Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Beiträge zur Entwicklung eines Laborverfahrens für die Griffigkeitsprognose

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald BLAB

Univ.Ass.Dipl-Ing.Dr.techn. Bernhard HOFKO

Institut für Verkehrswissenschaften

Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Simeon Minchev

1129507
Pencho Postompirov Str. 11
5300 Gabrovo

Wien, im April 2015

Kurzfassung

Beiträge zur Entwicklung eines Laborverfahrens für die Gruffigkeitsprognose

Die vorhandene Straßengriffigkeit ist heutzutage aufgrund ihrer Auswirkung auf die Verkehrssicherheit eine der wichtigsten Eigenschaften im Straßenbau. Sie bewirkt auch die Dauerhaftigkeit einer Straßenoberfläche vor allem bei Nässe und hat eine große wirtschaftliche Bedeutung. Das Niveau und die zeitliche Entwicklung der Griffigkeit der Deckschichten hängt von der Polierresistenz des verwendeten Gesteinsmaterials, dem Holraumgehalt und der Textur ab. Die langfristige Prognose dieser Entwicklung kann nicht nur kosteneffizient sein, sondern auch Ursache für die Vermeidung von gefährlichen Unfällen.

Diese Diplomarbeit ist ein Teil eines großen Forschungsprojekts für die Entwicklung eines Laborverfahrens für die Griffigkeitsprognose von Verkehrsflächen aus Asphalt bzw. Beton.

Das Institut für Verkehrswissenschaften an der TU Wien verfügt seit Jahren über die Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart. Mit diesem Prüfverfahren erfolgt die Bestimmung des Reibungsbeiwerts von Straßenoberflächen durch Verkehrssimulation von definierten Belastungszyklen.

Im Zuge dieser Arbeit wird der Polierwert nach Wehner/Schulze- (PWS) von Waschbetonoberflächen ermittelt. Dabei werden im Labor unter gleichen Bedingungen 9 Probekörper hergestellt. Diese Probekörper werden in 3 Gruppen durch den Ausbürstzeitpunkten (Oberflächenbehandlung) aufgeteilt, da jede Gruppe nach einer bestimmten Zeit ausgebürstet wurde.

Die Ergebnisse aus die durchgeführten Prüfungen tragen zur Entwicklung des Labor-Verfahrens zur Griffigkeitsprognose und zu den Zielen des ganzes Forschungsprojektes bei. Sie können als Grundlage zu weiteren Untersuchungen dienen.

Abstract

Road friction is due to their impact on traffic safety one of the most important features in road construction. It can limit the durability of a road surface, especially in wet conditions and has a great economic significance. The level and the evolution of the friction of the surface layers depend on the polishing resistance of the rock aggregate, the void content and texture. The long-term prediction of friction development can not only be cost efficient, but also a way for avoiding dangerous accidents.

This master thesis is part of a comprehensive research project for the development of a laboratory method for the prediction of friction surfaces of asphalt and concrete.

Since 2006 the Technical University Vienna`s Institute for Road Constructions and Road Maintenance has the new design test system by Wehner/Schulze. This test method determins the friction coefficient of road surfaces by simulation of traffic depending on defined load cycles.

In the course of this work the polish value – (PWS) of exposed aggregate concrete surfaces will be determined. For this purpose the time of the surface treatment will be varied.

The results of the tests carried out will contribute to the development of a laboratory procedure for friction prediction and this contribute to the goals of the entire research project. They can furthermore serve as basis of other studies.

Vorwort

Ich möchte mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Ronald Blab herzlich bedanken, der es mir erlaubte, meine Diplomarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung durchführen zu können.

Weiters möchte ich mich besonders bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko und Proj. Ass. Dipl.-Ing. Georgi Chankov für ihre Betreuung und das perfekte Arbeitsklima im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen.

Ich bedanke mich auch bei dem ganzen Laborteam für die kollegiale Beziehung und Mithilfe.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner ganzen Familie für die Ratschläge und die Unterstützung im Laufe meines Studiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung 7

2 Grundlagen zur Waschbetondecken 8

2.1 Waschbeton für Verkehrsflächen 8

2.1.1 Allgemeines 8

2.1.2 Eigenschaften 9

2.1.3 Anforderungen 12

2.2 Hydratation des Zementes 15

2.2.1 Hydratation des C_3A 15

2.2.2 Hydratation des C_3S und C_2S 16

2.3 Verzögerung der Zementhydratation 17

2.3.1 Stoffe, die die Zementhydratation verzögern 17

2.3.2 Wirkungsweise des Verzögerers 17

2.3.3 Andere Einflüsse auf die Zementhydratation 18

2.4 Untersuchungsmethoden im Labor 18

2.4.1 Herstellung der Probekörper 18

2.4.2 Plattenausbürsten 19

2.4.3 Bestimmung der Rautiefe 20

3 Probekörperherstellung 21

3.1 Verwendete Materialien 21

3.1.1 Zement 21

3.1.2 Gesteinkörnung 21

3.1.3 Zusatzmittel 23

3.1.4 Oberflächenkontaktverzögerer 24

3.2 Laborausrüstung 25

3.2.1 Betonmischer 25

3.2.2 Schalungen 25

3.2.3 Rütteltisch 26

3.2.4 Luftgehaltsprüfer 26

3.3 Plattenherstellung 27

3.3.1 Betonrezeptur 27

3.3.2 Versuchsbeschreibung 27

3.3.3 Auftrag des Betonverzögerers 30

3.3.4 Plattenausbürsten 30
3.4 Probekörper vorbereiten 31
3.5 Bestimmung der Rautiefe 31
4 Laborverfahren zur Prognose des Polierwiderstandes- Wehner/Schulze 33
4.1 Anwendungsbereich 33
4.2 Beschreibung des Verfahrens 34
4.3 Beschreibung der Geräte 36
4.3.1 Polierstation 36
4.3.2 Prüfstation 38
4.3.3 Messgummis und Polierrollen 39
4.3.4 Poliermittel 40
5 Optische Geräte zur Bestimmung der Topographie 41
5.1 Allgemeines 41
5.2 Oberflächenparameter 42
5.3 Messprinzip 43
6 Prüfergebnisse und Auswertung 46
6.1 Untersuchungsprogramm 46
6.2 Prüfergebnisse 46
6.2.1 Ergebnisse der Anlage nach Wehner-Schulze 46
6.2.2 Ergebnisse der Topographiemessungen 50
7 Zusammenfassung 53
7.1 Ausgangssituation und Zielsetzung 53
7.2 Versuchsprogramm und Ergebnisse 53
7.3 Schlussfolgerungen und Ausblick 54
I. Abbildungsverzeichnis 57
II. Tabellenverzeichnis 59
Anhang (Prüfprotokolle,…) 60

Häufig verwendete Abkürzungen

PWS – Polierwert nach Wehner/Schulze

μ_{pws} – Reibungsbeiwert

ÜR – Überrollung

PK – Probekörper

km/h – Kilometer pro Stunde

U/min – Überrollungen pro Minute

N/mm^2 – Newton pro Quadratmillimeter

g/cm^3 – Gram pro Kubikzentimeter

l/min – Liter pro Minute

1 Einleitung und Zielsetzung

Die vorhandene Straßengriffigkeit ist heutzutage aufgrund ihrer Auswirkung auf die Verkehrssicherheit eine der wichtigsten Eigenschaften im Straßenbau. Deshalb ist dieses Thema beim Bau, Erhaltung und Einschätzung von Straßen immer aktuell. Die Vermeidung von Verkehrsunfällen und daraus resultierende menschliche Schäden kann durch Erhöhung der Griffigkeit erreicht werden. Bei allen Straßennetzen, insbesondere in Bereichen mit kleinen Kurvenradien, Verwindungsbereiche oder gefährliche Verzögerungsstrecken hat die Griffigkeit einen hohen Stellenwert. Die Gewährleistung und die Bewahrung dieses Wert ist eine der wichtigsten Ziele des Straßenbauingenieurs. Das dient als erster Schritt zur Erreichung einer sicheren Fahrt durch die Verkehrsinfrastruktur.

Seit Jahrzehnten ist im österreichischen Autobahnbau kein Jahr ohne eine Betondeckenherstellung vergangen. Diese Kontinuität macht es möglich, das Problemstellungen und Entwicklungen in die Praxis rasch einfließen und Vorschriften und Richtlinien schnell an den Stand der Technik angepasst werden können . [1]

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Griffigkeitsprognoseverfahren für Straßenoberflächen untersucht. Dafür wird die Polierresistenz von Waschbetonprobekörper mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze geprüft.

Die Ziele der gegenständlichen Arbeit lassen sich zusammenfassen:

- Rezeptur und Erstprüfung für Waschbetonprobekörper
- Ermittlung des PWS-Wert von Beton mit Waschbetonoberfläche mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze
- Anfertigung einer Arbeitsanweisung für die Herstellung von Waschbetonprobekörpern
- Entwicklung eines Laborverfahren für die Griffigkeitsuntersuchung.

Die bei dieser Diplomarbeit gewonnenen Ergebnisse liefern die Grundlagen für die Untersuchung der Griffigkeit von Verkehrsflächen aus Wachbeton und tragen zur Entwicklung dieses Laborverfahrens bei.

2 Grundlagen zur Waschbetondecken

2.1 Waschbeton für Verkehrsflächen

2.1.1 Allgemeines

Die Betondecken sind eine kosteneffiziente Bauweisen mit hoher Lebensdauer. Hinsichtlich ihrer Eigenschaften sind sie für alle Verkehrsflächen geeignet. Unter Beachtung von wesentlichen Prinzipien in der Konstruktion, der Dimensionierung und in der Baustoffenauswahl besitzen die Betonfahrbahnen heute ein dauerhaftes Gebrauchsverhalten und eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit. Nach längerer Nutzung bleiben die Betondecken griffig, tragfähig und lärmmindernd. Diese Eigenschaften und der Zustand der Deckschichte beeinflussen sowohl den Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit einer Straße, als auch die Umweltbelastung und den Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge. In Bezug auf Ökologie sind die Betondecken heute durch gewonnene Erfahrungen bis zu 100 Prozent wiederverwendbar.

Abbildung 1: Herstellung von Betondecken mit Gleitschalungsfertiger [2]

Die Verkehrsflächen aus Beton besitzen auch eine große Verformungsstabilität unabhängig von Verkehrsbelastung und Temperatur, d. h. sie sind unempfindlich gegenüber Brems- und Antriebskräfte. Spurrinnenbildung kann unberücksichtigt werden. In Abbildung 2 ist das

Konstruktionsprinzip der Betonstraße dargestellt. Im Unterschied zu Asphaltbauweise bleibt hier die Steifigkeitsmodul E konstant, d. h. eine günstigere Übertragung von schweren Lasten auf den Untergrund.

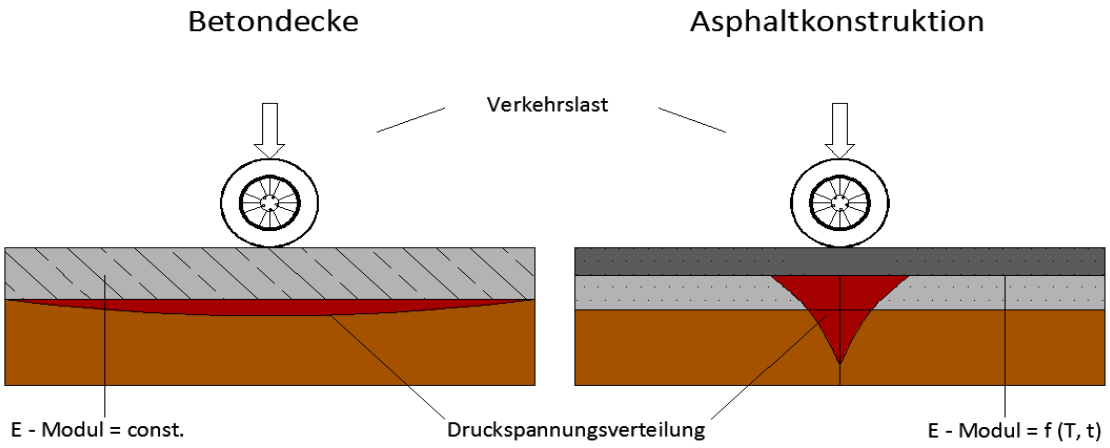

Abbildung 2: Lastabtragende Wirkung von Fahrbahnkonstruktionen, schematisch [3]

Zur Herstellung der Betonoberfläche mit Waschbetonstruktur ist auf dem fertig eingebauten, verdichteten und geglätteten Oberbeton ein dünner Film eines Nachbehandlungsmittels aufzubringen. Dieses ist eine Kombination aus Kontaktverzögerer und eines Verdunstungsschutzes. Der Verzögerer verhindert ein Aushärten des Zements in den obersten 1 – 2 mm der Betondecke. Nach Erreichen der ersten Festigkeit der Betondecke wird der Feinmörtel auf der Oberfläche ausgekehrt. [4]

Heutzutage werden Waschbetondecken wegen ihrer Festigkeit, Lastverteilung, Griffigkeit, Verschleiß- und Verformungswiderstand bei allen Verkehrsflächen eingesetzt. Diese Oberflächen bieten zahlreiche Vorteile:

2.1.2 Eigenschaften

Griffigkeit

Die Griffigkeit ist eine der wichtigsten Eigenschaften für die Sicherheit von Verkehrsflächen aus Beton bzw. Asphalt. Das ist die Wirkung der Textur oder Rauheit der Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand des Fahrzeugreifens. Die Größe dieses Reibungswiderstandes hängt auch von der Dicke des Wasserfilms, Verschmutzungen auf der Fahrbahnoberfläche, den Eigenschaften und den Zustand des Reifens sowie von der Geschwindigkeit ab. In Abbildung 3 sind die Griffigkeitseinflüssen von Materialien und Bautechnologie dargestellt.

Nach der Herstellung muss die Betonoberfläche nachbehandelt werden. Mittels Aufsprühen eines Verzögerungs- oder Nachbehandlungsmittels wird die Fahrbahnoberfläche gegen Austrocknen geschützt.

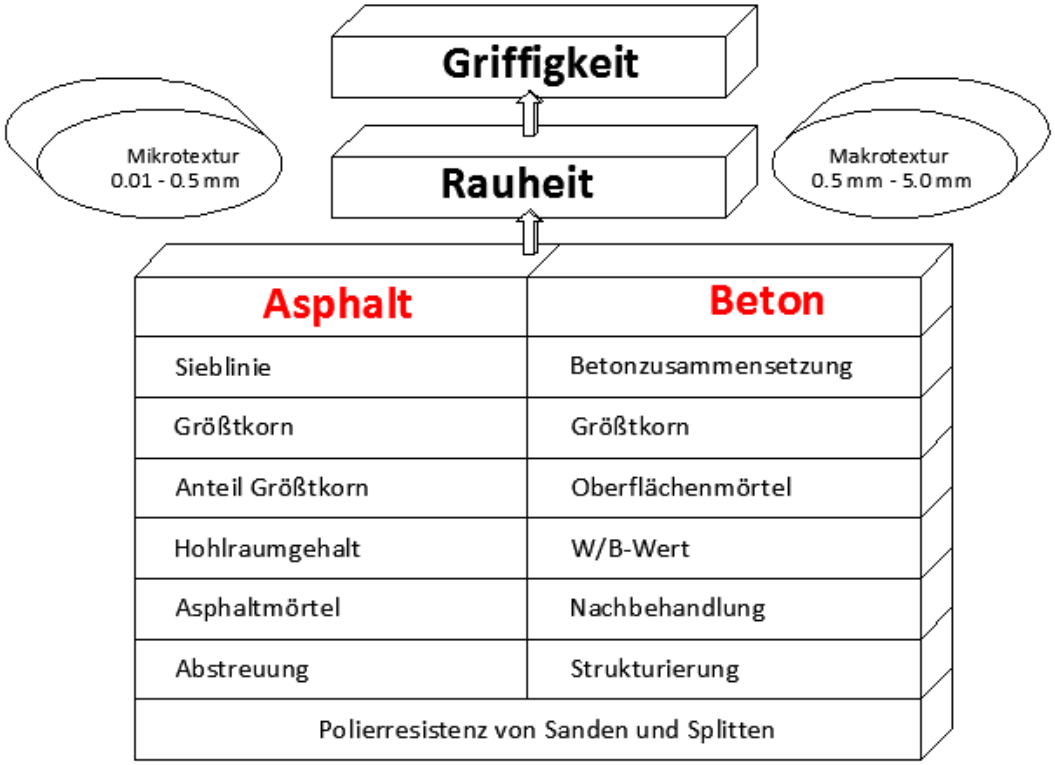

Abbildung 3: Material- und bautechnische Einflüsse auf die Griffigkeit von Fahrbahndecken [3]

Der Oberflächenmörtel, der durch das vibrierende Verdichten beim Einbau entsteht, ist zu entfernen. Deshalb wird die frische Betondecke durch Abziehen mit einem Jutetuch oder einem Stahlbesen bearbeitet. Häufig wird die Mörtelschicht auch durch trockenes oder nasses Ausbürsten freigelegt, also eine Waschbetonoberfläche entsteht (siehe Abbildung 4). [3]

Betondecken weisen in den ersten Jahren nach der Fertigstellung ein gutes Niveau der Griffigkeit auf. Diese ändert sich im Laufe der Zeit geringfügig, wenn für Ausgangsmaterialien ein stabiler Mörtel sowie polierresistente Sande und Gesteinskörnungen verwendet werden.

Abbildung 4: Ausbürsten des Oberflächenmörtels im Nassverfahren [5]

Dauerhaftigkeit

Ein wesentlicher Vorteil der Betonbauweise ist ihre Dauerhaftigkeit. In Vergleich zu den Asphaltkonstruktionen (ungefähr 20 Jahren Lebensdauer) haben die Betondecken eine längere Lebensdauer, die theoretisch mit 30 Jahren angenommen wird. Innerhalb dieser Lebensdauer könnte hinsichtlich der Baustoffeigenschaften fast keine Deckensanierung notwendig sein.

Helligkeit

Die helle Fläche der Betondecken wird die Verkehrssicherheit deutlich erhöht. Die Verkehrsteilnehmer haben eine bessere Sicht auf Personen, Markierung und Hindernisse insbesondere nachts oder in Tunnels und dadurch wird das Unfallrisiko vermindert.

In städtischen Bereich werden aufgrund der Helligkeit der Betondecken Investitionskosten für Beleuchtung eingespart. Das heißt wiederum kleine Energiebedarf und Senkung der Betriebskosten.

Bei Waschbetonoberflächen hängt die Helligkeit der Betondecke entscheidend von den verwendeten Gesteinskörnungen des Oberbetons ab und ist somit beeinflussbar. [6]

Lärmemissionen

Die Waschbetonoberfläche besitzt sehr gute lärmmindernde Eigenschaften und wird deshalb in Österreich seit 20 Jahren in Bereich von Fernverkehr benutzt. In Abb. 5 ist ein Vergleich zwischen verschiedene Verkehrsflächen dargestellt. Die Grafik zeigt, dass beim Waschbeton der so genannte LMA-Wert unabhängig von der Alterung niedrig bleibt.

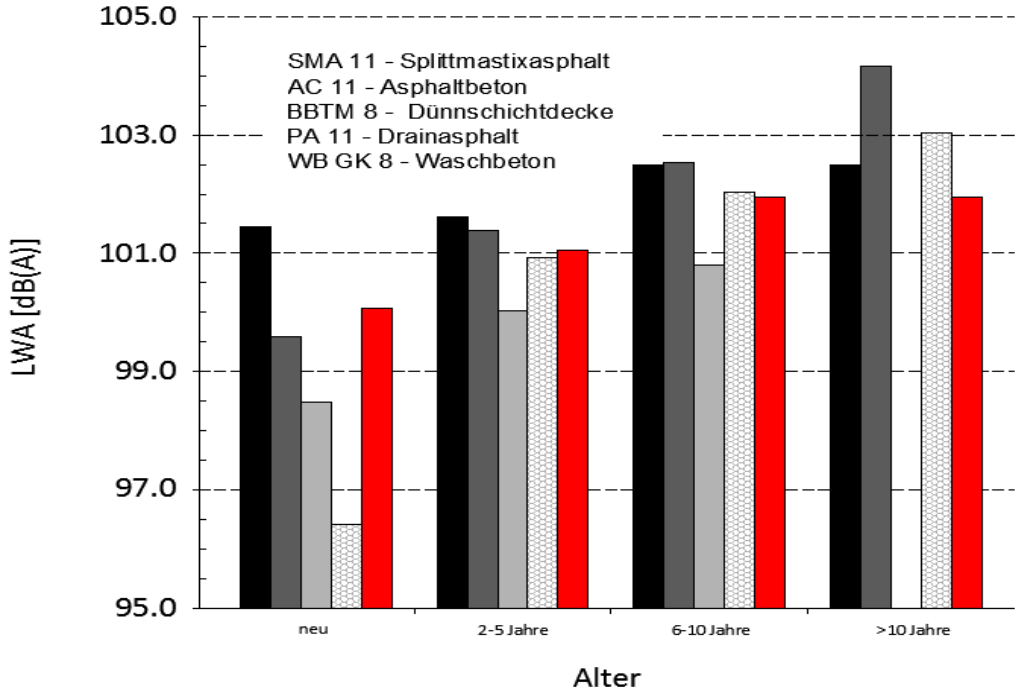

Abbildung 5: Ergebnisse der Rollgeräuschmessungen an Straßendeckschichten mit unterschiedlichem Alter bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h [3]

Die lärmmindernde Eigenschaft einer Waschbetonoberfläche liegt in ihren guten Drainagewirkung und einer verringerten Änderung von Schallwellen infolge der Wechselwirkungen zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche begründet. Die gute Drainagewirkung des Waschbetons verhindert einmal eine massive Kompression der Luft zwischen Fahrbahn und Reifen. Gleichzeitig wird der Reifen selbst weniger zum Schwingen angeregt, wenn er über möglichst viele, kleine Kontaktflächen abrollt. Dies wird durch die Profilspitzen des Waschbetons erreicht. [7]

2.1.3 Anforderungen

An Verkehrsflächen aus Beton werden strenge Anforderungen, die mit den Eigenschaften des Frischbetons (Verarbeitbarkeit, Verarbeitungsdauer) und des erhärteten Betons (Beständigkeit gegen äußere Einwirkungen) in Zusammenhang stehen, gestellt.

Anforderungen an Frischbeton

- Hohe Gleichmäßigkeit
- Gute Verarbeitbarkeit
- Ausreichende Verarbeitungszeit
- Beim Einsatz von Gleitschalungsfertigern eine ausreichende Grünstandfestigkeit

Anforderungen an Festbeton und Fahrbahndecke:

- Hohe Zugfestigkeit (Stabilität gegen Verformungen und Risse)
- Hoher Verschleißwiderstand

- Hoher Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand
- Gute Oberflächenbeschaffenheit (Ebenheit, Griffigkeit, Geräusch, Farbe, Lichtreflexion, Ableitung von Oberflächenwasser)

Damit die Fahrbahnoberfläche die große und rasch zunehmende Belastung sowie die sich ständig ändernden Temperaturamplituden übernehmen kann, müssen die Ausgangsstoffe (Gesteinskörnungen, Zement und Wasser) folgende Qualitätsanforderungen erfüllen.

Gesteinskörnungen

Die Gesteinskörnungen sind etwa 70 % des gesamten Volumens des Betons. Ihre Hauptaufgabe ist die Reduzierung des Bindemittelleims, weil die Gesteinskörnungen mit Bindemittelleim vollständig umhüllt und alle Hohlräume zwischen den Gesteinskörnern von Bindemittelleim ausgefüllt werden müssen. Das wird durch die richtige Zusammensetzung der Gesteinskörnung nach Größe und Menge erfüllt. In Tabelle 1 und 2 sind die einzelnen Anforderungen an Gesteinskörnungen für Unter- und Oberbeton dargestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Unterbeton [8]

Erforderliche Körnungen	GK 22 oder GK 32, 3 Korngruppen, davon eine mit höchstens D = 4 mm Größtkorn, die anderen mit mindestens d = 4 mm Kleinstkorn
Kornrohdichte ρ_{RD}	Angegebener Wert ± 30 kg/m^3
Kornzusammensetzung D > 4 mm	G_C 90/15 oder G_C 85/20
Kornzusammensetzung D ≤ 4 mm	GF85, Kategorie gemäß Tabelle zwei der ÖNORM EN 12620
Kornform	SI_{40}
Muschelschalengehalt	SC_{10}
Gehalt an Feinteilen grob	$f_{1,5}$
Gehalt an Feinteilen fein	f_{10}
Frost-Tau-Widerstand D > 4 mm	F_1
Frost-Tau-Widerstand D ≤ 4 mm	F_1 gemäß ONR 23303, Abschnitt 11.2
Säurelösliches Sulfat	$AS_{0,8}$
Alkali-Kieselsäure Reaktivität	Beanspruchungsklasse 2 gemäß ÖNORM B3100
Kornzusammensetzung D = 22, D = 32	Sieblinienbereich AC22 bzw. AC32

Tabelle 2: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Oberbeton [8]

Erforderliche Körnungen für GK 8, GK 11 (Waschbetonstruktur)	0/1 oder 0/2 und D = 8: 4/8 D= 11: 4/8 + 8/11 oder 4/11
Erforderliche Körnungen für ≥ GK 16 (z. B. mit Besenstrich)	3 Korngruppen, davon eine mit höchstens D = 4 mm Größtkorn, die anderen mit mindestens d = 4 mm Kleinstkorn; 4/8 kann entfallen
Kornrohdichte ρ_{RD}	Angegebener Wert ± 30 kg/m^3
Kornzusammensetzung D > 4 mm	G_C 90/15, bei Körnung D > 11/…: oder G_C 85/20
Kornzusammensetzung D ≤ 4 mm	GF85
Kornform	SI_{40}, bei Waschbeton bei Körnung D >4/…: SI_{15}
Muschelschalengehalt	SC_{10}
Gehalt an Feinteilen grob	$f_{1,5}$
Gehalt an Feinteilen fein	f_{10}
Anteil gebrochener Körner in grober Gesteinskörnung	Klasse K2 gemäß ÖNORM B3131
Widerstand gegen Zertrümmerung D > 4 mm	LA_{20}, (bestimmt gem. ÖNORM EN 1097-2 an 8/11)
Widerstand gegen Polieren D > 4 mm	PSV50 (bestimmt gem. ÖNORM EN 1097-8 an 8/11)
Widerstand gegen Polieren D ≤ 4 mm	PWS ≥ 0,50 gemäß RVS 11.06.23
Frost-Tau-Widerstand D > 4 mm	F_1
Frost-Tau-Widerstand D ≤ 4 mm	F_1 gemäß ONR 23303, Abschnitt 11.2
Säurelösliches Sulfat	$AS_{0,8}$
Alkali-Kieselsäure Reaktivität	Beanspruchungsklasse 2 gemäß ÖNORM B3100
Kornanteil ≥ 4 mm am gesamten Korngemisch bei D = 8, D = 11	≥ 68 % bzw. bei Straßenbeton mit Fließmittel
Kornzusammensetzung D = 22	Sieblinienbereich AC22 oder Ausfallkörnung mit jeweils ≥ 60% Korn aus Korngruppen mit Kleinstkorn d ≥ 4 mm

Zement für Betondecken

Zement ist das hydraulische Bindemittel, welches durch Reaktion mit Wasser erhärtet und so dauerhaften, wasserunlöslichen Zementstein bildet. Zementstein ist jener Bestandteil im Beton, der die einzelnen Gesteinskörner miteinander verbindet und daher für die Güte und Dauerhaftigkeit des Betons wesentlich ist. [8]

Neben den in Österreich üblichen Normen und Richtlinien für Zementsorten (z. B. ÖNORM EN 197 - 1) werden zusätzliche Anforderungen an die für Betonfahrbahnen verwendete Zement definiert.

- Späteren Erstarrungsbeginn- gute Verarbeitbarkeit beim hohen Temperaturen
- Max. Baline-Wert 4000 cm^2/g
- Zementtemperatur ab Werk ≤ 80°C – höhere Frischbetontemperaturen können die Rissgefahr vergrößern

Betonzusatzmittel
Die meist verwendete Zusatzstoff für Betondecken sind die Luftporenbildner. Sie erzeugen im Frischbeton sehr kleinen Poren und damit die Frost-Tau-Salzbeständigkeit verbessern. Alle andere Zusätze wie z. B. Verflüssiger oder Verzögerer müssen mit den Luftporenbildnern verträglich sein.

Zugabewasser und W/B- Wert
Wasser wird für die Hydratation des Zementes verwendet. Jedes Wasser, ohne Wasch- und Regenwasser ist brauchbar.
W/B-wert ist das Verhältnis zwischen wirksamen Wassergehalt (in kg) und dem Bindemittelgehalt. Um eine vollständige Hydratation zu erreichen muss die W/B-Wert etwa 0,4-0,5 sein. Das ist für die Güte der Betons sehr wichtig.

2.2 Hydratation des Zementes

Portlandzement besteht aus mind. 95 % Portlandzementklinker und bis zu 5 % Nebenbestandteile. Der PZ-Klinker ist auch ein Gemisch aus den vier Hauptklinkermineralen: Calciumsilikate (C_3S, C_2S), Calciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrat (C_4AF). Es gibt noch wenige Mengen an freien Calcium- und Magnesiumoxide dazu.

Die wichtigsten Hauptklinkermineralien für die Erstarrung sind das C_3A und C_3S. Die Frühfestigkeit wird durch das C_3S und die Endfestigkeit nach Menge vom C_2S bestimmt.

2.2.1 Hydratation des C_3A

Die Reaktion des C_3A hängt von ausreichendem Sulfatangebot ab. Ohne Sulfat reagiert C_3A sehr schnell mit Wasser und bildet dünne und metastabile Calciumaluminathydrate C_4AH_{13} und C_2AH_8. Das führt einerseits zu einer schnellen Erstarrung und andererseits wird die Wassertransport durch einen Überzug an die C_3A-Oberfläche reduziert. Im weiteren Verlauf wandeln sich die metastabilen Phasen (C_4AH_{13} und C_2AH_8) in stabiles C_3AH_6 um, wodurch die dichte Hülle um das C_3A- Korn aufgebrochen wird und die Reaktion wieder beschleunigt wird. [7]

Wenn nicht genug Calciumsulfat zur Verfügung steht, bildet sich in den ersten Minuten eine Ettringithülle auf der C_3A-Oberfläche. Das führt zur Verzögerung der weiteren C_3A-Reaktion, durch Verhinderung von dem Wassertransport. Solange ausreichender Sulfat vorhanden ist, wird stets eine geringe Menge an Ettringit gebildet, wodurch die Ettringithülle zum Teil aufgebrochen und durch neuen Ettringit wieder geschlossen wird. Am Anfang des Erstarrungsbeginns formen sich langnadeligen Ettringitskristalle, die eine Abdichtungs-funktion auf den C_3A-Körnern nicht mehr haben. Zurzeit erstarrt der Zement durch die ineinander verzahnenden Ettringitkristalle.

2.2.2 Hydratation des C_3S und C_2S

Zwischen beide Mineralien reagiert das C_3S viel schneller. Da es zudem auch den großen Mengenanteil des C_3S im Zement gibt, wird seine Hydratation und Festigkeitsentwicklung Großteil aus die Hydratation und Festigkeitsentwicklung des Portlandzementes bestimmt. Deshalb in Abbildung 6 dargestellte Hydratationsperiode von C_3S und einem PZ CEM I 32,5 R sehen fast gleich aus.

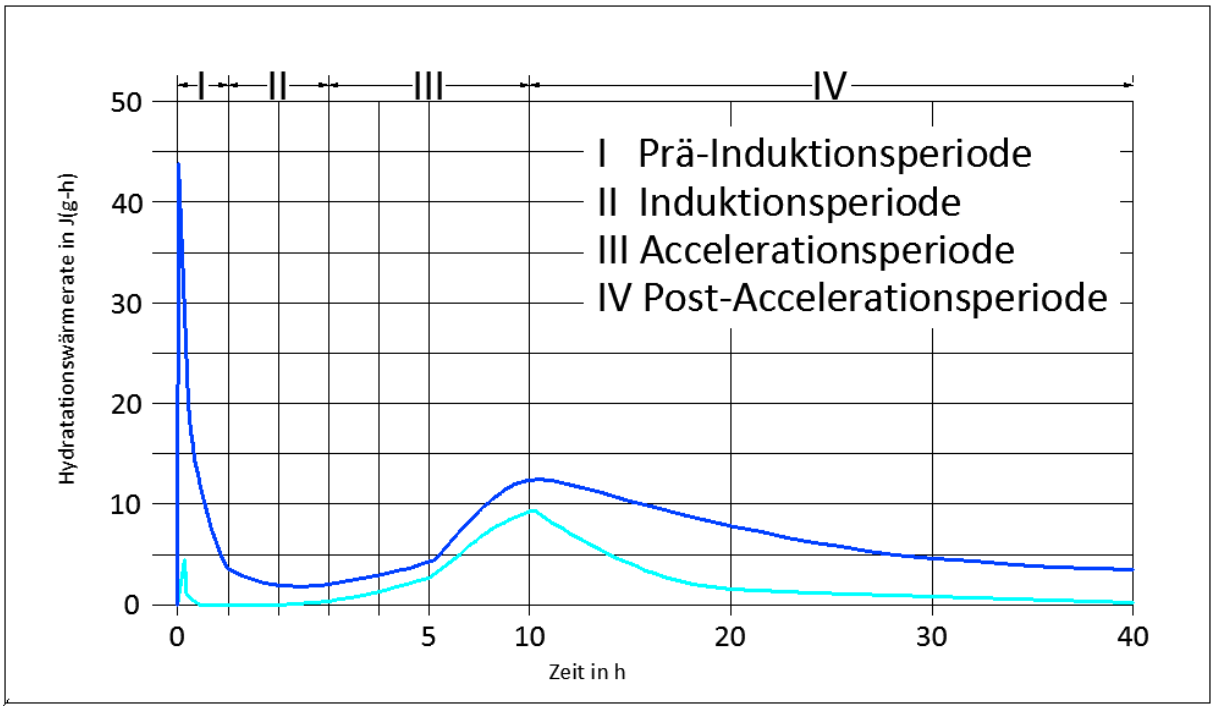

Abbildung 6: Hydratationswärmeraten und Hydratationsperioden von C_3S und Portland-Zement (CEM I 32,5 R) [7]

Die Anfangsreaktion des C_3S in der Prä-Induktionsperiode ist sehr rasch. In Rahmen einige Sekunden bis Minuten bildet sich an der C_3S-Oberfläche eine dünne Reaktionsschicht. Bis zu ca. 30 Minuten dauert die Hydratation von etwa 0,1-2 % des C_3S. Diesem entspricht bei einer angenommenen spezifischen Oberfläche von 300 m^2/kg eine Dicke der Reaktionsschicht zwischen 1 – 20 nm. [9]

In der nächsten Hydratationsperiode, die Induktionsperiode oder auch Dormante Phase genannt wird, ist nur eine kleine Umsetzung zu sehen. Der Grund dafür ist von verschiedenen Autoren diskutiert worden, aber es gibt keine einzige Theorie, die sie völlig umfasst.

Im Laufe der Zeit schließt sich die Accelerationsperiode an. In dieser Phase bilden sich nun Calciumhydroxidkristalle und das führt zur Erstarren. Die Reaktionsgeschwindigkeit steigt mit der Steigung der Wärmefreisetzung bis zu erreichen von ein Maximum und dann geht wieder herunter.

Die letzte Phase der C3S-Hydratation wird als stetige Periode bezeichnet. Nun überwiegen die langsamen Diffusionsprozesse, so dass eine sehr langsame Bildung von Hydratationsprodukten erfolgt. [7]

2.3 Verzögerung der Zementhydratation

Im Prinzip wird durch die Verzögerung von Zementhydratation das Erstarren des Betons oder auch dem Festigkeitsentwicklung beeinflussen. Entweder wird der Verzögerer direkt in den Frischbeton zugeben oder auf die Oberfläche verteilt.

Für die Herstellung von Verkehrsfläche aus Beton und insbesondere Waschbeton wird der Oberflächeverzögerer (OVZ) benutzt. Zu diesem Zweck sind die Verzögerer entweder auf die frische Oberfläche aufgebracht (Positivverfahren), oder auf die Schalung eingetragen (Negativverfahren). Im Straßenbau verwendet man nur die Positivverfahren.

Beim Waschbeton ist es sehr wichtig, dass der OVZ nicht nur das Erstarren, sondern auch die Erhärtung verzögert. Die Entfernung der dünnen Schicht des Oberflächenmörtels muss ohne Verlust auf die untere Beton bringen garantiert werden, so dass der untere Beton nicht beschädigt wird.

2.3.1 Stoffe, die die Zementhydratation verzögern

In Tabelle 3 sind mögliche Wirkstoffe, die auf die Zementhydratation eine verzögerte Wirkung haben, dargestellt.

Tabelle 3: Wirkstoffe, die als Verzögerer in Frage kommen [7]

Anorganische Verzögerer	Organische Verzögerer
Phosphate	Ligninsulfonate
Borate	Hydroxycarbonsäuren und deren Salze
Salze mit (Blei, Zink, Kupfer, Arsen und Antimon)	Phosphonate
	Zucker

2.3.2 Wirkungsweise des Verzögerers

Bei der Wirkung eines Verzögerers spielen sein Wirkstoff (Wirkstoffkombination), die Zugabemenge und der Zugabezeitpunkt sehr wichtige Rolle. Aus der Abbildung 7 Ist ersichtlich, dass die Zugabemenge unterschiedlichen Einfluss auf den Verzögerer ausübt: statt Verzögerungseffekt könnte ein Beschleunigungseffekt beobachtet werden.

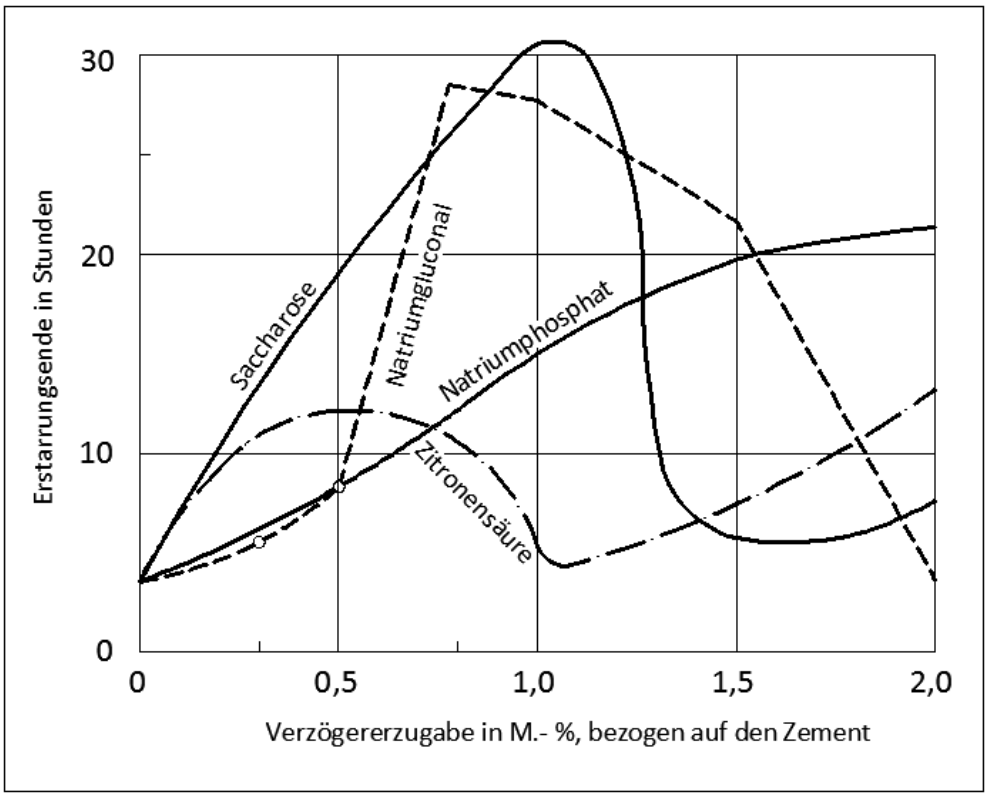

Abbildung 7: Einfluss der Verzögerermenge auf das Erstarrungsende von Zementleim. [7]

2.3.3 Andere Einflüsse auf die Zementhydratation

Die Betonrezeptur hat auch eine besondere Einwirkung auf die Verzögerung der Zementhydratation. Es ist zu unterscheiden zwischen Verzögerer für Transportbeton und OVZ. Beim Transportbeton ist eine lineare Beziehung zwischen der Zementmenge und dem verbrauchten Verzögerer zu merken, d.h. es ist nur auf die Dosierung aufzupassen. Die Wirkung dieses gewöhnlichen Verzögerers hängt auch von der Konsistenz des Frischbetons ab. Weichere Betonmischungen sind leicht und lang zu verzögern. Die Verwendung eines OVZs ist komplizierter, weil es neben der reinen Wirkung des Verzögerers noch der Eindringtiefe des Wirkstoffes, von dem die Ausbürsttiefe abhängig ist, in Frage kommt.

Die Wirkung des Verzögerers ist noch von klimatischen Bedingungen begrenzt. Ein Anstieg der Temperatur bewirkt neben einer schnelleren Erhärtung auch eine Verkürzung der Erstarrungszeit. Von der Praxis ist bekannt, dass bei der Herstellung von Waschbetondecken bei Temperaturen über 30°C die Wirkung der OVZ stark abnimmt.

2.4 Untersuchungsmethoden im Labor

2.4.1 Herstellung der Probekörper

Zur Herstellung der Probekörper im Labor werden Stahlformen mit Maßen 30 cm x 30 cm x 5 cm verwendet. Als Grundplatte wird eine 22 mm dicke Schalplatte (Siebdruckplatte) benutzt.

Unter der Schalplatte wurden miteinander verschweißte Flacheisen (30 mm x 10 mm) befestigt. Während des Verdichtens wird die Form mittels eine Elektromagnet gehalten.

Der Herstellungsbeginn wird kurz nach Mischende (5-10 min) erfolgen. Es wird eine bestimmte Einwaage durch die Frischbetonrohdichte und Volumen der Form bestimmt. Beim Einfüllen dieser Einwaage in die Form ist zu beachten, dass die Ecken der Form vollständig mit Beton ausgefüllt werden. Erst nach Einfüllen des Betons wird die Mischung durch Verdichten auf dem Rütteltisch gleichmäßig in der Form verteilt. Die Oberfläche des Betons wird dann geglättet.

Zwischen 30 und 35 Minuten nach Mischende werden die Probekörper in einen Klimaraum gebracht und nochmal geglättet. Das ist notwendig, weil beim Transport teilweise Luftblasen an die Oberfläche entstehen. Die Klimabedingungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

45 Minuten nach Mischende wird ein Kombimittel durch eine Drucksprühflasche an den Oberfläche aufgetragen. Die Auftragsmenge wird mit einer Waage kontrolliert und durch eine Schablone sichergestellt, dass nur die geglättete Betonoberfläche besprüht wird. Die Probekörper bleiben im Klimaraum bis zum Anfang der Ausbürstens. [7]

Tabelle 4: Verwendete Klimabedingungen

		Normal-klima	**sommerliche Bedingungen**	**herbstliche Bedingungen**
Abk.		N	So	He
Temperatur	[°C]	20	30	15
relative Luftfeuchte	[%]	65	40	70

2.4.2 Plattenausbürsten

Die Ausbürstzeiten sind von der Lagerung und den Klimabedingungen abhängig. Die variieren von 4 Stunden nach Mischende bei höheren und bis zu 24 Stunden nach Mischende bei niedrigen Temperaturen.

Die schwierigste Aufgabe bei der Standardisierung des Ausbürstens ist der subjektive Einfluss des Bearbeiters zu minimieren. Hierzu komm auch der Einfluss aus dem Ausbürstwerkzeug. Bei [10] ist ein Vergleich zwischen einer Kunststoffwurzelbürste und einer Drahtbürste dargestellt. Die geprüfte Betonplatten werden 60 Minuten nach Herstellung mit einem Kombinationsmittel besprüht und bei 20 ° C und 65 % r. F. gelagert. Die Differenz zwischen beiden Werkzeuge war rund 30 %. Am Ende die Drahtbürste erscheint als günstiger, weil bei Ausbürsten mit einer Drahtbürste geringe Schwankungsbreiten als bei einer Kunststoffwurzelbürste zu erwarten sind.

Um den Einfluss des Bearbeiters zu minimieren, wird vor Beginn der Untersuchungen festgelegt, wie das Ausbürsten mit der Drahtbürste zu erfolgen ist. Die Drahtbürste soll dazu mit der gesamten Fläche parallel zu den Außenkanten bei gleichmäßigem Druck über die

Betonoberfläche geführt werden. Zur Stabilisierung wird die Drahtbürste am Griff und am vorderen Ende gefasst und ohne ein Verkanten über die Fläche geführt. Das Ausbürsten erfolgte solange, bis kein weiterer Abtrag mehr eintrat. [7]

2.4.3 Bestimmung der Rautiefe

24 Stunden nach der Herstellung der Platten wird der Rautiefe bestimmt. Dafür wird die Sandfleckmethode (DIN EN 13036-1, 08/2001) verwendet. Eine Prüfung direkt nach dem Ausbürsten ist nicht effektiv, weil der Prüfsand aufgrund der Feuchtigkeit des Betons seine granulometrischen Eigenschaften ändert. Die Messungen werden mit ein Glasperlensand der Körnung 0,18-0,25 mm gemacht. Mindestens 2 Messungen werden in der Mitte der Platte mit einem Sandvolumen von 25 bzw. 40 ml ausgeführt. Die Flächenberechnung des Kreises erfolgte über seinen Durchmesser. Für die Untersuchungen jedes Kombinationsmittel wird eine Platte hergestellt und die Mittelwert von den 2 Messungen genommen.

3 Probekörperherstellung

3.1 Verwendete Materialien

3.1.1 Zement

Der verwendete Zement ist bereits in Betonstraßenbau zum Einsatz gekommen. Alle Versuche werden mit CEM II/B-S 42,5 N (DZ) durchgeführt. Das ist ein Spezialzement, der für die Herstellung von Betondecken für Verkehrsflächen gem. österreichischer Betonnorm ON B 4710-1 und RVS 08.17.02, geeignet ist. Laut Datenblatt wird die Wärmeentwicklung beim Erhärten durch die Beschränkung der Mahlfeinheit reduziert und so die Rissbildung in der Betondecke vermieden. Die hohe Biegezugfestigkeit (siehe Tabelle 5) dieses Zementtyps trägt wesentlich zu einer hohen Belastbarkeit und damit zur Dauerhaftigkeit der Betondecke bei. Das ermöglicht auch einen abgestimmten Erstarrungsbeginn der planmäßigen Verarbeitung des Betons.

Tabelle 5: Eigenschaften von CEM II/B-S 42,5 N (DZ)

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1
Dichte in kg/dm^3	3,05	-	-
Druckfestigkeit (bei 20°C) in MPa (=N/mm^2)			
1 Tag	9	-	-
2 Tage	20	≥ 10	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	57	≥ 42,5 ≤ 62,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20°C) 28 Tage in MPa	9	-	≥ 7
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm^2/g	3.700	-	≤ 4.000
Erstarrungsbeginn (bei 20°C) in min	180	≥ 60	≥ 120
Bluten in cm^3 nach 120 min	-	-	-
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	-	-	-
Sulfatbeständigkeit bzw. C_3A-frei	Nein	-	-
Na2O-Äquivalent am Zement in %	> 0,9		
Na2O-Äquivalent am Klinker in %	≈ 0,75		

3.1.2 Gesteinkörnung

Alle Untersuchungen werden mit Klöcher Basalt durchgeführt. Für die feine Gesteinskörnung werden EBK 0/2 GS und für die grobe Gesteinskörnung EBK 4/8 GS eingesetzt. Gleiche Korngruppen werden beim Neubau der A9 Pyhrautobahn, Abschnitt Schwarzlsee-Wildonn verwendet. Aufgrund der relativ großen Polierresistenz sind diese Gesteinskörnungen Betonstraßenbau für die Herstellung von Waschbetonoberflächen eigesetzt. Die Sieblinie von der GK 8 ist in Tabelle 6 und Abbildung 8 dargestellt.

Tabelle 6: Siebdurchgang EBK 0/2 und EBK 4/8

Sieb-nenn-weite [mm]	Nr.	1	2	Gesamtsieblinie
	Körnung	EBK 0/2	EBK 4/8	
	Herkunft	Klöch	Klöch	
	L Nr.	19 08 14/7	19 08 14/7	
	Anteil	30 M%	70 M%	100 M%
0,063	Sieb-durch-gang [Masse %]	6,2	0,0	1,9
0,125		10,1	0,0	3,0
0,25		17,8	0,0	5,3
0,5		30,2	0,0	9,1
1		52,9	0,7	16,4
2		89,7	1,3	27,9
4		100,0	11,4	38,0
8		100,0	93,1	95,2
11		100,0	100,0	100,0
16		100,0	100,0	100,0
22		100,0	100,0	100,0
32		100,0	100,0	100,0
45		100,0	100,0	100,0
63		100,0	100,0	100,0

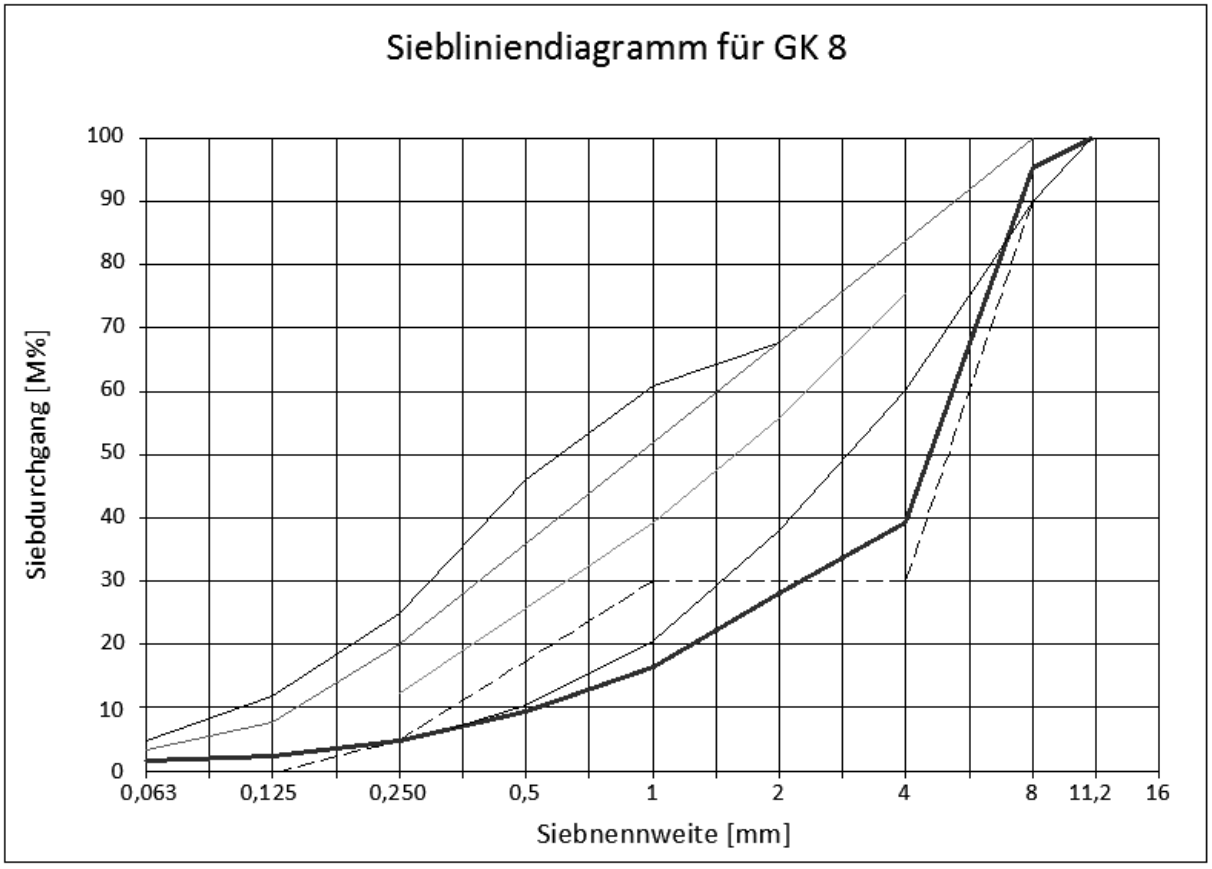

Abbildung 8: Siebliniendiagramm für GK8 Klöch

3.1.3 Zusatzmittel

3.1.3.1 Fließmittel

Das verwendete Fließmittel ist PROFLUID VP3 genannt. Das ist ein Produkt der Firma TAL Betonchemie. PROFLUID VP3 ist ein gebrauchsfertiges Superfließmittel der neuesten Generation, welches in Kombination mit allen Normenzementen eingesetzt werden kann. Es ist für den Einsatz auf der Baustelle und im Transportbetonwerk geeignet. Es wird empfohlen, dass das Fließmittel gemeinsam mit dem Anmachwasser in den Frischbeton zu dosieren. Die genauen Zugabemengen werden in Vorversuchungen bestimmt, jeweils ist die Höchstdosierung 2,5% auf die Zementmenge bezogen.

Profluid wird für eine Verringerung der Grenzflächenspannung innerhalb des Frischbetons benutzt. Dadurch kommt es zu einer intensiveren Durchmischung mit dem Anmachwasser. Es ist geeignet zur Herstellung von Beton mit hoher Früh- und Endfestigkeit, besonders für hochwertige Betonsorten und hohe Güteklassen. Die technischen Daten sowie die Leisutng von Profluid sind in Tabellen 7 und 8 dargestellt. [11]

Tabelle 7: Technische Daten Profluid VP3

Technische Daten	
Form	Flüssig
Farbe	Bernstein
Dichte	ca. 1,08 g/cm^3

Tabelle 8: Erklärte Leistung von Fließmittel Profluid VP3 [11]

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Chloridgehalt	chloridfrei	EN 934-2: T3.1/3.2
Alkaligehalt	Max. 8,0 M. -%	
Korrosionsverhalten	Enthält nur Bestandteile nach EN 934-1:2008, Anhang A.1	

3.1.3.2 Luftporenbildner

Als Mikroluftporenbildner wird der Produkt PROAIR NVX benutzt. Dieser Luftporenbildner ist chloridfrei und mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar. Er wird von demselben Hersteller produziert und ist mit dem ausgewählten Fließmittel kombinierbar. Vor dem Einsatz von Proair NVX ist eine Eignungsprüfung durchzuführen, aber die von der Hersteller empfohlene Dosierung ist mit 0,2-0,9% auf das Zementgewicht begrenzt.

Wenn Proair NVX gemeinsam mit dem Anmachwasser dosiert wird, führt er Mikroluftporen in den Beton ein, die für die Herstellung von XF-Betonen und WU Betonen unerlässlich sind.

Es ist darauf zu achten, dass eine längere Mischdauer, fast doppelt als bei Normalbetone, notwendig ist. Kurze Beschreibung der technischen Daten des Produkts findet man in Tabelle 9. In Tabelle 10 wird die Leistung der Proair NVX beschrieben. [11]

Tabelle 9: Technische Daten Proair NVX

Technische Daten	
Form	Flüssig
Farbe	Braun
Dichte	ca. 1,02 g/cm^3

Tabelle 10: Erklärte Leistung von Luftporenbildner Proair NVX 1:4 [11]

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Chloridgehalt	chloridfrei	EN 934-2: T5
Alkaligehalt	Max. 4,0 M. -%	
Korrosionsverhalten	Enthält nur Bestandteile nach EN 934-1:2008, Anhang A.1	
Druckfestigkeit	Nach 28 Tagen: Prüfmischung ≥ 75 % der	
Luftporengehalt	Prüfmischung ≥ 2,5% Volumenanteil über der Kontrollmischung Gesamtluftgehalt 4 % bis 6 % Volumenanteil	
Luftporenkennwert	Abstandsfaktor in der Prüfmischung ≤ 0,200 mm	
Gefährliche	NPD	

3.1.4 Oberflächenkontaktverzögerer

Der ausgewählte Waschbetonverzögerer für diese Untersuchungen ist TAL WB OFK-E. Dieser bildet mit dem frischen Zementleim Komplexverbindungen, die ein Abbinden des Betons für lange Zeit verhindern. Es entsteht aber eine Phasengrenze, unterhalb derer der Beton ungehindert erhärtet und seine normale Festigkeit erreicht. Zugleich schützt der resultierende Film die Betonoberfläche vor zu rascher Austrocknung und übermäßiger Erwärmung.

TAL WB OFK-E wird sofort nach der Herstellung durch eine Spritzpistole gleichmäßig auf die Probenoberfläche aufgesprüht. Nach dem Erhärten des Betons wird die Oberfläche ausgewaschen oder mit Drahtbürste ausgebürstet. Normalerweise die Auftragsmenge beträgt etwa 200 g/m^2. Nach den ersten Versuchen wurde eine genauere Dosierung ermittelt, da die Auswaschtiefe auch von der Betonzusammensetzung abhängt. In Tabelle 11 werden die technischen Daten dieser OVZ dargestellt.

Tabelle 11: Technische Daten von TAL WB OFK-E

Technische Daten	
Form	Dispersion
Farbe	Blau
Dichte	ca. 0,99 g/cm^3

3.2 Laborausrüstung

3.2.1 Betonmischer

Für die Mischung des Betons wird ein Zwangsmischer DZ60VS benutzt (Abbildung 9). Er ist für fein- und grobkörniges Mischgut bis zu einer Korngröße von 16 mm geeignet. Die einstellbaren Mischwerksteilen und das Direktgetriebe (siehe Abbildung 10) garantieren bereits ab Kleinstmengen ausgezeichnete Mischergebnisse. Der Trommelinhalt des Mischwerks beträgt 100 l für eine ganze Mischmenge von 60 l.

Abbildung 9: Zwangsmischer [12]

Abbildung 10: Der DZ 60 VS Getriebe [12]

3.2.2 Schalungen

Zur Herstellung der Betonplatten werden klappbaren Schalungen aus Holz mit Maßen 30 cm x 28 cm x 4,5 cm verwendet (siehe Abbildung 11). Wegen dieser kleinen Dimensionen kann fast keine Seitenspannung in die Schalungen entstehen und die Seiten sowie die Grundplatte sind mit kleinen Klammern befestigt. Das erlaubt ein mühelos und schnell Ausformen. Auf der unteren Seite der Grundplatte sind zwei Schlitze (siehe Abbildung 11) geschnitten, damit die Schalungen ohne andere Hilfsmittel auf den Rütteltisch sichergestellt werden können.

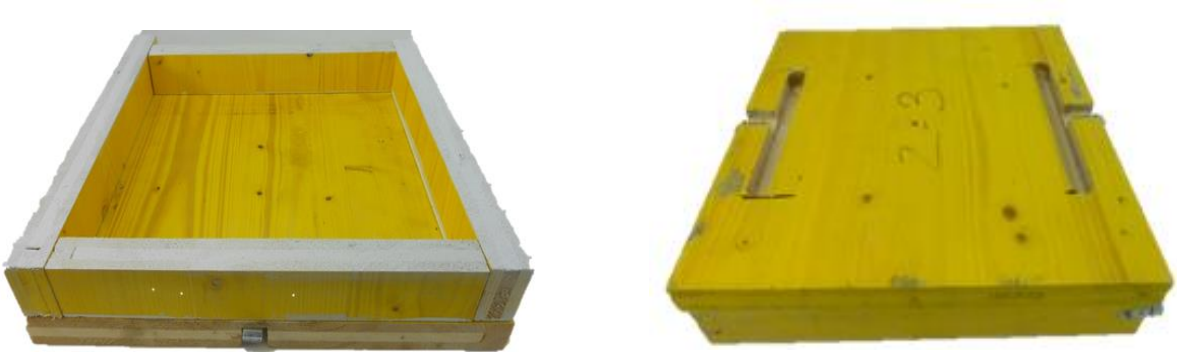

Abbildung 11: Schalungen von oben und unten

3.2.3 Rütteltisch

Das Verdichten von Beton wird mit Hilfe eines mobilen Rütteltisches (Abbildung 12) der Firma Beckel durchgeführt. Das Gerät hat eine Drehzahlregelung und ein Zeitschaltwerk. Die maximale Leistung ist 10500 UpM. Die zu verdichtete Betonplatte wird mittels zwei Bandeisen auf den Rütteltisch gehalten. Es ist wichtig der Rütteltisch waagerecht zu positionieren, um die Plattenoberfläche parallel zu der Schalung zu halten. So wird der Beton gleichmäßig in die Schalung verteilt. Für die gute Umfüllung der Ecken ist eine Spachtel zu benutzen.

Abbildung 12: Rütteltisch

3.2.4 Luftgehaltsprüfer

Der Gehalt an Mikroluftporen im Frischbeton wird mit einem 8 Liter Luftgehaltsprüfer (siehe Abbildung 13) kontrolliert. Das Gerät besteht im Wesentlichen aus 2 Teilen – einem Topf und einem Deckel. An dem Oberteil sind die Luftpumpe, sowie ein Kipphebelventil und zwei Absperrventile. Der Deckel wird durch drei Schnellspanner an den Unterteil befestigt. 10 Minuten nach der Herstellung muss der Luftporengehalt bestimmt werden. Die Luftporen in den Frischbeton müssen 4-5 Vo % sein.

Abbildung 13: Luftgehaltsprüfer 8 Liter

3.3 Plattenherstellung

3.3.1 Betonrezeptur

In diesem ersten Versuchsprogramm sind die entsprechenden Mengen von Gesteinskörnungen, Zement, Wasser und Zusätze für eine Gesamteinwaage von 40 kg berechnet. Der erhaltene Beton ist für die Herstellung von 4 Platten genügend.

Tabelle 12: Betonrezeptur für erstes Versuchsprogramm

CEM II/B-S 42,5 N (DZ)	g	7183,2	18 %
Gesteinskörnung trocken: EBK 0/2 fk5 GS EBK 4/8 GS	g	 8975,0 20936,2	 22 % 52,5 %
Gesamtwasser	g	180	7,5 %
Gesamteinwaage	g	40000	100 %
PROFLUID VP3	g	43,1 (0,6 %ZM)	-
PROAIR NVX	g	10,8 (0,15 %ZM)	-
TAL WB-OFK-E	g	16,8 (200g/m^2)	-
Wirksamer W/B Wert	-	0,4	-

3.3.2 Versuchsbeschreibung

Zur Herstellung des Betons wird getrocknete Gesteinskörnung verwendet. Zuerst wird die grobe Gesteinskörnung EBK 4/8 mit dem Zement in einem Zwangsmischer 30 Sekunden trocken gemischt (siehe Abbildung 14). Anschließend wird die feine Gesteinskörnung zugegeben und noch Mal 30 Sekunden gemischt (siehe Abbildung 15). Die Herstellung der Betone wird bei Temperaturen zwischen 18 – 22 °C erfolgt.

Abbildung 14: Mischung von Zement und grobe GK

Abbildung 15: Feine GK

Danach wird die ausreichende Menge von Wasser, Fließmittel und Luftporenbildner zusammen gemischt und in den Mischer hinzugefügt. Die Mischzeit beträgt etwa 5 Minuten. 120 Sekunden nach dem Mischenden wird das Luftporengehalt des Frischbetons bestimmt (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16: FM und LB abwiegen

Abbildung 17: Wasserzugabe

Mittels eines Luftgehaltsprüfers wird den Gehalt von Luftporen in dem Frischbeton gemessen. Der Topf wird bis zur oberen Kante mit Beton gefüllt und dann kurz auf den Rütteltisch verdichtet. Nach der Bestimmung wird der Beton in den Mischer zurückgegeben und kurz durchgemischt. Der Frischbeton ist dann für Probeplattenherstellung fertig.

Abbildung 18: Bestimmung der Luftgehalt des Frischbetons

Das Herstellen der Probeplatte beginnt sofort nach Mischende. Vor dem Befüllen werden die Schalungen für leichtere und schnelle Ausformen mit einem Schaltrennmittel gestrichen. Mittels Frischbetonrohdichte und dem Volumen der Form wird die erforderliche Einwaage bestimmt. Der Beton wird vollständig in die Form gefüllt, wobei zu beachten ist, auch die Ecken der Form mit Beton gut auszufüllen. Anschließend wird die Platte auf dem Rütteltisch gelegt und verdichtet. Der Verdichtungsvorgang dauert rund 30 Sekunden oder bis gleichmäßige Verteilung des Betons in die Schalung. In Abbildung 19 ist das Verdichten des Betons auf dem Rütteltisch dargestellt.

Abbildung 19: Verdichten des Betons

Nach der Herstellung wird die Oberfläche mittels einer Glättekelle nachgeglättet (siehe Abb. 20 links). Danach werden die Proben in einen Klimaraum gebracht und anschließend den entstandenen Luftblasen mit wenigen Strichen beseitigen. Die Lagerung findet bei Temperaturen von 18 - 20 ° C statt.

3.3.3 Auftrag des Betonverzögerers

Alle Untersuchungen in Rahmen dieser Arbeit werden mit einem Kombinationsverzögerungsmittel durchgeführt. Das Kombinationsmittel wird 30-35 Minuten nach dem Mischenden auf der Oberfläche aufgetragen (siehe Abbildung 20 rechts). Durch eine Drucksprühflasche (siehe Abbildung 20) wird die erforderliche Menge gleichmäßig besprüht. Zur Kontrolle werden die Probeplatten auf einer Waage vor und nach dem Auftrag abgewogen. Bis zum Ausbürstzeitpunkt bleiben die Platten im Klimaraum.

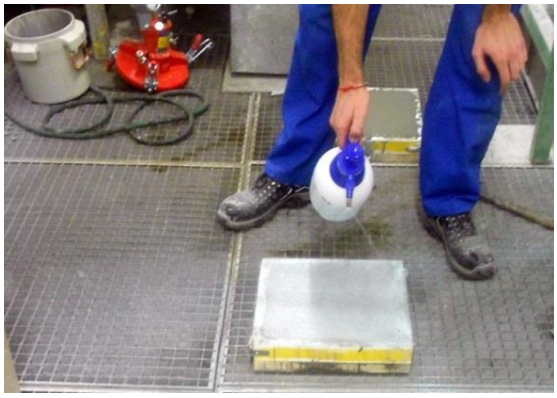

Abbildung 20: Auftrag des Oberflächenverzögerer auf die Frischbetonoberfläche (rechts); Glatten der Probekörer mittels einer Glättekelle (links).

3.3.4 Plattenausbürsten

Für die Zwecke dieser Arbeit werden die Probekörper nach verschiedenen Zeiten ausgebürstet. Die klimatischen Bedingungen bleiben unverändert (20 °C/ 50 % r. F.), weil die nicht für unser Ziel bestimmend sind. Die Ausbürstzeitpunkte variieren von 5,5 bis 6,5 Stunden. Die ersten drei Probekörper werden 5,5 Stunden nach dem Auftrag der OVZ ausgebürstet. Das Ausbürsten von dem nächsten drei erfolgt nach 6 Stunden und von den letzten nach 6,5 Stunden.

Beim nicht maschinellen Ausbürsten ist es schwierig, den subjektiven Einfluss des Bearbeiters zu minimieren. Vor Beginn wird mit einigen Untersuchungen definiert, wie eigentlich das Ausbürsten zu erfolgen ist. Die Kunststoffwurzelbürste muss mit der gesamten Fläche parallel zu den Außenkanten bei möglichst gleichmäßigem Druck über die Betonoberfläche geführt werden. Zur Stabilisierung wird die Kunststoffwurzelbürste am Griff und am vorderen Ende gefasst und ohne Verkanten über die Fläche geführt. Das Ausbürsten erfolgt so lang, bis kein weiterer Abtrag mehr eintritt. In Abbildung 21 ist die Kunststoffwurzelbürste dargestellt. [7]

Abbildung 21: Kunststoffwurzelbürste

3.4 Probekörper vorbereiten

Für die Untersuchungen werden insgesamt neun Probeplatten von drei Serien (drei Mal drei Proben) hergestellt, die anschließend mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze einer Polierwertbestimmung unterzogen. Vor und Nach dem Poliervorgang wird die Oberflächentextur der Probekörpers ermittelt. Die Platten werden nach der Herstellung von 20 Tage bei Temperaturen von 20°C gelagert. Anschließend werden die Betonprobekörper in eine 45 mm dicke Scheibe mit einem Durchmesser von 225 mm mittels eines Diamant-Bohrers gebohrt. Die Oberflächen müssen repräsentativ, sauber und eben sein.

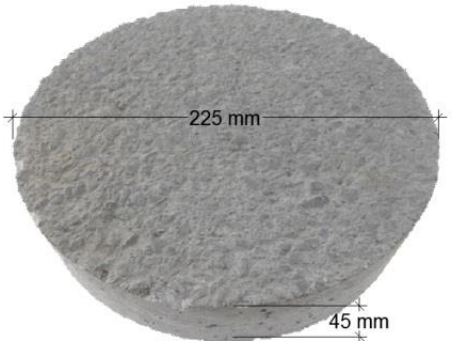

Abbildung 22: Ausbohren des Probekörpers (links); Dimensionen des Probekörpers (rechts)

3.5 Bestimmung der Rautiefe

Nach der Herstellung der Probekörper wird zuerst ihre Makrotexturtiefe durch eines volumetrischen Verfahren bestimmt. Laut der europäischen Norm EN 13036-1 muss die Prüffläche trocken und sauber sein. Deshalb wird die Rautiefe mindestens einen Tag nach dem Bohren bemessen, weil durch die Feuchtigkeit in den Probekörper der Prüfsand seine granulometrischen Eigenschaften ändert. Bei diesem Prüfverfahren wird eine bekannte

Materialmenge auf die Betonoberfläche ausgebreitet, den Durchmesser als bedeckten Fläche gemessen und anschließend die mittlere Tiefe zwischen dem Grund der Hohlräume in der Betonoberfläche und den Gesteinsspitzen der Deckschicht berechnet. [13]

Die wesentlichen Bestandteile der verwendeten Ausrüstung sind auf Abbildung dargestellt.

Abbildung 23: Laborausrüstung für Rautiefeprüfung

1. Lineal
2. Verteilerwerkzeug
3. Zylindrische Metallbehälter
4. Bürste

Als Prüfmaterial ist runde Glasperlensand zu verwenden. Die Glaskugel müssen zu mindestens 90 % Massenanteil ein Sieb mit 0,25 mm Lochweite passieren und auf einem Sieb mit 0,18 mm Lochweite nach ISO 565 zurückgehalten werden. Das Material wird in ein Behälter aus Metall mit bekanntem Volumen (25 ml) bis zur obere Kante hin gefüllt. Vor dem Aufbringen des Glassandes wird die Oberfläche mit Borstenbürste gereinigt. Anschließlich wird der Sand über die Probenoberfläche geschüttet und sorgfältig mit einer Scheibe, die gummibeschichtet ist, bis zum Befühlen der Hohlräume verteilt. Die Flächenberechnung, dem vom Glassand bedeckten Kreis erfolgt über seinen Durchmesser, der mit zwei senkrecht zueinander stehenden Linien durch den Mittelpunkt des Kreises bestimmt wird. Als Ergebnis nehmen wir den mittleren Wert von beiden Untersuchungen.

Die mittlere Oberflächentexturtiefe (MTD) wird mit folgender Formel berechnet:

$$MTD = 4V / \pi D^2$$

Die Ergebnisse werden im Abschnitt 5.3.3. dargestellt.

4 Laborverfahren zur Prognose des Polierwiderstandes- Wehner/Schulze

4.1 Anwendungsbereich

Mit dem von Wehner/Schulze entwickelten Verfahren wird der Polierwert PWS von Gesteinskörnungen durch eine zeitraffende Simulation der Verkehrseinwirkungen auf der Straßenoberfläche und eine anschließende Griffigkeitsmessung bestimmt. Mit diesem Verfahren sind auch Prüfungen zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Fahrbahnoberflächen möglich, sowohl an im Labor hergestellten Asphaltmischungen als auch an aus Straßen gezogenen Bohrkernen. Das Ziel der Prüfung ist die Polierresistenz von Mineralstoffen zu beurteilen. Im Gegensatz zum Polierverfahren nach Britisch Standard (PSV-Wert), wo nur für die Prüfkörnung 8/10 mm eine Bewertung vorliegt, ermöglicht die Polierprüfung nach Wehner/Schulze eine solche für Splitt 2/5 mm, 5/8 mm und 8/11 mm sowie auch für Sand bis 0/2 mm. Mit dem Prüfverfahren nach Wehner/ Schulze lässt sich zudem eine erheblich größere Spreizung und bessere Wiederholbarkeit erreichen. In Abbildung 4-2 sind die wesentlichen Bauteile des Prüfmaschine dargestellt. [14]

Abbildung 24: Bestandteile der Wehner/Schulze Prüfanlage

4.2 Beschreibung des Verfahrens

Das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ist ein Verfahren, das zur Bestimmung der Griffigkeitseigenschaften von Verkehrsoberflächen aus Asphalt bzw. Beton und zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden dient. Die Prüfmaschine besteht aus zwei Bauteilen- einem Poliergerät und Labor-Griffigkeitsmessgerät. Die Ermittlung des Polierwertes (PWS) wird in zwei Schritten durchgeführt:

Schritt 1: Verkehrssimulation

Bei der Polierstation wird die Verkehrsbelastung auf der zu prüfenden Oberfläche simuliert. Dabei wird die Wirkung von drei unter Schlupf laufende Gummirollen nachgeahmt (siehe Abbildung 23). Die Geschwindigkeit der Poliergummis ist konstant (500 U/m). Um die Polierleistung zu verstärken wird ein Quarzmehl/Wasser –Gemisch zugegeben. Nach jedem Poliervorgang muss die Probeoberfläche und die Einspannvorrichtung aus Quarzmehl sorgfältig gereinigt werden. Dieser Vorgang ist als „**Spülen**“ bezeichnet und wird auch an der Polierstation erfüllt.

Abbildung 25: Simulation der Verkehrsbeanspruchung [14]

Kennzahlen des Poliervorganges:

- Mittlerer Kontaktdruck: ca. 0,40 N/mm^2
- Schlupf: <1%
- Bahngeschwindigkeit: ca. 17 km/h
- Drehzahl des Rollenkopfes: 500 U/min (90.000 Überrollungen pro Stunde)
- Durchflussmenge des Wasser-Quarzmehl-Gemisches: 5.0 l/min ± 10%
- Temperatur: ≈20°C

Abbildung 26: Poliervorgang unter konstanter Zugabe von Q/W-G

Schritt 2: Griffigkeitsmessung

Das Laborgriffigkeitsmessgerät ist im Prinzip die Übertragung der Messmethode „definiert blockiertes Rad“ (Stuttgarter Reibungsmesser) aufgebaut (Abbildung 25). Es ist in Abstimmung mit dem Poliergerät für Messungen auf ebenen, kreisförmigen Prüfoberflächen, mit einem Durchmesser von 225 mm, eingerichtet. Drei Messgummis, die auf einer Prüfspindel geschraubt sind, werden zuerst bis 100 km/h beschleunigt und dann auf die bewässerte Oberfläche abgesenkt. Der Polierwert PWS wird bei einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h als Verhältnis zwischen Reibungskraft und Aufstandskraft der Messgummis erfasst. Der ganze Vorgang ist mittels PC-Software voll automatisch verrichtet.

Abbildung 27: Prinzip der Griffigkeitsmessung nach Wehner/Schulze mit der LGM [14]

Kennzahlen der Griffigkeitsmessung:

- Mittlerer Kontaktdruck: 20 bar
- Prüffläche: 82.0 cm^2
- Prüfbahnlänge: 565 mm je Messkopfumdrehung
- Durchflussmenge: 20 l/min
- Temperatur: 10 °C ± 1 °C.

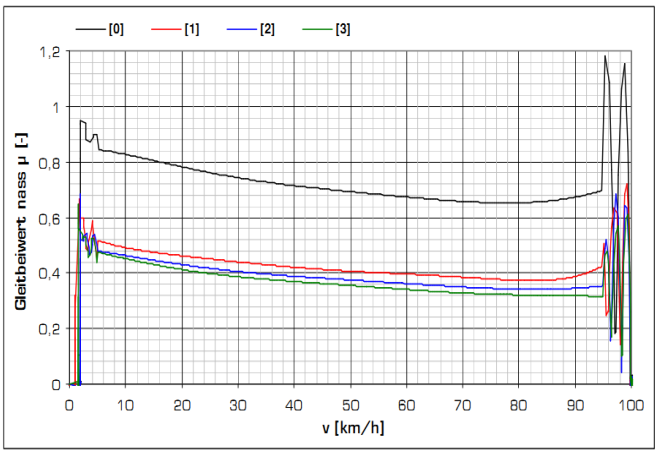

Abbildung 28: Abbremsvorgang und die entsprechende Aufzeichnung

4.3 Beschreibung der Geräte

4.3.1 Polierstation

Auf die Polierstation werden zwei Vorgänge erfüllt – Polieren und Spülen. Die wesentlichen Teile sind:

- Einspannvorrichtung für einen Probekörper
- Polierkopf mit drei Poliergummis mit einem Auflastgewicht von 392 N (40 kg)
- Mischbehälter für das Wasser-Quarzmehl-Gemisch
- Pumpe zur Aufbringung des Wasser-Quarzmehl-Gemisches auf der Probeoberfläche

Abbildung 29: Polierkopf mit drei Polierrollen

Spülen

Nach jedem Polieren werden die Probekörperoberfläche sowie der Rollenkopf mit Wasser für etwa 120 sec. gereinigt. Dies ist notwendig um die Proben von den vorhandenen Quarzmehlmengen zu befreien, da diese eine schlechte Beeinflussung auf die Ergebnisse bringen können. Durch den Vorgang bleibt der Kontaktdruck unverändert (ca. 0,4 N/mm^2) und die Geschwindigkeit etwa 100 U/m. Die Spülüberrollungen werden wie die Polierüberrollungen in die „N- gesamt“ erfasst.

Abbildung 30: Spülen der Probeoberfläche von Poliermittel

4.3.2 Prüfstation

Die Prüfstation besteht aus:

- Messkopf mit drei Messgummis (Gleitschuhe)
- Antrieb für den Messkopf
- Wasseranschluss mit regelbarer Wassermenge
- Kraftmessdose
- Messwerterfassung und Datenverarbeitung
- Drehmomentmesssystem
- Messwerterfassung und Datenverarbeitung

Abbildung 31: Prüfstation

Kalibrieren

Vor der Bestimmung des Reibwertes ist eine Kontrolle den vorhandenen Prüfgummis notwendig. Dazu wird die Kontrollplatte, die aus einer Glasoberfläche besteht. Das ist für die Dokumentierung der Randbedingungen wichtig. Der Kalibriervorgang findet auf den Prüfstation statt.

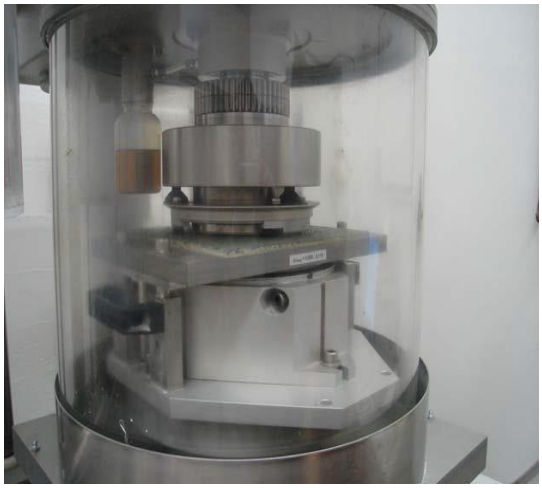

Abbildung 32: Kalibrieren der Prüfgummis

4.3.3 Messgummis und Polierrollen

Wegen der begrenzter Lagerfähigkeit sind nicht genutzte Polierrollen und Messgummis in Folie zu verpacken und in Kühlschrank zu lagern.

Polierrollen
Die Rollen bestehen aus einem kreiskegelförmigen Metallträgergehäuse, auf dem eine 8,8 mm Gummischicht aufgebracht ist. In diese Gummischicht werden 8 Profilrillen von ca. 4,5 mm Tiefe und 3,5 mm Breite geschnitten. Die äußeren Maße der Polierrollen betragen:

- Durchmesser: 36 bzw. 80 mm
- Höhe 56,3 mm
- Mantellinie s= 60 mm
- Shorehärte: 65 ± 3

Abbildung 33: Poliergummis

Gleitschuhe
Die Griffigkeitsmessgummis (siehe Abbildung 32) bestehen aus einem kreisringsegmentförmigen Metallträger mit Einspannvorrichtung, auf dem eine 5 mm starke Gummischicht aufgebracht ist. Die äußeren Maße eines Gleitschuhes betragen:

- Breite: 14,5 mm
- Dicke(inkl. Träger): 10 mm
- Mittlere Länge: 30 mm
- Shorehärte: 65 ± 3

Abbildung 34: Neuer und abgenutzter Prüfgummis mit Blasenbildung

4.3.4 Poliermittel

Das Poliermittel ist ein Gemisch von 2,4 kg Quarzmehl <0,063 mm Typ Millisil W6 (Quarzwerke Frechen) und 40 l Wasser.

5 Optische Geräte zur Bestimmung der Topographie

5.1 Allgemeines

Die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit wird im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von zwei Messgeräten durchgeführt. Der MicroProf, der zur einen präzisen optischen Topographiemessung an Oberflächen geeignet. Das Gerät arbeitet als Profilmeter (2D) sowie als bildgebendes Messgerät (3D) mit einem rasternden Verfahren bzw. mit einem direkt abbildenden Flächensensor. Aufgrund der normativ verankerten Oberflächenkennwerte werden Rauheiten und Welligkeiten zwei- und dreidimensional entsprechend der DIN EN ISO-Vorschriften bestimmt. In Abbildung 35 ist das Gerät MicroProf dargestellt.

Abbildung 35: MicroProf mit xy-Kreuztisch

Das andere optische 3D-Messsystem ist MikroCAD, das sowohl für 2D und 3D-Messungen an Bauteiloberflächen vorgenommen werden kann. Dieses besteht aus einem kompakten optischen 3D-Sensor, basierend auf der Verwendung eines DMD-Projektors und einer hochauflösenden CCD-Kamera sowie von hochwertigen Projektions- und Aufnahmeoptiken. Die Prinzipielle dieses Gerät sind die berührungslose Messdatenerfassung, hohe Messgeschwindigkeit und hohe Auflösung und Genauigkeit. Auf Abbildung 36 ist das Gerät MikroCAD dargestellt. [15]

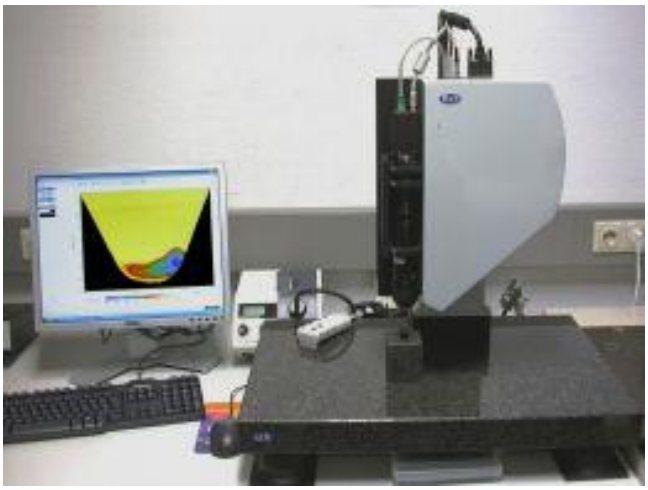

Abbildung 36: MikroCAD

5.2 Oberflächenparameter

Alle Daten von MicroProf werden mit der Analysesoftware FRT Mark III bearbeitet. Dieses standardisierte Programm ermittelt aus einer dreidimensionalen Primärfläche des Betonkörpers eine dreidimensionale Rauheitsfläche durch Anwendung eines phasenkorrekten digitalen Gaußfilters. Das Filtern erfolgt vollautomatisiert unter Anwendung eines zweidimensionalen Filters gemäß den Vorgaben der EN ISO 11562. Die Auswertung der Probekörper wird unter anderem durch folgende Oberflächenparameter durchgeführt:

- sRa Arithmetischer Mittenrauhwert der Flächenordinaten
- sRq Quadratischer Mittenrauhwert der Flächenordinaten
- sRz (DIN) Gemittlere Rautiefe
- sRz25 Gemittlere Rautiefe berechnet aus 25 Teilflächen
- sR_{max} Maximale Rautiefe auf der Messfläche
- $sR_{max}25$ Maximale Einzelrautiefe auf der Messfläche berechnet aus 25
- sRv Maximale Riefentiefe
- sRz (ISO) Zehnpunktenhöhe
- sRsk Schiefe
- sRpk Reduzierte Spitzenhöhe
- sRvk Reduzierte Riefentiefe
- sRk Kernrauheit
- sRt Profiltiefe
- Mr1 Kleinster Materialanteil
- Mr2 Größer Materialanteil

Die oben aufgelisteten Parameter sind aus den phasenkorrekt gefilterten Daten des bearbeiteten Bildes berechnet. Der vorangestellte Buchstabe „s“ bezeichnet die Berechnung von Oberflächenparameter aus 3D- Daten (Bildmessungen). Diese Kennwerte beschreiben eine Oberfläche einerseits in ihrer senkrechten Ausbildung (Amplitudenkenngrößen), anderseits kann eine für die Oberfläche charakteristische Materialanteilskurve beschrieben werden. [16]

Das Gerät MikroCAD berechnet dieselbe Parameter auf Grundlage der Analysesoftware ODSCAD 6.3. Zuerst wird die Linienrauheit jede einzelne Platte ohne Überrollungen (0 ÜR) ermittelt. Danach erfolgt in Anlehnung an die Grundprinzipien dieser Ermittlung die Flächenrauheitsbestimmung unter Beachtung von Fachliteraturalgorithmen. Flächenrauheitsparameter enthalten Informationen über die gesamte gemessene Oberfläche. Deshalb werden die Betonplatten nach der Herstellung mit dem MikroCAD gemessen und erst dann ausgebohrt. In Abbildung 37 sind die drei Profile, die für die Berechnung von Rauheitskenngrößen benutzt werden dargestellt.

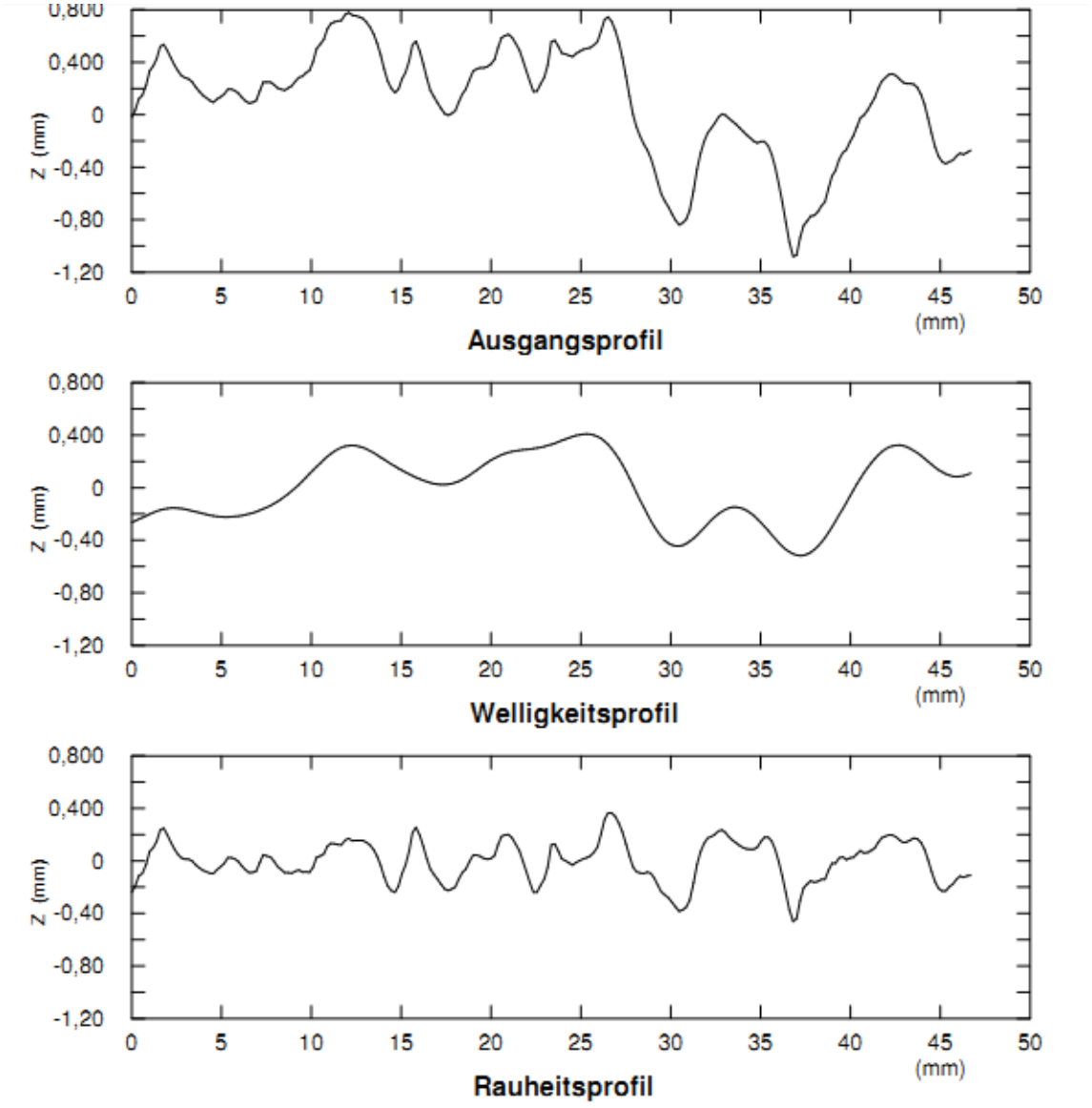

Abbildung 37: Ausgangs-, Welligkeits- und Rauheitsprofil von MikroCAD [15]

5.3 Messprinzip

Die optische Erfassung der Topographie bzw. der Textur von Oberflächen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit einem chromatischen Abstandsensor. Zur Erfassung der Höhe eines Oberflächenpunktes wird ein weißes Licht mittels einer Optik mit ausgeprägter

chromatischer Aberration (das Prinzip des wellenlängenabhängigen Brechungsindex) auf die Oberfläche fokussiert. Für diejenige Wellenlänge, für die sich die Oberfläche im Fokus befindet, wird das reflektierte Licht maximal sein. Das Spektrum des an der Oberfläche reflektierten Lichts zeigt einen Peak, aus dessen Wellenlänge der Abstand zur Probenoberfläche bestimmt wird. Das Messprinzip ist in Abbildung 38 dargestellt. [17]

Der Vorteil eines chromatischen Sensors liegt in seiner hohen lateralen und vertikalen Auflösung bei den stark und gering reflektierenden Oberflächen. Die hohe Messrate sowie seine Lichtstärke eignen den Sensor zu den Zwecken dieser Arbeit.

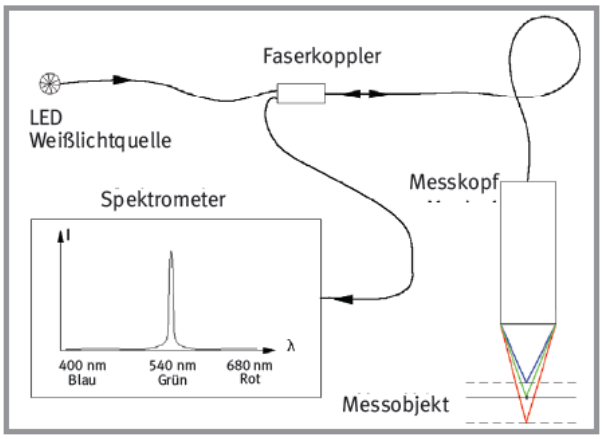

Abbildung 38: Messprinzip der Abstandsensor FRT CWL [17]

Die technischen Kenndaten sind:

Messbereich in z-Achse:	6 mm	
Arbeitsabstand:	35 mm	
Vertikale Auflösung z-Achse:	60 mm	
Laterale Auflösung x, y-Achse:	8 µm	
Messwinkel zur Oberfläche:	90° ± 25°	
Messrate:	4.000 Messungen/Sek.	
Dickenmessbereich:	0,9 – 9 mm	
Lichtquelle:	LED	[17]

Der Sensor ist auf einem Portalrahmen über einem x- und y-Richtung verfahrbaren, hochpräzisen Kreuztisch montiert. Die Messsystemauflösung in horizontaler Richtung beträgt 0,2 µm. Es ist möglich mit dem Tisch einen maximale Messbereich von 350 x 350 mm mit eine Wiederholgenauigkeit kleiner als ± 1 µm abzufahren. Die Probekörper müssen trotz Ein- und Ausbauen immer an dieselbe Stelle vermessen werden. Dafür werden zwei Schrauben und Markierungen auf dem xy-Tisch und auf den Seiten der Platten benutzt (siehe Abbildung 3). Dadurch können die Probekörper nach der Verwendung in der Wehner/Schulze-Anlage wieder genau positioniert werden. Die exakten Koordinaten werden durch das optische Messsystem angefahren. Die Messfläche beträgt 625 mm^2 (25 mm x 25 mm). In Abbildung 39 ist die Anordnung der Messfläche auf dem Betonplattenoberfläche schematisch dargestellt.

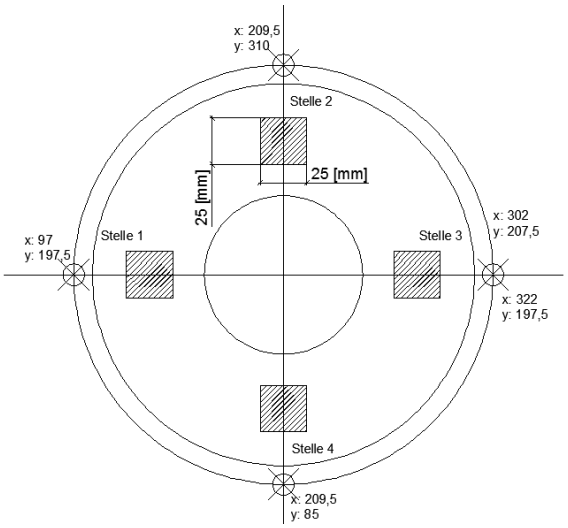

Abbildung 39: Anordnung von Messflächen auf dem Betonprobekörperoberfläche

Als optische Messmethode bei der MikroCAD kommt die digitale Streifenprojektion mit Mikrospiegelprojektoren (DMD: Digital Micro Mirror Devices) der Firma Texas Instruments zur Anwendung. Dabei werden Streifen mit einer sinusartigen Helligkeitsintensität unter einem definierten Triangulationswinkel auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert und deren Abbildung mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Das Höhenbild des Messobjektes wird aus der Lage der Streifen und dem Grauwert der einzelnen Bildpunkte errechnet. In Abhängigkeit von der konkreten Messaufgabe sind verschiedene Streifenprojektions-verfahren zu verwenden. In Abbildung 40 ist das Messprinzip gezeigt. [15]

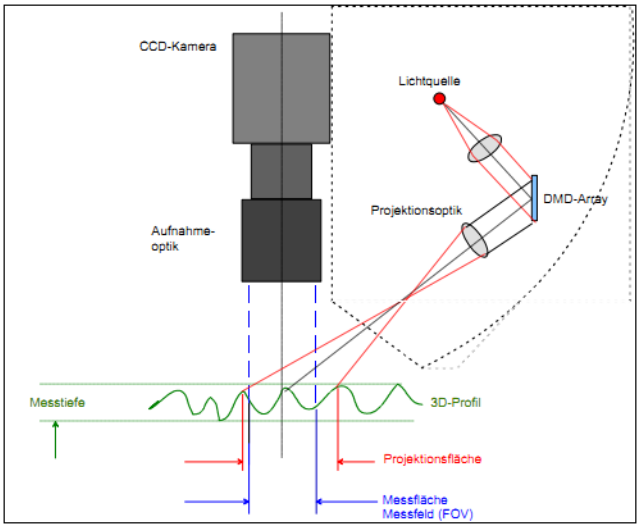

Abbildung 40: Prinzipdarstellug des optischen 3D-Sensors [15]

Der 3D-Sensor ist an einem Stativ oder Traverse mit Höhenverstellung für Einstellung des Abstandes zum Messobjekt montiert. Dazu kommt auch verfahrbarer Kreuztisch für bessere und leichtere Positionierung der Probekörper. In den Sensor sind die Projektionsoptik, die CCD-Kamera und der DMD-Projektor integriert.

6 Prüfergebnisse und Auswertung

6.1 Untersuchungsprogramm

Das ganze Untersuchungsprogramm gliedert sich in 4 Hauptphasen. In Phase 1 erfolgt die Betonplattenherstellung und Vorbereitung für Bestimmung des PWS-Werts. Die Plattenherstellung sowie die Aufbereitung je drei Einzelmessproben je Serie ist im Abschnitt 3.3. näher erklärt. In Phase 2 wird die Topographie der Probekörper durch zwei verschiedene Geräte- einer ist der MicroProf der TU-Wien und der andere ist der MikroCAD der TPA. Phase 3 umfasst den Poliervorgang und Griffigkeitsbestimmung mit der Anlage nach Wehner/Schulze. Anschließlich in Phase 4 werden die Plattenoberflächen mit dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Gerät aufgenommen.

Die Herstellung der Betonplatten wurde an drei verschiedenen Tagen unter gleichen Bedingungen ausgeführt. Der Auftrag des Kombinationsmittels sowie das Ausbürsten der Platten wurden von ein und demselben Mitarbeiter gemacht.

Für die Bestimmung des Polierwertes der neun Probekörper wurde einen Satz Prüfgummis (F70L) verwendet. Als Kontrolloberfläche wurde nach jeder Poliervorgang (8 je Probe) die Glasplatte, die in Abschnitt 4.3.2. beschrieben ist, verwendet.

Zur Beschreibung der Änderung der Betonoberfläche in den verschiedenen Beanspruchungszustände wurden die Oberflächenkenngrößen mit automatisierte Analysesoftware FRT Mark III (Abschnitt 5.2) berechnet.

6.2 Prüfergebnisse

In diesem Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse aus der Polierwertbestimmung mit der Anlage nach Wehner/Schulze diskutiert. Eine Auswertung mit dem optischen Texturerfassungssystem wird in den zwei Zuständen des Betons gemacht. Die Analyse der Oberflächenkennwerte wird hinsichtlich des Vergleichs der Körper in Betracht genommen.

6.2.1 Ergebnisse der Anlage nach Wehner-Schulze

Für die Betonplatten, die nach 5,5 Stunden ausgebürstet wurden (Probekörper 1,2 und 3), wurde ein maximaler PWS Wert von 0,425 nach 500 ÜR ermittelt. Die Standardabweichung zwischen den drei Probekörpern ist 0,021. Nach dem ganzen Poliervorgang (180 000 ÜR) wird die PWS von 0,304 reduziert. Bei Probekörper 1 und 2 ist eine interessante Erhöhung des Polierwertes nach 1500 ÜR zu sehen. Der Anfangspolierwert der nach 6,5 Stunden ausgebürstetes Betonplatten liegt bei 0,510 (Probekörper 5) und 0,290 (Probekörper 4) am Ende der Untersuchung. Die Standardabweichung bei dieser Gruppe ist höher und beträgt 0,041. Der PWS Wert der dritten Gruppe von Betonprobekörper liegt bei 0,435 und 0,298. Als Spannweite zwischen höchstem und niedrigstem Einzelergebnis wird nur 0,006

berechnet. Die Ergebnisse des Probekörpers 9 werden wegen technisches Problems der Maschine nicht in Betracht genommen.

In der Tabelle 13 sind die mit dem Wehner/Schulze ermittelten Reibungsbeiwerte von allen 9 Probekörpern dargestellt. Die Abbildung 41 stellt in Diagrammform den Verlauf der Reibungsbeiwerte der Probekörper dar.

Tabelle 13: Ergebnisse der Messungen mit der Anlage von Wehner/Schulze

Probekörper	Stunden	Reibungsbeiwert							
№	h	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	180000
1	5.5	0.411	0.417	0.419	0.417	0.407	0.389	0.337	0.304
2		0.403	0.413	0.421	0.419	0.412	0.386	0.342	0.310
3		0.425	0.423	0.421	0.415	0.400	0.379	0.342	0.315
4	6.5	0.468	0.437	0.423	0.412	0.399	0.372	0.325	0.290
5		0.510	0.470	0.447	0.432	0.418	0.392	0.356	0.327
6		0.490	0.451	0.432	0.422	0.405	0.381	0.339	0.307
7	6	0.435	0.420	0.418	0.416	0.403	0.379	0.336	0.308
8		0.431	0.415	0.413	0.412	0.400	0.376	0.329	0.298
9		0.448	0.427	0.406	0.393	0.364	0.328	0.284	0.256

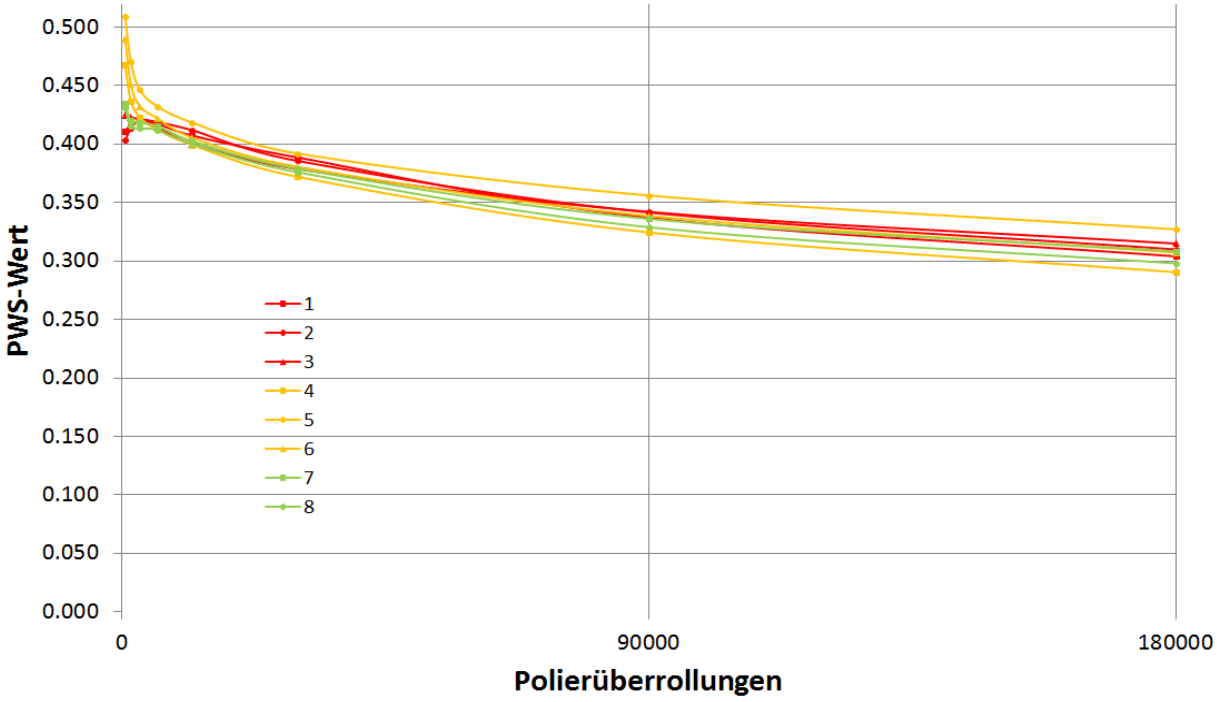

Abbildung 41: Reibungsbeiwert

Die in Tabelle 13 und Abbildung 41 dargestellten Werte zeigen die Veränderung der Messergebnisse in Bezug auf die verschiedenen Ausbürstzeitpunkten. Es zeigt sich, dass die Proben, die nach 6 Stunden ausgebürstet sind, bestes Griffigkeitsniveau besitzen und ihre PWS-Werte bei jedem Poliervorgang fast gleich bleiben. Die gleichen Diagramme sind für die

drei einzelne Gruppe von Probekörper dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildungen 42-44 zerteilt.

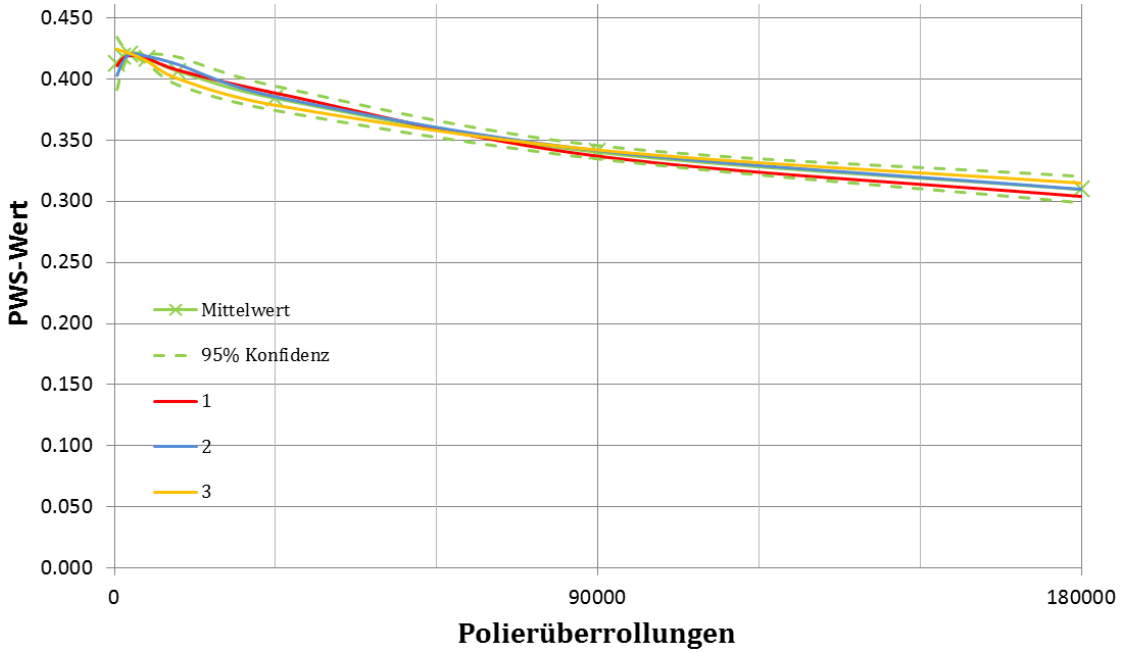

Abbildung 42: Reibungsbeiwerte und Standardabweichung nach 5,5 Stunden Ausbürsten

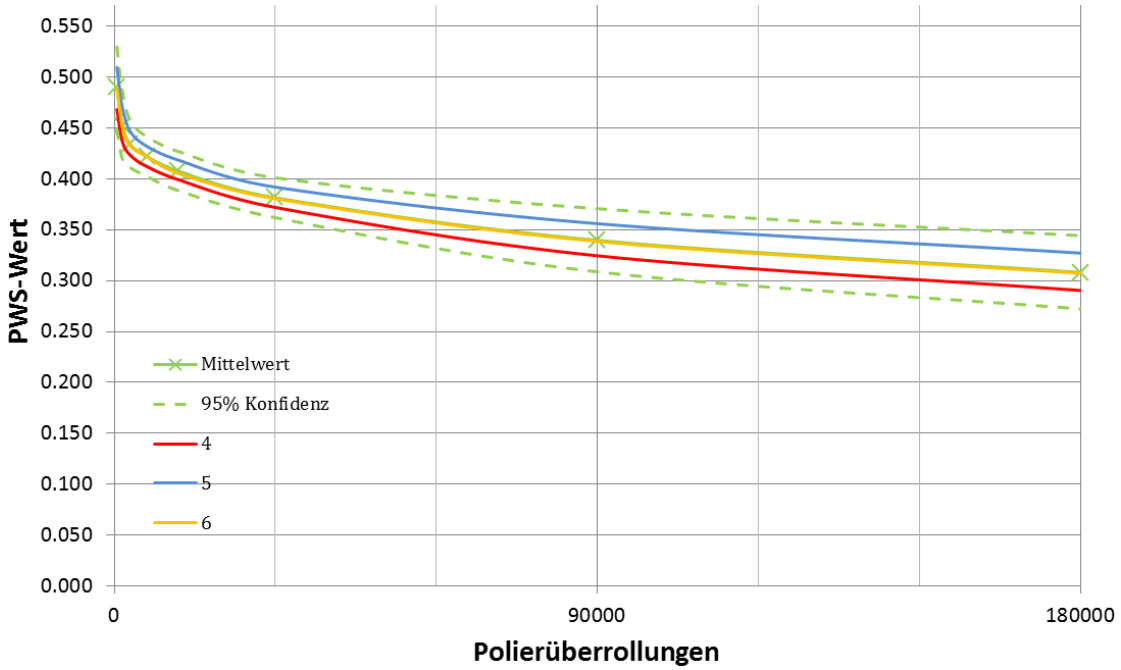

Abbildung 43: Reibungsbeiwerte und Standardabweichung nach 6,5 Stunden Ausbürsten

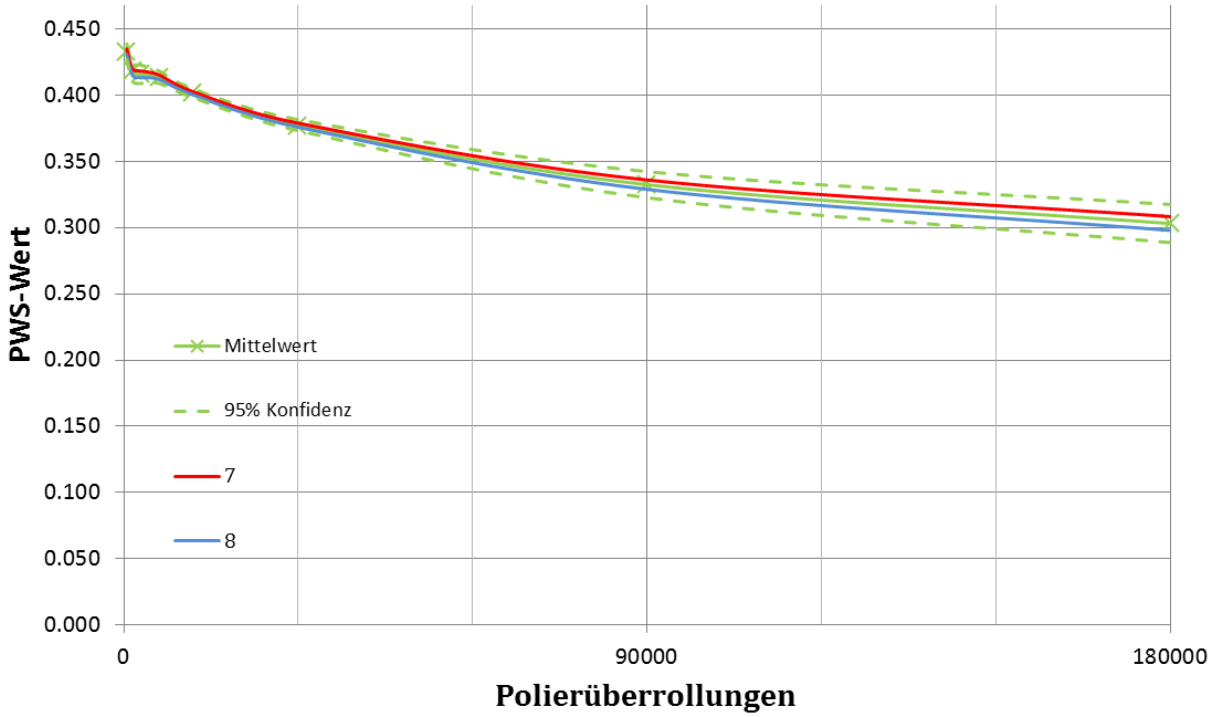

Abbildung 44: Reibungsbeiwert und Standardabweichung nach 6 Stunden Ausbürsten

Die Ergebnisse der drei untersuchten Gruppen von Probekörper sind mittels t- Test zwischen einander verglichen (siehe Tabelle 14). Die notwendige Kenngröße für Durchführung des t-Tests sind die Mittelwerte der 3 Gruppen sowie deren Standardabweichungen. Es ist sichtbar, dass die Reibungswerte im Bereich 3000 ÜR- 180 000 ÜR mit wenigen Ausnahmen fast identisch sind.

Tabelle 14: Einfluss der Ausbürstzeitpunkt- statische Analyse (t- Test)

Überrollungen	**500**	**1500**	**3000**	**6000**	**12000**	**30000**	**90000**	**180000**
Mittelwert 5,5 Stunden	0.413	0.418	0.420	0.417	0.406	0.384	0.340	0.310
95% Konfidenz	0.434	0.427	0.422	0.421	0.418	0.394	0.346	0.320
95% Konfidenz	0.392	0.408	0.419	0.413	0.395	0.374	0.335	0.299
Mittelwert 6,5 Stunden	0.489	0.453	0.434	0.422	0.408	0.382	0.340	0.308
95% Konfidenz	0.530	0.486	0.457	0.442	0.427	0.401	0.371	0.344
95% Konfidenz	0.449	0.420	0.411	0.403	0.388	0.362	0.309	0.272
Mittelwert 6 Stunden	0.433	0.418	0.416	0.414	0.401	0.378	0.333	0.303
95% Konfidenz	0.439	0.424	0.423	0.419	0.405	0.382	0.342	0.318
95% Konfidenz	0.427	0.411	0.409	0.409	0.398	0.373	0.323	0.289
T-Test **5,5-6**	19.1	99.9	34.4	41.6	50.6	33.3	30.2	56.6
T-Test **6,5-6**	7.6	14.4	26.0	50.5	60.7	74.2	72.0	82.9
T-Test **5,5-6,5**	4.5	15.0	36.0	67.2	92.8	83.8	98.0	95.4

Aufgrund der Ergebnissen vom Polieren mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze kann beschlossen werden, dass das Ausbürsten nach 6 Stunden als bester Ausbürstzeitpunkt für

händische Behandlung von Betonprobekörper ist. Die Probekörper dieser Gruppe besitzen einen guten Reibwert und sehr kleine Standardabweichung. Der Poliervorgang ist fließend und es gibt keine großen Sprünge zwischen den einzelnen Phasen. Die Werte von Probekörper 7 und 8 zeigen, dass beide gleich sind.

6.2.2 Ergebnisse der Topographiemessungen

Zuerst wurden die Oberflächenparameter der Probekörper, die mit dem Gerät der Technischen Universität Wien MicroProf gemessen sind, analysiert. Die Oberfläche der Probekörper die nach 5,5 und 6 Stunden ausgebürstet sind, weist einen fast gleichen Mittenrauwert (sRa) von 0,219 bis 0,248 mm auf. Die zugehörige mittlere Rautiefe (sRz) beträgt etwa 1,6 mm bei Probekörpern 7-9 und ein bisschen mehr bei den Probekörpern der erste Gruppe – 1,8 mm. Die größte Differenz zwischen beiden Probekörpergruppen ist bei dem Schiefewert (sRsk), der bei Probekörper 2 und 3 fast 6 Mal kleiner ist. Die Oberflächenparameter der Probekörper 4 bis 6 (nach 6,5 Stunden ausgebürstet) zeigen, dass sie nicht so ähnlich sind. Die Spannweite zwischen höchsten und niedrigsten Einzelergebnissen ist sehr groß und es gibt große Sprünge dazwischen. Das spricht nicht über Gleichartigkeit und Ähnlichkeit der drei Probekörper. In Tabelle 15 sind alle Ergebnisse der 9 Probekörper dargestellt.

Tabelle 15: Oberflächenrauheitsparameter gemessen mit MicroProf (TU Wien)

PK NR	sRa	sRq	sRmax	sRz (DIN)	sRku	sRsk	sRt	sRpk	sRvk	sRk	Mr1	Mr2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
1	0.224	0.276	2.227	1.73	3.03	0.304	2.365	0.309	0.199	0.744	11.26	94.97
2	0.245	0.303	2.574	1.87	3.30	0.055	2.720	0.301	0.235	0.85125	9.05	94.07
3	0.248	0.307	2.333	1.89	2.92	0.069	2.447	0.293	0.266	0.8375	9.23	92.81
4	0.177	0.219	1.689	1.40	3.17	0.394	1.801	0.257	0.169	0.562	13.80	95.65
5	0.198	0.257	2.322	1.94	4.38	0.345	2.674	0.348	0.269	0.571	16.01	93.52
6	0.223	0.277	2.169	1.75	3.06	0.215	2.302	0.292	0.236	0.72	12.55	94.05
7	0.226	0.276	1.859	1.60	2.89	0.439	2.014	0.322	0.179	0.69875	15.44	95.74
8	0.196	0.243	1.831	1.49	3.15	0.309	1.921	0.257	0.173	0.65725	10.62	94.15
9	0.219	0.275	2.229	1.78	3.35	0.196	2.292	0.301	0.262	0.71225	11.63	93.87

Dieselben Oberflächenparameter wurden auch mit dem Gerät MikroCAD gemessen. Das Messprinzip und Messfläche anders sind, deshalb wird die Topographie der einzelnen Probekörper zwischen einander diskutiert. Die Genauigkeit und Messrate sind nicht so hoch.

Die maximale Rautiefe, sowie mit ihr korrespondierenden Amplitudenkenngrößen (sRa), (sRq) und (sRz) sind bei Gruppen 1 und 3 sehr ähnlich. Die Kenngrößen (Mr1) und (Mr2) weisen bei allen Probekörpern dieselben Werten auf, wegen der kleinere Genauigkeit. Es ist auch interessant, dass die gemittelte und die größte Rautiefe von den Einzelmessflächen alle Probekörper fasst gleich sind. Die wichtigste Kenngroße hier ist der Spitzenanzahl, der für

6,25cm^2 berechnet ist. Die höchsten Werte sind bei den Probekörpern, die nach 6,5 Stunden ausgebürstet sind und beträgt ca. 52. Die Werte bei den anderen zwei Gruppen bewegen sich im Bereich von 44 bis 51. Immer mehr wie bei der Reibwerte, die Ergebnisse von Probekörper 4 bis 6 weisen große Schwankungen auf. In Tabelle 16 sind die diskutierten Werte dargestellt.

Tabelle 16: Oberflächenrauheitsparameter gemessen mit MikroCAD (TPA, Wien)

PK NR	sRa	sRq	sRmax	sRz (DIN)	sRku	sRPc	sRsk	sRt	sRpk	sRvk	sRk	Mr1	Mr2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
1	0.346	0.426	3.52	3.52	2.76	44.3	-0.25	-1.933	0.288	0.414	1.109	10	90
2	0.374	0.459	4.47	4.47	3.08	44.1	-0.42	-3.013	0.276	0.477	1.185	10	90
3	0.397	0.491	4.11	4.11	2.87	48.9	-0.15	-2.352	0.384	0.471	1.264	10	90
4	0.276	0.345	3.18	3.18	3.02	52.9	0.13	-1.61	0.328	0.301	0.889	10	90
5	0.342	0.429	5.49	5.49	3.45	53.2	0.15	-3.655	0.424	0.363	1.097	10	90
6	0.376	0.461	4.98	4.98	2.84	48.9	0.03	-3.13	0.358	0.382	1.201	10	90
7	0.336	0.419	3.45	3.45	2.93	51.2	-0.05	-1.665	0.363	0.397	1.081	10	90
8	0.304	0.383	4.63	3.78	3.28	45.4	-0.14	-2.267	0.345	0.381	0.976	10	90
9	0.331	0.415	3.59	3.59	3.08	51.4	-0.17	-1.96	0.352	0.441	1.059	10	90

Die nächsten vier Abbildungen zeigen die oben diskutierte Oberflächentopographie von zwei geprüften Probekörpern an einer der vier gemessenen Stellen. Dabei kann man die Veränderung der Oberflächenzustand vor und nach dem Poliervorgang vergleichen. Der erste ist PK 1, der nach 5,5 Stunden ausgebürstet ist und der zweite PK 7, dessen Ausbürstzeitpunkt 6 Stunden ist. Am Anfang ist eine gute Makrotextur bei beiden Probekörper ersichtlich (siehe Abbildung 45). Der Reibungswert ist 0,411 für Probekörper 1 und Probekörper 7 charakterisiert sich mit Anfangsreibwert von 0,435. Man kann auch jede Spitze der beiden Oberflächen sehen. Nach dem Poliervorgang (siehe Abbildungen 45, 46) – 180 000 ÜR, sinkt der Reibungswert auf ca. 0,306 für beide Probekörper. In diesem Zeitpunkt ist die Oberfläche schon poliert und die Textur sieht ein bisschen anders aus. Zwischen beide Probekörper sind noch einige Unterschiede zu sehen. Die Oberfläche bei Probekörper 7 sieht gleichartig aus, trotzdem halt die Reibungsbeiwert ein gutes Niveau. Aus den vier Abbildungen lässt sich ein klarer Zusammenhang zwischen die Prüfoberflächen und den Ausbürstzeitpunkten beider Probekörper erkennen.

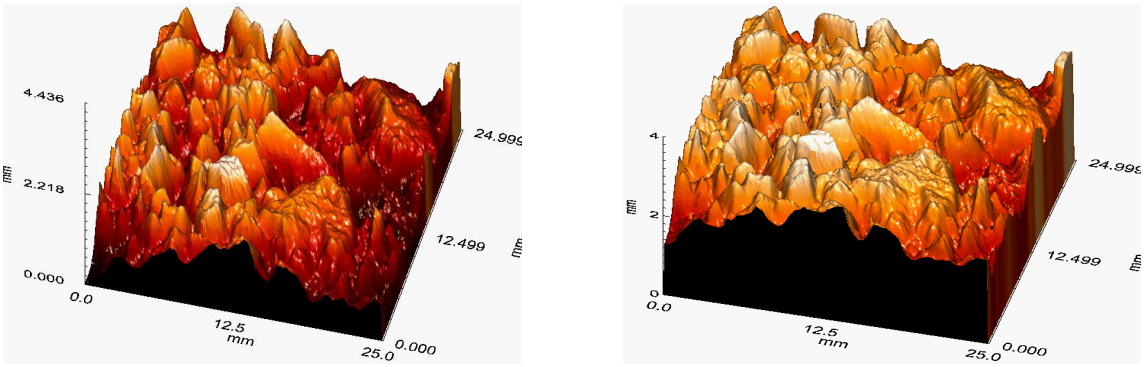

Abbildung 45: Probekörper 1 nach 0 (links) und nach 180 000 ÜR (rechts)

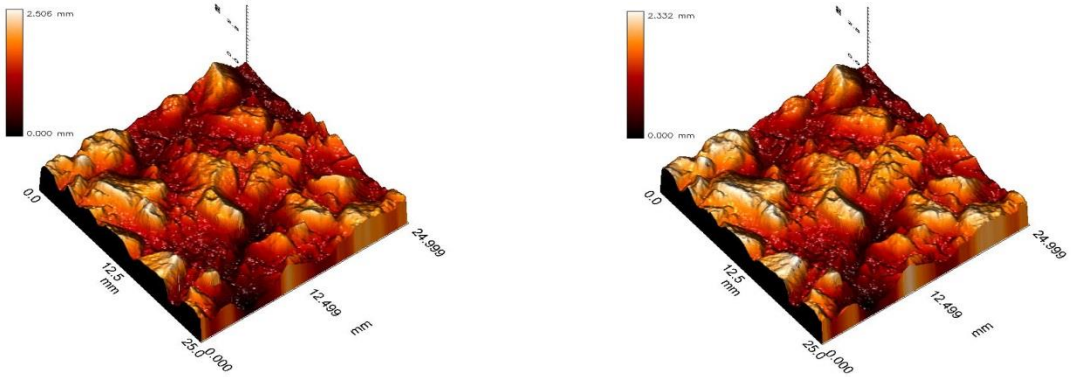

Abbildung 46: Probekörper 7 nach 0 (links) und nach 180 000 ÜR (rechts)

7 Zusammenfassung

7.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Die vorhandene Straßengriffigkeit ist heutzutage aufgrund ihrer Auswirkung auf die Verkehrssicherheit eine der wichtigsten Eigenschaften im Straßenbau. Als Griffigkeit wird die Wirkung der Rauheit der Oberfläche auf das Kraftschlussvermögen zwischen der Fahrbahn und dem Fahrzeugreifen verstanden.

Für die Ermittlung der Griffigkeit im Labor wird vor allem das Polierverfahren nach Wehner/Schulze eingesetzt. Das Niveau und die zeitliche Entwicklung der Straßengriffigkeit, sowie die Polierresistenz von Asphalt bzw. Beton kann mit dieser Prüfmethode im Labor bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Griffigkeitsprognoseverfahren für Straßenoberflächen von Waschbeton untersucht. Dafür werden 9 Probekörper hergestellt und geprüft.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist eine standardisierte Methode für Herstellung von Betonplatten mit Waschbetonoberflächenstruktur im Labor zu entwickeln. Dafür werden Waschbetonprobekörper hergestellt und deren Oberflächentextur mit Hilfe der Anlage von Wehner/Schulze geprüft. Die Betonplatten wurden auch durch eine optische Erfassung der Topographie bzw. der Textur miteinander verglichen.

7.2 Versuchsprogramm und Ergebnisse

Für die Ziele dieser Untersuchung wurde die Griffigkeit von Waschbetonoberflächen ermittelt. Das ganze Versuchsprogramm wurde in vier Phasen geteilt:

- Phase 1: Betonplattenherstellung und Vorbereitung für Bestimmung der PWS-Wert
- Phase 2: Messung der Topographie der Probekörper
- Phase 3: Poliervorgang und Griffigkeitsbestimmung
- Phase 4: Topographiemessung nach dem Polieren

In erster Phase erfolgt die Herstellung der Probekörper aus Beton. Dabei werden an drei verschiedenen Tagen unter gleichen Bedingungen 9 Probekörper hergestellt. Diese Probekörper werden in 3 Gruppen durch die Ausbürstzeitpunkten aufgeteilt, da jede Gruppe nach einer bestimmten Zeit ausgebürstet wurde.

In Phase 2 wurden die Oberflächenparameter der einzelne Probekörper bestimmt. Zur Beschreibung der Änderung der Betonoberfläche wurde die Bestimmung der Probekörperrauheit nochmal nach dem Polieren in Phase 4 wiederholt.

Phase 3 beschreibt die Durchführung der Polierwertbestimmung bei der Bedienung der Prüfanlage nach Wehner/Schulze. Alle Probekörper werden von 0 bis 180 000 Überrollungen poliert. Zu einer besseren Analyse werden die von der PK-Gruppen Ergebnisse auch mittels t- Test miteinander verglichen.

Da die Ergebnisse von den drei Gruppen (Probekörper, die nach 5.5, 6, 6.5 Stunden ausgebürstet) ähnlich sind, erschein die Ausbürstzeit nach 6 Stunden die beste Zeit für händisches Ausbürsten von Betonoberflächen im Labor zu sein. Die Probekörper diese Gruppe besitzen eine gute Anfangsgriffigkeit und auch sehr kleine Standardabweichung. Der Poliervorgang ist fließend und es gibt keine großen Sprünge.

7.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei der Griffigkeitsprüfung wurde die Polierresistenz von Waschbetonoberflächen untersucht. Die erhaltenen PWS-Werte jeder einzelnen Gruppe von Probekörpern charakterisieren sich mit einer guten Wiederholbarkeit.

Es besteht allerdings die Vermutung, dass zwischen der vorhandenen Ausbürstzeitpunkten und dem daraus resultierenden PWS- Wert ein Zusammenhang besteht. Deswegen sollte man auch in weiteren Untersuchungen nicht nur händische, sondern auch eine maschinelle Oberflächenbehandlung durchführen.

Die Ergebnisse des Polierens zeigen, dass mit einem händischen Ausbürsten von Betonoberflächen unter Laborbedingungen eine realitätsnahe Griffigkeitsniveau erschaffen werden kann. Das ausgewählte Versuchsprogramm mit verschiedenen Ausbürstzeitpunkten gilt als Basis für weitere Untersuchungen. Um bessere Schlussfolgerungen für die Griffigkeitseingenschaften von Verkehrsflächen aus Waschbeton zu erzielen, müssen in der Zukunft Straßenbohrkerne und im Labor hergestellten Probekörper verglichen werden.

Literaturverzeichnis

[1] J. Steigenberger, „Waschbetonoberfläche," Olomouce, 2002.

[2] „www.beton.org,"[Online].Available: https://www.beton.org/wissen/infrastruktur/beton-fuer-strassendecken/.

[3] R. Blab, „Eingenschaften von Betonfahrbahnen," in *BETONSTRASSEN Das Handbuch*, Wien, 2014.

[4] „http://www.guetegemeinschaft-beton.de/,"[Online].Available: http://www.guetegemeinschaft-beton.de/fileadmin/guetegemeinschaft-beton-de/media/Redaktion/PDF-Dateien/Griffig/Griffig_1_08.pdf.

[5] H. Eifert, „Der Bau von Betonfahrbahndecken," 2007.

[6] Ehrlich, „Straßenbau heute – Betondecken," Erkrath, 2010.

[7] M. Ludwig, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 2013.

[8] P. Nischer, „Baustoffe und Betonzusammensetzung,"

in *BETONSTRASSEN Das Handbuch*, Wien, 2014.

[9] W. Taylor, Cement chemistry, London, 2003.

[10] R. Schießl, D. Lowke, P. Wenzel und J. Skarabis, „Optimierung von Waschbeton im Betonstraßenbau," München, 2008.

[11] „http://www.tal-betonchemie.at," [Online].Available:

http://www.tal-betonchemie.at/1012,35,,2.html.

[12] Diem-Werke GmbH, [Online]. Available: www.diemwerke.com.

[13] DIN, *EN 13036-1 Rautiefe,* 2010.

[14] S. Huschek, „Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach Wehner/Schulze, Tagungsband zum Kolloquium Fahrbahngriffigkeit, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, Heft 13," Wien, 2002.

[15] GFMesstechnik GmbH, Handbuch Optisches 3D-Messgerät MikroCAD, Berlin, 2014.

[16] L. Kirchmaier, *Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Strassenbau,* Wien, 2011.

[17] Fries Research & Technology GmbH, Datenblat für den chromatischen Sensor, „www.frt-gmbh.com," 2009. [Online]. Available:

http://www.frt-gmbh.com/chromatischer-sensor-frt-cwl.aspx.

[18] Wikipedia.[Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Bitumen.

[19] W. Fleischer, „Die Griffigkeit von Fahrbahndecken aus Beton," München, 2008.

[20] „zement.at," [Online]. Available: http://www.zement.at/component/content/article/8-artikel/198-oesterreichischer-betonstrassenbau-topthema.

[21] „lafarge.at,"[Online].Available: http://www.lafarge.at/zement/service/ratgeber/anwendungen/strassendeckenbeton/.

[22] Technische Universität Wien- Labor des Forschungsbereich für Strasenwesen, Sandstrahlen von Asphalt- und Betonprobekörper für das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze, 2007.

[23] Technische Universität Wien- Labor des Forschungsbereich für Strasenwesen, Prüfung mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze, 2004.

[24] M. FYLAK, *Untersuchung zum frühen Hydratationsverhalten von Portland- und Portlandkompositzementen.,* Wittenberg, 2011.

[25] Fries Research & Technology GmbH, *Bedienungsanleitung für die Analysesoftware FRT Mart III, FRT Microprof,* 2009.

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellung von Betondecken mit Gleitschalungsfertiger [2] 8
Abbildung 2: Lastabtragende Wirkung von Fahrbahnkonstruktionen, schematisch [3] 9
Abbildung 3: Material- und bautechnische Einflüsse auf die Griffigkeit von Fahrbahndecken [3] 10
Abbildung 4: Ausbürsten des Oberflächenmörtels im Nassverfahren [5] 11
Abbildung 5: Ergebnisse der Rollgeräuschmessungen an Straßendeckschichten mit unterschiedlichem Alter bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h [3] 12
Abbildung 6: Hydratationswärmeraten und Hydratationsperioden von C_3S und Portland- Zement (CEM I 32,5 R) [7] 16
Abbildung 7: Einfluss der Verzögerermenge auf das Erstarrungsende von Zementleim. [7] 18
Abbildung 8: Siebliniendiagramm für GK8 Klöch 22
Abbildung 9: Zwangsmischer [12] Abbildung 10: Der DZ 60 VS Getriebe [12] 25
Abbildung 11: Schalungen von oben und unten 26
Abbildung 12: Rütteltisch 26
Abbildung 13: Luftgehaltsprüfer 8 Liter 27
Abbildung 14: Mischung von Zement und grobe GK Abbildung 15: Feine GK 28
Abbildung 16: FM und LB abwiegen Abbildung 17: Wasserzugabe 28
Abbildung 18: Bestimmung der Luftgehalt des Frischbetons 29
Abbildung 19: Verdichten des Betons 29
Abbildung 20: Auftrag des Oberflächenverzögerer auf die Frischbetonoberfläche (rechts); Glatten der Probekörer mittels einer Glättekelle (links). 30
Abbildung 21: Kunststoffwurzelbürste 31
Abbildung 22: Ausbohren des Probekörpers (links); Dimensionen des Probekörpers (rechts) 31
Abbildung 23: Laborausrüstung für Rautiefeprüfung 32
Abbildung 24: Bestandteile der Wehner/Schulze Prüfanlage 33
Abbildung 25: Simulation der Verkehrsbeanspruchung [14] 34
Abbildung 26: Poliervorgang unter konstanter Zugabe von Q/W-G 35
Abbildung 27: Prinzip der Griffigkeitsmessung nach Wehner/Schulze mit der LGM [14] 35
Abbildung 28: Abbremsvorgang und die entsprechende Aufzeichnung 36
Abbildung 29: Polierkopf mit drei Polierrollen 37
Abbildung 30: Spülen der Probeoberfläche von Poliermittel 37
Abbildung 31: Prüfstation 38
Abbildung 32: Kalibrieren der Prüfgummis 38
Abbildung 33: Poliergummis 39
Abbildung 34: Neuer und abgenutzter Prüfgummis mit Blasenbildung 40
Abbildung 35: MicroProf mit xy-Kreuztisch 41
Abbildung 36: MikroCAD 42
Abbildung 37: Ausgangs-, Welligkeits- und Rauheitsprofil von MikroCAD [15] 43
Abbildung 38: Messprinzip der Abstandsensor FRT CWL [17] 44
Abbildung 39: Anordnung von Messflächen auf dem Betonprobekörperoberfläche 45
Abbildung 40: Prinzipdarstellug des optischen 3D-Sensors [15] 45
Abbildung 41: Reibungsbeiwert 47
Abbildung 42: Reibungsbeiwerte und Standardabweichung nach 5,5 Stunden Ausbürsten 48
Abbildung 43: Reibungsbeiwerte und Standardabweichung nach 6,5 Stunden Ausbürsten 48

Abbildung 44: Reibungsbeiwert und Standardabweichung nach 6 Stunden Ausbürsten 49
Abbildung 45: Probekörper 1 nach 0 (links) und nach 180 000 ÜR (rechts) 52
Abbildung 46: Probekörper 7 nach 0 (links) und nach 180 000 ÜR (rechts) 52

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Unterbeton [8] 13
Tabelle 2: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Oberbeton [8] 14
Tabelle 3: Wirkstoffe, die als Verzögerer in Frage kommen [7] 17
Tabelle 4: Verwendete Klimabedingungen 19
Tabelle 5: Eigenschaften von CEM II/B-S 42,5 N (DZ) 21
Tabelle 6: Siebdurchgang EBK 0/2 und EBK 4/8 22
Tabelle 7: Technische Daten Profluid VP3 23
Tabelle 8: Erklärte Leistung von Fließmittel Profluid VP3 [11] 23
Tabelle 9: Technische Daten Proair NVX 24
Tabelle 10: Erklärte Leistung von Luftporenbildner Proair NVX 1:4 [11] 24
Tabelle 11: Technische Daten von TAL WB OFK-E 25
Tabelle 12: Betonrezeptur für erstes Versuchsprogramm 27
Tabelle 13: Ergebnisse der Messungen mit der Anlage von Wehner/Schulze 47
Tabelle 14: Einfluss der Ausbürstzeitpunkt- statische Analyse (t- Test) 49
Tabelle 15: Oberflächenrauheitsparameter gemessen mit MicroProf (TU Wien) 50
Tabelle 16: Oberflächenrauheitsparameter gemessen mit MikroCAD (TPA, Wien) 51

Anhang (Prüfprotokolle,…)

Text