

Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

FA 6.111

Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Materialprüfanstalt (Prof. Dr.-Ing. S. Weihe)

Bearbeiter: Mielich, O.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Juli 2020

1 Probleme und Zielstellung

Im Bereich des deutschen BAB-Netzes stellt sich derzeit das Problem dar, dass in den Jahren vor 2005/2006 zum Teil Gesteinskörnungen für den Bau von Betonfahrbahndecken verwendet wurden, die eine Alkaliempfindlichkeit aufweisen und dadurch heute mehr oder weniger ausgeprägte AKR-Schäden hervorrufen. Es ist abzusehen, dass in den kommenden Jahren mit größeren Erneuerungsmaßnahmen AKR-geschädigter Streckenabschnitte zu rechnen ist. Beim Ausbau dieser Strecken wirkt sich nachteilig aus, dass das anfallende Recyclingmaterial (RC-AKR-Material) zur Herstellung neuer Fahrbahndecken ungeeignet ist. Es sollte daher die Frage geklärt werden, ob und unter welchen Voraussetzungen das beim Ausbau gewonnene Aufbruchmaterial nach Aufbereitung als Sekundärrohstoff in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) beziehungsweise in hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann.

2 Methodisches Vorgehen

Bei der Verwertung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone ist eine ganzheitliche Bewertung erforderlich. Es müssen die Zeitpunkte vor (Diagnose und Aufbruch), während (Aufbereitung) und nach dem Fahrbahndeckenaufbruch (Verwertung) betrachtet werden. Vor dem Aufbruch ist die Betonfahrbahn hinsichtlich

- des visuellen Schadensbilds,
- der Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Spaltzugfestigkeit) und
- dem AKR-bedingten Restschädigungspotential zu prüfen und zu beurteilen.

Das beim Aufbruch und der Aufbereitung anfallende RC-AKR-Material stellt verglichen mit RC-Material hinsichtlich der angestrebten Verwertung eine Besonderheit dar. Auch nach dem Aufbruch und der Aufbereitung sind immer noch Voraussetzungen gegeben, die zu einer nachträglich einsetzenden Alkali-Kieselensäure-Reaktion führen könnten. Folgende Voraussetzungen sind gegeben, die in den Untersuchungen zu berücksichtigen sind:

- Anwesenheit einer als alkaliempfindlich eingestuftes Gesteinskörnung,

- Vorhandensein von neuen reaktiven Bruchflächen der gebrochenen Gesteinskörnung,
- Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Bindemittel),
- gespeicherte Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus Tausalzeintrag während der Nutzung),
- Feuchtigkeit (gespeichert über Eintrag bei Wässerung zur Verdichtung einer ToB und Entwässerung während der Nutzung als ToB) und
- Tausalzeintrag (über Fugen) während der Nutzung als ToB oder HGT.

Neben den Anforderungen, die sich aus den Regelwerken und den länderspezifischen Anforderungen an Recyclingmaterial ergeben, sollten für RC-AKR-Material nach der Aufbereitung mindestens

- die Korngrößenverteilung,
- der Widerstand gegen Zertrümmerung (Schlagversuch),
- der CBR-Wert und
- die Dauer-Biegezugfestigkeit für den Anwendungsfall HGT

ermittelt werden. Der Zeitpunkt nach der Aufbereitung definiert Anforderungen an ungebundene und gebundene Tragschichten. Als Anforderung an eine ToB sind die Tragfähigkeit, die Wasserdurchlässigkeit und die kapillarbrechende Wirkung zu nennen. Eine hydraulisch gebundene Tragschicht HGT sollte ausreichend tragfähig und frostsicher sein.

3 Untersuchungsprogramm

3.1 Laborversuche mit RC-AKR-Material für ToB

Bei der Bewertung einer AKR-geschädigten Fahrbahndecke und Berücksichtigung der Bauweise lässt sich vermuten, dass der aufzubereitende Altbeton nicht unbedingt aus einer gleichmäßigen Altsubstanz stammt. Bei AKR-geschädigten Fahrbahndecken ist mit unterschiedlichen Steifigkeiten (E-Moduln) des Altbetons zu rechnen, welche innerhalb einer Betonplatte stark schwanken können. Für den Elastizitätsmodul sind Schwankungen bis zu 50 % zu nennen. Aber auch Flickstellen oder partiell größere Asphaltflächen aus vorangegangenen Erhaltungsmaßnahmen dürfen nicht unberücksichtigt bleiben.

Untersuchungen am Aufbruchgut, welches mit einem Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage zu RC-AKR-Material aufbereitet wurde, zeigten, dass die Anforderungen an die technischen Regelwerke und Anforderungen, die sich aus länderspezifischen Regelungen ergeben, eingehalten werden können. Zum Prüfumfang nach der Aufbereitung gehören die Bestimmung der Korngrößenverteilung, der stofflichen Zusammensetzung (zum Beispiel Anteil Asphaltgranulat), der

Feinanteile, der Kornform, der Reinheit, des Widerstands gegen Frost-Tauwechsel, der Raumbeständigkeit, der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts, umweltrelevanter Eigenschaften sowie die Wasserdurchlässigkeit.

Zusätzlich zum aufgeführten Prüfumfang müssen zwei weitere Prüfungen genannt werden, die aber im Kontext mit einer schädigenden AKR besondere Erwähnung finden. Die schädigende AKR setzt durch Löseprozesse und Rissbildungen in der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung die Steifigkeit herab (Mielich et al. 2019). Zwei Kriterien, die diesem Einfluss nach der Aufbereitung in einem Prallbrecher sehr gut Rechnung tragen, sind der Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch sowie der California-Bearing-Ratio-Versuch (CBR-Versuch), der als Laborversuch die Tragfähigkeit von Tragschichten beschreibt.

Nach TL Gestein-StB 04/07, Anhang E, ist im Anwendungsbe- reich für Schichten ohne Bindemittel der Widerstand gegen Zertrümmerung zu bestimmen. In den Laborversuchen wurde der Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch nach DIN EN 1097-2 ermittelt. Alle im Labor an RC-AKR-Material ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{9/12,5}$ halten die Anforderungen gemäß TL Gestein-StB 04/07 wie auch die Anforderungen länderspezifischer Regelungen ein. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass AKR-bedingte Rissbildungen im Gesteinskorn durch die energiereiche Aufbereitung im Prallbrecher beim späteren Schlagversuch vernachlässigbar sind.

Nach TL SoB-StB 04/07 ist der CBR-Versuch gemäß DIN EN 13286-47 bei Baustoffgemischen 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecke nach Abtrennung des Anteils > 22 mm am Baustoffgemisch 0/22 nach 4 h Wasserlagerung zu bestimmen. Da aber wie erläutert eine schädigende AKR durch Löseprozesse und Rissbildung in der Gesteinskörnung die Steifigkeit herabsetzt, sollte der CBR-Versuch auch an RC-AKR-Material durchgeführt werden, wenn er in einer Frostschutzschicht verbaut wird. Bei allen untersuchten Proben wurde im Anlieferungszustand (nach Aufbereitung) als auch nach 24 h Wasserlagerung der Grenzwert von über 80 % stets erreicht, sodass aufgrund der Tragfähigkeit ein Einsatz des Materials als Tragschicht ohne Bindemittel möglich ist. Vergleichend ist anzuführen, dass mit Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinsvorkommen höhere CBR-Werte als mit RC-AKR-Material erreicht wurden. Abschließend lässt sich auch für den CBR-Versuch schlussfolgern, dass sich durch eine energiereiche Aufbereitung trotz AKR-bedingter Steifigkeitsverluste im Gesteinskorn hohe Tragfähigkeitskennwerte erreichen lassen.

Für eine Beurteilung von RC-AKR-Material sind daher beide Versuche entscheidend und sind daher stets für den Anwendungsfall ToB (Frostschutzschichten und Schottertragschichten) anzuwenden.

3.2 Laborversuche mit RC-AKR-Material für HGT

Grundsätzlich besitzt das RC-AKR-Material bezüglich seiner Körnungsspezifischen Eigenschaften das Potenzial für eine Verwendung in einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT). Eine entsprechende Klassierung zum Erreichen beziehungsweise Einstellen der nach Norm geforderten Kennwerte ist ohne Weiteres möglich (Hünger & Börner 2015).

Wie bereits in den Untersuchungen von Hünger & BÖRNER (2015) festgestellt, werden Druckfestigkeiten an HGT mit RC-AKR-Material erreicht, welche das Recyclingmaterial für den Anwendungsfall HGT interessant erscheinen lassen. An den Festigkeiten ändert sich auch nichts bei Veränderung der Umgebungsbedingungen (erhöhte Temperaturen bis 40 °C, hohe Luftfeuchten bis 100 %). Es wird sogar ein weiterer Festigkeitszuwachs festgestellt, der sich aus den günstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen durch Nachhydratation ergibt. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für den Elastizitätsmodul festgestellt.

Anders als in den Untersuchungen von Hünger & Börner (2015) ergeben sich keine Einschränkungen aus dem Formänderungsverhalten der mit dem RC-AKR-Material hergestellten HGT-Proben. Das Dehnungsniveau einer nachträglich einsetzenden AKR bei Temperaturen bis 40 °C und Luftfeuchten bis 100 % ist bei den bisher mit RC-AKR-Material unter Verwendung eines für den Straßenbau zugelassenen Portlandzements ($Na_2O_{aq} \leq 0,76$ M.-%) hergestellten hydraulisch gebundenen Tragschichten als eher gering einzustufen.

Bei Grundsatzuntersuchungen zur Wiederverwendung von RC-Material ist es nach Leykauf (1987) erforderlich, die in der Straßenkonstruktion maßgebende Festigkeitseigenschaft zu bestimmen, das heißt die Biegezugfestigkeit. Da Verkehrslasten als wiederholte Belastung auftreten, ist es daher notwendig, die Dauer-Biegezugfestigkeit (mehr als 2 Mio. Lastwechsel werden ohne Bruch ertragen) zu bestimmen.

Als Prüfkörper zur Bestimmung der Dauer-Biegezugfestigkeit eignen sich Biegebalken mit den Abmessungen 15 x 15 x 70 cm³. An diesen Biegebalken wurden im Alter von 60 Tagen und Lagerung in der 40 °C-Nebelkammer (zur Ausschließung unterschiedlicher Nacherhärtung) Dauerschwingversuche durchgeführt. Die Belastung erfolgte durch zwei gleich große Linienlasten in den Drittelpunkten bei einer Stützweite von 600 mm. Die Biegebalken wurden durch Folienumhüllung während der Versuchsdurchführung gegen Austrocknung geschützt. Die Unterspannung wurde zu $\sigma_u = 0,10$ N/mm² und die Prüffrequenz zu 3,33 Hz gewählt. Als Oberspannung σ_o wurden jeweils 50 % der statischen Biegezugfestigkeit ($f_{Bz, vor}$) im Alter von 60 Tagen festgelegt. Mit gleichen Randbedingungen wurden zusätzlich Dauerschwingversuche an Biegebalken durchgeführt, die über einen Zeitraum von 270 Tagen in der 40 °C-Nebelkammer lagerten.

Die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche zeigten, dass ein Großteil der untersuchten Varianten zwei Millionen

Lastwechsel nicht ohne Bruch ertragen. Eine mögliche Ursache ist, dass die Haftung des RC-AKR-Materials (bei neuen Bruchflächen) zum Zementsteingerüst durch eine nachträglich einsetzende AKR herabgesetzt wird. Gestützt wird diese Hypothese dadurch, dass an den Biegebalken 15 x 15 x 70 cm³ gelartige Produkte gefunden wurden. Aufgrund der dann vorliegenden mehr punkweisen Bindung werden örtlich Spannungskonzentrationen bewirkt, die dann bei einer Biegebeanspruchung zum Versagen des Gesamtquerschnitts führen.

Eine Rolle spielt dabei sicher auch, ob eine Betonfahrbahndecke über die gesamte Deckendicke alkaliempfindliche Gesteinskörnung enthält oder ob diese nur im Oberbeton oder Unterbeton anzutreffen ist. In Fällen, bei denen alkaliempfindliche Gesteinskörnung über die gesamte Deckendicke anzutreffen ist, ist eher mit einer verminderten Haftung des RC-AKR-Materials zum Zementstein zu rechnen. Beim Fall mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung nur im Oberbeton (rd. 1/3 der Deckendicke), ist mit besserer Haftung zu rechnen. Der Fall, bei dem sich alkaliempfindliche Gesteinskörnung nur im Unterbeton befindet (rd. 2/3 der Deckendicke), wurde bisher nicht untersucht.

3.3 Neubaumaßnahmen mit RC-AKR-Material

Die visuellen Beobachtungen an der Oberfläche eingebauter Tragschichten ohne Bindemittel lassen vermuten, dass sich Entmischungen des RC-Materials nicht dauerhaft verhindern lassen. Entmischungen wurden aber auch bei Neubaumaßnahmen festgestellt, bei denen Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkommen verwendet wurden. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem statischen und dynamischen Plattendruckgerät auf OK Schottertragschicht sowie Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf OK-Schottertragschicht und auf OK-Neubeton weisen darauf hin, dass sich auch unter Verwendung von RC-AKR-Material sehr gleichmäßige Tragfähigkeiten in Tragschichten ohne Bindemittel erzielen lassen.

Der in den ZTV SoB-StB 04/07 geforderte $E_{v,2}$ -Wert von 150 MN/m² kann unter Erfüllung der Anforderungen an die Sieblinie bei Neubaumaßnahmen mit den üblichen Verdichtungsgeräten erreicht werden. Ebenfalls kann die Grenze für den Verhältnisswert $E_{v,2}/E_{v,1} \leq 2,2$ beziehungsweise für $E_{v,1} \geq 0,6 \% \times E_{v,2, \text{Soll}}$ (wenn $E_{v,2}/E_{v,1} \geq 2,2$) eingehalten werden. Es können aber Probleme mit der Erfüllung dieser Anforderungen auftreten, wenn die Schichten unter der ToB keine ausreichenden Tragfähigkeitswerte aufweisen oder wenn die Tragschicht selbst nicht ausreichend verdichtet ist. Die Probleme dafür treten aber unabhängig davon auf, ob Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkommen, Recyclingmaterial aus Betonaufbruch oder aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken stammen.

Die vor dem Betoneinbau durch den Baustellenverkehr nicht ganz zu vermeidenden Verdrückungen sollten egalisiert oder angewalzt werden. Aber auch Verdrückungen treten unabhän-

gig davon auf, ob Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkommen, Recyclingmaterial aus Betonaufbruch oder aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken stammen. Vor dem Betoneinbau ist Sorge zu tragen, dass die ToB nicht trocken ist. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der eingebauten Betondecke im unteren Bereich das Wasser entzogen wird.

3.4 Bewertung von Bestandsstrecken

In den neuen Bundesländern wurde 1995/96 erstmalig auf einem Autobahnabschnitt der BAB A 24, km 136+655 bis km 172+220, linke Richtungsfahrbahn, eine Tragschicht ohne Bindemittel mit Recyclingmaterial aus einem AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbeton gebaut. Die 2017 durchgeführten FWD-Messungen auf diesem Streckenabschnitt haben gezeigt, dass die bereits gute Tragfähigkeit der ToB im Einbauzustand mit jahrzehntelanger Liegedauer zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führt. Dies lässt sich mit dem Nacherhärtungspotenzial des RC-Materials begründen. Vergleichende Feldversuche haben gezeigt, dass RC-Material gegenüber Naturschotter leicht erhöhte Tragfähigkeiten aufweist. Zu beachten ist aber, dass RC-Material sich beim Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel negativ auf die Wasserdurchlässigkeit auswirken kann. Schadensbilder, die sich aus veränderten Auflagerungsbedingungen bei Nichtvorhandensein einer erosionsfesten und frostsicheren Auflage, Verdichtungsmängel oder auch aus unzureichender Entwässerung in der Unterlage ergeben, konnten weder an dem Autobahnabschnitt auf der A 24 mit Schottertragschichten aus RC-AKR-Material als auch bei anderen Autobahnabschnitten mit RC-Material festgestellt werden.

4 Zusammenfassung

Der Einsatz von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) im Straßenbau kann einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung natürlicher Gesteinsvorkommen liefern. Daher wird auch eine ganzheitliche Bewertung gefordert. Diese umfasst die Diagnose, den Aufbruch, die Aufbereitung sowie die Verwertung selbst.

Zusätzlich zu den Einwirkungen aus Temperatur und Feuchte, können AKR-bedingte Schadensprozesse das Längsdehnungsbestreben von Betonfahrbahnen nachteilig fördern. Dies ist dann der Fall, wenn der Schadensprozess über die gesamte Betondicke oder auch nur im Unterbeton stattfindet. Beim Schadensprozess aus dem Unterbeton sind nicht farbliche Veränderungen in Fugenbereichen kennzeichnend für eine beginnende AKR, sondern Längsrisse in Fahrbahnplatten sowie rautenförmige Rissbildungen an Fugenbereichen, die auf ein mögliches Einbrechen schließen lassen. Das Längsdehnungsbestreben führt zudem zu einem Gesamtspannungszustand in den Betonfahrbahnen, welcher durch geeignete Maßnahmen beim Aufbruch abzubauen ist. Für eine energiereiche und ziel-

gerichtete Aufbereitung ohne weitere Nachbearbeitung mit anforderungsgemäßen Eigenschaften an das Recyclingmaterial eignet sich ein Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage am besten.

Folgende Ergebnisse zur Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) konnten im Labor, im Bestand und an einer wissenschaftlich begleiteten Neubaumaßnahme abgeleitet werden:

- Kann eine nachträglich einsetzende AKR in einer ungebundenen Tragschicht ausgeschlossen werden, dann hat der Einsatz in einer ToB keinen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit.
- Neben den hohen Tragfähigkeiten, die sich beim Einbau von RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton ergeben, ist auch mit einer Zunahme der Tragfähigkeit während der Liegezeit zu rechnen.
- Werden nach dem Aufbruch und der Aufbereitung länderspezifische Anforderungen und Anforderungen, die sich aus technischen Regelwerken ergeben, an das Recyclingmaterial eingehalten, so ist eine Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen möglich.
- Zu berücksichtigen sind mögliche negative Auswirkungen auf die Wasserdurchlässigkeit beziehungsweise kapillarbrechende Wirkung von Tragschichten ohne Bindemittel.

Aus den Laborergebnissen zur Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) kann Folgendes abgeleitet werden:

- An einigen hergestellten Zylindern und Biegebalken wurden gelartige Reaktionsprodukte festgestellt.
- Eine Auswirkung auf Druckfestigkeiten und Elastizitätsmoduln bei der Lagerung mit Temperaturen von 40 °C und Luftfeuchten von 100 % konnte nicht festgestellt werden.
- Das Dehnungsniveau einer nachträglich einsetzenden AKR ist bei den bisher untersuchten hydraulisch zugelassenen Portlandzementen ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq.}} \leq 0,76 \text{ M.-%}$) als eher gering einzustufen.
- Wird aber die Haftung des RC-AKR-Materials zum Zementsteingerüst durch eine einsetzende AKR nachträglich gestört, können aufgrund der dann vorliegenden mehr punktwisen Bindungen örtlich Spannungskonzentrationen ein Versagen des Gesamtquerschnitts bei Biegebeanspruchung bewirken.
- Das Versagen im Dauerschwingversuch wurde an Proben mit RC-AKR-Material festgestellt, bei dem sowohl der Ober- als auch der Unterbeton alkaliempfindlich eingestuft wurden.

Aus den bisherigen Ergebnissen kann eine Verwendung von RC-AKR-Material für hydraulisch gebundene Tragschichten nicht empfohlen werden.

5 Ausblick

Alle bisher untersuchten Kennwerte sind Stichprobenwerte, die sich infolge schwankender, AKR-bedingter Schadensprozesse in der Betonfahrbahndecke und produktionsbedingter Schwankungen ändern können. Bei der Umsetzung der Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in Tragschichten ohne Bindemittel sollte trotz der aufgezeigten Möglichkeiten behutsam vorgegangen werden. Die Erfahrungen, die sich bei der Diagnose, dem Aufbruch, der Aufbereitung und der Verwertung ergeben, sollten für alle zukünftigen Baumaßnahmen dokumentiert und für Bauherren und Auftragnehmer zugänglich gesammelt werden. Die sich daraus ergebende Datenbasis ermöglicht die Ausnutzung aller technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten, ohne die Bauweise durch Fehlschläge zu gefährden. Aus der somit gewonnenen Datenbasis ließe sich dann auch eine prozesssichere Herstellung von Tragschichten mit Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken, welche noch zu den offenen Fragestellungen gehört, realisieren.

6 Literatur

- HÜNGER, K.-J.; BÖRNER, C. (2015): Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 88, Bergisch Gladbach
- LEYKAUF, G. (1987): Hydraulisch gebundene Tragschichten aus alternativen Mineralstoffgemischen. Straßen- und Tiefbau 41 (1987), Nr. 1, S. 10-14
- MIELICH, O.; REINHARDT, H.W.; ÖZKAN, H. (2019): Kriechen und mechanische Eigenschaften von Straßenbetonen nach AKR-provozierender Lagerung, Beton- und Stahlbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau, DOI:10.1002/best.201800103