



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Prüfmethode zur raschen Beurteilung der Gussasphalt- eigenschaften

**Méthode d'essai pour une évaluation rapide des
caractéristiques de l'asphalte coulé routier**

**Test method for rapid assessment of mastic
asphalt properties**

**Berner Fachhochschule – Department Architektur, Holz und Bau
Kompetenzbereich Verkehrsinfrastruktur
Daniel Büttner, Master of Science in Engineering (MSE)
Nicolas Bueche, Ing. civil, dr ès sc. EPF**

**IMP Bautest AG; Oberbuchsitzen
Liliane Huber, Dr.
Christian Angst, Dr. sc. techn. ETH**

**Forschungsprojekt VSS 2018/331 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

August 2025

1799

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Prüfmethode zur raschen Beurteilung der Gussasphalt- eigenschaften

**Méthode d'essai pour une évaluation rapide des
caractéristiques de l'asphalte coulé routier**

**Test method for rapid assessment of mastic
asphalt properties**

**Berner Fachhochschule – Department Architektur, Holz und Bau
Kompetenzbereich Verkehrsinfrastruktur
Daniel Büttner, Master of Science in Engineering (MSE)
Nicolas Bueche, Ing. civil, dr ès sc. EPF**

**IMP Bautest AG; Oberbuchsitzen
Liliane Huber, Dr.
Christian Angst, Dr. sc. techn. ETH**

**Forschungsprojekt VSS 2018/331 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

August 2025

1799

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Nicolas Bueche, Berner Fachhochschule

Mitglieder

Christian Angst, IMP Bautest AG

Daniel Büttner, Berner Fachhochschule

Liliane Huber, IMP Bautest AG

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Thorsten Rucktäschel, BEEBA Ingenieure GmbH

Mitglieder

Kurt Andres, Aeschlimann AG

Sandra Dünner, Walo Bertschinger AG

Samuel Probst, Weibel AG

Bernard Schmid, Laboroute SA

Felix Solcà, BSL Baustofflabor AG

Yvan Ramel, Ertec SA

Jean-Marc Waeber, Office fédéral des routes (OFROU)

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Auftrag und Zielsetzung	13
1.1	Ausgangslage / Projektbegründung	13
1.2	Ziele des Projektes	13
2	Methodik	15
2.1	Projekt Organisation und Methodologie	15
2.2	Materialien	15
2.3	Statistische Analyse	17
3	Stand der Technik	19
3.1	Hochstandfester Gussasphalt	19
3.2	Prüfmethoden und Probekörpervorbereitung	21
3.3	Ergänzende Prüfmethoden	23
3.4	Analyse Forschungsberichte	25
4	Materialcharakterisierung	35
5	Probenherstellung auf Baustelle	39
5.1	Maschinelle Probenahme	39
5.2	Manuelle Probenahme	40
5.3	Einfluss der Vibration auf die Eindringtiefe	42
5.4	Prüfkörperherstellung im Labor	45
5.5	Innovative Methoden: Programm zum Erkennen und quantifizieren von Entmischungen	48
6	Einfluss Lagerungsdauer auf Prüfergebnisse	57
6.1	Eindringtiefe nach SN EN 12697-20	57
6.2	Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2	59
7	Auswahl neue Prüfmethode	65
7.1	Variantenstudium	65
7.2	Untersuchungen mit der favorisierten Variante	75
7.3	Untersuchungen zur Produktvariation 2022	78
7.4	Oberflächenbehandlung und Präzision	80
7.5	Alternative Prüfmethoden	83
8	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	85
	Anhänge	89
	Glossar	103
	Literaturverzeichnis	105
	Projektabschluss	108

Zusammenfassung

Die Bestimmung der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20:2020 «Asphalt; Prüfverfahren - Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern» dient als schnelle Qualitätskontrolle der Verformungsbeständigkeit für Gussasphalte mit Grösstkorn ≤ 16 mm. Die Prüfbedingungen 40 °C Prüftemperatur und 525 N Auflast sind unverändert seit Einführung der Prüfung. Seit langem bekannt sind drei wesentliche Kritikpunkte, die mit dieser Prüfung verbunden sind:

1. **Unzureichende Prüfbedingungen für harte Gussasphalte:** Die Prüfbedingungen sind für harte Gussasphalte mit Eindringtiefen ≤ 2.5 mm zu wenig selektiv und vermögen diese Gussasphalte nicht zu charakterisieren.
2. **Variabilität bei Vergleichsuntersuchungen:** Ringversuche zeigen grosse Streumasse in den Eindringtiefen, die im Wesentlichen auf die Behandlung bei im Labor hergestellten Probekörper, sowie auf Inhomogenitäten im Gussasphalt zurückzuführen sind.
3. **Verspätete Testergebnisse:** Das Prüfergebnat liegt – unter Einhaltung der in der SN EN festgelegten Wartefristen - frühestens 2 Tage nach Probenahme vor. Für eine zeitnahe Qualitätskontrolle bei mehrschichtigem Einbau sollten Prüfergebnate spätestens am Folgetag vorhanden sein.

Aus obigen Gründen wurde unter anderem das Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 «Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch» für Gussasphalte eingeführt. Harte Gussasphalte mit Eindringtiefen ≤ 2.5 mm nach SN EN 12697-20 sind somit nach SN EN 12697-25 zu prüfen, da mit dieser Prüfmethode die Eigenschaften bezgl. Verformungsbeständigkeit von harten Gussasphalten besser beschrieben werden können. Allerdings gibt es auch beim Prüfverfahren A2 einen wesentlichen Kritikpunkt. Die Durchführung der Prüfung darf frühestens 14 Tage bis 42 Tagen nach Probenherstellung erfolgen, was i.d.R. nicht im Einklang mit dem Baufortschritt steht (siehe 3.).

In der Anforderungsnorm SN EN 13108-6:2022 «Asphaltmischgut: Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt» sind Anforderungen an die Eindringtiefe nach 30 Minuten sowie an die Zunahme der Eindringtiefe nach weiteren 30 Minuten gemäss SN EN 12697-20 in festgelegt.

Beim dynamischen Prüfverfahren gemäss SN EN 12697-25 sind Anforderungen an die maximale kumulative Verformung nach 2'500 und 5'000 Zyklen festgelegt.

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zwei Hauptziele:

1. **Entwicklung einer repräsentativen Testmethode:** Die Definition einer einfachen, schnellen und repräsentativen Prüfmethode und
2. **Verbesserte Probenherstellung für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20:** Entwicklung einer Methode zur Herstellung von Messproben für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20.

Aufgrund der Erkenntnisse der Forschungsarbeit sollen anschliessend die SN EN 12697-20, SN EN 13108-6 und die SN EN 13108-20 revidiert werden.

Im Projekt wurden je zwei Gussasphaltprodukte MA 8 H und MA 11 H mit dem Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 untersucht.

Mit dem Prüfverfahren nach SN EN 12697-20, aber modifizierten Prüfbedingungen (Prüf-temperatur 55 °C, Auflast 650 N) wurden 15 Gussasphaltprodukte (MA 8 N bis MA 16 H) untersucht hinsichtlich:

- **Einfluss der Lagerungsdauer** zwischen Herstellung und Prüfung an Prüfwürfeln.
- **Vergleich zylindrischer Probekörper** hergestellt In-situ und im Labor.
- **Einfluss der Zylindergeometrie und Herstelltemperatur.**
- **Einfluss eines Rondells** bei zylindrischem Probekörper.
- **Einfluss der Stempelform mit abgerundeten Kanten und Kugelform.**
- **Einfluss der Prüfseite** bei zylindrischen Probekörpern.
- **Einfluss des Schneidens / Schleifens** bei zylindrischen Probekörpern.

Die statistische Datenanalyse beruht auf Mittelwertvergleichen und der Berechnung von Vertrauensbändern.

Auf Grundlage der SN EN 12697-20 empfiehlt die Forschungsstelle die Prüfbedingungen wie folgt anzupassen:

- **Prüfung von In-situ-Proben.**
- **Verwendung handelsüblicher Einweg-Zylinderdosen** aus Blech mit einem Durchmesser von 99 mm und einer Höhe von 78 mm für In-situ-Proben.
- **Herstellung von Probekörpern:** Durch paralleles Schneiden von Einfüll- und Unterseite sind Probekörper mit einer Höhe von 50 mm herzustellen.
- **Feilen oder Schleifen der Schnittkanten der Dose.**
- **Prüfbedingungen:** 55 °C Wasserbadtemperatur und 650 N Auflast.
- **Ebener Prüfstempel** mit einer Fläche von 500 mm², mittig platziert auf der Einfüllseite des Probekörpers.
- **Verkürzte Lagerungsdauer:** Das Schneiden, die Konditionierung und Prüfung kann nach Erkalten des Gussasphaltes erfolgen. Eine Lagerungsdauer von 24 h zwischen Herstellung und Prüfung ist nicht notwendig.

Die aufgeführten Prüfbedingungen sind geeignet, um im Wesentlichen grössere Eindringtiefen zu erzielen, wobei die Standardabweichung in der gleichen Grössenordnung wie bei der Prüfung gemäss SN EN 12697-20 ($\sigma_r < 10\%$) liegt. Die Prüfung von In-situ-Proben reduziert in hohem Masse den Arbeitsaufwand für das Labor. Andererseits verlagern sich die Risikopotentiale hinsichtlich der Gleichmässigkeit der hergestellten Probekörper vom Labor auf die Baustelle. Es ist daher der Ausbildung des Baustellenpersonals eine hohe Priorität einzuräumen.

Die grösseren Eindringtiefen der modifizierten statischen Prüfung erlauben es, auch harte Gussasphalte (Eindringtiefe gemäss SN EN 12697-20 von ≤ 2.5 mm) zu charakterisieren, was für eine zeitnahe Qualitätskontrolle von grosser Wichtigkeit ist.

Die Korrelation der Prüfergebnisse zwischen der modifizierten, statischen Methode gemäss SN EN 12697-20 und der dynamischen Prüfung gemäss SN EN 12697-25 wurde in anderen Arbeiten anhand einer beschränkten Anzahl Proben untersucht und als gut befunden. Allerdings wären hier weitere Untersuchungen an einem grösseren Datenkollektiv wünschenswert.

Die Forschungsstelle empfiehlt für die SN EN 12697-25 eine Reduzierung der bisherigen Lagerungsdauer zwischen Herstellung und Prüfung von ursprünglich 14 bis 42 Tagen auf 2 Tage.

Die entwickelte Methodik (und Software) zur Beurteilung der Entmischung von Prüfkörpern kann als zusätzliches Mittel zur Untersuchung bei Schadenfällen sehr hilfreich sein.

Résumé

L'essai de pénétration selon SN EN 12697-20 :2020 "Asphalte ; méthodes d'essai - partie 20 : Essai d'indentation de cubes ou éprouvettes Marshall" permet le contrôle rapide de qualité de la résistance à la déformation pour les asphaltes coulés de granulométrie ≤ 11.2 mm. Les conditions d'essai, à savoir une température d'essai de 40 °C et une charge de 525 N, n'ont pas changé depuis l'introduction de l'essai. Depuis longtemps, trois points de critique majeurs sont associés à cet essai :

1. **Conditions d'essai inadéquates pour les mastics bitumineux durs** : Les conditions d'essai ne sont pas suffisantes pour les asphaltes coulés durs avec des profondeurs de pénétration ≤ 2.5 mm. Les asphaltes coulés modernes d'aujourd'hui sont nettement plus résistants à la déformation.
2. **Variabilité inter-laboratoire** : Les essais inter laboratoires montrent de grandes masses de dispersion dans les profondeurs de pénétration, qui sont essentiellement dues au traitement effectué sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire.
3. **Résultats de tests retardés** : Le résultat de l'essai est disponible au plus tôt 2 jours après le prélèvement de l'échantillon. Cela ne correspond pas à l'avancement de la construction. En effet, la qualité devrait être vérifiée au plus tard le jour suivant.

Pour les raisons susmentionnées, la méthode d'essai A2 selon SN EN 12697-25 "Asphalte - Méthode d'essai pour mélanges d'hydrocarbures chauds - Partie 25 : essai de compression cyclique" a été introduite, en particulier pour les asphaltes coulés. Les asphaltes coulés durs avec des profondeurs de pénétration $\leq 2,5$ mm selon la norme SN EN 12697-20 doivent donc être testés selon la norme SN EN 12697-25, car cette méthode d'essai permet de garantir la fiabilité des résultats en ce qui concerne la résistance à la déformation. La méthode d'essai A2 présente toutefois aussi un point critique important. Le test peut être réalisé au plus tôt 14 à 42 jours après la fabrication de l'éprouvette, ce qui ne correspond pas à l'avancement de la construction (voir 3.).

La norme SN EN 13108-6:2022 "Mélanges bitumineux; Spécifications des matériaux – Partie 6: Asphaltes coulés routiers" divise les exigences de profondeur de pénétration pour l'essai de pénétration statique en catégories allant de 1.0 mm à 15.0 mm par incréments de 0.5 mm. De même, elle fait pour la déformation cumulative maximale lors de la méthode d'essai A2, de 1.0 mm à 4.5 mm par incréments de 0.5 mm après 2500 cycles et après 5000 cycles. La norme SN EN 13108-6:2010 classe les types et les grades d'asphalte coulé (selon les spécifications du projet de recherche VSS 2018/331). Cela signifie que, l'appel d'offres pour l'asphalte coulé qui doit être utilisé se fait désormais par catégorie et non plus par type et grade.

Le projet de recherche actuel a deux objectifs principaux :

1. **Développement d'une méthode d'essai représentative**: définir une méthode d'essai simple, rapide et représentative,
2. **Amélioration de la production d'échantillons pour l'essai d'indentation statique**: développer une méthode de fabrication d'échantillons pour l'essai de pénétration conformément à la norme SN EN 12697-20.

À la lumière des résultats de la recherche, les normes SN EN 12697-20, SN EN 13108-6 et SN EN 13108-20 doivent être révisées.

Dans le cadre de ce projet, deux produits d'asphalte coulé MA 8 H et deux produits d'asphalte coulé MA 11 H ont été analysés selon la méthode d'essai A2 conformément à la norme SN EN 12697-25.

La profondeur de pénétration selon SN EN 12697-20 avec des conditions d'essai modifiées de 55 °C et une charge de 650 N a été testée sur 15 produits en asphalte coulé, de MA 8 N à MA 16 H, en termes de :

- **L'influence de la durée de stockage** entre la fabrication et l'essai sur les échantillons cubiques.
- **Comparaison d'éprouvettes cylindriques** : fabriquées in situ et en laboratoire.

- **L'effet de la géométrie du cylindre et de la température de fabrication.**
- **L'influence d'une rondelle** sur les échantillons cylindriques.
- **L'effet de la forme du poinçon** avec des bords arrondis et de forme sphérique.
- **Effet du côté de l'essai** sur les éprouvettes cylindriques.
- **L'effet de la coupe / du meulage** sur les échantillons cylindriques.

L'analyse statistique des données repose sur la comparaison des moyennes et le calcul des intervalles de confiance.

Le centre de recherche considère que la norme SN EN 12697-20 est adaptée et recommande d'ajuster les conditions d'essai comme suit:

- **Essai sur des échantillons in-situ.**
- **Utilisation de boîtes cylindriques jetables disponibles dans le commerce :** D'un diamètre de 99 mm et d'une hauteur de 78 mm pour les échantillons in situ.
- **Production d'éprouvettes :** D'un diamètre de 99 mm et d'une hauteur de 50 mm, coupés au centre des échantillons in situ. Fabriquer au centre des échantillons in situ des éprouvettes d'un diamètre de 99 mm et d'une hauteur de 50 mm en découpant simultanément les faces supérieure et inférieure.
- **Limer ou meuler les bords métalliques.**
- **Conditions d'essai :** Utiliser une température de bain-marie de 55 °C et une charge de 650 N.
- **Tampon d'essai :** Tampon d'essai plan d'une surface de 500 mm², placé au centre de la face supérieure de l'échantillon. Utiliser un poinçon d'essai plat avec une surface de 500 mm², placé au centre sur le dessus de l'échantillon.
- **Réduction de la durée de conditionnement :** La découpe, la préparation et l'essai peuvent être effectués après refroidissement de l'asphalte coulé, sans nécessité d'une période de stockage de 24 heures entre la fabrication et l'essai.

Les conditions d'essai mentionnées sont appropriées pour obtenir des profondeurs de pénétration sensiblement plus profondes, avec un écart-type $s_r < 10 \%$. Les essais sur des échantillons in-situ réduisent considérablement la charge de travail en laboratoire ainsi que l'erreur significative associée à la fabrication des échantillons en laboratoire.

Les profondeurs de pénétration plus importantes permettent de distinguer les différents types d'asphalte coulé en fonction de la norme SN EN 13108-6:2022. Il existe encore un lien non confirmé avec la méthode d'essai A2 selon SN EN 12697-25.

Le centre de recherche recommande de réduire la période de stockage entre la fabrication et l'essai à 2 jours pour la norme SN EN 12697-25, par rapport à la période actuelle de 14 à 42 jours.

La méthodologie développée (et le logiciel) pour la démixtion sert d'outil supplémentaire pour évaluer les dommages et détecter toute démixtion éventuelle.

Summary

The indentation test, as per SN EN 12697-20:2020 titled "Bituminous Mixtures; Test Methods - Part 20: Indentation using Cube or Marshall Specimens," serves as a rapid quality control measure for assessing the deformation resistance of mastic asphalts with a maximum grain size of 11.2 mm. The test conditions, test temperature of 40 °C and a load of 525 N, have remained unchanged since the test methods initial development. However, this test has long been the subject of criticism:

1. **Inadequate Testing Conditions for Hard Mastic Asphalts:** The existing test conditions are insufficient for assessing hard mastic asphalts with an indentation of ≤ 0.5 mm. Modern mastic asphalts exhibit significantly higher deformation resistance.
2. **Interlaboratory Variability:** Interlaboratory tests have revealed significant variations in penetration depths, primarily due to the handling of laboratory-produced test specimens.
3. **Delayed Test Results:** Test results are typically available no earlier than 2 days after sampling, which does not align with the pace of construction. Quality assessment should ideally be conducted within the following day.

In response to these concerns, the test method A2 according to SN EN 12697-25. in SN EN 12697-25, titled "Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 25: Cyclic Compression Test", was introduced for mastic asphalts. For hard mastic asphalts with an indentation of ≤ 2.5 mm as per SN EN 12697-20, testing is now recommended according to SN EN 12697-25. This test method offers greater reliability in assessing deformation resistance. However, a notable criticism persists with the test method A2: it can only be conducted between 14 and 42 days after sample preparation, which is not conducive to construction timelines (as noted in point 3).

In SN EN 13108-6:2022, titled "Bituminous Mixtures; Material Specifications – Part 6: Mastic Asphalt," the requirements for the static indentation test are categorized in 0.5 mm increments, ranging from 1.0 mm to 15.0 mm. Similarly, maximum cumulative deformation criteria for the test method A2 are categorized from 1.0 mm to 4.5 mm after 2500 cycles and 5000 cycles. This standardization means that mastic asphalt specifications are now categorized by range rather than type and grade.

The current research project has two primary objectives:

1. **Development of a Representative Test Method:** To establish a simplified, quick, and repeatable test method.
2. **Improved Specimen Production for Static Indentation Test:** To devise a method for producing test specimens for the static indentation test in accordance with SN EN 12697-20.

Based on the research findings, revisions will be carried out for standards, SN EN 12697-20, SN EN 13108-6, and SN EN 13108-20.

Within the project, two mastic asphalt types, MA 8 H and MA 11 H, were evaluated using test method A2 per SN EN 12697-25.

For the indentation according to SN EN 12697-20, with modified test conditions of 55 °C and a 650 N load, 15 mastic asphalt products ranging from MA 8 N to MA 16 H were examined. Key aspects assessed included:

- **Influence of Conditioning Time:** Between production and testing on cube samples.
- **Comparison of Cylindrical Test Specimens:** Manufactured in-situ and in the laboratory.
- **Effect of Cylinder Geometry and Production Temperature.**
- **Effect of a Roundel** on cylindrical test specimens.
- **Effect of a Pin with Rounded Edges.**
- **Effect of the Testing Side** on cylindrical test specimens.
- **Effect of Cutting/Grinding** on cylindrical test specimens.

Statistical data analysis was conducted through mean value comparisons and the calculation of confidence intervals.

The research group endorses the suitability of SN EN 12697-20 and recommends adapting the test conditions as follows:

- **Testing of In-situ Samples.**
- **Use of Commercially Available Disposable Cylindrical Cans:** With a diameter of 99 mm and a height of 78 mm as containers for in-situ samples.
- **Production of Test Specimens:** With a diameter of 99 mm and a height of 50 mm, cut from the center of in-situ specimens.
- **Edge Smoothing: File or grind the edges.**
- **Test Conditions:** Set at 55 °C water bath temperature and a 650 N load.
- **Test Stamp:** Plane test stamp with a surface area of 500 mm², centrally placed on the upper side of the specimen.
- **Reduced Conditioning Time:** Testing can be conducted after the mastic asphalt has cooled down, with no need for a 24-hour storage period between production and testing.

These revised test conditions are well-suited for achieving deeper indentation with a standard deviation (r) of less than 10 %. Testing in-situ specimens significantly reduces laboratory workload and minimizes errors associated with laboratory specimen production.

Deeper indentation enables the categorization of mastic asphalts in line with SN EN 13108-6:2022. However, a definitive link to the test method A2 according to SN EN 12697-25 remains uncertain.

Regarding the standard SN EN 12697-25, the research group recommends reducing the conditioning time between production and testing from the current 14 to 42 days to just 2 days.

Additionally, the methodology and software developed for segregation assessment serve as valuable tools for evaluating damage and confirming potential segregation issues.

1 Auftrag und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage / Projektbegründung

Gussasphalt ist ein bituminöses Material, das bisher hauptsächlich für Ingenieurbauwerke (Brücken, Tunnel) aber auch für Parkdecks und andere spezifische Oberflächen verwendet wird, einschliesslich bestimmter hochbelasteter Oberflächen. In den letzten Jahren sind Bestrebungen im Gange, Gussasphalt auch auf offenen Strecken des Autobahnnetzes einzubauen. Aufgrund seiner Eigenschaften ist Gussasphalt selbstverdichtend und kann deshalb auch hauptsächlich als Abdichtungs-, Verschleiss-, Haft- oder Schutzmaterial verwendet werden.

Aus normativer Sicht kommt Gussasphalt hauptsächlich in folgenden Normen vor:

- SN EN 13108-6 "Asphaltemischgut; Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt" [1]
- VSS 40 440 C "Gussasphalt; Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten" [2]
- VSS 40 444 "Prüfplan für Gussasphalt; Festlegung der durchzuführenden Prüfungen" [3]
- VSS 40 450 "Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Beton: Systemaufbauten, Anforderungen und Ausführung" [4]

Die für Gussasphalt spezifische mechanische Leistung wird hauptsächlich durch die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 [5] und den Widerstand gegen bleibende Verformung mittels Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 [6] bewertet, die darauf abzielen, den Widerstand des Asphalts gegen bleibende Verformung zu quantifizieren. Aufgrund seines Anwendungsbereichs wird Gussasphalt in der Regel an besonders neuralgischen Standorten im Strassennetz eingebaut, wo die Anforderungen sehr hoch sind (z. B. bei Brücken- und Tunnelbauten).

Der Bauablauf beim Einbau von Gussasphalt erfolgt schichtenweise und in Etappen. Das erfordert die Kontrolle und Validierung einer Gussasphaltschicht vor dem Einbau der nächsten Schicht. Die Erfahrung zeigt, dass harter Gussasphalt insbesondere der Typen S und H, mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 nicht ausreichend zu charakterisieren sind, um die Leistung des Gussasphalts zu beurteilen. Diese Asphaltmischungen mit polymermodifiziertem Bindemittel oder spezifischen Additiven weisen in der Regel eine statische Eindringtiefe von weniger als 2.5 mm auf, das heisst mit den aktuellen Prüfbedingungen ist es nicht möglich die Typen S und H zu unterscheiden. Hierfür ist in der Regel ein dynamischer Eindringversuch erforderlich und besonders relevant. Diese Prüfung, deren Gesamtdauer (einschliesslich Konditionierung) mindestens 42 Tagen beträgt, steht jedoch nicht im Einklang mit den Erfordernissen einer Baustelle, die in der Regel die Verlegung der nächsten Schicht spätestens am nächsten Tag erfordert. In der vorliegenden Form gibt es keine normierte schnelle und sichere Prüfung, um die mechanische Leistung einer (harten) Gussasphaltschicht zu bewerten.

1.2 Ziele des Projektes

Die Ziele des Projektes, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Definition einer einfachen und repräsentativen Methode zur Herstellung von Messproben vor Ort und im Labor; dies unter Berücksichtigung der aktuellen Erfahrungen und der Untersuchung alternativer Probenformen.
2. Entwicklung einer schnellen (Ergebnisse in weniger als 24 Stunden) und sicheren Prüfmethode zur Bewertung der mechanischen Leistung (Verformungsbeständigkeit) von hartem Gussasphalt, basierend auf einer parametrischen Analyse mit Temperatur, Belastung, Prüfdauer, Wartezeit (Rahmenbedingungen).

3. Erwartung, dass die vorgeschlagene Prüfmethode von Strassenbaulaboren mit einfacher Ausstattung eingesetzt werden kann, was einen Ansatz voraussetzt, der in erster Linie auf der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 (statische Eindringtiefe) basiert.
4. Untersuchung möglicher Alternativen für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20.
5. Anpassung der Prüfbedingungen für das Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25, damit dieser Versuch schneller durchgeführt werden kann.

Idealerweise wird eine geeignete Ersatzmethode für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 entwickelt, um zukünftig eine Korrelation mit dem Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 herzustellen. Wenn dies gelingt, können Empfehlungen für eine mögliche neue Kategorisierung der Verformungsbeständigkeit von Gussasphalt vorgeschlagen werden. Diese Ersatzmethode sollte es auch ermöglichen, erste Anforderungen für Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit vorzuschlagen.

Am Ende wird ein Vorschlag für einen konkreten Beitrag zur SN- oder EN-Normung auf diesem Gebiet erwartet.

2 Methodik

2.1 Projekt Organisation und Methodologie

Das Projekt wurde in fünf Arbeitspakete unterteilt. Im Forschungsablauf in Abb. 1 steht den einzelnen Arbeitspaketen (AP) eine kurze Inhaltsbeschreibung gegenüber.

In einem ersten Schritt fand die Probenahme der (geplanten) vier Gussasphalte des Typs H bei einem Produzenten statt und die anschliessende Materialcharakterisierung (siehe Kapitel 2.2). Die Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete, deren Umfang teilweise den aktuellen Gegebenheiten angepasst wurde, erfolgte je nach Verantwortlichkeit. Für das AP 4 wurde für einen besseren Marktüberblick der Qualitäten, schrittweise zusätzlicher Gussasphalt anderer Produzenten organisiert, auch von den Typen S und N.

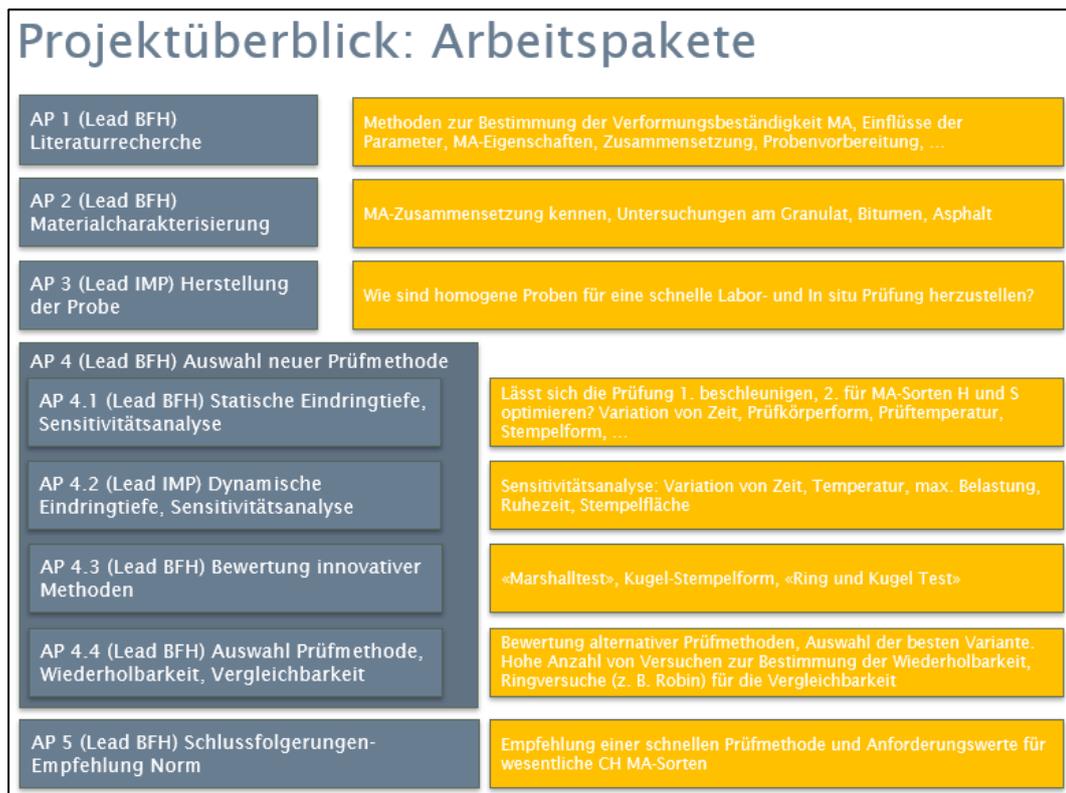


Abb. 1 Projektorganisation in Arbeitspaketen.

2.2 Materialien

Gemäss Antrag sind folgende Gussasphalte zur Untersuchung und Materialcharakterisierung vorgesehen (Tab. 1, Tab. 2)

Tab. 1 Zu untersuchende Gussasphalte

Gussasphaltsorte	Bindemittel 1	Bindemittel 2
MA 8 H	B 20/30	PmB 25/55-65 (CH-E)
MA 11 H	B 20/30	PmB 25/55-65 (CH-E)

Tab. 2 Materialcharakterisierung Versuchsübersicht

Prüfung	Referenz
Kornverteilung	SN EN 12697-2 [7] / EN 933-1 [8]
Bindemittelrückgewinnung	SN EN 12697-3 [9]
Löslicher Bindemittelgehalt	SN EN 12697-1 [10]
Statische Eindringtiefe	SN EN 12697-20 [11]
Nadelpenetration	SN EN 1426 [12]
Erweichungspunkt	SN EN 1427 [13]
Brechpunkt nach Fraass	SN EN 12593 [14]
Elastische Rückstellung	SN EN 13398 [15]
Rheologie (DSR)	SN EN 14770 [16]

Die Probenahme (Abb. 2) fand unter idealen Bedingungen statt, wie sie auf realen Baustellen nicht oft anzutreffen sind. Die Proben konnten problemlos vor Ort deponiert werden und vor dem späteren Transport abkühlen. Eine Probenahme von hoher Qualität ist bei entsprechender Schulung des Personals auch bei fortlaufendem Baufortschritt auf einer Baustelle möglich.

Während des Projektes wurden seitens BFH weitere zusätzliche Gussasphalte auch anderer Produzenten organisiert und mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 untersucht. An diesen Gussasphalten wurde nur stichprobenartig eine nicht vollumfängliche Materialcharakterisierung durchgeführt.

Letztendlich muss zu prüfender Gussasphalt als «Black Box» gesehen, und anhand seiner Leistungsfähigkeit bewertet werden, da die genaue Zusammensetzung des Gussasphaltes der Prüfstelle in der Regel nicht bekannt ist.

**Abb. 2** Probenahme bei idealen Bedingungen.

2.3 Statistische Analyse

Wenn möglich, findet die statistische Analyse der Resultate der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 wie hier beschrieben statt:

Bautechnische Versuche sind «teuer» und zeitaufwändig. Analysen erfolgen meist an kleinen Stichproben (< 30), bei denen oft keine Normalverteilung gegeben ist und die Stichprobenvarianz geschätzt werden muss. Vertrauensintervalle sind dann gut geeignet, die Güte eines Schätzwertes aufzuzeigen. Innerhalb des Vertrauensintervalls liegt der erwartete Schätzwert für die Grundgesamtheit mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Um ein Intervall anzugeben, in dem der Schätzwert wahrscheinlich liegt, benötigt es eine Irrtumswahrscheinlichkeit alpha (α). Üblich ist im technischen Bereich ein α von 5 %, das bedeutet der gesuchte «wahre Wert» wird mit 95%iger Wahrscheinlichkeit vom Vertrauensintervall überdeckt. Für kleine Stichproben müssen die t-Werte der Studentschen t-Verteilung berücksichtigt werden (siehe Anhang Seite 90). Mit dem t-Wert wird die Grösse der Differenz relativ zur Streuung in den Stichprobendaten gemessen.

Folgende statistische Kenngrössen werden verwendet:

\bar{x}	Mittelwert $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ in mm
s_x	Standardabweichung (σ) $s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ in mm
$s_{\bar{x}}$	Standardfehler $s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$
n	Stichprobengrösse (Anzahl der Probekörper)
KI, α	Vertrauensbereich (95 %) und Irrtumswahrscheinlichkeit alpha (α)
F	Freiheitsgrade bestimmen $f = n - 1$
KI	Berechnung Vertrauensbereich (-intervall) $KI = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}$ in mm
t	t-Wert, unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade f und α
v	Variationskoeffizient $v = \frac{s}{\bar{x}}$ in %
v^*	Normierter Variationskoeffizient $v^* = \frac{v}{\sqrt{n}}$ in %
Spannweite	Abstand zwischen dem grössten und kleinsten Messwert in mm

Tab. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Sigma-Umgebung und Wahrscheinlichkeit. In den Diagrammen mit den visualisierten Eindringtiefen dient die Standardabweichung als Fehlerbalken für die berechneten Mittelwerte.

Tab. 3 Sigma Umgebung und Wahrscheinlichkeit

Intervall	Wahrscheinlichkeit
$[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$	≈ 68 %
$[\mu - 1.65 * \sigma; \mu + 1.65 * \sigma]$	≈ 90 %
$[\mu - 1.96 * \sigma; \mu + 1.96 * \sigma]$	≈ 95 %
$[\mu - 2 * \sigma; \mu + 2 * \sigma]$	≈ 95.5 %
$[\mu - 2.58 * \sigma; \mu + 2.58 * \sigma]$	≈ 99 %
$[\mu - 2.8 * \sigma; \mu + 2.8 * \sigma]$	≈ 99.7 %

Eine Wahrscheinlichkeit von 68 % bedeutet, dass sich 68 % aller Messwerte innerhalb von ± 1 Standardabweichung um den Erwartungswert befinden.

3 Stand der Technik

3.1 Hochstandfester Gussasphalt

Ein Gussasphalt mit dem Grösstkorn 8 mm besteht im Mittel aus ca. 30 % Füller, 30 % Sand und 40 % Splitt. Ein Praxisbeispiel anhand der Kornverteilung zeigt Abb. 3. Der Bindemittelanteil schwankt zwischen 6.5 % und 8.0 % [1]. Insbesondere für die Typen S und H wird je nach Belastung ein PmB 25/55-65 E verwendet oder auch ein B 20/30 oder B 35/50.

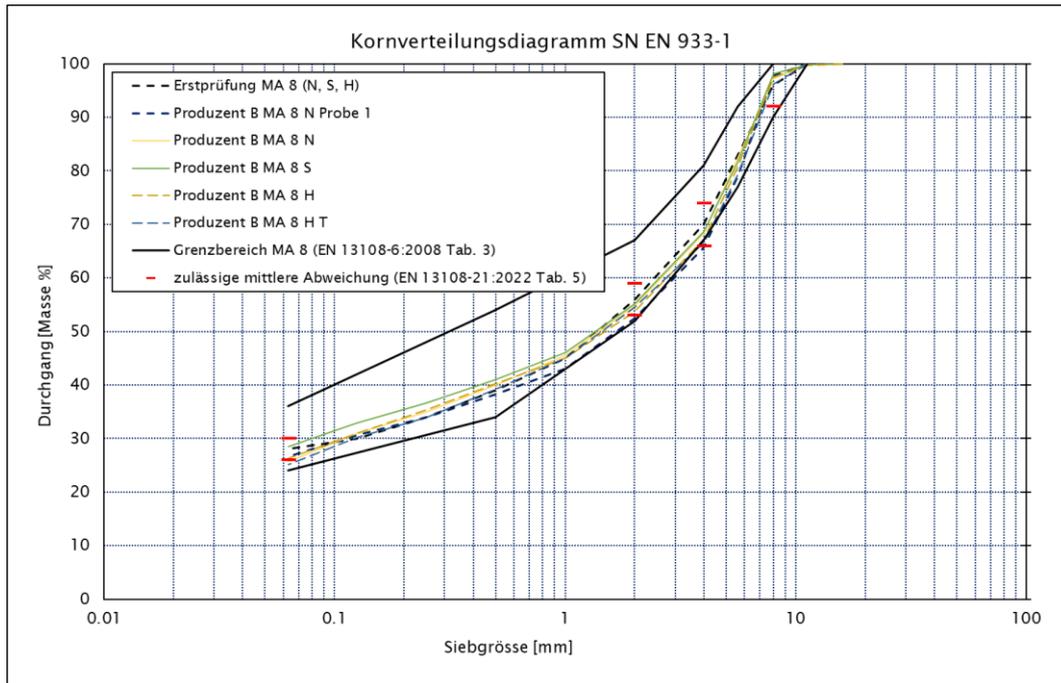


Abb. 3 Kornverteilung MA 8.

Abb. 3 veranschaulicht, dass für die Sorte MA 8 eines Produzenten der Verlauf der Kornverteilung aller Typen praktisch identisch ist (innerhalb zulässiger mittlerer Abweichung der werkseigenen Produktionskontrolle [17]).

Gussasphalt zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus [18]:

- lange Nutzungsdauer
- hohlraumfrei, wasserundurchlässig
- verdichtungsfreier Einbau
- geringer Instandhaltungs-/Instandsetzungsaufwand
- verformungsbeständig, abriebfest, dauerhafte Griffigkeit
- wenig empfindlich (Einbau) bei Lufttemperaturen $\leq 10\text{ °C}$
- wirtschaftlich

Für eine Temperaturreduzierung (z. B. Reduktion von 230 °C auf 180 °C für Herstellung und Einbau) werden viskositätsreduzierende Zusätze verwendet, wie z. B.:

- Wachse
- Tenside

Das Ziel der Additive ist es, den Ausstoss an Dämpfen und Aerosolen zu reduzieren und damit bessere Arbeitsbedingungen für das Einbaupersonal zu erreichen [18].

Für höhere Standfestigkeit und leichtere Verarbeitbarkeit lässt sich die Rezeptur verbessern z. B. mit:

- Trinidad Naturasphalt erleichtert die Verarbeitbarkeit und erhöht die Verankerung des Splitts im Deckbelag (weniger Fließen bei geneigten Flächen).
- Wachse ermöglichen einen Einbau bei reduzierter Temperatur, bei gleichzeitiger Erhöhung der Standfestigkeit im erkalteten Zustand
- Eigenfüller kann ersetzt werden durch kalkhaltigen Füller.
- Für leichtere Verarbeitbarkeit kann ein Teil des Brechsandes durch gerundeten Sand ersetzt werden.
- Ein Teil der verwendeten gebrochenen Gesteinskörnung im Asphalt könnte durch ungebrochene Gesteinskörnung ersetzt werden (z. B. anteilmässiger Ersatz von Brechsand durch Rundsand), da der Lastabtrag über die Mastix erfolgt und die Gesteinskörner eingebettet in der Mastix «schwimmen».

Die Oberfläche von Gussasphalt lässt sich lärmtechnisch verbessern durch:

- Kubisch geformte, enggestufte grobe Gesteinskörnung, vorbituminiert, $F_{fGK} < 5$ (Gesamt-Plattigkeitskennzahl der feinen Gesteinskörnung) [19]

Hauptsächlich werden im Strassenbau die Typen S und H (MA 11 S/H) eingesetzt [20] [21]. Die Typen L und N werden auf Fusswegen oder bei Abdichtungen eher selten verwendet.

Für die Interpretation der Eindringtiefe nach SN EN E12697-20 und des Widerstandes gegen bleibende Verformung mittels Prüfverfahrens A2 nach SN EN 12697-25 ist es wichtig zu wissen, dass eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, aus Effizienzgründen für zwei Sorten Gussasphalt nur eine Rezeptur zu verwenden. Ein MA 11 S PmB kann identisch mit einem MA 11 H PmB sein [20].

3.2 Prüfmethoden und Probekörpervorbereitung

In diesem Kapitel werden die zwei wesentlichen Methoden für die Bestimmung der Verformungsbeständigkeit von Gussasphalt beschrieben, die in diesem Forschungsprojekt verwendet wurden.

1. SN EN 12697-20: «Asphalt - Prüfverfahren - Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern» (Abb. 4). In diesem Bericht als Kurzform «Eindringtiefe nach SN EN 12697-20» benannt.

Das Prüfergebnis ist die Eindringtiefe eines 5 cm² grossen Prüfstempels in einen eingespannten Würfel (70x70x70 mm) unter der Belastung von 525 N in einem Wasserbad mit 40 °C nach einer Versuchsdauer von 30 min, sowie die Zunahme der Eindringtiefe in Millimetern nach weiteren 30 min.

Die Herstellung der Probekörper erfolgt nach SN EN 12697-20 (Beschrieb der Probekörperherstellung siehe Anhang).

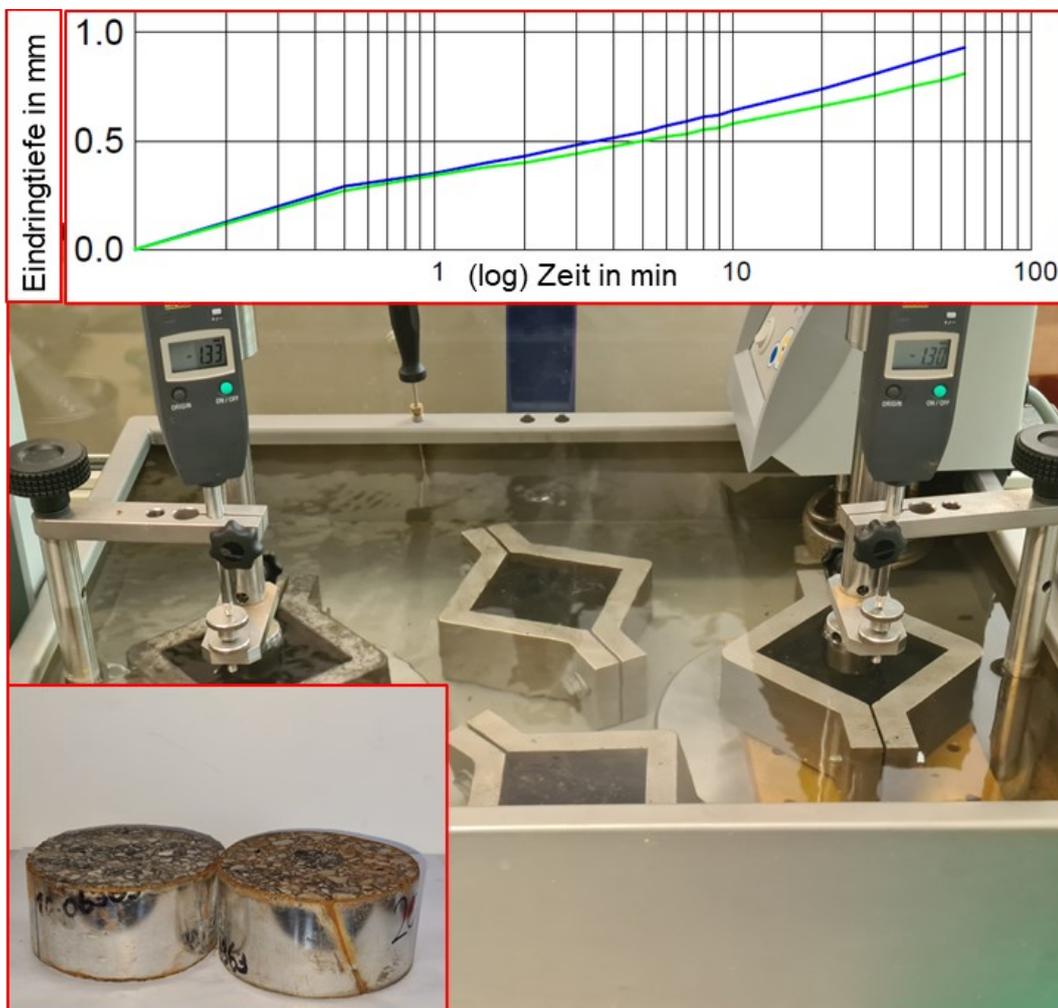


Abb. 4 Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 (Bild links unten: zylindrische Probekörper getestet bei 55 °C Wasserbadtemperatur und 625 N Auflast).

2. SN EN 12697-25 «Asphalt - Prüfverfahren - Teil 25: Druckschwellversuch» (Abb. 5). In diesem Bericht als Kurzform «Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25» benannt.

Das Prüfergebnis ist die Eindringtiefe eines 25 cm² grossen Prüfstempels nach haversienförmiger, zyklischer Belastung an einem zylindrischen Probekörper (60x150 mm) bei einer Mindestimpulsbelastung von 80 kPa und Höchstimpulsbelastung von 350 kPa in einem 50 °C warmen Luftbad nach 2500 Zyklen, sowie die Zunahme der Eindringtiefe in Millimetern nach weiteren 2500 Zyklen.

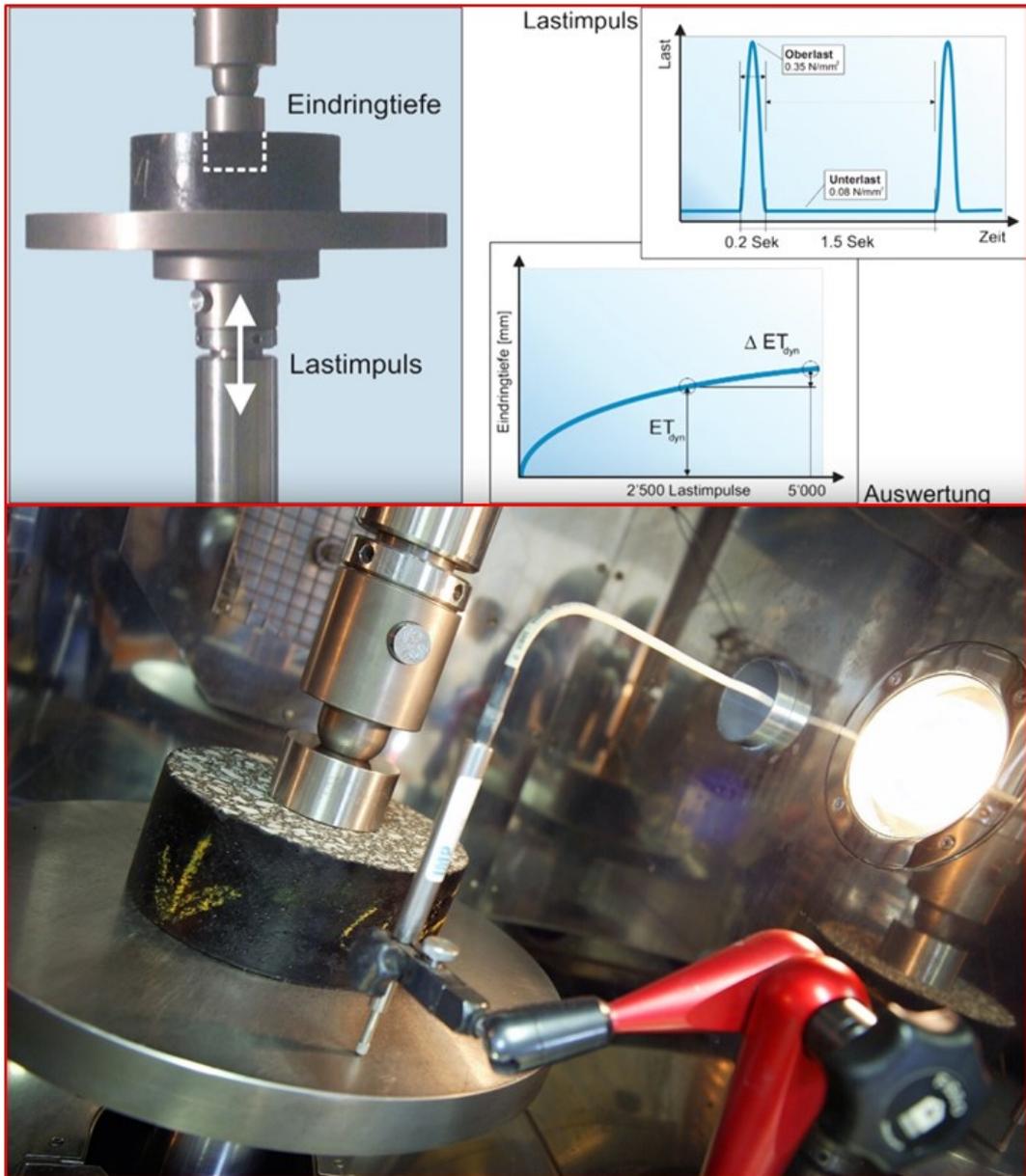


Abb. 5 Widerstand gegen bleibende Verformung an Gussasphalt mittels Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 (Quelle: Huber, L., IMP).

In der SN EN 13108-6:2022 sind für beide Prüfmethoden keine Anforderungen definiert wie dies in der ungültigen SN EN 13108-6:2006 / AC: 2008 NA der Fall war. Die Norm wird zurzeit revidiert und sollte demnächst erscheinen. Für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 und das Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 sind neu die Eindringtiefen kategorisiert, um den Anwendungsbereich zu definieren. Für den Anwendungsbereich des Produktes können so minimale oder maximale Eindringtiefen definiert werden.

Für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 wird neu die Eindringtiefe aller 0.5 mm kategorisiert. Bestimmt wird die Eindringtiefe nach 30 min und die maximale Zunahme der Eindringtiefe von 30 min zu 60 min.

Für das Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 wird neu die kumulative Verformung aller 0.5 mm kategorisiert. Bestimmt wird die kumulative Verformung nach 2500 Zyklen und die maximale kumulative Verformung nach 5000 Zyklen.

3.3 Ergänzende Prüfmethoden

In diesem Kapitel werden informativ zwei ergänzende Prüfmethoden vorgestellt. Die erste Prüfmethode (Stand 1993) mit der Bestimmung von «Q I» und «Q II» beschreibt eine Alternative zur Bestimmung der Verformungsbeständigkeit mit Eindringtiefe nach SN EN 2697-20. Die zweite Prüfmethode «Bucketttest» beschreibt eine schnelle Prüfmethode, um die Qualität des Gussasphalts auf der Baustelle bestimmen zu können. Abschliessend sind Erfahrungen zusammengefasst, die in Deutschland gemacht wurden, mit veränderten Prüfbedingungen bei der Bestimmung der Eindringtiefe nach EN 12697-20.

Aufgrund des grossen Unterschieds bei Vergleichsuntersuchungen mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 wurde als alternative Prüfmethode für Gussasphalt in Deutschland eine Kombination aus Würfeldruckfestigkeit «Q I» und Biegezugfestigkeit «Q II» entwickelt [22] [18]. Dabei wird die Würfeldruckfestigkeit an einem Würfel (70.7 x 70.7 mm) bei 22 °C bestimmt und die Biegezugfestigkeit an einem Balken (40 x 40 x 160 mm) bei 22 °C und bei 0 °C (Abb. 6).

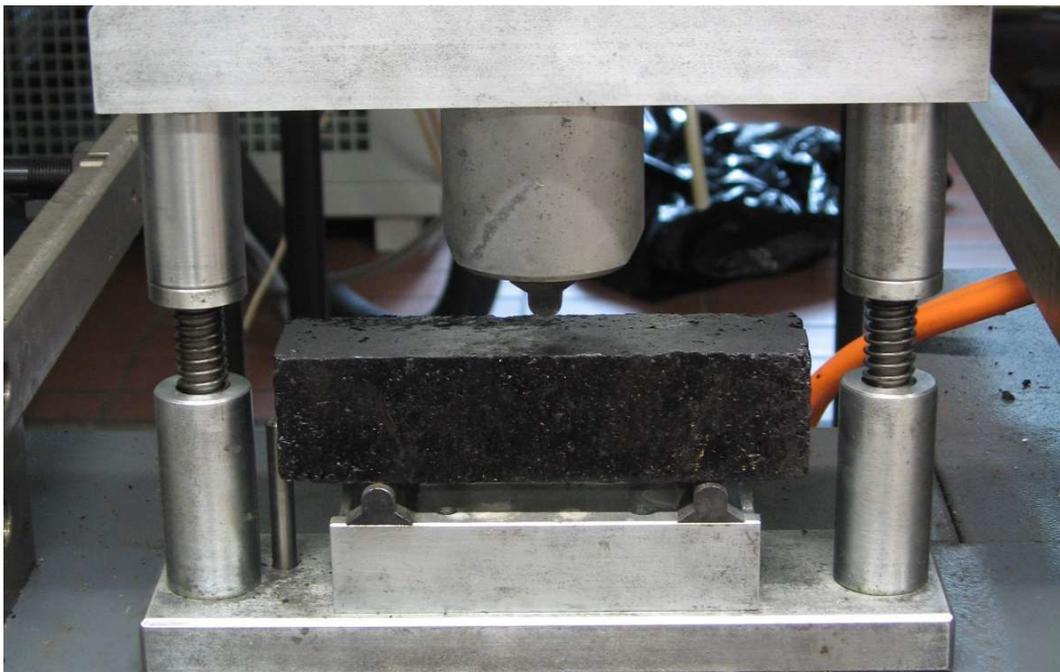


Abb. 6 Biegezugversuch, Bestimmung «Q II» [18].

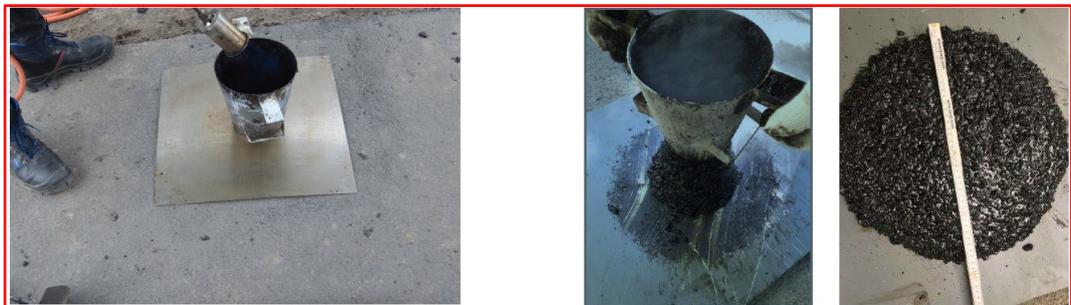
Aus den so erhaltenen Messergebnissen lässt sich zusätzlich zur Eindringtiefe nach SN EN 12697-20, als alleiniges Kriterium zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Gussasphalt, die Qualität des Gussasphaltes bewerten. Anhand von Kontrollprüfungen, Schadenfällen und Forschungsarbeiten konnten Erfahrungsbereiche ermittelt werden, in denen sich hochstandfeste und rissichere Gussasphalte bewegen sollten (Tab. 4).

Tab. 4 Erfahrungsbereiche (Stand 1993) [22]

Prüfergebnis	Erfahrungsbereich
Würfeldruckfestigkeit bei 22 °C	4 bis 8 N/mm ²
Biegezugfestigkeit bei 22 °C	3 bis 7 N/mm ²
Durchbiegung bei der Biegezugfestigkeit bei 0 °C	≥ 0.3 mm
Quotient I: $Q I = \frac{\text{Biegezugfestigkeit bei } 22\text{ °C}}{\text{Würfeldruckfestigkeit bei } 22\text{ °C}}$	0.8 bis 1.0
Quotient II: $Q II = \frac{\text{Biegezugfestigkeit bei } 22\text{ °C}}{\text{Biegezugfestigkeit bei } 0\text{ °C}}$	≤ 0.6

Für die Prüfung der Verarbeitbarkeit sind auch betriebsintern verwendete «Buckettests» bekannt (als Eigenüberwachung), in Anlehnung an die Konsistenzprüfung von Frischbeton (Abb. 7). Dabei wird vor dem Einbau des Gussasphalts auf der Baustelle aus dem Kocher Gussasphalt in einen Behälter mit definiertem Volumen gefüllt. Das kann ein kegelförmiger Behälter aus Holz oder Metall oder auch ein Zylinder sein. Anschließend wird der Behälter in Abhängigkeit der Behälterform umgedreht oder nach oben gezogen, so dass der Gussasphalt unten auslaufen kann. Nach einer definierten Wartezeit wird der Durchmesser bestimmt. Für eine optimale Verarbeitbarkeit sollte der gemessene Durchmesser in einem gewissen Bereich liegen. Je grösser der Durchmesser, umso leichter ist der Gussasphalt zu verarbeiten.

Anmerkung Verfasser: Die Behälterform ist weniger entscheidend, es könnte auch eine zylindrische Form sein. Bei Behältern aus Metall ist wichtig ein definiertes Volumen, eine erwärmte Probenform, evtl. Gleitmittel und ein sehr schnell ausgeführter Test, sowie eine glatte Unterlage (z. B. Ölpapier). Das Grundprinzip ist: Der Gussasphalt muss möglichst schnell in die Probenform eingefüllt werden und von dort möglichst schnell wieder herausfließen.

**Abb. 7 Prüfung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt auf der Baustelle [18].**

In Deutschland sind in einigen Bundesländern gute Erfahrungen zur Beurteilung der Verformungsbeständigkeit eines Gussasphaltes mit der zeitlichen Verlängerung der Statischen Eindringtiefenprüfung an Würfeln von 60 min auf bis zu 180 min sowie eine Erhöhung der Prüftemperatur auf 50 °C und 60 °C gemacht worden [23]. Neben den Prüfbedingungen wurde die im Rahmen von Kontrollprüfungen auf den oberen Grenzwert bestehende Toleranz von 1.5 mm auf 1.0 mm abgesenkt (gültig für alle Sorten und Typen). Diese Einschränkung soll dazu führen, dass die Gussasphalte herstellerseits so zusammengesetzt sind, dass im Rahmen von Typprüfungen und Kontrollprüfungen entsprechende Werte (z. B. 2.0 mm bis 2.5 mm) erreicht werden. Diese Verschärfungen führen insgesamt auch zu härteren Mischgutzusammensetzungen. Eine Absenkung für Gussasphalte für besondere Beanspruchungen von 3.0 mm auf 2.0 mm hätte dazu geführt, dass die Eindringtiefe nicht mehr statisch, sondern dynamisch hätte geprüft werden müssen, gemäss DIN EN 13108-6. Zum damaligen Zeitpunkt (2007) fehlte ein ausreichender Erfahrungshintergrund mit dem heutigen Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25. Durch oben beschriebene nationale Verschärfungen konnten die EN Einschränkungen «umschifft» werden [23]. Das Verfahren hat sich allerdings in der breiten Anwendung nicht durchgesetzt.

3.4 Analyse Forschungsberichte

Im Allgemeinen ist die Literatur auf dem Gebiet der Gussasphaltbewertung relativ begrenzt, da nur wenige Länder (bisher) über umfangreiche Erfahrungen verfügen. Aktuelle, teilweise unveröffentlichte Analysen zeigen im Vergleich mit Walzasphalt (SDA 8-12 für Nationalstrassen) auch eine qualitativ signifikant bessere Ökobilanz [24]. Dieses Thema wird aber im Rahmen dieser Forschung nicht vertieft.

Die Prüfung von Würfeln aus wiedererwärmtem und in die Prüfformen eigestampftem Gussasphalt im Labor stellt hinsichtlich Vergleichbarkeit der Resultate zum einen seit über 30 Jahren eine Herausforderung dar. Zum anderen hat sich Gussasphalt zu einem Hochleistungsprodukt für Strassenbeläge über die Bandbreite der Typen entwickelt, so dass eine eindeutige Unterscheidung anhand der Resultate, ob es sich um einen Typ S oder Typ H handelt, kaum möglich ist. Die Forderungen der Planer an die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 sind heutzutage teilweise strenger als die normierten Vorgaben der SN EN 12697-25 [6], was zu standfesteren Produkten führt [25] [49]. In Abb. 8 liegt die statische Eindringtiefe [5] einiger Gussasphaltprodukte eines Herstellers im Mittel innerhalb von rund 0.5 mm Bandbreite zwischen 1.1 mm und 1.6 mm [26]. Abb. 9 zeigt die Eindringtiefen nach SN EN 12697-20 von Gussasphaltprodukten eines zweiten Produzenten aufsteigend nach Produkt sortiert. Insgesamt sind diese Produkte als weicher einzustufen, doch eine logische Sortierung nach Typ oder Sorte ist nicht möglich.

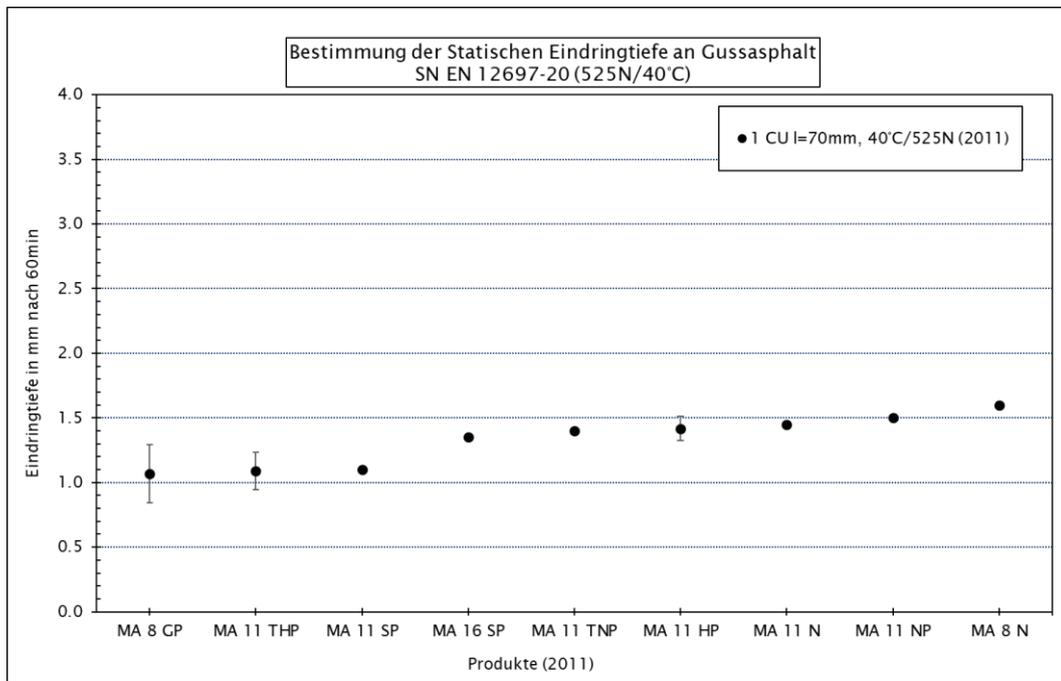


Abb. 8 Eindringtiefen von Gussasphaltprodukten aus 2011 [26].

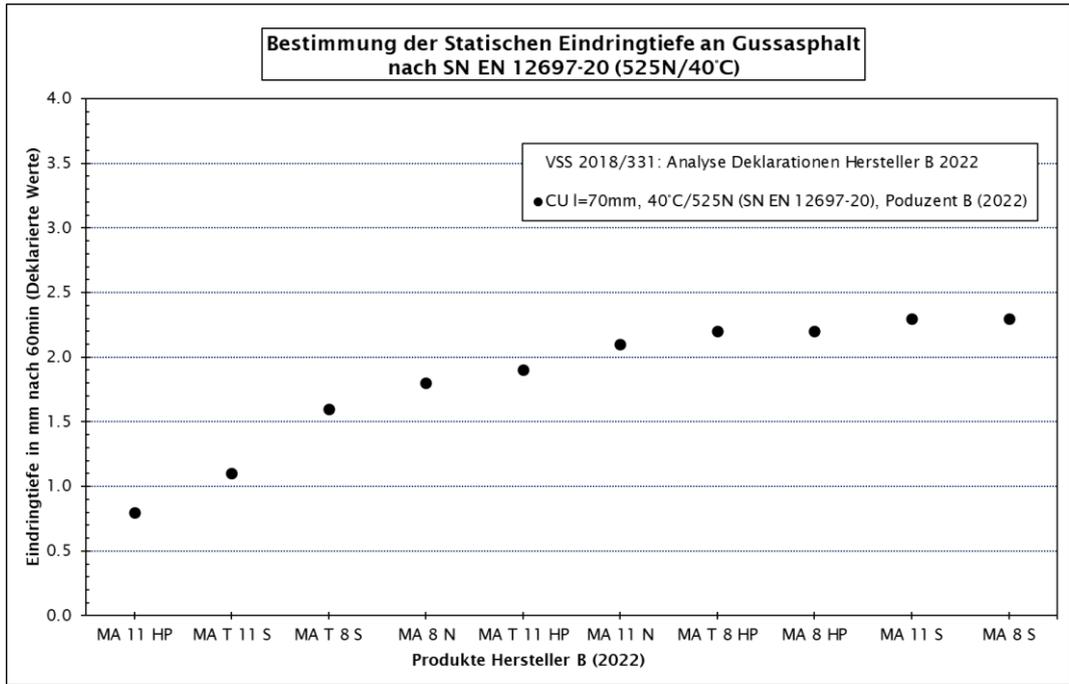


Abb. 9 Eindringtiefe von Gussasphaltprodukten aus 2022.

Gleichzeitig bekannt ist auch, dass In-situ-Proben bei Vergleichsuntersuchungen quantitativ besser abschneiden. In der VSS 671 970 (1999) [27] ist das «Herstellen der Prüfkörper auf der Baustelle» noch aufgeführt. Dieses Vorgehen konnte sich jedoch bis heute nicht als nationaler Standard durchsetzen, obwohl die nachgewiesenen Vorteile überwiegen. Die grösste Herausforderung liegt bei In-situ-Proben im Wesentlichen in einer korrekten Probenahme. Bereits 1992 fand zur Thematik Vergleichbarkeit zwischen Laboren eine Ringanalyse statt über die Internationale Gussasphalt-Vereinigung IGV [28] (Abb. 10). Untersucht wurden insgesamt 8 verschiedene Prüfvarianten unterschiedlicher Geometrien, hergestellt auf Baustelle und im Labor. Es ist festzustellen, dass die im Labor hergestellten Proben eine deutlich grössere Streuung aufweisen als In-situ-Proben (Tab. 5). Es gilt zu berücksichtigen, dass in diesem Fall jedes der 6 teilnehmenden Labore maximal 2 Einzelproben pro Variante geprüft hat.

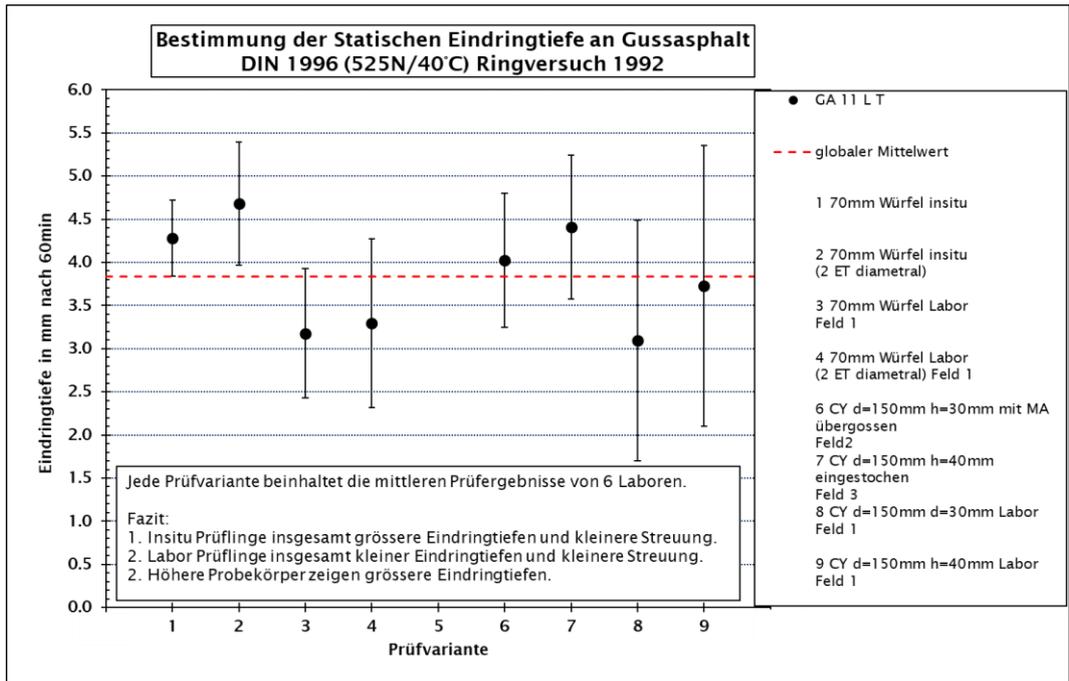


Abb. 10 Ringversuch IGV (IMAA) 1992 visualisierte Resultate.

Tab. 5 Dokumentation Statistik Abb. 10

Variante	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
1	12	4.28	0.44	10.3	3.0	1.26
2	10	4.68	0.71	15.2	4.8	2.18
3	11	3.18	0.75	23.6	7.1	2.00
4	11	3.30	0.98	29.6	8.9	2.74
6	6	4.03	0.77	19.2	7.9	2.05
7	6	4.41	0.83	18.9	7.7	2.32
8	6	3.10	1.39	45	18.4	3.94
9	6	3.73	1.63	43.7	17.8	5.01

Die Schlussfolgerungen von 1992 sind heute immer noch gültig:

Forderung nach Verwendung von In-situ-Proben.

Verwendung dynamischer Prüfung an Gussasphalt (umgesetzt in SN EN 12697-25).

Prüfung alternativer Methoden oder Optimierung der «statischen Eindringtiefe» notwendig.

Auf nationaler Ebene können wir den Forschungsbericht Nr. 1382 [29] von 2012 hervorheben, der eine der prioritären Grundlagen dieses Forschungsprojekts darstellt, mit folgendem Fazit:

Eine Verkürzung der Dauer der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 hat keinen negativen Einfluss auf die Empfindlichkeit des Verfahrens, d. h. die Halbierung der Prüfdauer auf Ergebnisse, die mit einer Standardprüfdauer von 60 min zufriedenstellend korreliert werden können. Aus Sicht des Labors bedeuten 30 min Prüfungszeit eine Verdopplung möglicher Prüfungen an einem Tag.

Eine Temperaturerhöhung von 40 °C auf 55 °C verbessert die Empfindlichkeit der Methode.

Abb. 11 visualisiert die Resultate aus dem Forschungsbericht Nr. 1382 VSS 2001/504 Kapitel 3.3 [29]. An im Labor hergestellten Würfelproben wurde der Effekt der Temperaturerhöhung und Steigerung der Auflast untersucht. Eine Temperaturerhöhung von 40 °C auf 55 °C hat den grösseren Effekt auf die Eindringtiefe als eine Steigerung des Gewichtes um einen Ring (ca. 12 kg) auf 650 N oder 2 Ringe auf 775 N. Für den Anspruch nationaler Prüfbedingungen sind 55 °C und 525 N Auflast möglicherweise ausreichend, um auch weiche Typen prüfen zu können. Das Verhalten des Gussasphalts ist bei jeder der 4 Varianten ähnlich, die Eindringtiefen verlagern sich nur auf ein höheres Niveau der Eindringtiefen. Eine Unterscheidung in Typen oder Sorten ist nicht sicher möglich. Eine vollständige Benennung der Gussasphalte war nicht immer gegeben.

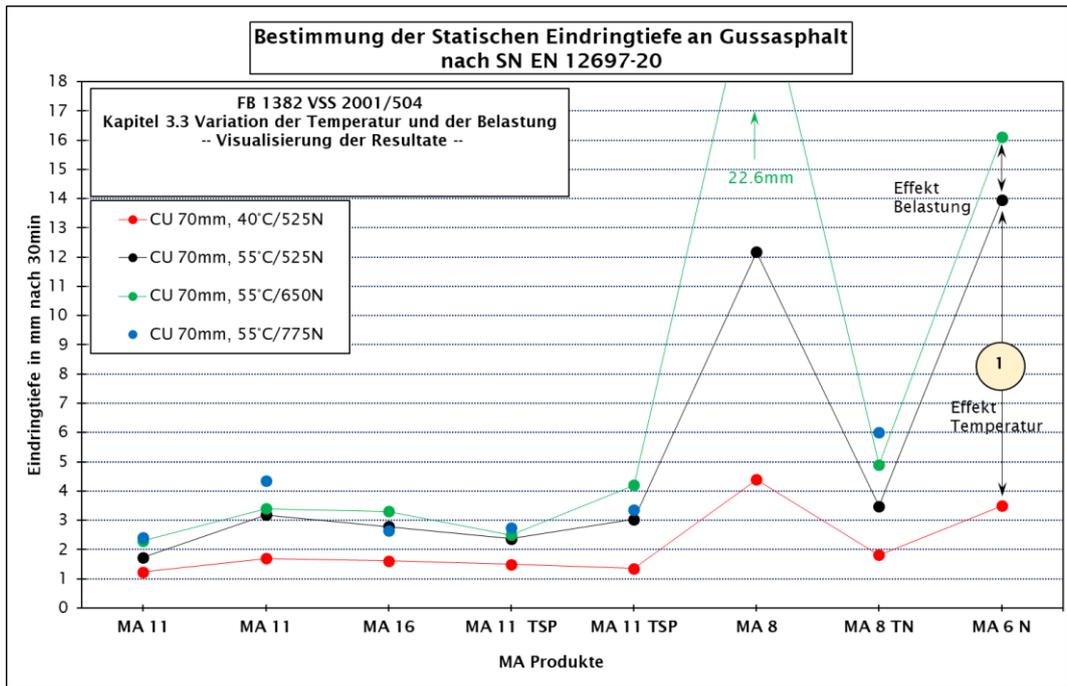


Abb. 11 Visualisierung Resultate Forschungsbericht Nr. 1382 VSS 2001/504, Kapitel 3.3.

Abb. 12 visualisiert die Resultate aus dem Forschungsbericht Nr. 1382 VSS 2001/504, Kapitel 4.3 [29]. Verglichen wurden Eindringtiefen an Würfeln (40 °C/525 N) und Eindringtiefen an Zylindern (55 °C/650 N) mit $d = 150$ mm. An einem Zylinder fanden drei Bestimmungen statt. In Abb. 12 ist der Temperatureffekt gut zu erkennen. Die Eindringtiefen bei den Zylindern sind insgesamt tiefer und der Unterschied zwischen den Produkten ist insgesamt grösser, verglichen mit der Referenzmethode. Anhand dieser Stichprobe (Annahme: Produkte eines Herstellers) lassen sich im Mittel die Produkte bei der Zylindervariante besser unterscheiden. Ein ähnlicher Trend in den Eindringtiefen ist auch hier erkennbar, das heisst Ansprache des viskoelastischen Verhaltens über Temperatur, Auflast und Zeit.

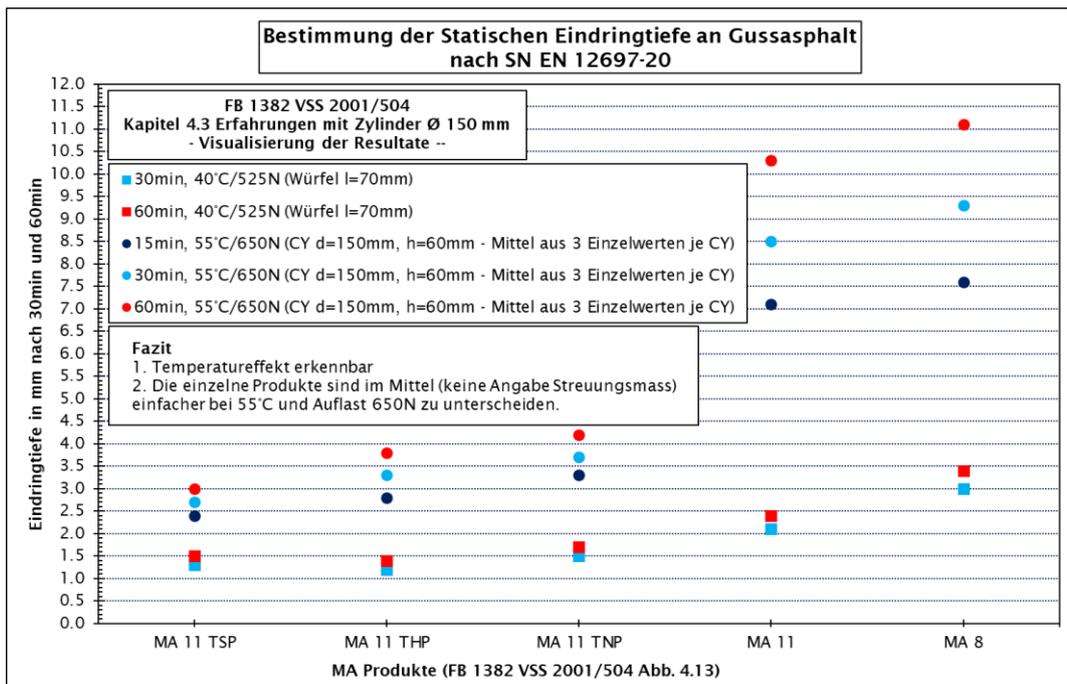


Abb. 12 Visualisierung Resultate FB 1382 VSS 2001/504, Kapitel 4.3.

Abb. 13 visualisiert die Resultate aus dem Forschungsbericht Nr. 1382 VSS 2001/504, Kapitel 4.2 [29]. Verglichen wurden zylindrische In-situ-Proben und im Labor hergestellte Würfel. Zu beobachten ist auch hier ein Geometrieeffekt und ein ähnlicher Trend in den Eindringtiefen auf einem anderen Niveau. Die Zylinderproben streuen insgesamt weniger als die Laborproben (Tab. 6).

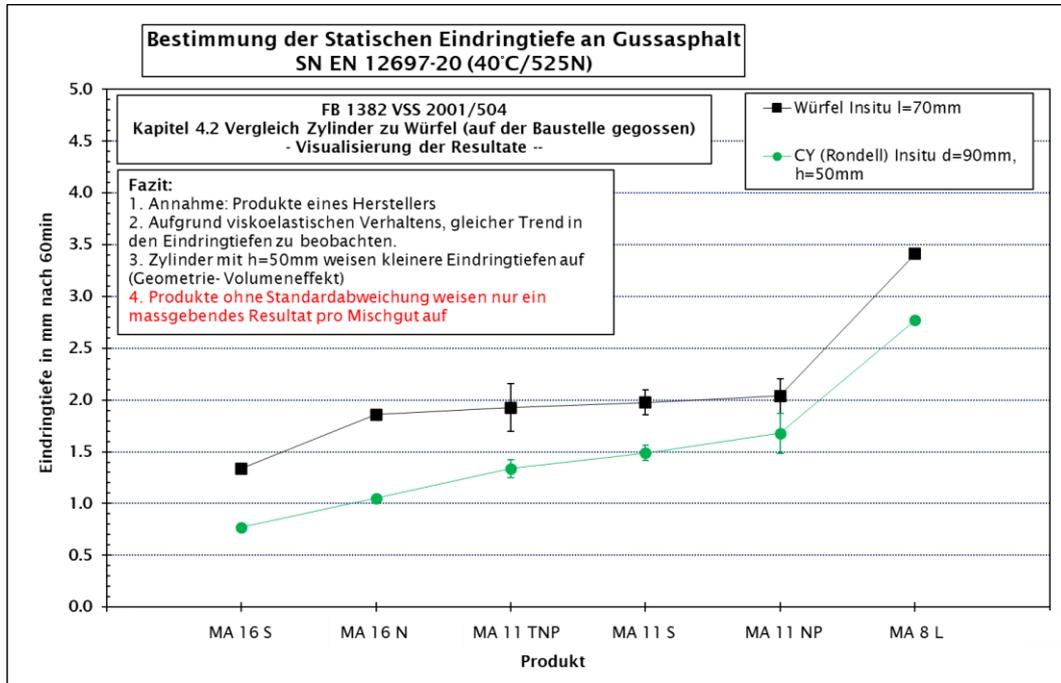


Abb. 13 Visualisierung Resultate FB 1382 VSS 2001/504, Kapitel 4.2.

Tab. 6 Dokumentation Statistik Abb. 13

Produkt	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
CU MA 16 S	1	1.34	-	-	-	-
CU MA 16 N	1	1.86	-	-	-	-
CU MA 11 TNP	4	1.93	0.23	12.0	6.0	0.50
CU MA 11 S	2	1.98	0.12	6.1	4.3	0.17
CU MA 11 NP	13	2.04	0.17	8.2	2.3	0.57
CU MA 8 L	1	3.41	-	-	-	-
CY MA 16 S	1	0.77	-	-	-	-
CY MA 16 N	1	1.05	-	-	-	-
CY MA 11 TNP	4	1.34	0.09*	6.5	3.2	0.21
CY MA 11 S	2	1.49	0.07	4.7	3.4	0.10
CY MA 11 NP	13	13.68	0.19	11.5	3.2	0.59
CY MA 8 L	1	2.77	-	-	-	-

Abb. 14 visualisiert die Resultate aus dem Forschungsbericht Nr. 1382 VSS 2001 / 504, Kapitel 5.1 [29]. Der Effekt der Temperaturerhöhung und erhöhten Auflast ist sehr gut sichtbar. Einige Typen sind sehr weich, was eine sehr hohe Eindringtiefe zur Folge hat und eventuell die Grenzen dieser Prüfbedingungen aufzeigt (Höhe Temperatur, Höhe Auflast).

Insgesamt ist ein ähnlicher Trend in den Eindringtiefen zu erkennen, nur auf einem höheren Level. Die Bandbreite der Eindringtiefen (Spreizung) mit den modifizierten Prüfbedingungen ist unter Nichtberücksichtigung der beiden «Ausreisser» etwas grösser als bei der SN-Referenzmethode. Wo Grenzen zu ziehen sind, liegt im Auge des Betrachters. Eine Unterscheidung in Typen oder Sorten ist nicht eindeutig möglich. Die im Projekt [29] vorgeschlagene Methode fand durch entsprechende Publikationen [30] [31] internationale Beachtung und wird neben der Schweiz in einigen Ländern bereits angewendet (Schweden, Deutschland).

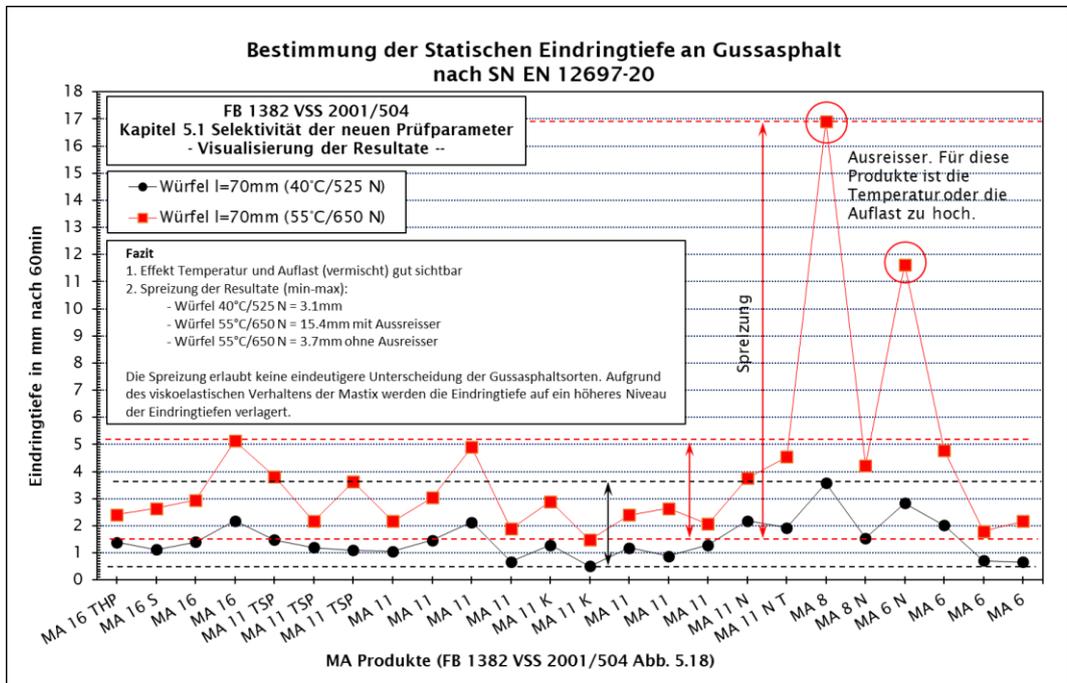


Abb. 14 Visualisierung Resultate Forschungsbericht 1382 VSS 2001/504, Kapitel 5.1.

Ebenso ist das Projekt VSS 2008/1248 [32] zur Beurteilung von Gussasphalt durch zyklisches Belasten eines Probekörpers zu erwähnen. In diesem Projekt aus dem Jahr 2008, das die Grundlage für das Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 bildet, sind zehn Jahre Entwicklung dokumentiert. Die Autoren untersuchten u. a. den Effekt der Probenhöhe (empfohlene Höhe 60 mm) und bestimmten die Anzahl der erforderlichen Einzelversuche. Eine sinusförmige Impulsbelastung, die repräsentativer ist und die Zeit für die Prüfung verkürzt, wird ebenfalls von den Autoren empfohlen. Zusammenfassend handelt es sich bei diesem nationalen Projekt um eine umfassende Untersuchung zur Entwicklung eines zuverlässigen Tests für die Bewertung von hochfestem Gussasphalt. Die Autoren haben verschiedene Parameter berücksichtigt, um sicherzustellen, dass das entwickelte Prüfverfahren zu repräsentativen und verlässlichen Ergebnissen führt.

Erwähnenswert ist auch das Forschungsbericht 1475 VSS 1999 / 125 [33] zu den Ringversuchen "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt". In diesem Projekt wurden Tests an Asphaltmischgut MA 6, MA 8 und MA 11 durchgeführt und die Wiederhol- und Reproduzierbarkeitswerte mit den aktuellen Standardwerten verglichen. Es sei darauf hingewiesen, dass dieses Projekt insbesondere die signifikanten Auswirkungen der Inhomogenität von Gussasphalt auf die gemessene Stempel Eindringtiefe hervorhebt.

Die Visualisierung der Resultate des IMAA (International Mastic Asphalt Association) Ringversuchs 2018 [34] zu vergleichenden Untersuchungen zur Probekörpergeometrie (Zylinder CY und Würfel CU). Temperatur und Herstellung im Labor und In-situ zeigen folgende Resultate (Abb. 15 und Tab. 7):

- Ähnlicher Trend bei Labor- und In-situ-Proben.

- Geometrieeffekt am Zylinder (CY): höhere Probekörper haben grössere Eindringtiefen bei gleichem Zylinderdurchmesser.
- Temperatureffekt: eine höhere Temperatur resultiert in höhere Eindringtiefen.
- Laborproben zeigen im Mittel kleinere Eindringtiefen als In-situ-Proben.
- höhere Bandbreite an Eindringtiefen (Spreizung) zwischen den Varianten In-situ.
- Deutlich kleinere Streuung bei In-situ-Proben.

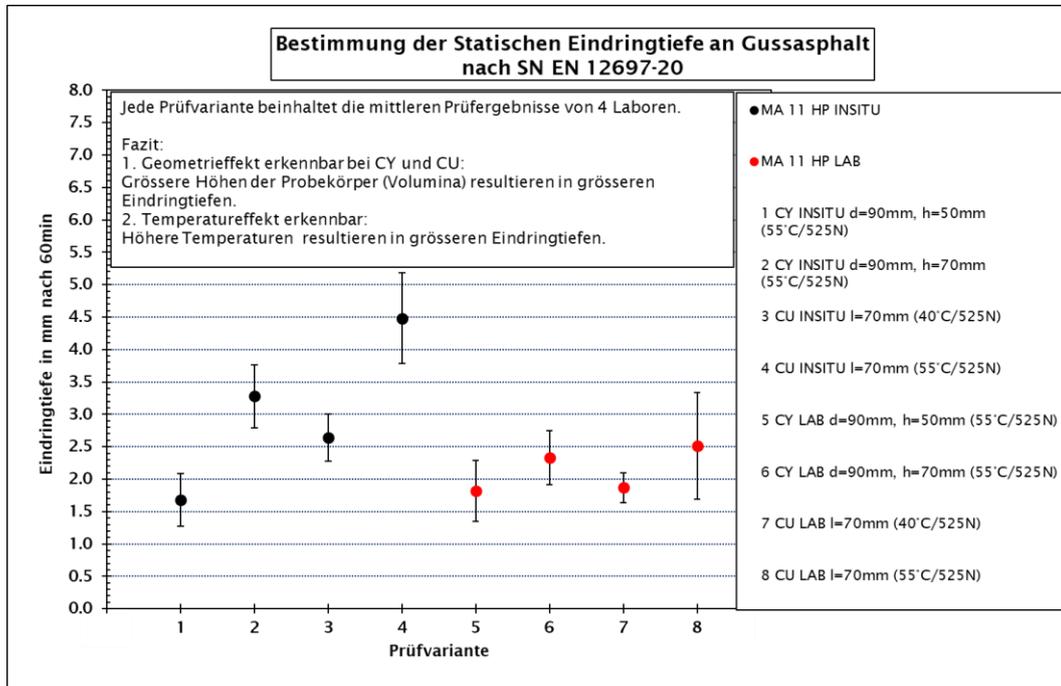


Abb. 15 Visualisierung Resultate IMAA Ringversuch 2018.

Tab. 7 Dokumentation Statistik Abb. 15

Variante	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
1	14	1.68	0.41	24.4	6.5	1.51
2	14	3.28	0.49	14.8	4.0	1.80
3	7	2.64	0.36	13.7	5.2	1.19
4	7	4.48	0.70	15.5	5.9	2.18
5	12	1.82	0.47	26.0	7.5	1.75
6	12	2.33	0.42	18.0	5.2	1.52
7	7	1.87	0.23	12.5	4.7	0.74
8	7	2.51	0.82	32.6	12.3	2.37

Der 2020 von der IMAA durchgeführte Ringversuch hatte zum Ziel, Erfahrungswerte zur Bewertung der Prüfergebnisse mit 2 Prüfvarianten zu erarbeiten und gleichzeitig die Herstellung der Probekörper auf der Baustelle zu evaluieren. Untersucht wurden Gussasphaltproben mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 und Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25. In diesem Fall konnte ein sehr hoher Zusammenhang zwischen den beiden Prüfmethode festgestellt werden (Abb. 16 und Abb. 17). Das lässt folgenden Schluss zu: Der Vergleich zwischen der modifizierten Prüfvariante der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 an In-situ-Proben mit dem Prüfverfahren A2 nach SN EN 12697-25 scheint geeignet zu sein, Anforderungen hinsichtlich der Gussasphaltqualitäten zu erarbeiten.

Aufgrund dieser ersten Erfahrung würde es eine Regressionsanalyse erlauben, das statistisch geeignetste Modell zu wählen und auf der Grundlage von Vertrauens- oder Prognoseintervallen Vorschläge für Anforderungen - sortiert nach Leistung oder Typen - zu berechnen. Ein solches Vorgehen ist ausführlich in [35] beschrieben. In dieser Forschungsarbeit wurden Schutzgeokunststoffe mehrerer Hersteller mit verschiedenen Prüfmethoden untersucht. Das Ziel war es, im Zuge der Harmonisierung mit den Europäischen Normen, die vorhandene Schweizer Prüfmethode durch eine geeignete EN-Prüfmethode zu ersetzen. Die Evaluierung der Prüfmethoden erfolgte mit statistischen Modellen, um den grösstmöglichen Zusammenhang zu ermitteln.

Ausgedrückt wird der Zusammenhang durch den Korrelationskoeffizienten r . Angestrebt wird im technischen Bereich ein Korrelationskoeffizient von $r \geq 0.9$. Bei der Modellwahl müssen die statistischen Modellvoraussetzungen erfüllt sein (u. a. Unabhängigkeit der Daten, Homogenität der Varianzen, Prüfung auf Normalverteilung). In die Auswahl der Prüfverfahren floss auch die Einfachheit der Prüfung ein. In beschriebenen Fall war das geeignetste Prüfverfahren der Pyramidendurchdruckwiderstand nach EN ISO 14574 [36] und das beste Modell für diese Verfahren eine lineare Regressionsanalyse.

Auch in der Forschungsarbeit «Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt» [32] wird ein (ungesicherter) Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 und der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 hergestellt (Würfelproben, Wasserbadtemperatur 40 °C und 525 N Auflast).

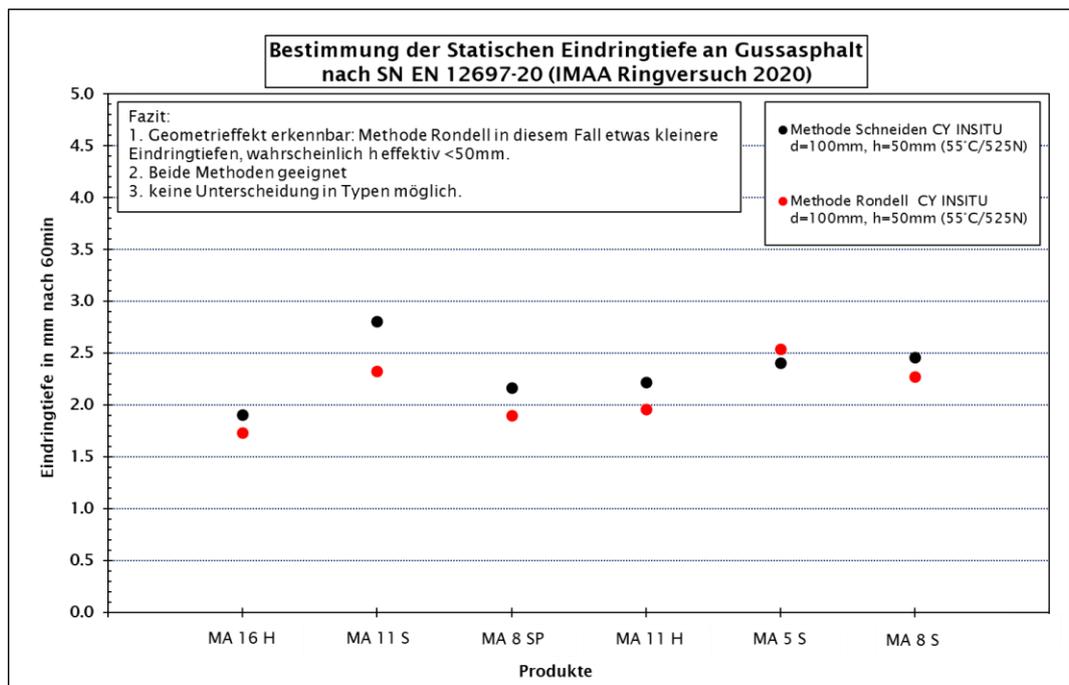


Abb. 16 Visualisierung der Resultate IMAA Ringversuch 2020.

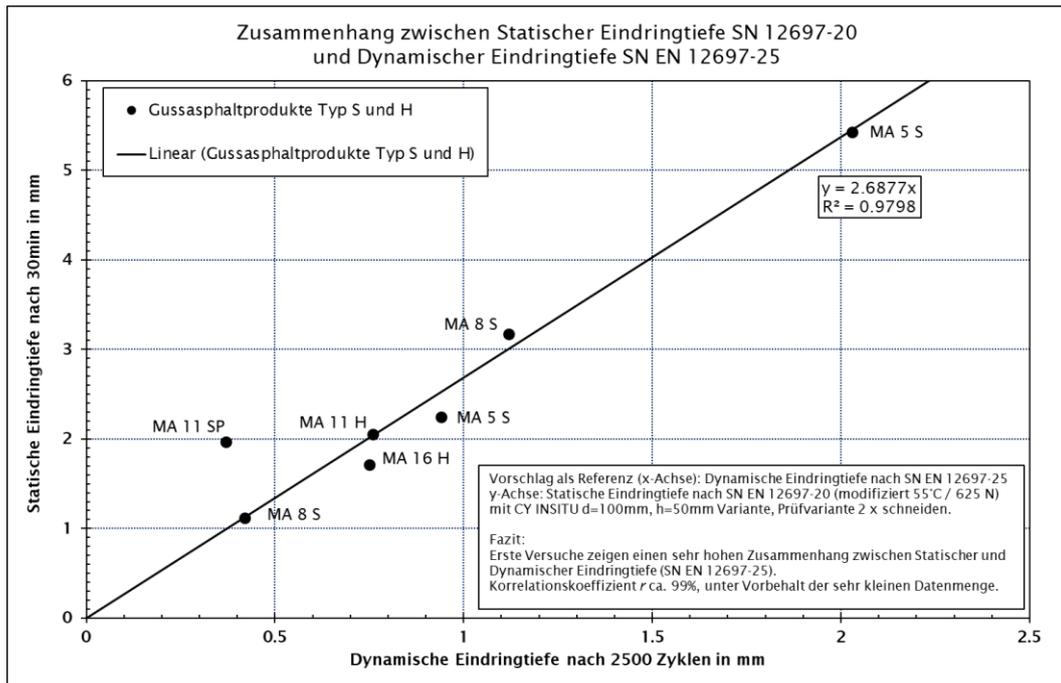


Abb. 17 Zusammenhang zwischen Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 und Eindringtiefe nach SN EN 12697-20.

Der Forschungsstand lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

Zur Verbesserung der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 wurde sowohl auf nationaler Ebene als auch im Rahmen von Ringversuchen der IMAA sehr viel geforscht und Neues ausprobiert. Geforscht wurde mit unterschiedlichen Geometrien sowie Herstellungs- und Prüfbedingungen. Die Resultate, insbesondere bei im Labor hergestellten Laborproben, zeigen sehr hohe Streumasse verglichen mit In-situ-Proben. Die unterschiedlichen Geometrien und Volumen der Probekörper resultieren, je nach Prüfvariante, in höheren oder kleineren Eindringtiefen. Eine Verkürzung der Prüfdauer von 60 min auf 30 min hat keine negative Wirkung auf die Aussagekraft der Resultate.

Für harte Gussasphaltsorten eignen sich höhere Prüftemperaturen wie z. B. 50°C oder 55°C. Höhere Prüftemperaturen resultieren im Wesentlichen in absolut grösseren Eindringtiefen und einer grösseren Bandbreite (Spreizung) der Eindringtiefen. Die Grösse der Eindringtiefe ist abhängig von der Probekörpergeometrie und den Prüfbedingungen.

Eine Unterscheidung in Gussasphalttypen oder Sorten ist ausschliesslich mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 nicht möglich. Die Untersuchung desselben Produktes mit verschiedenen Prüfvarianten zeigen, je nach Variante, kleinere oder grössere Eindringtiefen. So zeigt sich im Vergleich der Methoden ein ähnlicher Verlauf in den Eindringtiefen der Produkte. Das ist begründet im viskoelastischen Verhalten bituminöser Materialien und dem Lastabtrag bei Gussasphalt über die Mastix.

Der Forschungsbedarf besteht somit im Finden einer geeigneten Methode für eine Kontrollprüfung, die (im Idealfall) auf der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 aufbaut und im Wesentlichen folgendes vereinheitlicht und neu regelt:

- Probenahme und Probenherstellung (In-situ)
- Probenform (Geometrie, Volumen)
- Prüfbedingungen (Temperatur, Auflast, ...)

Unter den Bedingungen:

- Einfache Prüfung, für jedes Prüflabor geeignet
- Verkürzung der Prüfungsdauer
- Gute Wiederholbarkeit

4 Materialcharakterisierung

Tab. 8 und Tab. 10 fassen die Resultate der Materialcharakterisierung der Gussasphalte zusammen, die gemäss Antrag untersucht werden sollten. Das betrifft die Untersuchungen von Gussasphalten in Kapitel 2.2. Deklarationen standen nicht zur Verfügung, sodass die im Labor bestimmten Resultate nicht mit den deklarierten Werten verglichen werden konnten. In Abb. 18 und in Abb. 19 ist aus diesem Grund keine deklarierte Kornverteilung eingezeichnet. Zur eigenen Kontrolle wurde dann meistens eine Doppelbestimmung durchgeführt zur Ermittlung der Kornverteilung und des löslichen Bindemittelgehaltes. Originalbitumen wurde zur Untersuchung nicht zur Verfügung gestellt.

Tab. 8 Kennwerte Materialcharakterisierung des rückgewonnenen Bindemittels

Gussasphalt	Löslicher Bindemittelgehalt	Nadelpenetration	Erweichungspunkt	Viskosität Brookfield	Viskosität Brookfield	Elastische Rückstellung	Brechpunkt nach Fraass
	[%]	[dmm]	[°C]	T _{300 mPa*s}	T _{700 mPa*s}	[%]	[°C]
MA 11 H PmB	7.2/6.9	32	88.0	181	160	42 (Bruch bei 90 mm)	-10
MA 11 H	6.5/6.4	31	86.5	175	155	28 (Bruch bei 65 mm)	-
MA 8 H PmB	7.0/7.0	35	88.5	180	160	47 (Bruch bei 71 mm)	-7
MA 8 H	7.2/7.1	30	85.0	166	145	23 (Bruch bei 115 mm)	-8

Die Resultate in Tab. 8 liegen innerhalb der in Tab. 9 aufgeführten Anforderungen an das rückgewonnene Bindemittel für die Bindemittelleigenschaften Nadelpenetration, Erweichungspunkt und Elastische Rückstellung (VSS 40 430:2022) [37].

Tab. 9 Anforderungen an das rückgewonnene Bindemittel nach VSS 40430:2022

Bindemittel	Penetration	Erweichungspunkt	Elastische Rückstellung	Bindemittelgehalt dosiert
	[dmm]	[°C]	[%]	[%]
B 20/30	10...30	56...75	-	≥ 6.5
PmB 25/55-65 CH-E	15...50	≥ 53	≥ 30	≥ 6.5

Tab. 10 Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 an 70 mm Würfeln (40 °C/525 N)*

Gussasphalt	30 min	60 min	Zunahme
	[mm]	[mm]	[mm]
MA 11 H PmB	0.8/0.9	0.9/1.0	0.1/0.1
MA 11 H	0.6/0.5	0.7/0.6	0.1/0.1
MA 8 H PmB	0.7/0.7	0.8/0.8	0.1/0.1
MA 8 H	1.0/1.0	1.2/1.1	0.2/0.1

* Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 bei S und H Sorten nicht geeignet (≤ 2.5 mm)

Tab. 11 Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 an Zylinderproben $d = 150 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$ bei 50 °C nach 42 Tagen, Haversinenförmige Belastung (Be- und Entlastung 0.2 s, Pause 1.5 s, Oberlast 0.35 N/mm^2 , Unterlast 0.08 N/mm^2)

Gussasphalt	2500 Zyklen*	5000 Zyklen	Zunahme
	[mm]	[mm]	[mm]
MA 11 H PmB	0.42	0.53	0.09
MA 11 H	0.45	0.58	0.13
MA 8 H PmB	-	-	-
MA 8 H	0.67	0.89	0.22

* Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 bei H Sorten $\leq 2.5 \text{ mm}$ nach 2500 Zyklen (SN EN 13108-6: 2008 NA)

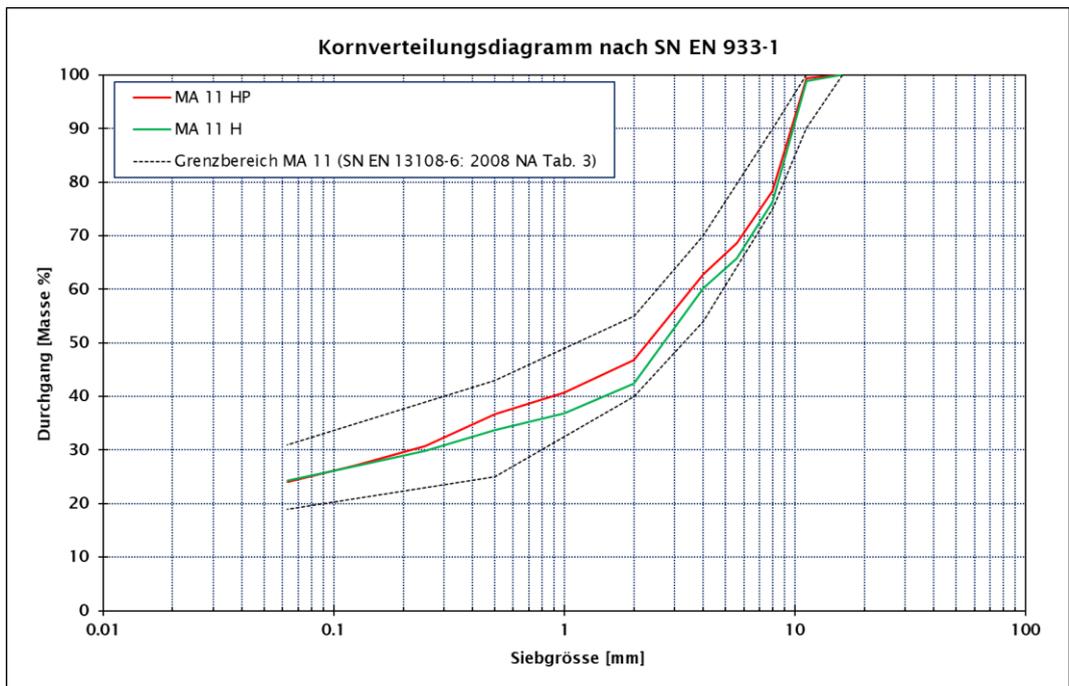


Abb. 18 Kornverteilung MA 11 H.

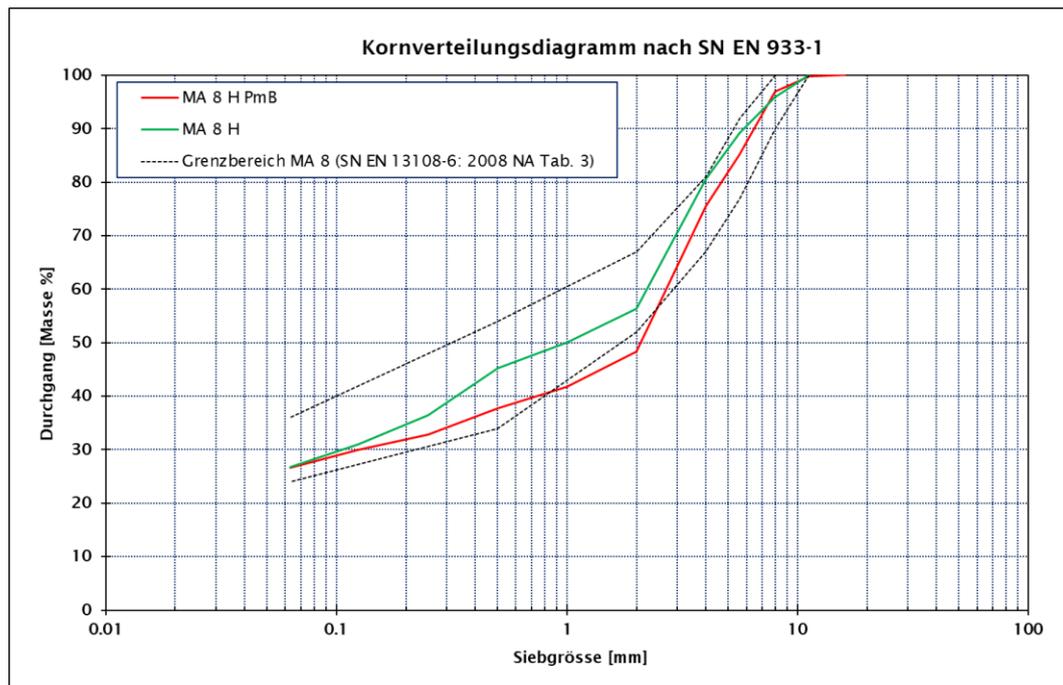


Abb. 19 Kornverteilung MA 11 H.

Die Viskositäten in Abb. 20 zeigen ein ähnliches verwendetes Bindemittel für MA 11 HP und MA 8 HP. Die Abweichungen zwischen MA 8 HP und MA 8 H können verschiedene Ursachen haben, die die Forschungsstelle nicht abschliessend klären konnte. Der MA 8 H verhält sich insgesamt weniger viskos, siehe auch Resultate der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 in Tab. 10, die gut zu dem weniger viskosen Bitumen passen.

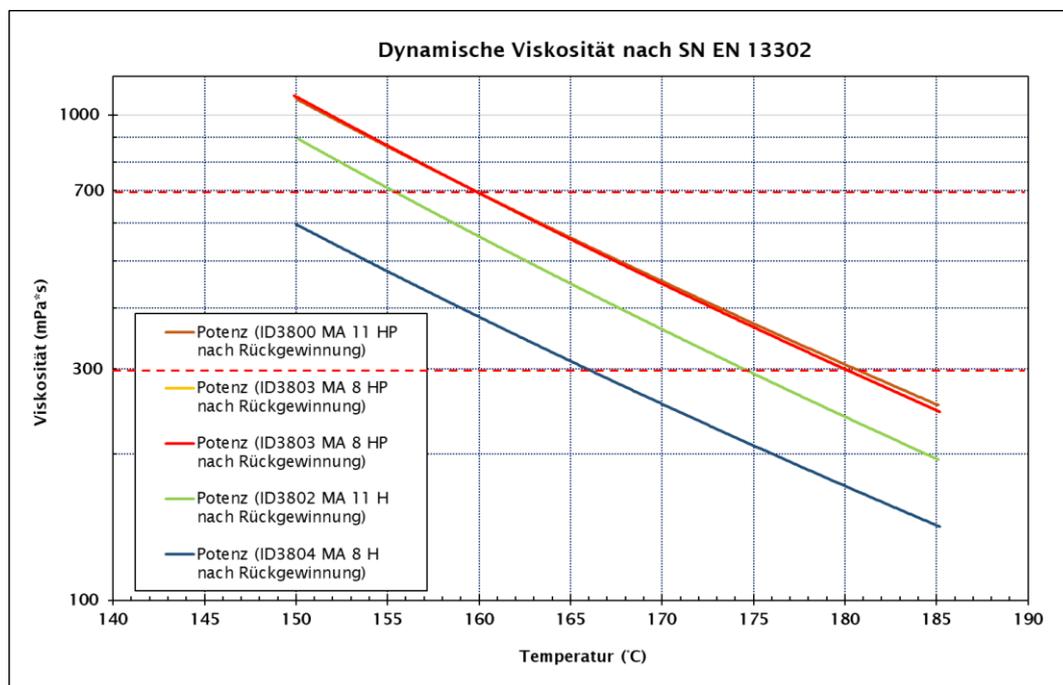


Abb. 20 Resultate Dynamische Viskosität.

5 Probenherstellung auf Baustelle

5.1 Maschinelle Probenahme

Um die Herstellung von Proben auf Baustellen weitgehend zu automatisieren und somit Fehlerquellen zu eliminieren, wurde im Rahmen der Aufgabenstellung (Ausschreibung der Forschung) der Bau einer Maschine vorgeschlagen. Aufgrund von entsprechenden Abklärungen, Kontakten zu Geräte- und Maschinen-Herstellern sowie Bau-Unternehmungen wurde rasch erkannt, dass dieser Ansatz nicht zielführend sein kann. Um eine vollständige Automatisierung der Probenahme und Probenherstellung zu erreichen, wären folgende Punkte zu lösen:

- Um den Gussasphalt vom Kocher automatisch, reproduzierbar und ohne Einfluss des „menschlichen Faktors“ in die Probenahme-Maschine zu befördern, müssten Beförderungs-Einrichtungen entworfen werden. Auch müsste die Rückführung des Überschussmaterials zur Einbaustelle gelöst werden.
- Die eigentliche Herstellung der Probe in der Maschine müsste unter konstanten Bedingungen erfolgen, was eine aufwändige maschinelle Lösung erfordert (gleichbleibende Bedingungen bezüglich Massenfluss, Druck).
- Um die Einflüsse der Witterung bei der Probenherstellung und -lagerung zu beherrschen, müsste diese „Probenahme-Maschine“ mit einem Klimaschrank ausgerüstet werden, was eine entsprechende Energiezufuhr (Stromgenerator) bedingen würde.

Eine Maschine, welche diese Anforderungen erfüllt, ist relativ gross, schwer und kostspielig. Deren Verfügbarkeit auf Baustellen kann schon allein aus Gründen der Logistik nicht gewährleistet werden.

Analog den Anforderungen an eine manuelle Probenahme, könnte trotz des immensen Aufwandes der Faktor Mensch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Unterschiedliche Handhabungen der zu entwickelnden Maschine müssten durch Anleitungen und Schulungen vermieden werden. So gesehen würde eine Maschine zur Probenahme das Problem – mit höheren Kosten – nicht lösen, sondern lediglich verschieben. Auch eine „kleine Maschine“, welche nur eine Teilautomatisierung gewährleisten würde, ist keine Lösung, denn der „Faktor Mensch“ wäre dabei – trotz maschinellem Aufwand – gewichtig. Daher wurde es als zielführender betrachtet, die Probenehmer entsprechend zu schulen, um repräsentative, homogene Proben zu erhalten.

Die Begleitkommission hat diese Projektänderung unterstützt, da eine Maschine neue, unbekannte Probleme hervorbringen würde.

5.2 Manuelle Probenahme

Die einfachste Methode, eine Probe auf der Baustelle zu entnehmen, ist es, die Büchse direkt am Gussasphaltkocher-Auslauf zu füllen (Abb. 21). Dies darf wie bei anderen Probenahmen nur im mittleren Drittel der Kocherladung geschehen. Der Zylinder ist in diesem Fall auch die Prüfform. Direktes Einfüllen ist effizienter als das Verwenden einer Probenahme Schaufel gemäss SN EN 12697-27 [38] zum Herstellen von Platten.



Abb. 21 Probenahme direkt vom Fahrmischer (Kocher).

Untenstehend wird die manuelle Probenahme auf der Baustelle im Detail beschrieben:

1. Probenahme mit Zylinder direkt am Auslauf des Fahrmischers; nicht aus Holzkübel oder Dumper.
2. Die Probenahme erst nachdem etwa ein Drittel des Kochers geleert wurde.
3. Vor der Entnahme muss der Gussasphalt schon ausfliessen, damit der Asphalt in der Nähe des Auslaufs (nicht genügend durch Rührwerk gerührt, daher potenziell entmisch) das Resultat nicht beeinflussen kann.
4. Füllen bis über den Rand des Zylinders.
5. Überlaufendes Material von Hand abstreifen.
6. Probe auf ebener Unterlage bzw. in Transportbox (Abb. 22) stellen.
7. Nicht auf vibrierende Oberfläche stellen.
8. Dose nicht zerdrücken.
9. Mindestens 45 Minuten auskühlen lassen.

Die Transportbox dient als Hitzeschutz für das weitere Handling der Proben (und Transportfahrzeug), wobei der Transport je nach Jahreszeit frühestens 45 bis 60 Minuten nach der Herstellung erfolgen sollte. Sollte die Probe beim Transport noch zu warm sein, könnte sie durch Vibration des Fahrzeuges entmischt werden.



Abb. 22 Transportbox aus Holz.

5.3 Einfluss der Vibration auf die Eindringtiefe

Es wurde untersucht, welchen Einfluss die Lagerung der Proben während des Abkühlvorganges auf das Prüfergebn hat. Aufgrund der Erfahrungen bei der Entnahme von Proben auf Gussasphaltbaustellen, wurden zwei Lagerungsbedingungen ausgewählt. Es wurde einerseits eine optimal gelagerte Probe untersucht, die nach dem Befüllen auf eine flache, stabile Unterlage gestellt wurde, andererseits eine Probe, die auf einer vibrierenden Unterlage abgekühlt wurde (Abb. 23 und Tab. 12).



Abb. 23 oben: Prüfkörper auf ebener und stabiler Unterlage. unten: Prüfkörper auf vibrierender Unterlage (auf dem Kotflügel des MA-Kochers mit laufendem Rührwerk).

Tab. 12 Einfluss der Vibration

Raumdichte [g/cm ³]	normal	vibriert
MA 11 HP	2.379	2.384
MA 8 HP	2.358	2.363
M 11 H	2.398	2.406
ET Stat. 30 Min [mm]		
MA 11 HP	1.3	1.2
MA 8 HP	1.4	1.4
MA 11 H	1.5	1.3

Abb. 23 resp. Tab. 12 zeigen, dass die durch die Lagerung auf dem Kotflügel des Transportmischers erzeugten Vibrationen sowohl eine leicht erhöhte Raumdichte als auch eine minimal niedrigere Eindringtiefe verursachen. Diese Feststellung unterstreicht sowohl die Bedeutung der Bemerkung in Punkt 7 des detaillierten Beschriebs der Probenahme als auch die Temperatur der Probe beim Abtransport. Die Probe sollte beim Abtransport ins Labor aus Sicherheitsgründen und für die Probenqualität ausreichend erkaltet sein. Vorschlag: 100 °C an der Oberfläche (Infrarotthermometer) oder pauschal nach 1 h Wartezeit.

Da die Unterschiede der Eindringtiefen (Tab. 12) innerhalb der Prüffehlertoleranz liegen, und zudem die Eindringtiefen allgemein sehr tief sind, wurde zusätzlich untersucht, ob der Einfluss der Vibration anderweitig nachgewiesen werden könnte. Bei Vibrationen der noch heissen Probe ist eine Entmischung durch Absinken der grossen Gesteinskörnungen (Sedimentation) zu erwarten. Da bietet sich die Untersuchung der Kornverteilung innerhalb der Probe an.

Um eine Entmischung festzustellen, wurden die Proben vertikal halbiert und die Verteilung der Gesteinskörnungen in der Schnittfläche untersucht. Neben der rein visuellen Betrachtung (Abb. 24) wurde eine Software angewendet, mit welcher die Verteilung der Gesteinskörnungen statistisch erfasst werden kann, um allfällige Entmischungen festzustellen. In der Abb. 24 werden zwei Proben dargestellt; eine vibriert, die andere ohne Vibration während der Abkühlphase.

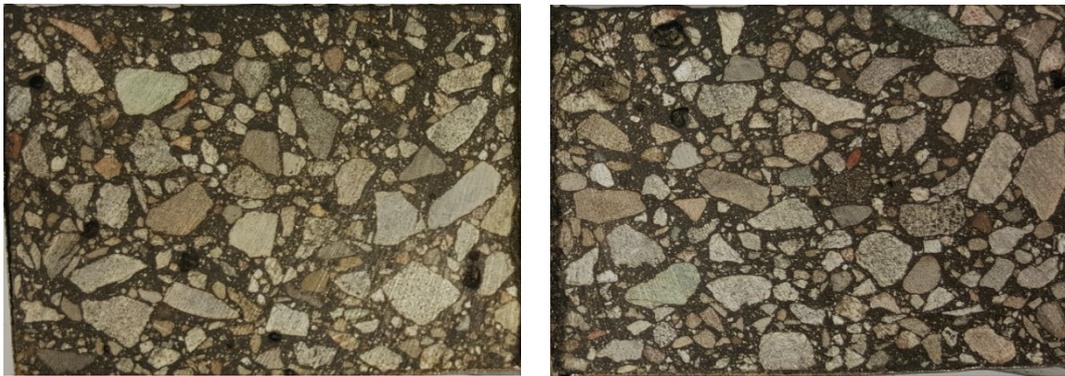


Abb. 24 *Vibrierte (links) und nicht vibrierte Probe (rechts). Die visuelle Betrachtung zeigt, dass bei der vibrierten Probe im unteren Bereich eine grössere Ansammlung an groben Körnern vorliegt. Zudem scheint der oberste Bereich des Schnittbildes mehrheitlich aus feinen Körnern zu bestehen. Dies bedeutet, dass eine Entmischung stattgefunden hat. Bei der ruhend abgekühlten Probe hingegen kann keine Entmischung festgestellt werden.*

Mit dem Programm kann die Mindestfläche der zu berücksichtigenden Gesteinskörner festgelegt werden. Wenn kleine Körner berücksichtigt werden, ist eine Häufung im oberen Teil sichtbar, was heisst, dass es mehr Körner (bzw. kleinere Gefüge) im oberen Teil hat (Abb. 25). Wenn die kleine Gesteinskörnung herausgefiltert wird, ist eine Häufung der grossen Gesteinskörnung im unteren Teil augenfällig (Abb. 26 und Abb. 27). Auch zeigt sich, dass der Unterschied vor allem im obersten Zentimeter markant ist. Je grösser der Grenzwert der berücksichtigten Fläche gewählt wird, desto markanter wird die Entmischung der grossen Gesteinskörnung sichtbar.

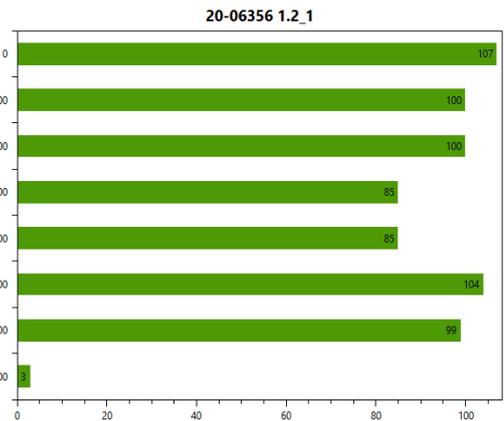
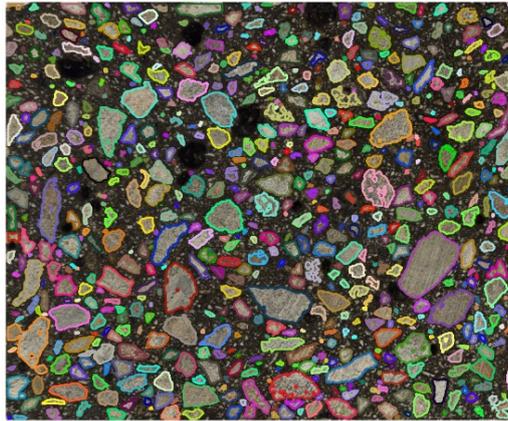


Abb. 25 MA 8 HP vibriert, Grenzwert der berücksichtigten Fläche klein. (Bildhöhe 706 Pixel, Threshold 10); Anteil feiner Gesteinskörnungen im oberen Teil gross. Im rechten Teil der Abbildung: x-Achse: Anzahl Körner mit einer Schnittfläche von 10 Pixeln; y-Achse: Höhenlage der Körner (mit 10 Pixeln).

Die Analyse einer vibrierten Probe wird in Abb. 25 und Abb. 26 mit verschiedenen Grenzwerten der Gesteinsgrösse analysiert. Die kleine Zahl bei der Kolonne 700 in Abb. 25 erklärt sich damit, dass die Einteilung der y-Achse in 100 Pixeln festgelegt ist; da das Bild 706 Pixel hat, gibt es hier Körner im untersten Teil, die in diese Kategorie fallen.

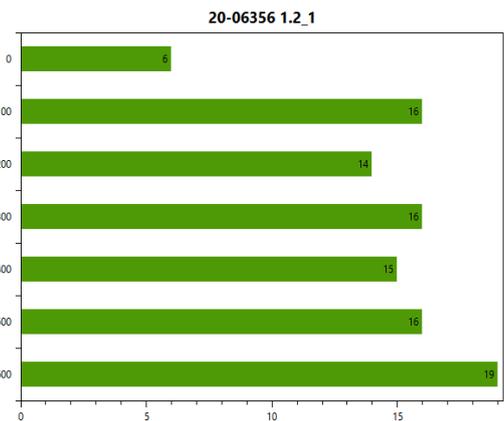
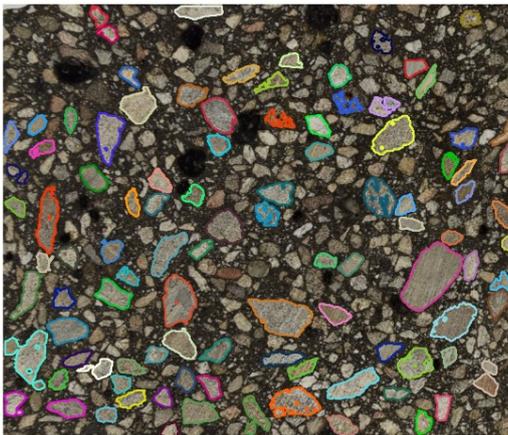


Abb. 26 MA 8 HP vibriert, Grenzwert der berücksichtigten Fläche grösser (Bildhöhe 706 Pixel, Threshold 500); Anteil grober Körner im unteren Teil gross. Im rechten Teil der Abbildung: x-Achse: Anzahl Körner mit einer Schnittfläche von 500 Pixel; y-Achse: Höhenlage der Körner (mit 500 Pixel).

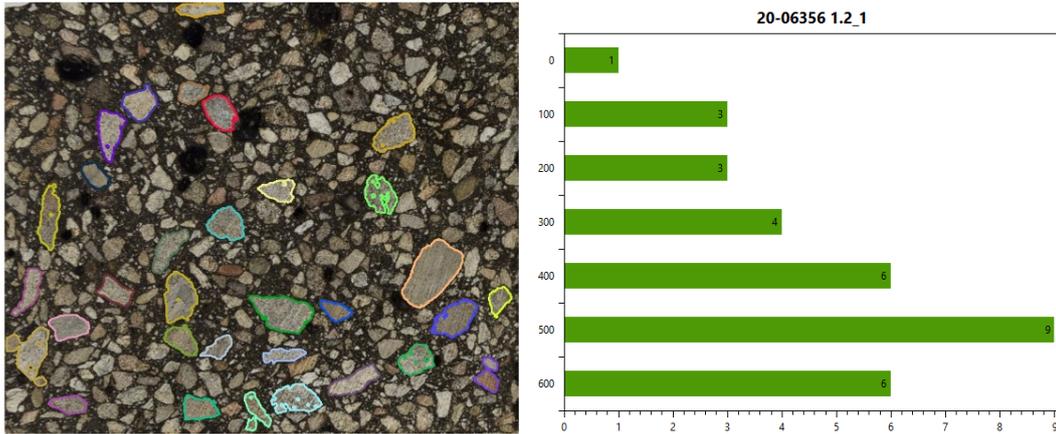


Abb. 27 MA 8 HP vibriert, Grenzwert der berücksichtigten Fläche noch grösser (Bildhöhe 706 Pixel, Threshold 1000); Anteil grober Körner im unteren Teil sehr gross. Im rechten Teil der Abbildung: x-Achse: Anzahl Körner mit einer Schnittfläche von 1000 Pixel; y-Achse: Höhenlage der Körner (mit 1000 Pixel).

Die gleichen Einstellungen wie bei der vibrierten Probe in Abb. 27 wurden auch bei einer normal gelagerten Probe angewendet, und wie bei Abb. 28 entnommen werden kann, ist keine Entmischung erkennbar.

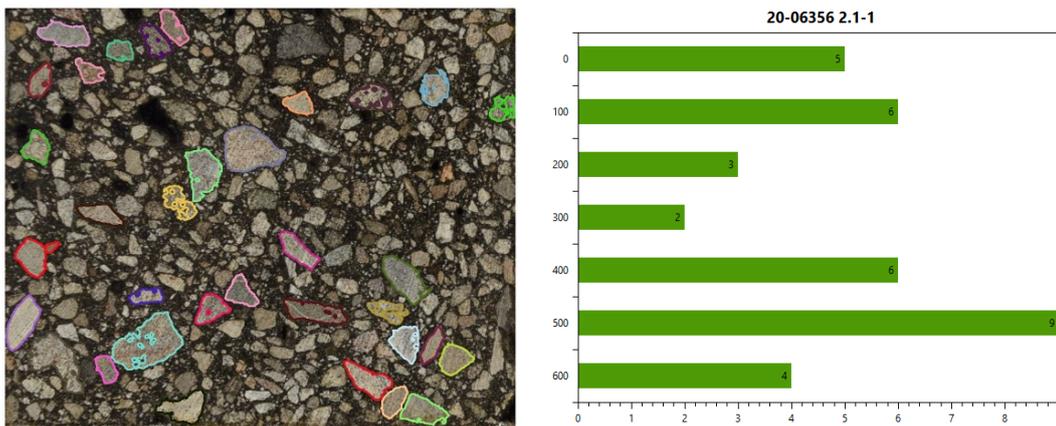


Abb. 28 MA 8 HP nicht vibriert, (Bildhöhe 697 Pixel Threshold 1000). Im rechten Teil der Abbildung: x-Achse: Anzahl Körner mit einer Schnittfläche von 1000 Pixel; y-Achse: Höhenlage der Körner (mit 1000 Pixel).

Das genaue Auswertungsprogramm wird in Kapitel 5.5 vorgestellt. Obwohl also eine deutliche Entmischung zu sehen ist, zeigen die Standardprüfungen keine signifikanten Unterschiede. Ein Grund dafür ist, dass es sich um sehr hartes Mischgut handelt, wo kleine Unterschiede innerhalb der Messtoleranz liegen. Bei etwas weicherem Mischgut kann dies anders aussehen und eine Entmischung einen grossen Einfluss auf das Resultat haben.

5.4 Prüfkörperherstellung im Labor

Um ein Mischgut im Labor verarbeiten zu können, muss es wieder erwärmt werden. Dazu wird auf der Baustelle in maximal ca. 4 cm hohen Aluminiumschalen abgefüllter Gussasphalt verwendet (siehe Abb. 2). Dieses nochmalige Erhitzen führt zu einer Alterung des Bindemittels, welche die Eigenschaften des Mischgutes – im Vergleich zur verlegten Asphaltmischgut In-situ – verändert. Aus Untersuchungen zur thermischen Alterung von Asphaltmischgut [39] sowie Laborerfahrung ist bekannt, dass diese zusätzliche Bindemittelalterung von vielen Faktoren abhängig ist. Neben der Mischgutzusammensetzung und der Bindemittelqualität spielt auch das Vorgehen im Labor eine zentrale Rolle.

Zur Erwärmung einer Mischgut-Probe stehen im Labor zwei Methoden zu Verfügung. Erstens die Erwärmung des Mischguts im Mikrowellen-Ofen (Erwärmung im Karton) und zweitens die Verwendung eines klassischer Umluft-Ofens. Zur Untersuchung des Einflusses der Erhitzung und zur Festlegung eines optimalen Vorgehens, wurden drei unterschiedliche Prozeduren durchgeführt:

- Vollständige Erwärmung im Mikrowellen-Ofen (14 Minuten)
- Vollständige Erwärmung im Umluft Ofen (2 h)
- Kombination von Erwärmung im Mikrowellen-Ofen bis auf ca. 120 °C und dann die restliche Erwärmung im Umluft-Ofen. (5 min Mikrowelle, 1 h Ofen)

Zur Bestimmung der erforderlichen Erwärmungsdauer in der Mikrowelle wurde vorgängig eine Testreihe mit dem Ziel durchgeführt, in der Gussasphaltprobe eine Temperatur von 230 °C zu erreichen. Eine Temperaturmessung ist während der Erwärmung in einem Mikrowellen-Ofen nicht möglich. Daher wurde alle paar Minuten die Türe geöffnet und die Temperatur der Probe per Sonde gemessen. Bei der Erwärmung einer Asphaltprobe in einem Mikrowellenofen ist erfahrungsgemäss die Temperatur inhomogen verteilt; einzelne Bereiche sind deutlich wärmer, andere hingegen kälter. Daher wurde, sobald der Gussasphalt warm genug war, das Mischgut zusätzlich vor der Temperatur-Messung durchgemischt.

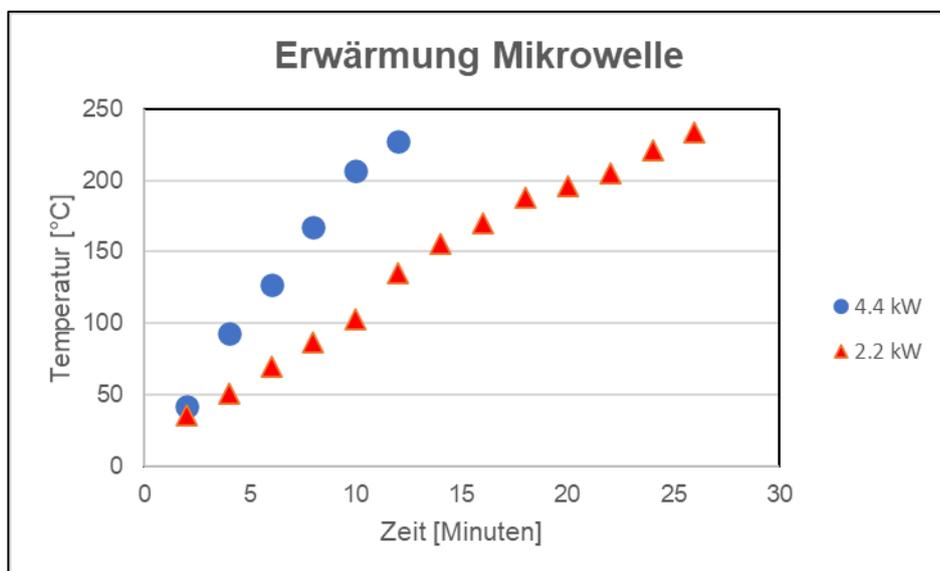


Abb. 29 Vortests zur Erwärmungszeit in der Mikrowelle, um die gewünschte Probentemperatur zu erreichen. Die Probemenge richtete sich an die geplanten Prüfungen und betrug 12 kg.

Abb. 29 zeigt, dass Mikrowellen-Öfen mit unterschiedlicher Leistung deutlich unterschiedliche Aufwärmzeiten erzeugen. Beim Ofen mit der doppelten Leistung (4.4 kW) wird die Probe in weniger als der halben Zeit gegenüber dem schwächeren Ofen (2.2 kW) auf die gleiche Temperatur erwärmt.

Die Erwärmungsdauer wurde für den Mikrowellen-Ofen (4.4 kW) bei 100 % Leistung auf 14 Minuten festgelegt. Um die gleiche Temperatur im Umluftofen zu erreichen, bedarf es zwei Stunden. Bei der kombinierten Methode wurde der Asphalt 5 Minuten in der Mikrowelle (4.4 kW / 100 % Leistung) und danach 60 Minuten im Umluft-Ofen erwärmt.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Mikrowellenöfen nicht darauf ausgelegt sind, Materialien auf 220°C zu erwärmen. So wurde das professionelle Mikrowellengerät bei der Testreihe (14 Minuten 100 %) stark beschädigt.

Das aus dem Gussasphalt rückgewonnene Bindemittel wurde anschliessend mit den Prüfungen Nadelpenetration [12], Erweichungspunkt [13], MSCRT [40] und Temperatursweep [41] im dynamischen Scherrheometer (DSR) untersucht. Am Gussasphalt wurden die modifizierte Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 (55 °C und 625 N Belastung) [42] und die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 bestimmt [43]. Die Resultate sind in der Tab. 13 aufgeführt.

Tab. 13 Resultate der unterschiedlichen Erwärmungsmethoden; «kurz MW» entspricht kurzer Erwärmung in der Mikrowelle, restliche Erwärmung im Ofen. Die Standarduntersuchungen und MSCRT zeigen Unterschiede zwischen den verschiedenen Erwärmungsprozeduren

Merkm al	Ofen	Mikrowelle	kurz MW
Nadelpenetration [dmm]	24.0	28.8	27.8
Erweichungspunkt [°C]	82.1	73.2	84.8
MSCR 3.2 kPa [%]	83.0	79.9	82.9
Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 A2 nach 5000 Zyklen [mm]	0.4	0.8	0.4
Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 [mm]	2.2	2.6	1.8
Zunahme [mm]	0.3	0.4	0.4

Die Nadelpenetration ist kleiner und der Erweichungspunkt höher bei Bitumenproben, die im Umluft-Ofen erwärmt wurden. Bitumenproben in der Mikrowelle erwärmt, zeigen gegensätzliches Verhalten. Eine Erhöhung des Erweichungspunktes geht einher mit kleineren Nadelpenetrationen, die Resultate sind also stimmig. Das heisst, Bitumenproben im Umluftofen erwärmt, lassen das Bindemittel schneller erhärten (altern) als Bitumenproben in der Mikrowelle erwärmt. Dies stimmt überein mit Resultaten aus [39].

Der Unterschied bei den Ergebnissen der MSCRT Messung ist nicht signifikant. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Prüfung eher dazu geeignet ist aufzuzeigen, dass Polymere vorhanden sind und Wirkung ausüben, und weniger geeignet ist einen quantitativen Abbau der Polymere nachzuweisen. Das Black-Diagramm (Abb. 30) hingegen zeigt sehr klar, dass die Erwärmung im Mikrowellenofen im Vergleich zu den anderen Erwärmungsverfahren (Umluft-Ofen und Kombination Mikrowelle/Umluft-Ofen) einen deutlichen Unterschied der rheologischen Eigenschaften erzeugt. Der Phasenwinkel ist bei gleichem Modul grösser, was bedeutet, dass die elastischen Eigenschaften verändert wurden; das Bindemittel ist weniger elastisch. Es ist bekannt, dass, je weiter sich die Kurve im Black Diagramm nach unten links verschiebt, desto mehr wurde die Probe gealtert. Wir gehen davon aus, dass die vollständige Erwärmung in der industriellen Mikrowelle gleichmässiger geschieht als im normalen Ofen, bei der die Probe von aussen gegen innen erwärmt wird.

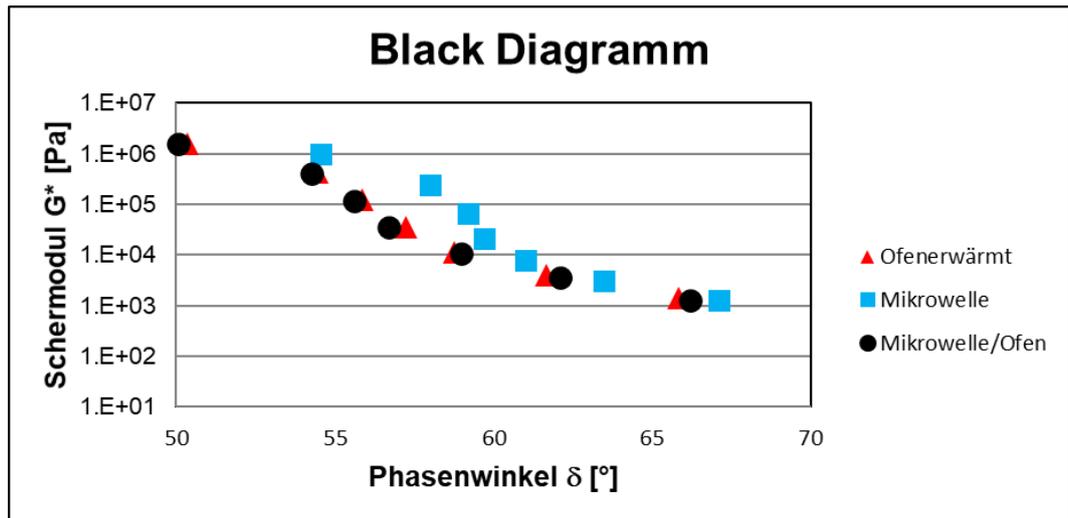


Abb. 30 Temperatursweep im DSR. Der Vergleich der verschiedenen Erwärmungsmethoden zeigt auch hier, dass die Mikrowelle die Polymere anders beeinflusst als reine Ofenerwärmung und Kombination Mikrowelle/Ofen.

Die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 zeigt auch einen kleineren Wert bei der ofenerwärmten Probe als bei der mikrowellenerwärmten Probe. Die Eindringtiefe nach SN EN 1269725 Prüfverfahren A2 zeigte den grössten Unterschied zwischen den zwei Methoden. Auch da ist das Resultat konsistent mit den anderen Prüfmethoden, dass die Belastung des Bindemittels im Ofen grösser ist als in der Mikrowelle.

Es zeigte sich über alle Prüfungen hinweg, dass eine vollständige Erwärmung in der Mikrowelle das Material am wenigsten altern lässt, während eine kombinierte Erwärmung der Ofenalterung sehr ähnlich ist. Die kombinierte Alterung wurde erst einige Monate später durchgeführt, da die Mikrowelle die vollständige Erwärmung der Probe nicht unbeschadet überstanden hatte.

Auch wenn die Mikrowelle für das Bindemittel die schonendste Erwärmungsmethode darstellt, wird nicht empfohlen, dies im Alltag so durchzuführen, da Mikrowellen nicht dafür ausgelegt sind, Material auf über 200 °C zu erwärmen. Die Kombination ist jedoch geeignet, die Erwärmungszeit zu beschleunigen und die Resultate sind vergleichbar mit der reinen Ofenerwärmung.

5.5 Innovative Methoden: Programm zum Erkennen und quantifizieren von Entmischungen

Da die untersuchten Mischgüter allgemein sehr hart waren, konnten mit konventionellen Methoden (ET stat und ET dyn) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lagerungen (mit / ohne Vibration) festgestellt werden. Um zu untersuchen, ob die Vibration überhaupt einen Einfluss hatte, wurden Querschnitte der Proben gemacht. Da wurde optisch festgestellt, dass eine Entmischung vorhanden war. Grosse Gesteinskörnungen waren am unteren Teil der Probe angesammelt, während die Mastix bevorzugt im oberen Teil vorlag.

Dies war optisch zwar qualitativ sichtbar, aber wir wollten versuchen, diese Beobachtung zu quantifizieren. Dazu wurde ein Programm mit dem Namen SampleSegmenter in der Programmierumgebung OpenCV Framework mit der Programmiersprache Csharp für diese Zwecke erstellt (Abb. 31).

Crop Options

Start X: Start Y: Width: Height: Enable Crop

Denoise Options

H: H Color: Template Window Size: Search Window Size:

Grayscale Options

Enable Histo Equalizer

Threshold Options

Threshold 0 Max Value: Use Otsu

Dilate Options

Kernel Size: Iterations: Enable Dilate

Contours

Minimum Area: Fill Contours Convex Hull

Abb. 31 Bedienoberfläche Software, wo einzelne Filteroptionen eingestellt werden können.

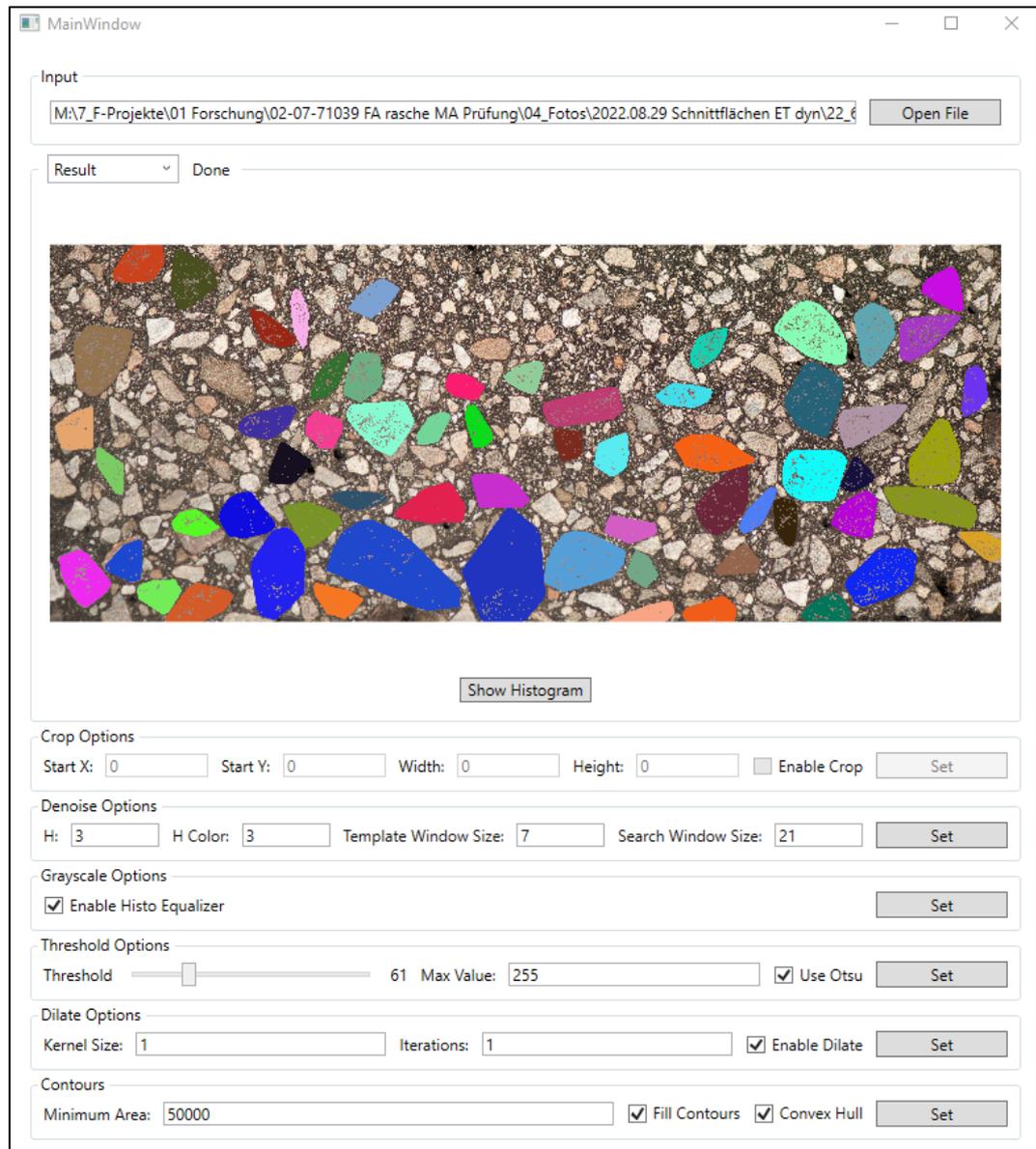
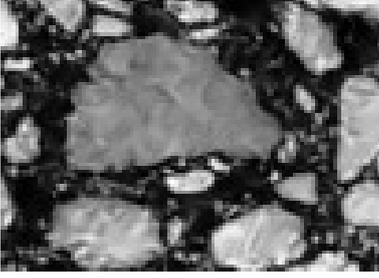


Abb. 32 Ansicht des Programmes mit einer Schnittfläche, die ausgewertet wurde.

Die einzelnen Programmschritte beeinflussen das Resultat (Abb. 32) und bestimmen, ob ein Gestein als Gestein erkannt wird. Je nach Ursprungsgestein wird eine andere Einstellung bessere Resultate liefern.

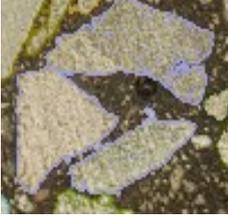
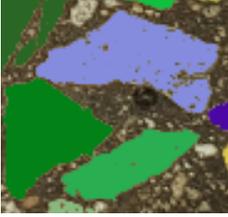
In Tab. 14 sind grob die einzelnen Schritte des Programmes zur Erkennung der Korngrenzen zusammengefasst:

Tab. 14 Ablauf des Programmes in Einzelschritten. Jeder Schritt kann individuell angepasst werden oder auf automatische Optimierung gesetzt werden

Foto	Beschreibung
<p>Crop Options</p> <p>Start X: <input type="text" value="0"/> Start Y: <input type="text" value="0"/></p>	<p>Bei hoher Auflösung dauert die Auswertung lange. Daher kann man zum Testen der Bedingungen einen kleineren Bildausschnitt wählen, um die Optimierung und minimale zu berücksichtigende Fläche einzustellen</p>
	<p>Originalbild Ausschnitt</p>
	<p>Mit der Denoise Funktion wird das Bild entstört. Es «verwischt» die Kanten und vermindert das Rauschen innerhalb des Bildes.</p>
	<p>Danach werden die Farben in Graustufen übersetzt; mit dem Histo Equalizer werden die Graustufen über das ganze Bild vereinheitlicht.</p>
	<p>Binarisiert: Das Graustufenbild wird in ein schwarzweisses Bild übersetzt. Der Schwellenwert kann von Hand gesetzt werden, oder mit der Funktion Otsu automatisiert optimiert werden.</p>
	<p>Dilate: mit dieser Funktion werden die hellen Bereiche vergrößert; je mehr Iterationen durchgeführt werden, desto kleiner wird der schwarze Bereich.</p>
<p>Contours</p> <p>Minimum Area: <input type="text" value="1000"/></p>	<p>Festlegung der übriggebliebenen schwarzen zusammenhängenden Fläche, die berücksichtigt werden soll. In der Auswertung. Hier kann auch noch etwas getrickst werden, wenn man um die Fläche eine konvexe Hülle legt.</p>

Zusätzlich kann noch mit der Form der Grenzflächen aussortiert werden. Tab. 15 zeigt die Auswirkung von Dilate auf die Erkennung von Körnern. Convex Hull zeigt eine andere Darstellung. Wenn die Konturen der Kornflächen gefüllt sind, ist eindeutig zu erkennen, dass diese drei einzelnen Körner vom Programm als ein Korn erkannt werden (zweites Bild in Tab. 15).

Tab. 15 Auswirkung von Dilate auf die Auswertung

Foto	Beschreibung
	<p>Ohne Dilate, minimum Area 1000</p>
	<p>Konturen gefüllt, ändert nichts an der Auswertung, aber zeigt eindeutig, dass die drei individuellen Körner nicht richtig erkannt werden mit diesen Einstellungen.</p>
	<p>Mit Dilate werden zwei von drei Körnern erkannt.</p>
	<p>Wird die Kernel Size auf 2 gesetzt, werden alle drei Körner erkannt</p>
	<p>Convex Hull legt um das Korn eine Hülle; damit wird die Grösse der Körner überschätzt, es kann aber bei Konglomeratskörnern helfen</p>

Wenn die Differenzierung jedoch für diese drei Körner funktioniert (zweites Bild in Tab. 15), gibt es an anderer Stelle Gestein, das nicht mehr erkannt wird. Sichtbar ist das auf Abb. 33 und Abb. 34 (grüne Kreise, Körner werden jetzt richtig erkannt, rote Kreise Körner werden nicht mehr erkannt).

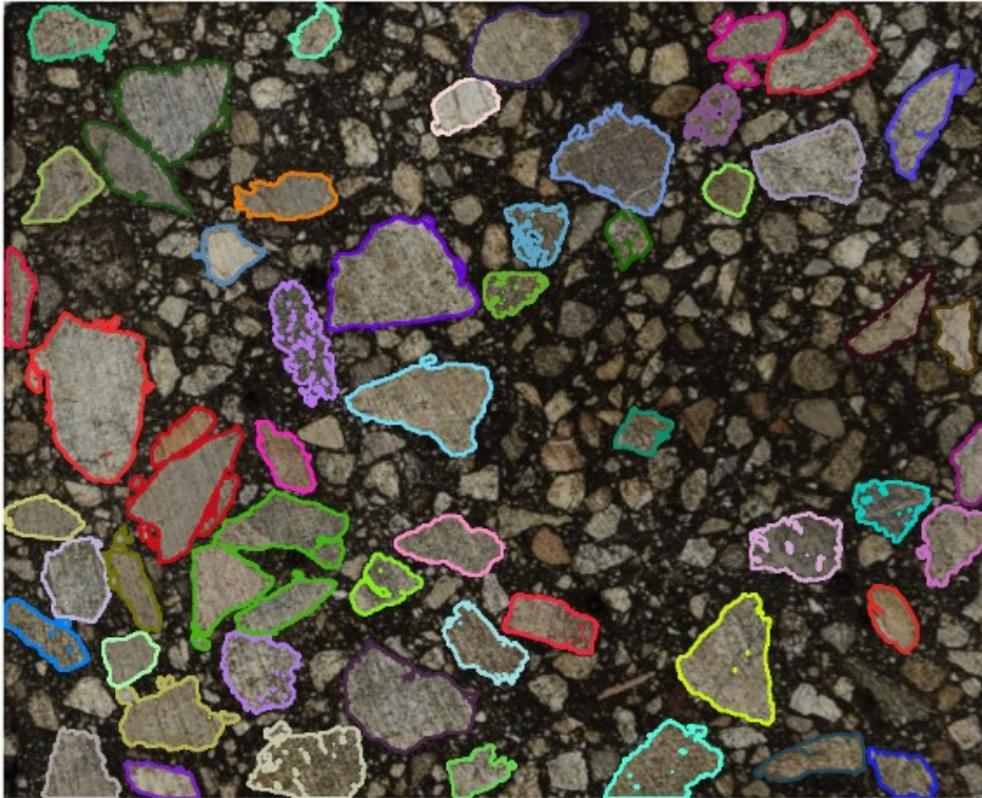


Abb. 33 Resultat ohne Dilate.

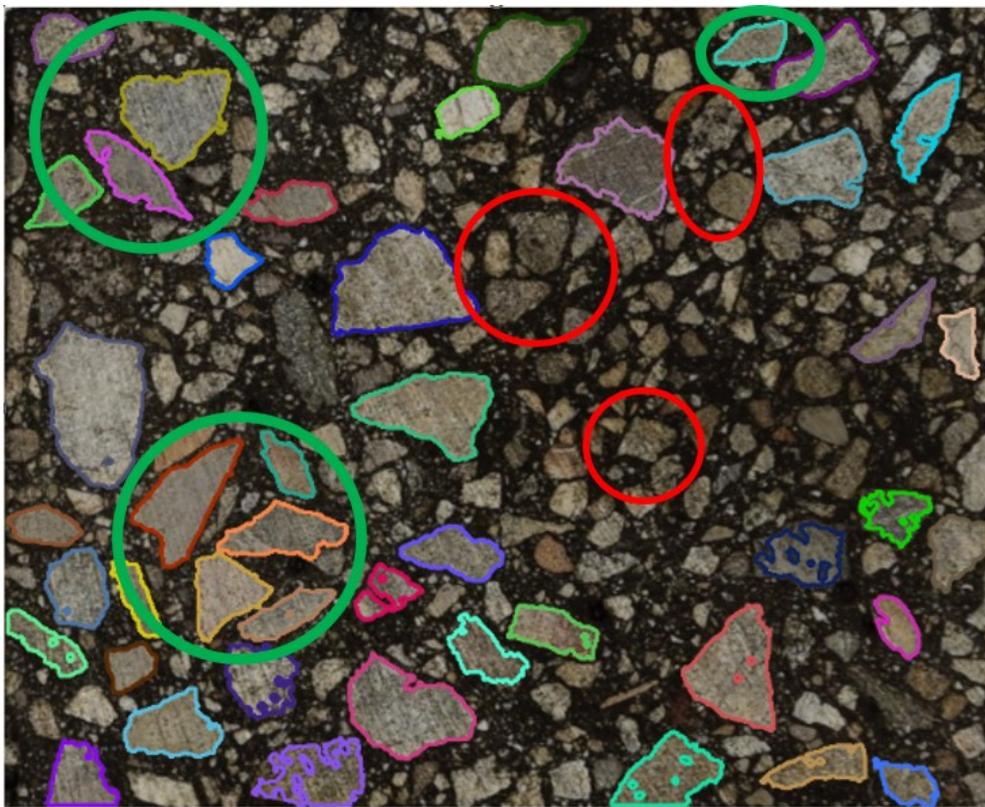


Abb. 34 Auswirkung von Dilate auf das gesamte Bild. Einige Körner werden besser erkannt (grüne Kreise), andere Körner dafür nicht mehr berücksichtigt (rote Kreise). (MA 11 HP, nicht vibriert).

Mit den erkannten Gesteinskörnern wird auch ein Histogramm und eine Tabelle mit den Koordinaten, der Fläche und dem Umfang des erkannten Gesteins erstellt. Die Tabelle kann als CSV-Datei exportiert werden und in Excel weiterverarbeitet werden (Abb. 35).

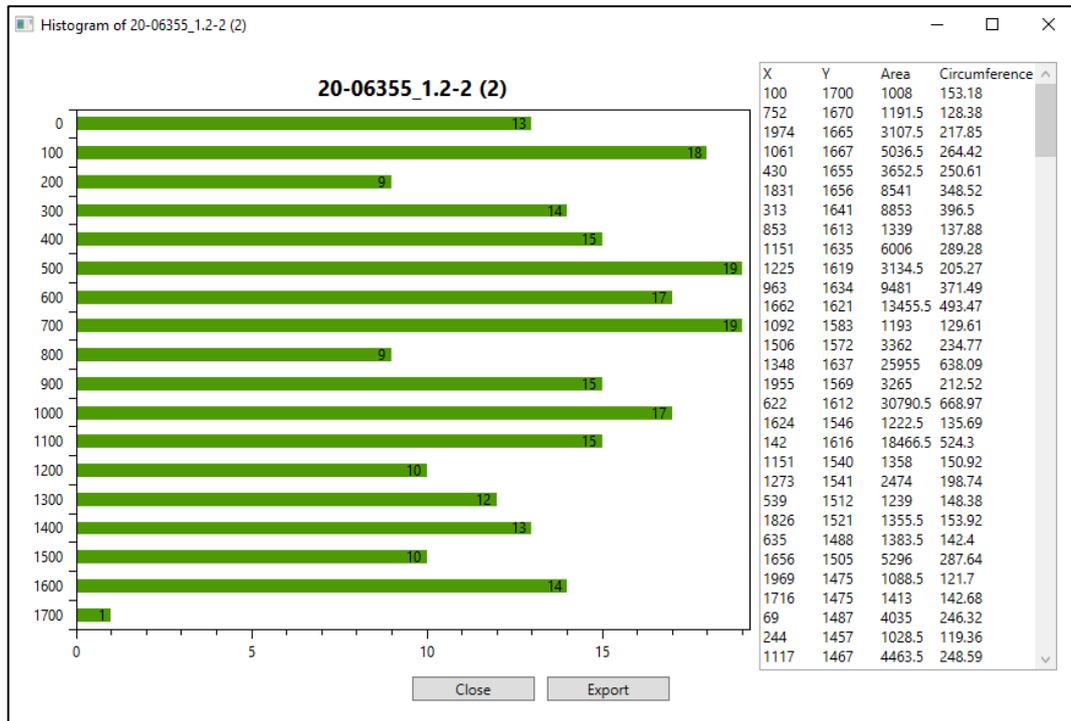


Abb. 35 Ausgabe Histogramm (x-Achse Anzahl Körner, y-Achse die Höhenlage des Mittelpunktes vom Korn in Pixeln) und Tabelle mit den Koordinaten (Kolonne x und y) und Grössen der Körner (Area) als Zusatzinformation kommt noch der Umfang der Körner in der vierten Kolonne. Die Tabelle kann als CSV-Datei exportiert werden.

Es wurden von den Schnittflächen nochmals Bilder mit grösserer Auflösung und polierter Schnittfläche gemacht. Dies zog dann bei der Analyse wieder Probleme bei der Auswertung nach sich, die den Rahmen dieses Auftrages sprengen.

Foto-Aufnahme der Schnittflächen

Zur Aufnahme der Schnittflächen wurde eine professionelle Spiegelreflex-Kamera (NIKON D850) mit hoher Auflösung (45 MB) sowie ein Makro-Objektiv (NIKKOR 105 mm 1:2.8 G ED) verwendet. Die Aufnahmen erfolgten mit einem Stativ unter Tageslicht mit folgenden Einstellungen:

- Spiegelvorauslösung: 0.7 sec
- Blende: f/6.3
- Verschluss: 1/1250 sec
- ISO: 320

Vorbereitung der Proben in Photoshop

Mit der Software Photoshop kann am Computer schon vor der Bildanalyse das Bild bearbeitet werden. Es wurde hauptsächlich mit Kontrast gearbeitet. Das Resultat zeigte sich vielversprechend. Die Abb. 36 und Abb. 37 sind unbearbeitet; selbst mit grossen Einschränkungen lassen sich die rot hervorgehobenen Körner nicht trennen. Bei Abb. 38 werden die Körner problemlos unterschieden, dafür erkannte es die dunkleren Gesteine im bearbeiteten Bild schlechter, da es mit höherem Kontrast dann körniger aussieht.



Abb. 36 unbearbeitetes Schnittbild von dynamischer Eindringtiefe.



Abb. 37 Analyse unbearbeitetes Bild.



Abb. 38 Kontrast hochgesetzt, Bild leicht bearbeitet in Photoshop.

Schlussfolgerung zum Programm

Das Programm kann, so wie es ist, Entmischungen erkennen. Es funktioniert nur eingeschränkt bei Konglomeraten und dunklen Gesteinen. Es ist nicht für die tägliche Anwendung gedacht, aber bei Schadensfällen kann es als objektive Einschätzung für Entmischungsfälle so wie es ist, benutzt werden.

Das Bildanalyseprogramm hat grosses Verbesserungspotential.

Einerseits was die Flexibilität der Anwenderfreundlichkeit aber auch die Auswertung angeht. Das Histogramm ist zurzeit an die Pixel gekoppelt. Das machte Sinn, als die Bilder eine geringe Auflösung hatten, aber mit der grösseren Auflösung müsste das Histogramm angepasst werden können. Auch könnte man eine Umrechnung der Pixel in cm einfügen, so dass man die Ausgabe immer in derselben Skala hat.

Es gibt auch noch viele andere Bildoptimierungsmöglichkeiten, die sich auch laufend weiterentwickeln. Auch das Anwendungspotential ist gross. Könnte man es doch benutzen, um Luftblasen im Beton zu erkennen. Eine weitere Möglichkeit wäre es, beim Karbonatisierungswiderstand den pinken Bereich zu detektieren und automatisch die Distanz zur Oberfläche des Würfels auszugeben.

Im vorliegenden Forschungsprojekt war es nicht vorgesehen, eine derartige Software zu entwickeln. Aus diesem Grund konnten nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Dies müsste allenfalls in einem Folgeprojekt angegangen werden.

6 Einfluss Lagerungsdauer auf Prüfergebnisse

6.1 Eindringtiefe nach SN EN 12697-20

Der Einfluss der Lagerungsdauer wurde untersucht. Ziel ist es nachzuweisen, dass die Probekörper nach Herstellung und Erkalten auf Raumtemperatur unmittelbar geprüft werden können und nicht erst nach 24 h Konditionierungsdauer wie es in der Norm steht [5]. Mit diesem Nachweis liesse sich die Prüfung zeitlich verkürzen. Das ist ein wesentlicher Punkt für einen zügigen Baufortschritt.

Dazu wurden ein MA 8 H auf ca. 220°C im Ofen erwärmt und in zwei Würfel mit Kantenlänge 70 mm und zwei Zylinder mit der Geometrie $d = 100 \text{ mm}$ und $h = 70 \text{ mm}$ inklusive Thermoelement Typ K eingebaut (Abb. 39). Masse Würfel ca. 850 g und Zylinder ca. 1300 g.



Abb. 39 Messaufbau zur Bestimmung des Temperaturverlaufs.

Nach dem Einbau und Erkalten wird Raumtemperatur erreicht für Würfel nach ca. 4.5 h und Zylinder nach ca. 6 h (Abb. 40). Würfel kühlen aufgrund der kleineren Masse schneller aus. Innerhalb von rund 30 min erreichen Würfel und Zylinder Prüftemperatur.

Die Abkühldauer lässt sich weiter verkürzen mittels kalten Wasserbads, indem die Prüflinge nach Herstellung und ca. 1 h Abkühlung bei Raumtemperatur 1 h in ein ca. 15°C Wasserbad (Leitungswasser) konditioniert werden. So sind sie 2 h nach Herstellung bereit für die einstündige Konditionierung auf Prüftemperatur [27]. Dieses Vorgehen ist bereits in der Prüfnorm der statischen Eindringtiefe von 1999 beschrieben [27].

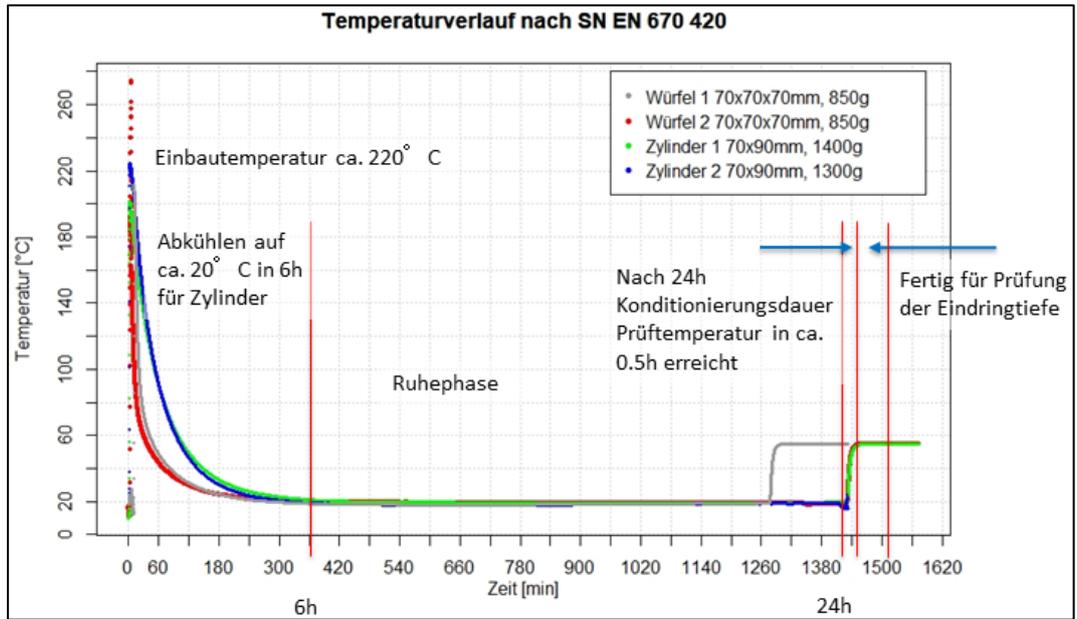


Abb. 40 Temperatur- Zeit-Verlauf der Konditionierungsphase.

Abb. 41, Tab. 16 und Tab. 17 fassen die Resultate zu den Untersuchungen zum Einfluss der Konditionierungsdauer zusammen.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Es sind keine Unterschiede in den Eindringtiefen nach einer Konditionierungszeit von 24 h oder 2 h zu erkennen.

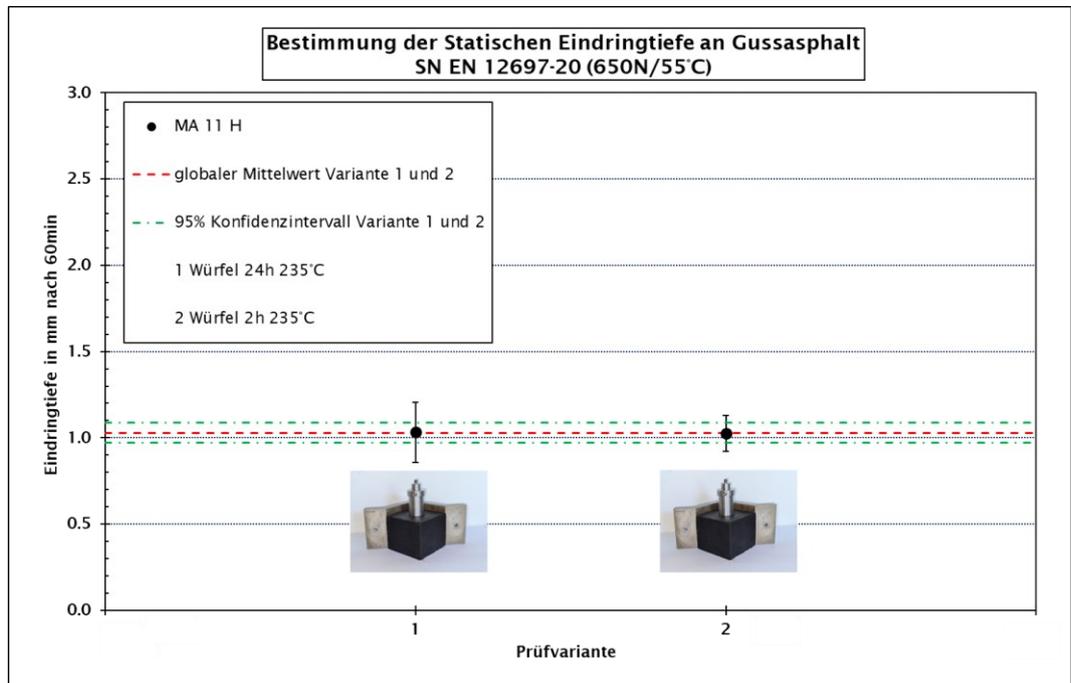


Abb. 41 Resultate Einfluss Lagerungsdauer Würfelproben.

Tab. 16 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 41

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
1.03 mm	0.15 mm	27	2.056	5 %	95 %	0.97 mm – 1.09 mm

Tab. 17 Übersicht Prüfbedingungen und Prüfergebnisse Abb. 41

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
1	16	1.03	0.17	16.9	4.2	0.71
2	11	1.02	0.10	10.2	3.1	0.30

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm \pm 0.5mm geschnitten.

6.2 Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2

Die bewährte Prüfmethode „Bestimmung der dynamischen Eindringtiefe“ wurde mit Verweis auf frühere Arbeiten [32] der geltenden SN EN 12697-25 und deren nationale Elemente in diversen Ländern nicht verändert.

Mit der Überarbeitung der SN EN 12697-25 vom Juli 2016 wurde neu eine Wartefrist zwischen der Herstellung der Probekörper und der Prüfung von mindestens 14 Tagen eingeführt. Gemäss Pkt 7.5.1. „Lagerbedingungen“ der SN EN 12697-25 müssen die Probekörper zwischen dem 14. und 42. Tag nach Herstellung bei einer Temperatur von höchstens 20 °C gelagert werden. Diese Änderung erfolgte in Anlehnung an andere dynamische Asphaltprüfungen, bei denen derartige Wartezeiten festgelegt sind; namentlich bei der Bestimmung des E-Moduls nach SN EN 12697-26 [44] und des Ermüdungswiderstandes SN EN 12697-24 [45].

Diese Bestimmung widerspricht den bisherigen Erfahrungen, vor allem aus Deutschland und der Schweiz. Zudem verlängert diese Bestimmung die Durchführung der Prüfung um ein Mehrfaches, was für deren Anwendung in der Praxis nicht haltbar ist. Aus diesem Grund wurden verschiedene MA-Sorten nach unterschiedlichen Lagerungsdauern untersucht. Ein Schwergewicht der Untersuchungen wurde auf folgende Lagerungszeiträume bei 20 °C gelegt:

- Prüfung 7 Stunden nach der Herstellung
- Prüfung ein Tag nach der Herstellung (Lagerung 1 Tag)
- Prüfung nach zwei Tagen
- Prüfung nach 14 Tagen
- Prüfung nach 42 Tagen

Zusätzlich wurden weitere, regelmässig verteilte Lagerungsdauern untersucht.

Um die Prüfung nach 7 Stunden durchführen zu können, wurde die Probe nach der Herstellung für 2.5 h an der Luft abgekühlt, danach für 30 Minuten in einem Wasserbad gelagert. Danach wurde die Probe aus der Form genommen und geschliffen. 4.5 h nach der Herstellung wurde die Probe wieder auf 50 °C erwärmt, und 2.5 h später geprüft.

Somit können die für die Praxis wünschenswerten Lagerungen (7 h, 1 oder 2 Tage) mit den Bedingungen der EN (14 bis 42 Tage) verglichen werden.

Mit drei verschiedenen MA-Sorten wurde die beschriebene Zeitreihe durchgeführt. Die Messreihen bestätigen die Resultate aus dem Forschungsbericht VSS 2000.

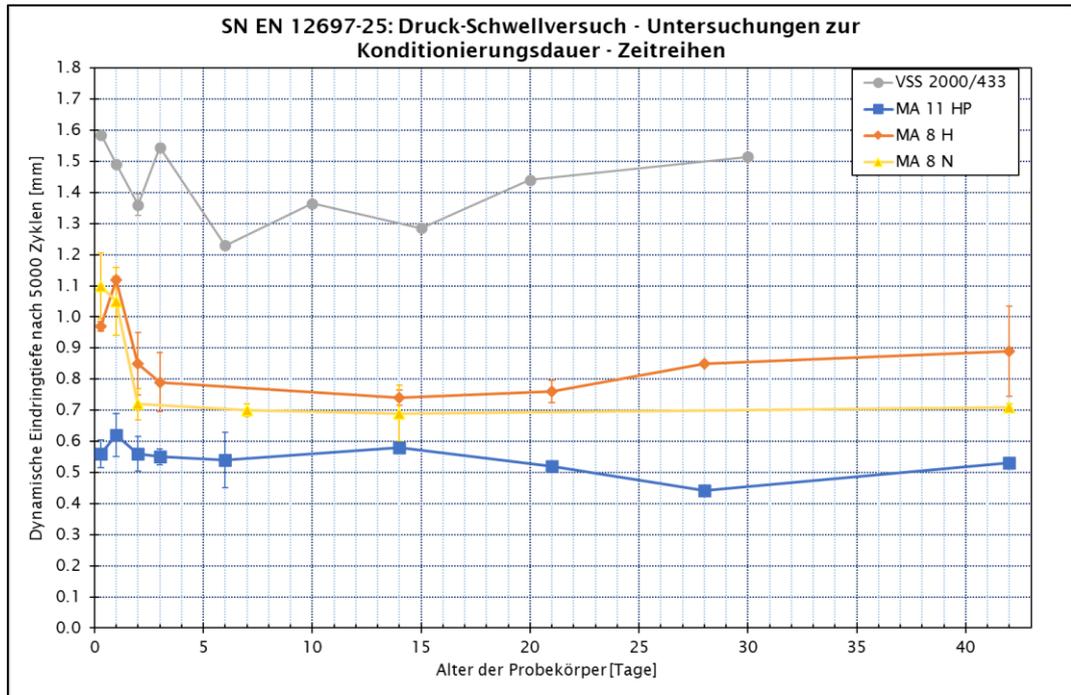


Abb. 42 Zeitreihen von MA 8 und 11 zeigen keine signifikanten Unterschiede, ob nach 2 Tagen oder erst nach 14 Tagen gemessen wird.

Die Ergebnisse der Zeitreihenuntersuchung in Abb. 42 zeigen keine Abhängigkeit von der Lagerungsdauer, welche die Forderung der Norm EN 12697-25 begründen würde, die Prüfung erst nach 14 – 42 Tagen durchzuführen. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die untersuchten MA-Sorten Werte der dynamischen Eindringtiefe um 1 mm zeigten, was hart ist. Selbst der MA 8 N, per Definition ein etwas weiches Material, hatte unüblich niedrige Werte. Dies ist wohl zufällig auf einen harten Gussasphalt zurückzuführen. Ein systematischer Fehler kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden, da zwischen den Prüfungen für das vorliegende Forschungsprojekt immer wieder andere MA-Sorten (auch weichere) für Routineuntersuchungen auf den gleichen Prüfeinrichtungen untersucht wurden.

Aus den Messungen folgt, dass eine Wartezeit von zwei Tagen völlig ausreicht, um die Prüfung durchzuführen. Die Bedingungen der SN EN 12697-25 in welchen verlangt wird, mindestens 14 Tage nach der Herstellung zu warten, können im nationalen Anhang – mit Verweis auf die vorliegenden Forschungsergebnisse – geändert werden.

Statistische Auswertung der Eindringtiefe nach SN EN 12697-25

Da die Resultate der untersuchten Gussasphalte alle sehr hart waren, wurden die Resultate der letzten Jahre betrachtet, um zu beurteilen, ob die untersuchten Gussasphalte typisch für den Schweizer Markt sind. Abb. 43 zeigt eine statistische Auswertung der dynamischen Eindringtiefen aus Routineuntersuchungen der letzten Jahre. Es zeigt sich, dass grundsätzlich fast ausschliesslich harte MA-Sorten verbaut wurden, welche bis auf wenige Ausnahmen die Anforderungen an den Mischguttyp H ≤ 2.5 mm erfüllen. Das liegt auch daran, dass das ASTRA eigene schärfere Anforderungen an die eingebauten Schichten hat, als in der Norm für H verlangt wird [49]. Für die dynamische Eindringtiefe ET_{dyn} verlangt das ASTRA eine Eindringtiefe von ≤ 1.8 mm mit einer Zunahme $\Delta ET_{dyn} \leq 0.5$ mm. Zudem wird die dynamische Eindringtiefe bei weichen Sorten nicht durchgeführt.

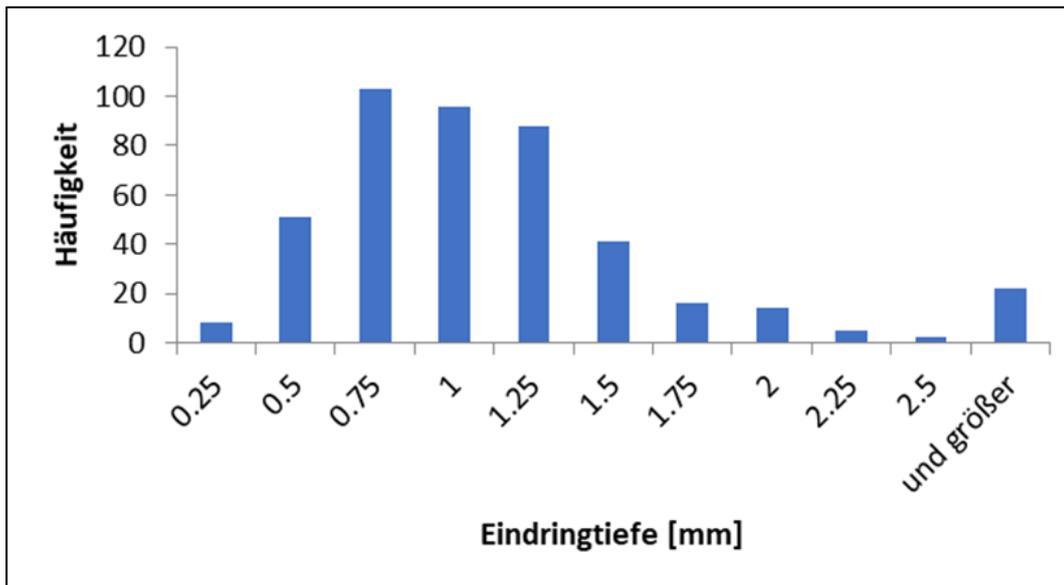


Abb. 43 Statistische Auswertung der letzten Jahre zeigt, dass die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 allgemein sehr niedrig ist. Dies liegt auch daran, dass auf Baustellen des ASTRA so hartes Material verlangt wird.

Einfluss der Entmischung auf die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25

Um festzustellen, ob eine Entmischung der Probe die Resultate der dynamischen Eindringtiefe beeinflussen kann, wurden drei Prüfkörper hergestellt, welche während der Abkühlphase auf einem Rütteltisch vibriert wurden. Nach der vollständigen Abkühlung und der üblichen Vorbereitung (Schleifen und Ruhezeit) wurden zwei Prüfkörper sowohl an der oberen als auch an der unteren Seite geprüft (Eindringtiefe nach SN EN 12697-25). Falls durch die Vibrationen eine Entmischung entstanden ist, wären grundsätzlich unterschiedliche Ergebnisse oben / unten zu erwarten.

Der dritte Prüfkörper wurde in der Mitte zersägt und die Schnittflächen hinsichtlich Verteilung der Körner beurteilt. In Abb. 44 ist das Schnittbild zu sehen. Im Schnittbild ist schon rein optisch eine Entmischung im oberen Teil (weniger Grobanteile, mehr Mastix) erkennbar.



Abb. 44 Querschnitt eines Probekörpers für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2, der beim Abkühlprozess der Herstellung vibriert wurde. Klar ersichtlich ist die oberflächennahe Entmischung.

Eine Visualisierung der grösseren Körner (Abb. 45) mit dem angewendeten Programm (vorgestellt in Kapitel 5.5) zeigt eindeutig, dass eine Entmischung stattgefunden hat.

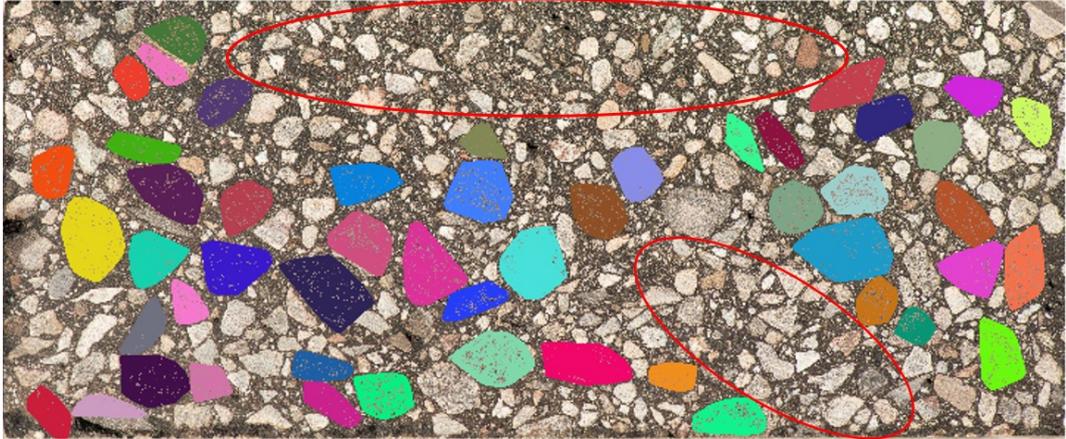


Abb. 45 Querschnitt eines Probekörpers für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2, mit Visualisierung der grösseren Körner.

Auch wenn die beiden Schnittflächen in Abb. 44 und Abb. 45 zusammen angeschaut werden und die grösseren Körner statistisch ausgewertet werden (Abb. 46), ist die Entmischung eindeutig. Es scheint auch, dass seitlich die Entmischung weniger ausgeprägt ist. Dies ist auf Randeffekte bei der Probenherstellung zurückzuführen. Da der Rand fest ist, kann sich das Gestein bei der Vibration an dieser Stelle nicht frei bewegen was der Entmischung entgegenwirkt.

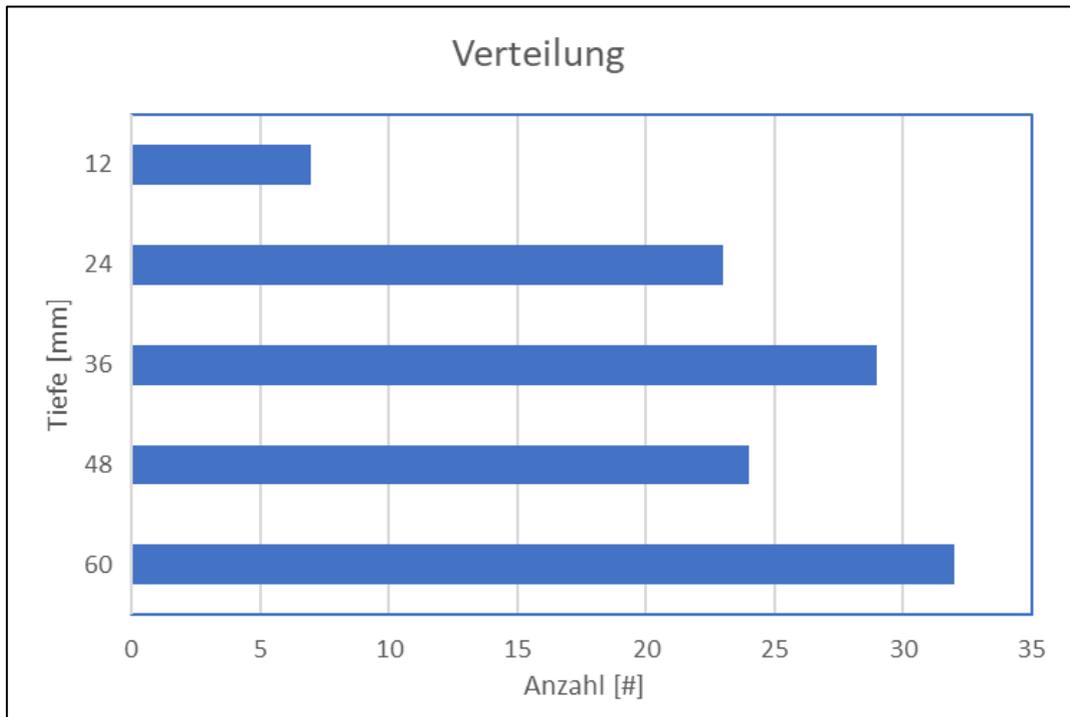


Abb. 46 statistische Verteilung grosser Körner, bestimmt an einem Probekörper für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2.

Trotz der Entmischung konnte bei der Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 kein signifikanter Unterschied zwischen der Prüfung an der oberen und an der unteren Stirnfläche festgestellt werden (Tab. 18). Möglicherweise resultierte dies aus der Tatsache, dass eine Untersuchung an sehr hartem Gussasphalt mit Eindringtiefen kleiner 0.5 mm durchgeführt wurde, wobei die Eigenschaften des Bitumens das Verhalten im Eindringversuch massgeblich beeinflussten.

Tab. 18 Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 an entmischtem Probekörper; einmal von oben und unten geprüft

20-06355-AA	Prüffläche unten			Prüffläche oben		
	PK 1	PK 2	Mittelwert	PK 1	PK 2	Mittelwert
	[mm]			[mm]		
Eindringtiefe nach 2500 Zyklen	0.54	0.41	0.48	0.48	0.37	0.43
Zunahme zwischen 2500 und 5000 Zyklen	0.14	0.10	0.12	0.14	0.10	0.12
Eindringtiefe nach 5000 Zyklen	0.68	0.51	0.60	0.62	0.47	0.55

**Abb. 47** Probekörper 2 Fläche unten (links) und Fläche oben (rechts) zeigen keine offensichtliche Entmischung.

Um sicherzustellen, dass die Entmischung nicht nur im Probekörper 3 signifikant war, der nicht getestet wurde, wurden beide mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 untersuchten Probekörper nochmals optisch untersucht. Bei Probekörper 1 war der Unterschied oben und unten nicht ganz eindeutig (Abb. 47). während Probekörper 2 eindeutig eine Entmischungserscheinung zeigt (Abb. 48).



Abb. 48 Probekörper 1 zeigt schon an den geschliffenen Flächen eine klare Entmischung. Linke Seite: Fläche unten, rechte Seite: Fläche oben.

Danach wurden die Proben geschnitten, um die Entmischung zu verifizieren. Die Software bestätigte ebenfalls, dass Probekörper 2 im Vergleich zu den Probekörpern 1 und 3 geringere Anzeichen von Entmischung aufwies, jedoch dennoch entmischt war.

7 Auswahl neue Prüfmethode

7.1 Variantenstudium

In der ersten Phase im Jahr 2020 wurden Untersuchungen zur Probekörpergeometrie und den Prüfbedingungen von Gussasphalten gemäss dem Forschungsantrag (siehe Kapitel 2.2) durchgeführt. Nach Abschluss dieser Untersuchungen sollte die optimale Methode ausgewählt werden. In den Jahren 2021 und 2022 wurden zusätzlich Gussasphalte anderer Hersteller untersucht, um eine umfassendere Produktübersicht zu erhalten, obwohl dies im ursprünglichen Antrag nicht vorgesehen war.

Das Ziel der neuen Methode besteht darin, die deklarierten Werte als Kontrollprüfung bestätigen zu können. Zu diesem Zweck wurden 13 Varianten festgelegt (siehe Abb. 49 und Abb. 50). Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden alle Probekörper auf eine Höhe von 60 mm zugeschnitten.

Die Prüfungen zur Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 wurden bei einer Wasserbadtemperatur von 55 °C und einer Auflast von 650 N durchgeführt. Diese Parameter wurden gewählt, da sie laut VSS Forschungsbericht Nr. 1382 [29] zu einer besseren Spreizung der Ergebnisse führen. Die genauen Einzelwerte sind im Anhang auf Seite 92 zu finden.

AP 4.1 / 4.3 Statische Eindringtiefe: Sensitivitätsanalyse, innovative Methoden												
Variante	Herstellort	Abkühldauer in h	Geometrie [mm]	Prüfhöhe [±1mm]	Schneiden	Prüfseite	Rondell	Stempelform	Herstelltemperatur in °C		Vorbelastung in min	behinderte Seitendehnung
									MA 11 H	MA 11 HP MA 8 H/HP		
1	Labor	24	CU 70 x 70	60	1 x	planer Würfelboden	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	ja
2	Labor	2	CU 70 x 70	60	1 x	planer Würfelboden	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	ja
3	Labor	24	CU 70 x 70	60	1 x	geschnittene Einbauseite	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	ja
4	Labor	24	CU 70 x 70	60	1 x	planer Würfelboden	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	nein
5	Labor	24	CY 70 x 90	60	1 x	Zylinderboden	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	ja
6	Labor	24	CY 70 x 90	60	1 x	Zylinderboden	nein	stumpf d = 25 mm	220	220	10	ja
7	Insitu	24	CY 70 x 90	60	1 x	Zylinderboden	nein	stumpf d = 25 mm	220	220	10	ja
8	Labor	24	CY 70 x 90	60	1 x	Zylinderboden	nein	d = 30 mm Kugel	235	220	10	ja
9	Labor	24	CY 150 x 65	60	1 x	Zylinderboden	nein	stumpf d = 25 mm	235	220	10	nein
10	Labor	24	CY 70 x 90	60	1 x	Zylinderboden	nein	d = 25 mm, Radius r = 5 mm	220	220	10	ja
11	Labor	24	CY 70 x 90	60	1 x	geschnittene Einbauseite	ja	stumpf d = 25 mm	220	220	10	ja
12	Labor	24	CY 70 x 90	60	2 x	geschnittene Einbauseite	nein	stumpf d = 25 mm	220	220	10	ja
13	Labor	24	CU 70 x 70	60	1 x	planer Würfelboden	nein	stumpf d = 25 mm	220	220	20	ja

Abb. 49 Definition der Prüfvarianten.



Abb. 50 Bilder zu den Prüfvarianten 1 bis 13.

In Abb. 50 und Tab. 19 sind die Resultate der Untersuchungen am Würfel zusammengefasst.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Das Entfernen der Prüfform (Variante 4) führt zu den grössten Eindringtiefen, da die Begrenzung der Seitenausdehnung entfällt. Die Prüfung auf einer geschnittenen Oberfläche (Variante 3) resultiert in höheren Eindringtiefen und grösserer Streuung im Vergleich zu ungeschnittenen Flächen (Abb. 51).

Anmerkung: Würfel stellen eine ungünstige Prüfgeometrie dar. Der Gussasphalt wird zweilagig eingebaut und muss in Ecken eingestampft werden. Die Nachspannform wird vor der Konditionierung im Wasserbad ohne definiertes Drehmoment fest angezogen. Der Gussasphalt passt sich Nachspannform an, durch die aufgebrachte Spannung und der Temperatur von 55 °C, so dass sich nach 1 h Konditionierungsdauer im Wasserbad die Schrauben der Nachspannform lockern. Nach einer Stunde wird der Würfel gedreht, sodass der Boden des Probekörpers freisteht, und gleichzeitig werden die Schrauben erneut ohne definiertes Drehmoment fest angezogen. Dadurch kann eine Vorspannung aufgebracht werden. Aufgrund unterschiedlicher Handhabungen in den Prüflaboren können zwangsläufig verschiedene Eindringtiefen auftreten. Um dieses Problem zu lösen, haben wir sichergestellt, dass die Schrauben stets mit einem Drehmoment von 4 Nm angezogen wurden (Abb. 52).

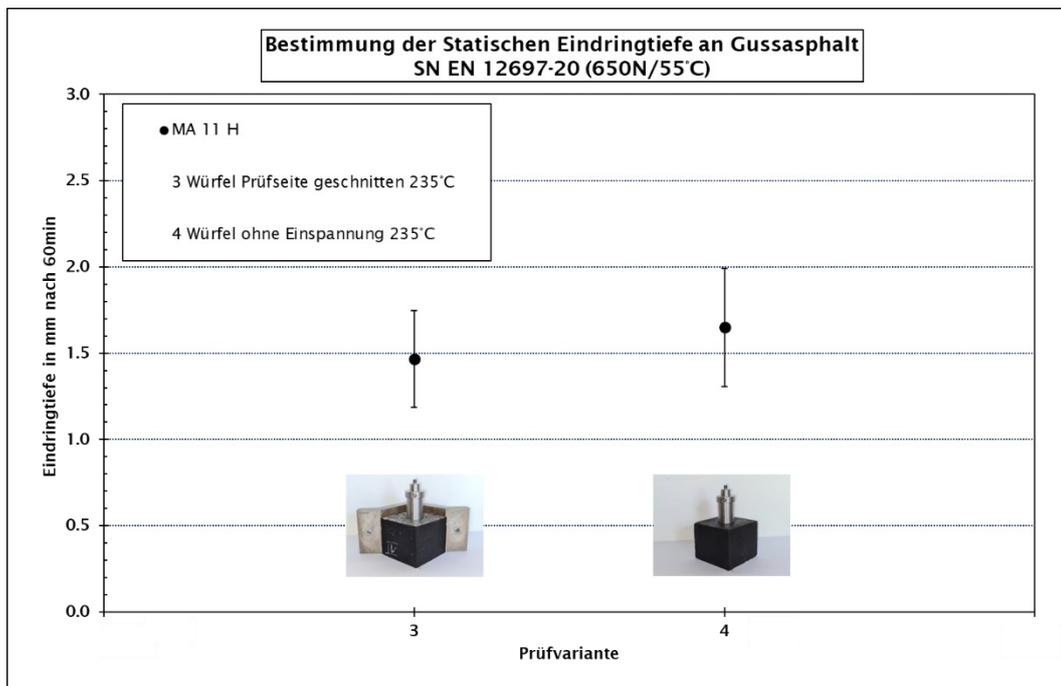


Abb. 51 Resultate der Untersuchungen am Würfel.

Tab. 19 Übersicht Prüfbedingungen und Prüfergebnisse Abb. 51

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
3	10	1.47	0.28	19.2	6.1	0.77
4	10	1.65	0.34	20.8	6.6	0.98

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm \pm 0.5mm geschnitten.



Abb. 52 Schneidhilfe für Würfel und Zylinder; Schraubenanzug mit Drehmomentschlüssel.

Abb. 53, Tab. 20 und Tab. 21 fassen die Resultate der Untersuchungen zum Temperatureinfluss zusammen.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Die Eindringtiefe ist invers proportional zur Herstelltemperatur der Proben – je höher die Herstelltemperatur, desto geringer die Eindringtiefe. Varianten 5 und 6 wurden im Labor hergestellt. Gussasphalt, der im Labor wiedererwärmt wird, verhält sich viskoser als frischer Gussasphalt auf der Baustelle. Es wurde beobachtet, dass ein wiedererwärmter MA 8 N B 35/50 sich in der Probenschale vollständig entmischen kann, wodurch sich das leichtere Bitumen vollständig an der Oberfläche absetzt. Daher muss die Probe im Labor regelmässig durchmischt werden, um eine Entmischung zu verhindern, ähnlich wie bei frischem Gussasphalt im Kocher.

Ein wiedererwärmter Gussasphalt mit dem Bindemittelersatz Trinidad fühlte sich bei gleicher Herstelltemperatur eher trocken und rieselfähig an, wodurch er beim Einbau in die Zylinder manuell mit Kanthölzern verdichtet werden musste, da er nicht mehr selbstverdichtend war. Diese Beobachtungen stützen grosse Schwankungen in den Ergebnissen aus Ringversuchen an Laborproben.

Variante 7 (In-situ) zeigt den kleinsten normierten Variationskoeffizienten v^* . Kleine Streuungen an In-situ Proben sind bereits aus anderen Ringversuchen bekannt. Aus Sicht der Forschungsstelle sollten zukünftig In-situ-Proben geprüft werden und keine im Labor hergestellten Proben.

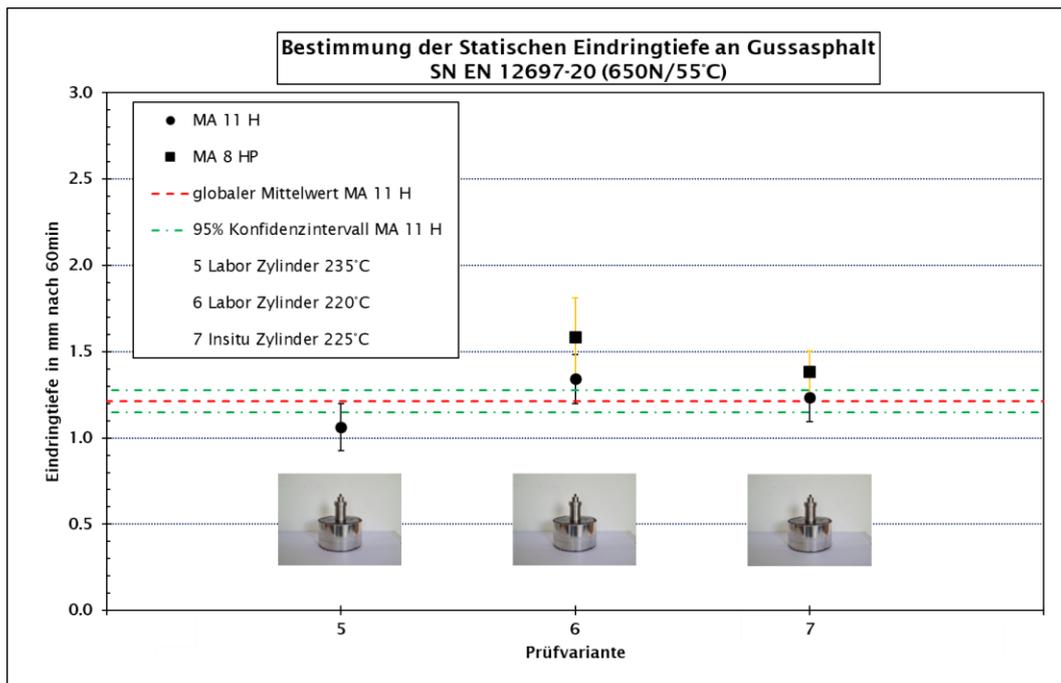


Abb. 53 Temperatureinfluss Herstellung.

Tab. 20 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 53

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
1.21 mm	0.15 mm	32	2.042	5 %	95 %	1.15 mm – 1.28 mm

Tab. 21 Dokumentation Statistik Abb. 53

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
5 MA 11 H	10	1.06	0.14	12.9	4.1	0.40
6 MA 11 H	10	1.34	0.14	10.7	3.4	0.51
6 MA 8 HP	6	1.58	0.23	14.4	5.9	0.61
7 MA 11 H	12	1.23	0.14	11.2	3.2	0.44
7 MA 8 HP	6	1.38	0.12	8.8	3.6	0.37

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5mm geschnitten.

Abb. 54 und Tab. 22 zeigen die Resultate der Untersuchungen an den Varianten 8, 9 und 13.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Variante 8 zeigt die grössten Eindringtiefen. Bei weichen Proben würde Variante 8 sehr hohe Eindringtiefen erzeugen. Variante 9, ebenso wie jeder nicht eingespannter Probekörper, ist weniger kontrolliert zu prüfen, das Streumass nimmt zu. Aus diesem Grund wurden diese Varianten nicht weiterverfolgt. Eine Vorbelastungsdauer von 20 min (Variante 13) hatte zum Ziel, die Streuung zu verkleinern. Variante 13 wurde ebenfalls verworfen. Letztendlich resultieren daraus kleinere Eindringtiefen, da nach Vorbelastung der Weg (Eindringtiefe) genullt wird. Eine Vorbelastung von 10 min ist ausreichend, um einen guten Kraftschluss zwischen Stempel und Probenoberfläche zu erzeugen und kleinere Oberflächenunebenheiten auszugleichen.

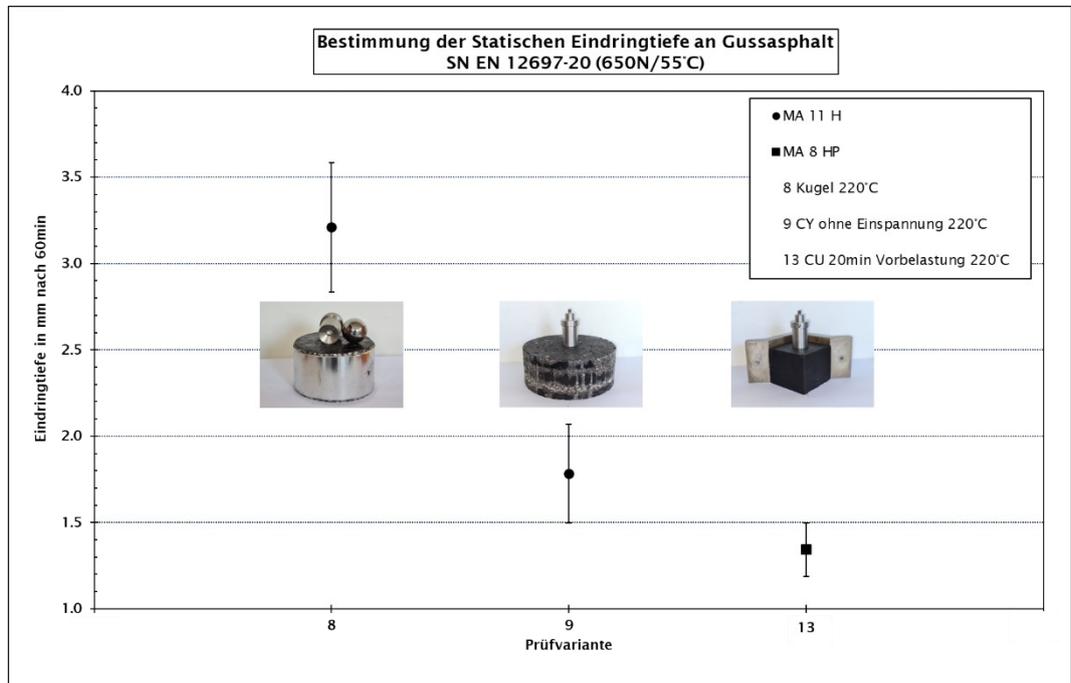


Abb. 54 Variantenstudium für grössere Eindringtiefen.

Tab. 22 Dokumentation Statistik Abb. 54

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
8 MA 11 H	9	3.21	0.37	11.6	3.9	0.93
9 MA 11 H	8	1.78	0.29	16.0	5.7	0.76
13 MA 8 HP	6	1.34	0.16	11.5	4.7	0.40

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm \pm 0.5mm geschnitten.

Abb. 55, Tab. 24 und Tab. 33 fassen die Resultate der Untersuchungen an drei favorisierten Varianten zusammen.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Variante 10 erzeugt aufgrund effektiver kleinerer Stempelfläche und gerundeten Kanten höhere Eindringtiefen. Das ist wünschenswert, um verschieden harte Gussasphalttypen unterscheiden zu können. Die Prüfung erfolgte an der Unterseite der Proben, basierend auf der Annahme, dass bei Belastung mit einem planen Prüfstempel die Umlagerung der Körner anders ist als bei einer geschnittenen Oberfläche. Aus der Forschungsarbeit «Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten» [29] ist bekannt, dass bei geschnittenen Oberflächen einzelne Körner zerbrechen, die nur teilweise vom Stempel bedeckt waren. Dass die Prüfseite weniger wichtig ist, wird in Kapitel 7.4 gezeigt.

Aufgrund der grösseren Eindringtiefen und des kleinen Streumasses wurde für weiterführende Untersuchungen Variante 10 favorisiert.

Varianten 11 und 12 können als gleichwertig betrachtet werden. Bei Variante 11 ist der geringste Aufwand im Labor notwendig. Die Oberseite des gefüllten Zylinders wird abgetrennt, so dass sich eine Höhe von rund 50 mm ergibt. Dazu ist nur ein Schnitt mit der Steinsäge notwendig. Als nachteilig zu nennen ist die eher schlechte Kontrolle der Probenhöhe und die Verwendung eines Rondells. Das Rondell muss einen kraftschlüssigen Kontakt mit dem Zylinderboden garantieren. Der Zylinderboden darf nicht verformt sein und darf keine Bitumenrückstände an der Unterseite des Zylinderbodens haben, was bei Baustellenproben durchaus passieren kann.

Die mittleren Unterschiede in den Eindringtiefen zwischen Variante 11 und 12 sind im Wesentlichen auf den fehlenden kraftschlüssigen Verbund zwischen Zylinderboden und Rondell (Variante 11) zurückzuführen.

Anmerkungen zu Variante 11: Es wird empfohlen, dass nach der Entnahme des Gussasphalts aus dem Kocher die Zylinder auf Rondellen abkühlen und später im Labor auf diesen Rondellen im Wasserbad konditioniert werden sollten. Dies gewährleistet den notwendigen Kraftschluss und reduziert Messunsicherheiten. Auf diese Weise kann sich der Gussasphalt bei Wärme seiner Zylinderform (aufgrund des viskoelastischen Verhaltens) anpassen.

Anmerkungen zu Variante 12: Zur Herstellung eines Probekörpers aus einem Zylinder sind zwei Schnitte mit einer Steinsäge erforderlich. Die Ränder der Auflagefläche wurden mit einer Feile bearbeitet oder mit einem Schleifstein geschliffen, um eine Abstützung auf dem Zylinderrand zu verhindern. Die Unterlage muss eben sein. Es wird nicht empfohlen, den unteren Zylinderrand auf eine Höhe von 1 cm zu entfernen, um eine Abstützung auf dem Zylinderrand zu verhindern, da nicht eingespannter Gussasphalt zu unkontrollierten Verformungen führen kann. Variante 12 erscheint aus Sicht des Labors für eine allgemeingültige Prüfmethode praktikabler als Variante 11, da sie weniger Unsicherheiten bei der Prüfung beinhaltet.

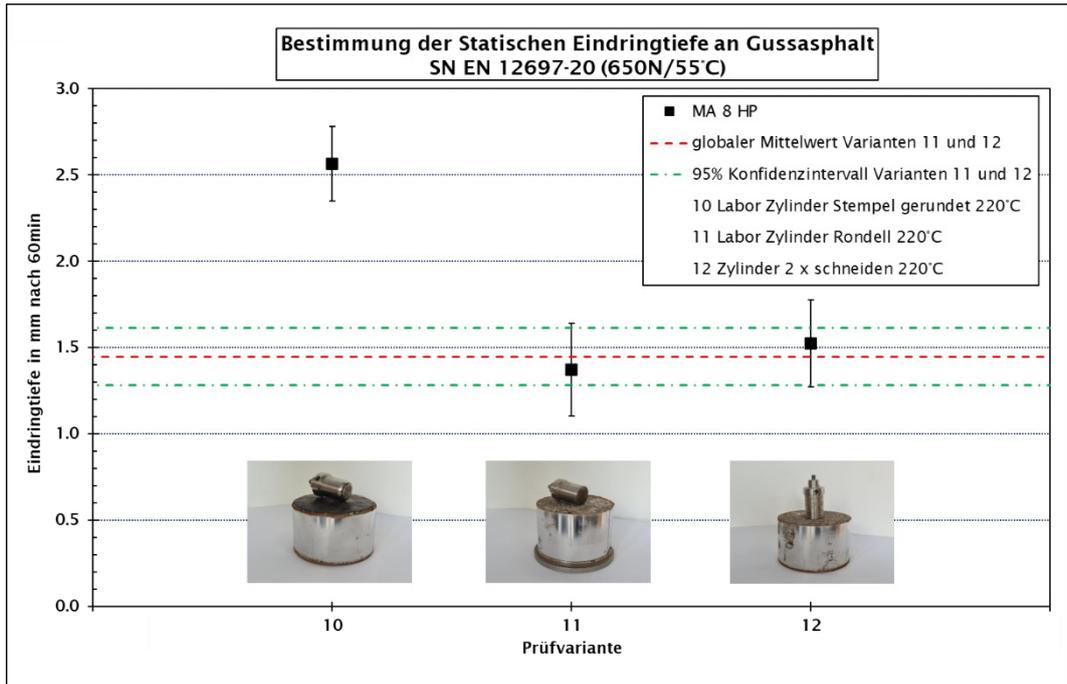


Abb. 55 Untersuchung favorisierter Varianten.

Tab. 23 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 55

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
1.45 mm	0.26 mm	12	2.201	5 %	95 %	1.28 mm – 1.61 mm

Tab. 24 Dokumentation Statistik Abb. 55

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
10 MA 8 HP	6	2.57	0.22	8.4	3.4	0.58
11 MA 8 HP	6	1.37	0.27	19.6	8.0	0.66
12 MA 8 HP	6	1.53	0.25	16.6	6.8	0.70

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5mm geschnitten.

Abb. 56, Tab. 25 und Tab. 26 zeigen die Resultate der Untersuchungen mit der favorisierten Variante 10 an drei verschiedenen Gussasphalten.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

In diesem Fall sind im Mittel mit Variante 10 keine Unterschiede zwischen den Gussasphaltpfentypen und -sorten festzustellen.

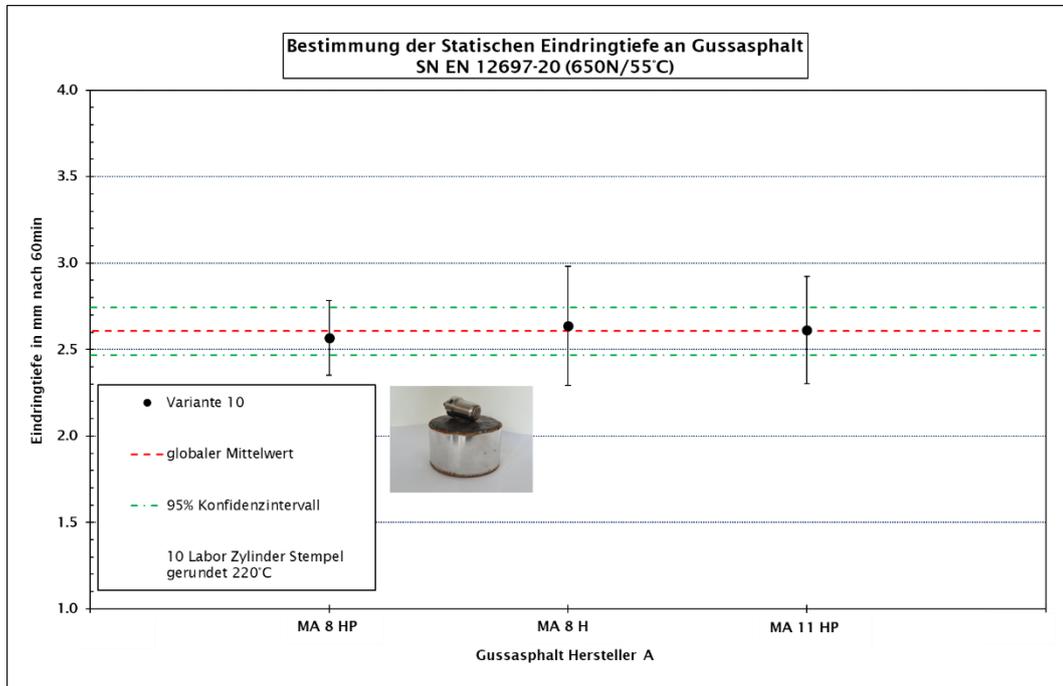


Abb. 56 Detailuntersuchung Variante 10.

Tab. 25 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 56

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
2.61 mm	0.28 mm	18	2.110	5 %	95 %	2.47 mm – 2.74 mm

Tab. 26 Dokumentation Statistik Abb. 56

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
10 MA 8 HP	6	2.57	0.22	8.4	3.4	0.58
10 MA 8 HP	6	2.64	0.34	13.1	5.3	0.86
10 MA 11 HP	6	2.61	0.31	11.9	4.8	0.69

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5mm geschnitten.

Abb. 57, Tab. 27 und Tab. 28 zeigen die Resultate der Untersuchungen mit der favorisierten Variante 12 an vier verschiedenen Gussasphalten.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

In diesem Fall sind im Mittel mit Variante 11 für die Sorte MA 11 keine Unterschiede festzustellen, beide Mittelwerte (MA 11 HP und MA 11 H) liegen innerhalb des Vertrauensintervalls. Wir führen die Unterschiede zu Variante 10 auf die geschnittenen Oberflächen zurück (siehe Tab. 19 Untersuchungen am Würfel). Für innerbetriebliche Qualitätskontrollen könnte diese Variante 11 geeignet sein, Typen und Sorten zu unterscheiden. Die Produktstreuung über den Produktionszyklus ist hier nicht berücksichtigt. Es ist eine Stichprobe. Insgesamt sind die Unterschiede sehr klein. Statistisch gesehen zeigen überlappende Standardabweichungen keine Unterschiede zwischen MA 11 HP, MA 11 H und MA 8 HP. MA 8 HP überlappt mit MA 8 H.

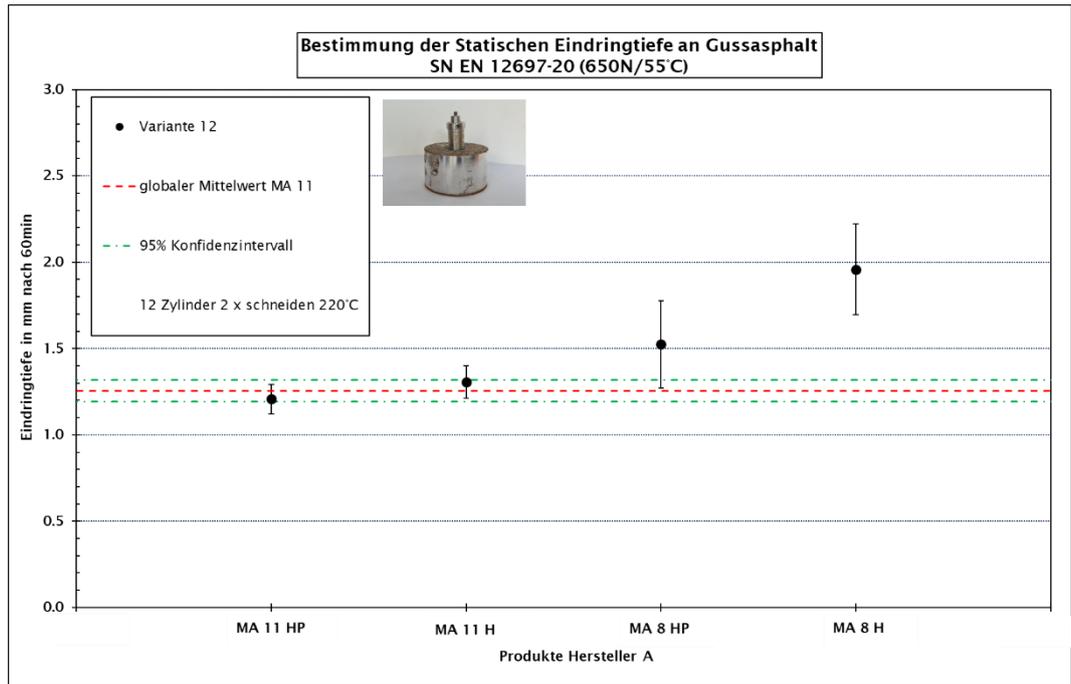


Abb. 57 Detailuntersuchung Variante 12.

Tab. 27 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 57

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
1.26 mm	0.10 mm	12	2.201	5 %	95 %	1.19 mm – 1.32 mm

Tab. 28 Dokumentation Statistik Abb. 57

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
12 MA 11 HP	6	1.21	0.08	6.9	2.8	0.26
12 MA 11 H	6	1.31	0.09	7.1	2.9	0.25
12 MA 8 HP	6	1.53	0.25	16.6	6.8	0.70
12 MA 8 H	8	1.96	0.26	13.4	4.7	0.83

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5mm geschnitten.

7.2 Untersuchungen mit der favorisierten Variante

Aufbauend auf den Resultaten mit der favorisierten Variante 10 gerundeter Stempel wurden 2021 weitere Untersuchungen zur Geometrie durchgeführt. Dazu wurden kleinere Zylinderdosen mit Innendurchmesser $d = 84 \text{ mm}$ (anstelle von $d = 100 \text{ mm}$) organisiert. Ziel ist es die Gussasphalttypen hinsichtlich Eindringtiefe unterscheiden zu können in Typen und / oder Sorten bei möglichst kleinem Streumass. Einzelwerte zu den Untersuchungen 2021 siehe Anhang.

Abb. 58, Tab. 29 und Tab. 30 zeigen die Resultate der Untersuchungen zur Geometrie und Prüfzeitpunkt.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Die Geometrie beeinflusst die Eindringtiefe. Prüflinge mit kleinerem Volumen zeigen kleinere Eindringtiefen. Das ist bereits aus Ringversuchen bekannt bei Vergleichen zwischen Würfeln und Zylindern. Das Verhältnis Oberfläche und Prüffläche Stempel scheint sich günstig auf das Streumass auszuwirken. Das sollte in der Bewertung für eine neue Prüfmethode berücksichtigt werden. Einjährige Proben zeigen kleinere Eindringtiefen als frisch hergestellte Proben. Das ist auf chemische aushärtende Prozesse im Gussasphalt (Verbund aus Gestein, Bitumen, Kalkfiller, Filler, Wachs, Naturasphalt, ...) über die Zeit zurückzuführen und weniger auf eine Bitumenalterung. Einjährige Laborproben und Insituproben zeigen im Mittel gleiche Eindringtiefen. Die Wiedererwärmung im Labor (Ofen) zeigt statistisch gesehen keinen Effekt.

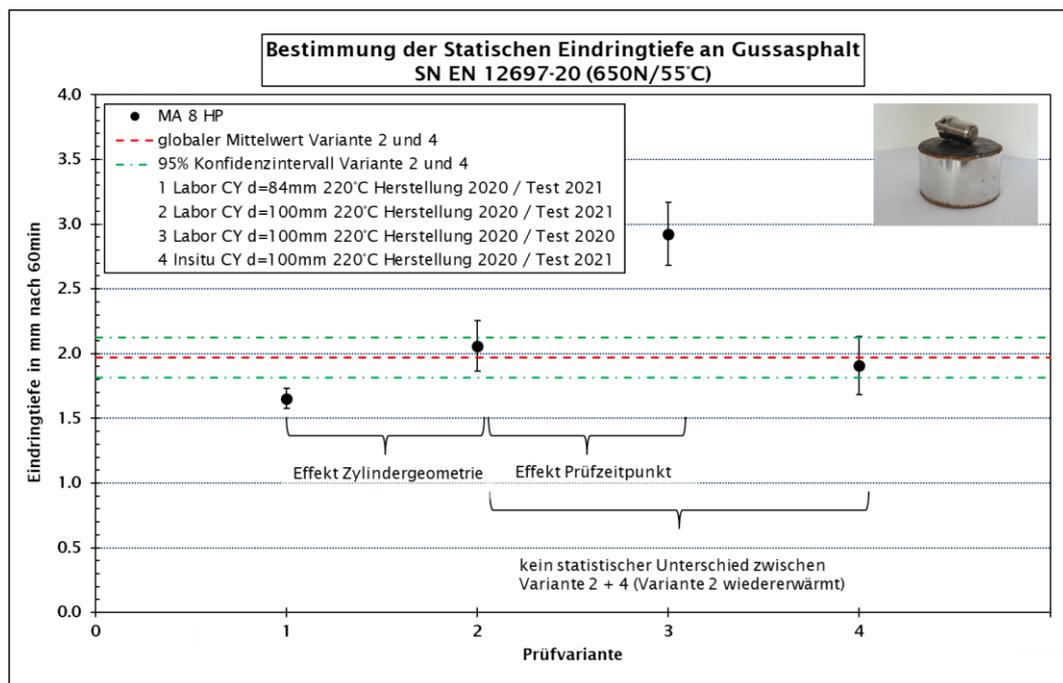


Abb. 58 Untersuchungen zur Geometrie und Prüfzeitpunkt.

Tab. 29 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 58

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
1.97 mm	0.22 mm	10	2.262	5 %	95 %	1.82 mm – 2.12 mm

Tab. 30 Dokumentation Statistik Abb. 58

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
1	6	1.65	0.08	4.7	1.9	0.21
2	4	2.06	0.20	9.5	4.8	0.43
3	6	2.93	0.24	8.3	3.4	0.66
4	6	1.91	0.22	11.7	4.8	0.61

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5mm geschnitten.

Abb. 59 und Tab. 31 fassen die Resultate der Untersuchungen zur Zylindergeometrie mit d=84 mm zusammen.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Mit der Zylindergeometrie d = 84 mm sind die Gussasphalttypen im Mittel innerhalb jeder Sorte gut zu unterscheiden bei kleinem Streumass. Zwischen den Sorten (MA 8 HP und MA 11 N) ist eine Unterscheidung im Mittel weniger einfach.

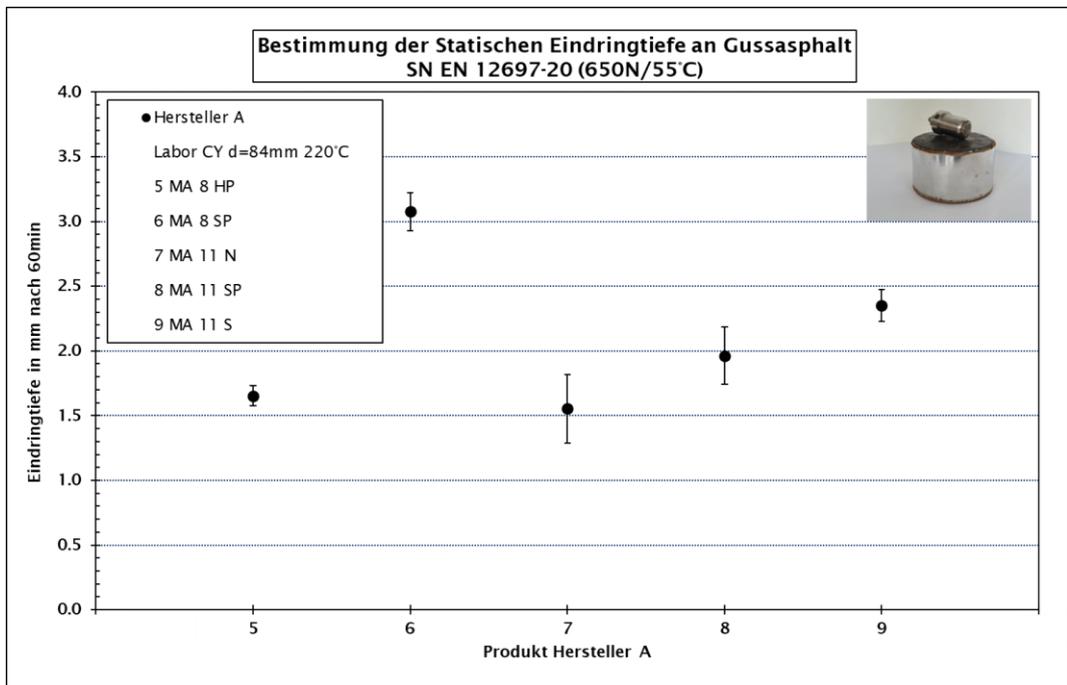


Abb. 59 Untersuchungen zur Zylindergeometrie d = 84 mm.

Tab. 31 Dokumentation Statistik Abb. 59

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
5 MA 8 HP	6	1.65	0.08	4.7	1.9	0.21
6 MA 8 SP	5	3.08	0.15	4.7	2.1	0.30
7 MA 11 N	4	1.55	0.26	16.9	8.4	0.61
8 MA 11 SP	5	1.96	0.22	11.3	5.0	0.51
9 MA 11 S	5	2.35	0.12	5.2	2.3	0.30

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm ± 0.5 mm geschnitten.

In der Abb. 60 und in Tab. 32 sind die Resultate an untersuchten Produkten vom Hersteller A zusammengefasst. Diese Produkte sind mit mehreren Prüfvarianten untersucht worden, so dass ein Trend im Materialverhaltens festzustellen ist.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Beim Vergleich der Prüfvarianten mit planem Stempel (Variante 1 und 12) ist ein ähnlicher Trend in den Eindringtiefen festzustellen, d. h. der MA 11 HP zeigt jeweils die kleinsten Eindringtiefen bei Prüfung mit Variante 1 und 12. Der MA 8 H zeigt jeweils die grössten Eindringtiefen. Unter Einbezug der Standardabweichung (und Annahme einer Produktstreuung über die Zeit) sind die H-Typen innerhalb und zwischen den Sorten MA 8 und MA 11 nicht zu unterscheiden. Bei Prüfung mit Variante 10 (gerundeter Stempel) sind im Mittel keine Unterschiede zu erkennen. Der Effekt des gerundeten Stempels ist erkennbar in den grössten Eindringtiefe zwischen den drei Varianten.

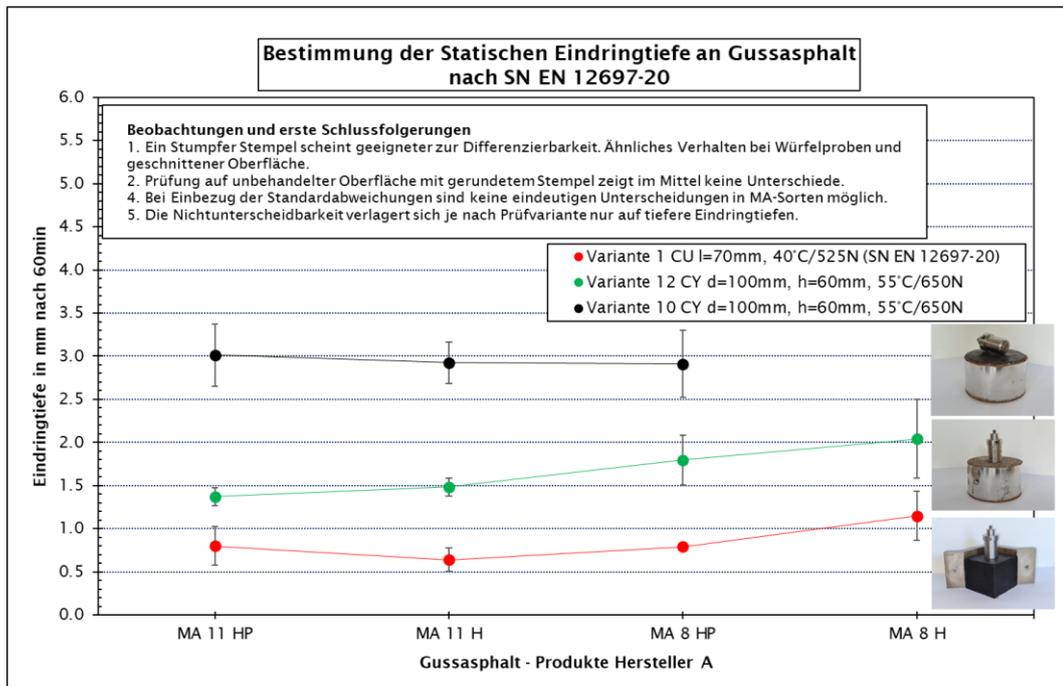


Abb. 60 vergleichende Untersuchungen an Produkten Hersteller A.

Tab. 32 Dokumentation Statistik Abb. 60

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
Diese Tabelle verläuft über zwei Seiten.						
1 CU l=70mm 40 °C/525N MA 11 HP	10	0.80	0.226	28.2	8.9	0.64
1 CU l=70mm 40 °C/525N MA 11 H	4	0.64	0.136	21.3	10.7	0.33
1 CU l=70mm 40 °C/525N MA 8 HP	4	0.79	0.032	4.0	2.0	0.07
12 CY d=100mm, h=60mm, MA 11 HP	6	1.37	0.104	7.6	3.1	0.29
12 CY d=100mm, h=60mm, MA 11 H	6	1.48	0.106	7.2	2.9	0.30
12 CY d=100mm, h=60mm, MA 8 HP	6	1.8	0.285	15.9	6.5	0.79

Tab. 32 Dokumentation Statistik Abb. 60

Variante ¹	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
12 CY d=100mm, h=60mm, MA 8 H	8	2.04	0.459	22.5	8.0	1.39
10 CY d=100mm, h=60mm, MA 11 HP	6	3.01	0.359	11.9	4.9	0.80
10 CY d=100mm, h=60mm, MA 8 HP	6	2.93	0.242	8.3	3.4	0.66
10 CY d=100mm, h=60mm, MA 8 H	6	2.91	0.389	13.4	5.5	1.00

¹ Die Probekörper wurden mittels Schneidhilfe möglichst rechtwinklig zum Sägeblatt auf eine Höhe von 60 mm \pm 0.5 mm geschnitten.

7.3 Untersuchungen zur Produktvariation 2022

Für ein umfassenderes Bild wurden im Jahr 2022 weiche und harte Gussasphalttypen von einem weiteren Hersteller (Hersteller B) beschafft, um auch die Produktvariation zwischen den Produzenten zu berücksichtigen. Wenn möglich wurden gleiche Produkte von verschiedenen Baustellen berücksichtigt, um die Produktvariabilität abzubilden. Diese Versuche wurden mit der Variante 10 (gerundeter Stempel) durchgeführt.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Untersucht wurden 16 Gussasphaltprodukte des Herstellers B. Die Produkte in Abb. 61 sind nach Gussasphalttyp (H, S, N) und aufsteigend nach Höhe der Eindringtiefe sortiert. Es ist festzustellen: Innerhalb der Typen sind die Produkte anhand des Mittelwertes zu unterscheiden. Bei Hinzunahme der Standardabweichung zeigt sich, dass sich die Eindringtiefen überlappen. Das bedeutet, die Produkte sind nicht eindeutig zu unterscheiden. Die grosse Streuung könnte auf ein Qualitätsproblem hinweisen. Wiederholungen brachten jedoch keine Verbesserung und die Lieferscheine waren eindeutig beschriftet.

Der MA 8 T SP verhielt sich auffällig bei der Probekörperherstellung. Ein «Fliesen» in den Zylinder wie bei anderen Produkten war nicht immer zu beobachten. Bei 220°C machte er einen eher «trockenen» Eindruck. Das lose Mischgut verhielt sich teilweise «rieselfähig» wie Reis. Der Gussasphalt musste teilweise manuell in die Zylinder eingestampft werden. Die Schwierigkeit bei der Probenherstellung kann eine Ursache für die streuenden Resultate sein. Der MA 8 TSP und MA 11 SP sind auf Anfrage beim Hersteller keine deklarierten Produkte. Bei Unterteilung in Sorten ergibt sich ein ähnliches Bild (Abb. 62).

Während der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Produkte des Herstellers B verglichen mit den Produkten des Hersteller A weicher sind, das heisst grössere Eindringtiefen aufweisen.

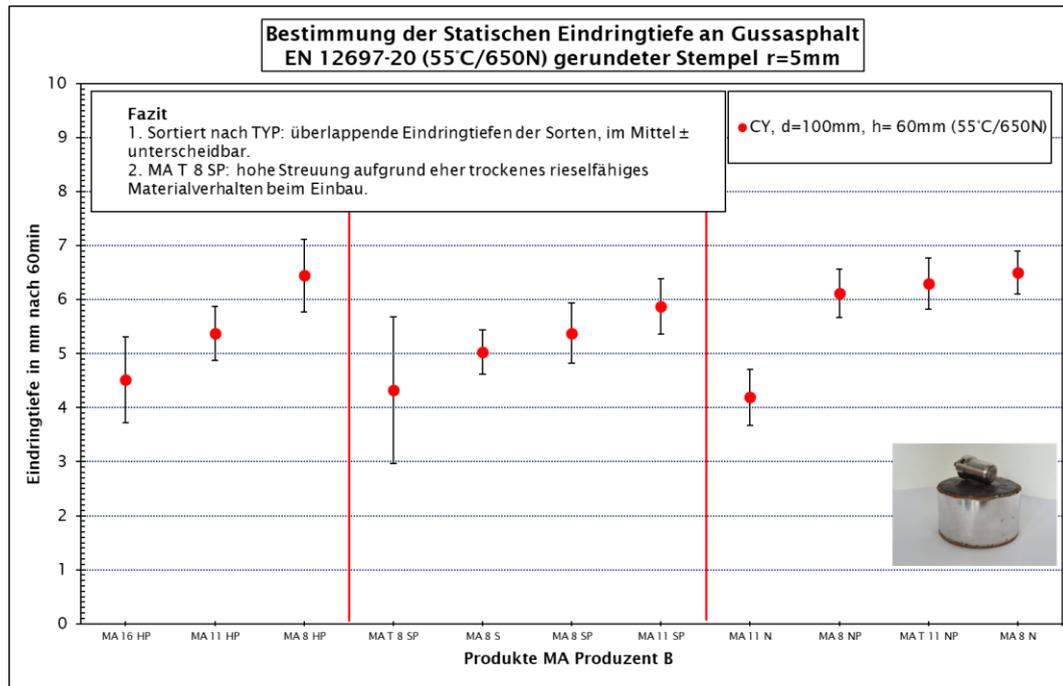


Abb. 61 Prüfergebnisse an Produkten vom Hersteller B sortiert nach Typ.

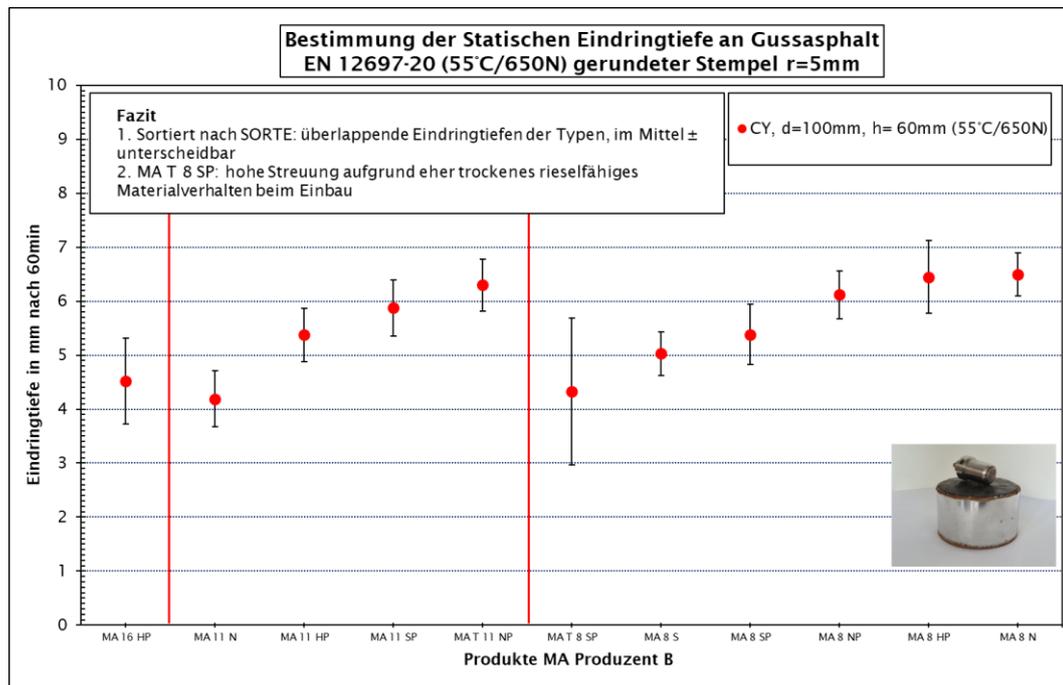


Abb. 62 Prüfergebnisse an Produkten vom Hersteller B sortiert nach Sorte.

7.4 Oberflächenbehandlung und Präzision

In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Oberflächenbehandlung (Schneiden / Schleifen / Unbehandelt) der Probekörper auf das Resultat auswirkt.

Die Versuche wurden an einem Restbestand MA 8 HP durchgeführt, der zum Prüfzeitpunkt im Jahr 2022 ca. 1 Jahr alt war. In diesem Fall ist für obige Fragestellung aus Sicht der Forschungsstelle das Probenalter weniger relevant. Die Proben wurden mit dem gerundeten Stempel geprüft.

Insgesamt wurden 13 zylindrische Proben hergestellt. (Abb. 63). Es wurden 5 Gruppen gebildet. Tab. 33 fasst für jede Gruppe (Variante) die Prüfbedingungen und Prüfergebnisse zusammen. Geprüft wurde in Anlehnung an SN EN 12697-20 [5] mit 55 °C Wasserbadtemperatur und 625 N Auflast. Die Variante mit Rondell (Variante 5) wurde hier ausschließlich zu Vergleichszwecken visualisiert. In der Analyse der Oberflächenbehandlung wurde diese Variante nicht berücksichtigt. Nach den Prüfungen wurden die Weissblechummantelung entfernt und die Geometrie bestimmt. Anhand der deklarierten Rohdichte Mischgut und des Bindemittelgehalts der Hohlraumgehalt berechnet.



Abb. 63 Probekörper für Fragestellung Oberflächenbehandlung.

Tab. 33 Zusammenfassung der Prüfbedingungen und Mittelwerte Abb. 63

Variante	n	μ	σ	Schleifen ¹	Prüfseite	Rondell
1	3	4.47	0.30	nein	Einbauseite	nein
2	3	4.36	0.13	Einbauseite	Einbauseite	nein
3	3	4.42	0.16	Unterseite	Unterseite	nein
4	2	4.35	0.22	nein	Unterseite	nein
5	2	5.14	0.37	nein	Einbauseite	ja

¹ Die Probekörper der Varianten 1 bis 3 wurden zuerst beidseitig mit einer Betonsäge geschnitten. Anschließend auf ca. 60 mm Höhe geschliffen. Bei den Varianten 4 und 5 wurde mit der Betonsäge einseitig so geschnitten, dass sich eine Höhe von ca. 60 mm ergab.

Die detaillierte Probengeometrie und Einzelwerte der Eindringtiefen sind in Abb. 64 zusammengefasst.

Oberflächenbehandlung													
Produkt:	MA 8 HP (PmB 25/55-65 (CHE) Baustelle Yverdon, Probennahme 2021)												
Probenherst. / Test	11.10.2022 / 14.10.2022 bis 16.11.2022												
Prüfvariante	1			2			3			4		5	
	2 x schneiden Stempel Einbauseite			2 x schneiden, oben schleifen Stempel Einbauseite			2 x schneiden, unten schleifen Stempel Unterseite			oben schneiden, Stempel Unterseite		Oben schneiden, Rondell, Stempel Oberseite	
Nr. Probekörper	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	13	10	11
Masse trocken in g	1071.2	1080.3	1096.3	1087.9	1085.6	1086.6	1087.8	1083.7	1087.9	1082.2	1071.5	1044.4	1064.4
ET30 in mm	4.28	3.81	4.01	3.78	3.95	4.04	4.10	3.79	4.03	3.77	4.06	4.83	4.37
ET60 in mm	4.79	4.19	4.44	4.23	4.32	4.49	4.56	4.25	4.46	4.19	4.50	5.40	4.87
Höhe in mm	59.0	60.0	60.8	60.3	59.9	60.1	60.2	60.1	60.3	59.4	58.4	58.3	59.8
d in mm	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8
rho_bssd in g/cm ³	2.371	2.361	2.368	2.364	2.375	2.372	2.370	2.369	2.371	2.369	2.375	2.370	2.370
Rohdichte Mischgut berechnet in g/cm ³	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411	2.411
Hohlraum VA bssd in %	1.6	2.1	1.8	2.0	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.5	1.7	1.7

Abb. 64 Probengeometrie und Eindringtiefen MA 8 HP.

Beobachtung und erste Schlussfolgerung:

Die Abb. 65, Tab. 34 und Tab. 35 fassen die Resultate zusammen. Vier von fünf Prüfvarianten liegen mit ihrem Mittelwert innerhalb des 95 % Vertrauensbandes. Das bedeutet, die Prüfbedingungen der Varianten 1 bis 4 zeigen im Mittel keine Auswirkung auf die Eindringtiefe. Der Mittelwert von Prüfvariante fünf (Rondell) liegt ausserhalb des Vertrauensbandes. Die Erfahrung mit dieser Prüfvariante fünf zeigt jedoch, dass etwa ähnliche Eindringtiefen erwartet werden (Abb. 55). Die Ursache für Eindringtiefen bei rund 5 mm liegt in diesem Fall der Verwendung von unpassenden Rondellen. Diese Erfahrung zeigt eine gewisse Unsicherheit bei der Verwendung von zusätzlichen Hilfsmitteln. In Diskussion mit einem Experten wurde angemerkt, dass diese Prüfvariante gut beherrschbar ist [46]. In Unternehmungen wurde mit ähnlicher Methode gute Erfahrungen gemacht. Die Forschungspartner haben diese Variante jedoch nicht weiterverfolgt, da eine zukünftige allgemeingültige Methode möglichst einfach und robust sein sollte. Tab. 34 dokumentiert die Details zur Berechnung des Vertrauensintervalls.

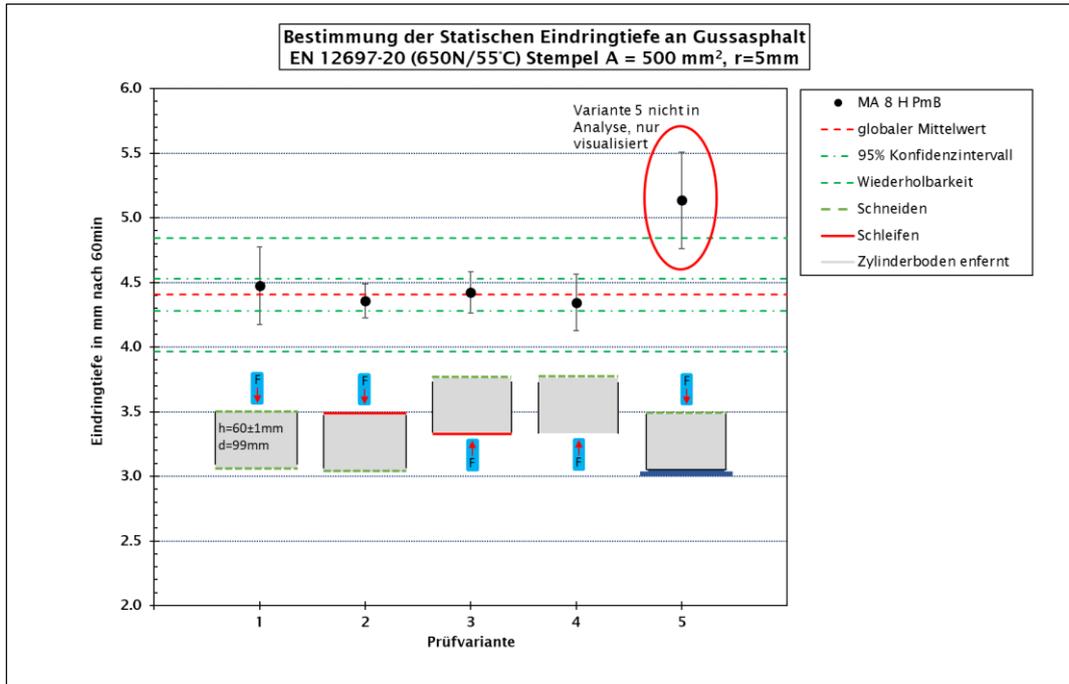


Abb. 65 Bestimmung der Präzision für jede Prüfvariante.

Tab. 34 Dokumentation Vertrauensintervall Abb. 65

μ	σ	n	t-Wert	α	Vertrauensbereich	Grenzen des KI
4.40 mm	0.19 mm	11	2.228	5 %	95 %	4.28 mm - 4.53 mm

Tab. 35 Dokumentation Statistik Abb. 65

Variante	n	μ	σ	v	v*	Spannweite
1	3	4.47	0.30	6.7	3.9	0.60
2	3	4.36	0.13	3.0	1.7	0.26
3	3	4.42	0.16	3.6	2.1	0.31
4	2	4.35	0.22	5.0	3.6	0.31
5	2	5.14	0.37	7.3	5.2	0.53

Fazit Oberflächenbehandlung

Ausgehend vom Mittelwert der Varianten 1 bis 5 beträgt die zulässige Spannweite für Einzelwerte gemäss [11] 0.90 mm (max. 20 % vom Mittelwert). Die bestimmte maximale Spannweite der Einzelwerte innerhalb der einzelnen Gruppen beträgt ≤ 0.60 mm. Alle 5 Varianten liegen innerhalb der zulässigen Spannweite.

Die Mittelwerte der Varianten 1 bis 4 liegen innerhalb einer Wiederholpräzision σ_r von ± 10 % (± 0.44 mm) des Mittelwertes, ausgehend vom Mittelwert mit 4.40 mm.

Die kleinsten Standardabweichungen zeigen die Prüfvarianten zwei und drei. Es ist festzustellen, dass Planparallelität die Präzision erhöht. Schlussfolgerung: Für eine sehr kleine Standardabweichung ist Schleifen empfohlen.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen an einem kleinen Stichprobenumfang pro Variante durchgeführt wurden.

Die Evaluierung einer geeignetsten allgemeingültigen Variante erfolgte anhand der gemachten Erfahrungen bei der Probenherstellung und Präzision der Resultate (Tab. 36).

Tab. 36 Bewertung zur Eignung favorisierter Prüfvarianten

Variante	Probenvorbereitung im Labor	Bewertung
1	Entfernen von Ober- und Unterseite mit Säge (und Hilfsvorrichtung für paralleles Schneiden). Höhe des Probekörpers 50 ± 1 mm, hergestellt aus der Mitte des Probekörpers. Den Zylinderrand an der Unterseite zurückfeilen, so dass Lastabtrag ausschliesslich über Gussasphalt erfolgt. Einbauseite = Prüfseite	Einfach und schnell, Gefahr vom Verkanten, das heisst keine parallelen Oberflächen und daraus resultierend erhöhte Streuung. bei Prüfung auf geschnittener Oberfläche besteht die Gefahr des Kornbruchs durch Überschneiden von Prüffläche Stempel und Kornfläche. Das wiederum erhöht die Streuung, kann aber als Fehler akzeptiert werden.
2	Wie Variante 1, der Unterschied ist Schneiden UND Schleifen der Einbauseite = Prüfseite für Planparallelität.	Ein zusätzlicher Arbeitsschritt als bei Variante 1. Die Planparallelität verringert die Streuung. Ob Einbau- oder Unterseite = Prüfseite ist, hat keinen statistischen Effekt.
3	Wie Variante 1, der Unterschied ist Schneiden UND Schleifen der Unterseite = Prüfseite für Planparallelität.	Die Probenvorbereitung ist einfach, die Unsicherheiten klein. Die daraus resultierende Präzision ist ausreichend hoch für eine allgemeingültige Methode.
4	Das Entfernen der Oberseite mit Säge (und Hilfsvorrichtung für paralleles Schneiden). Zielhöhe 50 ± 1 mm. Entfernen des Zylinderbodens mit Dosenöffner. Zylinderrand an der Oberseite zurückfeilen, so dass Lastabtrag ausschliesslich über Gussasphalt erfolgt, Unterseite = Prüfseite.	Einfach und schnell, Gefahr von nicht parallelen Oberflächen und daraus resultierend erhöhte Streuung. Die Unterseite = Prüfseite ist unbehandelt und bedeckt von einem Bitumenfilm. Die Kornumlagerung bei Belastung entspricht der Würfelmethode. Die Oberfläche entspricht der Form des Zylinderbodens, oft leicht gewölbt zur Mitte. Die Höhe des Probekörpers ist gut bestimmbar (Mitte des Prüflings = Auflage Stempel). Als allgemeingültige Methode sind diese Bedingungen eher ungeeignet, da mit zu vielen Unsicherheiten behaftet, als betriebliche Methode jedoch geeignet.
5	Entfernen von Oberseite mit Säge (und Hilfsvorrichtung für paralleles Schneiden). Höhe 50 ± 1 mm, Aufsetzen des Zylinders auf ein Rondell für kraftschlüssigen Formschluss. Einbauseite = Prüfseite	Einfach und schnell, Gefahr von nicht parallelen Oberflächen und daraus resultierend erhöhte Streuung. Genauere Höhe des Probekörpers erst nach Entfernen des Dosenblechs messbar. Zylinderunterseite kann beschädigt / verformt sein. 100%iger Kraftschluss durch Rondelle nicht gewährleistet. Als allgemeingültige Methode sind diese Bedingungen eher ungeeignet, da mit zu vielen Unsicherheiten behaftet, als betriebliche Methode jedoch geeignet.

Hellgrün = geeignet als allgemeingültige Methode

Dunkelgrün = gut geeignet als allgemeingültige Methode

Orange = geeignet als betriebliche Methode, jedoch nicht für allgemeingültige Methode

Gelb = geeignet als betriebliche Methode, jedoch nicht für allgemeingültige Methode

7.5 Alternative Prüfmethoden

In dieser Arbeit wurden nur alternative Prüfvarianten vertieft, die auf der Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 beruhen. Die Begründung liegt in der Einfachheit der Prüfung und dem Erfahrungshintergrund mit den optimierten Prüfbedingungen und alternativen, zylindrischen Prüfformen.

8 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Dieses Projekt beinhaltete folgende, wesentliche Ziele:

- Definition einer einfachen und repräsentativen Methode zur Herstellung von Testproben vor Ort (Labor)
- Verkürzen der Prüfzeit bei der Statischen und Dynamischen Eindringtiefenprüfung
- Einfachheit der Testmethode
- Untersuchung möglicher Alternativen für die statische Eindringtiefe

Auf Grundlage der ermittelten Resultate und Erfahrungen im Rahmen des Projektes mit der Eindringtiefe nach SN EN 12697- 20 und der Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2, kann folgendes zusammenfasst werden:

- Das Projekt hat sich hauptsächlich auf die Anpassung von bestehenden Methoden fokussiert. Eine weitere / innovative einfache Prüfmethode für Gussasphalt wurde im Rahmen des Projektes nicht erfunden bzw. entwickelt.
- Eine Verkürzung der Konditionierungsdauer für Proben nach der Herstellung für die dynamische Eindringtiefe von 14 bis 42 Tagen auf 2 Tage wird die Prüfergebnisse nicht massgeblich beeinflussen.
- Der Versuch dynamische Eindringtiefe ist geeignet, um die mechanischen Eigenschaften harter Gussasphalte des Typs S und H zu prüfen.
- Eine Verkürzung der Konditionierungsdauer für Proben nach der Herstellung für die statische Eindringtiefe von 24 Stunden auf 2 Stunden ist machbar, ohne massgebliche Einfluss auf die Prüfergebnisse. Nach dem Abkühlen auf Umgebungstemperatur und dem Eingang der Proben im Labor sind sie bereit zur Weiterverarbeitung, sodass Ergebnisse noch am gleichen Tag oder am nächsten Tag vorliegen können.
- Eine verkürzte Prüfdauer bei der statischen Eindringtiefe von 60 Minuten auf 30 Minuten ist möglich, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse zu beeinträchtigen. Eine halbierte Prüfdauer erhöht die Effizienz der Tests im Labor.
- Aus Sicht der Forschungsstelle wird empfohlen, einen Stempel mit einer Stempelfläche von 500 mm² zu verwenden, obwohl positive Erfahrungen mit einem gerundeten Stempel gemacht wurden. Die meisten Labor sind standardmässig damit ausgerüstet.
- Die Temperatur hat den grössten Einfluss auf die Höhe der Eindringtiefen. Demzufolge werden die modifizierten Prüfbedingungen von 55 °C und 625 N Auflast zu höheren Eindringtiefen führen. Aus Sicht der Forschungsstelle wären 55 °C bei 525 N Auflast ausreichend für einen umfassenden Ansatz zur Prüfung aller MA-Typen. Trotzdem wird die höhere Auflast vorgeschlagen, denn einerseits ist ein allgemeiner Trend zu immer härterem Gussasphalt festzustellen. Das neue Prüfverfahren sollte alle Möglichkeiten ausschöpfen, um auch bei künftigen MA-Sorten eine repräsentative und genügend grosse Eindringtiefe zu messen. Zudem ist die Prüfung bei 55 °C teilweise schon auf dem Markt eingeführt. So schreibt beispielsweise das ASTRA bei gewissen Baustellen die Prüfung 55 °C/625 N aus. Auch Bauunternehmer verwenden zur internen Prüfung die Methode 55°/625 N an.
- Handelsübliche Zylinderdosen mit einem Durchmesser von 99 mm und 78 mm Höhe sind aus Sicht des Labors am besten geeignet, um daraus Prüfkörper mit einem Durchmesser von 99 mm und 50 mm Höhe herzustellen.
- Für die Zukunft wird die Verwendung zylindrischer In-situ-Proben zur Prüfung vorgeschlagen und auf im Labor hergestellte Würfelproben zu verzichten.

- Schulung oder Sensibilisierung des Baustellenpersonals für die Probenahme von zylindrischen Insituproben.
- Verwendung einer Transportbox für die Probenzylinder, um das Personal für die Qualität der Proben und den sicheren Transport zu sensibilisieren.
- Mit der statischen Eindringtiefe ist eine Unterscheidung zwischen verschiedenen MA-Typen oder MA-Sorten nur begrenzt möglich, da der Markt im Wesentlichen von harten Gussasphalttypen dominiert wird, die auch untersucht wurden. Das ist bereits bekannt.
- Die entwickelte Methodik (und Software) zur Entmischung eignet sich als zusätzliches Hilfsmittel zur Bewertung von Schäden, um eine mögliche Entmischung nachzuweisen.

Weiteres Vorgehen

Die modifizierte Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 (Abb. 66) sollte an mindestens zwei zylindrischen Baustellenproben mit einem Durchmesser von 100 mm erfolgen. Anschließend möglichst planparalleles Schneiden der Proben auf eine Höhe von 50 ± 1 mm und Abkanten der Blechränder. Mittiges Prüfen auf der geschnittenen Einbauseite mit stumpfem Stempel ($A = 5 \text{ cm}^2$) mit den Prüfbedingungen 55 °C Wasserbadtemperatur und 625 N Auflast. Das Prüfergebn wird nach 30 min bestimmt.

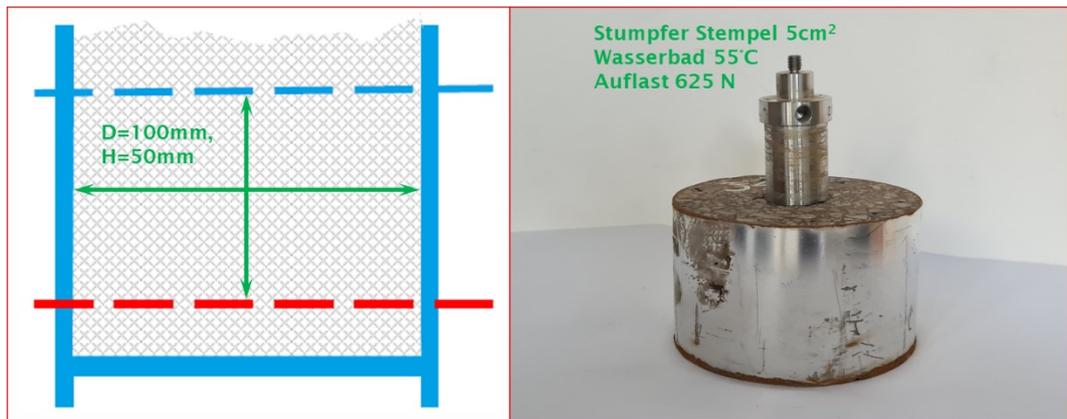


Abb. 66 modifizierte Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 (Quelle IMP).

Bezugsquelle für Zylinderdosen:

- Stebler Packaging AG, Brügglistrasse 4, 4208 Nunningen
- Artikel: Dose ZYL, 0.45L, D99X78MM, BLANK

Konkret unterstützen die Ergebnisse dieser Forschung den in der CEN TC217/WG1/TG2 von der IMAA eingebrachten Vorschlag zur Überarbeitung der EN 12697-20 (siehe Anhang). Diese Arbeit wird einen wesentlichen Beitrag zur Revision der genannten Norm beitragen.

Auf Grundlage von Erfahrungswerten und durchgeführten Versuchen zeigt sich, dass die modifizierte Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 in Kombination mit der bewährten Eindringtiefe nach SN EN 12697-25 Prüfverfahren A2 geeignet wäre, einen Zusammenhang herzustellen. Für die Auswertung wird empfohlen, das beste statistische Modell einer Regressionsanalyse auszuwählen, das die Modellvoraussetzungen erfüllt und einen signifikanten Zusammenhang aufweist.

Des Weiteren werden im statistischen Modell Vertrauens- und Prognoseintervalle berechnet. Prognoseintervalle eignen sich, um Vorschläge für die Anforderungen an die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 zu berechnen, die derzeit nicht in der gültigen EN 13108-6 [47] definiert sind. Abb. 67 zeigt ein mögliches Modell, in diesem Fall ein lineares Modell, für die Gussasphalttypen H, S und N. Dieses Modell kann auch für jeden einzelnen MA-Typ

oder MA-Sorte angewendet werden. Damit das Modell Gültigkeit erlangt, ist es wichtig, auch tatsächlich weichere Typen zu prüfen und nicht nur harte Typen, um die gesamte Bandbreite der Eindringtiefen abzudecken. Dieses Modell muss auch konsolidiert werden, zum Beispiel im Rahmen von Ringversuchen. Die Werte des MA 11 N und MA 8 N sind in Abb. 67 fiktiv und dienen lediglich zur Veranschaulichung des weiteren Vorgehens aus Sicht der Forschungsstelle.

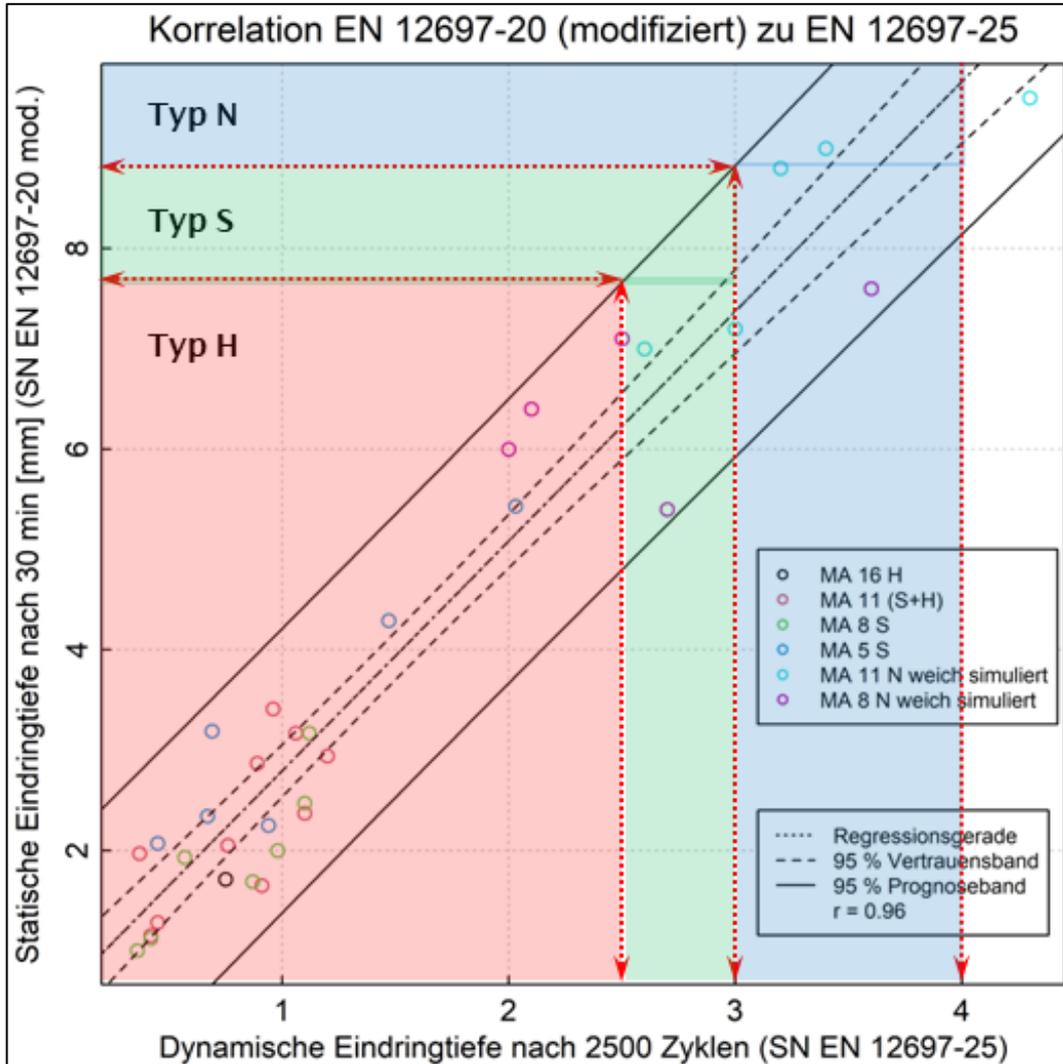


Abb. 67 Visualisierung Statistisches Modell, um Anforderungswerten für die modifizierte Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 vorzuschlagen.

Um dieses Ziel zu erreichen, stehen schlussendliche zwei Hauptmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Analyse bestehender Labordaten: Hierbei werden die vorhandenen Daten, die sowohl mit der dynamischen als auch mit der modifizierten statischen Methode untersucht wurden, analysiert und ausgewertet. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Erfahrungswerte von der Firma IMP Bautest AG.
2. Durchführung neuer Untersuchungen: Es müssen neue Versuche an Gussasphalt durchgeführt werden, mit Rahmenbedingungen auf Grundlage dieses Berichtes. Diese Untersuchungen können in Zusammenarbeit mit einer Organisation wie der IMAA durchgeführt werden oder im Rahmen weiterführender Forschungsarbeiten des VSS bzw. ASTRA.

Basierend auf der heutigen Erfahrung scheint die 2. Möglichkeit in Kombination mit der 1. Möglichkeit geeigneter, da hier auch die Transportbox und die Probenahme in der Praxis validiert (oder verbessert) werden können. Somit werden auch Privatlabore einbezogen und die Methodologie *de facto* validiert.

Vorschlag für Rahmenbedingungen, um die Methodologie zur Definition von Anforderungswerten zu konkretisieren:

1. Die Probenahme und Prüfungen sollten von erfahrenen Institutionen durchgeführt werden. Danach müssen die Proben schnell geprüft werden.
2. Es ist ratsam, Produkte von mindestens drei verschiedenen Produzenten zu untersuchen, da erfahrungsgemäss gleiche Produkte deutliche Unterschiede in den Ergebnissen je nach Hersteller zeigen können.
3. Von jedem Produzenten sollten mindestens sechs verschiedene Gussasphalttypen getestet werden (zwei H-Typen, zwei S-Typen, zwei N-Typen). Dabei handelt es sich um die am häufigsten verwendeten Typen, wobei die N-Typen nicht für hochbelastete Flächen geeignet sind. Für eine geeignete Auswahl (und ein die Realität widerspiegelndes statistisches Modell) ist eine gute Zusammenarbeit mit den Produzenten erforderlich.
4. Es sollte eine Doppelbestimmung an demselben deklarierten Produkt mit zeitlich versetzter Probenahme durchgeführt werden.
5. Zusammengefasst ergibt sich am Ende eine Anzahl von 18 Doppelbestimmungen. (3 Produzenten x 6 Gussasphalttypen). Die effektive Materialmenge und die Anzahl der Zylinder sollten vor Projektbeginn festgelegt werden. Es wird vorgeschlagen pro Einzelprüfung, mindestens 2 x 6 kg Probenmaterial für die dynamische Prüfung und mindestens 4 Zylinder für die statische Prüfung zu verwenden.

Anhänge

I Student t-Verteilung	90
II Probekörperherstellung	91
III Einzelwerte Untersuchungen 2020	92
IV Einzelwerte Untersuchungen 2021	98
V Vorschlag IMAA Revision EN 12697-20	100

I Student t-Verteilung

Die Tabelle [48] enthält die Quantile der t_n -Verteilung zu verschiedenen Signifikanzniveaus α und Freiheitsgraden n .

Degrees of freedom $v = N - 1$	Konfidenzniveau p in percent					
	68,27 ^{a)}	90	95	95,45 ^{a)}	99	99,73 ^{a)}
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

a) For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ , the interval $\mu_z \pm k\sigma$ encompasses $p = 68,27$ percent, $95,45$ percent and $99,73$ percent of the distribution for $k = 1, 2$ and 3 , respectively.

Abb. 68 Tabelle Student t -Verteilung [48].

II Probekörperherstellung

Probekörperherstellung für Würfel:

- Prüfkörperformen zusammensetzen und im Ofen bei 100 °C bis 150 °C erwärmen
- 900 g Gussasphalt auf Arbeitsblech ca. 1h bei 230 °C erwärmen, bis er mischbar (knetfähige Masse) ist
- Prüfkörperformen aus Ofen nehmen und gründlich mit Formtrennmittel einpinseln
- Probe aus Ofen nehmen und mischen, so dass keine Rückstände am Blech verbleiben
- Probe halbieren mit kleiner Maurerkelle
- In die Hände nehmen und 1. Hälfte in Form einfüllen
- mit Hartholzstamper Gussasphalt in Form einkneten, eindrücken (weniger stampfen), besonders Ecken (Ecken und Mitte im Wechsel)
- 2. Hälfte in Form einfüllen und einkneten
- So einkneten, dass keine Schichten nach dem Ausschalen sichtbar sind
- plane Oberfläche, sehr wichtig! da sich Prüfwürfel sonst in der Nachspannform verformt,
- während des Abkühlens Oberfläche planen
- Dauer: ca. 8min für einen Prüfkörper
- Proben abkühlen lassen auf ca. 40-50/60 °C, danach ausformen, wenn kälter passieren Abplatzungen an den Oberflächen, Oberflächen sollten schön glatt sein.
- Probenformen entfetten mit Papier und Lösemittel (oder Asphaltanalysator)
- Oben (Einbauseite) kennzeichnen

Prüfung:

- Beide Würfel in Nachspannformen einspannen, so handfest wie möglich,
- Einstampfseite an einer Seitenwand.
- Temperieren mindestens 60 min bei 40 °C \pm 1 °C im Wasserbad
- Nach 60 min Wasserbad Nachspannformen mit der Hand Nachspannen
- Danach Probe unter Stempel legen mit planer Seite oben, Probe steht nun auf dem überstehenden Gussasphalt
- Stempel auf Probe aufsetzen und solange an der Spindel drehen bis nur noch wenig Spiel zwischen Vorlast und Hauptlast. Prüfen durch Hochheben des Stempels, zügig für beide Proben durchführen
- Gleichzeitig Beide Messuhren nullen und Versuch starten.
- Start Belastungsdauer der Vorlast für 10 min \pm 1 min.
- Nach Ablauf der 10 min beide Spindeln gleichzeitig weiterdrehen bis Hauptlast aufliegt, Beginn der 60 min Hauptlast, Startwert wird automatisch genullt
- Ergebnis ist für 30 min und 60 min der Mittelwert der jeweiligen Einzelwerte, gerundet auf 0.1 mm
- Der Unterschied zwischen den jeweiligen Einzelwerten darf maximal 0.2 mm betragen und \leq 20 % des Zahlenwertes des Ergebnisses sein

III Einzelwerte Untersuchungen 2020

AP 4.1/4.3 Statische Eindringtiefe: Sensitivitätsanalyse, innovative Methoden (Untersuchungen 2020)							
Variante	Proben-Nr.	rep	MA-Typ	Serie	ET30 in mm	ET60 in mm	Herstell- temperatur
1	11	1	MA 11 H	1	1.07	1.2	235°C
1	12	2	MA 11 H	1	1.24	1.38	235°C
1	13	3	MA 11 H	2	0.82	0.89	235°C
1	14	4	MA 11 H	2	0.62	0.67	235°C
1	15	5	MA 11 H	3	0.88	0.96	235°C
1	16	6	MA 11 H	3	0.92	1.01	235°C
1	33	7	MA 11 H	4	0.9	0.98	235°C
1	34	8	MA 11 H	4	0.78	0.83	235°C
1	67	9	MA 11 H	5	1.03	1.15	235°C
1	68	10	MA 11 H	5	0.93	1.03	235°C
1	75	11	MA 11 H	6	1.03	1.13	235°C
1	76	12	MA 11 H	6	1.15	1.26	235°C
1	82	13	MA 11 H	7	1.01	1.09	235°C
1	83	14	MA 11 H	7	0.92	1.01	235°C
1	85	15	MA 11 H	8	0.8	0.87	235°C
1	86	16	MA 11 H	8	0.97	1.05	235°C
1	37	1	MA 8 HP	1	1.85	2.08	220°C
1	38	2	MA 8 HP	1	1.23	1.38	220°C
1	39	3	MA 8 HP	2	1.45	1.63	220°C
1	40	4	MA 8 HP	2	1.25	1.4	220°C
1	41	5	MA 8 HP	3	1.2	1.35	220°C
1	42	6	MA 8 HP	3	1.2	1.34	220°C
2	6	2	MA 11 H	1	1.06	1.14	235°C
2	7	3	MA 11 H	2	0.82	0.9	235°C
2	8	4	MA 11 H	2	0.85	0.92	235°C
2	9	5	MA 11 H	3	0.93	1	235°C
2	10	6	MA 11 H	3	0.87	0.95	235°C
2	35	7	MA 11 H	4	1.04	1.15	235°C

2	36	8	MA 11 H	4	0.94	1.03	235°C
2	37	9	MA 11 H	5	0.84	0.91	235°C
2	38	10	MA 11 H	5	0.91	0.99	235°C
2	39	11	MA 11 H	6	0.97	1.07	235°C
2	40	12	MA 11 H	6	1.09	1.2	235°C
3	17	1	MA 11 H	1	1.35	1.55	235°C
3	18	2	MA 11 H	1	1.29	1.46	235°C
3	19	3	MA 11 H	2	1.4	1.64	235°C
3	20	4	MA 11 H	2	0.96	1.1	235°C
3	21	5	MA 11 H	3	1.06	1.22	235°C
3	22	6	MA 11 H	3	0.98	1.12	235°C
3	71	7	MA 11 H	4	1.44	1.69	235°C
3	72	8	MA 11 H	4	1.61	1.87	235°C
3	73	9	MA 11 H	5	1.52	1.78	235°C
3	74	10	MA 11 H	5	1.06	1.24	235°C
4	23	1	MA 11 H	1	1.03	1.17	235°C
4	24	2	MA 11 H	1	1.2	1.37	235°C
4	25	3	MA 11 H	2	1.5	1.75	235°C
4	26	4	MA 11 H	2	1.69	1.99	235°C
4	27	5	MA 11 H	3	1.25	1.41	235°C
4	28	6	MA 11 H	3	1.52	1.74	235°C
4	29	7	MA 11 H	4	1.77	2.04	235°C
4	30	8	MA 11 H	4	1.88	2.15	235°C
4	69	9	MA 11 H	5	1.08	1.26	235°C
4	70	10	MA 11 H	5	1.39	1.61	235°C
5	49	1	MA 11 H	1	0.89	1.01	235°C
5	50	2	MA 11 H	1	1.02	1.17	235°C
5	51	3	MA 11 H	2	0.8	0.88	235°C
5	52	4	MA 11 H	2	1.12	1.27	235°C
5	53	5	MA 11 H	3	0.98	1.12	235°C
5	54	6	MA 11 H	3	0.78	0.87	235°C
5	61	7	MA 11 H	4	0.9	0.94	235°C
5	62	8	MA 11 H	4	0.94	1.04	235°C
5	55	9	MA 11 H	5	1.04	1.2	235°C

5	56	10	MA 11 H	5	0.99	1.12	235°C
6	97	1	MA 11 H	1	1.13	1.27	220°C
6	98	2	MA 11 H	1	1.21	1.36	220°C
6	101	3	MA 11 H	2	1.09	1.25	220°C
6	102	4	MA 11 H	2	1.25	1.41	220°C
6	103	5	MA 11 H	3	1.19	1.33	220°C
6	104	6	MA 11 H	3	1.44	1.62	220°C
6	105	7	MA 11 H	4	1.35	1.5	220°C
6	106	8	MA 11 H	4	1.18	1.31	220°C
6	107	9	MA 11 H	5	1.11	1.25	220°C
6	108	10	MA 11 H	5	0.99	1.11	220°C
6	7	1	MA 8 HP	1	1.44	1.63	220°C
6	8	2	MA 8 HP	1	1.14	1.26	220°C
6	9	3	MA 8 HP	2	1.68	1.87	220°C
6	10	4	MA 8 HP	2	1.2	1.39	220°C
6	11	5	MA 8 HP	3	1.52	1.77	220°C
6	12	6	MA 8 HP	3	1.37	1.58	220°C
7	87	1	MA 11 H	1	0.95	1.07	220°C
7	88	2	MA 11 H	1	0.87	0.99	220°C
7	89	3	MA 11 H	2	1.11	1.26	220°C
7	90	4	MA 11 H	2	1.08	1.23	220°C
7	91	5	MA 11 H	3	1.08	1.19	220°C
7	92	6	MA 11 H	3	1	1.13	220°C
7	93	7	MA 11 H	4	1.27	1.43	220°C
7	94	8	MA 11 H	4	1.08	1.22	220°C
7	95	9	MA 11 H	5	1.29	1.43	220°C
7	96	10	MA 11 H	5	1.25	1.4	220°C
7	109	11	MA 11 H	6	1.14	1.28	220°C
7	110	12	MA 11 H	6	1.04	1.18	220°C
7	1	1	MA 8 HP	1	1.09	1.2	220°C
7	2	2	MA 8 HP	1	1.23	1.39	220°C
7	3	3	MA 8 HP	2	1.26	1.4	220°C
7	4	4	MA 8 HP	2	1.24	1.41	220°C
7	5	5	MA 8 HP	3	1.14	1.32	220°C

7	6	6	MA 8 HP	3	1.41	1.57	220°C
8	57	1	MA 11 H	1	3.37	3.65	235°C
8	58	2	MA 11 H	1	2.9	3.26	235°C
8	59	3	MA 11 H	2	3.64	4.09	235°C
8	60	4	MA 11 H	2	3.71	4.06	235°C
8	63	5	MA 11 H	3	3.24	3.48	235°C
8	64	6	MA 11 H	3	3.55	3.82	235°C
8	77	7	MA 11 H	4	2.87	3.13	235°C
8	79	8	MA 11 H	4	2.78	2.96	235°C
8	80	9	MA 11 H	5	2.83	3.04	235°C
8	13	1	MA 8 HP	1	4.56	5	220°C
8	14	2	MA 8 HP	1	4.06	4.48	220°C
8	15	3	MA 8 HP	2	4.55	5.01	220°C
8	16	4	MA 8 HP	2	4.23	4.68	220°C
8	17	5	MA 8 HP	3	4.48	4.88	220°C
8	18	6	MA 8 HP	3	4.06	4.47	220°C
8	63	1	MA 11 HP	1	4	4.47	220°C
8	64	2	MA 11 HP	1	4.31	4.82	220°C
8	73	3	MA 11 HP	2	3.2	3.55	220°C
8	74	4	MA 11 HP	2	4.35	4.81	220°C
8	61	1	MA 8 H	1	4.08	4.37	220°C
8	62	2	MA 8 H	1	3.97	4.22	220°C
8	71	3	MA 8 H	2	4.64	4.96	220°C
8	72	4	MA 8 H	2	4.91	5.3	220°C
9	41	1	MA 11 H	1	1.73	2.03	235°C
9	42	2	MA 11 H	1	1.93	2.23	235°C
9	43	3	MA 11 H	2	2.14	2.51	235°C
9	44	4	MA 11 H	2	1.57	1.82	235°C
9	45	5	MA 11 H	3	1.61	1.88	235°C
9	46	6	MA 11 H	3	2.24	2.61	235°C
9	47	7	MA 11 H	4	1.48	1.72	235°C
9	48	8	MA 11 H	4	1.57	1.8	235°C
10	19	1	MA 8 HP	1	2.45	2.79	220°C
10	20	2	MA 8 HP	1	2.18	2.5	220°C

10	21	3	MA 8 HP	2	2.68	3.06	220 °C
10	22	4	MA 8 HP	2	2.68	3.06	220 °C
10	23	5	MA 8 HP	3	2.65	2.98	220 °C
10	24	6	MA 8 HP	3	2.76	3.16	220 °C
10	49	1	MA 11 HP	1	2.41	2.75	220 °C
10	50	2	MA 11 HP	1	2.33	2.71	220 °C
10	51	3	MA 11 HP	2	2.95	3.4	220 °C
10	52	4	MA 11 HP	2	2.33	2.69	220 °C
10	53	5	MA 11 HP	3	3.02	3.49	220 °C
10	54	6	MA 11 HP	3	2.64	3.04	220 °C
10	55	1	MA 8 H	1	2.96	3.31	220 °C
10	56	2	MA 8 H	1	2.5	2.73	220 °C
10	57	3	MA 8 H	2	2.95	3.23	220 °C
10	58	4	MA 8 H	2	2.1	2.31	220 °C
10	59	5	MA 8 H	3	2.86	3.17	220 °C
10	60	6	MA 8 H	3	2.45	2.72	220 °C
11	25	1	MA 8 HP	1	1.75	2.07	220 °C
11	26	2	MA 8 HP	1	1.23	1.42	220 °C
11	27	3	MA 8 HP	2	1.56	1.81	220 °C
11	28	4	MA 8 HP	2	1.49	1.73	220 °C
11	29	5	MA 8 HP	3	1.09	1.23	220 °C
11	30	6	MA 8 HP	3	1.11	1.26	220 °C
12	31	1	MA 8 HP	1	1.38	1.62	220 °C
12	32	2	MA 8 HP	1	1.63	1.92	220 °C
12	33	3	MA 8 HP	2	1.25	1.47	220 °C
12	34	4	MA 8 HP	2	1.58	1.88	220 °C
12	35	5	MA 8 HP	3	1.36	1.62	220 °C
12	36	6	MA 8 HP	3	1.95	2.26	220 °C
12	65	1	MA 8 H	1	1.73	1.95	220 °C
12	66	2	MA 8 H	1	1.99	2.3	220 °C
12	85	3	MA 8 H	2	1.82	1.42	220 °C
12	86	4	MA 8 H	2	2.02	1.58	220 °C
12	87	5	MA 8 H	3	2.16	2.41	220 °C
12	88	6	MA 8 H	3	1.62	1.77	220 °C

12	77	7	MA 8 H	4	1.88	2.1	220 °C
12	78	8	MA 8 H	4	2.45	2.81	220 °C
12	69	1	MA 11 HP	1	1.09	1.26	220 °C
12	70	2	MA 11 HP	1	1.2	1.28	220 °C
12	81	3	MA 11 HP	2	1.35	1.55	220 °C
12	82	4	MA 11 HP	2	1.18	1.35	220 °C
12	83	5	MA 11 HP	3	1.2	1.39	220 °C
12	84	6	MA 11 HP	3	1.22	1.4	220 °C
12	75	1	MA 11 H	1	1.32	1.49	220 °C
12	76	2	MA 11 H	1	1.23	1.43	220 °C
12	67	3	MA 11 H	2	1.28	1.45	220 °C
12	68	4	MA 11 H	2	1.19	1.33	220 °C
12	79	5	MA 11 H	3	1.38	1.57	220 °C
12	80	6	MA 11 H	3	1.44	1.63	220 °C
13	43	1	MA 8 HP	1	1.2	1.34	220 °C
13	44	2	MA 8 HP	1	1.43	1.6	220 °C
13	45	3	MA 8 HP	2	1.37	1.54	220 °C
13	46	4	MA 8 HP	2	1.23	1.36	220 °C
13	47	5	MA 8 HP	3	1.6	1.77	220 °C
13	48	6	MA 8 HP	3	1.23	1.38	220 °C

IV Einzelwerte Untersuchungen 2021

AP 4.1/4.3 Statische Eindringtiefe: Einfluss der Geometrie unter Verwendung des gerundeten Stempels (Untersuchungen 2021)								
Name	Nr. PK	MA-Typ	T	ET30	ET60	Probenahme	Herstellung PK	Test
InsituCY100	130	MA 8 HP		1.89	2.17	2020	2020	2021
InsituCY100	131	MA 8 HP	220 °C	1.37	1.56	2020	2020	2021
InsituCY100	132	MA 8 HP	220 °C	1.87	2.14	2020	2020	2021
InsituCY100	133	MA 8 HP	220 °C	1.61	1.83	2020	2020	2021
InsituCY100	134	MA 8 HP	220 °C	1.65	1.88	2020	2020	2021
InsituCY100	135	MA 8 HP	220 °C	1.63	1.88	2020	2020	2021
LaborCY84	136	MA 8 HP	220 °C	1.51	1.68	2020	2021	2021
LaborCY84	137	MA 8 HP	220 °C	1.50	1.65	2020	2021	2021
LaborCY84	138	MA 8 HP	220 °C	1.52	1.69	2020	2021	2021
LaborCY84	139	MA 8 HP	220 °C	1.51	1.69	2020	2021	2021
LaborCY84	140	MA 8 HP	220 °C	1.35	1.50	2020	2021	2021
LaborCY84	141	MA 8 HP	220 °C	1.55	1.71	2020	2021	2021
LaborCY100	188	MA 8 HP	220 °C	1.65	1.86	2020	2021	2021
LaborCY100	189	MA 8 HP	220 °C	1.88	2.15	2020	2021	2021
LaborCY100	190	MA 8 HP	220 °C	1.98	2.29	2020	2021	2021
LaborCY100	191	MA 8 HP	220 °C	1.71	1.94	2020	2021	2021
LaborCY100	19	MA 8 HP	220 °C	2.45	2.79	2020	2020	2020
LaborCY100	20	MA 8 HP	220 °C	2.18	2.50	2020	2020	2020
LaborCY100	21	MA 8 HP	220 °C	2.68	3.06	2020	2020	2020
LaborCY100	22	MA 8 HP	220 °C	2.68	3.06	2020	2020	2020
LaborCY100	23	MA 8 HP	220 °C	2.65	2.98	2020	2020	2020
LaborCY100	24	MA 8 HP	220 °C	2.76	3.16	2020	2020	2020

LaborCY84	158	MA 8 SP	220 °C	2.68	2.92	2020	2021	2021
LaborCY84	159	MA 8 SP	220 °C	2.84	3.13	2020	2021	2021
LaborCY84	160	MA 8 SP	220 °C	2.96	3.22	2020	2021	2021
LaborCY84	161	MA 8 SP	220 °C	2.68	2.92	2020	2021	2021
LaborCY84	163	MA 8 SP	220 °C	2.90	3.19	2020	2021	2021
LaborCY84	164	MA 11 S	220 °C	2.38	2.53	2020	2021	2021
LaborCY84	165	MA 11 S	220 °C	2.13	2.26	2020	2021	2021
LaborCY84	166	MA 11 S	220 °C	2.12	2.23	2020	2021	2021
LaborCY84	167	MA 11 S	220 °C	2.16	2.32	2020	2021	2021
LaborCY84	168	MA 11 S	220 °C	2.31	2.42	2020	2021	2021
LaborCY84	170	MA 11 SP	220 °C	1.63	1.73	2020	2021	2021
LaborCY84	171	MA 11 SP	220 °C	1.99	2.10	2020	2021	2021
LaborCY84	172	MA 11 SP	220 °C	2.07	2.24	2020	2021	2021
LaborCY84	173	MA 11 SP	220 °C	1.55	1.75	2020	2021	2021
LaborCY84	175	MA 11 SP	220 °C	1.88	1.99	2020	2021	2021
LaborCY84	176	MA 11 N	220 °C	1.21	1.28	2020	2021	2021
LaborCY84	177	MA 11 N	220 °C	1.52	1.61	2020	2021	2021
LaborCY84	178	MA 11 N	220 °C	1.82	1.89	2020	2021	2021
LaborCY84	179	MA 11 N	220 °C	1.36	1.43	2020	2021	2021

V Vorschlag IMAA Revision EN 12697-20

In diesem Anhang ist das Kapitel 6 «Test method B – Static indentation on test specimens manufactured on site» aus dem Vorschlag der IMAA für die europäische Normierung hinsichtlich Statischer Eindringtiefenprüfung nach EN 12697-20 mit modifizierten Prüfbedingungen abgedruckt.

6. Test method B – Static indentation on test specimens manufactured on site

6.1 Brief description

The static indentation of test specimens, which are produced on the construction site, serves as a quick control test to ensure the quality of the installed layers without hindering the construction progress. In order to also be able to assess hard mastic asphalt types, the test conditions were optimised and newly defined in a research study (literature [2]).

This procedure has proven itself for decades and is used by construction companies.

6.2 Test specimens

6.2.1 Production of the mastic asphalt test cylinders

The test cylinders are made on site by one person - wearing gloves - holding the test can directly into the outflowing mastic asphalt stream until the can is completely filled. The cans are filled in the mastic asphalt outlet of the cooker (see Figure 8). There is neither compaction by tamping nor smoothing of the asphalt in the can. Only the excess asphalt on the surface is scraped off with a glove.

NOTE 1. Sampling is carried out when the mastic asphalt cooker is emptied in the middle third.

NOTE 2. the can must not be filled with mastic asphalt from a bucket

When producing the test specimens, their marking in accordance with EN 12697-27 must be respected.

The test specimens must be stored horizontally and vibration-free on the construction site before transport. Before transport, the test specimens must be cooled in the air until they have reached a temperature $< 50^{\circ}\text{C}$ on the surface.



Figure 8 - Production of the test specimen on the construction site

6.2.2 Preparation of the test cylinders

The can delivered to the laboratory is shortened by one or two cuts in such a way that the specimen height is 50 ± 2 mm. The steel shell of the can is not removed.

NOTE 1: It is recommended to cut a few mm off the steel shell on the lower side of the specimen (supporting surface) to ensure that the base of the specimen is not disturbed by the steel shell

NOTE 2: The delivered can can be shortened to the specimen height by making two parallel cuts at the top and bottom.

NOTE 3: Alternatively, the specimen may be shortened to the specimen height by a single cut at the top. In this case the bottom of the box shall be placed on a ring of steel, the diameter of this ring being not more than 10 ± 1 mm smaller than the outside diameter of the box.

NOTE 4: Alternatively, the bottom of the can can be removed by means of a can opener and, in addition, the shell of the can can be cut off by a few mm. With a cut on the upper side, the specimen is shortened to the specimen height. The specimen is placed on the cut surface for testing; the load is applied to the untreated face of the bottom of the can.

Number of specimens:

Two specimens are tested.

6.2.3 Conditioning

The test specimens shall be stored in the laboratory on a flat surface at room temperature not exceeding 25°C. The preparation of the test cylinders according to 6.2.2. may only be carried out after the cylinders have cooled down completely.

NOTE: Experience has shown that specimen preparation may be carried out 4 hours after their production.

No further storage period is to be observed.

6.3 Mounting of the specimens

The test specimens are placed with the underside on the support plate (see Fig. 5); the load by the indentation pin is applied to the upper side of the test specimen.

NOTE: If an alternative preparation of the test specimens has been chosen according to 6.2.2, this shall be taken into account mutatis mutandis.

The test specimens shall be tempered at the test temperature of 55 ± 1 °C for at least 60 min.

6.4 Test conditions

The test conditions are specified in Table 2.

Table 2 – Test conditions for the test method B

Parameter	
Temperatur [°C]	55 ± 1
Load mass [N]	650 ± 1
Reading taken after seconds	900 ± 10 und 1800 ± 10
Base area of the pin [mm ²]	500

NOTE: The load of 525 N (acc. to 5.4) is achieved with the preload and 4 rings of 125 N each. The load of 650 N is achieved with an additional 5th Ring à 125 N.

6.5 Application of the load

Place the indenter pin vertically and as centrally as possible on the test specimen and first apply the preliminary force of (25 ± 1) N for a period of (10 ± 1) min. Then read the initial value from the displacement transducer and apply the total test force (650 ± 1) N without impact. After further 15 min and 30 min, all with an accuracy of ± 1 min, read the depth of indentation of the indenter pin to the nearest 0,01 mm.

NOTE It is recommended, for the purposes of preparing a time/indentation graph, that the depth of indentation be read after 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60 min and, where appropriate, 120 min and 300 min. The use of a digital value recording is recommend.

Glossar

Begriff	Bedeutung
IMAA	International Mastic Asphalt Association IMAA (deutsch: Internationale Gussasphalt Vereinigung IGV)
SN	Schweizer Norm (SN)
EN	Europäische Norm (EN)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
CY	Cylinder, englisch abgekürzt für Zylinder
CU	Cube, englisch abgekürzt für Würfel

Literaturverzeichnis

Normen

-
- [1] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2022). „**SN EN 13108-6 Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 6: Gussasphalt**“.
-
- [2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019). „**VSS 40 440 C: Gussasphalt; Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten**“.
-
- [3] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019). „**VSS-40444: Prüfplan für Gussasphalt; Festlegung der durchzuführenden Prüfungen**“.
-
- [4] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2022). „**VSS-40450 : Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Beton: Systemaufbauten, Anforderungen und Ausführung**“.
-
- [5] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2020). „**SN EN 12697-20 Asphalt; Prüfverfahren - Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern**“.
-
- [6] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN EN 12697-25 Asphalt - Prüfverfahren - Teil 25: Druck-Schwellversuch**“.
-
- [7] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN 670402/EN-12697-2 Asphalt - Prüfverfahren – Teil 2: Korngrößenverteilung**“.
-
- [8] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013). „**SN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren**“.
-
- [9] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2020). „**SN EN 12697-3: Asphalt; Prüfverfahren – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer**“.
-
- [10] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013). „**SN 670401/EN 12697-1: Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt**“.
-
- [11] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2020). „**SN EN 12697-20: Asphalt - Prüfverfahren - Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern**“.
-
- [12] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN-670511/EN-1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration**“.
-
- [13] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN-670512/EN-1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel Verfahren**“.
-
- [14] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN EN 12593 SN 670 507: "Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes von Fraass**“.
-
- [15] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2018). „**SN EN 13398 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen**“.
-
- [16] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013). „**SN EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)**“.
-
- [17] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). „**SN EN 13108-21: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 21: Werkseigene Produktionskontrolle**“.
-

Dokumentation

-
- [18] Müller, M. (16. Januar 2021). „**Weiterbildung Gussasphalt - Seminarunterlagen**“.
-
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2015). „**Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau, TP Gestein-StB Teil 4.3.3, Bestimmung der Kornform von feinen Gesteinskörnungen durch Stabsiebung – Plattigkeitskennzahl**“, Arbeitsgruppe „Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen“.
-
- [20] Probst, S. (2021). „**Qualitäten bei Gussasphalt (Weibel AG)**“.
-
- [21] Peter, H. (Oktober 2021). „**Häufigste verwendete Gussasphalte im Strassenbau (BHZ Volketswil)**“.
-
- [22] Höher, K., Lehne, R. (1993). „**Bitumen -Erweiterte mechanische Prüfungen zur Optimierung und Bewertung von Gussasphalten**“, Nr. 1, S. 15–19.
-

-
- [23] Bull-Wasser, R., Schmidt, H., Hüning, H.-H. (2011). **"ZTV/TL Asphalt-StB. Handbuch und Kommentar - Fassung 2007. Unter Berücksichtigung der Änderungen und Ergänzungen des ARS 29/2010"**, 3. Auflage. Kirschbaum Verlag.
-
- [24] Lenk, J. (2023). **„Ökobilanz (LCA) von Gussasphalt als Deckschicht für Schweizer Nationalstrassen - Erarbeitung einer Ökobilanz (LCA) für Gussasphalt basierend auf dem Projekt ‚Deckbelagererneuerung A 3 bei Frick‘“**, Berner Fachhochschule BFH, Burgdorf, Masterarbeit.
-
- [25] Zangerl, M. (7. Juli 2022). **„Standfestigkeit und Schadenfälle bei Gussasphalt (Fa. Aeschlimann AG)“**.
-
- [26] Institut für Materialforschung IFM (2011). **„Untersuchung einer Gussasphaltprobe (Untersuchungsberichte IFM)“**.
-
- [27] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1999). **„Empfehlung VSS 671 970 Bituminöses Mischgut Prüfverfahren - Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung“**.
-
- [28] Aeschlimann, H. (September 1992). **„Gegenüberstellung Stempeleindringprüfung“**, Zofingen.
-
- [29] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2012). **„Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten“**, Forschungsauftrag VSS 2001/504, Berichtsnummer 1382.
-
- [30] Angst, C. (2019). **„Innovation in der MA-Prüftechnik: rasche und einfache Prüfmethode; Internationaler Gussasphalt-Kongress - IGV-Symposium“**, Köln
-
- [31] Angst, C. (2021). **„Indentation test for mastic asphalt; New method and follow-up to standardization, Internationaler Gussasphalt-Kongress - IGV-Symposium“**.
-
- [32] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2008). **„Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt“**, Forschungsauftrag VSS 2000/433, Berichtsnummer 1248.
-
- [33] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2014). **„Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt“**, Forschungsauftrag 1999/125, Berichtsnummer 1475: Ringversuch.
-
- [34] Bueche, N., Aeschlimann, H. (2018). **„IMAA Ringanalyse 2018“**, Version 2
-
- [35] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016). **„Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden“**, Forschungsauftrag 2010/404, Berichtsnummer 1548.
-
- [37] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015). **„SN EN 14574:2015; SN 670714:2015 Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramidendurchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage“**.
-
- [37] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2022). **„REG Norm VSS 40430: Walzasphalt - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten“**.
-
- [38] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2018). **„SN EN 12697-27: Asphalt; Prüfverfahren – Teil 27: Probenahme“**.
-
- [39] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2012). **„Thermische Alterung von Asphalt im Labor“**, Forschungsauftrag 2000/434, Berichtsnummer 1408.
-
- [40] FGSV (2016). **„AL DSR-Prüfung (MSCRT): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Teil 2: Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)“**.
-
- [41] FGSV (2014). **„AL DSR-Prüfung (T-Sweep): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep“**.
-
- [42] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2008). **„Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt“**, Forschungsauftrag VSS 2000/433, Berichtsnummer 1248.
-
- [43] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019). **„SN EN 12697-25: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch“**.
-
- [44] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019). **„SN EN 12697-26 Asphalt - Prüfverfahren - Teil 26: Steifigkeit“**.
-
- [45] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2018). **„SN EN 12697-24: Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung“**.
-
- [46] Andres, A. (31. August 2022). **„Interne Qualitätskontrolle mittels Statischer Eindringtiefe“**.
-
- [47] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2010). **„SN EN 13108-6 NA : 2019 Anforderungen Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt“**.
-
- [48] JCGM (2008). **„Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, CGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections“**.
-

Fachhandbuch des ASTRA

[49] Bundesamt für Strassen ASTRA (2023). „**Fachhandbuch T/U Technisches Merkblatt Bauteile 21 001-10216 Oberbau - Deckschicht**“. www.astra.admin.ch

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 12.03.2024

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2018/331

Projekttitel: Prüfmethode zur raschen Beurteilung der Gussasphalteeigenschaften

Enddatum: 31.03.2024

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Projektergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Entwicklung einer raschen Prüfmethode:

Als Prüfmethode eignet sich die modifizierte statische Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 in dem die Prüfbedingungen und die Probenherstellung verändert wurden: Temperatur 55 °C statt 40 °C, Belastung 650 N statt 525 N und Probekörperherstellung mittels zylindrischen Dosen in situ statt Würfel im Labor. Die grösseren Eindringtiefen der modifizierten statischen Prüfung erlauben es, auch harte Gussasphalte (Eindringtiefe gemäss SN EN 12697-20 von ≤ 2.5 mm) zu charakterisieren, was für eine zeitnahe Qualitätskontrolle von grosser Wichtigkeit ist.

Untersuchungen zur Lagerungsdauer zwischen Herstellung und Prüfung zeigen keinen signifikanten Unterschied in den Eindringtiefen nach 2 h oder 24 h. Die Gesamtdauer der Untersuchung (Lagerung und Prüfung) konnte somit verkürzt werden.

Die Prüfung von zylindrischen in-situ-Proben (Dosen) anstatt im Labor hergestellten Würfelproben reduziert den Arbeitsaufwand und verbessert die Gleichmässigkeit der hergestellten Probekörper.

2. Dynamische Eindringtiefe (SN EN 12697-25)

Untersuchungen zur Lagerungsdauer zwischen Herstellung und Prüfung zeigen keinen signifikanten Unterschied in den Eindringtiefen nach 2 bis 42 Tagen. Die Prüfdauer konnte somit verkürzt werden.

3. Nachweis der Entmischung an Gussasphaltprobekörpern:

Entwicklung einer Methodik (und Software) zur Beurteilung der Entmischung von Prüfkörpern.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Projektziele wurden in Zusammenarbeit mit der Begleitkommission definiert und während der Projekt auch leicht angepasst.

Aus Sicht der Forschungsstellen sind die Ziele erreicht. Die modifizierte statische Eindringtiefe als Prüfmethode konnte validiert bzw. optimiert werden und die Prüfdauer verkürzt. Die neuen modifizierten Prüfbedingungen (Temperatur und Auflast) sind einfach und schnell zu implementieren. Die Verwendung von Einweg-Zylinderdosen, die gleichzeitig als Herstell- und Prüfform fungieren, erspart bei in-situ-Proben das Wiedererwärmen und Herstellen von Probekörpern im Labor, bei ähnlicher Qualität.

Der Nachweis einer verkürzten Lagerungsdauer, ohne das Prüfergebn signifikant zu beeinflussen wurde für die Eindringtiefe nach SN EN 12697-20 und SN EN 12697-25 erbracht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Forschungsstelle empfiehlt für die SN EN 12697-20 die Implementierung der modifizierten statischen Eindringtiefe sowie eine Optimierung der Prüfdauer. Die Prüfergebnisse wurden schon mit der IMAA (International Mastic Asphalt Association) sowie dem CEN Delegierten besprochen, damit die Resultate in Normenwerk einfließen können.

Für die dynamische Eindringtiefe wird auch eine Reduktion der bisherigen Lagerungsdauer zwischen Herstellung und Prüfung von ursprünglich 14 bis 42 Tagen auf 2 Tage empfohlen.

Nachweis der Entmischung an Gussasphaltprobekörpern: Die entwickelte Methodik (und Software) zur Beurteilung der Entmischung von Probekörpern kann als zusätzliches Mittel zur Untersuchung bei Schadenfällen sehr hilfreich sein.

Weitere Empfehlungen: Weitere Untersuchungen an einem grösseren Datenkollektiv, um den Zusammenhang zwischen modifizierter statischer und dynamischer Prüfung abzusichern und um die bisherigen provisorischen Grenzwerte zu verifizieren.

Publikationen:

keine

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Prof. Dr. Öngel

Vorname: Aybike

Amt, Firma, Institut: Berner Fachhochschule, Institut für Baustoffe und biobasierte Materialien IBBM

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die modifizierte Prüfmethode ermöglicht eine bessere Differenzierung der Mischguteigenschaften. Eine Korrelation zu den in den in der SN EN 12697-20 beschriebenen Methoden (statische, jedoch insbesondere dynamische ET) konnte nicht umfassend aufgezeichnet werden. Dies ist aber erforderlich, um die entsprechenden Anforderungen gem. SN EN 13108-6 in Relation setzen zu können. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Gemäss Forschungsbericht ist die Wiederholbarkeit der Prüfungen mit in-situ hergestellten Prüfkörpern besser als mit Prüfkörpern, die im Labor hergestellt werden. Es ist jedoch nicht nachgewiesen, ob bei unterschiedlichen Baustellen mit wechselnder Einbauequipe (und somit wechselndem Probehersteller) eine ausreichende Vergleichbarkeit bei gleicher Gussasphaltsorte (gleicher Hersteller) erwartet werden kann. Eine gute Vergleichbarkeit ist aber erforderlich, damit u.a. das in der Norm VSS 40 444:2019 (Ziff. 10.3) aufgeführte Kriterium bzgl. Gültigkeit von Resultaten von Probeaufbereitung Phase 2 (max. 1 Jahr bei vergleichbaren Objekten) bestehen bleiben kann. Sie ist aber auch für die Sicherung der Produktequalität unabdingbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Umsetzung:

Der Bericht hält sich grundsätzlich an die Zielvorgaben des Auftrags. Änderungen wurden mit der Begleitkommission diskutiert und grösstenteils umgesetzt. Lediglich die im Bericht entwickelte Methodik (und Software) zur Beurteilung der Entmischung von Prüfkörpern war nicht Teil des Forschungsvorhabens und wurde von der BK nie freigegeben.

weitergehender Forschungsbedarf:

ja

Einfluss auf Normenwerk:

Nach zurückhaltender Reaktion der für die oben angegebenen Normen zuständigen CEN Kommission wird der Einfluss auf die Norm EN 12697-20 als gering beurteilt. Die Anpassung der Lagerungsdauer für die Probekörper in der EN 12697-25 wird begrüsst.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Rucktäschel

Vorname: Thorsten

Amt, Firma, Institut: BEEBA Ingenieure GmbH, Grafenastrasse 7, CH-6300 Zug

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

21.03.2024

