

## Erarbeiten von Grundlagen für einen abnahmetauglichen Bewertungshintergrund für Tragfähigkeitsmessungen an Betonbefestigungen unter Beachtung temperatur- und jahreszeitbedingter Einflüsse

FA 4.203

Forschungsstelle: Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen  
(ISE) (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)

Bearbeiter: Karcher, C. / Kubanek, K. /  
Freund, H.-J. / Chakar, T.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und  
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: November 2011

### 1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts war es zum einen, durch umfassende Tragfähigkeits- und Temperaturmessungen den Temperatureinfluss auf die für Betonkonstruktionen relevant erachteten Zustandsindikatoren  $D_1$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $s_{D1}$ ,  $s_{rF}$  sowie auf die Regressionsparameter "a" und "b" des Regressionsparameterverfahrens unter Einbeziehung von jahreszeitlich bedingten Veränderungen der Randbedingungen spezifisch herauszuarbeiten. Zum anderen sollten anhand der Tragfähigkeitsuntersuchungen auf Grundlage eines vorliegenden Bewertungsverfahrens (Grossmann, 2003) und unter Beachtung der als maßgeblich erachteten Einflüsse für die genannten Zustandsgrößen abgesicherte Bewertungskennzahlen mit Bezügen zu den jeweiligen Bauweisen als Grundlagen für einen Bewertungshintergrund angegeben werden.

### 2 Untersuchungsmethodik

Es wurden acht verschiedene Untersuchungsstrecken der Bauklasse SV mit Liegedauern von maximal 5 Jahren ausgewählt. Wegen der Bedeutung der Bauweise auf hydraulisch gebundener Tragschicht mit Vliesstoff und den bereits an anderer Stelle durchgeführten Untersuchungen wurden fünf Strecken dieser Bauweise ausgewählt. Des Weiteren wurden eine Strecke mit Betondecke auf einer Asphalttragschicht und zwei auf einer Tragschicht ohne Bindemittel untersucht.

Um weitere Erkenntnisse über Randbedingungen bei FWD-Messungen erlangen zu können, wurden an einer der Untersuchungsstrecken in einer Betonplatte Dehnungs-, Temperatur- sowie Feuchtemesssensoren eingebaut. An einer weiteren Strecke wurden zu signifikanten Witterungsbedingungen zweier Jahreszeiten Bohrkerne entnommen und daran der Feuchtegehalt bestimmt.

An den Untersuchungsstrecken wurden an jeweils vier Messterminen mit unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen verschiedener Jahreszeiten systematische FWD-Messungen mit gleichzeitiger Erfassung der Temperatur in der Betonkonstruktion durchgeführt. Dabei erfolgte je Messtermin eine Standard- und eine Intensivmessung. Die Standardmessung wurde jeweils in einem Untersuchungsabschnitt von 2 km Länge an jeder zweiten Betonplatte mit der Standardbelastung (50 kN) in der rechten Radspur des Hauptfahrstreifens durchgeführt und die hierfür verhaltensbeschreibenden Zustandsgrößen  $D_1$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $s_{D1}$  und  $s_{rF}$  für diese Strecken bei unterschiedlichen Zustän-

den ermittelt. Die Intensivmessung erfolgte innerhalb des jeweiligen Untersuchungsabschnitts auf einer Länge von maximal 200 m an jeder Platte mit drei Laststufen (50, 75 und 90 kN) am Plattenrand (Querfuge) in der linken und rechten Radspur des Hauptfahrstreifens. Dabei sollte jeder Messpunkt zweimal je Messtag im größeren zeitlichen Abstand erfasst werden, um gegebenenfalls die Effekte unterschiedlicher Temperaturzustände unter sonst gleichen Randbedingungen ermitteln zu können.

Alle Einzelwerte der durchgeführten Messungen wurden zunächst in Streckenbändern dargestellt sowie die statistischen Basiskenngrößen ausgewiesen.

Für die Auswertungen wurden keine homogenen Abschnitte auf Basis eines bestimmten Zustandsindikators ermittelt, da dies hinsichtlich der Fragestellung in diesem Projekt nicht sinnvoll erschien. Bei der Bildung von homogenen Abschnitten von größerer Länge wäre bei einer Niveauänderung der Zustandsindikatoren nicht ersichtlich, ob diese aus den Einflüssen von möglicherweise veränderten Temperaturbedingungen oder aus einer tatsächlichen Änderung der vorhandenen Tragfähigkeit resultiert. Da aber unter anderem die Änderung der Niveaus der verschiedenen Zustandsindikatoren in Abhängigkeit von den exogenen Randbedingungen untersucht werden sollte, wurden systematisch vom Streckenanfang beginnend Abschnitte von jeweils 100 m Länge gebildet. Diese Länge erschien zum einen in Anlehnung an die ZEB zielführend. Zum anderen kann davon ausgegangen werden, dass die äußeren Randbedingungen während der Messung innerhalb eines 100 m-Abschnitts gleich bleiben beziehungsweise sich nur unwesentlich ändern. Ebenso basiert die von Grossmann vorgeschlagene Bewertung von Betonkonstruktionen durch die Standardabweichungen der Werte  $D_1$  und  $F$  ( $s_{D1}$  und  $s_{rF}$ ) auf Basis von 100 m-Abschnitten. Daher wurden jeweils die arithmetischen Mittel der Zustandsindikatoren  $D_1$ ,  $F$  und  $W$  sowie die Standardabweichungen  $s_{D1}$  und  $s_{rF}$  der 100 m-Abschnitte betrachtet. Den arithmetischen Mittel der Zustandsindikatoren aller 100 m-Abschnitte wurden die jeweils während der Messung ermittelten Temperaturen und die dazugehörigen Temperaturgradienten aus den Temperaturverläufen zugeordnet.

Des Weiteren wurden die Ergebnisse der beiden 100 m-Abschnitte des Intensivmessfelds aller Strecken untersucht. An diesen Abschnitten wurden bei den Standard- und Intensivmessungen jeweils 12-mal in der rechten Radspur Messungen durchgeführt. Die streckenbedingten Einflüsse und Randbedingungen konnten für diesen kurzen Abschnitt als konstant angesehen werden.

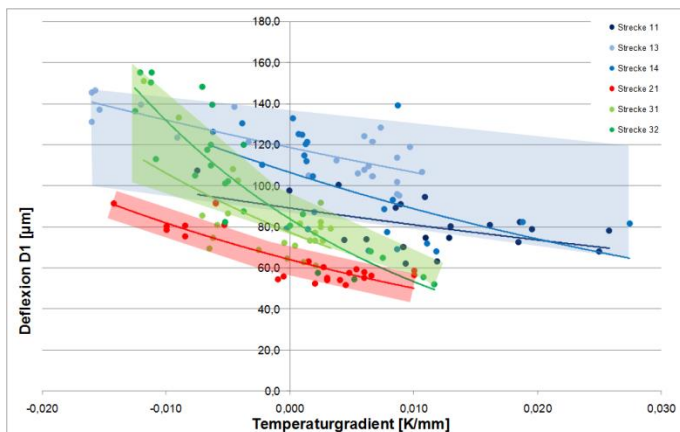
### 3 Untersuchungsergebnisse

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse der einzelnen FWD-Messungen sowie der durchgeführten statistischen Analysen wurden die daraus gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Einflüsse auf die Zustandsindikatoren zusammengeführt. Dazu wurden die verschiedenen erkannten Systematiken als Thesen formuliert, belegt und bautechnisch interpretiert.

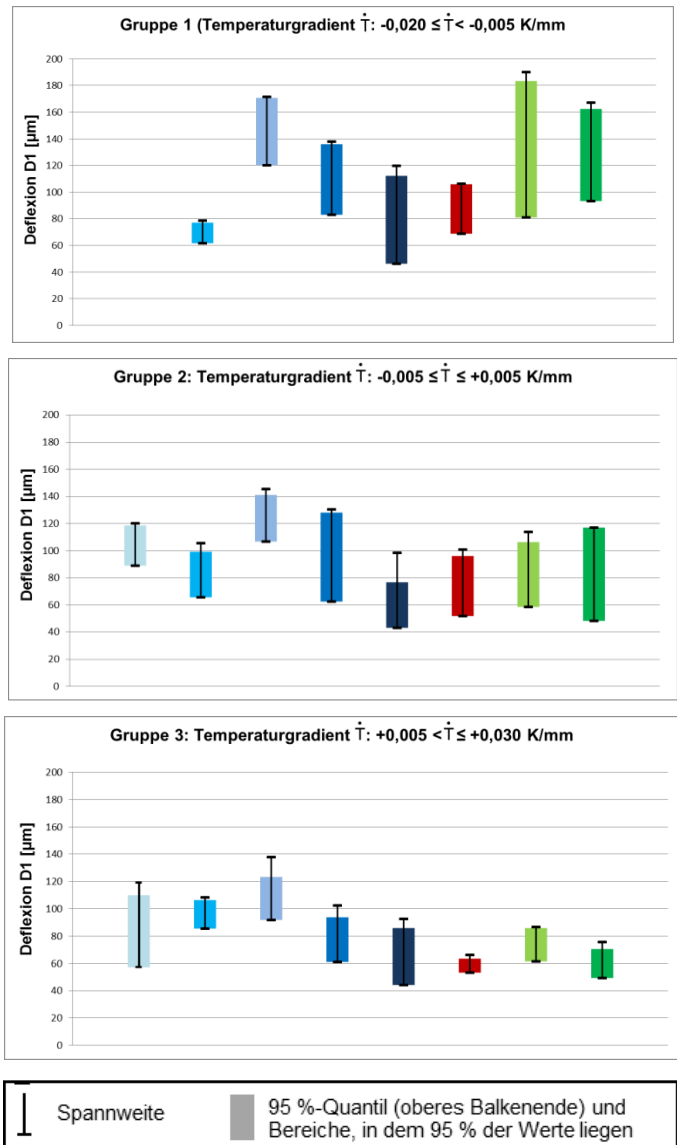
Die Thesen lauten im Einzelnen:

- These 1: Bei negativen Temperaturgradienten ergeben sich größere Werte für die Deflexion D1, die relative Fugenbewegung F und die Standardabweichungen  $s_{D1}$  und  $s_{rF}$  als bei positiven Temperaturgradienten.
- These 2: Temperaturgradienten "um 0 K/mm", das heißt  $-0,005 \dots +0,005$  K/mm, haben vergleichsweise niedrigere beziehungsweise höhere Werte der Zustandsindikatoren D1 und F, teilweise auch für  $s_{D1}$  und  $s_{rF}$  zur Folge als niedrigere beziehungsweise höhere Temperaturgradienten.
- These 3: Steigende Temperaturgradienten haben einen Abfall des Niveaus der Werte der Deflexionen D1 und der relativen Fugenbewegungen F zur Folge.
- These 4: Die Größe des negativen Temperaturgradienten beeinflusst die Werte der Zustandsindikatoren D1 und  $s_{D1}$ .
- These 5: Eine Kombination aus hoher Umgebungstemperatur und positivem Temperaturgradienten hat vergleichsweise niedrige Werte der Zustandsindikatoren F und  $s_{rF}$  zur Folge.
- These 6: Für die hier untersuchten, vergleichsweise jungen Betonkonstruktionen ergibt sich kein Einfluss der Temperaturbedingungen auf die Werte des Wirksamkeitsindex W.

Anschließend wurden bei der Ableitung der Bewertungskennzahlen zur ersten Einschätzung die Intensivmessfelder betrachtet. Beispielhaft wurde dies für den Zustandsindikator D1 in Bild 1 dargestellt. Dabei wurden zunächst je Strecke die Werte der arithmetischen Mittel von D1 über den zugeordneten Temperaturgradienten aufgetragen. Mithilfe exponentieller Regressionskurven für die jeweiligen Strecken wurden die Zusammenhänge verdeutlicht. Danach konnte für jede Bauweise ein abgegrenzter Wertebereich ausgewiesen werden. Mit den so entstandenen Bereichen ließ sich die beschriebene Tendenz von sinkenden Werten für D1 bei steigenden Temperaturgradienten bei allen Bauweisen auch grafisch zeigen.



**Bild 1:** Arithmetische Mittel und abgegrenzte Wertebereiche des Zustandsindikators D1 in Abhängigkeit des Temperaturgradienten für die verschiedenen Bauweisen auf Basis der Intensivmessungen



**Bild 2:** Spannweiten und max. 95 %-Quantile des Zustandsindikators D1 der verschiedenen Strecken, Einteilung in drei Vergleichsgruppen für den Temperaturgradienten auf Basis der Standardmessungen; Strecken in kursiver Schreibweise wurden nicht beim Ableiten der Bewertungskennzahlen berücksichtigt

Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Intensivmessfelder mit einer Länge von 200 m wurden die streckenspezifischen Randbedingungen nur begrenzt miteinbezogen, da die baulichen Randbedingungen über diese Länge in etwa gleich waren und somit kein Einfluss aus der Veränderung der Streckeneigenschaften auf die Zustandsindikatoren vorlag beziehungsweise dieser Einfluss deutlich kleiner war, als wenn die Daten der gesamten Standardmessstrecke zugrunde gelegt worden wären. Daher wurden in einem weiteren Schritt die Werte aus den Standardmessungen zur Ermittlung von Größenordnungen für die Zustandsindikatoren herangezogen. Mit den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Kapiteln wurde dabei bereits eine Unterscheidung in die drei Vergleichsgruppen des Temperaturgradienten und die Bauweisen vorgenommen. Dafür wurden die Spannweiten und die 95 %-Quantile für die drei Vergleichsgruppen des Temperaturgradienten aus den Standard-

messungen jeder Strecke berechnet. Beispielhaft sind diese in Bild 2 für den Zustandsindikator D1 abgebildet.

Bei diesen Untersuchungen ergab sich ebenfalls, dass mit steigendem Temperaturgradienten die Werte der Deflexion D1 bei den Strecken aller Bauweisen mit Ausnahme der Strecke 12 absanken. Insgesamt resultierte durch die hier hinzukommenden streckenbedingten Einflüsse erwartungsgemäß eine Vergrößerung der Spannweiten der Zustandsindikatoren für die einzelnen Bauweisen im Vergleich zur ausschließlichen Betrachtung der Intensivmessfelder.

Innerhalb einer Bauweise wurde das höchste auftretende 95 %-Quantil als Bewertungskennzahl für diese Bauweisen und den jeweiligen Zustandsindikatoren in Abhängigkeit des Temperaturgradienten ausgewiesen. In der Tabelle 1 wurden diese ermittelten Werte als sogenannte Bewertungskennzahlen zusammengestellt.

Die Werte des Wirksamkeitsindex W sind als unabhängig von den Temperaturbedingungen anzusehen, unterscheiden sich

aber je Bauweise. Als Bewertungskennzahlen wurden die 5 %-Quantile des Wirksamkeitsindex W der einzelnen Bauweisen als Mindestwerte in Tabelle 1 angegeben, das heißt die Werte, über denen 95 % aller ermittelten Werte lagen. Aufgrund der unterschiedlichen bautechnischen Wirkung des Auflagers unter der Fuge ergeben sich Mindestwerte für den Wirksamkeitsindex W für die Bauweise

- Betondecke auf HGT mit Vliesstoff von 89 %,
- Betondecke auf ATS von 90 % und
- Betondecke auf ToB von 83 %.

Die angegebenen Bewertungskennzahlen gelten jeweils nur für den Bereich des Temperaturgradienten von -0,020 bis 0,030 K/mm, der bei den vorliegenden Messungen auch zugrunde lag.

**Tabelle 1: Zusammenstellung der abgeleiteten Bewertungskennzahlen als 95 %-Quantile für die Zustandsindikatoren D1, F, s<sub>D1</sub>, s<sub>rF</sub> und W auf Basis der Standardmessungen, Einteilung in Bauweisen nach RStO und in drei Vergleichsgruppen für den Temperaturgradienten**

Bewertungskennzahlen für die Zustandsindikatoren D1, s <sub>D1</sub> , F, s <sub>rF</sub> , W					
Gruppe 1: Temperaturgradient $\dot{T}$ : -0,020 ≤ $\dot{T}$ < -0,005 K/mm					
Bauweise nach RStO 01	D1 [µm]	s <sub>D1</sub> [µm]	F [µm]	s <sub>rF</sub> [µm]	W [%]
Betondecke auf HGT mit Vliesstoff (Tafel 2, Zeile 1.1)	171	29	30	11	89
Betondecke auf ATS (Tafel 2, Zeile 2)	106	13	18	7	90
Betondecke auf ToB (Tafel 2, Zeile 3)	184	24	30	6	83
Gruppe 2: Temperaturgradient $\dot{T}$ : -0,005 ≤ $\dot{T}$ < +0,005 K/mm					
Betondecke auf HGT mit Vliesstoff (Tafel 2, Zeile 1.1)	141	18	30	6	89
Betondecke auf ATS (Tafel 2, Zeile 2)	96	9	17	5	90
Betondecke auf ToB (Tafel 2, Zeile 3)	110	16	30	6	83
Gruppe 3: Temperaturgradient $\dot{T}$ : +0,005 ≤ $\dot{T}$ < +0,030 K/mm					
Betondecke auf HGT mit Vliesstoff (Tafel 2, Zeile 1.1)	123	17	25	8 (15)*	89
Betondecke auf ATS (Tafel 2, Zeile 2)	63	6	12	4	90
Betondecke auf ToB (Tafel 2, Zeile 3)	86	10	21	5	83

\* Der statistisch ermittelte Klammerwert wich aufgrund der Werte der Strecke 13 stark von der Gesamtsystematik ab und wurde daher angepasst.

Zu bevorzugen sind Messungen bei einem Temperaturgradienten > 0,005 K/mm. Insgesamt treten für diesen Bereich geringere Streuungen der Einzelwerte auf (vgl. Bewertungskennzahlen

s<sub>D1</sub> und s<sub>rF</sub> in Tabelle 1), gleichzeitig gibt es hier auch deutlichere Abgrenzungen zwischen den einzelnen Bauweisen (vgl. Bild 1). Falls keine Messung bei diesen Randbedingungen möglich

ist, liegen nun entsprechend Tabelle 1 für Temperaturgradienten zwischen  $-0,020$  und  $0,005$  K/mm ebenfalls abgesicherte Bewertungskennzahlen vor.

In einem weiteren Schritt wurden die klimatischen Randbedingungen bei FWD-Messungen bauweisenunabhängig diskutiert. Es wurde unter anderem festgestellt, dass allein über die Umgebungs- oder die Oberflächentemperatur keine Rückschlüsse auf den Temperaturgradienten gezogen werden können. Daher sollten bereits in den Tagen und Nächten vor den Messungen die vorliegenden Temperaturen beobachtet werden, um einen sinnvollen Zeitpunkt für den Beginn der Messungen bei einem Temperaturgradienten von möglichst  $> 0,005$  K/mm wählen zu können.

Darüber hinaus wurden weitere Empfehlungen für die praktische Durchführung und Auswertung von FWD-Messungen bei Betonkonstruktionen gegeben.

Aus den Ergebnissen der Messsensorik zur Dehnungs- und Feuchtemessung konnten nur wenige und teilweise eingeschränkte Erkenntnisse gewonnen werden, da die Technik erst gegen Ende des Projekts eingebaut werden konnte und die Messwerte teilweise durch weitere Messungen abzusichern und zu hinterfragen sind.