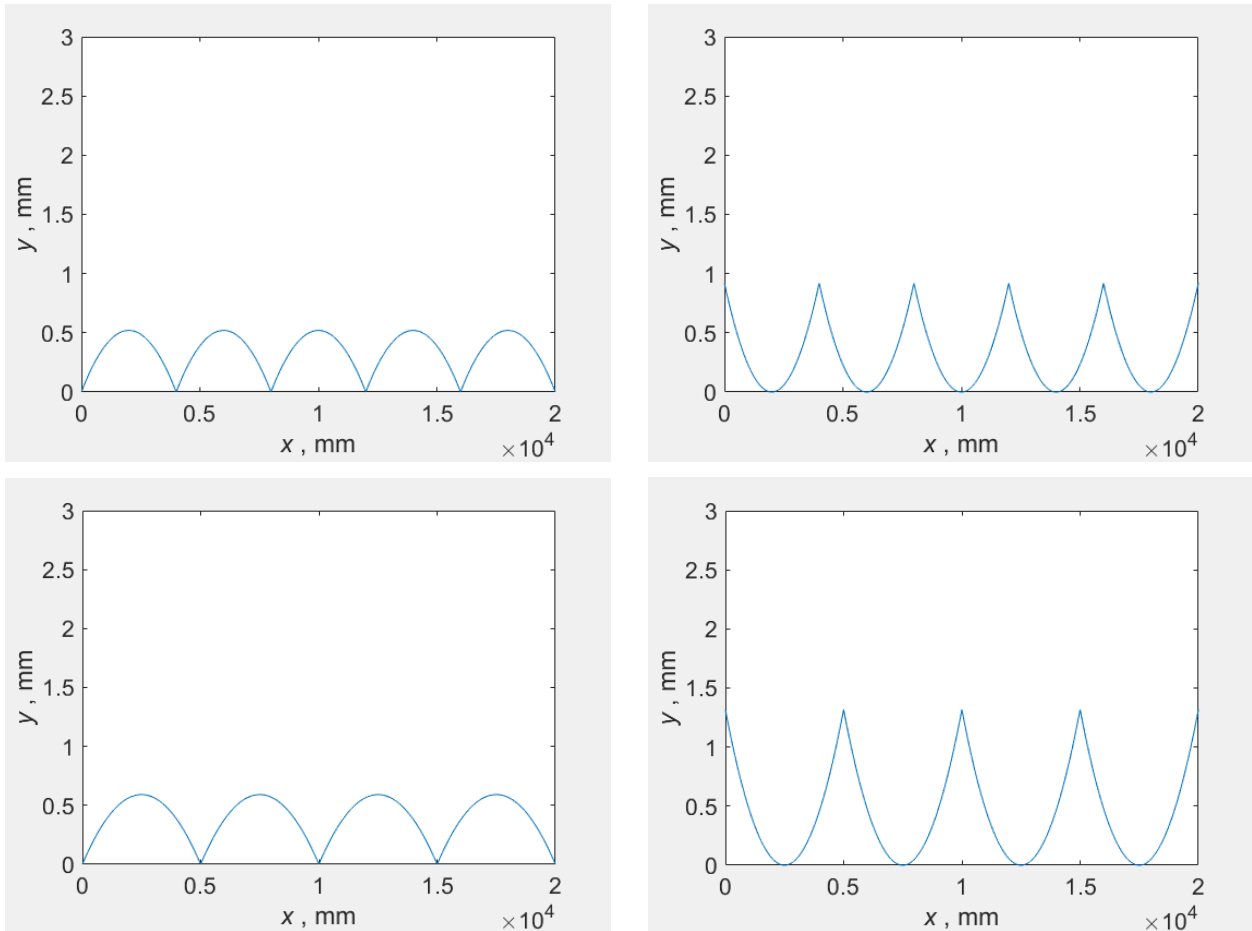
**Tab. 3.28:** Koeffizientenwerte für die Polynome der Rollspurberechnung für die akustische Simulation aufgrund von Plattenverformungen.

Für die Modellrechnungen wurden kurze Fahrbahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von 20 m durch Aneinanderreihung der einzelnen verformten Platten modelliert und die Radrollspur in einem Abstand von 1 m zum seitlichen Rand der Platten angenommen. Im Standardfall (Plattenlänge 5m) beträgt das Maximum der gewölbten Platte gegenüber der ebenen Platte in Längsrichtung und in 1 m Querabstand zum Plattenrand 0,52 mm, das der aufgeschüsselten Platte 0,92 mm. Die jeweiligen Tiefpunkte der Profile, das heißt deren Minima sind für die akustischen Berechnungen dabei jeweils auf 0 mm gesetzt. Der Verlauf der Längsprofile entspricht damit den in Bild 3.154 dargestellten Kurven.

Die Querneigungen innerhalb einer Platte aufgrund der Wölbung bzw. Aufschüsselung werden für die akustischen Berechnungen vernachlässigt, weil die wirksame Breite der Radrollspur nicht mehr als 30 cm beträgt.



**Bild 3.153:** 3D-Darstellung der in der akustischen Parameterstudie berücksichtigten Verformungen einer 4m (oben) und 5m (unten) langen und jeweils 4,5 m breiten Platte für die Verformungstypen „Aufschüsselung“ (links) und „Wölbung“ (rechts). Alle Maße in mm.



**Bild 3.154:** Längsprofile der Radrollspur über eine Länge von 20 m in 1 m Querabstand zum Plattenrand für die Verformungstypen „Wölbung“ (links) und „Aufschüsselung“ (rechts) ohne Fugen. Oben: Plattenabstand 4,0 m; unten: Plattenabstand 5,0 m.

Zur Berücksichtigung der Öffnungsweiten der Querscheinfugen werden die einzelnen Platten entsprechend auseinandergerückt.

### Höhenversatz der Betonplatten

Durch die Verdübelung der Betonplatten im Bereich der Querscheinfugen ist im unbelasteten Zustand und unter der Voraussetzung gleicher Materialeigenschaften kaum mit einem Höhenversatz aufeinanderfolgender Betonplatten zu rechnen. Durch die Verkehrslast kann aber dennoch ein geringer Höhenversatz im Quersfugenbereich entstehen (Bild 3.41). Der Höhenversatz ist dabei in Fahrtrichtung immer abwärtsgerichtet, d. h. die in Fahrtrichtung zuerst überrollte Platte liegt höher als die darauffolgende.

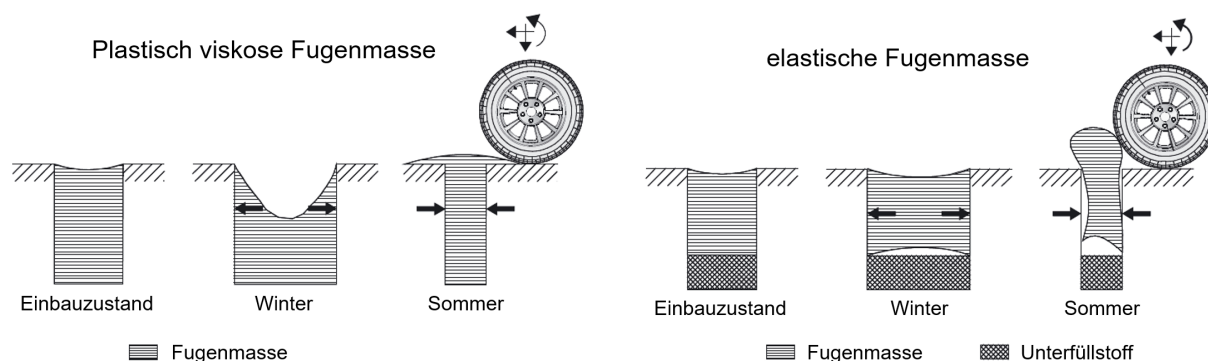
In der akustischen Parameterstudie werden drei Maße für den Höhenversatz untersucht:

1. kein Höhenversatz
2. -0,5 mm
3. -1,0 mm

### Fugenfüllhöhe und Steifigkeit des Fugenfüllmaterials

Dem Umstand, dass die Fugenfüllung, egal ob es sich um Fugenband oder Fugenvergussmasse handelt, tiefer oder höher liegen können als die Oberkante der Betonplatten (Bild 3.155), die Fugenfüllung also nicht bündig mit der Oberkante abschließt, wird im akustischen Modell Rechnung getragen. Dabei wurden zwei Parameter berücksichtigt:

- die Höhe des Unter- bzw. Überstands der Fugenfüllung und
- die Steifigkeit des Fugenfüllmaterials.



**Bild 3.155:** Betriebsverhalten der Fugenfüllung bei überwiegend plastisch eingestellten Fugenfüllungen (links) und elastischen Fugenmassen (rechts).

Die Festlegung der Steifigkeiten der Fugenfüllung für die Modellrechnungen sind auf Messungen der mechanischen Impedanz an verschiedenen Materialien bezogen. Die Messung der mechanischen Impedanz der Probekörper erfolgt dabei mit einer – wie bei Punktmobilitätsmessungen an Reifen – quadratischen Anregefläche. Die Fläche  $S$  des quadratischen Plättchens mit einer Kantenlänge von 2 cm ergibt sich zu

$$S = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Für Reifen resultieren daraus typische Steifigkeiten  $s$  von

$$s = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}.$$

Die Steifigkeit der Fugenfüllung wurde für die Modellrechnung so gewählt, dass sie eine Größenordnung höher ist als die Steifigkeit des Reifens.

Folgende Festlegungen wurden getroffen. Die Angaben zur Fugenfüllhöhe beziehen sich dabei auf die Oberkante der Betonplatten:

- |    |               |                             |             |                              |
|----|---------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|
| 1. | Fugenfüllhöhe | -10 mm (Fugenfüllung fehlt) | Steifigkeit | ohne Bedeutung               |
| 2. | Fugenfüllhöhe | -1 mm                       | Steifigkeit | $2,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ |
| 3. | Fugenfüllhöhe | +2 mm                       | Steifigkeit | $2,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ |

Die Oberfläche der Fugenfüllung (Oberflächentextur) wurde in jedem Fall als glatt, also texturlos angenommen.

### Oberflächentextur

Die akustische Parameterstudie umfasst folgende vier Texturen:

1. texturlose Fahrbahnoberfläche
2. Waschbeton 0/8
3. Grinding Typ S (Grinding S)
4. Grinding, akustisch optimiert (Grinding A)

Ausgangspunkt ist in jedem Fall die texturlose Oberfläche. Die übrigen Parameter der Parametervariationen wurden alle auch mit texturloser Oberfläche durchgeführt. Von diesen Fällen sind – im Vergleich zu den Fällen mit Oberflächentextur – die jeweils niedrigsten Rollgeräuschpegel zu erwarten.



Für die Fälle mit Oberflächentextur wurden die texturlosen Oberflächenmodelle mit einer realen Fahr-  
bahntextur überlagert. Für die Regelbauweise Waschbeton 0/8 und die Bauweise Grinding A liegen hierzu  
Originalmessungen von Lasertexturprofilen aus dem Projekt FE 08.0232/2014/FRB „Einfluss der Fugen-  
öffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton“ [FE 08.0232/2014] in  
einer Länge von 20 m vor. Bei der Herstellung der Textur wurde ein Wellenbesatz mit einer Segmentbreite  
von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 2,2 mm gewählt. Die Textur entspricht dem Zustand nach  
einem knappen Jahr unter Verkehr. Die Textur für die Oberfläche Grinding S mit einer Mindestsegment-  
breite von 3,2 mm bei der Herstellung wurde aus Texturmessungen in einer Reihe von anderen Projekten  
abgeleitet.

Jeweils sechs parallele Laserprofile wurden in das Modell eingespeist. Die Laserprofile der Grindingtextu-  
ren wurden dabei so ausgewählt, dass sie dem Verlauf der Stegoberflächen folgen. Die Texturen wurden  
für die Überlagerung mit den parametrisierten Oberflächenmodellen in folgenden Schritten aufbereitet:

- Entfernung der Fugen aus den Originalprofilen und Schließung der Lücken durch Interpolation der  
angrenzenden Texturabschnitte;
- Entfernung der langwelligen Unebenheiten (tatsächliche Plattenverformung am Tag der Messung) mit  
Hilfe eines Hochpasses 1. Ordnung im Ortsbereich. Die Grenzwellenlänge des Hochpasses wurde zu  
 $\lambda_g = 0,5$  m gewählt. Aus der Hochpassfilterung ergab sich für jedes der sechs parallelen Profile eine  
Korrekturkurve zur Beseitigung der langwelligen Unebenheiten (Plattenverformungen). Am Ende  
wurde auf jedes Profil die mittlere Korrekturkurve aus den sechs Korrekturkurven angewandt.

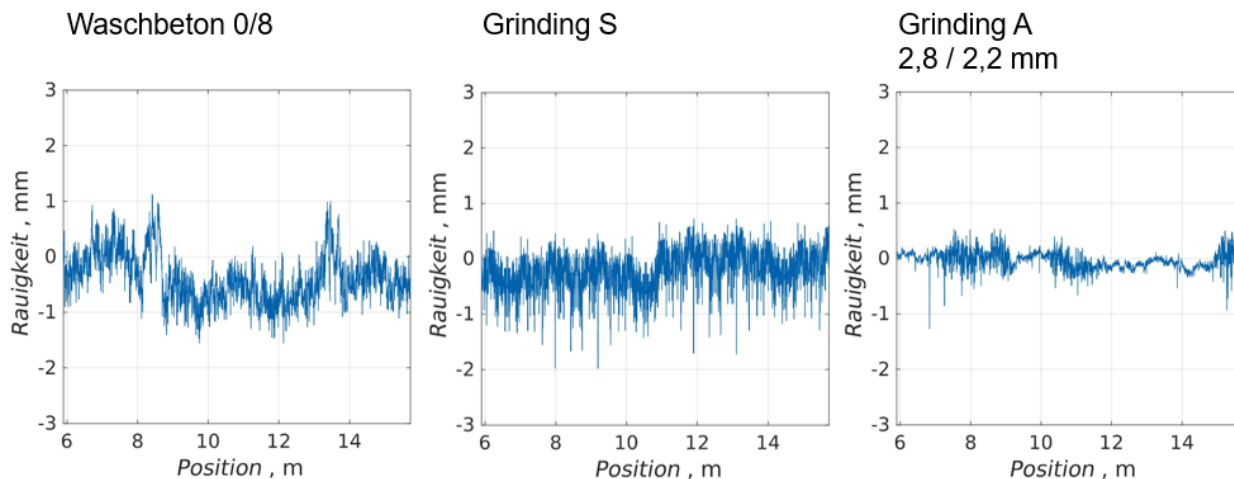
Daraus ergeben sich die Referenzprofile „WB08\_ref“ und „Grinding\_S\_ref“ und „Grinding\_A\_ref“.

- Überlagerung der Referenzprofile mit den Plattenverformungen „Wölbung“ (WOEL) und „Aufschüs-  
selung“ (AUFS) aus dem bautechnischen Rechenmodell.

Daraus ergeben sich die fugenlosen Profile für die verformte Fahrbahn „WB08\_WOEL“  
„WB08\_AUFS“, „Grinding\_S\_WOEL“ und „Grinding\_S\_AUFS“, „Grinding\_A\_WOEL“ und „Grin-  
ding\_A\_AUFS“.

- Die Fugenöffnungsweiten  $OW$  wurden entsprechend der Beschreibung im Text nach Tab. 3.27 ge-  
wählt. Die Fugenfüllhöhen  $h$  und Höhenversätze  $M$  der aufeinanderfolgenden Betonplatten wurden  
ebenfalls wie oben beschrieben gewählt.

Bild 3.156 zeigt die aus den Originaltexturen rekonstruierten Modelltexturen für die Waschbeton-, Grin-  
ding S und Grinding A Oberfläche ohne Fugen und ohne Verformung.

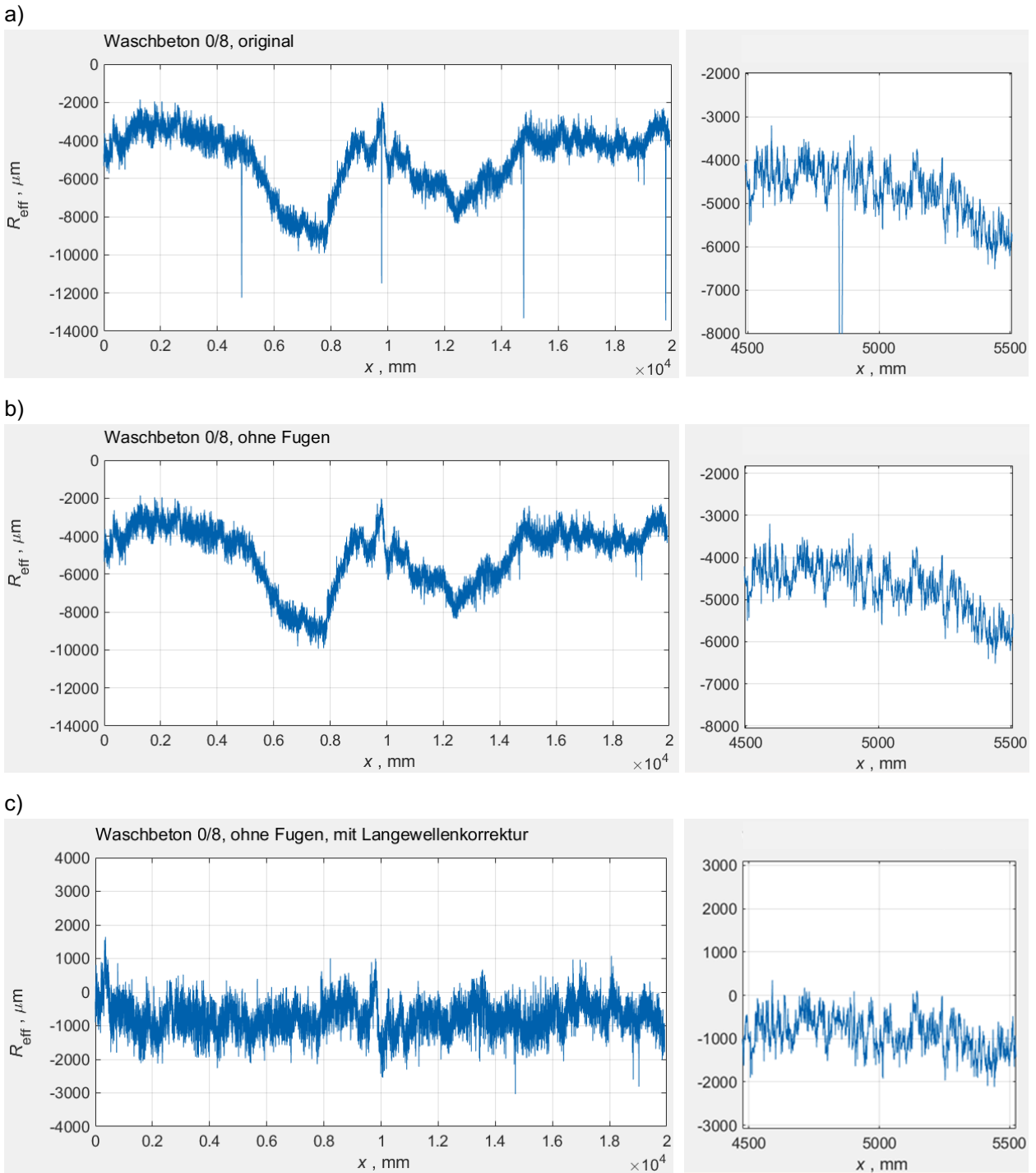


**Bild 3.156:** Rekonstruktionen der fugenlosen und unverformten Texturen.

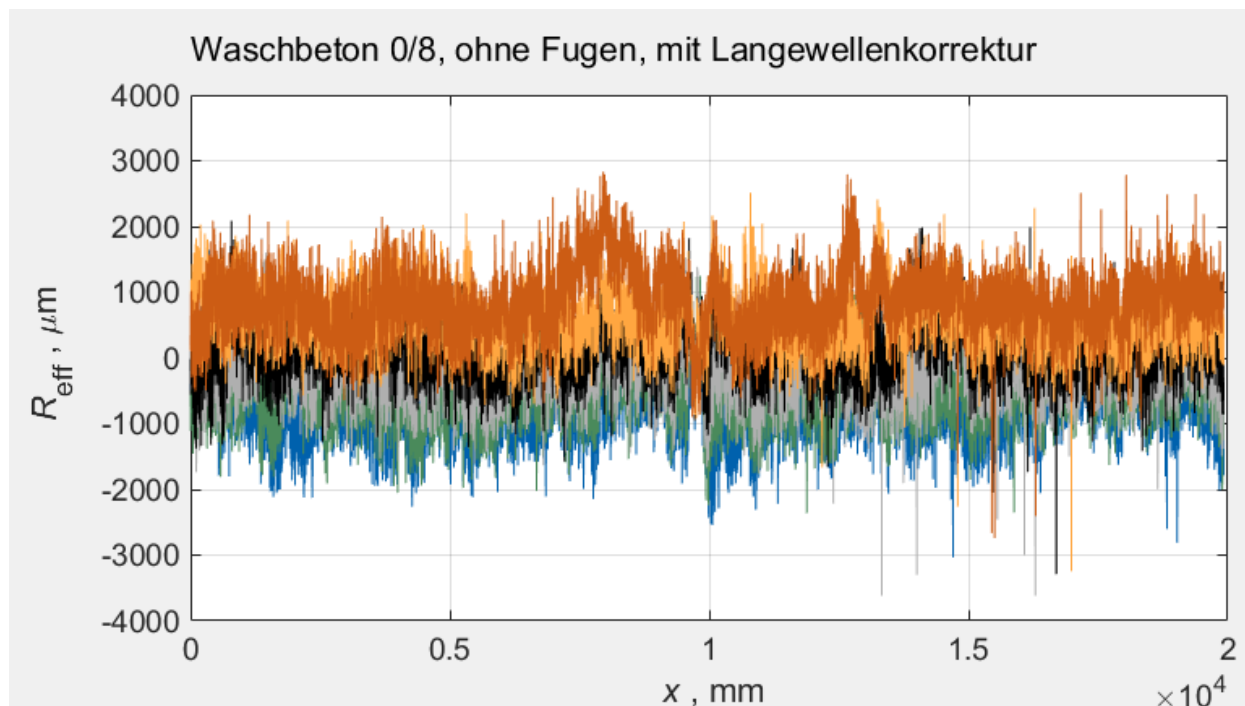
---

In Bild 3.157 ist die Rekonstruktion des Referenzprofils ohne Fugen und ohne Plattenverformungen aus den gemessenen Texturprofilen am Beispiel des Waschbetons 0/8 dargestellt. Die sechs parallelen Referenzprofile sind in Bild 3.158 aufgetragen. Bild 3.159 und Bild 3.160 veranschaulichen die Vorgehensweise bei der Bildung der Oberflächenmodelle für den Fall ohne Verformung der Fahrbahnoberfläche (ebener Fall). In Bild 3.159 sind die texturlosen Oberflächen mit 15 mm breiten und 10 mm tiefen Fugen ohne Höhenversatz der aufeinanderfolgenden Platten und mit einem -1 mm großen Höhenversatz für einen 20 m langen Fahrbahnabschnitt bei einem Querfugenabstand von 5,0 m dargestellt. Diesen Texturprofilen sind die Profile nach Überlagerung des Referenzprofils für den Waschbeton 0/8 gegenübergestellt.

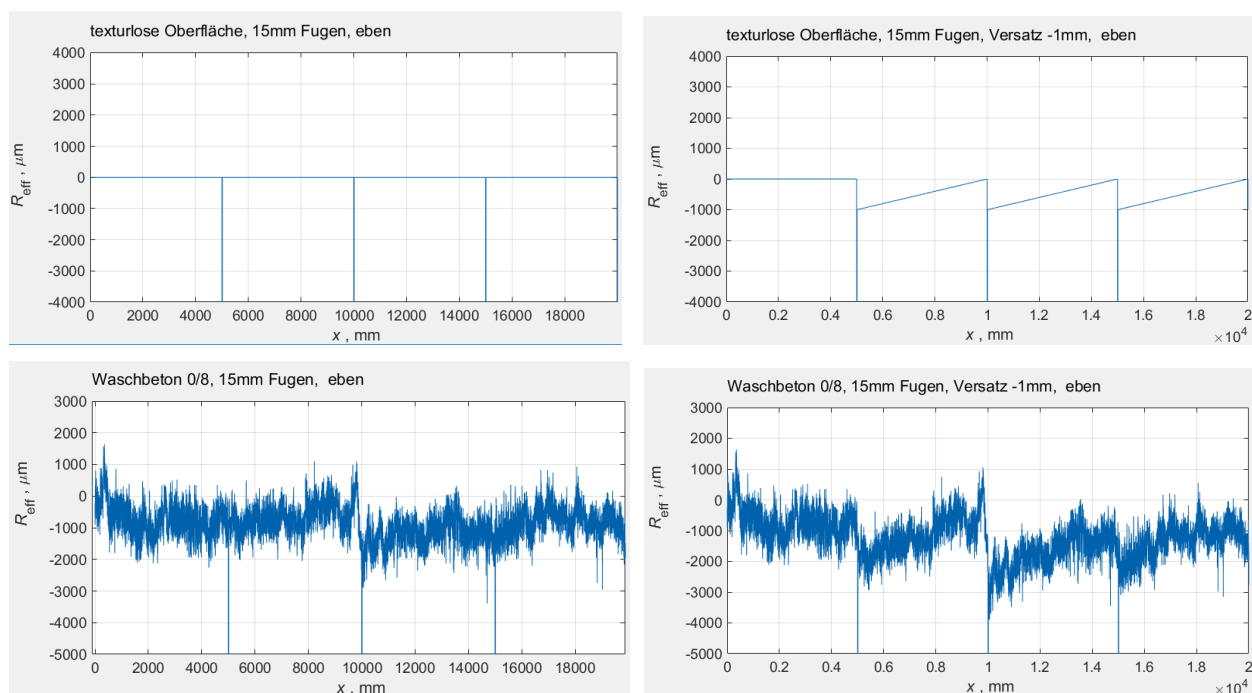
Bild 3.160 zeigt die Modelle für die texturlose Oberfläche und die Waschbetonoberfläche bei Berücksichtigung der Aufschüsselung.



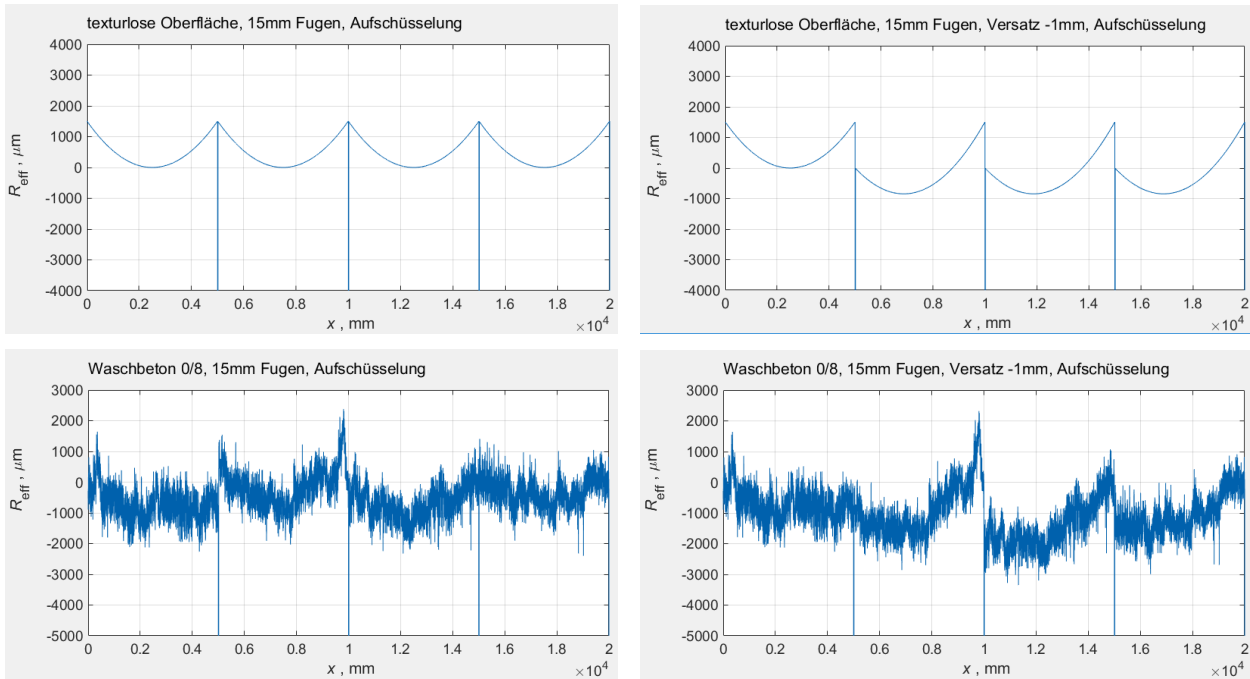
**Bild 3.157:** Rekonstruktion des Referenzprofils für die Waschbetonoberfläche aus gemessenen Lasertexturprofilen am Beispiel eines der sechs parallelen Profile. a) Originalprofil aus der Messung; b) Profil nach Entfernung der Fugen und Rekonstruktion der Textur über die Länge der Fugenöffnungsweite; c) Profil nach Entfernung der langwelligen Plattenverformungen (Referenzprofil).



**Bild 3.158:** Referenzprofile aller sechs parallelen Texturprofile für den Waschbeton 0/8.



**Bild 3.159:** Oberflächenmodelle, dargestellt an einem der sechs parallelen Texturprofile, für den ebenen Fall ohne Plattenverformungen. Querfugenabstand:  $a = 5,0$  m, Fugenöffnungsweite  $OW = 15$  mm, Fugenfüllhöhe  $h = -10$  mm. Oben links: texturlose Oberfläche ohne Höhenversatz, oben rechts: texturlose Oberfläche mit einem Höhenversatz von  $M = -1$  mm zwischen aufeinanderfolgenden Platten, unten links: Waschbetonoberfläche ohne Höhenversatz, unten rechts: Waschbetonoberfläche mit Höhenversatz.



**Bild 3.160:** Oberflächenmodelle, dargestellt an einem der sechs parallelen Texturprofile, für den Fall mit aufschüsselnder Plattenverformung. Querfugenabstand:  $a = 5,0 \text{ m}$ , Fugenöffnungsweite  $OW = 15 \text{ mm}$ , Fugenfüllhöhe  $h = -10 \text{ mm}$ . Oben links: texturlose Oberfläche ohne Höhenversatz, oben rechts: texturlose Oberfläche mit einem Höhenversatz von  $M = -1 \text{ mm}$  zwischen aufeinanderfolgenden Platten, unten links: Waschbetonoberfläche ohne Höhenversatz, unten rechts: Waschbetonoberfläche mit Höhenversatz.

Zusammenfassung der akustischen Parametervariation

In Tab. 3.29 sind übersichtshalber nochmals alle variierten Oberflächenparameter und deren Werte eingetragen. Die Plattenlänge bzw. der Querfugenabstand  $a$  von  $3,0 \text{ m}$  liegt nur den Rechenfällen für die „empfohlene Konstruktion“ zugrunde. Der Parametersatz für diese Rechenfälle ist durch Unterstreichungen der Parameterwerte gekennzeichnet.

Querfugenabstand $a$ (Plattenlänge)	<u>3,0 m</u>	4,0 m	5,0 m	
Fugenöffnungsweite $w$ ausgehend von $\Delta a = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot a$ mit $\alpha_T = 9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ und $13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ $\Delta T = 20 \text{ K}$ und $40 \text{ K}$	<u>10 mm</u>	8 mm 12 mm	9 mm 12 mm 15 mm	

Plattenverformung	eben	Aufschüsselung	Wölbung	
Höhenversatz $M$	0 mm	<u>-0,5 mm</u>	-1,0 mm	
Fugenfüllhöhe $h$	0 mm	+2 mm	<u>-1 mm</u>	-10 mm
Fugenfüllung Steifigkeit $s$	$2,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$			
Oberflächentextur	texturlos	Washbeton 0/8	Grinding S	<u>Grinding A</u>

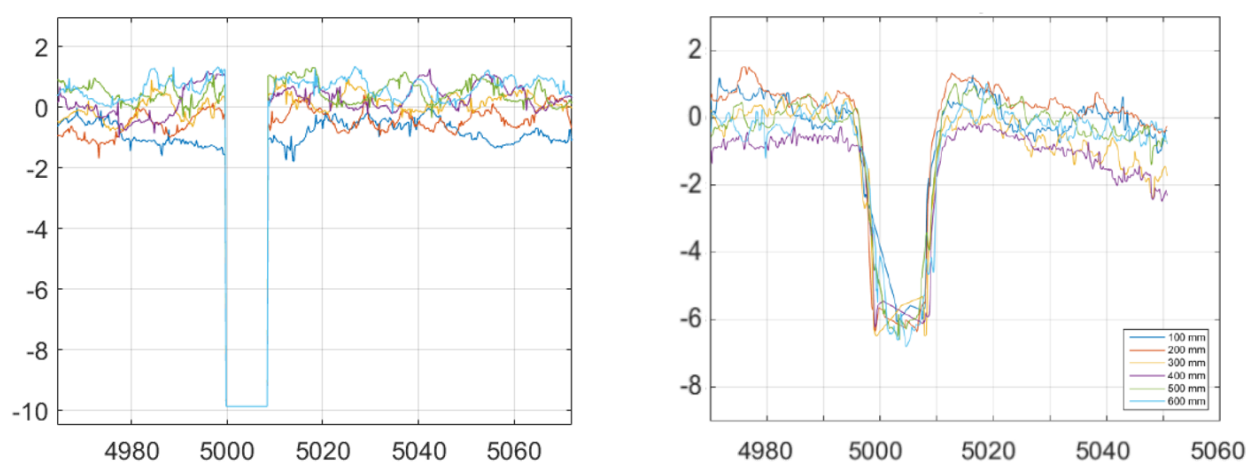
**Tab. 3.29:** Übersicht über die variierten Oberflächenparameter und deren Werte.

Bild 3.161 zeigt alle 72 Variationen der Oberflächenmodelle ohne Textur am Beispiel der Plattenlänge von 4,0 m. Gleichzeitig aussehende Oberflächenmodelle unterscheiden sich in der Fugenöffnungsweite  $w$ , die in dieser Abbildung nicht erkennbar ist.



**Bild 3.161:** Schematische Übersicht über alle texturlosen Oberflächenmodelle über die Gesamtlänge von 20 m am Beispiel der Oberflächen mit 4,0 m Plattenlänge.

Fugen wurden in den Oberflächenmodellen als Abweichung gegenüber dem ebenen Fall berücksichtigt. Alle Fugenöffnungsweiten sind hier inklusive Anfasung zu verstehen, wobei die Fase als solche in den Oberflächenmodellen nicht berücksichtigt ist, sondern zu einer gegenüber der Öffnungsweite des Aufweitungsschnitts größeren Fugenöffnungsweite führt. Die Abbildung links in Bild 3.162 zeigt das Vorgehen des Einfügens einer Fuge bei der Erstellung der Oberflächenmodelle. In der Abbildung sind alle 6 zugrundegelegten Texturprofile dargestellt mit Einfügung einer Fuge von 8 mm Breite. Zum Vergleich sind in der rechten Abbildung 6 gemessene Texturprofile der realen Waschbetonoberfläche mit der am Messort vorgefundenen 10 mm breiten Querscheinfuge dargestellt. Aus dem Vergleich geht hervor, dass auch in Realität im unmittelbaren Umfeld der Fuge unterschiedliche relative Höhenlagen der Texturprofile zueinander vorzufinden sind und die Fugen je Profil zu einer Diskontinuität in der Oberfläche führen.



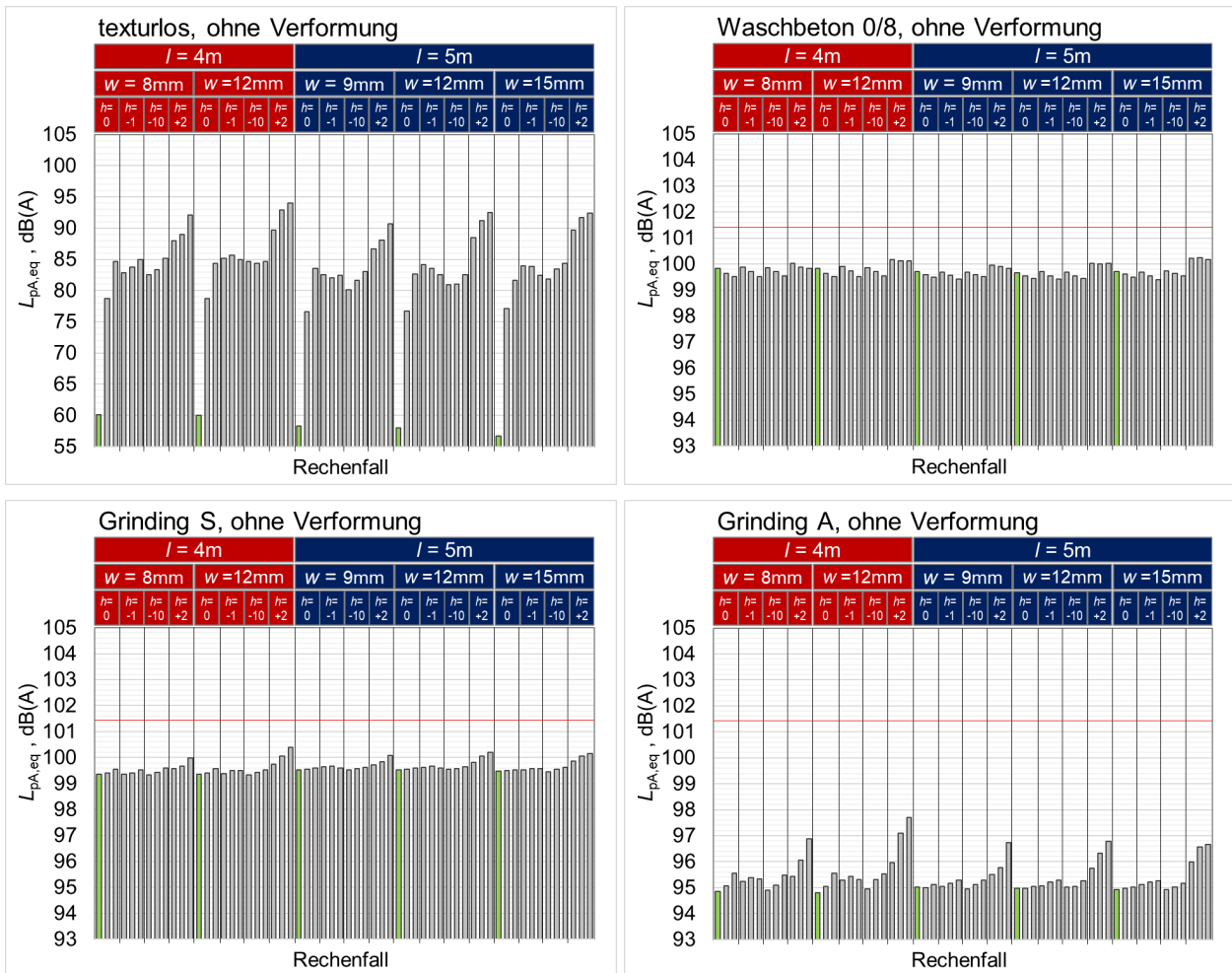
**Bild 3.162:** Links: Einfügung einer 8 mm breiten Fuge in die 6 Texturprofile des Referenzmodells für die Waschbetonoberfläche. Rechts: Texturprofile der realen Waschbetonoberfläche mit einer 10 mm breiten Querscheinfuge. Alle Maße in mm.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der akustischen Parameterstudie zusammenfassend dargestellt. Ausgangspunkt ist der über die Länge des betrachteten Fahrbahnabschnitts von 20 m ausgewertete A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der an den CPX-Positionen 5 und

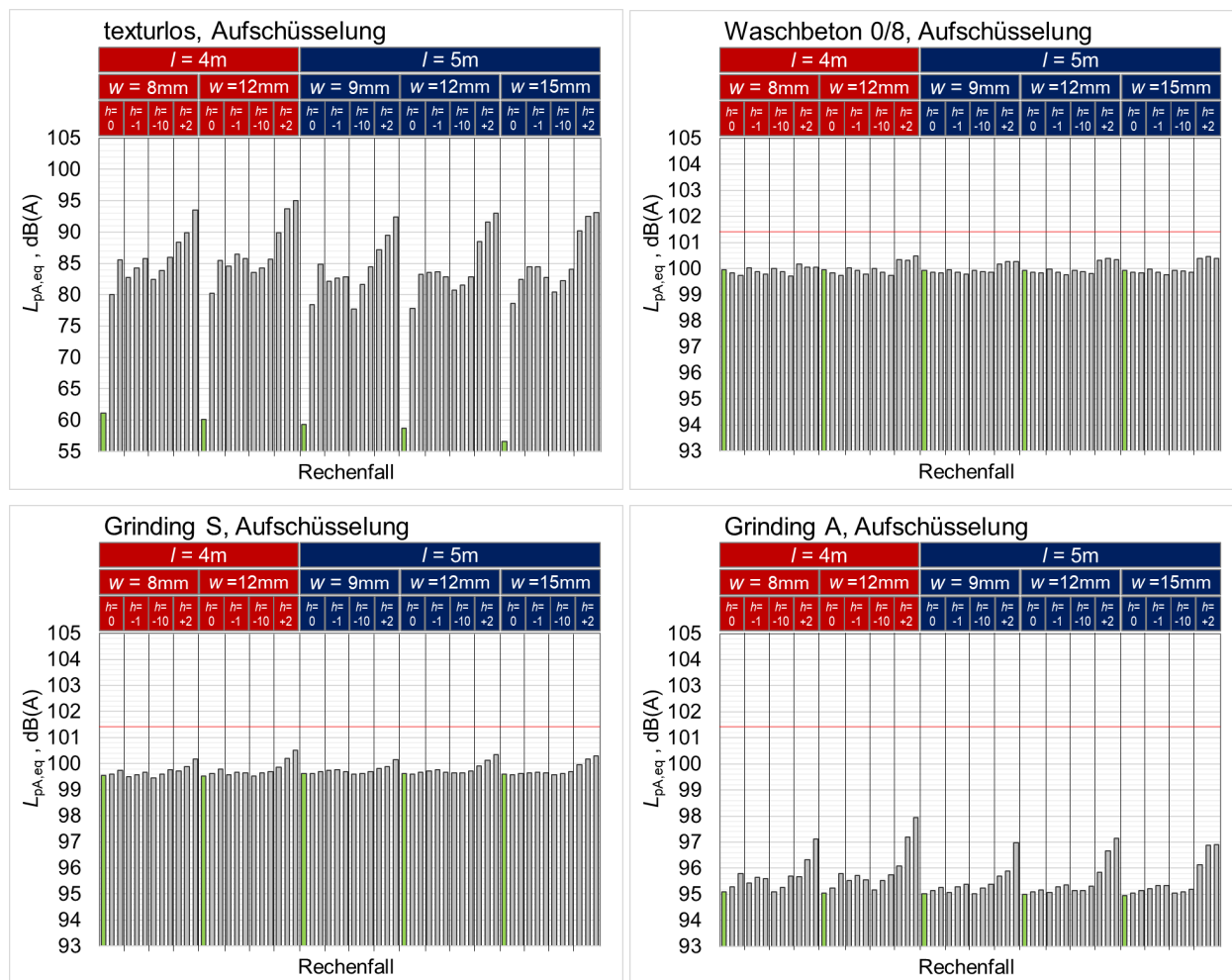
7 (siehe Bild 3.152) berechneten Schalldruckpegel-Zeitsignale der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Die für beide Norm-Mikrofonpositionen berechneten Schalldruckpegel wurden für die Auswertungen energetisch gemittelt. Der ausgewertete Einzahlwert für den  $L_{Aeq,20m}$  entspricht damit der auch bei Auswertungen von CPX-Messungen gebildeten Kenngröße für jeden 20 m-Abschnitt der befahrenen Fahrbahnoberfläche. Alle Werte gelten für eine Geschwindigkeit von 80 km/h, was seinerseits den Anforderungen an CPX-Messungen nach Norm ISO 11819-2 entspricht.

Bild 3.163 zeigt die Ergebnisse für die Rechenfälle ohne Verformung der Platten, Bild 3.164 diejenigen mit Ausschüsselung und Bild 3.165 diejenigen mit Aufwölbung. Die Diagramme sind unterteilt nach Gruppen gleicher Parameter, beginnend mit der Plattenlänge  $l$  als erster Gruppe, der Fugenöffnungsweite  $w$  als zweiter Gruppe und der Füllhöhe  $h$  des Fugenfüllmaterials als dritter Gruppe. Die Gruppen gleicher Füllhöhe weisen jeweils drei Werte auf, die dem Höhenversatz  $M$  aufeinanderfolgender Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und 1,0 mm entsprechen. Die jeweiligen Fälle ohne Höhenversatz zwischen den Platten und mit einer Fugenfüllhöhe  $h$  von 0 mm, also einem völlig ebenen Übergang von Platte zu Platte, sind – zur besseren Orientierung – durch grüne Säulen gekennzeichnet.

Jede der drei Abbildungen enthält die Ergebnisse für die drei realen Fahrbahnoberflächentexturen und die texturlose Oberfläche. Letztere dient als Referenz. Eine texturlose Oberfläche führt per se zu den niedrigsten Rollgeräuschpegeln, was sich auch in den hier dargestellten Modellberechnungen bestätigt. Gleichwohl führen jedoch Imperfektionen und Störungen in der Fahrbahnoberfläche zu Reaktionen des Reifens und entsprechenden Auswirkungen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, weshalb die texturlose Oberfläche ein hervorragender Indikator für die Sensitivität des Systems Reifen-Fahrbahn und der Rollgeräuschentstehung gegenüber den hier, neben den Oberflächentexturen, zusätzlich variierten Fahrbahnoberflächenparametern ist.

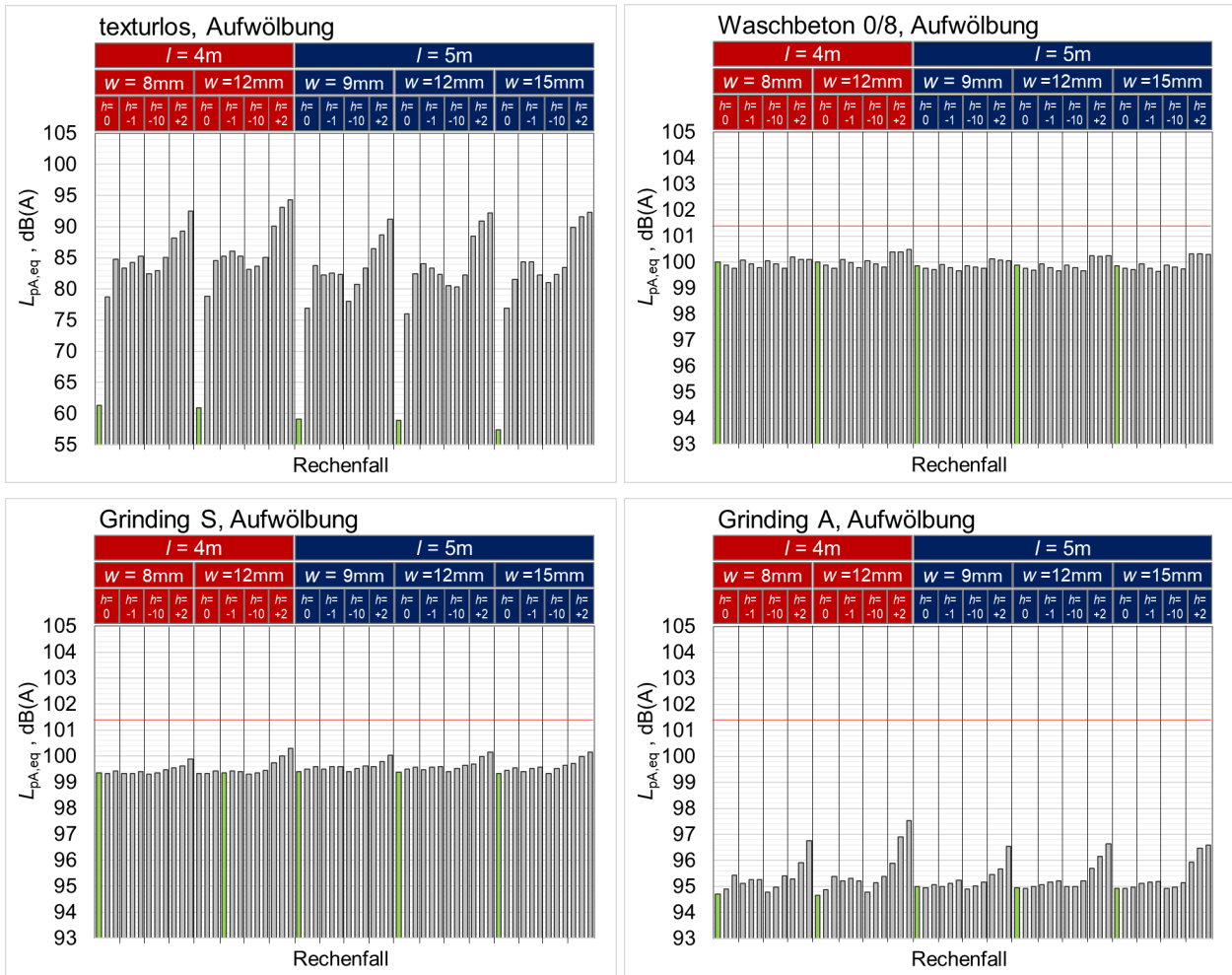


**Bild 3.163:** Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle ohne Verformung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen  $l$ , Fugenöffnungsweiten  $w$  und Füllhöhen  $h$  des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz.



**Bild 3.164:** Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle mit Aufschüsselung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen  $l$ , Fugenöffnungsweiten  $w$  und Füllhöhen  $h$  des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz.





**Bild 3.165:** Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle mit Wölbung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen  $l$ , Fugenöffnungsweiten  $w$  und Füllhöhen  $h$  des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse sind die  $L_{Aeq,20m}$ -Werte für wichtige Parameterkonstellationen in Tabellenform in Tab. 3.30 nochmals zusammengefasst. Die Tabellen quantifizieren den Einfluss der Textur, der Plattenverformungen, der Fugenöffnungsweite  $w$  in Verbindung mit der Füllhöhe  $h$  des Fugenfüllmaterials und des Höhenversatzes  $M$  zwischen aufeinanderfolgenden Platten in Form des energieäquivalenten Dauerschallpegels  $L_{Aeq,20m}$ , also des Mittelungspegels für den gesamten 20 m langen Fahrbahnabschnitt. Die kurzzeitigen Geräuschereignisse bei Überrollung der Fugen und anderen Imperfektionen der Fahrbahnoberfläche durch die Verformung der Platten beeinflussen das Schalldruck-Zeitsignal nur im Millisekunden-Bereich. Dennoch ergeben sich Änderungen des Mittelungspegels nicht nur bei Änderung der Textur, sondern auch bei Änderung der übrigen Oberflächenparameter. Dies weist darauf hin, dass die durch kleinräumige Imperfektionen und Störungen der Fahrbahnoberfläche hervorgerufenen Auswirkungen auf den Reifen-Fahrbahn-Kontakt so energiereich sind, dass sie im Gesamtsignal des Reifen-Fahrbahn-Geräusches wiedergefunden werden können.

Die Tabellen in Tab. 3.30 weisen die  $L_{Aeq,20m}$ -Werte der Parametervariation für jede Textur und jeden Verformungszustand (eben, Aufschüsselung, Aufwölbung) aus. Außerdem sind jeweils die Minimal- und Maximalwerte des  $L_{Aeq,20m}$  der jeweiligen Parametervariation angegeben. Schließlich ist auch ein der Fahrbahnoberflächenkorrektur nach den RLS-19 [RLS 2019] äquivalenter  $D_{SD}$ -Wert angegeben, der die Pegelminderung gegenüber der Referenzoberfläche nach den RLS-19 charakterisiert. Anders als in den RLS-19 ist der  $D_{SD}$ -Wert hier auf einen Referenzwert des CPX-Pegels für 80 km/h bezogen, um die hier berechneten CPX-Pegel (Mittelwerte der beiden Norm-Mikrofonpositionen) auch im Bewertungssystem der RLS-19 miteinander vergleichen zu können. Der Referenzwert beträgt 101,4 dB(A) [BECKENBAUER 2020].

Einfluss der Textur,  $h = 0 \text{ mm}$ ,  $M = 0 \text{ mm}$ 

eben					Aufschüsselung					Aufwölbung				
Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A
$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	60.1	99.8	99.4	94.9	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	61.1	100.0	99.5	95.1	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	61.3	100.0	99.3	94.7
$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	60.0	99.8	99.3	94.8	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	60.2	100.0	99.5	95.1	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	61.0	100.0	99.3	94.7
$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	58.3	99.7	99.5	95.0	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	59.3	99.9	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	59.1	99.9	99.4	95.0
$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	58.0	99.7	99.5	95.0	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	58.7	99.9	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	58.9	99.9	99.4	95.0
$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	56.7	99.7	99.5	94.9	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	56.6	99.9	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	57.4	99.9	99.3	94.9
min	56.7	99.7	99.3	94.8	min	56.6	99.9	99.5	95.0	min	57.4	99.9	99.3	94.7
max	60.1	99.8	99.5	95.0	max	61.1	100.0	99.6	95.1	max	61.3	100.0	99.4	95.0
$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.6	-2.0	-6.5	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.5	-1.8	-6.4	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.5	-2.0	-6.6

Einfluss der Fugenöffnungsweite  $w$ , abgesunkenes Fugenfüllmaterial,  $h = -10 \text{ mm}$ ,  $M = 0 \text{ mm}$ 

eben					Aufschüsselung					Aufwölbung				
Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A
$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	82.5	99.9	99.3	94.9	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	82.4	100.0	99.5	95.1	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	82.4	100.0	99.3	94.8
$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	84.7	99.9	99.3	95.0	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	83.6	100.0	99.5	95.2	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	83.1	100.1	99.3	94.8
$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	80.1	99.7	99.5	94.9	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	77.7	99.9	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	78.1	99.9	99.4	94.9
$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	80.9	99.7	99.5	95.0	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	80.8	99.9	99.6	95.1	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	80.5	99.9	99.4	95.0
$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	81.8	99.7	99.5	94.9	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	80.5	99.9	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	81.0	99.9	99.3	94.9
min	80.1	99.7	99.3	94.9	min	77.7	99.9	99.5	95.0	min	78.1	99.9	99.3	94.8
max	84.7	99.9	99.5	95.0	max	83.6	100.0	99.6	95.2	max	83.1	100.1	99.4	95.0
$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.6	-2.0	-6.4	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.4	-1.9	-6.3	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.4	-2.1	-6.5

Einfluss der Fugenöffnungsweite  $w$ , überstehendes Fugenfüllmaterial,  $h = +2 \text{ mm}$ ,  $M = 0 \text{ mm}$ 

eben					Aufschüsselung					Aufwölbung				
Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A
$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	88.0	100.0	99.6	95.4	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	88.4	100.2	99.7	95.7	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	88.2	100.2	99.6	95.3
$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	89.6	100.2	99.8	96.0	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	89.9	100.3	99.9	96.1	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	90.0	100.4	99.7	95.9
$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	86.7	100.0	99.7	95.5	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	87.2	100.2	99.8	95.7	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	86.5	100.1	99.6	95.5
$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	88.4	100.0	99.8	95.7	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	88.5	100.3	99.9	95.8	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	88.5	100.2	99.7	95.7
$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	89.7	100.2	99.9	96.0	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	90.2	100.4	100.0	96.1	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	89.9	100.3	99.7	95.9
min	86.7	100.0	99.6	95.4	min	87.2	100.2	99.7	95.7	min	86.5	100.1	99.6	95.3
max	89.7	100.2	99.9	96.0	max	90.2	100.4	100.0	96.1	max	90.0	100.4	99.7	95.9
$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.3	-1.7	-5.7	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.1	-1.6	-5.5	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.1	-1.8	-5.8

Einfluss der Fugenöffnungsweite  $w$  bei Höhenversatz,  $h = 0 \text{ mm}$ ,  $M = -1 \text{ mm}$ 

eben					Aufschüsselung					Aufwölbung				
Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Plattenlänge / Fugenweite $w$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A
$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	84.7	99.5	99.5	95.6	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	85.6	99.7	99.7	95.8	$l=4,0\text{m}, w=8\text{mm}$	84.8	99.8	99.4	95.4
$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	84.4	99.5	99.6	95.5	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	85.4	99.7	99.8	95.8	$l=4,0\text{m}, w=12\text{mm}$	84.5	99.8	99.4	95.4
$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	83.6	99.5	99.6	95.1	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	84.9	99.8	99.7	95.3	$l=5,0\text{m}, w=9\text{mm}$	83.7	99.7	99.6	95.1
$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	82.6	99.5	99.6	95.0	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	83.3	99.8	99.7	95.2	$l=5,0\text{m}, w=12\text{mm}$	82.4	99.7	99.6	95.0
$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	81.7	99.5	99.5	95.0	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	82.4	99.8	99.6	95.1	$l=5,0\text{m}, w=15\text{mm}$	81.6	99.7	99.5	95.0
min	81.7	99.5	99.5	95.0	min	82.4	99.7	99.6	95.1	min	81.6	99.7	99.4	95.0
max	84.7	99.5	99.6	95.6	max	85.6	99.8	99.8	95.8	max	84.8	99.8	99.6	95.4
$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.9	-1.8	-6.1	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.6	-1.7	-5.9	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.7	-1.9	-6.2

Einfluss des Höhenversatzes  $M$ ,  $l = 4,0 \text{ m}$ ,  $w = 12 \text{ mm}$ ,  $h = 0 \text{ mm}$ 

eben					Aufschüsselung					Aufwölbung				
Höhenversatz $M$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Höhenversatz $M$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A	Höhenversatz $M$	texturlos	Waschbeton	Grinding S	Grinding A
$M = 0 \text{ mm}$	60.0	99.8	99.3	94.8	$M = 0 \text{ mm}$	60.2	100.0	99.5	95.1	$M = 0 \text{ mm}$	61.0	100.0	99.3	94.7
$M = -0,5 \text{ mm}$	78.7	99.7	99.4	95.0	$M = -0,5 \text{ mm}$	80.3	99.8	99.6	95.2	$M = -0,5 \text{ mm}$	78.8	99.9	99.3	94.9
$M = -1,0 \text{ mm}$	84.4	99.5	99.6	95.5	$M = -1,0 \text{ mm}$	85.4	99.7	99.8	95.8	$M = -1,0 \text{ mm}$	84.5	99.8	99.4	95.4
min	60.0	99.5	99.3	94.8	min	60.2	99.7	99.5	95.1	min	61.0	99.8	99.3	94.7
max	84.4	99.8	99.6	95.5	max	85.4	100.0	99.8	95.8	max	84.5	100.0	99.4	95.4
$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.7	-1.9	-6.2	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.6	-1.7	-6.0	$D_{SD re. 101,4 \text{ dB(A)}}$		-1.5	-2.0	-6.4

**Tab. 3.30:** Zusammenfassung der  $L_{Aeq,20m}$ -Werte für wichtige Parameterkonstellationen. *min* = Minimum der  $L_{Aeq,20m}$ -Werte der Parametervariation für die jeweilige Textur; *max* = Maximum der  $L_{Aeq,20m}$ -Werte.  $D_{SD|re. 101,4dB(A)}$  = Fahrbahnoberflächenkorrektur in Anlehnung an die RLS-19 [RLS 2019], siehe Text.

### 3.7 Bewertung der Parameterstudie und Vorschläge für ein verbessertes System der Nachweisführung für die Dimensionierung und/oder die Substanzbewertung

Die rechnerische Analyse des thermo-mechanischen Verhaltens einer Betonfahrbahn in Regelbauweise erbrachte die folgenden hauptsächlichen Erkenntnisse:

- Die Plattenkrümmung im Querfugenbereich hat einen großen Einfluss auf die Vertikalbeschleunigung des Rades bei der Überfahrt. Auch kleine Veränderungen haben hier schon wesentliche Auswirkungen und beeinflussen damit den Fahrkomfort und die Lärmemission.
- Der Querfugenabstand hat einen wesentlichen Einfluss auf die mechanische Beanspruchung und die Verformung der Fahrbahnplatten. Die maximalen Spannungen betreffend ist ein Regelabstand von 4,0 m bis 4,5 m ein günstiger Wert. Kürzere Platten führen zu keiner wesentlichen Reduzierung der Spannungen. Bei längeren Abständen kommt es dagegen zu einer Erhöhung um bis 50 %. Für die Plattenverformung gilt dagegen: Je kleiner der Querfugenabstand, desto kleiner die Verformung. Der maximale Verformungswert einer 7,0 m langen Platte ist fast doppelt so groß wie der einer 3,0 m langen Platte.
- Ein Hohlraum in Form einer flachen Mulde unter den Querfugen (z. B. infolge Erosion der Tragschicht) führt wie zu erwarten, zu einer Erhöhung der mechanischen Beanspruchung der Platte. Die Auswirkungen bei kleineren Hohlräumen (bis ca. 4 mm Tiefe und 1 m Breite) sind aber zunächst moderat. Bei bestimmten Kombinationen von Temperaturzustand und Verkehrslast kann die Hohlagerung sogar zu einer Reduzierung der Spannungen führen. Erst wirklich ausgedehnte Hohlräume führen zu gravierenden Spannungserhöhungen.
- Die Materialparameter (Elastizitätsmodul, Wärmedehnzahl) haben einen sehr großen Einfluss auf die Größe der Spannung und Verformungen. Dabei ist bezüglich der Spannungen der Einfluss des E-Moduls besonders ausgeprägt. Bezogen auf die Verformungen dominiert dagegen der Einfluss der Wärmedehnzahl. Im Einzelfall kann die Änderung der Materialparameter die Spannung und Verformungen um 100 % verändern. Besonders gravierend ist der Einfluss auf die Zwangsspannungen. Diese können bei ungünstiger Materialauswahl besonderer Temperaturkonstellation die Größenordnung der Biegespannungen erreichen.
- Durch die Öffnung der Querfugen im Winter wird die Wirksamkeit der Querkraftübertragung wesentlich reduziert. Bei geöffneter Fuge erhöht sich die Biegespannung an der Querfuge um ca. 20 bis 25 %.
- Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die planmäßig auftretenden Dübellasten zu einer relevanten Rissbildung in der Dübelebene führen. Entsprechende Schäden sind wahrscheinlich bereits in der Erhärtungsphase des Betons erzeugt worden.
- Bereits kleine Winkelabweichungen ( $\geq 2^\circ$ ) der Dübellage wirken sich negativ auf die Fugenbeweglichkeit aus und erhöhen die Anzahl blockierter Fugen.

Die aufgeführten Erkenntnisse über das Verhalten des Systems „Betonfahrbahn“ und auch die hier nicht dokumentierten Erfahrungen bei der Entwicklung geeigneter Rechenmodelle erlauben es, konkrete Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Verfahren zur Dimensionierung und Substanzbewertung zu formulieren:

- Die Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes sollte mit der Finite-Elemente-Methode erfolgen.
- Die Mitwirkung der angrenzenden Platten ist zu berücksichtigen. Damit ist ein 5-Platten, oder besser 9-Platten-Modell erforderlich.
- Die Zwangsspannungen können nicht vernachlässigt werden. Um diese berücksichtigen zu können, ist die Nutzung eines Volumenmodelles erforderlich.

- Die real auftretenden Temperaturzustände haben über den Querschnitt im Allgemeinen einen nichtlinearen Verlauf. Entsprechend sollte ein geeigneter Temperaturansatz formuliert werden.
- Die Parameter E-Modul und Wärmedehnzahl müssen im Einzelfall bestimmt und entsprechend bei der Berechnung angesetzt werden. Unterschiede zwischen Ober- und Unterbeton sind ggf. zu beachten.
- Der Ansatz eines Einzelrades als Verkehrslast ist nur für analytische Lösungen gerechtfertigt, welche keinen realistischeren Ansatz erlauben. Bei der FEM-Berechnung sollte eine realitätsbezogene Radlastkonfiguration zu Grunde gelegt werden.
- Die Modellierung einzelner Anker und Dübel ist wünschenswert aber nicht zwingend erforderlich.

Die wichtigsten Ergebnisse der akustischen Parameterstudie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Fahrbahnoberflächentextur hat einen entscheidenden Einfluss darauf, inwieweit die sonstigen Fahrbahnoberflächeneigenschaften auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch durchschlagen. Je höher der durch die Textur hervorgerufene Rollgeräuschpegel ist, desto weniger machen sich Imperfektionen und Störungen in der Fahrbahnoberfläche, wie sie Querfugen und ein Höhenversatz zwischen den Platten darstellen, im Rollgeräuschpegel bemerkbar. Dies ist der wesentliche Grund, weshalb derartige Störungen in der Fahrbahnoberfläche bislang bei der Bewertung der akustischen Qualität von herkömmlichen Fahrbahnbelägen aus Beton, wie Beton mit Jutetuch Längsstrich, Beton mit Kunstrasentextur oder auch Waschbeton, keine Rolle gespielt haben. Fahrbahndecken mit einer Geräuschminderung von nicht mehr als 2 dB müssen hinsichtlich Fugengeometrie, Fugenspiel und Ebenflächigkeit aneinandergrenzender Betonplatten kaum optimiert werden. Ausgehend von dem hier zugrunde gelegten Waschbeton 0/8 mit einem Geräuschminderungswert von -2,0 dB führen die unterschiedlichen hier untersuchten Parameter zu Änderungen des Rollgeräuschpegels in einem Bereich von höchstens 0,5 dB.

Dies ändert sich mit zunehmend leiseren Oberflächentexturen jedoch deutlich. Bei der Bauweise Grinding A („akustisches Grinding“) nimmt die Variabilität des Reifen-Fahrbahn-Geräusches durch Einfluss der Plattenlänge, des Verformungszustandes, der Fugengeometrie, des Fugenfüllzustandes und des Höhenversatzes aufeinanderfolgender Platten auf 3 dB zu. Das heißt, ungünstige Konstellationen von Imperfektionen und Störungen der Fahrbahnoberfläche können eine Betonoberfläche mit Grinding A Textur gegenüber dem störungsfreien Zustand akustisch um bis zu 3 dB verschlechtern. Der  $D_{SD}$ -Wert beträgt dann nicht mehr -6 dB, sondern nur noch -3 dB.

- Die kleinräumigen Störungen der Betonoberfläche führen nur zu kurzzeitigen Schalldruckänderungen im Millisekunden-Bereich. Dennoch machen sich die Störungen aufgrund der permanenten Wiederholung während des Rollvorgangs akustisch auch im Mittelungspegel für einen gesamten Fahrbahnabschnitt von 20 Meter Länge bemerkbar. Der Störungseinfluss steigt mit kürzer werdenden Platten. Legt man wiederum die zukünftig relevante Bauweise Grinding A zugrunde, ergibt sich bei einer Fugenöffnungsweite  $w$  von 12 mm und abgesunkenem Fugenfüllmaterial ohne Plattenhöhenversatz ( $h = -10$  mm,  $M = 0$  mm) ein Pegelunterschied von bis zu +0,2 dB der 4,0 m langen Platten gegenüber den 5,0 m langen Platten. Gravierendere Störungen wie ein Höhenversatz zwischen den Platten ( $h = 0$  mm,  $M = -1$  mm) führen zu einem Pegelunterschied der 4,0 m langen gegenüber den 5,0 m langen Platten von bis zu +0,6 dB (bei gleicher Fugenöffnungsweite  $w$  von 12 mm). Wird die Plattenlänge auf 3,0 m verkürzt, ist von einem zusätzlichen Anstieg des Einflusses der Störungen um 0,2 dB bis 0,3 dB zu rechnen, so dass sich dann in den ungünstigen Fällen wie bei einem Höhenversatz eine Pegelerhöhung von fast 1 dB gegenüber den 5,0 m langen Platten ergeben kann.
- Dieses Ergebnis weist auf einen Zielkonflikt zwischen Bautechnik und Schalltechnik hin. Während das Ergebnis der bautechnischen Simulationen zu einem Postulat für kürzere Platten führt, ergibt

sich aus den akustischen Simulationen aufgrund des geringeren Eintrags hochfrequenter mechanischer Energie in den Reifen-Fahrbahn-Kontakt bei größerem Querfugenabstand eine Empfehlung für längere Platten. Anders ausgedrückt lässt sich daraus auch eine Anforderung an die Qualität der Fugenausbildung dahingehend ableiten, dass kürzere Platten akustisch dann keinen Nachteil darstellen, wenn Fugengeometrie, Fugenfüllzustand und Höhenversatz zwischen den Platten so günstig ausgebildet sind, dass sie nur unbedeutende Auswirkungen von maximal 0,2 dB auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch haben. Den Ergebnissen der Parameterstudie nach ergeben sich folgende Minimalanforderungen solcher akustisch günstiger Verhältnisse im Fugenbereich

- Vermeidung von überstehendem Fugenfüllmaterial
- Höhenversatz  $M$  aufeinanderfolgender Platten höchstens 0,5 mm

Insbesondere das Problem überstehenden Fugenfüllmaterials muss mit der Realisierung geräuschmindernder Betonoberflächen gelöst werden. Mit kürzer werdenden Platten verschärft es sich zusätzlich. Das Herauswandern des Füllmaterials aus der Fuge aufgrund der dynamischen Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt während der Überrollung ist ein häufig beobachteter Prozess in der Praxis. Konstruktive und materialtechnische Lösungen müssen das Herauswandern verhindern. Eine mögliche Verschlechterung der akustischen Performance geräuschmindernder Texturen von Betonoberflächen von bis zu 3 dB muss sonst erwartet werden.

- Die Verformung der Platten durch das Temperaturgefälle und indirekt auch die Materialeigenschaften in der Betondeckschicht spielen akustisch ebenfalls eine Rolle, wobei Aufschüsselungen ungünstigere Auswirkungen haben als Aufwölbungen. Der Zustand der Aufschüsselung zu den Plattenrändern hin führt bei realen Oberflächentexturen – je nach Textur und den Werten der übrigen Oberflächenparameter – tendenziell zu einer Erhöhung der Rollgeräuschpegel ( $L_{Aeq,20m}$ ) um 0,2 dB bis 0,3 dB gegenüber dem Zustand der ebenen Platte. Auch hier ist wieder festzustellen, dass kürzere Platten, trotz der etwas kleineren geometrischen Abweichungen gegenüber der ebenen Platte, zu größeren Pegeldifferenzen führen als längere Platten. Fugenöffnungsweite und Fugenfüllhöhe haben nur bei leisen Oberflächentexturen wie Grinding A einen spürbaren Einfluss auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Abgesunkenes Fugenfüllmaterial mit einer Fugenfüllhöhe von -1 mm bzw. -10 mm führt grundsätzlich dazu, dass der Reifen im Fugenübergang für einen kurzen Moment einen Sprung in der Kontaktkraft wahrnimmt. Die Kontaktkraft wird plötzlich kleiner bzw. geht bei weit abgesunkenem Fugenfüllmaterial gänzlich auf Null zurück. Dieser Effekt macht sich ab einer Fugenfüllhöhe von -1 mm mit einem Pegelanstieg gegenüber der Fugenfüllhöhe von 0 mm von 0,2 dB bis 0,5 dB bemerkbar. Der fehlende Kontakt zur Fahrbahn im Fugenübergang verstärkt bei leisen Oberflächentexturen aber auch den Einfluss zusätzlicher Störungen in der Fahrbahnoberfläche. Beträgt die Fugenfüllhöhe noch -1 mm macht sich ein von 0 mm auf -1 mm zunehmender Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten mit einem Pegelanstieg des  $L_{Aeq,20m}$  von nur 0,1 dB bis 0,2 dB bemerkbar, wogegen die Zunahme bis zu 0,6 dB betragen kann, wenn das Fugenfüllmaterial gänzlich abgesunken ist (Fugenfüllhöhe  $h = -10$  mm).

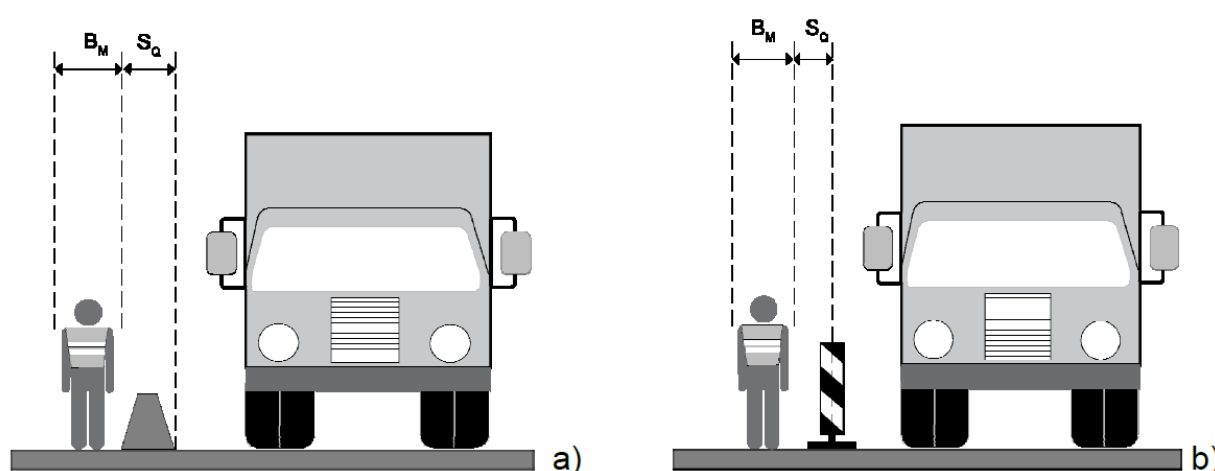
## 4 Untersuchungen zur allgemeinen Optimierung der Konstruktion

### 4.1 Aspekte der Verfügbarkeit

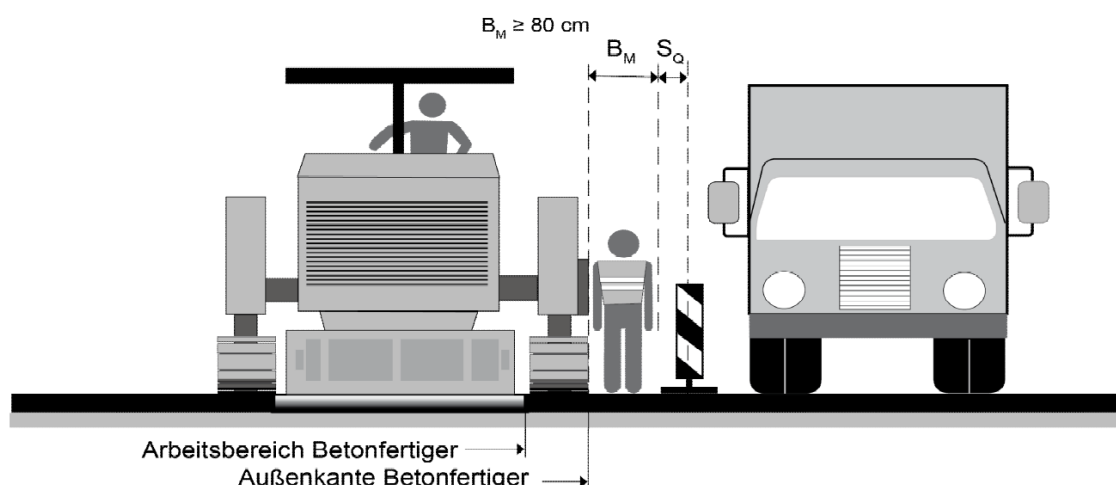
#### 4.1.1 Regelwerke zur Verkehrsführung

In den „Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen“ [RSA 1995] werden die für die Verkehrslenkung relevanten Maßnahmen geregelt. Die Grundlage hierfür bildet die StVO.

Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten hingegen werden bislang in den entsprechenden Arbeitsschutzvorschriften festgelegt. Mit den Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2 „Straßenbaustellen“ [ASR A5.2 2018] soll ein verbesserter Arbeitsschutz für Beschäftigte auf Straßenbaustellen erreicht werden. Diese beinhalten unter anderem Festlegungen zu Sicherheitsabständen und Mindestbreiten von Arbeitsräumen (siehe Bild 4.1 und Bild 4.2) in Abhängigkeit der auszuführenden Tätigkeiten.



**Bild 4.1:** Bezugslinie für seitliche Sicherheitsabstände ( $S_0$ ) zum fließenden Verkehr:  
 a) dem Verkehr zugewandte äußere Begrenzung bei Fahrzeug-Rückhaltesystemen  
 b) Mittelachse bei Leitbaken, Leikegeln, Leitwänden, Leitschwellen, Leitborden gemäß ASR 5.2



**Bild 4.2:** Seitlicher Sicherheitsabstand ( $S_0$ ) und Mindestbreite ( $B_M$ ) für Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Straßenbaustellen, Beispiel Beton-/Gussasphaltpflegemaschine mit überkragendem Kettenlaufwerk gemäß [ASR 5.2 2018]

Gemäß Tab. 4.1 ergibt sich der jeweilige seitliche Sicherheitsabstand neben der Länge der Maßnahme an sich in Abhängigkeit von der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit des fließenden Verkehrs sowie von dem gewählten Schutz- bzw. Leitelement.

Element	Zulässige Höchstgeschwindigkeit					
	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Fahrzeug-Rückhaltesysteme	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Leitbake (1000 mm x 250 mm, 750 mm x 187,5 mm), Leitkegel, Leitwand	30 cm	40 cm	50 cm	70 cm	90 cm	*
Leitbake (500 mm x 125 mm), Leitschwelle, Leitbord	50 cm	60 cm	70 cm	90 cm	110 cm	*

\*Hinweise zu Tabelle 1:

1. Bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ab 100 km/h müssen Fahrzeug-Rückhaltesysteme eingesetzt werden.
2. Die Sicherheitsabstände für Fahrzeug-Rückhaltesysteme berücksichtigen ausschließlich die verkehrsleitende Funktion dieser Systeme.

**Tab. 4.1:** Mindestmaße für seitliche Sicherheitsabstände gemäß [ASR 5.2 2018] bei Straßenbaustellen längerer Dauer

Aus den Anforderungen für die Verkehrslenkung [RSA 1995] und den Anforderungen für den Schutz der Beschäftigten [ASR 5.2 2018] ergeben sich demzufolge für die unterschiedlichen Querschnitte mögliche Arbeitsbereiche. In den folgenden Punkten wird gezeigt, inwiefern sich die Reglementierungen aus den Regelwerken auf die Durchführbarkeit der Baustelle auswirken können. Unterschieden wird dabei zwischen zwei und drei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn sowie zwischen Verkehrsführungen mit und ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn.

Die Untersuchungen sollen zeigen, welche Arbeiten unter Berücksichtigung der Regelwerke sowie der technologischen Anforderungen möglich sind. Folgende Szenarien sind dabei zu betrachten:

- a) Grundhafte Erneuerung einer Richtungsfahrbahn
- b) Streifenweiser Ersatz des Hauptfahrstreifens
- c) Plattenersatz /-sanierung

#### 4.1.2 Richtungsfahrbahnen mit 2 Fahrstreifen

Bei Richtungsfahrbahnen mit 2 Fahrstreifen können Verkehrsführungen mit und ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn sowie mit und ohne Reduzierung der Fahrstreifenanzahl erfolgen. Die möglichen Verkehrsführungen ohne Überleitung sind in der nachfolgenden Tab. 4.2 dargestellt.

Richtungsfahrbahn mit 2 Fahrstreifen					
Einschränkung des Querschnittes	Verkehrsführung	Kurzbezeichnung <sup>*)</sup>	Mindestbreiten [m] der		Regelplan Nr.
			(Behelfs-) Fahrstreifen	Behelfsfahrbahn	
Einschränkung der Fahrbahn	1 Fahrstreifen und 1 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links	$2n + 2$	3,75 + 3,25 (3,00)	7,00 (6,75)	D I/1
	2 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links	$2n + 2$	2,50 + 3,25 (3,00)	5,75 (5,50)	D I/2
Einschränkung auf einen Fahrstreifen	1 Fahrstreifen oder 1 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links ohne Standstreifen	$2n + 1$	3,25	3,25	D I/3
Sperrung des linken Fahrstreifens	2 Behelfsfahrstreifen auf rechtem Fahrstreifen und Standstreifen	$2n + 2s$	2,50 + 3,25 (3,00)	5,75 (5,50)	D I/4
<p>*) Zur Unterscheidung von gleichen Ziffernfolgen werden zusätzlich folgende Kennzeichnungen verwendet:</p> <p>n Die Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn werden nicht von der Arbeitsstelle betroffen.</p> <p>s Der Verkehr wird unter Mitbenutzung des Standstreifens geführt.</p>					

Tab. 4.2: Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 2 FS ohne Überleitung gemäß [RSA 1995]

Die zugehörigen Regelpläne sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt.

Bei der Aufrechterhaltung von 2 Fahrstreifen unterscheiden sich die verschiedenen Varianten in der Mitverwendung des Seitenstreifens bzw. der Ausbildung eines oder mehrerer Behelfsfahrstreifen.

Von besonderem Interesse ist bei der Betonbauweise, wenn Arbeiten im Hauptfahrstreifen (z. B. Plattenersatz) notwendig werden. Geht man davon aus, dass die Breite der Betonplatte nahezu mit der Breite des Fahrstreifens übereinstimmt, kann man aus Bild 4.3 erkennen, dass Arbeiten auf voller Breite des Hauptfahrstreifens mit den aufgeführten Verkehrsregelungen nicht möglich sind. Dies bestätigt auch die detaillierte Darstellung in Bild 4.4.

Der technologische Überstand für einen Gleitschalungsfertiger wurde für alle Varianten pessimal mit 0,70 m pro Seite angesetzt. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass dieser Raum nicht für den Arbeits- bzw. Sicherheitsraum verwendet werden kann.



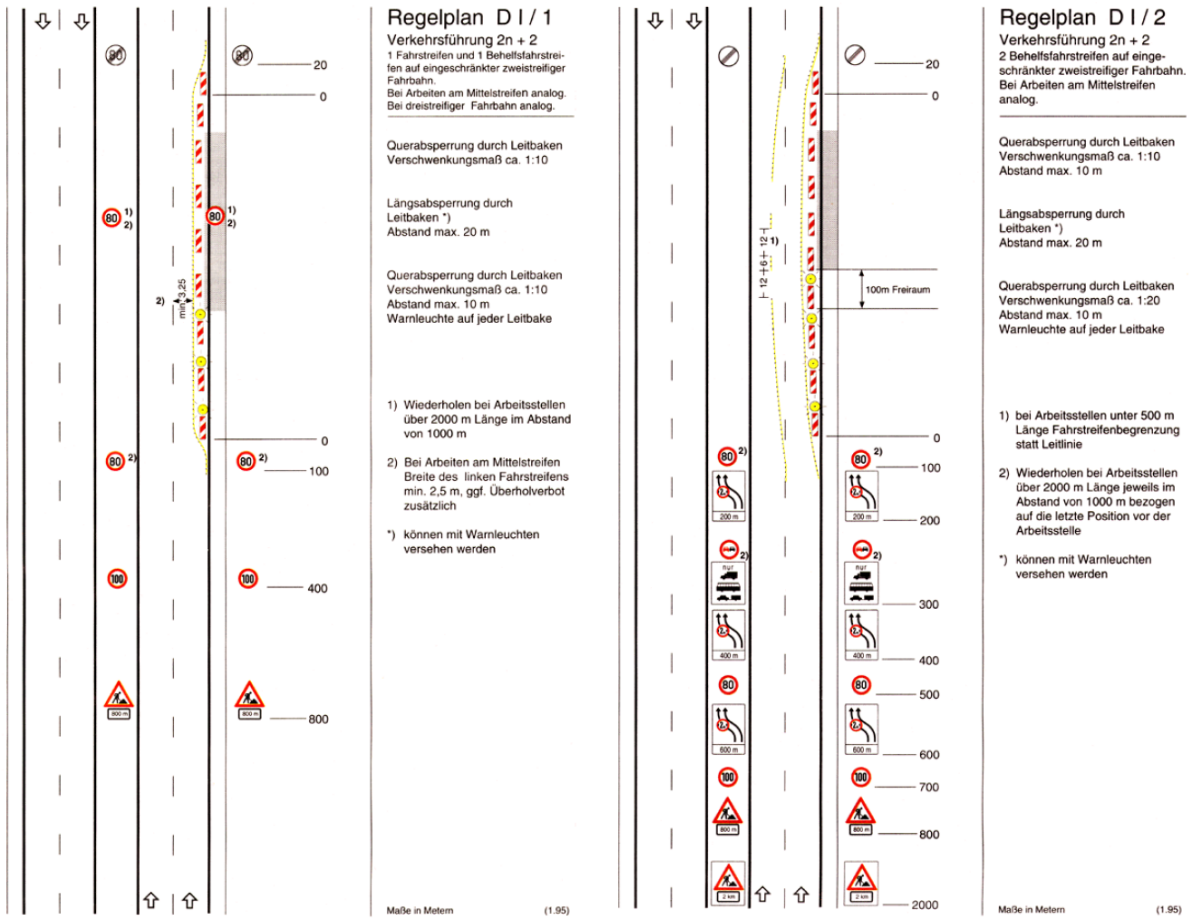


Bild 4.3: Regelplan D I/1 und D I/2 für Verkehrsführung ohne Überleitung (2n+2) gemäß [RSA 1995]

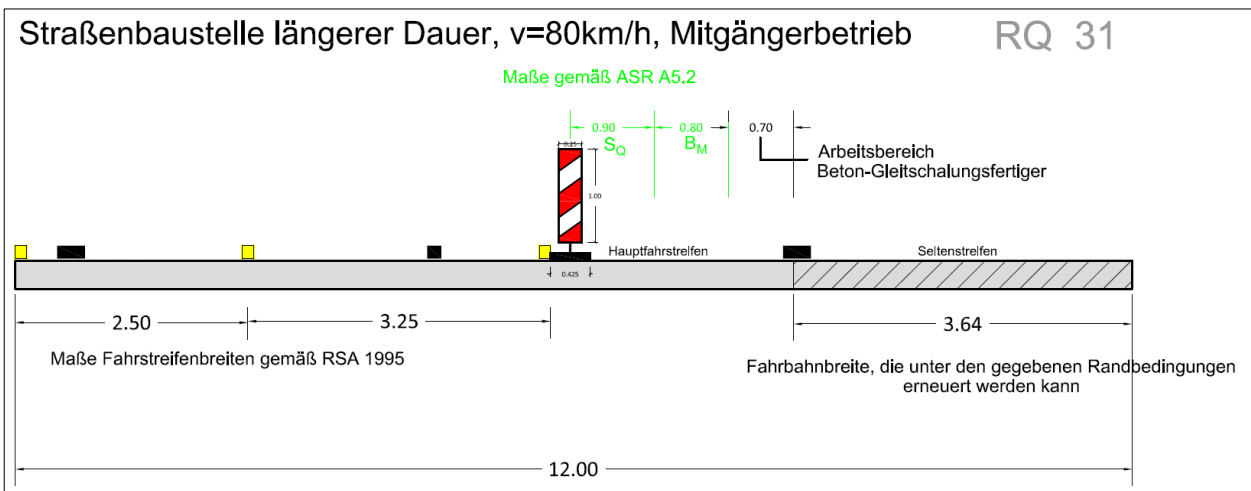
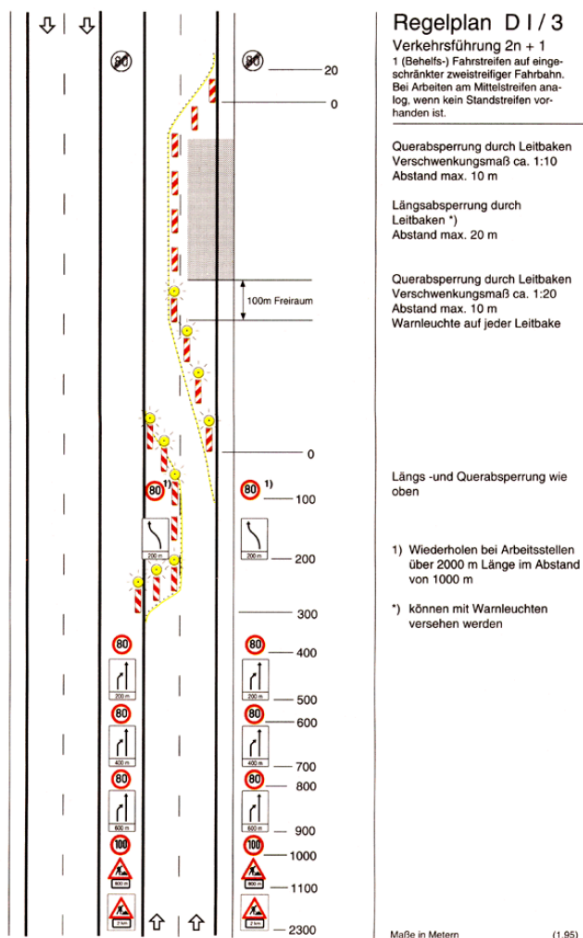


Bild 4.4: Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung ohne Überleitung (2n+2) gemäß [RSA 1995] bei 80 km/h

Es wird deutlich, dass aufgrund der einzuhaltenden Sicherheits- und Arbeitsabstände Arbeiten im Hauptfahrstreifen nicht ausgeführt werden können.

Erst nach Reduzierung eines Fahrstreifens (siehe Regelplan DI/3 (Bild 4.5)) erscheinen Arbeiten durchführbar. Die detaillierten Untersuchungen hierzu sind in Bild 4.7 und Bild 4.8 dargestellt.



**Bild 4.5:** Regelplan D I/3 für Verkehrsführung ohne Überleitung (2n+1) gemäß [RSA 1995]

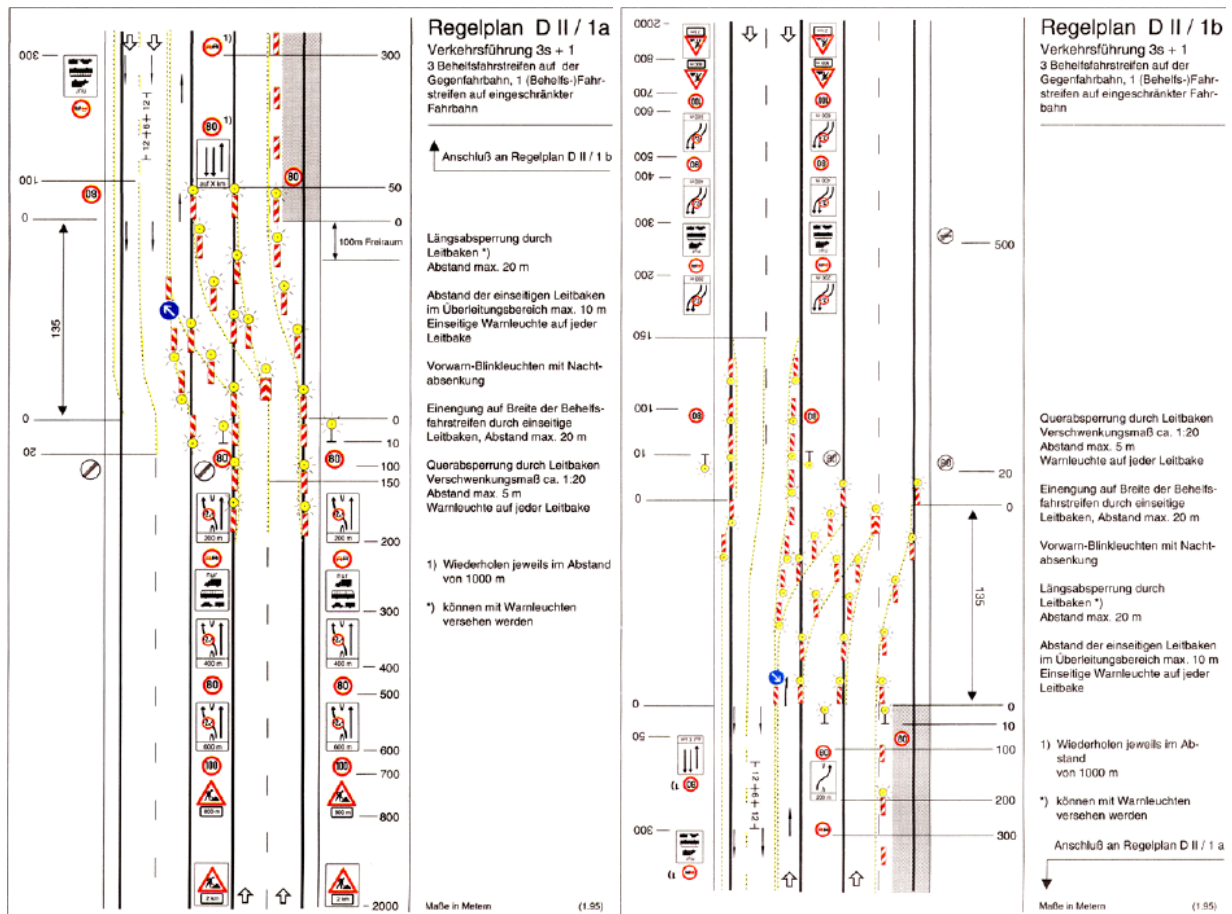
Bei den nachfolgend dargestellten Verkehrsführungen (Tab. 4.3) wird der Verkehr auf die Gegenfahrbahn geleitet, um ausreichend Arbeitsraum zu schaffen. Dabei ist es auch möglich, dass ein Fahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn verbleibt (z. B. 3s+1 (Bild 4.6)), auf der die Arbeiten ausgeführt werden sollen. Dies ist auch der Fall, wenn die Fahrstreifenanzahl reduziert wird, ohne den Verkehr auf die Gegenfahrbahn zu leiten (2n+1 (Bild 4.5)). Die Untersuchungen im Hinblick auf die mögliche Arbeitsbreite sind bei beiden Varianten identisch.

Tabelle D-3 a: Verkehrsführung mit Überleitung auf die Gegenfahrbahn

Richtungsfahrbahn mit 2 Fahrstreifen					
Einschränkung des Querschnittes	Verkehrsführung	Kurzbezeichnung <sup>*)</sup>	Mindestbreiten [m] der		Regelplan Nr.
			(Behelfs-) Fahrstreifen	Behelfsfahrbahn	
Einschränkung auf einen Fahrstreifen	3 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn, 1 Fahrstreifen oder Behelfsfahrstreifen auf eingeschränkter Fahrbahn	3s + 1	3,25	9,00	D II/1
			(3,00)	(8,75)	
			+ 2,50		
			+ 3,25		
			-----	-----	
			3,25	3,25	
Sperrung einer Richtungsfahrbahn	4 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	4s + 0	3,25	11,50	D II/2
			(3,00)	(11,00)	
			+ 2,50		
			+ 2,50		
			+ 3,25		
			(3,00)		
	2 Fahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	2 + 0	3,25	6,50	D II/3
			+ 3,25		
	3 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	3s + 0	3,25	9,00	D II/4
			(3,00)	(8,75)	
			+ 2,50		
			+ 3,25		

\*) Zur Unterscheidung von gleichen Ziffernfolgen werden zusätzlich folgende Kennzeichnungen verwendet:  
n Die Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn werden nicht von der Arbeitsstelle betroffen.  
s Der Verkehr wird unter Mitbenutzung des Standstreifens geführt.

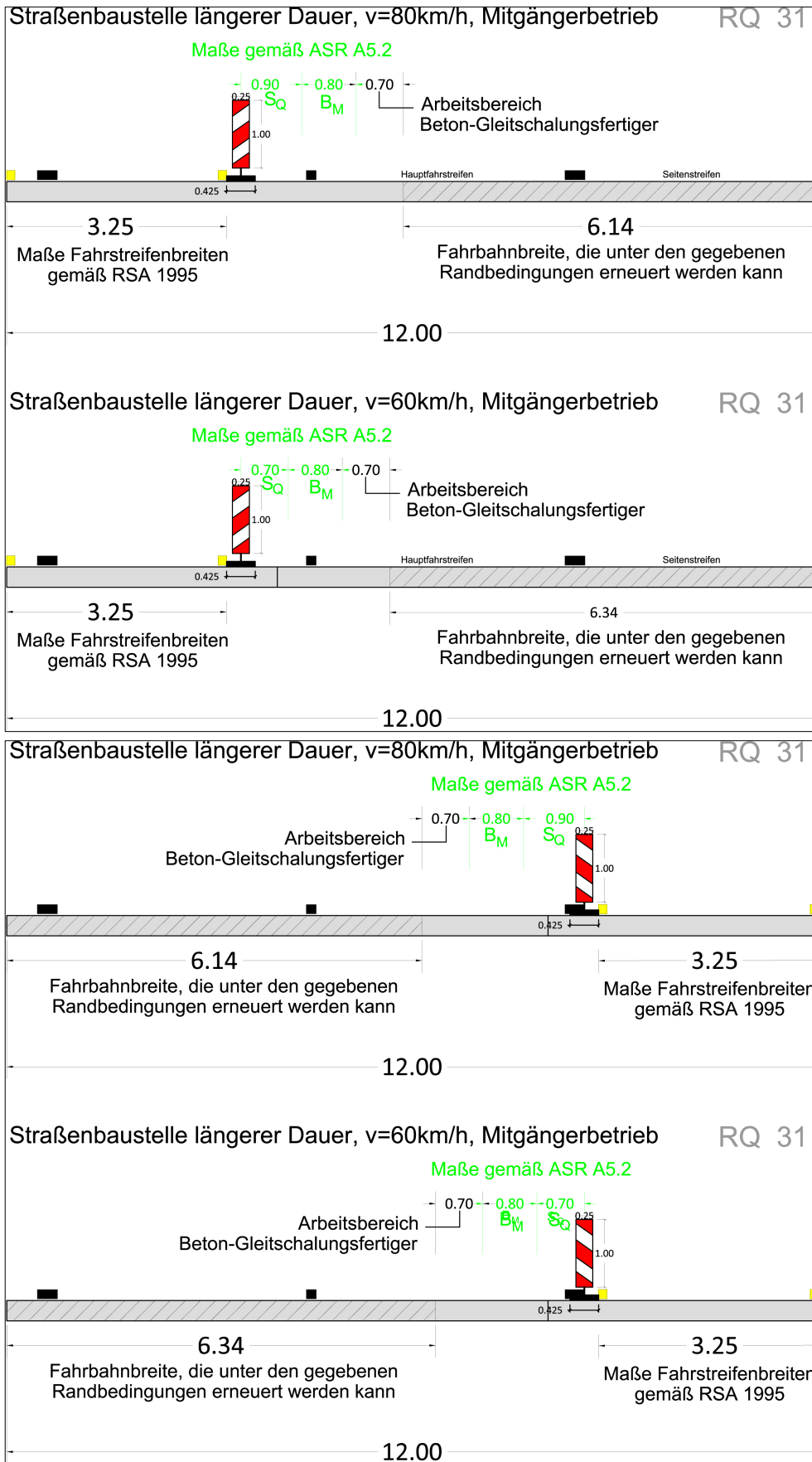
Tab. 4.3: Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 2 FS mit Überleitung gemäß [RSA 1995]



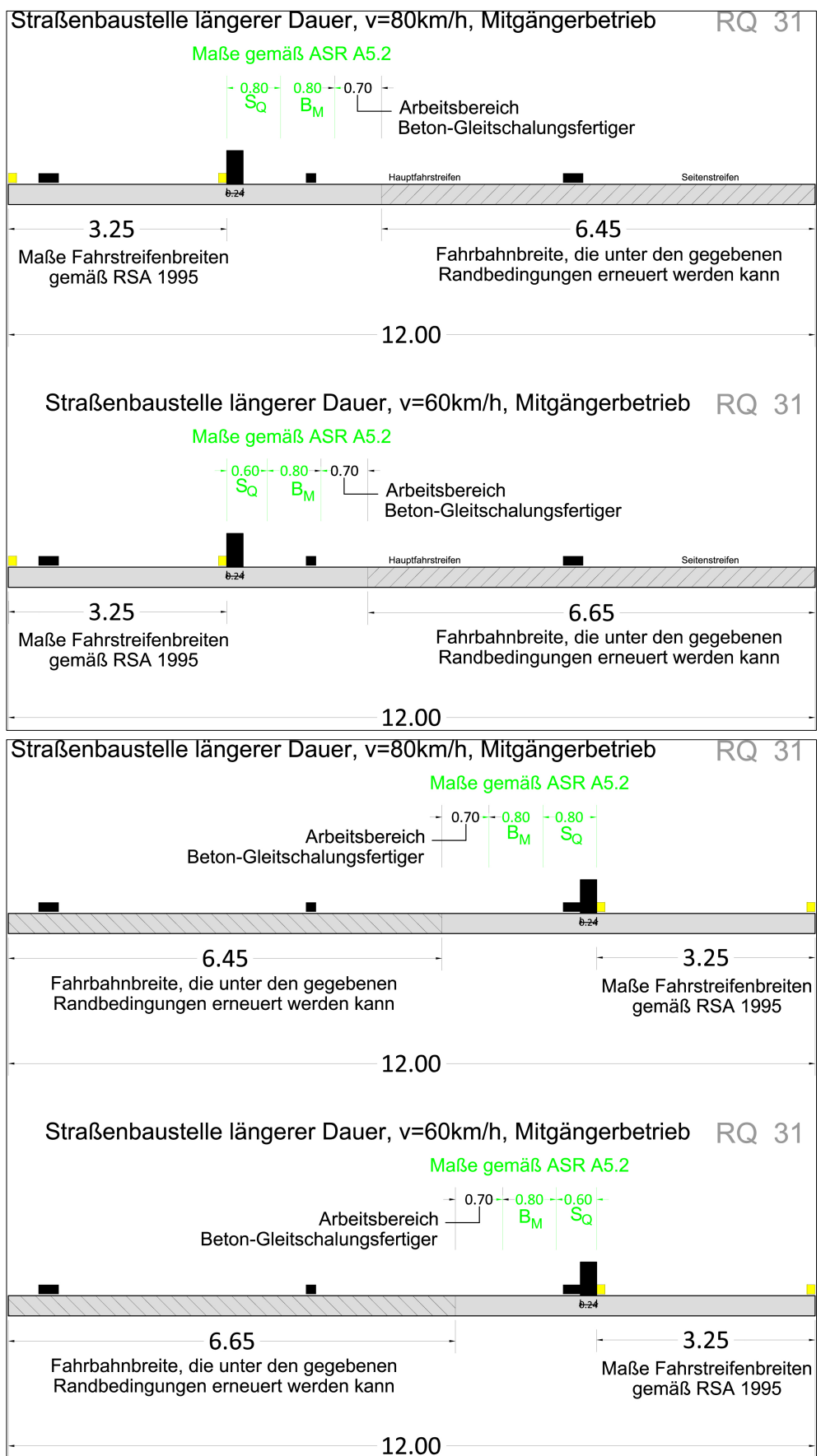
**Bild 4.6:** Regelplan D II/1a und DII/1b für Verkehrsführung mit Überleitung (3s+1) gemäß [RSA 1995]

Wie bereits bei vorangegangenen Untersuchungen wurde der technologische Überstand für einen Gleitschalungsfertiger mit 0,70 m pro Seite und die Arbeits- und Sicherheitsabstände gemäß [ARS 5.2 2018] angenommen. Letztere sind insbesondere von der gefahrenen Geschwindigkeit sowie von der verwendeten Schutz- bzw.- Leiteinrichtung abhängig. In Bild 4.7 und Bild 4.8 sind die jeweiligen möglichen Arbeitsbreiten bei 80 bzw. 60 km/h dargestellt, wenn ein Fahrstreifen verbleibt.

Bei beiden Varianten mit 60 und 80 km/h wird deutlich, dass zwar ausreichend Arbeitsraum zur Verfügung steht, um letztendlich die gesamte Fahrbahnbreite zu bearbeiten, unter Annahme üblicher Plattengeometrien jedoch Arbeiten, die den gesamten Bereich des Hauptfahrstreifens umfassen (z. B. Plattenersatz, streifenweiser Ersatz), nicht ausgeführt werden können, sofern die Verkehrsführung mit 80 bzw. 60 km/h erfolgt.



**Bild 4.7:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit/ohne Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt - 3s+1 / 2n+1) und Leitbake gemäß [RSA 1995]

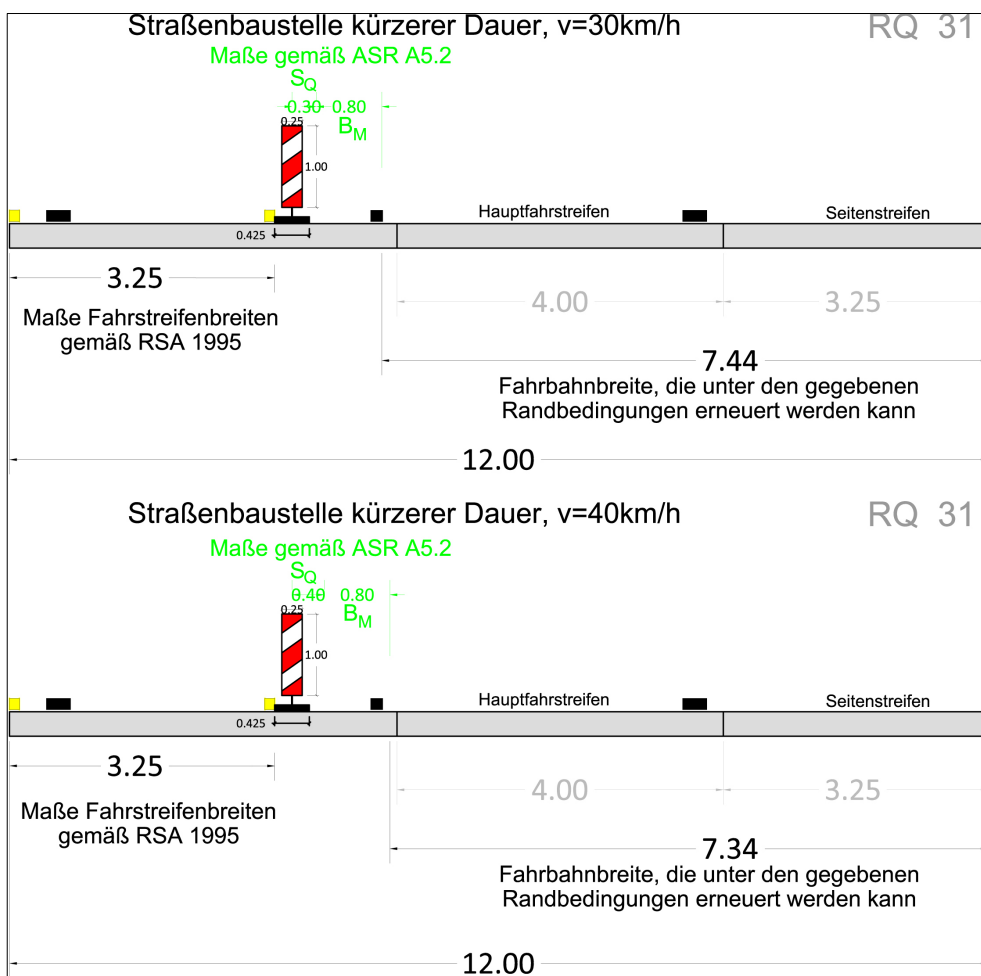


**Bild 4.8:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit/ohne Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt - 3s+1 / 2n+1) und Fahrzeugrückhaltesystem gemäß [RSA 1995]

Die bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass eine Erneuerung der Richtungsfahrbahn unter den gegebenen Randbedingungen zwar möglich ist, die Plattengeometrie jedoch nicht beibehalten werden kann und neue Plattenanmessungen eingeführt werden müssen.

Ein Plattenersatz im Hauptfahrstreifen ist in diesem Fall nur möglich, wenn die Geschwindigkeiten im Bereich der Baustelle auf 30 bzw. 40 km/h gesenkt werden, da beim Plattenersatz die technologische Breite des Fertigers im Arbeitsraum nicht mehr notwendig und der Sicherheitsabstand aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten verringert ist (siehe Bild 4.9).

Änderungen können sich ergeben, wenn eine abweichende von der hier dargestellten Plattengeometrie vorhanden ist. In jedem Fall ist für einen Plattenersatz im HFS ein mindestens 4,60 m breiter Bereich im 2. FS für Verkehrsführung und Sicherheitsbereiche notwendig. Die Platte im Überholfahrstreifen muss also dementsprechend breit sein. Bei geringeren Plattenbreiten sind die Arbeiten nicht durchführbar.



**Bild 4.9:** Plattenersatz im Hauptfahrstreifen bei herkömmlicher Plattengeometrie

Ein streifenweiser Ersatz des HFS ist generell nicht möglich, da hier die technologische Breite des Fertigers berücksichtigt werden muss und folglich unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit in der Baustelle kein genügend breiter Arbeitsraum zur Verfügung steht.

Es ist daher in jedem Fall sinnvoll, für den hier gezeigten Regelquerschnitt die herkömmlichen Plattengeometrien zu überdenken, sofern ein Fahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn verbleiben soll, auf der auch die Arbeiten stattfinden.

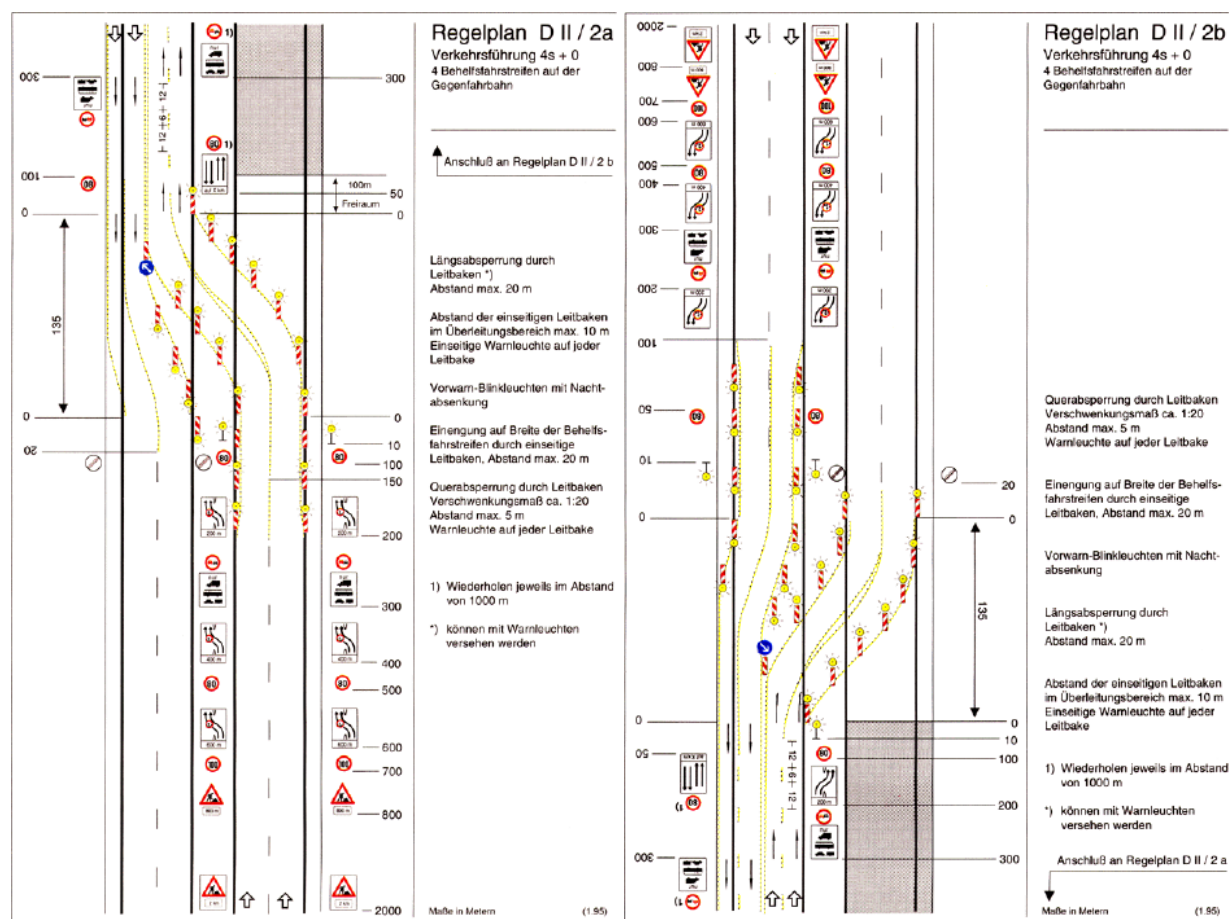
Verbleibt hingegen kein Fahrstreifen, indem die gesamte Verkehrsführung auf der Gegenfahrbahn abgewickelt wird (z. B. bei 4s+0 (Bild 4.10), 2+0, 3s+0), besteht Baufreiheit für die gesamte Fahrbahnbreite, so



dass keine Beschränkungen hinsichtlich der Arbeitsräume bestehen. Weitere Untersuchungen entfallen daher.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass aus Sicht der Verkehrssicherheit und der Baustellensicherheit sowie aus bautechnischen Qualitätsaspekten bei einer grundhaften Erneuerung einer Richtungsfahrbahn bzw. beim streifenweisen Ersatz die vollständige Überleitung des Verkehrs auf die Gegenfahrbahn vorteilhaft ist. Die damit erreichte Baufreiheit wird zudem auch beschleunigend auf die Baumaßnahme wirken, was zu einer schnelleren Wiederverfügbarkeit beiträgt.

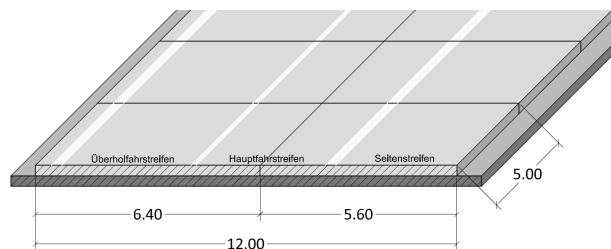
Es ist daher von Fall zu Fall abzuwägen, welche Verkehrsführungsvariante sinnvoll ist.



**Bild 4.10:** Regelplan D II/2a und DII/2b für Verkehrsführung mit Überleitung (4s+0) gemäß [RSA 1995]

Wie bereits festgestellt wurde, ist es notwendig, die herkömmlichen Plattengeometrien zu verändern, wenn Verkehrsführungen unter Beibehaltung eines Fahrstreifens durchgeführt werden sollen, um Arbeiten an Betonplatten durchführen zu können.

Es ergeben sich diesbezüglich zwei Varianten. Bei der ersten wird eine Reduktion der Längsfugenanzahl vorgesehen (Bild 4.11). Die einzige Längsfuge befindet sich etwa in der Mitte des Hauptfahrstreifens und unterteilt die Fahrbahn in ~6,40 und ~5,60 m breite Platten.

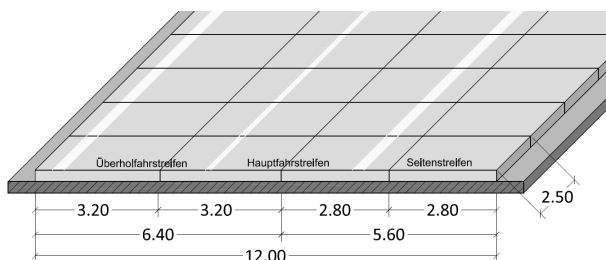


**Bild 4.11:** Resultierende Plattengeometrien bei nur einer Längsfuge im Querschnitt (RQ 31)



Die deutlich vergrößerten Plattengeometrien führen zu größeren Deckendicken bei ansonsten gleich bleibenden Randbedingungen. Im Abschnitt 4.2 sind entsprechende Spannungs- und Verformungsberechnungen angestellt worden, die Grundlage einer rechnerischen Dimensionierung darstellen. Unterstellt man ein vergleichbares Sicherheitsmodell wie das in den [RDO Beton 09] verwendeten, sind je nach Festigkeitsniveau (Spaltzugfestigkeit) Mehrdicken von ca. 4-6 cm zu erwarten.

Bei der zweiten Variante wird entgegen der herkömmlichen Anordnung eine weitere Längsfuge eingefügt (Bild 4.12). Die mittlere Längsfuge befindet sich wiederum in der Mitte des Hauptfahrstreifens. Durch die übrigen beiden Längsfugen werden die durch die mittlere Fuge entstandenen großen Platten noch einmal halbiert. Dadurch ergibt sich eine Plattenreihe mit vier kleinen Platten. Die Plattenlänge ist dementsprechend anzupassen und wurde in diesem Beispiel auf 2,50 m festgelegt.



**Bild 4.12:** Resultierende Plattengeometrien bei einer zusätzlichen Längsfuge im Querschnitt

Um zu untersuchen, wie sich die verringerte Plattengeometrie auf die Dimensionierung auswirkt, wurden exemplarische Berechnungen nach [RDO Beton 09] durchgeführt und mit Ergebnissen für Standardfälle verglichen. Die Berechnungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tab. 4.4 einander gegenübergestellt. Die Plattenlänge bei den kleinen Platten wurde variiert.

Länge [m]	Breite [m]	Resultierende Deckendicke
5,00	4,00	25,5 cm
	4,25	26,0 cm
2,50	3,20	24,5 cm
	2,80	24,0 cm
3,00	3,20	24,0 cm
	2,80	24,0 cm
3,50	3,20	24,0 cm
	2,80	24,0 cm
4,00	3,20	24,0 cm
	2,80	26,0 cm

**Tab. 4.4:** Dimensionierungsberechnungen AWDSTAKO, C30/37-3,7, B=100 Mio., Unterlage HGT

Für die kleinen Platten wurden die Plattenbreiten gemäß Bild 4.12 den Berechnungen zu Grunde gelegt und die Plattenlänge schrittweise erhöht. Wie zu erwarten war, fallen im Vergleich mit den üblichen Plattengeometrien (erste beiden Zeilen der Tabelle) die Dimensionierungsergebnisse bei kleineren Plattenabmessungen auch geringer aus. Erst bei Plattenlängen ab 4,00 m steigen die Dimensionierungsergebnisse wieder an.

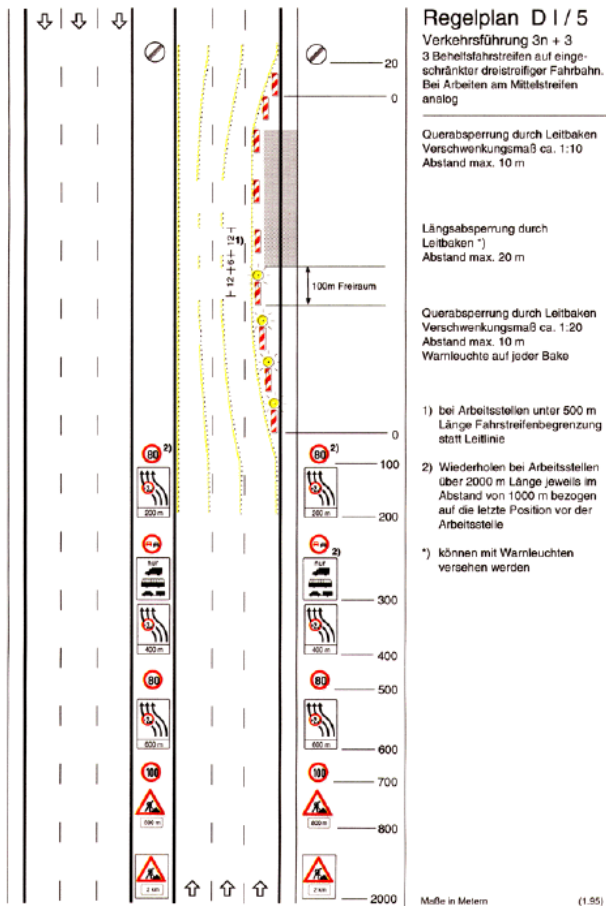
Die Ergebnisse in Tab. 4.4 sind mit dem analytischen Berechnungsverfahren gemäß [RDO Beton 09] entstanden. Künftige Dimensionierungsberechnungen sollten auf Spannungs- und Verformungsberechnungen mit Hilfe von 3D FEM-Modellen basieren, wie sie im Abschnitt 4.2 durchgeführt wurden.

### 4.1.3 Richtungsfahrbahnen mit 3 Fahrstreifen

Wie bereits bei 2-streifigen Richtungsfahrbahnen sind auch bei Richtungsfahrbahnen mit 3 Fahrstreifen baustellenbedingte Verkehrsführungen mit und ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn möglich. Tab. 4.5 enthält die Angaben zu den Verkehrsführungen ohne, die Tab. 4.6 mit Überleitung auf die Gegenfahrbahn.

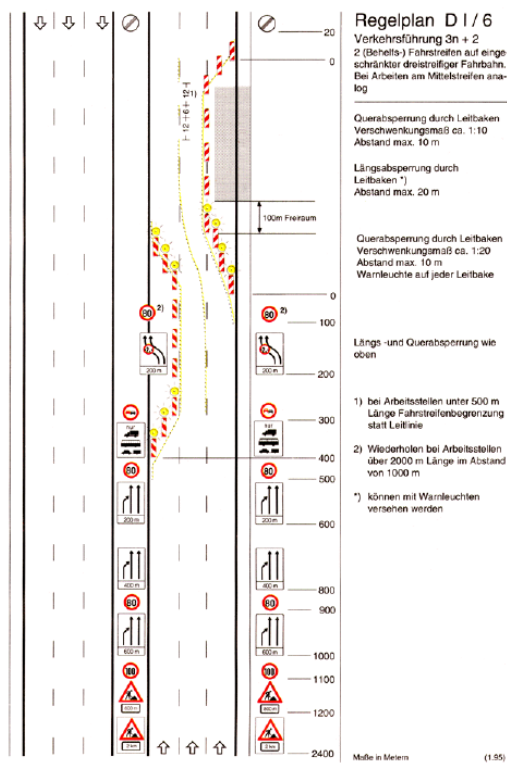
Richtungsfahrbahn mit 3 Fahrstreifen					
Einschränkung des Querschnittes	Verkehrsführung	Kurzbezeichnung <sup>*)</sup>	Mindestbreiten [m] der (Behelfs-) Fahrstreifen		Regelplan Nr.
Einschränkung der Fahrbahn	3 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links	3n + 3	2,50	8,25	D I/5
			+ 2,50 + 3,25 (3,00)	(8,00)	
Einschränkung auf zwei Fahrstreifen	2 Fahrstreifen oder 2 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links	3n + 2	2,50	5,75	D I/6
			+ 3,25 (3,00)	(5,50)	
Einschränkung auf einen Fahrstreifen	1 Fahrstreifen oder 1 Behelfsfahrstreifen; analog bei Einschränkung links ohne Standstreifen	3n + 1	3,25	3,25	analog D I/6
Sperrung der zwei linken Fahrstreifen	2 Behelfsfahrstreifen auf rechtem Fahrstreifen und Standstreifen	3n + 2s	2,50	5,75	D I/7
			+ 3,25 (3,00)	(5,50)	
<sup>*)</sup> Zur Unterscheidung von gleichen Ziffernfolgen werden zusätzlich folgende Kennzeichnungen verwendet: n Die Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn werden nicht von der Arbeitsstelle betroffen. s Der Verkehr wird unter Mitbenutzung des Standstreifens geführt.					

**Tab. 4.5:** Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 3 FS ohne Überleitung gemäß [RSA 1995]

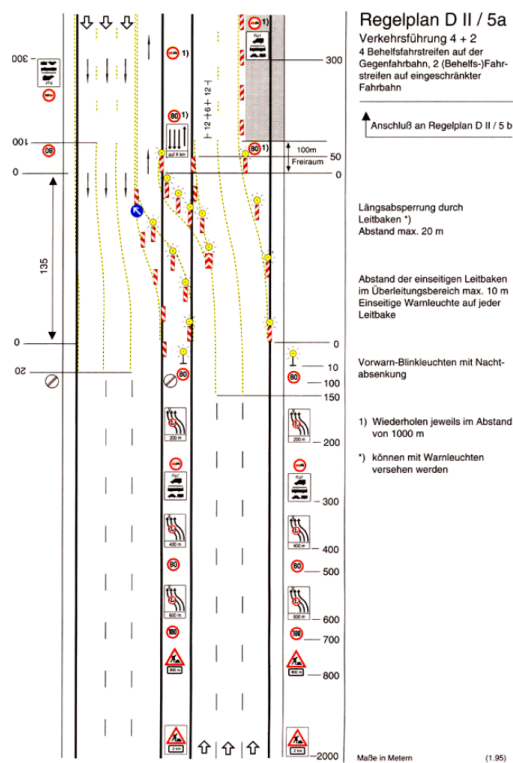


**Bild 4.13:** Regelplan D I/5 für Verkehrsführung ohne Überleitung (3n+3) gemäß [RSA 1995]

Wie aus Bild 4.13 bereits ersichtlich wird, ist eine Verkehrsführung 3n+3 nicht geeignet, um unter Beibehaltung herkömmlicher Plattengeometrien Maßnahmen durchzuführen, die den gesamten Hauptfahrstreifen umfassen. In den weiteren Untersuchungen soll daher festgestellt werden, ob unter Berücksichtigung der Arbeits- und Sicherheitsräume mit der Reduzierung auf 2 Fahrstreifen (durch Fahrstreifenreduktion oder Überleitung auf die Gegenfahrbahn) die entsprechenden Arbeiten durchgeführt werden können. Entsprechende Verkehrsführungen sind in Bild 4.14 (3n+2) und Bild 4.15 (4+2) dargestellt.



**Bild 4.14:** Regelplan D I/6 für Verkehrsführung ohne Überleitung (3n+2) gemäß [RSA 1995]



**Bild 4.15:** Regelplan D II/5a für Verkehrsführung mit Überleitung (4+2) gemäß [RSA 1995]

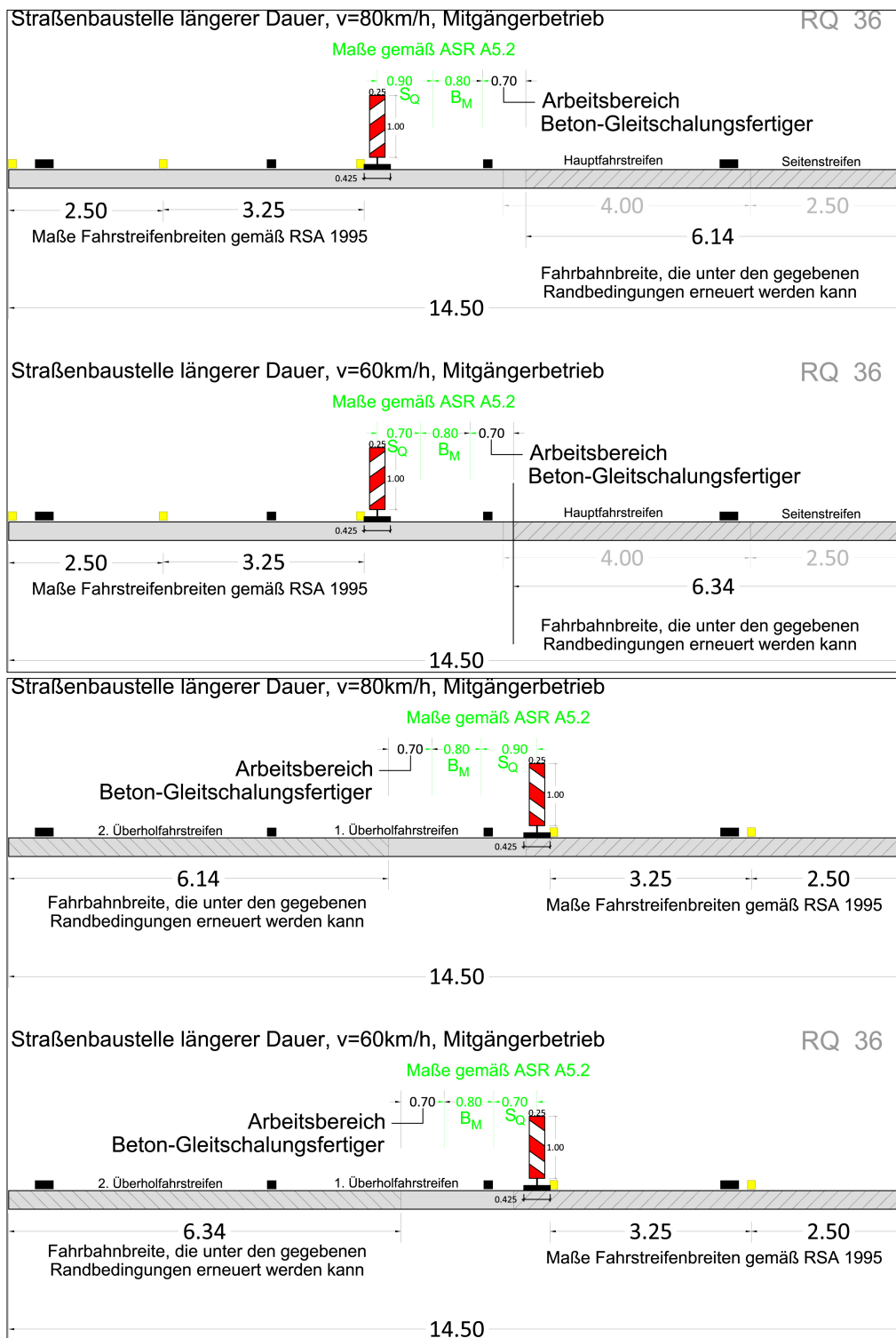
Richtungsfahrbahn mit 3 Fahrstreifen					
Einschränkung des Querschchnittes	Verkehrsführung	Kurzbezeichnung *)	Mindeststreifen [m] der (Behelfs-) Fahrbahn		Regelplan Nr.
Einschränkung auf zwei Fahrstreifen	4 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn, 2 Fahrstreifen oder 2 Behelfsfahrstreifen auf eingeschränkter Fahrbahn	4 + 2	3,25	11,50	D II/5
			(3,00)	(11,25)	
Einschränkung auf einen Fahrstreifen	5 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn, 1 Fahrstreifen oder 1 Behelfsfahrstreifen auf eingeschränkter Fahrbahn	5s + 1	+ 2,5		D II/6
			- 2,50		
			+ 3,25		
			2,50	5,75	
			+ 3,25	(5,50)	
Sperrung des linken Fahrstreifens	4 Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	4 + 0	3,25	11,50	D II/7
			(3,00)	(11,00)	
			+ 2,50		
Sperrung des linken Fahrstreifens	5 Fahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	5s + 0	+ 2,50		D II/8
			- 2,50		
			+ 3,25		
			(3,00)		
			3,25	3,25	
Sperrung des linken Fahrstreifens	6 Fahrstreifen auf der Gegenfahrbahn	6 + 0	3,25	16,50	
			(3,00)	(16,00)	
			+ 2,50		
			+ 2,50		
			+ 3,25		

\*) Zur Unterscheidung von gleichen Ziffernfolgen werden zusätzlich folgende Kennzeichnungen verwendet:  
 n Die Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn werden nicht von der Arbeitsstelle betroffen.  
 s Der Verkehr wird unter Mitbenutzung des Standstreifens geführt.

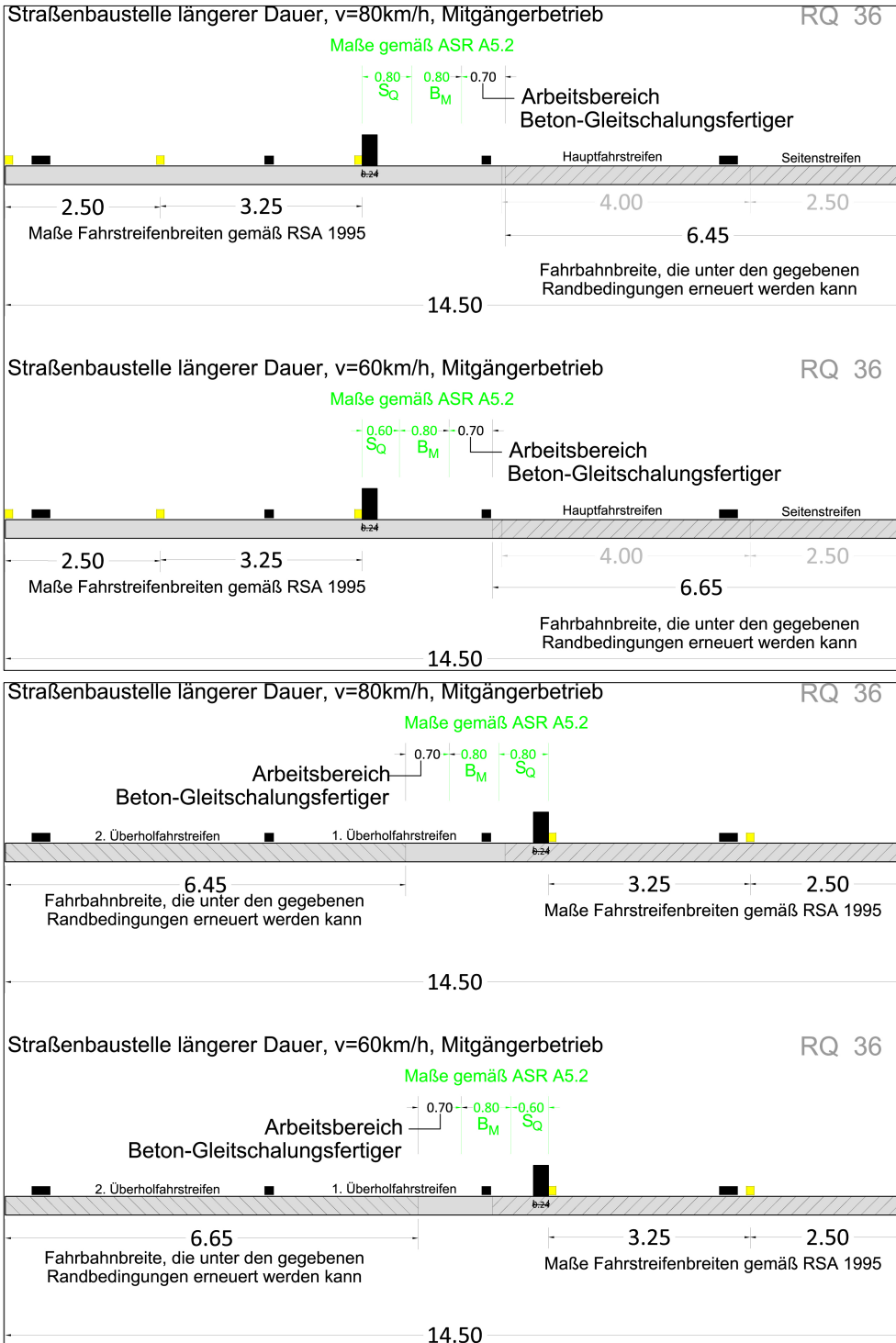
**Tab. 4.6:** Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 3 FS mit Überleitung gemäß [RSA 1995]

In Bild 4.16 und Bild 4.17 sind die möglichen Breiten angegeben, die sich unter Berücksichtigung der Verkehrsführung mit 2 Behelfsfahrestreifen, den von der Geschwindigkeit und vom Leit- bzw. Sicherungssystem abhängigen Arbeits- und Sicherheitsräumen und der technologischen Arbeitsbreite eines Fertigers ergeben.

Es wird deutlich, dass bei 2 verbleibenden Fahrestreifen Arbeiten im Hauptfahrestreifen nur dann durchgeführt werden können, wenn ein Fahrzeugrückhaltesystem zum Einsatz kommt und gleichzeitig die Geschwindigkeit auf 60 km/h begrenzt wird (siehe Bild 4.17). Erkennbar ist aber auch, dass in keinem der untersuchten Fälle der gesamte Fahrbahnbereich erneuert werden kann, sofern noch zwei Fahrestreifen auf der Richtungsfahrbahn verbleiben, die mit 60 bzw. 80 km/h befahren werden. Für Arbeiten im Hauptfahrestreifen bei herkömmlicher Plattengeometrie ist diese Verkehrssicherung unter Beachtung der Randbedingungen möglich.



**Bild 4.16:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführungen mit 2 verbleibenden Fahrstreifen (3n+2(s) bzw. 4+2) und Leitbake gemäß [RSA 1995] ]

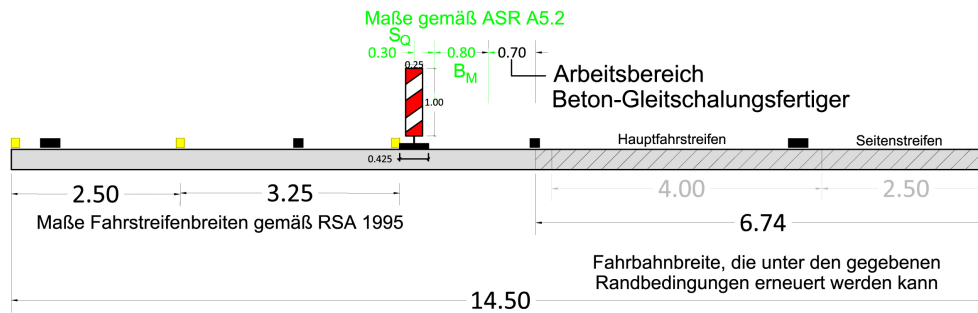


**Bild 4.17:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit 2 verbleibenden Fahrstreifen (3n+2 bzw. 4+2) und Fahrzeurückhaltesystem gemäß [RSA 1995]

Bereits bei der Reduzierung der Geschwindigkeit auf 50 km/h sind bei dem gezeigten Beispiel (siehe Bild 4.18) Arbeiten im gesamten Bereich des Hauptfahrstreifens mit Fertiger möglich. Durch eine weitere Reduzierung der gefahrenen Geschwindigkeiten können aufgrund der sinkenden geforderten Sicherheitsabstände  $S_Q$  (30 cm bei 30 km/h) auch breitere Platten des Hauptfahrstreifens vollumfänglich bearbeitet werden. Es ist denkbar, insbesondere die geringen Geschwindigkeiten, diese nur im Bereich des Fertigers selbst anzuordnen und im übrigen Teil der Baustelle, in dem keine Arbeiten erfolgen, eine höhere Geschwindigkeit zuzulassen. Diese Vorgehensweise wird in der Praxis teilweise bereits praktiziert.

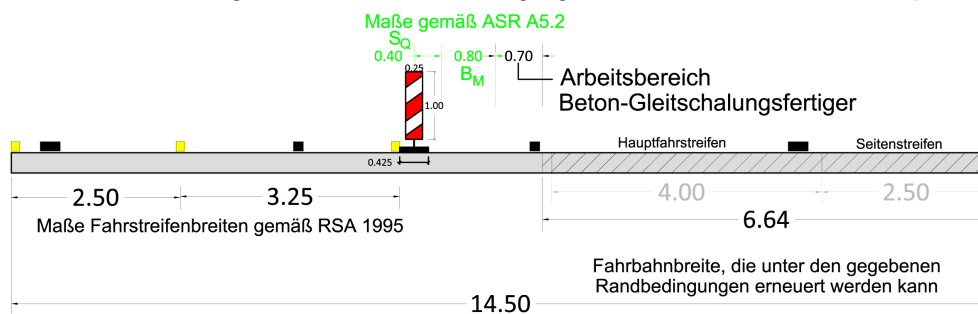
Straßenbaustelle längerer Dauer,  $v=30\text{km/h}$ , Mitgängerbetrieb

RQ 36



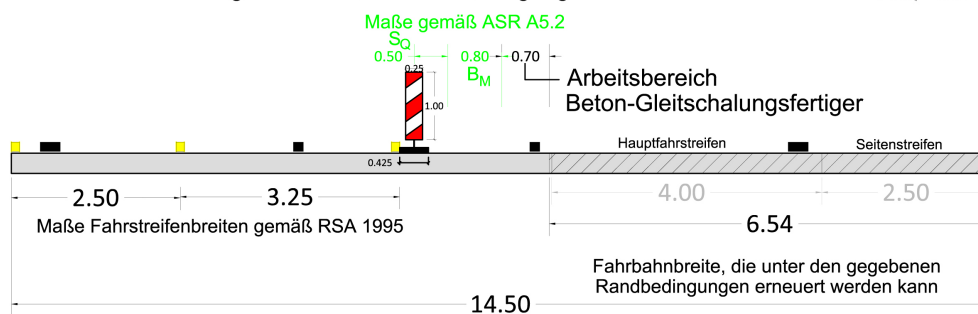
Straßenbaustelle längerer Dauer,  $v=40\text{km/h}$ , Mitgängerbetrieb

RQ 36



Straßenbaustelle längerer Dauer,  $v=50\text{km/h}$ , Mitgängerbetrieb

RQ 36

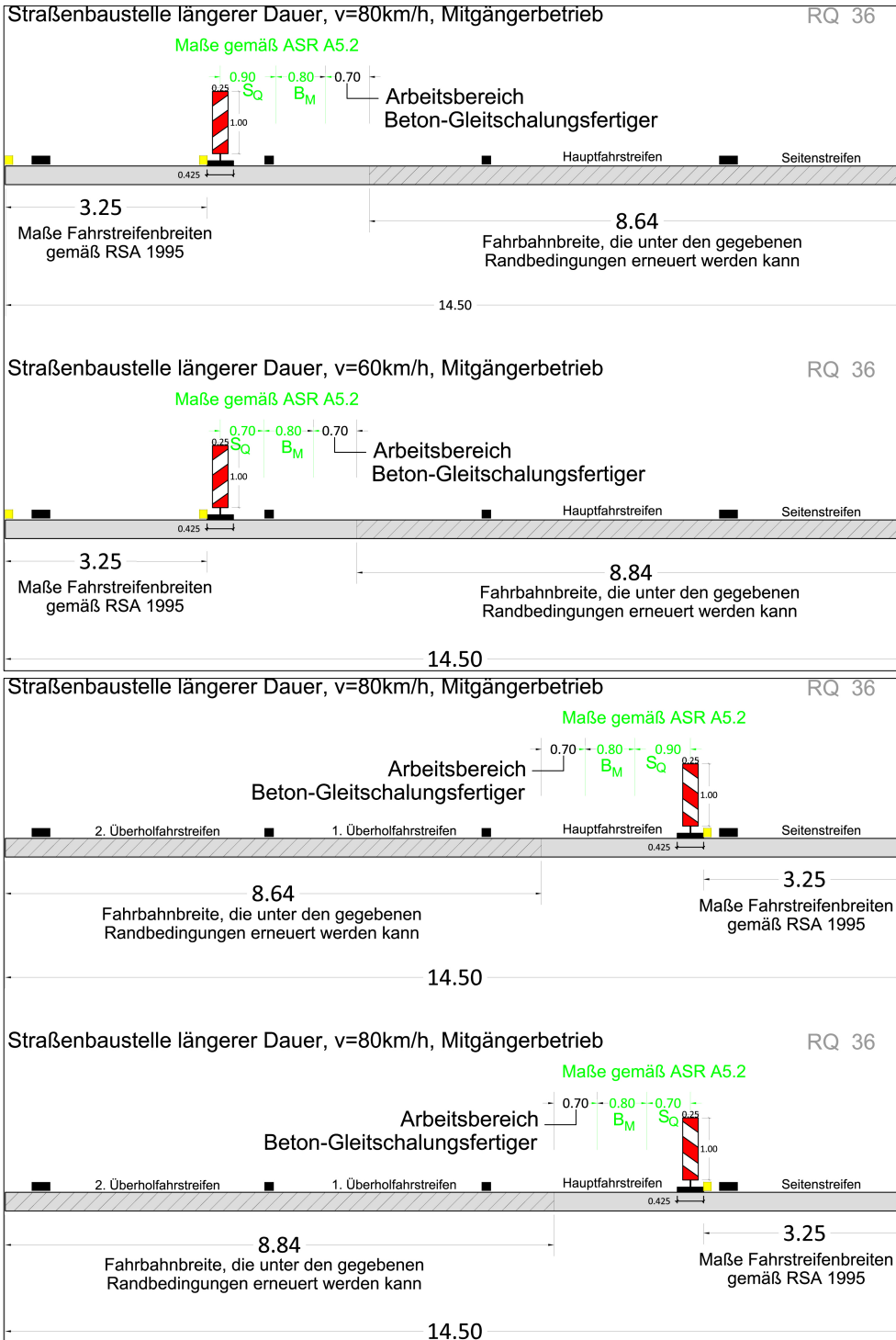


**Bild 4.18:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit 2 verbleibenden Fahrstreifen ( $3n+2$  bzw.  $4+2$ ) und Leitbake gemäß [RSA 1995] – Geschwindigkeiten 30-50 km/h

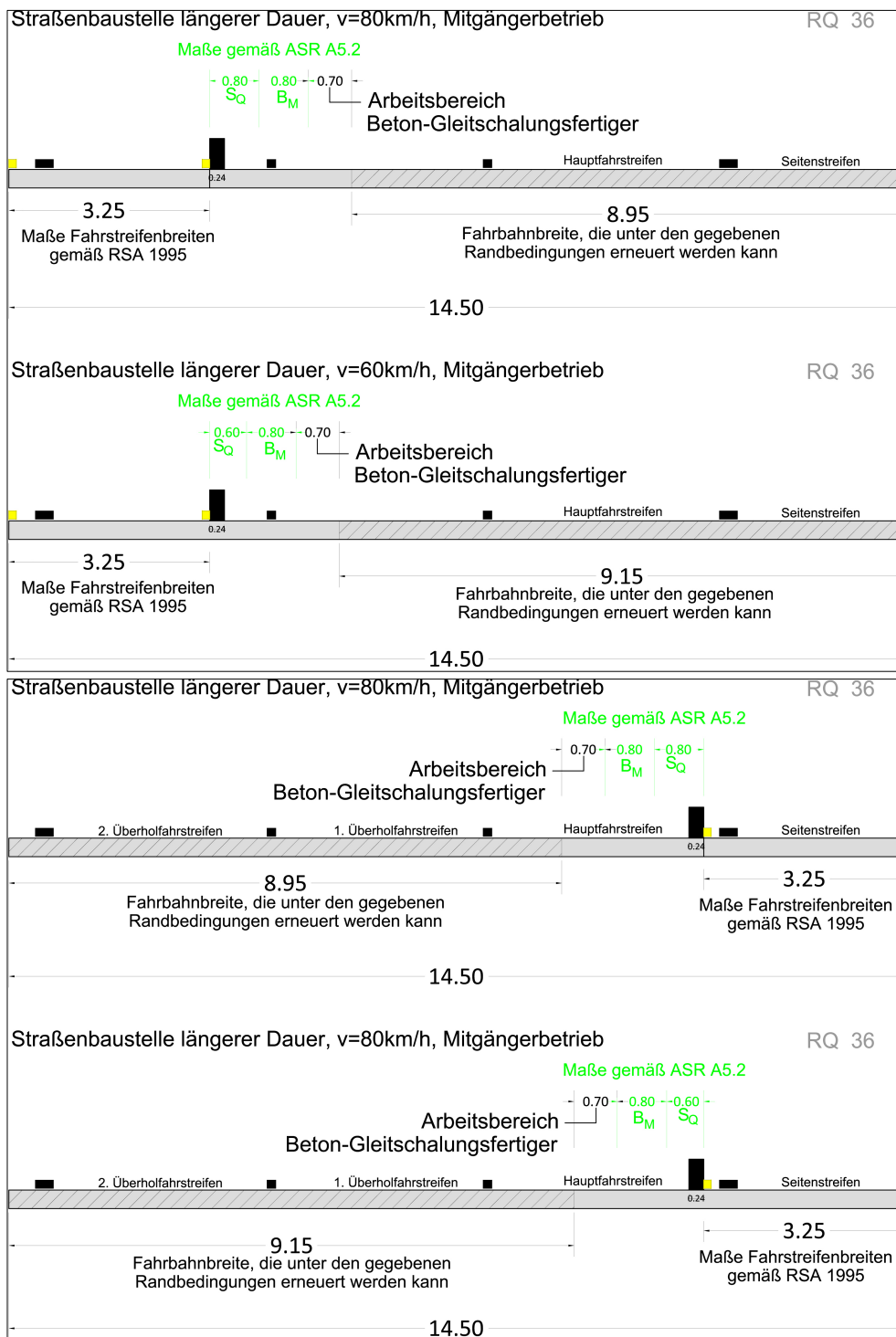
Ist es hingegen ausreichend, nur einen Fahrstreifen auf der betroffenen Richtungsfahrbahn beizubehalten ( $3n+1$  bzw.  $5s+1$ ), ist der resultierende Baubereich ausreichend groß, um Platten des Hauptfahrstreifens sowie phasenweisen den gesamten Fahrbahnbereich zu bearbeiten (Bild 4.19 und Bild 4.20).

Vollständige Baufreiheit ergibt sich erst bei Verkehrsführungen, bei denen alle Fahrstreifen auf der Gegenfahrbahn geführt werden ( $4+0$ ,  $5s+0$  und  $6+0$ ). Voraussetzung dafür sind jedoch ausreichend bemessene Fahrbahnbreiten.

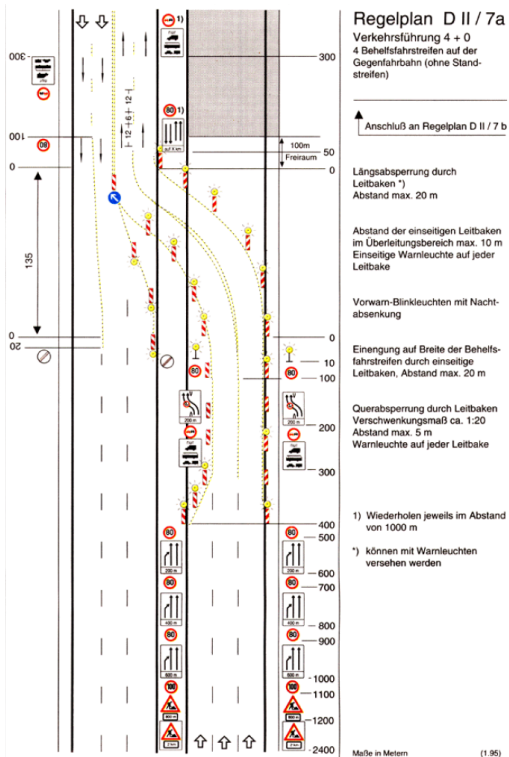




**Bild 4.19:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt – 5s+1) und Leitbake gemäß [RSA 1995]



**Bild 4.20:** Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt – 5s+1) und Fahrzeugrückhaltesystem gemäß [RSA 1995]



**Bild 4.21:** Regelplan D II/7a für Verkehrsführung mit Überleitung (4+0) gemäß [RSA 1995]

Bei den Untersuchungen zur Verkehrsführung und Ausführungsbreite konnte insgesamt festgestellt werden, dass die herkömmlichen Plattengeometrien bei 3-streifigen Richtungsfahrbahnen ggf. unverändert bleiben können, da Maßnahmen an den einzelnen Platten möglich sind. Eine grundlegende Erneuerung einer Richtungsfahrbahn (Szenario a)) ist bei Beibehaltung der Plattengeometrien und gleichzeitiger Verkehrsführung mit zwei Fahrstreifen jedoch nicht möglich. Ein streifenweiser Ersatz kann bei den derzeitigen Plattengeometrien nur erfolgen, wenn die Geschwindigkeiten in der Baustelle  $\leq 60$  km/h betragen und Fahrzeugrückhaltesysteme eingesetzt werden. In jedem Fall sollte die Vorgehensweise anhand der tatsächlich vorhandenen Plattenbreite des Hauptfahrstreifens untersucht werden, da breitere Platten (z. B. 4,50 m) dazu führen können, dass der notwendige Arbeitsraum nicht mehr ausreicht. Eine Sanierung von Platten im Hauptfahrstreifen (Szenario c) (ohne den Einsatz eines Gleitschalungsfertigers)) ist aber in jedem Fall möglich. Hierfür sind Geschwindigkeiten in der Baustelle von 80 km/h und die Verwendung von Bakern möglich.

Bei einer Verbreiterung des zweiten Behelfsfahrstreifens von 2,50 m auf 2,60 m verringert sich die Breite des möglichen Arbeitsraums entsprechend. Bei dem in Bild 4.17 gezeigten Beispiel würden sich keine Änderungen im Hinblick auf die betrachteten Szenarien ergeben. Es sind sowohl der streifenweise Ersatz unter Nutzung eines Gleitschalungsfertigers bei  $\leq 60$  km/h Baustellengeschwindigkeit und Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen als auch die Plattensanierungen bis zu einer Baustellengeschwindigkeit von 80 km/h weiterhin möglich.

Bei Richtungsfahrbahn mit nur 2 Fahrstreifen hingegen sind Arbeiten nur dann möglich, wenn der Verkehr vollständig auf die Gegenfahrbahn umgelegt wird. Soll zumindest ein Fahrstreifen auf der betrachteten Richtungsfahrbahn verbleiben, sind neue Plattengeometrien anzustreben, die entweder zu größeren (Bild 4.11) oder zu kleineren (Bild 4.12) Plattenabmessungen führen.

## 4.2 Entwicklung neuer / verbesserter Konstruktionsdetails

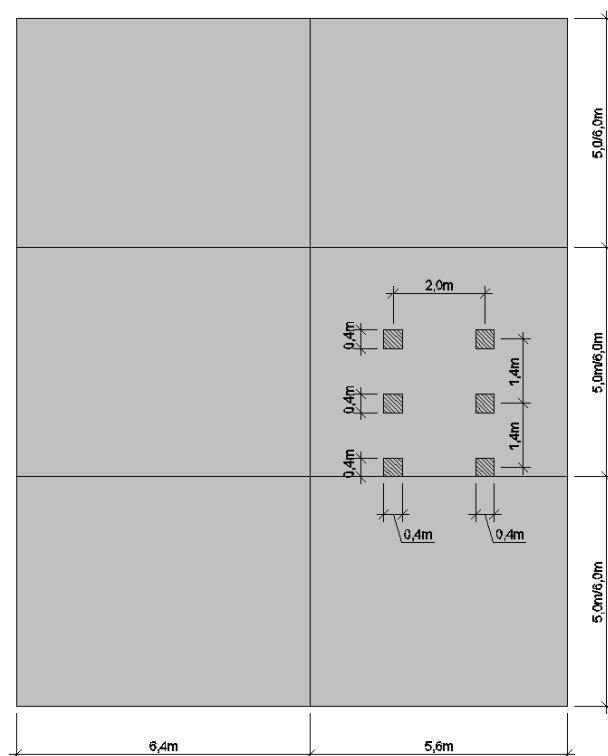
### 4.2.1 Neue Plattengeometrien

Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, ergibt sich für zukünftige Neubaustrecken insbesondere mit zweistreifigen Richtungsfahrbahnen die Notwendigkeit veränderte Plattengeometrien zu verwenden. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Dimensionierung, den Fahrkomfort und die Lärmemission wurden mit einer Serie von Simulationsrechnungen näher untersucht. Für die notwendigen FEM-Berechnungen wurde das Berechnungsmodell aus Abschnitt 3.6.3, einschließlich der Lastannahmen für Temperatur und Verkehr verwendet. Damit ergab sich die Möglichkeit, die Berechnungsergebnisse für die neuen Geometrien direkt mit den Werten für die jetzige Standardbauweise zu vergleichen.

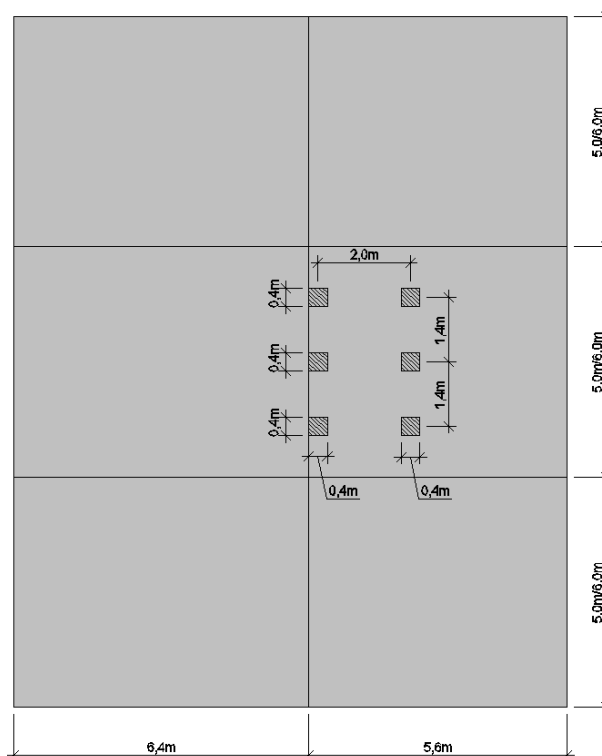
Ausgangspunkt für die Festlegung der Plattenbreiten war der Regelquerschnitt RQ31 nach [RAA 2008]. Die Betondecke eines Fahrstreifens hat hier eine Gesamtbreite von 12,0 m. Die neuen Plattenbreiten wurden für eine erste Analyse entsprechend Bild 4.11 (5,60 m + 6,40 m) festgelegt. Als eine weitere Möglichkeit wurde eine mittige Unterteilung der Gesamtbreite untersucht. Damit entstehen zwei Platten mit jeweils 6,0 m Breite. Der Querfugenabstand wurde alternativ mit 5,0 m und 6,0 m angenommen.

Die für die Berechnungen zu berücksichtigenden Laststellungen wurden ebenfalls aus Abschnitt 3.6.3 übernommen. Zusätzlich wurden die Laststellungen „Mitte Hauptfahrstreifen“ und „2 Fahrzeuge auf einer Platte“ untersucht. Eine Übersicht über die für die Berechnungen verwendeten Plattengeometrien und Lastfälle zeigen Bild 4.22 bis Bild 4.31.

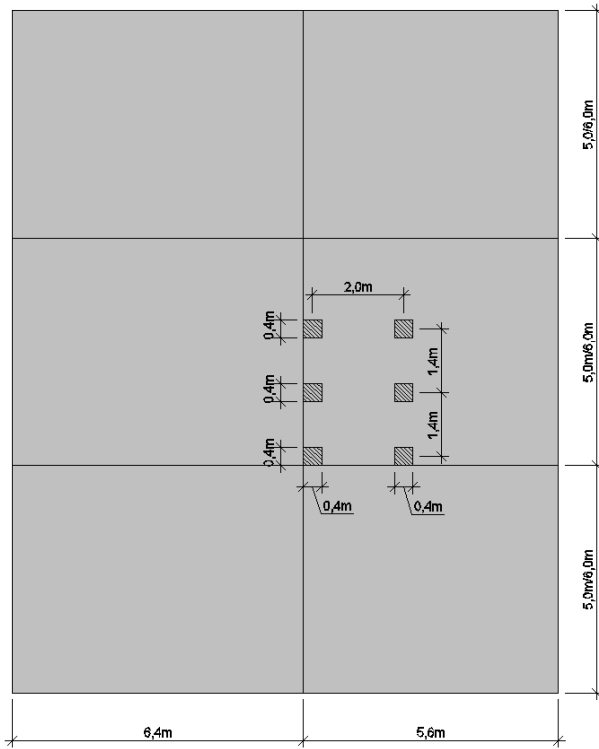
#### Plattengeometrie 1



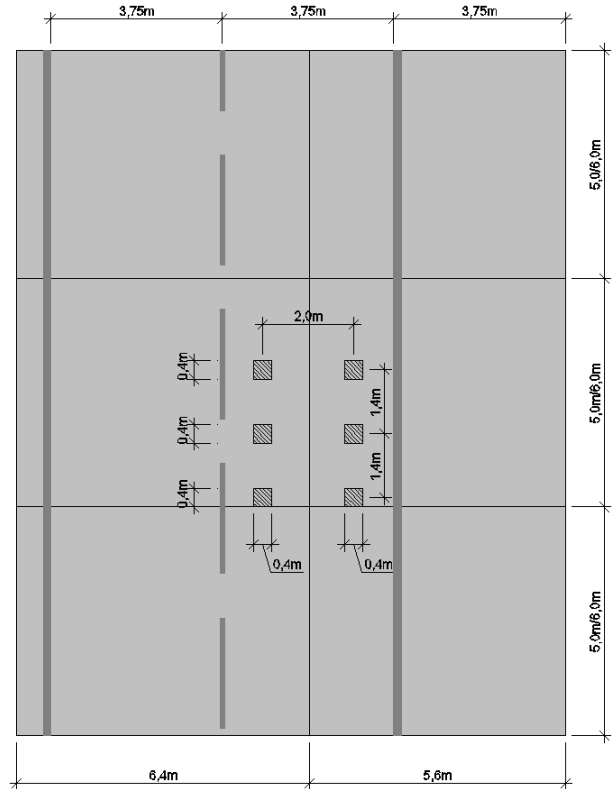
**Bild 4.22:** Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 1 (Mitte Querfuge)



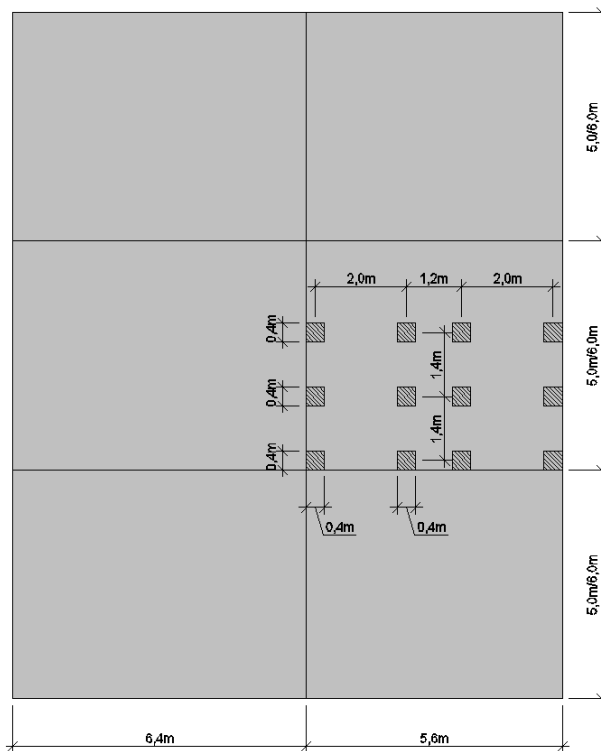
**Bild 4.23:** Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 2 (Mitte Längsfuge)



**Bild 4.24:** Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 3 (Ecke)

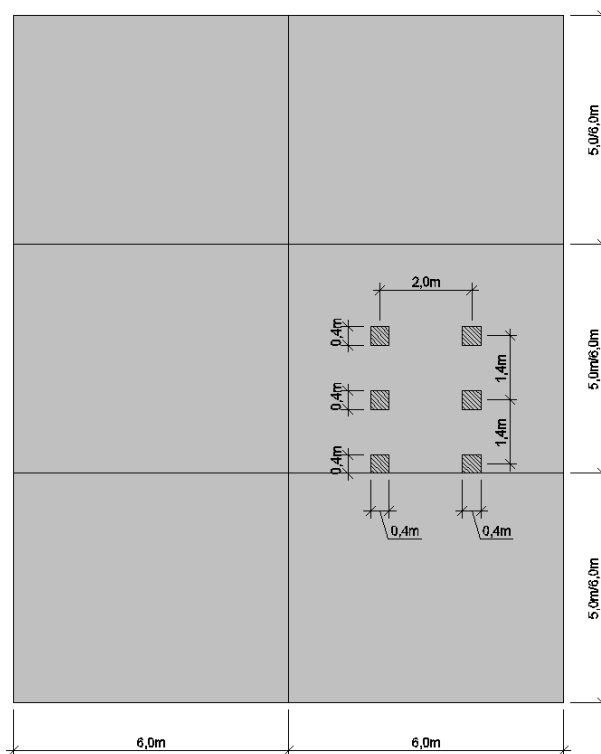


**Bild 4.25:** Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 4 (Mitte Fahrstreifen)

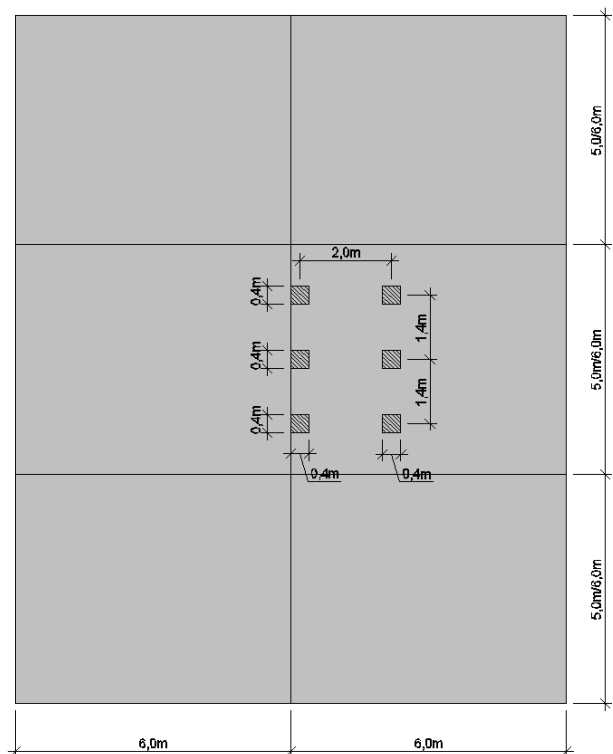


**Bild 4.26:** Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 5 (2 Fahrzeuge auf einer Platte)

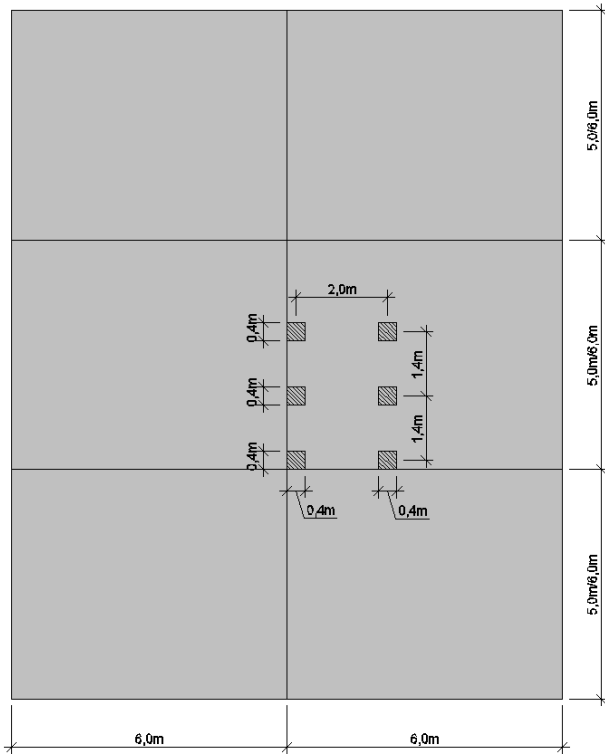
### Plattengeometrie 2



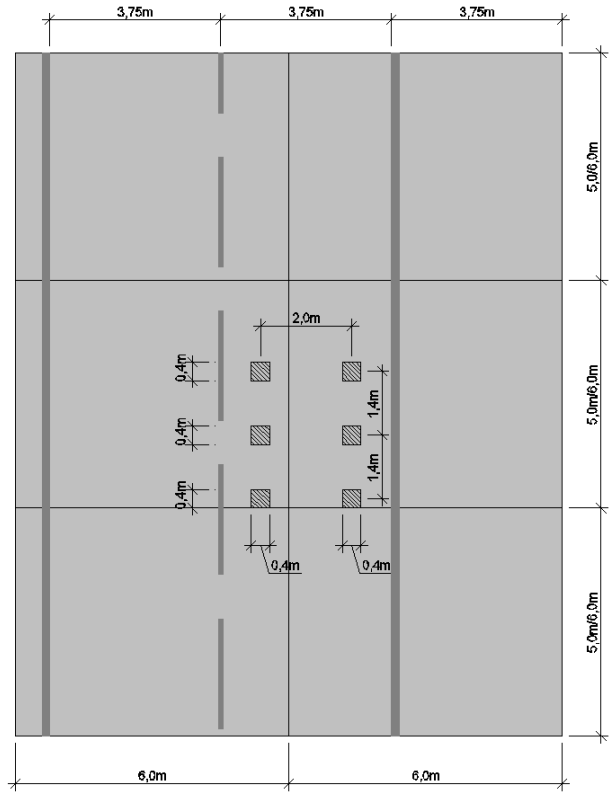
**Bild 4.27:** Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 1 (Mitte Querfuge)



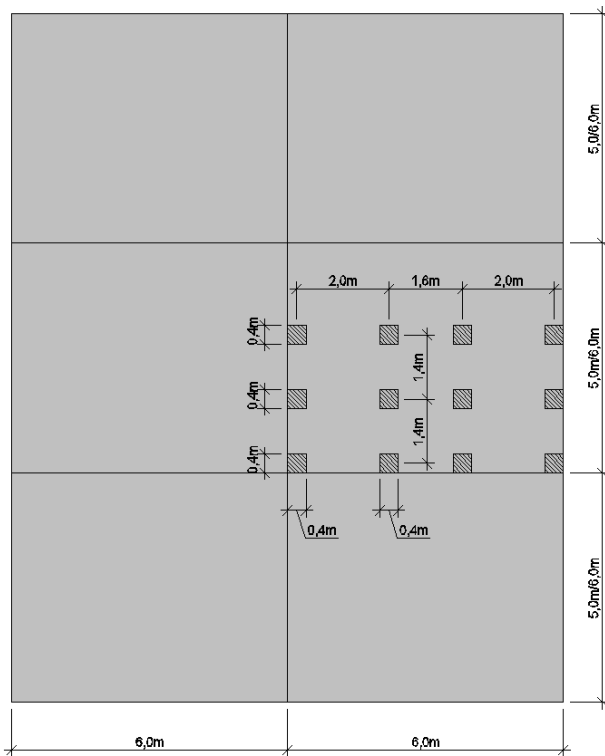
**Bild 4.28:** Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 2 (Mitte Längsfuge)



**Bild 4.29:** Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 3 (Ecke)



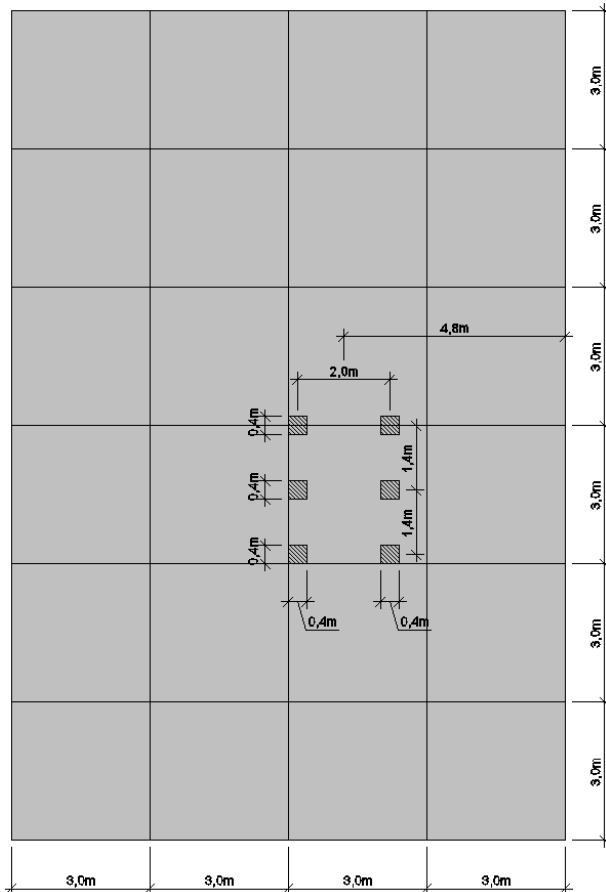
**Bild 4.30:** Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 4 (Mitte Fahrstreifen)



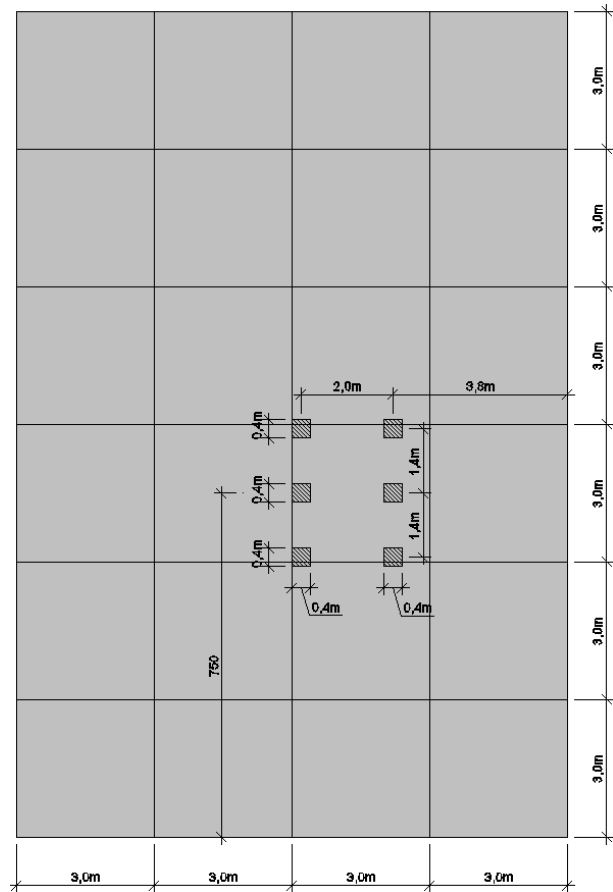
**Bild 4.31:** Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 5 (2 Fahrzeuge auf einer Platte)

Eine weitere Möglichkeit die Anforderungen aus Abschnitt 3.6.3 zu erfüllen besteht darin, die 6,0 m breiten Platten jeweils in der Mitte durch eine weitere Querfuge zu unterteilen. Dieser Fall wurde ebenfalls untersucht. Als Querfugenabstand wurde dabei 3,0 m festgelegt. Alle Platten haben damit einen quadratischen Grundriss mit 3,0 m Kantenlänge. Die maßgebenden Laststellungen waren für diesen Fall leicht zu modifizieren. Eine Übersicht über die für die Berechnungen verwendeten Plattengeometrien und Lastfälle zeigen Bild 4.32 bis Bild 4.35.

### Plattengeometrie 3

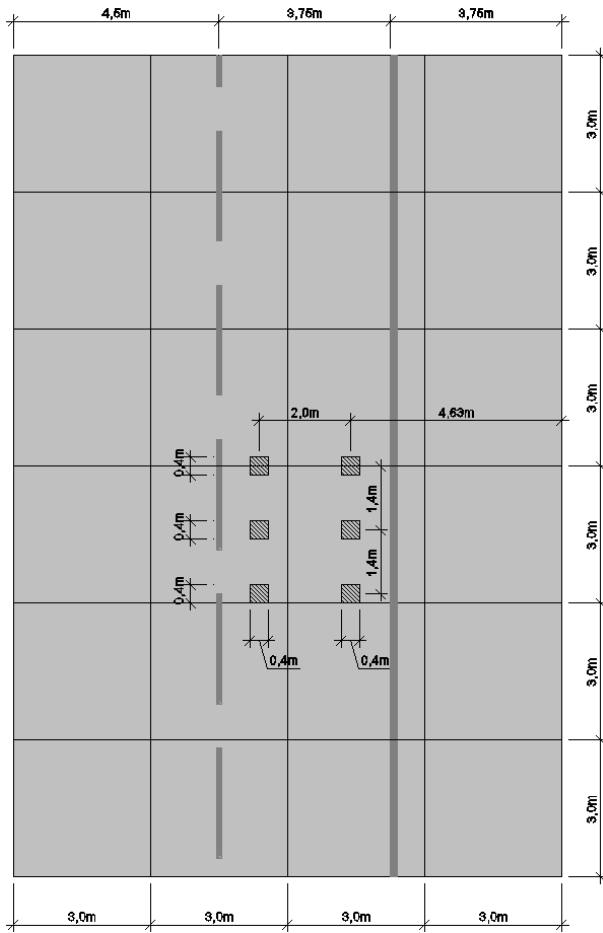


**Bild 4.32:** Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 1 (Ecke)

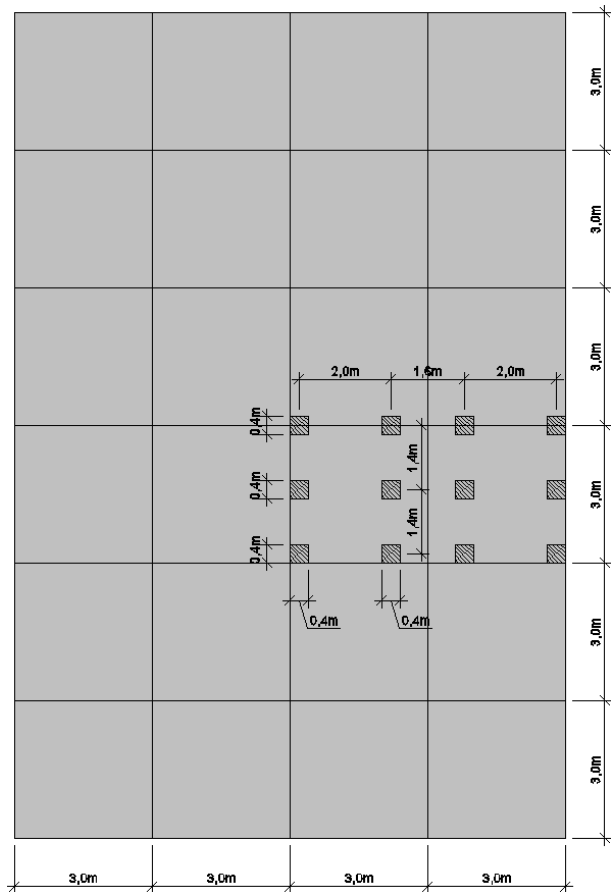


**Bild 4.33:** Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 2 (Mitte Längsfuge)





**Bild 4.34:** Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 3 (Mitte Fahrstreifen)



**Bild 4.35:** Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 4 (2 Fahrzeuge nebeneinander)

Die für die verschiedenen Berechnungsfälle ermittelten Spannungen und Verformungen sind in Tab. 4.7 bis Tab. 4.10 zusammengestellt.

Last- stellung	Platten- länge	Platten- breite	positiver Temperaturgradient / h=28 cm				
			maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
			Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
[MPa]	[mm]						
	[m]	[m]					
Ecke	5,00	6,00	2,02	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,77	Mitte Platte
	6,00		2,07	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,82	Mitte Platte
Mitte Längsfuge	5,00		2,18	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,77	Mitte Platte
	6,00		2,33	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,82	Mitte Platte
Mitte Quer- fuge	5,00		2,07	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,77	Mitte Platte
	6,00		2,23	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,82	Mitte Platte
Mitte Fahr- streifen	5,00		1,56	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,77	Mitte Platte
	6,00		1,76	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,82	Mitte Platte
Zwei Fahr- zeuge	5,00		2,05	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,77	Mitte Platte
	6,00		2,28	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,82	Mitte Platte
<hr/>							
Ecke	5,00	5,60	1,95	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,76	Mitte Platte
	6,00		1,99	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,81	Mitte Platte
Mitte längsfuge	5,00		2,10	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,76	Mitte Platte
	6,00		2,22	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,81	Mitte Platte
Mitte Quer- fuge	5,00		1,96	Unterseite unter Rad	y-Rtg.	0,76	Mitte Platte
	6,00		2,24	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,81	Mitte Platte
Mitte Fahr- streifen	5,00		1,50	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,76	Mitte Platte
	6,00		1,72	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,81	Mitte Platte
Zwei Fahr- zeuge	5,00		2,10	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,76	Mitte Platte
	6,00		2,33	Unterseite unter Rad	x-Rtg.	0,81	Mitte Platte

Tab. 4.7: Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient)

Laststellung	Plattenlänge	Plattenbreite	negativer Temperaturgradient / h=28 cm				
			maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
			Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
			[MPa]			[mm]	
[m]	[m]	[MPa]			[mm]		
Ecke	5,00	6,00	4,08	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,87	Ecke
	6,00		4,29	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	3,26	Ecke
Mitte Längsfuge	5,00		4,04	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,87	Ecke
	6,00		4,18	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	3,26	Ecke
Mitte Querruge	5,00		4,15	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,87	Ecke
	6,00		4,33	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	3,26	Ecke
Mitte Fahrstreifen	5,00		4,27	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,87	Ecke
	6,00		4,69	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	3,26	Ecke
Zwei Fahrzeuge	5,00		5,10	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,87	Ecke
	6,00		5,17	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	3,26	Ecke
<hr/>							
Ecke	5,00	5,60	3,83	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	2,68	Ecke
	6,00		4,22	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	3,06	Ecke
Mitte Längsfuge	5,00		3,72	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,68	Ecke
	6,00		3,91	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	3,06	Ecke
Mitte Querruge	5,00		3,94	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,68	Ecke
	6,00		4,24	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	3,06	Ecke
Mitte Fahrstreifen	5,00		4,01	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,68	Ecke
	6,00		4,27	Oberseite Plattenmitte	x-Rtg.	3,06	Ecke
Zwei Fahrzeuge	5,00		4,78	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	2,68	Ecke
	6,00		4,86	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	3,06	Ecke

Tab. 4.8: Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)

Wie zu erwarten war, trat die maximale Spannung bei positivem Temperaturgradienten immer an der Plattenunterseite unter einem Rad auf. Ebenso lag die maximale Spannung bei negativem Temperaturgradienten an der Oberseite in Plattenmitte. Die auftretenden Spannungen sind bei negativem Temperaturgradienten deutlich größer (etwa Faktor 2). Die Verformungen sind bei negativem Temperaturgradienten dreibis viermal so groß im Vergleich zu Berechnungen mit positivem Temperaturgradienten.

Laststellung	Plattenlänge	Plattenbreite	positiver Temperaturgradient / h=28 cm				
			maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	[m]	[m]	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
			[MPa]			[mm]	
Ecke	3,0	3,00	0,55	Unterseite, unter Rad	y-Rtg.	0,35	Mitte Platte
Mitte Längsfuge			0,61	Unterseite, unter Rad	y-Rtg.	0,35	Mitte Platte
Mitte Fahrstreifen			0,84	Unterseite, unter Rad	y-Rtg.	0,35	Mitte Platte
Zwei Fahrzeuge			0,95	Plattenrand, unteres Drittel	y-Rtg.	0,35	Mitte Platte

Tab. 4.9: Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient) bei kleinen Platten

Laststellung	Plattenlänge	Plattenbreite	negativer Temperaturgradient / h=28 cm				
			maxPS1			maxD3 (ohne Radlasten)	
	[m]	[m]	Betrag	Stelle	Richtung	Betrag	Stelle
			[MPa]			[mm]	
Ecke	3,0	3,00	2,95	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	0,96	Ecke
Mitte Längsfuge			2,92	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	0,96	Ecke
Mitte Fahrstreifen			2,53	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	0,96	Ecke
Zwei Fahrzeuge			3,01	Oberseite Plattenmitte	y-Rtg.	0,96	Ecke

Tab. 4.10: Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient) bei kleinen Platten

Um die verschiedenen Plattengeometrien in ihrem mechanischen Verhalten vergleichen zu können, wurden in einem ersten Schritt die für jede Plattengeometrie ermittelten Höchstwerte für die Spannung und Vertikalverformung gegenübergestellt. Dabei wurde auch die jeweils erforderliche Dickendifferenz berechnet, welche theoretisch dazu führen würde, dass die Spannungsdifferenz zwischen den verglichenen Fällen ausgeglichen wird. Es handelt sich hierbei aber lediglich um eine einfache Abschätzung und keine vollständige Dimensionierung. Die Formeln ergeben sich aus der elementaren Biegelehre.

Nimmt man vereinfachend an, dass die Spannung proportional zum Biegemoment ist, dann gilt allgemein:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{M_1}{M_2} = k \quad (4-1)$$

$\sigma_1$  – Spannung im Berechnungsfall 1

$\sigma_2$  – Spannung im Berechnungsfall 2

$M_1$  – Biegemoment im Berechnungsfall 1

$M_2$  – Biegemoment im Berechnungsfall 2

Die Biegespannung kann für einen Rechteckquerschnitt berechnet werden mit:

$$\sigma = \frac{6 \cdot M}{h^2 \cdot b} \quad (4-2)$$

h – Querschnittshöhe (Plattendicke)

b- betrachtete Querschnittsbreite

Gesucht ist die neue Deckendicke  $h_{neu}$  für die gilt:

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot M_2}{h_{neu}^2 \cdot b} \quad (4-3)$$

$h_{neu}$  - Querschnittshöhe (Plattendicke), welche erforderlich wäre um bei erhöhtem Biegemoment die Spannung konstant zu halten

Unter Verwendung von 4-1 und 4-2 ergibt sich:

$$k \cdot \frac{6 \cdot M_2}{h_1^2 \cdot b} = \frac{6 \cdot M_2}{h_{neu}^2 \cdot b} \quad (4-4)$$

$$k \cdot \frac{1}{h_1^2} = \frac{1}{h_{neu}^2} \quad (4-5)$$

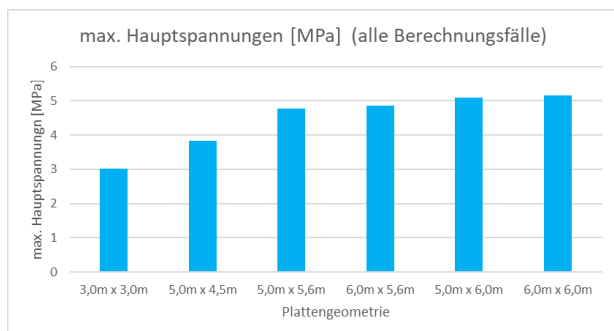
$$h_{neu} = h_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (4-6)$$

In Tab. 4.11 sind die berechneten Werte zusammengestellt. Ausgewiesen sind auch die Vergleichswerte für die Standardbauweise (5,0 m x 4,5 m, siehe Abschnitt 3.6.3).

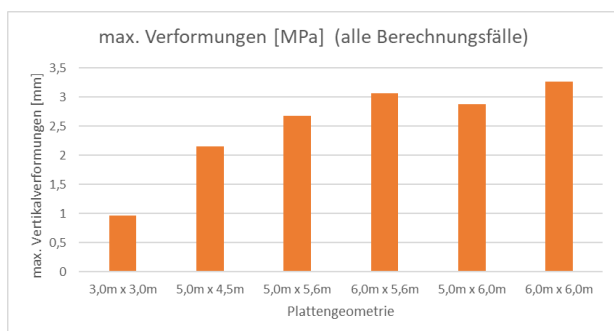
Platten- geometrie (L X B)	positiver/ negativer Temperaturgradient / h=28 cm				
	Betrag	maxPS1 (alle Lastfälle)		Betrag	rel. Erhöhung gegenüber Standardfall
		Spannung	Deckendicke		
[m]	[MPa]			[mm]	
3,0 m x 3,0 m	3,01	-21,61%	-11,46%	0,96	-55,35%
5,0 m x 4,5 m	3,84	0,00%	0,00%	2,15	0,00%
5,0 m x 5,6 m	4,78	24,48%	11,57%	2,68	24,65%
6,0 m x 5,6 m	4,86	26,56%	12,50%	3,06	42,33%
5,0 m x 6,0 m	5,10	32,81%	15,24%	2,87	33,49%
6,0 m x 6,0 m	5,17	34,64%	16,03%	3,26	51,63%

Tab. 4.11: Maximale Spannungen und Verformungen für alle Berechnungsfälle

Bild 4.36 und Bild 4.37 visualisieren die Ergebnisse noch einmal.



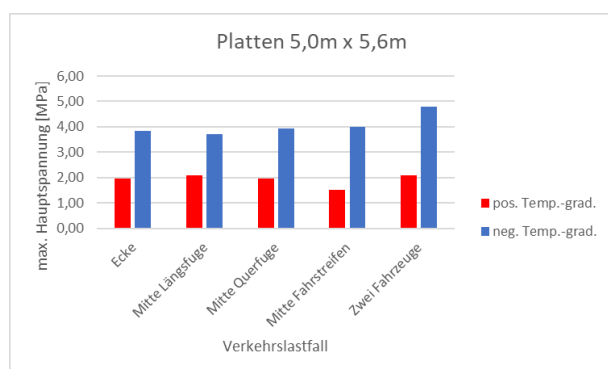
**Bild 4.36:** max. Hauptspannungen für alle Berechnungsfälle (h=28 cm)



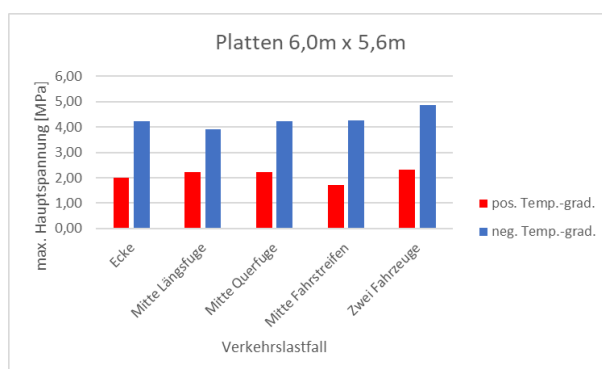
**Bild 4.37:** max. Vertikalverformungen für alle Berechnungsfälle (h=28 cm)

Die Bilder zeigen eindrucksvoll wie vorteilhaft die Benutzung kleiner Platten ist. Sowohl die Spannungen, wie auch die Verformungen sind bei Platten mit einem Grundriss von 3 m x 3 m wesentlich geringer als bei allen anderen untersuchten Geometrien. Auch die bisherige Standardgeometrie ist deutlich günstiger als die größeren Platten.

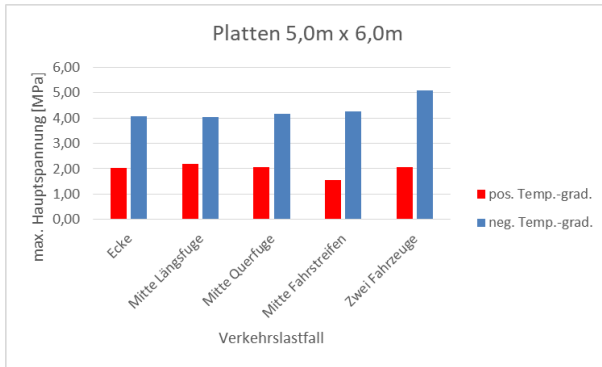
Von besonderem Interesse ist der Verkehrslastfall „Mitte Fahrstreifen“. Weil zu erwarten ist, dass diese Laststellung am häufigsten auftritt, ist eine besondere Relevanz für den Ermüdungsnachweis gegeben. Bild 4.38 bis Bild 4.41 zeigen, wie sich die maximalen Hauptspannungen für diesen Verkehrslastfall im Vergleich mit den anderen Verkehrslastfällen darstellen.



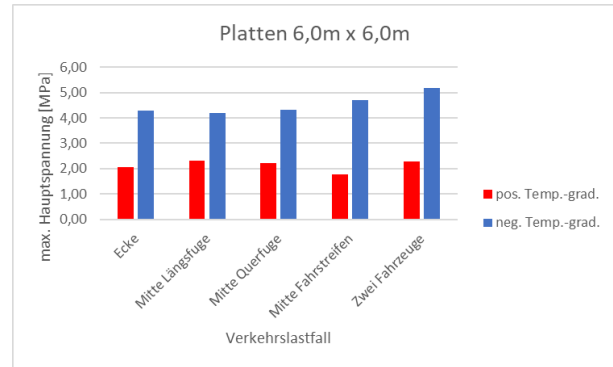
**Bild 4.38:** max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 5,0 m Länge und 5,6 m Breite (h=28 cm)



**Bild 4.39:** max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 6,0 m Länge und 5,6 m Breite (h=28 cm)



**Bild 4.40:** max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten und 5,0 m Länge mit 6,0 m Breite (h=28 cm)



**Bild 4.41:** max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 6,0 m Länge und 6,0 m Breite (h=28 cm)

Die Diagramme zeigen, dass der Verkehrslastfall „Mitte Fahrstreifen“ bei jeder der untersuchten Plattengeometrien für Temperaturzustände mit positivem Gradienten die kleinste Spannung liefert.

Für Temperaturzustände mit negativem Gradienten liefert der Verkehrslastfall „Zwei Fahrzeuge“ immer die größten Spannungen. Alle anderen Verkehrslastfälle erzeugen jeweils etwa gleich große Spannungen. Eine Ausnahme bildet die Plattengeometrie 6,0 m x 6,0 m, wo der besonders relevante Fall „Mitte Fahrstreifen“ die zweitgrößte Spannung liefert.

Der Vergleich zeigt, dass im Hinblick auf die relative Größe der Spannungen im Verkehrslastfall „Mitte Fahrstreifen“ keine der untersuchten Plattengeometrien eindeutig zu präferieren ist. Lediglich die Geometrie 6,0 m x 6,0 m erscheint etwas nachteilig. Der Unterschied zu den anderen Plattengeometrien ist diesbezüglich aber eher klein.

#### Vergleich der unterschiedlichen Plattenbreiten

Ein Vergleich der unterschiedlichen Plattenbreiten soll zeigen, welche Variante der großen Platten zu bevorzugen ist.

In Tab. 4.12 und Tab. 4.13 sind die Ergebniswerte für 5,6 m breite und 6,0 m breite Platten gegenübergestellt.

Laststellung	Plattenlänge	positiver Temperaturgradient / h=28 cm						
		maxPS1				maxD3		
		Plattenbreite		rel. Erhöhung bei breiter Platte		Plattenbreite		rel. Erhöhung
		5,6m	6,0m	Spannungen	Deckendicke	5,6m	6,0m	Verformung
	[m]	[MPa]	[MPa]			[mm]	[mm]	
Ecke	5,00	1,95	2,02	3,59%	1,78%	0,76	0,77	1,32%
	6,00	1,99	2,07	4,02%	1,99%	0,81	0,82	1,23%
Mitte Längsfuge	5,00	2,10	2,18	3,81%	1,89%	0,76	0,77	1,32%
	6,00	2,22	2,33	4,95%	2,45%	0,81	0,82	1,23%
Mitte Querfuge	5,00	1,96	2,07	5,61%	2,77%	0,76	0,77	1,32%
	6,00	2,24	2,23	-0,45%	-0,22%	0,81	0,82	1,23%
Mitte Fahrstreifen	5,00	1,50	1,56	4,00%	1,98%	0,76	0,77	1,32%
	6,00	1,72	1,76	2,33%	1,16%	0,81	0,82	1,23%
Zwei Fahrzeuge	5,00	2,10	2,05	-2,38%	-1,20%	0,76	0,77	1,32%
	6,00	2,33	2,28	-2,15%	-1,08%	0,81	0,82	1,23%

Tab. 4.12: Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenbreiten für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient)

Laststellung	Plattenlänge	negativer Temperaturgradient / h=28 cm						
		maxPS1				maxD3		
		Plattenbreite		rel. Erhöhung bei breiter Platte		Plattenbreite		rel. Erhöhung
		5,6m	6,0m	Spannungen	Deckendicke	5,6m	6,0m	Verformung
	[m]	[MPa]	[MPa]			[mm]	[mm]	
Ecke	5,00	3,83	4,08	6,53%	3,21%	2,68	2,87	7,09%
	6,00	4,22	4,29	1,66%	0,83%	3,06	3,26	6,54%
Mitte Längsfuge	5,00	3,72	4,04	8,60%	4,21%	2,68	2,87	7,09%
	6,00	3,91	4,18	6,91%	3,40%	3,06	3,26	6,54%
Mitte Querfuge	5,00	3,94	4,15	5,33%	2,63%	2,68	2,87	7,09%
	6,00	4,24	4,33	2,12%	1,06%	3,06	3,26	6,54%
Mitte Fahrstreifen	5,00	4,01	4,27	6,48%	3,19%	2,68	2,87	7,09%
	6,00	4,27	4,69	9,84%	4,80%	3,06	3,26	6,54%
Zwei Fahrzeuge	5,00	4,78	5,10	6,69%	3,29%	2,68	2,87	7,09%
	6,00	4,86	5,17	6,38%	3,14%	3,06	3,26	6,54%

Tab. 4.13: Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenbreiten für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)

Die in den Tabellen angegebenen Werte zeigen, dass die Erhöhung der Plattenbreite relevante Auswirkungen auf die Spannungen in der Betonplatte hat. Dabei sind die Auswirkungen bei Temperaturzuständen mit negativem Gradienten höher als bei positiven Gradienten. Die Spannungserhöhung kann bis zu ca. 10 % betragen. Um dies auszugleichen, müsste die Deckendicke um ca. 5 % erhöht werden. Das entspricht bei üblichen Deckendicken einer Erhöhung um ca. 1,0 cm.

Die Vertikalverformung ändert sich im Fall der Aufwölbung (positiver Temperaturgradient) nur marginal. Im Fall einer Aufschüsselung (negativer Temperaturgradient) sind die Verformungen bei 6 m breiten Platten dagegen deutlich größer als bei 5,6 m breiten Platten. Die Unterschiede liegen im Bereich von 6 bis 7 %.



Den dargestellten Ergebnissen folgend wäre die schmalere Platte (5,6 m Breite) zu bevorzugen. Es ist aber zu beachten, dass diese Platte immer mit einer entsprechend breiteren Platte (6,4 m Breite) auf der Seite des Überholfahrstreifens kombiniert werden muss. Für diese breitere Platte ergeben sich entsprechend größere Spannungs- und Verformungswerte.

#### Vergleich der unterschiedlichen Plattenlängen

Von baupraktischer Bedeutung ist ebenfalls ein Vergleich der Werte, welche für die unterschiedlichen Plattenlängen der großen Platten berechnet wurden. Die Gegenüberstellung der Spannungs- und Verformungswerte für die unterschiedlichen Plattenlängen ist in Tab. 4.14 und Tab. 4.15 aufgeführt.

Last- stellung	Plat- ten- breite	positiver Temperaturgradient / h=28 cm						
		maxPS1				maxD3		
		Plattenlänge		rel. Erhöhung bei langer Platte		Plattenlänge		
		5,0m	6,0m	Spannungen	Deckendicke	5,0m	6,0m	rel. Erhöhung
[m]	[MPa]	[MPa]			[mm]	[mm]	Verformung	
Ecke	5,60	1,95	1,99	2,05%	1,02%	0,76	0,81	6,58%
	6,00	2,02	2,07	2,48%	1,23%	0,77	0,82	6,49%
Mitte Längsfuge	5,60	2,10	2,22	5,71%	2,82%	0,76	0,81	6,58%
	6,00	2,18	2,33	6,88%	3,38%	0,77	0,82	6,49%
Mitte Querfuge	5,60	1,96	2,24	14,29%	6,90%	0,76	0,81	6,58%
	6,00	2,07	2,23	7,73%	3,79%	0,77	0,82	6,49%
Mitte Fahr- Streifen	5,60	1,50	1,72	14,67%	7,08%	0,76	0,81	6,58%
	6,00	1,56	1,76	12,82%	6,22%	0,77	0,82	6,49%
Zwei Fahr- zeuge	5,60	2,10	2,33	10,95%	5,33%	0,76	0,81	6,58%
	6,00	2,05	2,28	11,22%	5,46%	0,77	0,82	6,49%

**Tab. 4.14:** Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenlängen für den Temperaturlastfall 1 (negativer Gradient)

Last- stellung	Platten- breite	negativer Temperaturgradient / h=28 cm						
		maxPS1				maxD3		
		Plattenlänge		rel. Erhöhung bei langer Platte		Plattenlänge		rel. Erhöhung
		5,0m	6,0m	Spannungen	Deckendicke	5,0m	6,0m	Verformung
	[m]	[MPa]	[MPa]			[mm]	[mm]	
Ecke	5,60	3,83	4,22	10,18%	4,97%	2,68	3,06	14,18%
	6,00	4,08	4,29	5,15%	2,54%	2,87	3,26	13,59%
Mitte Längs- fuge	5,60	3,72	3,91	5,11%	2,52%	2,68	3,06	14,18%
	6,00	4,04	4,18	3,47%	1,72%	2,87	3,26	13,59%
Mitte Querfuge	5,60	3,94	4,24	7,61%	3,74%	2,68	3,06	14,18%
	6,00	4,15	4,33	4,34%	2,15%	2,87	3,26	13,59%
Mitte Fahrstrei- fen	5,60	4,01	4,27	6,48%	3,19%	2,68	3,06	14,18%
	6,00	4,27	4,69	9,84%	4,80%	2,87	3,26	13,59%
Zwei Fahr- zeuge	5,60	4,78	4,86	1,67%	0,83%	2,68	3,06	14,18%
	6,00	5,10	5,17	1,37%	0,68%	2,87	3,26	13,59%

**Tab. 4.15:** Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenlängen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)

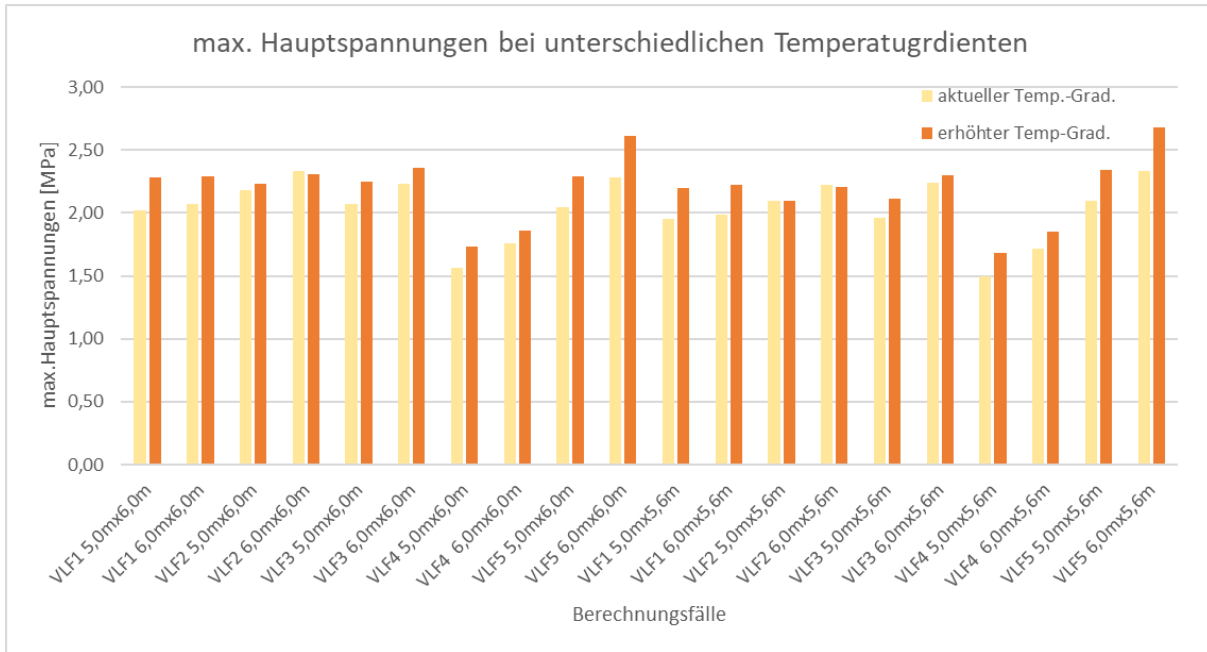
Für beide Temperaturlastfälle ist ein deutlicher Einfluss der Plattenlänge auf die maximalen Spannungen festzustellen. Die Erhöhung kann bis zu ca. 15 % betragen. Dies hat eine Erhöhung der erforderlichen Deckendicke um ca. 7 % zur Folge. Bei üblichen Deckendicke sind dies bis zu 2 cm.

Bezüglich der maximalen Vertikalverformungen ist zu konstatieren, dass durch eine Erhöhung der Plattenlänge von 5,0 m auf 6,0 m die Verformung um 6 bis 15 % ansteigt. Für den Fall der Aufschüsselung ergeben sich dabei die größeren Differenzen.

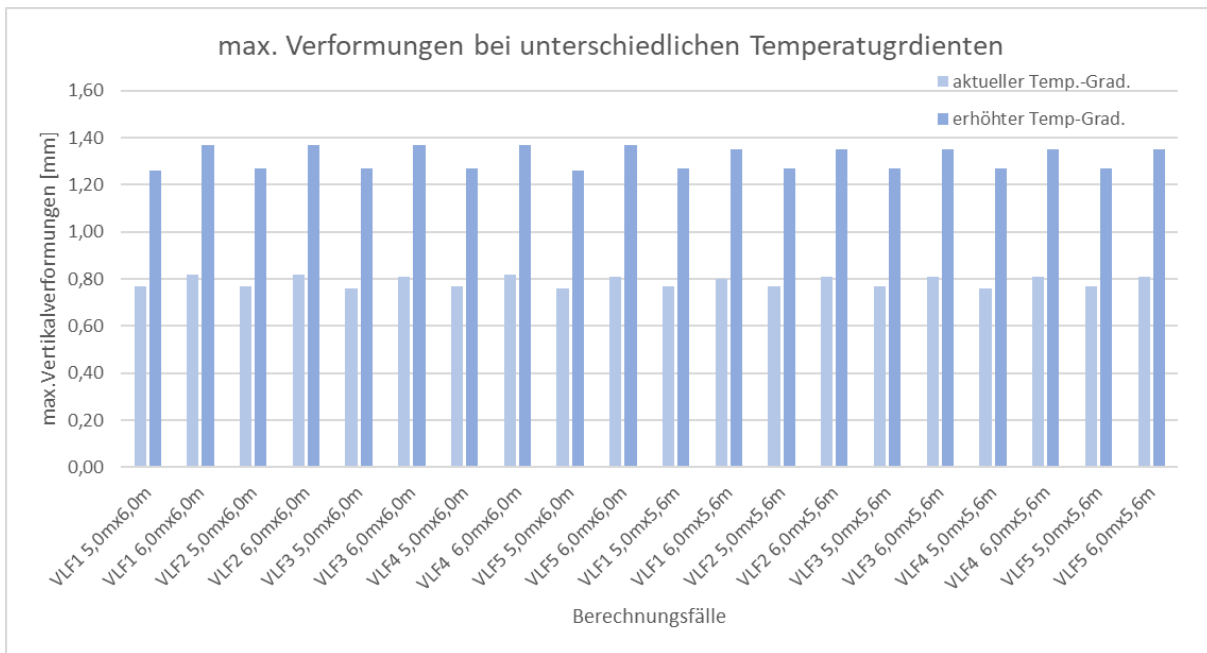
#### Wirkung eines erhöhten Temperaturgradienten

In Abschnitt 2.1.4 wurde eine Erhöhung des maximalen jährlichen Temperaturgradienten von 10 K/m prognostiziert. Um die zu erwartenden Konsequenzen für die Spannungen und Verformungen an Betonfahrbahnen abzuschätzen, wurden sämtliche Berechnungsfälle mit positivem Temperaturgradienten noch einmal mit einem entsprechend erhöhten Gradienten berechnet.

Bild 4.42 und Bild 4.43 zeigen die Gegenüberstellung der Ergebnisse.



**Bild 4.42:** Vergleich der max. Hauptspannungen bei Ansatz des aktuellen und des erhöhten Temperaturgradienten (VLF1 – Ecke, VLF 2 – Mitte Längsfuge, VLF 3 – Mitte Querfuge, VLF 4 – Mitte Fahrstreifen, VLF 5 – 2 Fahrzeuge) (h=28 cm)



**Bild 4.43:** Vergleich der max. Vertikalverformungen bei Ansatz des aktuellen und des erhöhten Temperaturgradienten (VLF1 – Ecke, VLF 2 – Mitte Längsfuge, VLF 3 – Mitte Querfuge, VLF 4 – Mitte Fahrstreifen, VLF 5 – 2 Fahrzeuge) (h=28 cm)

Es wird deutlich, dass die prognostizierte Erhöhung des Temperaturgradienten zu Spannungserhöhungen von bis zu ca. 15 % führen kann. Dabei ist aber zu beachten, dass es sich hierbei um maximale Gradienten handelt. Der zumeist maßgebende Ermüdungsnachweis wird aber mit einem mittleren Gradienten geführt, welcher sich wahrscheinlich nicht in gleichem Maße ändert. Die dargestellten Ergebnisse lassen also nicht den Schluss zu, dass generell deutlich größere Deckendicken notwendig werden. Es ist aber damit zu rechnen, dass bei Eintritt der Prognose der Nachweis gegen extreme Belastung häufiger maßgebend für die Dimensionierung wird.

Bezüglich der maximalen Verformungen ist eine sehr große Wirkung des erhöhten Temperaturgradienten zu verzeichnen. Die Verformungswerte steigen um bis zu ca. 70 %. Auch hier ist aber zu beachten, dass es sich um selten auftretende Extremwerte handelt.

### Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die Plattengeometrie einen sehr großen Einfluss auf die maximalen Spannungen und Verformungen der Betonplatten hat. Der Verzicht auf eine Längsfuge und die damit verbundenen größeren Plattenabmessungen führen zwangsläufig zu höheren Spannungen und Verformungen. Die erhöhten Spannungswerte können durch eine größere Plattendicke ausgeglichen werden. Für die erhöhten Verformungen gilt dies nicht.

In Bezug auf das mechanische Verhalten der Betonplatten ist es zu empfehlen, möglichst kleine Platten zu verwenden. Diese Erkenntnis wird auch gestützt durch empirische Belege aus der Praxis (siehe [DARTER 2018]).

Als besonders günstig erweist es sich, die Platten jeweils durch zwei weitere Fugen in Längs- und Quer- richtung zu unterteilen. Die so entstehenden kleinen Geometrien erzeugen im Vergleich zu den großen Platten nur einen Bruchteil der Spannungs- und Verformungswerte.

## **4.2.2 Fugenkonstruktionen**

Fugen werden hergestellt, um ein unkontrolliertes Reißen des Betons zu verhindern. Um die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn zu sichern und gute Gebrauchseigenschaften zu erreichen, sind folgende Anforderungen an die Fugenkonstruktion zu stellen:

- (1) Die Fuge muss dicht sein gegen eindringendes Oberflächenwasser.
- (2) Die (Quer-)Fuge muss eine möglichst zwängungsfreie Längenschumpfung der Platten ermöglichen.
- (3) Die Fugenkonstruktion muss eine möglichst effiziente Übertragung von Querkräften zwischen den Platten ermöglichen.
- (4) Die Fugenkonstruktion muss so dauerhaft sein, wie die anderen Bestandteile der Fahrbahnkonstruktion.
- (5) Die Fuge sollte möglichst wartungsarm sein.

Die gegenwärtig praktizierte Regelbauweise mit Ankern und Dübeln (siehe Abschnitt 2.2.6 bzw. 3.6.7) erfüllt diese Anforderungen nur unzureichend. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit alternative Möglichkeiten der Fugenausbildung untersucht. Dabei wurden zwei Grundrichtungen verfolgt:

- Optimierung bereits erprobter Konstruktionen mit profilierter Fuge
- Entwicklung einer innovativen Fugenkonstruktion

### Profilierte Fugen

Das Funktionsprinzip der profilierten Fuge basiert darauf, durch eine abgestimmte Formgebung der Fugenflanken eine formschlüssige Verbindung zwischen den Platten herzustellen, welche die Kraftübertragung in vertikaler Richtung sicherstellt und gleichzeitig in horizontaler Richtung ausschließt. Die Anordnung von Dübeln kann damit entfallen. Da die Querkraftübertragung kontinuierlich über die Fugenlänge verteilt wird, werden auch Spannungsspitzen vermieden.

Eine effektive Herstellung der Fugenprofilierung ist durch das Einrütteln entsprechend geformter Fugenschwerter möglich. Bei Fertigteilen ist es möglich, die Fugenflanken bereits profiliert herzustellen und die Montagefuge mit einem geeigneten Material auszugießen. In beiden Fällen ist ein perfekter Formschluss erreichbar. Dies hat allerdings zur Folge, dass ein einwandfreies Öffnen der Fuge im Winter nur sichergestellt werden kann, wenn die Flanken der Profilierung leicht konisch hergestellt werden. Mit dieser Maßnahme geht aber theoretisch jegliche Querkraftübertragung verloren, sobald sich die Fuge öffnet.

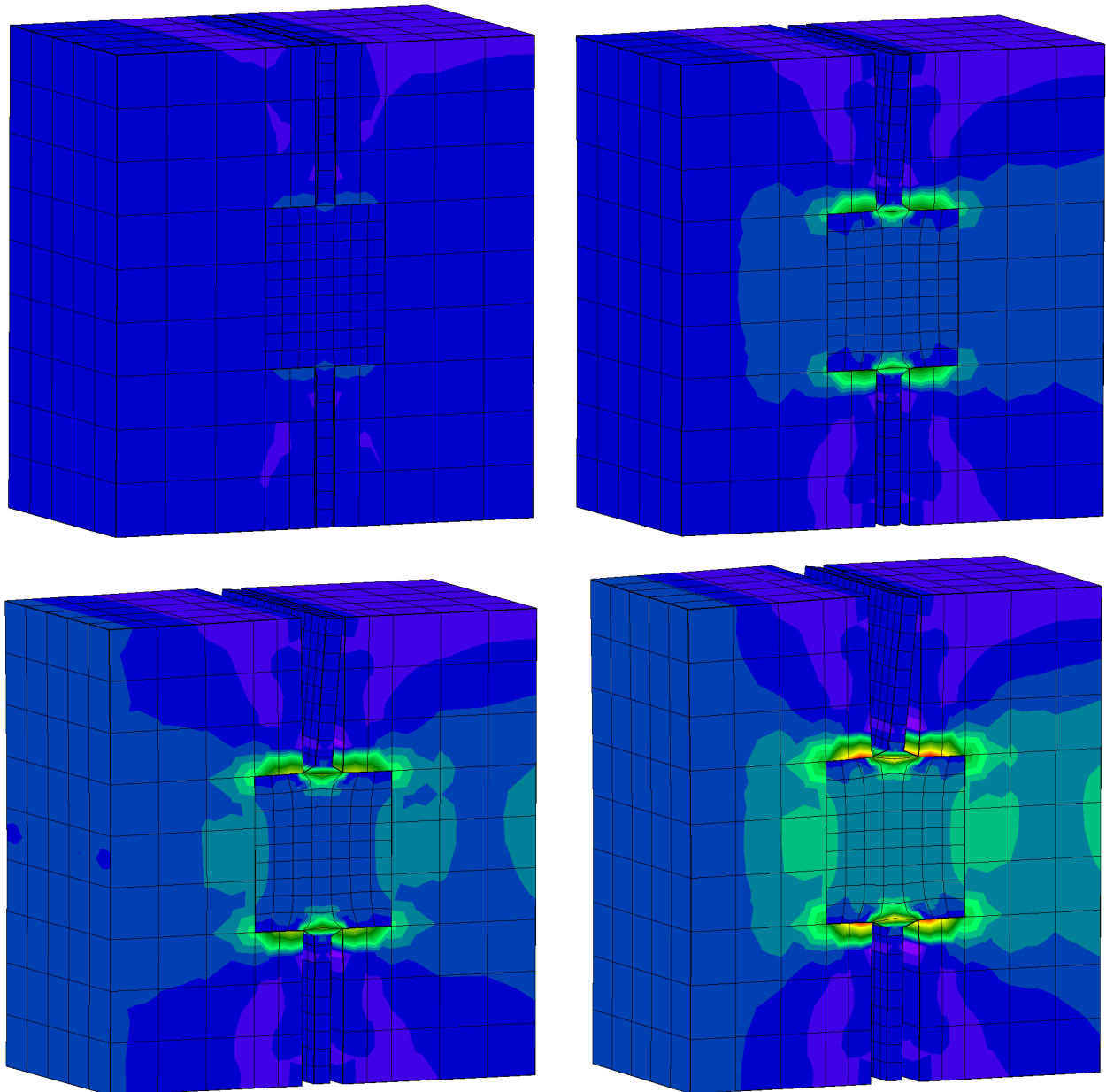
Um zu untersuchen, ob es dennoch möglich ist, eine funktionsfähige Konstruktion nach dem Prinzip der profilierten Fuge herzustellen, wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt.

Zunächst wurde der Fall einer perfekt horizontal ausgerichteten Profilierung analysiert. Für die Konstruktionsvariante Fugenschwert ist festzustellen, dass eine derartige Ausführung praktisch unmöglich ist. Allein der Vorgang des Einrüttelns wird in jedem Fall zu leichten Verkantungen und Verformungen führen, sodass die horizontale Ausrichtung der querkraftübertragenden Fugenflanken nicht mehr gegeben ist.

Bei der Fertigteilherstellung ist mit entsprechendem technologischem Aufwand eine hinreichende Genauigkeit aber möglicherweise realisierbar. Es ist aber zu erwarten, dass es nach dem Verpressen des Fugenspaltes zu einer innigen Verbindung zwischen dem Fertigteilbeton und dem Verpressmaterial kommt. Infolgedessen ist mit erheblichen Reibungs- und Adhäsionskräften in den horizontalen Kontaktflächen zu rechnen. Mit einer FEM-Berechnung wurde der Vorgang der Fugenöffnung und die Herausbildung der damit verbundenen Spannungszustände simuliert. Bild 4.44 zeigt die Spannungen in x-Richtung (Fahrtrichtung). Deutlich erkennbar ist, dass sich im Beton (rot) eine Spannungsspitze herausbildet. Die Zugspannungen können in diesem Bereich die Zugfestigkeit des Betons übersteigen. Auf einer Versuchsstrecke, welche mit einer entsprechenden Konstruktion hergestellt wurde, wurde auch bereits ein derartiger Schadensfall beobachtet. Ursächlich für die Spannungsspitze ist offenbar der deutliche Steifigkeitsunterschied zwischen Beton und Verpressmaterial. Am Beginn der Kontaktzone kommt es zu einem Abriss und im hinteren Bereich sind die Dehnungen von Beton und Verpressmaterial gleich. Hier ist das weiche Verpressmaterial also weitgehend spannungsfrei. Die Spannungsübertragung kann also nur in einem engbegrenzten Bereich stattfinden.

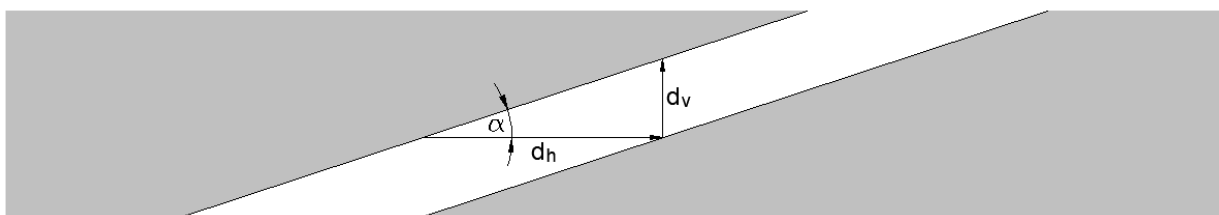
Wird für das Verpressmaterial ein höherer E-Modul (ähnlich dem Beton) angesetzt, so verschwindet die Spannungsspitze. Es wäre also wünschenswert, ein steiferes Verpressmaterial zu verwenden. Dies führt aber wieder zu anderen technischen und technologischen Problemen. Auch ist zu vermuten, dass ein Verpressmaterial mit betonähnlicher Steifigkeit schon bei kleinsten Unebenheiten in den horizontalen Fugenflanken zu einer Blockade der Fugen führen würde.

Es ist damit festzustellen, dass eine zuverlässige Gewährleistung der erwünschten Fugenbeweglichkeit mit horizontalen Fugenflanken kaum realisierbar ist.



**Bild 4.44:** Entwicklung der Horizontalspannungen durch Reibung an den Fugenflanken im Verlauf der Fugenöffnung

Für den Fall der konischen Ausbildung der Fugenprofilierung ist festzustellen, dass theoretisch schon bei der kleinsten Fugenöffnung der Kontakt zwischen den Platten verloren geht. Bild 4.45 zeigt den geometrischen Zusammenhang.



**Bild 4.45:** Spaltbreiten bei Öffnung einer konischen Fuge

Für den vertikalen Fugenspalt gilt offensichtlich:

$$d_v = d_h \cdot \tan(\alpha)$$

(4-7)

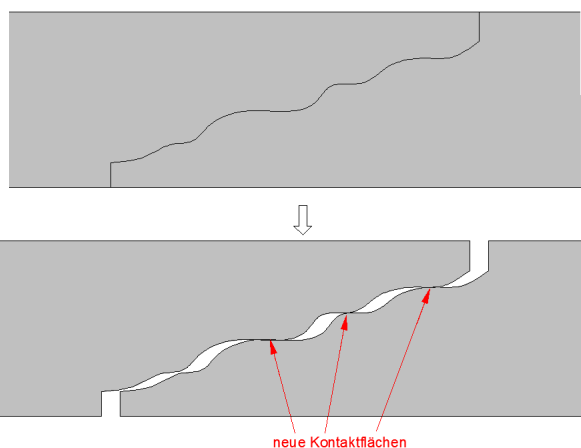
In den Wintermonaten ist mit einer maximalen Fugenöffnungsweite von 1 mm zu rechnen. In Abhängigkeit von der Neigung der Fugenflanke ergeben sich damit die in Tab. 4.16 angegebenen Vertikalspaltmaße.

Neigung der Fugenflanke	Vertikaler Fugenspalt
[°]	[mm]
1	0,017
2	0,035
3	0,052
4	0,07
5	0,087
6	0,105
7	0,123
8	0,14
9	0,158
10	0,176

**Tab. 4.16:** Größe des Vertikalspaltes in Abhängigkeit von der Neigung der Fugenflanke

Aus FWD-Messungen ist bekannt, dass auch bei verdübelten Fugen mit gutem Wirksamkeitsindex die Deflexionsdifferenz zwischen den Fugenflanken mehrere 1/100 mm beträgt. Bei offenem Fugenspalt besteht zunächst keinerlei Kontakt zwischen den benachbarten Plattenrändern. Es wäre also mit einer deutlich größeren Deflexionsdifferenz zu rechnen. Dies bedeutet, dass zumindest bei kleinen Fugenneigungen (unter 5°) sich bei entsprechender Belastung der vertikale Fugenspalt schließen würde. Eine gewisse, wenn auch geminderte Querkraftübertragung wäre also noch gegeben.

Weiter ist zu beachten, dass die Fugenflanken niemals perfekt eben sind. Eine Horizontalbewegung führt damit prinzipiell zu einem Öffnen der Fugenspalte in horizontaler, wie auch in vertikaler Richtung. Die Unebenheiten in den Fugenflanken führen aber dazu, dass sich nach der Verschiebung neue Kontaktflächen herausbilden (siehe Bild 4.46).



**Bild 4.46:** Bildung neuer Kontaktflächen infolge von Unebenheiten an den Fugenflanken

Es ist also damit zu rechnen, dass bei einer geringen Flankenneigung immer ein Restkontakt zwischen den Fugenflanken erhalten bleibt. Andererseits behindert dieser Kontakt auch die Horizontalbewegung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Herstellung perfekt horizontaler Fugenflanken kaum realisierbar ist und zum Blockieren der Fugenöffnung führen kann. Eine konische Ausbildung ist deshalb zu befürworten. Diese führt bei einer kleinen Neigung der Fugenflanken nicht dazu, dass die Querkraftübertragung bei der Öffnung der Fuge sofort komplett ausfällt.

Der Neigungswinkel der Fugenflanken sollte optimiert werden. Bei einer zu kleinen Neigung wird die Fugenöffnung zu stark behindert, durch zu große Neigungen wird die Wirksamkeit der Querkraftübertragung

beeinträchtigt. Das Optimum wird nur durch praktische Versuche zu ermitteln sein. Vom theoretischen Standpunkt her, können ca. 5° Neigung als ein wahrscheinlich günstiger Wert gelten.

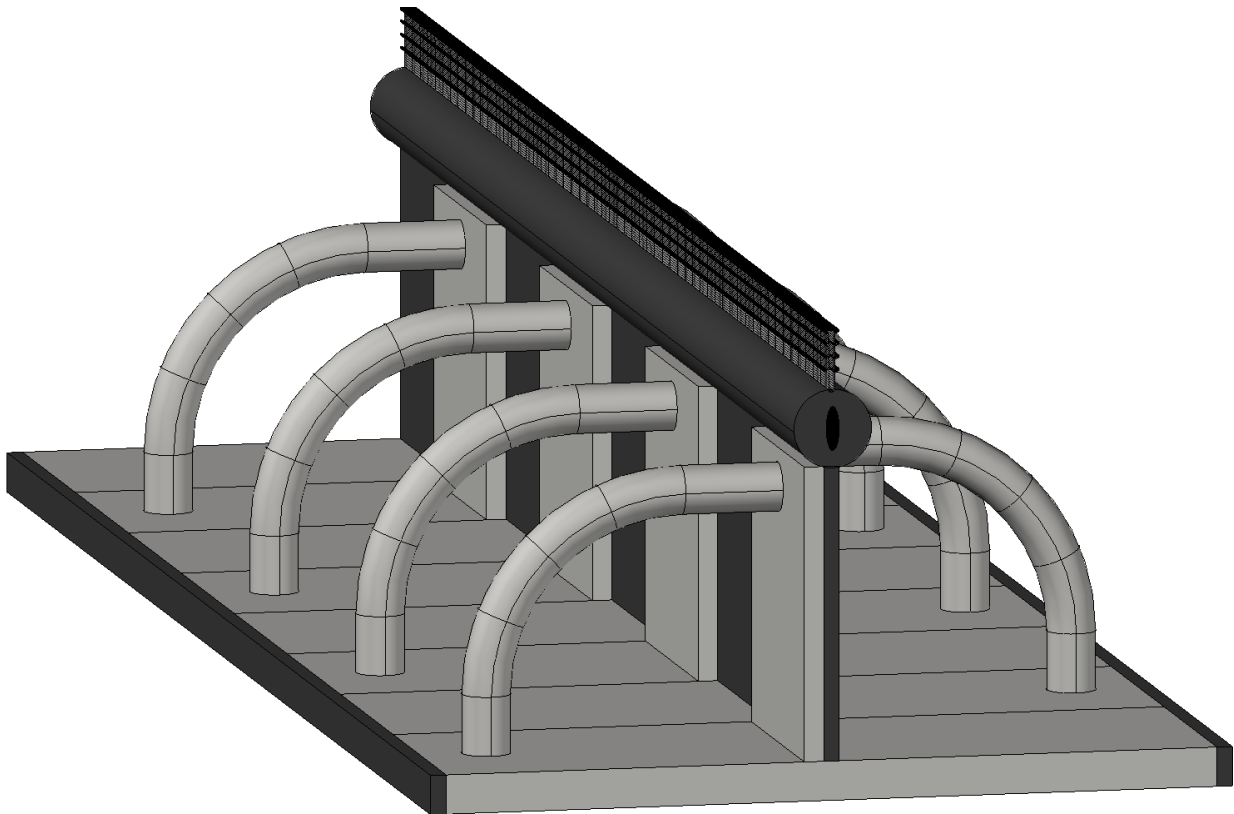
Die Konstruktionsvariante mit eingerütteltem Fugenschwert wurde bereits in der DDR zur Anwendungsreife entwickelt (siehe [WEINGART 2017]). Es liegen also Langzeiterfahrungen vor. Diese sind im Allgemeinen positiv, beziehen sich aber ausnahmslos auf Strecken außerhalb des Autobahnnetzes. Eine Versuchsstrecke auf der BAB A9 zeigte dagegen schon nach wenigen Jahren deutliche Verschleißerscheinungen. In [WEINGART 2017] ist angegeben, dass sich hier der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung auf unter 50 % reduzierte. Das Material des Fugenschwertes (Kunststoff) wurde teilweise zerrieben. Die Erosion der Fugenschwerte und auch der durch die Formgebung entstandenen Betondübel (Konsolen) wird offenbar durch mineralische Körner innerhalb der Fuge begünstigt. Diese können leicht eindringen, weil der Beton über dem Fugenschwert reißt und der so entstandene Riss unverschlossen verbleibt. Diese technologisch vorteilhafte Lösung ist offenbar bei hoher Verkehrsbelastung nicht als dauerhaft anzusehen. Bei einer Weiterentwicklung der Bauweise mit Fugenschwert sollte eine Fugenabdichtung vorgesehen werden. Außerdem sollte getestet werden, ob das Fugenschwert aus Metall herstellbar ist.

Die Fertigteilm Bauweise mit profilierter und verpresster Fuge wurde in Deutschland erst in den letzten Jahren entwickelt. Dementsprechend liegen noch keine Langzeiterfahrungen vor. Es wird aber, allein auf der Basis der oben dargestellten theoretischen Überlegungen empfohlen, die Fugenprofilierung leicht konisch auszuführen.

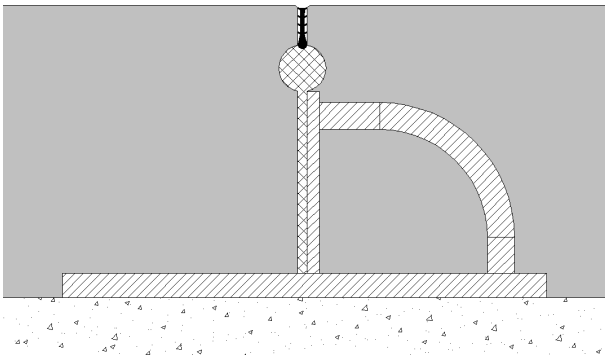
### Neue Fugenkonstruktion

Um den eingangs formulierten Anforderungen gerecht zu werden, wurde eine völlig neue Fugenkonstruktion entwickelt. Diese besteht im Wesentlichen aus einem Stahlbauteil und einer Kunststoffdichtung. Das Stahlbauteil wird durch zwei T-förmig verschweißte Flachstähle gebildet. Das Bauteil wird so angeordnet, dass unter beiden Platten ein horizontales Blech liegt und das angeschweißte Vertikalblech an einer Fugenflanke anliegt. Das Vertikalblech ist mit einem Dübel im Plattenbeton verankert (siehe Bild 4.48). Diese Stahlbauteile werden lückenlos über die gesamte Länge der Querfuge angeordnet. Dabei wechselt die Verankerung ständig von einer Platte zur anderen. Zwischen den Fugenflanken verbleibt ein Zwischenraum von 5 bis 10 mm. Dieser wird mit einem elastischen, weichen und volumenkompressiblen Kunststoffband ausgefüllt. Oberhalb der senkrechten Stahlplatten erweitert sich das Kunststoffband zu einer kreisförmigen Verdickung von ca. 5 cm Durchmesser. Dieser Teil der Dichtung muss nach dem Erhärten des Betons unter Druckspannung gesetzt werden. Damit ist gewährleistet, dass sich im Winter, bei einer temperaturbedingten Verkürzung der Platten die Fugendichtung nicht vom Beton ablöst. Das Aufbringen der Druckspannung kann entweder durch ein nachträgliches Verpressen eines vorbereiteten Hohlraumes oder durch das Eindrücken eines Formteiles von oben erfolgen. Bild Bild 4.47 zeigt die Konstruktion. Dargestellt ist auch ein Hohlraum für die Verpressung.





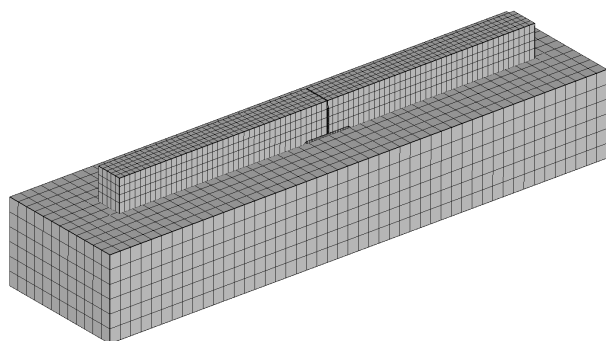
**Bild 4.47:** Neue Fugenkonstruktion



**Bild 4.48:** Neue Fugenkonstruktion, Darstellung der Konstruktion im Schnitt

Problematisch ist die Herstellung des Fugenschnittes. Auf den Fugenschnitt kann nicht verzichtet werden, weil andernfalls bei der sommerlichen Ausdehnung der Platten die gesamte Normalkraft aus der Platte über den schmalen verbliebenen Betonstreifen oberhalb der Dichtung übertragen werden müsste. Hitzeschäden wären unvermeidbar. Es ist evident, dass der Fugenschnitt sehr präzise ausgeführt werden müsste, weil die Dichtung exakt getroffen werden muss. Auch die Tiefe des Schnittes wäre genau zu dosieren. Im Bild 4.48 dargestellt ist ein vorgefertigtes Fugenprofil zum Verschließen des Fugenschnittes. Alternativ wäre auch ein Verguss denkbar.

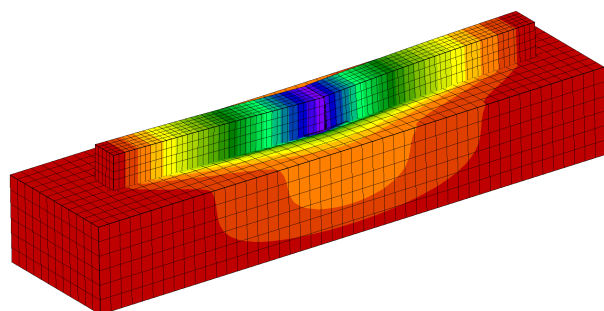
Es ist offensichtlich, dass die horizontale Stahlplatte eine hinreichende Steifigkeit haben muss, um eine wirksame Querkraftübertragung sicherzustellen. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde die notwendige Mindestdicke ermittelt. Bild 4.49 zeigt das verwendete Berechnungsmodell.



**Bild 4.49:** FEM-Volumenmodell zur Simulation der Querkraftübertragung

Um die erforderliche Detailliertheit des Modells realisieren zu können, wurde nicht eine gesamte Platte, sondern nur ein Plattenstreifen mit einem Stahlbauteil modelliert. Die Breite beträgt 12,5 cm. Als Belastung wurde auf der linken Plattenseite eine Last von 12 kN angesetzt (vergleiche Abschnitt 3.6.7).

Bild 4.50 zeigt das unter der Lasteinwirkung verformte Modell.



**Bild 4.50:** verformtes FEM-Modell

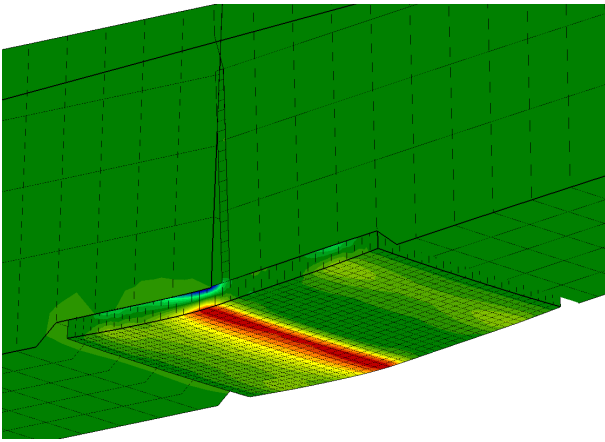
Deutlich erkennbar ist, dass auch der rechte Plattenstreifen nach unten gezogen wird. In Tab. 4.17 sind die für verschiedenen Blechdicken ermittelten Wirksamkeitsindices zusammengestellt. Außerdem wurde jeweils die maximale Stahlspannung ermittelt um zu kontrollieren ob die Biegespannung ohne plastische Verformungen aufgenommen wird.

Dicke Horizontalplatte [mm]	max. Biegespannung im Stahl [MPa]	Wirksamkeitsindex
2	60,1	0,88
4	32,9	0,93
6	18,5	0,95
8	11,1	0,95
10	9,55	0,96
12	8,6	0,96
14	7,9	0,96
16	7,52	0,96
18	7,2	0,96
20	6,9	0,96

**Tab. 4.17:** Wirksamkeitsindex und Stahlspannung für unterschiedliche Blechdicken

Wie zu erwarten, ist mit geringen Blechdicken keine hinreichende Wirksamkeit der Querkraftübertragung erreichbar. Mit zunehmender Blechdicke steigt der Wirksamkeitsindex aber an und nähert sich asymptotisch einem Wert von 1. Auf Basis der ermittelten Werte kann angenommen werden, dass eine Blechdicke

von 12 mm ausreichend ist. Die Biegespannungen werden in jedem Fall sicher vom Stahl aufgenommen. (zulässig 240 MPa). Bild 4.51 zeigt die berechneten Biegespannungen im Stahl.



**Bild 4.51:** Biegespannungen im horizontalen Blech

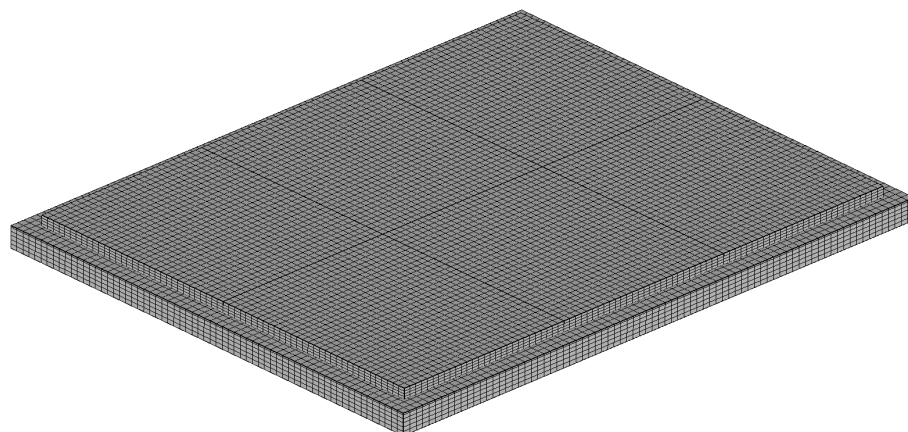
Mit der neuen Konstruktion lassen sich alle eingangs formulierten Anforderungen an die Fuge erfüllen. Hervorzuheben ist, dass die Platte sich nicht mehr temperaturbedingt verschieben kann und somit immer an derselben Stelle verharrt. Dies sollte positive Auswirkungen auf die Langzeitbeständigkeit der Lagerungsbedingungen haben. Hitzeschäden sind systembedingt ausgeschlossen. Auch auf die Anordnung von Endbereichskonstruktionen am Ende einer Betonbaustrecke kann verzichtet werden. Durch die Vorspannung der Dichtung ist eine dauerhafte Dichtigkeit der Fugen erreichbar. Die genannten Vorteile werden durch einen erhöhten Herstellungsaufwand erkauft. Daneben sind auch verschiedene Detailprobleme zu lösen.

### 4.2.3 Schichtenfolge

#### Einfluss des Schichtenaufbaus

Die Lagerungsbedingungen, also die Eigenschaften der Tragschichten unter den Betonplatten, haben naturgemäß einen wesentlichen Einfluss auf die mechanische Beanspruchung der Fahrbahnplatten. In der Praxis angewendet werden aber nur aufeinander abgestimmte und in ihren Eigenschaften reglementierte Schichtenfolgen, welche erfahrungsgemäß alle dafür geeignet sind, eine dauerhafte Auflagerung für die Betondecke sicherzustellen. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass die unterschiedlichen genormten Regelaufbauten zu großen Unterschieden im Spannungs- bzw. Verformungszustand der Fahrbahnplatten führen. Trotzdem kann ein rechnerischer Vergleich interessante Hinweise für eine Weiterentwicklung der Regelwerke für den Oberbau geben.

Aus diesem Grund wurde eine Serie von FEM-Berechnungen mit differenzierter Modellierung der Oberbauten durchgeführt. Es liegt auf der Hand, dass aussagekräftige Ergebnisse nur erwartet werden konnten, wenn die Modellierung auch und besonders im Bereich der unteren Tragschichten hinreichend detailliert erfolgen würde. Entsprechend ergaben sich sehr komplexe Modelle und sehr lange Berechnungszeiten (teilweise >48 h mit leistungsfähiger PC-Technik). Grundlage für die Modellierung bildete das Modell, welches in Abschnitt 4.2.1 beschrieben wird. Die Rechenannahmen für die Verkehrslasten und die Temperaturzustände wurden ebenfalls übernommen. Auf die Berücksichtigung des selten vorkommenden Verkehrslastfalles 5 (2 Fahrzeuge auf einer Platte) wurde auf Grund der sehr langen Rechenzeiten verzichtet. Bild 4.52 zeigt beispielhaft das Modell für einen Tragschichtenaufbau mit Asphaltzwischen-schicht (AZS) und Verfestigung.



**Bild 4.52:** FEM-Volumenmodell für einen Fahrbahnaufbau mit AZS und Verfestigung

### Materialkennwerte

Voraussetzung für eine aussagekräftige Analyse war die realitätsnahe Beschreibung der Materialkennwerte für die unterschiedlichen Tragschichten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es vielfach eine relativ große Spreizung bei den relevanten Parameterwerten geben kann. Im Rahmen dieser Studie konnte nur jeweils ein möglichst repräsentativer Parameterwert angenommen werden.

#### (1) Ungebundene Tragschichten

Das mechanische Verhalten der ungebundenen Tragschichten kann bei der hier interessierenden Problematik in guter Näherung als elastisch beschrieben werden. Jede andere Annahme würde implizieren, dass sich nach einer Belastung bleibende Verformungen einstellen. Durch die konstruktive Durchbildung des Deckenaufbaus soll aber dies gerade vermieden werden.

Ungebundene Tragschichten zeigen aber allgemein kein linear-elastisches Verhalten. Vielmehr hängt die Größe des Elastizitätsmoduls vom Spannungszustand ab ([NUMRICH 2003] / [WERKMEISTER 2003]). Dieser kann durch die drei Hauptspannungen charakterisiert werden. Für die bei Fahrbahnaufbauten vorkommenden Belastungssituationen können die ersten beiden Hauptspannungen als horizontal ausgerichtet angenommen werden und die dritte Hauptspannung als vertikal. Ferner gilt:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (4-8)$$

$$\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 < 0 \quad (4-9)$$

Die betragsmäßige Differenz zwischen der horizontalen und der vertikalen Hauptspannung wird als Deviatorspannung bezeichnet. Die horizontale Spannung wird Zellspannung genannt. Der E-Modul ist in starkem Maße von der Summe der Hauptspannungen und der Größe der Deviatorspannung abhängig. Dominierend ist dabei der Einfluss der Hauptspannungssumme. Generell gilt, dass mit steigenden Spannungsbeträgen der E-Modul zunimmt.

Eine genaue Ermittlung des Spannungszustandes in einem Fahrbahnaufbau mit ungebundenen Tragschichten erfordert also eine iterative Berechnung mit schrittweiser Anpassung der Materialsteifigkeit an den jeweils lokal vorherrschenden Spannungszustand. Eine solche Berechnung ist nicht nur sehr aufwendig, sie erfordert auch, um überhaupt sinnvoll zu sein, eine Kalibrierung an hinreichend genauen Messwerten. Im Rahmen dieser Arbeit muss deshalb näherungsweise mit einem konstanten E-Modul gerechnet werden. Der damit verbundene Fehler dürfte aber vergleichsweise gering sein, weil die Spannungen in den Tragschichten unterhalb der Betonplatte relativ klein sind. Eine relevante Änderung des E-Moduls ist nur in lokal begrenzten Bereichen zu erwarten.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführten Simulationsrechnungen liefern reichhaltiges Datenmaterial über die Größenordnung der Spannungen unter der Betonplatte. Es ist festzustellen, dass die Zellspannung kaum 40 kPa erreicht, bei gleichzeitiger Deviatorspannung in der Größenordnung von ca. 50 kPa.

In [NUMRICH 2003] sind E-Modul-Werte für ein definiertes Gesteinskörnungsgemisch in Abhängigkeit vom Spannungszustand angegeben. Diesen Angaben folgend wäre für die oben genannten Spannungen ein E-Modul von 115 MPa anzunehmen. Es ist aber zu beachten, dass es sich bei den genannten Spannungen um Höchstwerte handelt, welche nur unter den Radlasten auftreten. Der zu wählende Steifigkeitswert muss aber näherungsweise für die gesamte ungebundene Tragschicht gelten. In vorsichtiger Abschätzung wurden deshalb für die ungebundenen Schichten folgende Werte festgelegt:

- Schottertragschicht:  $E=80$  MPa
- Frostschuttschicht:  $E=50$  MPa

Die Werte liegen damit in der Größenordnung, welche in [FE 08.0253/2017] an Hand von Kalibrierungsrechnungen für die ungebundenen Tragschichten unter einer Fertigteilplatte ermittelt wurden.

In [NUMRICH 2003] sind ebenfalls Werte für die Querdehnzahl angegeben. Auch hier gibt es eine Abhängigkeit vom Spannungszustand. Der letztendlich interessierende Spannungszustand in der Betonplatte reagiert allerdings wenig sensitiv auf Änderungen der Querdehnzahl im Unterbau. Demzufolge ist an dieser Stelle keine genauere Analyse notwendig. Die Querdehnzahl wurde auf Basis der in [NUMRICH 2003] angegebenen Werte für alle ungebundenen Schichten mit 0,35 angenommen.

## (2) HGT

Hydraulisch gebundene Tragschichten erreichen in der Praxis Druckfestigkeiten zwischen 5 und 25 MPa. Werte für den Elastizitätsmodul werden gewöhnlich nicht ermittelt. Es besteht aber eine Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit hydraulisch gebundener Baustoffe.

In [RDO Beton 09] sind Werte für die E-Module von Straßenbetonklassen angegeben (Tabelle A 4.2). Auf dieser Basis lässt sich ein linearer Zusammenhang definieren. Geht man von einer Druckfestigkeit von 15 MPa aus, so ergibt die Extrapolation einen E-Modulwert von 33.000 MPa.

In anderen Quellen werden allerdings zumeist kleinere Werte angegeben. So wird in [OESER 2010] mit einem Wert von 20.000 MPa gerechnet.

In jedem Fall ist aber davon auszugehen, dass die HGT infolge der in relativ kleinen Abständen zu erwartenden Rissbildung keine Biegemomente übertragen kann. In [RDO Asphalt 09] wird deshalb empfohlen mit einem abgeminderten Elastizitätsmodul zu rechnen (2.000 MPa / 5.000 MPa). Dies sollte aber in der FEM-Analyse dazu führen, dass für lokale Einsenkungen, z. B. der Ecken von aufgewölbten Platten, zu hohe Werte berechnet werden. Für die FEM-Berechnungen wurde deshalb ein Material mit der wahrscheinlichen zu erwartenden Steifigkeit (33.000 MPa) definiert, welches aber keine Zugspannungen übertragen kann (COMPRESSION\_ONLY). Die Aufnahme von Biegespannungen ist damit ausgeschlossen.

Bezüglich der Querdehnzahl kann angenommen werden, dass hydraulisch gebundene Schichten im weiteren Sinne Betone sind und damit eine Querdehnzahl von 0,2 aufweisen.

## (3) Verfestigungen

In [ZTV Beton-StB 07] wird bezüglich der Festigkeitsforderungen nicht zwischen hydraulisch gebundenen Tragschichten und Verfestigungen unterschieden. Der oben verwendeten Argumentationslinie folgend ergibt sich daraus, dass es auch keinen Grund gibt eine Unterscheidung bezüglich E-Modul und Querdehnzahl vorzunehmen. Es wurden die für die HGT festgelegten Werte verwendet.

## (4) Asphalttragschicht / Asphaltzwischen-schicht

In [RDO BETON 09] sind Anforderungen an die Asphalt-schichten unter Betondecken angegeben. Enthalten sind auch Spezifikationen zur Mischgutart, zum Größtkorn und zum Bindemittel.

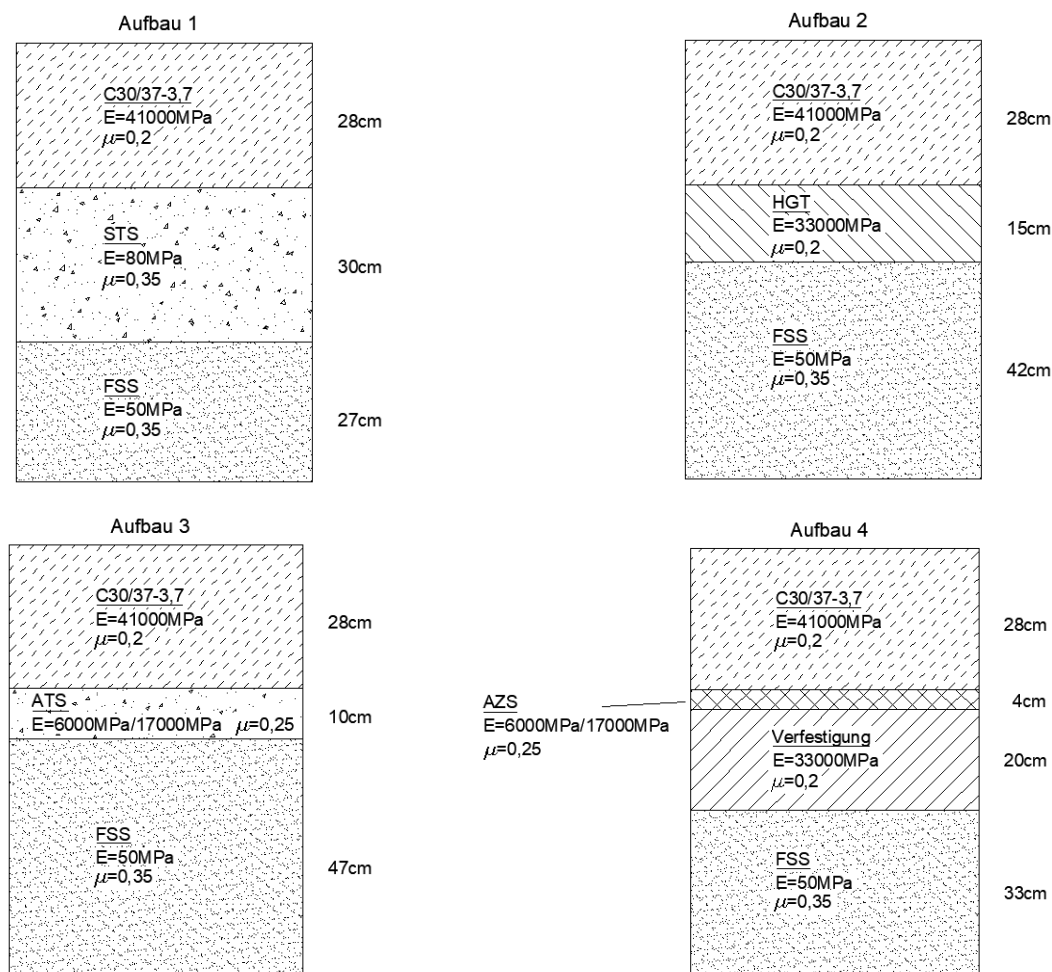
Angaben zum E-Modul verschiedener Asphalttragschichtgemische sind [WELLNER 2010] zu entnehmen. Für ein Asphalttragschichtgemisch mit Bitumen 50/70 sind für eine Temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  E-Modulwerte von 15.000 MPa bis 23.000 MPa angegeben. Bei einer Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  liegen die Werte bei 5.000 MPa bis 8.000 MPa. Die Angaben variieren in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt, der Belastungsfrequenz, der Sieblinie und der Herstellerfirma des Bindemittels. Die aufgeführten Messergebnisse zeigen weiterhin, dass beim Übergang auf eine weichere Bitumensorte sich der E-Modul um 5 bis 20 % reduziert. Die großen Schwankungsbreiten der Werte zeigen, dass nur eine relativ pauschale Abschätzung für den Elastizitätsmodul der Asphaltsschichten möglich ist. Es wurden jeweils die Mittelwerte der angegebenen Bereiche gewählt. Da für die Asphaltsschichten unter Betondecken in der Regel weiche Bitumensorten verwendet werden, wurden die Werte noch einmal um 10 % reduziert. Damit ergaben sich folgende Werte für den Elastizitätsmodul:

- für  $20^{\circ}\text{C}$ :  $E = 6.000 \text{ MPa}$
- für  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $E = 17.000 \text{ MPa}$

Die Querdehnzahl kann laut [RDO Asphalt 09] mit 0,25 angenommen werden.

### Untersuchte Oberbauten

Die im deutschen Betonstraßenbau anzuwendenden Schichtenaufbauten sind in [RStO 12] und [RDO Beton 09] aufgeführt. In der rechnerischen Analyse wurden die in Bild 4.53 dargestellten Oberbauvarianten berücksichtigt.



**Bild 4.53:** Bei den Berechnungen verwendete Varianten für den Oberbau

Bei den Aufbauten 3 und 4 finden bituminös gebundene Schichten Verwendung. Weil deren Steifigkeitswerte stark temperaturabhängig sind wurden jeweils eine warme und eine kalte Variante berücksichtigt (siehe oben).

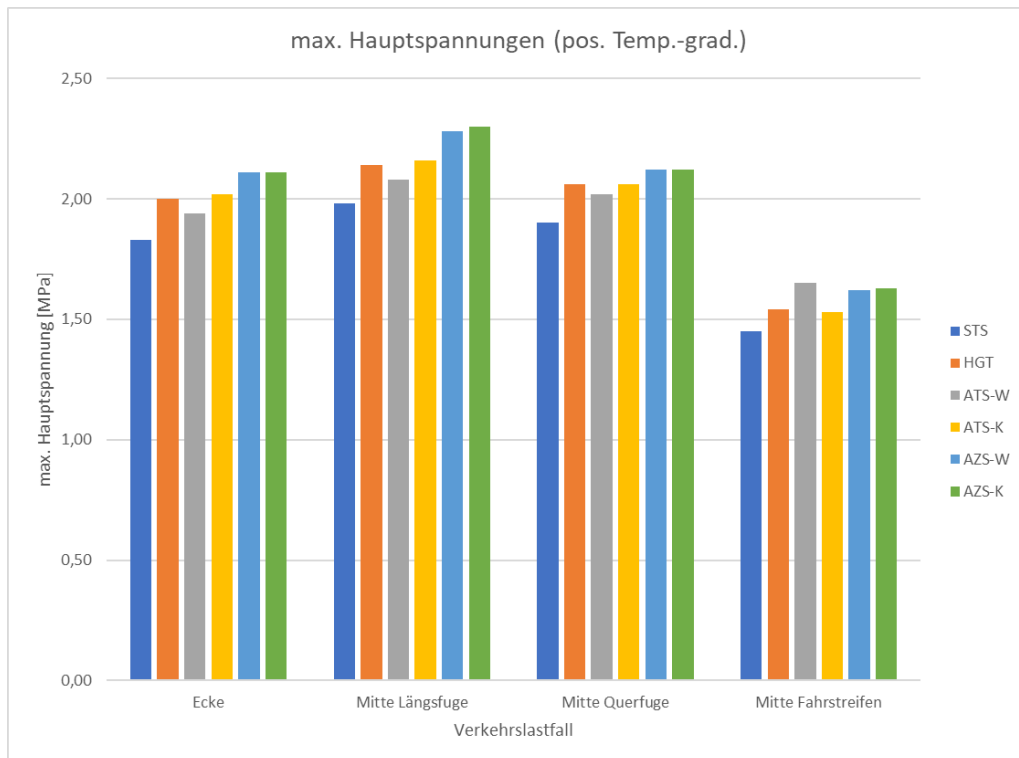
### Ergebnisse

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurde zunächst auf den Vergleich der maximalen Hauptspannungen beschränkt. Man kann davon ausgehen, dass die Plattenverformung ohne Verkehrslast fast ausschließlich durch die Eigenschaften der Betonplatte und den Temperaturzustand bestimmt werden. Die Beschaffenheit der Unterlage spielt hier eine untergeordnete Rolle. Auf die Auswertung der Verformungswerte wurde deshalb verzichtet. In Tab. 4.18 sind die berechneten Spannungswerte zusammengestellt.

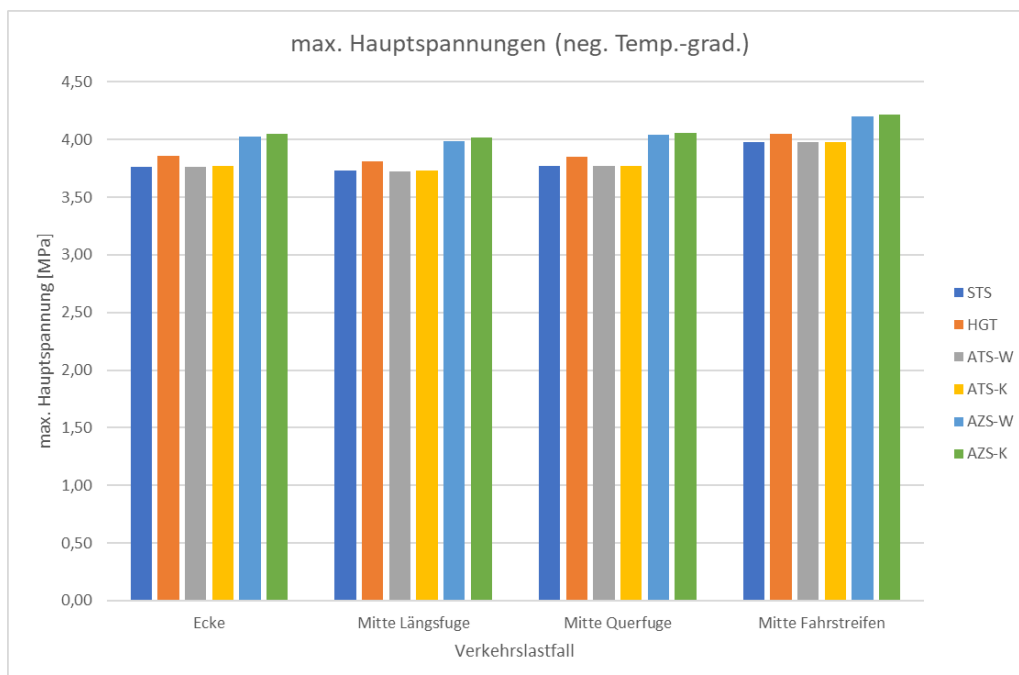
Unterlage	Laststellung	positiver Temperaturgradient	negativer Temperaturgradient
		maxPS1	maxPS1
		[MPa]	[MPa]
Schottertragschicht (STS)	Ecke	1,83	3,76
	Mitte Längsfuge	1,98	3,73
	Mitte Querfuge	1,90	3,77
	Mitte Fahrstreifen	1,45	3,98
Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)	Ecke	2,00	3,86
	Mitte Längsfuge	2,14	3,81
	Mitte Querfuge	2,06	3,85
	Mitte Fahrstreifen	1,54	4,05
Asphalttragschicht warm (ATS-W)	Ecke	1,94	3,76
	Mitte Längsfuge	2,08	3,72
	Mitte Querfuge	2,02	3,77
	Mitte Fahrstreifen	1,65	3,98
Asphalttragschicht kalt (ATS-K)	Ecke	2,02	3,77
	Mitte Längsfuge	2,16	3,73
	Mitte Querfuge	2,06	3,77
	Mitte Fahrstreifen	1,53	3,98
Asphaltzwischen-schicht warm (AZS-W)	Ecke	2,11	4,03
	Mitte Längsfuge	2,28	3,99
	Mitte Querfuge	2,12	4,04
	Mitte Fahrstreifen	1,62	4,20
Asphaltzwischen-schicht kalt (AZS-K)	Ecke	2,11	4,05
	Mitte Längsfuge	2,30	4,02
	Mitte Querfuge	2,12	4,06
	Mitte Fahrstreifen	1,63	4,22

Tab. 4.18: Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage

In Bild 4.54 und Bild 4.55 werden die Ergebnisse visualisiert.



**Bild 4.54:** Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage (pos. Temperaturgradient)



**Bild 4.55:** Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage (neg. Temperaturgradient)

Es ist deutlich erkennbar, dass die Unterschiede zwischen den Spannungswerten nicht sehr groß sind. In Tab. 4.19 sind die Unterschiede genauer quantifiziert. Angegeben ist jeweils die Abweichung des berechneten maximalen Hauptspannungswertes von dem Wert, welcher mit dem bezüglich der Tragschichten weniger detaillierten Modell aus Abschnitt 4.2.1 berechnet wurde.



Unterlage	Laststellung	positiver Temperaturgradient		negativer Temperaturgradient	
		Differenzbetrag	rel. Abweichung	Differenzbetrag	rel. Abweichung
		[MPa]		[MPa]	
STS	Ecke	0,19	-9,41%	0,32	-7,84%
	Mitte Längsfuge	0,20	-9,17%	0,31	-7,67%
	Mitte Querfuge	0,17	-8,21%	0,38	-9,16%
	Mitte Fahrstreifen	0,11	-7,05%	0,29	-6,79%
HGT	Ecke	0,02	-0,99%	0,22	-5,39%
	Mitte Längsfuge	0,04	-1,83%	0,23	-5,69%
	Mitte Querfuge	0,01	-0,48%	0,30	-7,23%
	Mitte Fahrstreifen	0,02	-1,28%	0,22	-5,15%
ATS-W	Ecke	0,08	-3,96%	0,32	-7,84%
	Mitte Längsfuge	0,10	-4,59%	0,32	-7,92%
	Mitte Querfuge	0,05	-2,42%	0,38	-9,16%
	Mitte Fahrstreifen	-0,09	5,77%	0,29	-6,79%
ATS-K	Ecke	0,00	0,00%	0,31	-7,60%
	Mitte Längsfuge	0,02	-0,92%	0,31	-7,67%
	Mitte Querfuge	0,01	-0,48%	0,38	-9,16%
	Mitte Fahrstreifen	0,03	-1,92%	0,29	-6,79%
AZS-W	Ecke	-0,09	4,46%	0,05	-1,23%
	Mitte Längsfuge	-0,10	4,59%	0,05	-1,24%
	Mitte Querfuge	-0,05	2,42%	0,11	-2,65%
	Mitte Fahrstreifen	-0,06	3,85%	0,07	-1,64%
AZS-K	Ecke	-0,09	4,46%	0,03	-0,74%
	Mitte Längsfuge	-0,12	5,50%	0,02	-0,50%
	Mitte Querfuge	-0,05	2,42%	0,09	-2,17%
	Mitte Fahrstreifen	-0,07	4,49%	0,05	-1,17%

**Tab. 4.19:** Abweichung der für unterschiedliche Tragschichten berechneten maximalen Hauptspannungen zu den mit dem vereinfachten Modell aus Abschnitt 4.2.1 berechneten Werten

Wie die Angaben in Tab. 4.19 zeigen, liegen die Abweichungen in jedem Fall unter 10 %.

Die Ergebnisse werden dahingehend interpretiert, dass es im Allgemeinen möglich und sinnvoll ist, die Tragschichten unter der Betonplatte als homogenen Volumenblock zu modellieren. Eine genauere Modellierung ist nur sinnvoll, wenn die Materialeigenschaften der verschiedenen Schichten hinreichend genau bekannt sind und auch alle übrigen Modellbestandteile mit vergleichbarer Präzision modelliert werden. Dies wird nur in seltenen Fällen gegeben sein. Zu beachten sind auch die durch die Komplexität des Modells

entstehenden sehr langen Rechenzeiten. Im vorliegenden Fall waren bei Verwendung leistungsfähiger PC-Technik Rechenzeiten von bis zu 72 h zu verzeichnen.

Bezogen auf die Baupraxis sind die Rechenergebnisse als Bestätigung dafür anzusehen, dass alle genormten Oberbauten prinzipiell geeignet sind, eine tragfähige Unterlage für die Betondecke zu gewährleisten. Für die Bewertung von Tragschichten sind offensichtlich Eigenschaften wie Erosionsbeständigkeit, Frostsicherheit oder Wiederverwendbarkeit bei Fahrbahnerneuerung ausschlaggebend.

### 4.3 Strukturbewertung sowie teilweise Simulation der Konstruktionen hinsichtlich auftretender Last- und Nutzungsszenarien

#### 4.3.1 Dimensionierung der neuen Konstruktion

Zur Bewertung der Konstruktion mit kleinen Platten wurde eine rechnerische Dimensionierung durchgeführt und anschließend die Plattenvorverformung berechnet. Die so gewonnenen Verformungsfunktionen dienten als Eingangswerte für die Berechnung der im Nutzungszustand zu erwartenden Lärmemission.

Die Dimensionierung der Fahrbahnplatten erfolgt üblicherweise mit dem Verfahren nach [RDO Beton 09]. Dieses Verfahren ist als Gesamtsystem kalibriert. Durch systematische Serienrechnungen wurde überprüft, ob im gesamten Parameterbereich plausible Ergebnisse generiert werden. Außerdem liegen auch Praxiserfahrungen aus realisierten Bauvorhaben vor. Die vorgeschlagene Plattengeometrie von 3 m x 3 m liegt im Geltungsbereich der RDO Beton. Die Dimensionierung könnte also mit diesem Verfahren durchgeführt werden. Es sind aber bisher kaum Fahrbahnen mit derartigen Plattengrößen rechnerisch dimensioniert und gebaut worden, sodass hier die Praxiserfahrung fehlt. Weiterhin ist zu beachten, dass die alternativ verwendbaren (hier aber nicht empfohlenen) Platten mit einer Breite  $> 4,5$  m außerhalb des Geltungsbereiches der RDO liegen. Für diese Platten fehlt somit ein praktikables Dimensionierungsverfahren. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Aufgabe ein Dimensionierungsverfahren entwickelt, welches auf den abgesicherten Erkenntnissen des Verfahrens nach [RDO Beton 09] basiert und den Anwendungsbereich bezüglich der Plattengeometrie erweitert.

Die Grundidee für das neue Verfahren besteht darin, die Vorgehensweise aus den [RDO Beton 09] möglichst unverändert zu nutzen und nur die Berechnung des mechanischen Plattenverhaltens zu verbessern. Konkret wurde dies mit folgenden Schritten realisiert:

- Für einen vielfach praxiserprobten Dimensionierungsfall wurde ein FEM-Modell erstellt. Das Modell entspricht in seinem grundsätzlichen Aufbau der Beschreibung in Abschnitt 3.6.3. Die Plattengröße und -anzahl wurde den konkreten Berechnungsfällen angepasst. (siehe Bild 4.56, Bild 4.57).
- Die Lastannahmen wurden so modifiziert, dass die Verwendung der FEM-Berechnungen mit den nach [RDO Beton 09] geforderten Nachweisen zu dem gleichen Dimensionierungsergebnis führt wie das RDO-Verfahren.
- Die so bestimmten Lastannahmen ersetzen in Verbindung mit der FEM-gestützten Spannungsrechnung die bisherige Berechnungsmethodik zur Ermittlung des aufnehmbaren Momentes. Alle anderen Bestandteile des Dimensionierungsverfahrens bleiben unverändert.

Damit ist sichergestellt, dass das neue Dimensionierungsverfahren im Kalibrierungsfall das gleiche Sicherheitsniveau liefert wie das bisherige Verfahren. Für alle anderen Fälle ist anzunehmen, dass das neue Verfahren zuverlässiger das angestrebte Sicherheitsniveau trifft als das alte Verfahren. Dies ist damit zu begründen, dass die FEM gestützte Berechnung das mechanische Verhalten der Platten wesentlich realitätsnäher erfasst als die bisher verwendeten analytischen Formeln.

Im Ergebnis der oben beschriebenen Vorgehensweise wurden die Lastannahmen aus den [RDO Beton 09] folgendermaßen modifiziert:

- (1) Anstatt des Einzelrades wurden 3-fach-Achsen als Verkehrslast angesetzt.
- (2) Für Nachweise für extreme Verkehrsbelastung (LF1 / LF2) wurden nur die häufig vorkommenden Temperaturgradienten entsprechend Nachweisfall 5 bzw. 6 (Ermüdung) angesetzt.

Begründung für die Änderung (1):

Das in den Nachweisen nach RDO anzusetzende Einzelrad entspricht offensichtlich nicht der real auftretenden Lastkonstellationen. Es wird im Verfahren nach [RDO Beton 09] deshalb verwendet, weil die dort benutzte Westergaard-Formel nur für Einzellasten in Randmitte anwendbar ist. Der Ansatz liefert höhere Biegemomente als die real auftretende Achslast (mit gleichen Radlasten).

Ein weiteres, ebenfalls aus den begrenzten Anwendungsmöglichkeiten der analytischen Formeln resultierendes Manko des RDO-Verfahrens besteht darin, dass die Wirkung der temperaturbedingten Vorverformung der Platte auf die durch die Verkehrslast verursachten Spannungen nicht berücksichtigt wird. Die durch die Verkehrslast bedingten Biegemomente werden dadurch zu klein berechnet.

Die beiden hier aufgeführten Defizite des RDO-Verfahrens gleichen sich in ihren Auswirkungen also tendenziell aus. Im FEM-Modell wird aber die Wirkung der Verkehrslast auf einer vorverformten Platte realitätsnah abgebildet. Folglich würde ein Ausgleich des durch den Ansatz der Einzelradlast entstehenden Fehlers nicht mehr stattfinden. Im FEM-Modell ist also die eher virtuelle Radlast durch eine real vorkommende Achslast zu ersetzen. Konsequenterweise wurde hier die Achskonstellation aus der dominierenden Fahrzeugart 98 gewählt. Dies ist die 3-fach-Achse.

Begründung für Änderung (2):

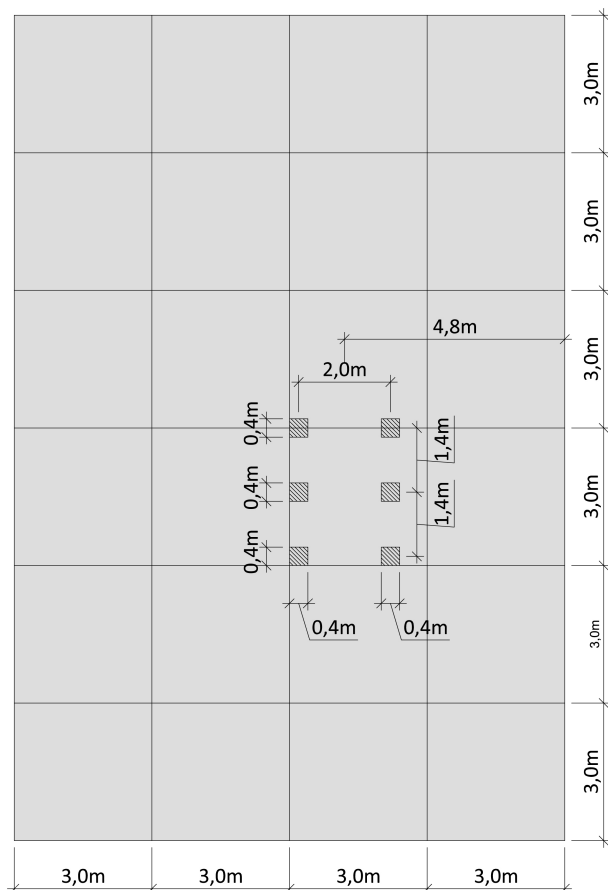
Die RDO sehen vor, für die Nachweise gegen extreme Beanspruchung eine Radlast von ca. 75 kN bis 85 kN anzusetzen. Dies entspricht einer Achslast von ca. 16 t. Eine derartige Achslast tritt statistisch in etwa 0,1 % aller Fälle auf. Die Achslast ist damit relativ gesehen selten, kommt aber praktisch täglich vor. Es ist damit korrekt, zur Definition eines wirklich seltenen Beanspruchungsfalles eine Überlagerung mit einer selten auftretenden Temperaturbeanspruchung vorzunehmen. Dies ist die Vorgehensweise im RDO-Verfahren.

Der Ansatz einer 80 kN schweren Radlast innerhalb eines 3-fach-Achsaggregates ist aber anders zu bewerten. Eine Achslast von 16 t überschreitet die zulässige Achslast (11,5 t) um 39 %. Setzt man drei 16 t-Achsen in einer Dreifachachse an, so ergibt sich eine Gesamtlast von 48 t. Die zulässige Last (24 t) wird damit um 100 % überschritten. Es handelt sich also um eine echte Extremlast.

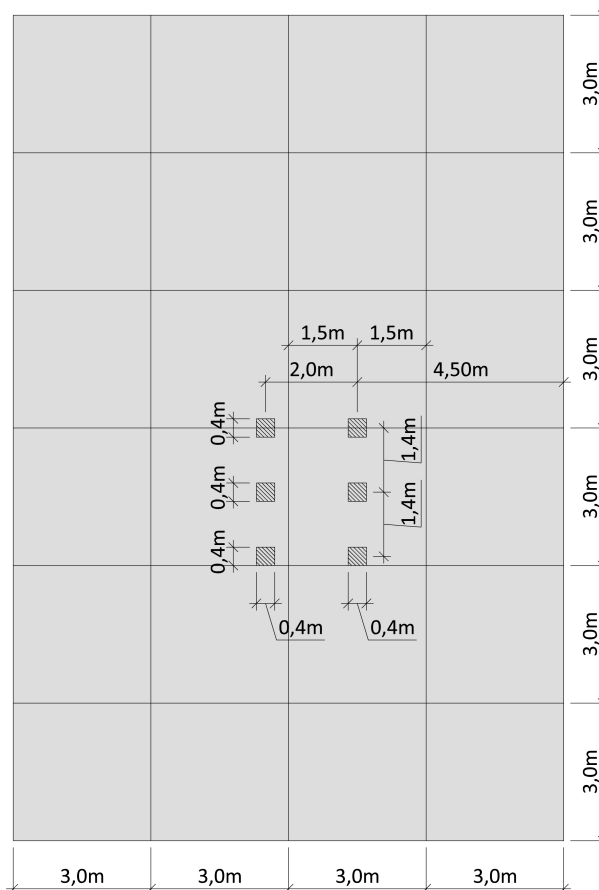
Die im Bauwesen allgemein akzeptierte Turkstra-Regel besagt, dass ein Versagen dann eintritt, wenn eine der Einwirkungen einen Extremwert erreicht. Für eine Dimensionierung ist der führenden Einwirkung der Extremwert zuzuordnen. Alle anderen Einwirkungen sind mit durchschnittlichen Werten anzunehmen. Konkret bedeutet dies, dass für die 3-fach-Achse die hohen Radlasten nach RDO für die Nachweisfälle LF1 und LF2 angesetzt wurden. Gleichzeitig wurde für den Temperaturgradienten der häufig vorkommende Wert entsprechend LF5 bzw. LF6 gewählt.

Mit diesen Lastannahmen wurde die o.g. Kalibrierungsbedingung erfüllt.

Die für die Spannungsberechnungen anzunehmenden Laststellungen sollen weiter den RDO entsprechen. Hier sind für die anzunehmende Radlast die Positionen „Mitte Längsfuge“ und „Mitte Querfuge“ vorgegeben. Diese Laststellungen erzeugen beim Ansatz eines Einzelrades auch jeweils die maßgebenden Spannungswerte. Beim neuen Konzept wird, wie oben bereits erwähnt, als realitätsnahe Belastung eine Dreifachachse angesetzt. Damit ist nicht in jedem Fall klar erkennbar, welche Laststellung die maßgebenden Spannungswerte liefert. Dies ist im Einzelfall in Abhängigkeit von der Plattengröße zu entscheiden. Eine Einteilung in die Fälle „Mitte Längsfuge“ und „Mitte Querfuge“ ist im Allgemeinen weiterhin sinnvoll möglich. Es ist aber im Einzelfall zu entscheiden, ob der Terminus „Mitte“ auf das gesamte Achsaggregat, eine Radreihe oder ein bestimmtes Rad bezogen werden muss. Auf der Basis der im Zusammenhang mit der Bearbeitung des vorliegenden Projektes durchgeführten Berechnung ließen sich für die hier zu dimensionierenden Platten die maßgebenden Laststellungen eindeutig zuordnen (siehe Bild 4.56 und Bild 4.57).



**Bild 4.56:** Laststellung „Mitte Längsfuge“



**Bild 4.57:** Laststellung „Mitte Querfuge“

Wie auf den Bildern erkennbar ist, sind die Laststellungen in Fahrtrichtung nicht vollkommen symmetrisch bezüglich der Plattengeometrie. Die Dreifachachsen sind nicht genau in Plattenmitte angeordnet sondern so, dass eine äußere Achse des Achsaggregats genau an der Querfuge steht. Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass diese Laststellung für die gegebene Plattengeometrie höhere Spannungen liefert als eine symmetrische Anordnung. Die Unterschiede sind aber marginal.

Die Berechnung der Spannungen erfolgte mit dem FEM-Modell, welches in Abschnitt 3.6.3 beschrieben wird. Da bedeutet, dass im Berechnungsmodell keine Differenzierung bezüglich der unteren Tragschichten vorgenommen wurde (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Für die Dimensionierung wurde eine Betonklasse StC 30/37-3,3 angenommen.

Wie innerhalb der vorliegenden Forschungsarbeit gezeigt wurde, haben die Materialeigenschaften der Betonplatten einen großen Einfluss auf die Größe der Spannungen und damit auch auf das Dimensionierungsergebnis (siehe Abschnitt 3.6.5). Es ist sehr vorteilhaft, Betonrezepturen zu verwenden, welche zu kleinen Werten für die Wärmedehnzahl und den E-Modul führen. Dafür ist es erforderlich, sich bei der Auswahl der Zuschlagstoffe auf bestimmte Gesteinsarten zu konzentrieren. In der Praxis wird die Auswahl der Gesteinsart aber vorwiegend durch wirtschaftliche Erwägungen und die Verfügbarkeit bestimmt. Dies gilt umso mehr, als dass die Verwendbarkeit vieler Gesteinsarten bereits durch andere Forderungen (z. B. Polierresistenz, AKR-Gefährdung) eingeschränkt ist. Um einerseits den Einfluss der Materialeigenschaften an dieser Stelle noch einmal deutlich zu machen und andererseits auch den Erfordernissen der Praxis Rechnung zu tragen, wurde die Dimensionierung für drei Materialfälle durchgeführt:

- günstiger Fall ( $E=37.000 \text{ MPa}$ ,  $WDZ=0,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )
- Normalfall ( $E=39.000 \text{ MPa}$ ,  $WDZ=1,15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )
- ungünstiger Fall ( $E=41.000 \text{ MPa}$ ,  $WDZ=1,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

Die Ergebnisse der Dimensionierungen sind in Tab. 4.20 zusammengefasst.

Berechnungsfall	Materialfall: günstig		Materialfall: normal		Materialfall: ungünstig	
	Plattendicke: 25 cm		Plattendicke: 27 cm		Plattendicke: 28 cm	
	max PS1	Auslastung	max PS1	Auslastung	max PS1	Auslastung
	[MPa]		[MPa]		[MPa]	
extreme Last Verkehrslast an Längsfuge (Lastfall 1 nach RDO Beton)	1,89	61,62%	1,82	59,34%	1,80	58,69%
extreme Last Verkehrslast an Querfuge (Lastfall 2 nach RDO Beton)	2,25	73,36%	2,22	72,38%	2,22	72,38%
Ermüdung Verkehrslast an Längsfuge (Lastfall 5 nach RDO Beton)	1,36	72,84%	1,34	71,77%	1,34	71,77%
Ermüdung Verkehrslast an Querfuge (Lastfall 6 nach RDO Beton)	1,75	98,87%	1,75	98,87%	1,77	100,00%

Tab. 4.20: Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen für die drei Materialfälle

Ein Vergleich mit Dimensionierungsergebnissen nach [RDO Beton 09] zeigte keine bzw. nur geringe Abweichungen.

Die im Nutzungszustand zu erwartende Lärmemission wird wesentlich durch die vor der Einwirkung der Verkehrslast vorhandenen Plattenvorformung beeinflusst. Innerhalb des FEM-Modells wird diese Verformung durch den Ansatz des Temperaturzustandes im Plattenbeton bestimmt. Für die Dimensionierungsberechnungen wurden, wie oben beschrieben, ausschließlich positive Temperaturgradienten berücksichtigt. Im Gegensatz dazu treten in der Praxis aber auch negative Temperaturgradienten auf. Außerdem wird die Plattenverformung zusätzlich durch den Feuchtezustand des Betons (Schwinden) beeinflusst. Aus diesem Grund konnten die Verformungswerte für die Platten nicht direkt aus den Dimensionierungsrechnungen übernommen werden. Stattdessen wurden mit dem gleichen FEM-Modell separate Berechnungen für alle drei ermittelten Deckendicken durchgeführt.

Der Temperaturzustand in den Betonplatten wurde entsprechend folgender Gleichung festgelegt:

$$t(z) = t_0 + z * \delta_T + t_E + t_s \quad (4-10)$$

$t_0$  – angenommenen Grundtemperatur (beliebig)

$\delta_T$  – Temperaturgradient

$t_E$  – Temperaturanteil aus eingprägter Vorverformung (Ansatz entspr. Abschnitt 3.6.2)

$t_s$  – Temperaturanteil aus Schwinden (Ansatz entspr. Abschnitt 3.6.2)

Der nichtlineare Temperaturanteil konnte vernachlässigt werden, weil er keine Auswirkungen auf die Verformung hat.

Für den Ansatz des Temperaturgradienten wurden folgende vier Festlegungen getroffen:

- Es werden die Verformungsfiguren „Aufwölbung“ (positiver Gradient) und „Aufschüsselung“ (negativer Gradient) untersucht.
- Für jede dieser Verformungsfiguren werden jeweils ein häufig vorkommender und ein selten vorkommender Temperaturzustand definiert.
- Alle als „häufig“ definierten Temperaturzustände sollen die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit haben.

- Alle als „selten“ definierten Temperaturzustände sollen die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit haben.

Damit ergeben sich jeweils vier Temperaturfälle. In Kombination mit den drei Materialfällen resultieren daraus zwölf Berechnungsfälle für die Lärmemission.

In [FE 08.0254/2017] sind Verteilungsfunktionen für die Temperaturgradienten angegeben. Außerdem sind hier Überschreitungshäufigkeiten mit zugehörigen Gradientenwerten (Quantilwerte) für positive Gradienten festgelegt. Diese Gradienten sind den Dimensionierungsfällen nach RDO-Beton zugeordnet. Damit können die angegebenen Gradientenwerte als „häufige“ bzw. „seltene“ Werte für die weiteren Berechnungen verwendet werden.

Ebenfalls in [FE 08.0254/2017] enthalten ist eine Formel zur Anpassung der Gradienten an die Deckendicke:

$$\delta_T = C_1 \cdot 0,0245K/mm \cdot [5,313 \cdot 10^{-6} \cdot (h_d)^2 - 6,19588 \cdot 10^{-3} \cdot h_d + 2,3820213] \quad (4-11)$$

häufiger Fall / pos. Gradient:  $C_1=0,62 \Rightarrow$  Überschreitungswahrscheinlichkeit: 16 %

seltener Fall / pos. Gradient:  $C_1=1,6 \Rightarrow$  Überschreitungswahrscheinlichkeit: 2,5 %

Für die negativen Gradienten werden Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in gleicher Höhe gefordert. Damit sind als Überschreitungswahrscheinlichkeiten anzusetzen:

häufiger Fall / neg. Gradient: Überschreitungswahrscheinlichkeit: 84%

seltener Fall / neg. Gradient: Überschreitungswahrscheinlichkeit: 97,5%

Die Analyse der in [FE 08.0254/2017] definierten Verteilungsfunktionen zeigte, dass die Quantilwerte für die negativen Gradienten aus den Quantilwerten für die positiven Gradienten berechnet werden können. Mit guter Näherung gilt:

$$q_{97,5\%} = \frac{q_{2,5\%}}{-1,65} \quad (4-12)$$

bzw.

$$q_{84\%} = -q_{16\%} \quad (4-13)$$

$q_{2,5\%}$  - 2,5%-Quantilwert

$q_{16\%}$  - 16%-Quantilwert

$q_{84\%}$  - 84%-Quantilwert

$q_{97,5\%}$  - 97,5%-Quantilwert

Für die Berechnung der Lärmemission ist es erforderlich, die Plattenverformung durch eine Funktion zu beschreiben. Die mit dem FEM-Modell berechneten Verformungen wurden deshalb mit einer einfachen Polynomfunktion approximiert. Die Funktion wurde definiert mit:

$$s_v(s_h) = a_1 \cdot s_F^2 + a_2 \cdot s_Q^2 + s_{v0}$$

$s_v$  – Verschiebung in Vertikalrichtung

$s_F$  – Abstand vom Plattenmittelpunkt in Fahrriichtung

$s_Q$  – Abstand vom Plattenmittelpunkt in Querrichtung

$a_1, a_2$  - Koeffizienten

$s_{v0}$  - Vertikalverschiebung in Plattenmitte

Die ermittelten Parameterwerte für die zwölf Berechnungsfälle sind in Tab. 4.21 aufgeführt.

Berechnungsfall	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>0</sub>
	[1/mm]	[1/mm]	[mm]
Dicke 25 cm, günstige Materialparameter, häufig auftretender negativer Temperaturgradient	1,571·10 <sup>-7</sup>	1,641·10 <sup>-7</sup>	-0,111
Dicke 25 cm, günstige Materialparameter, selten auftretender negativer Temperaturgradient	2,003·10 <sup>-7</sup>	2,101·10 <sup>-7</sup>	-0,13
Dicke 25 cm, günstige Materialparameter, häufig auftretender positiver Temperaturgradient	1,681·10 <sup>-8</sup>	1,681·10 <sup>-8</sup>	-0,014
Dicke 25 cm, günstige Materialparameter, selten auftretender positiver Temperaturgradient	-5,184·10 <sup>-8</sup>	-5,184·10 <sup>-8</sup>	0,117
Dicke 27 cm, durchschnittliche Materialparameter, häufig auftretender negativer Temperaturgradient	1,848·10 <sup>-7</sup>	1,971·10 <sup>-7</sup>	-0,086
Dicke 27 cm, durchschnittliche Materialparameter, selten auftretender negativer Temperaturgradient	2,499·10 <sup>-7</sup>	2,664·10 <sup>-7</sup>	-0,148
Dicke 27 cm, durchschnittliche Materialparameter, häufig auftretender positiver Temperaturgradient	2,166·10 <sup>-8</sup>	2,167·10 <sup>-8</sup>	-0,012
Dicke 27 cm, durchschnittliche Materialparameter, selten auftretender positiver Temperaturgradient	-7,589·10 <sup>-8</sup>	-7,588·10 <sup>-8</sup>	0,193
Dicke 28 cm, ungünstige Materialparameter, häufig auftretender negativer Temperaturgradient	2,216·10 <sup>-7</sup>	2,366·10 <sup>-7</sup>	-0,133
Dicke 28 cm, ungünstige Materialparameter, selten auftretender negativer Temperaturgradient	2,779·10 <sup>-7</sup>	2,993·10 <sup>-7</sup>	-0,156
Dicke 28 cm, ungünstige Materialparameter, häufig auftretender positiver Temperaturgradient	2,63·10 <sup>-8</sup>	2,63·10 <sup>-8</sup>	-0,011
Dicke 28 cm, ungünstige Materialparameter, selten auftretender positiver Temperaturgradient	-8,982·10 <sup>-8</sup>	-8,982·10 <sup>-8</sup>	0,238

Tab. 4.21: Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen für die drei Materialfälle

Auffällig ist, dass sich auch für die Fälle mit häufig auftretenden positiven Temperaturgradienten die Verformungsfigur „Aufschüsselung“ ergibt. Dies ist auf die Überlagerung mit dem Schwindeinfluss zurückzuführen.

### 4.3.2 Fugenbewegung bei kurzen Platten

Die Bedeutung der Fugenöffnungsweiten für die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn und die Lärmemission im Nutzungszustand wurde in der vorliegenden Arbeit mehrfach dargestellt (siehe Abschnitte 2.3.4, 2.4.2, 3.3.1, 3.3.6 und 3.6.8). Die geringen prognostizierten Fugenöffnungsweiten werden als ein wesentlicher Vorteil der Bauweise mit kleinen Platten angesehen. Um diesen Vorteil zum Tragen zu bringen, ist es notwendig, die mechanischen Zusammenhänge beim Öffnen und Schließen der Fugen theoretisch zu analysieren und damit relevante Einflüsse zu identifizieren. Zielstellung ist es, ein Öffnen und Schließen aller Fugen sicher zu stellen.

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist zunächst die nicht gerissene Fahrbahn. Im Querschnitt baut sich infolge des Betonschwindens und sinkender Temperaturen eine Zugspannung auf. Sobald an einer beliebigen Stelle diese Zugspannungen die Zugfestigkeit überschreiten, kommt es zu einem Riss. Dies wird in aller Regel unterhalb eines Kerbschnittes erfolgen, weil hier die Spannung durch die verminderte Querschnittsfläche deutlich größer ist als im übrigen Plattenbereich. Im Zusammenhang mit der Rissbildung

kommt es zu einer Entspannung in den angrenzenden Fahrbahnbereichen. Praktisch bildet sich ein Endbereich. Die hier wirksamen Zusammenhänge wurden bereits eingehend untersucht. Die Formeln zur Beschreibung der mechanischen Zusammenhänge können [FE 89.0269/2011] entnommen werden.

Die Zugkraft im Endbereich ergibt sich aus der Reibung an der Unterseite der durch die Entspannung mobilisierten Platten. Es gilt:

$$F_{t.EB} = h \cdot b \cdot \rho \cdot \mu \cdot x \quad (4-14)$$

$F_{t.EB}$  – Zugkraft im Endbereich

$h$  – Plattendicke

$b$  – betrachtete Breite

$\rho$  – Wichte Beton

$\mu$  – Reibungsbeiwerte Platte / Unterlage

$x$  – Abstand vom Riss

Zu einem Riss innerhalb des Endbereiches kommt es offensichtlich, wenn die Zugkraft im Querschnitt größer wird als die unterhalb der Kerbschnitte aufnehmbare Zugkraft. Diese aufnehmbare Zugkraft kann berechnet werden mit:

$$F_{t.zul} = h_K \cdot b \cdot f_{ct} \quad (4-15)$$

$F_{t.zul}$  – zulässige (aufnehmbare) Zugkraft im gekerbten Querschnitt

$h_K$  – Höhe des gekerbten Querschnittes

$f_{ct}$  – Zugfestigkeit des Betons

Die Rissbedingung lautet also in mathematischer Form:

$$h \cdot b \cdot \rho \cdot \mu \cdot x = h_K \cdot b \cdot f_{ct} \quad (4-16)$$

Für den Abstand des neuen Risses vom schon vorhandenen Riss ergibt sich damit:

$$x = \frac{h_K \cdot f_{ct}}{h \cdot \rho \cdot \mu} \quad (4-17)$$

Um eine realistische Größenordnung für den Rissabstand abschätzen zu können, werden für die Einflussparameter plausible Werte angenommen:

$$h_K = 0,75 \cdot h$$

$$f_{ct} = 4,0 \frac{N}{mm^2} = 4000 kN/m^2$$

$$\rho = 24 kN/m^3$$

$$\mu = 1,0$$

Damit ergibt sich:

$$x = \frac{0,75 \cdot 4000 \text{ kN/m}^2}{24 \text{ kN/m}^3 \cdot 1,0} = 125 m$$

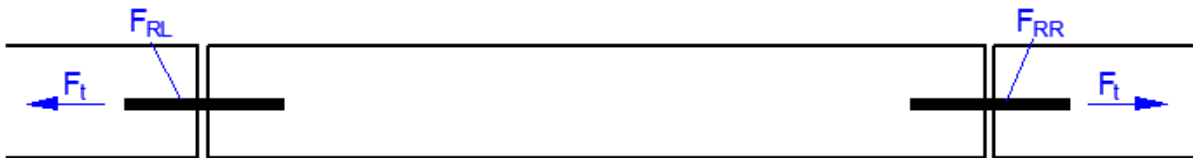


Wenn also ein Riss eingetreten ist, ist keineswegs zu erwarten, dass die Fahrbahn am nächsten Kerbschnitt wieder reißen wird. Dies ist nahezu ausgeschlossen. Vielmehr ist zu erwarten, dass nur jede zwanzigste bis fünfundzwanzigste Fuge reißt. Die initiale Bildung von Paketfugen ist also unvermeidlich.

Spätestens nach der Verkehrsfreigabe ist aber damit zu rechnen, dass es innerhalb relativ kurzer Zeit unter allen Kerbschnitten zum Riss kommt. Hierbei handelt es sich aber im Wesentlichen um einen Bruch infolge Biegung.

Die anfänglich gebildeten Paketfugen werden bei einer neuerlichen Erwärmung der Fahrbahn wieder zusammengesoben. Sofern dann bereits die anderen Kerbstellen gerissen sind, kommt es zu keiner wiederholten Öffnung. Die Paketfugen bilden sich nicht wieder.

Bei den bisherigen Betrachtungen blieb die Widerstandskraft, welche die Dübel der Fugenbewegung entgegenseetzen unberücksichtigt. Dies war im Rahmen der angestrebten Genauigkeit auch korrekt, weil diese Widerstandskraft klein ist im Vergleich zur im Betonquerschnitt übertragbaren Zugkraft. Sobald aber alle Fugen gerissen sind verbleibt der Dübelwiderstand als einzige Kraft, welche die Fugenbewegung behindert. Entsprechend muss sie bei einer Analyse der Fugenbewegungen beachtet werden. Für eine theoretische Untersuchung wurde ein einfaches Modell nach Bild 4.58 betrachtet.



**Bild 4.58:** Normalkräfte in den Fugen ohne Bewegung

Im System wirkt eine Zugkraft  $F_t$ . Diese wird über die bereits gerissenen Fugen übertragen. Die Dübel können der Fugenbewegung eine Widerstandskraft infolge Reibung von  $F_{RL}$  (linke Fuge) bzw.  $F_{RR}$  (rechte Fuge) entgegenseetzen. Solange gilt

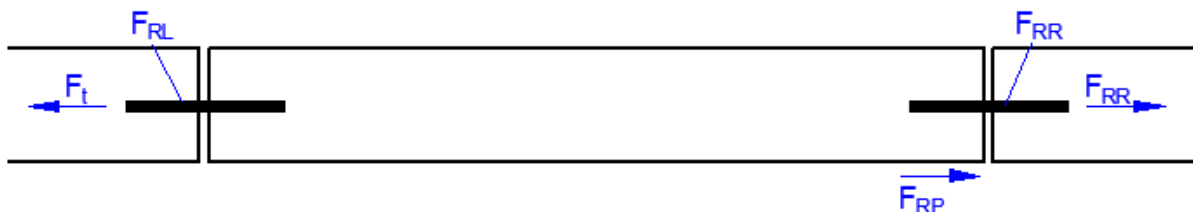
$$F_t < F_{RL} \quad (4-18)$$

und

$$F_t < F_{RR} \quad (4-19)$$

befindet sich das System im Gleichgewicht und es findet keine Fugenbewegung statt.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird angenommen, dass  $F_{RR}$  kleiner ist als  $F_{RL}$ . Wenn  $F_t$  größer wird als  $F_{RR}$ , kommt es zu einer Fugenbewegung. Dies führt zu einer teilweisen Entspannung des Betons unmittelbar an der Fuge. Die damit verbundene Bewegung führt zur Mobilisierung von Reibungskräften zwischen Platte und Unterlage. Wenn die Reibungskraft hinreichend groß ist, befindet sich das System wieder im Gleichgewicht und es findet keine weitere Bewegung statt (Bild 4.59).



**Bild 4.59:** Kräfte am System nach einer Fugenbewegung links.

An der rechten Fuge ist die übertragbare Kraft auf den Wert  $F_{RR}$  begrenzt. Zusätzlich wirkt die Reibungskraft unter der Platte  $F_{RP}$ . Es gilt:

$$F_t = F_{RR} + F_{RP} \quad (4-20)$$

Die Reibungskraft ist identisch mit der Zugkraft im Endbereich und kann deshalb mit Formel (4-14) berechnet werden. Für die maximal mögliche Reibungskraft ergibt sich:

$$F_{RP.max} = h \cdot b \cdot \rho \cdot \mu \cdot l_p \quad (4-21)$$

$l_p$  - Plattenlänge

Damit ist auch ein Maximalwert für  $F_t$  gegeben. Unter Verwendung von Gleichung (4-20) ergibt sich:

$$F_{t.max} = F_{RR} + F_{RP.max} \quad (4-22)$$

Eine Fugenbewegung links tritt ein, wenn  $F_t$  größer wird als  $F_{RL}$ . Dieser Fall kann nur eintreten, wenn  $F_{RL}$  kleiner ist als  $F_{t.max}$ . Die Bedingung für ein Blockieren der Fuge lautet also in mathematischer Form:

$$F_{RL} > F_{t.max} \quad (4-23)$$

Unter Verwendung von Gleichung (4-22) ergibt sich:

$$F_{RL} > F_{RR} + F_{RP.max} \quad (4-24)$$

bzw.

$$|F_{RL} - F_{RR}| > F_{RP.max} \quad (4-25)$$

Die Fuge bleibt blockiert, wenn die Differenz der Widerstandskräfte, welche die Dübel in zwei aufeinanderfolgenden Fugen der Bewegung entgegensetzen größer ist als die Reibungskraft zwischen Platte und Unterlage. Bei weiter sinkenden Temperaturen bleibt  $F_t$  dann konstant. Die dafür erforderliche Entspannung wird realisiert, indem die gesamte Platte verschoben wird. An der rechten Fuge ergeben sich zusätzliche Öffnungsweiten.

Gleichung (4-21) zeigt, dass  $F_{RP.max}$  linear von der Plattenlänge abhängt. Um die Beweglichkeit der Fugen sicherzustellen, müssen bei kürzeren Platten also kleinere Differenzwerte für die Dübelwiderstände eingehalten werden. Bei 3 m-langen Platten dürfen die Differenzwerte nur 60 % der für 5 m-lange Platten zulässigen Werte betragen.

Da die Dübel im Wesentlichen als identisch anzusehen sind, können sich unterschiedliche Widerstandswerte nur durch Abweichung beim Einbau ergeben. Die Verwendung kurzer Platten erfordert also eine erhöhte Genauigkeit beim Einbau der Dübel. Dies gilt in besonderem Maße für die exakte Ausrichtung in Fahrtrichtung.

### 4.3.3 Bewertung

Kleine Plattengeometrien bieten den Vorteil, dass Spannungen und Verformungen deutlich geringer ausfallen als bei den bisher verwendeten Plattengeometrien. Dies führt zum einen dazu, dass geringere Deckendicken notwendig sind und zum anderen zu einem verbesserten Fahrkomfort aufgrund der verringerten Verformungen. Auch wird die im Nutzungszustand zu erwartende Schallemission durch die vor der Einwirkung der Verkehrslast vorhandenen Plattenvorformung beeinflusst. Die kleineren Verformungswerte der kürzeren Platten wirken sich hier positiv aus.

Vorteilhaft ist weiterhin, dass sich die Öffnungsweite der Fuge verkleinert. Damit wird das Fugenfüllmaterial weniger gedehnt und die Zugspannung an den Fugenflanken reduziert sich. Im Ergebnis verbessert sich die Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit der Fugendichtung.

Nachteilig ist hingegen die Erhöhung der Anzahl der Fugen, die sich aufgrund der kürzeren Querfugenabstände ergibt.

Kleinere Platten weisen zudem eine kleinere Reibungskraft an der Unterseite auf, wodurch sich die Gefahr, dass eine Fuge blockiert, erhöht. Bei der Verwendung kurzer Platten muss daher auf eine erhöhte Genauigkeit beim Einbau der Dübel geachtet werden, um ein Blockieren zu verhindern. Dies gilt in besonderem Maße für die exakte Ausrichtung in Fahrtrichtung.

Trotz der genannten negativen Aspekte ist es technischer Sicht die Verwendung kleiner Platten zu favorisieren. Wie weiter oben erläutert wurde ist alternativ nur die Verwendung sehr großer Platten möglich. Deren Nachteile sind so gravierend, dass von einer Anwendung abgeraten wird.

## **4.4 Benötigte Materialeigenschaften und deren experimentelle Ermittlung**

### **4.4.1 Unterlage**

Wie die in Abschnitt 4.2.3 beschriebene Untersuchung gezeigt hat, sind alle standardisierten Unterlagen für die Betondecke als hinreichend tragfähig zu betrachten. Hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung der Fahrbahnplatten gibt es keine relevanten Unterschiede. Insofern bedarf es keiner tiefergehenden rechnerischen Simulation. Die Ermittlung spezieller Materialparameter ist an dieser Stelle also nicht notwendig.

Von größerer Bedeutung sind die Eigenschaften der Unterlage, welche sich auf die Dauerhaftigkeit beziehen, wie z. B. Frostbeständigkeit, chemische Beständigkeit oder Umlagerungsbeständigkeit. Diese Eigenschaften waren jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

### **4.4.2 Fugenmaterial**

Wie unter Punkt 3.1.1 festgestellt, sind kleine Fugenspaltbreiten vor allem aus lärmtechnischen Gründen vorteilhaft. Das bedeutet allerdings, dass Dehnungen bzw. Stauchungen bis zu 100% auftreten können. Bisher übliche kalt bzw. heiß verarbeitbare Fugenmassen können das nicht leisten. Zudem würden erhebliche Verformungen auftreten, da das Volumen des Fugenfüllmaterials konstant bleibt. Das Fugenmaterial würde bei Abkühlung den Fugenspalt nicht mehr komplett ausfüllen (siehe Bild 3.11) und außerdem würden hohe Randspannungen an der Verklebungsfläche zur Fugenflanke auftreten. Bei Erwärmung würde das Fugenfüllmaterial aus der Fuge herausquellen.

Fugenbänder, die Hohlräume besitzen (siehe Bild 3.12) sind per se besser geeignet, wenn sie auch bei Abkühlung noch unter Vorspannung stehen. Es ist jedoch mehr als fraglich, ob solche Fugenbänder bei Fugenöffnungsweiten zwischen 3 und 6 mm (ohne Fase) einsetzbar sind.

Neuartige Fugenfüllmassen sollten aus einem Material bestehen, das genügend geschlossene Luftporen enthält, um die erforderlichen Dehnwege realisieren zu können. Dabei ist es wichtig, dass auch eine solche Fugenfüllmasse immer unter einer gewissen Vorspannung steht, um die Dichtheit der Fuge zu gewährleisten. Des Weiteren kommen auch Fugenfüllstoffe in Frage, die eine definierte Quellwirkung unter Einwirkung von Feuchtigkeit aufweisen. Andere Eigenschaften, wie die Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit sowie eine mechanische Widerstandsfähigkeit müssen ebenfalls gegeben sein. Die mechanische Widerstandsfähigkeit betrifft auf Grund der schmalen Fugen nicht die infolge Verkehrsbelastung, da die Aufstandsklötzchen der Reifen größer sind als die Fugenspaltbreite. Es geht vielmehr um eine gewisse Verhinderung des Einfahrens von Feststoffen in das Fugenfüllmaterial, was wahrscheinlich nicht vollständig verhindert werden kann. Dieser Effekt führt zur Begrenzung der Lebensdauer des Fugenfüllmaterials.

Das Einbringen neuartiger Fugenmassen bei 3 bis 6 mm schmalen Fugenspaltbreiten erfordert auch neue technologische Einbauprozesse, bei denen menschliche Fehlerquellen nahezu beseitigt sind.

### **4.4.3 Beton**

Zur Erreichung optimaler Gebrauchs- und Substanzeigenschaften spielt der Fahrbahndeckenbeton eine entscheidende Rolle.

Hinsichtlich einer dauerhaften Ebenheit sind keine besonderen Anforderungen zu stellen, da bereits normale Betonfestigkeiten ausreichen, um beispielsweise eine Spurrinnenbildung zu vermeiden. Dauerhafte Griffigkeiten setzen voraus, dass die Mikro- und Makrotextur der Oberfläche erhalten bleiben oder sich immer wieder nachschärfen (Mikrotextur). Das Drainagevermögen ist im Wesentlichen von dem Erhalt der Makrotextur und einer ausreichenden Quer- und Längsneigung abhängig. Der Rollwiderstand ist umso geringer, je ebener und verformungsbeständiger die Oberfläche der Fahrbahndecke ist. Eine gute und dauerhafte Lärminderung wird erreicht, indem die Textur der Fahrbahnoberfläche möglichst langfristig erhalten bleibt. In der Summe der Gebrauchseigenschaften kann festgestellt werden, dass eine hohe Festigkeit und Oberflächenhärte des Betons angestrebt werden sollte.

Mit guten Substanzeigenschaften soll eine möglichst langlebige Konstruktion realisiert werden. Dazu muss die Betonfahrbahndecke den Einwirkungen aus Verkehr und Witterung standhalten. Auch hier ist eine hohe Festigkeit, insbesondere Zugfestigkeit des Oberbetons anzustreben. Die FEM-Berechnungen (siehe Punkt 3.6 und 3.7) haben gezeigt, dass weitere Materialeigenschaften zu niedrigeren Spannungen im Plattensystem bei gleicher Verkehrs- und Witterungsbelastung führen. An erster Stelle ist hier ein niedrigerer E-Modul des Betons von Vorteil, aber auch eine niedrigere Wärmedehnzahl führt zu geringeren Spannungen. Das bedeutet, dass beim Einsatz von Betonen mit niedrigem E-Modul und kleiner Wärmedehnzahl auch geringere Festigkeiten (Zugfestigkeiten) bei gleicher Deckendicke akzeptiert werden können. Im Sinne der Nachhaltigkeit werden Betone üblicherweise aus den regional vorkommenden Gesteinskörnungen und den im Umkreis verfügbaren Zementen hergestellt. Diese Verfahrensweise sollte auch in Zukunft nicht unterbunden werden. Somit ergibt sich künftig das Erfordernis, die Dimensionierung einer Betondecke nicht nur an der Spaltzugfestigkeit auszurichten, sondern auch das E-Modul und die Wärmedehnzahl zu bestimmen. Verfolgt man diesen Gedanken weiter, führt das zu einer weiteren Differenzierung bei der rechnerischen Dimensionierung, die von den regionalen brauchbaren Gesteinsvorkommen und den regional verfügbaren Zementen abhängig ist. Diese Aufgabe ist mit einem überschaubaren Aufwand leistbar, da zur Vermeidung einer schädigenden AKR die verwendbaren Gesteinskörnungen und Zemente begrenzt sind.

Im Hinblick auf eine Pilotanwendung sollten daher im Vorfeld folgende Eigenschaften in Laborversuchen ermittelt werden:

1. Spaltzugfestigkeit (Ober- und Unterbeton)
2. Druckfestigkeit (Ober- und Unterbeton)
3. E-Modul (Ober- und Unterbeton)
4. Wärmedehnzahl (Ober- und Unterbeton)
5. Witterungsbeständigkeit der Oberflächentextur (Oberbeton)
6. Abriebfestigkeit der Oberflächentextur (Oberbeton)

Da es sich bei den Prüfgrößen um sich zeitlich bzw. verkehrsabhängig verändernde Parameter handelt, sollten diese in situ turnusmäßig überprüft werden, um entsprechende Verhaltensfunktionen aufstellen zu können.

## 5 Empfehlungen zur Modifizierung der Konstruktion und Pilotkonzept

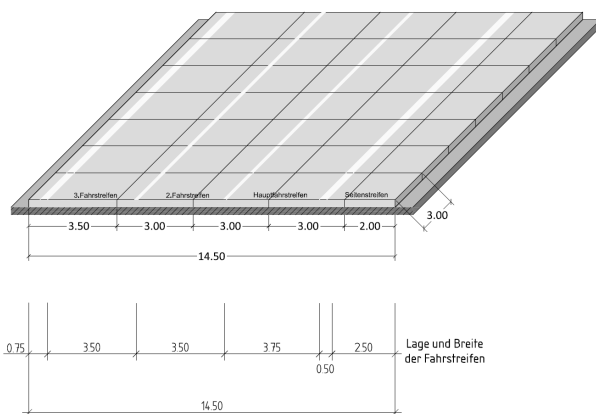
### 5.1 Vorstellen der verbesserten Konstruktion

#### 5.1.1 Konstruktion

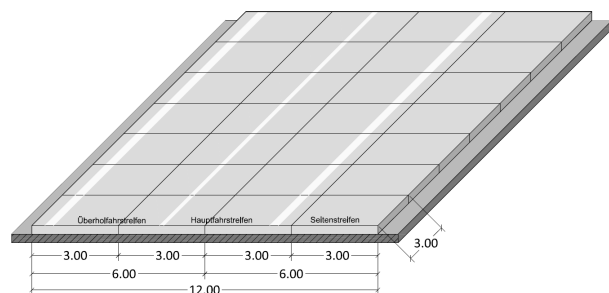
Wie in Abschnitt 4.1.1 ausführlich erläutert wurde, erzwingen die neuen Richtlinien zum Arbeitsschutz an Straßenbaustellen eine Veränderung der bisher üblichen Plattengeometrien insbesondere bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass Betondeckenkonstruktionen mit verhältnismäßig kleinen Plattengeometrien vorteilhaft sind. Dies betrifft nicht nur die Oberflächeneigenschaften insbesondere bedingt durch die deutlich kleineren Plattenverformungen und Fugenbewegungen sondern auch die Substanzeigenschaften durch signifikant verringerte Spannungsverhältnisse.

Die am meisten angewendete Regelquerschnitte im Autobahnbau sind der RQ 36 und der RQ 31. Das folgende Bild 5.1 zeigt eine verbesserte Plattengeometrie und eine mögliche Fugenaufteilung, die einerseits gut zur Markierung passt und andererseits die Längsfuge im Hauptfahrstreifen nicht in der Rollspur liegen lässt.

RQ 36



RQ 31



**Bild 5.1:** Plattengeometrien in Relation zur Markierung

Bezüglich der Lärmemission bringen die kleineren Plattenabmessungen keine Verbesserung. Die erhöhte Anzahl von Querfugen kann diesbezüglich sogar nachteilig wirken. Bei Einhaltung geringer Fugenbreiten können negative Effekte aber vermieden werden. Generell ist zur Reduzierung der Lärmemission ein Texturgrinding zu empfehlen. Mit dieser Maßnahme (Grinding A) lässt sich eine Verminderung des emittierten Schalldruckpegels im optimalen Fall keiner bzw. geringer Störungen in der Fahrbahnoberflächentextur von bis zu 6 dB(A) erzielen.

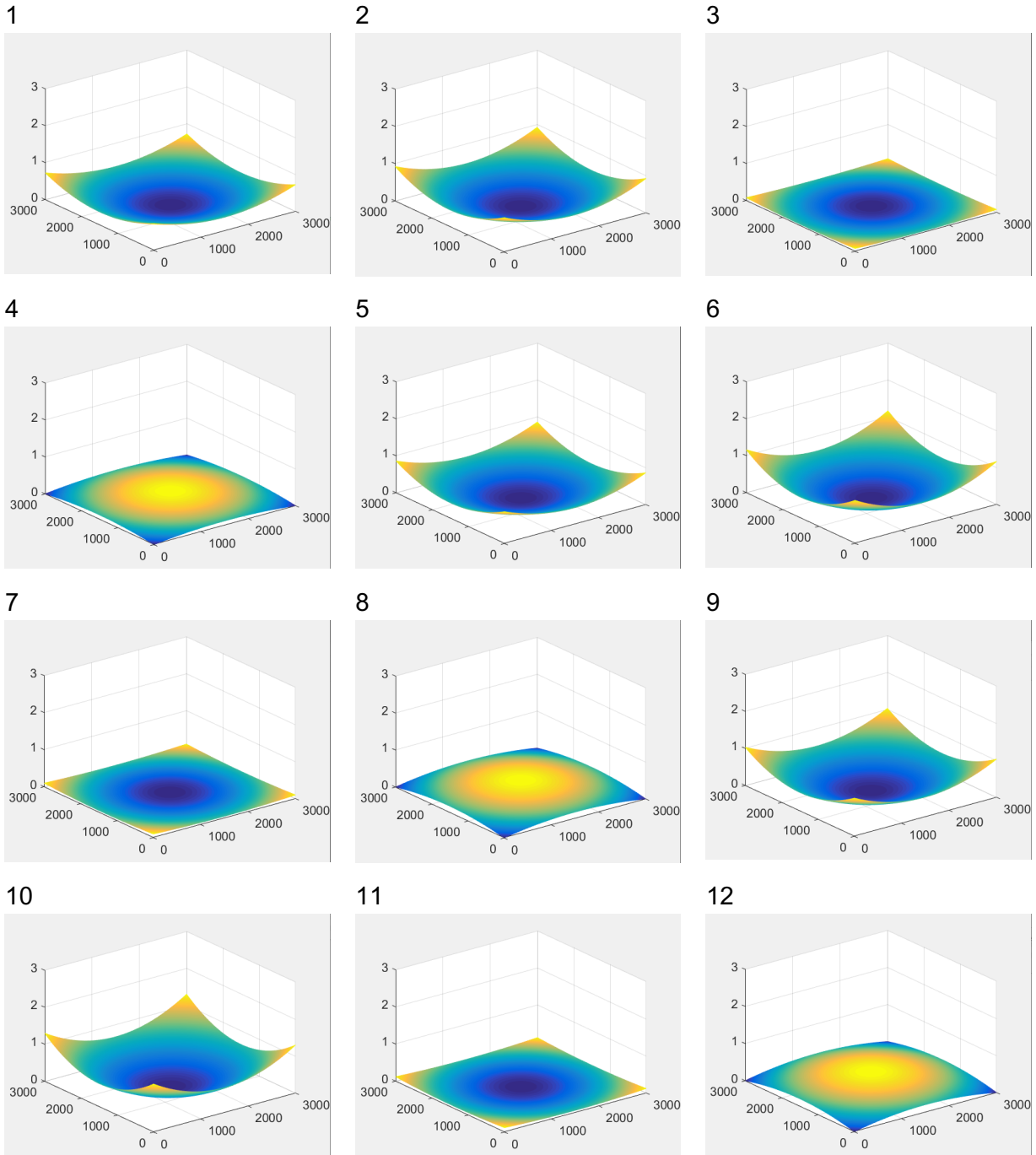
Weitere Veränderungen in Konstruktion und Planung der Betonfahrbahn werden empfohlen (siehe Abschnitt 5.2) erscheinen aber nicht kurzfristig in die Praxis überführbar.

#### 5.1.2 Simulation der Lärmemission bei kleinen Platten

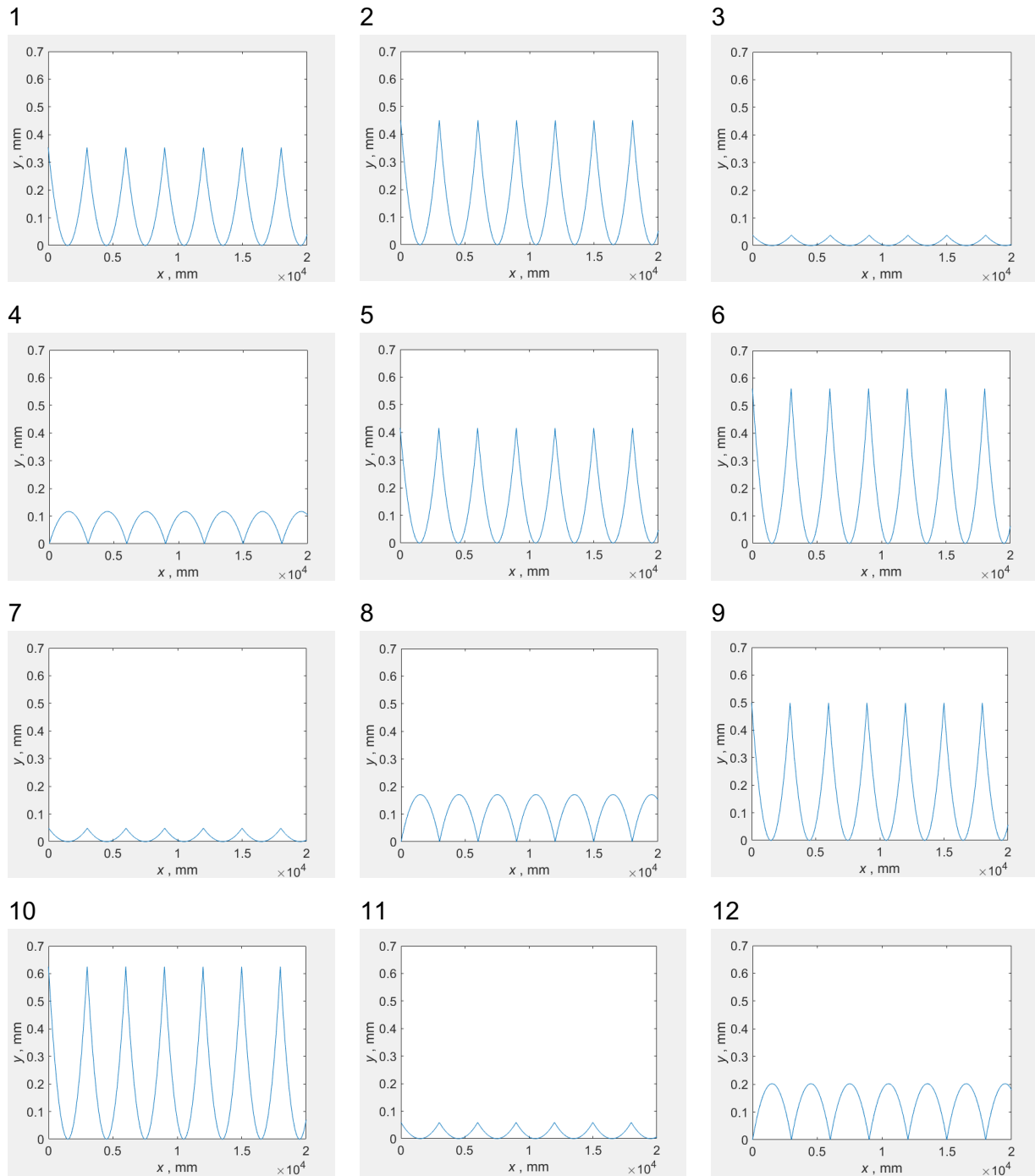
Aus den bautechnischen und akustischen Parameterstudien haben sich Parametersätze für die sogenannte „empfohlene Konstruktion“ ergeben, die zu den in Tab. 4.21 aufgeführten zwölf Rechenfällen geführt haben. Diese zwölf Konstruktions-/Verformungsfälle wurden mit der Textur Grinding A auch akustisch simuliert. Alle zwölf Verformungsfälle wurden mit folgenden Werten der übrigen Fahrbahnoberflächenparameter berechnet:

- 
- Querfugenabstand  $a = 3,0$  m
  - Plattenbreite  $b = 3,0$  m, Radrollspur im Abstand von 1 m zum Plattenrand
  - Fugenöffnungsweite  $w = 10$  mm
  - Fugenfüllhöhe  $h = -1,0$  mm
  - Höhenversatz  $M = -0,5$  mm
  - Steifigkeit des Fugenfüllmaterials  $s = 2,5 \cdot 10^6$  N/m

Bild 5.2 zeigt die Verformungen einer Platte in den zwölf Rechenfällen in einer 3D-Darstellung. Bild 5.3 enthält die Abbildungen der Fahrbahnlängsprofile über eine Länge von 20 m in der Radrollspur in 1 m Entfernung zum Rand der 3 m breiten Platten für die zwölf Rechenfälle. Fugen sind in diesen generischen Profilen noch nicht enthalten. In den Abbildungen wird deutlich, dass die Überhöhungen in den Radrollspuren bei den aufgeschüsselten Platten der empfohlenen Konstruktion nicht mehr über 0,7 mm gegenüber dem Tiefpunkt des jeweiligen Profils hinausgehen.



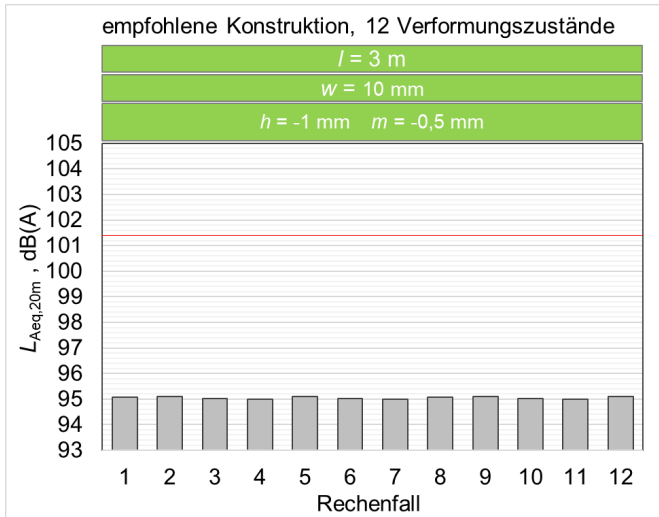
**Bild 5.2:** 3D-Darstellung der zwölf in der akustischen Simulation für die empfohlene Konstruktion untersuchten Rechenfälle. Alle Maße in mm.



**Bild 5.3:** Längsprofile der Radrollspur über eine Länge von 20 m in 1 m Querabstand zum Plattenrand für die Verformungen der zwölf Rechenfälle für die empfohlene Konstruktion, ohne Fugen.

Die akustische Simulation hat zu den in Bild 5.4 dargestellten Werten des mittleren Rollgeräuschpegels über die 20 m Länge der simulierten Fahrbahnabschnitte geführt.





**Bild 5.4:** Akustische Simulation der zwölf Fälle für die empfohlene Konstruktion. Mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h. Die rote Linie kennzeichnet den Vergleichswert für Ableitung von  $D_{SD}$ -Werten nach den RLS-19.

Mit dem auf 3,0 m weiter verkürzten Querfugenabstand bei der empfohlenen Konstruktion ist, wie in Kapitel 3.7 diskutiert, grundsätzlich mit einem gegenüber den in der akustischen Parameterstudie untersuchten Fahrbohnoberflächen nochmals erhöhten Eintrag hochfrequenter Energie in den Reifen-Fahrbohn-Kontakt zu rechnen. Gleichwohl wirkt sich diese Verschärfung jedoch aufgrund der günstigen Werte der übrigen Fahrbohnoberflächenparameter kaum auf das Reifen-Fahrbohn-Geräusch aus. Dabei spielt die kleine Fugenöffnungsweite von 10 mm eine wichtige Rolle.

## 5.2 Zusammenstellen von relevanten Aspekten, die bei der weiteren Regelwerks-erstellung zu beachten sind

Ergänzend zu den in Abschnitt 5.1 konkret vorgeschlagenen Veränderungen der Regelbauweise sind auch langfristige Weiterentwicklungen anzustreben. Diese sind vielfach unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht unmittelbar umsetzbar bzw. erfordern weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Mittel- und langfristig ist aber eine Realisierung entsprechender Maßnahmen erforderlich, um die Betonbauweise als konkurrenzfähige Technologie in Deutschland zu erhalten.

Eine grundsätzliche Orientierung für die Weiterentwicklung der Regelbauweise ist durch die eingangs formulierten Zielfunktionen (Abschnitt 2.4.1 / 2.4.2) vorgegeben. Jegliche Veränderung der Regelbauweise sollte mit einer besseren Erfüllung einer oder mehrerer Zielfunktionen einhergehen. Wie die rechnerischen Analysen zeigten, ist aber bereits durch die erwartete Klimaänderung diesbezüglich mit einer, allerdings moderaten, Verschlechterung zu rechnen. Dies betrifft speziell die Grundforderungen „gutes Nutzererlebnis“ und „Wirtschaftlichkeit“. Eine Weiterentwicklung der Regelbauweise ist also bereits geboten, um das vorhandene Niveau zu sichern.

Auf der Grundlage der innerhalb des vorliegenden Projektes durchgeführten Analysen und Berechnungen konnten Maßnahmen formuliert werden, die geeignet sind, eine bessere Erfüllung der Zielfunktionen zu realisieren.

### (1) Bessere Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen beim Herstellungsprozess

Es ist seit langem bekannt, dass die klimatische Randbedingungen (Temperatur, Feuchte, Wind) einen signifikanten Einfluss auf die Qualität des hergestellten Betons haben. Dem wird auch in der bisherigen Herstellungspraxis durch Anforderungen an die Lufttemperatur bzw. verschiedene Nachbehandlungsmaßnahmen Rechnung getragen.

Tieferegehende Analysen des mechanischen Verhaltens der Betonfahrbahn und auch empirische Befunde lassen aber erkennen, dass es in diesem Bereich ein erhebliches Optimierungspotential gibt. Der Hydratations- und Erhärtungsvorgang des Betons ist ein komplexer Prozess, welcher mit ständig wechselnden nichtlinearen Temperatur- und Feuchtezuständen im Bauteilvolumen verbunden ist. Parallel zu der sich erhöhenden Festigkeit entwickeln sich Zwangsspannungen. Im Ergebnis entsteht eine Fahrbahnplatte mit einem eingprägten Verformungs- und Spannungszustand. Die im Zuge der Projektbearbeitung durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass Zwangsspannungen und Vorverformungen einen starken Einfluss auf die mechanische Beanspruchung der Fahrbahnplatten haben (Abschnitt 3.6.5). Das Ergebnis des Hydratations- und Erhärtungsprozesses, welches maßgeblich durch die zufällig vorhandenen klimatischen Randbedingungen beeinflusst wird, bestimmt also dauerhaft, in starkem Maße das Beanspruchungsniveau der Fahrbahnplatte und damit auch die Lebensdauer (Zielfunktion ZF W K).

Weiterhin ist zu beachten, dass die angesprochenen Zwängungen, welche sich in den ersten Tagen der Betonhärtung ergeben, zu Mikrorissbildungen und versteckten Schäden führen können (siehe Abschnitt 3.6.7). Manche in der Praxis zu beobachtende Schadensbilder sind kaum anders zu erklären.

Die Maßnahmen, mit denen aktuell in der Baupraxis versucht wird, den Hydratations- und Erhärtungsprozess in der gewünschten Weise zu beeinflussen, sollten weiterentwickelt werden. Es wird empfohlen, auf der Grundlage der schon vorhandenen umfangreichen Forschung zu dieser Thematik sowie ergänzender schwerpunktmäßiger Untersuchungen Klimakonstellationen zu identifizieren, welche als besonders schädlich zu betrachten sind. Mit entsprechenden bauvertraglichen Regelungen sollte eine Herstellung unter diesen Bedingungen ausgeschlossen werden bzw. geeignete Kompensationsmaßnahmen erforderlich machen. Die damit einhergehende Erhöhung der Baukosten erscheint klein gegenüber der zu erwartenden Qualitätssteigerung.

### (2) Zielgerichtete Steuerung der Materialparameter des Betons

Die aktuell für den Betonstraßenbau gültigen Normen enthalten bereits verschiedenen Anforderungen an den Beton bzw. dessen Bestandteile. Nicht beachtet werden bislang die Parameter, welche die Steifigkeit und die Wärmedehnung quantifizieren. Die im Zuge der Projektbearbeitung durchgeführten Serienrechnungen (Abschnitt 3.6.5) belegen aber eindrucksvoll, dass diese Materialeigenschaften einen sehr großen Einfluss auf die Spannungen in der Betonplatte und vor allem auf die Verformung haben. Damit wird mittelbar auch der Fahrkomfort und die Lärmemission beeinflusst (Zielfunktion ZF S E / ZF U L).

Die rechnerische Analyse, welche auch durch empirische Daten gestützt wird, ergab eindeutig, dass ein hoher E-Modul und eine hohe Wärmedehnzahl sich negativ auf den Spannungs- und Verformungszustand auswirken. Da sich die genannten Effekte vor allem durch temperaturinduzierte Belastungen ergeben, wird sich im Zuge der prognostizierten allgemeinen Temperaturerhöhung der beschriebene Einfluss noch verstärken (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Die Vernachlässigung dieser Materialparameter erscheint vor diesem Hintergrund nicht mehr vertretbar. Perspektivisch sollten einheitlich Messverfahren für diese Materialwerte definiert und die Betonrezepturen entsprechend untersucht werden. Die so ermittelten Parameter sind in der Dimensionierung zu berücksichtigen.

Es sollte geprüft werden, ob auf besonders ungünstige Rezepturen ganz verzichtet werden kann. Ebenso ist eine starke Variation der Materialparameter zwischen Ober- und Unterbeton abzulehnen.

Perspektivisch wären Betone mit hoher Festigkeit und gleichzeitig niedrigem E-Modul anzustreben. Ideal wäre eine gewisse Duktilität.

### (3) Verbesserung der Fugenkonstruktion

Die Fuge, speziell die Querfuge, ist bekanntermaßen ein Schwachpunkt in der Fahrbahnkonstruktion. Viele Schädigungsprozesse haben hier ihren Ausgangspunkt. Als Initialschaden ist oftmals die ungenügende Beweglichkeit einzelner Fugen zu verzeichnen, welche zu vergrößerten Öffnungsweiten bei anderen Fugen führt. Daraus resultierende Undichtigkeiten lassen Wasser eindringen, welches im Zusammenspiel mit

Frost und ständigen verkehrsbedingten Pumpbewegungen zu einer Erosion der Unterlage führt. Tangiert sind hier verschiedenen Zielfunktionen (ZWW D, ZWW K, ZFW BK).

Allgemein befriedigend ist bei der gegenwärtig praktizierten verdübelten Fuge dagegen die Effizienz der Querkraftübertragung. Hier ist allerdings festzustellen, dass es im Laufe der Jahre zu einer teilweisen Lockerung kommt, wobei die Wirksamkeit der Querkraftübertragung leicht abnimmt. Gleichzeitig kommt es zu einer, wenn auch geringen Stufenbildung. Diese findet gegenwärtig in Deutschland wenig Beachtung. Um steigenden Anforderungen an Fahrkomfort, Lärmemission und Umweltschutz gerecht zu werden (Zielfunktion ZF S E / ZF U L / ZF U C / ZF U E), muss dieser Sachverhalt aber in den Blick genommen werden.

In einem ersten Schritt sollte die Regelkonstruktion verbessert werden. Zielstellung sollte es sein, die Beweglichkeit jeder Fuge sicher zu stellen. Wie in Abschnitt 4.3.2 erläutert wurde, ist dies bei kürzeren Platten von besonderer Bedeutung. Dazu ist es notwendig, die Dübel exakt auszurichten (vgl. Abschnitt 3.6.7). Außerdem sollte die Haftreibung zwischen Dübel und Beton durch eine Optimierung der Beschichtung vermindert werden.

Um die Konstruktion der Betonfahrbahn in diesem Punkt grundlegend zu verbessern, ist aber eine grundsätzliche Neukonstruktion der Fuge erforderlich. Es wird angenommen, dass eine unter verschiedenen klimatischen Bedingungen dauerhaft dichte Fuge nur mit einem permanent vorgespannten Dichtmaterial realisiert werden kann. Gleichzeitig muss der Reibungswiderstand der Fugenkonstruktion kleiner sein als die Reibungskraft, welche die Platte auf der Unterlage aktiviert. So ist zuverlässig gesichert, dass jede Fuge beweglich ist. Die Konstruktion zur Querkraftübertragung sollte keine Spannungsspitzen erzeugen, um Lockerungserscheinungen zu vermeiden. Weiterhin ist im Interesse einer Lärmreduktion anzustreben, dass der Fugenspalt auf eine Weite von ca. 6mm reduziert wird.

In Abschnitt 4.2.2 wurde eine Fugenkonstruktion vorgeschlagen, die diese Anforderungen erfüllt. Bei planmäßiger Funktion ergeben sich Verbesserungen im Sinne der Zielfunktionen ZF S E, ZF S SF, ZF S H, ZF W K, ZF W FD und ZF U L.

Da die Kosten einer derartigen Fugenkonstruktion vergleichsweise hoch sind, verschiedene Detailprobleme noch ungelöst sind und der Nutzen erst nach vielen Jahren spürbar wird, ist die tatsächliche Umsetzung derartiger Konstruktionsvarianten unwahrscheinlich. Dennoch wird eine nachhaltige Verbesserung des Systems Betonfahrbahn nur mit neuen technischen Lösungen möglich sein, welche naturgemäß nicht immer einfach und billig sind.

#### (4) Zielgerichte Dimensionierung (ZFW D)

Eine auf konkrete Standortbedingungen und Materialeigenschaften abgestimmte Konstruktion ist nur mit einer rechnerischen Dimensionierung realisierbar. Das vorhandene Dimensionierungssystem sollte so weiterentwickelt werden, dass eine schrittweise Annäherung der verwendeten Berechnungsmodelle an die realen Gegebenheiten erfolgt. Eine wichtige Maßnahme in diesem Sinne ist die Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) bei der Berechnung der Spannungen und Verformungen. Die Definition der FEM-Modelle sollte so erfolgen, dass eine Erweiterung und Präzisierung ohne grundlegende Änderungen möglich ist.

Bei den Lastannahmen sollte der Übergang von rein modellorientierten Lasten (Einzelrad) zu realitätsnahen Lastbildern (Achskonfigurationen) angestrebt werden.

Die temperaturbedingten Einwirkungen können nur mit nichtlinearen Temperaturzuständen realistisch beschrieben werden. Die derzeit übliche Beschränkung auf den Ansatz linearer Temperaturverläufe sollte mittelfristig überwunden werden.

Materialunterschiede zwischen Ober- und Unterbeton haben einen relevanten Einfluss auf das mechanische Verhalten der Platten und sind deshalb im Modell abzubilden.

Mit der Anwendung der FEM sind die genannten Forderungen prinzipiell umsetzbar. Auch die Interaktion zwischen benachbarten Platten sowie den Platten und dem Untergrund kann realitätsnah simuliert werden.

Eine nicht triviale Aufgabe ist die Definition repräsentativer Lastbilder und Lastkombinationen. Diese bilden die Grundlage für die Formulierung geeigneter Nachweisformate. Diese müssen, wie im aktuell gültigen Dimensionierungsverfahren, sowohl die Sicherheit gegenüber einer extremen Belastung wie auch gegenüber einer allmählichen Ermüdung sicherstellen.

Eine echte Herausforderung stellt die Kombination der FEM mit probabilistischen Methoden dar. Dies ist nur möglich, wenn die Rechenzeit bei den FEM-Berechnungen auf ein Minimum reduziert wird.

Die skizzierten Aufgaben erfordern umfangreiche Änderungen im bisherigen Dimensionierungsverfahren. Da das Verfahren aber jederzeit konsistent und für den gesamten zulässigen Parameterraum abgesichert sein muss, ist eine schrittweise Abarbeitung kaum möglich. Die Einführung des FEM-gestützten Verfahrens erfordert die gleichzeitige Umsetzung verschiedener anderer Maßnahmen.

### **5.3 Entwurf einer Pilotanwendung inklusive Ausschreibungsunterlagen für Dimensionierung und Konstruktion**

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sollen in einer Pilotanwendung entsprechend umgesetzt werden. Hierfür wurden im Folgenden erste Textbausteine für eine Baubeschreibung und ein Leistungsverzeichnis zusammengetragen bzw. erstellt. Die Textteile sind auf die entsprechende Baumaßnahme anzupassen. Eine Garantie auf Vollständigkeit kann daher nicht gegeben werden.

Es ist vorgesehen, eine rechnerisch dimensionierte Betondecke auf einer 10 cm dicken Asphalttragschicht (ATSuB) mit Plattenbreiten im Hauptfahrstreifen von 3,0 m x 3,0 m herzustellen. Die Fugen sind möglichst schmal herzustellen und mit Fugenprofilen zu schließen.

#### **5.3.1 Textteile Baubeschreibung**

##### **Zu 0 VORBEMERKUNGEN**

###### **Zu 0.1 Anwendung der RDO Beton 09**

Durch den Bieter soll auf der Grundlage einer Dimensionierung des Straßenoberbaus nach den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“ (RDO Beton 09) ein Straßenoberbau in Betonbauweise so angeboten werden, dass bei der vorgegebenen Verkehrsbelastung eine **Nutzungsdauer von 30 Jahren** für die Gesamtkonstruktion erreicht wird.

Den RDO Beton liegt ein semiprobabilistisches Verfahren zu Grunde, das eine definierte Ausfallrate zum Ende der normativen Nutzungsdauer postuliert. Bei Anwendung der Software AWDSTAKO, Version 1.7 ist die Erfüllung des Sicherheitskriteriums gemäß RDO Beton automatisch gegeben. Sollte die Berechnung auf anderem Weg erfolgen, ist die Einhaltung des Sicherheitsniveaus der RDO Beton exakt nachzuweisen.

Entsprechend der Vorgaben aus der Dimensionierung werden die vorhandenen Schichten in einer vom Bieter festzulegenden Dicke so ausgebaut, dass unter Einhaltung des Deckenbuchs die Betondecke auf einer 10 cm dicken Asphalttragschicht hergestellt werden kann.

Die Angaben zu den Materialeigenschaften des Oberbaus sind vollständig gemäß den Vorgaben aus Anlage 1 („Erforderliche Angaben und Voraussetzungen für die Dimensionierung von Betondecken nach den RDO Beton 09“) zur Baubeschreibung mit der Abgabe des Angebotes mitzuteilen.

Die Berechnungsergebnisse sind dem Angebot beizulegen und rechtskräftig zu unterschreiben.

**Die mit der Dimensionierung verbundenen Aufwendungen sind in die Einheitspreise einzurechnen und werden nicht gesondert vergütet.**

### Rechnerische Dimensionierung des Oberbaus

Die Dimensionierung des Hauptfahrstreifens für die BAB AXX erfolgt rechnerisch anhand der „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“ (RDO Beton 09 (FGSV-Nr. 497)) lt. Tabelle 5.2 Variante 3.1.

Bereiche vor und hinter A-Bauwerken werden gemäß Lageplan und Regelquerschnitt in Asphaltbauweise nach RStO 12 ausgeführt. Eine rechnerische Dimensionierung für diese Flächen kann entfallen, die Anforderungen gemäß Punkt 3.5 sind dennoch einzuhalten.

Folgender Oberbau ist vorgesehen:

$h_d$ cm	Betondecke mit C30/37 nach ZTV Beton-StB und StC 30/37 – $f_{ctk,core}$ gemäß RDO Beton 09, $f_{ctk,core} \geq 3,0$ MPa
10,0 cm	Asphalttragschicht (ATSuB) gemäß RDO Beton 09 auf vorhandener Frostschuttschicht ( $E_{v2} \geq 120$ MPa)

Die maßgebende Plattengeometrie im Hauptfahrstreifen beträgt 3,00 m x 3,00 m. Die übrigen Plattenbreiten sind so anzupassen, dass im Hauptfahrstreifen keine Längsfuge in den Radrollspuren liegt und das Seitenverhältnis gemäß ZTV Beton-StB eingehalten wird.

Der Bieter hat die Betondecke gemäß RDO Beton 09 zu dimensionieren.

Die zugrunde gelegten Eingangswerte einschließlich der charakteristischen Spaltzugfestigkeit  $f_{ctk,core}$  sowie die ermittelte Solldicke  $h_d$  sind in Anlage 1 zur Baubeschreibung zu dokumentieren und mit dem Angebot abzugeben.

Die vom Auftragnehmer im Rahmen seines Angebots angebotenen dimensionierungsrelevanten Qualitätsparameter werden als Anforderungswerte für die Betondecke vereinbart und in der Kontrollprüfung überprüft.

Die anzugebende Solldicke  $h_d$  entspricht der charakteristischen Deckendicke nach den RDO Beton 09 beim unteren 10 %-Quantil, sie ist auf den halben Zentimeter genau anzugeben.

Ein hinreichendes Vorhaltemaß für den Einbau ist vom AN selbst zu wählen.

Der anzugebende Spaltzugfestigkeitswert  $f_{ctk,core}$  entspricht dem charakteristischen Spaltzugfestigkeitswert beim unteren 5 %-Quantil, er ist auf 0,1 MPa genau anzugeben und darf 3,0 MPa nicht unterschreiten. Auch hier ist ein entsprechendes Vorhaltemaß bei der Herstellung erforderlich.

Für die Ermittlung der Massen im Rahmen der Ausschreibung wurde eine mittlere Betondeckendicke von xx,x cm (fiktiver Wert) angenommen, wie auch im Regelquerschnitt dargestellt. Durch die rechnerische Dimensionierung der Betondecke kann sich eine davon abweichende Mehr- oder Minderdicke ergeben. Je nach berechneter und später gebauter Betondeckendicke ändert sich die Dicke der Frostschuttschicht. Das Deckenbuch ist einzuhalten.

Der AN hat eine vollständige rechnerische Dimensionierung der Straßenbefestigung gemäß dem Verfahren der RDO Beton 09 für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren zu erstellen und darüber hinaus definierte bauweisenspezifische Angaben mit dem Angebot zu übergeben. Diese Angaben stellen die Grundlage für die Bewertung des Angebots dar und werden im Fall der Beauftragung des Bieters durch den AG zum Vertragsbestandteil. Bei einer nachträglichen Änderung der Angaben ist vom Bieter erneut der Nachweis zu führen. Für die vertragliche Wertung der fertigen Bauleistung gelten die „Empfehlungen für die Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Beton“ (FGSV-Nr. 867).

Bei der Dimensionierung der Betondecke ist folgendes zu berücksichtigen:

- Es ist ausschließlich die Betondecke mit der maßgebenden Plattengeometrie des Hauptfahrstreifens zu berücksichtigen.
- Die rechnerische Dimensionierung wird vom AG mit dem Programm AWDSTAKO Version 1.7 gemäß den RDO Beton 09 geprüft (Prüfung mit Angebot sowie nach Herstellung).

- Die Angaben gemäß nachfolgender Tabelle sind bei der rechnerischen Dimensionierung zu Grunde zu legen:

Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs (DTV <sup>(SV)</sup> ) 20xx	xxxxx Kfz/24h
Erfassungsart	
Jährliche Schwerverkehrszunahme	
Fahstreifenbreite	≥ 3,75 m
Steigung	
Achszahlfaktor $f_A$	4,5
Lastkollektivquotient $q_{BM}$	0,33
Achslastverteilung	BAB Fernverkehr
Bemessungsrelevante Beanspruchung B [äquiv. 10 t AÜ]	
Sicherheitsniveau (statistisch - semiprobabilistisch)	Ausfallrate gemäß RDO Beton 09
Normative Nutzungsdauer	30 Jahre

- Die Plattenlänge beträgt 3,00 m.
- Die Breite der Platten im Hauptfahstreifen beträgt ebenfalls 3,00 m. Die Breiten der anderen Platten sind so zu wählen, dass sich die Längsfuge im Hauptfahstreifen außerhalb der Radrollspuren und nicht unter den Markierungen befindet. Zudem ist ein Mindestabstand zum Rand der Markierung von 5 cm einzuhalten.
- Das Verhältnis der Plattenabmessungen Breite zu Länge darf nicht kleiner als 0,5 sein. Dies gilt auch für die Platten des Überholfahstreifens und des Seitenstreifens. Die Lage der Längsfugen in Relation zur Markierung ist in Anlage 1 anzugeben.

Je Platte sind 2 Anker im Abstand von 1 m bei einzubauen. Der Dübelabstand untereinander beträgt 0,25 m. Abweichend von den ZTV Beton-StB darf der Abstand der Dübel zu den Längsfugen/Außenkanten der Betondecke 0,125 m nicht unter- und 0,25 m nicht überschreiten.

Der Bieter muss über die rechnerische Dimensionierung hinaus die folgenden Angaben, unter Verwendung des Formblatts in Anlage 1 mit dem Angebot liefern:

- kurze Beschreibung vorgenommener Modifikationen und daraus resultierender besonderer Eigenschaften,
- Schichtdicken, Art und Schichtenfolge,
- Straßenbetonklasse gemäß RDO Beton 09, mit Angabe der charakteristischen Spaltzugfestigkeit,
- Berechnungsprotokolle des angewendeten Dimensionierungsverfahrens.

Für die Mittelstreifenüberfahrten, Provisorien und die Bereiche mit Asphaltoberbau (Anschlussstellen, etc.) erfolgt kein rechnerischer Nachweis. Werden die Anschlussstellen in Betonbauweise hergestellt, gelten die in der Dimensionierung zu Grunde gelegten bzw. berechneten Schichtdicken der freien Strecke mit deren baustofflichen Eigenschaften.

## **Prüfungen und vertragliche Regelungen im Zusammenhang mit dem rechnerisch dimensionierten Oberbau**

Die Kontrollprüfungen werden nach den Vorgaben der ZTV Beton-StB 07 durchgeführt und bewertet.

Ergänzend wird die Spaltzugfestigkeit nach TP B-StB 3.1.05 geprüft. Die Auswertung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit erfolgt nach den TP B-StB 3.1.05 beim 5%-Quantil. Die Prüfung und Auswertung erfolgt getrennt am Ober- und am Unterbeton.

Zusätzlich sind Bohrkern DN 350 und DN 100 zu entnehmen und dem AG zu übergeben. Diese dienen der Prüfung der Wärmedehnzahl bzw. des E-Moduls. Diese Prüfergebnisse dienen nur zur Information und stellen keine Anforderungswerte im Sinne dieses Bauvertrags dar.

Für die Dicke der Fahrbahndecke aus Beton ist zu beachten, dass statt der Einzelwerte der Deckendicke die charakteristische Dicke beim unteren 10%-Quantil eingehalten werden muss. Die Auswertung erfolgt nach den TP B-StB, Teil 0.2 „Statistische Grundlagen zur Auswertung von Prüfergebnissen“. Bei einem Austausch von Teilen der Betondecke müssen bei diesen die Anforderungen in Bezug auf Spaltzugfestigkeit und Dicke der Betondecke (jeweils Einzelwerte) erfüllt sein. Die Ergebnisse der Prüfungen an neuen Bauteilen ersetzen die Ergebnisse der ausgebauten Teilstücke.

Die im Rahmen der Dimensionierung seitens des Auftragnehmers angegebenen Werte:

- charakteristische Spaltzugfestigkeit  $f_{ctk,core}$  (DIM) des Betons und
- die charakteristische Dicke  $h$ (DIM) der Fahrbahndecke aus Beton

gelten als Anforderungswerte.

Der AG ermittelt am Bauteil Betondecke gemäß der TP B-StB 3.1.05 die charakteristischen Spaltzugfestigkeiten  $f_{ctk,core}$ (BT) getrennt für den Ober- und Unterbeton und gemäß TP B-StB, Teil 0.2 die charakteristische Deckendicke  $h$ (BT).

Die vertragliche Beurteilung der Betondecke erfolgt auf der Grundlage der „Empfehlungen für die Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Beton“ (FGSV-Nr. 867) durch Vergleich der charakteristischen Spaltzugfestigkeiten und Deckendicken der Dimensionierung mit denen auf der Grundlage der Kontrollprüfungen am Bauteil ermittelten Ergebnissen durch den AG folgendermaßen:

### **Festigkeitsvergleich (Spaltzugfestigkeit):**

Bedingung 1:  $f_{ctk,core}(DIM) \leq f_{ctk,core}(BT)$

- $f_{ctk,core}(DIM)$  = Charakteristische Spaltzugfestigkeit (5%-Quantil), die der Dimensionierung zugrunde gelegt wurde (Erstprüfung)
- $f_{ctk,core}(BT)$  = Charakteristische Spaltzugfestigkeit (5%-Quantil), die am Bauteil/Bauwerk Straße ermittelt wurde

### **Mehreinbau Betonfahrbahn:**

Voraussetzung für die Vergütung von Mehreinbaudicken ist das Erreichen bzw. das Übertreffen des angebotenen 5%-Quantils der Spaltzugfestigkeit.

Die Ermittlung der Dicke der Betondecke erfolgt an Bohrkernen gemäß TP D-StB.

Die Auswertung der Ist-Werte der Deckendicke erfolgt nach den TP B-StB, Teil 0.2 „Statistische Grundlagen zur Auswertung von Prüfergebnissen“.

Die Dicke beim unteren 10% Quantil tritt folglich an die Stelle der Einzelwerte bzw. deren arithmetischem Mittel. Daher entspricht die Ist-Einbaudicke gemäß Kapitel 5.3.1.2 ZTV Beton-StB der nach den den TP B-StB, Teil 0.2 ermittelten Dicke beim unteren 10% Quantil.

Die vergütungsfähige Mehreinbaudicke ist somit die Differenz der nach den TP B-StB, Teil 0.2 ermittelten Dicke beim unteren 10% Quantil und der angebotenen charakteristischen Dicke beim unteren 10%-Quantil  $h_d$ . Die dann verbleibende Mehreinbaudicke der abzurechnenden Betondecke wird im Abrechnungseinheitspreis vergütet, jedoch nur bis zu 15 mm über der angebotenen charakteristischen Dicke  $h_d$  beim unteren 10%-Quantil.

### **Deckendickenvergleich:**

Bedingung 2:  $h(\text{DIM}) \leq h(\text{BT})$

- $h(\text{DIM})$  = Charakteristische Deckendicke (10%-Quantil), die bei der Dimensionierung berechnet wurde
- $h(\text{BT})$  = Charakteristische Deckendicke (10%-Quantil), die am Bauteil/Bauwerk Straße ermittelt wurde

Der Nachweis ist jeweils mit Bohrkernen einer Grundgesamtheit zu erbringen. Sollten die Bohrkern vor den Grinding-/Groovingschneidarbeiten entnommen worden sein, wird von der allen Einzelwerten ein pauschaler Abzug von 8 mm vorgenommen. Jede sich neu ergebende Grundgesamtheit (z. B. durch Veränderungen in der Betonzusammensetzung, im Misch- bzw. Einbauverfahren oder der Soll-Deckendicke) ist dem Auftraggeber rechtzeitig vor Ausführung anzuzeigen.

Bei Nichterfüllung der Bedingung 1 (Festigkeitsvergleich) und / oder der Bedingung 2 (Deckendickenvergleich) hat der AN eine Nachberechnung zur Abschätzung der normativen Nutzungsdauer auf der Grundlage des Verfahrens nach den RDO Beton mit den am Bauteil Betondecke ermittelten Werten  $f_{\text{ctk,core}}(\text{BT})$  und  $h(\text{BT})$  auf eigene Kosten durchzuführen.

Die charakteristische Deckendicke am Bauteil wird auf volle 0,5 cm kaufmännisch gerundet.

Ergibt die Nachrechnung eine **normative Nutzungsdauer von 30 Jahren** oder mehr sind die vertraglichen Anforderungen erfüllt.

Für den Fall, dass die Nachrechnung eine normative Nutzungsdauer von weniger als 30 Jahren ergibt, liegt ein Mangel nach § 4 Abs. 7 VOB/B vor.

### **zum Punkt 1 - Allgemeine Beschreibung der Bauleistung**

#### **Grinding/Grooving**

Im Zuge der Fahrbahnerneuerung ist auf der gesamten Fahrbahnbreite die Textur durch Diamantschneidarbeiten (Grinding/Grooving) herzustellen.

Die Betondecke ist mit ca. 1 cm Mehrdicke für den Abtrag durch das Grinding/Grooving auszuführen. Diese Leistung ist in die Leistungspositionen für das Herstellen der Betondecke einzukalkulieren.

Ungeachtet der angesetzten 1 cm Mehrdicke ist zu beachten, dass die nach RDO festgelegte Deckendicke an der fertigen Leistung (nach Herstellung der Texturierung) einzuhalten ist.

Das Fertigstellen der Oberfläche der frischen Betondecke endet mit dem Längsglätter als letztes Glättelement und der Nachbehandlung. Die Texturierung der Oberfläche wird nach dem Erhärten des Betons mittels Grinding ausgeführt. Eine entsprechende Anforderung an die Mindestfestigkeit des Oberbetons zum Zeitpunkt des Grindings ist weiter unten angegeben.

Neben der Herstellung der anforderungsgerechten Ebenheit und Griffigkeit soll mittels Grinding eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche erreicht werden.

Die nachstehend aufgeführten Angaben dienen zur genauen Spezifizierung der Grindingsarbeiten.

- Der Schneidvorgang hat, beginnend vom linken Rand der Fahrbahn in Fahrtrichtung, in Längsrichtung in mehreren nebeneinander angeordneten Einzelbahnen zu erfolgen. Diese Arbeitsweise ist einzuhalten, so dass die letzte Grindingbahn im Seitenstreifen liegt und Restbahnen am linken Fahr-



bahnrand ausgeschlossen werden. In den Übergangsbereichen zu den angrenzenden Streckenabschnitten ist die Schnitttiefe derart anzupassen, dass keine Stufen bzw. vertikalen Absätze entstehen und somit der Abfluss des Oberflächenwassers in Richtung der Quer- und/oder Längsneigung nicht beeinflusst wird. Der Anpassungsbereich an den Bestand beträgt maximal 5 m. Zudem ist die Schnitttiefe so zu wählen, dass zum einen die erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Längsebenheit erreicht werden und zum anderen die Textur insbesondere in der groben Gesteinskörnung durch Anschneiden dieser hergestellt wird. Hierbei ist auch auf die Abnutzung der einzelnen Schneidblätter zu achten, da hier eine unregelmäßige Abnutzung zu unterschiedlichen Tiefenniveaus führt. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit muss der mittlere MPD-Wert für Grinding/Groovingbereiche  $\geq 0,8$  mm vor Verkehrsfreigabe betragen. Die Höhendifferenz der unteren Tiefpunkte zweier benachbarter Grindinggrillen darf 2 mm nicht überschreiten. Grundsätzlich sind ggf. vorhandene mörtelreiche Schichten vollständig abzutragen.

- Die Gradienten und Querneigungen gemäß Deckenbuch sind einzuhalten.
- Neben der Einhaltung der vorgegebenen Ebenheitsanforderungen (siehe unten) des ersten Schneidvorgangs darf der an den Rändern der einzelnen Arbeitsbahnen in Längsrichtung auftretende Überlappungsbereich, bezogen auf den Gesamtquerschnitt der texturierten Fläche, eine mittlere Breite von 1 cm (in besonderen Fällen, z. B. Kurven max. 3 cm) nicht überschreiten. Zur Gewährleistung der prozesssicheren Herstellung sollte die Grindingmaschine mit einem entsprechenden Mess- und Steuerungssystem ausgestattet sein.
- Zur Einhaltung und/oder Steuerung der Schneidtiefe muss die Grindingmaschine über ein Abtastsystem verfügen, das einen exakten Bezug zur Achse der Schneidwelle besitzt. In diesem Kontext ist auch auf eine gleichmäßige Abnutzung der einzelnen Schneidscheiben sowohl hinsichtlich ihres Durchmessers als auch ihrer Schneidgeometrie zu achten. Schneidwellen sind bei Erreichung ihres zulässigen Abnutzungsgrades (Anforderungen an die Textur können nicht mehr eingehalten werden) auszutauschen. Der beim Schneidvorgang anfallende Schneidschlamm ist mittels Direktabsaugung aufzunehmen, von der Baustelle zu entfernen und einer Verwertung nach Wahl des AN zuzuführen.
- Zudem ist die Breite der einzelnen Bahnen so anzulegen, dass alle daraus resultierenden Abstände der Überlappungsbereiche außerhalb fahrzeugtypischer Spurweiten liegen. Im Ergebnis ist eine homogene Oberflächentextur mit gleichbleibender Endtexturtiefe – d.h. nach Brechen der Stege – anzustreben. Dem AG ist zusammen mit dem Fugenplan ein Schneidplan vorzulegen.
- Das Grinding darf erst erfolgen, wenn der Beton eine Festigkeit von  $f_{c, cube} = 35$  MPa erreicht hat. Die Festigkeit ist an neben der Fahrbahn gelagerten Würfeln zu prüfen.

#### Erster Schneidvorgang (Ebenheitsgrinding)

Der aktuelle Stand der Technik erfordert bei einer Ausgangslage der Längs- und Querebenheit gemäß dem aktuellen Regelwerk einen vorgeschalteten Schneidvorgang, um zum einen die erhöhten Anforderungen an die Längsebenheit zu erfüllen und zum anderen schonend eine homogene Oberflächentextur mit gleichbleibender Texturtiefe herstellen zu können. Die Anforderung an die Längsebenheit der fertigen Leistung beträgt  $\leq 2,0$  mm bezogen auf eine 4 m lange Messstrecke. Die Prüfung erfolgt gemäß TP Eben – Berührungslose Messungen mit der Besonderheit, dass das Messverfahren für Grindingstrecken geeignet sein muss.

#### Zweiter Schneidvorgang (Texturgrinding/-grooving)

In einem zweiten Schneidvorgang ist eine Betonoberfläche auf den genannten Streckenabschnitten mit den nach der folgenden Tabelle angeführten Texturparametern herzustellen:

Rezeptur	Oberflächentextur	Einbau
Größtkorn 22 mm im Oberbeton	Grinding-/Groovingtextur: Segmentbreite Grinding: 2,4 mm, Segmentabstand Grinding: 2,0 mm, Segmentbreite Grooving: 2,4 mm, Segmentabstand Grooving: 10,0 mm, Tiefe Grooving: 3,0 mm	Zweilagig, zweischichtig,

Die Schnitttiefe ist so einzustellen, dass eine Abbildung der Grindingtextur insbesondere in der groben Gesteinskörnung (durch Anschneiden dieser) erfolgt. Ggf. vorhandene Mörtelschichten sind vollständig abzutragen.

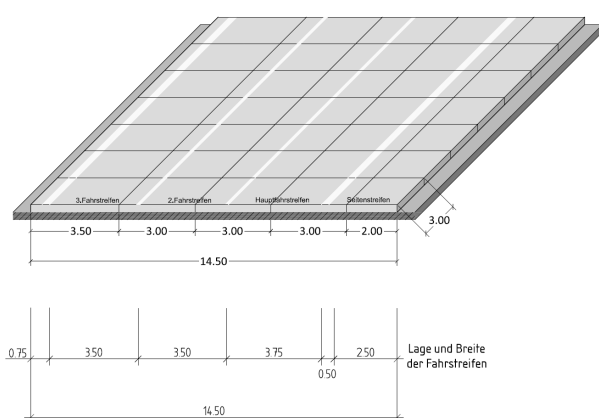
Die Anforderung an die Längsebenheit der fertigen Leistung beträgt  $\leq 2,0$  mm bezogen auf eine 4 m lange Messstrecke.

### Zum Punkt 3.5 Baustoffe / Bauteile

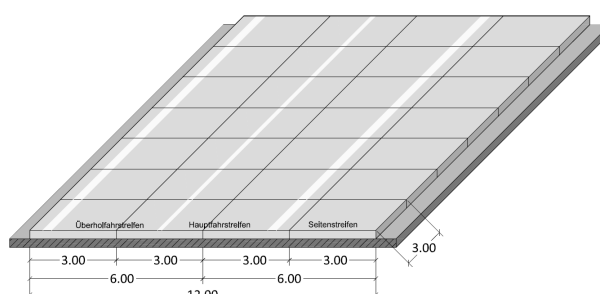
Die Plattengeometrie im Hauptfahrstreifen beträgt 3,0 m x 3,0 m. Die Lage der Längsfuge im Hauptfahrstreifen ist so zu wählen, dass sie außerhalb der Radrollspuren liegt.

Information zur Fugenanordnung in Relation zur Markierung:

RQ 36



RQ 31



### Fugen, Dübel, Anker

Die Betondecke ist gemäß ZTV Beton-StB 07 mit verdübelten Quer- und verankerten Längsfugen zu versehen. Die Querfugen sind i. d. R. im Abstand von 3 m anzuordnen. Für die Herstellung der Betondecke ist ein Fugenplan zu erstellen.

Für besondere Bereiche wie z. B. Beschleunigungs- und Verzögerungsstreifen an Anschlussstellen oder Rastplätzen sowie im Übergangsbereich zum Bestand sind durch den AN detaillierte Fugenpläne zu erarbeiten. Diese sind mit dem AG abzustimmen.

Die Lage der Markierung gem. Querschnitt und Markierungsplan ist zu beachten.

Sowohl der Kerb- als auch der Kammerschnitt sind mit Absaugung herzustellen. In den Kerbschnitt ist eine Schutzeinlage einzulegen.

Der Abstand der Dübel beträgt generell über den gesamten Fahrbahnquerschnitt 25 cm mit einem Plattenrandabstand (Längsfugen und Fahrbahnrand) von 12,5 cm.

Der Ankerabstand beträgt generell 1,0 m mit einem Plattenrandabstand (Querfuge) von 1,0 m.

Beim nachträglichen Anbau von Betonbahnen sind Verbundanker (Klebeanker) einzusetzen und die Bohr-  
löcher passgenau herzustellen.

#### Fugenfüllstoffe allgemein

Die Fugenfüllung der Quer- und Längsfugen hat mit geeigneten Fugenprofilen zu erfolgen.

Der Fugenverschluss aller Querscheinfugen hat durch das Einlegen von komprimierbaren elastischen  
Profilen zu erfolgen. Die Profile sollen mit ihrer Oberkante an die Unterkante der Fase anschließen, sind  
mit 5 – 10 cm Überstand zum Fahrbahnrand vorzusehen und dürfen nicht unter Vorspannung eingebaut  
werden. Die Mehrlängen sind in das Angebot einzurechnen. Die Breite der Fugenprofile ist entsprechend  
der Rissbreite nach ZTV-Fug zu ermitteln.

Längsscheinfugen sind ebenfalls mit geeigneten Fugenprofilen zu verschließen.

Der AN hat Fugenprofile mit unterschiedlichen Breiten auf der Baustelle vorzuhalten.

Die Fugen sind an der seitlichen Stirnfläche der Betondecke gegen das Eindringen von Gesteinskörnungen  
oder gebundenen Materialien zu dichten.

Zu tief und zu hoch liegende Profile sind erstmalig bei Abnahme und nochmals nach Begehung im folgen-  
den Frühjahr zu entfernen und – wo notwendig nach Unterfütterung – mit einem neuen, dem Spalt entspre-  
chenden Profil zu verschließen.

Während der Gewährleistungsfrist sollen Fugen

- nicht reißen,
- sich nicht vom Fahrbahnrand zurückziehen,
- eine ausreichende Lagestabilität aufweisen
- sich nicht von der Wandung lösen.

Die Kreuzungspunkte Längs-/Querfuge sind nach ZTV Fug-StB herzustellen.

Der entstehende Mehraufwand für die Fugenausbildung an den Kreuzungspunkten ist in die Einheitspreise  
einzukalkulieren und wird nicht gesondert vergütet.

#### Beton

Es gelten die Anforderungen der ZTV Beton-StB 07 und TL Beton-StB 07 im Kontext mit dem ARS 04/2013.

#### Betondecke – fertige Schicht

Die Prüfung und Auswertung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit erfolgt nach den TP B-StB 3.1.05  
beim 5%-Quantil getrennt am Ober- und Unterbeton (der geringere der beiden Werte wird maßgebend).

Die am Bauteil ermittelte charakteristische Spaltzugfestigkeit (5%-Quantil) muss den der Dimensionierung  
zugrunde gelegten Wert erreichen bzw. übertreffen. Andernfalls wird eine Nachberechnung zur Abschät-  
zung der erreichbaren normativen Nutzungsdauer auf der Grundlage des Verfahrens nach den RDO Beton  
mit den am Bauteil Betondecke ermittelten Werten  $f_{ctk,core}(BT)$  und  $h(BT)$  erforderlich.

### Grinding bzw. Grinding/Grooving

Die Grinding- und Groovingwelle muss folgende Parameter erfüllen:

- Arbeitsbreite: min. 1200 mm
- Segmentbreiten: gemäß 1.
- Segmentabstände: gemäß 1.

### 5.3.2 Textteile Leistungsverzeichnis

<b>x.xx.xx.</b>	<p><b>Erweiterte Erstprüfungen für Ober- und Unterbeton</b></p> <p>Erweiterte Erstprüfung durchführen und liefern. für Ober- und Unterbeton</p> <p>Baustoff = Fahrbahndeckenbeton nach TL Beton-StB und</p> <p>Erweiterte Erstprüfung durchführen gemäß TP B-StB, Teil 3.1.05,</p> <p>Ermittlung der Festigkeitskennwerte nach 28 Tagen und zusätzlich nach 7 Tagen,</p> <p>Lieferzeitpunkt spätestens 4 Wochen vor Einbaubeginn</p>	St 2,000.....
<b>x.xx.xx.</b>	<p><b>Stellungnahme Gesteinskörnungen</b></p> <p>Gutachterliche Stellungnahme zur Gesteinskörnung bzw. zur konkreten Betonzusammensetzung hinsichtlich einer schädigenden AKR aufstellen und liefern bzw. Nachweis aufgrund der Positivliste der BAST liefern. Nachweisverfahren gemäß ARS 04/2013 des BMVBS vom 22.01.2013,</p> <p>unter Beachtung der Verfahrensbeschreibungen:</p> <p>V1: für Nachweis der Eignung einer konkreten Betonzusammensetzung</p> <p>V2: für Nachweis der Eignung grober Gesteinskörnungen</p> <p>V3: für Nachweis der Eignung grober Gesteinskörnungen auf Grundlage bestehender positiver Beurteilungen nach V1 oder</p> <p>V2 (Positivliste der BAST)</p> <p>V4: Listenführung OBB inklusive erforderlicher Prüfungen und Untersuchungen</p> <p>Lieferzeitpunkt spätestens 3 Wochen vor Einbaubeginn</p>	St 2,000.....
<b>x.x.xx.</b>	<p><b>Betondecke herstellen Bk100</b></p> <p><b>Dimensionierung nach RDO Beton 09</b></p> <p>Betondecke herstellen.</p>	

In Verkehrsflächen der Belastungsklassen Bk100  
 Einbau in Fahrbahn;  
 Einbau in voller Breite gemäß Baubeschreibung;  
 Deckendicke gemäß rechnerischer Dimensionierung  
 nach RDO Beton 09  
 Ausführung zweilagig, zweischichtig.  
 Festigkeitsklasse C30/37, besondere Anforderung:  
 Festigkeitsklasse StC 30/37 - x,x nach rechnerischer  
 Dimensionierung gemäß RDO Beton (Mindestanfor-  
 derung  $f_{ctk, core} \geq 3,0$  MPa)  
 Kategorie PSV angegeben (53).  
 Oberbeton mit CEM I, GK22 (Schichtdicke OB 7 cm)  
 Unterbeton mit CEM II/A bzw. CEM III/B  
 Oberflächentexturierung mittels Grinding/Grooving  
 Das Grinden/Grooven der Oberfläche wird  
 gesondert vergütet.

m2 .....

x.xx.xx.

**Betond.nachbeh.**

Betondecke nachbehandeln  
 durch Aufbringen von Nachbehandlungsmittel.

m2 .....

x.x.xx.

**Bohrkerne für erweiterte Kontrollprüfungen entnehmen und verfüllen**

Bohrkerne für erweiterte Kontrollprüfungen nach An-  
 gabe des AG entnehmen  
 Die Proben exakt beschriften, versandfertig verpa-  
 cken und dem AG übergeben.  
 Entnahme aus der Betondecke der Fahrbahn.  
 Kerndurchmesser 100 mm.  
 Bohrtiefe gemäß einzureichender rechnerischer Di-  
 mensionierung.  
 Bohrlöcher mit PCC-Mörtel verfüllen und verdichten.

St .....

x.x.xx.

**Proben versenden**

Versenden der Proben für erweiterte Kontrollprüfungen  
 von der Baustelle nach anerkanntes Prüfinstitut  
 auf Anordnung des AG.

Psch .....

x.xx.xx.

**Längsscheinfuge herstellen**  
**Fahrbahn\*2 Anker je Platte**  
**mit Fugenprofil**

Längsscheinfuge in Betondecke herstellen.

Fugenkerbe herstellen (Kerbschnitt 3 mm breit)  
 Schutzeinlage einbringen  
 Fugenkerbe durch Schneiden zum Fugenspalt  
 aufweiten (6 mm).  
 Fuge verfüllen.  
 Fuge in Fahrbahn  
 Anker, 2 Anker je Platte, Abstand jeweils 1 m.  
 Anker, Durchmesser 20 mm, Länge mindestens  
 80 cm.  
 Dicke der Betondecke nach rechnerischer Dimensio-  
 nierung des AN  
 Schneidschlamm am Schneidblatt während des  
 Schneidvorganges direkt absaugen.  
 Abfasen der Fugenspaltkanten unter 45 Grad, Breite  
 Fase 2 mm  
 Fugenspaltbreite (inkl. Fase) 10 mm, Fugenspalttiefe  
 20 mm, verfüllen mit Fugenprofil.

m .....

x.xx.xx.

**Querscheinfuge herstellen****Dübel, Regelabstand 25 cm****mit Fugenprofil**

Querscheinfuge in Betondecke herstellen  
 Fugenkerbe herstellen (Kerbschnitt 3 mm breit)  
 Schutzeinlage einbringen  
 Fugenkerbe durch Schneiden zum Fugenspalt auf-  
 weiten (6 mm)  
 Fuge verfüllen.  
 Fuge in Fahrbahn  
 Dübel, Regelabstand 25 cm einbauen.  
 Schneidschlamm am Schneidblatt während des  
 Schneidvorganges direkt absaugen.  
 Abfasen der Fugenspaltkanten unter 45 Grad  
 Breite Fase 2 mm  
 Fugenspaltbreite (inkl. Fase) 10 mm, Fugenspalttiefe  
 30 mm, verfüllen mit Fugenprofil.

m .....

x.x.xx.

**Ebenheitsgrinding**

Abtragen der Betonoberfläche zur Erfüllung er-  
 höhter Ebenheitsanforderungen ( $\leq 2,0$  mm/4 m),  
 Arbeitsausführung erfolgt durch eine Grindingma-  
 schine längs zur Fahrbahn gem. Baubeschrei-  
 bung,

**Wellenbesatz nach Wahl des AN**

Schnitttiefe: Abtragen der groben Unebenheiten, Direktabsaugung der anfallenden Betonschlämme, Abtragsgut aufnehmen, von der Baustelle entfernen und einer Verwertung nach Wahl des AN zuführen.

Alle anfallenden Entsorgungskosten sind im EP enthalten.

m2 .....

**x.x.xx. Komb. Texturgrinding/-grooving**

Kombiniertes Texturgrinding/-grooving zur Herstellung einer homogenen, längsgerichteten Oberflächentextur

Abtragen der Betonoberfläche zur Herstellung einer längsgerichteten Oberflächentextur im Diamantschneidverfahren von **km xxx,xxx bis km xxx,xxx**,

Anforderungen hinsichtlich Griffigkeit gemäß aktuellen ZTV Beton - StB

Arbeitsausführung erfolgt durch eine Grindingmaschine längs zur Fahrbahn gem. Baubeschreibung,

**Segmentbreite Grinding: 2,4 mm,**

**Segmentabstand Grinding: 2,0 mm,**

**Segmentbreite Grooving: 2,4 mm,**

**Segmentabstand Grooving: 10,0 mm,**

**Tiefe Grooving: 3,0 mm**

Schnitttiefe: Anschneiden der groben Gesteinskörnung zur Texturerstellung, ggfls. Abtrag der mörtelreichen Schichten

Direktabsaugung der anfallenden Betonschlämme,

Abtragsgut aufnehmen, von der Baustelle entfernen und einer Verwertung nach Wahl des AN zuführen.

Alle anfallenden Entsorgungskosten sind im EP enthalten.

m2 .....

## 5.4 Konzeption von Messtechnik und Messbegleitung des Piloten sowie anschließendes Monitoring

Zur Beurteilung des Baues mit Betondecke im Rahmen der Pilotanwendung sollten nach Herstellung die relevanten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften messtechnisch ermittelt werden. Somit kann einerseits festgestellt werden, ob die gewünschten Eigenschaften in entsprechender Qualität gebaut wurden. Andererseits können die ermittelten Kenngrößen als Anfangswert für ein künftiges Monitoring verwendet werden. Im Rahmen eines Monitorings sind weitere Messungen insbesondere im Hinblick auf die Gebrauchseigenschaften in planmäßigen Abständen erforderlich. Um den wiederholten Aufwand dieser Messungen gering zu halten, wird angeregt, eine Messstation zu errichten, um Messwerte in regelmäßigen Abständen ermitteln zu können.

Hinsichtlich der Substanzeigenschaften werden folgende direkte und indirekte Prüfungen/Untersuchungen empfohlen:

Prüfung/ Untersuchung	Richtlinie	Prüfumfang	Bewertung	Wiederholung
Deckendicke	TP D-StB, Auswertung nach TP B-StB, Teil 0.2	an Bohrkernen für Festigkeitsprüfungen	Ermittlung des 10 %-Quantils, des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten	Nur bei Wiederholung des Grindingsvorgangs
Spaltzugfestigkeit am Ober- und Unterbeton	TP B-StB, Teil 3.1.05, Auswertung nach TP B-StB, Teil 0.2	1 BK / 1000 m <sup>2</sup> , jedoch mind. 15 Stück	Ermittlung des 5 %-Quantils, des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten	Nach 4 bis 5 Jahren, 2 BK pro 2 km aus HFS, jedoch mind. 16 BK
Druckfestigkeit Unterbeton	TP B-StB, Teil 3.1.03, Auswertung nach TP B-StB, Teil 0.2	1 BK / 1000 m <sup>2</sup> , jedoch mind. 15 Stück (Mittelstück aus BK für Spaltzugprüfung)	Ermittlung des 5 %-Quantils, des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten	Nach 4 bis 5 Jahren, 2 BK pro 2 km aus HFS, jedoch mind. 16 BK
Druckfestigkeit Oberbeton	TP B-StB, Teil 3.1.03, Auswertung nach TP B-StB, Teil 0.2	1 BK / 1000 m <sup>2</sup> , jedoch mind. 15 Stück (BK Ø 50)	Ermittlung des 5 %-Quantils, des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten	Nach 4 bis 5 Jahren, 2 BK pro 2 km aus HFS, jedoch mind. 16 BK
Stat. Elastizitätsmodul	DIN 1048-5 bzw. DIN EN 12390-13	6 BK pro Baulos	Ermittlung des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten	-
Dyn. Elastizitätsmodul		an Prismen für Wärmedehnzahl	Ermittlung des Mittelwerts und der Standardabweichung	Nach 4 bis 5 Jahren an Prismen für Wärmedehnzahl
Wärmedehnzahl	DIN CEN/TS 12390-9	2x4 Prismen aus 1 BK Ø 350 je Baulos	Ermittlung des Mittelwerts und der Standardabweichung	Nach 4 bis 5 Jahren 2x4 Prismen aus 1 BK Ø 350 je Baulos
Frost-Taumittelwiderstand	TP B-StB, Teil 3.1.07	mind. 5 BK mit Gesamtprüffläche mindestens 800 cm <sup>2</sup>	Ermittlung der Abwitterung	-
Längsebenheit	TP Eben – Berührungslose Messungen, Auswertung WLP nach prEN 13036-5:2017	Kontinuierliche Aufnahme mit geeigneter Lasertechnik für Grindertexturen	Bewertetes Längsprofil (WLP)	Aus ZEB-Messung
Oberflächenbild	TP Oberflächenbild (Entwurf 2019)	Kontinuierliche Aufnahme hochauflösender Oberflächenbilder	Bestimmung der Ausfallrate zum Bewertungszeitpunkt	Aus ZEB-Messung, Aufnahme hochauflösender Bilder vorausgesetzt
Fugenbewegung	-	Eine Messstation mit stündlichen Messungen von 5 aufeinanderfolgenden Querfugen	Bestimmung der jährlichen Nullspannungstemperatur, Analyse der unterschiedlichen Fugenbewegung benachbarter Platten	Regelmäßig über Messstation
Temperaturverlauf in der Betondecke	-	Eine Messstation mit stündlichen Messungen an 2 Messpunkten pro Baulos über 6 Horizonte	Feststellung der tatsächlich auftretenden Temperaturverläufe und zugehörige Plattenverformung	Regelmäßig über Messstation



Klimadaten	-	Eine Messstation mit stündlichen Messungen der Lufttemperatur, Oberflächentemperatur der Fahrbahnoberfläche, Globalstrahlung, Windstärke und -richtung, Regenereignis	Zusammenhang von Klimadaten und Temperaturverläufen in der Betondecke	Regelmäßig über Messstation
Verkehrsbelastung	-	Eine Messstation zur Erfassung relevanter Verkehrsdaten (Lastsilhouetten)	Bestimmung der Schwerverkehrsbelastung auf dem HFS sowie Bereitstellung relevanter Daten für einzelne Fahrzeuge auf dem Hauptfahrstreifen (Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrzeugabstand, Fahrzeuglänge) für SPB-Messungen	Regelmäßig über Messstation

Hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften werden folgende Prüfungen empfohlen:

Prüfung	Richtlinie	Prüfumfang	Bewertung	Wiederholung
Längsebenheit	TP Eben – Berührungslose Messungen, Auswertung WLP nach prEN 13036-5:2017	Kontinuierliche Aufnahme mit geeigneter Lasertechnik für Grindtexturen	Bewertetes Längsprofil (WLP) und Ermittlung PGR_MAX und PGR_AVG (Simulierte 4 m-Latte)	Aus ZEB-Messung
Querebenheit				
Oberflächenbild	TP Oberflächenbild (Entwurf 2019)	Kontinuierliche Aufnahme hochauflösender Oberflächenbilder		Aus ZEB-Messung, Aufnahme hochauflösender Bilder vorausgesetzt
Griffigkeit (SKM)	TP Griff-StB (SKM)	Doppelmessung pro Fahrstreifen		Aus ZEB-Messung
Textur				Alle 2 Jahre
Lärmemission (CPX)	DIN EN ISO 11819-2 TP KoSD-19	Kontinuierliche Aufnahme des Reifen-Fahrbahn-Geräusches entlang des gesamten Bauloses auf allen Fahrstreifen		Nullmessung nach Fertigstellung der Oberfläche aber vor Verkehrsfreigabe.  Im ersten Jahr nach einem halben Jahr und nach einem Jahr nach Verkehrsfreigabe.  Im zweiten Jahr zum Zeitpunkt 2 Jahre nach Verkehrsfreigabe.  Danach alle 2 Jahre.
Lärmemission (SPB)	DIN EN ISO 11819-1 TP KoSD-19	Eine Messstation zur Schallmessung bei geeigneten Voraussetzungen bezüglich Hindernisfreiheit und Störschallsituation.		Regelmäßig über Messstation
Plattenverformung		Oberflächenscan zum Nachweis der Plattenverformung		

## 6 Fazit

Die Betonbauweise zählt zu den traditionell bewährten technischen Lösungen im Straßenbau. Dies gilt insbesondere für hochbelastete Strecken. Infolge der kontinuierlichen Zunahme des Schwerverkehrs auf deutschen Autobahnen ist es geboten, die Vorzüge dieser Technologie auch weiterhin zu nutzen und verstärkt zur Geltung zu bringen. Dabei ist es wichtig, künftig eine ganzheitliche Betrachtung der Anforderungen vorzunehmen bzw. diese zu erfüllen. Daher gilt es, die Bauweise durch gezielte Weiterentwicklungen entsprechend anzupassen.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden hierfür konkrete Zielfunktionen definiert. Es wurde weiter gezeigt, dass schon allein die prognostizierte Klimaveränderung einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzungs- und Substanzeigenschaften der Betonfahrbahn erwarten lässt. Konkrete Änderungen in Technik und Technologie sind also bereits heute erforderlich, um das vorhandene Niveau aufrecht zu halten. Erhöhte Anforderungen an die Verfügbarkeit erfordern teilweise ebenfalls eine Modifikation der Regelbauweise. Ein wesentliches Ziel dabei ist auch die Sicherstellung der Verfügbarkeit der einzelnen Strecken auf möglichst hohem Niveau.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen, dass sowohl die erhöhten klimainduzierten Belastungen auf die Oberbauten mit Betondecke als auch eine Reihe von bautechnologischen, baustofflichen und konstruktiven Aspekten eine systematische Weiterentwicklung der Bauweise erfordern.

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen sind folgende Feststellungen bzw. Folgerungen aufzuführen:

- Die geänderten Klimabedingungen erhöhen die mechanische Beanspruchung und die Verformung der Fahrbahnplatten. Um das vorhandene Niveau hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Fahrkomfort beizubehalten, ist aus heutiger Sicht eine technische Weiterentwicklung des Betonstraßenbaues notwendig.
- Die prognostizierte Klimaentwicklung zeigt, dass die Berücksichtigung der Witterungsbelastung bei der Dimensionierung von Betondecken mit einer Erhöhung der mittleren Plattentemperatur von 2 K erfolgen sollte. Des Weiteren sollten ungünstigere positive Temperaturverläufe bzw. Temperaturgradienten (Erhöhung um 10 K/m bei positiven Gradienten) berücksichtigt werden.
- Die Materialparameter des Betons haben einen großen Einfluss auf die Größe der Spannungen und der Plattenverformung. Dies gilt in besonderem Maße für die temperatur- und feuchteinduzierten Beanspruchungen. Die Betonparameter sollten deshalb im Rahmen der Dimensionierung stärker berücksichtigt werden als dies bisher der Fall ist.
- Neue gesetzliche Vorgaben für den Arbeitsschutz an Baustellen erfordern insbesondere bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen Änderungen in den Plattengeometrien. Außerdem sind auch Aspekte der Verfügbarkeit zu beachten. Insofern sind künftig Längsfugen so anzuordnen, dass insbesondere bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen unter Berücksichtigung der [ASR 5.2 2018] und der [RSA 1995] die Aufrechterhaltung des Verkehrs mindestens eines Fahrstreifens im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen möglich bleibt. Dafür ist es entweder notwendig, auf eine Längsfuge in der Fahrbahn zu verzichten, wodurch sich größere Plattengeometrien ergeben, oder eine Längsfuge hinzuzufügen, womit sich kleinere Platten ergeben. Aus technischer Sicht sind hier kleinere Platten zu bevorzugen. Auch dabei gilt, dass die Längsfugen so anzuordnen sind, dass regelmäßige, ungünstige Beanspruchungen der Platten durch die Verkehrslasten möglichst vermieden werden.
- Die Lärmemission der Fahrbahn wird maßgeblich durch die Oberflächentextur bestimmt. Je besser die Lärmreduzierung durch eine geeignete Oberflächentextur gelingt, desto mehr gewinnen auch andere Randparameter der Betonfahrbahn an Bedeutung wie Fugenweite, Fugenabstand und Plattenverformung.

Anhand umfangreicher Simulationsrechnungen in diesem Forschungsvorhaben kann das Verhalten von Betonfahrbahnen unter dem Einfluss von Klima und Verkehr genau beschrieben werden. Die Ergebnisse

erlauben auch Formulierungen von technischen Lösungen für eine zielgerichtete Anpassung der Bauweise Beton an die Beanspruchungen infolge zukünftiger Klimaveränderungen:

- Bei Beachtung der Schwindverformungen und der eingepprägten Vorverformung der Betonplatten ist die Verformungsfigur „Aufschüsseln“ als vorherrschende Art und Weise der Plattenverformung zu betrachten.
- In größeren Fahrbahnplatten entwickeln sich bei gleicher äußerer Belastung deutlich höhere Zwangsspannungen und Verformungen als in kleinen Platten. Die maximalen Hauptspannungen sind bei Platten mit einer Geometrie von 3 m x 3 m gegenüber einer 6 m x 6 m großen Platten um ca. 40 % reduziert. Bezüglich der Verformung ergibt sich sogar eine Reduktion um ca. 70 %.
- Die Zwangsspannungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Plattenbeanspruchung. Allein die Zwangsspannungen, die sich aus einem nichtlinearen Temperaturverlauf ergeben, können die temperaturbedingten maximalen Hauptspannungen um ca. 70 % erhöhen.
- Die prognostizierten höheren Temperaturgradientenwerte werden sich nur relativ geringfügig auf die dimensionierungsrelevanten maximalen Hauptspannungen auswirken. Lastfallabhängig ist mit Erhöhungen von maximal 15 % zu rechnen. Die maximalen Verformungen erhöhen sich dagegen um bis zu 70 %.
- Wenn sich die Quersfugen in der kalten Jahreszeit so weit öffnen, dass die Rissverzahnung für die Querkraftübertragung nicht mehr wirksam ist, erhöhen sich die maximalen Hauptspannungen in den Platten um ca. 20 % bis 25 %.
- Elastizitätsmodul und Wärmedehnzahl des Betons haben einen großen Einfluss auf die Plattenbeanspruchung und -verformung. Für eine Betonplatte mit niedrigen Werten für diese Parameter ( $E=25.000 \text{ MPa}$ ,  $WDZ=0,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) können sich gegenüber einer Platte mit hohen Werten ( $E=50.000 \text{ MPa}$ ,  $WDZ=1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) Reduzierungen der Spannungs- und Verformungswerte um bis zu 100 % ergeben. Besonders sensibel reagieren in dieser Hinsicht die temperaturbedingten Beanspruchungen. Daher sollten diese Parameter bei künftigen Dimensionierungen stärker berücksichtigt werden.
- Der Einfluss kleinerer Hohlräume unter den Quersfugen, wie sie an Betondecken aus vorangegangenen Oberbaugenerationen bekannt sind (flache Mulden bis ca. 4 mm Tiefe und 1 m Breite), auf die Plattenbeanspruchung ist zunächst moderat. Bei bestimmten Kombinationen von Temperaturzustand und Verkehrslast kann die Hohlagerung sogar zu einer Reduzierung der Spannungen führen. Erst Hohlräume mit größerer Ausdehnung führen zu gravierenden Spannungserhöhungen.
- Die Fugen sind ein bautechnisch notwendiger Bestandteil der aktuellen Standardbauweise. Eine rechnerische Simulation lieferte keinerlei Anhaltspunkte dafür, dass eine normgerecht ausgeführte Fugenkonstruktion bei planmäßiger Belastung zu einer mechanischen Überbeanspruchung der Platte führt, auch nicht bei zukünftigen Klimaszenarien. Die Berechnungen zeigen, dass die Übertragung von Verkehrslasten über die Dübel in den Quersfugen mit großer Sicherheit nicht die Bildung von Horizontalrissen in der Dübelebene zur Folge hat. Entsprechende Schadensbilder sind bislang wahrscheinlich in einem frühen Stadium der Betonerhärtung durch Schwind- und Temperatureinflüsse entstanden.
- Unterschiede in der Widerstandskraft können zur Bildung dauerhafter Paketfugen führen. Es ist deshalb wichtig, auf eine homogene Fugenausbildung zu achten. Dies gilt insbesondere für kleinere Platten, da hier die Gefahr der Bildung dauerhafter Paketfugen größer ist als bei großen Platten. In diesem Kontext spielt auch die exakte Ausrichtung der Dübel in Fahrtrichtung eine besondere Rolle. So wirken sich bereits kleine Winkelabweichungen ( $\geq 2^\circ$ ) der Dübellage negativ auf die Fugenbeweglichkeit aus und erhöhen die Anzahl blockierter Fugen. Die Fugenbewegung wird dann verhindert, wenn die Differenz der Widerstandskräfte gegen die Fugenbewegung in zwei aufeinanderfolgenden Quersfugen größer ist als die Reibungskraft zwischen Platte und Unterlage.

- Kürzere Plattengeometrien führen auch zu kleineren Fugenöffnungsweiten. Der Zusammenhang ist linear.
- Alternative Fugenkonstruktionen mit Querkraftübertragung durch profilierte Fugenflanken (z. B. Nut und Feder) sollten mit einer leicht konischen Ausbildung der Flankenprofilierung ausgeführt werden. Bei ca. 5° Neigung ist eine Querkraftübertragung auch noch bei geöffneter Fuge möglich. Ein Verzicht auf jegliche Neigung wird mit großer Sicherheit zu einem Blockieren der Fugen führen.
- Fahrbahnen mit einer üblichen Oberflächentextur (Besenstrich, Waschbeton) können hinsichtlich der Schallemission nicht durch andere Maßnahmen (z. B. Reduzierung der Fugenöffnungsweite, Änderung der Plattengeometrie, o.ä.) optimiert werden. Zu vermeiden ist aber ein Hervorstehen der Fugenfüllung über die Fahrbahnoberfläche. Dies kann dazu führen, dass sich die Schallemission deutlich erhöht.
- Mit einem Oberflächengrinding (Texturgrinding Typ A) kann für die Fahrbahnoberfläche eine Reduktion gegenüber einer Oberfläche mit geriffeltem Gussasphalt von bis zu -6 dB(A) erzielt werden. Um dieses Geräuschminderungspotential nicht durch die anderen Parameter der Betonfahrbahn zu beeinträchtigen, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: kleine Fugenbreite ( $\leq 10$  mm inkl. zwei Fasen à 2 mm), vertikaler Plattenversatz an der Querfuge  $< 0,5$  mm, geringe Vorverformung der Platten, möglichst wenige Fugen, optimaler Füllstand der Fugen (weniger als 10 mm unter OK Fahrbahn). Ist dies nicht der Fall, so kann sich in der Summe die durch das Grinding erzielbare Lärminderung um 3 dB(A) reduzieren.
- Bei Verwendung kleiner Platten (3 m Fugenabstand) ist bei anforderungsgerechter Ausführung der Fugen die Pegelerhöhung durch die erhöhte Anzahl von Fugengeräuschereignissen so gering, dass sie schalltechnisch durch die geringeren Verformungen der kleineren Platten kompensiert wird.

Neben der kurzfristigen Umsetzung bereits konkret vorgeschlagener Maßnahmen ist es notwendig, kurz- und mittelfristig die Bauweise in verschiedenen Punkten weiter zu verbessern. Die wichtigsten dabei zu bearbeitenden Problemfelder bzw. Forschungsschwerpunkte wurden in der vorliegenden Arbeit identifiziert.

Bei der Durchsetzung neuer bzw. modifizierter Bauweisen können die tatsächlichen Verbesserungen erst nach langjähriger Nutzung der Fahrbahn endgültig nachgewiesen werden. Die zu erwartenden Kosten sind dagegen sofort bekannt und spürbar. Dieser Herausforderung muss sich der Straßenbau immer wieder neu stellen.

In der rund hundertjährigen Geschichte des Betonstraßenbaus konnte die Bauweise immer wieder zeigen, wie robust und zuverlässig sie ist. Ständige Verbesserungen, angefangen vom Aufbau, Konstruktion, baustofflichen Zusammensetzung, bautechnologischer Umsetzung bis hin zu akustisch hochwirksamen Oberflächentexturen führten dazu, dass die Betonbauweise den steigenden Anforderungen immer wieder gerecht werden konnte. Die Umsetzung der wesentlichen Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in die Praxis wird dazu führen, dass die Betonbauweise für die nächsten Jahrzehnte die anstehenden Aufgaben sicher bewältigen kann.

## Literatur

- [AMADEUS 1999] EUROPEAN COMMISSION:  
Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures, 1999
- [BAZANT 2000] BAZANT, Z.:  
Size Effect, International Journal of Solid and Structures 37, 2000
- [BAZANT 2009] BAZANT, Z.; LE, J.-L.:  
Size Effect on Strength and Lifetime Distributions of Quasibrittle Structures, ASME International Mechanical Engineering Congress, 2009
- [BECKENBAUER 2020] BECKENBAUER, T. :  
Akustik von Grindingoberflächen. Proc. FGSV / BAST Grinding Workshop, Bergisch Gladbach, 28. Januar 2020
- [COVARRUBIAS 2010] COVARRUBIAS, J. Jr.; COVARRUBIAS, J. Sen.; ROESLER, J.:  
Design of Concrete Slabs with Optimized Geometry, International Conference on Concrete Pavements, 2010
- [DARTER 2018] DARTER, M.:  
Cost-Effective Pavement Design Requires Useful Prediction Models, 13th International Symposium on Concrete Roads, Key-Note-Speech
- [DAVIDS 1998] DAVIDS, R.; TURKIYYAH, G; MAHONEY, J.:  
Modelling of Rigid Pavements: Joint Shear Transfer Mechanism and Finite Element Solution Strategies, U.S. Department of Transportation, 1998
- [DWD 2012 Extrem] DEUTSCHLÄNDER, T.; DALELANE, C.:  
Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit, Offenbach, 2012
- [DWD 2016 TRJ] Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse, DWD, Offenbach, 2016
- [EISENMANN 1973] EISENMANN, J.; GNAD, H.:  
Experimentelle Ermittlung der Knickkraft bei Betonstraßen mit unterschiedlicher Fugenausbildung, Bundesministerium für Verkehr, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 145, 1973
- [EISENMANN 2003] EISENMANN, J.; LEYKAUF, G.:  
Betonfahrbahnen, Verlag Ernst & Sohn, A. Wiley Company, 2003
- [EOM 2000] EOM, I.-S.; PARSONS, I.; HJELMSTAD, K.:  
Nonlinear Analysis of the Load Transfer Mechanism in Rigid Pavement Systems Considering Various Interface Conditions, Dissertation, Universität Illinois, 2000
- [FE 04.0285/2014] VILLARET; S; KATHMANN; RIWE; ÖSER; UECKERMANN; VILLARET, K.: FE 04.0285/2014/ORB  
Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung, laufendes FE-Thema, Zwischenbericht III, BAST, Bergisch Gladbach

- [FE 04.0433/2009] VILLARET, BIRBAUM, BUCH, EICKSCHEN, NIESSEN, PICHOTTKA, RIWE, TSCHERNACK, ZANDER, FE 04.0433/2009/DGB:  
Grundlagen für eine vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Fahrbahnbefestigungen in Betonbauweise nach mehrjähriger Verkehrsnutzung, unveröffentlichter Schlussbericht 10/2013
- [FE 08.197/2008] BREITENBÜCHER, R.; KUNZ, S.:FE 08.197/2008/CRB  
„Auswirkungen dynamischer Beanspruchungen in Beton von Fahrbahndecken auf potentielle Gefügeschädigungen“, unveröffentlichter Schlussbericht 12/2013
- [FE 08.0217/2012] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN: FE 08.0217/2012/ERB  
Instandsetzung partiell geschädigter Betonfahrbahndecken mittels Betonfertigteilen, unveröffentlichter Schlussbericht
- [FE 08.0219/2012] VILLARET, FROHBÖSE, KRAUSE: FE08.0219/2012/IGB  
Grindingtexturierte Waschbetondecken zur dauerhaften Wiederherstellung der Oberflächeneigenschaften, unveröffentlichter Schlussbericht 01/2016
- [FE 08.0220/2012] VILLARET, ALTE-TEIGELER, ALTREUTHER, BECKENBAUER, FROHBÖSE, GEHLEN, OESER, SKARABIS, TULKE, UECKERMANN, WANG  
FE08.0220/2012/ORB  
Dauerhafte Betondecken - Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren, unveröffentlichter Schlussbericht 03/2017
- [FE 08.0228/2013] BREITENBÜCHER: FE08.0228/2013/BRB  
Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen, Ruhr-Universität Bochum
- [FE 08.0232/2014] BECKENBAUER, T., ALTREUTHER, A., ERTSEY, M., OTTO, T., SCHUBERT, S., KROPP, W., HOEVER, C.: FE 08.0232/2014/FRB  
Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsprojekt FE 08.0232/2014, Bundesanstalt für Straßenwesen 2018
- [FE 08.0236/2015] VILLARET, PICHOTTKA, RIWE, TSCHERNACK, WEINGART: FE 08.0236/2015/ERB  
Einsatz von Fertigteilen für die dauerhafte Instandsetzung sowie die Schaffung von Entspannungsbereichen an Betonfahrbahndecken, unveröffentlichter Schlussbericht 03/2017
- [FE 08.0237/2015] VILLARET S., FREUDENSTEIN, FROHBÖSE, EGER, PICHOTTKA, RIWE, VILLARET K.: FE 08.0237/2015/ARB  
„Informationssystem - Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken“, unveröffentlichter Schlussbericht (Entwurf) 09/2017
- [FE 08.0253/2017] ALTE-TEIGELER u.a.: FE 08.0253/2017/ERB  
Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundlegende Erneuerung auf der duraBASt, laufendes FE-Thema, Zwischenbericht, BASt, Bergisch Gladbach
- [FE 08.0254/2017] VILLARET; RIWE; AUGTER; KAYSER: FE 08.0254/2017/KRB  
„KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte“, laufendes FE-Thema, Zwischenbericht, BASt, Bergisch Gladbach

- [FE 09.0188/2011] VILLARET, ST.; VILARET, K.; KIEHNE, A.; RIWE, A.:  
Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton, BAST, 2014
- [FE 89.0269/2011] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.:  
Dimensionierung und Konstruktion von Endbereichen beim Neubau und bei der Erneuerung des Oberbaus in Betonbauweise, Forschungsprojekt FE 89.0269/2011, Bundesanstalt für Straßenwesen 2011
- [FE 89.0279/2012] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.:  
Machbarkeitsstudie zum Einsatz von vorgefertigten Betonfertigteilen zur schnellen Sanierung lokaler Schadstellen, Forschungsprojekt FE 89.0279/2012, Bundesanstalt für Straßenwesen 2012
- [FE 89.0283/2013] RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.:  
Weiterentwicklung und Erweiterung der theoretischen Grundlagen für die Instandsetzungsmethode mittels Betonfertigteilen, Forschungsprojekt FE 89.0283/2013, Bundesanstalt für Straßenwesen 2012
- [FOOS 2006] FOOS, S.:  
Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen, Universität Karlsruhe, 2006
- [FÖRSTER 2005] FÖRSTER, M-O.:  
Temperaturbedingte Beanspruchung von Betonfahrbahnen, Universität Hannover, 2005
- [FREUDENSTEIN 2001] FREUDENSTEIN, S.:  
Untersuchungen über den Einfluss reduzierter Dübeleinbindelängen auf die Wirksamkeit der Fugenkonstruktion bei Betonstraßen, TU München, 2001
- [FREUDENSTEIN 2010] FREUDENSTEIN, ST.; BIRMANN, D.:  
Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft 65
- [GAEDICKE 2009] GAEDICKE, C.; ROESLER, J.; SHAH, S.:  
Fatigue Crack Growth Prediction in Concrete Slabs, International Journal of Fatigue 31, 2009
- [HAMMONS 2006] HAMMONS, M.:  
Advanced Pavement Design: Finite Element Modeling for Rigid Pavement Joints, Report II: Model Development, U. S. Department of Transportation, 1998
- [Heft 976] VILLARET, KAYSER, PFEIFER, U., RIWE, WELLNER, PFEIFER, L.: FE 04.194/2004/ARB  
Weiterentwicklung der Bemessungsmethoden für Verkehrsflächen – Teil Betonstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 976 (2007)
- [Heft 1050] VILLARET, KAYSER, KIEHNE, PFEIFER, RIWE: FE 04.197/2004/ARB  
Grundlagen zur Erfassung der Belastung für die analytische Dimensionierung von Straßenbefestigungen – Teil Betonstraßen, Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 1050 (2010)

- [Heft 1072] VILLARET, KIEHNE, RIWE: FE 04.218/2008/ARB  
Probabilistische Verfahrensweise für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil Betondecken, Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 1072 (2012)
- [Heft 1128] WELLNER, KAYSER, CLAUß: FE 09.0177/2011/ERB  
Projizierter Klimawandel und Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 1128 (2017)
- [HESTER 2018] Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung, Projekt Verbundforschung gefördert vom BMBF, 2018
- [HOLZAPFEL 2010] HOLZAPFEL, G.:  
Nonlinear Solid Mechanics, 2. Auflage, John Wiley & Sons, 2010
- [INNO 2012] VILLARET, S.; KIEHNE, A.; MUSFELD, K.; NIEßEN, A.; RIWE, A.:  
Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der strukturellen Substanz von Verkehrsflächen mit unbewehrter Betondecke, Forschungsprojekt Innovationsprogramm Straße, 2011
- [IPCC 2007] Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- [IPCC, 2014] Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Frequently Asked Questions – Part of the Working-Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Stämpfli Publikationen AG, Bern, Switzerland, 66 pp.
- [KAYSER 2007] KAYSER, S.:  
Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse für Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen, TU Dresden, 2007
- [KERR 1984] KERR, A.D., SHADE, P.J.:  
Analysis of Concrete Pavement Blowups, Acta Mechanica 52 (1984), Springer-Verlag 1984
- [KIM 2006] KIM, S.; CEYLAN, H; GOPALIKRISHNAN, K.; WANG, K.:  
The Effect of Slab Curvature due to the Environmental Loading on Initial Smoothness of Jointed Concrete Pavements, 6th International DUT-Workshop on Fundamental Modelling of Design and Performance of Concrete Pavements, 2006
- [LECHNER 1996] LECHNER, B.:  
Der Temperaturgradient als Bemessungsgröße bei der Dimensionierung von dicken Betondecken, Dissertation, TU München, 1996



- [LEE 2001] LEE, S.; SOFFELS, S.:  
Analysis of In-situ Joint Movement in Rigid Pavement, Transportation Research Record, No. 1778
- [LEISTRA3-1 2016] BECKENBAUER, T.; KROPP, W.; GAUTERIN, F.; STALTER, F.; BÜCKERS, C.; DREWES, B.:  
Teilvorhaben SPERoN 2020 – Teil I. Erweiterung des effizienten Rechenmodells um physikalische Teilmodelle. Gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 3", Förderkennzeichen 19U10016 A-M, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2016
- [LEISTRA3-2 2016] ESTORFF, O.; KROPP, W.; STEPHAN, E.; BECKENBAUER, T.:  
Teilvorhaben SPERoN 2020 – Teil II. Entwicklung eines Rechenmodells zur Reduzierung des Rollgeräusches profilierter Reifen. Gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 3", Förderkennzeichen 19U10016 A-M, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2016
- [MAITRA 2009] MAITRA, S.; REDDY, K.; RAMACHANDRA, L.:  
Load Transfer of Dowel Bae System in Jointed Concrete Pavement, Journal of Transportation Engineering, 2009
- [MC 90] CEB Bulletin d'Information Nr. 213/214: CEB/FIB Model Code 1990, London, Thomas Telford Ltd. 1993
- [MECHTCHERINE 2015] MECHTCHERINE, V.:  
Hochduktiler beton mit Kurzfaserbewehrung: Baustoffliche Grundlagen und bautechnische Anwendungen, Beton- und Stahlbetonbau, 2015
- [M-E D 2004] ARA Inc. ERES.:  
Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, 2004
- [MISHRA 2012] MISHRA, T., MERRITT, D.:  
New Innovations in Precast Concrete Pavement, 10th International Conference on Concrete Pavements, Quebec 2012
- [MÜLLER 2016]) MÜLLER, CH.:  
Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport in Betonen und Zementestrichen sowie auf den hieraus resultierenden Feuchtegehalt unter verschiedenen Umweltbedingungen, VDZ, 2016
- [NASSIRI 2006] NASSIRI, S.; VANDENBOSSCHE, J.:  
Methodology for Establishing Permanent Curl/Warp Gradients in Jointed Plain Concrete Pavements, 10th International Conference on Concrete Pavements, 2006
- [NUMRICH 2003] NUMRICH, R.:  
Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, TU Dresden, 2003
- [PFANNER 2003] PFANNER, D.:  
„Zur Degradation von Stahl-betonbauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung“  
Fortschrittsberichte VDI Nr. 189  
Ruhr-Universität Bochum, 2003

- 
- [PFEIFER 1973] PFEIFER, L.:  
Beitrag zur Ermittlung der relativen Verformungen und der Spannungen von Betonstraßen auf starrer unterer Tragschicht, Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1973
- [PIARC 1995] PIARC:  
Surface Characteristics. XXth World Road Congress in Montreal, September 3-9, Technical Committee on Surface Characteristics, Report 20.01.B, 1995.
- [PRABHU 2006] PRABHU, M.; VARMA, A.; BUCH, N.:  
Effects of Dowel Misalignment on the Stress-States in Jointed Concrete Pavements, 6th International DUT-Workshop on Fundamental Modelling of Design and Performance of Concrete Pavements, 2006
- [RACKWITZ 2006] RACKWITZ, R.:  
Zuverlässigkeit und Lasten im konstruktiven Ingenieurbau, TU München, 2006
- [RIWE 2015] RIWE, A.:  
Methoden zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Straßenplatten aus Beton, TU Dresden, 2015
- [RIWE 2019] RIWE, A.:  
Rechnerische Analyse des Einflusses ausgewählter Materialparameter auf die maximalen Spannungen und Verformungen von Betonfahrbahnplatten, Bundesanstalt für Straßenwesen, Auftrag 45000053082, unveröffentlicht
- [SADEGHI 2017] SADEGHI, V.; HESAMI, S.:  
Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements (JPCP) using FEM, ScienceDirect, 2017
- [SERUGA 2012] SERUGA, A., SZYLOWSKI, R.:  
Experiences resulted from construction of two-way posttensioned concrete pavement, 10th International Conference on Concrete Pavements, Quebec 2012
- [SII 2014] SII, H.:  
Three-Dimensional Finite Elemente Analysis of Concrete Pavement on Weak Foundation, Griffith School of Engineering, 2014
- [SONDAG 2006] SONDAG, S.; SNYDER, M.:  
Analysis of Built-in Curling and Warping of PCC Pavements, 6th International DUT-Workshop on Fundamental Modelling of Design and Performance of Concrete Pavements, 2006
- [SPAETHE 1992] SPAETHE, G.:  
Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, 2. Auflage, Springer Verlag Wien, 1992
- [SPEED-FT] Schnelle Reparatur der Betonfahrbahndecken mit Fertigteilen, laufendes Forschungsprojekt im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und des deutschen Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Zeitraum 2016-2018
- [UBA 2018] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>

- [VILLARET 2014-1] VILLARET, S.:  
Hitzeschäden auf südbayerischen Betonautobahnen, Teil 1: Datenanalyse und Streckenbeprobung, 2014
- [VILLARET 2014-2] VILLARET, S., PFEIFER, L.; RIWE, A.:  
Hitzeschäden auf südbayerischen Betonautobahnen, Teil 2: FE-Modell zur Berücksichtigung von Imperfektionen, 2014
- [VOIGT 2010] VOIGT, G.; SNYDER, J.:  
Concrete Pavement Joint Sealing & Filling a U.S. Perspektive, International Conference on Concrete Pavements, 2010
- [WEINGART 2017] WEINGART, W., LÜDIKE, H.:  
Profilierte Fugeneinlagen für die Herstellung überdeckter Fugen in Betonflächen, Analyse von Forschungsergebnissen im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Gesamtbericht 12/2017, unveröffentlicht
- [WERKMEISTER 2003] WERKMEISTER, S.:  
Plastisches Verformungsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen, TU Dresden, 2003
- [YINGHONG 2014] YINGHONG, Q.; HILLER, J.:  
Coupled Thermal and Moisture Modeling of Joined Concrete Pavements: A Sensitivity Study, International Conference on Concrete Pavements, 2014

## Verwendete Regelwerke

- [ARS 04/2013] 22.01.2013 ARS-Nr. 04/2013 StB 27/7182.8/3/1885090, Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure- Reaktion (AKR), (VkB1. 2013 S. 222)
- [ASR 5.2 2018] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2, Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Baustellen im Grenzbereich zum Straßenverkehr – Straßenbau- stellen, Ausgabe 2018
- [DIN EN 197-1] Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011
- [DIN EN 206-1] Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013
- [DIN EN 934-2] Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 2: Betonzusatzmittel - Defini- tionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fas- sung EN 934-2:2009+A1:2012
- [DIN EN 1008] Zugabewasser für Beton - Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Was- ser, als Zugabewasser für Beton; Deutsche Fassung EN 1008:2002
- [DIN 1045-2] Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Ei- genschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [DIN EN 1991-1-1] Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau (Ausgabe 11/2010)
- [DIN EN 1992-1-1] Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (Ausgabe 1/2011)
- [EN 12620] Gesteinskörnungen für Beton
- [EN 13242] Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische im Inge- nieur- und Straßenbau
- [EN 16236] Bewertung der Konformität von Gesteinskörnungen – Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle
- [RAA 2008] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, Ausgabe 2008
- [RDO Beton 09] FGSV: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Ober- bau von Verkehrsflächen RDO-Beton 09, Ausgabe 2009
- [RLS 2019] FGSV: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe 2019
- [RSA 1995] Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, Ausgabe 1995, 6. überar- beitete Auflage Stand Juni 2017
- [RSO Beton] Richtlinien zur Beurteilung der strukturellen Substanz von Betonstraßen (in Bearbei- tung)

- [RStO 12] FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen , Ausgabe 2012
- [TL Beton-StB 07] Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007
- [TL Gestein-StB] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004/ Fassung 2007
- [TP B-StB] Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen
- [ZTV Beton-StB 07] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007

## Tabellen

Tab. 2.1:	Lineare Trends der Lufttemperatur (Differenzwerte zwischen 1881 und 2017 bezogen auf die Trendlinie, Bild 2.4).....	18
Tab. 2.2:	Thermophysikalische Materialkennwerte für Beton in Abhängigkeit von den untersuchten Parametervarianten aus [Heft 1128] .....	26
Tab. 2.3:	Mittlere Anzahl der stündlichen Überschreitungen der Schwellenwerte .....	28
Tab. 2.4:	Verkehrsentwicklung in Zahlen (aus [FITSCHEN/NORDMANN 2018]).....	35
Tab. 2.5:	Entwicklung des DTV <sup>(SV)</sup> auf bundesdeutschen Autobahnen von 1997 bis 2015.....	35
Tab. 2.6:	Straßenbetonklassen mit charakteristischer Spaltzugfestigkeit $f_{ctk,core}$ ermittelt an Prüfcylinder-/Bohrkernscheiben (nach [TP B-StB], 3.1.05).....	40
Tab. 2.7:	Erstprüfung und WPK-Prüfung (nach TP Beton-StB bzw. TP B-StB).....	52
Tab. 2.8:	Prüfvorschriften für Gebrauchs- und Substanzeigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton .....	53
Tab. 3.1:	konstruktive Parameter für die FEM-Berechnung.....	84
Tab. 3.2:	Materialparameter .....	88
Tab. 3.3:	Auswirkungen einzelner Maßnahmen .....	113
Tab. 3.4:	Rechenwerte zur Ermittlung der Dehnungsdifferenzen.....	118
Tab. 3.5:	Berechnete Verformungswerte am Plattenrand.....	120
Tab. 3.6:	Koeffizientenwerte für die Polynome.....	121
Tab. 3.7:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 1 + Temperaturlastfall 1 .....	127
Tab. 3.8:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 2 + Temperaturlastfall 1 .....	127
Tab. 3.9:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 3 + Temperaturlastfall 1 .....	128
Tab. 3.10:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 1 + Temperaturlastfall 2 .....	128
Tab. 3.11:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 2 + Temperaturlastfall 2 .....	129
Tab. 3.12:	Berechnungsergebnisse für den Fall Verkehrslastfall 3 + Temperaturlastfall 2 .....	129
Tab. 3.13:	Anteilmäßige Reduzierung der Hauptspannungen bzw. Verformungen bei einer Veränderung des Querfugenabstandes von 5,0 m auf 4,0 m bzw. 4,5 m .....	133
Tab. 3.14:	Für die Berechnungen angesetzte Muldenparameter .....	135
Tab. 3.15:	Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 1 ohne Temperatureinfluss .....	136
Tab. 3.16:	Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 2 ohne Temperatureinfluss .....	136
Tab. 3.17:	Berechnungsergebnisse für den Verkehrslastfall 3 ohne Temperatureinfluss .....	137
Tab. 3.18:	Materialparameter für die Berechnung der Temperaturverläufe (aus [RIWE 2019]) .....	146
Tab. 3.19:	Temperaturverläufe für die 24,5 cm dicke Betondecke (aus [RIWE 2019]) .....	147
Tab. 3.20:	Temperaturverläufe für die 30,5 cm dicke Betondecke (aus [RIWE 2019]) .....	149
Tab. 3.21:	Berechnungsfälle (aus [RIWE 2019]) .....	154
Tab. 3.22:	Ergebnisse für den Lastfall Eigengewicht + Temperatur.....	156
Tab. 3.23:	Ergebnisse für den Lastfall Eigengewicht + Temperatur + Verkehrslast.....	158
Tab. 3.24:	Spannungen bei offener und geschlossener Fuge .....	169
Tab. 3.25:	Widerstandskräfte gegen die Fugenbewegung bei unterschiedlicher Winkelabweichung..	183
Tab. 3.26:	Maximale Plattenverformungen $maxD3$ in mm. ....	188

Tab. 3.27:	Dehnung $\Delta L$ der Betonplatten in Abhängigkeit von der Plattenlänge (Ausgangslänge), der Wärmedehnzahl $\alpha_T$ und der Temperaturdifferenz $\Delta T$ .	189
Tab. 3.28:	Koeffizientenwerte für die Polynome der Rollspurberechnung für die akustische Simulation aufgrund von Plattenverformungen.	190
Tab. 3.29:	Übersicht über die variierten Oberflächenparameter und deren Werte.	198
Tab. 3.30:	Zusammenfassung der $L_{Aeq,20m}$ -Werte für wichtige Parameterkonstellationen. <i>min</i> = Minimum der $L_{Aeq,20m}$ -Werte der Parametervariation für die jeweilige Textur; <i>max</i> = Maximum der $L_{Aeq,20m}$ -Werte. $D_{SD re. 101,4dB(A)}$ = Fahrbahnoberflächenkorrektur in Anlehnung an die RLS-19 [RLS 2019], siehe Text.	203
Tab. 4.1:	Mindestmaße für seitliche Sicherheitsabstände gemäß [ASR 5.2 2018] bei Straßenbaustellen längerer Dauer	208
Tab. 4.2:	Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 2 FS ohne Überleitung gemäß [RSA 1995]	209
Tab. 4.3:	Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 2 FS mit Überleitung gemäß [RSA 1995]	212
Tab. 4.4:	Dimensionierungsberechnungen AWDSTAKO, C30/37-3,7, B=100 Mio., Unterlage HGT.	218
Tab. 4.5:	Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 3 FS ohne Überleitung gemäß [RSA 1995]	219
Tab. 4.6:	Mögliche Verkehrsführungen bei Richtungsfahrbahnen mit 3 FS mit Überleitung gemäß [RSA 1995]	221
Tab. 4.7:	Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient)	235
Tab. 4.8:	Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)	236
Tab. 4.9:	Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient) bei kleinen Platten	237
Tab. 4.10:	Maximale Spannungen und Verformungen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient) bei kleinen Platten	237
Tab. 4.11:	Maximale Spannungen und Verformungen für alle Berechnungsfälle	238
Tab. 4.12:	Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenbreiten für den Temperaturlastfall 1 (positiver Gradient)	241
Tab. 4.13:	Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenbreiten für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)	241
Tab. 4.14:	Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenlängen für den Temperaturlastfall 1 (negativer Gradient)	242
Tab. 4.15:	Gegenüberstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Plattenlängen für den Temperaturlastfall 2 (negativer Gradient)	243
Tab. 4.16:	Größe des Vertikalspaltes in Abhängigkeit von der Neigung der Fugenflanke	248
Tab. 4.17:	Wirksamkeitsindex und Stahlspannung für unterschiedliche Blechdicken	251
Tab. 4.18:	Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage	256
Tab. 4.19:	Abweichung der für unterschiedliche Tragschichten berechneten maximalen Hauptspannungen zu den mit dem vereinfachten Modell aus Abschnitt 4.2.1 berechneten Werten	258
Tab. 4.20:	Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen für die drei Materialfälle	262
Tab. 4.21:	Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen für die drei Materialfälle	264

## Bilder

Bild 2.1:	Vergleich der beobachteten Änderungen der Erdoberflächentemperatur auf kontinentaler und globaler Skala mit den von Klimamodellen auf Grund natürlicher und anthropogener Antriebe berechneten Resultaten. Die Jahrzehnt-Mittel der Beobachtungen sind für den Zeitraum 1906–2005 (schwarze Linie) im Zentrum des Jahrzehnts und relativ zum entsprechenden Mittel von 1901–1950 eingezeichnet. Die Linien sind gestrichelt, wenn die räumliche Abdeckung weniger als 50% beträgt. Blau schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 19 Simulationen von 5 Klimamodellen, welche nur die natürlichen Antriebe durch Sonnenaktivität und Vulkane berücksichtigen. Rot schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 58 Simulationen von 14 Klimamodellen unter Verwendung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen Antriebe. [IPCC 2007].....	16
Bild 2.2:	Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche....	17
Bild 2.3:	Abweichung der globalen Lufttemperatur vom Durchschnitt 1961 bis 1990 (Referenzperiode) .....	17
Bild 2.4:	Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland.....	18
Bild 2.5:	Anzahl der Tage mit einem Lufttemperatur-Maximum über 30 °C.....	19
Bild 2.6:	Mittlere Tagesmitteltemperatur im Sommer in Deutschland 1881 bis 2017 .....	20
Bild 2.7:	Mittlere Tagesmitteltemperatur im Winter in Deutschland 1881 bis 2017 .....	21
Bild 2.8:	Schematische Darstellung der relativen Bedeutung verschiedener Unsicherheitsquellen und ihrer Entwicklung über die Zeit [IPCC, 2014].....	22
Bild 2.9:	Änderung der 30-jährigen mittleren Oberflächentemperaturen (Durchschnitt aller untersuchten Varianten und Emissionsszenarien) bezogen auf die Temperaturen des Zeitraums 1983-2012 (Normierungszeitraum) - [Heft 1128].....	22
Bild 2.10:	Relative Änderung der auf den Zeitraum 1983-2012 normierten Gradienten, Mittelwert aller untersuchten Varianten und Emissionsszenarien [Heft 1128] .....	23
Bild 2.11:	Mittlere Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit von 2,5 % (links) und 16,0 % (rechts) jeweils beim Emissionsszenario A1B, alle Belastungsklassen und Bauweisen [Heft 1128].	23
Bild 2.12:	Vergleich der Standorte Dresden (links) und Freiburg (rechts) - Relative Änderung der auf den Zeitraum 1983-2012 normierten Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit 16,0 % in Abhängigkeit der Emissionsszenarien nach [Heft 1128] .....	25
Bild 2.13:	Änderung der mittleren Gradienten mit einer Überschreitungshäufigkeit von 2,5 % bezogen auf den Mittelwert der Parameterkombination PB3 des Zeitraums 1983-2012, Emissionsszenario A1B aus [Heft 1128] .....	26
Bild 2.14:	Jährliche Maxima der Gradientenwerte für die Station 164 (Angermünde).....	27
Bild 2.15:	Jährliche Minima der Gradientenwerte für die Station 164 (Angermünde).....	27
Bild 2.16:	Mittlere Anzahl der jährlichen Niveauüberschreitungen .....	28
Bild 2.17:	Mittlere Anzahl der jährlichen Niveauunterschreitungen .....	29
Bild 2.18:	Durchschnittswerte der mittleren jährlichen Plattentemperatur .....	29
Bild 2.19:	Verlauf der jährlichen Maximalwerte der Temperaturgradienten (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde).....	30
Bild 2.20:	Verlauf der jährlichen Minimalwerte der Temperaturgradienten (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde) .....	30
Bild 2.21:	Verlauf der jährlichen Niveauüberschreitungen (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde).....	31
Bild 2.22:	Verlauf der jährlichen Niveauunterschreitungen (rot) und der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (blau) für die Station 164 (Angermünde).....	31



Bild 2.23:	Verlauf der jährlichen Werte der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (rot) und der durchschnittlichen Oberflächentemperatur (blau) .....	32
Bild 2.24:	Verlauf der jährlichen Werte der durchschnittlichen mittleren Plattentemperatur (rot) und der jährlichen Maximalwerte für die mittlere Plattentemperatur (blau) .....	33
Bild 2.25:	Verlauf der über 328 Stationen gemittelten Werte für die Jährlichen Maximalwerte der mittleren Plattentemperatur .....	33
Bild 2.26:	Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen in der Bundesrepublik seit 1950 (aus [FITSCHEN/NORDMANN 2018]) .....	34
Bild 2.27:	Entwicklung des DTV <sup>(SV)</sup> auf bundesdeutschen Autobahnen von 1997 bis 2015 .....	36
Bild 2.28:	Entwicklung des DTV <sup>(SV)</sup> , Vergleich der Prognose nach RStO 2012 (orange) mit den tatsächlichen Werten (blau) .....	36
Bild 2.29:	Entwicklung des Produktes $q_{Bm} \times DTV^{(SV)}$ .....	37
Bild 2.30:	Betondecke nach den RStO bzw. RDO Beton .....	41
Bild 2.31:	Standardisierte Bauweisen (nach [RStO 12], Tafel 2) .....	42
Bild 2.32:	Plattengeometrie gemäß [RDO Beton 09]: Plattenlänge $L_p$ und Plattenbreite $B_p$ .....	43
Bild 2.33:	Eckplatte an einer Kreuzung mit konstruktiver Fugenausbildung am Schachtdeckel .....	44
Bild 2.34:	Ausführungsbeispiel eines Fugenplans im Detailbereich eines Kreisverkehrs mit unbewehrter Decke nach [MVaB, Teil 1] .....	44
Bild 2.35:	Kreissegment und Ersatzrechteck .....	45
Bild 2.36:	Anordnung von Fugen .....	45
Bild 2.37:	Regelausführung einer geschnittenen Querscheinfuge mit Fugenmassen [ZTV Fug-StB] ..	47
Bild 2.38:	Querscheinfuge mit Fugenprofil [ZTV Fug-StB] .....	47
Bild 2.39:	Beispiel einer Raumfuge .....	47
Bild 2.40:	Endbereich mit verdübelten Raumfugen .....	49
Bild 2.41:	Anforderungsgruppen und Zielfunktionen .....	59
Bild 2.42:	Anzahl gebrochener Platten in Abhängigkeit vom Alter und der Wärmedehnzahl .....	70
Bild 3.1:	Klassische Querscheinfugenausbildung nach [ZTV Fug-StB] bei 5 m Plattenlänge .....	76
Bild 3.2:	Alternative Querscheinfugenausbildung bei reduzierter Plattenlänge (ca. 2,50 m) .....	77
Bild 3.3:	Alternative Querscheinfugenausbildung ohne Aufweitungsschnitt bei reduzierter Plattenlänge (ca. 2,50 m) .....	77
Bild 3.4:	Dübelverformung bei Fehlausrichtung .....	78
Bild 3.5:	Verlauf der Spannungstrajektorien im Kerbschnittbereich .....	78
Bild 3.6:	Querkraftübertragende Längspressfugenausbildung für Flugbetriebsflächen als Nut- und Feder-Profile [WEINGART 2017] .....	78
Bild 3.7:	Fugeneinlage mit wechselseitig ausgeformten Konsolen Typ 1 [WEINGART 2017] .....	79
Bild 3.8:	Konstruktionsdetails der Fugeneinlage mit unten offenen wechselseitig ausgeformten Konsolen (Variante zu Typ 1 mit Entlüftungsöffnungen) [WEINGART 2017] .....	79
Bild 3.9:	Variante 1 – Nut-Nut-System .....	79
Bild 3.10:	Variante 2 – Nut-Feder-System .....	79
Bild 3.11:	Einschnürung des Fugenfüllmaterials infolge Dehnung [VOIGT 2010] .....	80
Bild 3.12:	Vorgespannte Fugenbänder [VOIGT 2010] .....	81
Bild 3.13:	Dauerhaftigkeit von Betonplatten in Abhängigkeit zur Plattenlänge [DARTER 2018] .....	81
Bild 3.14:	Plattenabmaße a) bis c) .....	82

Bild 3.15:	Plattenabmaße a) bis c) mit Winkel ii) 20 ° .....	82
Bild 3.16:	Plattenabmaße a) bis c) mit Winkel iii) 30 ° .....	82
Bild 3.17:	Änderung des statischen Systems in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Unterlage, Fall Aufwölbung .....	83
Bild 3.18:	Verformungsbehinderung durch eine steifere Unterlage.....	83
Bild 3.19:	Visualisierung der Verteilung der gemessenen WZD-Werte .....	85
Bild 3.20:	Visualisierung der Verteilung aller gemessenen Elastizitätsmodul-Werte .....	86
Bild 3.21:	Ermittelte Werte für E-Modul und Wärmedehnzahl.....	87
Bild 3.22:	Aufteilung des Temperaturzustandes in Komponenten .....	89
Bild 3.23:	Konkave Verformung bei Austrocknung (Schwinden) von oben, sowie Verformung bei nachfolgender Erwärmung [RDO Beton 09] .....	91
Bild 3.24:	Ohne konkave Vorverformung - bei Erwärmung von oben [RDO Beton 09].....	91
Bild 3.25:	Volumenmodell mit vorverformter Platte, Auflast und Unterlage .....	91
Bild 3.26:	Plattenbewegung bei Eckbelastung einer aufgeschüsselten Einzelplatte.....	92
Bild 3.27:	Einsenkung des Fugenrandes ohne Dübel.....	92
Bild 3.28:	Einsenkung des Fugenrandes mit Dübel.....	93
Bild 3.29:	Dübelverformung bei Fehlausrichtung.....	94
Bild 3.30:	FEM-Volumenmodell für einen einzelnen Dübel im Beton .....	95
Bild 3.31:	Fahrdynamisch relevante Wellenlängen .....	96
Bild 3.32:	Texturbereiche und deren Auswirkungen, nach [PIARC 1995] .....	97
Bild 3.33:	Plattenverformung und Überhöhte Darstellung der statischen und dynamischen Radlast $F_{z, stat}$ und $F_{z, dyn}$ bei der Überfahrt über das Plattensystem .....	97
Bild 3.34:	Links: Reifen-Fahrbahn-Kontakt. ZT: nicht verformte Reifenkontur (grau), ZR: Fahrbahnrauigkeit, $F_e$ und $F_m$ : Kontaktkräfte an den Punkten e und m, $u_e$ : dynamische Auslenkung der Reifenkontur im Punkt e. Rechts: ortsabhängige Steifigkeit $S_i(x)$ mit dem zugrunde liegenden realen Reifenprofil im Hintergrund. ....	98
Bild 3.35:	Veränderung des A-bewerteten Kontaktkraftpegels und Schalldruckpegels des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs als Funktion der Fugenöffnungsweite [FE 08.0232/2014]. ....	99
Bild 3.36:	Schema der Sensitivitätsanalyse .....	100
Bild 3.37:	Zusammenwirken der bautechnischen mit der akustischen Simulation.....	100
Bild 3.38:	Anwendung des Modells in der Validierung (Analyse) und für die Prognose von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen (Synthese).....	101
Bild 3.39:	FEM-Volumenmodell für einen Betonblock mit integriertem Dübel.....	102
Bild 3.40:	FEM-Volumenmodell zur Analyse der Fugenkonstruktion entsprechend Kapitel 3.1.1 .....	103
Bild 3.41:	Unter Belastung verformtes System.....	103
Bild 3.42:	FEM-Volumenmodell zur Analyse der Fugenkonstruktion entsprechend Kapitel 0 .....	104
Bild 3.43:	Verformtes System mit Verdrehung der Fugenflanken .....	104
Bild 3.44:	Kombination des Finite Element Modells für den Reifenquerschnitt und das Wellenleitermodell für die Ausbreitung der Reifenschwingungen entlang des Reifenumfangs mit der Zielgröße der Schwingungsschnelle $v$ auf der Reifenoberfläche. Rechts: Beispiele für Schwingungsformen..	105
Bild 3.45:	Die drei Reifen mit vollständigen und validierten WFE-Modellen in CHATRIN. ....	106
Bild 3.46:	Abgestrahlter Schalldruckpegel $L_p$ in Abhängigkeit der Frequenz für einen Reifen mit Stoßanregung über die gesamte Reifenbreite, simuliert mit dem Reifenmodell ohne (blau) und mit (rot) luftgefülltem Innenraum. ....	106

Bild 3.47:	Vergleich der gemessenen Punktmobilität (schwarz) mit zwei berechneten Punktmobilitäten mit (rot) und ohne (blau) Berücksichtigung des Innenraums.....	107
Bild 3.48:	Die ersten drei Moden des luftgefüllten Innenraums eines Reifens. Typische Resonanzfrequenzen liegen bei ca. 220 Hz, 450 Hz und 680 Hz. ....	107
Bild 3.49:	WFE-Gitter des 205/55 R16 Reifens. (a) Fall ohne luftgefülltem Innenraum; (b) Fall mit luftgefülltem Innenraum und Felge. Nodes markiert mit •, Shellelemente für Seitenwand und Gürtel in rot, Festkörperelemente der Lauffläche in schwarz, Shellelemente der Felge in blau und Elemente für das Fluid in grün [FE 08.0232/2014].....	108
Bild 3.50:	Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Die nicht verformte Reifenkontur (grau) ist $Z_T$ und die Fahrbahnrauigkeit $Z_R$ . $F_e$ und $F_m$ sind die Kontaktkräfte an den Punkten $e$ und $m$ . $u_e$ ist die dynamische Auslenkung in Punkt $e$ . ....	109
Bild 3.51:	Volumenmodelle einer Einzelplatte unter Temperatureinwirkung und Einzellast.....	110
Bild 3.52:	Modellierte Fugen in einem 9-Platten-Modell .....	111
Bild 3.53:	Spannungsverteilung an einem modellierten Kerbschnitt .....	111
Bild 3.54:	Unter Verkehrslast und Temperatur verformtes 3-Platten-Modell .....	112
Bild 3.55:	9-Platten-Modell mit temperaturbedingter Verformung .....	112
Bild 3.56:	Übergangsbereich zwischen kleineren und größeren Elementen im Fugenbereich.....	112
Bild 3.57:	FEM-Volumenmodell zur Berechnung der Plattenverformung im Randbereich.....	115
Bild 3.58:	Temperaturprofil für den Berechnungsfall 1 .....	116
Bild 3.59:	Temperaturprofil für den Berechnungsfall 2 .....	117
Bild 3.60:	Feuchtigkeitsverteilung im Bauteil (aus [MÜLLER 2016]).....	117
Bild 3.61:	Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Endschwindmaß (aus [FOOS 2006])....	118
Bild 3.62:	Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Feuchtedehnzahl (aus [FOOS 2006])....	118
Bild 3.63:	Verformtes Berechnungsmodell.....	119
Bild 3.64:	Definition der Werte in Tab. 3.5 .....	120
Bild 3.65:	Verformungswerte (blau) und angepasstes Polynom (rot) in der Fahrspur des Rades.....	121
Bild 3.66:	Berechnungsmodell.....	122
Bild 3.67:	Plattengeometrien .....	122
Bild 3.68:	Temperaturprofil für den Temperaturlastfall 1 .....	123
Bild 3.69:	Temperaturprofil für den Temperaturlastfall 2 .....	124
Bild 3.70:	Laststellung VLF 1.....	124
Bild 3.71:	Laststellung VLF 2.....	125
Bild 3.72:	Laststellung VLF 3.....	125
Bild 3.73:	Spannungen in x-Richtung. an der Oberseite des Systems.....	126
Bild 3.74:	Maximale Hauptspannungen für den Temperaturlastfall 1.....	130
Bild 3.75:	Maximale Hauptspannungen für den Temperaturlastfall 2.....	131
Bild 3.76:	Maximale Vertikalverformung für den Temperaturlastfall 1 .....	132
Bild 3.77:	Maximale Vertikalverformung für den Temperaturlastfall 2 .....	133
Bild 3.78:	FEM-Modell mit Hohlräumen unter den Querfugen (Darstellung der Hohlräume 10-fach überhöht).....	134
Bild 3.79:	Hohlraum im Fugenbereich.....	135
Bild 3.80:	Maximale Hauptspannungen in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde)....	137

Bild 3.81:	Maximale Spannungen an der Plattenoberseite in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde).....	138
Bild 3.82:	Maximale Hauptspannungen im TLF 1 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde).....	139
Bild 3.83:	Maximale Spannungen an der Plattenoberseite im TLF 1 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde).....	139
Bild 3.84:	Maximale Hauptspannungen im TLF 2 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde).....	140
Bild 3.85:	Maximale Spannungen an der Plattenoberseite im TLF 2 in Abhängigkeit vom Berechnungsfall (Größe der Mulde).....	140
Bild 3.86:	Platten im vollständigen 9-Platten-Modell und im verwendeten 5-Platten-Modell .....	142
Bild 3.87:	Verwendetes FEM-Volumenmodell (Platten und Unterbau).....	142
Bild 3.88:	Fugenschnitt im Modell.....	143
Bild 3.89:	Gesamtmodell mit Darstellung der Spannungen an der Plattenunterseite .....	143
Bild 3.90:	Dübelspannungen (Fahrtrichtung).....	144
Bild 3.91:	Prinzip der Dübelmodellierung (Fugenbreite überhöht) .....	144
Bild 3.92:	Prinzip der Ankermodellierung (Fugenbreite überhöht) .....	145
Bild 3.93:	Temperaturverlauf für langsame Erwärmung und 24,5 cm Deckendicke .....	147
Bild 3.94:	Temperaturverlauf für langsame Abkühlung und 24,5 cm Deckendicke.....	148
Bild 3.95:	Temperaturverlauf für schneller Abkühlung und 24,5 cm Deckendicke .....	148
Bild 3.96:	Temperaturverlauf für langsame Erwärmung und 30,5 cm Deckendicke .....	149
Bild 3.97:	Temperaturverlauf für langsame Abkühlung und 30,5 cm Deckendicke.....	150
Bild 3.98:	Temperaturverlauf für schnelle Abkühlung und 30,5 cm Deckendicke .....	150
Bild 3.99:	Stellung Verkehrslast.....	151
Bild 3.100:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur .....	158
Bild 3.101:	Maximale Hauptspannungen für den Berechnungsfall V19 (Eigengewicht + Temperatur). .....	159
Bild 3.102:	Spannungsspitze am Ende eines Ankers.....	159
Bild 3.103:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1.....	160
Bild 3.104:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2.....	160
Bild 3.105:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3.....	160
Bild 3.106:	Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 .....	161
Bild 3.107:	Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 .....	161
Bild 3.108:	Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 .....	161
Bild 3.109:	Vertikalspannungen im Randbereich der Platte (V1, Eigengewicht + Temperatur).....	162
Bild 3.110:	Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1.....	162
Bild 3.111:	Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2.....	162
Bild 3.112:	Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3.....	162
Bild 3.113:	Maximale Hauptspannungen an der Plattenunterseite im Berechnungsfall V6 (mit Verkehrslast).....	163
Bild 3.114:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast .....	163
Bild 3.115:	Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast .....	163

---

Bild 3.116: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast .....	164
Bild 3.117: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 .....	164
Bild 3.118: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 .....	164
Bild 3.119: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 .....	165
Bild 3.120: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 .....	165
Bild 3.121: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 .....	165
Bild 3.122: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 .....	166
Bild 3.123: Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 .....	166
Bild 3.124: Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 .....	166
Bild 3.125: Maximale Vertikalverformungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 .....	166
Bild 3.126: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast .....	167
Bild 3.127: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast .....	167
Bild 3.128: Maximale Hauptspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast .....	167
Bild 3.129: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 1 + Verkehrslast .....	167
Bild 3.130: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 2 + Verkehrslast .....	167
Bild 3.131: Maximale Vertikalspannungen im Lastfall Eigengewicht + Temperatur bei TLF 3 + Verkehrslast .....	168
Bild 3.132: Maximale Hauptspannungen an der Plattenunterseite bei offener Fuge .....	169
Bild 3.133: FEM-Volumenmodell: Betonblöcke und Dübel .....	170
Bild 3.134: FEM-Volumenmodell: Betonblöcke und Dübel (Gitterdarstellung) .....	171
Bild 3.135: Berechnete Vertikalspannungen .....	172
Bild 3.136: Verechnete Vertikalspannungen im Beton (horizontaler Schnitt in Dübelebene) .....	173
Bild 3.137: Berechnete Vertikalspannungen im Beton (vertikaler Schnitt in Dübelebene) .....	173
Bild 3.138: Spannungen in Dübellängsrichtung .....	174
Bild 3.139: Lagerung und Belastung der Volumenkörper im Modell .....	174
Bild 3.140: Verformtes Modell .....	175
Bild 3.141: Berechnete Vertikalspannungen .....	176
Bild 3.142: Berechnete Vertikalspannungen im Beton (horizontaler Schnitt in Dübelebene) .....	177
Bild 3.143: Spannungen in Dübellängsrichtung .....	178
Bild 3.144: Dübel mit von der Fahrtrichtung abweichender Winkellage .....	179
Bild 3.145: Gesamtmodell (2 x 2,5 m Länge) .....	179
Bild 3.146: Spannungen in y-Richtung bei einer Winkelabweichung des Dübels von 10° .....	180
Bild 3.147: Betonspannungen in x-Richtung bei 10° Winkelabweichung .....	181
Bild 3.148: Biegespannungen am Dübel bei einer Winkelabweichung von 10° .....	182
Bild 3.149: Widerstandskräfte gegen die Fugenbewegung bei unterschiedlicher Winkelabweichung..	183
Bild 3.150: Dichtefunktionen der Streuungen der Winkelabweichungen der einzelnen Dübel (rot) und der Mittelwerte der Winkelabweichungen der Dübel in einer Fuge .....	184

Bild 3.151:	Beispiele für Schwingungsformen des Reifens.....	186
Bild 3.152:	Positionen für die Berechnung der Schalldrücke des Reifen-Fahrbahn-Geräusches in der Umgebung des Reifens. ....	187
Bild 3.153:	3D-Darstellung der in der akustischen Parameterstudie berücksichtigten Verformungen einer 4m (oben) und 5m (unten) langen und jeweils 4,5 m breiten Platte für die Verformungstypen „Aufschüsselung“ (links) und „Wölbung“ (rechts). Alle Maße in mm. ....	191
Bild 3.154:	Längsprofile der Radrollspur über eine Länge von 20 m in 1 m Querabstand zum Plattenrand für die Verformungstypen „Wölbung“ (links) und „Aufschüsselung“ (rechts) ohne Fugen. Oben: Plattenabstand 4,0 m; unten: Plattenabstand 5,0 m. ....	192
Bild 3.155:	Betriebsverhalten der Fugenfüllung bei überwiegend plastisch eingestellten Fugenfüllungen (links) und elastischen Fugenmassen (rechts). ....	193
Bild 3.156:	Rekonstruktionen der fugenlosen und unverformten Texturen.....	194
Bild 3.157:	Rekonstruktion des Referenzprofils für die Waschbetonoberfläche aus gemessenen Lasertexturprofilen am Beispiel eines der sechs parallelen Profile. a) Originalprofil aus der Messung; b) Profil nach Entfernung der Fugen und Rekonstruktion der Textur über die Länge der Fugenöffnungsweite; c) Profil nach Entfernung der langwelligen Plattenverformungen (Referenzprofil).....	196
Bild 3.158:	Referenzprofile aller sechs parallelen Texturprofile für den Waschbeton 0/8. ....	197
Bild 3.159:	Oberflächenmodelle, dargestellt an einem der sechs parallelen Texturprofile, für den ebenen Fall ohne Plattenverformungen. Querfugenabstand: $a = 5,0$ m, Fugenöffnungsweite $OW = 15$ mm, Fugenfüllhöhe $h = -10$ mm. Oben links: texturlose Oberfläche ohne Höhenversatz, oben rechts: texturlose Oberfläche mit einem Höhenversatz von $M = -1$ mm zwischen aufeinanderfolgenden Platten, unten links: Waschbetonoberfläche ohne Höhenversatz, unten rechts: Waschbetonoberfläche mit Höhenversatz.....	197
Bild 3.160:	Oberflächenmodelle, dargestellt an einem der sechs parallelen Texturprofile, für den Fall mit aufschüsselnder Plattenverformung. Querfugenabstand: $a = 5,0$ m, Fugenöffnungsweite $OW = 15$ mm, Fugenfüllhöhe $h = -10$ mm. Oben links: texturlose Oberfläche ohne Höhenversatz, oben rechts: texturlose Oberfläche mit einem Höhenversatz von $M = -1$ mm zwischen aufeinanderfolgenden Platten, unten links: Waschbetonoberfläche ohne Höhenversatz, unten rechts: Waschbetonoberfläche mit Höhenversatz.....	198
Bild 3.161:	Schematische Übersicht über alle texturlosen Oberflächenmodelle über die Gesamtlänge von 20 m am Beispiel der Oberflächen mit 4,0 m Plattenlänge. ....	199
Bild 3.162:	Links: Einfügung einer 8 mm breiten Fuge in die 6 Texturprofile des Referenzmodells für die Waschbetonoberfläche. Rechts: Texturprofile der realen Waschbetonoberfläche mit einer 10 mm breiten Querscheinfuge. Alle Maße in mm.....	199
Bild 3.163:	Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq,20m}$ der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle ohne Verformung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen $l$ , Fugenöffnungsweiten $w$ und Füllhöhen $h$ des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz. ....	200
Bild 3.164:	Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq,20m}$ der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle mit Aufschüsselung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen $l$ , Fugenöffnungsweiten $w$ und Füllhöhen $h$ des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz. ....	201
Bild 3.165:	Akustische Parameterstudie. Energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq,20m}$ der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h für die Rechenfälle mit Wölbung der Fahrbahnoberfläche bei verschiedenen Plattenlängen $l$ , Fugenöffnungsweiten $w$ und Füllhöhen $h$ des Fugenfüllmaterials. Pro Fugenfüllhöhe ist unterschieden nach dem	

	Höhenversatz zwischen aufeinanderfolgenden Platten in der Reihenfolge 0 mm, -0,5 mm und -1,0 mm. Die grünen Säulen kennzeichnen – zur besseren Orientierung – die Fälle ohne Höhenversatz.....	202
Bild 4.1:	Bezugslinie für seitliche Sicherheitsabstände ( $S_Q$ ) zum fließenden Verkehr:.....	207
Bild 4.2:	Seitlicher Sicherheitsabstand ( $S_Q$ ) und Mindestbreite ( $B_M$ ) für Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Straßenbaustellen, Beispiel Beton-/Gussasphaltpfaster mit überkragendem Kettenlaufwerk gemäß [ASR 5.2 2018] .....	207
Bild 4.3:	Regelplan D I/1 und D I/2 für Verkehrsführung ohne Überleitung ( $2n+2$ ) gemäß [RSA 1995]..	210
Bild 4.4:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung ohne Überleitung ( $2n+2$ ) gemäß [RSA 1995] bei 80 km/h.....	210
Bild 4.5:	Regelplan D I/3 für Verkehrsführung ohne Überleitung ( $2n+1$ ) gemäß [RSA 1995].....	211
Bild 4.6:	Regelplan D II/1a und DII/1b für Verkehrsführung mit Überleitung ( $3s+1$ ) gemäß [RSA 1995]	213
Bild 4.7:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit/ohne Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt - $3s+1 / 2n+1$ ) und Leitbake gemäß [RSA 1995].....	214
Bild 4.8:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit/ohne Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt - $3s+1 / 2n+1$ ) und Fahrzeugrückhaltesystem gemäß [RSA 1995] ....	215
Bild 4.9:	Plattenersatz im Hauptfahrstreifen bei herkömmlicher Plattengeometrie .....	216
Bild 4.10:	Regelplan D II/2a und DII/2b für Verkehrsführung mit Überleitung ( $4s+0$ ) gemäß [RSA 1995]	217
Bild 4.11:	Resultierende Plattengeometrien bei nur einer Längsfuge im Querschnitt (RQ 31).....	217
Bild 4.12:	Resultierende Plattengeometrien bei einer zusätzlichen Längsfuge im Querschnitt.....	218
Bild 4.13:	Regelplan D I/5 für Verkehrsführung ohne Überleitung ( $3n+3$ ) gemäß [RSA 1995].....	220
Bild 4.14:	Regelplan D I/6 für Verkehrsführung ohne Überleitung ( $3n+2$ ) gemäß [RSA 1995].....	221
Bild 4.15:	Regelplan D II/5a für Verkehrsführung mit Überleitung ( $4+2$ ) gemäß [RSA 1995].....	221
Bild 4.16:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführungen mit 2 verbleibenden Fahrstreifen ( $3n+2(s)$ bzw. $4+2$ ) und Leitbake gemäß [RSA 1995] ] .....	223
Bild 4.17:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit 2 verbleibenden Fahrstreifen ( $3n+2$ bzw. $4+2$ ) und Fahrzeugrückhaltesystem gemäß [RSA 1995].....	224
Bild 4.18:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit 2 verbleibenden Fahrstreifen ( $3n+2$ bzw. $4+2$ ) und Leitbake gemäß [RSA 1995] – Geschwindigkeiten 30-50 km/h .....	225
Bild 4.19:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt – $5s+1$ ) und Leitbake gemäß [RSA 1995].....	226
Bild 4.20:	Fahrstreifenbreiten und resultierender Baubereich für Verkehrsführung mit Überleitung (1 Fahrstreifen verbleibt – $5s+1$ ) und Fahrzeugrückhaltesystem gemäß [RSA 1995] .....	227
Bild 4.21:	Regelplan D II/7a für Verkehrsführung mit Überleitung ( $4+0$ ) gemäß [RSA 1995].....	228
Bild 4.22:	Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 1 (Mitte Querfuge).....	229
Bild 4.23:	Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 2 (Mitte Längsfuge).....	229
Bild 4.24:	Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 3 (Ecke).....	230
Bild 4.25:	Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 4 (Mitte Fahrstreifen) .....	230
Bild 4.26:	Plattengeometrie 1 und Laststellung VLF 5 (2 Fahrzeuge auf einer Platte).....	231
Bild 4.27:	Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 1 (Mitte Querfuge).....	231
Bild 4.28:	Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 2 (Mitte Längsfuge).....	231

Bild 4.29:	Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 3 (Ecke).....	232
Bild 4.30:	Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 4 (Mitte Fahrstreifen).....	232
Bild 4.31:	Plattengeometrie 2 und Laststellung VLF 5 (2 Fahrzeuge auf einer Platte).....	232
Bild 4.32:	Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 1 (Ecke) .....	233
Bild 4.33:	Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 2 (Mitte Längsfuge) .....	233
Bild 4.34:	Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 3 (Mitte Fahrstreifen) .....	234
Bild 4.35:	Plattengeometrie 3 und Laststellung VLF-4P 4 (2 Fahrzeuge nebeneinander).....	234
Bild 4.36:	max. Hauptspannungen für alle Berechnungsfälle (h=28 cm).....	239
Bild 4.37:	max. Vertikalverformungen für alle Berechnungsfälle (h=28 cm).....	239
Bild 4.38:	max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 5,0 m Länge und 5,6 m Breite (h=28 cm).....	239
Bild 4.39:	max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 6,0 m Länge und 5,6 m Breite (h=28 cm).....	239
Bild 4.40:	max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten und 5,0 m Länge mit 6,0 m Breite (h=28 cm).....	240
Bild 4.41:	max. Hauptspannungen in den einzelnen Verkehrslastfällen für Platten mit 6,0 m Länge und 6,0 m Breite (h=28 cm).....	240
Bild 4.42:	Vergleich der max. Hauptspannungen bei Ansatz des aktuellen und des erhöhten Temperaturgradienten (VLF1 – Ecke, VLF 2 – Mitte Längsfuge, VLF 3 – Mitte Querfuge, VLF 4 – Mitte Fahrstreifen, VLF 5 – 2 Fahrzeuge) (h=28 cm) .....	244
Bild 4.43:	Vergleich der max. Vertikalverformungen bei Ansatz des aktuellen und des erhöhten Temperaturgradienten (VLF1 – Ecke, VLF 2 – Mitte Längsfuge, VLF 3 – Mitte Querfuge, VLF 4 – Mitte Fahrstreifen, VLF 5 – 2 Fahrzeuge) (h=28 cm) .....	244
Bild 4.44:	Entwicklung der Horizontalspannungen durch Reibung an den Fugenflanken im Verlauf der Fugenöffnung.....	247
Bild 4.45:	Spaltbreiten bei Öffnung einer konischen Fuge.....	247
Bild 4.46:	Bildung neuer Kontaktflächen infolge von Unebenheiten an den Fugenflanken .....	248
Bild 4.47:	Neue Fugenkonstruktion.....	250
Bild 4.48:	Neue Fugenkonstruktion, Darstellung der Konstruktion im Schnitt.....	250
Bild 4.49:	FEM-Volumenmodell zur Simulation der Querkraftübertragung .....	251
Bild 4.50:	verformtes FEM-Modell .....	251
Bild 4.51:	Biegespannungen im horizontalen Blech .....	252
Bild 4.52:	FEM-Volumenmodell für einen Fahrbahnaufbau mit AZS und Verfestigung.....	253
Bild 4.53:	Bei den Berechnungen verwendete Varianten für den Oberbau .....	255
Bild 4.54:	Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage (pos. Temperaturgradient) .	257
Bild 4.55:	Maximale Hauptspannungen bei unterschiedlicher Unterlage (neg. Temperaturgradient) .	257
Bild 4.56:	Laststellung „Mitte Längsfuge“ .....	261
Bild 4.57:	Laststellung „Mitte Querfuge“ .....	261
Bild 4.58:	Normalkräfte in den Fugen ohne Bewegung .....	266
Bild 4.59:	Kräfte am System nach einer Fugenbewegung links .....	266
Bild 5.1:	Plattengeometrien in Relation zur Markierung.....	270
Bild 5.2:	3D-Darstellung der zwölf in der akustischen Simulation für die empfohlene Konstruktion untersuchten Rechenfälle. Alle Maße in mm. ....	272



- 
- Bild 5.3: Längsprofile der Radrollspur über eine Länge von 20 m in 1 m Querabstand zum Plattenrand für die Verformungen der zwölf Rechenfälle für die empfohlene Konstruktion, ohne Fugen. ...  
..... 273
- Bild 5.4: Akustische Simulation der zwölf Fälle für die empfohlene Konstruktion. Mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq,20m}$  der berechneten Zeitsignale an den CPX-Normmesspositionen für 80 km/h. Die rote Linie kennzeichnet den Vergleichswert für Ableitung von  $D_{SD}$ -Werten nach den RLS-19. .... 274

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2019

### S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

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

### S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

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

### S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

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

### S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

### S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

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

### S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

### S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

### S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

### S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

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

### S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

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

### S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

### S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

## 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, Pirskawetz € 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, Hunger, 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 Ausbauphase**

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

**S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten 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.

---

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](http://www.schuenemann-verlag.de)

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