

Grundlagen für eine vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Fahrbahnbefestigungen in Betonbauweise nach mehrjähriger Verkehrsnutzung

FA 4.433

Forschungsstelle: Villaret Ingenieurgesellschaft mbH, Hoppegarten
 Bearbeiter: Zander, U. / Eickschen, E. / Villaret, S. / Riwe, A. / Birbaum, J. / Buch, M.T. / Niessen, J. / Pichottka, S. / Tschernack, T.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
 Abschluss: November 2013

1 Aufgabenstellung

Die Frage nach der Haltbarkeit und Restnutzungsdauer der Fahrbahnbefestigungen ist nicht nur aus technischer, sondern auch aus wirtschaftlicher Betrachtungsweise von immenser Bedeutung. Dies ist nicht nur bei der Bewertung von normalen Bestandsstrecken wichtig, es betrifft auch die Abwicklung von Funktionsbauverträgen und Konzessionsverträgen (PPP-Modelle), bei denen eine turnusmäßige Überprüfung der Gebrauchs- und Substanzwerte vereinbart wird, wobei letztere momentan ausschließlich aus dem Merkmal Oberflächenbild abgeleitet werden. Die strukturelle Substanz des befestigten Oberbaus kann zurzeit nicht berücksichtigt werden.

Die theoretischen Grundsätze für eine Bewertung der strukturellen Eigenschaften liefert die rechnerische Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen mit Betondecke, die in den vergangenen Jahren von Pfeifer/Villaret aufgestellt und schrittweise weiterentwickelt wurde. Die hieraus resultierende Software AWDSTAKO wurde zur Ermittlung beziehungsweise Überprüfung der Gleichwertigkeit unterschiedlicher Konstruktionen vom BMVBW 2004 eingeführt. Das Verfahren der rechnerischen Dimensionierung ist in den RDO Beton 09 beschrieben und bildet gleichzeitig die Grundlage für eine Bewertung der strukturellen Substanz. Im Kontext mit einer detaillierten Aufnahme des Grades der Schädigung der Oberfläche und der Ermittlung der Tragfähigkeit der Konstruktion zum Zeitpunkt der Erfassung war ein Verfahren zu entwickeln, mit dem man in der Lage ist, die Restsubstanz bewerten zu können.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die wesentlichen Einflussgrößen für eine vergleichende Bewertung der Restsubstanz zu erarbeiten und zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Einflussgrößen sollten dabei Berücksichtigung finden:

- sichtbare Vorschädigung der Konstruktion zum Bewertungszeitpunkt
- Alter und bisher ertragene Verkehrsbelastung
- bisher ertragene Belastung aus Witterung
- Konstruktionsaufbau und Dicken
- relevante statische Festigkeiten und deren Entwicklung
- relevante Ermüdungsfestigkeiten

- Lagerungsbedingungen der Betondecke zum Bewertungszeitpunkt

Der strukturelle Zustand von Straßenbefestigungen ist am Ende der Vertragslaufzeit von Funktionsbauverträgen von besonderer Bedeutung. Für die Anwendung der neuen Bauvertragsformen ist es wichtig, die strukturelle Substanzbewertung als bisher fehlenden Baustein in das Gesamtkonzept der funktionalen Ausschreibung einzubinden.

Durch die damit ermöglichte monetäre Abgeltung eines Restwerts von Straßenbefestigungen bei der Bauwerksabnahme wird nicht nur die Akzeptanz der Funktionsbauverträge bei den Anwendern (Baufirmen) gesteigert, sondern vor allem die Bereitschaft zur Steigerung der Bauqualität und damit der Verlängerung der Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen durch die Schaffung finanzieller Anreize gezielt angesprochen.

2 Untersuchungsmethodik

Da es sich um ein äußerst komplexes Thema handelt, wurden spezifische Teilaufgaben gezielt abgeleitet und bearbeitet. Zu beachten war dabei auch die besondere betonimmanente Eigenschaft, dass Ermüdung und Nacherhärtung hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung entgegenwirken.

Zur Bestimmung der Nacherhärtung wurden zunächst in Laborversuchen die statischen Festigkeiten sowie deren Entwicklung von im Straßenbau eingesetzten Zementen und Betonen untersucht.

Zum Einsatz kamen dabei sechs Fahrbahndeckenzemente, die sich in der Zementart (CEM I, CEM II, CEM III) und Festigkeitsklasse (32,5 R, 42,5 N, 42,5 R) unterschieden. Neben den physikalischen und chemischen Kennwerten der Zemente wurde die zeitliche Entwicklung der Druck- und Biegezugfestigkeit von Zementmörtelprismen unter Verwendung sechs aktueller Straßenbauzemente im Alter von 2, 7, 28, 60, 120, 180 und 360 Tagen nach DIN EN 196-1 ermittelt. Zusätzlich wurde die Spaltzugfestigkeit an Zementmörtelwürfeln mit einer Kantenlänge von 40 mm zu gleichen Prüfzeitpunkten bestimmt, um einen Vergleich zu den Entwicklungen der Spaltzugfestigkeiten der Betone zu erhalten. Pro Zement waren für jeden Prüfzeitpunkt sechs Prismen vorhanden, die geprüft wurden, was somit eine statistische Auswertung ermöglichte.

Für neuere Betone ist die Festigkeitsentwicklung weitgehend unbekannt, wenn die Betrachtung über 60 Tage nach Herstellung hinausgehen soll. Die Entwicklung wird maßgeblich vom eingesetzten Zement und vom Wasser-Zement-Wert beeinflusst. Für die Betonuntersuchungen wurden aus den sechs zur Verfügung stehenden aktuellen Straßenbauzementen zwei Zemente ausgewählt, um aus diesen jeweils einen Ober- und einen Unterbeton nach einer für Fahrbahndeckenbeton üblichen Rezeptur herzustellen. Zum Einsatz kamen hierbei ein CEM I 42,5 N und ein CEM II/B-S 42,5 N.

Für die in den Betonen einzusetzenden Gesteinskörnungen wurde Material aus einer aktuellen Baumaßnahme im Zuge einer Neubaustrecke Bundesautobahn des Jahres 2011 aus-

gewählt. Im Rahmen einer Baustoffeingangsprüfung von Kornverteilung, Rohdichte, Kernfeuchte und Wasseraufnahme sowie der Sichtung der durch den Lieferanten bereitgestellten Unterlagen zu den Gesteinskörnungen konnten die Kornzusammensetzung sowie die diversen Gesteinseigenschaften dokumentiert werden. Die Betonzusammensetzung entsprach den Anforderungen der TL Beton-StB 07.

Es wurden zylindrische Probekörper hergestellt, um sowohl die Spaltzugfestigkeit als auch die Druckfestigkeit im gleichen Probenalter zu prüfen, bei dem auch die Versuche an Zementprobekörpern erfolgten. Da auch in diesem Fall zu jedem Prüfzeitpunkt sechs Probekörper getestet wurden, war eine statistische Auswertung ebenfalls möglich.

Für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit nach AL Sp-Beton 06 wurde der untere Bereich von 50 mm des Prüfkörpers im Nassschnittverfahren abgetrennt. Der Mittelteil der Prüfzylinder wurde nach Abtrennen im Nassschnittverfahren und Planparallelschleifen der Stirnflächen zu Prüfkörpern mit dem Längendurchmesser-Verhältnis 1:1 aufbereitet und damit die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 bestimmt.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen können die Festigkeitsentwicklungspotenziale der zurzeit zur Anwendung kommenden Zemente im Voraus abgeschätzt werden. Des Weiteren sind im Ergebnis die Festigkeitsentwicklungspotenziale der beiden ausgewählten Ober- und Unterbetone bekannt, die das Verhältnis zwischen Festigkeitsentwicklung der zugehörigen Zemente und den Straßenbetonen aufzeigen.

Große Bedeutung hat die Ermüdungsfestigkeit im Kontext mit der Festigkeitsentwicklung der Betone. Da jedoch hinsichtlich der zeitlichen Überlagerung dieser Eigenschaften derzeit keine Kenntnisse vorliegen, wurden zeitlich parallel Untersuchungen zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit des Betons durchgeführt.

Derzeit existiert für die Dimensionierung, aber auch für die Restsubstanzbewertung ein Bewertungshintergrund, der sich auf die im statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton 06 bestimmte Festigkeit des Betons stützt.

Für eine praxisgerechte Bewertung der Dauerhaftigkeit von Betonbefestigungen erscheint diese Vorgehensweise zwar pragmatisch, jedoch in Anbetracht der erwarteten Steigerungen im Schwerverkehr auf dem Bundesfernstraßennetz von einem bereits hohen Niveau aus unzureichend. Sinnhafter wäre ein Verfahren, das die Substanz als einen Vorrat an ertragbaren Achsüberrollungen interpretiert und jeder Überrollung einen Schädigungsanteil zuordnet.

An Probekörpern, die zuvor im Labor unter Verwendung derselben zuvor eingesetzten Zemente hergestellt wurden, sind zusätzliche Versuche durchgeführt worden, bei denen die Straßenbetone dem auf der Straße tatsächlich vorherrschenden Belastungsgeschehen unterzogen wurden. Hierfür wurde ein Teil der im Labor hergestellten Probekörper mit einer dynamischen Belastung beaufschlagt.

Zuvor wurden anhand der ermittelten Festigkeiten Belastungsniveaus unterhalb des Mittelwerts der statischen Spaltzugfestigkeit als Eingangsgröße für die Spaltzugschwellbelastung festgelegt, um anschließend die Spaltzugschwellbelastung bei

den festgelegten Belastungsniveaus bis zu einer definierten Lastwechselzahl durchzuführen. Nach Erreichen der zuvor festgelegten Lastwechselzahlen können die Ermüdungsversuche Spaltzugfestigkeit mit der gezielten Ermittlung der statischen Bruchlast abschließen. Somit war es möglich, Aussagen zur Festigkeit des Betons vor und nach der Belastung zu erhalten.

Durch Vergleich der Ergebnisse von dynamisch belasteten und nicht belasteten Probekörpern war beabsichtigt, die Funktion der Nacherhärtung und der Ermüdung zu trennen und die relevanten Anteile zu bestimmen. Beide Funktionen werden benötigt, um in praxi vorhandene Betone beurteilen und einordnen zu können.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Laborversuche wurden parallel vier Autobahnabschnitte untersucht.

Dafür wurde ein sogenanntes Rückblickprogramm anhand von drei Streckenabschnitten unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Belastung in das Forschungsvorhaben aufgenommen. Außerdem wurde für die Einschätzung neuer beziehungsweise in letzter Zeit gebauter Strecken eine Neubaustrecke untersucht, was die stoffliche Untersuchung der zurzeit eingesetzten Betone beinhaltete.

Das Untersuchungsprogramm der gewählten Streckenabschnitte umfasste die Auswertung der Ergebnisse der ZEB sowie vorhandener Bestands- und Zustandsdaten wie zum Beispiel das Alter, die Verkehrsbelastung, Deckendicken, den vorhandenen Aufbau, Materialien, Prüfungen und das Oberflächenbild.

Bei allen Untersuchungsstrecken erfolgte eine Streckenbegehung mit systematischer visueller Aufnahme des Oberflächenbildes. Dabei wurden unter anderem Rissbildungen erfasst, die zur Bestimmung der zum Zeitpunkt der Begehung vorliegenden Ausfallrate herangezogen werden konnten. Zur Bestimmung der Lagerungsbedingungen, insbesondere der Hohllagerungen der Betonplatte, erfolgten FWD-Messungen in den Bereichen Plattenmitte und Plattenrand sowie eine Beurteilung der Querkraftübertragung in den Bereichen der Fuge. Wie bereits im FE 88.0102/2009 ausführlich erläutert, sollten die dort beschriebenen Überlegungen im vorliegenden Versuchsprogramm mithilfe von zerstörungsfreien Georadaruntersuchungen erstmalig in situ angewendet werden. Es handelte sich dabei um die Möglichkeit, Hohllagen zu detektieren, die nur wenige Millimeter "hoch" sind.

Zur Kalibrierung der Schichtdickenmessung mit dem Georadar sollten punktuelle Bohrkernentnahmen durchgeführt werden. Während der Streckenbegehung wurden jeweils zwei Entnahmestellen pro Streckenabschnitt festgelegt, bei denen die Bohrkernentnahmen gemäß nachfolgendem Schema entnommen wurden.

Sechs der Bohrkernentnahmen wurden anschließend den statischen Festigkeitsuntersuchungen zugeführt und die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeits- und Druckfestigkeitsprüfungen danach statistisch ausgewertet. Die restlichen vier Bohrkernentnahmen wurden, wie bereits die Laborbetone, dynamisch belastet und im Anschluss, nach Aufbringen der gewünschten Lastwechselzahl, die Ermüdungsfestigkeit bestimmt.

Es wurden der Vorschädigungsgrad (visuelle Begehung und ZEB), die Lagerungsbedingungen (FWD und Georadar), die

Nacherhärtung des Deckenbetons und die Ermüdungsfunktionen bestimmt. Anhand der Vorschädigung sollte eine Ausfallrate ermittelt und mithilfe der Erkenntnisse aus Lagerungsbedingung, Nacherhärtung und Ermüdungsfestigkeit eine Prognoserechnung erstellt werden, die die noch ertragbare B-Zahl bis zum wirtschaftlichen Nutzungsausfallzeitpunkt zum Ergebnis haben sollte.

Die in letzter Zeit gebaute Strecke eignet sich außerdem hervorragend, um eine Langzeituntersuchung folgen zu lassen, da alle Anfangswerte einer noch jungen Strecke vorliegen.

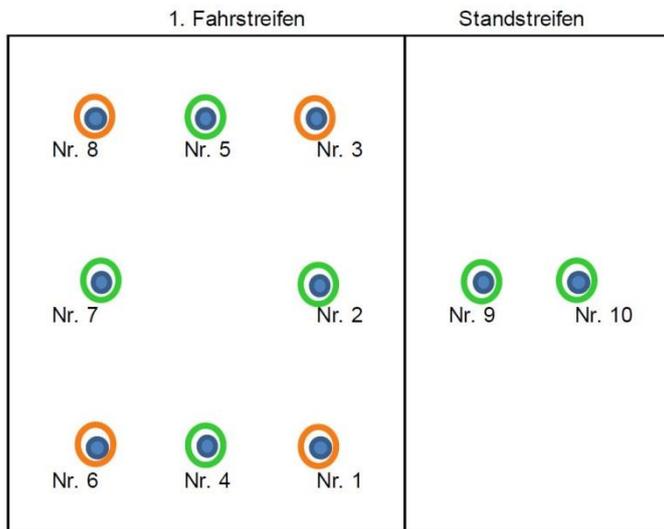


Bild 1: Entnahmestellen der Bohrkern zur Bestimmung der statischen Spaltzugfestigkeit (grün) und zur Durchführung dynamischer Belastungen (orange)

3 Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der Prüfung der Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit an Zementmörtelprismen wurden in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Neben der Ermittlung der absoluten Entwicklung wurden der prozentuale Anstieg der Festigkeit bezogen auf den 60-Tage-Wert und in Anlehnung an die ZTV Beton-StB 07 beziehungsweise das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau ARS 27/2012 der Zeitbeiwert ermittelt und dargestellt. Der Zeitbeiwert berücksichtigt dabei die Nacherhärtung des Betons bezogen auf das Betonalter von 60 Tagen. Ein hoher Zeitbeiwert entspricht dabei einer geringen und ein niedriger Zeitbeiwert einer hohen Nacherhärtung. Die im ARS 27/2012 aktualisierten Zeitbeiwerte beziehen sich allein auf die Druckfestigkeit von Fahrbahndeckenbeton, Biegezug- oder Spaltzugfestigkeiten wurden nicht ermittelt [Müller et al. 2013].

Alles in allem ist festzustellen, dass die Druckfestigkeit bei allen sechs Zementen mit zunehmendem Alter anstieg. Im Vergleich zum 60-Tage-Wert betrug der weitere Anstieg zwischen 5 und 20 %. Wie bereits bei den in [Müller et al. 2013] an Beton durchgeführten Untersuchungen wurden bei den Mörtelvarianten mit CEM II- und CEM III-Zement etwas höhere Zeitbeiwerte als bei den Mörtelvarianten mit CEM I-Zement ermittelt.

Im Vergleich zur Druckfestigkeit nahm die Biegezug- und die Spaltzugfestigkeit zwischen 60 und 360 Tagen nur noch geringfügig zu. Der prozentuale Anstieg im Vergleich zum 60-Tage-Wert betrug bei der Biegezugfestigkeit zwischen 0 und 10 %

und bei der Spaltzugfestigkeit zwischen 5 und 15 %. Entsprechend gering waren bei Biegezug- und Spaltzugfestigkeit die Zeitbeiwerte nach 360 Tagen, die in der Regel über 0,90 lagen und sich zwischen 60 und 360 Tagen nur noch geringfügig veränderten.

Bei den Untersuchungen der Laborbetonprobekörper wurde deutlich, dass sich sowohl bei den Druck- als auch bei den Spaltzugfestigkeiten nach den 60-Tage-Werten nur noch geringe Veränderungen ergeben. Eine Ausnahme bilden die Werte der Druckfestigkeit im Prüfaller von 360 Tagen, die einen Anstieg erkennen und eine weitere Zunahme der Festigkeit im Folgezeitraum vermuten lassen.

Die folgenden Bilder zeigen die prozentuale Entwicklung der Spaltzug- und Druckfestigkeiten, wobei die 60-Tages-Festigkeiten jeweils 100 % darstellen.

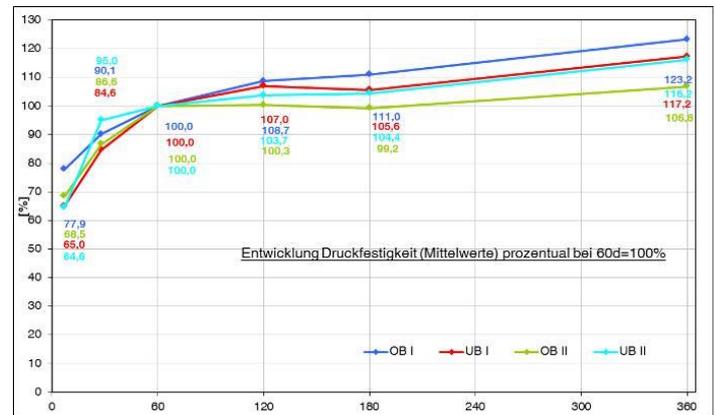


Bild 2: Prozentuale Entwicklung der Druckfestigkeiten

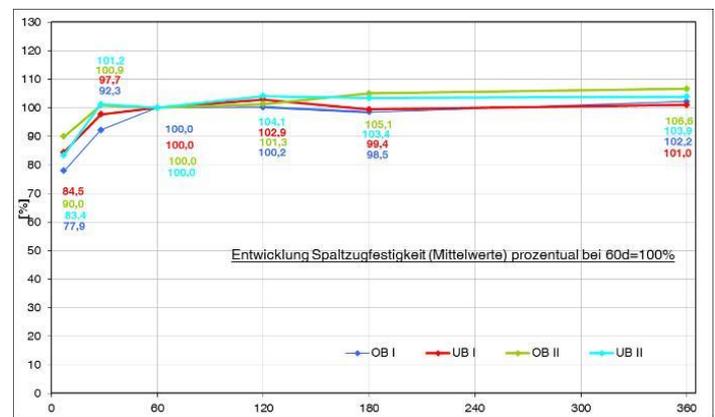


Bild 3: Prozentuale Entwicklung der Spaltzugfestigkeiten der Laborbetone

Die Betone weisen bei den Druckfestigkeiten nach 360 Tagen eine 7 bis 23 %ige Steigerung zu den Ergebnissen der Versuche im Alter von 60 Tagen auf. Die prozentuale Zunahme der Spaltzugfestigkeit liegt hingegen nur bei 1 bis 7 %.

Der Vergleich der Festigkeiten der Laborbetone mit den Festigkeiten der eingesetzten Zemente zeigt, dass die Festigkeitsentwicklungen des Betons und des Zements im Labor zeitlich in etwa gleich verlaufen.

Die Ermüdungsfestigkeitsversuche an Laborbetonprobekörpern führten in vielen Fällen zum vorzeitigen Versagen, sodass eine

Bestimmung der statischen Festigkeit nach Belastung in diesen Fällen nicht mehr möglich war. Dennoch konnten in der Untersuchung auch hohe Lastwechselzahlen erreicht werden. Bislang bekannte Ermüdungskurven wurden aus Versuchsergebnissen abgeleitet, die mit relativ geringeren Lastwechselzahlen und entsprechend hohen zugehörigen Belastungsniveaus durchgeführt wurden. Da die Anzahl der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht ausreicht, um eine eigene Ermüdungskurve abzuleiten, war es sinnvoll zu prüfen, inwiefern die bekannten Ermüdungsfunktionen mit den Versuchsergebnissen vereinbar sind. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sehr gut mit der Ermüdungsformel aus den RDO Beton 09 vereinbar sind. Sie geben deshalb keinen Anlass, diese Formel zu präzisieren oder durch eine andere Formel zu ersetzen.

Eine verlässliche Degradationskurve, welche durch empirische Daten hinreichend abgesichert ist, existiert derzeit nicht und ist auch nur mit sehr großem Aufwand zu gewinnen. Der prinzipielle Verlauf der Degradationsfunktion des Betons entspricht der im folgenden Bild dargestellten Kurve.

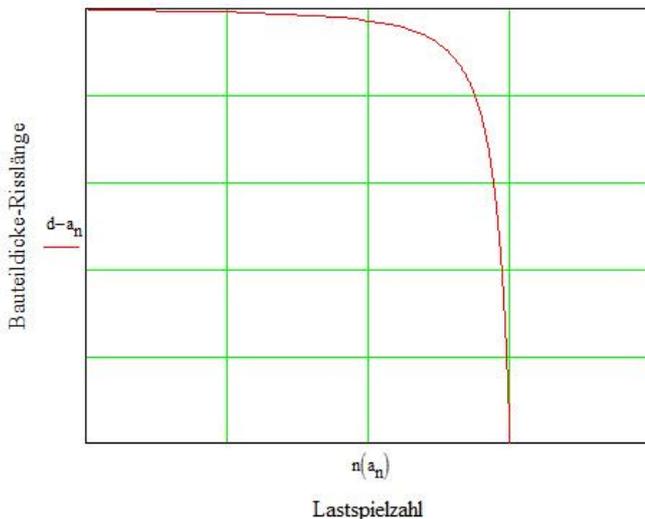


Bild 4: Durch Integration der Paris-Erdogan-Formel berechneter qualitativer Ermüdungsverlauf

Demnach kommt es erst in einer späten Phase des Ermüdungsprozesses zu einer wesentlichen Abnahme der Festigkeit. Der Festigkeitsverlust setzt sich dann progressiv fort und führt schnell zum Versagen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Festigkeitsverlust infolge Ermüdung bei einer ausreichend dimensionierten Betonplatte über die normative Nutzungsdauer marginal ist. Es scheint also gerechtfertigt, im Rahmen der Dimensionierung den Festigkeitsverlust durch Ermüdung zu vernachlässigen. Ebenso ist es nicht notwendig, für die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit im Zuge einer Substanzbewertung eine allmähliche Abnahme der Betonfestigkeit zu berücksichtigen.

Für das Forschungsvorhaben wurden vier Betonstrecken mit einem Alter zwischen 5 und 17 Jahren ausgewählt und untersucht. Die Verkehrsbelastung der Strecken während ihrer bisherigen Nutzungszeit betrug zwischen 7 und 35 Mio. äquivalente 10 t-Achsübergänge. Neben einer visuellen Zustandserfassung aller Strecken erfolgten Messungen mit dem Georadar-

und FWD-Messverfahren. Zusätzlich wurden zur Bestimmung des Aufbaus sowie zur Ermittlung der statischen und der Ermüdungsfestigkeit in je zwei Plattenreihen je zehn Bohrkerne entnommen.

Die Prüfungen der Druck- und Spaltzugfestigkeiten ergaben Mittelwerte zwischen 64-80 beziehungsweise 4,4 bis 6,6 N/mm². Ein Vergleich mit vorliegenden Ergebnissen aus Kontrollprüfungen zeigt, dass eine Zunahme der mittleren Druckfestigkeit von bis zu 63 % erreicht wurde.

Aus den visuellen Zustandserfassungen wurden anhand der aufgenommenen Risserscheinungen Ausfallraten zwischen 0 und 2,5 % ermittelt.

Die Ermüdungsfestigkeitsversuche führten im Gegensatz zu den Laborbetonen nur zu wenigen vorzeitigen Ausfällen, sodass die Festigkeit nach der gewünschten Lastwechselzahl ermittelt werden konnte. Eine eindeutig erkennbare/interpretierbare Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit von den ertragenen Lastwechseln war jedoch nicht feststellbar.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Ermittlung der strukturellen Substanz ist im folgenden Bild dargestellt.

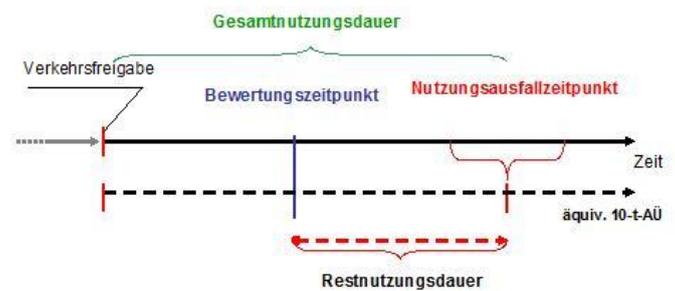


Bild 5: Ermittlung der strukturellen Substanz zum Bewertungszeitpunkt

Die Berechnung der strukturellen Restsubstanz erfolgt durch Umkehrung des Dimensionierungsverfahrens unter Berücksichtigung zusätzlicher Parameter.

Die allgemeine Vorgehensweise kann so mit drei Komplexen beschrieben werden.

1. Bewertung der strukturellen Substanz aus visueller Zustandserfassung und zerstörungsfreien Messungen
2. Rechnerische Überprüfung der Dimensionierung anhand zum Bewertungszeitpunkt ermittelter Festigkeits- und Geometriewerte
3. Berechnung der Restsubstanz aus Ergebnissen zu 1. und 2.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass das Verfahren zur Ermittlung der strukturellen Substanz auf der Grundlage der Berechnungsansätze nach RDO Beton 09 nur in relativer Nähe des Kalibrierungspunkts realistische Ergebnisse liefert. Es können hinreichend verlässliche Ausfallraten etwa bis zum doppelten Wert der jeweils gemessenen Ausfallrate berechnet werden. Um längerfristige Prognosen mit diesem Verfahren berechnen zu können, ist es erforderlich, den zeitlichen Verlauf des Lage-

rungsfaktors zu kennen und in das Berechnungsverfahren zu integrieren.

Mit einem heuristischen Berechnungsmodell, welches die Erfahrungswerte über den allgemeinen Schadensverlauf berücksichtigt, lassen sich langfristige Prognosen erstellen. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist im Einzelfall zu prüfen.

4 Folgerungen für die Praxis

Die zeitliche Entwicklung der Spaltzugfestigkeit weicht von der der Druckfestigkeit signifikant ab, wobei das Nacherhärtungspotenzial für die Spaltzugfestigkeit kleiner ist als das für die Druckfestigkeit. Damit ist festzustellen, dass die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen nur sehr bedingt Auskunft über die Spaltzugfestigkeit geben.

Es ist nicht möglich, ein einheitliches gesichertes Nacherhärtungspotenzial anzugeben, welches im Zuge der Dimensionierung angesetzt werden kann, da eine Abhängigkeit von der Zementart und der Betonzusammensetzung vorliegt.

Die Ermüdungskurve aus den RDO Beton 09 (Gleichung 7-6, 7-7) konnte durch die Ermüdungsversuche bestätigt werden.

Im Lastniveaubereich zwischen 50 und 60 % nimmt die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel dramatisch ab. Eine ausreichend dimensionierte Betondecke wird damit normalerweise über ihre gesamte Nutzungsdauer nur mit einem Bruchteil der ertragbaren Lastwechsel belastet werden. Diese Sicherheitsreserve kann aber sehr schnell aufgebraucht werden, wenn sich das Belastungsniveau erhöht.

Erst am Ende des Ermüdungsprozesses kommt es zu einer spürbaren Abnahme der Betonfestigkeit. Die Schädigung wächst progressiv an und führt schließlich zum Versagen. Die Betonfestigkeit ist damit kein geeigneter Parameter, um den Ermüdungszustand des Betons zu diagnostizieren. Für die rechnerische Dimensionierung und Berechnungen der strukturellen Substanz ist es nicht notwendig, eine allmähliche Abnahme der Betonfestigkeit infolge Ermüdung in Rechnung zu stellen.

Der für den Einzelfall exakte Verlauf einer Degradationskurve für die Betonfestigkeit im Zuge der Ermüdung kann derzeit nicht angegeben werden.

Georadarmessungen sind grundsätzlich ein geeignetes und sinnvolles Untersuchungsverfahren im Prozess der Substanzbewertung. Die Nutzung dieser Technologie ermöglicht einen flächendeckenden Überblick über gewisse Zustandsmerkmale der Fahrbahn. Beim gegenwärtig möglichen Genauigkeitsniveau liegt die Bedeutung des Verfahrens weniger in der zielgenauen Bestimmung einzelner Parameter, sondern in der Erstellung eines allgemeinen Gesamtbildes über den Fahrbahnzustand. Bei wiederholter Anwendung ergeben sich Vergleichsmöglichkeiten, welche den Erkenntnisgewinn steigern können. Sinnvoll ist die Kombination mit ergänzenden Bohrkernuntersuchungen.

Zur besseren Beurteilung des Nacherhärtungspotenzials sind längerfristige Versuche oder Untersuchungen in situ notwendig. Eine Differenzierung bezüglich der Zementsorten ist ebenfalls erforderlich.

Weitere Ermüdungsuntersuchungen erscheinen erst sinnvoll, wenn es eine Möglichkeit der zerstörungsfreien Festigkeitsprüfung gibt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist zu erwarten, dass signifikante Erkenntnisfortschritte eher aus dem Studium der Degradation der Steifigkeit (E-Modul) zu gewinnen sind. Hier ist die Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung gegeben. Die Ermüdungsversuche werden dadurch deutlich weniger aufwendig und die Streuung der Ergebnisse wird sich auf viel niedrigerem Niveau bewegen. Weiter ist zu erwarten, dass der E-Modul, im Gegensatz zur Festigkeit, im Verlaufe des Ermüdungsprozesses eine deutlich erkennbare Degradation zeigt. Damit wäre potenziell die Möglichkeit gegeben, den E-Modul als Indikator für den Ermüdungszustand des Betons zu benutzen.

Um das Berechnungsverfahren für die strukturelle Restsubstanz weiterzuentwickeln, ist es erforderlich, einen quantitativen Zusammenhang zwischen dem Bettungszustand und dem Lagerungsfaktor zu finden. Dafür sind zunächst objektiv messbare Parameter zur Beschreibung der Bettung zu definieren. Gleiches gilt für die Wirksamkeit der Querkraftübertragung und den Dübelfaktor. Hier ist mit dem Wirksamkeitsindex allerdings ein messbarer Parameter vorhanden. Die Entwicklung der Bettung und der Querkraftübertragung ist zu erforschen, adäquat zu beschreiben und im Verfahren zur Berechnung der Restsubstanz zu berücksichtigen.

Perspektivisch ist die Ermüdung nicht isoliert als Materialparameter zu betrachten, sondern der Ermüdungsprozess der Fahrbahnplatte zu beschreiben. Dazu ist die Implementierung fortgeschrittener Materialgesetze in leistungsfähige FEM-Modelle notwendig.

5 Literatur (Auswahl)

- [AL Sp-Beton 06] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: "Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen", AL Sp-Beton 06, Ausgabe 2006
- [ARS 27/2012] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 27/2012, Korrekturen der ZTV Beton-StB 07, Stand August 2012, Verkehrsblatt Ausgabe 03/2013
- [BONZ 1965] Bonzel, J.: "Biegezug- und Spaltzugfestigkeit des Betons", Betonverlag Düsseldorf, 1965
- [FE 04.0218/2008/ARB] Villaret, Kiehne, Riwe: FE 04.0218/2008/ARB "Probabilistische Verfahrensweise für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil Betondecken" – Schlussbericht 07/2011
- [FE 04.0249/2011/FGB] Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Zander: FE 04.249/2011/FGB "Entwicklung einer Systematik zur Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten", Entwurf des Schlussberichts 10/2013
- [FE 88.0102/2009] Kiehne, Musfeldt, Nießen, Riwe, Villaret: FE 88.0102/2009 "Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der strukturellen Substanz von Verkehrsflächen mit unbewehrter Betondecke", Schlussbericht 05/2011

- [GRO/VI 2009] Grossmann, Villaret: "Restwertermittlung von Asphalt- und Betonstraßen", Straße und Autobahn, 06/2009
- [KEKRA 2002] Kessler-Kramer, C.: "Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung", Dissertation Universität Karlsruhe, 2002
- [KU 1962] Kucera, K.: "Die Ermüdung des Betons als Grundlage für die Dimensionierung von Betonfahrbahnen", Die Straße, 1962
- [MAL 2010] Malarics, V.: "Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch mit zylindrischen Betonproben", Dissertation Universität Karlsruhe, 2010
- [MÜLLER et al 2013] Müller, C.; Eickschen, E.; Breitenbücher, R.; Köster, C.: "Überprüfung des Zeitbeiwerts für Fahrbahndeckenbetone". Straße und Autobahn 64 (2013) Heft 4, S. 213-224.
- [PFA 2003] Pfanner, D.: "Zur Degradation von Stahlbetonbauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung", Fortschrittsberichte VDI Nr. 189, Ruhr-Universität Bochum, 2003
- [PFEI/KIE/VI 2002] Pfeifer, Kiehne, Villaret: "Bemessungsverfahren für Betonoberbau", Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 856 (2002)
- [Rack 2006] Rackwitz: "Zuverlässigkeit und Lasten im konstruktiven Ingenieurbau", Technische Universität München 1993-2006
- [RDO Beton 09] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: "Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen", RDO Beton 09, Ausgabe 2009
- [RE/HE/CA 2006] Rens, L.; Henriët, G.; van Cauwelaert, F.: "Fatigue tests on circular concrete slabs", 6th International DUT-Workshop Belgium, 2006
- [RIWE 2011] Riwe: "Dauerhafte Betondecken – Substanzbewertung von Betondecken" – Vortrag zur Betonstraßen-tagung Köln 2011
- [ROES 2006] Roesler, J.: "Fatigue Resistance of Concrete Pavements", 6th International DUT-Workshop Belgium, 2006
- [RStO 12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: "Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen", Ausgabe 2012
- [TL Beton-StB 07] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: "Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton", Ausgabe 2007
- [TP Beton] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: "Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton", Ausgabe 2010
- [ZHA 1997] Zhang, B.; Wu, K.: "Residual fatigue strength and stiffness of ordinary concrete under bending", Cement and Concrete Research, 1997