

# OPTIMIERUNG DES RECYCLINGANTEILS IN ASPHALTTRAG- UND -BINDERSCHICHTEN

## ORAB (Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten)

Im europäischen Vergleich ist der österreichische Stand der Technik beim Kaltrecycling von Asphalt gut entwickelt. Beim Heißrecycling von Asphalt werden durchschnittliche Quoten erreicht, bedingt durch vergleichsweise hohe Anteile an gerundeten Gesteinsoberflächen im ausgebauten Altasphalt und durch strenge Anforderungen im Regelwerk an die Qualität von Asphaltmischgut für hochbelastete Straßen. Die notwendige Forschung und Entwicklung (F&E) zur Hebung der Quote beim österreichischen Asphaltrecycling und zur Schaffung entsprechender Grundlagen für die Adaptierung des Regelwerks lieferte das F&E-Projekt ORAB mit folgenden Erkenntnissen.

**Facts:**  
 Laufzeit: 08/2013-09/2015

**Forschungskonsortium:**  
 Institut für Straßenwesen,  
 Univ.-Prof. Dr. M. Wistuba,  
 Technische Universität Braunschweig  
 &  
 KAB GmbH & Co KG

Eine ausreichende Asphaltgranulatqualität kann durch lagenweises Fräsen unter baustellenüblichen Randbedingungen erreicht werden. Für die untersuchten Asphaltbinder- und Asphalttragschichten kann ein Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat realisiert werden, ohne signifikant schlechtere Gebrauchseigenschaften und dadurch eine kürzere rechnerische Lebensdauer im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante ohne Asphaltgranulat hinnehmen zu müssen. Gerundete Gesteinskörnungen im auszubauenden Asphalt wirken sich weder auf die innere Struktur des Recyclingasphalts, noch auf die untersuchten Gebrauchseigenschaften nachteilig aus. Die Zugabe von frischem Bindemittel ist maßgebend für die resultierenden Gebrauchseigenschaften und steuert Verformungs- und Ermüdungsbeständigkeit.



ABB 1. Variationsfaktoren bei der Gewinnung von Altasphalt

## Kurzzusammenfassung

### Ziel

Die technische Realisierung höherer Wiederverwendungsraten von in Österreich anfallenden Altasphalten ist Forschungsinhalt und Entwicklungsziel des Projektes ORAB.

### Gewählte Methodik

Die praxisgerechten Gebrauchseigenschaften und die rechnerische Lebensdauer von Asphaltbinder- und Asphalttragschicht-Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat unterschiedlicher Qualität werden mittels prüftechnischer und analytischer Methoden bestimmt und den Eigenschaften von Asphalten ohne Asphaltgranulat gegenübergestellt.

### Ergebnisse

Für die untersuchten Asphaltbinder- und Asphalttragschichten kann ein maximaler Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat realisiert werden, ohne signifikant schlechtere Gebrauchseigenschaften und dadurch eine kürzere rechnerische Lebensdauer im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante ohne Asphaltgranulat hinnehmen zu müssen.

### Schlussfolgerungen

Unter Beachtung der Forschungserkenntnisse ist in Österreich eine Steigerung der Recyclingquote im Heißrecycling von Asphalt möglich.

### English Abstract

As far as hot recycling of asphalt road pavements is concerned, only average recycling rates of reclaimed asphalt are achieved in Austria, mainly due to strict requirements in the technical specifications and to long-term experience in proper cold recycling. Research and development needed to explore the possibility for increasing hot recycling quota and to adapt the technical specifications is provided by project "ORAB". From this, the following conclusions can be drawn. As concerns milling the asphalt, sufficient quality can be achieved by standard milling techniques but by milling each layer separately. For asphalt binder layers and asphalt base layers, an addition rate of 60 mass-% of reclaimed asphalt can be realized without having any negative effects on asphalt performance characteristics if compared to asphalt mixtures made without reclaimed asphalt. Rounded aggregates in the old asphalt pavement do not negatively influence the inner structure of reclaimed asphalt layers, nor the asphalt performance characteristics. The addition of fresh binder is critical in regard to the resulting performance characteristics and regulate deformation and fatigue resistance.

## Impressum:

### Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits,  
Abt. IV/ST 2 Technik und  
Verkehrssicherheit  
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,  
Abt. III/14 Mobilitäts- und  
Verkehrstechnologien  
andreas.blust@bmvit.gv.at,  
www.bmvit.gv.at

### ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;  
Leitung Forschung & Entwicklung  
wolfgang.zottl@oebb.at,  
www.oebb.at

### ASFINAG

DI Eva Hackl,  
Manager International Relations  
und Innovation  
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie,  
Internationales und Innovation  
rene.moser@asfinag.at,  
www.asfinag.at

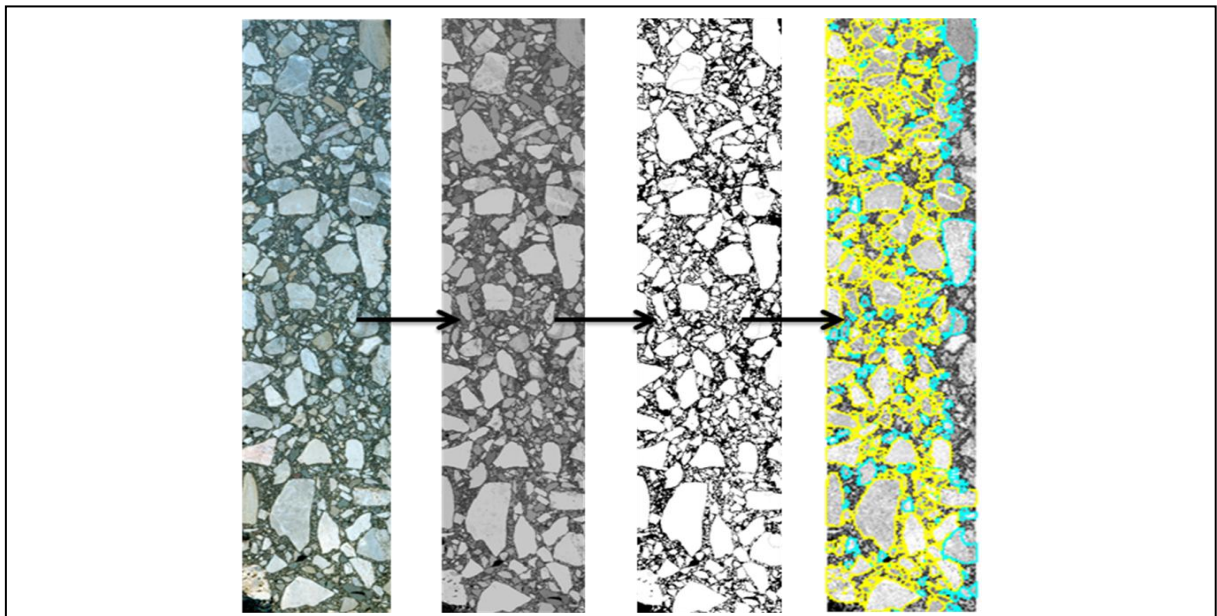
### Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,  
Programmleitung Mobilität  
Sensengasse 1, 1090 Wien  
christian.pecharda@ffg.at,  
www.ffg.at

September, 2015

# Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten (ORAB)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2012  
(**VIF2012**)



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Braunschweig,  
Institut für Straßenwesen  
Beethovenstraße 51b  
D - 38106 Braunschweig



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A - 1090 Wien



# **Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten (ORAB)**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2012  
**(VIF2012)**

September 2015

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
ÖBB-Infrastruktur AG  
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

ISBS Institut für Straßenwesen  
Technische Universität Braunschweig

**Autoren:**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jens Grönniger  
Ivan Isailović, M.Sc.

## INHALT

1	AUFGABENSTELLUNG.....	6
1.1	Hintergrund .....	6
1.2	Ziele und Vorgehensweise .....	17
2	UNTERSUCHUNGSMETHODIK.....	20
2.1	Analyse und Gewinnung von Ausbauasphalt .....	21
2.2	Auswirkung gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften .....	24
2.2.1	Herstellung von Asphalt mit Asphaltgranulat.....	24
2.2.2	Strukturcharakterisierung mittels Bildanalyse.....	29
2.2.3	Ansprache der Verformungsbeständigkeit .....	34
2.2.4	Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit .....	39
2.2.5	Rechnerische Ermittlung der Lebensdauer .....	42
2.3	Beurteilung einer Kompensationsmaßnahme.....	52
2.4	Erstellung eines Leitfadens Asphaltrecycling.....	53
3	ERGEBNISSE.....	55
3.1	Analyse der gewonnenen Asphaltgranulate .....	55
3.1.1	Geometrische Eigenschaften.....	55
3.1.2	Mechanische und physikalische Eigenschaften .....	63
3.1.3	Einfluss der Gewinnung auf die geometrischen Eigenschaften.....	64
3.1.4	Auswahl der Asphaltgranulat-Varianten für die Mischgutuntersuchungen...71	
3.2	Auswirkungen gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften .....	73
3.2.1	Innere Asphaltstruktur.....	73
3.2.2	Verformungsbeständigkeit .....	80
3.2.3	Steifigkeit und Ermüdungsbeständigkeit .....	84
3.2.4	Rechnerische Lebensdauer .....	97
3.3	Beurteilung der Kompensationsmaßnahme.....	99
3.3.1	Auswahl der worst-case-Varianten .....	99
3.3.2	Wirkung der Kompensationsmaßnahme .....	101
4	LEITFADEN ASPHALTRECYLING (Erstfassung).....	107
4.1	Allgemeines .....	107
4.2	Gewinnung von Asphaltgranulat durch Fräsen und zum Haldenmanagement..107	
4.3	Gleichmäßigkeit und Zugabeanteil des Asphaltgranulats .....	109

4.4	Mischgutherstellung in Asphaltmischanlagen mit Paralleltrommel.....	110
4.5	Hinweise zum Eignungsnachweis für Asphaltgranulat.....	111
4.6	Einsatz von Verjüngungsmitteln .....	111
4.7	Prüftechnik.....	112
5	ZUSAMMENFASSUNG .....	115
5.1	Projekthalt .....	115
5.2	Einfluss Gewinnungsart auf die Qualität des Asphaltgranulats .....	116
5.3	Auswirkung gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften .....	116
5.4	Kompensationsmaßnahme .....	119
6	DANKSAGUNG.....	120
7	LITERATUR.....	121

# 1 AUFGABENSTELLUNG

## 1.1 Hintergrund

### (a) Recycling von Asphalt

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt ist nicht nur vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung sondern auch aufgrund der europäischen Abfallrahmenrichtlinien, des abnehmenden Anteils an Neubaumaßnahmen bei gleichzeitig steigendem Anteil an Erhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen, sowie aufgrund von nicht absehbaren Preisschwankungen im Erdöl- und Bitumensektor, eine der drängendsten Fragen im modernen Straßenbau.

Aus Straßen ausgebauter und aufgebrochener Asphalt – in der Fachsprache als Asphaltgranulat bezeichnet - ist ein vollwertiger Baustoff, der in neuen Straßenschichten ohne Qualitätseinbußen wiedereingesetzt werden kann. Der Ausbau aus bestehenden Asphaltstraßen erfolgt durch Fräsen (Fräsasphalt) oder Aufbrechen mit anschließender Zerkleinerung zu Asphaltgranulat.

Asphaltgranulat kann grundsätzlich nur dann in neuen Asphaltsschichten wiederverwendet werden, wenn nachgewiesen ist, dass er frei von Schadstoffen (beispielsweise Teer) und Verunreinigungen ist (unbelasteter Ausbauasphalt). Die nationalen Regelwerke beinhalten eine umfangreiche Dokumentation von Anforderungen, Bau- und Einsatzkriterien an bzw. für Asphaltgranulat.

Die heutigen Strategien des Asphaltrecyclings zielen ab auf die Verwendung von Ausbauasphalt im großen Maßstab und mit möglichst hohem Wertschöpfungsniveau. Im Sinne eines wirtschaftlichen Recyclings ist der Einsatz des Ausbauasphaltes möglichst auf der gleichen Qualitätsstufe anzustreben, also der Einsatz in neuen Asphaltsschichten. Ein „Down-cycling“, wie etwa die Verwertung des Ausbauasphaltes in ungebundenen Schichten, ist in wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht suboptimal.

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt ist in einigen europäischen Ländern Stand der Technik und ist dort in nationalen Regelwerken dokumentiert (vgl. Re-Road, 2013; in Österreich: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV); in Deutschland: Technisches Regelwerk der For-



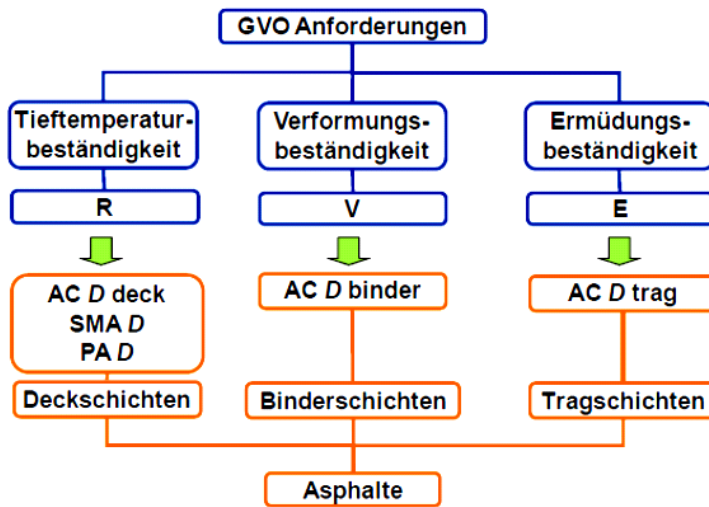
schungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Die nationalen Regelwerke regeln insbesondere die Optimierung des Anteils von Ausbauasphalt in neuem Asphaltmischgut und geben Hinweise zur Verarbeitung von Ausbauasphalt in der Asphaltmischanlage.

Erprobung und Beurteilung des Einflusses von Asphaltgranulat und deren Zugabern auf die Gebrauchseigenschaften der daraus neu hergestellten Straßenaufbauten aus Recyclingasphalt erfolgt im Labormaßstab üblicherweise mit Hilfe von gebrauchsvorhaltensorientierten Bitumen- und Asphaltprüfungen (GVO-Prüfungen oder Performance-Prüfungen) und mittels rechnerischer Dimensionierung. Auf der Grundlage der Mess- und Berechnungsergebnisse wird schließlich festgestellt, ob die Recyclingasphalte und in welchen Zugabern für die Erprobung in neuen Straßen empfohlen werden können, ohne dabei Einbußen in den Gebrauchseigenschaften hinnehmen zu müssen.

Nach dem Stand der Technik wird das Gebrauchsverhalten von Asphalt im Labor anhand von folgenden Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltmischgut (Performance-Eigenschaften) unter definierten Prüfbedingungen bewertet:

- Verformungsbeständigkeit (Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung),
- Steifigkeit (komplexer E-Modul und komplexe Querdehnzahl),
- Ermüdungsbeständigkeit (Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse),
- Tieftemperaturbeständigkeit (Widerstand gegen Kälterissbildung infolge ver- bzw. behinderten thermischen Schrumpfens).

Die gebrauchsvorhaltensorientierten Anforderungen in Abhängigkeit vom Einsatz des Asphalts als Deck-, Binder- oder Tragschichtmischgut sind im Technischen Regelwerk (sh. z. B. RVS 08.16.06, 2011) spezifiziert (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Anforderungen an Asphalt (RVS 08.16.06, 2011).**

Die Ergebnisse aus den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen werden zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenaufbauten genutzt und folglich deren rechnerische Lebensdauer (strukturelle Haltbarkeit) prognostiziert. Trotz des breiten Einsatzes von verschiedenen Prüfverfahren ermöglichen diese nicht zwangsläufig die umfassende Beschreibung und Bewertung des Gebrauchsverhaltens im gesamten Temperatur- und Beanspruchungsbereich (z. B. nachhaltige Beeinflussung der Gebrauchseigenschaften durch Umwelteinwirkungen).

### **(b) Stand der Technik in Deutschland**

In Deutschland bestehen langjährige Erfahrungen im Asphaltrecycling und die praktizierten Technologien zählen zu den international führenden. Insgesamt werden dort bereits über 80 % des anfallenden Ausbauasphalts durch Heißrecycling wieder in neuen Asphalt-schichten verwendet. Die Wiederverwendung von Asphaltgranulat ist dabei nicht (wie in anderen europäischen Ländern) auf die unteren Schichten des ungebundenen oder bituminös gebundenen Straßenoberbaus beschränkt. Heißrecycling wird für alle Asphalt-schichten – auch Asphaltdeckschichten – praktiziert.

Aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit mit anderen Bauweisen und aus Gründen der Nachhaltigkeit werden hohe Zugaberraten von Asphaltgranulat angestrebt. Die maximal erzielbare Zugabemenge wird einerseits begrenzt von der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats (siehe unten) und andererseits von den anlagentechnischen Möglichkeiten.

Die durch die Anlage verarbeitbare Zugabemenge reicht von maximal 30 M.-% bis (theoretisch) 100 M.-% Asphaltgranulat (M WA), in der Praxis oft zusätzlich eingeschränkt durch kalte Witterungsbedingungen. Maximal 30 M.-% (bei guten Witterungsbedingungen) sind bei Erwärmung des Asphaltgranulats durch die heißen Gesteinskörnungen mittels chargenweiser Direktzugabe in den Mischer möglich. Maximal 40 M.-% sind bei Erwärmung des Asphaltgranulats durch die heißen Gesteinskörnungen mittels kontinuierlicher Elevatorzugabe realisierbar oder bei Erwärmung des Asphaltgranulats gemeinsam mit den Gesteinskörnungen mittels Mitten- oder Wurfbandzugabe.

Zugaberaten bis (theoretisch) 100 M.-% sind nur bei gesonderter Erwärmung des Asphaltgranulats mittels Paralleltrommel möglich, in der das Asphaltgranulat separat erhitzt und anschließend heiß dem frischen Gestein beigemischt wird.

In frühen Forschungsprojekten an der TU Braunschweig wurde das Gebrauchsverhalten von Asphalten unter Mitverwendung von bis zu 30 M.-% (tw. stark verhärtetem) Asphaltgranulat in unterschiedlichen Variationen untersucht und dabei kein nachteiliges Gebrauchsverhalten festgestellt. So wurde der Einsatz von bis zu 30 M.-% Asphaltgranulat aus dichten Asphaltdeck- und -binderschichten in neuen Asphaltdeckschichten (Leutner et al., 2003), wie auch von Ausbauasphalt aus Offenporigen Asphalttschichten in neuen Asphaltbinderschichten und in Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt (Grönniger et al., 2009a, 2009b; Wistuba et al., 2011) empfohlen.

Zum Einfluss von Asphaltgranulat mit Straßenbaubitumen auf neues Asphaltmischgut mit Polymermodifizierten Bindemitteln zeigten die Untersuchungen an der TU Braunschweig (Renken und Lobach, 2007), dass die teils polymerbedingten, vorteilhaften Asphalteigenschaften (insbesondere gute Kälteflexibilität und Ermüdungseigenschaften) durch die Zugabe von Asphaltgranulat mit Straßenbaubitumen erhalten bleiben bzw. im Einzelfall sogar verbessert werden.

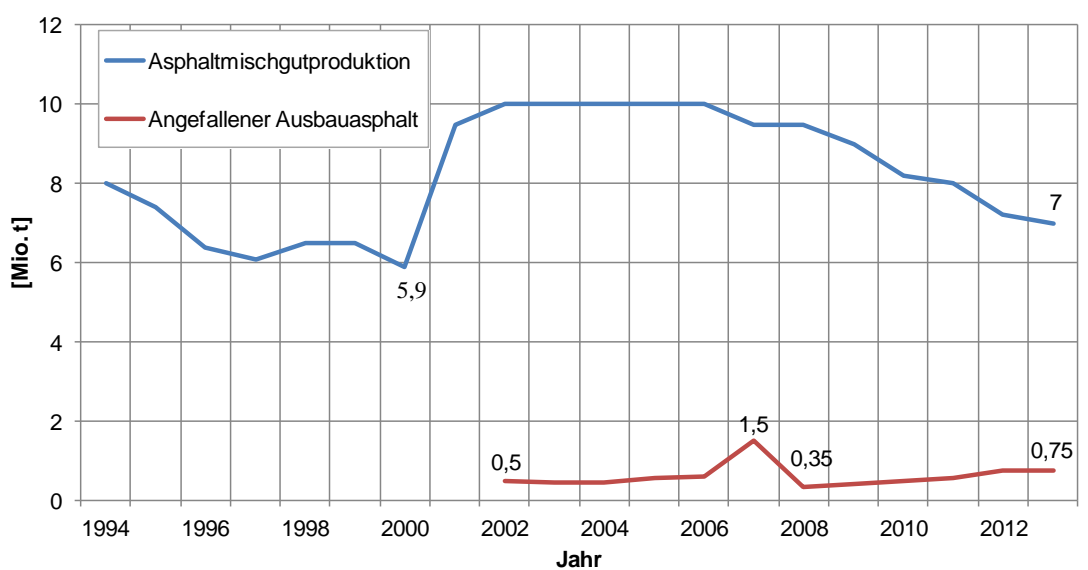
Später wurde an der TU Braunschweig festgestellt, dass auch Zugabeanteile von Asphaltgranulat von deutlich über 30 M.-% bezogen auf die Asphaltmischgutmenge realisiert werden können, ohne dabei Einbußen im Gebrauchsverhalten hinnehmen zu müssen. Von entscheidender Bedeutung sind dabei u. a. die Gleichmäßigkeit und die Qualität des Asphaltgranulats (z. B. Bitumenviskosität/-alterung/-sprödigkeit), die Wahl des Frischbindemittels und der Zusatzstoffe (Bitumenviskosität, Rejuvenator) sowie die Verarbeitungstechnik (Mischdauer, Doppelumhüllung).

In den letzten Jahren haben einige deutsche Bundesländer die allgemein gültigen Regelungen des Technischen Regelwerks erweitert (tw. abweichend zu den TL Asphalt-StB, z. B. Erhöhung des zulässigen Erweichungspunktes des resultierenden Bindemittels; Zugabe von Rejuvenatoren) und zahlreiche Untersuchungsstrecken mit sehr hohen Recyclinganteilen angelegt. Beispielsweise wurden im Jahr 2014 allein in Baden-Württemberg 40 Pilotmaßnahmen ausgeführt (sh. ETV-StB-BW, 2013; Gohl, 2014), in denen das Verfahren „Maximalrecycling 90“, d. h. Verwendung von bis zu 90 % Asphaltgranulat in Asphaltbinder- und Asphalttragschichten mit Zugabe von Rejuvenatoren, sowie das Verfahren „Maximalrecycling 50/75“, d. h. Verwendung von bis zu 50 % Asphaltgranulat in Asphaltdeckschichten und bis zu 75 % in Asphaltbinder- und Asphalttragschichten mit Verwendung von Straßenbaubitumen 50/70 oder 70/100 oder Polymermodifiziertem Bitumen, zur Ausführung gelangten. Die Hamburger Unternehmensgruppe STORIMPEX wendet seit mehreren Jahren eine Technologie zur Wiederverwendung von Asphalt mit 100 % Recyclinganteil an, wobei als Rejuvenator das Produkt STORBIT PLUS zugemischt wird (bspw. Baumaßnahme Pollhornweg, Hamburg-Wilhelmsburg, 2011). Diese Technologie wurde und wird auch an der TU Braunschweig weiter untersucht (Wistuba und Hauser, 2014).

Es ist anzumerken, dass bei regelwerkskonformer Zusammensetzung des Asphaltmischguts zu einer bestimmten Asphaltmischgutart und -sorte maximal ein Recyclinganteil von etwa 90 % erreicht werden kann, weil infolge der Fräs-, Brech- und Siebvorgänge Anteile an grober Gesteinskörnung verloren gehen und daher zur Korrektur der Sieblinie und zum Ausgleich des geringfügigen Bindemittelüberschusses grobe Gesteinskörnung zugegeben werden muss.

### **(c) Stand der Technik in Österreich**

Die Entwicklung der österreichischen Asphaltproduktion sowie die Menge an anfallendem Ausbauasphalt zeigt Abbildung 2.



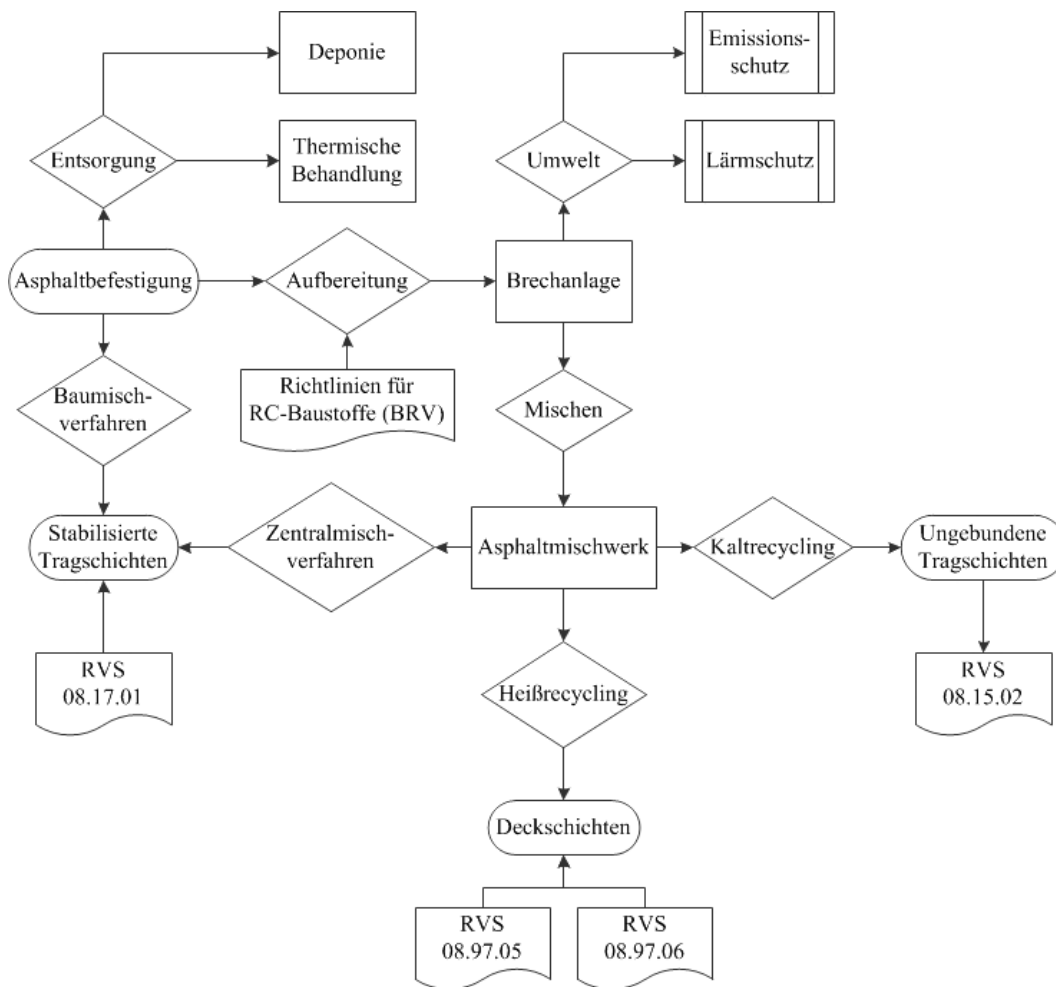
**Abbildung 2. Entwicklung der Asphaltmischgutproduktion und Menge des angefallenen Ausbausphalt in Österreich (EAPA, 2015).**

In Österreich sind folgende Verfahren zur Wiederverwendung von Ausbausphalt bekannt:

- Recycling im Asphaltmischwerk (Heißmischgut),
- Kaltrecycling durch Stabilisierung,
  - Zentralmischverfahren,
  - Baumischverfahren,
- Verwertung des Ausbausphaltes in ungebundenen Tragschichten.

In Abbildung 3 sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Verwertungsverfahren und die jeweils geltenden Regelwerke im Überblick dargestellt.

Die Richtlinien für Recycling-Baustoffe stellen ein grundlegendes Regelwerk in Österreich für den Umgang mit Ausbausphalt dar, welche vom Baustoffrecyclingverband (BRV) veröffentlicht und zuletzt im Jahr 2009 aktualisiert wurde. Hierbei hat insbesondere die *Grüne Richtlinie* einen herausragenden Stellenwert, da dieser Anhang die Verwendung von hydraulischen, bituminösen sowie ungebundenen mineralischen Baurestmassen aus dem Tiefbau behandelt. In Abstimmung mit dem Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) enthalten die „Richtlinien für Recycling-Baustoffe“ die gesetzlichen Vorgaben zu den jeweiligen Aufbereitungsverfahren von Recycling-Baustoffen. Des Weiteren geben sie Auskunft über den Ablauf von erforderlichen Prüfungen an den Baustoffen (BRV, 2009).



**Abbildung 3. Zusammenhänge zwischen einzelnen Verwertungsverfahren im Rahmen des Asphaltrecyclings und zugehörige Regelwerke in Österreich im Überblick.**

Mithilfe des Parameters „PAK-Gehalt im Eluat“ werden Straßenausbaustoffe in vier Güte- bzw. Qualitätsklassen (A+, A, B und C) eingeteilt. In Tabelle 1 sind die Qualitätsklassen wiedergegeben. Ausbaustoffe der Qualitätsklasse C sind nur zur Ablagerung auf Deponien geeignet (BRV, 2009).

**Tabelle 1: Einteilung der Qualitätsklassen in Abhängigkeit vom PAK-Gehalt im Eluat (BRV, 2009)**

Parameter	Einheit	gemäß	Qualitätsklasse A+	Qualitätsklasse A	Qualitätsklasse B
$\Sigma$ PAK nach EPA	mg/kg <sub>TS</sub>	ÖNORM L 1200	4	12	20

Die Qualitätsklasse ist ein Hinweis zur ordnungsgemäßen Verwendung der jeweiligen Baurestmassen, zu den möglichen hydrologischen Einsatzbereichen sowie zu den entsprechenden Anwendungsformen. Die umwelttechnischen Einsatzbereiche der Qualitäts-

klassen A+, A und B sind in Abhängigkeit von der Anwendungsform in Tabelle 2 enthalten (BRV, 2009).

**Tabelle 2: Verwendungsformen in Abhängigkeit von den umwelttechnischen Einsatzbereichen und Qualitätsklassen (BRV 2009)**

Verwendungsform	hydrologische sensibles Gebiet	hydrologische weniger sensibles Gebiet
ungebunden ohne Deckschicht	A+	A+, A
ungebunden mit Deckschicht oder gebunden ohne/mit Deckschicht	A+, A	A+, A, B
als Zuschlagstoff	A+, A, B	A+, A, B

Die Bestimmung des PAK-Gehaltes im Eluat nach EPA hat mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) oder Gaschromatographie (GC) entsprechend den Angaben der ÖNORM L 1200 zu erfolgen. Diese Form der Gütebestimmung ist jedoch auf eine Verwendung der Recyclingbaustoffe für Füll- sowie Schüttmaterialien fokussiert, die in gebundenen und ungebundenen Tragschichten verbaut werden. Wenn die zu prüfenden Recyclingbaustoffe zur Herstellung von Asphaltmischgut verwendet werden, sind weitere Untersuchungen gemäß Technischem Regelwerk erforderlich. In folgenden Anwendungsfällen können Recyclingbaustoffe entsprechend der Grünen Richtlinie in Form von Zuschlagstoffen für Schüttungen oder Tragschichten genutzt werden (BRV, 2009):

- bituminös gebundene Bauweise gemäß den RVS 08.97.05,
- hydraulisch gebundene Bauweise gemäß RVS 08.17.01, RVS 08.17.02, RVS 08.06.01 und ÖNORM B 4701-1 und
- ungebundene Bauweise gemäß RVS 08.03.01, RVS 08.15.01 und RVS 08.15.02.

Neben den zuvor genannten Richtlinien beleuchten die RVS 08.17.01 "Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten" die Zugabe von bituminösen Straßenausbaustoffen bei der Herstellung von stabilisierten Tragschichten (FSV, 2015b).

Für die Wiederverwendung von Ausbauphosphat galt bis September 2009 die RVS 08.97.04 Asphaltgranulat. Diese Richtlinie wurde zurückgezogen (FSV, 2015c).

Die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) führte im Jahr 2007 erstmals ein Pilotprojekt mit Asphaltrecycling im Heißverfahren durch. Im Rahmen dieses Projektes am Knoten Graz-West wurde getestet, inwiefern eine Wiederverwendung der ausgebauten Straßenbefestigung umsetzbar ist und ob 100 M.-% der

Ausbaustoffe auf der Baustelle recycelt werden können (Steiner, 2014). Es folgte eine Reihe von Pilot- und Forschungsprojekten. 2009 wurde Asphaltrecycling am Knoten Graz West im Schnittpunkt der A 2 Südautobahn und an der A 9 Pyhrnautobahn im Westen von Graz erprobt, wo im Rampenbereich in einem Abschnitt eine Zugabe von 15 M.-% Asphaltgranulat in das Asphaltmischgut der Asphaltbinderschicht und 20 M.-% in das Asphaltmischgut der Asphalttragschicht und in einem weiteren Bereich die Zugabe von 20 M.-% in die Asphaltbinderschicht und 30 M.-% in die Asphalttragschicht erfolgte (Fegelin, 2013). Das Asphaltgranulat wurde den restlichen Bestandteilen des Asphaltmischgutes bei der Herstellung in einem kalten und feuchten Zustand beigemischt. Im Rahmen der Abnahmeprüfung nach Fertigstellung der Baumaßnahme konnten zwischen den unterschiedlichen Streckenabschnitten unter Anwendung des empirischen Ansatzes keine maßgebenden Unterschiede festgestellt werden. Auch das Tieftemperaturverhalten der Straßenabschnitte war zufriedenstellend (Fegelin, 2013).

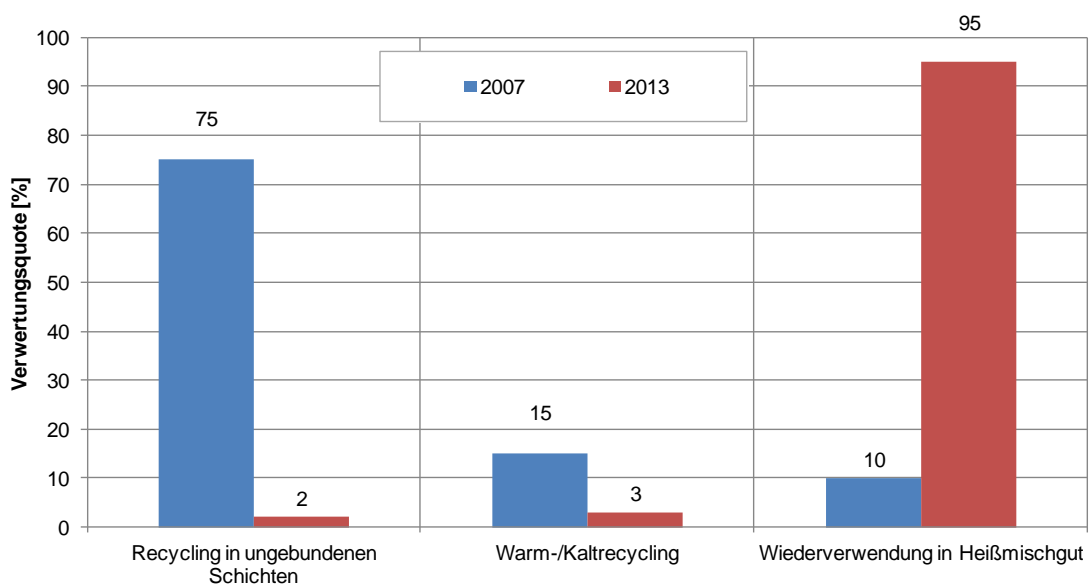
Im Projekt L 384 Laßnitzthal wurde 2010 beim Neubau der Nestelbacherstraße die Zugabe von Asphaltgranulat bei der Asphaltmischgutherstellung getestet. Die Länge des Teilstückes, in dem nicht sortenrein gefräster Ausbauasphalt beigefügt wurde, betrug 550 m. Im Anschluss an die Fräsarbeiten wurde eine zweilagige Fahrbahn mit einer 8 cm dicken Trag- sowie einer 5 cm dicken Deckschicht hergestellt. Auch die ungebundene Obere Tragschicht wurde aus Recyclingasphalt gebaut. Dabei wurde das Teilstück in zwei Abschnitte geteilt, in denen jeweils 15 M.-% und 20 M.-% Asphaltgranulat in das Asphaltmischgut für die Trag- und die Deckschicht eingemischt wurden. Als Tragschicht wurde ein Asphaltmischgut der Sorte AC 32 trag PmB 45/80 RC, T2, G6, RA15 bzw. ein AC 32 trag PmB 45/80 RC, T2, G6, RA20 und als Deckschicht ein Asphaltmischgut der Sorte AC 16 deck PmB 45/80 RC, A5, G9, RA15 bzw. AC 16 deck PmB45/80 RC, A5, G9, RA20 verwendet (Spiegl, 2011).

Bereits Mitte der 2000er Jahre wurde in Österreich angestrebt, dass nahezu 100 M.-% der anfallenden Straßenausbaustoffe einer Verwertung zuzuführen sind. Jedoch handelte es sich 2007 eher um ein Downcycling statt um eine effektive Wiederverwendung, da der Ausbauasphalt nach der Aufbereitung überwiegend zur Herstellung untergeordneter Asphalttragschichten, ungebundener Oberbauschichten von gering belasteten Wegen oder im Dammbau verwendet wurde. Abbildung 38 zeigt die Verteilung der Verwertungsformen im Jahr 2007 bei einer Menge von 1.500.000 t angefallenen Ausbauasphalt (EAPA, 2015).



In Österreich liegt die Wiederverwertungsrate von Ausbaupasphalt in Asphaltsschichten (Heißrecycling) im europäischen Vergleich auf einem durchschnittlichen Niveau. Die Ursachen liegen u. a. im ausgezeichneten Erfolg mit hohen Verwertungsquoten im Bereich des Kaltrecyclings und in den durch das technische Regelwerk geforderten Anforderungen an die Zusammensetzung von Asphaltmischgut. Heißrecycling von Asphalt wird (wenn überhaupt) nur für einen eingeschränkten Teil des untergeordneten Straßennetzes mit einer niedrigen Verkehrsbelastung realisiert, weil nur hier das Regelwerk hinsichtlich der Anforderungen an das Asphaltmischgut entsprechend tolerant in Bezug auf die Materialeigenschaften der Einzelkomponenten ist. Die Verwendung von Ausbaupasphalt in hochbelasteten Straßenbefestigungen (Lastklassen S bzw. 1) ist gemäß Regelwerk derzeit nicht zulässig, weil dann die Anforderungen an das Asphaltmischgut bezüglich des Anteils an gerundeten Oberflächen der Gesteinskörnungen gemäß den RVS 08.97.05 nicht eingehalten werden können.

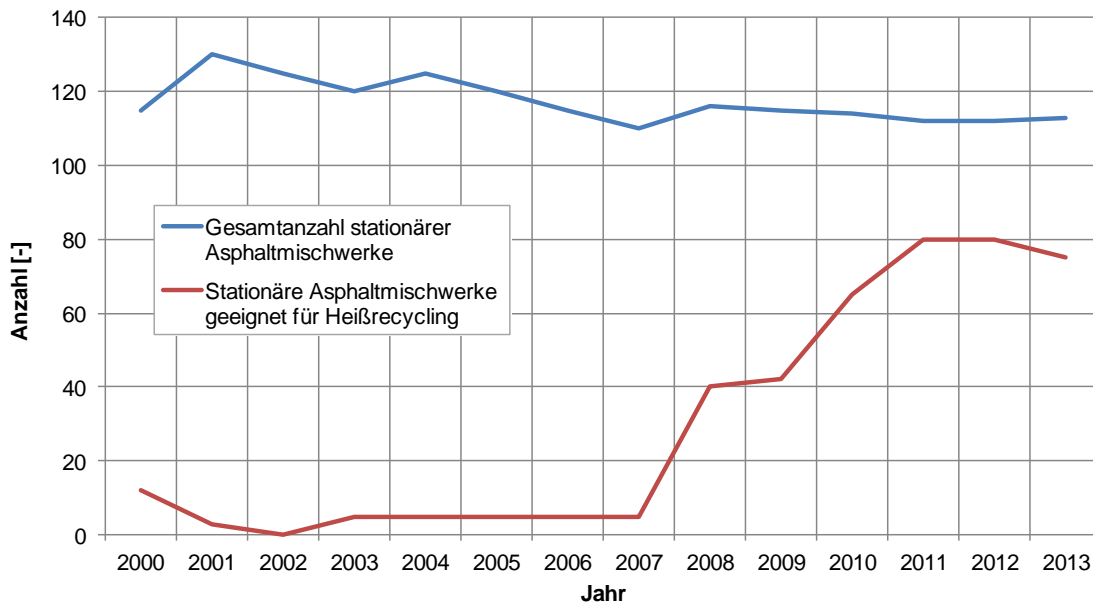
Trotzdem hat sich im Vergleich zum Jahr 2007 bis 2013 die Verteilung der unterschiedlichen Verwertungsformen gewandelt (vgl. Abbildung 4). Statt den Ausbaupasphalt hauptsächlich in ungebundenen Tragschichten zu verbauen, wird mittlerweile ein großer Anteil des Ausbaupasfaltes zur Herstellung von Asphaltsschichten genutzt (EAPA, 2015).



**Abbildung 4: Vergleich der Verwertungsformen von Ausbaupasphalt in Österreich (EAPA, 2015).**

Viele der Österreichischen Bauunternehmen besitzen mittlerweile die maschinentechnischen Möglichkeiten zur Wiederverwendung im Heißmischgut – zumindest bis Zugabera-

ten von 20 bis 30 M-%. Waren 2007 von 110 stationären Asphaltmischgutanlagen lediglich 5 entsprechend ausgerüstet, waren es 2013 von 113 stationären Asphaltmischanlagen bereits 75 Anlagen (Abbildung 5).



**Abbildung 5. Anzahl der stationären Asphaltmischwerke in Österreich mit und ohne Möglichkeit zum Heißrecycling (EAPA, 2015).**

Zum jetzigen Zeitpunkt kann allerdings der Großteil der Mischwerke, die nach dem Heißmischverfahren arbeiten, aus anlagentechnischen Gründen nur relativ geringe Zugabemengen (ca. 20 bis 30 M.-%) an Asphaltgranulat realisieren. Die Mittenzugabe des Asphaltgranulats in die Trockentrommel wird bevorzugt.

Zur Erzielung von Zugabemengen über 30 M.-% ist die Verwendung einer Paralleltrommel zusätzlich zur Trockentrommel zwingend notwendig, d. h. einer zweiten Heizeinrichtung, die allein für die Erhitzung des Asphaltgranulats sorgt. Installation und Betrieb einer Paralleltrommel sind monetär und betrieblich aufwändig, erfordern eine neue Betriebsstätten-Genehmigung mit erheblichen Auflagen, rechnen sich nur beim Asphaltrecycling im großen Stil und sind daher für viele österreichische Straßenbauunternehmen derzeit keine Option. Eine Zugabemenge von ca. 20 M.-% Asphaltgranulat wird aktuell als die wirtschaftlichste Lösung gesehen. Diese Zugabemenge wird auch mindestens von der ASFI-NAG bei der Ausschreibung von Straßenbaumaßnahmen gefordert (Holzfeind, 2014).

## 1.2 Ziele und Vorgehensweise

Aufgrund der Ressourcenverknappung und des damit einhergehenden Preisanstiegs für asphaltbildende Baustoffe, sowie vor dem Hintergrund der zukünftig rechtlichen Verpflichtung zur Verwertung bzw. zum Recycling von Baustoffen gemäß den europäischen Abfallrahmenrichtlinien, soll auch in Österreich der Anteil des Heißrecyclings im Straßenbau sukzessive erhöht werden. Es bedarf einer fundierten Erarbeitung der notwendigen Handlungsempfehlungen im Hinblick auf eine Realisierung höherer, zulässiger Recyclinganteile von Altasphalt in bituminösen Straßenschichten. Bislang fehlen hierzu detaillierte systematische Untersuchungen, die sowohl die Auswirkung der Gewinnungsart des Ausbauasphaltes auf dessen Eigenschaften, sowie den Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von mit Asphaltgranulat hergestellten Asphalttrag- und -binderschichten umfassen. Das F&E-Projekt ORAB soll beitragen, entsprechende Grundlagen zu schaffen.

Ziel des F&E-Projekts ORAB ist es, die Möglichkeit der Wiederverwendung von Asphaltgranulaten mit einem unvorteilhaft hohen Anteil an gerundeten Gesteinsoberflächen, zu untersuchen. Auftragsgemäß wird an typischen Beispielen von Asphaltgranulaten, die aus gefrästen bituminösen Trag- und Binderschichten gewonnen werden, eine geeignete Technologie entwickelt und erprobt, sodass diese Asphaltgranulate mit einem Anteil von deutlich über 20 % zu neuem Asphaltmischgut zugegeben werden können. Das so entstandene Recycling-Asphaltmischgut soll solche Eigenschaften haben, dass es für neue Asphalttrag- und -binderschichten auf hochbelasteten Asphaltstraßen der Lastklassen S und 1 (gemäß RVS 03.08.63) zum Einsatz kommen könnte und hinsichtlich seiner Gebrauchseigenschaften mindestens gleichwertig zu herkömmlichem Asphaltmischgut ist.

Die Beiträge des F&E-Projekts ORAB zur Entwicklung geeigneter Technologien betreffen im Einzelnen (beispielhaft für ausgewählte Asphaltgranulate):

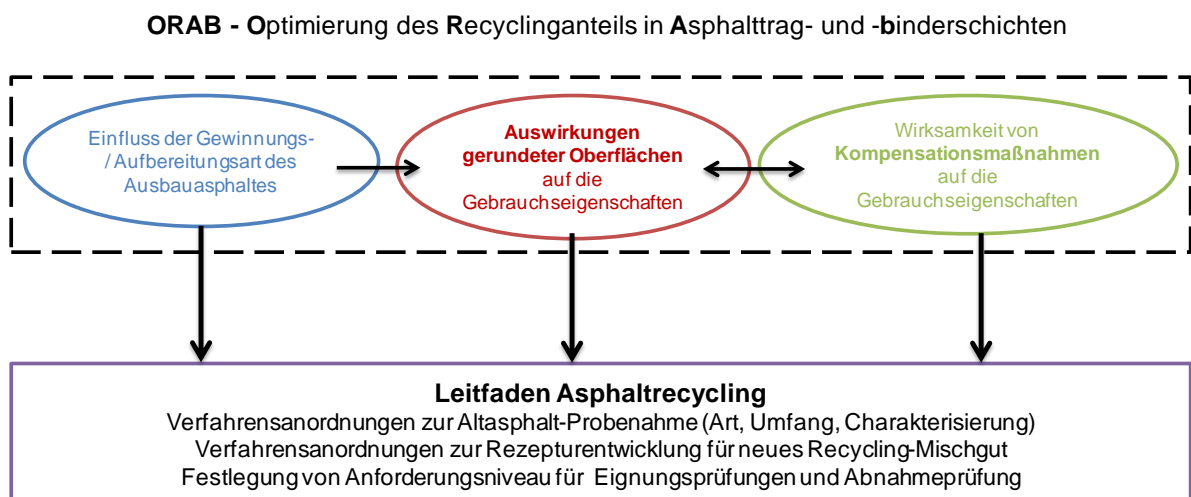
- (1.) die Gewinnung und ggf. Aufbereitung von Asphaltgranulat und die Identifikation des Einflusses der Frästechnik des Ausbauasphaltes aus Asphalttrag- und -binderschichten auf die Materialeigenschaften und die Qualität der Gesteinskörnungen bzw. des Asphaltgranulats
  - **Ergebnis: Einfluss der Frästechnik auf die erreichte Qualität des Ausbauasphaltes (in Bezug zu den RVS 08.97.05)**

- (2.) die Ansprache des Einflusses des Anteils an gerundeten Gesteinsoberflächen auf das Gebrauchsverhalten (Analyse mittels praxisadäquater Verdichtung, Herstellung von Probeplatten, bildtechnischer Analyse und Durchführung von am Gebrauchsverhalten orientierten Laborprüfungen)
- **Ergebnis: Auswirkungen der Zugabe von Asphaltgranulat auf die wesentlichen Gebrauchseigenschaften von ausgewählten Asphalttrag- und –binderschichten; Identifikation von maximalen Zugabeanteilen in Abhängigkeit von der vorliegenden Qualität des Asphaltgranulats und den Anforderungen gemäß RVS 08.16.06**
- (3.) die Realisierung maximaler Asphaltgranulat-Zugabeanteile (bei hierarchischer Variation der Asphaltgranulatqualität, des Zugabeanteils, der Bindemittelart bzw. –sorte oder des zugegebenen Rejuvenators) unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Zwänge
- **Ergebnis: Beurteilung des Einflusses einer Kompensationsmaßnahme (Verwendung von frischem Bitumen) auf die Gebrauchseigenschaften von ausgewählten Asphalttrag- und -binderschichten mit Asphaltgranulat**
- (4.) die Oberbaubemessung und die Prognose der rechnerischen Lebensdauer von Asphaltbefestigungen aus Recycling-Asphalt
- **Ergebnis: rechnerische Lebensdauer von ausgewählten Straßenaufbauten der Lastklasse S unter Verwendung von Asphaltgranulat in den Asphalttrag- und –binderschichten und unter Berücksichtigung der prognostizierten Verkehrsbelastung und der Klimaprognosen für einen Standort in Österreich (Wien)**
- (5.) Auf der Grundlage der erhaltenen Ergebnisse und mit Hilfe des langjährigen Erfahrungshintergrundes am ISBS wird zusammenfassend eine Erstfassung zur Erstellung eines „Leitfadens Asphaltrecycling“ formuliert. Der Leitfaden soll die Arbeit zur Weiterentwicklung des österreichischen Regelwerks unterstützen, sodass vorhandene Bestimmungen zum Asphaltrecycling ergänzt bzw. ersetzt werden können, und dass die Rahmenbedingungen geschaffen werden, um zukünftig höhere Recyc-

linganteile in Asphalttrag- und -binderschichten für hochbelastete Straßen der Lastklassen S und 1 (gemäß den RVS 03.08.63) zu ermöglichen.

- **Ergebnis:** Im „Leitfaden Asphaltrecycling“ (Erstfassung) sind die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst. Er enthält exemplarische Empfehlungen zur Realisierung möglichst hoher Zugabeanteile bezüglich der Aspekte Analyse des Ausbauasphaltes, Auswirkungen von unterschiedlichen Gewinnungs- und Aufbereitungsarten (Fräsen, Brechen) auf die Qualität des Ausbauasphaltes, zur Mischgutkonzeption und prüftechnische Ansprache der Gebrauchseigenschaften, sowie die Prognose der rechnerischen Lebensdauer von Asphaltbefestigungen mit Recycling-Asphalt.

In Abbildung 6 ist die Projektstruktur im Überblick aufgeführt.



**Abbildung 6: Projektstruktur im Überblick.**

## 2 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die im F&E-Projekt ORAB geplante Untersuchungsmethodik zur Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -binderschichten gliedert sich in 4 Arbeitspakete (AP), siehe Abbildung 7. In den nachfolgenden Abschnitten 2.1 bis 2.4 werden die in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten erläutert.

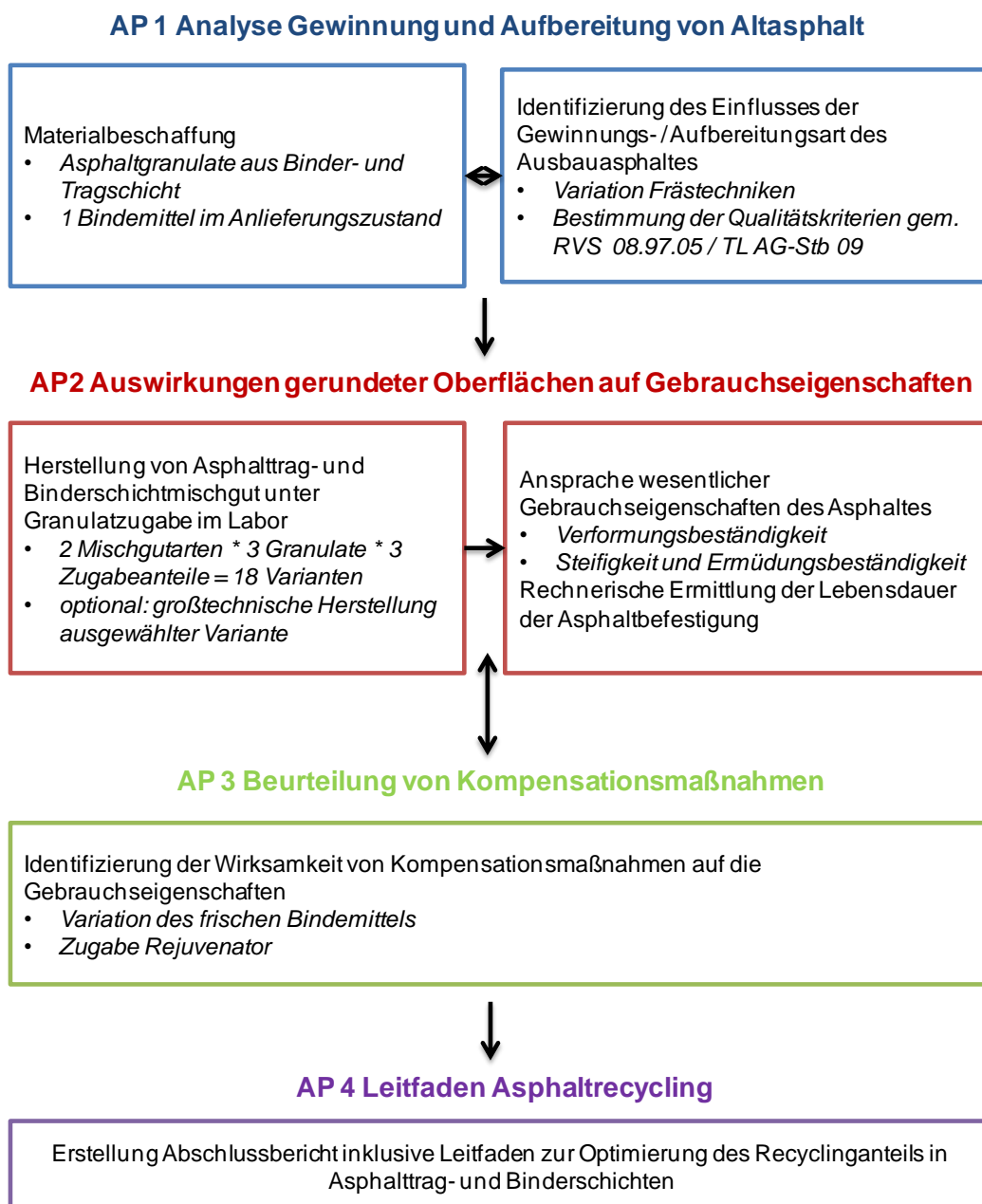


Abbildung 7: Arbeitspakete im F&E-Projekt ORAB (Überblick).

## 2.1 Analyse und Gewinnung von Ausbausphalt

Alle Untersuchungen im F&E-Projekt ORAB wurden exemplarisch an Asphaltgranulaten aus ausgewählten Straßenabschnitten durchgeführt. Dazu wurden insgesamt 10 Varianten an Asphaltgranulat durch mechanisches Fräsen aus 4 Asphaltbinderschichten und 6 Asphalttragschichten unter Variation der in Abbildung 8 dargestellten Faktoren gewonnen.



**Abbildung 8: Variationsfaktoren bei der Gewinnung von Altasphalt zur Weiterverwendung als Asphaltgranulat in neuen Asphaltsschichten.**

Folgende Baustellen mit deutlich unterschiedlicher Liegedauer der Asphaltsschichten (kurze vs. lange Liegedauer) wurden ausgewählt:

- Schnellstraße S 3: Stockerau-Hollabrunn,
- Schnellstraße S 36: Zeltweg,
- Südautobahn A 2: AS Arnoldstein und
- Landesstraße L 301: Hitzendorf).

Es wurde jeweils Asphaltgranulat in ausreichender Menge durch lagenweises Fräsen (getrennt für Asphaltbinder und -tragschicht) gewonnen und dabei folgende Gewinnungsmodalitäten als möglicherweise maßgebend für die Granulateigenschaften festgelegt und variiert:

- Vorschub: langsam (5 m/min) und schnell (10 bis 15 m/min) und
- Fräslinienabstand (15 bzw. 25 mm).

Die Variationen der Rotationsgeschwindigkeit der Frästrommel und der verwendeten Wassermenge wurden von den Experten in der Frästechnologie aus maschinentechnischen und praktischen Gründen als nicht realisierbar erkannt und ihr möglicher Einfluss auf die Asphaltgranulatqualität als nicht maßgebend eingestuft.

Im Einzelnen wurden die nachfolgend tabellarisch aufgeführten Fräsgut-Varianten gewonnen, die in Form von aufbereitetem (getrockneten) Asphaltgranulat dann für die weiteren Untersuchungen im F&E-Projekt ORAB weiter genutzt wurden.

**Tabelle 3: Fräsgut-Varianten und Gewinnungsmodalitäten**

Variante		Baumaßnahme	Fräsgeschw. $V_{\text{fräs}}$ [m/min]	Fräslinien- abstand [mm]	Frästiefe [mm]
Fräsgut aus Asphalt- binderschicht	B1	S 3 (Stockerau – Hollabrunn)	3	15	8
	B2	S 3 (Stockerau – Hollabrunn)	10	15	8
	B3	S 36 (Zeltweg)	5	25	9
	B4	S 36 (Zeltweg)	11	25	9
Fräsgut aus Asphalt- trag & -binderschicht	T1	S 36 (Zeltweg)	5	25	9
	T2	S 36 (Zeltweg)	11	25	9
	T3	A 2 (AS Arnold- stein)	1,8	15	7 bei Binder, 13 bei Tragsch.
	T4	A 2 (AS Arnold- stein)	3,8	15	7 bei Binder, 13 bei Tragsch.
	T5	L 301 (Hitzendorf)	5	15	10 bei Binder, 8 bei Tragsch.
	T6	L 301 (Hitzendorf)	11	15	10 bei Binder, 8 bei Tragsch.

Der überwiegende Teil der Fräsgut-Varianten konnte durch lagenweises Fräsen gewonnen werden. Bei der Gewinnung der Fräsgut-Varianten aus Asphalttragschichten wurde ein Teil der Varianten baustellenbedingt durch gemeinsames Fräsen von Asphaltbinder und Asphalttragschicht erhalten.

Zur Charakterisierung der gewonnenen Ausbauasphalte wurden die nachfolgend aufgeführten Kenngrößen an den Gesteinskörnungen bzw. am durch Extraktion rückgewonnenen Bindemittel bestimmt:



- Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 933-1,
- Masseanteil nicht-kubischer Körner im Anteil  $\geq 4$  mm gemäß ÖNORM EN 933-4,
- Masseanteil gebrochener Körner im Anteil  $\geq 4$  mm gemäß ÖNORM EN 933-5,
  - Anteil vollständig gebrochener Körner  $C_{tc}$ ,
  - Anteil gebrochener Körner  $C_c$ ,
  - Anteil vollständig gerundeter Körner  $C_{tr}$ ,
- Fließkoeffizient gemäß ÖNORM EN 933-6,
- Widerstand gegen Zertrümmerung gemäß ÖNORM EN 1097-2,
- Wasseraufnahme gemäß ÖNORM EN 1097-6 bzw. Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel an 8/16 gemäß ÖNORM EN
- Bindemittelgehalt gemäß ÖNORM EN 12697-1,
- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß ÖNORM EN 1427.

Das Ergebnis des Arbeitspaketes AP 1 war die Zuordnung der durch Variation von Gewinnungs- und Aufbereitungsart erzielten Qualitäten des Ausbaumasphaltes zu den Qualitätskriterien an Asphaltmischgut für hochbelastete Asphalttrag- und -binderschichten gemäß den RVS 08.97.05.

Anhand der Analyseergebnisse der gewonnenen Asphaltgranulate wurden jeweils 3 unterschiedliche Asphaltgranulate aus Asphalttrag- und -binderschicht ausgewählt, die bezüglich ihrer Qualität, der Form der Gleichmäßigkeit und der Eignung für den Einsatz in hochbelasteten Asphalttrag- und -binderschichten eine möglichst große Bandbreite (vorteilhafte / moderate / kritische Eigenschaften) aufwiesen. Die ausgewählten Asphaltgranulate wurden im Rahmen des Arbeitspaketes AP 2 bei der Herstellung von neuem Asphalttrag- und -binderschichtmischgut unter Zugabe des Asphaltgranulats eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.1).

## 2.2 Auswirkung gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften

### 2.2.1 Herstellung von Asphalt mit Asphaltgranulat

#### (a) Asphaltmischgut

Zur Untersuchung des Einflusses von Asphaltgranulat mit gerundeten Oberflächen auf die wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Asphalttrag- und -binderschichten wurden Asphaltmischgutvarianten hergestellt unter Variation der

- Art des Asphaltgranulats (3-fach: vorteilhafte / moderate / kritische Eigenschaften)
- und des Zugabeanteils des Asphaltgranulats (3-fach: 20, 40 und 60 M.-%).

Zur Herstellung der Asphaltvarianten wurden zwei verschiedene Bitumen verwendet, die als praxisrelevant für den österreichischen Markt gelten (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Eingesetzte Bitumen**

Variante	Bitumen
1	Straßenbaubitumen 50/70
2	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65

Zur Herstellung der Asphalte unter Zugabe von Asphaltgranulat wurden desweiteren dolomitischer Kalkstein aus dem Werk Pichlern beschafft.

Die Variantenbezeichnungen der so hergestellten Asphaltvarianten zeigt Tabelle 5.

Insgesamt ergaben sich zur weiteren Berücksichtigung im Rahmen des F&E-Projekts ORAB je Asphaltmischgutart 9 Asphaltvarianten zuzüglich einer Referenzvariante ohne Asphaltgranulat-Zugabe, insgesamt somit 20 Asphaltvarianten.

Da der Wassergehalt des Asphaltgranulats die Verarbeitbarkeit und die Homogenität des resultierenden Asphaltmischguts beeinflusst, wurden die Asphaltgranulate vor der Zugabe im Ofen getrocknet, sodass der Wassergehalt mit 0 M.-% angenommen werden kann.

Der Mischprozess im Labor erfolgte praxisnah mittels eines Doppelwellen-Zwangsmischers, dessen Mischwerkzeug jenem in der Asphaltmischanlage im Maßstab  $M = 1:8$  nachgebildet ist. Es ist durch mehrere Forschungsstudien bekannt, dass nur mit einem derartigen Verdichtungsgerät das Asphaltgranulat mit ausgezeichneter Näherung zur Praxis (in der Asphaltmischanlage) aufgeschlossen wird (Abbildung 9).

**Tabelle 5: Variantenbezeichnungen der unter Asphaltgranulat-Zugabe hergestellten Asphaltmischgute für die Asphalttragschicht (AC 22 trag T1) und Asphaltbinderschichten (AC 16 binder H1)**

Zugabeanteil	20 M.-%	40 M.-%	60 M.-%
<b>Fräsgut</b>			
<b>AC 22 trag T1 + 50/70</b>			
T1	T11	T12	T13
T4	T21	T22	T23
T6	T31	T32	T33
<b>AC 16 binder H1 + 45/80-65</b>			
B1	B11	B12	B13
B3	B21	B22	B23
B4	B31	B32	B33

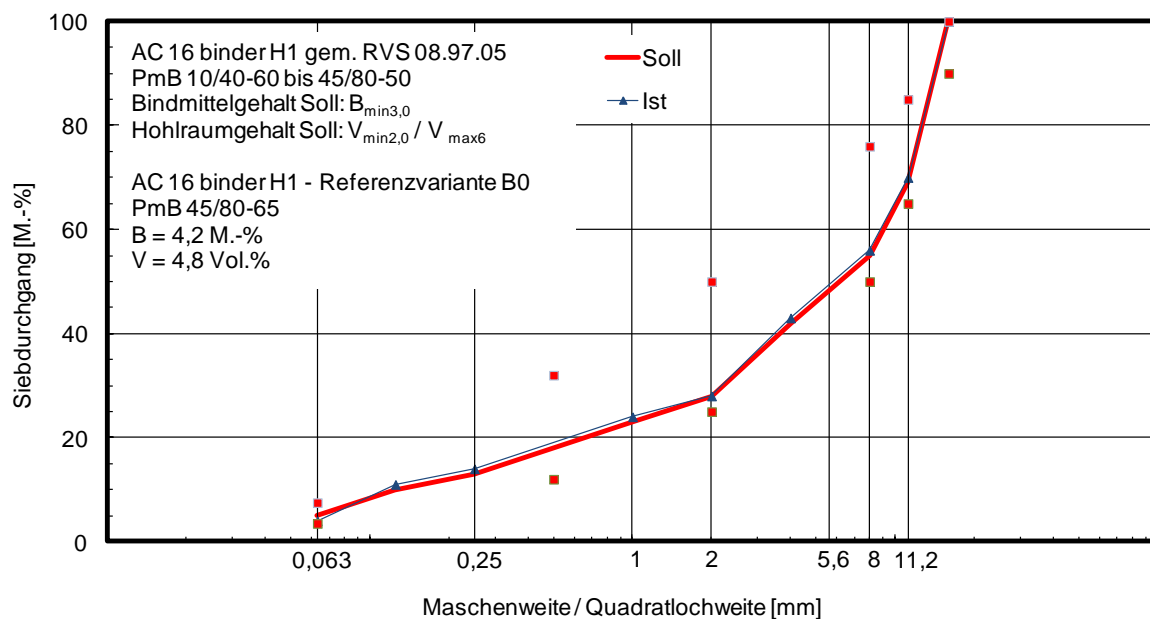


**Abbildung 9: Doppelwellen-Zwangsmischer (im Prüflabor des ISBS) zur praxisadäquaten Herstellung von Asphaltmischgut unter Zugabe von Asphaltgranulat (links); Detail Mischwerkzeug nachempfunden dem Mischwerk in einer Asphaltmischanlage im Maßstab  $M = 1:8$  (rechts).**

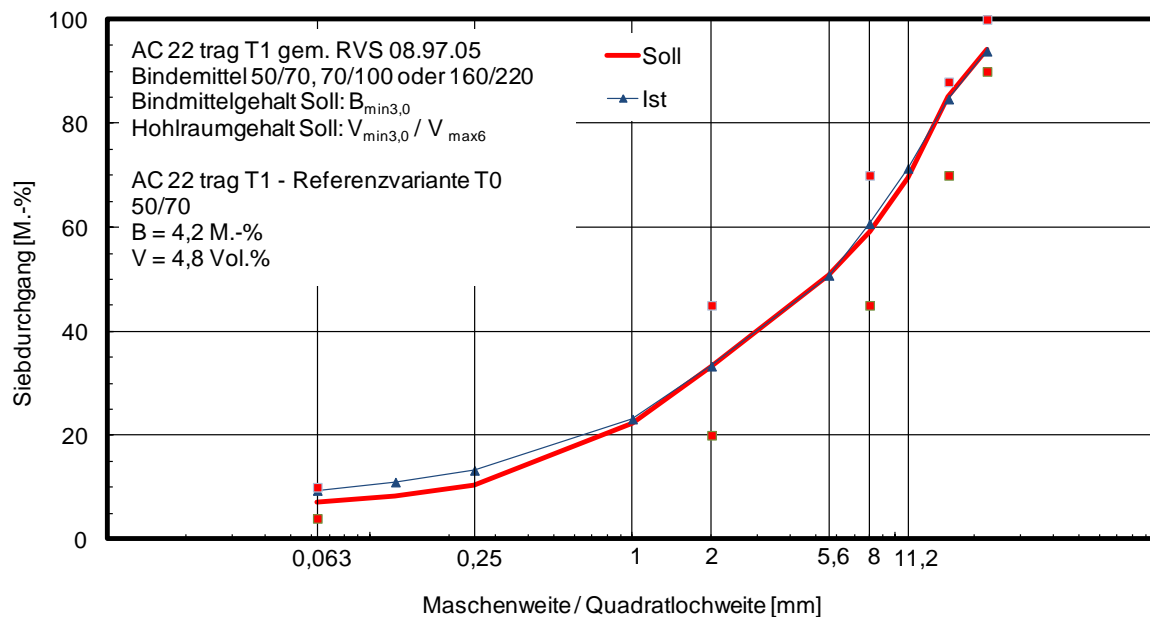
Aus früheren Forschungsprojekten ist bekannt (sh. Renken, 2012; Wistuba, 2012; Gröniger et al., 2009a), dass für die Herstellung eines praxisadäquaten homogenen Asphalt-

mischguts mittels Doppelwellen-Zwangsmischer im Labor eine ausreichend lange Mischdauer in Abhängigkeit von den Asphaltgranulat-Eigenschaften zu gewährleisten ist. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des F&E-Projekts ORAB für die Herstellung des Asphaltmischguts unter Zugabe von Asphaltgranulat eine für alle Asphaltvarianten einheitliche Mischdauer von 120 Sekunden verwendet.

Die Mischgutrezepturen der Asphaltbinderschicht-Variante AC 16 binder und Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat wurden so gewählt, dass die entsprechenden Anforderungen an das Asphaltmischgut gemäß den RVS 08.97.05 Tabelle 19 (AC 16 binder H1) beziehungsweise Tabelle 20 (AC 22 trag T1) eingehalten werden. Die verwendeten Mischgutrezepturen unter Einhaltung der Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 sind in Abbildung 10 (AC 16 binder H1) und Abbildung 11 (AC 22 trag T1) dargestellt.



**Abbildung 10: Mischgutrezeptur der Asphaltbinderschicht-Variante AC 16 binder H1 ohne Asphaltgranulat.**



**Abbildung 11: Mischgutzrezeptur der und Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag T1 ohne Asphaltgranulat.**

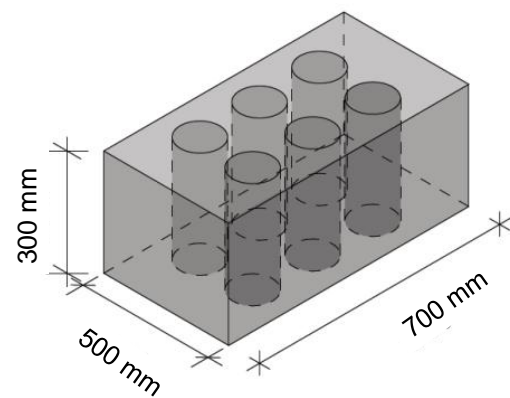
### (b) Asphalt-Probekörper

Der Prozess der Mischgutherstellung umfasst das Bereitstellen und Einwiegen der Gesteinskörnungen, des Asphaltgranulats und des Bindemittels sowie deren anschließende Lagerung und jeweilige Temperierung. Erst dann wird mit dem eigentlichen Mischen der Baustoffkomponenten begonnen.

Die Herstellung der Asphalt-Probekörper erfolgt mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (TP Asphalt-StB, Teil 33). Mit dem am ISBS verwendeten Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht ein ausgezeichneter Erfahrungshintergrund, insbesondere auch zur Herstellung von großformatigen homogenen Asphalt-Probekörpern (siehe hierzu Ringleb, 2012; Arand 1999 und Abbildung 12). Mit Hilfe des Walzsektor-Verdichtungsgeräts der neuesten Generation ist es möglich, Asphalt-Probekörper mit einer Höhe von bis zu 300 mm in ausreichend homogener Qualität zielsicher herzustellen.

Es ist bekannt, dass während der Verdichtung die Gesteinskörner im Asphaltmischgut in Abhängigkeit von der eingebrachten Verdichtungsarbeit und Verdichtungsrichtung eine anisotrope Ausrichtung erfahren. Daher wird das Gebrauchsverhalten von Probekörpern, die aus laborverdichteten Asphalt-Probekörpern gewonnen werden, von der Wahl des Verdichtungsregimes und der gewählten Bohrrichtung der Probekörper aus den Asphalt-

Probekörper maßgeblich beeinflusst (sh. z. B. Ringleb, 2012). Insbesondere vor dem Hintergrund der Wirkungsanalyse von Asphaltgranulat im F&E-Projekt ORAB wurde daher eine Bohrrichtung senkrecht zur Ausrichtungsebene der Körner beim Verdichtungsprozess als zwingend notwendig erachtet. Dazu waren möglichst großformatige, entsprechend dicke homogene Asphalt-Probekörper mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät herzustellen, aus denen vertikal die zylindrischen Probekörper für die Triaxialversuche (Abschnitt 2.2.3) gebohrt werden konnten.



**Abbildung 12: Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probekörper (links), Gewinnung von zylindrischen Asphalt-Probekörpern aus einer Asphalt-Probekörperplatte durch senkrechtes Bohren (rechts).**

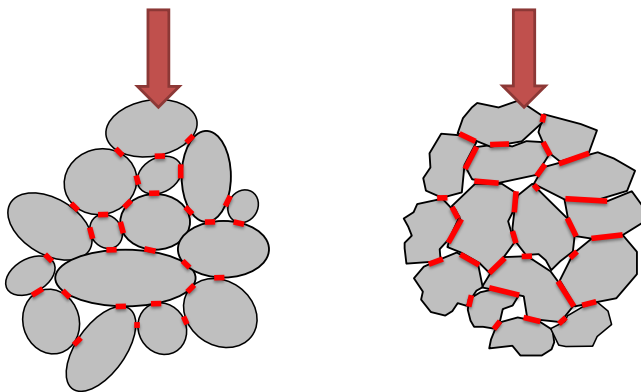
Aus den walzsektor-verdichteten Asphalt-Probekörpern wurden anschließend

- prismenförmige Asphalt-Probekörper mit den Abmessungen 450 mm x 40 mm x 40 mm für die späteren Triaxialversuche (Abschnitt 2.2.3) und
- zylindrische Asphalt-Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und mit einer Höhe von 200 mm für die späteren 4-Punkt-Biegeversuche (Abschnitt 2.2.4)

gesägt und die Raumdichte jedes einzelnen Probekörpers mittels Tauchwägung bestimmt.

## 2.2.2 Strukturcharakterisierung mittels Bildanalyse

Für die Untersuchungen im F&E-Projekt ORAB wurde a priori davon ausgegangen, dass die Eigenschaften des Asphaltgranulats mit teilweise runder Gesteinskörnung das Gebrauchsverhalten von Asphalt (insbesondere Verdichtungs- und Verformungsverhalten) maßgeblich beeinflussen können. Abbildung 13 ist eine Prinzipskizze zur Tragstruktur des verdichteten Mischguts bei Gesteinskörnern mit runder Kornform im Gegensatz zu Gesteinskörnern mit kantiger Konform. Die rot eingezeichneten Kontaktpunkte bzw. -flächen verdeutlichen, dass eine Tragstruktur mit runden Körnern wesentlich weniger Möglichkeiten der Kraftübertragung bietet und dadurch instabiler ist.



**Abbildung 13: Prinzipskizze zur Kraftübertragung im Gesteinskörnungsgerüst: wenige Kontaktpunkte bei runder Gesteinskörnung (links), vergleichsweise große Kontaktflächen bei kantiger Gesteinskörnung (rechts).**

Bei der runden Gesteinskörnung (links) ergeben sich im Gesteinskörnungsgerüst vergleichsweise nur wenige Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Körnern, die zur Kraftübertragung im Asphalt herangezogen werden können. Hingegen bildet sich bei kantiger Gesteinskörnung ein Gesteinskörnungsgerüst aus, das aufgrund der vergleichsweise höheren Anteile an Kontaktflächen besser verzahnt ist und zu einem stabileren System der Kraftübertragung führt. Daraus resultieren im Regelfall vorteilhafte Gebrauchseigenschaften (Zusammenhalt durch mechanische Verzahnung, Verformungsstabilität, usw.).

Die Charakterisierung des Gesteinskörnungsgerüsts (bzw. der Asphaltstruktur nach Abschluss der Verdichtung) kann mittels bildgebender Verfahren unter Berücksichtigung der Anteile unterschiedlicher Kornformen, der Kornorientierung sowie der Anzahl und Verteilung der Kontaktpunkte erfolgen. Zur Anwendung solcher bildgebender Verfahren liegen am ISBS bereits umfangreiche Voruntersuchungen und eine Auswertung von über 100 Literaturquellen vor (sh. Grönniger, 2015; Wiskow, 2014). Folgende stichwortartige Zu-

sammenfassung soll einen generellen Überblick dazu geben – für vertiefende Informationen sei auf die angegebenen Literaturquellen verwiesen.

Yue & Morin (1996) charakterisierten die Struktur von Asphalt mit Hilfe eines Flachbett-scanners und der Software „Mocha“, um morphologische Parameter des Gesteinsquerschnitts aus der verarbeiteten Aufnahme abzulesen und Korngrößenverteilungen (KGV) zu bestimmen. Denison et al. (1997) und Braz et al. (1999) setzten die Computertomografie zur Analyse der Kornstruktur ein. Persson (1998) entwickelte eine Methode zur Charakterisierung der Feinanteile von natürlichen und gebrochenen Gesteinen mittels des Bildanalyse-Systems „IBAS“. Mit Hilfe der Computertomografie und der Software „Image-Tool“ (entwickelt 1997 von der University of Texas Health Science Center in San Antonio) untersuchten Masad et al. (1999, 2002a) und Alvarez et al. (2010, 2011) Probekörper, die mit dem „Superpave Gyrotory Compactor“ (SGC) verdichtet wurden. Dabei studierten sie den Gehalt an Hohlräumen und deren Struktur, um charakteristische Kennwerte für die Hohlraumverteilung, die Gesteinsorientierung und die Korngrößenverteilung abzuleiten. Kuo et al. (1998) und Brzezicki & Kasperkiewicz (1999) führten die automatisierte Bildanalyse von Gesteinsformen nach der Standardmethode der „American Society for Testing and Materials“ (ASTM) ein. Maerz (2004) verwendete die Bildanalyse zur Bestimmung von Gesteinsformen, Mora & Kwan (2000) sowie Masad (2001) für die Sphärität und weiterer Eigenschaften von Zuschlägen. Weiterführend setzten unter anderem Masad et al. (2001) und Lakes et al. (2002) Bildanalyse-Techniken zur Weiterverwendung von bildgestützten Daten für Schubspannungsberechnungen mittels Finite-Elemente-Methode zur Bestimmung des Kompressionsmoduls und der Steifigkeit ein. Es wurde zudem eine mikromechanische Analyse der Steifigkeitsanisotropie in Asphaltmischgut ausgearbeitet (Masad et al., 2002b). Hunter et al. (2004) untersuchten die volumetrischen und mechanischen Eigenschaften eines einzelnen Asphaltmischguts nach Rotations-, Vibrations- und Schlagverdichtung mithilfe einer Digitalkamera und der Image-Pro Plus Software. Hier wurden beispielsweise 40 Bilder pro Verdichtungsmethode aufgenommen. Die dort verwendeten Bilderfassungsvarianten sind in Abbildung 1 dargestellt. Anschließend entstand ein auf der Mikrostruktur basierendes viskoplastisches Kontinuumsmodell für die Deformation von Asphaltbeton bei hohen Temperaturen (Tashman et al., 2005) und es wurde ein Kontinuumsmodell unter Bezugnahme der strukturellen Parameter wie Gesteinsorientierung, Gesteinsformen, Durchlässigkeit und Hohlraumverteilung entwickelt (Tashman et al., 2007). Überdies wurde die Bildanalyse zur Klassifikation von Zuschlägen aufgrund ihrer Form, Winkeligkeit und Textur (Masad & Button, 2000; Al-Rousan et al., 2007) mithilfe



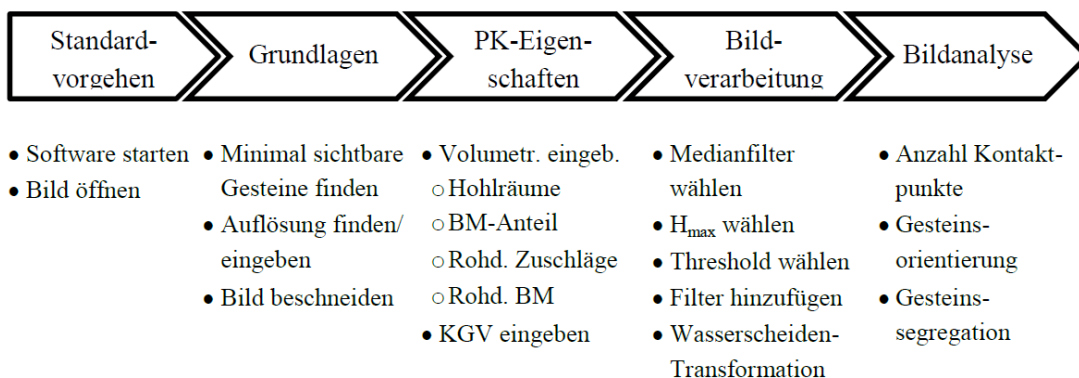
fe des „Aggregate Imaging System“ (AIMS) genutzt (Masad et al., 2004; 2007; Alvarez et al., 2008). Die Entwicklung eines automatisierten „Digital Image Processing“ (DIP)-Algorithmus zur Bildverarbeitung von Computertomografie-Aufnahmen erfolgte durch Zelelew et al. (2008). Ferner nutzten verschiedene Autoren die Bildanalyse als Basis für die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und Finite-Elemente-Methode (FEM) (You & Dai, 2007; You et al., 2008; Adhikari & You, 2011; Zhang & Yang, 2013) – auch in Bezug auf den indirekten Zugversuch (Wang & Hao, 2011). Romero & Masad (2011) leiteten mithilfe der Computertomografie einen Zusammenhang zwischen dem Repräsentativen Volumen-Element (RVE) bzw. den minimalen Abmessungen eines Probekörpers und den mechanischen Eigenschaften von Asphaltbeton ab. Bahia et al. (2012) untersuchten die mechanische Performance (Gebrauchsverhalten) und die Gesteinsstruktur unter Mitverwendung von gemahlenem Reifengummi. Hassan et al. (2013) befassten sich mithilfe der Computertomografie mit der Bestimmung von Hohlräumen und Beschädigungen der Probekörper durch Kompression. Weiterhin erarbeiteten Hamzah et al. (2013) die Auswirkungen des Verdichtungsverfahrens auf die Gesteinsorientierung und Adhikari et al. (2013) die Multiphasen-Charakterisierung von Asphaltbeton mittels Röntgenfluoreszenz. Jüngst machten sich Ozen & Guler (2014) die Bildanalyse zu Nutze, um einen Algorithmus für optimales Thresholding mit unterschiedlichen Dichtefunktionen zu entwickeln. Coenen et al. (2012) merkte an, dass man sich bis zuletzt meist auf die Bewertung der zu ermittelnden Parameter und auf die Bilderfassung selbst konzentriert hat, Entwicklungspotential aber vor allem in der Bildverarbeitung und -analyse liege.

Auf der Grundlage dieser Arbeiten wurde für das F&E-Projekt ORAB eine Methodik zur Analyse der inneren Struktur von Asphalt-Probekörpern ausgewählt und weiterentwickelt, die laborökonomisch verlässliche und aussagekräftige Kenngrößen zur Strukturcharakterisierung liefert. Die Analyse-Technik besteht dabei aus den Teilprozessen der Bilderfassung, der Bildverarbeitung sowie der eigentlichen Bildanalyse. Die üblichen Verfahren zur Bilderfassung sind die Computertomografie als zerstörungsfreie 3D-Variante sowie die Bilderfassung mittels Flachbettscanner, Mikroskop und/ oder Digitalkamera als weniger aufwändige 2D-Variante.

Zur Beschreibung der inneren Gesteinsstruktur von Asphalt wurde speziell nach Kennwerten gesucht, wie z. B. die Anzahl und Länge der Kontakte der Gesteinskörner, die Kontaktorientierung und die Vektormagnitude, welche mit der Konnektivität und der resultierenden Spannungsverteilung in Zusammenhang gebracht werden können. Die Kontakt-

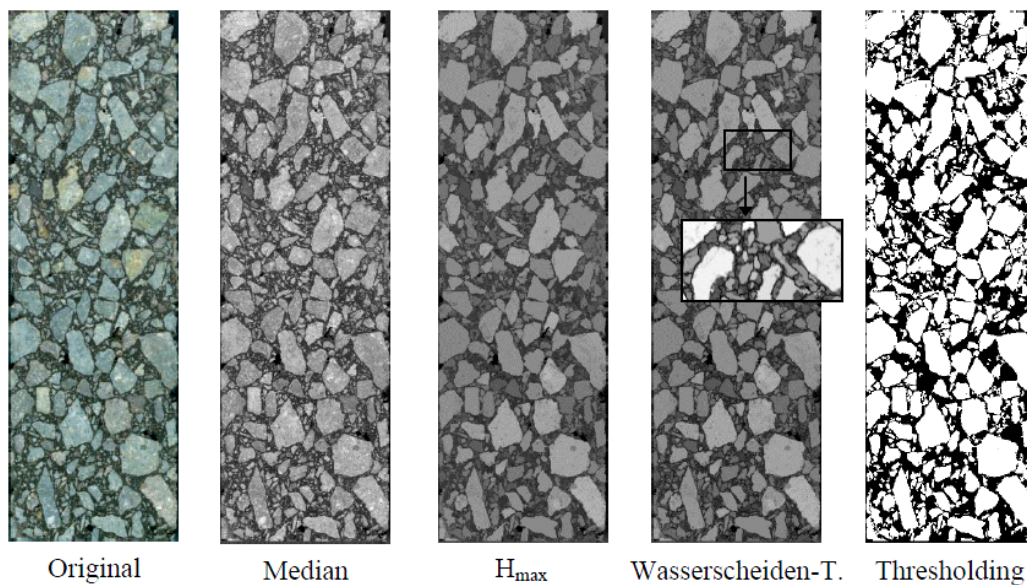
längen, die Kontaktororientierung und die Segregation, welche die Verteilung der unterschiedlichen Korngrößen im Querschnitt beschreibt, sind verantwortlich für die Effektivität der durch das Gesteinsskelett gebildeten inneren Tragstruktur. Zur Bestimmung dieser Parameter, wird die digitalisierte Aufnahme mittels Filterungen bearbeitet und mit optischen Verfahren ausgewertet.

Im Rahmen des F&E-Projekts ORAB wurde die Software „Image Processing and Analysis System“ (Coenen et al., 2012) eingesetzt. Dabei wird zunächst aus dem farbigen Bild eine 8 Bit-Graustufen-Aufnahme mit 256 unterschiedlichen Grauwerten entwickelt. Mittels Medianfilterung,  $H_{\max}$ -Filterung, Wasserscheiden-Transformation, Thresholding und Etikettierung kann das Bild für die Analyse aufbereitet und folglich ausgewertet werden. Den generellen Ablauf in der Anwendung Software zeigt Abbildung 14.



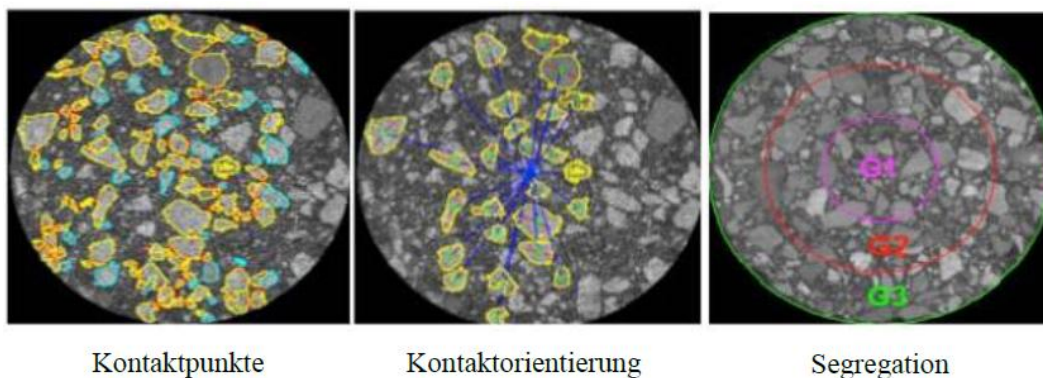
**Abbildung 14: Ablauf der Bildanalyse mit Hilfe der Software „Image Processing and Analysis System“.**

Abbildung 15 zeigt beispielhaft das Ergebnis der schrittweisen Bildaufbereitung an einem prismenförmigen Asphalt-Probekörper (beispielsweise verwendet für 4-Punkt-Biegeversuche).



**Abbildung 15: Strukturanalyse eines Asphalt-Probekörpers mit Hilfe der Software „Image Processing and Analysis System“: Schrittweise Aufbereitung des Bildes durch Filtern.**

Nachfolgende werden aus dem aufbereiteten Bild computergestützt die maßgebenden Kenngrößen zur Charakterisierung der inneren Struktur des Asphalt-Probekörpers ermittelt, bspw. die Anzahl an Kontaktpunkten zwischen den einzeln erkennbaren Gesteinskörnern, die Gesteinssegregation /-verteilung sowie die dominante Orientierung der einzeln erkennbaren Gesteinskörner. Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Visualisierung solcher Kenngrößen als Ergebnis der Digitalbildanalyse.



**Abbildung 16: Visualisierung der Kenngrößen zur Strukturcharakterisierung des Asphalt-Probekörpers als Ergebnis der Digitalbildanalyse (Wiskow, 2014).**

Basierend auf den Studien am ISBS zur Bildanalyse an Asphalt-Probekörpern erfolgten im F&E-Projekt ORAB die Strukturanalysen an 2D-Scans der ebenen Probekörperschnittflächen (oben und unten). Sämtliche Asphalt-Probekörper der 9 Asphalttragschicht-

Varianten (AC 22 trag T1, vgl. Tabelle 3), die für die späteren 4-Punkt-Biegeversuche (vgl. Abschnitt 2.2.4) vorgesehen waren, wurden bildtechnisch erfasst und ausgewertet (aus 16 Asphalt-Probekörpern je Asphalttragschicht-Variante ergeben  $9 \times 16 = 144$  Digitalbilder).

Die 2D-Scans wurden mittels eines handelsüblichen Flachbettscanners mit einer Bildauflösung von 800 DPI erzeugt. Der Algorithmus zur Digitalbildanalyse war auf eine minimale Korngröße von 2 mm beschränkt, so wurden im Rahmen der Strukturcharakterisierung alle Gesteinskörnungen  $> 2$  mm berücksichtigt.

Für die Bildaufbereitung wurden einheitlich die in Tabelle 6 aufgeführten Filtereinstellungen angewendet.

**Tabelle 6: Filtereinstellungen zur Strukturcharakterisierung mittels Digitalbildanalyse**

Filter	Einstellung/Wert
Medianfilter [-]	7
H <sub>max</sub> -Filterung [-]	55
Thresholding [-]	95
Mindestkorngröße [mm]	2

Zur Charakterisierung der inneren Struktur wurden folgende Kenngrößen ausgewertet.

- die Anzahl der sichtbaren Kontaktpunkte zwischen den einzeln erkennbaren Gesteinskörnern [-],
- die Summe der Kontaktlängen zwischen den einzeln erkennbaren Gesteinskörnern [mm] und
- die durchschnittliche Kontaktorientierung [°].

### 2.2.3 Ansprache der Verformungsbeständigkeit

Die Gebrauchseigenschaft der Verformungsbeständigkeit beschreibt den Widerstand des Asphalts gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung. Nach dem GVO Ansatz (vgl. Abbildung 1) ist die Verformungsbeständigkeit an Asphaltbinderschichten zu bestimmen. Dazu wird der Triaxialversuch gemäß ÖNORM EN 12697-25 angewendet.

Mittels Triaxialversuch wird jener Hauptspannungszustand simuliert, der in der Straße bei Radüberfahrt entsteht (Abbildung 17). Bei der Radüberfahrt wird ein Volumenelement im Straßenoberbau in vertikaler Richtung mit einer Druckspannung beansprucht. Als Reakti-

on auf diese Belastung dehnt sich dieses Element in radialer Richtung aus. Durch umgebendes Material wird der betrachtete Volumenkörper allerdings an seiner Querdehnung behindert, wenn auch nicht gänzlich blockiert. Dadurch ergeben sich radiale Druckspannungen, die gemeinsam mit axialen Druckspannungen als Funktion beschrieben werden können.

Aus diesem Grund wird im Triaxialversuch ein zylindrischer Asphalt-Probekörper einem dreiaxigen (triaxialen) Spannungszustand ausgesetzt, der durch das Aufbringen eines zyklischen Axialdrucks und eines statischen oder zyklischen Radialdrucks zur Behinderung der Querdehnung erzeugt wird. Da die Aufbringung eines dynamischen Radialdrucks eine aufwendige Prüfapparatur benötigt, wird im Regelfall dieser Druck während der Prüfung konstant gehalten.

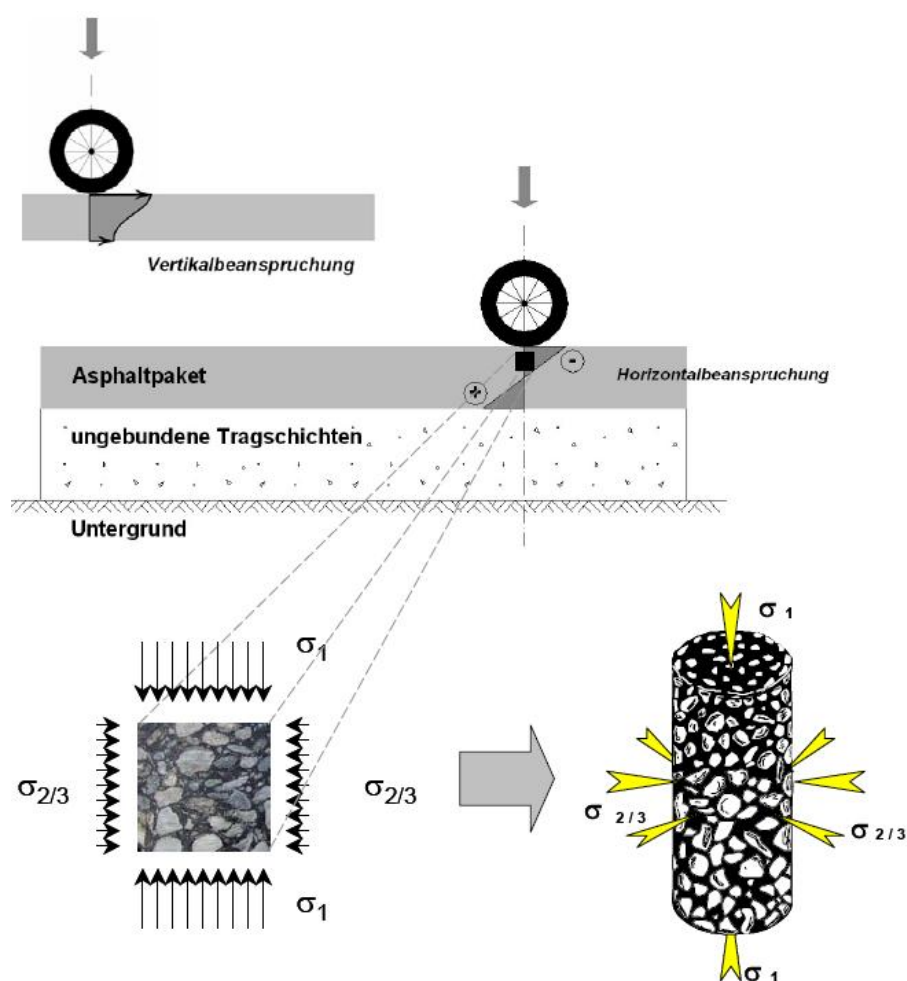
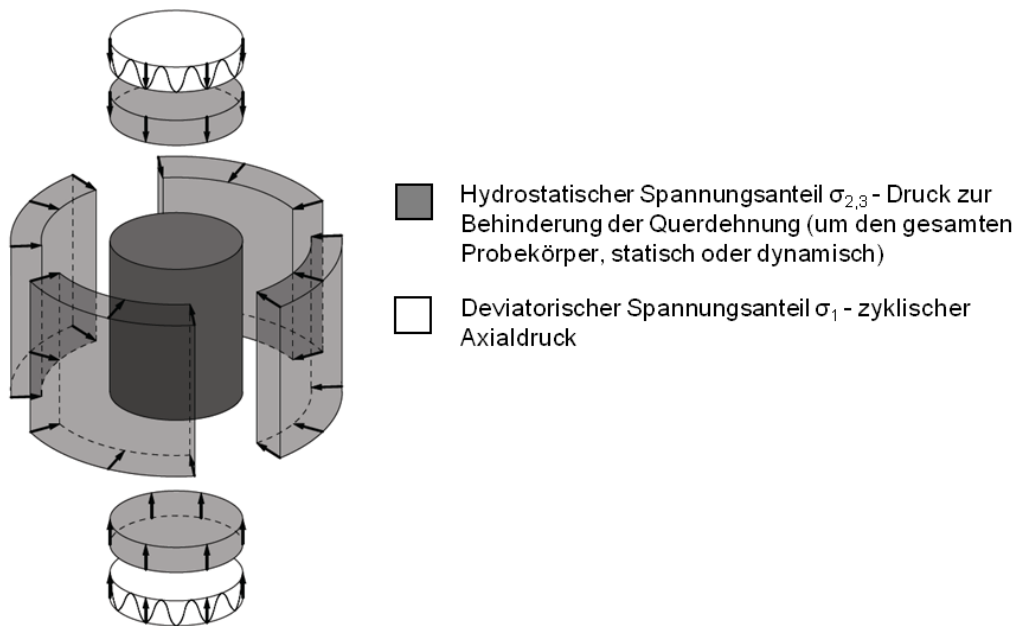


Abbildung 17: Räumlicher Spannungszustand in Asphaltbefestigungen und Übertragung auf den Triaxialversuch (Wellner, 2009).

Den triaxialen räumlichen Spannungszustand, dem der Probekörper während des dynamischen Triaxialversuchs ausgesetzt ist, zeigt Abbildung 18 schematisch. Werden alle Oberflächen mit der gleichen Druckspannung beansprucht, herrscht ein sogenannter hydrostatischer Spannungszustand. Die zusätzlich in axialer Richtung aufgebrachten Spannungen werden als deviatorischer Spannungsanteil bezeichnet und sind für die Entstehung bleibender Verformungen maßgebend.



**Abbildung 18: Schematische Darstellung des räumlichen Spannungszustandes beim Triaxialversuch (Ringleb, 2012).**

Die Versuchsbedingungen gemäß ÖNORM EN 13108-20 für die Triaxialversuche im F&E-Projekt ORAB sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die verwendete Triaxialzelle ist in Abbildung 19 dargestellt.

**Tabelle 7: Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche (gemäß ÖNORM EN 13108-20)**

<b>Prüftemperatur</b>	40 °C
<b>Dauer der Temperierung</b>	120 Minuten
<b>Probekörperdurchmesser</b>	100 mm
<b>Probekörperhöhe</b>	200 mm
<b>Anzahl der Belastungszyklen</b>	25000
<b>zyklische Axialbelastung</b>	sinusförmig
<b>Frequenz der Axialbelastung</b>	3 Hz
<b>Amplitude der Axiallast</b>	0,2 MPa
<b>Behinderung der Querdehnung (konstanter radialer Druck)</b>	0,050 MPa



Abbildung 19: Für die Triaxialversuche verwendeter Prüfeinsatz (ohne Mantelaufsatz).

Die fortlaufende sinusförmige axiale Belastung führt zu einer Stauchung des Probekörpers, der sich zeitgleich seitlich ausdehnt. Dadurch kommt es zu Akkumulierung der in jedem Belastungszyklus entstandenen bleibenden Verformungen (Abbildung 20). Die axialen Verformungen werden kontinuierlich aufgenommen.

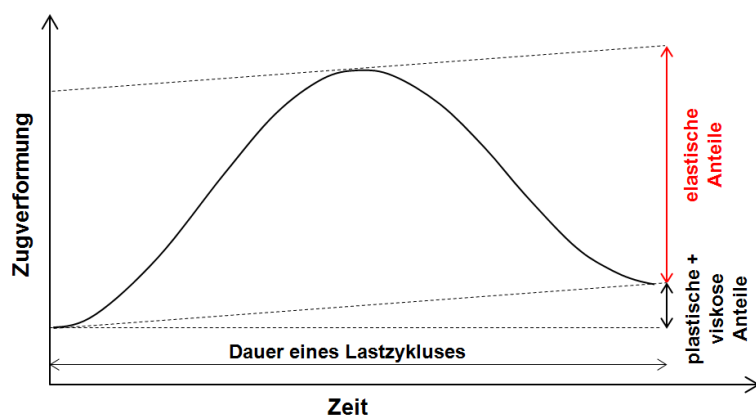


Abbildung 20: Elastische und bleibende (plastische und viskose) Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Triaxialversuch (schematisch).

Für jeden Lastzyklus kann die plastische Druckdehnung nach Gleichung 1 berechnet werden:

$$\varepsilon_{pd,i} = \frac{h_0 - h_i}{h_n} \cdot 1000 \quad [\text{‰}] \quad \text{Gleichung 1}$$

$\varepsilon_{pd,i}$ : akkumulierte bleibende Dehnung nach dem i-ten Belastungszyklus [‰],

$h_0$ : Höhe des Probekörpers am Anfang der Prüfung [mm],

$h_i$ : Höhe des Probekörpers nach i Belastungszyklen [mm].

Die akkumulierten axialen plastischen Dehnungen als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bilden die Kriechkurve. Die Kriechkurve wird mittels Methode der kleinsten Quadrate durch die folgende Funktion beschrieben:

$$\varepsilon_{pd,n} = b \cdot n^a \quad [\text{‰}] \quad \text{Gleichung 2}$$

$\varepsilon_{pd,n}$ : akkumulierte bleibende Dehnung nach n Belastungszyklen [‰],

a, b: Regressionsparameter [-],

n: Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Abbildung 21 zeigt eine typische Kriechkurve für verformungsbeständige Walzasphalte. Diese besteht aus 2 Phasen, wobei in der Phase I die Krümmung stark abnimmt. Phase II weist einen quasilinearen Kurvenverlauf auf. Der Anstieg der Kriechkurve (erste Ableitung) ergibt die Dehnungsrate (Kriechrate), die als ein Maß für die Berücksichtigung der Beständigkeit des Mischgutes gegen bleibende Verformung interpretiert wird. Dies ist mittels Methode der kleinsten Quadrate durch lineare Regression der Kriechkurve in der linearen Phase II zu bestimmen (zwischen 5000 und 20000 Lastwechsel):

$$\varepsilon_{pd,n} = A_1 + B_1 \cdot n \quad [\text{‰}] \quad \text{Gleichung 3}$$

$\varepsilon_{pd,n}$ : plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [‰],

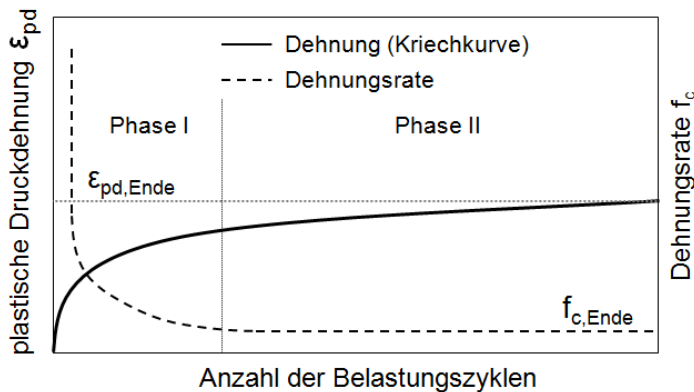
$A_1, B_1$ : Regressionsparameter [-],

n: Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Anschließend wird die Kriechrate  $f_c$  im quasi-linearen Teil der Kriechkurve berechnet:

$$f_c = B_1 \cdot 10^4 \quad \left[ \frac{\mu\text{m/m}}{\text{Lastwechsel}} \right] \quad \text{Gleichung 4}$$





**Abbildung 21: Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Triaxialversuch für einen verformungsbeständigen Asphalt.**

## 2.2.4 Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit

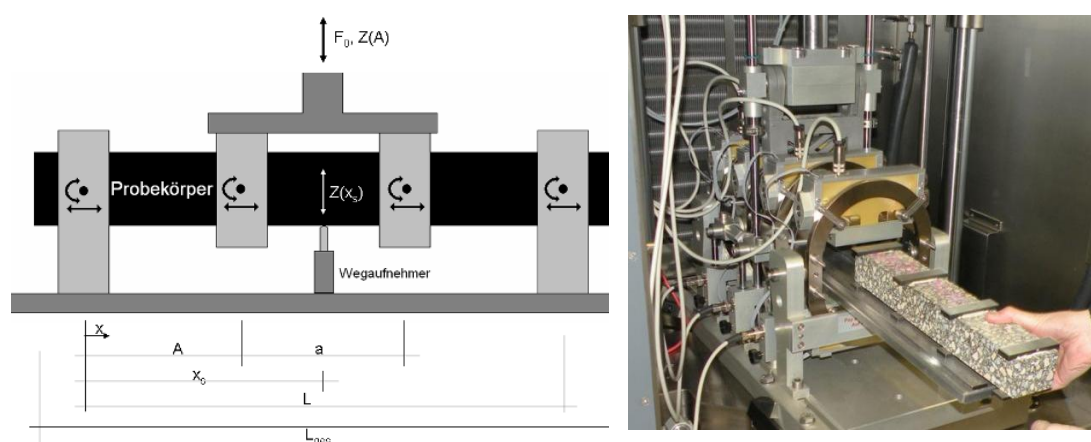
Die Gebrauchseigenschaft der Ermüdungsbeständigkeit beschreibt den Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse. Nach dem GVO Ansatz (vgl. Abbildung 1) ist die Ermüdungsbeständigkeit an Asphalttragschichten zu bestimmen. Dazu werden die Steifigkeit und das Ermüdungsgesetz mittels 4-Punkt-Biegeversuch gemäß ÖNORM EN 12697-24 ermittelt.

### (a) Steifigkeit

Die Steifigkeit kann als viskoelastische Kenngröße zur Berechnung der temperatur- und belastungszeitabhängigen Spannungs-Dehnungsbeanspruchungen in Asphaltsschichten definiert werden. Zur Ermittlung eines Steifigkeitsmoduls im 4-Punkt-Biegeversuch wird der prismenförmige Asphalt-Probekörper (450 mm x 40 mm x 40 mm) an zwei äußeren Auflagern gelenkig gelagert, während über zwei innere Belastungspunkte eine Verschiebung sinusförmig eingetragen wird. Abbildung 22 (links) zeigt die Prinzipskizze mit den wichtigsten Abmessungen sowie den vom ISBS verwendeten Prüfeinsatz. Bei Verwendung dieses Prüfeinsatzes sind die Vorgaben der Europäischen Norm vollständig erfüllt, insbesondere ist durch die zwängungsfreie Einspannung an den Viertelpunkten gewährleistet, dass der Probekörper zu Beginn und während der Steifigkeits- oder Ermüdungsversuche nicht verdrillt und dadurch geschädigt wird.

Die Prüfeinrichtung ist in eine Universal-Prüfmaschine integriert. In der Temperaturkammer können Versuche bei konstanten Temperaturen zwischen  $-25^{\circ}\text{C}$  und  $+60^{\circ}\text{C}$

durchgeführt werden. Die äußeren Auflager sind auf Linear-Gleitlagern auf Schienen verschiebbar, die mit der Grundplatte der Prüfmaschine verschraubt sind. Die inneren Auflager, ebenfalls auf Schienen verschiebbar, sind mit dem Lastgestänge mit Hydraulik-Zylinder verbunden, über das die geforderte Verschiebung eingetragen wird. Zur Messung der eingetragenen Kräfte ist ein Kraftaufnehmer ( $\pm 50$  kN) außerhalb der Temperaturkammer zwischen Lastgestänge und Hydraulik-Zylinder integriert. Die vertikale Verschiebung wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers direkt an der Mitte des Probekörpers in der Lastachse gemessen.



**Abbildung 22: Prinzipskizze der 4-Punkt-Biegevorrichtung (links), vom ISBS verwendeter Prüfeinsatz (rechts).**

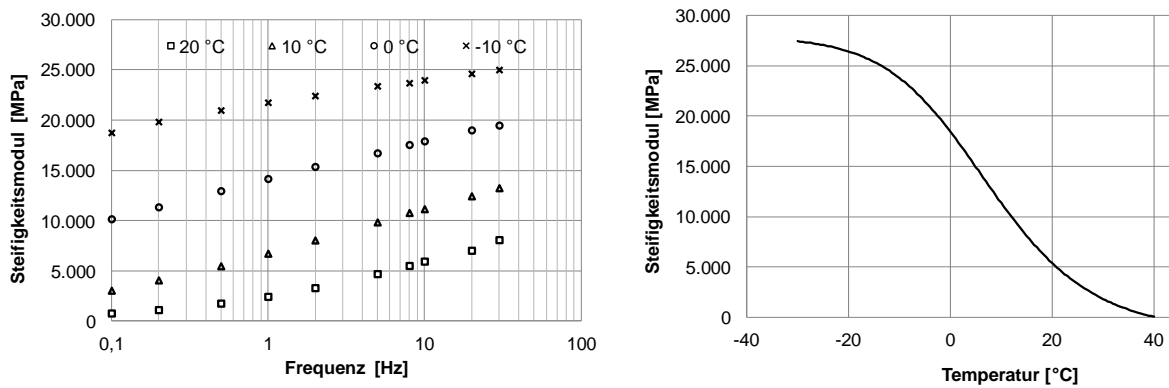
Über die beiden inneren Klemmvorrichtungen wird eine vertikale Verschiebung  $Z(A)$  eingeleitet. An der Unterseite des Probekörpers wird die tatsächliche vertikale Auslenkung  $Z(x_s)$  gemessen. Die Klemmvorrichtungen müssen symmetrisch zur Mitte des Probekörpers ausgerichtet sein. Der Abstand zwischen den inneren und äußeren Klemmen  $A$  sollte so gewählt werden, dass  $0,25 < A/L < 0,4$  gilt.

Die aufzubringende vertikale Verschiebung wird so gewählt, dass die resultierenden elastischen horizontalen Dehnungen  $\varepsilon_{el}$  in etwa bei  $50 \mu\text{m}/\text{m}$  liegen.

Die 4-Punkt-Biegeversuche werden bei den in Tabelle 8 angegebenen Temperatur-Frequenz-Sweeps durchgeführt. Die Ergebnisse sind die Steifigkeitsmodul-Frequenzfunktion in Form der Isothermen-Darstellung (Abbildung 23, links) und die daraus ermittelte Masterkurve (Abbildung 23, rechts).

**Tabelle 8: Versuchsparameter für den Steifigkeitsversuch mittels 4-Punkt-Biegeversuch gemäß ÖNORM EN 12697-24**

<b>Asphaltmischgut</b>	AC 22 trag T1
<b>Prüftemperatur [°C]</b>	+20; +10; 0; -10
<b>Belastung [µm]</b>	50 (weggeregelt)
<b>Belastungsfrequenz [Hz]</b>	0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8, 10, 20 und 30
<b>Kenngößen</b>	Steifigkeitsmodul $ E  = f(\text{Temperatur } T, \text{ Frequenz } f)$ in [MPa]
	Masterkurve



**Abbildung 23: Steifigkeitsmodul-Frequenzfunktion eines Asphalttragschichtmischguts in Form der Isothermen-Darstellung (links), und die daraus abgeleitete Masterkurve (rechts), ermittelt im 4-Punkt-Biegeversuch.**

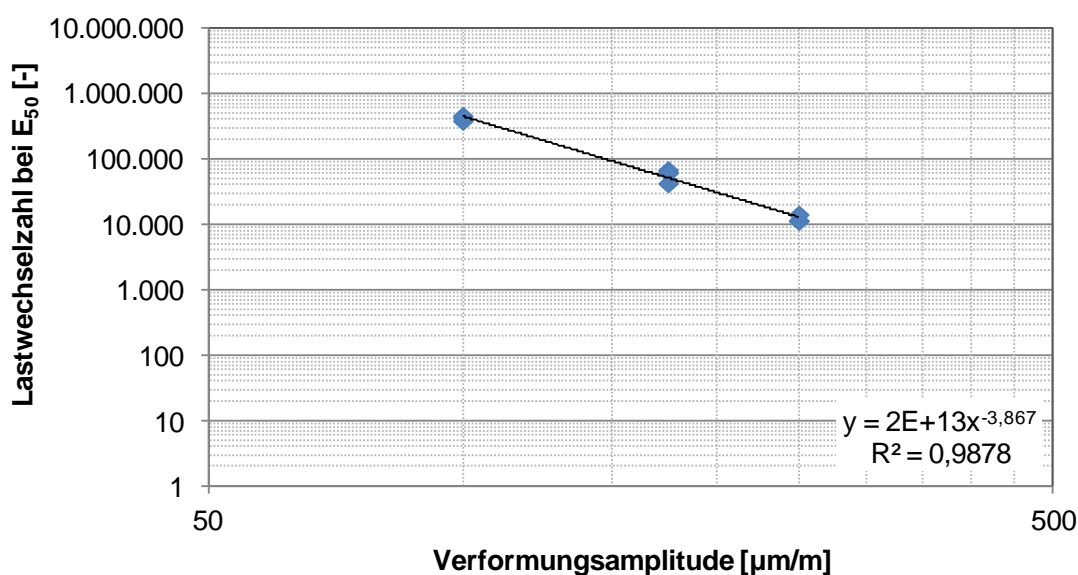
**(b) Ermüdung**

Die Prüfung der Ermüdungsbeständigkeit erfolgt analog zur Steifigkeitsprüfung mit derselben Apparatur, allerdings mit höherer Amplitude, sodass der Probekörper mit zunehmender Lastwechselzahl geschädigt wird. Zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion werden 3 unterschiedliche Oberspannungen so gewählt, dass die anfänglichen elastischen Anfangsdehnungen im Bereich von 0,05 bis 0,30 ‰ sowie die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums (Abfall des Steifigkeitsmoduls um 50 %) zwischen  $10^3$  und  $10^6$  Lastwechseln liegen.

Die 4-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Ermüdungsbeständigkeit wurden im F&E-Projekt ORAB unter den in Tabelle 9 angegebenen Prüfbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind die Ermüdungslastwechselzahl  $N_{50}$  (50%-Steifigkeitsabfall) und die materialspezifische Ermüdungsfunktion. Weiterhin werden die beim 100. Lastwechsel gemessene Steifigkeit  $S_{Mix}$  und Phasenwinkel  $\varphi$  angegeben.

**Tabelle 9: Versuchsparameter für den Ermüdungsversuch mittels 4-Punkt-Biegeversuch gemäß ÖNORM EN 12697-24**

Asphaltmischgut	AC 22 trag T1
Prüftemperatur [°C]	+20
Belastungsfrequenz [Hz]	30
Kenngrößen	Bestimmung der Lastwechselzahl bis zum Versagen $N_{50}$
	Bestimmung der Ermüdungsfunktion $N = k \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_0}\right)^n$ mit den materialspezifischen Parametern k und n

**Abbildung 24: Beispiel für eine Ermüdungsfunktion eines Asphalttragschichtmischguts ermittelt im 4-Punkt-Biegeversuch.**

## 2.2.5 Rechnerische Ermittlung der Lebensdauer

### 2.2.5.1 Vorgehensweise

Die Schichtdickenbemessung von Straßenaufbauten kann grundsätzlich nach zwei Methoden erfolgen: nach der empirischen Methode und nach der analytischen Methode.

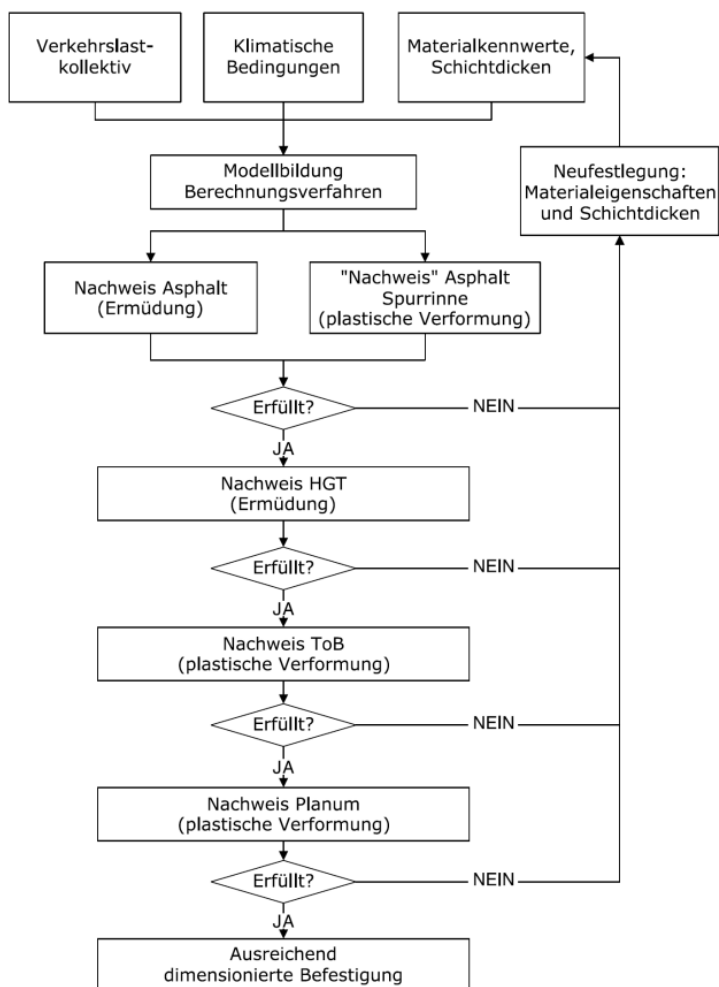
In Österreich ist die empirische Methode (Litzka, 1987) im Technischen Regelwerk in Form der RVS 03.08.63 abgebildet. Diese erlaubt die Auswahl einer Oberbauvariante auf der Grundlage der prognostizierten Verkehrsbelastung (BNLW), nicht aber eine rechnerische Dimensionierung der Schichtdicken in Abhängigkeit von den Materialparametern.

Bei der analytischen Methode wird der Straßenoberbau in einem mechanistischen Modell abgebildet und die Reaktion der Schichten (unter Berücksichtigung ihrer Materialeigenschaften) auf äußere Belastungen (Verkehr, Witterung) simuliert. In Österreich ist eine Richtlinie zur analytischen Oberbaubemessung in Vorbereitung. Eine analytische Methode für die Oberbaubemessung im österreichischen Regelwerk war daher zum Zeitpunkt der Schlussberichtserstellung nicht abgebildet.

Die im F&E-Projekt ORAB angewandte analytische Bemessungsmethode basiert auf den in Österreich bisher praktizierten Ansätzen zur Mehrschichten-, Ermüdungs- und Schadensakkumulationstheorie (vgl. Litzka et al., 1996; Molzer, 1996; Wistuba, 2002) und den deutschen Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09). Es wurde eine Weiterentwicklung genutzt, die in jüngster Vergangenheit am ISBS realisiert wurde. Die Weiterentwicklung besteht darin, dass nicht mehr (wie bisher) nur eine beschränkte Anzahl von charakteristischen Bemessungsfällen berücksichtigt wird (12 Temperaturperioden), deren jeweilige Häufigkeit des Vorkommens abgeschätzt wird. Stattdessen wird in jedem Punkt des Oberbaus eine stundengenaue Ganglinie der Temperatur- bzw. der Steifigkeit (basierend auf meteorologischen Standardmessgrößen) gebildet und mit der stundengenauen Ganglinie der Verkehrslasten überlagert. Diese Vorgehensweise bringt eine deutliche Steigerung der Berechnungs- bzw. Prognosegenauigkeit (siehe Wistuba & Walther, 2012).

Als Eingangsgrößen in die rechnerische Dimensionierung dienten u. a. die aus den Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen (vgl. Abschnitt 2.2.4) erhaltenen Materialkenngrößen bzw. -gesetze.

Das Ablaufschema einer Dimensionierungsrechnung ist in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen gemäß den RDO Asphalt 09.**

### 2.2.5.2 Ermüdungsnachweis

Der Nachweis des Ermüdungsverhaltens von Asphalt beruht üblicherweise auf einer Begrenzung der Biegezugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht. Zur Berechnung der maßgebenden Dehnung an der Unterseite der Asphalttragschicht wird die linear-elastische Mehrschichtentheorie angewendet. Der Fahrbahnoberbau wird dabei in homogene Schichten je 1 cm Dicke eingeteilt. Jede Schicht wird durch die Eigenschaften Dicke, Elastizitätsmodul, Querdehnzahl und Verbund zu der darunter liegenden Schicht beschrieben. Für die Berechnung der auftretenden Beanspruchungen aus der Verkehrslast wird im Modell die Radlast durch eine runde, auf der Oberfläche vertikal angreifende Flächenlast (Topflast) angenähert.

Über die angestrebte Lebensdauer und das durchschnittliche Verkehrsaufkommen des Schwerverkehrs (SV/h, unterteilt in Lastkollektive nach Tabelle 11) wird jene Anzahl prognostiziert, wie oft ein bestimmter Belastungsfall innerhalb der Lebensdauer auftreten wird (vorh N). Es ergeben sich  $24 \text{ (h)} \cdot 365 \text{ (d)} \cdot 20 \text{ (a)} \cdot 11 \text{ (LK)} \approx 2.0 \text{ Mio.}$  Bemessungsfälle, für welche die Dehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zu berechnen sind.

Anhand der mittels 4-Punkt-Biegeversuchen an dem entsprechenden Asphalttragschichtmaterial ermittelten Ermüdungsfunktion (vgl. Abschnitt 2.2.4) wird die für jede berechnete Dehnung ertragbare zulässige Lastwechselzahl (zul N) abgeleitet, wobei zusätzliche Korrekturfaktoren Berücksichtigung finden:

$$\text{zulN} = \theta \cdot C_1 \cdot \varepsilon_{el}^{C_2} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

- zul N    zulässige Lastwechselzahl bis zur Rissentstehung in den Asphalttragschichten
- $\varepsilon_{el}$     maßgebende elastische (steifigkeitsabhängige) Dehnung an der Unterseite der Asphalttragschicht
- $C_1$     Materialkennwert, aus der Ermüdungsfunktion bestimmt (4 Punkt-Biegeversuch @ 20°C)
- $C_2$     Materialkennwert, aus der Ermüdungsfunktion bestimmt (4 Punkt-Biegeversuch @ 20°C)
- $\theta$     Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Ermüdungsfunktion und zur Kopplung an empirische Bauweisen gemäß Oberbaukatalog (RVS 03.08.63); hier:  $\theta = 2.500$

Für den Ermüdungsnachweis wird von der Hypothese nach Miner ausgegangen, derzufolge die bei unterschiedlichen Primärwirkungen ertragenen Lastwechsel berücksichtigt und zur Grenzlastwechselzahl akkumuliert werden:

$$\sum_{\text{MINER}} = \frac{\text{vorh } N_a}{\text{zul } N_a} + \frac{\text{vorh } N_b}{\text{zul } N_b} + \frac{\text{vorh } N_c}{\text{zul } N_c} + \dots + \frac{\text{vorh } N_n}{\text{zul } N_n} = \sum \frac{\text{vorh } N_i}{\text{zul } N_i} \leq 1 \quad \text{Gleichung 6}$$

Der Nachweis der Ermüdungsresistenz der Befestigung gilt als erfüllt, solange die Summe der Quotienten in Gleichung 6 kleiner bzw. gleich 1 ist.

### 2.2.5.3 Berechnungsannahmen

#### (a) Eingangsgröße Verkehr

Die der Oberbaubemessung zugrunde gelegten Verkehrsdaten (vgl. Tabelle 10) wurden auf Basis des Disaggregierungs-Verfahrens nach Pinkofsky (2005) zu Stundenwerten überführt und so eine stundengenaue Verkehrsganglinie erzeugt. Über die Zuordnung

eines Straßenabschnitts zu einem Jahres-, einem Wochen- und dem (bzw. den) jeweiligen Tagesganglinientyp(en) wurde die Verkehrsstruktur in generalisierter Form dargestellt. Eine Disaggregation in einzelne Stundenwerte wurde wie folgt realisiert:

- Durch Multiplikation der Prozentwerte des Jahresganglinientyps (Abbildung 26) mit dem Durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) wurden Wochenwerte abgeleitet.
- Durch Multiplikation der Prozentwerte des Wochenganglinientyps (Abbildung 27) mit den einzelnen Wochenwerten wurden Tageswerte abgeleitet.
- Durch Multiplikation der Prozentwerte des jeweiligen Tagesganglinientyps (Abbildung 28) mit den einzelnen Tageswerten wurden Stundenwerte abgeleitet.

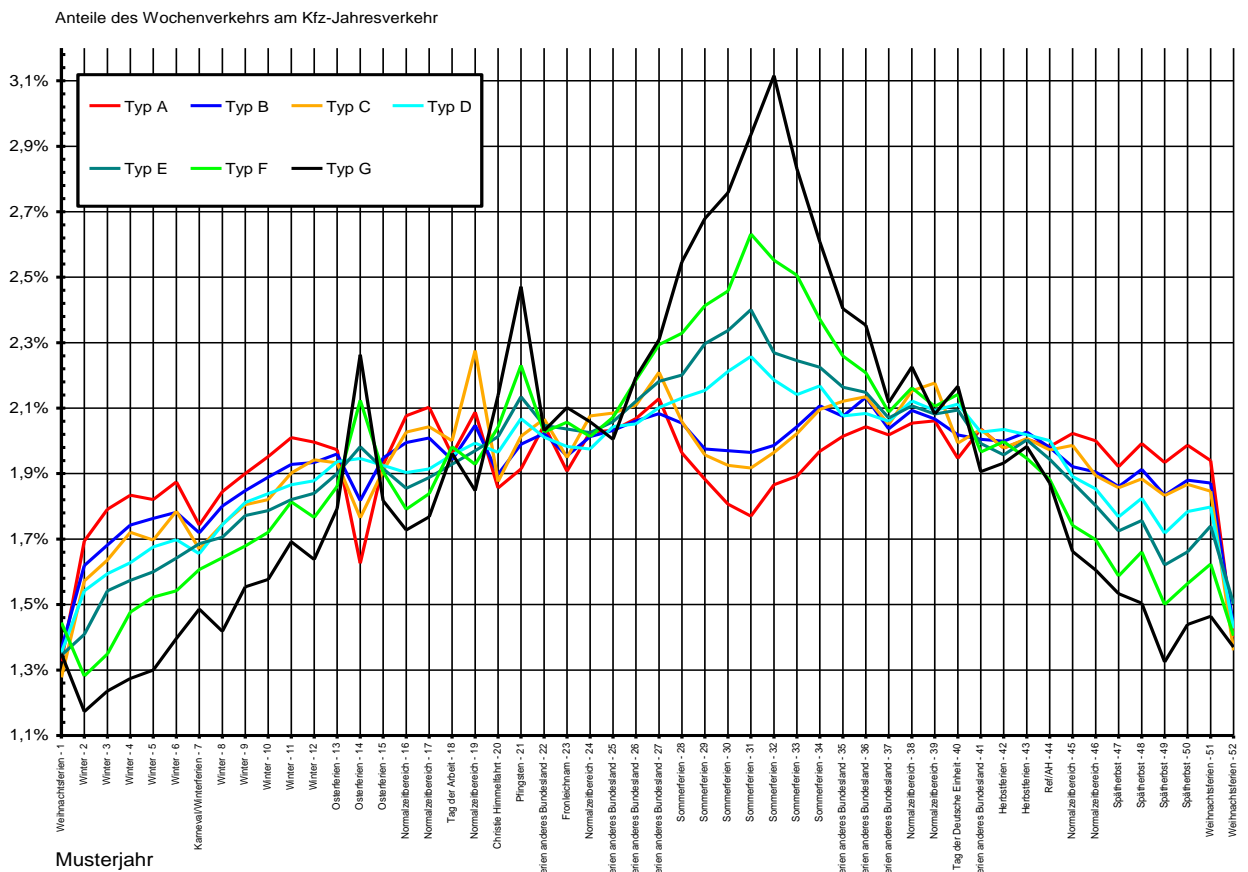


Abbildung 26. Jahresganglinientypen des Kfz-Verkehrs (Beispiel).



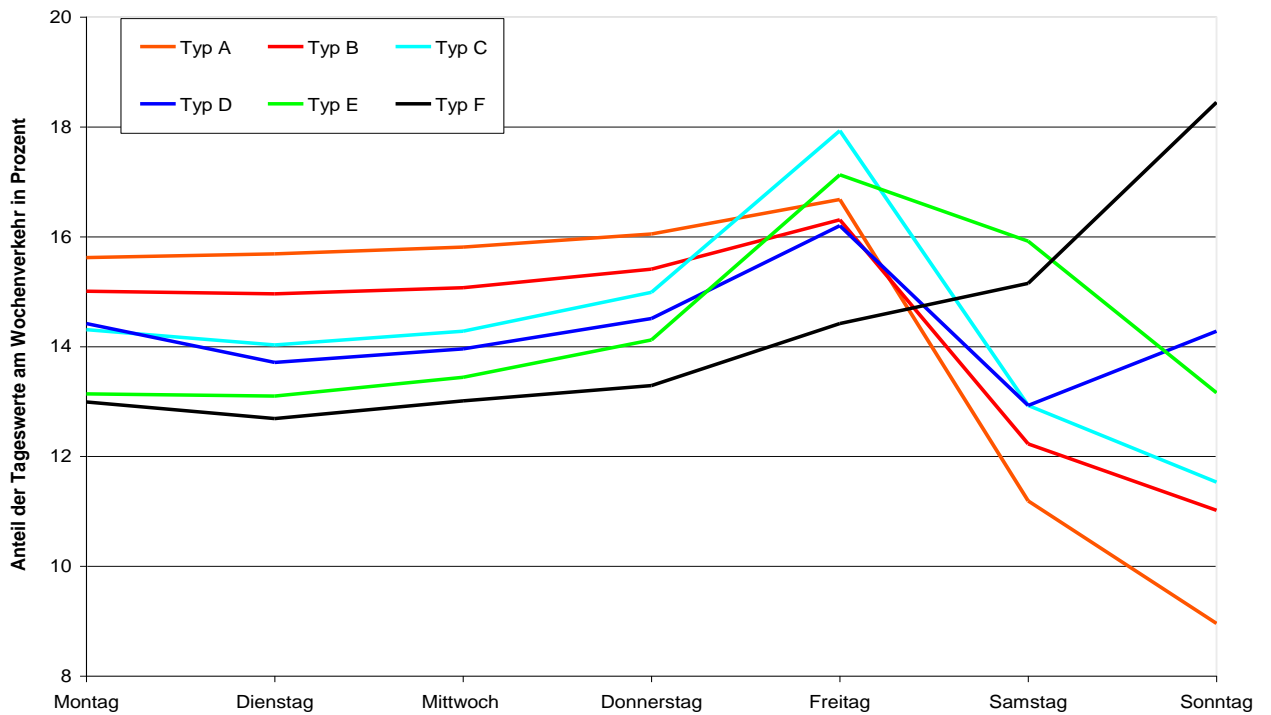


Abbildung 27. Wochenganglinientypen für den Kfz-Verkehr (Beispiel).

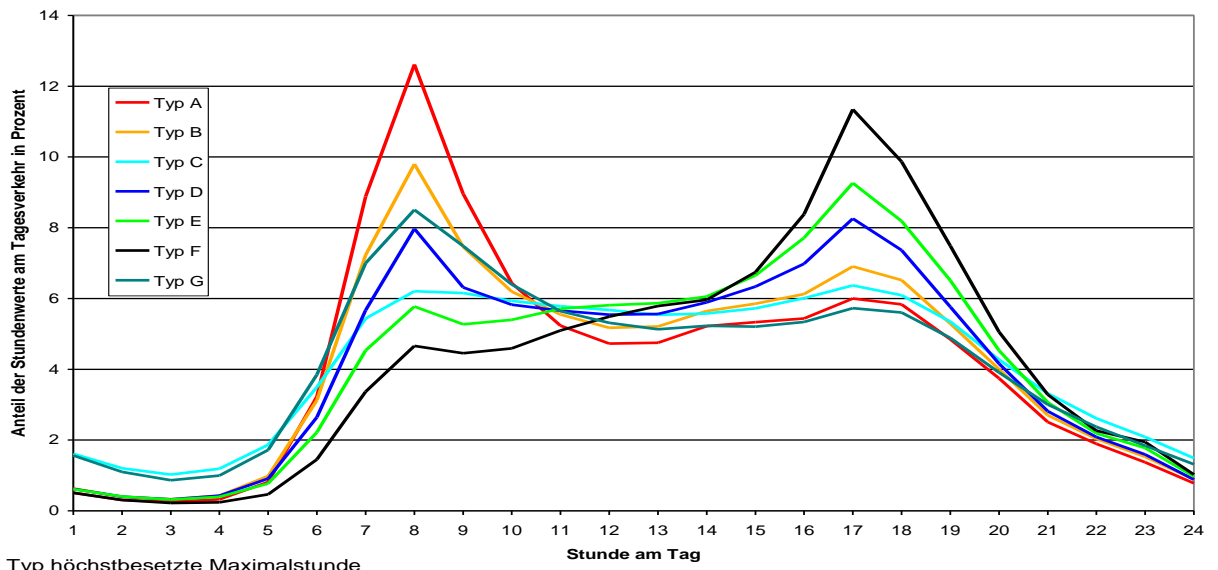


Abbildung 28. Tagesganglinientypen für den Kfz-Verkehr am Beispiel Montag (Beispiel).

Für die Variantenstudie wurden so aus den unten aufgeführten Ganglinientypen stundenbasierte Jahrespanglinien für die zu berücksichtigenden Anschlussstellen, unter Annahme des Ganglinientyps A, erzeugt. Nachfolgend sind beispielhaft für Jahres-, Wochen- und

Tagesgang typisierte Ganglinien mit ihrer prozentualen Häufigkeit graphisch dargestellt. Eine Zusammenfassung der Eingangsgrößen zeigt Tabelle 10.

**Tabelle 10: Eingangsgrößen in die Bemessung**

Schwerverkehr 2016 [SV/24h]	2.390
Fahstreifenfaktor $f_1$ [-]	0,4
Fahstreifenbreitenfaktor $f_2$ [-]	1,0
Steigungsfaktor $f_3$ [-]	1,0
jährliche Zunahme des Schwerverkehrs $p$ [%]	3
Achszahlfaktor $f_A$ [-]	4,5
Nutzungszeitraum $N$ [a]	20
Gewählte Eingangsgrößen für die Oberbaubemessung:	
Achslastkollektiv	BAB Fernverkehr
Temperatur	abgeleitet aus Straßenoberflächentemperaturen
Ganglinientyp Verkehr	A (für Jahr, Woche und Tag)

Die unterschiedlichen Achslasten im Fahrzeugkollektiv wurden durch 11 Achslastklassen berücksichtigt, deren Anteil am Gesamtverkehr in Abhängigkeit der Straßenklasse definiert ist (Tabelle 11). In Tabelle 12 sind die resultierenden zu berücksichtigenden Lastübergänge in den definierten Lastklassen angegeben.

**Tabelle 11: Achslastklasse und zugeordnete Häufigkeit (Uhlig, 2007)**

Achslastklasse (statische Last) [t]											
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	≥20
Bezeichnung	Häufigkeit [%] der jeweiligen Achslastklasse										
BAB Fernverkehr *)	2,8396	21,467	26,485	30,720	11,703	4,9098	1,6540	0,2087	0,0126	0,0007	0,0001

\*) Fernverkehr entspricht der Verbindungsfunktionsstufe 0 und I, „kontinental / großräumig“ nach den Richtlinien zur Anlage von Landstraßen RAL bzw. Richtlinien zu Anlage von Autobahnen RAA

**Tabelle 12: Resultierende Anzahl an Lastübergängen im Bemessungszeitraum (20 Jahre)**

Lastklasse	Achslast [t]	Anzahl Achsübergänge [-]
LK 1	2	1198103
LK 2	4	9057500
LK 3	6	11174644
LK 4	8	12961377
LK 5	10	4937892
LK 6	12	2071576
LK 7	14	697867
LK 8	16	88056
LK 9	18	5316
LK10	20	295
LK11	22	42

**(b) Dicke des frostsicheren Oberbaus**

Die frostsichere Mindestdicke des Oberbaus wurde mit 75 cm festgelegt. Gemäß RDO Asphalt 09 kann die Dicke des frostsicheren Oberbaus nach der in den deutschen Richtlinien zur Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) beschriebenen Methode ermittelt werden. Tabelle 13 zeigt die hier getroffenen Annahmen.

**Tabelle 13: Mindestdicke bzw. Mehr- und Minderdicken zur Ermittlung der Dicke des frostsicheren Oberbaus gemäß RStO 12**

	Kategorie	Mindestdicke frostsicherer Oberbau / Mehr- bzw. Minderdicke [cm]
Empfindlichkeitsklasse des Bodens	F3 (in Belastungsklasse Bk100)	65
Frosteinwirkungszone	Zone III	+5
Kleinräumige Klimaunterschiede	keine besonderen Einflüsse	±0
Wasserhältnisse	Grundwasser zeitweise höher als 1,5 m unter Planum	+5
Lage der Gradienten	Einschnitt Damm	+5
Entwässerung in Randbereichen	Rinnen und Abläufe	-5

**(c) Eingangsgröße ungebundene Schichten**

In Österreich gilt gemäß den RVS 03.08.63 als Abnahmekriterium ein minimaler  $E_{V1}$ -Wert von 35 MPa am Unterbauplanum (Verformungsmodul abgeleitet mittels statischem Lastplattenversuch aus der Druck-Setzung-Linie nach der Erstbelastung). Dies entspricht einem E-Modul von ca. 70 MPa als Schichtsteifigkeit des Unterbaus als Eingangsgröße in die Bemessung. In Anlehnung an Metelmann (1972) wird im österreichischen Modell zur

analytischen Oberbaubemessung der minimale dynamische Modul des Untergrunds in Abhängigkeit vom statischen Erstbelastungsmodul abgeschätzt aus:

$$E_{\text{dyn,UG,Abnahmeprüfung}} = 2 \cdot E_{V1} = 70 \text{ MN/m}^2.$$

Folgende Verhältnisse der jeweiligen Steifigkeiten für ungebundene Schichten werden berücksichtigt:

**Tabelle 14: Verhältnisse der jeweiligen Steifigkeiten für ungebundene Schichten**

Schicht 1	Schicht 2	Verhältnis der E-Moduln
30 cm ungebundene untere Tragschicht	Untergrund	2,0
ungeb. obere TS: 20 cm Rundkörnung	ungeb. untere TS	1,7
ungeb. obere TS: 20 cm Kantkörnung	ungeb. untere TS	1,9
ungeb. obere TS: 15 cm ZGKK	ungeb. untere TS	2,5

Für die Berechnungsannahmen im Rahmen des F&E Projekts ORAB resultieren daraus folgende E-Moduln als Eingangsgrößen in die Oberbaubemessung:

$$\text{E-Modul Untergrund } E_{\text{dyn,UG,Abnahmeprüfung}} = 70 \text{ MPa,}$$

$$\text{E-Modul ungebundene untere Tragschicht } E_{\text{dyn,ungeb.u.TS}} = 140 \text{ MPa,}$$

$$\text{E-Modul ungebundene obere Tragschicht } E_{\text{dyn,ungeb.o.TS}} = 238 \text{ MPa.}$$

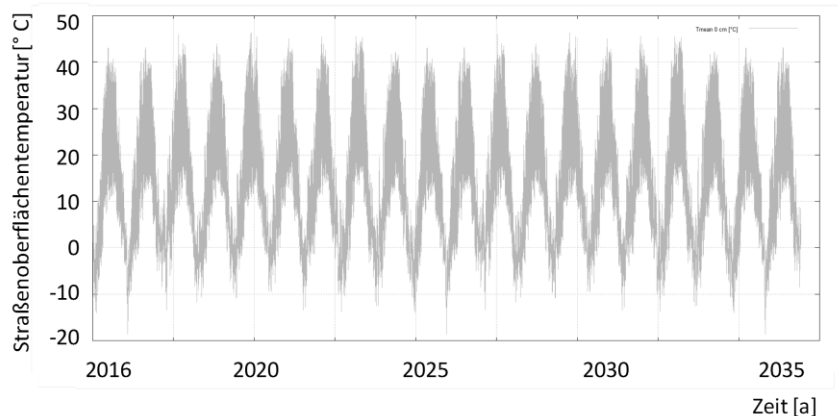
#### (d) Eingangsgröße Temperatur

Für den Zeitraum 1996 bis 2005 (10 Jahre) wurden die Straßenoberflächentemperaturen und die Straßenkörpertemperaturen auf stündlicher Basis auf Grundlage der Energiebilanz und des expliziten Differenzenverfahrens berechnet (Vorgehensweise siehe Wistuba, 2002; Walther & Wistuba, 2012).

Als Eingangsgrößen in die Berechnung der Temperaturverteilungen dienten die stundengenauen Ganglinien der meteorologischen Messgrößen Temperatur, Globalstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Die Wetterdaten wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die Wetterstation Wien Hohe Warte bezogen.

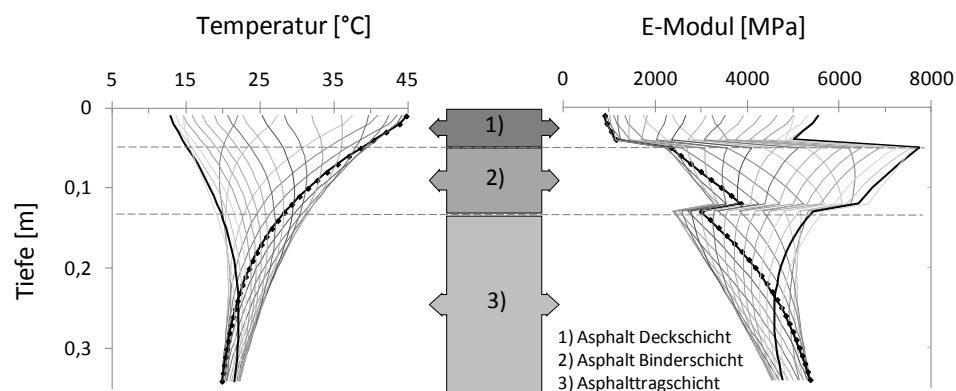
Der Bemessungszeitraum für bituminös gebundene Straßenbefestigungen gemäß RVS 03.08.63 beträgt 20 Jahre. Aus diesem Grund wurden die für 10 Jahre berechneten Temperaturverteilungen durch Aneinanderreihung der Datenreihe auf einen Zeitraum von 20 Jahren extrapoliert. Nachfolgend ist exemplarisch die resultierende, stundengenaue

Ganglinie der Straßenoberflächentemperatur für den Bemessungszeitraum von 20 Jahren dargestellt.



**Abbildung 29. Straßenoberflächentemperaturen für 20 Jahre Bemessungszeitraum**

Auf der Grundlage der Straßenoberflächentemperaturen, der daraus berechneten Straßenkörpertemperaturen und der materialabhängigen Steifigkeits-Temperatur-Funktionen kann die Steifigkeitsverteilung über die Schichten des Straßenoberbaus zu jeder Stunde ermittelt werden. Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die stündlichen Temperaturverteilungen im Oberbau an einem bestimmten Tag (links) und die dazu korrespondierenden E-Moduln der gewählten Asphaltmischgutsorten.



**Abbildung 30. Temperaturverteilung im Oberbau und korrespondierende E-Moduln während 24 Stunden (Beispiel).**

Durch diese Vorgehensweise kann der Steifigkeitsverlauf in jedem Punkt des Oberbaus über den gesamten Bemessungszeitraum in stundengenauer Auflösung generiert und die Verkehrsbeanspruchung stundengenau mit der zu jeweiligen Stunde vorherrschenden Steifigkeit gekoppelt werden. So erlaubt die Ableitung des temperaturabhängigen E-

Modulverlaufs mittels 4-Punkt-Biegeversuch eine detaillierte Erfassung resultierender Beanspruchungszustände in Bezug auf Verkehr und temperaturinduzierte Spannungen.

### 2.2.5.4 Untersuchte Oberbauvariante

In Abbildung 31 ist die berücksichtigte Oberbau-Variante dargestellt. Dabei wird von einem vollen Verbund zwischen den Asphalttragschichten ausgegangen.

Lastklasse (n = 20 Jahre)		S
BNLW in Mio.		> 10 bis 25 <sup>1)</sup>
Bautype 1	bit. Decke + bit. Tragschichte	
	ungeb. obere Tragschichte ungeb. untere Tragschichte	

Abbildung 31: Berücksichtigte Oberbau-Variante der Lastklasse S gemäß RVS 03.08.63 im Rahmen der rechnerischen Ermittlung der Lebensdauer Dimensionierung.

## 2.3 Beurteilung einer Kompensationsmaßnahme

Um den Einfluss von Kompensationsmaßnahmen auf die Gebrauchseigenschaften der Asphalttrag- und -binderschichten mit Asphaltgranulat zu untersuchen, wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zunächst diejenigen Asphaltvarianten aus AP 2 herangezogen, die als „kritisch“ bezüglich ihrer Gebrauchseigenschaften für hochbelastete Trag- und Binderschichten eingestuft wurden und gegebenenfalls die Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 bzw. RVS 08.16.06 nicht erfüllen (worst-case-Varianten). Diese zeichnen sich beispielsweise durch einen hohen Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels oder durch eine sehr kurze rechnerische Lebensdauer der Asphaltbefestigung aus.

An den worst-case-Varianten wurde in Abhängigkeit von den Ergebnissen der prüftechnischen Ansprache der Gebrauchseigenschaften als Kompensationsmaßnahme die Zugabe eines alternativen (weicheren) frischen Bindemittels zur Herstellung neuer Asphaltmisch-

gutvarianten mit Asphaltgranulat erprobt. Durch die Zugabe von einem alternativen Bindemittel, beispielsweise mit einem niedrigeren Erweichungspunkt Ring und Kugel oder einem Polymermodifizierten Bindemittel soll der negative Einfluss eines hohen Zugabeanteils eines stark gealterten Asphaltgranulats kompensiert werden.

An den aus der Kompensationsmaßnahme resultierenden neuen Asphaltmischgutvarianten mit Asphaltgranulat wurden die gleichen Gebrauchseigenschaften wie in Arbeitspaket AP 2 ermittelt. Durch eine vergleichende Analyse wurde die Wirkung der Kompensationsmaßnahmen beurteilt.

## **2.4 Erstellung eines Leitfadens Asphaltrecycling**

Der Leitfaden Asphaltrecycling soll eine Hilfestellung bei der vertraglichen und baupraktischen Umsetzung zum Heißrecycling mit Asphaltgranulat im österreichischen Umfeld geben, bspw. durch

- Hinweise zur korrekten Probenahme von bereits in der Lagerung befindlichem Ausbauasphalt / Asphaltgranulat auf der Halde,
- Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Gewinnung eines qualitativ hochwertigen Ausbauasphaltes/Asphaltgranulats (Randbedingungen während des Fräsvorgangs), optimal geeignet zum Einsatz in hochbelasteten Asphalttrag- und -binderschichten,
- Auflistung der GVO Prüfverfahren (inkl. Prüfbedingungen) und der Gütekriterien der Asphaltgranulate, die zur Klassifizierung der Asphaltgranulate prüftechnisch angesprochen werden müssen,
- Beschreibung der Vorgehensweise zur Ermittlung des maximalen Asphaltgranulat-Zugabeanteils in Asphalttrag- und -binderschichten auf Basis der Klassifizierung des Asphaltgranulats und festgelegter gebrauchsvorhaltensorientierter Kriterien (erweiterte Anforderungen in Ergänzung zu den RVS 08.97.05).

Die Auswertung der Literatur, die Erfahrungen der Projektpartner und die Erkenntnisse aus dem F&E-Projekt ORAB wurden zur Erstellung einer ersten Fassung des Leitfadens Asphaltrecycling herangezogen. Die Erstellung dieser Erstfassung wurde im Einvernehmen mit den fachlichen Betreuern des Projekts abgestimmt.

Diese Erstfassung ist nicht als abschließend gültige Handlungsanweisung zu verstehen, sondern soll durch Workshops mit den potentiellen Anwendern weiterentwickelt werden. Die weiterführende Ausarbeitung zu einem anwendungsgerechten und praktikablen Dokument wird im Anschluss an das F&E-Projekt ORAB angestrebt.



### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 Analyse der gewonnenen Asphaltgranulate

##### 3.1.1 Geometrische Eigenschaften

Alle gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten wurden vor der Analyse homogenisiert und zur Trocknung in einer Halle ausgebreitet, um ideale Lagerungsbedingungen (sortenrein und überdacht) zu simulieren.

##### (a) Zusammensetzung

In Tabelle 15 sind die Zusammensetzungen der aus der Asphaltbinderschicht gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 aufgeführt. Die aufgeführten Werte stellen Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelwerten dar.

**Tabelle 15: Zusammensetzungen der aus den Asphaltbinderschichten der Baumaßnahmen S 3 (Stockerau Hollabrunn) und S 36 (Zeltweg) gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten B1, B2, B3 und B4**

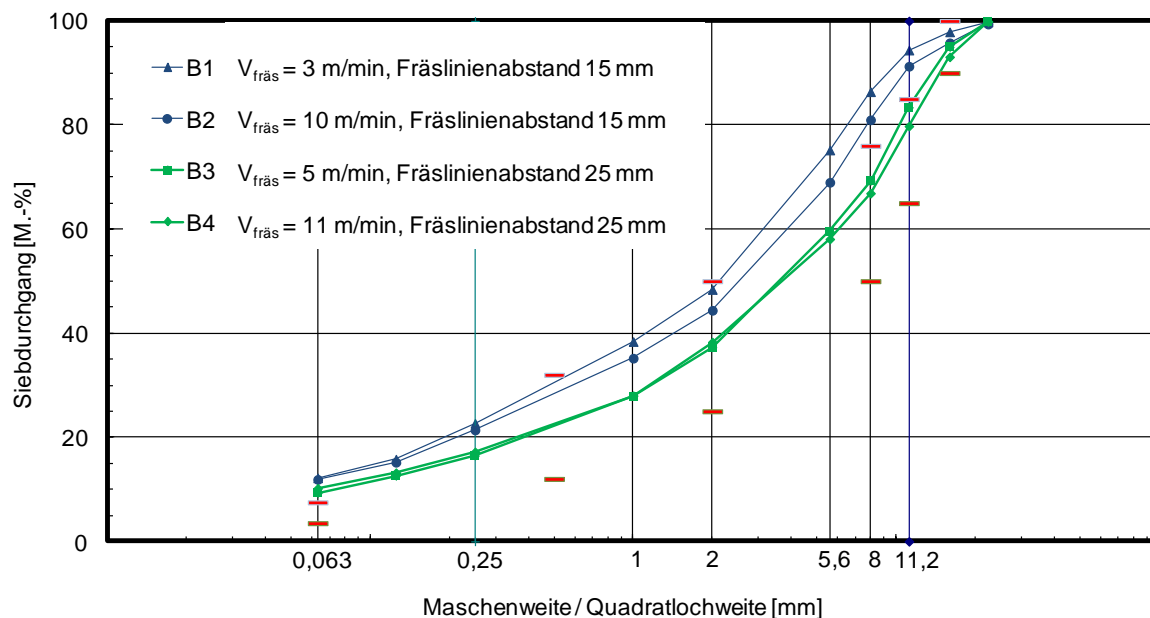
Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Varianten			
		Baumaßnahme S 3		Baumaßnahme S 36	
		B1	B2	B3	B4
Bindemittelgehalt	M.-%	5,1	5,0	5,1	5,3
ERK	°C	53,4	54,3	62,0	61,2
Füllergehalt	M.-%	12,2	11,9	9,3	10,2
0,063 – 0,125	M.-%	3,6	3,3	3,3	3,0
0,125 – 0,25	M.-%	6,9	6,2	3,9	4,0
0,25 – 1,0	M.-%	15,7	13,8	11,4	10,8
1,0 – 2,0	M.-%	10,0	9,2	9,4	10,3
2,0 – 5,6	M.-%	26,8	24,6	22,3	19,8
5,6 – 8,0	M.-%	11,2	12,0	9,7	8,8
8,0 – 11,2	M.-%	8,0	10,3	14,1	12,9
11,2 – 16,0	M.-%	3,5	4,5	11,6	13,3
16,0 – 22,4	M.-%	1,9	3,6	4,8	6,8
22,4 – 31,5	M.-%	0,3	0,5	-	-

Bezüglich des Bindemittelgehalts weisen alle Asphaltgranulat-Varianten ein praktisch gleiches Niveau von ca. 5,1 M.-% auf, das für Asphaltbinderschichten üblich ist. Anhand des Verhärtungsgrads des Bitumens (ERK Erweichungspunkt Ring und Kugel) können 2 Gruppen differenziert werden.

Die beiden Asphaltgranulat-Varianten B1 und B2 aus der Baumaßnahme S 3 (Stockerau Hollabrunn) sind als wenig gealtert (ERK 53 bis 54 °C) zu beurteilen und werden daher in Bezug auf die Bindemittelversprödung als unkritisch für die Zugabe zu neuem Asphaltbinderschichtmischgut eingestuft.

Die Asphaltgranulat-Varianten B3 und B4 aus der Baumaßnahme S 36 (Zeltweg) sind stärker gealtert (ERK 61 bis 62 °C) und werden daher in Bezug auf die Bindemittelversprödung als moderat bis kritisch für die Zugabe zu neuem Asphaltbinderschichtmischgut eingestuft.

In Abbildung 32 sind die resultierenden Sieblinien für die aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten, sowie die jeweiligen Ober- und Untergrenzen der Siebgrößen für Asphaltbinderschichtmischgut der Sorte AC 16 binder H1 gemäß den RVS 08.97.05 dargestellt.



**Abbildung 32: Korngrößenverteilungen der aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten, sowie Ober- und Untergrenzen für Asphaltbinderschichtmischgut der Sorte AC 16 binder H1 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 18 (rote Markierungen).**

Die Sieblinien der Asphaltgranulat-Varianten B3 und B4 liegen innerhalb der Ober- und Untergrenzen für Asphaltbinderschichtmischgut der Sorte AC 16 binder H1 gemäß RVS 08.97.05. Bezüglich der Sieblinie werden die Asphaltgranulat-Varianten B3 und B4 somit als unkritisch für die Verwendung in Asphaltbinderschichtmischgut eingestuft.

Die Sieblinien der Asphaltgranulat-Varianten B1 und B2 liegen im Bereich der feinen Gesteinskörnungen (< 2 mm) mit Ausnahme der Siebgröße 0,063 mm innerhalb der Ober- und Untergrenzen der RVS 08.97.05. Es wird eine maximale Überschreitung bei der Siebgröße 0,063 mm von +2,7 M.-% festgestellt (vgl. Tabelle 16). Für die Sieblinien der Asphaltgranulat-Varianten B1 und B2 werden Abweichungen bei der Siebgröße 0,063 mm von maximal +4,7 M.-% festgestellt. Weiterhin überschreiten die Werte bei den Siebgrößen 8 mm und 11,2 mm die Obergrenze um bis zu +10,4 M.-% (vgl. Tabelle 16).

**Tabelle 16: Abweichungen der Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphaltbinderschichten bezüglich der Sieblinie im Vergleich zu den Anforderungen für Asphaltmischgut der Sorte AC 16 binder H1 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 18**

Siebgröße [mm]	Anforderung AC 16 binder H1 gemäß RVS 08.97.05 [M.-%]	Abweichung der Asphaltgranulat-Varianten [M.-%]			
		B1	B2	B3	B4
0,063	3,5 bis 7,5	+4,7	+4,4	1,8	+2,7
2	25 bis 50	-	-	-	-
8	50 bis 76	+10,4	+5,0	-	-
11,2	65 bis 85	+9,4	+4,0	-	-
16	90 bis 100	-	-	-	-
22,4	100	-	-	-	-

Weil Abweichungen der Asphaltgranulat-Varianten B1 und B2 bezüglich der Grenzsieblinien festgestellt werden, sind diese durch eine entsprechend angepasste Zugabe der frischen Gesteinskörnung bei der Herstellung von neuem Asphaltbinderschichtmischgut auszugleichen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass im weiteren Verlauf der Untersuchungen ein maximaler Asphaltgranulat-Zugabeanteil von 60 M.-% vorgesehen ist und somit 40 M.-% Zugabe für die zielgenaue Dosierung der frischen Gesteinskörnung verbleiben.

In Tabelle 17 sind die Zusammensetzungen der aus den Asphaltbinder- und Asphalttrag-schichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 aufgeführt. Die Werte stellen Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelwerten dar.

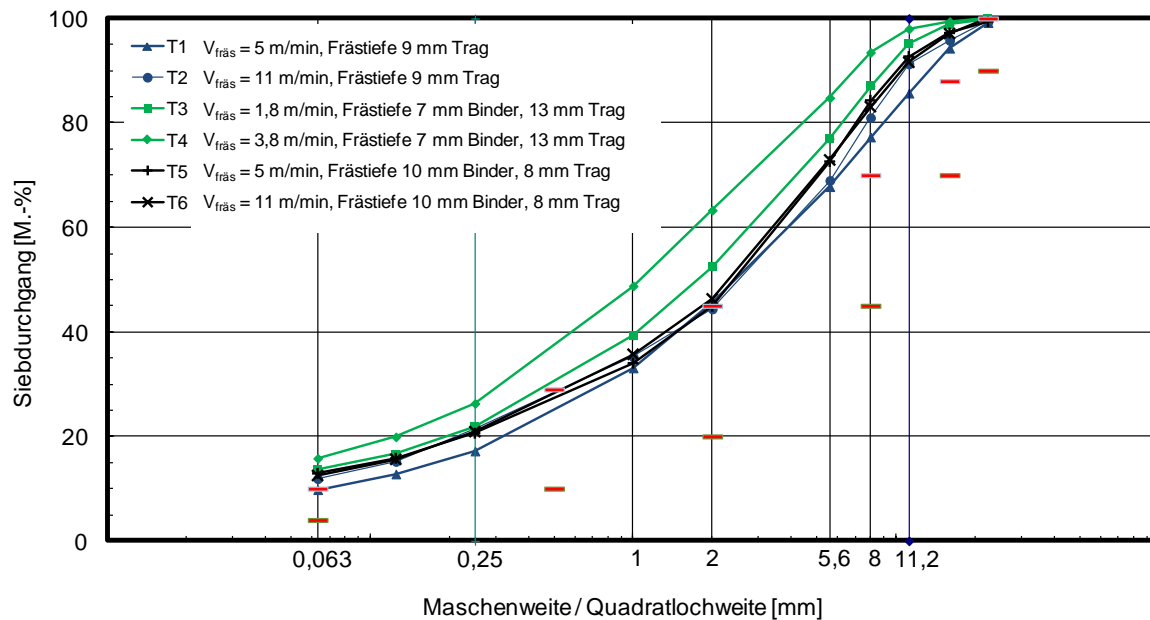
**Tabelle 17: Zusammensetzungen der aus den Asphaltbinder und -tragschichten der Baumaßnahmen S 36 (Zeltweg), A 2 (Südautobahn, AS Arnoldstein) und L 301 (Hitzendorf) gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6**

Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Variante					
		Baumaßnahme S 36		Baumaßnahme A 2		Baumaßn. L 301	
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Bindemittelgehalt	M.-%	4,5	4,6	4,9	5,2	5,4	5,3
ERK	°C	68,8	68,6	58,8	59,0	67,6	71,0
Füllergehalt	M.-%	9,8	11,9	13,6	15,8	12,9	12,5
0,063 – 0,125	M.-%	3,0	3,3	3,0	4,1	2,9	3,1
0,125 – 0,25	M.-%	4,4	6,2	5,2	6,4	4,8	5,3
0,25 – 1,0	M.-%	15,9	13,8	17,5	22,5	13,4	14,8
1,0 – 2,0	M.-%	12,5	9,2	13,2	14,5	10,9	10,6
2,0 – 5,6	M.-%	22,2	24,6	24,5	21,5	27,7	26,6
5,6 – 8,0	M.-%	9,5	12,0	10,1	8,7	11,7	10,2
8,0 – 11,2	M.-%	8,4	10,3	8,1	4,5	8,4	8,5
11,2 – 16,0	M.-%	8,6	4,5	3,6	1,4	4,5	5,5
16,0 – 22,4	M.-%	4,9	3,6	1,1	0,6	2,2	3,0
22,4 – 31,5	M.-%	0,6	0,5	-	-	0,7	-
> 31,5	M.-%	-	-	-	-	-	-

Die festgestellten Bindemittelgehalte der Asphaltgranulat-Varianten liegen in einem Bereich von 4,5 bis 5,4 M.-%, wobei die Asphaltgranulat-Varianten T1 und T2 (Baumaßnahme S 36 Zeltweg) die niedrigsten Werte mit 4,5 und 4,6 M.-%, die Asphaltgranulat-Varianten T5 und T6 (Baumaßnahme L 301 Hitzendorf) die höchsten Werte mit 5,3 und 5,4 M.-% aufweisen. Die festgestellten Bindemittelgehalte liegen in einem für Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten üblichen Bereich.

Anhand des Verhärtungsgrads des Bitumens (ERK Erweichungspunkt Ring und Kugel) können 2 Gruppen differenziert werden. Die Asphaltgranulat-Varianten aus den Baumaßnahmen S 36 und L 301 sind stärker gealtert, die festgestellten ERK liegen im Bereich von 70 °C. Daher werden diese Asphaltgranulat-Varianten in Bezug auf die Bindemittelversprödung als moderat bis kritisch für die Zugabe zu neuem Asphaltmischgut eingestuft. Die Asphaltgranulat-Varianten aus der Baumaßnahme A 2 (T3 und T4) sind weniger gealtert (ERK bei ca. 59 °C) und werden daher in Bezug auf die Bindemittelversprödung als unkritisch für die Zugabe zu neuem Asphaltmischgut eingestuft.

In Abbildung 32 sind die resultierenden Sieblinien für die Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6, sowie die jeweiligen Ober- und Untergrenzen der Siebgrößen für Asphalttragschichtmischgut der Sorte AC 22 trag T1 gemäß den RVS 08.97.05 dargestellt.



**Abbildung 33: Korngrößenverteilungen der aus den Asphaltbinder- und -tragschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten, sowie Ober- und Untergrenzen für Asphalttragschichtmischgut der Sorte AC 22 trag T1 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 20 (rote Markierungen).**

Die Sieblinien aller Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 liegen insgesamt oberhalb der Obergrenzen für Asphalttragschichtmischgut der Sorte AC 22 trag T1 gemäß den RVS 08.97.05. Das bedeutet, dass die Asphaltgranulat-Varianten durchweg größere Anteile an feinerer Gesteinskörnung enthalten, als für die Herstellung von AC 22 trag T1 vorgesehen ist. Die größten Abweichungen (bis zu +23,5 %) werden für die Siebgröße 8 mm festgestellt (vgl. Tabelle 18). Insgesamt über alle Siebgrößen betrachtet, weisen die Sieblinien der Asphaltgranulat-Varianten aus der Baumaßnahme A 2 (T3 und T4) im Vergleich zu den übrigen Varianten die größten Abweichungen, die Asphaltgranulat-Varianten aus der Baumaßnahme S 36 (T1 und T2) die geringsten Abweichungen auf.

**Tabelle 18: Abweichungen der Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 bezüglich der Sieblinie im Vergleich zu den Anforderungen für Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag T1 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 20**

Siebgröße [mm]	Anforderung AC 22 trag T1 ge- mäß RVS 08.97.05 [M.-%]	Abweichung der Asphaltgranulat-Varianten [M.-%]					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
0,063	4,0 bis 10,0	-	+1,9	+3,6	+5,8	+2,9	+2,5
2	20 bis 45	+0,6	-	+7,5	+18,3	-	+1,3
8	45 bis 70	+7,3	+11,0	+17,1	+23,5	+14,3	+13,1
16	70 bis 88	+6,3	+7,8	+10,8	+11,4	+9,2	+9,1
22,4	90 bis 100	-	-	-	-	-	-
31,5	100	-	-	-	-	-	-

Die festgestellten Abweichungen sind insofern plausibel, da der überwiegende Teil der betrachteten Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 nicht ausschließlich aus der Asphalttragschicht gewonnen wurden, sondern aus der Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht gemeinsam in einem Arbeitsgang gefräst wurden. Die Asphaltbinderschicht weist naturgemäß im Vergleich zur Asphalttragschicht einen geringen Anteil an grober Gesteinskörnung (> 2 mm) und einen geringfügig höheren Anteil an feiner Gesteinskörnung (< 2 mm) auf. Aus der Vermischung von Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht durch den Fräsvorgang resultiert die festgestellte Überschreitung der Obergrenzen für AC 22 trag T1 gemäß den RVS 08.97.05.

Insgesamt sind die Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 bezüglich ihrer Sieblinien trotz der festgestellten Abweichungen als geeignet für die Herstellung von neuem Asphaltmischgut der Sorten AC 16 binder H1 bzw. AC 22 trag T1 einzustufen, da durch eine entsprechend zielgenaue Dosierung der frischen Gesteinskörnungen die resultierende Sieblinie entsprechend korrigiert werden kann.

#### **(b) Masseanteil nicht-kubischer / gebrochener Körner**

Die an den Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 aus den Asphaltbinderschichten bestimmten Werte für den Anteil an nicht-kubischen und gebrochenen Körner, sowie die Anforderung für das jeweilige Merkmal gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 enthält Tabelle 19. Die aufgeführten Werte stellen Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelwerten dar. Im Falle einer Abweichung von der Anforderung ist die Höhe der Abweichung in Klammern angegeben.

**Tabelle 19: Massenanteil an nicht kubischen und gebrochenen Körnern der aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4, sowie die jeweiligen Anforderungswerte für die Gesteinsklasse G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7**

Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Variante				Anforderung G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7
		B1	B2	B3	B4	
Masseanteil nicht-kubischer Körner im Anteil $\geq 4$ mm	M.-%	11	13	18	19	$\leq 20$ M.-%
Anteil vollständig gebrochener Körner $C_{tc}$	%	47 (-43)	44 (-46)	72 (-18)	67 (-23)	$\geq 90\%$
Anteil gebrochener Körner $C_c$	%	29 (-1)	34	16 (-14)	30	$\geq 30\%$
Anteil vollständig gerundeter Körner $C_{tr}$	%	23 (+13)	21 (+11)	13 (+3)	2	$\leq 10\%$ <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7:  $C_{tr} \leq 1\%$ , jedoch im Zusammenhang mit recyciertem gebrochenem Asphaltgranulat durch Ergänzung 2012  $\leq 5\%$  + zulässige Abweichung der oberen Grenze mit  $5\% = 10\%$  (ausgenommen AC binder H1 und H2)

Bezüglich des Massenanteils an nicht kubischen Körnern im Anteil  $\geq 4$  mm erfüllen alle Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 die Anforderung gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7. Für die Asphaltgranulat-Varianten B1 und B2 werden deutliche Unterschreitungen für den Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  (bis zu -46%), sowie deutliche Überschreitungen beim Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  (bis +13%) festgestellt.

Für die Asphaltgranulat-Varianten B3 und B4 werden ebenfalls deutliche Unterschreitungen für den Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  (bis zu -23%), sowie für die Variante B3 eine Überschreitung beim Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  von +3% festgestellt. Aufgrund der vorliegenden Abweichungen wäre die Verwendung der Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphaltbinderschichten für die Herstellung von neuem Asphaltmischgut der Sorte AC 16 binder H1 nicht zulässig.

Die an den Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 bestimmten Werte für den Anteil an nicht-kubischen und gebrochenen Körnern, sowie die Anforderung für das jeweilige Merkmal gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 enthält Tabelle 20. Die aufgeführten Werte stellen Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelwerten dar. Im Falle einer Abweichung von der Anforderung ist die Höhe der Abweichung in Klammern angegeben.

**Tabelle 20: Massenanteil an nicht kubischen und gebrochenen Körnern der Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6, sowie die jeweiligen Anforderungswerte für die Gesteinsklasse G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7**

Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Varianten						Anforderung G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Masseanteil nicht-kubischer Körner im Anteil $\geq 4$ mm	M.-%	11	13	18	19	17	18	$\leq 20$ M.-%
Anteil vollständig gebrochener Körner $C_{tc}$	%	49 (-41)	49 (-41)	78 (-12)	74 (-16)	58 (-32)	61 (-29)	$\geq 90\%$
Anteil gebrochener Körner $C_c$	%	40	33	15 (-15)	14 (-16)	27 (-3)	22 (-8)	$\geq 30\%$
Anteil vollständig gerundeter Körner $C_{tr}$	%	10	18 (+8)	7	12 (+2)	15 (+5)	18 (+8)	$\leq 10$ % <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup>Gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7:  $C_{tr} \leq 1\%$ , jedoch im Zusammenhang mit recycliertem gebrochenen Asphaltgranulat durch Ergänzung 2012  $\leq 5\%$  + zulässige Abweichung der oberen Grenze mit  $5\% = 10\%$  (ausgenommen AC binder H1 und H2)

Bezüglich des Massenanteils an nicht kubischen Körnern im Anteil  $\geq 4$  mm erfüllen alle Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 die Anforderung gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7. Für die Asphaltgranulat-Varianten T1 und T2 werden deutliche Unterschreitungen von -41 % für den Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$ , sowie eine Überschreitung beim Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  von +8 % festgestellt.

Für die Asphaltgranulat-Varianten T3 und T4 werden ebenfalls deutliche Unterschreitungen für den Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  und für den Anteil an gebrochenen Körnern  $C_c$  (bis -16 %) identifiziert. Die Asphaltgranulat-Varianten T4 und T5 zeigen die höchsten Abweichungen beim Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  (bis -31 %). Aufgrund der vorliegenden Abweichungen wäre die Verwendung der Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 in Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag T1 nicht zulässig.

Insgesamt sind die Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 bezüglich ihrer Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern als nicht zulässig für die Verwendung in Asphaltmischgut der Sorten AC 16 binder H1 bzw. AC 22 trag T1 einzustufen.

### (c) Fließkoeffizient (Kantigkeit)

Alle untersuchten Sande aus den Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 und T1 bis T6 weisen eine Ausflusszeit größer als 35 s auf und sind daher der Kategorie  $E_{CS35}$  gemäß



ÖNORM EN 933-6, Abschnitt 8 zuzuordnen. Die Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05, Anhang 2, Tabelle 7 von  $\geq 25$  s sind erfüllt.

### 3.1.2 Mechanische und physikalische Eigenschaften

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 sind in Tabelle 21, die Ergebnisse für die Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 in Tabelle 22 zusammengefasst. Die aufgeführten Werte stellen Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelwerten dar.

**Tabelle 21: Widerstand gegenüber Zertrümmerung und Wasseraufnahme der Gesteinskörnung der Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4, sowie die jeweiligen Anforderungswerte für die Gesteinsklasse G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7**

Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Variante				Anforderung G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7
		B1	B2	B3	B4	
Widerstand gegen Zertrümmerung für grobe Gesteinskörnungen	M.-%	21	20	24	22	LA <sub>25</sub>
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel an 8/16 bzw. Wasseraufnahme <sup>1)</sup>	%	0,4	0,5	0,8	0,8	F <sub>2</sub>

<sup>1)</sup>Gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7 kann die Gesteinskörnung als widerstandsfähig gegen Frost angesehen werden, wenn die nach ÖNORM EN 1097-6 bestimmte Wasseraufnahme einer Gesteinskörnung nicht größer als der geforderte Wert ist. Bei einer Wasseraufnahme  $WA_{24} \leq 2$  ist F2 erfüllt.

Alle Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 weisen LA-Werte  $< 25$  auf und erfüllen damit die Anforderungen an die Gesteinsklasse G4 gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7.

Wenn die nach ÖNORM EN 1097-6 bestimmte Wasseraufnahme einer Gesteinskörnung nicht größer als der geforderte Wert ist, kann die Gesteinskörnung als widerstandsfähig gegen Frost angesehen werden. Demgegenüber gibt es jedoch viele brauchbare Gesteinskörnungen mit höheren Werten der Wasseraufnahme. So haben z. B. einige Jurakalksteine und Sandsteine häufig Wasseraufnahmewerte über 4 % Massenanteil und sind dennoch ausreichend widerstandsfähig gegen Frost.

Wenn die Anforderung der Wasseraufnahme nicht eingehalten wird, ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach ÖNORM EN 1367-1 zu prüfen. Alle Gesteinskörnungen aus den untersuchten Asphaltgranulat-Varianten B1 bis B4 und T1 bis T6 erfüllen die Anforderung  $WA_{24} < 2$  und sind somit der Frostempfindlichkeitsklasse F2 zuzuordnen. Eine

Prüfung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung gemäß ÖNORM EN 1367-1 entfällt.

**Tabelle 22: Widerstand gegenüber Zertrümmerung und Wasseraufnahme der Gesteinskörnung der Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6, sowie die jeweiligen Anforderungswerte für die Gesteinsklasse G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7**

Merkmal	Dim.	Bezeichnung der Asphaltgranulat-Varianten						Anforderung G4 gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Widerstand gegen Zertrümmerung für grobe Gesteinskörnungen	M.-%	21	21	25	23	20	19	LA <sub>25</sub>
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel an 8/16 bzw. Wasseraufnahme <sup>*)</sup>	%	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6	0,5	F <sub>2</sub>

<sup>\*)</sup>Gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7 kann die Gesteinskörnung als widerstandsfähig gegen Frost angesehen werden, wenn die nach ÖNORM EN 1097-6 bestimmte Wasseraufnahme einer Gesteinskörnung nicht größer als der geforderte Wert ist. Bei einer Wasseraufnahme  $WA_{24} \leq 2$  ist F<sub>2</sub> erfüllt.

Alle Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 weisen LA-Werte < 25 auf und erfüllen damit die Anforderung an die Gesteinsklasse G4 gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7.

Desweiteren weisen alle Gesteinskörnungen aus den untersuchten Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 Werte für die Wasseraufnahme  $WA_{24} < 2$  auf und sind somit der Frostempfindlichkeitsklasse F<sub>2</sub> zuzuordnen. Eine Prüfung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung gemäß ÖNORM EN 1367-1 entfällt.

Insgesamt sind die Asphaltgranulat-Varianten T1 bis T6 gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 bezüglich ihrer mechanisch-physikalischen Eigenschaften als zulässig für die Verwendung in Asphaltmischgut der Sorten AC 16 binder H1 bzw. AC 22 trag T1 einzustufen.

### 3.1.3 Einfluss der Gewinnung auf die geometrischen Eigenschaften

Im Rahmen des F&E-Projekts ORAB wurde untersucht, ob die Bedingungen während der Gewinnung von Asphaltgranulat durch Fräsen die resultierenden geometrischen Gesteinskörnungseigenschaften beeinflussen können. Dominante Einflüsse der Gewinnungsart auf die mechanisch-physikalischen Gesteinseigenschaften oder auf die Eigenschaften des im Asphaltgranulat enthaltenen Bitumens wurden ausgeschlossen und daher nicht untersucht. So wird sich beispielsweise die Art des Fräsens nicht auf den Ver-

härtungsgrad des Bitumens oder die Frost-Tau Beständigkeit der Gesteinskörnung auswirken.

### (a) Korngrößenverteilung

Zunächst wurde analysiert, ob eine Variation der Fräsgeschwindigkeit die resultierende Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats maßgeblich verändert. Drei praxisgerechte Veränderungen der Fräsgeschwindigkeit wurden berücksichtigt, eine Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit

- um 7 m/min (von 3 m/min auf 10 m/min), realisiert bei der Baumaßnahme S 3,
- um 6 m/min (von 5 m/min auf 11 m/min), realisiert bei den Baumaßnahmen S 36 und L 301 und
- um 2 m/min (von 1,8 m/min auf 3,8 m/min), realisiert bei der Baumaßnahme A 2.

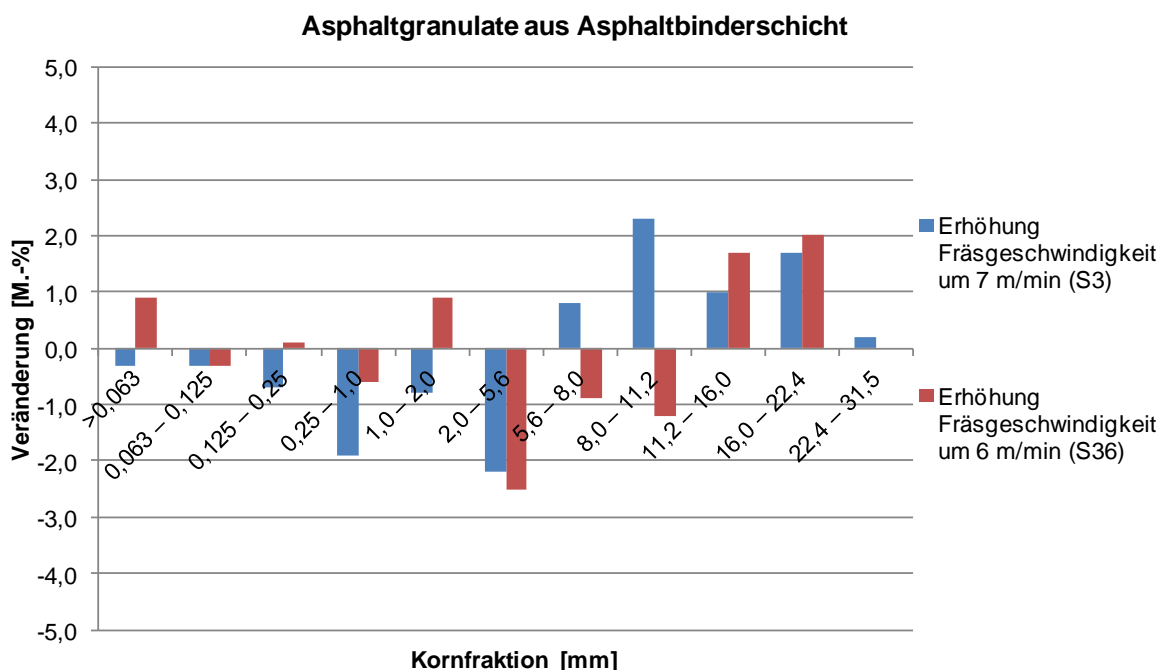
In Tabelle 23 und Abbildung 34 ist der jeweilige Einfluss der Veränderung der Fräsgeschwindigkeit auf die resultierende Korngrößenverteilung der Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphaltbinderschichten in Form der einzelnen Anteile der Kornfraktionen dargestellt.

**Tabelle 23: Einfluss der Veränderung der Fräsgeschwindigkeit um 7 m/min (von 3 m/min auf 10 m/min), realisiert bei der Baumaßnahme S 3, und um 6 m/min (von 5 m/min auf 11 m/min), realisiert bei der Baumaßnahme S 36, auf die Anteile der einzelnen Kornfraktionen der gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphaltbinderschichten**

	<b>Baumaßnahme S 3</b>	<b>Baumaßnahme S 36</b>
<b>Kornfraktion [mm]</b>	<b>Veränderung [M.-%]</b>	<b>Veränderung [M.-%]</b>
>0,063	-0,3	0,9
0,063 – 0,125	-0,3	-0,3
0,125 – 0,25	-0,7	0,1
0,25 – 1,0	-1,9	-0,6
1,0 – 2,0	-0,8	0,9
2,0 – 5,6	-2,2	-2,5
5,6 – 8,0	0,8	-0,9
8,0 – 11,2	2,3	-1,2
11,2 – 16,0	1	1,7
16,0 – 22,4	1,7	2
22,4 – 31,5	0,2	-

Für die Asphaltgranulat-Variante aus den Asphaltbinderschichten der Baumaßnahme S 3 (blaue Säulen in Abbildung 34) führt die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit zu einer geringfügigen Abnahme der Anteile der feinen Kornfraktionen (0,063 mm bis 5,6 mm), wobei eine maximale Abnahme von 2,2 M.-% in der Kornfraktion 2/5,6 mm festgestellt wird. Dies ist plausibel, da bei einer höheren Fräsgeschwindigkeit weniger Zeit zur Verfügung steht die Gesteinskörnungen zu zerkleinern, sodass das resultierende Asphaltgranulat insgesamt grober ausfällt. Folgerichtig ergeben sich geringe Zunahmen für die Anteile der größeren Kornfraktionen (5,6 mm bis 31,5 mm).

Für die Asphaltgranulat-Variante aus den Asphaltbinderschichten der Baumaßnahme S 36 (rote Säulen in Abbildung 34) wirkt sich die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit tendenziell gleich aus. Die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit führt überwiegend zu einer Abnahme in den Anteilen der feineren Kornfraktionen (0,063 mm bis 11,2 mm), wobei die maximale Abnahme von 2,5 M.-% in der Kornfraktion 2/5,6 mm festgestellt wird. Folgerichtig ergeben sich auch hier entsprechende Zunahmen in den Anteilen der größeren Kornfraktionen.



**Abbildung 34: Einfluss der Fräsgeschwindigkeit auf die Korngrößenverteilung der aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten.**

Insgesamt ergeben sich durch die Variation der Fräsgeschwindigkeit keine signifikanten Änderungen für die einzelnen Anteile der Kornfraktionen.

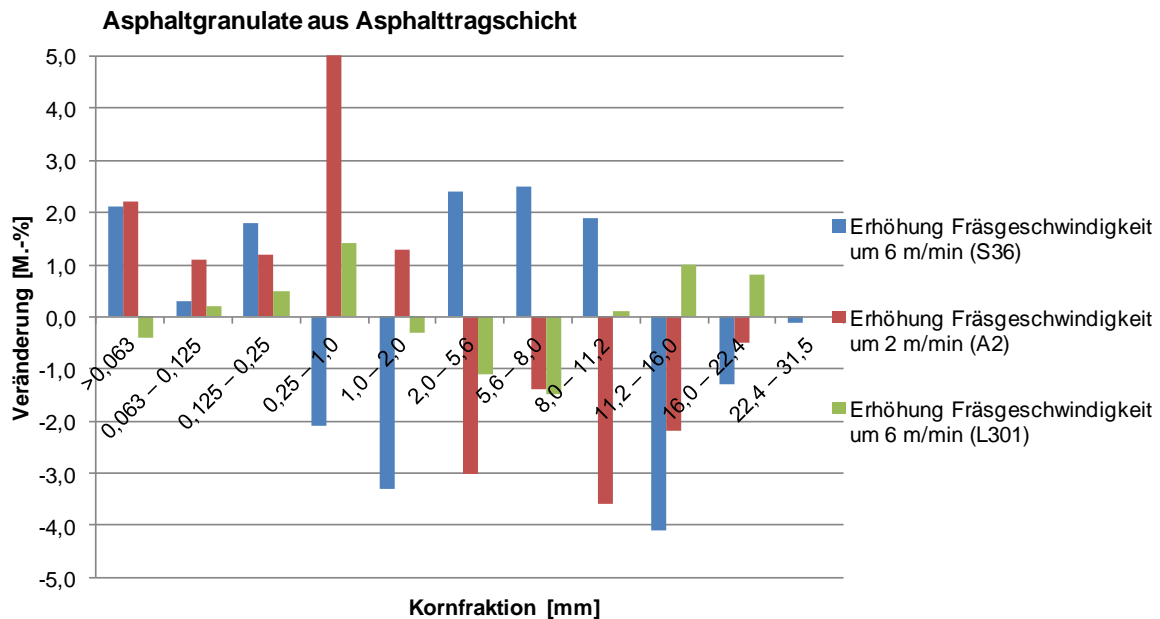
In Tabelle 24 und Abbildung 35 ist der jeweilige Einfluss der Veränderung der Fräsgeschwindigkeit auf die resultierende Korngrößenverteilung der Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphalttrag- und -binderschichten in Form der einzelnen Anteile der Kornfraktionen dargestellt.

**Tabelle 24: Einfluss der Veränderung der Fräsgeschwindigkeit um 6 m/min (von 5 m/min auf 11 m/min), realisiert bei den Baumaßnahmen S 36 und L 301, und um 2 m/min (von 1,8 m/min auf 3,8 m/min), realisiert bei der Baumaßnahme A 2, auf die Anteile der einzelnen Kornfraktionen der gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten**

	Baumaßnahme S 36	Baumaßnahme L 301	Baumaßnahme A 2
Kornfraktion [mm]	Veränderung [M.-%]	Veränderung [M.-%]	Veränderung [M.-%]
>0,063	2,1	-0,4	2,2
0,063 – 0,125	0,3	0,2	1,1
0,125 – 0,25	1,8	0,5	1,2
0,25 – 1,0	-2,1	1,4	5,0
1,0 – 2,0	-3,3	-0,3	1,3
2,0 – 5,6	2,4	-1,1	-3,0
5,6 – 8,0	2,5	-1,5	-1,4
8,0 – 11,2	1,9	0,1	-3,6
11,2 – 16,0	-4,1	1,0	-2,2
16,0 – 22,4	-1,3	0,8	-0,5
22,4 – 31,5	-0,1	-	-

Für die Asphaltgranulat-Variante aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten der Baumaßnahme S 36 (blaue Säulen in Abbildung 35) führt die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit um 6 m/min (von 5 m/min auf 11 m/min) zu einer Abnahme der Anteile der feinen Kornfraktionen 0,25/1,0 mm und 1,0/2,0 mm, sowie bei den gröbereren Kornfraktionen 11,2/16,0 mm und 16,0/22,4 mm, wo Abnahmen zwischen 2,1 M.-% und 4,1 M.-% festgestellt werden. Für die übrigen Kornfraktionen werden geringe Zunahmen bis maximal 2,5 M.-% festgestellt.

Bei der Baumaßnahme A 2 (rote Säulen in Abbildung 35) führt die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit um 2 m/min (von 1,8 m/min auf 3,8 m/min) zu einer Zunahme der Anteile der feinen Kornfraktionen (0,063 mm bis 2 mm), die maximale Zunahme beträgt 5,0 M.-% für die Kornfraktion 0,25/1 mm. Demgegenüber werden für die gröbereren Gesteinsfraktionen (2 mm bis 22,4 mm) Abnahmen bis maximal 3,6 M.-% festgestellt.



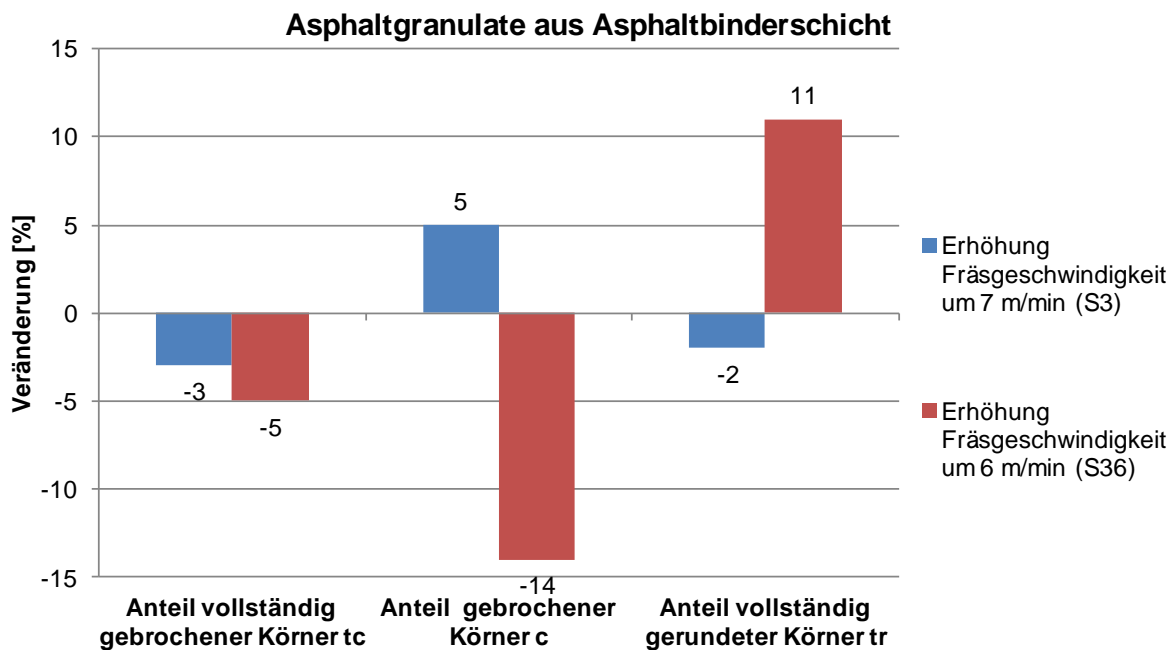
**Abbildung 35: Einfluss der Fräsengeschwindigkeit auf die Korngrößenverteilung der aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten.**

Die festgestellten Abnahmen der feineren Kornfraktionen und die teilweisen Zunahmen der groben Kornfraktionen widersprechen der oben festgestellten Tendenz und den Erwartungen. Ihre Ursache kann an dieser Stelle nicht ermittelt werden.

Bei der Baumaßnahme L 301 (grüne Säulen in Abbildung 35) wirkt sich die Erhöhung der Fräsengeschwindigkeit praktisch nicht aus. Es werden nur minimale Änderungen für die einzelnen Kornfraktionen bis maximal 1,5 M.-% festgestellt. Insgesamt ergeben sich also nur geringfügige Änderungen für die einzelnen Anteile der Kornfraktionen der Asphaltgranulat-Varianten. Die festgestellten Änderungen liegen in einem Bereich, der innerhalb der üblichen Schwankungsbreite liegt und nicht allein auf den Einfluss der Fräsengeschwindigkeit zurückzuführen ist. In der Praxis können sich derartige Schwankungen unter anderem durch das nicht lagenweise Fräsen ergeben.

### **(b) Anteil gebrochener und gerundeter Körner**

Es galt festzustellen, ob die Variation der Fräsengeschwindigkeit die resultierenden Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern maßgeblich beeinflusst. Die Ergebnisse zur Ermittlung dieses Einflusses für die aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten sind in Abbildung 36 dargestellt. Dabei wurden dieselben Veränderungen der Fräsengeschwindigkeit gemäß Abschnitt (a) berücksichtigt.

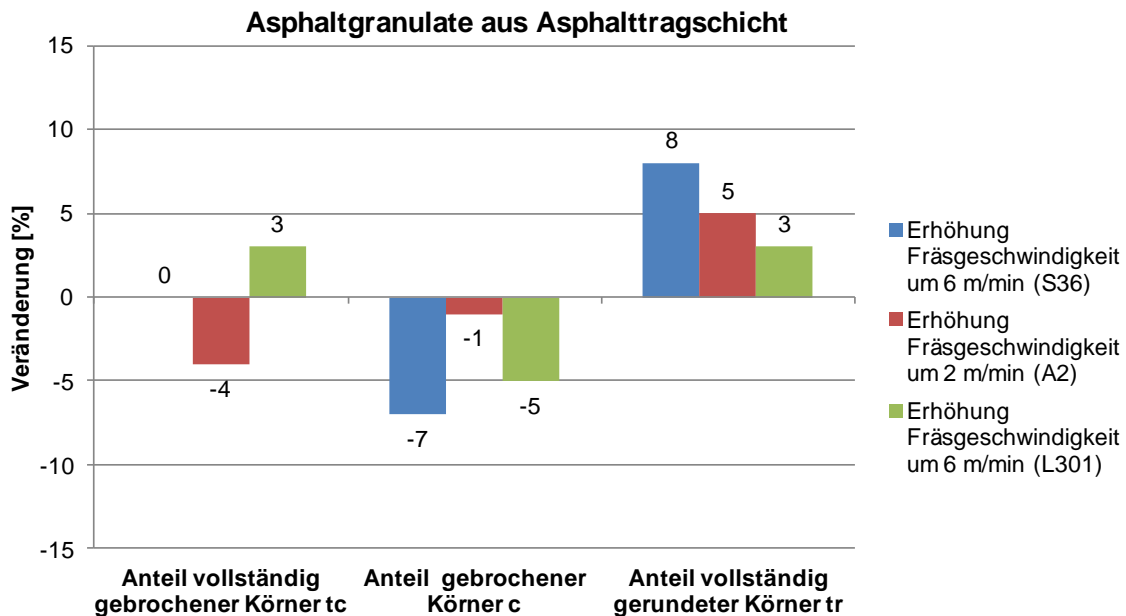


**Abbildung 36: Einfluss der Fräsengeschwindigkeit auf die Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern der aus den Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten.**

Für die Asphaltgranulat-Variante bei der Baumaßnahme S 3 (blaue Säulen in Abbildung 36) wirkt sich die Erhöhung der Fräsengeschwindigkeit um 7 m/min (von 3 m/min auf 7 m/min) in einer geringen Abnahme der Anteile an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  und vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  aus. Für den Anteil an gebrochenen Körnern  $C_c$  wird ein entsprechender Anstieg von 5 % ermittelt. Für die Asphaltgranulat-Variante bei der Baumaßnahme S 3 wird somit festgestellt, dass die Fräsengeschwindigkeit die Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern nur schwach und unsystematisch beeinflusst.

Bei der Asphaltgranulat-Variante der Baumaßnahme S 36 (rote Säulen in Abbildung 36) führt die Erhöhung der Fräsengeschwindigkeit zu einer deutlichen Abnahme des Anteils an gebrochenen Körnern (-14 %) und zu einer entsprechenden Zunahme des Anteils an vollständig gerundeten Körnern (+11 %). Ein fräsengeschwindigkeitsbedingter Anstieg von mehr als 10 % beim Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  ist kritisch zu sehen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass derzeit bezüglich  $C_{tr}$  gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 ein Maximalwert von 10 % (inklusive 5 % zulässiger Überschreitung der Höchstgrenze von 5 %) gilt.

Den Einfluss der Fräsgeschwindigkeit auf die Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern der aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten verdeutlicht Abbildung 37.



**Abbildung 37: Einfluss der Fräsgeschwindigkeit auf die Anteile an gebrochenen und gerundeten Körnern der aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten.**

Die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit führt bei den Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten zu einem Anstieg des Anteils an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  und entsprechenden Abnahmen bei den Anteilen an gebrochenen Körnern  $C_c$  und vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$ . Die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit resultiert in Anstiegen von bis zu 8 % beim Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  und erschwert dadurch erheblich die Einhaltung des Maximalwerts von 10 % gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7.

Insgesamt wirkt sich die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit sowohl für die Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphaltbinderschichten, als auch für die Asphaltgranulat-Varianten aus den Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten auf den Anteil an vollständig gerundeten Körnern  $C_{tr}$  aus, wodurch die Einhaltung des Maximalwerts von 10 % gemäß den RVS 08.97.05, Tab. 7 nicht realisierbar ist.



### **3.1.4 Auswahl der Asphaltgranulat-Varianten für die Mischgutuntersuchungen**

Zur Untersuchung des Einflusses von Asphaltgranulat mit gerundeten Oberflächen auf die wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Asphalttrag- und -binderschichten waren im nächsten Schritt Asphaltmischgutvarianten herzustellen unter Variation der Art des Asphaltgranulats (3-fach: vorteilhafte / moderate / kritische Eigenschaften) und des Zugabeteils des Asphaltgranulats (3-fach: 20, 40 und 60 M.-%), vgl. Abschnitt 2.2. Hierzu waren auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse 3 Asphaltgranulat-Varianten aus Asphaltbinderschichten und 3 Asphaltgranulat-Varianten aus Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten auszuwählen, die hinsichtlich ihrer Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 jeweils als vorteilhaft, moderat und kritisch zu bewerten sind.

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der qualitativen Bewertung der aus der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten bezüglich der Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 zusammengefasst. Rot hinterlegte Felder zeigen Abweichungen vom jeweils zulässigen Grenzwert. Hierbei ist zu beachten, dass für einige Merkmale gemäß den RVS 08.97.05 zwar Anforderungen gestellt werden, diese jedoch für die Erstprüfung des jeweiligen Asphaltmischguts gelten und nicht für die Asphaltgranulate, die zu dem Asphaltmischgut hinzugegeben werden sollen.

**Tabelle 25: Qualitative Bewertung der aus den Asphaltbinder- und Asphalttragschichten gewonnenen Asphaltgranulat-Varianten bezüglich der Anforderungen gemäß RVS 08.97.05**

Merkmal	Asphaltgranulat-Varianten aus Asphaltbinderschichten				Asphaltgranulat-Varianten aus Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten					
	S 3		S 36		S 36		A 2		L 301	
	B1	B2	B3	B4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Bindemittelgehalt <sup>1)</sup>	-	--	-	○	--	-	○	+	++	+
Erweichungspunkt Ring und Kugel <sup>1)</sup>	--	-	++	+	+	+	--	-	+	++
Korngrößenverteilung <sup>1)</sup>	○	++	+	○	--	○	+	++	○	○
Masseanteil an nicht-kubischen Körnern	--	-	+	++	--	-	+	++	○	+
Anteil an vollständig gebrochenen Körnern $C_{tc}$	+	++	○	○	--	--	++	+	○	○
Anteil an gebrochenen Körnern $C_c$	+	++	--	+	++	+	-	--	○	○
Anteil an vollständig gerundeten Körnern $C_{tr}$	++	+	○	--	-	++	--	○	+	++
Widerstand gegen Zerkümmerung	einheitliches, unkritisches Niveau									
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel										

++ Maximalwert + hoch ○ mittel - niedrig -- Minimalwert

**rot hinterlegt:** Abweichung von Grenzwerten gemäß RVS 08.97.05, Tab.7, Tab. 18, Tab. 20

<sup>1)</sup> Anforderung gemäß RVS 08.97.05 gilt für die Erstprüfung des jeweiligen Asphaltmischguts und nicht für Asphaltgranulat allein, das für die Zugabe zum Asphaltmischgut vorgesehen wird. Zur Beurteilung der Eignung der Asphaltgranulate zur Zugabe zum Asphaltmischgut wird die Anforderung an dieser Stelle trotzdem aufgeführt

Sämtliche Asphaltgranulat-Varianten genügen nicht den Anforderungen an die Korngrößenverteilung gemäß den RVS 08.97.05. Diese Anforderungen gelten allerdings für die Erstprüfung des jeweiligen Asphaltmischguts und nicht für Asphaltgranulat allein, das für die Zugabe zum Asphaltmischgut vorgesehen wird. Zur Beurteilung der Eignung der Asphaltgranulate zur Zugabe zum Asphaltmischgut wird die Anforderung an dieser Stelle trotzdem aufgeführt.

Sämtliche Asphaltgranulat-Varianten genügen nicht den Anforderungen an den Anteil an vollständig gebrochenen Körnern  $C_{tc}$  gemäß den RVS 08.97.05. Weiterhin genügt der überwiegende Teil der Asphaltgranulat-Varianten nicht den Anforderungen an den Anteil an gebrochenen Körnern und vollständig gerundeten Körnern.

Hauptkriterium im F&E-Projekt ORAB für die Auswahl von Asphaltgranulat-Varianten zur Herstellung von neuem Asphaltmischgut für Asphalttrag- und -binderschichten unter Zugabe von Asphaltgranulat war eine möglichst große Bandbreite der Eigenschaften (vorteilhafte / moderate / kritische Eigenschaften) bezüglich der Anforderungen gemäß den

RVS 08.97.05. Auf Grundlage der bisherigen Untersuchungsergebnisse (Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2) und der qualitativen Bewertung der Asphaltgranulat-Varianten (Tabelle 25) wurden die in Tabelle 26 aufgeführten Varianten für die weiteren Untersuchungen an neu hergestellten Asphaltmischgutvarianten für Asphalttrag- und –binderschichten ausgewählt.

**Tabelle 26: Auswahl der Asphaltgranulat-Varianten für die Herstellung von neuem Asphalttrag- und –binderschichtmischgut**

Qualitative Bewertung bzgl. Anforderungen gemäß RVS 08.97.05	Asphaltgranulat-Varianten aus Asphaltbinderschichten	Asphaltgranulat-Varianten aus Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten
vorteilhaft	B4	T1
moderat	B3	T6
kritisch	B1	T4

## 3.2 Auswirkungen gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften

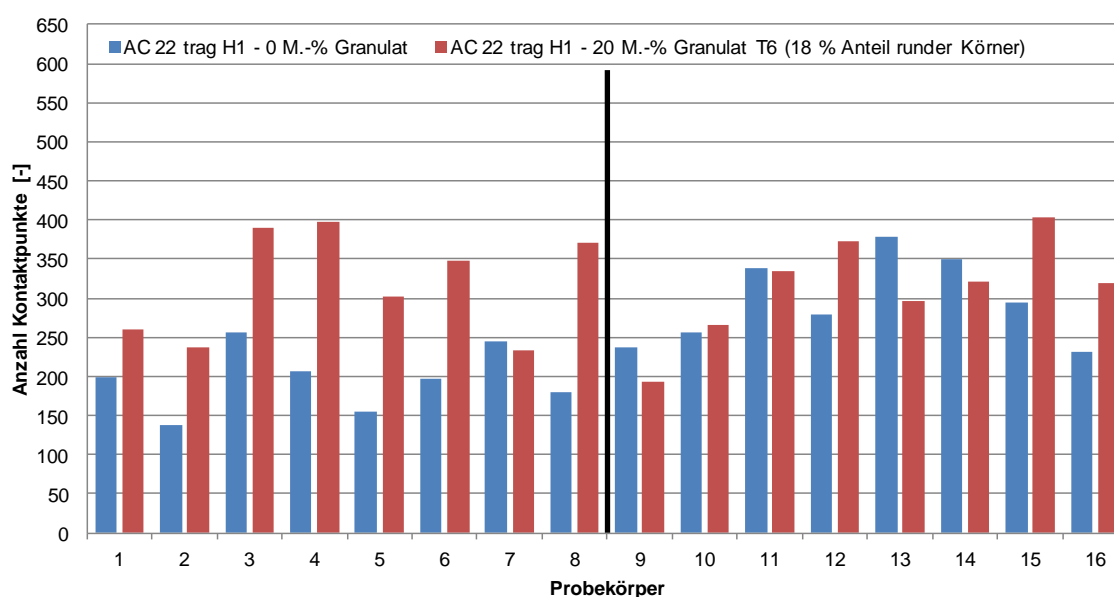
### 3.2.1 Innere Asphaltstruktur

Die Untersuchungen zum Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörnern auf die innere Asphaltstruktur erfolgen exemplarisch anhand der Ergebnisse für die Asphalt-Varianten unter Zugabe der Asphaltgranulat-Variante T6, da hier der höchste Anteil an runden Gesteinskörnern mit 18 M.-% ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 3.1.1, Tabelle 20).

In diesem Bericht sind nur ausgewählte Untersuchungsergebnisse wiedergegeben. Sämtliche Einzelergebnisse liegen am Server des ISBS Prüflabors elektronisch vor und können auf Anfrage auf Datenträger zur Verfügung gestellt werden.

#### (a) Anzahl der Kontaktpunkte

Der Einfluss der Zugabe von 20 M.-% Asphaltgranulat T6 mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern auf die Anzahl an Kontaktpunkten ist in Abbildung 38 dargestellt.

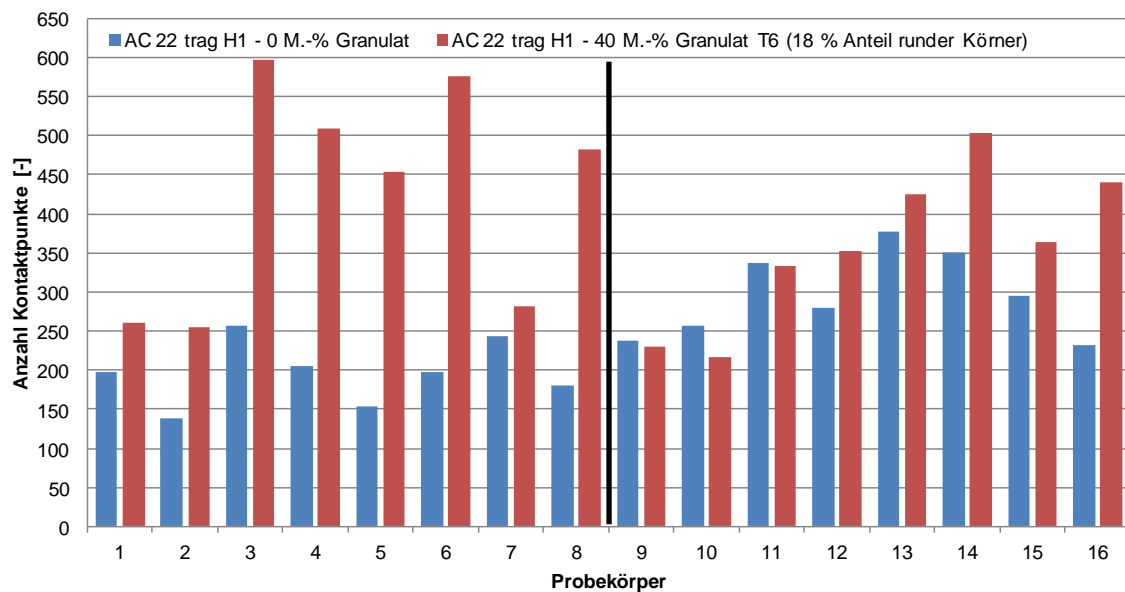


**Abbildung 38: Einfluss von 20 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe im Vergleich zu 0 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Varianten T6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur.**

Die Zugabe von 20 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern zu Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag H1 führt an 11 von 16 untersuchten Asphalt-Probekörpern zu einem signifikanten Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten. Es liegt ein systematischer Zusammenhang vor. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass eine hohe Anzahl an Kontaktpunkten in der Asphaltstruktur vorteilhaft bei der Kraftübertragung im Gesteinskörnungsgewüst ist. Ein nachteilhafter Einfluss der runden Gesteinskörner auf die Anzahl der Kontaktpunkte der Asphaltstruktur ist somit nicht zu erwarten.

Es ergeben sich auch Unterschiede in den Kontaktpunkten zwischen den Asphalt-Probekörpern einer Asphaltmischgut-Variante. Da die prismenförmigen Asphalt-Probekörper aus großformatigen Asphalt-Probepplatten gesägt werden, ergeben sich in der Tendenz an den Rändern der Asphalt-Probepplatte (Probekörper 1, 2, 7, 8 für Asphalt-Probepplatte 1 bzw. Probekörper 9, 10, 15, 16) höhere Raumdichten, resultierend aus der geringeren Verdichtung. Korrespondierend zu höheren Raumdichten werden tendenziell auch geringere Werte für die Anzahl an Kontaktpunkten an den Rändern, bzw. höhere Werte in Plattenmitte festgestellt.

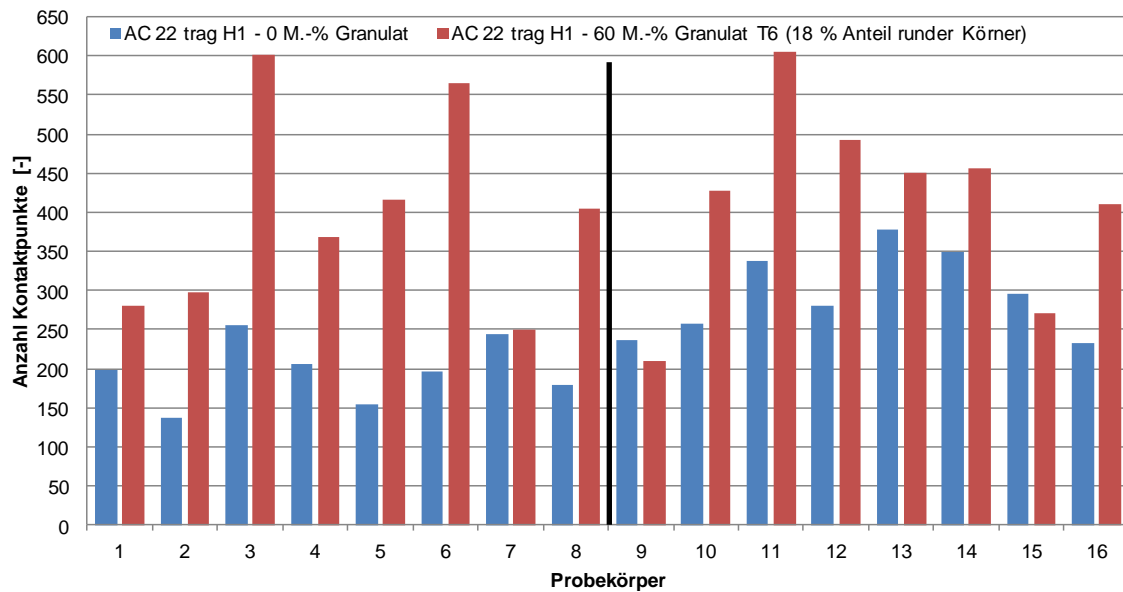
Der Einfluss der Zugabe von 40 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur ist in Abbildung 39 dargestellt.



**Abbildung 39: Einfluss von 40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe im Vergleich zu 0 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T 6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur.**

Die Zugabe von 40 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern zu Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag H1 führt an 13 von 16 untersuchten Asphalt-Probekörpern zu einem signifikanten Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen bei 20 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (vgl. Abbildung 38), wobei die festgestellten Anstiege bei 40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe weitaus größer ausfallen (Abbildung 39). Es werden maximale Anstiege von über 150 % (beispielsweise am Probekörper 3 von 256 auf 597 Kontaktpunkten) identifiziert. Ein nachteilhafter Einfluss der runden Gesteinskörner auf die Anzahl der Kontaktpunkte der Asphaltstruktur kann, trotz des höheren Asphaltgranulat-Zugabeanteils von 40 M.-%, nicht festgestellt werden.

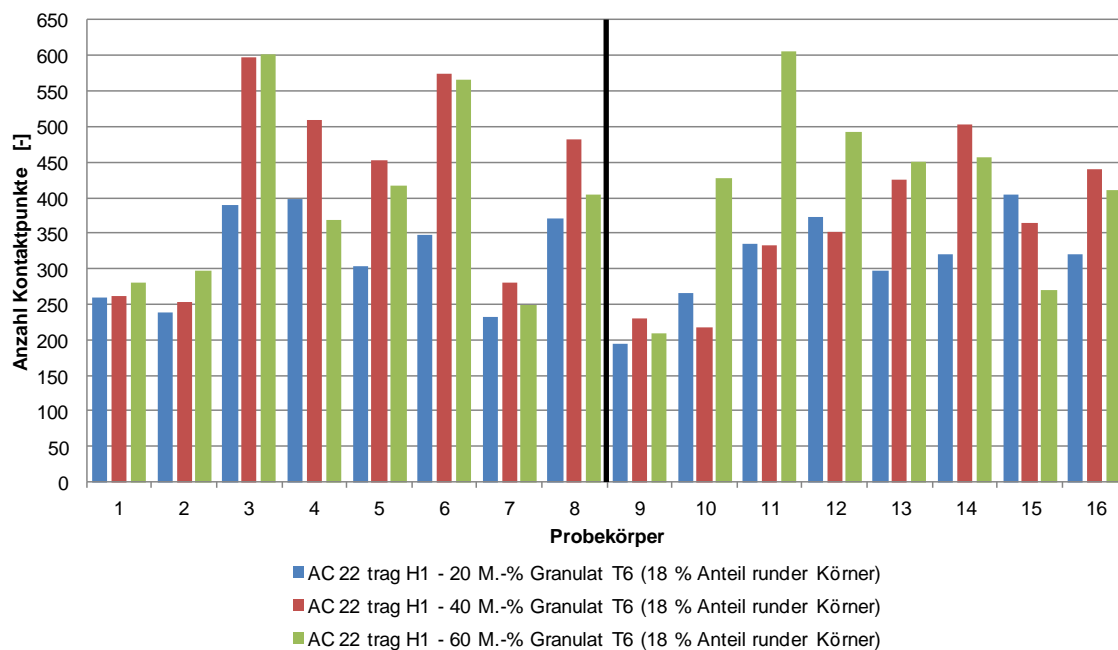
Der Einfluss der Zugabe von 60 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern auf die Anzahl an Kontaktpunkte der Asphaltstruktur ist in Abbildung 40 dargestellt.



**Abbildung 40: Einfluss von 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe im Vergleich zu 0 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T 6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur.**

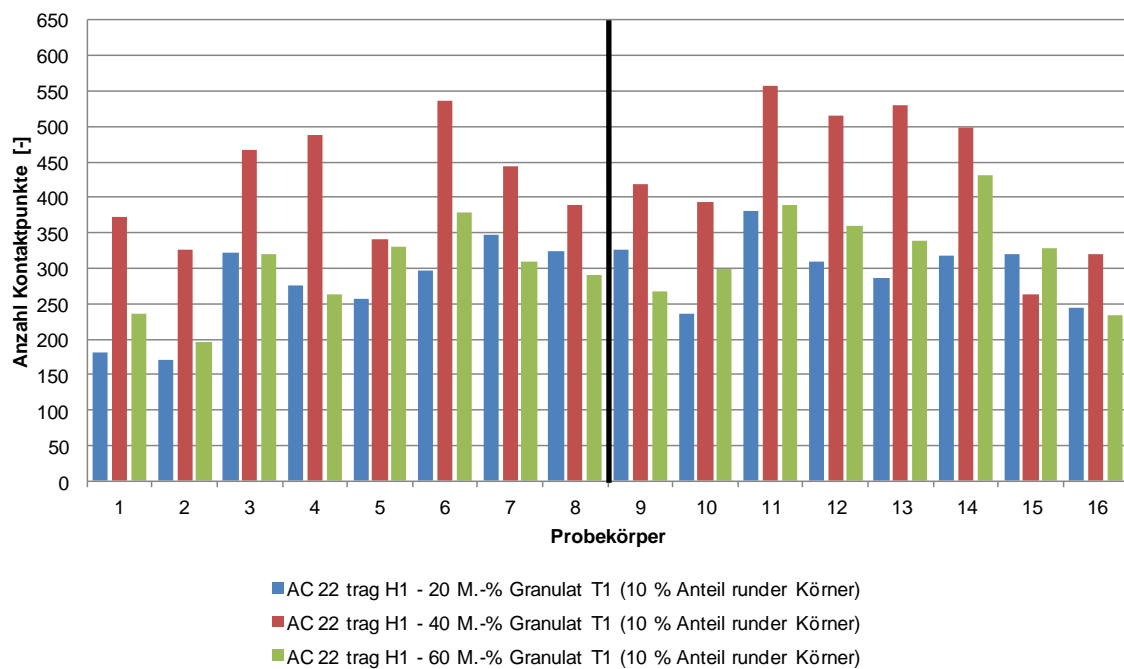
Die Zugabe von 60 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern zu Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag H1 führt an 14 von 16 untersuchten Asphalt-Probekörpern zu einem signifikanten Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten. Dies bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen bei 20 M.-% und 40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (siehe oben). Die festgestellten Anstiege bei 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe fallen mit maximalen Anstiegen von über 150 % (beispielsweise am Probekörper 3 von 256 auf 602 Kontaktpunkten) vergleichbar zu jenen bei 40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe aus. Ein nachteilhafter Einfluss der runden Gesteinskörner auf die Anzahl der Kontaktpunkte der Asphaltstruktur kann, trotz des höchsten Asphaltgranulat-Zugabeanteils von 60 M.-%, nicht festgestellt werden.

In Abbildung 41 ist der Vergleich der Werte für die Anzahl an Kontaktpunkten aller Varianten mit Asphaltgranulat-Zugabe dargestellt.



**Abbildung 41: Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur.**

Es wird zusammenfassend festgestellt, dass durch Steigerung des Asphaltgranulat-Zugabeanteils von 20 M.-% auf 40 M.-% in den meisten Fällen ein Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten erreicht wird. Eine weitere Steigerung auf 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabeanteil führt jedoch nur an 6 von 16 Probekörpern auch zu einem weiteren Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten. An 10 Probekörpern führt die Steigerung auf 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabeanteil zu einer Abnahme der Anzahl an Kontaktpunkten. Dies deutet darauf hin, dass es bezüglich der Anzahl an Kontaktpunkten einen "optimalen" Asphaltgranulat-Zugabeanteil gibt. Wird dieser überschritten, wird die Asphaltstruktur hinsichtlich der Anzahl an Kontaktpunkten nachteilig beeinflusst, mit möglichen (nachteiligen) Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften. Dieser Trend wird noch deutlicher für die Varianten unter Zugabe der Asphaltgranulat-Variante T1 mit 10 M.-% runden Gesteinskörnern (Abbildung 42). Bei der mittleren Asphaltgranulat-Zugabemenge von 40 M.-% erreichen 15 von 16 Probekörpern die höchsten Werte für die Anzahl an Kontaktpunkten.

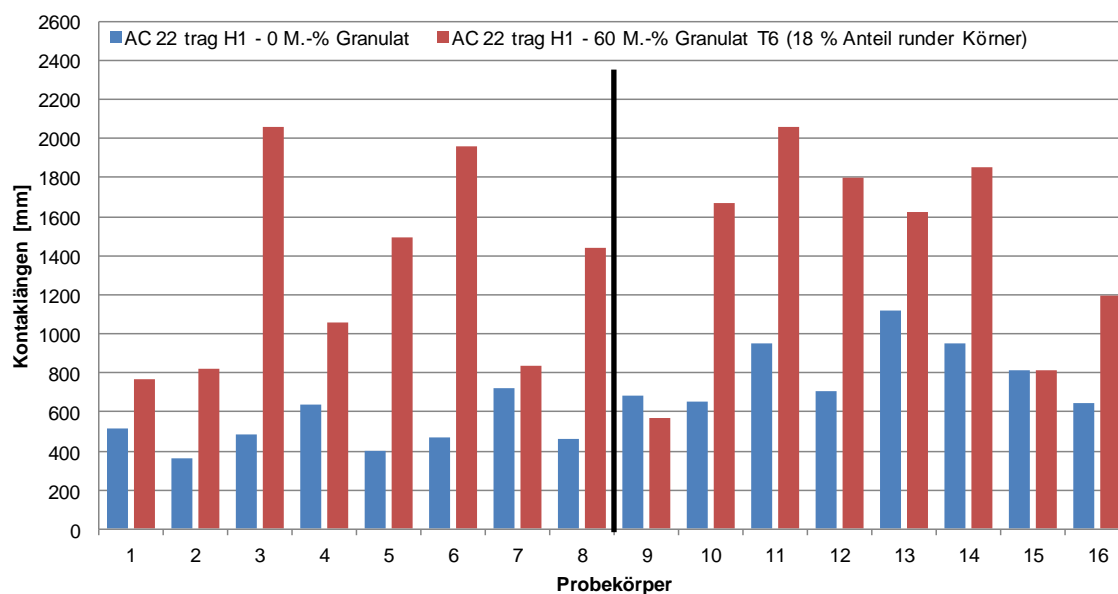


**Abbildung 42: Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T1 mit 10 % Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Anzahl an Kontaktpunkten der Asphaltstruktur.**

### (b) Kontaktlängen

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe (mit Anteilen an runden Gesteinskörnern) auf die Kontaktlänge die obigen Erkenntnisse zum Zusammenhang Asphaltgranulat-Zugabe und resultierende Anzahl an Kontaktpunkten. Ein nachteiliger Einfluss der runden Gesteinskörner auf die Kontaktlängen innerhalb der Asphaltstruktur kann, bis zu einem Asphaltgranulat-Zugabeanteil von 60 M.-%, nicht festgestellt werden. Vielmehr wird durch die Asphaltgranulat-Zugabe ein signifikanter Anstieg der Kontaktlängen festgestellt (vgl. exemplarisch Abbildung 43).



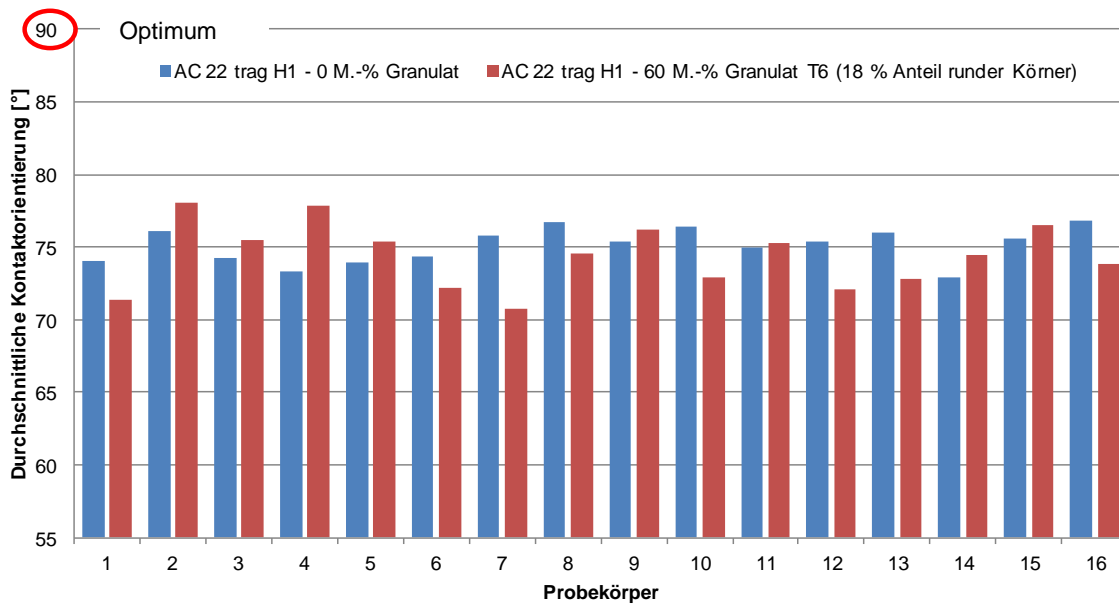


**Abbildung 43: Einfluss von 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe im Vergleich zu 0 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die Kontaktlängen innerhalb der Asphaltstruktur.**

### (c) Durchschnittliche Kontaktorientierung

Als „Kontaktorientierung“ ist definiert die Winkelbeziehung zwischen der Vertikalen auf die Kontaktebene zweier Gesteinskörner und der horizontalen Achse. Wenn die Kontaktorientierung exakt der axialen Beanspruchung (Winkel von  $90^\circ$  zur horizontalen Achse) entspricht, dann ist die Effektivität des Kontakts einer Verformung zu widerstehen maximal. Mit abnehmendem Winkel vermindern sich die innere Stabilität für die Lastabtragung und die Effektivität der Verformungsresistenz. Große Winkel (bis maximal  $90^\circ$ ) haben daher eine vorteilhaft hohe Verformungsresistenz und damit insgesamt ein besseres Gebrauchsverhalten, kleine Winkel sind als nachteilig für die Lastabtragung anzusehen.

Der Einfluss der Zugabe von 60 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern auf die durchschnittliche Kontaktorientierung ist in Abbildung 44 dargestellt.

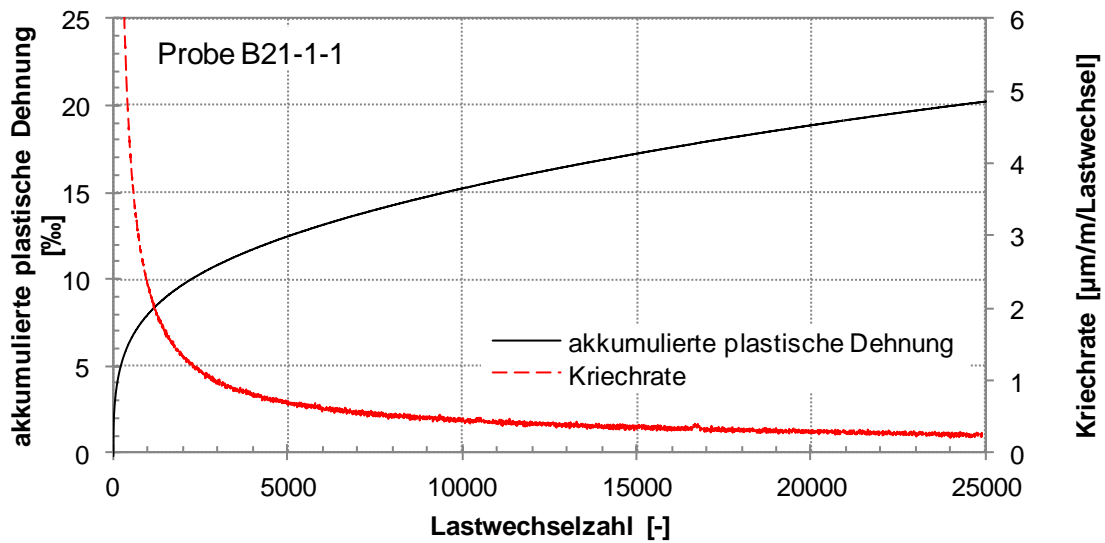


**Abbildung 44: Einfluss von 60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe im Vergleich zu 0 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe (exemplarisch für Asphaltgranulat-Variante T 6 mit 18 M.-% Anteil an runden Gesteinskörnern) auf die durchschnittliche Kontaktorientierung der Asphaltstruktur.**

Die Zugabe von 60 M.-% Asphaltgranulat mit 18 M.-% runden Gesteinskörnern zum Asphaltmischgut der Sorte AC 22 trag H1 führt zu keinen signifikanten und systematischen Unterschieden der durchschnittlichen Kontaktorientierung der Asphaltstruktur. Alle festgestellten Winkel liegen in einem engen Bereich zwischen 70° und 78° und liegen damit bezüglich des optimalen Winkels von 90° auf einem vorteilhaften Niveau. Demnach ist keine nachteilige Auswirkung von runden Gesteinskörnern auf die Kontaktorientierung und der damit (theoretisch) zusammenhängenden Effektivität der Lastabtragung nachweisbar. Diese Erkenntnis wird durch die Ergebnisse an den allen anderen Varianten bestätigt.

### 3.2.2 Verformungsbeständigkeit

Die Beständigkeit der hergestellten Binderschichtvarianten gegen bleibende Verformung wurde mittels Triaxialversuchen (vgl. Abschnitt 2.2.3) untersucht. Abbildung 45 zeigt exemplarisch die Verläufe der akkumulierten plastischen Dehnung und der Kriechrate für die Asphaltbinder-Variante B21 mit 20 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe. Eine starke Zunahme der Dehnung ist in der Anfangsphase vorhanden, wonach sich ein quasilinear Kurvenverlauf ergibt.

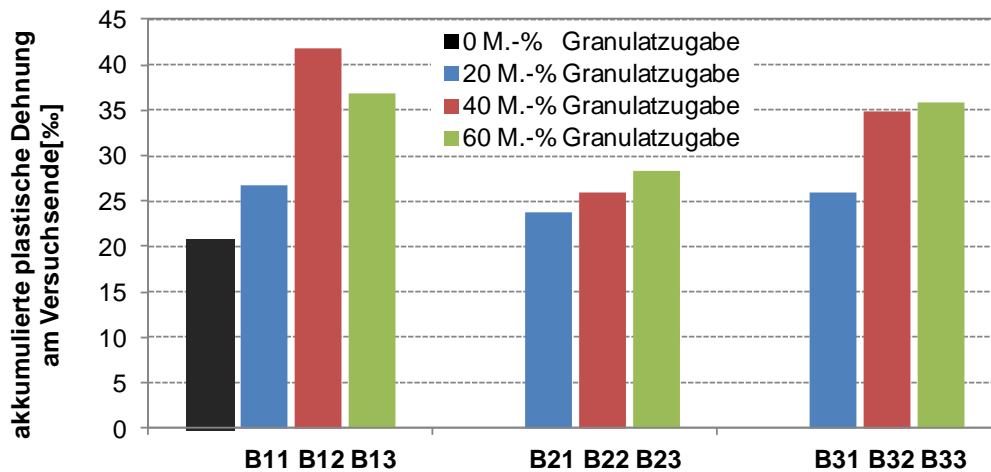


**Abbildung 45: Verlauf der akkumulierten plastischen Dehnung und der Kriechrate für die Asphaltbinderschicht-Variante B21 (20 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) im Triaxialversuch.**

Die Werte der akkumulierten bleibenden Verformung am Versuchsende (nach 25.000 Lastwechseln) und die Werte der Kriechrate  $f_c$  sind in Tabelle 27 und jeweils in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt.

**Tabelle 27: Akkumulierte plastische Dehnung am Versuchsende und Kriechrate für die Asphaltbinder-Varianten**

Variante	Akkumulierte plastische Dehnung am Versuchsende $\epsilon_{pd}$ [‰]		Kriechrate $f_c$ [ $\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ ]	
	Einzelwert	Mittel	Einzelwert	Mittelwert
B0	20,93	20,70	0,160	0,177
	19,75		0,219	
	21,43		0,152	
B11	26,75	26,64	0,137	0,181
	26,18		0,257	
	27,00		0,149	
B12	35,94	41,81	0,473	0,799
	41,71		1,206	
	47,78		0,719	
B13	38,38	36,88	0,488	0,533
	30,73		0,403	
	41,54		0,709	
B21	23,84	23,67	0,174	0,189
	23,06		0,227	
	24,12		0,165	
B22	28,11	25,93	0,208	0,204
	24,12		0,165	
	25,57		0,239	
B23	30,18	28,25	0,501	0,381
	32,66		0,391	
	21,91		0,250	
B31	25,23	26,02	0,269	0,229
	25,18		0,197	
	27,65		0,220	
B32	28,33	34,89	0,386	0,589
	39,74		0,727	
	36,60		0,653	
B33	39,08	35,78	0,938	0,716
	28,89		0,437	
	39,36		0,77	



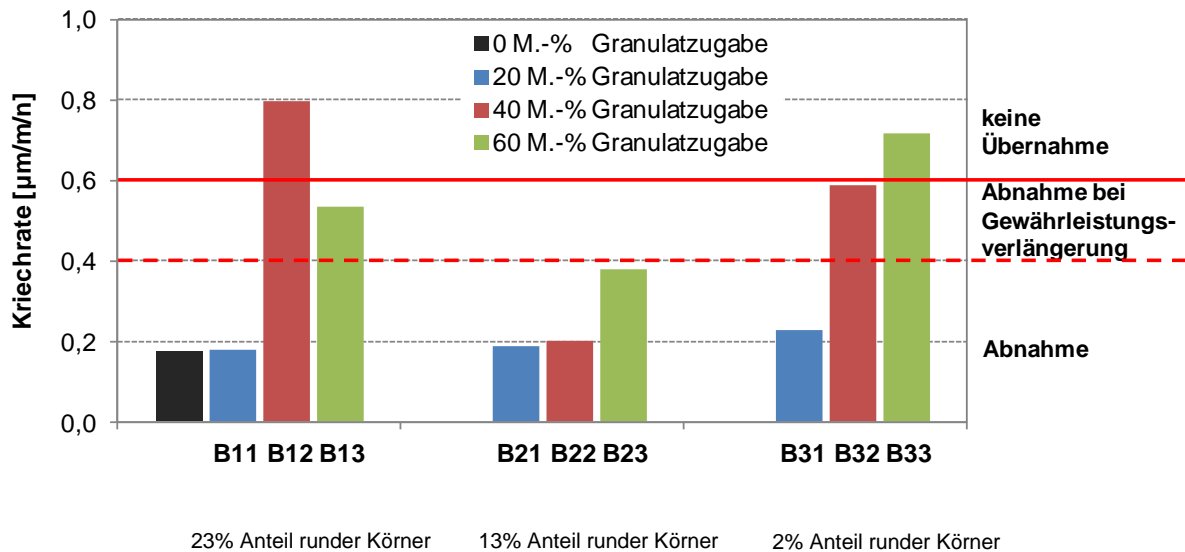
**Abbildung 46: Mittelwerte der akkumulierten plastischen Dehnungen am Versuchsende des Triaxialversuchs (nach 25.000 Lastwechseln) für die Asphaltbinder-Varianten.**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verformungsbeständigkeit tendenziell mit steigendem Asphaltgranulat-Zugabeanteil sinkt, resultierend in höheren Kriechraten und höheren plastischen Dehnungen. Einzige Ausnahme ist die Asphaltbinder-Variante B12 mit 40 M.-% Asphaltgranulat, die eine deutliche Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante B13 (60 M.-% Asphaltgranulat) aufweist.

Im Vergleich zu Referenzvariante B0 (ohne Asphaltgranulat) zeigen alle Varianten, die mit 20 M.-% Asphaltgranulat hergestellt sind, eine abnehmende Beständigkeit gegen bleibende Verformungen. Bei höheren Asphaltgranulatmengen sind die Unterschiede zu Variante ohne Asphaltgranulat deutlich höher (mit der Ausnahme der Variante B22 mit 40 M.-% Asphaltgranulat).

Die Referenzvariante B0 ist so konzipiert, dass sie den Anforderungskategorien V3/V4 eines AC 16 binder Mischguts gemäß den RVS 08.16.06 genügt (Beständigkeit gegen bleibende Verformung  $f_c < 0,4 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ ). Bei Überschreitung des Anforderungswertes von 0,4 bis max. 0,6 erfolgt in der Praxis eine Abnahme nur in Verbindung mit einer Gewährleistungsverlängerung. Wenn gilt  $f_c > 0,6 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$  erfolgt keine Übernahme der Asphalt-schicht.

Anhand der Werte aus Abbildung 47 ist zu schließen, dass die Varianten überwiegend unter der Grenze von  $f_c = 0,6$  liegen und somit die Anforderungen erfüllen. Ausnahmen sind die Varianten B12 und B33 mit jeweils 40 und 60 M.-% Asphaltgranulat, wo  $f_c$ -Werte bis zu  $0,8 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$  erreicht werden.



**Abbildung 47: Mittelwerte der Kriechraten für die untersuchten Asphaltbinder-Varianten mit den GVO-Anforderungen.**

Der Anteil an vollständig gerundeten Körner  $C_{tr}$  übt keinen eindeutigen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit aus (Abbildung 47). So zeigen die Varianten B31-,2,3 mit dem Asphaltgranulat B4 ( $C_{tr} = 2$  M.-%) eine Kriechrate, die in einigen Fällen größer ist als bei den Varianten mit mehr Anteilen an vollständig gerundeten Körner, z. B. Variante B21-,2,3 mit dem Asphaltgranulat B2 ( $C_{tr} = 21$  M.-%).

### 3.2.3 Steifigkeit und Ermüdungsbeständigkeit

#### (a) Steifigkeit

Die Steifigkeiten der Asphalttragschicht-Varianten der Sorte AC 22 trag T1 wurden mittels 4-Punkt-Biegeversuch in Temperatur-Frequenz-Sweeps ermittelt und daraus die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) abgeleitet (vgl. Abschnitt 2.2.4). Für die Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag T1 ohne Asphaltgranulat sind die ermittelten Steifigkeiten für die unterschiedlichen Temperaturen und Frequenzen detailliert in Tabelle 28 und Abbildung 48, sowie die daraus abgeleitete Masterkurve in Abbildung 49 aufgeführt.

**Tabelle 28: Ergebnisse der Temperatur-Frequenz-Sweeps im 4-Punkt-Biegeversuch zur Bestimmung der Masterkurve für die Asphalttragschicht AC 22 trag T1 ohne Asphaltgranulat**

Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	Steifigkeit [MPa]	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	Steifigkeit [MPa]
20	0,1	808	0	0,1	10181
20	0,2	1146	0	0,2	11370
20	0,5	1789	0	0,5	12978
20	1	2460	0	1	14189
20	2	3332	0	2	15390
20	5	4724	0	5	16743
20	8	5535	0	8	17571
20	10	5970	0	10	17932
20	20	7049	0	20	19023
20	30	8107	0	30	19503
10	0,1	3075	-10	0,1	18774
10	0,2	4098	-10	0,2	19858
10	0,5	5504	-10	0,5	21000
10	1	6756	-10	1	21775
10	2	8072	-10	2	22446
10	5	9870	-10	5	23410
10	8	10809	-10	8	23716
10	10	11182	-10	10	24001
10	20	12466	-10	20	24649
10	30	13273	-10	30	25034

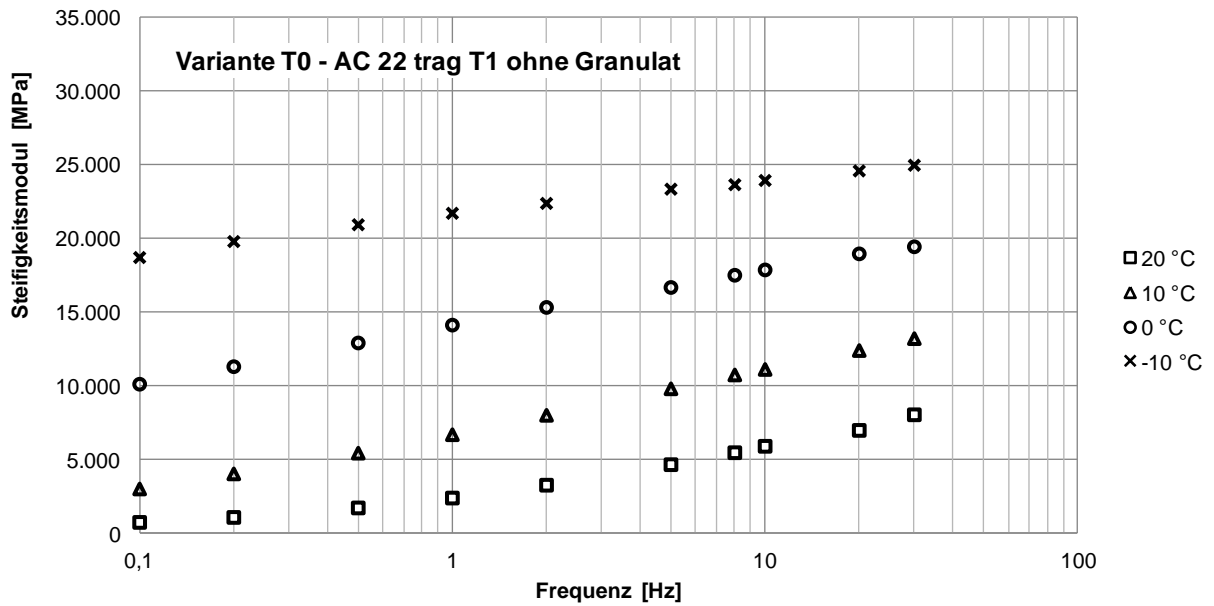


Abbildung 48: Ergebnisse der Temperatur-Frequenz-Sweeps im 4-Punkt-Biegeversuch zur Bestimmung der Masterkurve für die Asphalttragschicht AC 22 trag T1 ohne Asphaltgranulat (Isothermendarstellung).

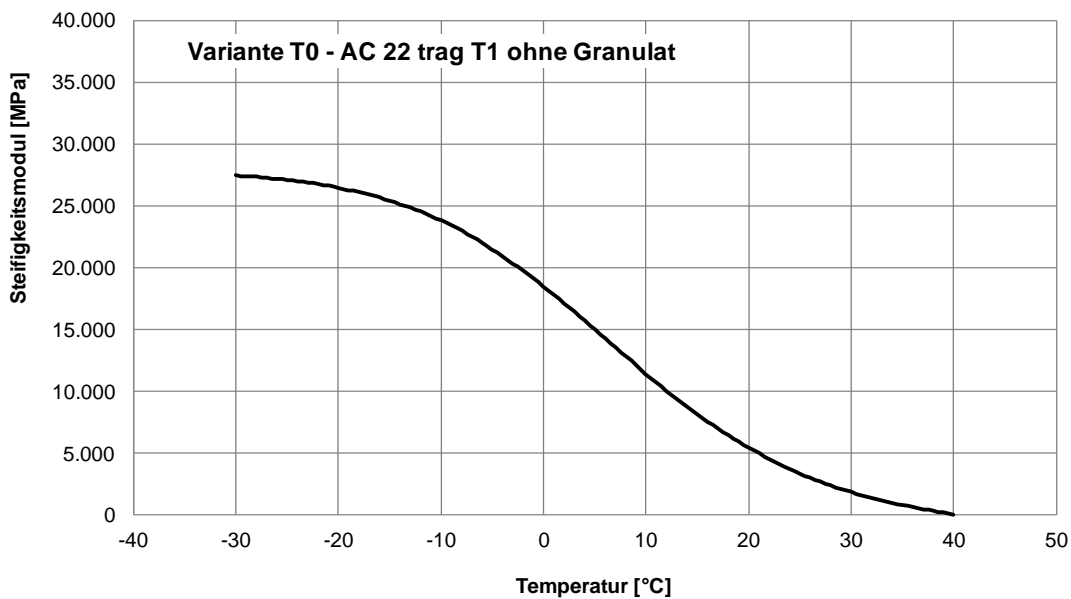
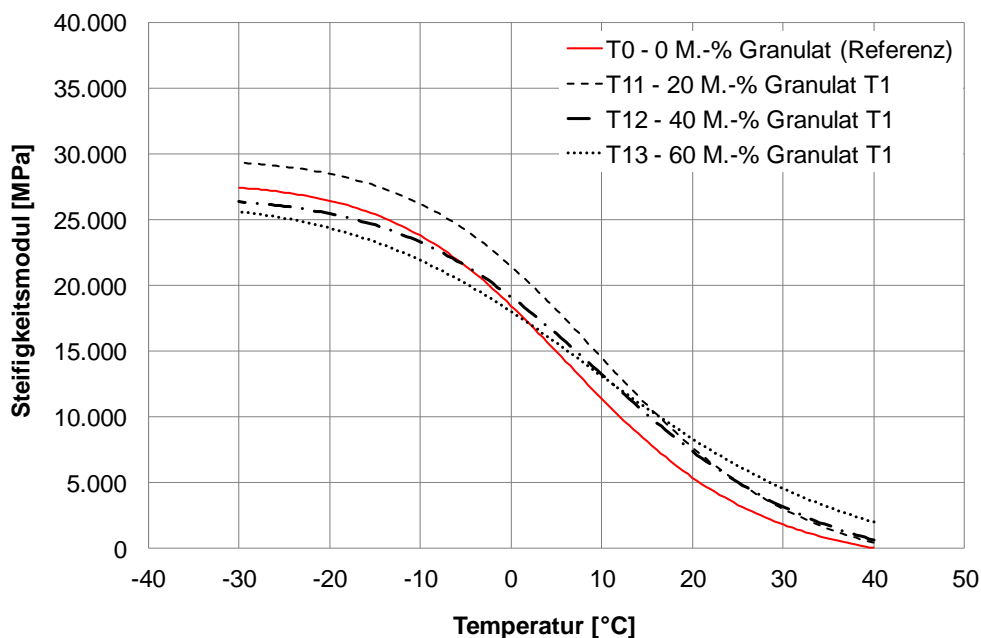


Abbildung 49: Masterkurve für die Asphalttragschicht AC 22 trag T1 als Ergebnis der Temperatur-Frequenz-Sweeps im 4-Punkt-Biegeversuch.

Für die weitere Auswertung werden zur besseren Übersicht nur die Masterkurven der jeweiligen Asphalttragschicht-Varianten vergleichend gegenüber gestellt.



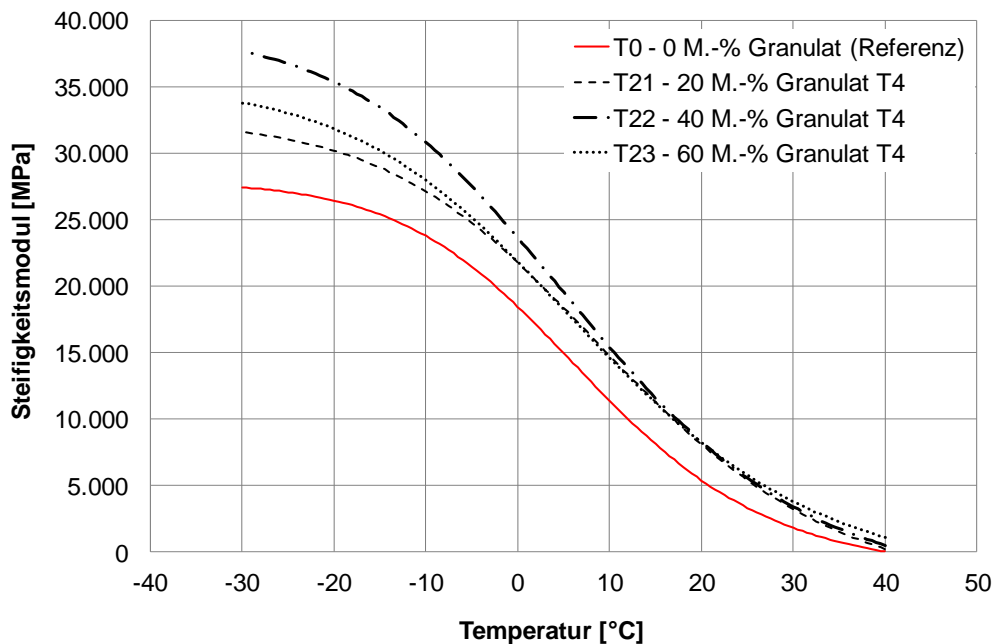
In Abbildung 50 sind die Masterkurven der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Zugabe des Asphaltgranulats T1 der Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat (T0) gegenüber gestellt.



**Abbildung 50: Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat T1 auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Durch die Zugabe von Asphaltgranulat T1 ergeben sich über den gesamten Temperaturbereich insgesamt höhere Steifigkeiten im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat. Lediglich im Bereich von 0 bis -30 C werden geringfügig kleinere Steifigkeiten für die Varianten mit Asphaltgranulat festgestellt. Insgesamt wird kein ungünstiger Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T1 auf die Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 und +40 °C identifiziert.

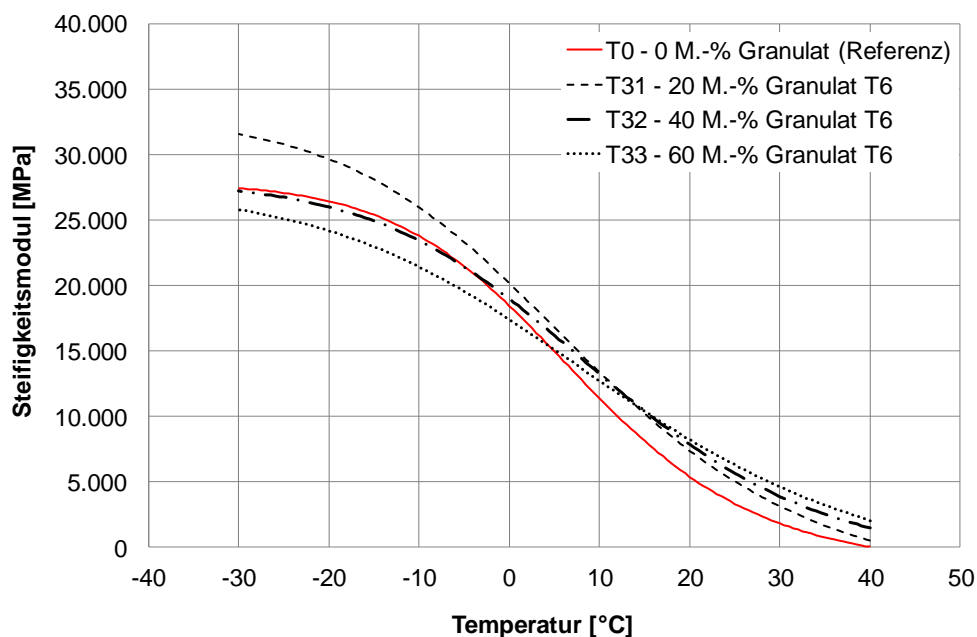
In Abbildung 50 sind die Masterkurven der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Zugabe des Asphaltgranulats T4 der Variante ohne Asphaltgranulat gegenüber gestellt.



**Abbildung 51: Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat T4 auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

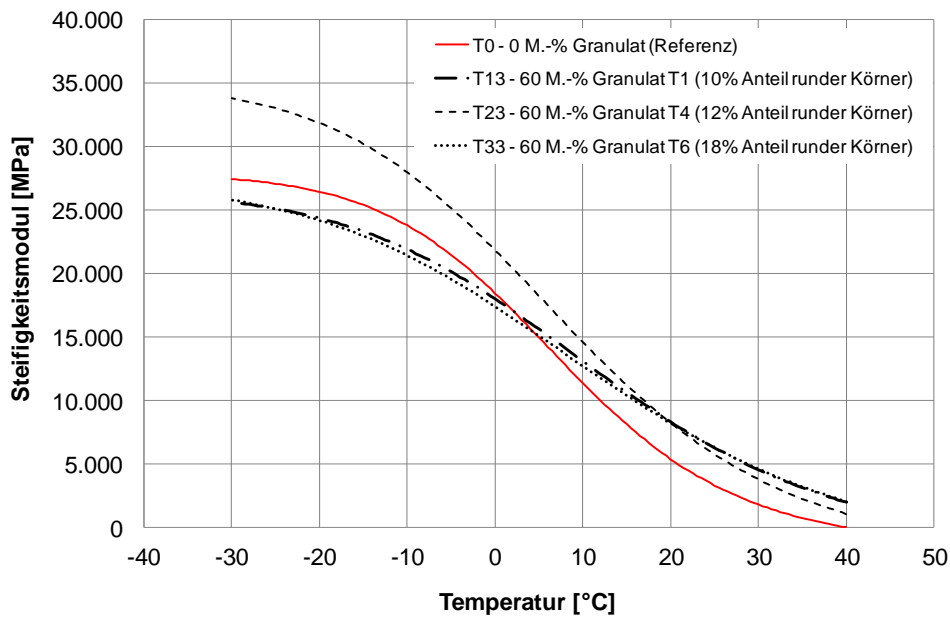
Für die Varianten unter Zugabe des Asphaltgranulats T4 werden im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat über den gesamten Temperaturbereich höhere Steifigkeiten festgestellt. Der Zugabeanteil wirkt sich im oberen Temperaturbereich (+10 bis +40 °C) nicht auf die Steifigkeiten aus, es werden unabhängig vom Zugabeanteil gleiche Steifigkeiten erreicht. Im unteren Temperaturbereich (-10 bis -30 °C) ergeben sich erhebliche Steifigkeitsunterschiede in Abhängigkeit vom Asphaltgranulat-Zugabeanteil. Die höchsten Steifigkeiten werden bei Zugabe von 40 M.-% Asphaltgranulat T4, die geringsten Steifigkeiten bei einem Zugabeanteil von 20 M.-% festgestellt. Insgesamt wird ein vorteilhafter Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat T4 auf die Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 und +40 °C identifiziert.

In Abbildung 52 sind die Masterkurven der Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag mit Zugabe von Asphaltgranulat T6 der Variante ohne Asphaltgranulat gegenüber gestellt.



**Abbildung 52: Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat T6 auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Durch die Zugabe des Asphaltgranulats T6 ergeben sich über den gesamten Temperaturbereich insgesamt höhere Steifigkeiten im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat. Lediglich im Bereich von 0 bis -30 °C werden geringfügig kleinere Steifigkeiten für die Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat T6 festgestellt. Insgesamt wird kein ungünstiger Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T6 auf die Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 und +40 °C identifiziert.



**Abbildung 53: Einfluss des Anteils runder Körnern im Asphaltgranulat auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Es wird kein systematischer und signifikanter Einfluss des Anteils an runden Körnern im Asphaltgranulat auf die Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 bis +40 °C identifiziert. Die Varianten mit den größten Unterschieden bezüglich des Anteils an runden Körnern, nämlich Variante T13 (10 M.-% runde Körner) und Variante T33 (18 M.-% runde Körner), weisen einen praktisch gleichen Steifigkeitsverlauf auf. Für die Variante T23 (12 M.-% runde Körner) werden im Temperaturbereich zwischen -30 und +10 °C höhere Steifigkeiten erhalten.

Insgesamt wird kein ungünstiger Einfluss der runden Gesteinskörner auf die Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 bis +40 °C festgestellt. Obwohl bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat mit Anteilen bis zu 18 M.-% vollständig gerundeten Gesteinskörner dem AC 22 trag hinzugegeben wurde, ergeben sich im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat vergleichbare und überwiegend sogar höhere (vorteilhafte) Steifigkeiten. Lediglich bei der höchsten Asphaltgranulat-Zugabemenge von 60 M.-% werden an zwei von drei Varianten geringere Steifigkeiten im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat im unteren Temperaturbereich (0 bis -30 °C) festgestellt.

## (b) Ermüdungsbeständigkeit

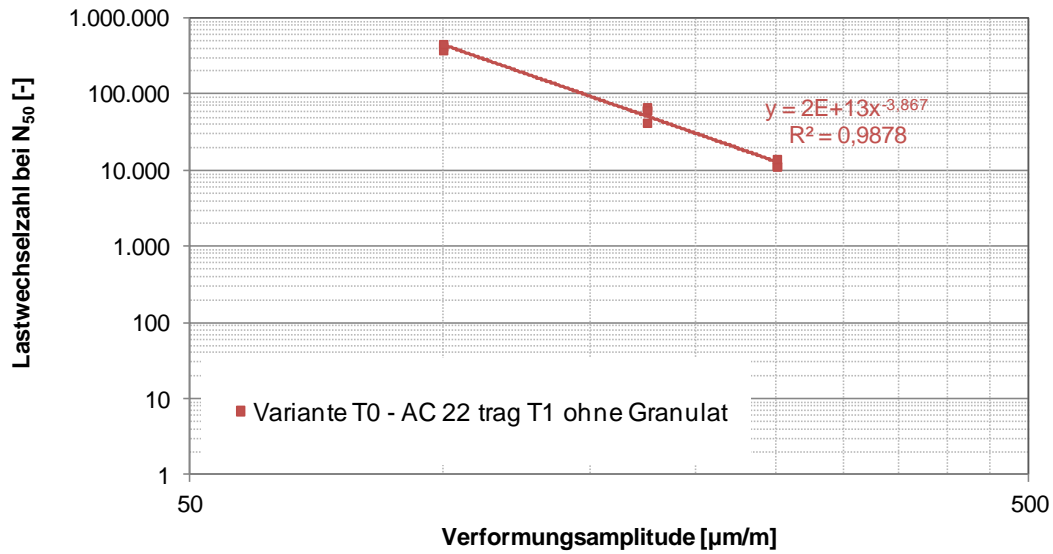
Die Beurteilung der Ermüdungsbeständigkeit erfolgt gemäß den RVS 08.16.06 (2011).

Die Ermüdungsbeständigkeit der Asphalttragschicht-Varianten der Sorte AC 22 trag T1 wurden mittels 4-Punkt-Biegeversuch bestimmt und daraus die materialspezifischen Ermüdungsfunktionen abgeleitet (vgl. Abschnitt 2.2.4). Für die Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat sind die Ermüdungslastwechselzahl  $N_{50}$  (50%-Steifigkeitsabfall) sowie die beim 100. Lastwechsel gemessene Steifigkeit  $S_{\text{mix}}$  und der zugehörige Phasenwinkel  $\varphi$  in Tabelle 29 angegeben. Die daraus abgeleitete material-spezifische Ermüdungsfunktion ist in Abbildung 54 dargestellt.

**Tabelle 29: Ergebnisse des 4-Punkt-Biegeversuchs zur Bestimmung der materialspezifischen Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat**

PK. N <sub>0</sub>	Dehnungsamplitude [μm/m]	N <sub>50</sub> [-]	S <sub>mix</sub> - Amplitude [MPa]	Phasenwinkel [°]
T0-13	250	11.376	3865	35,5
T0-14	250	11.506	4550	32,4
T0-15	250	11.426	4549	32,7
T0-16	250	14.211	4852	33,5
T0-18	175	61.281	4185	33,1
T0-348	175	68.031	4172	31,7
T0-345	175	62.512	5354	30,8
T0-342	175	42.537	4319	30,5
T0-346	100	427.571	5495	29,7
T0-344	100	382.412	6696	28,7
T0-341	100	459.014	4323	29,1
T0-343	100	(203.496) <sup>*)</sup>	5415	29,1

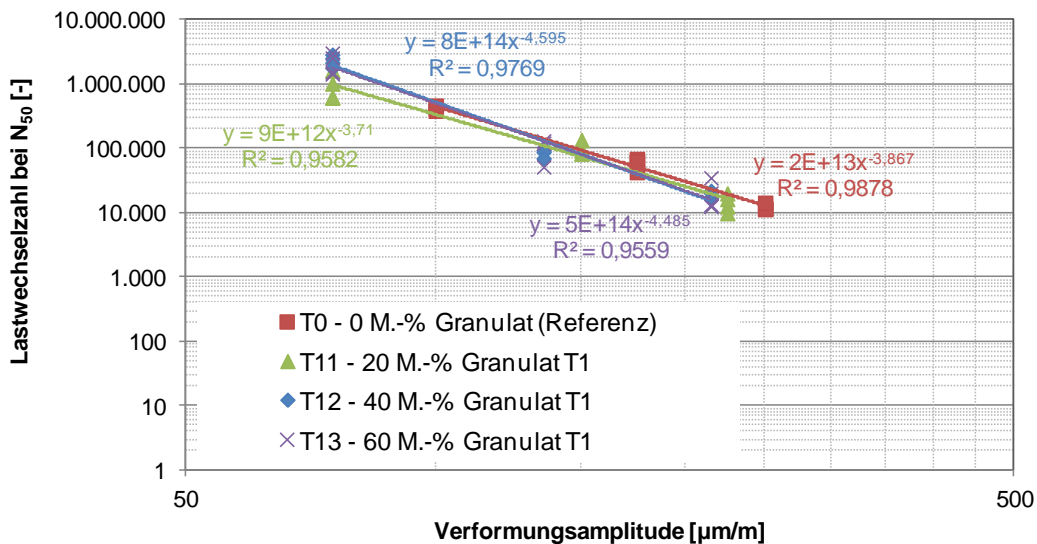
<sup>\*)</sup> Ausreißer; in der Auswertung nicht berücksichtigt.



**Abbildung 54: Materialspezifische Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat als Ergebnis des 4-Punkt-Biegeversuchs.**

Sämtliche Einzelergebnisse liegen in elektronischer Form vor. Für die weitere Auswertung werden zur besseren Übersicht nur die Ermüdungsfunktionen der jeweiligen Asphalttragschicht-Varianten gezeigt.

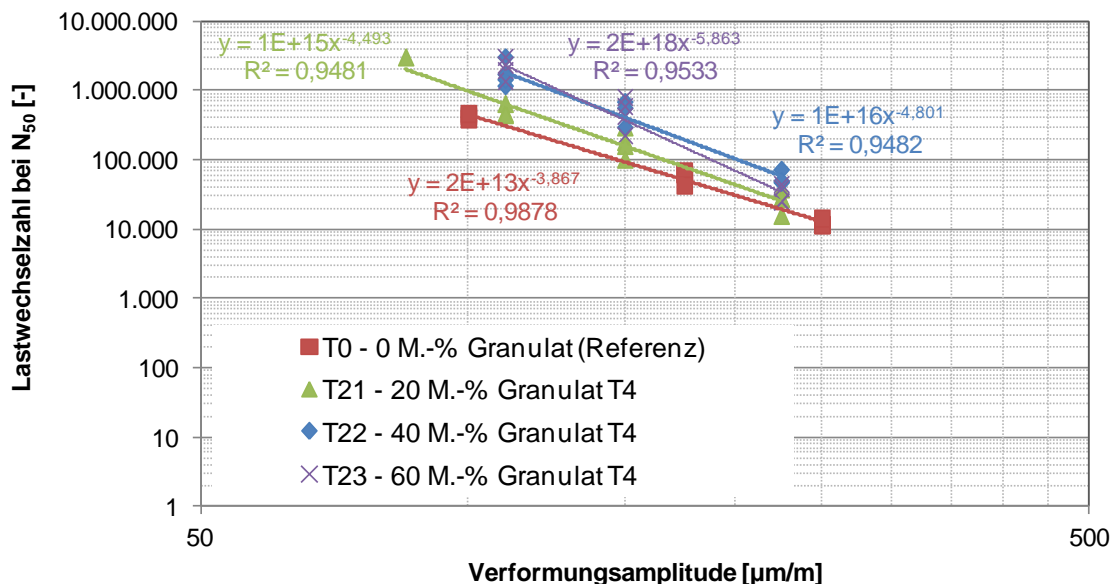
In Abbildung 55 sind die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Zugabe des Asphaltgranulats T1 der Variante ohne Asphaltgranulat vergleichend gegenüber gestellt.



**Abbildung 55: Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T1 auf die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Durch die Asphaltgranulat-Zugabe ergeben sich praktisch keine Änderungen, und es resultieren deckungsgleiche Ermüdungsfunktionen im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat. Lediglich für die Variante mit 20 M.-% Asphaltgranulat T1 werden höhere Ermüdungslastwechselzahlen  $N_{50}$  mit nur geringfügig kleineren Verformungsamplituden erreicht, wobei die Unterschiede marginal ausfallen. Insgesamt wird kein nachteiliger Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T1 auf die Ermüdungsbeständigkeit identifiziert.

In Abbildung 56 sind die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Zugabe des Asphaltgranulats T4 der Variante ohne Asphaltgranulat gegenüber gestellt.

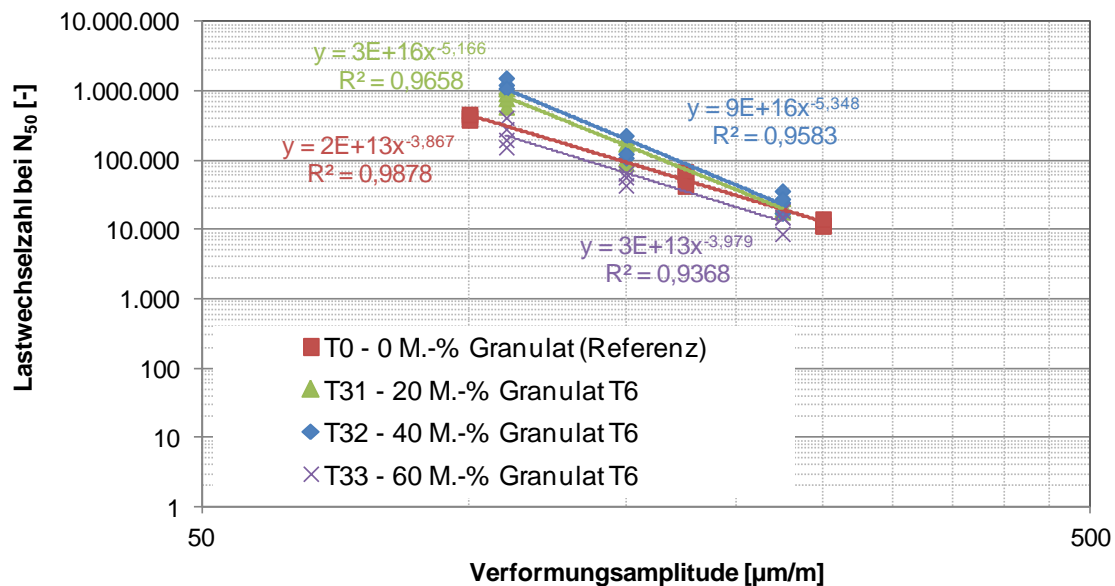


**Abbildung 56: Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T4 auf die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Der Verlauf der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Asphaltgranulat T4 sind im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat nahezu parallel nach oben verschoben und ertragen somit bei gleicher Verformungsamplitude eine höhere Ermüdungslastwechselzahl  $N_{50}$  bis zum Eintritt des Makrorisses. Mit steigendem Zugabeanteil des Asphaltgranulats T4 wird eine Verbesserung der Ermüdungsbeständigkeit festgestellt, wobei sich die Steigerung von 40 M.-% auf 60 M.-% praktisch nicht mehr auf die Ermüdungsbeständigkeit auswirkt und nahezu deckungsgleiche Ermüdungsfunktionen ermittelt werden (in blau und lila dargestellte Verläufe der Asphalttragschicht-Varianten T22 und T23 in Abbildung 56).

Insgesamt wird ein vorteilhafter Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T4 auf die Ermüdungsbeständigkeit identifiziert.

In Abbildung 57 sind die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Zugabe des Asphaltgranulats T6 der Variante ohne Asphaltgranulat vergleichend gegenüber gestellt.



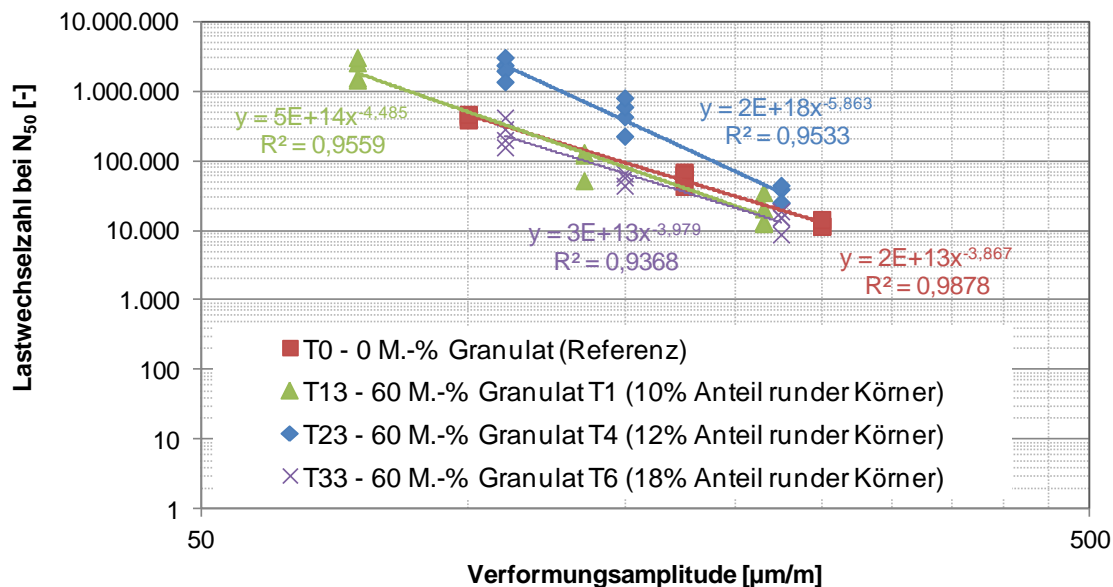
**Abbildung 57: Einfluss der Zugabe des Asphaltgranulats T6 auf die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Bis zu einem Zugabeanteil von 40 M.-% Asphaltgranulat T6 wird eine vorteilhafte Ermüdungsbeständigkeit im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat festgestellt. Die verbesserte Ermüdungsbeständigkeit zeigt sich vor allem im unteren Bereich der Verformungsamplituden, wo die Varianten mit 20 M.-% und 40 M.-% Asphaltgranulat T6 höhere Ermüdungslastwechselzahlen  $N_{50}$  als die Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat erreichen. Die Steigerung des Zugabeanteils auf 60 M.-% Asphaltgranulat T6 resultiert demgegenüber in einer schlechteren Ermüdungsbeständigkeit im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat (in rot und lila dargestellte Verläufe der Asphalttragschicht-Varianten T0 und T33 in Abbildung 57).

Insgesamt wird ein vorteilhafter Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit durch die Zugabe bis 40 M.-% des Asphaltgranulats T6 identifiziert. Die Zugabe von 60 M.-% führt dagegen zu einer geringfügig schlechteren Ermüdungsbeständigkeit.



Um den Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörner im Asphaltgranulat auf die Ermüdungsfunktion bewerten zu können, sind in Abbildung 58 die Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit den höchsten Zugabeanteilen von 60 M.-% mit Angabe des Anteils an runden Gesteinskörnern der Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat gegenübergestellt.



**Abbildung 58: Einfluss des Anteils runder Gesteinskörner im Asphaltgranulat auf die Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag.**

Es wird kein systematischer und signifikanter Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörner im Asphaltgranulat auf die Ermüdungsbeständigkeit festgestellt.

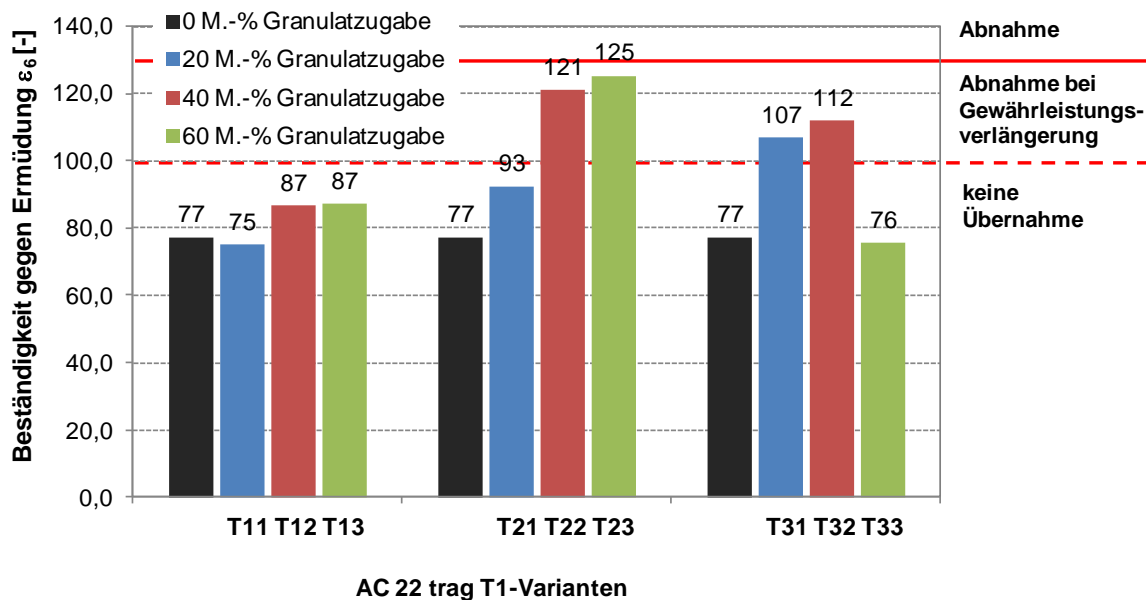
Die Asphalttragschicht-Varianten mit den größten Unterschieden bezüglich des Anteils an runden Gesteinskörnern, nämlich die Variante T13 (10 M.-% runde Gesteinskörner) und die Variante T33 (18 M.-% runde Gesteinskörner), weisen einen praktisch deckungsgleichen Verlauf in den Ermüdungsfunktionen aus. An der Asphalttragschicht-Variante T23 (12 M.-% runde Gesteinskörner) wird die höchste Ermüdungsbeständigkeit (höhere Ermüdungslastwechselzahlen  $N_{50}$  bei gleichen Verformungsamplituden) im Vergleich zu den übrigen Varianten festgestellt.

Insgesamt ist kein unvorteilhafter Einfluss von runden Gesteinskörnern auf die Ermüdungsbeständigkeit feststellbar. Obwohl bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat mit Anteilen an bis zu 18 M.-% vollständig gerundeten Gesteinskörnern hinzugegeben wurde, ergeben

sich im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat vergleichbare und teilweise sogar vorteilhaftere Ermüdungseigenschaften.

In Abbildung 59 sind die  $\varepsilon_6$  - Werte (Mikrodehnung bei  $10^6$  Ermüdungslastwechseln) sämtlicher Asphalttragschicht-Varianten und die Anforderungen bezüglich der Beständigkeit gegen Ermüdung für die GVO Anforderungskategorie E4 eines AC 22 trag Mischguts gemäß den RVS 08.16.06 dargestellt.

Gemäß Regelwerk ist die minimale Mikrodehnung  $\varepsilon_6 = 130$  [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]. Bei Unterschreitung des Anforderungswertes bis max. 100 erfolgt die Abnahme nur in Verbindung mit einer Gewährleistungsverlängerung. Für  $\varepsilon_6 < 100$  erfolgt keine Übernahme der Asphalttschicht.



**Abbildung 59: Mikrodehnungen bei  $10^6$  Ermüdungslastwechseln ( $\varepsilon_6$ ) für die untersuchten Asphalttragschicht-Varianten und GVO-Anforderungen gemäß RVS 08.16.06.**

Anhand der Werte aus Abbildung 59 ist zu schließen, dass keine der Asphalttragschicht-Varianten das Abnahmekriterium  $\varepsilon_6 \geq 130$  erreicht. Die niedrigsten Werte werden für die Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat erreicht. Diese ungünstige Beständigkeit gegen Ermüdung war so nicht zu erwarten, da die Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat gemäß den Anforderungen der RVS 08.97.05 hergestellt wurde und die Einhaltung der Anforderungen nachgewiesen wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1). Unabhängig von der Unterschreitung der GVO-Anforderung kann jedoch ein positiver Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe auf die  $\varepsilon_6$ -Werte festgestellt werden. Durch die Zugabe von Asphaltgranulat, insbesondere mit Zugabeanteilen von 40 M.-% und 60 M.-% (Ausnahme

Variante T33) werden höhere (vorteilhafte)  $\varepsilon_6$ -Werte erreicht. Vier Asphalttragschicht-Varianten ohne Asphaltgranulat mit Asphaltgranulat (T22, T23, T31, T32) erreichen  $\varepsilon_6$ -Werte  $> 100$ , wodurch eine Abnahme bei Gewährleistungsverlängerung möglich ist.

### 3.2.4 Rechnerische Lebensdauer

Die im Abschnitt 3.2.3 erhaltenen Ergebnisse zu den Steifigkeiten und Ermüdungsbeständigkeiten dienen als Eingangsparameter für die Ermittlung der rechnerischen Lebensdauer einer Asphaltbefestigung gemäß Abschnitt 2.2.5. Maßgebliches Ziel der Ermittlung der rechnerischen Lebensdauer war die Überprüfung der ausreichenden Dimensionierung des Schichtaufbaus und eine Vermeidung von Ermüdungsrissen an der Unterseite des bitumengebundenen Oberbaus.

In Abbildung 60 sind die im Rahmen der rechnerischen Bestimmung der Lebensdauer ermittelten Schädigungssummen nach Miner von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß den RVS 03.08.63) mit Asphalttragschichten der Sorte AC 22 trag im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat dargestellt.

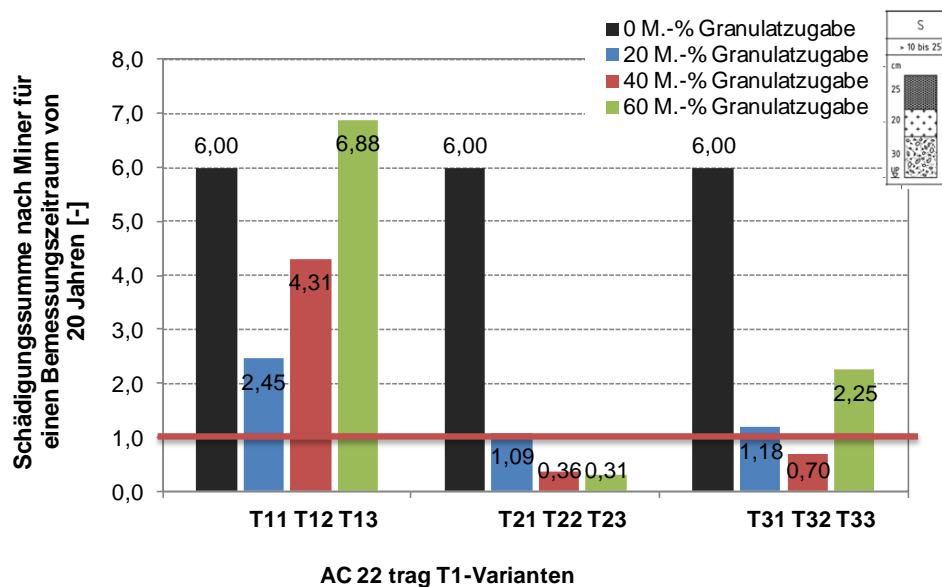


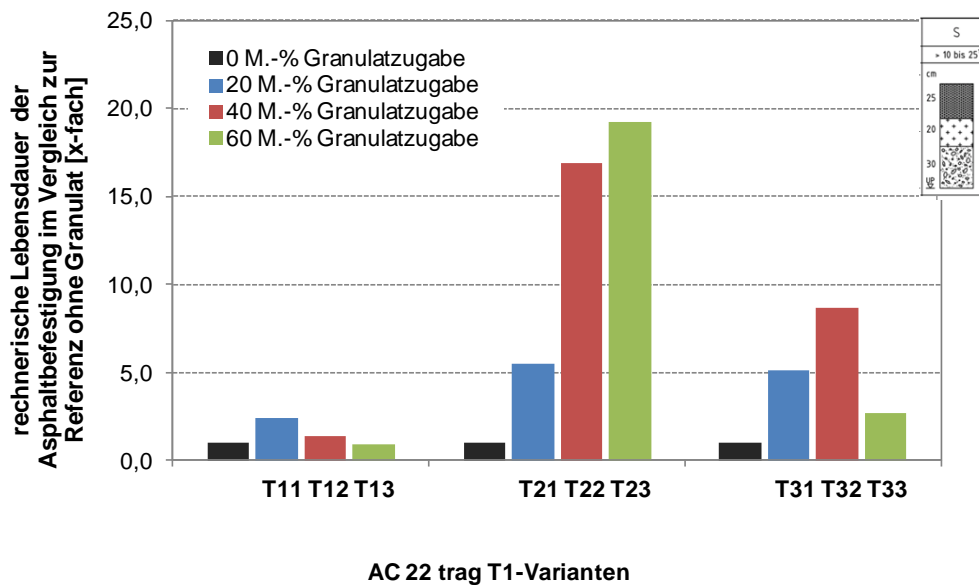
Abbildung 60: Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe auf die rechnerische Lebensdauer (Schädigungssumme nach Miner) von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63) mit Asphalttragschichten der Sorte AC 22 trag im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat.

Der Nachweis der Ermüdungsresistenz der Befestigung gilt als erfüllt, solange die Schädigungssumme nach Miner kleiner bzw. gleich 1 ist.

Für die Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat wird eine Schädigungssumme von 6,00 ermittelt, wonach eine Schädigung der Asphaltbefestigung innerhalb des Nutzungszeitraum von 20 Jahren zu erwarten ist. Diese ungünstige Prognose bezüglich der Lebensdauer war so nicht zu erwarten, da die Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat gemäß den Anforderungen der RVS 08.97.05 hergestellt und die Einhaltung der Anforderungen nachgewiesen wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Unabhängig davon kann insgesamt ein vorteilhafter Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe auf die rechnerische Lebensdauer festgestellt werden. So ergeben sich für sämtliche Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag mit Asphaltgranulat - mit Ausnahme der Variante T13 - im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat deutlich geringere Schädigungssummen (vgl. Abbildung 60). An den Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag Varianten T21, T22 und T23 zeigt sich am deutlichsten der vorteilhafte Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe, es werden Schädigungssummen  $< 1$  ermittelt. Der deutliche Gewinn an rechnerischer Lebensdauer resultiert hauptsächlich aus den guten Ermüdungsbeständigkeiten der Varianten T21 bis T23 (vgl. Abbildung 56) im Vergleich zur Variante ohne Asphaltgranulat. Für die Varianten T31 und T32 werden ebenfalls kleine Schädigungssummen um 1,00 ermittelt.

In Abbildung 61 ist der Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe auf die prognostizierten Lebensdauer der Asphaltbefestigungen mit Asphalttragschichten der Sorte AC 22 trag im Vergleich zur Asphalttragschicht-Varianten AC 22 trag ohne Asphaltgranulat dargestellt.



**Abbildung 61: Einfluss der Asphaltgranulat-Zugabe auf die rechnerische Lebensdauer von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63) mit Asphalttragschichten der Sorte AC 22 trag in Relation zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat.**

Durch die Zugabe von Asphaltgranulat werden in Relation zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat eindeutig längere rechnerische Lebensdauern ermittelt. Es ergeben sich für die Varianten T21 bis T23, sowie T31 und T32 rechnerische Lebensdauern, die teilweise mehr als das 15-fache der Lebensdauer der Variante ohne Asphaltgranulat betragen.

Es wird kein Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörnern im Asphaltgranulat auf die rechnerische Lebensdauer festgestellt. Dies war zu erwarten, da weder ein signifikanter und systematischer Einfluss auf die Steifigkeiten (vgl. Abbildung 53), noch auf die Ermüdungsbeständigkeit (vgl. Abbildung 58) identifiziert wurde und diese Parameter als Eingangsgrößen für die Prognose der rechnerischen Lebensdauer verwendet werden.

### 3.3 Beurteilung der Kompensationsmaßnahme

#### 3.3.1 Auswahl der worst-case-Varianten

Zur Beurteilung des Einflusses der Kompensationsmaßnahme auf die Gebrauchseigenschaften der Asphalttrag- und -binderschichten mit Asphaltgranulat, wurden diejenigen Asphaltvarianten aus Arbeitspaket 2 herangezogen, die als „kritisch“ bezüglich ihrer

Gebrauchseigenschaften für hochbelastete Trag- und Binderschichten eingestuft werden beziehungsweise den Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 bzw. RVS 08.16.06 nicht genügen (worst-case-Varianten).

Die Untersuchungsergebnisse an den Asphaltbinder-Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat haben gezeigt, dass die Asphaltbinder-Variante B12 (AC 16 binder mit 40 M.-% Zugabe von Asphaltgranulat B1) kritisch bezüglich ihrer Gebrauchseigenschaften für hochbelastete Binderschichten eingestuft wird, da an dieser Variante hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit die größte plastische Dehnung ( $\epsilon_{pd} = 41,81\%$ ), sowie die höchste Kriechrate ( $f_c = 0,799 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ ) festgestellt wurden (vgl. Tabelle 27). Hierdurch wird die Anforderung an die Kriechrate gemäß den RVS 08.16.06 (bei  $f_c > 0,6 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$  keine Abnahme der Asphaltsschicht) nicht erfüllt.

An der Asphaltbinder-Variante B12 (worst-case Asphaltbinder) wird als Kompensationsmaßnahme die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels vorgesehen. Anstelle des Bindemittels 45/80-65 wird ein Bindemittel 25/55-55 eingesetzt, um die Verformungsbeständigkeit zu verbessern. Die Zugabe eines höherwertigen Edelsplitts als Kompensationsmaßnahme erscheint nicht zielführend, da die mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnung aus den Asphaltgranulaten der Asphaltbinder den Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05, Tab.7 bereits genügten (vgl. Tabelle 21) und kein nachteiliger Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörnern auf die Gebrauchseigenschaften festzustellen war (vgl. Abschnitt 3.2.1 sowie 3.2.2). Desweiteren ist der Einsatz eines Rejuvenators hier nicht zielführend, da das Bitumen aus der Asphaltgranulat-Variante B1 nur eine moderate Versprödung (ERK = 53,4 °C, vgl. Tabelle 15) aufweist und nur ein geringes Potential zur Reaktivierung vorhanden ist.

Die Untersuchungsergebnisse an den Asphalttragschicht-Varianten unter Zugabe von Asphaltgranulat haben gezeigt, dass die Asphalttragschicht-Variante T13 (AC 22 trag mit 60 M.-% Zugabe von Asphaltgranulat T1) als kritisch bezüglich ihrer Gebrauchseigenschaften für hochbelastete Binderschichten einzustufen ist, da an dieser Variante im Rahmen der rechnerischen Prognose der Lebensdauer die höchste Schädigungssumme nach Miner ermittelt wurde und hierdurch die höchste Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Asphaltbefestigung innerhalb des Nutzungszeitraums von 20 Jahren besteht. Desweiteren erfüllt diese Variante mit einem  $\epsilon_6$ -Wert von 87 (Mikrodehnung bei  $10^6$  Ermüdungslastwechseln, vgl. Abbildung 59) nicht die GVO-Anforderung bezüglich der Beständigkeit

gegen Ermüdung eines AC 22 trag Mischguts der Kategorie E4 gemäß den RVS 08.16.06 (für  $\varepsilon_6 < 100$  erfolgt keine Übernahme der Asphalttschicht).

An der Asphalttragschicht-Variante T13 (worst-case Asphalttragschicht) wird als Kompensationsmaßnahme die Zugabe eines alternativen (weicheren) frischen Bindemittels vorgesehen. Konkret wird anstatt des 50/70 ein 70/100 eingesetzt, um die Ermüdungsbeständigkeit zu verbessern. Die Zugabe eines höherwertigen Edelsplitts als Kompensationsmaßnahme erscheint nicht zielführend, da die mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnung aus den Asphaltgranulaten der Asphalttragschichten den Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05, Tab.7 bereits genügten (vgl. Tabelle 22) und kein nachteiliger Einfluss des Anteils an runden Gesteinskörnern auf die Gebrauchseigenschaften festzustellen war (vgl. Abschnitt 3.2.1 sowie 3.2.3). Desweiteren ist der Einsatz eines Rejuvenators hier nicht sinnvoll. Zwar weist das Bitumen aus der Asphaltgranulat-Variante T1 eine Versprödung auf (ERK = 68,8 °C, vgl. Tabelle 17), jedoch ist die Einsatz eines unmodifizierten (weicheren) 70/100 im Vergleich eines Rejuvenators aufgrund des niedrigeren Beschaffungspreises günstiger und damit aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll.

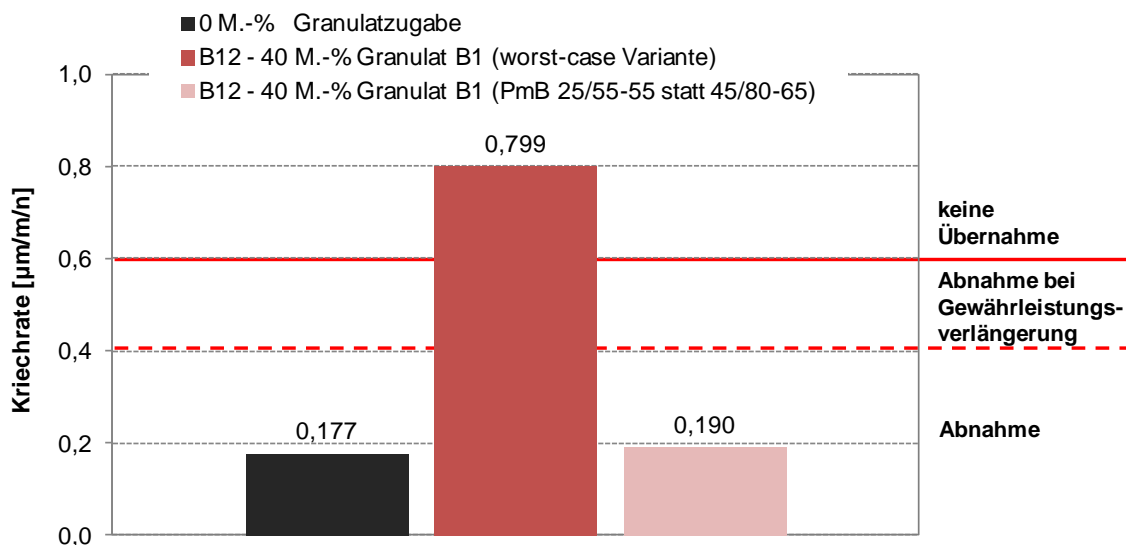
Tabelle 30 zeigt zusammenfassend die Vorgehensweise zur Beurteilung der Wirkung der ausgewählten Kompensationsmaßnahmen an den worst-case-Varianten.

**Tabelle 30: Vorgehensweise zur Beurteilung der ausgewählten Kompensationsmaßnahmen an den worst-case-Varianten**

<b>Worst-case-Variante</b>	<b>Kompensationsmaßnahme</b>	<b>Beurteilung der Wirkung</b>
Asphaltbinder-Variante B 12 (AC 16 binder mit 40 M.-% Zugabe von Asphaltgranulat B1)	Zugabe eines alternativen frischen PmB 25/55-55 anstatt PmB 45/80-65	Bestimmung der Verformungsbeständigkeit mittels Triaxialversuch
Asphalttragschicht-Variante T 13 (AC 22 trag mit 60 M.-% Zugabe von Asphaltgranulat T1)	Zugabe eines alternativen (weicheren) frischen Bitumen 70/100 anstatt 50/70	Bestimmung der Steifigkeit und Ermüdungsbeständigkeit mittels 4-Punkt-Biegeversuch  Prognose der rechnerischen Lebensdauer

### 3.3.2 Wirkung der Kompensationsmaßnahme

In Abbildung 62 ist der Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels PmB 25/55-55 statt PmB 45/80-65“ auf die Kriechraten der Asphaltbinderschicht-Variante B12 (40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) und die entsprechende GVO-Anforderung an die Kriechrate gemäß den RVS 08.16.06 dargestellt.

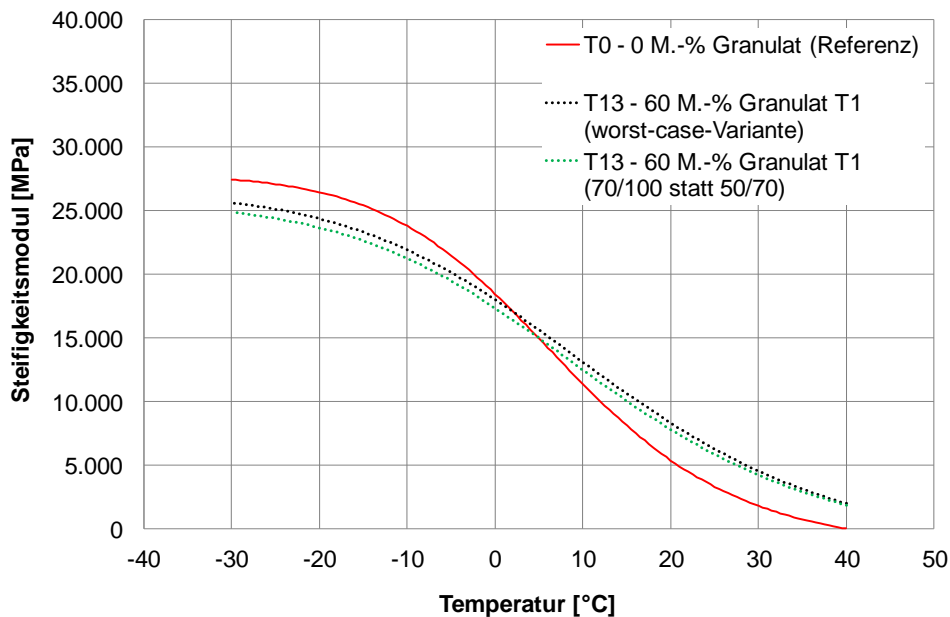


**Abbildung 62: Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines PmB 25/55-55 statt 45/80-65“ auf die Kriechraten der Asphaltbinderschicht-Variante B12 (40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe), sowie GVO-Anforderungen.**

Durch die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels PmB 25/55-55 statt PmB 45/80-65 wird eine signifikante Verbesserung der Verformungsbeständigkeit an der worst-case-Variante erreicht. Die ungünstige Verformungsbeständigkeit (hohe Kriechrate von 0,799  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ ) der worst-case-Variante kann durch die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels PmB 25/55-55 statt PmB 45/80-65 kompensiert werden, resultierend in einer günstigen Verformungsbeständigkeit (Kriechrate = 0,190  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ ), die auf vergleichbarem Niveau zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat liegt. Durch die Kompensation wird die Abnahme der Asphalttschicht ermöglicht.

In Abbildung 63 ist der Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) dargestellt.

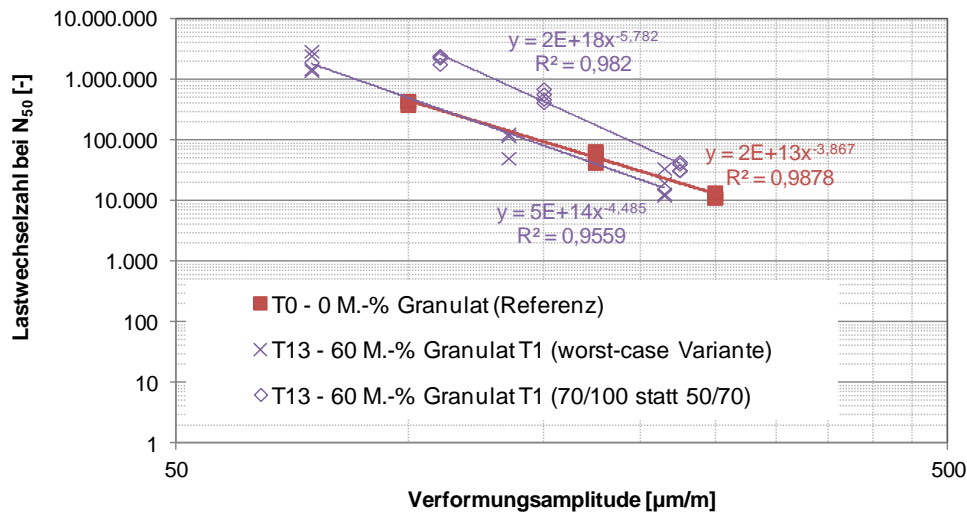




**Abbildung 63: Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe).**

Durch die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70 werden nur geringfügige Änderungen bezüglich der Steifigkeiten im Temperaturbereich zwischen -30 und +40 °C festgestellt. Tendenziell werden durch die Zugabe des weicheren Bindemittels 70/100 statt des 50/70 folgerichtig geringe Steifigkeiten erreicht. Die Auswirkung geringerer Steifigkeiten auf die rechnerische Lebensdauer kann nur in Verbindung mit den Ermüdungseigenschaften beurteilt werden.

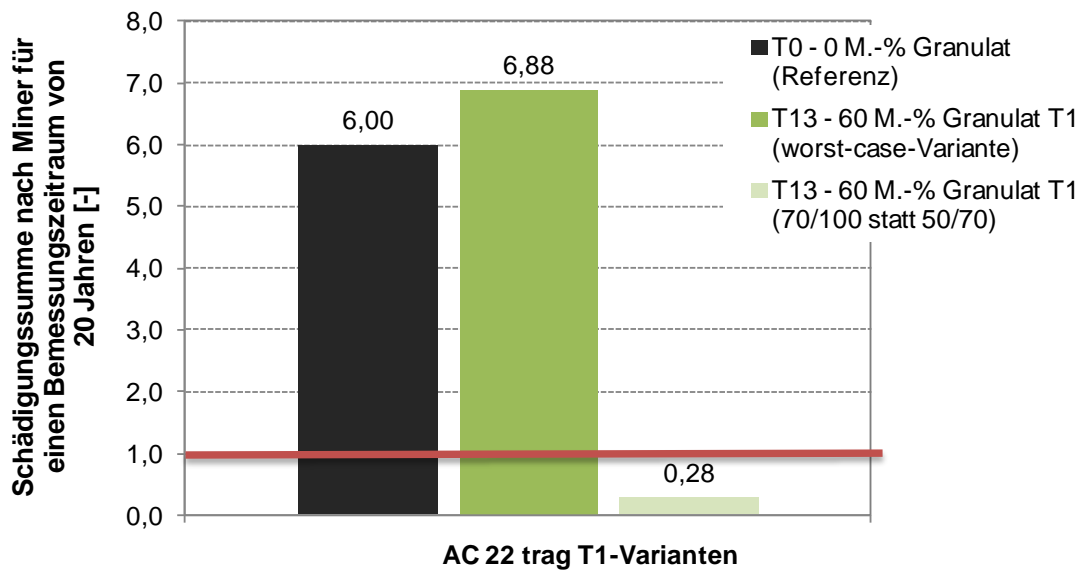
In Abbildung 64 ist der Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die Ermüdungsfunktionen (Masterkurven) der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) dargestellt.



**Abbildung 64: Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe).**

Durch die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70 wird eine signifikante Verbesserung der Ermüdungsfunktion im Vergleich zur worst-case-Variante, wie auch zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat festgestellt. Der Verlauf der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht-Variante T13 mit weicherem Bindemittel 70/100 statt 50/70 ist im Vergleich zur worst-case-Variante und zur Variante ohne Asphaltgranulat nahezu parallel nach oben verschoben. Dadurch wird bei gleicher Verformungsamplitude eine höhere Ermüdungslastwechselzahl  $N_{50}$  bis zum Eintritt des Makrorisses erreicht.

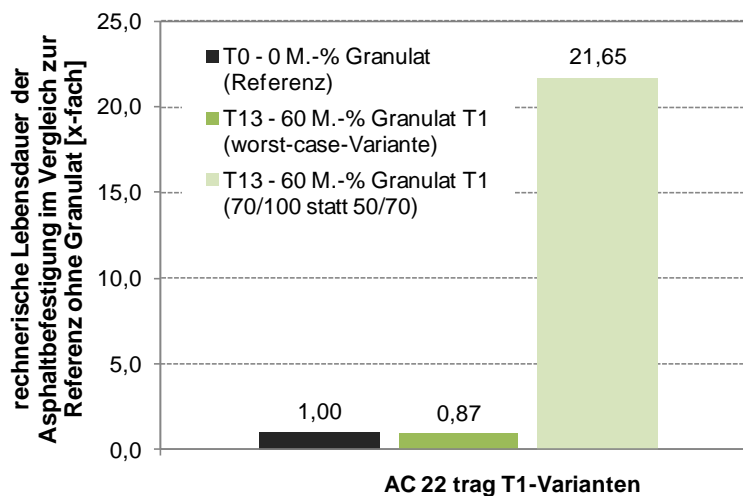
Abbildung 65 zeigt den Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70“ für die Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) auf die Schädigungssummen nach Miner von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63).



**Abbildung 65: Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die Schädigungssumme nach Miner von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63) mit der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe).**

Durch die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70 wird eine signifikante Verbesserung in Bezug auf die Schädigungssumme nach Miner im Vergleich zur worst-case-Variante, wie auch zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat festgestellt. Die Nachteile zufolge einer nachteiligen Ermüdungsfunktion (vgl. Abbildung 64), die zu hohen Schädigungssummen nach Miner für die worst-case-Variante und die Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat führen, können durch die Zugabe des weicheren Bindemittels 70/100 statt 50/70 vollständig kompensiert werden, resultierend in einer geringen Schädigungssumme von 0,28.

In Abbildung 65 ist der Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70“ an der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) auf die rechnerische Lebensdauer von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63) in Relation zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat dargestellt.



**Abbildung 66: Einfluss der Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines Bindemittels 70/100 statt 50/70“ auf die rechnerische Lebensdauer von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S (gemäß RVS 03.08.63) mit der Asphalttragschicht-Variante T13 (60 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe) in Relation zur Asphalttragschicht-Variante ohne Granulat.**

Die Kompensationsmaßnahme „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels 70/100 statt 50/70“ an der worst-case-Variante führt zu einer signifikant höheren rechnerischen Lebensdauer der Asphaltbefestigung im Vergleich zur worst-case-Variante und Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat. Es wird eine um den Faktor 20 längere Lebensdauer durch die Kompensationsmaßnahme erreicht.

Insgesamt stellen sich die angewandten Kompensationsmaßnahmen „Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels“ als äußerst wirksam in Bezug auf die Verbesserung der Verformungs- und Ermüdungsbeständigkeit der worst-case-Varianten heraus. Durch die Anpassung des frischen Bindemittels werden die entsprechenden GVO-Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit (AC 16 binder, Kategorie V4) und die Ermüdungsbeständigkeit (AC 22 trag, Kategorie E4) gemäß den RVS 08.16.06 eingehalten. In der Folge wird eine deutliche längere rechnerische Lebensdauer von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S prognostiziert.

## **4 LEITFADEN ASPHALTRECYLING (Erstfassung)**

### **4.1 Allgemeines**

Die nachfolgenden Hinweise zum Heißrecycling mit hohen Zugabeanteilen geben erste Hinweise zur vertraglichen und baupraktischen Umsetzung, sind aber nicht als abschließend gültige Handlungsanweisung zu verstehen. Eine detaillierte Ausarbeitung dieser Erstfassung des Leitfadens zu einem anwendungsgerechten und praktikablen Dokument wird in Abstimmung mit der ASFINAG erarbeitet. Dazu sind Workshops mit den potentiellen Anwendern geplant.

### **4.2 Gewinnung von Asphaltgranulat durch Fräsen und zum Haldenmanagement**

Im Gegensatz zu Deutschland existiert in Österreich kein Technisches Regelwerk (RVS oder RVS-Arbeitspapier), welches die Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Ausbautechniken, insbesondere der Frästechnik, abbildet. Grundsätzliche Festlegungen sind zwar in der ÖNORM B 2251 Abbrucharbeiten – Werkvertragsnorm als auch in der ÖNORM B 3151 Rückbau als Standardabbruchmethode enthalten, asphaltspezifische Randbedingungen finden jedoch keine Berücksichtigung. Vorgaben zur Lagerung von mineralischen Ausbaustoffen (bspw. sortenreine Trennung) sind im Merkblatt Zwischenlager für mineralische Baurestmassen, Asphaltaufbruch und Betonabbruch enthalten (BRV, 2006). Des Weiteren stellt auch die RVS 11.03.22 im Zusammenhang mit der werkseigenen Produktionskontrolle Anforderungen an die Lagerung von Ausbauasphalt (FSV, 2012a). Unter Einhaltung der Vorgaben der eben genannten Regelwerke in Verbindung mit den nachfolgenden Empfehlungen, kann die Gewinnung eines qualitativ hochwertigen Ausbauasphaltes/Asphaltgranulats, der optimal geeignet zum Einsatz in hochbelasteten Asphalttrag- und –binderschichten ist, realisiert werden.

Für eine größtmögliche Gleichmäßigkeit des eingesetzten Asphaltgranulats wird der Ausbauasphalt idealerweise schichtenweise und sortenrein gefräst und stammt aus nur einer Baumaßnahme, für die es auch wieder eingesetzt wird. Bei der Vorerkundung mittels Bohrkernentnahme empfiehlt sich, ein entsprechend enges Raster zu wählen, sodass die Grenzen der eingebauten Asphaltmischgutarten und -sorten sowie die Schichtdicken genau erkannt werden. Um Verunreinigungen im Fräsgut zu minimieren, kann es sinnvoll

sein, beim Fräsen bestimmte Bereiche auszusparen (insbesondere verschmutzte Fahrbahnträger). Ferner ist eine sorgfältige Qualitätskontrolle des Asphaltgranulats beim Warenaufgang der Asphaltmischanlage unabdingbar.

In der Praxis sind diese Vorgaben nicht ohne Weiteres umzusetzen. Das Fräsgut wird in Halden gelagert, deren Zusammensetzung und Homogenität erheblich schwanken können. Zumindest eine Unterscheidung in Fräsasphalt aus Asphaltdeckschichten und in Asphaltaufruch und Fräsgut aus anderen Asphalttschichten (mit vergleichsweise weniger guter Gesteinsqualität) ist zu empfehlen. Insbesondere bei großen Baumaßnahmen, wo die Fahrbahnaufbauten kaum variieren, ist es vorteilhaft, das Asphaltgranulat aus beprobten und anforderungsgerechten Halden zu entnehmen, solange bis die Halde vollständig aufgebraucht ist und danach mit einer nächsten Halde fortzufahren. Hierzu wird empfohlen, pro "angefangene" 500 t des zur Wiederverwendung vorgesehenen Fräsguts mindestens fünf Proben an einer Halde zu entnehmen und diese auf ihre Gleichmäßigkeit zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.3 in Anlehnung an das deutsche Regelwerk Merkblatt zur Wiederverwendung von Asphalt, MW A).

Sofern Fräsgut unterschiedlicher Herkunft zur gemeinsamen Wiederverwertung vorgesehen ist, sollte vor der Probenahme eine Zerkleinerung und Durchmischung erfolgen, da ansonsten kein repräsentatives Ergebnis bei der Bestimmung der Gleichmäßigkeit des Fräsguts (siehe Abschnitt 4.3) erwartet werden kann. Vor der Durchmischung ist in jedem Fall die Umweltverträglichkeit (Prüfung auf teer-/pechtypische Bestandteile) zu klären.

Bezüglich der Korngrößenverteilung ist zu beachten, dass durch das Fräsen und Aufbrechen des Ausbauasphalts eine Kornverfeinerung einhergeht. Die Eigenschaften des Asphaltgranulats können daher im Hinblick auf Einhaltung des (minimalen) Grobkornanteils und des maximalen Füllergehalts von den allgemein gültigen Anforderungen des Technischen Regelwerks abweichen, und das Asphaltgranulat kann nicht ohne Weiteres (z. B. ergänzende Zugabe von grober Gesteinskörnung) als dieselbe Asphaltmischgutsorte (für die gleiche Schicht) wiederverwendet werden. Ferner ist der Bindemittelgehalt auf den durch Kornverfeinerung bedingten, hohen Füllergehalt abzustimmen, sodass das Füller-Bitumen-Verhältnis ausgewogen ist und ein ausreichend flexibles, rissbeständiges Asphaltmischgut resultiert.

### 4.3 Gleichmäßigkeit und Zugabeanteil des Asphaltgranulats

Die maximal zulässige Menge an Asphaltgranulat hängt wesentlich mit der Gleichmäßigkeit der eingesetzten Asphaltgranulate zusammen. Die Art und Weise der Gewinnung und der Lagerung von Ausbauasphalt haben auf die Gleichmäßigkeit seiner Eigenschaften und die Qualität einen entscheidenden Einfluss.

Für die Wiederverwendung von Ausbauasphalt galt bis September 2009 die RVS 08.97.04 Asphaltgranulat, welche durch den Arbeitsausschuss A03 Erhaltung erarbeitet wurde. Die RVS 08.97.04 enthielt elementare Anforderungen sowie Prüfverfahren für den Umgang mit Asphaltgranulat. Diese Richtlinie wurde allerdings zurückgezogen, sodass aktuell keine Regelung zur Beurteilung der Asphaltgranulatqualität in Österreich zur Verfügung steht.

Im deutschen Regelwerk (TL AG-StB) ist eine Vorgehensweise zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit und Qualität von Asphaltgranulat definiert. Dazu sind die Merkmale Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] des aus dem Ausbauasphalt zurückgewonnenen Bindemittels, Bindemittelgehalt [M.-%], Kornanteil [M.-%] < 0,063 mm (Füller), Kornanteil [M.-%] 0,063 bis 2 mm und Kornanteil [M.-%] > 2 mm fünffach zu bestimmen und die Spannweiten (Abstand zwischen dem größten und kleinsten Messwert der ausreißerbereinigten Messreihe) der einzelnen Merkmale zu ermitteln. Anhand der ermittelten Spannweiten – wobei die größte Spannweite maßgebend ist – kann gemäß TL Asphalt-StB 07/13 rechnerisch bzw. graphisch mittels Nomogramm der maximal zulässige Zugabeanteil an Asphaltgranulat in neuem Asphaltmischgut bestimmt werden. Meist wird die Zugabemenge begrenzt durch die engen zulässigen Spannweiten für den Bindemittelgehalt und den Fülleranteil. Zusätzlich ist gemäß Regelwerk die Zugabemenge durch den Erweichungspunkt eingeschränkt (sh. TL Asphalt-StB 07/13), weil der Erweichungspunkt des Bindemittels, das aus der Vermischung des Bindemittels im Asphaltgranulat mit Frischbindemittel resultiert, innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen muss. Es wird empfohlen, die Vorgehensweise zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit und Qualität, wie auch der Festlegung der Zugabeanteils von Asphaltgranulat gemäß TL AG-StB und TL Asphalt-StB 07/13 in das österreichische Technische Regelwerk zu integrieren.

Die Festlegung des maximalen Zugabeanteils von Asphaltgranulat sollte jedoch nicht ausschließlich anhand der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats erfolgen, da beispielsweise gemäß TL Asphalt-StB 07/13 für Asphaltbinderschichten nur ein maximaler Zugabeanteil von 50 M.-% zulässig ist.

Für die im F&E-Projekt ORAB untersuchten Asphaltbinder- und Asphalttragschichten wurde jedoch dargelegt, dass ein maximaler Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat zu realisieren ist, ohne signifikant schlechtere Gebrauchseigenschaften und dadurch eine kürzere rechnerische Lebensdauer im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante ohne Asphaltgranulat hinnehmen zu müssen. Sofern Zugabeanteile > 50 M.-% angestrebt werden, wird empfohlen im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung gebrauchsvhaltensorientierte Prüfungen an der jeweilig vorgesehenen Mischgutrezeptur vorzunehmen (vgl. Abschnitt 4.7). Nur so lässt sich zielsicher die Auswirkung eines hohen Zugabeanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltbefestigung beurteilen und eine Prognose der rechnerischen Lebensdauer der Asphaltbefestigung realisieren.

#### **4.4 Mischgutherstellung in Asphaltmischanlagen mit Paralleltrommel**

Recyclingasphalt wird ausschließlich in Asphaltmischanlagen hergestellt.

In Österreich sind zurzeit nur wenige Paralleltrommeln installiert. Es ist zu prüfen, welche maximalen Zugaberaten durch alternative Anlagentechnik erreicht werden können, etwa durch eine chargenweise Zugabe an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Produktionsprozesses.

Hohe Zugaberaten sind heute zielsicher nur mit einer Paralleltrommel zusätzlich zur Trockentrommel zu erreichen. Die Überhitzung des Asphaltgranulats wird durch eine exakte Temperatursteuerung in der Paralleltrommel vermieden. Hierzu und zur Ermittlung der optimalen Mischzeit für den vollständigen Aufschluss des Asphaltgranulats (z. B. Verlängerung der Nachmischzeit von mindestens 10 Sekunden je Charge) sind Probemischungen erforderlich.

Die Umhüllung eines Einzelkorns im Asphaltgranulat, das bereits mit altem Bitumen (vollflächig oder zumindest teilweise) umhüllt ist, mit Frischbindemittel kann eine Doppelumhüllung verursachen. Es wird zurzeit davon ausgegangen, dass die Doppelumhüllung



maßgeblich die Verdichtungswirkung und somit die Stabilität beeinflusst, und dass der Doppelumhüllungseffekt durch eine optimale Mischwirkung gesteuert werden kann.

Das einzubauende Asphaltmischgut soll nur aus einer Asphaltmischanlage, vorzugsweise mittels Thermomulde, angeliefert werden.

#### **4.5 Hinweise zum Eignungsnachweis für Asphaltgranulat**

Ist bei Straßenbaumaßnahmen die Mitverwendung von Asphaltgranulat vorgesehen, das im Zuge der Baumaßnahme aus dem vorhandenem Oberbau gewonnen wird, bspw. bei Generalsanierungen, so ist praktisch im Angebot kein Eignungsnachweis für dieses Asphaltgranulat möglich. Der Eignungsnachweis kann letztlich erst nach Vergabe und Projektstart realisiert werden – als Initialprüfung vor dem Einbaubeginn (Mischgutkonzeption) und während der Baumaßnahme, wenn sich die maßgeblichen Eigenschaften des Asphaltgranulats ändern. Im Rahmen der Initialprüfung ist die Anwendung von GVO Prüfungen gemäß den RVS zu empfehlen (siehe unten). Während der Baumaßnahme sind diese aus zeitlichen und monetären Gründen kaum zu realisieren.

#### **4.6 Einsatz von Verjüngungsmitteln**

Es ist hinlänglich nachgewiesen, dass das aus Ausbauasphalt zurückgewonnene Bindemittel gegenüber dem Ausgangszustand in Abhängigkeit der Verarbeitungs- und Einbaubedingungen sowie der Liegezeit (aufgrund oxidativer Bitumenalterung infolge Reaktion mit Luftsauerstoff) deutlich verhärtet, versprödet und daher im Hinblick auf seine Gebrauchseigenschaften (insbes. Haftverhalten und Anfälligkeit gegenüber Sprödbruch) weniger leistungsfähig ist. Die nachteilige Viskositätsveränderung kann im Zuge der Herstellung von neuem Asphaltmischgut durch Vermischen mit entsprechend weichem frischem Bitumen zumindest teilweise kompensiert werden. Gleichzeitig ist festzustellen, dass in Regionen mit hohen Recyclingquoten verstärkt Ausbauasphalte zurückgewonnen werden, die bereits mit Asphaltgranulat hergestellt worden sind und damit einen besonders hohen Alterungsgrad aufweisen. Innovative Ansätze zur Erhöhung der Verwendungsquote zielen daher darauf ab, eventuelle Qualitätseinbußen infolge von Bindemittelalterung mittels Zugabe von geeigneten Rejuvenatoren zu kompensieren und damit auch die notwendige zusätzliche Zugabe von frischem Bindemittel zu reduzieren.

Die Verwendung von Rejuvenatoren kann eine Reaktivierung der Eigenschaften des gealterten Bindemittels aus dem Asphaltgranulat bewirken, woraus sich asphalttechnologische und wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zur (alleinigen) Verwendung eines höherwertigen frischen Bindemittels ergeben können. Der Einsatz von Rejuvenatoren ist besonders interessant, weil zukünftig die Menge an Ausbauasphalt mit bereits enthaltenem Recyclingmaterial zunehmen wird und zu dessen Verwendung der negative Einfluss des „multiplen Asphaltrecyclings“ durch gezielten Einsatz von Rejuvenatoren kompensiert werden soll.

Rejuvenatoren sind Verjüngungsmittel zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Oxidation. Manche Rejuvenatoren enthalten viskositätsverändernde Zusätze (z. B. Fischer-Tropsch-Wachs, Fettsäureamid). Die Zugabe beträgt meist zwischen 0,4 und 0,8 M.-%. Die Erfahrungen zur Wirkung, insbesondere zur Langzeitwirkung, von unterschiedlichen Rejuvenatoren auf die chemischen und mikrostrukturellen Bindemittelveränderungen und folglich auf die asphaltmechanischen Eigenschaften sind derzeit unzureichend.

Die optimale Abstimmung von Bindemittelanteilen aus dem Asphaltgranulat, von frischem Bindemittel und von Rejuvenatoren unter Beachtung aller Randbedingungen bei der Mischgutherstellung – speziell der Asphaltgranulateigenschaften hinsichtlich der Misch- und Verdichtungs- sowie der resultierenden Gebrauchseigenschaften – ist somit eine wesentliche Aufgabe beim Asphaltrecycling. Zurzeit werden systematische Untersuchungen durchgeführt, um eine Technologie zum gezielten Einsatz von ausgewählten Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt bereitzustellen. Durch eine Marktanalyse werden typische Produkte ausgewählt und auf Basis der Stoffeigenschaften die Eignung als Verjüngungsmittel in Asphalt bewertet. Ein wesentlicher Arbeitsschritt ist die Untersuchung der Art und der Dauer der Wirkung im Bindemittel und im Asphalt. Hierzu werden die wesentlichen Gebrauchseigenschaften der Asphalte bestimmt (Radenberg et al. 2015).

## **4.7 Prüftechnik**

Alle Anforderungen in den RVS gelten sinngemäß auch für mit Asphaltgranulat modifizierte Asphalte. Die gebrauchsverhaltensorientierten (GVO) Anforderungen in Abhängigkeit vom Einsatz des Asphalts als Deck-, Binder- oder Tragschichtmischgut sind im Technischen Regelwerk spezifiziert.

Sofern Zugabeanteile > 50 M.-% angestrebt werden, wird daher empfohlen zunächst im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung gebrauchungsverhaltenorientierte Prüfungen auf Basis der RVS 08.16.06 an der jeweilig vorgesehenen Mischgutrezeptur vorzunehmen. Um zielsicher die Auswirkung eines hohen Granulatzugabeanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltbefestigung zu beurteilen und eine Prognose der rechnerischen Lebensdauer der Asphaltbefestigung zu realisieren sind für die vorgesehenen Binder- bzw. Tragschichtmischgute die

- Verformungsbeständigkeit (Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung) mittels Triaxialversuch gemäß ÖNORM EN 12697-25 in Verbindung mit den Versuchsbedingungen gemäß ÖNORM EN 13108-20 (vgl. Abschnitt 2.2.3), sowie die
- Steifigkeit und Ermüdungsbeständigkeit (Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse) mittels 4-Punkt-Biegeversuch gemäß ÖNORM EN 12697-24 (vgl. Abschnitt 2.2.4)

zu bestimmen und den entsprechenden GVO-Anforderungen gemäß den RVS 08.16.06 gegenüberzustellen. Sofern eine GVO-Anforderung nicht erfüllt wird, ist zunächst zu prüfen, ob sich dies im Rahmen der Prognose der rechnerischen Lebensdauer so unvorteilhaft auswirkt, dass es zu einem Versagen innerhalb der Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung kommt.

Für die im F&E Projekt ORAB untersuchten Mischgutrezepturen und Asphaltgranulat-Qualitäten führte die Unterschreitung der GVO-Anforderung Ermüdungsbeständigkeit der Asphalttragschicht-Varianten nicht zwangsläufig zu einer entsprechend unvorteilhaften rechnerischen Lebensdauer, da die Ermüdungsbeständigkeit immer im Zusammenhang mit der Steifigkeit beurteilt werden muss.

Die prüftechnische Ansprache der Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse gemäß ÖNORM B 3590 war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Gemäß den RVS 08.16.06 gelten jedoch entsprechende GVO-Anforderungen an Binder- und Tragschichtmischgut. Die Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse wird derzeit nicht als Eingangsgröße im Rahmen der Prognose der rechnerischen Lebensdauer verwendet und wirkt sich in der Folge auch nicht auf die prognostizierte Lebensdauer aus. Daher ist für den jeweiligen Einzelfall zwischen den Vertragsparteien zu vereinbaren, welches Kriterium (Einhaltung

der jeweiligen GVO-Anforderung gemäß RVS 08.16.06 oder rechnerischer Nachweis der Schadensfreiheit innerhalb des Nutzungszeitraums) beim Eignungsnachweis beziehungsweise bei Abnahme als bindend gilt.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

### 5.1 Projektinhalt

Während im europäischen Vergleich der österreichische Stand der Technik beim Kaltrecycling von Asphalt gut entwickelt ist, werden derzeit nur durchschnittliche Quoten beim Heißrecycling von Asphalt erreicht. Diese ist einerseits bedingt durch die Meinung, dass im Asphaltgranulat vorhandene Anteile an gerundeten Gesteinsoberflächen die Stabilität herabsetzen und andererseits durch strenge Anforderungen im Regelwerk an die Qualität von Asphaltmischgut für hochbelastete Straßen.

Einen Beitrag zur Hebung der Quote beim österreichischen Asphaltrecycling und zur Schaffung entsprechender Grundlagen für die Adaptierung des Regelwerks liefert das F&E-Projekt ORAB. Dazu wurden im Einzelnen die folgenden Aspekte an ausgewählten Baustoffen untersucht bzw. erarbeitet:

- Einfluss der Gewinnung durch Fräsen auf die Qualität von Asphaltgranulat bezüglich der geometrischen Gesteinseigenschaften,
- Auswirkung gerundeter Oberflächen der Gesteinskörner aus Asphaltgranulat auf die innere Struktur und die Gebrauchseigenschaften (Verformungs- und Ermüdungsbeständigkeit, sowie Prognose der rechnerischen Lebensdauer) von Asphaltbefestigungen mit bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat,
- Beurteilung der Wirkung von Kompensationsmaßnahmen (Zugabe eines alternativen Bindemittels) bezüglich der Gebrauchseigenschaften von Asphaltbefestigungen aus Recycling-Asphalt mit bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat,
- Erstellung eines Leitfadens Asphaltrecycling (Erstfassung), der die Erkenntnisse aus Literaturstudien und den Untersuchungen bezüglich Gewinnung und Analyse des Asphaltgranulats, Auswirkungen der Gewinnungsart auf die Qualität des Asphaltgranulats, Mischgutkonzeption und prüftechnische Ansprache der Gebrauchseigenschaften, sowie die Prognose der rechnerischen Lebensdauer von Asphaltbefestigungen mit Recycling-Asphalt zusammenfasst; Ableitung von entsprechenden Empfehlungen zur Realisierung möglichst hoher Zugabeanteile.

Die Ergebnisse zu den einzelnen Aspekten sind nachfolgend zusammengestellt. Der Erstfassung des Leitfadens Asphaltrecycling enthält Abschnitt 4.

Zusammenfassend können für die in den Untersuchungen verwendeten Mischgutrezepturen und Asphaltgranulat-Qualitäten folgende Aussagen abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 5.2 bis 5.4). Eine Übertragung auf andere Fälle ist nicht zwingend gültig und muss im Einzelfall überprüft werden.

## **5.2 Einfluss Gewinnungsart auf die Qualität des Asphaltgranulats**

Zusammenfassend kann aus den durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Gewinnungsart des Fräsasphalts festgehalten werden, dass sich die Fräsgeschwindigkeit nicht signifikant auf die Korngrößenverteilung der aus dem Asphaltgranulat extrahierten Gesteinskörnungen auswirkt (vgl. 3.1.1 und 3.1.3).

Die Erhöhung der Fräsgeschwindigkeit wirkt sich ungünstig auf den Anteil vollständig gerundeter Körner  $C_{tr}$  aus, wodurch die Einhaltung des derzeitigen Maximalwerts von 10 % gemäß RVS 08.97.05, Tab. 7 nicht realisierbar ist. Dies wirkt sich jedoch in der Folge nicht nachteilig auf die Gebrauchseigenschaften aus (vgl. Abschnitt 5.3).

Es ist davon auszugehen, dass die Asphaltgranulatqualität zwar von der Frästechnik und den Erfahrungen des Arbeitspersonals an sich abhängt, vor Ort aber nicht durch eine Optimierung der Einstellung von Fräsgeschwindigkeit und Fräslinienabstand zielsicher gesteigert werden kann.

Lagenweises Fräsen ist notwendig zur Gewinnung eines möglichst hochwertigen Ausgangsstoffs für das Asphaltrecycling. Werden Asphaltbinder- und -tragschicht gemeinsam gefräst, ergeben sich entsprechende Auswirkungen in der Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats respektive in der Korngrößenverteilung der aus dem Asphaltgranulat extrahierten Gesteinskörnungen.

## **5.3 Auswirkung gerundeter Oberflächen auf die Gebrauchseigenschaften**

Ein nachteiliger Einfluss von runden Gesteinskörnern im Asphaltgranulat auf die innere Asphaltstruktur und deren Einfluss auf Steifigkeit und Ermüdungsbeständigkeit - charakterisiert durch die Anzahl an Kontaktpunkten und Kontaktlängen des Gesteinsgerüsts, sowie die durchschnittliche Kontaktorientierung - wurde nicht festgestellt (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Unabhängig vom Anteil an runden Gesteinskörnern wurde bis 40 M.-% Asphaltgranulat-Zugabe ein signifikanter Anstieg der Anzahl an Kontaktpunkten und Kontaktlängen festgestellt. Ein Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat führte zu einer Abnahme der Anzahl an Kontaktpunkten und -längen. Dies deutet darauf hin, dass es bezüglich der Anzahl an Kontaktpunkten bzw. -längen einen "optimalen" Asphaltgranulat-Zugabeanteil gibt. Wird dieser überschritten, wird die Asphaltstruktur hinsichtlich der Anzahl an Kontaktpunkten nachteilig beeinflusst, mit möglichen (nachteiligen) Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften.

Es ist festzuhalten, dass die Zugabe von Asphaltgranulat bis zu einem Zugabeanteil von 60 M.-% sich insgesamt vorteilhaft auf die innere Asphaltstruktur und der damit (theoretisch) zusammenhängenden Effektivität der Lastabtragung auswirkt.

Der Anteil an vollständig gerundeten Gesteinskörnern hat keinen nachweisbaren Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit der Asphaltbinder-Varianten (AC 16 binder), beurteilt anhand der Kriechrate im Triaxialversuch (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dagegen beeinflusste (bei den im Rahmen des Projekts hergestellten Varianten) die Zugabe von Asphaltgranulat die Verformungsbeständigkeit nachteilig. Mit steigendem Zugabeanteil wurden höhere Kriechraten festgestellt. Jedoch genügte der überwiegende Teil der Asphaltbinder-Varianten mit bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat den GVO-Anforderungen an Asphaltmischgut der Sorte AC 16 binder gemäß den RVS 08.16.06. Somit kann festgehalten werden, dass die Realisierung eines maximalen Zugabeanteils von 60 M.-% Asphaltgranulat in Asphaltbinder möglich ist, ohne dadurch eine signifikant schlechtere Verformungsbeständigkeit im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante ohne Asphaltgranulat hinnehmen zu müssen. Dieses Ergebnis deckt sich mit Erkenntnissen aus früheren Forschungsprojekten am ISBS, indem kein nachteiliger Einfluss durch die Asphaltgranulatzugabe bis 30 M.-% auf die Verformungseigenschaften von Asphaltdeck- und Binderschichten nachgewiesen wurde (Gröniger et al., 2009a; Renken et al., 2007).

Es wurde kein nachteiliger Einfluss durch den Anteil an runden Gesteinskörnern auf die Steifigkeiten der Asphalttragschicht-Varianten (AC 22 trag) im Temperaturbereich zwischen -30 bis +40 °C festgestellt (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Es ist festzuhalten, dass die Zugabe von Asphaltgranulat insgesamt zu einer geringfügig höheren Steifigkeit im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat führte.

Es wurde kein nachteiliger Einfluss durch den Anteil an runden Gesteinskörnern auf die Ermüdungsbeständigkeit der Asphalttragschicht-Varianten (AC 22 trag) festgestellt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Obwohl bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat mit Anteilen bis zu 18 M.-% an vollständig gerundeten Gesteinskörnern hinzugegeben wurde, ergaben sich im Vergleich zur Asphalttragschicht-Variante ohne Asphaltgranulat vergleichbare und teilweise sogar vorteilhafte Ermüdungseigenschaften. Jedoch genügte keine der Asphalttragschicht-Varianten mit Asphaltgranulat der GVO-Anforderung bezüglich der Beständigkeit gegen Ermüdung (bei Mikrodehnung bei  $10^6$  Ermüdungslastwechseln  $\epsilon_6 > 130$  erfolgt Abnahme).

Der Anteil an runden Gesteinskörnungen wirkte sich nicht signifikant auf die prognostizierte Lebensdauer aus (vgl. Abschnitt 3.2.4). Dies war zu erwarten, da weder ein signifikanter und systematischer Einfluss auf die Steifigkeiten noch auf die Ermüdungsbeständigkeiten festgestellt wurde und diese Parameter als Eingangsgrößen für die Prognose der rechnerischen Lebensdauer verwendet werden.

Es wurden für die Oberbauvarianten mit Zugabe von Asphaltgranulat in Relation zur Asphalttragschicht-Variante AC 22 trag ohne Asphaltgranulat generell längere rechnerische Lebensdauern ermittelt, bedingt durch die teilweise vorteilhafte Beständigkeit gegenüber Ermüdung der Asphalttragschicht-Varianten mit Asphaltgranulat und dem relativ ungünstigen Ermüdungsverhalten der Variante ohne Asphaltgranulat. Die Zugabe von bis zu 60 M.-% Asphaltgranulat wirkte sich demnach vorteilhaft auf die rechnerische Lebensdauer der Asphaltbefestigung aus.

Zusammenfassend ist für die hier untersuchten Asphaltbinder- und Asphalttragschichten festzuhalten, dass ein maximaler Zugabeanteil von 60 M.-% Asphaltgranulat zu realisieren ist, ohne signifikant schlechtere Gebrauchseigenschaften und dadurch eine kürzere rechnerische Lebensdauer im Vergleich zur Asphaltbinder-Variante ohne Asphaltgranulat hinnehmen zu müssen. Der Anteil an runden Gesteinskörnungen im Asphaltgranulat wirkt sich weder auf die innere Asphaltstruktur, noch auf die untersuchten Gebrauchseigenschaften signifikant und systematisch aus. Jedoch wurden asphaltgranulatspezifische Unterschiede identifiziert, die im unterschiedlichen Versprödungsgrad des im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels oder in Unterschieden in der Korngrößenverteilung begründet sein könnten.



## 5.4 Kompensationsmaßnahme

Asphaltbinder- und Asphalttragschicht-Varianten mit Asphaltgranulat, die als "kritisch" bezüglich ihrer Gebrauchseigenschaften für hochbelastete Trag- und Binderschichten eingestuft wurden beziehungsweise den Anforderungen gemäß den RVS 08.16.06 nicht genügen, wurden als worst-case-Varianten deklariert und an diesen die Wirkung einer ausgewählten Kompensationsmaßnahme untersucht (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Zugabe eines alternativen frischen Bindemittels eine äußerst wirksame Kompensationsmaßnahme in Bezug auf die Verbesserung der Verformungs- und Ermüdungsbeständigkeit der worst-case-Varianten ist (vgl. Abschnitt 3.3.2). Durch die Anpassung des frischen Bindemittels werden die entsprechenden GVO-Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit (AC 16 binder, Kategorie V4) und die Ermüdungsbeständigkeit (AC 22 trag, Kategorie E4) gemäß den RVS 08.16.06 eingehalten. In der Folge wird eine deutliche längere rechnerische Lebensdauer von Asphaltbefestigungen der Lastklasse S prognostiziert.

## **6 DANKSAGUNG**

Die Autoren danken dem BMVIT, der ÖBB und der ASFINAG für die Realisierung des Projekts, sowie Herrn Dr. Christian Pecharda von der FFG für das Programmmanagement. Den Fachbetreuern bei der ASFINAG Herrn Dipl.-Ing. Michael Steiner und Dipl.-Ing. Reinhard Lohmann-Pichler sei für die vielen fachlichen Anregungen und die gute Unterstützung in der formalen Projektabwicklung herzlich gedankt. Dem Projektpartner der Firma KAB, Herrn Dipl.-Ing. Dr. Hans Kirchknopf und Ing. Erich Mayrhofer danken wir für die ausgezeichnete Kooperation.

## 7 LITERATUR

AL-Sp-Asphalt 09. 2009. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen, FGSV-Verlag, Köln, Deutschland.

Arand, W. & Renken, P. 1999. Labor-Walzverdichtungs-Gerät zur Herstellung verdichteter Asphaltproben mit praxisadäquaten mechanischen Eigenschaften. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 771, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Institut für Straßenwesen Technische Universität, Braunschweig

Arand, W. & Von der Decken, S. 1996. Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung: Qualitätsplanung im Asphaltbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes. Schlussbericht, Forschungsauftrag Q27 i. A. der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Blab, R. 2012. Wieder ganz der Alte. Gestrata Journal , S. Ausgabe 136, S. 6-8, Gestrata, Wien.

DIRECT-MAT, 2012. Dismantling and RECYcling Techniques for road MATerials – sharing knowledge and practices. Wiederverwertung von Asphaltmischgut im Europäischen Kontext, research project funded by the Europeans Community's Seventh Framework Program. (FP7/2007-2013) (No. SCP-GA-2008-218747). <http://direct-mat.fehrl.org/>.

ETV-StB-BW, 2013: Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg, Maximalrecycling. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.

European Asphalt Pavement Association (EAPA). 2015. Asphalt in figures 2001-2013,. Abgerufen am 17. August 2015 von <http://www.eapa.org/promo.php?c=174>

Fegelin, F. 2014. Klares Bekenntnis zum Recycling. Gestrata Journal , S. Ausgabe 142, S. 11-14, Gestrata, Wien.

Fegelin, F., & Gritsch, T. 2009. Ausbauasphalt im Straßenbau. Gestrata Journal , S. Ausgabe 124, S. 11-15, Gestrata, Wien.

Fegelin, F., & Tillinger, G. 2013. Einsatz von Ausbauasphalt – ein Pilotprojekt der ASFI-NAG. Gestrata Journal, Ausgabe 133, S. 12-14, Gestrata, Wien.

Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV). 2015a. Arbeitsausschuss Straße, Ausbauasphalt. Abgerufen am 17. August 2015 von <http://www.fsv.at/organisation/organisationdetail.aspx?IDOrganisation=e723a039-d7dc-4d00-b134-4c21302590ef>.

Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV). 2015b. Arbeitsausschuss Straße, Betonstraßen im hochrangigen Straßennetz. Abgerufen am 17. August 2015 von

[http://www.fsv.at/organisation/organisation\\_detail.aspx?IDOrganisation=423b986e-c865-4e11-95ee-4064a256454b](http://www.fsv.at/organisation/organisation_detail.aspx?IDOrganisation=423b986e-c865-4e11-95ee-4064a256454b).

Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV). 2015c. Arbeitsausschuss Straße. Abgerufen am 17. August 2015 von [http://www.fsv.at/shop/produkt\\_detail.aspx?IDProdukt=837739de-08f5-4d63-8646-29df60bd8ac2](http://www.fsv.at/shop/produkt_detail.aspx?IDProdukt=837739de-08f5-4d63-8646-29df60bd8ac2).

Gohl, S. 2014. Maximalrecycling nach den ETV-StB-BW. Zeitschrift asphalt, Fachorgan des Deutschen Asphaltverbandes e. V. und des Deutschen Asphaltinstituts e. V., Heft 6/2014, 19-24, Giesel-Verlag.

Grönniger, J. 2015. Charakterisierung der Asphaltstruktur und des Asphaltmörtels und dessen Auswirkung auf die Resistenz gegenüber Baustoffversagen. Manuskript zur Dissertation, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, unveröffentlicht.

Grönniger, J., Renken, P. & Wistuba, M. 2009a. Verwendung von Fräsasphalt aus Offenenporigen Asphaltdeckschichten auf möglichst hohem Wertschöpfungsniveau. Schlussbericht, Forschungsvorhaben FE 07.0212/2006/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 1035, 2010.

Grönniger, J., Wistuba, M. & Renken, P. 2009b. Wiederverwendung von Fräsasphalt aus Offenenporigen Asphaltdeckschichten in Splittmastixasphalt und Asphaltbinder. Dresdner Asphalttage, 10./11. Dezember 2009, Dresden.

Holzfeind, W. 2014. Klares Bekenntnis zum Recycling. Gestrata Journal, Ausgabe 142, S. 11-14, Gestrata, Wien.

Lackner, R., Blab, R., Jäger, A., Spiegl, M., Kappl, K., Wistuba, M., Gagliano, B. & Eberhardsteiner, J. 2004. Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of the behavior of multi-composed materials. Progress in Engineering Computational Technology, Saxe-Coburg Publications, ISBN 1-874672-22-9.

Leutner, R., Renken, P. & Lobach, T. 2003. Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten. Schlussbericht, Forschungsprojekt FA 07.194/2001/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 908, 2005.

Litzka, J. 1987. Die Bemessung des Straßenoberbaus nach der neuen RVS 3.63. Baumaschine, Baugerät, Baustelle, Heft 2, Wien.

Litzka, J., Molzer, C. und Blab, R. 1996. Modifikation der österreichischen Methode zur Dimensionierung des Straßenoberbaues. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 465, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien.

Metelmann, P. 1972. Über die Möglichkeit zur Einführung einer „Bemessungs-Tragfähigkeit“ anstelle der jahreszeitlich schwankenden Tragfähigkeiten bei Asphaltfahrbahnbefestigungen. Mitteilungen aus dem Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der Technischen Universität Hannover, Heft 21.

Milkovics, T. 1984. Ergänzende Berechnungen und Untersuchungen zur neuen Oberbau-richtlinie RVS 3.63. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik und Verkehrswesen, Universität für Bodenkultur, Wien.

Molzer, C. 1996. Modifikation der österreichischen Bemessungsmethode für Oberbauten mit bituminösen Befestigungen. Dissertation, erschienen in: Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 6, Technische Universität Wien.

M WA, 2013. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt zur Wiederverwendung von Asphalt M WA, FGSV-Verlag, Köln, Deutschland.

ÖNORM B 2251. 2006. Abbrucharbeiten – Werkvertragsnorm.

ÖNORM B 3151. 2014. Rückbau als Standardabbruchmethode.

ÖNORM B 3580-1. 2009. Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton - Empirischer Ansatz - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1.

ÖNORM B 3580-2. 2011. Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 2: Asphaltbeton - Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen - Regeln für die Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1.

ÖNORM B 3590. 2007. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt – Tieftemperaturverhalten.

ÖNORM EN 12697-24. 2012. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung.

ÖNORM EN 12697-26. 2004. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 26: Steifigkeit.

ÖNORM EN 12697-46. 2012 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen.

ÖNORM EN 13108-1. 2008. Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton (konsolidierte Fassung).

Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV). 2013. Richtlinie für die mobile Aufbereitung von mineralischen Baurestmassen, Wien

Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV). 2009. Richtlinie für Recycling-Baustoffe, 8. Auflage. Wien.

Österreichischer Baustoff-Recycling Verband (BRV). 2006. Zwischenlager für mineralische Baurestmassen, Asphaltaufruch und Betonabbruch, Wien.

Pinkofsky, L., 2005. Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage. Dissertation, Heft 54, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig.

Radenberg, M., Wistuba, M., et al. 2015. Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederherstellung von Asphalt. Forschungsprojekt („Reju“) Nr. FE 07.0250/2011/LRB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Arbeitsgemeinschaft unter der Leitung der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau und der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, in Bearbeitung, unveröffentlicht.

RDO Asphalt 09. 2009. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke RDO Asphalt 09, FGSV-Verlag, Köln, Deutschland.

Renken, P. & Lobach, T. 2005. Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten. Schlussbericht, Forschungsprojekt FA 07.194/2001/CGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 908.

Renken, P. & Lobach, T. 2007. Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalt ohne und mit PmB auf die Eigenschaften von Asphaltbindervarianten bei Verwendung von PmB 45, Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.205/2003/BGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 954.

Renken, P. & Wistuba, M. 2012. Wiederverwendung von Ausbauasphalt mit viskositätsmindernden Zusätzen im Walzasphalt. Forschungsprojekt („AtA“) Nr. FE 09.0168/2011/KRB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen.

Re-Road, 2013: End of life strategies of asphalt pavements. Final report, research project funded by the 7<sup>th</sup> Framework Program of the European Community, FP7/2007-2013 No. SCP-GA-2008-218747, <http://re-road.fehrl.org/>.

Ringleb, A. / Herzberg, B. 2012. Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs / Einfluss der Mischgutherstellung im Labor auf die resultierenden Asphalteeigenschaften. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

RVS 03.08.63. 2008. Oberbaubemessung. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.03.01. 2010. Erdarbeiten. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.15.01. 2010. Ungebundene Tragschichten. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.15.02. 2012. Ungebundene Tragschichten mit Asphaltgranulat. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.16.06. 2013. Anforderungen an Asphalttschichten – Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.17.01. 2009. Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.97.05. 2012. Anforderungen an Asphaltmischgut. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 08.97.06. 2013. Anforderungen an Asphaltmischgut – Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

RVS 11.03.22. 2012. Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat für Asphaltmischgut, Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

Spiegl, M. 2014. Klares Bekenntnis zum Recycling. Gestrata Journal, Ausgabe 142, S. 11-14, Gestrata, Wien.

Spiegl, M., & Kammerer, S. 2011. Forschungsprojekt Ausbauasphalt – L384 Laßnitzthal. Gestrata Journal, Ausgabe 131, S. 4-13, Gestrata, Wien.

TL AG-StB 09. 2009. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, FGSV-Verlag, Köln.

TP Asphalt-StB, Teil 33. 2007. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät, FGSV-Verlag, Köln, Deutschland.

TP Asphalt-StB, Teil 35. 2007. Deutsches Regelwerk für das Straßen- und Verkehrswesen, Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil 35: Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium FGSV-Verlag, Köln, Deutschland.

Wellner, F. 2007. Nachhaltiger Straßenbau - Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen. Schlussbericht, i. A. der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Technische Universität Dresden.

Wiskow, B. 2014. Charakterisierung der Asphaltstruktur mittels Digitalbildanalyse. Studienarbeit, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M. & Hauser, E. 2014. „MaxRecycling“ - Untersuchungen an mit Rejuvenatoren modifizierten Asphalten und Ermittlung der Nutzungsdauer. Schlussbericht, Forschungsprojekt i. A. der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M. & Walther, A. 2012. Probabilistische Beschreibung der baulichen Substanz für die Lebenszyklus-Prognose von Asphaltbefestigungen - Module 1 bis 3: zeitliche Überlagerung von Verkehr und Temperatur, rechnerische Analyse des Substanzverfalls zufolge Rissbildung und Angabe des Ausfallrisikos. Forschungsprojekt Nr. FE 88.0101/2009 i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Wistuba, M. & Walther, A. 2012. Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphalttragschichten auf die mechanischen Eigenschaften. Forschungsprojekt („RACT“) Nr. FE 07.0245/2011 i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen.

Wistuba, M., Grönniger, J. & Renken, P. 2011. Re-use of reclaimed asphalt with high added value. Proc., 24th World Congress, Mexico City, 26-30 Sept. 2011, Mexico; deutschsprachige Version: Asphaltwiederverwendung auf hohem Wertschöpfungsniveau. Straße und Autobahn, 8, 532-536, Kirschbaum Verlag.

Wistuba, M. 2002. Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen - Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich. Dissertation, Technische Universität Wien, erschienen in Schriftenreihe des Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Heft 15.