

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100

FA 4.300

Forschungsstellen: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Ressel)
 Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)
 Universität Stuttgart, Materialprüfungsanstalt, Bereich Bauwesen (Prof. Dr.-Ing. H. Garrecht)

Bearbeiter: Ressel, W./Wellner, F./Garrecht, H./Alber, S./Mielich, O./Engel, C./Ferraro, P./Kamratowsky, E./Kraft, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Oktober 2020

1 Betonbefestigungen – Untersuchungen

In über 80 Jahren weltweiter AKR-Forschung ist es bisher noch nicht gelungen, zuverlässige Verlaufsprognosen AKR-geschädigter Bauwerke und die daraus resultierende Restnutzungsdauer dieser Bauwerke zu entwickeln. Auch die vorgestellten Rechenverfahren und Versuche konnten noch nicht abschließend die Restnutzungsdauer einer AKR-geschädigten Betonfahrbahndecke erfassen. Hierfür waren der in diesem Projekt angesetzte Zeitrahmen von 36 Monaten und die bereitgestellten Mittel für das Teilprojekt "AKR-Verlaufsprognose" zu gering. Trotzdem ist es gelungen, neue und vor allem wesentliche Erkenntnisse herauszuarbeiten.

Die vorliegenden Ergebnisse und der Verweis auf die Arbeiten von Mielich (2019b) und Mielich & Zwirger (2019) haben sehr deutlich gezeigt, dass der maßgebende Bemessungsfall für den AKR-bedingten Schadensfortschritt, die Belastungen sind, die sich aus jedem Radübergang (Be- und Entlastung) ergeben. Genau diese verursachen mehr oder weniger starke Vertikalverformungen, die ein Fortschreiten der AKR-bedingten Horizontalrisse und eine Ermüdung des Betons mit sich bringen und im Laufe der Zeit ein Einbrechen und eine Verschotterung der Fugenkreuze und Querfugen zur Folge haben.

Der Rissfortschritt des Horizontalrisses in der Fahrbahndecke ist der Grund für eine oftmals schnelle, nichtlineare und fast unkalkulierbare Schadensentwicklung. In Einzelfällen wurde ein schneller Schadensfortschritt festgestellt, der in kürzester Zeit von Schadenskategorie I zu III führte. Es ist auch davon auszugehen, dass der Rissfortschritt in einem betroffenen Streckenabschnitt nicht gleichmäßig stattfindet.

Diese Ausführungen sind auch der Grund dafür, warum eine systematische Prognose der Schadensentwicklung mittels AKR-

provozierenden Lagerungen nicht möglich ist. Die in diesem Projekt angewandte FIB-Klimawechsellagerung lässt dahingehend eine Bewertung zu, ob eine AKR zu erwarten oder ob noch weiteres Restschädigungspotenzial vorhanden ist. Bei der Durchführung der Klimawechsellagerung spielt die Ausrichtung der Prüfkörper eine zentrale Rolle. Die Prüfkörper sollten zukünftig rechtwinklig zur Plattenebene und nicht wie bei zweischichtiger Bauweise üblich parallel dazu ausgerichtet sein. Die Frage, ob durch diese Änderung die Grenzwerte in den AKR-provozierenden Lagerungen angepasst werden müssen, wurde in diesem Forschungsprojekt nicht beantwortet.

Ein Eckabbruch bei einer Betonfahrbahnplatte kann auch dann auftreten, wenn noch keine Anzeichen farblicher Veränderungen im Bereich von Längs- und Querfugen sowie Fugenkreuzen an der Oberfläche sichtbar sind (Mielich 2019a). Das ist dann möglich, wenn eine schädigende AKR ihren Ursprung nicht im Oberbeton, sondern im Unterbeton hat. In jedem Fall muss aber überprüft werden, ob die Ursache für einen Eckabbruch auch in einer hohl liegenden Platte zu suchen ist. Wenn ja, war eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion vermutlich nicht beteiligt.

Bohrkerne für weiterführende Untersuchungen im Labor müssen an Stellen der Betonfahrbahnplatte entnommen werden, wo die AKR-Schädigung ihr Maximum findet. Der bereits in MIELICH (2019b) vorgestellte Bohrkernentnahmeplan wurde auch in diesem Projekt angewandt.

Die für die AKR maßgebliche Bedeutung der Materialeigenschaften ist nicht gleichzusetzen mit der für die Dimensionierung. Anzuführen ist die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit, welche als maßgebender Materialparameter in die rechnerische Dimensionierung nach RDO Beton 09 auf der Seite des aufnehmbaren Moments eingeht. Grund für diese wesentliche Erkenntnis ist die AKR-bedingte Strukturschwächung der Betondecken. An der Stelle, an der die Spaltzugfestigkeit ermittelt wird, nämlich an der oberen und unteren Randfaser, findet die AKR-bedingte Strukturschwächung nicht statt. Die Strukturschwächung ist geprägt von einer Rissbildung, die überwiegend horizontal gerichtet ist. Sie tritt meistens in Höhe der Dübellage, aber auch ober- und unterhalb der Dübel auf. Aus den Ausführungen ergibt sich, dass jegliche Art der Substanzbewertung AKR-verdächtiger Fahrbahndeckenbetone, beruhend auf Spaltzugergebnissen, falsch ist.

Die Abnahme der Spaltzug- als auch der Druckfestigkeit ist sehr gering, die der zentrischen Zugfestigkeit und des E-Moduls groß. Beim Druckversuch werden die Risse geschlossen und beeinträchtigen demzufolge die Festigkeit wenig. Bei der Bestimmung des E-Moduls werden die Risse ebenfalls zusammengedrückt, aber das Schließen der Risse wird als größere Dehnung registriert, was bewirkt, dass der E-Modul kleiner wird. Bei der Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit wirkt die Last rechtwinklig zur horizontalen Rissbildung und bewirkt geringere Zugfestigkeiten.

Bekanntlich versagt eine Betonfahrbahndecke auf Zug und nicht auf Druck. Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit werden durch die AKR aber nur sehr wenig beeinträchtigt. Die zentrische Zugfestigkeit darf deshalb auch nicht näherungsweise aus der Druck- und der Spaltzugfestigkeit abgeschätzt werden.

Es wird vorgeschlagen, dass eine Zustandserfassung an einer Fahrbahnplatte mittels drei Bohrkernen vorgenommen wird, die in Plattenmitte und mit einem Abstand von 26 cm und 8 cm der Bohrlochmitten zum Längs- und Querfugenrand entnommen werden. An diesen werden der Elastizitätsmodul und die zentrische Zugfestigkeit bestimmt. Weichen die mechanischen Eigenschaften zu den Referenzwerten in Plattenmitte um mehr als 15 % ab, deuten sie auf eine zyklisch auftretende last- und lastunabhängige Beanspruchung bei gleichzeitigem Auftreten einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion hin.

Als zerstörungsfreie Untersuchungen wurden Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführt. Da das FWD grundsätzlich eine große Tiefenwirkung hat, resultiert der größte Anteil der Deflexion aus der Bettungstragfähigkeit, die bekanntlich jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. In diesem Forschungsprojekt war nur eine begrenzte Anzahl an Versuchen möglich. Die ersten Ergebnisse sind aber dahingehend vielversprechend, dass eine AKR-bedingte Strukturschwächung unter bestimmten Voraussetzungen nachgewiesen werden kann, und zwar dann, wenn den FWD-Messungen eine längere Frostperiode vorausging. Abschließend soll nicht unerwähnt bleiben, dass bei Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer begleitend Bohrkern nach dem in Mielich (2019b) vorgeschlagenen Entnahmeplan entnommen werden sollten.

Die Dimensionierung nach RDO Beton 09 vergleicht einwirkende mit aufnehmbaren Biegemomenten. Die rechnerischen Ausführungen haben jedoch gezeigt, dass die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Kombination mit der Bauweise Belastungszustände erzeugt, die dazu führen, dass sich Ober- und Unterbeton wegen des Verbunds nicht frei verformen können. Infolge der Einleitung und Umlenkung der horizontalen Spannungen in den Plattenendbereichen entstehen Schub- als auch Schälspannungen. Erreichen die Schubspannungen die Schubfestigkeit des Betons, die näherungsweise der Zugfestigkeit gleichgesetzt werden kann, kommt es zum Schubversagen. Die Folge sind Risse im Endbereich der Betonfahrbahnplatten, die horizontal gerichtet sind. Zukünftig ist daher bei AKR-verdächtigen Betonfahrbahnplatten den auftretenden Schubspannungen große Aufmerksamkeit zu widmen. Berechnungsmethoden und die Ausnutzung von Materialparametern, wie sie in den RDO Beton 09 angewandt werden, sind für AKR-verdächtige Betonfahrbahnplatten nicht geeignet.

Im Gegensatz dazu bilden die RDO Beton 09 das Fundament für die Dimensionierung oder Nachrechnung von Neubaumaßnahmen. So konnte gezeigt werden, dass bei einer konventionellen Dimensionierung nach RStO 12 keine hinreichende Beachtung der Nutzungsdauer erfolgt. Streuungen in der Materialqualität/-

performance im Kontext mit einer entsprechenden Dauerhaftigkeit sind nicht bewertbar. Im Gegensatz dazu ist bei einer konsequenten Anwendung der RDO Beton 09 eine Kompensation von Streuungen in der Materialqualität/-performance durch die Mehrdicke kompensierbar. Somit wird die Nachhaltigkeit einer Baumaßnahme nach RDO Beton 09 bereits in der Planungs- als auch in der Ausführungsphase beeinflusst.

2 Asphaltbefestigung – Untersuchungen

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen der drei Bauabschnitte als Asphaltbauweise werden Prognoseberechnungen der Ermüdungsrisssbildung und der Spurrinnenentwicklung durchgeführt. Grundlage für die Prognoseberechnung der Ermüdungsrisssbildung bilden die Versuchsergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Bestimmung der Hauptkurve und der Ermüdungsfunktion der Asphaltgemische sowie die Bestimmung des Verformungsverhaltens anhand von einaxialen Druck-Schwellversuchen beziehungsweise Triaxialversuchen. Außerdem werden die Schichtdicken an den gewonnenen Bohrkernen bestimmt.

Die Prognose der Ermüdungsrisssbildung wird mit der probabilistischen Verfahrensweise durchgeführt. Mit dieser Verfahrensweise kann die Variabilität der Materialkenngrößen basierend auf der jeweiligen Stichprobe in die Berechnung eingebunden werden. Die charakteristischen Materialkenngrößen werden statistisch modelliert und durch Klassen diskret abgebildet. In einer ähnlichen Art und Weise wird die Schichtdickenstreuung des Asphaltpakets in der Prognoseberechnung berücksichtigt. Ziel dieser Verfahrensweise ist, die Streuung der Materialeigenschaften und der Schichtdicken des Asphaltpakets in den Prognoseprozess der Nutzungsdauer einzubeziehen.

Bei der Verfahrensweise der Spurrinnenprognose wird die Akkumulation der bleibenden Dehnungen durch zufallsbedingte Beanspruchungszustände vorgenommen. Nach der Berechnung aller Beanspruchungszustände ermitteln sich die gesamten bleibenden Verformungen der Straßenkonstruktion durch die Multiplikation der berechneten Verformung je Schicht mit der jeweiligen Schichtdicke und summiert diese über alle Schichten auf. Aufgrund der fehlenden Validierung und Kalibrierung der Verfahrensweise können die Prognoseergebnisse nur relativ dargestellt werden, sodass nur vergleichende Untersuchungen an Asphaltbefestigungen momentan möglich sind.

Bei den Prognoseberechnungen der Ermüdungsrisssbildung und der Spurrinne werden verschiedene Einflüsse aus Klima und Verkehr sowie Materialeigenschaften betrachtet. Mithilfe des Bochumer Alterungsverfahrens werden die Asphaltgemische der Bauabschnitte 2a und 2b im Labor gealtert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung der gealterten Asphaltgemische widersprechen allerdings den gesammelten Erfahrungen in situ deutlich und zeigen, dass die Alterung der Asphaltgemische nur unzureichend mit dem Bochumer Alterungsverfahren simuliert werden kann. Die Alterung der

Asphaltgemische besitzt einen geringen Einfluss auf die Spurrinnenprognose. Die Entwicklung der Spurrinne über die Nutzungsdauer ist fast identisch zu den Ergebnissen, die mit den ungealterten Asphaltgemischen prognostiziert werden. Während der ersten 10 Jahre der Nutzungsdauer entsteht der Großteil der bleibenden Verformung in der Straßenkonstruktion. In diesem Zeitbereich werden die Materialkenngrößen der ungealterten Asphaltgemische für die Prognoseberechnung, die die Alterung der Asphaltgemische berücksichtigt, verwendet.

Weiterhin wird der Einfluss des Schichtenverbunds zwischen den Asphaltsschichten untersucht. Bei einem abgeminderten Schichtenverbund gemäß den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen (FGSV 2009d) reduziert sich die Nutzungsdauer der vorhandenen Straßenkonstruktion für alle Bauabschnitte. Die größte Reduzierung der Nutzungsdauer wird bei einem abgeminderten Schichtenverbund zwischen der Asphaltbinder- und der oberen Asphalttragschicht prognostiziert. Dagegen ist der Einfluss des Schichtenverbunds auf die Entwicklung der Spurrinne sehr gering. Die Prognoseergebnisse der Spurrinne sind nahezu identisch zu den Ergebnissen mit vollem Verbund zwischen allen Asphaltsschichten.

Für das Emissionsszenario A1B (Jacobs 2005) werden die normierten charakteristischen Temperaturprofile durch thermische Simulationen angepasst. Der prognostizierte Wandel der klimatischen Bedingungen bewirkt eine deutliche Reduzierung der Nutzungsdauer hinsichtlich der Ermüdung bei allen Bauabschnitten. Die Ergebnisse zeigen für die verschiedenen Asphaltabschnitte unterschiedliche Reduzierungen der Nutzungsdauer. Bei gleichen Randbedingungen der klimatischen Verhältnisse sind diese Unterschiede auf die verschiedenen eingesetzten Asphaltgemische und/oder auf die jeweilige Bauweise zurückzuführen. Das Verformungsverhalten der Bauabschnitte verschlechtert sich ebenfalls deutlich.

Des Weiteren werden verschiedene außerplanmäßige Verkehrsszenarien in den Prognoserechnungen berücksichtigt: Vollsperrung einer Richtungsfahrbahn aufgrund von Instandsetzungsmaßnahmen, Verkehrsverlagerung der A 38 auf die A 14 aufgrund von Baumaßnahmen auf der A 38, Anstieg des Schwerverkehrsanteils während der gesamten Nutzungsdauer. Der Anstieg des Schwerverkehrs verursacht erwartungsgemäß die größte Reduzierung der Nutzungsdauer in Hinblick auf die Ermüdungsrissbildung. Dagegen besitzt die Verkehrsverlagerung aufgrund von Baumaßnahmen auf der A 38 keinen Einfluss auf die Ermüdungsrissbildung. Aufgrund der Vollsperrung einer Richtungsfahrbahn reduziert sich die Nutzungsdauer der Bauabschnitte geringfügig. Die außerplanmäßigen Verkehrsszenarien besitzen keinen Einfluss auf die Entwicklung der Spurrinne, insbesondere für den Bauabschnitt 2b. Der Anstieg des Schwerverkehrsanteils bewirkt lediglich bei Abschnitt 2a eine geringfügige Erhöhung der Spurrinnentiefe nach 30 Jahren Nutzungsdauer.

3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Erhaltungsstrategien

Aus den dargestellten Untersuchungen an Asphalt- und Betonbefestigungen und den damit entwickelten Prognosen zur Nutzungsdauer und zum Schadensverlauf wurde die Wirtschaftlichkeit verschiedener Erhaltungsstrategien bei Annahme verschiedener möglicher eintretender Szenarien durch Berechnungen mit der Software LCD2 untersucht. Hierzu wurden verschiedene Verhaltensfunktionen eingesetzt, die auf den Untersuchungen an den Abschnitten der BAB A 14 basieren. Diese Verhaltensfunktionen sind somit sehr viel (abschnitts-)spezifischer bezüglich Material und Aufbau als herkömmliche Standardverhaltensfunktionen, die in FGSV (2001b) grundlegend beschrieben sind.

Konkret wurden bei den Asphaltabschnitten Nutzungsdauerprognosen und Prognosen der Spurrinnenbildung in unterschiedlichen Kombinationsvarianten betrachtet. Neben einer ausschließlichen Betrachtung der Spurrinnenbildung über eine fix angenommene Nutzungsdauer von 30 Jahren (Variante 1), der Durchführung eines standardisierten, an der prognostizierten Nutzungsdauer orientierten Konzepts (Variante 2) ist auch die sinnvolle und mutmaßlich aussagekräftigste Kombination beider Merkmale beziehungsweise Verhaltensfunktionen (Nutzungsdauer und Spurrinnenbildung) untersucht worden (Variante 3). Es wurden unterschiedliche Szenarien (Schichtenverbund, Klima- und Verkehrsszenarien) bezüglich Nutzungsdauer und Schadensentwicklung angenommen, die sich wie im Abschnitt "Asphaltbefestigungen" beschrieben unterscheiden. Dabei wurden nicht nur die Einzel-Szenarien und die dabei entstehenden Baulasträger- und Nutzerkosten ermittelt, vielmehr wurde eine szenarienübergreifende Methodik entwickelt, die auch bei Unkenntnis des tatsächlich zukünftig eintretenden Szenarios die Bestimmung der wirtschaftlichsten Erhaltungsstrategie ermöglichen kann.

Bei den betrachteten Abschnitten, die in Betonbauweise erneuert wurden, kamen als Verhaltensfunktionen Hazardfunktionen (nach Wieland et al., 2017) zum Einsatz, die basierend auf der Prognose der zeitlichen Entwicklung der Betonplattenausfallrate als Schadenprozess eine Prognose der Nutzungsdauer zulassen. Darauf aufbauend wurden – vor allem basierend auf der Prognose der Nutzungsdauer – sinnvolle mögliche Erhaltungsstrategien untersucht und verglichen. Eine Szenarienbetrachtung war aufgrund der deterministischen Charakteristik der Hazardfunktionen nicht möglich, wurde aber im Rahmen der Formulierung eines weiterführenden Konzepts für zukünftige Untersuchungen vorgeschlagen. Der Unterschied zu den Betrachtungen bei den Asphaltabschnitten bestand weiterhin darin, dass nur eine Verhaltensfunktion (Hazardfunktion) zugrunde gelegt wurde (anstatt zwei wie bei Asphalt).

Es wurden auch bauweisenübergreifende Vergleiche (Asphalt/Beton) der Abschnitte versucht, die jedoch aufgrund zu verschiedener Randbedingungen nur sehr eingeschränkt sinnvoll waren.

Die betrachteten Abschnitte auf der BAB A 14 unterlagen vor der Erneuerung (2016-2019) einer AKR-Schädigung (siehe auch Abschnitt "Betonbefestigungen"). Auch diesbezüglich wurden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen angestellt, um für eine zu prognostizierende verbleibende (Rest-)Nutzungsdauer der AKR-geschädigten Betondecke eine an das AKR-Geschehen angepasste systematische Erhaltungsplanung entwerfen zu können. Die zeitliche Prognose der AKR-Schädigung und auch konkret auftretender Schadensbilder (zum Beispiel Eckabbrüche) ist wie oben dargestellt sehr komplex. Deshalb wurde ein empirisches Verfahren entwickelt, das auf Basis der Auswertung von ZEB-Daten (Frontkamerabilder) verschiedener Kampagnenjahre und der Anwendung einer Normalverteilung bezüglich des Schadensfortschritts eine Prognose der (Rest-)Nutzungsdauer ermöglicht. Diese Prognose basiert somit nicht auf grundlegenden Materialuntersuchungen; falls zukünftig entsprechende Erkenntnisse aus Materialversuchen vorliegen sollten, könnten diese jedoch in das methodische Vorgehen integriert werden. Auf Basis dieser Prognose des AKR-Verlaufs und der Abschätzung der (Rest-)Nutzungsdauer wurden verschiedene Erhaltungsprogramme – sowohl mit AKR-verzögernden als auch nicht-verzögernden Maßnahmen – berechnet und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit verglichen. In den Berechnungen wurde nach dem Vorliegen von bestimmten Schadenskategorien (0 bis III) unterschieden, da diese mitunter bestimmte Maßnahmenmöglichkeiten ausschließen. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere ein frühzeitiges aktives Eingreifen mit umfangreichen flächigen Maßnahmen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit dem (reaktiven) Flicken (Asphaltplomben an Fugenkreuzen) überlegen ist.

Eine lebenszyklusübergreifende Betrachtung (über Erneuerungszeitpunkte hinweg) wurde zusätzlich beispielhaft für den Abschnitt 4 durchgeführt und daran aufgezeigt, welche Aussagen dies prinzipiell ermöglichen kann, aber auch welche Probleme diese über große Zeiträume durchgeführte Betrachtung bergen kann.

Ein Monitoring der betrachteten Abschnitte (zum Beispiel im Abstand von je 5 Jahren nach der Herstellung) wäre dahingehend wünschenswert und anzustreben, da damit die erarbeiteten Methoden, Prognosen und Ergebnisse überprüft und weiterentwickelt werden könnten.

4 Literatur

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2001b): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01), Ausgabe 2001, FGSV Verlag, Köln.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2009d): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB), Ausgabe 2009 / Fassung 2013, FGSV Verlag, Köln

Jacob, D. (2005): REMO climate of the 20th century run – 0,088 degree resolution run no. 006210, 1h data, Techn. Ber

Mielich, O. (2019a): Empfehlungen zur Schadensdiagnose AKR-geschädigter Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung der Bauweise. Straße und Autobahn 2019, H. 8, S. 666-672

Mielich, O. (2019b): Rissbildungen und mechanische Betoneigenschaften an einem Fahrbahndeckenbeton mit Alkali-Kieselsäure-Reaktion. beton 69 (2019), H. 11, S. 406-415

Mielich, O., Zwerger, V. (2019): Zustandserfassung von Fahrbahndeckenbetonen mit Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 12, S. 899-910

Wieland, M., Villaret, S., Riwe, A. (2017): Bewertung der strukturellen Substanz für die systematische Erhaltungsplanung von Betonfahrbahndecken, Straße und Autobahn Heft 2/2017, Kirschbaum Verlag, Bonn.