

Verformungsverhalten von Betonfahrbahndecken unter kritischen Beanspruchungen

FA 8.159

Forschungsstelle: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Prof. Dr.-Ing. H. Müller)

Bearbeiter: Müller, H. / Foos, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

Abschluss: November 2004

1. Problemstellung und Zielsetzung

Eine Verbesserung der Lebensdauer von Betonfahrbahnen erfordert präzise Kenntnisse über die vorherrschenden Beanspruchungen und deren Berücksichtigung in der Bemessung der Platten. Dies gilt neben den Verkehrslasten insbesondere auch für witterungsbedingte Beanspruchungen, die zu relativ hohen Temperatur- und Feuchtegradienten führen können. Daher gilt es, die offenen Fragen zur Größe thermischer und hygri-scher Spannungen bzw. zum Verformungsverhalten von Platten bei thermischen und hygri-schen Einwirkungen zu klären.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte das bisher nicht hinreichend bekannte bzw. quantifizierte Verformungs- und Spannungsverhalten von Fahrbahndecken aus Beton unter witterungsbedingten Beanspruchungen untersucht werden. Dabei war von zentraler Bedeutung, dass die charakteristischen Eigenschaften von Beton, der ein nichtlineares viskoelastisches Verhalten aufweist, wirklichkeitsnah einbezogen werden. Eine eingehende Analyse des Verformungs- und Spannungsverhaltens von Betonfahrbahndecken bei instationären Feuchte- und Temperaturfeldern unter Berücksichtigung des spezifischen nichtlinearen Betonverhaltens ist nur mittels geeigneter numerischer Modelle möglich. Vor diesem Hintergrund bildete die Entwicklung eines numerischen Analysemodells, das durch die Implementierung wirklichkeitsnaher Stoffgesetze für die hygri-schen, thermischen, rheologischen und bruchmechanischen Eigenschaften des Betons die Verformung von Fahrbahnplatten unter Berücksichtigung kritischer Beanspruchungen zutreffend beschreiben kann, einen wesentlichen Arbeitsschwerpunkt.

Aus den unter Verwendung des Analysemodells durchzuführenden Parameterstudien sollten Empfehlungen für die Herstellung und den konstruktiven Aufbau von Betonfahrbahndecken erarbeitet werden.

2. Untersuchungsmethodik

Das in Bild 1 dargestellte Flussdiagramm beschreibt das Gesamtkonzept dieses Forschungsprogramms. Aufbauend auf numerischen Voruntersuchungen, die zur Festlegung der zu simulierenden Randbedingungen sowie der Dauer der Beanspruchungen dienten, wurde die Anzahl der zu untersuchenden Großplatten und deren Abmessungen festgelegt. In Tabelle 1 sind die Beanspruchungen bei den großen Betonplatten in Abhängigkeit von der Zeit bzw. dem Betonalter zusammengefasst. Bei den Großversuchen handelte es sich um eine praxisnahe Simulation von hygri-schen und thermischen Beanspruchungen an unter verschiedenen Randbedingungen gelagerten großen Betonplatten. Im Rahmen der Parallelversuche erfolgte

an kleinen Probekörpern die Bestimmung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des verwendeten Betons.

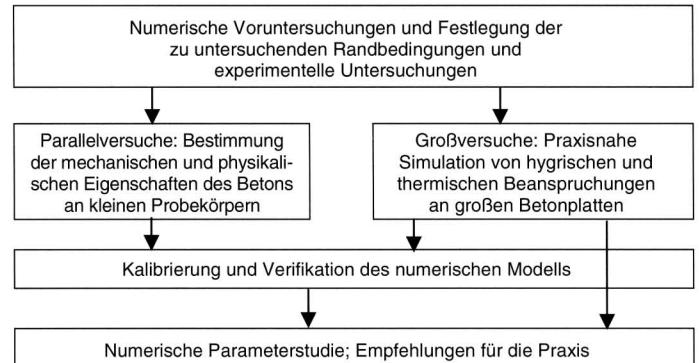


Bild 1: Konzept des Forschungsprogramms

Tab. 1: Versuchsmatrix zu den Randbedingungen bzw. Beanspruchungen bei den großen Betonplatten

Art der Beanspruchung, Randbedingungen	Zeitraum bezogen auf Betonalter	Platte			
		1*	2	3	4**
Nachbehandlung	1. Woche	x	x	-	x
Lagerung in der Prüfhalle	2. Woche	x	x	x	x
Austrocknung der Oberseite	3.-80. Woche	x	x	x	x
Befeuchtung der Unterseite	3.-80. Woche	-	x	x	x
Wind	3.-80. Woche	-	-	x	x
hyg. Wechselbeanspruchung	81. Woche	x	x	x	x
Zwangsbeanspruchung	3.-86. Woche	-	-	-	x
Temperaturbeanspruchung	83.-86. Woche	x	x	x	-
extremer Thermo-schock	83.-86. Woche	x	x	x	-
		* Platte 1 war an der Unterseite versiegelt		** Platte 4 stand zusätzlich unter Zwangsbeanspruchung	

Die aus den experimentellen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse wurden der Kalibrierung und Verifikation des numerischen Modells zugrunde gelegt, welches aus einem zweidimensionalen FE-Netz bestand ($l \times h = 2.500 \times 260 \text{ mm}^2$). Die Materialeigenschaften wurden isoparametrischen 8-Knoten-Rechteckelementen zugewiesen. Die Simulation der Lagerung erfolgte über an der Unterseite durchgehend angebrachte 3-Knoten-Interfaceelemente. Die Lagerung der Platte war auf Druck starr, ein Abheben der Platte nach oben wurde jedoch nicht behindert. Zur Simulation der Konvektion zwischen Außen- und Beton kamen an der Ober- und Unterseite der Platte zusätzliche Boundaryelemente zur Anwendung. In Bild 2 ist das FE-Netz der untersuchten Betonplatte schematisch dargestellt.

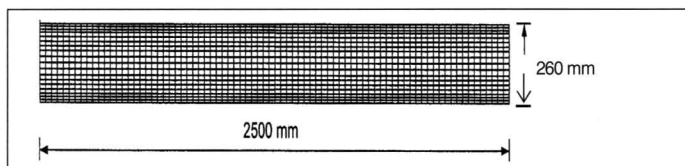


Bild 2: Schematische Darstellung des FE-Netzes der untersuchten Betonplatte

Unter Verwendung des verifizierten numerischen Modells wurde eine Parameterstudie mit dem Ziel durchgeführt, Empfehlungen für die Herstellung und den konstruktiven Aufbau von Betonfahrbahnplatten zu erarbeiten. Bei den untersuchten Parametern handelt es sich um geometrische und materialabhängige Parameter (Dicke und Länge der Platte, Betongüte, hygri-sche sowie thermische Eigenschaften des Betons) und um Parameter, welche von den Herstellungs- und den Umgebungsbedingungen abhängen (Nullspannungstemperatur, Nachbehandlungsdauer, hygri-sche und thermische Einflüsse der Umgebung sowie Wasseraufnahme an der Unterseite).

3. Untersuchungsergebnisse

Bei den Versuchen zum Verformungsverhalten von großen Betonplatten unter hygri-scher Beanspruchung wurde der Einfluss der Austrocknung an der Oberseite, der Befeuchtung der Unterseite, der Zwangsbeanspruchung an den Plattenenden sowie der Einfluss des Windes und der fehlenden Nachbehandlung untersucht (siehe Tabelle 1). Es konnte erwartungsgemäß festgestellt werden, dass sich Verformungen in Form von Aufschüsselungen infolge Schwindens und Quellens einstellen. Die einseitige Austrocknung an der Oberseite verursachte mittlere vertikale Verformungen an den Plattenenden von bis zu ca. 3,1 mm. Die Entwicklung der Verformungen der Plattenenden folgte ab dem Zeitpunkt der Austrocknung über die gesamte Beobachtungsdauer einer logarithmischen Funktion. Das infolge Befeuchtung der Unterseite verursachte Quellen des Betons beeinflusste die Verformung maßgeblich. Weiterhin wurde experimentell nachgewiesen, dass auch eine nahezu volle Verformungsbehinderung der Plattenenden, selbst bei extremen Einwirkungen, nicht zu einer Trennrissbildung führt.

Der Einfluss von Befeuchtungs- und Trocknungsperioden auf das Verformungsverhalten wurde im Rahmen der hygri-schen Wechselbeanspruchung erfasst. Die Untersuchungen beschränkten sich auf fünf Zyklen. Dabei wurden die Platten an der Oberseite zweistündigen Regenperioden mit anschließender 22-stündiger Trocknung ausgesetzt. Die zyklische Befeuchtung der Oberseite wirkte sich auf das Verformungsverhalten der Platten entlastend aus und verursachte einen Rückgang der Aufschüsselung der Platten von ca. 6 mm auf ca. 4,5 mm.

Das Verhalten von großen Betonplatten unter thermischer Beanspruchung wurde ebenfalls experimentell untersucht (siehe Tabelle 1). Dabei wurde die Erwärmung der Platten infolge Sonneneinstrahlung mit anschließender Abkühlung simuliert. Nach der Aufheizung der Platten mittels Heizstrahler erreichte die Temperatur in 5 mm Tiefe unter der Oberfläche ca. 55 °C. Das Aufheizen verursachte eine Abnahme der vorhandenen Aufschüsselung von ca. 2,7 mm auf ca. 1 mm. Mittels Wasser mit unterschiedlichen Temperaturen wurden die Platten abgekühlt. Ein extremer Thermoschock wurde mit Hilfe von Eiswasser durchgeführt. Die Temperatur in der Randzone an der Oberfläche sank 30 Minuten nach dem Einsatz des Eiswassers auf ca. 12 °C. Nach der Abkühlung auf Raumtemperatur verformten sich die Platten nicht vollständig wieder zurück, was auf den Einfluss der Befeuchtung zurückzuführen ist. Das während der Abkühlung eingesetzte Wasser drang in den Beton ein und verursachte eine weitere Abnahme der Aufschüsselung (hygri-sche Verformungen).

Bei einer plötzlichen Abkühlung, z. B. Gewitterregen oder Hagelschauer, treten Verformungen nicht nur infolge von Temperaturgradienten sondern auch infolge von Feuchtegradienten auf. Bei den thermischen Untersuchungen konnten durch eine geeignete Versuchsdurchführung die Verformungen infolge Befeuchtung getrennt von den Verformungen infolge Temperatur erfasst werden. Eine 30-minütige Befeuchtung der Plattenoberseite führte zum Quellen der Randzone und verursachte an den Plattenenden eine Absenkung der vertikalen Verformung zwischen 0,2 und 0,3 mm. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der während eines Thermoschocks auftretenden thermischen Zugspannungen im oberen Bereich der Platte durch Druckspannungen, die durch Quellen des Betons entstehen, abgebaut werden.

Für die Durchführung der numerischen Untersuchungen auf der Basis der "Finite Elemente Methode" wurde das Programmpaket DIANA herangezogen. Im Mittelpunkt stand das Verformungs-, Spannungs- und Rissverhalten unter hygri-schen und thermischen Beanspruchungen. Mit geeigneten mechanischen, hygri-schen, thermischen und rheologischen Materialmodellen konnte das Verformungsverhalten sowohl der kleinen Probekörper als auch der großen Betonplatten praxisnah simuliert werden. Dabei wurden das nichtlineare Verhalten und die Heterogenität des Betons berücksichtigt. Vergleiche zwischen den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und den Ergebnissen des numerischen Modells zeigten eine gute Obereinstimmung, was auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des numerischen Modells hinweist.

Bei der durchgeführten numerischen Parameterstudie konnte festgestellt werden, dass die relative Feuchte der Umgebung das Verformungsverhalten sehr stark beeinflusst. In einer normalen Umgebung (im Freien) kann die Aufschüsselung von Betonfahrbahndecken infolge Austrocknung an der Plattenoberseite einen rechnerischen Wert von ca. 1,7 mm erreichen, wenn eine freie Verformung der Plattenenden möglich ist. Während die Plattenenden Verformungen von ca. 0,8 mm in einer feuchten Umgebung (r. F. 83 %) zeigen, erreichen sie in einer trockenen Umgebung (r. F. 40 %) Verformungen bis zu 2,4 mm. Kommt es zur Wasseraufnahme an der Unterseite, ist mit einer weiteren Vergrößerung der Verformungen zu rechnen. In der Praxis ist gegenüber den durchgeführten Berechnungen grundsätzlich von kleineren Verformungen auszugehen, da neben einer gewissen Verformungsbehinderung durch Nachbarplatten u. a. die Plattenwirkung (Berechnungen erfolgten zweidimensional) zum Tragen kommt.

Neben der Umgebungsfeuchte erwies sich die Betongüte als ein maßgeblicher Einflussparameter auf die Verformungen von Betonfahrbahndecken. Ein Beton mit höherer Festigkeitsklasse besitzt eine geringe Feuchteleitfähigkeit, was zur Verminderung von hygri-schen Verformungen führt.

Im Rahmen der numerischen Parameterstudie wurde festgestellt, dass bei allen Platten unter den verschiedenen hygri-schen Umgebungsbedingungen, unabhängig von der Nachbehandlungsdauer, mit einer Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons in der oberen Randzone der Platte zu rechnen ist, was mit einer feinen Rissbildung einhergeht. Hierbei handelt es sich um die auch in der Praxis zu beobachtende feine Schwindrissbildung (oftmals als Krakeleerisse bezeichnet), die weder die Festigkeit noch die Dauerhaftigkeit von Fahrbahnen beeinträchtigt. Es ist zu vermuten, dass die Tiefe dieser Mikrorisse zudem in der Praxis etwas geringer ausfällt, als die Berechnungen (ca. 20 mm) zeigen, was auf das verwendete Modell für den Feuchte-transport zurückzuführen ist. Die Befeuchtung der Oberseite durch Regen und die damit verbundenen Druckspannungen infolge des Quellens des Betons führen zu einem Schließen einiger dieser Risse.

Die numerischen Untersuchungen zur thermischen Beanspruchung zeigten, dass der Verlauf der Nullspannungstemperatur das Verformungs- und Spannungsverhalten von Betonfahrbahnplatten wesentlich beeinflusst. Liegt ein positiver Verlauf der Nullspannungstemperatur vor, so weisen die Fahrbahndecken nach der maximalen Erwärmung eine kleine oder gar keine Aufwölbung auf. Kühlen sich die Fahrbahndecken ab, so entstehen Aufschüsselungen, die einen Wert bis zu 2,7 mm – freie Verformbarkeit vorausgesetzt – erreichen können. Bei Fahrbahndecken mit höherer Betonfestigkeitsklasse ist mit einer Vergrößerung der Verformungen zu rechnen. Überlagert man die Aufschüsselung infolge Temperatur mit einer infolge Feuchte, können die Abhebungen der Plattenränder unter ungünstigen Randbedingungen theoretisch einen Wert bis zu 6 mm erreichen.

Ein negativer Verlauf der Nullspannungstemperatur besitzt einen günstigen Einfluss auf die Verformungen und Spannungen. Dadurch kann die Aufschüsselung infolge Temperatur stark reduziert werden. Allerdings ist von größeren Aufwölbungen der Fahrbahndecken auszugehen. Rufwölbungen infolge Temperatur besitzen jedoch den Vorteil, dass sie den auftretenden Aufschüsselungen infolge hygrischer Beanspruchung entgegenwirken.

Die Simulation einer nach der Erwärmung auftretenden Abkühlung durch Gewitterregen zeigte, dass an der Oberfläche kleine Zugspannungen entstehen. Dies gilt für einen konstanten Verlauf der Nullspannungstemperatur (25 °C). Bei der Annahme eines positiven Verlaufs der Nullspannungstemperatur können diese Zugspannungen die Betonzugfestigkeit erreichen, was die Bildung von feinen Rissen verursachen kann. Da die Abkühlung an der Oberseite von einer Befeuchtung der Oberseite begleitet wird, kann davon ausgegangen werden, dass die zugehörigen Druckspannungen infolge Quellen zur Abminderung der Zugspannungen führen.

Ein extremer Thermoschock, der durch einen Hagelschauer verursacht werden kann, führte unter der Annahme eines konstanten Verlaufs der Nullspannungstemperatur theoretisch zu einer feinen Rissbildung in den obersten 20 Millimetern der Platte. An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass solche thermischen Beanspruchungen mit extremen negativen Temperaturgradienten von bis zu $-0,07$ K/mm, wie sie im Experiment vorlagen, in der Praxis sehr selten auftreten werden. Messungen an der BAB A 5 (Kronau) in den Jahren 2000 bis 2003 zeigten, dass die negativen Temperaturgradienten nur einen etwa halb so großen Wert von ca. $-0,036$ K/mm erreichten. Diese Gradienten traten mit einer Häufigkeit von ca. 1 % auf.

Aus den Ergebnissen der numerischen Parameterstudie kann unter Berücksichtigung der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse zusammenfassend gefolgert werden, dass eine Ausführung der Betonfahrbahndecken unter Einhaltung der Angaben der ZTV Beton-StB 01 und der RSt0 01 zu einer Minimierung der Gefahr einer Rissbildung beiträgt. Die hier durchgeführten quantitativen Analysen untermauern also die Qualität der heutigen Bauweise von Betonfahrbahnen, die sich in weiten Teilen aus Erfahrungen heraus entwickelt hat.

4. Folgerungen für die Praxis

Im Folgenden werden aus den Untersuchungsergebnissen einige konkrete Schlüsse gezogen, deren Umsetzung in der Praxis einen Beitrag zur Konstruktion und Herstellung von dauerhaften Betonfahrbahndecken leistet. Diese Folgerungen sind im Wesentlichen nicht neu, basieren hier aber – gegenüber früheren qualitativen Betrachtungen – auf quantitativen Analysen, die zudem experimentell abgesichert sind. Dabei wird von Betonfahrbahndecken ohne Verbund mit der HGT ausgegangen.

Betontechnologische Maßnahmen

1. Ausgehend von einem Beton der Güte C30/37 sollten folgende Eigenschaften möglichst angestrebt werden:
 - eher höhere Festigkeit,
 - geringe Feuchteleitfähigkeit,
 - kleines Schwindmaß,
 - kleinere Wärmedehnung.

2. Die Verwendung eines Zements mit einer niedrigen Hydrationswärmeentwicklung trägt zur Reduzierung der Nullspannungstemperatur bei.

Im Hinblick auf die Kleinhaltung der Verformungen und Spannungen wäre ein Beton mit einem kleinen E-Modul anzustreben. Bei der Einhaltung der oben genannten betontechnologischen Parameter ist die Herstellung eines Betons mit einem kleinen E-Modul in der Praxis jedoch nur schwer zu realisieren.

Herstellungstechnische Maßnahmen

1. Das Erreichen eines negativen Verlaufs der Nullspannungstemperatur wird dringend empfohlen. Um der Entstehung von großen positiven Nullspannungstemperaturen entgegenzuwirken, sollte an heißen Sommertagen, wie bereits bekannt und oftmals praktiziert, mit dem Betonieren erst im späteren Tagesverlauf begonnen werden, soweit keine anderen Maßnahmen vorgesehen sind.
2. Im Sommer sollte eine möglichst lange feuchte und besonders kühle Nachbehandlung erfolgen.
3. Zur Verringerung der Gefahr einer Rissbildung infolge Schwindens bei neu gebauten Strecken sollte die Fahrbahn bei langen Trockenperioden (ohne Regenfall) oder bei einer trockenen Umgebung möglichst lange regelmäßig befeuchtet bzw. feucht gehalten werden.

Sonstige Maßnahmen

Neben den betontechnologischen und herstellungstechnischen Maßnahmen sind verschiedene konstruktive Maßnahmen erforderlich, um die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken zu gewährleisten. Diese betreffen z. B. die Entwässerung, die Verwendung von Vlies (Bauweise ohne Verbund), die Fugenabdichtung oder ggf. den Einsatz von Elastomerunterlagen. Für die jeweilige Maßnahme liegen dauerhafte technische Lösungen in der Praxis vor.

Die Bewertung aller Ergebnisse unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen der numerischen Analysen zeigt, dass bei Einhaltung der einschlägigen aktuellen Vorschriften des Betonstraßenbaus und der hier zusätzlich genannten Empfehlungen die Betonbauweise zu außerordentlich tragfähigen, robusten und höchst langlebigen Verkehrswegen führt. □