

Bemessung kontinuierlich bewehrter Betondecken

FA 4.189/2

Forschungsstelle: Dr.-Ing. Lissi Pfeifer, Berlin

Bearbeiter: Pfeifer, L. / Pfeifer, U. /
Villaret, S. / Kiehne, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und
Wohnungswesen

Abschluss: August 2005

1. Aufgabenstellung

Für die bisher grundsätzlich in Deutschland angewandte unbewehrte Betonbauweise erfolgt die Dickenbemessung nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen [R StO 01].

Dem standardisierten Konstruktionsaufbau der R StO 01 liegen die gültigen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien [ZTV StB] zugrunde.

Die Berücksichtigung der zahlreichen Einflüsse auf die erforderliche Deckendicke ist jedoch nur mit einem System der freien Bemessung möglich. Für unbewehrte Betondecken steht seit kurzem das Bemessungssystem und -programm AWDSTAKO zur Verfügung.

Das dort verwendete Grundprinzip einer semiprobabilistischen Verfahrensweise sollte auf seine Verwendbarkeit für kontinuierlich bewehrte Decken geprüft und im erforderlichen Umfang modifiziert werden; es beinhaltet

- die Gegenüberstellung des einwirkenden mit dem aufnehmbaren Moment,
- die Bildung eines ineinander greifenden Komplexes aus Lastannahmen, Berechnung (des Moments) und Nachweisführung (nach Grenzzuständen),
- die Definition von Grenzzuständen,
- die Verwendung von Last-, Anpassungs- und Materialfaktoren, die sich differenziert auf die Einflüsse auf die Bemessung beziehen.

Die Bauweise mit durchgehender Bewehrung wird in Deutschland im Straßenbau bisher grundsätzlich nicht angewendet. Bei der "Festen Fahrbahn" der Bahn wird die Bauweise dagegen seit Jahren in größerem Umfang angewendet; dabei gibt es zum Teil Probleme, die im Forschungsbericht beschrieben sind. Im benachbarten Ausland werden, ebenso wie in einigen Staaten der USA, seit Jahren bis zu Jahrzehnten Autobahnen in dieser Bauweise, teilweise mit gutem Erfolg, gebaut.

Eine Autobahn-Versuchsstrecke wurde 2004 in Deutschland angelegt; ein Forschungsvorhaben mit dem Ziel der Rissvorhersage läuft z. Z. an einer Universität.

Das hier beschriebene Forschungsprojekt hatte das Ziel, ein Bemessungsverfahren nach Grenzzuständen für durchgehend bewehrte Betondecken für Straßenverkehrsflächen zu entwickeln und ein DV-Programm daraus abzuleiten. Aufgabenbezogene Bausteine waren zu entwickeln, die erforderlichen Eingangsgrößen waren zu erarbeiten und programmtechnisch zu formulieren. Ihr Einfluss war zu testen. Ausländische Erfahrungen waren einzubeziehen.

Bild 1 zeigt den Einbau einer Betondecke mit kontinuierlicher Bewehrung.



Bild 1: Einbau einer Betondecke mit kontinuierlicher Bewehrung

2. Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungsmethode stellt sich in folgenden, teilweise parallel laufenden Schritten dar:

Es wurde zunächst das im Jahre 2002 abgeschlossene und bis 2004 inhaltlich und rechentechnisch weiter entwickelte Bemessungsprogramm AWDSTAKO für die Bemessung unbewehrter Betondecken mit einem speziellen Kopierschutz versehen, damit eine hohe Sicherheit gegen die Erstellung abweichender Versionen gegeben ist. Das neu zu entwickelnde Programm wird ebenso abgesichert.

Parallel dazu wurden Recherchen in den europäischen Ländern, die diese Bauweise anwenden, durchgeführt. Die zugehörige Literatur und die diesbezüglichen Vorträge des letzten Betonstraßensymposiums wurden ausgewertet. Dabei lag der Schwerpunkt sowohl auf den Fragen vorhandener Bemessungsmethoden als auch des Langzeitverhaltens. Auch entstandene Schäden, die auf grundsätzliche Probleme oder auf Systemfehler zurückzuführen sein könnten, wurden einbezogen.

Schwerpunktmäßig befassten sich die Bearbeiter zunächst mit der Erarbeitung der logischen Zusammenhänge als Grundlage für die Erfolgchancen der Bauweise.

Es zeigte sich sehr bald, dass eine präzise Steuerung des Gesamtkomplexes "Konstruktionsaufbau – Deckenausbildung – Betoneigenschaften" nicht nur theoretisch, sondern auch bei der Baudurchführung erforderlich ist.

Auch die Frage der Voreinschätzung der Rissabstands- und Rissbreitenentwicklung ist von entscheidender Bedeutung für die Dickenbemessung. Bei Planung und Ablauf der Arbeiten war zunächst davon auszugehen, dass Ergebnisse eines parallel laufenden Forschungsvorhabens hierfür verwendet werden könnten. Diese standen dem Forschungsnehmer jedoch nicht zur Verfügung, sodass hier auf die umfassenden, aber manchmal auch kontroversen ausländischen Erfahrungen zu dieser komplizierten Problematik zurückgegriffen wurde, um begründete Annahmen über die sich abhängig von der Einbautemperatur, dem Stahlanteil, der Haftung zwischen Stahl und Beton, der

Reibung zur Unterlage etc. entwickelnden Rissabstände/Plattengrößen zu erhalten. Es wurde schließlich der Weg gewählt, innerhalb des Rechenprogramms insgesamt 4 Querrissabstände/Plattengrößen zu verwenden, um die unterschiedlichen erforderlichen Dicken für unterschiedliche Plattengeometrien, Stoßfaktoren und Querkraftübertragungen zu erhalten. Auf dieser Grundlage war die Dicke als maßgebend herauszuarbeiten, bei der sich Momenten-bedingt nicht zu große Rissabstände einstellen, wenn geringere Abstände nicht bereits durch die behinderte Kontraktion aus Längszugkräften entstanden sind. Andererseits sollten Momenten-bedingt nicht zu geringe Rissabstände entstehen, die wiederum Längsrisse und Ausbrüche zur Folge haben.

Da eine Entscheidung getroffen werden sollte, ob für die Bauvarianten mit und ohne Querbewehrung ein gesondertes Bemessungsverfahren zu entwickeln sei, wurden in einem weiteren Komplex die Wirkungen einer Querbewehrung systematisch untersucht.

Spezielle Untersuchungen erfolgten zur Entwicklung bauweisespezifischer Last-, Anpassungs- und Materialfaktoren. Bei den Lastfaktoren waren vor allem die Stoßfaktoren von Interesse; diese weichen von denen bei der unbewehrten Bauweise ab und entwickeln sich mit der Rissentwicklung teils gegenläufig. Bei den Anpassungsfaktoren waren vorrangig die Rissweiten-abhängigen Dübel- und Lagerungsfaktoren zu betrachten. Aus den übereinstimmenden positiven Erfahrungen der Nachbarländer waren neue Befestigungsaufbauten, insbesondere mit Asphaltzweischicht einzuführen und in Eingangsgrößen zu formulieren.

Ausführliche Untersuchungen waren zu den Anforderungen an die Betonfestigkeit und deren Erreichbarkeit durchzuführen. Dabei war klar, dass nur die Spaltzugfestigkeit am Bauwerk Straße von Interesse sein konnte. Darüber hinaus mussten aus der Auswertung von Bohrkernuntersuchungen an Autobahnabschnitten und von Forschungsergebnissen aus dem Hauptthema erreichbare Grenzstreuungen für die Spaltzugfestigkeit und die Deckendicke abgeleitet werden, um Anforderungen formulieren zu können.

Alle Untersuchungen wurden unter dem Aspekt der Zuordnung zu definierenden Nachweisfällen nach Grenzzuständen durchgeführt. Es waren Nachweise für die Lastfälle Querriss und Längsfuge herauszuarbeiten, aus denen sich im Endergebnis die maßgebende Dicke ergibt.

In Form einer Ergebniskomprimierung war ein "Fachtechnisches Handbuch" als Programmierungsgrundlage zu erarbeiten.

Abschließend hatte die Erarbeitung des DV-Programms STAKO-KONT zu erfolgen; im Rücklauf war dabei eine laufende Ergebnistestung und ggf. Systemüberarbeitung erforderlich.

3. Untersuchungsergebnisse

Da bei der kontinuierlich bewehrten Bauweise die Stahleinlagen mittig bzw. in Nähe Deckenmitte liegen, nehmen sie keine oder nur geringfügige Momente aus Verkehr und ungleichmäßiger Temperaturverteilung im Querschnitt auf. Die Deckendicke ist daher wie für unbewehrte Konstruktionen vordergründig von der (Spalt-)zugfestigkeit in der Randfaser des Betons abhängig. Grundvoraussetzung ist daher, dass das aufnehmbare Moment mit der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Bohrkernscheiben bei der Kontrollprüfung, bestimmt wird. Der Nachweis dynamischer Spaltzugfestigkeiten bzw. Ermüdungsspaltzugfestigkeiten muss dabei nicht für das einzelne Projekt erbracht werden, was zu aufwändigen Untersuchungen beim Einzellabor führen würde. Hierfür werden die aus den Ergebnissen des Hauptvorhabens abgeleiteten Ermüdungskurven intern verwendet.

Aus den mit differenzierten Plattenlängen, Dübelfaktoren, Lagerungs- sowie Stoßfaktoren in jedem Einzelfall durchgeführten Berechnungen resultieren beispielsweise die folgenden Ergebnisse:

- Es muss ein Querrissabstand von 1,20 bis 3 m angestrebt werden. Dazu dienen geringe Streuungen von Dicke und Festigkeit, Spaltzugfestigkeiten des Betons, die dem Stahlanteil zugeordnet, also auch nicht zu hoch gegenüber den geplanten sind, eindeutige Trennungsebenen von der Unterlage. Da aber Einflüsse wie die Haftfestigkeit zwischen Beton und Stahl und Temperaturdifferenzen am Einbautag und danach schwer kalkulierbar sind, bleibt doch eine Restunsicherheit bezüglich der Rissabstände und -weiten. Bemessungstechnisch wurde daher die Notwendigkeit der iterativen Dickenermittlung mit 4 verschiedenen Rissabständen herausgearbeitet.
- Kontinuierlich bewehrte Decken dürfen wegen der ungleichmäßigen Verbundlösung nicht unmittelbar auf Trag-schichten mit hydraulischem Bindemittel verlegt werden.
- Asphalt-schichten unter kontinuierlich bewehrten Decken dürfen nicht zu dick sein, damit keine Abscherebene innerhalb derer entsteht; Asphaltzweischichten von ca. 5 cm Dicke sind daher vorteilhaft; die Ebenheit und Gradiententreue auf dieser Schicht ist maßgebend für die Minimierung der Dickenschwankung der Decke.
- Die Querbewehrung hat keinen Einfluss auf die erforderliche Deckendicke, sie dient aber der Lagesicherung der Längsbewehrung; sie sollte unter einem Winkel von 60° verlegt werden, damit die zu erwartenden Querrisse nicht oberhalb von dieser entstehen und eine erhöhte Korrosionsgefährdung, auch für die kreuzende Längsbewehrung, eintritt.
- Aus den Erfahrungen benachbarter Länder ergibt sich die Notwendigkeit, höhere Betonfestigkeiten einzusetzen als bisher in Deutschland üblich (Tabelle 2); maßgebend für die Dickenbemessung ist die Spaltzugfestigkeit; es wurden in praxi erreichbare Werte herausgearbeitet.
- Es wurden erreichbare Einschränkungen der Festigkeits- und Dickenstreuungen (Einflussgrößen auf die bauweisen-immanente Rissbildung) herausgearbeitet.
- Es wurden bauweisenbezogene Dübelfaktoren, Lagerungs-faktoren und Stoßfaktoren erarbeitet und in das System eingeführt.

Die Nachweisführung erfolgt insgesamt mit 24 Fällen: Quasistatische Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit sowie Ermüdungsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit, jeweils für den Querriss und die Längsfuge (hier für Rissabstände von 1,2; 1,8; 3,0 und 5,0 m). Die bei maximal 3 m Rissabstand erforderliche Dicke wurde letztendlich als maßgebend herausgearbeitet.

Für das Bemessungsverfahren wurde das Rechenprogramm STAKO-KONT 1.0 entwickelt, das kopiergeschützt bereits steht. Die Kalibrierung des Bemessungssystems/-programms erfolgte an den langjährig bewährten belgischen (holländischen/französischen) Erfahrungen. Dort wird ein Beton C 60 (C 45), der mindestens eine charakteristische Spaltzugfestigkeit von 5,0 (4,3) N/mm² haben dürfte, eingesetzt; es ergibt sich hiermit eine erforderliche Deckendicke von 23 bis 25 cm, wobei der Längsbewehrungsanteil ~ 0,76 % beträgt.

Die übrigen Varianten ergeben sich im Rahmen des Berechnungsprogramms relativ hierzu. Mit den Festigkeiten gemäß ZTV Beton-StB würden die erforderlichen Dicken ca. 5 bis 7 cm höher liegen als die o. g.

Tabelle 1: zu führende Nachweise

quasistatistischer Nachweis			
Im GZT		Im GZG	
Längsfuge bzw. Längskante bei den 4 Varianten der Querriss-Abstände	Querriss bei den 4 Varianten der Abstände	Längsfuge bzw. Längskante bei den 4 Varianten der Querriss-Abstände	Querriss bei den 4 Varianten der Abstände
$M_{Rdu} \geq M_{Sdu,L}$	$M_{Rdu} \geq M_{Sdu,Q}$	$M_{Rd} \geq M_{Sd,L}$	$M_{Rd} \geq M_{Sd,Q}$
Ermüdungsnachweis			
Im GZT			
Längsfuge bzw. Längskante bei den 4 Varianten der Querriss-Abstände		Querriss bei den 4 Varianten der Abstände	
$M_{Rdu} \geq M_{Sdu,L}$		$M_{Rdu} \geq M_{Sdu,Q}$	

Tabelle 2: Straßenbetonklassen für kontinuierlich bewehrte Decken

Straßenbetonklasse	$f_{ctk,core}$ [N/mm ²]
StC 30/37 –3,3	3,3
StC 35/45 –3,3	3,3
StC 35/45 –3,7	3,7
StC 35/45 –4,0	4,0
StC 40/50 –4,0	4,0
StC 40/50 –4,3	4,3
StC 40/50 –4,6	4,6
StC 45/55 –4,3	4,3
StC 45/55 –4,6	4,6
StC 45/55 –5,0	5,0

$f_{ctk,core}$ ist die charakteristische Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen.

4. Folgerungen für die Praxis

Es steht ein Bemessungsprogramm für kontinuierlich bewehrte Betondecken zur Verfügung. Damit kann die Bauweise für Nutzungsdauern bis zu 30 Jahren geplant und gebaut werden; kontinuierlich bewehrte Betondecken können nach ausländischen Erfahrungen sogar noch länger halten und sind bei sorgfältiger Planung und Ausführung ausgesprochen instandhaltungsarm.

Das DV-Programm für die Bemessung kontinuierlich bewehrter Betondecken führt zu sicheren Ergebnissen und die Bauweise hat Aussicht auf gute Bewährung, wenn mindestens die im Folgenden zusammengestellten Randbedingungen erfüllt werden.

Bei der Planung/Konstruktion:

- Die Deckendicke längs und quer muss gleichbleibend sein.
- Die Bewehrung darf nicht überlappend gestoßen werden.
- Die gemäß Tabelle 2 aufgelisteten Straßenbetonklassen werden empfohlen; diese haben Einfluss auf den erforderlichen Stahlanteil und auf die notwendige Deckendicke).
- Die angesetzten mittleren Festigkeiten dürfen nur geringfügig vom angesetzten Wert (auch nicht nach oben!) abweichen.
- Eine Schichtenfolge in Anlehnung an die RStO, Tafel 2, 4 oder 6 und bei gebundenen Tragschichten sowie bei Schottertragschichten ist für die dort standardisierte Dicke anzusetzen. Statt der Bauweise mit 10 cm Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht sind Bauweisen mit 5 cm Asphaltzwischen-schicht auf Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel sowie auf Tragschicht ohne Bindemittel (Schottertragschicht gemäß ARS 6/2002 des BMVBW) zu planen.
- Die Anordnung der kontinuierlich bewehrten Decke unmittelbar auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht ist nicht vorzusehen.

- Die nach RStO 01 erforderliche Dicke des frostsicheren Oberbaus ist einzuhalten.
 - Die in Längsrichtung angeordneten Stahleinlagen sollen etwa in Mitte Betondecke oder geringfügig darüber liegen. Bei einer (erfahrungsgemäß anhaftenden) Asphaltzwischen-schicht, liegen sie bereits oberhalb der Mitte des für die Querrissbildung maßgebenden Querschnitts.
 - Längsfugen sind auszubilden gemäß ZTV Beton StB 01 und mit Fugenfüllstoffen gemäß ZTV Fug-StB 01 zu verfüllen.
 - Es sollte möglichst vermieden werden, durchgehend bewehrte Fahrstreifen neben Asphaltstreifen anzuordnen, da hier nur eine verminderte Querkraftübertragung möglich ist.
 - Bei den Baustoffeigenschaften/der Baustoffprüfung:
 - Zemente mit geringer Nacherhärtung müssen verwendet werden, damit der Bewehrungsprozentsatz erhalten bleibt.
 - Die Querkraftübertragung in den Querrissen muss durch die in Längsrichtung angeordneten Stahleinlagen in Verbindung mit einer teilweise vorhandenen Rissverzahnung über die geplante Nutzungsdauer erhalten bleiben (gezielt enge Rissweiten).
 - Das Bemessungsverfahren für die Betondecke erfordert den Nachweis der Spaltzugfestigkeit des (Straßen-)Betons; diesem ist das Arbeitspapier "Mechanisches Verhalten von unbewehrten Betondecken in Befestigungen für Verkehrsflächen-Eingangsgrößen in die Bemessung (Materialkennwerte)" in der jeweils letzten Fassung, z. Z. Ausgabe 2002, zugrunde zu legen. Zusätzlich gilt, dass weitere Maßnahmen zur Geringhaltung der Prüfstreuungen vorzusehen sind. Es sind dies vorrangig die Verwendung einer Zentrier-vorrichtung sowie die Lasteintragung über konkave Stahl-leisten (Krümmung entsprechend dem Radius des Prüfkörpers, Sekantenbreite 12,9 mm für Ø 100).
 - Neben der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Bohrkernscheiben ist analog die "charakteristische Dicke" an den Bohrkernen zu ermitteln.
 - Für Dicke und Spaltzugfestigkeit sind an aus Bohrkern-untersuchungen ausgewerteten Stichproben die Variationskoeffizienten nachzuweisen.
- Bei der Baudurchführung:
- Die Druck- und Spaltzugfestigkeit des Betons und die Deckendicke dürfen nur äußerst geringen Streuungen unterliegen. Die bau- und materialtechnischen Grundlagen hierfür müssen zu Baubeginn gesichert sein.
 - Der Variationskoeffizient der Deckendicke darf 2,5 % nicht überschreiten.
 - Der Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit des Betons darf 10 % nicht überschreiten.
 - Die angesetzten mittleren Spaltzugfestigkeiten dürfen nur geringfügig vom angesetzten Wert (auch nicht nach oben!) abweichen.
 - Eine durchgehende klare Trennung von der Unterlage (Tragschicht) muss gewährleistet sein.
 - Die Längsbewehrung ist zur Konstanthaltung des Prozentsatzes bezogen auf die Deckendicke endlos verschweißt oder mit versetzten Überlappungsstößen auf der unter einem Winkel von 60 ° angeordneten Querbewehrung zu ein-zubauen.
 - Der Prozentsatz der Längsbewehrung darf nicht – infolge unzulässig hoher Dicken- und/oder Festigkeitsstreuungen der Decke bzw. lokal anhaftender gebundener Trag- oder Zwischenschichten – wechseln.