

Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten

FA 7.194

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. R. Leutner)

Bearbeiter: Renken, P. / Lobach, T.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

Abschluss: Februar 2004

1. Aufgabenstellung

Die Verwertung von Asphaltgranulat in den unteren Schichten des gebundenen Straßenoberbaus ist heute Stand der Technik und in den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 01) sowie in dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat (M VAG) ausführlich beschrieben.

Die Verwertung von Asphaltgranulat in Asphaltbetonmischgut wird jedoch aufgrund des nicht abgesicherten Kenntnisstandes über den Einfluss auf die Asphalteeigenschaften des resultierenden Mischgutes zurückhaltend gehandhabt. Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurden bei vergleichbarer Zusammensetzung der resultierenden Asphalte unterschiedliche mechanische Eigenschaften festgestellt [4, 5].

Die Untersuchung des zurück gewonnenen Bindemittels alleine ist nicht geeignet, um ausreichende Aussagen über das Verhalten der Asphaltdeckschicht zu treffen, da erst durch die Extraktion Asphaltgranulatstücke im Mischgut vollständig aufgeschlossen werden – diese aber im Mischgut als Einzelstücke vorliegen. In diesem Zusammenhang wird auch von der "Doppelumhüllung" des Granulatstückes gesprochen, bei der das nicht ausreichend aufgeschlossene Granulatstück von dem "neuen" frisch zugegebenen Bindemittel umhüllt wird. Trotz dann identischer Werte bei der Mischgutanalyse ist mit unterschiedlichen Asphalteeigenschaften zu rechnen.

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, die Auswirkungen eines unterschiedlich starken Aufschlusses der Granulatstücke und somit die Intensität des Einflusses des "alten" gebrauchten Bindemittels auf die mechanischen Eigenschaften eines resultierenden Asphaltbetonmischgutes zu prüfen.

2. Untersuchungsmethodik

2.1 Art und Umfang der Untersuchungsvariation

Gegenstand der Untersuchungen zum Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten ist ein Asphaltbeton 0/11 S, hergestellt mit zwei unterschiedlichen Asphaltgranulatqualitäten unter Variation der Herstellmodalitäten. Ausgehend von drei Null-Varianten ohne Asphaltgranulatzugabe bei unterschiedlichen Nachmischzeiten (30 / 90 / 180 Sekunden) wurden folgende Variationen vorgenommen:

- Asphaltgranulatqualität (weiches Bindemittel / hartes Bindemittel),
- Zugabemenge des Asphaltgranulates (20 % und 40 %),
- Zugabetemperatur des Asphaltgranulates (20 °C, Simulation der Kaltzugabe / 120 °C, Simulation der Warmzugabe),
- Wassergehalt des Granulates (natürlich getrocknet / auf 3 M.-% geimpft),
- Nachmischzeit (30 / 90 / 180 Sekunden).

Die zur Anwendung gekommenen Asphaltgranulate wurden gezielt aus Deckschichten gefräst und können als Asphaltbeton 0/11 bezeichnet werden. Das "weiche" Granulat hat einen Erweichungspunkt Ring und Kugel des zurück gewonnenen Bindemittels von 56 °C und das "harte" Granulat einen solchen von 69 °C.

2.2 Herstellung des Asphaltbetons

Die Rezeptur des herzustellenden Asphaltbetons 0/11 S wurde mittels Eignungsprüfung unter Verwendung von Bitumen 50/70 ohne Granulatzugabe optimiert und bei den Varianten mit Granulatzugabe dahingehend verändert, dass eine mit der Eignungsprüfung identische Korngrößenverteilung sowie ein vergleichbarer Erweichungspunkt Ring und Kugel des extrahierten Bindemittels erhalten werden konnte. Hierzu wurden die frischen Mineralstoffe sowie das frische Bindemittel mit unterschiedlichen Sorten – ggf. entsprechend abgemischt – dosiert zugegeben.

Nach einer Homogenisierung durch mehrfaches Umsetzen wurden beide Granulate auf Homogenität sowie hinsichtlich der Stückgrößenverteilung überprüft. Danach konnten die Homogenität bestätigt und beide Granulate der Kategorie DR_{A45} gemäß TL AG-StB 01 zugeordnet werden.

Zur Herstellung der Asphaltvarianten mit dem auf 3 M.-% Wassergehalt geimpften Granulat wurden Vorversuche durchgeführt, um den festgelegten Wassergehalt zielgenau zu erreichen. Danach wurde in einen Bleicheimer die erforderliche Wassermenge zugegeben und das Granulat durchmischt. Bei der Kaltzugabe blieb der Wassergehalt im geschlossenen Bleicheimer praktisch vollständig erhalten, bei der Temperierung für die Warmzugabe war eine Abnahme um rund 0,5 M.-% festzustellen.

Die Herstellung der Asphaltvarianten erfolgte mit einem Doppelwellen-Zwangsmischer im halbtechnischen Maßstab im Labor, um die Mischkinematik bei der Einmischung des Granulates möglichst praxisgerecht zu simulieren. Die frischen Mineralstoffe – mit Ausnahme des Füllers – wurden vorab auf 190 °C, das Asphaltgranulat auf 20 °C (Kaltzugabe) bzw. 120 °C (Warmzugabe) temperiert. Danach wurde das Mischgut wie folgt hergestellt:

- Einfüllen der frischen Mineralstoffe in den Mischer,
- Zugabe des kalten Füllers,
- kurzes Vermischen (20 Sekunden),
- Zugabe des Asphaltgranulates,
- kurzes Vermischen (20 Sekunden bei der Kaltzugabe, 10 Sekunden bei der Warmzugabe),
- Zugabe des frischen Bindemittels,
- Start der Nachmischzeit (30 / 90 / 180 Sekunden).

Aus dem hergestellten Asphaltmischgut wurden Marshall-Probekörper sowie walzsektorverdichtete Asphaltprobekörper gemäß TP A-StB Teil: Verfahren zur Herstellung von Asphaltprobekörpern im Laboratorium hergestellt.

2.3 Prüfungen zur Ansprache der mechanischen Eigenschaften

An den hergestellten Asphaltprobekörpern wurden Versuche zur Ansprache des Verdichtungs-, Verformungs-, Kälte- sowie Ermüdungsverhaltens durchgeführt. Konkret waren dies:

- Bestimmung des Verdichtungswiderstandes D,

- Spurbildungsversuche,
- Druck-Schwellversuche,
- Einaxiale Zug- und Abkühlversuche,
- Einaxiale Zug-Schwellversuche.

Zur Bestimmung des Verdichtungswiderstandes D wurden während der Herstellung der Marshall-Probekörper die Probekörperdicken messtechnisch aufgenommen und der Verdichtungswiderstand D [21 Nm] berechnet.

Die Spurbildungsversuche wurden in Anlehnung an die TP A-StB, Teil: Spurbildungsversuch – Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad durchgeführt. Zur Optimierung der Prüfbedingungen wurden sowohl Vorversuche durchgeführt, als auch Ergebnisse neuester Forschungsprojekte sowie Festlegungen der prEN 12697-22 berücksichtigt. Danach wurden die Prüfbedingungen Gummirad im Temperiermedium Luftbad bei $T = 50\text{ °C}$ festgelegt.

Die Druck-Schwellversuche wurden gemäß der TP A-StB, Teil: Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme durchgeführt. Die beidseitig planparallel geschliffenen Marshall-Probekörper wurden mittels sinusförmigem Lastimpuls von 0,2 Sekunden Dauer mit $0,2\text{ N/mm}^2$ sowie einer anschließenden Lastpause von 1,5 Sekunden mit $0,025\text{ N/mm}^2$ belastet. Als Ergebnis wurde aus der erhaltenen Impulskriechkurve zusätzlich zur Lastimpulszahl im Wendepunkt n_w und der Dehnung im Wendepunkt ε_w als maßgebender Parameter die Dehnungsrate im Wendepunkt $\dot{\varepsilon}_w$ betrachtet.

Zur Beurteilung der Kälteeigenschaften wurden einaxiale Zug- sowie Abkühlversuche durchgeführt. Dazu wurden prismatische Probekörper der Abmessung $40 \times 40 \times 160\text{ mm}^3$ aus den walzsektorverdichteten Asphaltprobekörpern herausgesägt.

Die einaxialen Zugversuche wurden bei konstanten Temperaturen von $+20\text{ °C}$, $+5\text{ °C}$, -10 °C und -25 °C durchgeführt.

Bei den Abkühlversuchen werden die prismatischen Probekörper mit einer Temperaturrate von $\dot{T} = -10\text{ K/h}$ bis zum Bruch abgekühlt und die kryogenen Spannungen gemessen.

Die Differenz zwischen dem Verlauf der Zugfestigkeit und der kryogenen Zugspannung wird als Zugfestigkeitsreserve bezeichnet und stellt die temperaturabhängige Spannungsreserve dar, die zur Aufnahme von verkehrslastbedingten Zugspannungen im Asphalt zur Verfügung steht. Als aussagefähiges Kriterium zur Beurteilung der Asphalteeigenschaft in Gegenwart von Kälte können das Maximum der Zugfestigkeitsreserve sowie die zugehörige Temperatur angesehen werden.

Zur Ansprache der Ermüdungseigenschaften wurden lastgeregelte Zug-Schwellversuche an prismatischen Probekörpern mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160\text{ mm}^3$ bei einer Temperatur von 0 °C durchgeführt. Als Prüfspannung wurde eine sinusförmige Zug-Schwellspannung aufgebracht, die zwischen der Unterspannung – der kryogenen Zugspannung bei $T = 0\text{ °C}$ – und der Oberspannung – kryogene Zugspannung zuzüglich verkehrslastbedingte Zugspannung – mit einer Frequenz von 10 Hz oszilliert. Als Ergebnis der lastgeregelten Zug-Schwellversuche wurde die Anzahl der Lastwechsel beim Bruch des Probekörpers angegeben.

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Rezepttreue der Asphaltvarianten

Zur Prüfung einer vergleichbaren Asphaltzusammensetzung der mit den unterschiedlichen Variationen hergestellten Asphaltvarianten wurden an jeder der 32 Varianten Kontrolluntersuchungen durchgeführt. Mittels statistischer Untersuchungen

wurden die 32 Einzelergebnisse eines Datenkollektivs mit dem Mittelwert der so genannten Nullmischungen verglichen. Danach konnte festgestellt werden, dass die Zusammensetzung der Asphaltbetonvarianten aus allen Herstellvariationen der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Damit war sichergestellt, dass für die Prüfungen Asphaltprobekörper mit immer gleicher Zusammensetzung des Mischgutes zur Verfügung standen.

3.2 Verdichtungseigenschaften

Bei der Erhöhung des Zugabeanteiles des "weichen" Asphaltgranulates wird bei der Warmzugabe das Mischgut leichter verdichtbar – nicht aber bei der Kaltzugabe. Die Erhöhung der Nachmischzeit begünstigt in Kombination mit der Zugabetemperatur die Verdichtungswilligkeit. Bei der Kaltzugabe war dieser Einfluss stärker ausgeprägt, als bei der Warmzugabe. Die erhöhte Feuchtigkeit des Asphaltgranulates wirkt sich bei kurzen Nachmischzeiten ebenfalls günstig auf die Verdichtungseigenschaften aus.

Nachfolgend sind in den Bildern 1.1 und 1.2 die Verdichtungswiderstände D [21 Nm] in Abhängigkeit der Herstellungsvariationen zusammenfassend dargestellt.

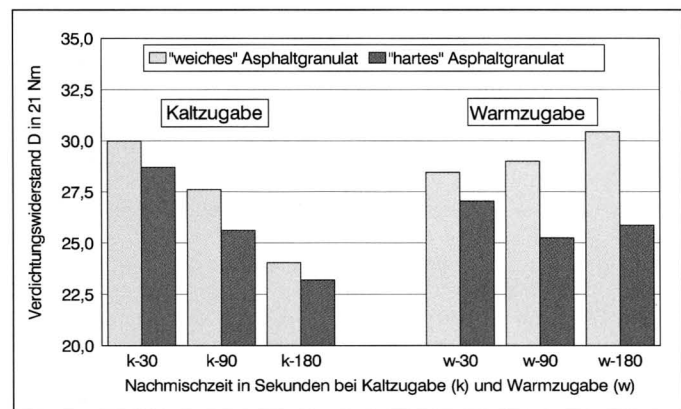


Bild 1.1: Einfluss der Nachmischzeit auf den Verdichtungswiderstand D

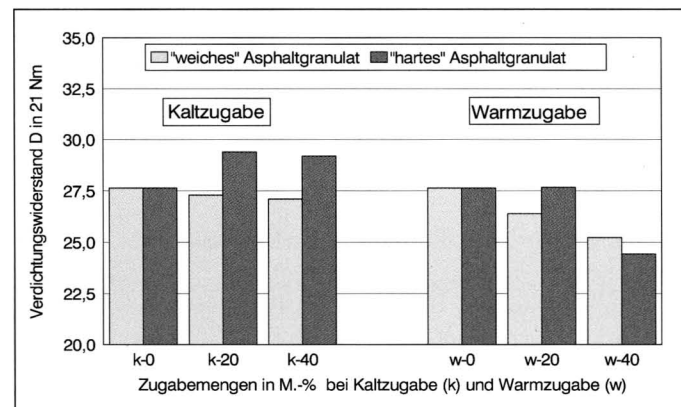


Bild 1.2: Einfluss der Zugabemengen auf den Verdichtungswiderstand D

3.3 Verformungseigenschaften

3.3.1 Spurbildungsversuch

Zunächst konnte festgestellt werden, dass weder der Feuchtigkeitsgrad noch die Nachmischzeit einen statistisch nachweisbaren Einfluss auf das Ergebnis der Spurbildungsversuche ausüben. Durch die Warmzugabe wird der Verformungswiderstand geringfügig günstiger. In Verbindung mit der Kaltzugabe

wird das Asphaltmischgut mit dem "weichen" Asphaltgranulat tendenziell verformungsempfindlicher.

Den Haupteinfluss auf die Ergebnisse des Spurbildungsversuches besitzt die Zugabemenge. Je größer die Zugabemenge – unabhängig ob Kalt- oder Warmzugabe, ob "weiches" oder "hartes" Asphaltgranulat – umso verformungsempfindlicher wird das Mischgut. Dieser Haupteinfluss ist in Bild 2.2 veranschaulicht.

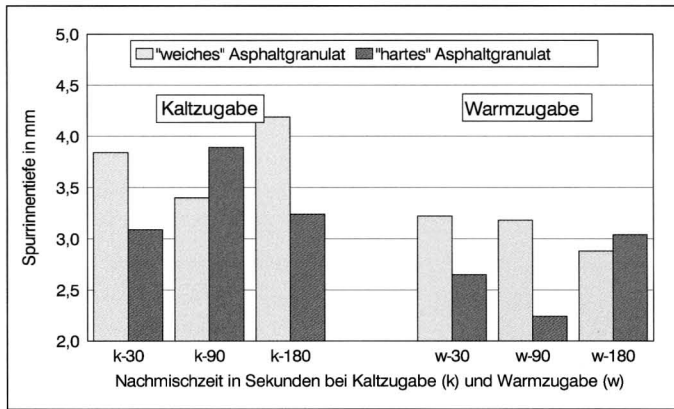


Bild 2.1: Einfluss der Nachmischzeit auf die Spurrinnentiefe

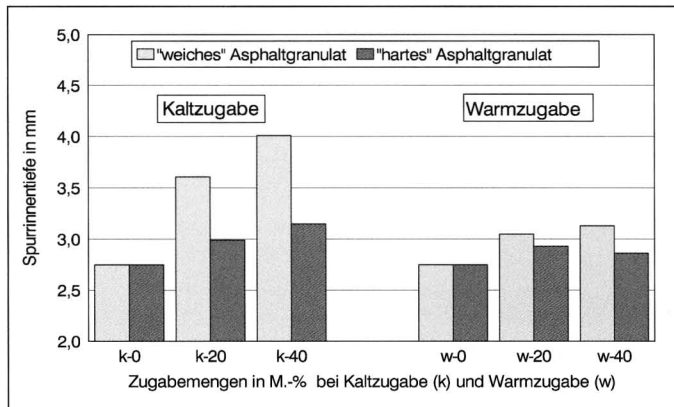


Bild 2.2: Einfluss der Zugabemenge auf die Spurrinnentiefe

3.3.2 Druck-Schwellversuch

Für die Auswertung von Druck-Schwellversuchen wird als dominante Prüfgröße die Dehnungsrate ϵ_w^* am Wendepunkt der Verformungskurve angesehen. Anhand dieser Prüfgröße wurden die Einflüsse der Herstellvariationen auf die Verformungseigenschaften bewertet.

Generell wurde festgestellt, dass die Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat die Verformungseigenschaften begünstigt. Eine Erhöhung der Zugabemenge bewirkt bei "hartem" und bei "weichem" Asphaltgranulat gegenläufige Effekte: Während bei "hartem" Granulat das Verformungsverhalten verbessert wird, wirkt sich bei "weichem" Granulat die Erhöhung der Zugabemenge ungünstig aus (Bild 3.2). Die Verlängerung der Nachmischzeit hatte bei der Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat keinen messbaren Einfluss, während bei der Verwendung von "weichem" Granulat ein günstiger Einfluss auf das Verformungsverhalten festgestellt wurde. In Bild 3.1 ist der Einfluss der Nachmischzeit auf die Prüfgröße Dehnungsrate im Wendepunkt dargestellt. Ein Einfluss der Feuchtigkeit des Granulates wurde nicht festgestellt.

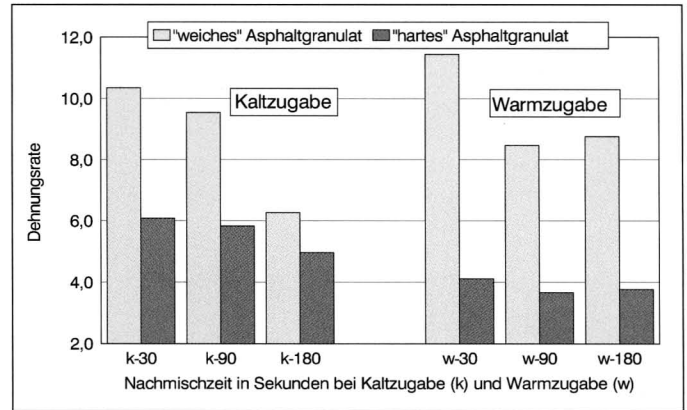


Bild 3.1: Einfluss der Nachmischzeit auf die Dehnungsrate am Wendepunkt ϵ_w^*

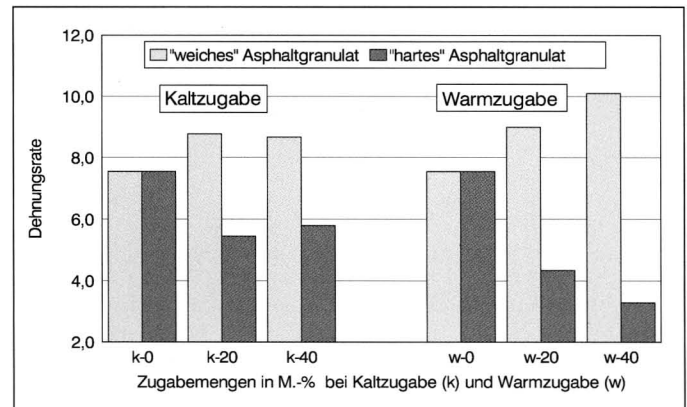


Bild 3.2: Einfluss der Zugabemenge auf die Dehnungsrate am Wendepunkt ϵ_w^*

3.4 Kälteeigenschaften

Für die Interpretation der einaxialen Zug- und Abkühlversuche wurden die Merkmalsgrößen Zugfestigkeit bei -10 °C , Bruchspannung aus dem Abkühlversuch, maximale Zugfestigkeitsreserve sowie Temperatur der maximalen Zugfestigkeitsreserve ausgewertet. Grundsätzlich können günstige Kälteeigenschaften einem Asphalt zugesprochen werden, wenn

- im niedrigen Temperaturbereich höhere Zugfestigkeiten,
- bei niedriger Temperatur geringere kryogene Zugspannungen,
- eine hohe Zugfestigkeitsreserve und
- die maximale Zugfestigkeitsreserve im niedrigen Temperaturbereich festgestellt werden.

Als aussagefähige Merkmalsgröße zur Beurteilung der Kälteeigenschaften wird die maximale Zugfestigkeitsreserve betrachtet. Danach können sowohl die Asphaltgranulatqualität als auch die Nachmischzeit als dominante Einflussgrößen festgestellt werden. Die Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat sowie langen Nachmischzeiten wirkt sich günstig auf die Kälteeigenschaften aus (Bild 4.1). Die Zugabemenge sowie die Zugabetemperatur wirken sich lediglich in Verbindung mit der Nachmischzeit dahingehend aus, dass bei langer Nachmischzeit keine ungünstigen Einflüsse auf das Kälteverhalten festgestellt wurden.

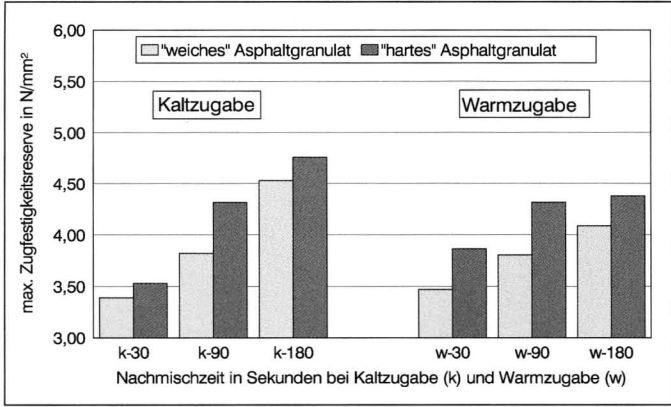


Bild 4.1: Einfluss der Nachmischzeit auf die maximale Zugfestigkeitsreserve

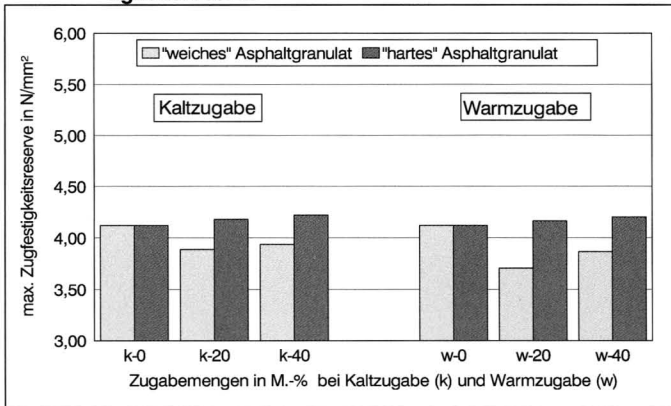


Bild 4.2: Einfluss der Zugabemenge auf die maximale Zugfestigkeitsreserve

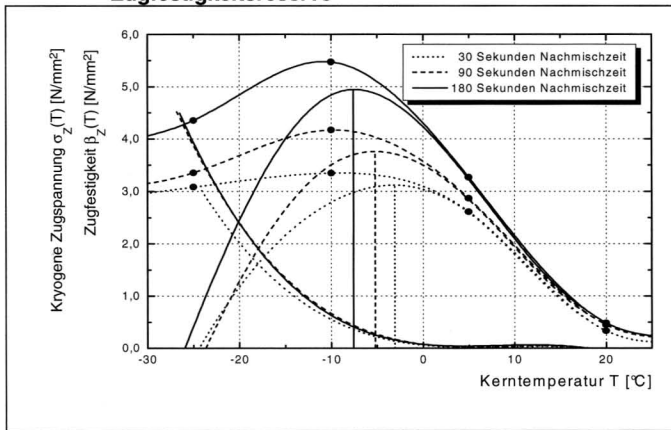


Bild 5.1: Ergebnisse der Kälteversuche, Asphaltgranulatqualität "weich" 40 % Zugabemenge, trocken, Kaltzugabe

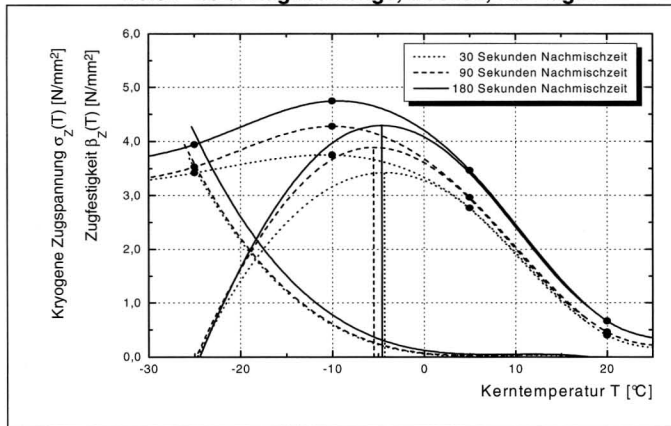


Bild 5.2: Ergebnisse der Kälteversuche, Asphaltgranulatqualität "weich", 40 % Zugabemenge, trocken, Warmzugabe

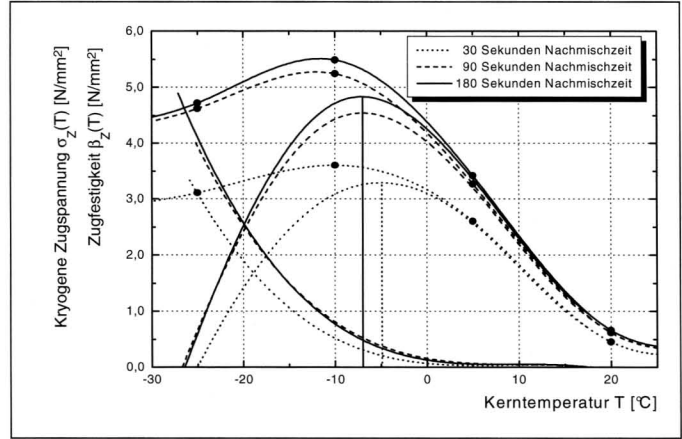


Bild 5.3: Ergebnisse der Kälteversuche, Asphaltgranulatqualität "hart", 40 % Zugabemenge, trocken, Kaltzugabe

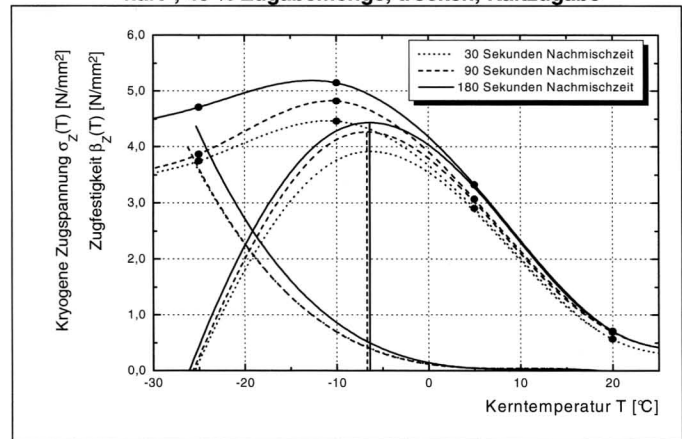


Bild 5.4: Ergebnisse der Kälteversuche, Asphaltgranulatqualität "hart", 40 % Zugabemenge, trocken, Warmzugabe

3.5 Ermüdungseigenschaften

Die Ermüdungseigenschaften wurden mittels lastgeregeltem ein-axialem Zug-Schwellversuch geprüft. Als Ermüdungskriterium wurde die Lastwechselzahl am Bruch des Probekörpers betrachtet.

Insbesondere die Nachmischzeit übt einen deutlichen Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit der hergestellten Asphaltbetonvarianten aus (Bild 6.1). Die Erhöhung der Nachmischzeit führt zu einem günstigeren Ermüdungsverhalten. Die "Härte" des Asphaltgranulates hatte ebenfalls einen deutlichen Einfluss: Die Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat führte zu einem ermüdungsresistenteren Asphalt. Die Zugabetemperatur (kalt/warm) hatte lediglich in Kombination mit "hartem" Asphaltgranulat einen günstigen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. Ein Einfluss des Feuchtigkeitsgrades war nicht festzustellen.

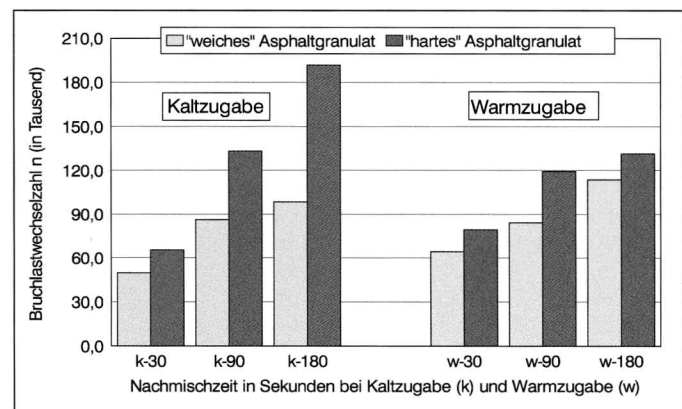


Bild 6.1: Einfluss der Nachmischzeit auf die Bruchlastwechselzahl

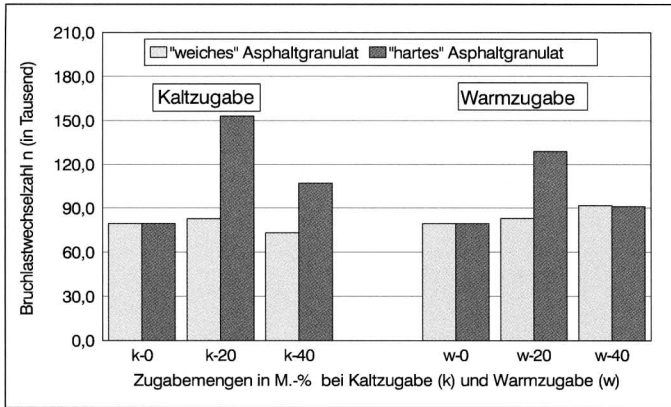


Bild 6.2: Einfluss der Zugabemenge auf die Bruchlastwechselzahl

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Verwertung von Asphaltgranulat in Asphaltdeckschichten wurde bisher zurückhaltend gehandhabt, da nur ein nicht abgesicherter Kenntnisstand über mögliche Einflüsse auf die resultierenden Asphalteigenschaften bekannt war. Um diese Einflüsse umfassend zu beleuchten, wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit Asphaltbetone 0/11 S mit unterschiedlichen Zugabemengen von gezielt aus Deckschichten gefrästet Asphaltgranulaten praxisadäquat labortechnisch hergestellt und die mechanischen Eigenschaften der Asphalte untersucht.

Es wurden zwei Asphaltgranulate mit unterschiedlichen Erweichungspunkten Ring und Kugel des zurück gewonnenen Bindemittels (56 °C "weich"; 69 °C "hart") unter Variation der Zugabemenge (20 % / 40 %), der Nachmischzeit (30 / 90 / 180 Sekunden), der Zugabeart (20 °C kalt / 120 °C warm) sowie der Feuchtigkeit ("natürlich" getrocknet / auf 3 M.-% geimpft) verwendet. An dem hergestellten Asphaltbeton 0/11 S wurden die Mischgutzusammensetzung festgestellt sowie die Verdichtungseigenschaften, die Verformungseigenschaften mittels Spurbildungsversuchen und Druck-Schwellversuchen, die Kälteeigenschaften mittels einaxialen Zug- und Abkühlversuchen und die Ermüdungseigenschaften mittels Zug-Schwellversuchen überprüft.

Anhand der Kennwerte der Mischgutanalysen konnte festgestellt werden, dass für alle hergestellten Asphaltbetonvarianten nahezu gleiche Zusammensetzungen erzielt wurden. Es ist damit nicht möglich, auf Grund der Kennwerte von Mischgutanalysen auf die Gebrauchseigenschaften des unter Verwendung von Asphaltgranulat hergestellten Asphaltdeckschichtmischgutes zu schließen – hierfür sind weitergehende, performance-orientierte Prüfverfahren notwendig.

Im Verlaufe der referierten Untersuchungen hat sich der Spurbildungsversuch – mit der gewählten Versuchsbedingung (Gummirad / Luftbad / 50 °C) – als ungeeignet erwiesen, den Einfluss der Herstellungsvariationen auf das Verformungsverhalten des Asphaltbetons differenziert anzusprechen, sodass Druck-Schwellversuche oder dynamische Stempel Eindringversuche zur Ansprache des Verformungsverhaltens zu empfehlen sind.

Die Versuchsergebnisse wurden mittels Varianzanalysen der 4-fachen Klassifikation ausgewertet, um mögliche Einflussgrößen aus den Herstellungsmodalitäten und deren Wechselwirkungen quantifizieren zu können.

In den Bildern 7.1 und 7.2 sind die Ergebnisse der Varianzanalysen als prozentuale Varianzanteile an der Gesamtvariabilität histogrammisch dargestellt.

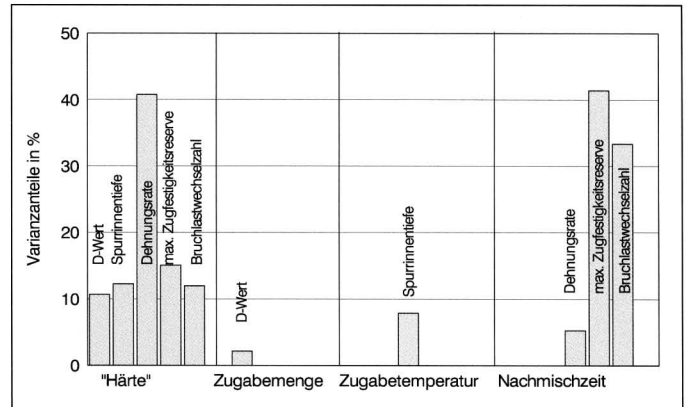


Bild 7.1: Varianzanteile in Prozent an der Gesamtvariabilität unterschiedlicher Prüfmerkmale für Asphaltbetonvarianten auf Grund unterschiedlicher Herstellungsmodalitäten

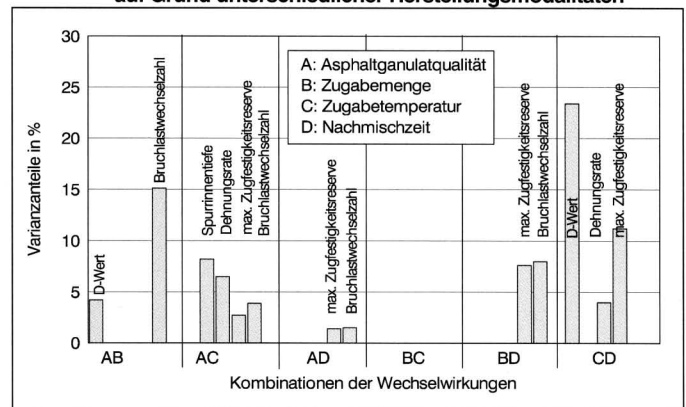


Bild 7.2: Varianzanteile in Prozent an der Gesamtvariabilität für einfache Wechselbeziehungen zweier Herstellungsmodalitäten

Anhand der durchgeführten performance-orientierten Prüfungen wurde festgestellt, dass

- der Wassergehalt praktisch keinen Einfluss auf die Asphalteigenschaften ausübt,
- die Zugabemenge insgesamt einen eher geringen Einfluss ausübt,
- lange Nachmischzeiten sich besonders günstig für die Kälte-, Ermüdungs- sowie Verformungseigenschaften auswirken und bei der Kaltzugabe die Verdichtungseigenschaften deutlich verbessern,
- eine Warmzugabe die Verformungseigenschaften verbessert, insbesondere bei der Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat,
- die Verwendung von "hartem" Asphaltgranulat die Verformungs-, Kälte- und Ermüdungseigenschaften begünstigt.

Da sowohl der Wassergehalt als auch die Zugabemenge einen vergleichsweise geringen Einfluss ausüben, kann eine Zugabemenge bis zu 40 % Asphaltgranulat uneingeschränkt empfohlen werden, sofern die anlagentechnischen Voraussetzungen gewährleistet sind. Eine vorherige vollständige Trocknung des Asphaltgranulates ist nicht notwendig. Allerdings müssen bei der Zugabe von Asphaltgranulat in Asphaltbetondeckschichten lange Nachmischzeiten favorisiert werden. Die Kalt- sowie die Warmzugabe führen auf die gleiche Asphaltqualität, sofern eine ausreichend lange Nachmischzeit realisiert wird.

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse schaffen die Grundlage dafür, dass aus Asphaltdeckschichten gefrästes Asphaltgranulat in größeren Mengen und auf hohem Niveau der Wertschöpfung in Asphaltbetondeckschichten wiederverwertet werden kann.

Streng genommen können die Forschungsergebnisse nicht ohne weiteres auf die Verwendung von Asphaltgranulat mit polymermodifiziertem Bitumen und auf die Herstellung von Splittmastixasphalten und offenporigen Asphalten übertragen werden. Dazu sind weitere Forschungsaktivitäten erforderlich. Des Weiteren wird empfohlen, Untersuchungen zur Festlegung der optimalen Nachmischzeit bei der Herstellung von Asphaltbeton mit Asphaltgranulat im großtechnischen Maßstab an verschiedenen Mischanlagentypen durchzuführen.

Literaturverzeichnis

- [1] FGSV: Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 01). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2001
- [2] FGSV: Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat (MVAG). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2000
- [3] National Center for Asphalt Technology, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration: Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Auburn University, AL, Washington D, 1998
- [4] Arand, W., Renken, P.: Verwendung größtmöglicher Ausbauasphaltanteile im Straßenbau. Schlussbericht zum Forschungsauftrag Nr. 1480669 des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Braunschweig 1994
- [5] Leutner, R.; Dröge, Ch.: Ermittlung von Einsatzgrenzen für die Zugabe von Ausbaupasphalt in Asphaltdecken anhand von Erprobungsstrecken. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 1481045 des Umweltbundesamtes, Braunschweig 2000
- [6] Schellenberger, W.; Vetter, U.: Asphalt mit Zusatz von Asphaltgranulat – kalt und heiß – Einfluss auf die Eigenschaften. Bitumen 65 (2003) 2, S. 69–78 