

Verbundvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton"

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)	Förderkennzeichen: 13N10492
Vorhabenbezeichnung: BMBF Forschungsrahmenprogramm "Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING" Fördermaßnahme "Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture" Verbundvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton"	
Laufzeit des Vorhabens: von 01.07.2009 bis 30.06.2013	

Inhalt

I	Kurzdarstellung	1
1	Aufgabenstellung	1
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II	Eingehende Darstellung	10
1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	55
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	55
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	56
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	58
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	58

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

I Kurzdarstellung

1	Aufgabenstellung	1
1.1	Aufgabenstellung des Gesamtprojekts	1
1.2	Teilprojekte und Projektpartner	2
1.3	Aufgabenstellung im Teilprojekt V „Grundlagen der Bewertung bei der Erprobung von nanooptimiertem UHPC im Straßenbau“	3
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9

II Eingehende Darstellung

1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
1.1	Arbeitspaket 2: Laborforschung Nutzschiicht	10
1.1.1	Frisch- und Festbetonkennwerte Nutzschiicht	10
1.1.2	Griffigkeit geprägter Nutzschiichtkörper	12
1.1.3	Ermittlung der Texturkenngrößen mittels T3D-Messsystem	18
1.2	Arbeitspaket 3: Laborforschung Deckschiicht	22
1.2.1	Frisch- und Festbetonkennwerte Deckschiicht	22
1.3	Arbeitspaket 4: Versuche auf kleinen Flächen	24
1.3.1	Laboreinbauversuch an der Universität Kassel	24
1.3.2	Einbauversuch bei der Holcim AG	24
1.3.3	Mischversuche bei der Fa. Eirich.....	26
1.4	Arbeitspakete 5 und 6: Herstellung und Bewertung des Demonstrators	33
1.4.1	Bau des Demonstrators	33
1.4.2	Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer	41
1.4.2.1	Messpunkte und Belastungsbedingungen	41
1.4.2.2	Ergebnisse und Auswertung	42
1.5	Monitoring der HPC-Versuchsstrecke „PWC Löwenburg“	45
1.5.1	Rissaufnahme	45
1.5.2	Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer	52
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	55
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	55
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	56
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	58
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	58

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Normen-, Arbeitsblatt- und Richtlinienverzeichnis	59
Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. I.1.1: Geplanter Aufbau der Fahrbahndecke aus UHPC	1
Abb. I.3.1: Arbeitspakete (AP) und Verteilung der Aufgaben unter den Partnern	5
Abb. I.4.1: ITARI-Textur (Quelle: Müller-BBM)	8
Abb. I.4.2: Wehner/Schulze-Gerät im Labor der BAST und geprägter Prüfkörper	9
Abb. II.1.1: Druckfestigkeitsverlauf der Nuttschichtmischungen	11
Abb. II.1.2: Prototyp des mittels Stempeln geprägten Probekörpers	12
Abb. II.1.3: Lufteinschlüsse auf der Mörteloberfläche	12
Abb. II.1.4: Texturierung mittels Aufbetonieren	13
Abb. II.1.5: SRT-Gerät der BAST	13
Abb. II.1.6: Messrichtungen SRT	14
Abb. II.1.7: Prägung mit Entlüftungsbohrungen (Nullzustand ohne Beanspruchung) ..	14
Abb. II.1.8: Verlauf des Reibbeiwertes μ_{PWS} der im Juni 2011 untersuchten Nuttschicht- mischungen im Wehner/Schulze-Gerät (Textur_2010 mit Entlüftungsloch) 15	
Abb. II.1.9: Verlauf des Reibbeiwertes μ_{PWS} der im Februar 2012 untersuchten Nuttschicht- mischung	16
Abb. II.1.10: Entwicklung des Reibbeiwertes μ_{SRT} der im Februar 2012 untersuchten Nuttschichtmischung	17
Abb. II.1.11: 3D-Texturmessgerät der BAST	18
Abb. II.1.12: Durchbrechen von Sandkörnern (Aufnahme nach 90.000 Überrollungen) 19	
Abb. II.1.13: Vergleich der Biegezugfestigkeiten nach [6]	23
Abb. II.1.14: Laboreinbau der Deck- und Nuttschicht mit anschließender Prägung ...	24
Abb. II.1.15: Vergleich der Druckfestigkeiten der Deckschicht (hergestellt in verschiede- nen Mischern)	25
Abb. II.1.16: Verlauf der Druck- und Spaltzugfestigkeiten von zwei Nuttschichtmischun- gen des Mischversuchs bei der Fa. Eirich	27
Abb. II.1.17: Verlauf des Reibbeiwertes von geprägten Probplatten der Nuttschichtmi- schung M5 im Wehner/Schulze-Gerät	28

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Abb. II.1.18: Verlauf der Druck- und Spaltzugfestigkeiten von drei Deckschichtmischungen	31
Abb. II.1.19: Lageplan mit Abmessungen des Demonstrators in Kilsheim	34
Abb. II.1.20: Erfolgreicher Einbau der Deckschicht mittels Gleitschalungsfertiger	35
Abb. II.1.21: Anschließendes Abziehen mit Jutetuch	35
Abb. II.1.22: Nutzschieteinbau	36
Abb. II.1.23: Druckfestigkeitsverlauf der Deckschicht MA vom 03.04.13, Biegezugfestigkeit nach 29 Tagen	37
Abb. II.1.24: Spaltzugfestigkeitsverlauf des Betons der Deckschicht MA vom 03.04.13	37
Abb. II.1.25: Druck- und Spaltzugfestigkeitsverlauf der Nutzschieht vom 04.04.13, Abschnitt II	38
Abb. II.1.26: ELAtextur [®] -Messgerät	38
Abb. II.1.27: geprägte Bereiche (Abschnitte II, IV und VI)	39
Abb. II.1.28: Lageskizze Plattenlängen/Querfugen für FWD-Messungen	41
Abb. II.1.29: HPC-Versuchsstrecke „PWC Löwenburg“	45
Abb. II.1.30: Schnellfahrendes Rissaufnahmesystem „RoadControl“	46
Abb. II.1.31: Häufigkeitsverteilung der Längsrisse (alle Breiten), Aufnahme mittels „RoadControl“ im September 2011	47
Abb. II.1.32: Häufigkeitsverteilung feiner Querrisse ($b \leq 0,1$ mm), Aufnahme mittels „RoadControl“ im September 2011	47
Abb. II.1.33: Aufteilung der verschiedenen Rissbreiten auf der HPC-Versuchsstrecke (Stand 2011, gemessen mit „RoadControl“)	48
Abb. II.1.34: Rissbild Abschnitt 1 – stark ausgeprägtes Längsrissbild und wenige breite Querrisse, die über die gesamte Breite verlaufen, konzentriert in einem Bereich des Abschnitts	49
Abb. II.1.35: Rissbild Abschnitt 2 – vermehrt Querrisse, z.T. durchgehend oder mit Versatz	50
Abb. II.1.36: heterogenes Rissbild in Abschnitt 3 – inkl. händisch eingebauten Bereichen	50
Abb. II.1.37: Mittlere 10%-Quantilwerte des äquivalenten Verformungsmoduls auf OK HPC-Fahrbahn	53
Abb. II.1.38: Mittlere 10%-Quantilwerte des Bettungsmoduls in Plattenmitte	54

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Tabellenverzeichnis

Tab. I.1.1: Übersicht über die Teilvorhaben des Forschungsvorhabens: Laufende Nummern, Titel und ausführende Partner	2
Tab. II.1.1: Nutzschichtmischungen vor und nach teilweiser Substitution durch Feinsthüttensandmehl	10
Tab. II.1.2: Ergebnisse der ersten SRT-Messungen	14
Tab. II.1.3: Deckschichtmischungen vor und nach teilweiser Substitution durch Feinsthüttensandmehl	22
Tab. II.1.4: Nutzschichtmischung M5 (Mischvolumen 236 l)	26
Tab. II.1.5: Deckschichtmischungen MA und MC	30
Tab. II.1.6: Textur- und Griffigkeitswerte auf den Abschnitten II, IV und VI	39
Tab. II.1.7: Plattengrößen der zu überbauenden Betondecke	41
Tab. II.1.8: Vergleich der mittleren äquivalenten Verformungsmoduln der linken Plattenreihe	42
Tab. II.1.9: Vergleich der mittleren Bettungsmoduln der linken Plattenreihe	43
Tab. II.1.10: mittlere Wirksamkeitsindizes der linken Plattenreihe	43
Tab. II.1.11: Maximale Deflexionen sowie daraus berechnete äquivalente Verformungsmoduln E_a , Bettungsmoduln E_0 und Wirksamkeitsindizes W auf den Abschnitten 1 bis 3	52

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

1.1 Aufgabenstellung des Gesamtprojekts

In dem hier beschriebenen Forschungsvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus UHPC" sollte ein Herstellungsverfahren für eine hoch tragfähige, lärmarme, ressourcensparende und dauerhafte Betonfahrbahn aus Ultra-hochfestem Beton (Ultra High Performance Concrete, UHPC) erarbeitet werden. Die Oberflächeneigenschaften Griffigkeit, Nassgriff, Entwässerung und Wasserverdrängung sowie Reduktion der Reifen-Fahrbahngeräusche sollten durch eine geometrisch definierte, reproduzierbare und dauerhafte Oberflächentexturierung erreicht werden.

Es wurden Arbeiten zur stofflichen und produktionstechnischen Anpassung des Ausgangsmaterials an die besonderen Belange des Straßenbaus und zur Ausarbeitung eines geeigneten Texturierungsverfahrens durchgeführt. Insbesondere wurden die Rezeptur und das Mischverfahren an die Erfordernisse des Materials angepasst.

Ein ökologisches Ziel des vorgestellten Konzepts war die Verminderung des Rohstoff- und Energieeinsatzes sowie der Emissionsbelastung, nicht nur durch die wesentlich dünnere Betondecke selbst, sondern auch durch die Verwendung hütten-sandhaltiger Zemente. Letztere erfordern einen geringeren Energieeinsatz bei der Herstellung als die heute verwendeten Verfahren und Materialien.

Neuartig ist bei dem hier zugrunde gelegten Konzept insbesondere die Trennung der Fahrbahndecke in zwei Schichten mit unterschiedlicher Funktion: eine sog. Deckschicht mit einer Stärke von ca. 15 cm, die im Wesentlichen die Tragfähigkeit der Fahrbahn gewährleistet und eine ca. 2 cm dicke Nuttschicht, die die o. g. funktionalen und umwelttechnischen Eigenschaften aufweist (vgl. Abbildung I.1.1).

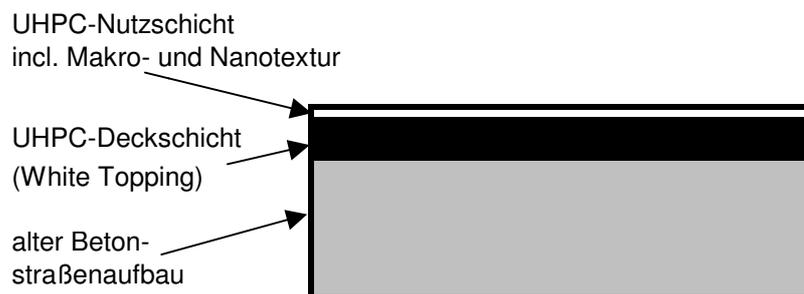


Abbildung I.1.1: Geplanter Aufbau der Fahrbahndecke aus UHPC

Die im Projekt umgesetzte Oberflächentextur ist durch Rauigkeitselemente geprägt, deren Größe und Formgebung im Bereich von Zehntel Millimetern bis etwa zehn Millimeter liegen. Die vorgegebene Makrotextur ist geeignet, die Rollgeräuschentstehung durch Schwingungsanregung des Reifens und air-pumping im Reifen-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Fahrbahn-Kontakt zu minimieren. Das Material sowie die Anordnung, Größe und Formgebung der Rauigkeitselemente unterstützen außerdem die Griffigkeit der Fahrbahn im trockenen und nassen Zustand.

In der Schlussphase des Vorhabens war der Bau eines Demonstrators zum Nachweis der funktionalen und umwelttechnischen Eigenschaften und der akustischen Performance vorgesehen.

(Text Kapitel I.1.1: Müller-BBM)

1.2 Teilprojekte und Projektpartner

Das Forschungsvorhaben war in die nachfolgenden Teilvorhaben gegliedert, die jeweils von einem Projektpartner, ggf. in Kooperation mit weiteren Projektpartnern, bearbeitet wurden.

Tabelle I.1.1: Übersicht über die Teilvorhaben des Forschungsvorhabens:
Laufende Nummern, Titel und ausführende Partner

Lfd. Nr. Teilvorh.	Titel	Ausführender Partner
I	Betontechnologische Grundlagen für dauerhafte, hoch belastbare tragende Betondeckschichten aus HPC und UHPC	Universität Kassel, FB 14 Bauwesen
II	Grundlagenforschung zur Wechselwirkung mit Additiven	BASF Construction Chemicals
III	Forschungsarbeiten zu Zement und Mischgut für Hochleistungsbeton	Holcim Deutschland
IV	Grundlagen der Kornbandoptimierung für Hochleistungsbeton	ThyssenKrupp Resource Technologies (früher: Polysius)
V	Grundlagen der Bewertung bei der Erprobung von nanooptimiertem UHPC im Straßenbau	Bundesanstalt für Straßenwesen
VI	Erarbeitung eines material- und prozessadäquaten lärmarmen Texturdesigns	Müller-BBM
VII	Erarbeitung der Methodik eines Texturprägeverfahrens für nanooptimierten UHPC	Röchling Automotive

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Lfd. Nr. Teilvorh.	Titel	Ausführender Partner
VIII	Grundlagen der Mischtechnik für Hochleistungsbeton	Otto Alte-Teigeler GmbH
IX	Grundlagen der Einbautechnik für Hochleistungsbeton	EUROVIA Beton

(Text Kapitel I.1.2: Müller-BBM)

1.3 Aufgabenstellung im Teilprojekt V „Grundlagen der Bewertung bei der Erprobung von nanooptimiertem UHPC im Straßenbau“

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat die Aufgabe übernommen, die im Rahmen des Projektes entwickelten Betonrezepturen aus Ultra-hochfestem Beton (UHPC) für den Einsatz im Straßenbau zu begutachten. Entsprechend der jeweiligen Laborergebnisse des beteiligten Partners Universität Kassel sollten im Labor der BASt Betonprüfungen durchgeführt werden, um die Plausibilität dieser Ergebnisse zu bewerten und Optimierungsvorschläge speziell für den Einsatz im Straßenbau zu erarbeiten. Zudem sollten an geprägten Probeplatten aus UHPC Prognoseuntersuchungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Funktionalität in Bezug auf die Gebrauchseigenschaften Griffigkeit und Lärmreduktion erfolgen.

Darüber hinaus war die Begutachtung der neuen multifunktionalen Fahrbahn von der Laborprüfung bis zur Einrichtung von Testfeldern hinsichtlich seiner Eignung für den Einsatz im Straßenbau Aufgabe der BASt.

Voraussetzung für die Aufnahme einer neuen Bauweise in ein Technisches Regelwerk mit vertragsrechtlicher Wirkung ist neben dem Nachweis der prinzipiellen Eignung eine detaillierte Konstruktions- und Baubeschreibung sowie die Festlegung von Anforderungen für die Herstellung und den Zeitraum der Nutzung. Daher sollte die BASt nach einem erfolgreichen Projektabschluss ein Konzept erarbeiten, wie diese neue Bauweise zukünftig Eingang in das Regelwerk des Straßenbaus finden kann.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Straßenerhaltung ist angesichts der stetig wachsenden Verkehrsdichte und steigenden Achslasten eine der wichtigsten Aufgaben der Straßenbauverwaltungen. Unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit ist es u.a. erforderlich, neue Erhaltungstechnologien zu erarbeiten, um die Lebenszykluskosten zu senken bzw. zu optimieren. Aufgrund der stetig wachsenden Verkehrsbelastung stoßen die bisher verwendeten Baustoffe und Standardbauweisen hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer an Grenzen, so dass die Eignung neuer leistungsfähiger Materialien und Konstruktionen für den Einsatz im Straßenbau geprüft werden muss.

Mit dem Baustoff Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC) steht ein innovativer Werkstoff zur Verfügung, der die hohen Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer und chemischer Beanspruchung erfüllt. Zudem ist davon auszugehen, dass aufgrund der mechanischen Materialkennwerte die erforderliche Tragfähigkeit mit geringeren Schichtdicken als bei herkömmlichen Straßenbetonen erreicht werden kann. Die Instandsetzung sanierungsbedürftiger Beton- und Asphaltfahrbahnen durch Aufbringen einer neuen und dünneren Betonfahrbahndecke auf die Altsubstanz ist seit langem unter dem Namen Whitetopping bekannt. Allerdings wurden dafür im In- und Ausland bisher noch keine Leistungsbetone im Sinne von UHPC verwendet. So kamen ultrahochfeste Betone insbesondere als Ort beton und nicht für den Einbau mit konventioneller Gleitschalungstechnologie zum Einsatz.

Um bereits gesammelte Erkenntnisse aus relevanten Forschungsarbeiten in dem Projekt berücksichtigen zu können, hat die Bundesanstalt für Straßenwesen ein Tragfähigkeits- und Rissmonitoring an einer bestehenden Versuchsstrecke artgleicher Konstruktion aus Hochleistungsbeton (HPC) [Schm08] durchgeführt.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen verfügt über umfangreiche Erfahrungen bei der Bearbeitung und Koordination großer Verbundprojekte. Dazu zählen die vom BMWi geförderten Projekte „Leiser Straßenverkehr“ und die EU-Projekte Silvia, ITARI und Silence. In den genannten Projekten war und ist die BAST für Fragestellungen auf dem Gebiet der Straßenoberflächen tätig. Sie verfügt über spezielle Messinstrumente, die zur Prüfung bestimmter Oberflächeneigenschaften entwickelt wurden. So stehen bspw. zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften und Bestimmung weiterer Texturkenngrößen zwei- und dreidimensionale Messsysteme, sowie zur Beurteilung der Griffigkeit das Seitenkraft-Messverfahren, bei dem der Reibbeiwert μ_{SKM} bestimmt wird, zur Verfügung. Darüber hinaus können zur Prüfung des Polierwiderstandes und zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung Untersuchungen mit dem Wehner/Schulze-Gerät [9] durchgeführt werden.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Verteilung der Aufgaben unter den Partnern in diesem Verbundprojekt ist in Ab-
 bildung I.3.1 dargestellt:

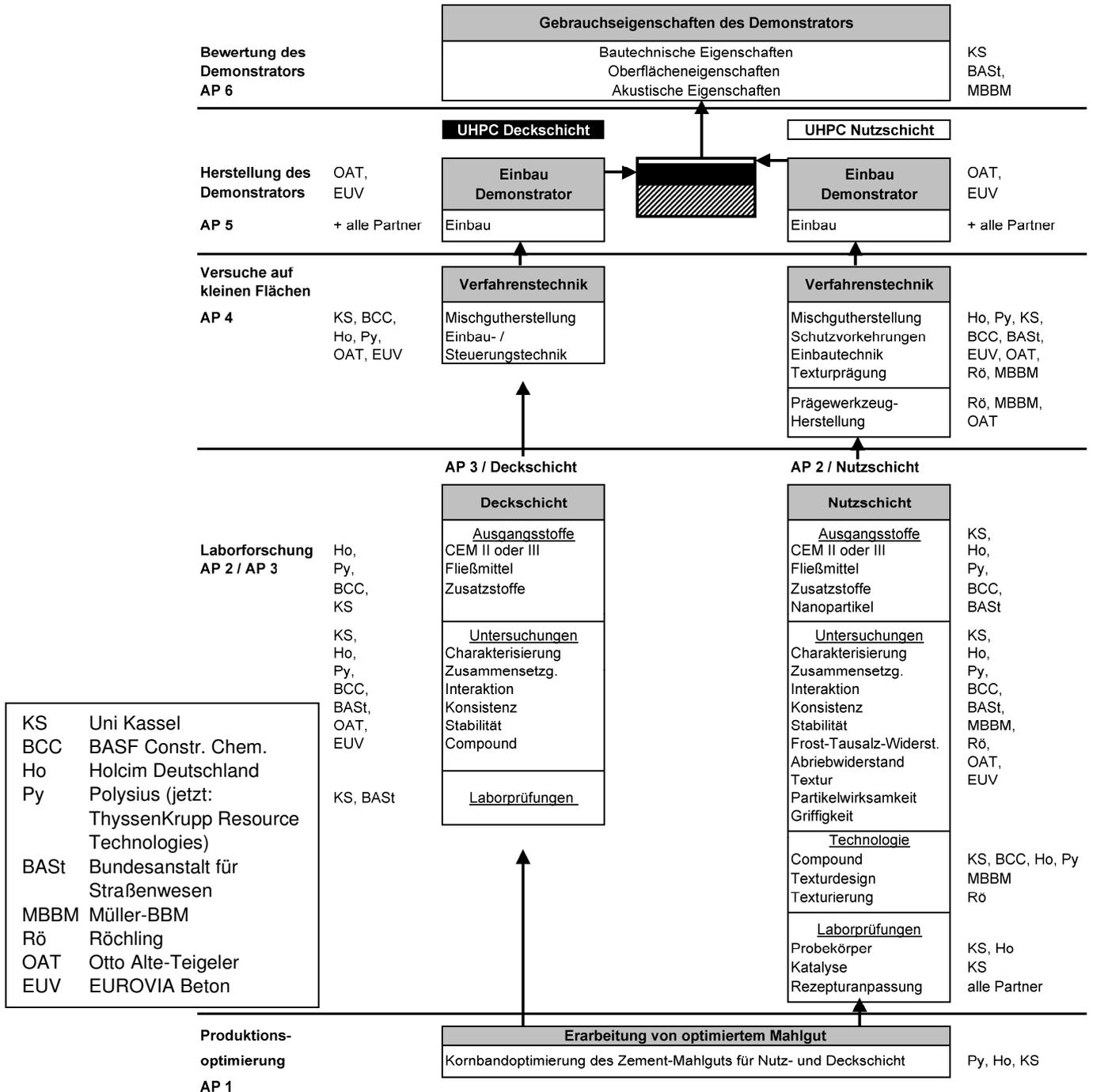


Abbildung I.3.1: Arbeitspakete (AP) und Verteilung der Aufgaben unter den Partnern

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Im Arbeitspaket 2 war zum einen geplant, die Frisch- und Festbetonkennwerte der Nuttschichtmischung zu bestimmen. Zum anderen sollten geprägte Platten im Wehner/Schulze-Gerät geprüft und nach verschiedenen Beanspruchungsstufen sowohl die Reibungskoeffizienten nach Wehner/Schulze als auch die Texturkenngrößen zur Bewertung der Mikrotextur und SRT-Werte (**S**kid **R**esistance **T**ester) zur Griffigkeitsbestimmung ermittelt werden. Innerhalb der Projektlaufzeit veränderte sich aus wirtschaftlichen und umweltrelevanten Gründen die Rezeptur der Nuttschichtmischung. Hinsichtlich einer Optimierung der Konsistenz und Prägbarkeit sowie der Packungsdichte erfolgte eine teilweise Substitution von Silicastaub und Zement durch Feinsthüttensandmehl. Mit Ausnahme des CDF-Tests (**C**apillary suction of **D**e-icing chemicals and **F**reeze-thaw test) zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes, auf dessen Durchführung aufgrund der hohen Gefügedichte bzw. geringen Porosität des Festbetonmatrix verzichtet werden konnte, wurden durch die BAST alle aufgeführten Leistungen erbracht. Dies geschah sowohl an Laborproben begleitend zur Entwicklung der Nuttschichtmischung als auch an Proben, die während der Mischversuche in situ hergestellt wurden. Dabei wurden jeweils die Druck- und Spaltzugfestigkeiten sowie an ausgewählten geprägten Probekörpern die Reibungskoeffizienten nach Wehner/Schulze und die SRT-Werte bestimmt.

Im Arbeitspaket 3 wurden ebenfalls alle geplanten Arbeiten - die Deckschicht betreffend - durchgeführt. Auch hier ergaben sich mehrere Rezepturänderungen aus o.g. Gründen. Zudem betraf dies aufgrund der Igelbildung während des Mischvorgangs ferner die Fasergeometrie. Neben Probekörpern zur Bestimmung der Druck- und Spaltzugfestigkeit wurden hier von ausgewählten Mischungen Biegebalken zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit hergestellt.

Die Teilnahme an den regelmäßig stattfindenden Partnertreffen und Telefonkonferenzen, vor allem zur Vorbereitung der Misch- und Einbauversuche, gewährleistete durch den fachlichen Austausch mit den anderen Partnern die Bearbeitung aller, insbesondere in den Arbeitspaketen 4 und 5, geforderten Fragestellungen, sowohl die Versuche auf kleinen Flächen als auch den Bau des Demonstrators betreffend.

Es zeigte sich innerhalb der Projektlaufzeit, dass das Mischen des UHPC mit der vom Partner OAT vorgesehenen mobilen Mischtechnik trotz mehrerer Modifikationen an der Gerätetechnik zu keinem akzeptablen Mischergebnis führte. Daher war es erforderlich, die Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich für das Mischen des UHPC in das Projekt einzubinden. Die Firma Eirich verfügt als Mischgerätehersteller über umfassende Erfahrungen mit Intensivmischern für unterschiedliche Materialien. Mit der Mischtechnik der Firma Eirich war das Mischen von den im Projekt entwickelten Rezepturen von Deck- und Nuttschicht möglich. Aufgrund dieser Gegebenheit und der Tatsache, dass durch die Kapazitätsauslastung bei Eurovia und OAT, die für die Bereitstellung der Gleitschalungsfertiger sowie der zur Prägung notwendigen Nachlaufbühne verantwortlich waren, unmittelbar nach den Mischversuchen im Juli 2012 kein Einbauversuch mehr in diesem Jahr möglich war, musste der Demonstratorbau ohne vorherigen Einbauversuch im Frühjahr 2013 auf dem Gelände der Fa. Eirich stattfinden. Der Demonstrator sollte eine Länge von rd. 60 m und eine Breite von 3,75 m

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

besitzen, wobei die Deckschicht ohne Verankerung auf einem Vlies auf der vorhandenen Betondecke des von der Fa. Eirich zur Verfügung gestellten Parkplatzes betoniert wurde. Während sich die Deckschicht mit dem vom Partner Eurovia bereitgestellten Fertiger gut einbauen ließ, konnte die Nutzschrift nicht in der vorgesehenen Konsistenz mit einem Gleitschalungsfertiger aufgebracht werden. Aus diesem Grund wurde die Nutzschriftmischung auf mehrere Abschnitte der Deckschicht verteilt sowie durch Änderung des Wasser- und Fließmittelgehaltes in unterschiedlicher Konsistenz aufgebracht und anschließend geprägt. Die BAST führte auf diesen geprägten Bereichen Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel sowie Texturmessungen zur Bestimmung der Texturkenngößen MPD (Mean Profile Depth) und ETD (Estimated Texture Depth) mit dem Laserprofilometer (ELAtextur[®]-Messgerät) durch. Messungen mit dem SKM (Seitenkraft-Messverfahren) zur Bestimmung der Griffigkeit konnten aufgrund der nicht durchgehend vorhandenen und geprägten Nutzschrift nicht vorgenommen werden. Auch ein im Juni 2013 durchgeführter Handeinbauversuch der Nutzschrift auf der bis dato freiliegenden Oberfläche der Deckschicht mit anschließender Prägung führte zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis.

Ferner wurden auf der Versuchsstrecke jeweils vor und nach dem Demonstratorbau Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführt, um die tragfähigkeitsverbessernde Wirkung des UHPC-Instandsetzungssystems in der Praxisanwendung beurteilen zu können.

Der Demonstrator wurde im Juli 2013 rückgebaut.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Unter dem Aspekt der Sicherstellung von Qualität, Dauerhaftigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit des bestehenden Autobahnnetzes aus Beton ist es erforderlich, neue bauliche Erhaltungssysteme zu erarbeiten. Besonders betroffen von der Notwendigkeit wiederkehrender bautechnischer Instandsetzung sind die hoch belasteten Bundesfernstraßen. Gleichzeitig findet ein kontinuierliches Zusammenwachsen von Verkehrsadern und empfindlicher Bebauung, wie Wohnbebauung, statt. Es besteht ein hohes Konfliktpotenzial bei gleichzeitig hohen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen. Abschirmeinrichtungen, wie Schallschutzwände und -wälle, erreichen heute bereits kaum mehr realisierbare Höhen von bis zu 20 m über Fahrbahnoberkante, um den Anforderungen gerecht zu werden. Aktuell stellt lediglich der Waschbeton mit einem D_{Stro} -Wert von -2 dB(A) eine lärmarme Betonbauweise dar. Wie durchgeführte Messungen gezeigt haben, ist hierbei zu beachten, dass die an verschiedenen bestehenden Waschbetonstrecken ermittelten Vorbeirollpegel in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnung sowie der Ausführung (z. B. Ausbürsttiefe) variieren können [WIEL12].

In diesem Projekt sollte die aus dem Projekt „Leiser Straßenverkehr“ [LEIS04] und den EU-Projekten ITARI und Silence [ITAR07; SILE08] hervorgegangene und opti-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

mierte Oberflächentextur „ITARI“ dauerhaft formstabil und reproduzierbar in die Nuttschicht eingeprägt werden. Daher war zu prüfen, ob und wie sich diese Textur, die sich durch Elemente von sehr geringer Größenordnung auszeichnet (die Seiten der Rauten sind nur wenige Millimeter lang), in die Nuttschicht einbringen lässt.

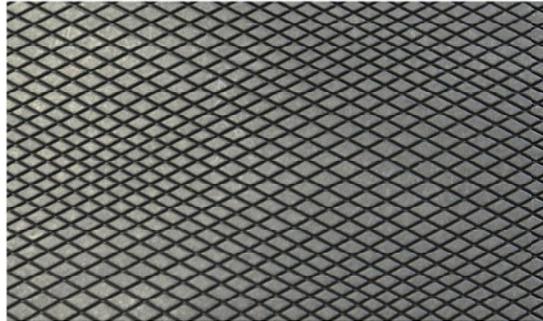


Abbildung I.4.1: ITARI-Textur (Quelle: Müller-BBM)

Aufgrund eines bereits existierenden Patents zur Texturierung mittels einer Walze, deren Mantel das Negativ der aufzubringenden Fahrbahntextur (Matrize) enthält, sollten zwei alternative Ansätze verfolgt werden. Zum einen war das Aufstempeln der gewünschten Textur in einem step-by-step Verfahren zu prüfen. Zum anderen sollte vom Partner Röchling Automotive ein Spritzgusswerkzeug entworfen und hergestellt werden, mit Hilfe dessen Kunststoffbahnen gefertigt werden, die Träger des Negativs der Fahrbahntextur sind. Diese Trägerfolien sollten in einem kontinuierlichen Prozess auf der frisch betonierten Nuttschicht aufgelegt und eingedrückt werden.

Zur Bewertung der Griffigkeit bzw. zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Fahrbahnoberflächen steht das von Wehner und Schulze an der Technischen Universität Berlin entwickelte Prüfverfahren (PWS-Verfahren) zur Verfügung [9].

Beim PWS-Verfahren wird zeitraffend der Einfluss der Verkehrsbelastung auf das Griffigkeitsverhalten von Fahrbahnoberflächen an Bohrkernen oder im Labor hergestellten Prüfkörpern simuliert. Dazu wird die Fahrbahnoberfläche durch drei konisch angeordnete Polierrollen, welche unter Schlupf abrollen, mit einem Quarzmehl-Wasser-Gemisch als Schleifmittel beansprucht. Um den entmörtelnden und aufräuhenden Einfluss von Schwerverkehr, Frost-Tauwechseln und Taumitteln zu simulieren, wird die Prüfoberfläche zusätzlich mit einem groben Korund (0,5/1,0 mm) bei einem Druck von ca. 6 bar einer aggressiven Behandlung durch Sandstrahlung unterzogen. Anhand eines kreisförmig messenden Laborgriffigkeitsmessgerätes werden Griffigkeitsbeiwerte nach den jeweiligen verschiedenen Beanspruchungsstufen bestimmt. Der kreisförmige Messkopf, an dem drei Reibgummis befestigt sind, wird dabei frei bei einer Umlaufgeschwindigkeit von 100 km/h über der Prüfoberfläche unter einer kontinuierlichen Wasserzugabe mit einem rechnerischen Wasserfilm von 1 mm auf die Prüfoberfläche aus einer Höhe von 3 mm abgesetzt. Das bei dieser "Vollbremsung" auftretende Drehmoment wird bis zum Stillstand durch einen sich unter der Grundplatte befindlichen Messaufnehmer aufgezeichnet. Der Reibbeiwert μ_{PWS} für die entsprechende Beanspruchungsstufe entspricht dem Quotienten aus dem bei 60 km/h gemessenen Moment und dem Auflastgewicht.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

In Abbildung I.4.2 ist das Prüfgerät der BAST dargestellt, mit dem alle Untersuchungen in diesem Projekt durchgeführt wurden.



Abbildung I.4.2: Wehner/Schulze-Gerät im Labor der BAST und geprägter Prüfkörper

Wehner/Schulze Untersuchungen an Bohrkernen von Autobahnabschnitten mit Waschbetonoberflächen weisen μ_{PWS} -Werte von 0,3 bis 0,5 bei der Nullmessung und Werte zwischen 0,3 und 0,4 nach 360.000 Überrollungen (ohne Sandstrahlen) auf.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Verlauf des Projektes zeigte sich, dass das Mischen des UHPC mit der vom Partner OAT vorgesehenen mobilen Mischtechnik nicht wie geplant durchgeführt werden konnte. Daher erwies es sich als erforderlich, die Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich für das Mischen des UHPC in das Projekt einzubinden. Die Firma Eirich verfügt über umfassende Erfahrungen mit Intensivmischern für unterschiedliche Materialien. Mit der Mischtechnik der Firma Eirich war das Mischen des UHPC der im Projekt entwickelten Rezepturen möglich.

(Text Kapitel I.5: Müller-BBM)

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

II Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Wie bereits aus der Aufgabenstellung (Abschnitt I.1.2) hervorgeht, war das Forschungsvorhaben in neun Teilvorhaben gegliedert, die jeweils von einem Projektpartner, ggf. in Kooperation mit weiteren Projektpartnern, bearbeitet wurden. Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat dabei das Teilprojekt V „Grundlagen der Bewertung bei der Erprobung von nanooptimiertem UHPC im Straßenbau“ übernommen.

1.1 Arbeitspaket 2: Laborforschung Nutzschiicht

Bearbeitungszeitraum: 07.2009 bis 06.2012

Im Arbeitspaket 2 wurden die Frisch- und Festbetonkennwerte der Nutzschiichtmischung nach Vorgabe der Universität Kassel sowie die Texturkenngrößen mittels T3D-Messsystem als auch Reibbeiwerte nach Wehner/Schulze und SRT-Werte zur Griffigkeitsbestimmung nach verschiedenen Beanspruchungsstufen an geprägten Platten bestimmt.

1.1.1 Frisch- und Festbetonkennwerte Nutzschiicht

Die Rezeptur der Nutzschiichtmischung veränderte sich innerhalb der Projektlaufzeit hauptsächlich dahingehend, dass eine teilweise Substitution des Silicastaubs und des Zementes durch Feinsthüttensandmehl erfolgte (siehe Tabelle II.1.1). Dies geschah im Wesentlichen aus wirtschaftlichen und umweltrelevanten Aspekten, zur Optimierung der Packungsdichte sowie hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und Prägbarkeit.

	Masse [kg/m ³]	Masse [kg/m ³]
Wasser	196,09	188,01
Bindemittel		
CEM III/A 42,5 N-NA (Holcim)	822,66	688,55
Feinsthüttensandmehl (Holcim)	-	91,81
Sika Silikoll P unkompaktiert	206,61	174,12
Zusatzmittel		
BASF UHPC 0518 (53,7%)	21,08	6,22
Zuschlag / Zusatzstoffe		
Quarzmehl W3	60,53	146,81
Quarzsand 0,125/0,5	1004,63	1048,65
Summe (inkl. 15 dm³ Porenraum)	2311,6	2650,51

Tabelle II.1.1: Nutzschiichtmischungen vor (linke Spalte: Stand bis 2011) und nach teilweiser Substitution durch Feinsthüttensandmehl (rechte Spalte: Stand ab 2012)

Der Wasser-Bindemittelwert kann bei beiden Rezepturen mit 0,20 angegeben werden, wenn der Anteil an Feinsthüttensandmehl wie auch der Silicastaubgehalt zu 100% auf den Bindemittelgehalt angerechnet werden. Der nach DIN EN 12350-7 [13]

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

ermittelte Luftgehalt lag zwischen zwei und sechs Vol.-%. Das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [12] konnte mit < 20 cm angegeben werden, womit eine gute Prägbarkeit und Stabilität der eingebrachten Textur erreicht werden konnte.

An Probekörpern der Nutzschrift wurde unter anderem die Druckfestigkeit im Alter von 7, 14 und 28 Tagen nach DIN EN 12390-3 [4] bestimmt (siehe Abbildung II.1.1). Dabei zeigte sich ein großer Unterschied zwischen beiden Mischungen insbesondere ab dem siebten Tag, der im Wesentlichen durch die latent hydraulische Wirkung und damit verlangsamte festigkeitsrelevante Hydratation des Feinsthüttensandmehls verursacht wird. Nach der vorgenommenen Substitution liegt die Nutzschrift lediglich im Bereich der hochfesten Betone. Die labortechnischen Untersuchungen an geprägten Prüfkörpern beider Nutzschriftmischungen (siehe Kap. II.1.3.3, Abbildung II.1.17) prognostizieren eine dauerhafte und stabile Textur.

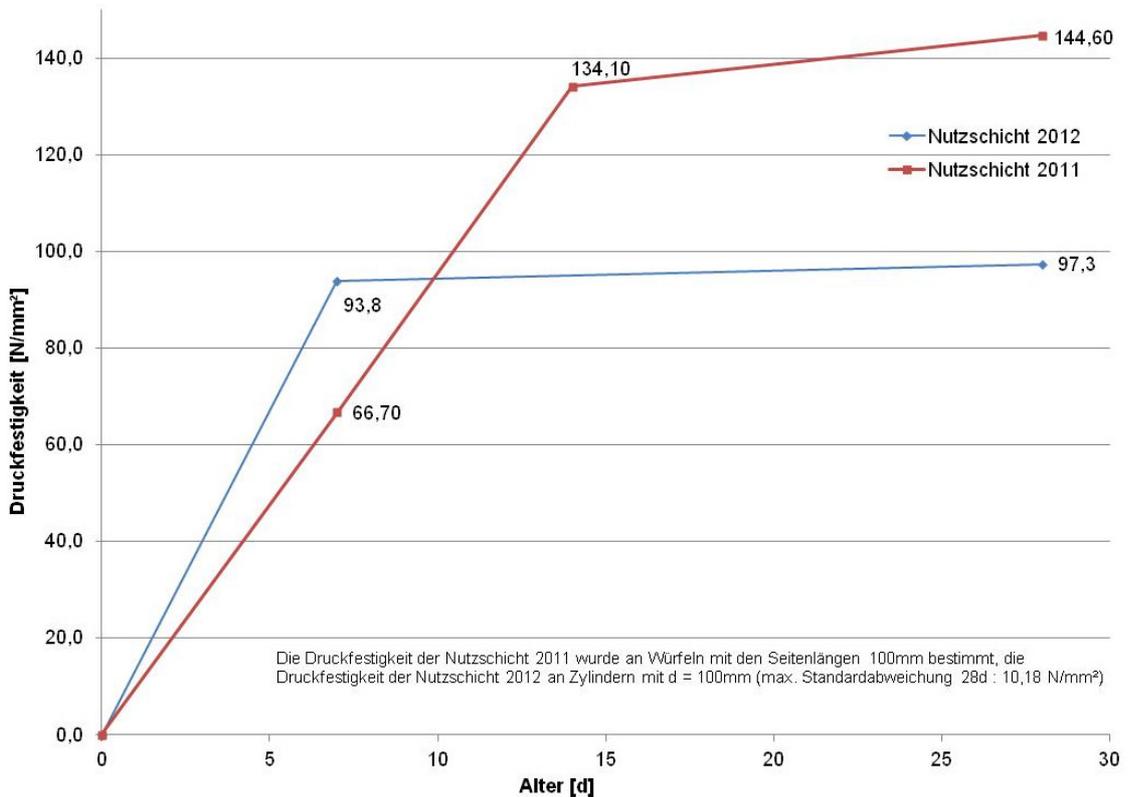


Abbildung II.1.1: Druckfestigkeitsverlauf der Nutzschriftmischungen

Die Herstellung der Probekörper erfolgte gemäß Mischanweisung vom Partner Universität Kassel nach DIN EN 12390-2 [3] im Betonlabor der BAST. Nach Herstellung blieben die Probekörper für 24h in der Schalung, danach erfolgte bis zur jeweiligen Prüfung eine Lagerung in Wasser bei 20±1 °C.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Zu Projektbeginn wurden zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [4] sowohl von der Nutz- als auch Deckschichtmischung Würfel mit den Abmessungen $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ nach DIN EN 12390-1 [2a] hergestellt. Im weiteren Projektverlauf wurden die Prüfungen gemäß den Regelwerken des Straßenbaus vorgenommen, um eine bessere Interpretation und Bewertung der mechanischen Betonkennwerte vornehmen zu können. Demzufolge wurden seit 2012 Zylinder mit den Abmessungen $h = 200 \text{ mm}$ und $d = 100 \text{ mm}$ für die Probekörperherstellung gewählt. Aus diesen Zylindern können sowohl Proben für die Druckfestigkeit (Abmessungen $h = 100 \text{ mm}$ und $d = 100 \text{ mm}$) als auch für die Spaltzugfestigkeit (Zylinderscheibe mit den Abmessungen $h = 50 \pm 5 \text{ mm}$ und $d = 100 \pm 5 \text{ mm}$) durch zwei Sägeschnitte gewonnen werden. Die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die AL Sp-Beton [1].

Die an Laborproben der Nuttschicht bestimmte Spaltzugfestigkeit lässt sich im Alter von sieben Tagen mit $8,2 \text{ N/mm}^2$ und im Alter von 28 Tagen mit $9,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer maximalen Standardabweichung von $0,7 \text{ N/mm}^2$ angeben. Damit liegt die Spaltzugfestigkeit der Nuttschicht im Alter von 28 Tagen wesentlich höher als bei herkömmlichen Straßenbetonen, was eine hohe Dauerhaftigkeit erwarten lässt.

1.1.2 Griffigkeit geprägter Nuttschichtkörper

Die geprägten Laborprobekörper sind ausnahmslos durch den Projektpartner Universität Kassel hergestellt worden.

Zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung wurden im ersten Halbjahr 2010 Tastversuche mit dem Wehner/Schulze-Gerät an einem Probekörper der Nuttschichtmischung durchgeführt. Aufgrund der inhomogenen Oberflächentextur des Probekörpers (Prototyp) war eine Bewertung der Griffigkeit bzw. Griffigkeitsentwicklung zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Die vorliegenden Unterschiede im Höhenniveau zwischen den einzelnen Prägeflächen waren in erster Linie auf die geringe Prägefläche des Werkzeuges (Stempel mit $d = 20 \text{ mm}$) zurückzuführen, der hier versuchsweise Anwendung fand (Abbildung II.1.2).



Abbildung II.1.2: Prototyp des mittels Stempeln geprägten Probekörpers

Erwartungsgemäß konnte in den Versuchen festgestellt werden, dass einzelne Sandkörner die Mörteloberfläche durchbrechen und somit eine Verbesserung der Mikrorauheit auf den Plateauoberflächen der einzelnen Rauten herbeiführen. An einigen Rautenecken konnten Mörtelausbrüche festgestellt werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Vorschädigung in der Prägephase zurückzuführen sind.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Grundlegend war jedoch davon auszugehen, dass die Matrix des UHPC-Nutzschichtmörtels eine gute Polierresistenz aufweist.



Abbildung II.1.3: Luft einschüsse auf der Mörteloberfläche

In der weiteren Entwicklung erfolgte die Prägung mit Prägegittern, die sich aufgrund fehlender Entlüftung nur unter Einschluss von Luftblasen und mit erhöhter Auflast in die Mörteloberfläche einpressen ließen (siehe Abbildung II.1.3). In Abstimmung mit dem Projektpartner Müller BBM erfolgte aufgrund der oben erwähnten extrem schwer herzustellenden Prägung die Abwandlung der Rautenform zu größenmäßig variierenden Rechtecken.

Im weiteren Verlauf wurden vom Projektpartner Röchling Prägeplatten zur Verfügung gestellt, die lediglich die Herstellung texturierter Probekörper durch Aufbetonieren erlaubten (Abbildung II.1.4). Dadurch ergaben sich zunächst sehr geringe Reibbeiwerte ($\mu_{PWS,min} \sim 0,17$), die eine geringe kritische Anfangsgriffigkeit erwarten lassen. Bei allen bis dato untersuchten Probekörpern stellten sich jedoch nach einer relativ kleinen Anzahl von Überrollungen ausreichende Griffigkeiten ein. Diese lagen auch nach anschließender sehr starker Beanspruchung durch wiederholtes Sandstrahlen und Überrollungen im Wechsel weiterhin in einem günstigen Bereich ($\mu_{PWS,18 \times 10^4 \ddot{U}} \sim 0,41$). Dabei unterschieden sich die Probekörper unter anderem in der Art der verwendeten Sande sowie in ihrem massebezogenen Fließmittelwirkstoff / Bindemittelwert. Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Textur einen hinreichenden Widerstand gegenüber Polieren bei ausreichend hohem Griffigkeitsniveau aufweist.



Abbildung II.1.4 : Texturierung mittels Aufbetonieren

Parallel zu den Messungen des Reibbeiwertes μ_{PWS} wurden mit Hilfe des Pendelgerätes SRT (**S**kid **R**esistance **T**ester, siehe Abbildung II.1.5) nach [8] Griffigkeitsmessungen an den beanspruchten Probekörpern der Nutzschicht durchgeführt.



Abbildung II.1.5 : SRT-Gerät der BAST

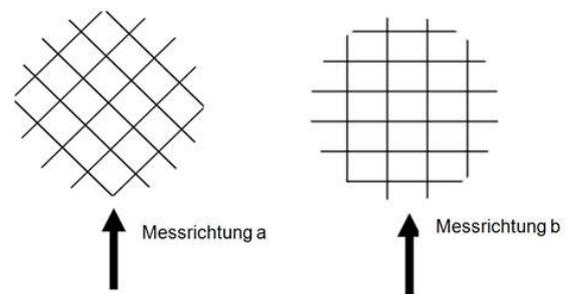
Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Geplant war eine diagonal zur Fahrtrichtung verlaufende Texturierung der Fahrbahn. Bzgl. der mit dem SRT-Gerät ermittelten Werte konnte dabei zwischen der Messrichtung a, die in einem Winkel von 45° zu den Vertiefungslinien der Prägung verlief, und der Messrichtung b, parallel zu den Vertiefungslinien der Prägung (siehe Abbildung II.1.6), kein signifikanter Unterschied gefunden werden.

Tabelle II.1.2 zeigt die Ergebnisse der SRT-Messungen an geprägten und im Wehner/Schulze-Gerät beanspruchten Proben aus ersten Versuchen.

(n x 10 ⁴) Überrollungen	SRT-Wert [μ _{SRT,a}]	Reibbeiwert [μ _{PWS}]
0	46	0,21
9	61	0,37
13,5	57	0,35
18	57	0,35
22,5	57	0,34
27	56	0,33



Tab. II.1.2: Ergebnisse der ersten SRT-Messungen

Abbildung II.1.6: Messrichtungen SRT

In Kombination mit dem Ausflussmesser nach Moore [7] kann nach den ZTV Beton-StB 07 [10] bei einer Kontrollprüfung der Griffigkeit auf eine Messung mit dem SKM verzichtet werden, wenn folgende Richtwerte eingehalten werden:

- SRT-Wert ≥ 60
- Ausflusszeit (s) ≤ 30 .

Da die im Nullzustand gemessene Ausflusszeit aufgrund der sehr hohen Makrorauheit nur ca. 2 s betrug, wurde im weiteren Projektverlauf auf die Bestimmung dieser Kenngröße verzichtet. Die Ergebnisse der SRT-Messungen spiegeln den Verlauf der im Wehner/Schulze-Gerät ermittelten Reibbeiwerte wieder. Auffallend ist hier zum einen die sehr geringe Anfangsgriffigkeit, die sich jedoch nach 9×10^4 Überrollungen stark erhöht hat. Zum anderen ist festzuhalten, dass die SRT-Werte nach 27×10^4 Überrollungen nur unwesentlich unter den bei der Kontrollprüfung geforderten Wert von 60 fallen.

Im weiteren Projektverlauf wurden vom Partner Röchling Prägeplatten mit Entlüftungslöchern entwickelt („Textur_2010 mit Entlüftungsloch“), die eine Probekörperherstellung wie geplant erlaubten und die Prägung nicht mehr durch Aufbetonieren erfolgen musste (siehe Abbildung II.1.7). Dadurch ergaben sich entgegen den zuvor gemessenen geringen kritischen Anfangsgriffigkeiten auch im Nullzustand (ohne Beanspruchung im



Abbildung II.1.7: Prägung mit Entlüftungsbohrungen (Nullzustand ohne Beanspruchung)

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

Wehner/Schulze-Gerät) sehr gute Griffigkeitswerte ($\mu_{PWS,0} = 0,55$ und $\mu_{SRT,0} = 66$).

Innerhalb des Prüfprogramms wurden an zwei geprägten Probekörpern Griffigkeitsprognosen durchgeführt. Diese wurden einer immens starken Beanspruchung durch wiederholtes Sandstrahlen und Überrollungen im Wechsel unterzogen. Der PWS-Wert nach Wehner/Schulze kann nach 27×10^4 Überrollungen inkl. wiederholten Sandstrahlens mit 0,44 angegeben werden. Nach weiteren $13,5 \times 10^4$ Überrollungen ohne Sandstrahlen blieb der PWS-Wert etwa konstant bei 0,44 (siehe dazu Abbildung II.1.8). Die mit dem SRT-Gerät gemessenen Griffigkeiten wiesen nach 27×10^4 Überrollungen im Mittel einen Wert von $\mu_{SRT} = 64$ auf. Auch nach weiteren $13,5 \times 10^4$ Überrollungen lag der Wert mit $\mu_{SRT} = 61$ noch über dem Wert, der bei einer Kontrollprüfung nach den ZTV Beton-StB 07 [10] gefordert wird. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die verwendeten Labormessverfahren keinen abnahme- bzw. vertragsrelevanten Charakter besitzen. So ist bspw. die Griffigkeit einer Straßenoberfläche im Rahmen der Abnahme in situ mittels des Reibungskoeffizienten μ_{SKM} nachzuweisen. Die ermittelten Laborergebnisse lassen darauf schließen, dass die Textur hinsichtlich ihrer Polierwiderstandsfähigkeit und Griffigkeit ausreichend dauerhaft ist.

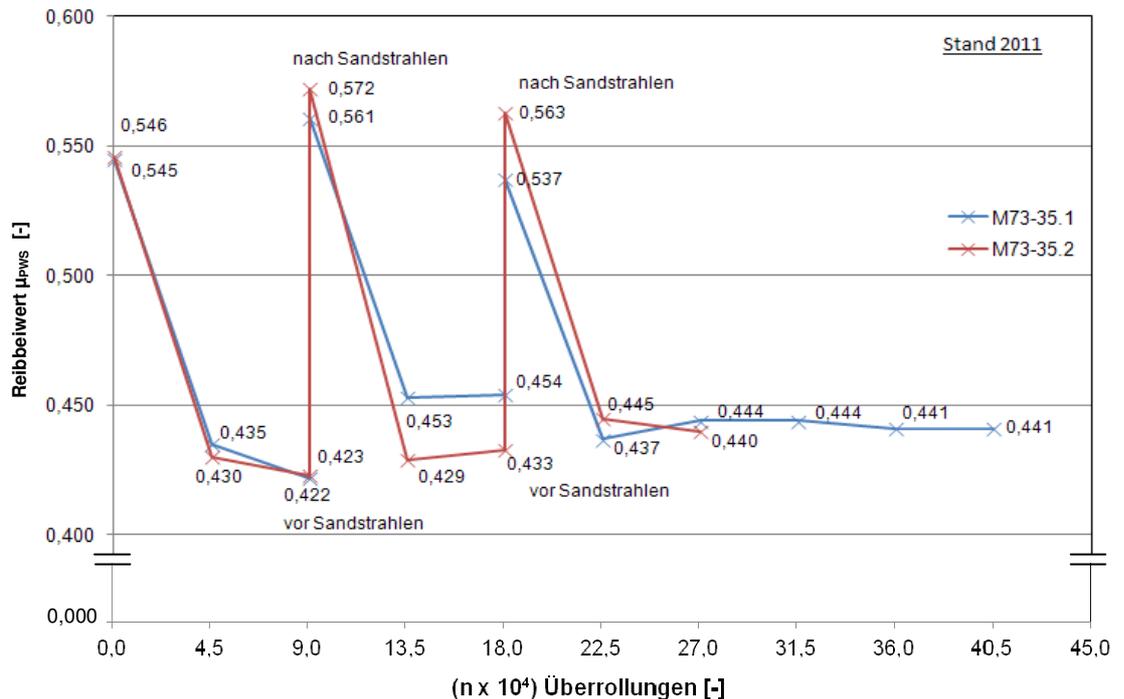


Abbildung II.1.8: Verlauf des Reibbeiwertes μ_{PWS} der im Juni 2011 untersuchten Nutzschichtmischungen im Wehner/Schulze-Gerät (Textur_2010 mit Entlüftungsloch)

Durch die im weiteren Projektverlauf vom Partner Röchling vorgenommene Fixierung von Prägegittern an mikroperforierter Trägerfolie, die eine Entlüftung während des Prägevorgangs gewährleistet, konnte die bis dato beobachtete „Kissenbildung“, hervorgerufen durch ein einzelnes Entlüftungsloch auf jedem Plateau, weitestgehend vermieden werden. Von der Universität Kassel wurden Ende 2011 aus der UHPC-Nuttschichtmischung zwei Probeplatten hergestellt, wobei die Prägung bei einer Plat-

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

te durch das Aufrollen des Prägegitters erfolgte und bei der zweiten Platte durch ein Eindrücken des Prägegitters mit Hilfe einer steifen Einpressplatte. Die beiden Probeplatten wurden zunächst an Müller-BBM zu Textur- und Strömungswiderstandsmessungen übergeben. Anschließend wurden in der BAST an den Probeplatten Griffigkeitsmessungen mit dem Wehner/Schulze-Gerät und dem SRT-Pendel sowie T3D-Messungen zur Bestimmung der Mikro- und Makrorauheit durchgeführt (bzgl. der T3D-Messungen siehe Kap. II.1.1.3). Die gemessenen Reibbeiwerte nach Wehner/Schulze und die Texturkenngrößen lagen mit Ausnahme der Anfangsgriffigkeit (Nullmessung) wie die an vorangegangenen Proben bestimmten Werte (Prägung „Textur_2010 mit Entlüftungsloch“) durchgängig in einem sehr guten Bereich (siehe Abbildung II.1.9).

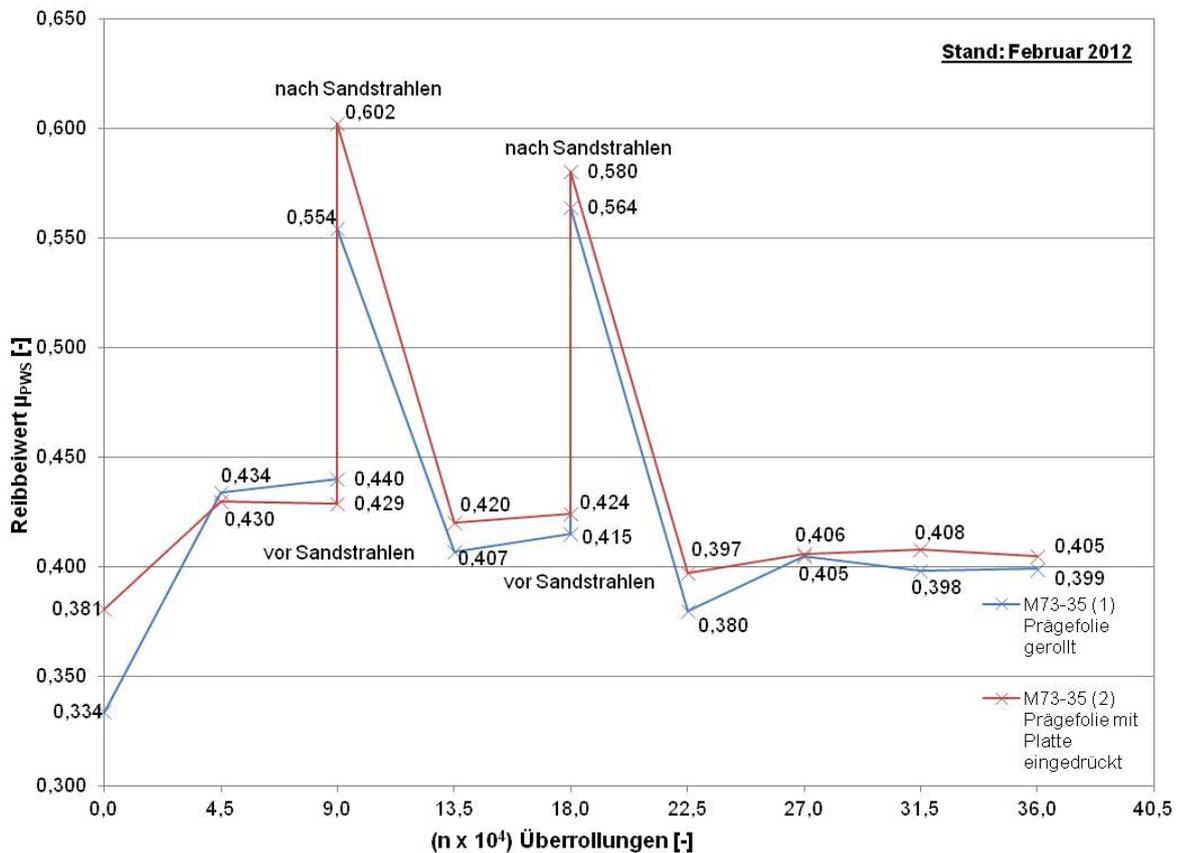


Abbildung II.1.9: Verlauf des Reibbeiwertes μ_{PWS} der im Februar 2012 untersuchten Nuttschichtmischung

Im Nullzustand wiesen die Probekörper relativ geringe Griffigkeitswerte auf ($\mu_{SRT,0} = 55$, $\mu_{PWS,0} = 0,33$ und $0,38$), die sich mit der Anwendung eines Nachbehandlungsmittels auf der Oberfläche erklären lassen. Bereits nach den ersten $4,5 \times 10^4$ Überrollungen stieg der PWS-Wert wie erwartet an und lag bei rd. $0,43$. Hinsichtlich der verwendeten Art der Prägung (Prägefolie gerollt oder Prägefolie mit Platte eingedrückt) zeigten sich keine Griffigkeitsunterschiede. Im weiteren Prüfprogramm wurden die Probekörper ebenfalls einer immens starken Beanspruchung durch wiederholtes

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Sandstrahlen und Überrollungen im Wechsel unterzogen. Der PWS-Wert kann nach 27×10^4 Überrollungen inkl. wiederholtem Sandstrahlen mit 0,41 angegeben werden. Nach weiteren 9×10^4 Überrollungen ohne Sandstrahlen blieb der PWS-Wert etwa konstant bei 0,40.

Wie in Abbildung II.1.10 zu sehen ist, liegen die mittels SRT-Pendel gemessenen Reibbeiwerte μ_{SRT} deutlich unter den Werten, die an vorangegangenen Proben bestimmt wurden und korrelieren in ihrer Entwicklung nicht mit dem Verlauf der Reibbeiwerte in Abbildung II.1.9. Da die Rezeptur der Nutzschichtmischung, wie bereits erwähnt, durch die Zugabe von Feinsthüttensandmehl zu diesem Zeitpunkt noch einmal geändert werden sollte, wurden die Prüfungen jedoch nicht an weiteren Probelplatten gleicher Zusammensetzung wiederholt.

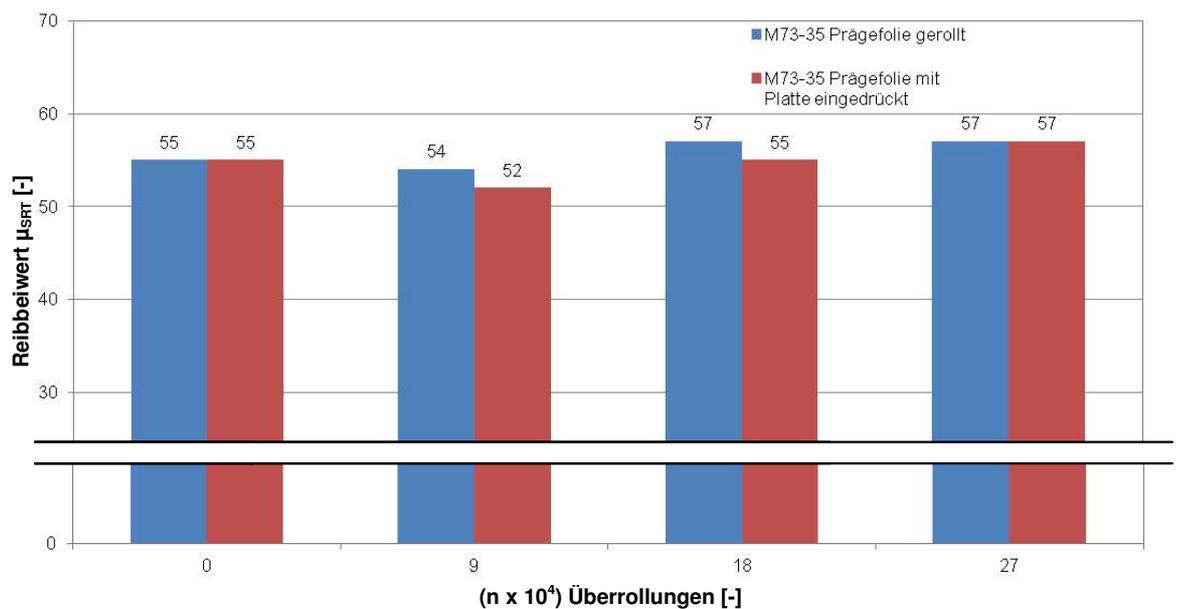


Abbildung II.1.10: Entwicklung des Reibbeiwertes μ_{SRT} der im Februar 2012 untersuchten Nutzschichtmischung

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.1.3 Ermittlung der Texturkenngößen mittels T3D-Messsystem

An geprägten sowie zu Beginn des Projektes an drei ungeprägten Probeplatten der Nutzschicht wurden dreidimensionale Texturaufnahmen zur Bestimmung folgender Texturkenngößen durchgeführt:

- mittlere Profiltiefe „ MPD_r “ und Standardabweichung „ S_{mpd} “,
- geschätzte Texturtiefe „ ETD_r “ und Standardabweichung „ S_{etd} “,
- max. Amplitude des Wellenlängenspektrums „ A_{max} “ und Standardabw. „ S_a “,
- A_{max} -Wert der entsprechenden Wellenlänge „ W_{max} “,
- Gestaltfaktor „ g “ und Standardabweichung „ S_g “,
- charakteristische Gestaltlänge „ gL “ ($gL = g \cdot W_{max}$),
- gemittelte Rautiefe „ R_z “ (nach ISO 4287) und Standardabweichung „ S_{rz} “,
- maximale Rautiefe „ R_{max} “ (nach ISO 4287) und Standardabweichung „ S_{rmax} “,
- arithmetischer Mittenrauwert „ R_a “ (nach ISO 4287) und Standardabweichung „ S_{ra} “,
- Profilorordinaten $Z_{5\%}$, $Z_{35\%}$, $Z_{65\%}$ und $Z_{95\%}$, die im Texturprofil einem 5%-, 35%-, 65%- und 95%-Summenhäufigkeitswert entsprechen und aus der Materialanteilkurve berechnet werden.

Die Messungen wurden mit dem statischen Texturmessgerät der Bundesanstalt für Straßenwesen für dreidimensionale Aufnahmen von Straßenoberflächentexturen durchgeführt (Abbildung II.1.11).

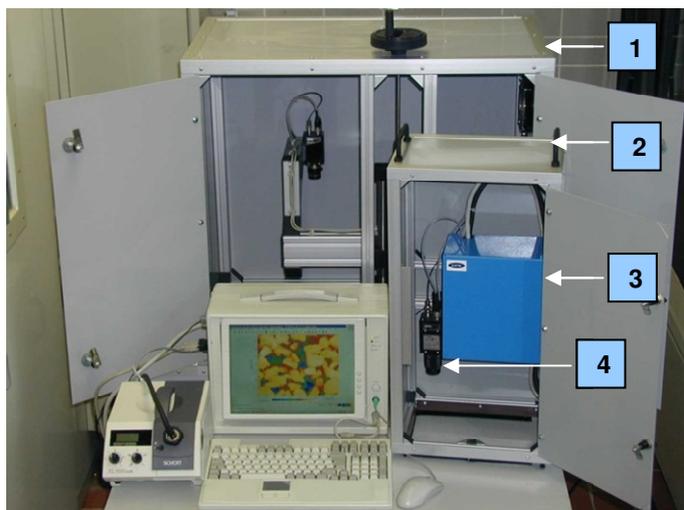


Abbildung II.1.11: 3D-Texturmessgerät der BAST: (1) großes Messfeld, (2) kleines Messfeld, (3) Mikroskopprojektor, (4) hochauflösende CCD-Kamera

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Für die Bewertung der Oberflächeneigenschaften der während der Projektlaufzeit gemessenen Probekörper sind die Auswerteprotokolle im Anhang A bis C angeführt.

Für die quantitative Abschätzung der Oberflächenveränderungen sowie zur Bewertung der Messdaten der UHPC-Probekörper vor, während und nach ihrer Beanspruchung in der Wehner/Schulze-Prüfanlage mit zusätzlichem Sandstrahlen wurden im Wesentlichen drei Texturkenngößen herangezogen. Dabei handelt es sich um den arithmetischen Mittenrauwert R_a und die mittlere Profiltiefe MPD_r bzw. die geschätzte Texturtiefe ETD_r . Diese Texturkenngößen reagieren sensibel auf die Oberflächenveränderungen durch Verschleiß und werden daher i.d.R. für das Oberflächenmonitoring eingesetzt. Da die Texturkenngöße ETD_r besser zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden kann und dadurch genauer verschiedene Profilformen erkennt als die mittlere Profiltiefe MPD_r , sind in diesem Fall R_a und ETD_r als Rauheitskenngößen von besonderer Bedeutung. Mit Hilfe dieser Kenngößen lässt sich demnach die Beständigkeit der Textur bzw. die Veränderung der Fahrbahnoberfläche sehr gut beschreiben. Aussagen zur Griffigkeit können hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Die Messungen auf den geprägten Probekörpern wurden jeweils in zwei definierten Positionen mit dem kleinen Messfeld T3Dk (40 mm x 50 mm) durchgeführt. Die ungeprägten Probeplatten wurden sowohl mit dem großen T3Dg (400 mm x 500 mm) wie auch mit dem kleinen Messfeld gemessen. Dabei wurde die Oberflächentextur in ganzer Größe der Platten erfasst. Die Messungen mit dem T3Dk wurden im mittleren Bereich der Platten in einer Messposition durchgeführt. Die ersten Untersuchungen erfolgten Ende 2010 an geprägten Platten, deren Textur durch Aufbetonieren auf ein Prägegitter entstanden ist. Dabei unterschieden sich die beiden untersuchten Probekörper M73-35 und M73-45 unter anderem in der Art des verwendeten Sandes sowie in ihrem massebezogenen Fließmittelwirkstoff / Bindemittelwert. Sowohl bei den T3D-Messungen als auch insbesondere bei den mikroskopischen Betrachtungen (siehe Abbildung II.1.12) der geprägten Probekörper ließ sich das Durchbrechen zunächst einzelner Sandkörner durch die Bindemittelschicht und einer damit einhergehenden Verbesserung der Mikrorauhigkeit auf den Plateauoberflächen der einzelnen Rauten gut verfolgen.

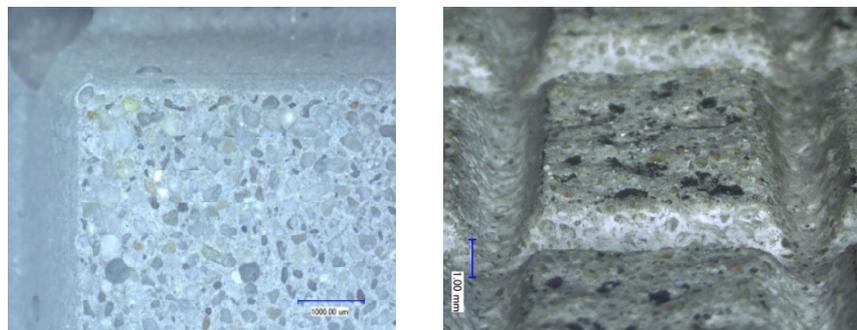


Abbildung II.1.12: Durchbrechen von Sandkörnern beim Prüfkörper der Nuttschichtmischung M73-35 (Aufnahme nach 90.000 Überrollungen; schwarze Stellen im rechten Bild: Gummiabrieb der Messgummis der Wehner/Schulze-Prüfanlage)

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Die beiden geprägten Probekörper weisen nur geringfügige Unterschiede in den betrachteten Texturkenngrößen auf. So hat sich die Oberflächenrauheit im Makroturbereich nach 9×10^4 Überrollungen inkl. Sandstrahlen durchschnittlich um rd. 12% verringert (charakterisiert durch den Wert R_a). Der Probekörper mit der Bezeichnung M73-35 wurde darüber hinaus mit 27×10^4 Überrollungen beansprucht, wobei sich die Makrorauheit um 17% gegenüber dem Ausgangswert (Nullzustand) verringerte. Ferner konnte in den Untersuchungen ein leichter Anstieg der ETD_r -Werte festgestellt werden. Dieses atypische Verhalten lässt sich an dieser Stelle nur durch eine geringfügige Verschiebung des Messfeldes zwischen den durchgeführten Messungen erklären.

Die ungeprägten Probeplatten wurden hingegen nicht beansprucht und nur einmal mit dem großen und dem kleinen Messfeld gemessen. Die Messungen wurden durchgeführt, um zum Vergleich die Texturkenngrößen des ultrahochfesten Betons direkt nach der Herstellung zu erhalten. Die erfasste Makrorauheit R_a beträgt dabei im Durchschnitt 0,04 mm, die geschätzte Texturtiefe ETD_r 0,40 mm. Die Auswerteprotokolle finden sich im Anhang A.

Im Juni 2011 wurden vom Projektpartner Universität Kassel geprägte Probeplatten, („Textur_2010 mit Entlüftungsloch“) zur Verfügung gestellt. Aufgrund von Frisch- und Festbetonkennwerten wurde im weiteren Verlauf nur die Mischung M73-35 präferiert und weiter untersucht. Die T3D-Messungen erfolgten an der Probeplatte M73-35.1 vor bzw. während der Beanspruchung im Wehner/Schulze-Gerät nach 9×10^4 Überrollungen inkl. Sandstrahlen, nach 27×10^4 Überrollungen und nach Beendigung der Beanspruchung mit $40,5 \times 10^4$ Überrollungen. Dabei lagen die akustischen Bewertungskenngrößen sowohl bei der Nullmessung als auch im weiteren Verlauf der Beanspruchung mit $A_{max} \approx 220 \mu\text{m}$ und einer charakteristischen Gestaltlänge g_L zwischen 480 mm und 855 mm in einem durchweg guten bis sehr guten Bereich [BECK02]. Auch ließ sich anhand etwa gleichbleibender arithmetischer Mittenrauhwerte R_{a8} von rd. 0,20 mm und 0,27 mm sowie annähernd konstanter und nach [KRIE99] im optimalen Bereich liegender Texturtiefen ETD_r von rd. 0,5 mm und 0,7 mm die Beständigkeit der Textur ableiten. Die zugehörigen Auswerteprotokolle sind im Anhang B enthalten.

Nach der Fixierung von Prägegittern an mikroperforierter Trägerfolie wurden, wie bereits in Kapitel II.1.2 erwähnt, an zwei Platten, die sich in der Art der eingebrachten Prägung unterschieden (Aufrollen des Prägegitters und Eindrücken des Prägegitters mit Hilfe einer hinreichend steifen Einpressplatte), Texturmessungen begleitend zu den Beanspruchungen im Wehner/Schulze-Gerät durchgeführt. Weiterhin lagen sowohl bei der Nullmessung als auch im weiteren Verlauf die akustischen Bewertungskenngrößen A_{max} und g_L wie auch die Kenngrößen ETD_r und R_a zur Beschreibung der Texturbeständigkeit (Mikro- und Makrorauheit) durchweg in einem guten bis sehr guten Bereich. Die Werte der entsprechenden Texturkenngrößen finden sich auf den Seiten C1 bis C4 im Anhang C. Zwischen den an aktuell geprägten Proben (Prägegitter an mikroperforierter Trägerfolie) und den an vorangegangenen Proben („Textur_2010 mit Entlüftungsloch“) ermittelten Werten finden sich mit Ausnahme der Ab-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

weichung des arithmetischen Mittenrauwertes R_a bei der Nullmessung, die sich durch das in der Prägeplatte vorliegende Entlüftungsloch erklären lässt, in Bezug auf die erhaltenen Texturkenngößen nur geringfügige Unterschiede. Eine isotrope Oberflächenstruktur wurde deutlich wiedergegeben, wobei aufgrund der akustischen Bewertungsparameter (Gestaltfaktor g bzw. charakteristische Gestaltlänge g_L) wie vorgesehen die Befahrung in einem Winkel von 45° zu den Vertiefungslinien der Prägung erfolgen sollte. Nach [BECK02] ist die charakteristische Gestaltlänge g_L hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften in einem optimalen Bereich zwischen 400 mm und 700 mm zu finden.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass sich hinsichtlich der verwendeten Prägeart (Prägefolie gerollt oder Prägefolie mit Platte eingedrückt) wie schon bei den Griffigkeitswerten auch bei den Texturkenngößen keine signifikanten Unterschiede feststellen ließen.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.2 Arbeitspaket 3: Laborforschung Deckschicht

Bearbeitungszeitraum: 09.2009 bis 06.2012

Im Arbeitspaket 3 wurden die Wahl der Ausgangsstoffe und Zusammensetzung der UHPC-Deckschicht getroffen sowie insbesondere die Laborprüfungen an Probekörpern durchgeführt.

1.2.1 Frisch- und Festbetonkennwerte Deckschicht

Wie auch die Rezeptur der Nutzschicht wurde ebenso die Rezeptur der Deckschicht in ihrer Zusammensetzung während der Projektlaufzeit mehrfach geändert. Dies betraf, wie bereits in Kap. I.3 erwähnt, sowohl die Fasergeometrie (Faserlänge) als auch die teilweise Substitution von Zement und Silicastaub durch Feinsthüttensandmehl (siehe Tabelle II.1.3) aus bereits genannten Gründen (siehe Kap. II.1.1.1).

	Masse [kg/m ³]	Masse [kg/m ³]
Wasser	103,30	104,05
Bindemittel		
CEM III/A 42,5 N-NA (Holcim)	424,89	403,74
Feinsthüttensandmehl (Holcim)	-	24,28
Sika Silikoll P unkompaktiert	53,42	53,91
Zusatzmittel		
BASF UHPC 0518 (53,7%)	6,43	6,47
Zuschlag / Zusatzstoffe		
Quarzmehl W3	32,16	32,44
Quarzsand 0,125/0,5	536,18	540,86
Quarzsand 0,6/2	285,44	283,05
Basalt 2/5	735,22	673,93
Basalt 5/8	397,59	449,28
Fasern		
Stahlfasern 0,19/13mm	78,50	78,50
Summe (incl. 15 dm³ Porenraum)	2653,12	2650,51

Tabelle II.1.3: Deckschichtmischungen vor (linke Spalte: Stand bis 2011) und nach teilweiser Substitution durch Feinsthüttensandmehl (rechte Spalte: Stand ab 2012)

In beiden Zusammensetzungen wurde ein Wasser-Bindemittelwert von 0,22 verwendet. Für die Berechnung wurde der Anteil an Feinsthüttensandmehl wie auch der Silicastaubgehalt zu 100% auf den Bindemittelgehalt angerechnet. Das Verdichtungsmaß wurde nach DIN EN 12350-4 [11] bestimmt und lag bei rd. 1,3 (Klasse C1: steife Konsistenz). Der Luftgehalt der Mischungen wurde nach DIN EN 12350-7 [13] bestimmt und kann im Mittel mit rd. 2,5 Vol.-% angegeben werden. Die Frischbetontemperatur betrug direkt nach dem Mischvorgang ca. 25 °C.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung entsprechen den Werten, die auch von der Universität Kassel ermittelt wurden. Vor der durchgeführten Substitution lag die Druckfestigkeit f_c der Deckschichtmischung nach zwei Tagen bei 64,1 N/mm², nach sieben Tagen bei 112,3 N/mm² und nach 28 Tagen bei 137,6 N/mm².

Darüber hinaus wurden im November 2011 erste Tastversuche nach der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [6] zur Ermittlung der relevanten Stoffkennwerte der Deckschichtmischung im Betonlabor der BAST durchgeführt.

Zusätzlich wurden erste Vergleichsmessungen der Biegezugfestigkeit von Probekörpern der Deckschichtmischung ohne Fasern und mit Bikomponentenfasern der Brugg Contec AG (Concrix) durchgeführt. Die Herstellung der Probekörper erfolgte dabei nach DIN EN 12390-2 [3] im Betonlabor der BAST. Als Probekörper wurden Balken der Abmessungen 150 mm x 150 mm x 700 mm entsprechend DIN EN 12390-1 [2a, 2b] verwendet, die nach Herstellung für 24h in der Schalung verblieben. Danach erfolgte bis zur jeweiligen Prüfung eine Lagerung in Wasser bei 20±1 °C.

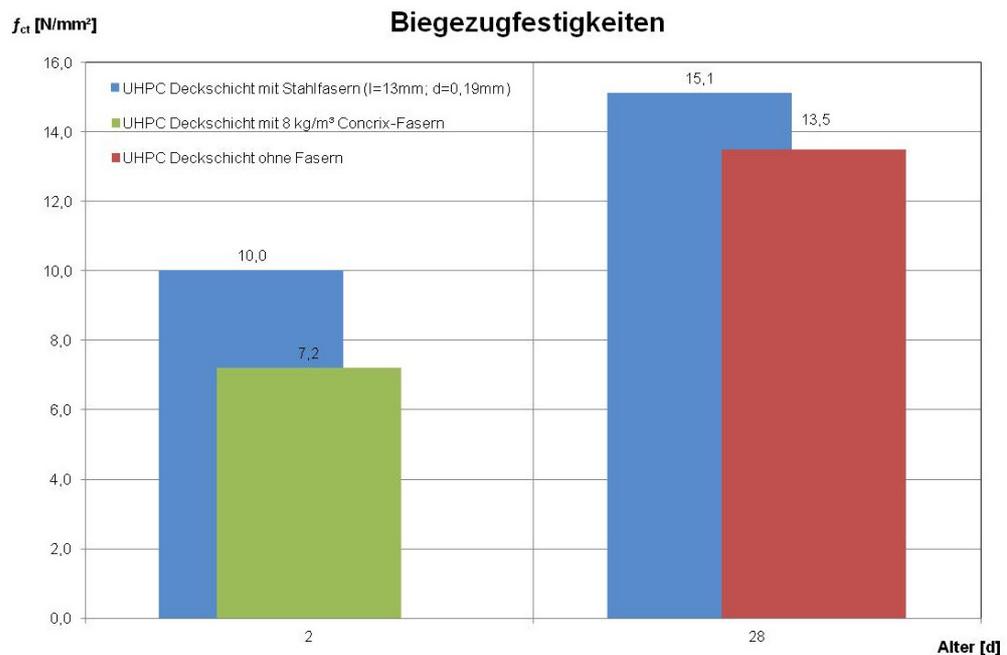


Abbildung II.1.13: Vgl. der Biegezugfestigkeiten nach [6]

Die Ergebnisse aus diesen Versuchen bestätigen die Verwendung von Stahlkurzfasern in (Ultra-) Hochleistungsbetonen (siehe Abbildung II.1.13), wobei aufgrund der Probenanzahl von jeweils drei Prüfkörpern die fehlende statistische Absicherung der Ergebnisse zu erwähnen bleibt. Bestimmt wurde ebenso nur die jeweilige Bruchfestigkeit bei maximaler Last. Auf die Ermittlung der Leistungsklasse mittels Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit wurde verzichtet.

Weitere Laborversuche wurden aufgrund des geplanten Einsatzes von Feinsthütten-sandmehl zunächst eingestellt.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.3 Arbeitspaket 4: Versuche auf kleinen Flächen

1.3.1 Laboreinbau an der Universität Kassel

Im Januar 2012 wurde die Mischungszusammensetzung wie geplant geändert, worauf im März ein erfolgreicher Laboreinbauversuch mit Hilfe eines „Laborfertigers“ an der Universität Kassel durchgeführt werden konnte (siehe Abbildung II.1.14)



Abbildung II.1.14: Laboreinbau der Deck- und Nuttschicht mit anschließender Prägung

1.3.2 Einbauversuch bei der Holcim AG

Im Anschluss an die o.g. Laborversuche wurde von allen Partnern ein Einbauversuch auf dem Gelände von Holcim in Braunschweig-Rüningen vorbereitet. Die BAST stellte ein großangelegtes Prüfprogramm auf und war mit einem Bohranhänger und vier Mitarbeitern vor Ort, um nach zwei Tagen Bohrkernentnahmen durchführen zu können. Der Einbauversuch konnte aufgrund des Ausfalls des angemieteten Eirich-Intensivmischers R15 für die Nuttschicht (siehe Bilder D9 und D10, Anhang D) sowie einer ausgeprägten Igel- bzw. Granalienbildung in beiden Deckschichtmischungen jedoch nicht wie geplant durchgeführt werden. Daher wurden von der BAST lediglich 18 Prüfkörper (Zylinder) aus den Deckschichtmischungen von beiden eingesetzten Mixern (modifizierter Fahrmischer von OAT und Doppelwellenzwangsmischer von Holcim) hergestellt. An den Proben wurden die Druck- und Spaltzugfestigkeiten nach zwei, sieben und 28 Tagen ermittelt. Es zeigten sich bereits ab dem zweiten Tag durchgehend höhere Spaltzug- und Druckfestigkeiten an jenen Probekörpern, die mit dem Frischbeton aus dem OAT-Mischer hergestellt worden waren. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass der Faseraufschluss in der OAT-Mischung besser war. So konnten in den Bruchflächen der Spaltzugprobekörper mehr und gleichmäßiger verteilte Fasern gegenüber den mit dem Holcim-Mischer hergestellten Proben festgestellt werden. Ferner ist anzunehmen, dass die in der Mischung vorhandenen Granalien aufgrund ihrer Größe aus den Probekörpern herausgehalten werden konn-

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

ten. Diese Verklumpungen, in denen sich keine Fasernester befanden, sondern lediglich Konglomerate trockener feiner Feststoffe, entstanden vermutlich durch die Art der Zugabe der Trockenstoffe in den Mischer in Kombination mit nassem Splitt, der ungeschützt vor Regen gelagert worden war. In den Bruchflächen der „Holcim-Proben“ waren verschiedene Fasernester sichtbar, die vermutlich zu den Festigkeitseinbußen geführt haben (siehe Bilder D1 bis D4, Anhang D). Abbildung II.1.15 zeigt die Druckfestigkeitsentwicklung der mit dem Doppelwellenzwangsmischer von Holcim hergestellten Deckschichtmischung im Vergleich zu der mit dem modifizierten Fahr-mischer von OAT hergestellten Deckschichtmischung sowie im direkten Vergleich die Druckfestigkeitsentwicklung der 2011 im Labor hergestellten Probekörper (ohne Feinsthüttensandmehl). Der bei der Nutzschichtmischung auffällige Unterschied zwischen den Mischungen mit und ohne Feinsthüttensandmehl, der scheinbar im Wesentlichen durch die latent hydraulische Wirkung und damit verlangsamte festigkeitsrelevante Hydratation des Feinsthüttensandmehls bedingt war, ließ sich an dieser Stelle bei der Deckschicht nicht beobachten.

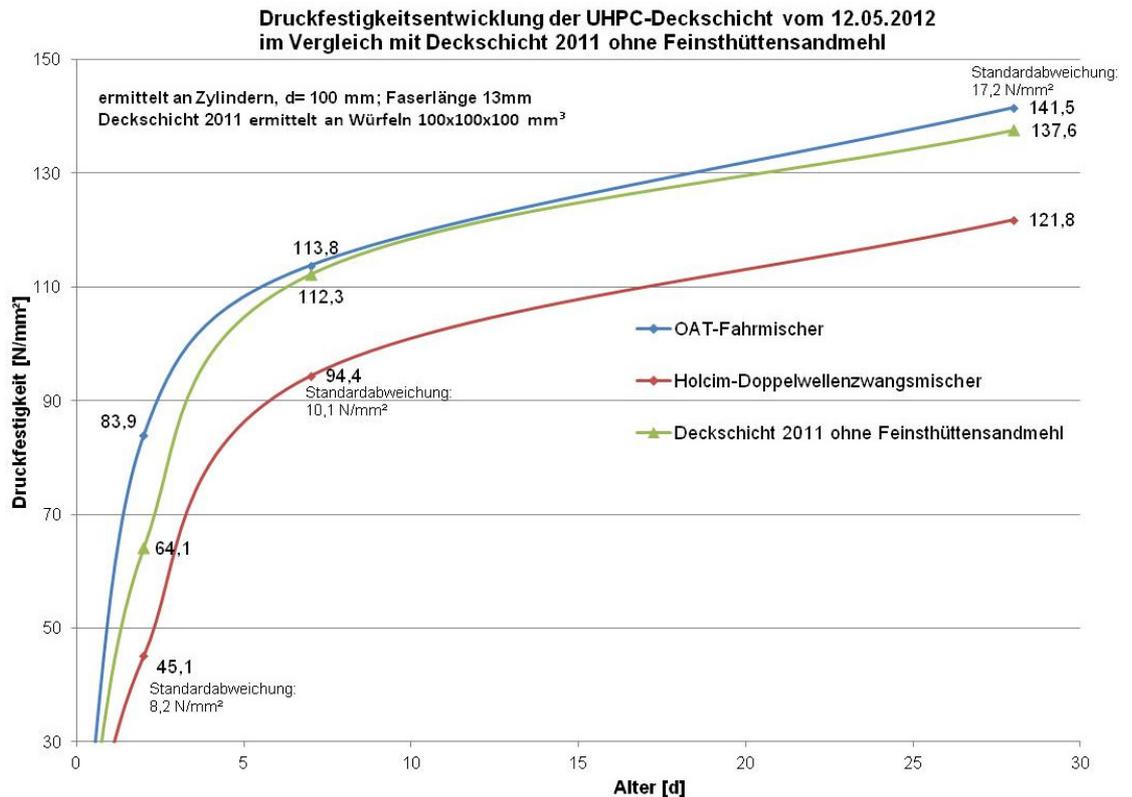


Abb. II.1.15: Vergleich der Druckfestigkeiten der Deckschicht (Herstellung in verschiedenen Mixchern)

Die Spaltzugfestigkeiten der Proben aus beiden Mixchern lagen dicht beieinander, obwohl in den Bruchflächen der mit dem Doppelwellenzwangsmischer von Holcim hergestellten Mischung verschiedene Fasernester sichtbar waren (Bild D4, Anhang D). Die Spaltzugfestigkeit lag im Mittel nach sieben Tagen bei rd. 9,5 N/mm² und nach 28 Tagen bei rd. 11,5 N/mm².

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Auf eine Bohrkernentnahme wurde aufgrund der vorliegenden schlechten Mischergebnisse verzichtet. Die Nutzschrift wurde infolge des Ausfalls des überlasteten Mischaggregates des Eirich-Intensivmischers an diesem Tag nicht gemischt, so dass auch kein Versuch der maschinellen Prägung im Großmaßstab erfolgen konnte. Während bei dem Laboreinbauversuch an der Universität Kassel zur Einprägung der Textur eine „Mini“-Gitterrolle zum Einsatz kam, die mit einer handgeführten Walze angepresst wurde, konnte für den Einbauversuch auf dem Gelände in Braunschweig-Rüningen von Röchling eine Groß-Gitterrolle für die maschinelle Prägung erstellt werden. Eine geeignete Aufnahmevorrichtung für die Folien-Gitter-Kombination wurde an der Nachlaufbühne von OAT angebracht, wobei zu diesem Zeitpunkt noch nicht einstimmig geklärt war, wie großtechnisch ein gleichmäßiger Anpressdruck erzeugt werden sollte. Zur Diskussion standen die Erzeugung des Anpressdrucks mittels Walze, beschwertem Kunstrasen oder mit Hilfe des Längsglätters.

1.3.3 Mischversuche bei der Fa. Eirich

Aufgrund der wenig zufriedenstellenden Resultate des Einbauversuchs vom 12.05.2012 fanden am 17.07. und 18.07.2012 auf einem Werksgelände von der Fa. Eirich in Kilsheim mehrere Mischdurchgänge für die Rezepturen der Deck- und Nutzschrift statt. Am ersten Tag der Mischversuche wurde die Misch- und Reproduzierbarkeit des Nutzschriftbetons inklusive seiner Grünstandfestigkeit und Prägbarkeit überprüft. Dazu wurde der 500-Liter Zwangsmischer R15 verwendet, der bereits beim Einbauversuch zum Einsatz hätte kommen sollen. Dieser wurde in der Form modifiziert, als dass die Ausstattung mit einem größeren Antriebsaggregat erfolgte. Nach mehreren Mischdurchgängen, die geringe Änderungen im Fließmittel- und Wassergehalt beinhalteten, stand die für die weiteren Versuche sowie den Demonstratorbau zu verwendende Nutzschriftmischung hinsichtlich ihres Wasser- und Fließmittelgehaltes sowie des in den Mischer R15 einzubringenden Volumens fest (siehe Tabelle II.1.4).

	Masse [kg]
Wasser	47,0
Bindemittel	
CEM III/A 42,5 N-NA (Holcim Duo4)	160,6
Feinsthüttensandmehl (Holcim)	21,4
Sika Silikoll P unkompaktiert	40,6
Zusatzmittel	
BASF UHPC 0518 (53,7%)	0,912
Zuschlag / Zusatzstoffe	
Quarzmehl W3	34,30
Quarzsand 0,125/0,5	244,60
Summe (inkl. 15 dm³ Porenraum)	549,5

Tabelle II.1.4: Nutzschriftmischung M5 (Mischvolumen 236 l)

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

Von der Ausgangsmischung M1 sowie der Mischung M5 wurden Zylinderproben hergestellt, an denen nach sieben und 28 Tagen die Druck- und Spaltzugfestigkeit bestimmt wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung II.1.16 dargestellt. Die Abnahme der mittleren Druckfestigkeit der Mischung M5 im Alter von 28d lässt sich auf eine große Streuung der Einzelwerte (Standardabweichung = 14,7 N/mm²) zurückführen. So zeigten zwei Proben im Gefüge nennenswerte Luftporen.

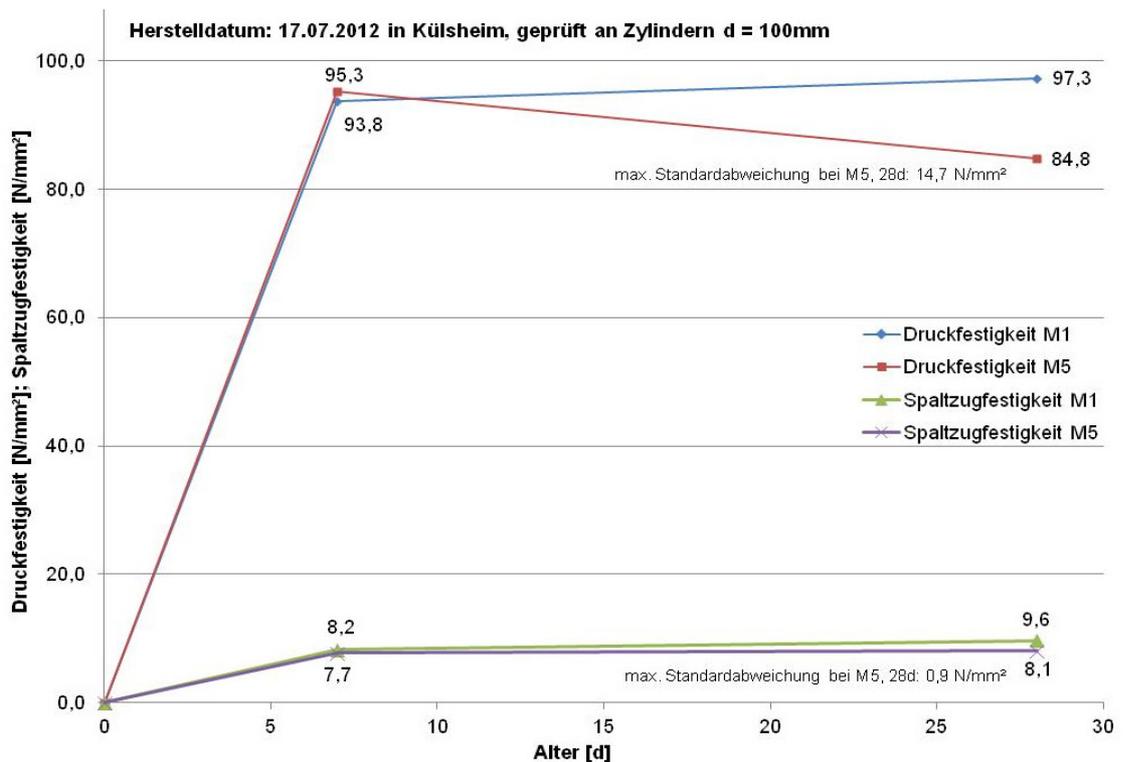


Abbildung II.1.16: Verlauf der Druck- und Spaltzugfestigkeiten von zwei Nuttschichtmischungen des Mischversuchs bei der Fa. Eirich

Während der Mischversuche wurden mehrere Testflächen hergestellt und geprägt (Fotos im Anhang D, Bilder D5 bis D8), wobei das Gewicht der Walze zum Anpressen der Prägegitter durch Einfüllen und Ablassen von Wasser variiert und so der Anpressdruck optimiert wurde. An der zuletzt geprägten Probefläche aus der optimierten Nuttschichtmischung M5 wurden anschließend Textur- und Strömungswiderstandsmessungen vom Partner Müller-BBM durchgeführt. Abschließend wurden von der BAST aus dieser Fläche zwei Teilstücke entnommen, an denen Griffigkeitsmessungen und -prognosen mit dem SRT und dem Wehner/Schulze-Gerät erfolgten sowie T3D-Messungen durchgeführt wurden. Parallel wurde zudem noch eine Probe untersucht, die von der Universität Kassel vergleichsweise im Labor hergestellt und geprägt worden war.

Wie in Abbildung II.1.17 zu sehen ist, wiesen beide Teilstücke der in situ geprägten Oberfläche eine relativ geringe Anfangsgriffigkeit auf, die sich auf das Vorhandensein einer sogenannten „Elefantenhaut“ zurückführen lässt. Ein derartiges Phänomen ent-

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

steht, wenn sich an der Oberfläche eine zusammenhängende Bindemittelschicht ausbildet. Die Anreicherung von Bindemittelleim ist in diesem Fall vermutlich durch die Verdichtung mit einem Innerrüttler (Flaschenrüttler) verstärkt worden.

Im Nullzustand lagen die Reibbeiwerte μ_{PWS} bei 0,32 und 0,35. Entsprechend wurde der SRT-Wert μ_{SRT} mit 58 bestimmt (bei einer Messrichtung im Winkel von 45° zu den Vertiefungslinien der Prägung). Diese Werte liegen unterhalb des Richtwertes, der bei einer Kontrollprüfung gemäß den ZTV Beton-StB 07 [10] gefordert wird ($\mu_{SRT} \geq 60$). Bereits nach den ersten $4,5 \times 10^4$ Überrollungen stieg der PWS-Wert jedoch auf 0,41 bzw. 0,48 an. Im weiteren Prüfprogramm wurden die Teilstücke erneut einer immens starken Beanspruchung durch wiederholtes Sandstrahlen und Überrollungen im Wechsel unterzogen. Der PWS-Wert kann nach $22,5 \times 10^4$ Überrollungen im Mittel mit 0,49 angegeben werden. Er blieb nach weiteren 18×10^4 Überrollungen ohne Sandstrahlen etwa konstant bei 0,46. Der SRT-Wert lag konform mit den PWS-Werten nach 18×10^4 Überrollungen im Mittel bei 66 und nach Beanspruchungsende ($40,5 \times 10^4$ Überrollungen) bei rd. 61.

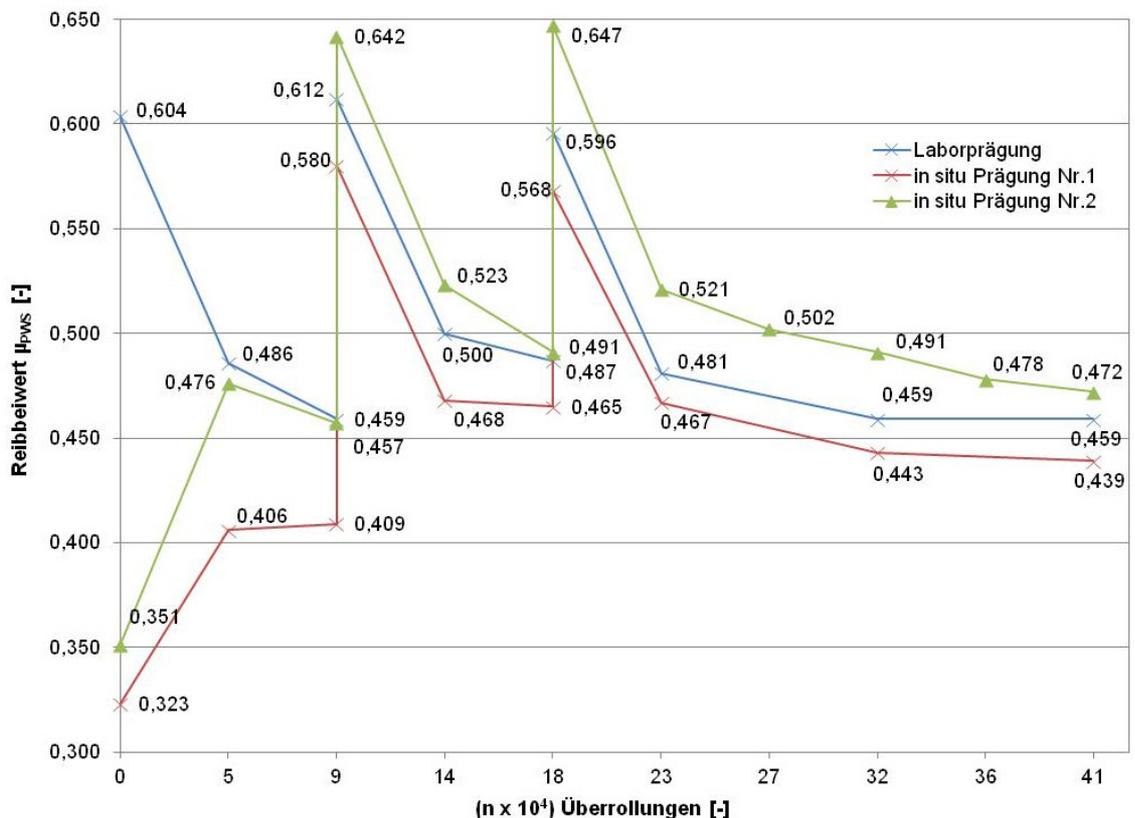


Abbildung II.1.17: Verlauf des Reibbeiwertes μ_{PWS} von geprägten Probeplatten der Nuttschichtmischung M5 im Wehner/Schulze-Gerät

Die im Labor geprägte Probe zeigte im Nullzustand einen Reibbeiwert von 0,60 und wies während der weiteren Beanspruchung nahezu identische Werte wie die in situ

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

geprägten Teilstücke auf. Nach gleicher Beanspruchung stellte sich hier nach $40,5 \times 10^4$ Überrollungen ein PWS-Wert von 0,46 ein. Warum die Anfangsgriffigkeiten der in situ geprägten Proben so stark von der Anfangsgriffigkeit der im Labor geprägten Probe differieren, ließ sich abschließend nicht ganz klären. Wie bereits oben erwähnt, könnte hier die Art der Verdichtung eine Rolle spielen.

Zudem wurden an einem in situ geprägten Teilstück die Texturkenngrößen vor, während und nach Beanspruchung in der Wehner/Schulze-Prüfanlage mit Hilfe des T3D-Messverfahrens bestimmt. Zur Bewertung der Messdaten wurden erneut die zwei Texturkenngrößen „arithmetischer Mittenrauwert R_a “ und „geschätzte Profiltiefe ETD_r “ herangezogen. Wie in Kap. II.1.1.3 bereits bemerkt wurde, lassen sich mit Hilfe dieser Kenngrößen die Texturbeständigkeit bzw. die Veränderung der Fahrbahnoberfläche sehr gut beschreiben.

Die untersuchte Platte befand sich sowohl bei der Nullmessung als auch im weiteren Verlauf der Beanspruchung im Wehner/Schulze-Gerät durchgängig in einem guten bis sehr guten Bereich, sowohl die akustischen Bewertungskenngrößen als auch die Beständigkeit der Textur (Mikro- und Makrorauheit) betreffend. Der jeweils aus Gestaltfaktor und maximaler Wellenlänge berechnete Gestaltlängenfaktor g_L lag durchgängig unter 700 und damit im optimalen Bereich. Ebenso lagen die gemessenen Werte der maximalen spektralen Rauigkeitstiefe A_{max} zwischen $89 \mu\text{m}$ und $144 \mu\text{m}$ und damit in einem Bereich, der für niedrige Pegelwerte steht [BECK02]. Während die Makrotextur (Makrorauheit, Kenngrößen ETD_r und R_{a10}) im Beanspruchungsverlauf erwartungsgemäß etwas abnahm, stieg die Kenngröße $R_{a0,5}$ der Mikrotextur stetig an. Die zugehörigen Auswerteprotokolle finden sich im Anhang C.

Am zweiten Tag der Mischversuche wurde die Deckschicht in einem Transportmischer (R23-24) mit einem Füllvolumen von max. 3 m^3 loser Aufgabestoffe gemischt, wobei die Mischung hinsichtlich der eingesetzten Fasergeometrie (Länge/Dicke) und das Mischregime bezüglich des Faserzugabezeitpunktes, der eingebrachten Mischenergie (Änderung der Geschwindigkeit des Behälters und des Wirblers) sowie der im Mischer eingebrachten Volumina variiert wurde. Eine optimale Füllmenge, wie man sie bspw. von Planetenmischern kennt, gibt es aufgrund der Funktionsweise bei den verwendeten Eirich-Intensivmischern nicht. Lediglich bei den Mindestmengen werden vom Hersteller Eirich ungefähre Richtmengen angegeben, wobei i. A. die Füllmenge nicht kleiner als ein Drittel der Nennfüllung gewählt werden sollte.

Beim Einsatz der längeren Stahlfasern ($l = 13 \text{ mm}$) kam es erneut zu einer deutlichen Igelbildung. Zwei weitere Mischungen mit kürzeren Fasern ($l = 10 \text{ mm}$) und einem Fließmittelgehalt von 80% des Ausgangswertes, die sich lediglich in dem eingebrachten Volumen unterschieden, wiesen dagegen die gewünschte Homogenität, Frischbetontemperatur und Konsistenz auf (siehe Tab. II.1.5). Von drei Deckschichtmischungen, die sich hinsichtlich des in den Mischer eingebrachten Volumens sowie des Zeitpunktes der Faserzugabe unterschieden, wurden Proben entnommen (jede Mischung beinhaltet Fasern der Länge 10 mm, der Fasergehalt wurde auf 1,5 Vol.-% hochgesetzt). Dabei wies die Mischung mit dem größten mischbaren Volumen (ent-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

spricht 1,5 m³ Frischbeton) und den trocken mit den groben Gesteinskörnungen vorgemischten Fasern mit 116 N/mm² nach sieben Tagen die höchste Druckfestigkeit auf. Hingegen war die Spaltzugfestigkeit mit rd. 10 N/mm² bei allen Proben in etwa gleich hoch. Die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen lag im Durchschnitt bei rd. 12,5 N/mm² und damit rd. 8 N/mm² höher als bei herkömmlichen Straßenbetonen. Die Druckfestigkeit belief sich auf Werte zwischen 127 N/mm² und 141 N/mm² (mit größeren Standardabweichungen), wobei auch hier die o.g. Mischung die größten Festigkeitswerte aufwies (vgl. Abbildung II.1.18).

	MA 1005 I Masse [kg]	MC 1507,5 I Masse [kg]
Wasser	104,1	156,0
Bindemittel		
CEM III/A 42,5 N-NA (Holcim)	406,6	610,0
Feinsthüttensandmehl (Holcim)	24,5	36,7
Sika Silikoll P unkompaktiert	54,3	81,4
Zusatzmittel		
BASF UHPC 0518 (53,7%)	5,2	7,8
Zuschlag / Zusatzstoffe		
Quarzmehl W3	32,4	48,7
Quarzsand 0,125/0,5	540,9	811,2
Quarzsand 0,6/2	283,0	424,5
Basalt 2/5	673,	1010,7
Basalt 5/8	449,3	673,8
Fasern		
Stahlfasern 0,2/10mm	118,0	177,0
Summe (incl. 15 dm³ Porenraum)	2653,12	4037,8

Tabelle II.1.5: Deckschichtmischungen MA (linke Spalte) und MC (rechte Spalte)

Daher wurden die Mischungen MA bzw. MC, die sich nur in dem gemischten Volumen unterschieden, von den Projektpartnern präferiert und als einbaufähig eingestuft. Die Mischung MD musste, bedingt durch eine Faserzugabe zum Schluss, länger und mit einer höheren Wirblergeschwindigkeit gemischt werden, was neben einer geringfügigen Igelbildung eine deutlich höhere Frischbetontemperatur zur Folge hatte.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

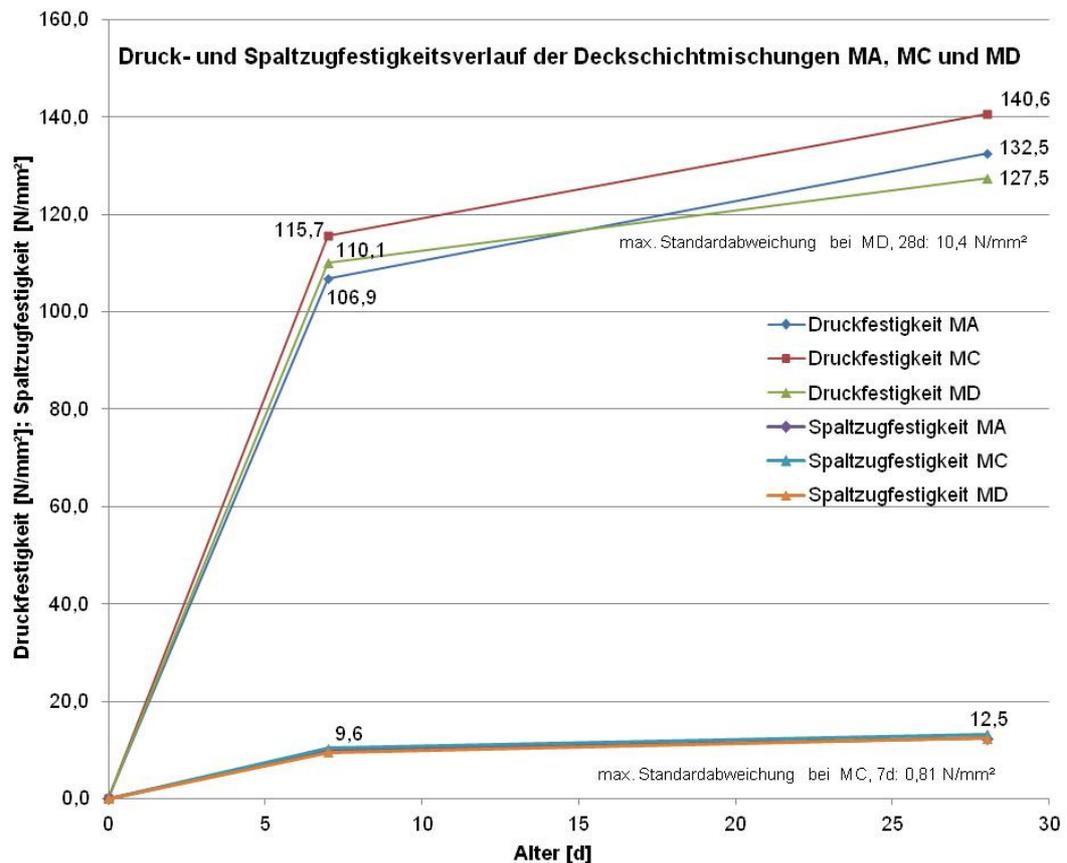


Abbildung II.1.18: Verlauf der Druck- und Spaltzugfestigkeiten von drei Deckschichtmischungen

Nach einem Mischversuch am 01.09.2012 auf dem Gelände von OAT in Neustadt a. d. Orla, bei dem überprüft werden sollte, inwieweit sich die Erkenntnisse aus den Mischversuchen bei der Fa. Eirich in Verbindung mit einer geänderten Fasergeometrie auf die Mischtechnik des modifizierten Fahrmischers von OAT übertragen lassen, stand fest, dass für den folgenden Einbauversuch sowie den Demonstratorbau weiterhin die Mischtechnik von Eirich genutzt werden musste. So zeigte sich bei Verwendung des modifizierten Fahrmischers erneut eine deutliche Konglomeratbildung feiner Ausgangsstoffe in den Mischungen. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen von Proben, die beim Mischversuch genommen wurden, belegen die Inhomogenität der mit dem modifizierten Fahrmischer von OAT hergestellten Deckschichtmischungen. Sowohl die Spaltzug- als auch die Druckfestigkeit waren mit sehr hohen Standardabweichungen behaftet, wobei die Spaltzugfestigkeit nach sieben Tagen im Mittel bei 8 N/mm² und nach 28 Tagen bei rd. 12 N/mm² lag. Die Druckfestigkeiten variierten dabei zwischen Werten von rd. 90 und 105 N/mm² nach sieben und rd. 95 und 130 N/mm² nach 28 Tagen.

Auf zusätzliche Laborversuche wurde in der Folge weitestgehend verzichtet. Es wurde lediglich die Biegezugfestigkeit der Deckschichtmischung MA/MC an im Labor hergestellten Biegebalken (l x b x h = 700 mm x 150 mm x 150 mm) im 4-Punkt-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Biegezugversuch nach der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [6] ermittelt. Dabei wiesen die Balken im Mittel eine Biegezugfestigkeit von 6,6 N/mm² nach zwei und rd. 14 N/mm² nach sieben Tagen auf. Die 28d-Festigkeit wurde nicht ermittelt. Ebenso wurde erneut auf die Bestimmung der Leistungsklasse (Nachrissbiegezugfestigkeit) verzichtet. Die im November 2011 an Biegebalken ermittelte Biegezugfestigkeit nach sieben Tagen konnte damit nicht ganz erreicht werden, was sich im Wesentlichen damit begründen lässt, dass sich die Rezepturen der Mischungen hinsichtlich ihres Gehaltes an Feinsthüttensandmehl unterscheiden.

Auf dem halbjährlichen Partnertreffen, das am 21. November 2012 in der BAST stattfand, wurde festgelegt, dass der noch ausstehende Einbauversuch aufgrund fehlender Kapazitäten beim Partner Eurovia vor der 50. KW 2012 erst im März 2013 erfolgen sollte. Aufgrund terminlicher Zwangspunkte sowohl beim Partner Eurovia als auch im Projekt selbst sollte der Demonstratorbau gekoppelt an den Einbauversuch erfolgen, der aus bereits genannten Gründen auf dem Gelände von Eirich in Kulsheim stattfinden musste. Dabei war geplant, zunächst 30 m in einer Breite von 3,75 m zu bauen. Weitere 30 m sollten nach einem erfolgreichen Einbauversuch unmittelbar im Anschluss folgen.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

1.4 Arbeitspakete 5 und 6: Herstellung und Bewertung des Demonstrators

Aufgrund der sehr kalten Witterung bis in den April 2013 hinein konnte kein Einbauversuch vor dem Demonstratorbau erfolgen. Eine Verschiebung des Demonstratorbaus auf einen späteren Zeitpunkt war aufgrund der Projektlaufzeit sowie einer Kapazitätsauslastung von Fertignern und Nachlaufbühne bei den Partnern Eurovia und OAT nicht zu realisieren. Daher wurde von allen Partnern einstimmig die Zusammenlegung von Einbauversuch und Demonstratorbau beschlossen.

Am 19.03.2013 wurden seitens der BAST Tragfähigkeitsuntersuchungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) auf der geplanten Demonstratorfläche auf dem Werksgelände der Fa. Eirich in Kilsheim durchgeführt, um die Messwerte vor und nach Demonstratorbau vergleichen und den Tragfähigkeitszuwachs durch das Aufbringen des UHPC-Instandsetzungssystems beurteilen zu können. Zur Besprechung der Ablaufplanung, der Mischzeitaktung, zur Anpassung der Auslaufzeiten der Wechselsilos bei der Mischerbefüllung und Einweisung des Personals fand am 25.03.13 ein letztes Abschlussgespräch vor Beginn des Demonstratorbaus statt. Die für die Nutz- und Deckschicht bereitstehenden Mischer R15 (siehe Bilder D9 und D10, Anhang D) und R28 (siehe Bilder D11 und D12, Anhang D, Frischbetonvolumen einer Charge: rd. 2,5 m³) wurden hierfür abschließend erfolgreich getestet. Der Mischer R28 ist der größte von der Fa. Eirich hergestellte transportable Zwangsmischer.

1.4.1 Bau des Demonstrators

Ohne zusätzlichen vorangegangenen Einbauversuch wurde am 02.04.2013 mit den Vorbereitungen für den Bau des Demonstrators begonnen. Nach einer weiteren Einweisung von Hilfspersonal und einer Sicherheitseinweisung für alle am Bau beteiligten Personen wurden zunächst die Big Bags mit Compound (Zement, Feinsthüttensandmehl, Silicastaub und Sand bis 0,6 mm Größtkorn) und Gesteinskörnungen den Mischungen entsprechend vorsortiert, die vorhandenen Wechselsilos befüllt und die Nachlaufbühne sowie die Technik für die Texturprägung aufgebaut, um einen reibungslosen Ablauf des zweischichtigen Einbaus von Nutz- auf Deckschicht frisch-in-frisch mit direktem Anschluss der maschinellen Prägung gewährleisten zu können.

Im Anschluss wurde ein weiterer Mischversuch der Nuttschicht durchgeführt, um den Ablauf und die zugehörige Taktung zum R28 (Mischer für die Deckschicht) zu erproben. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob die zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden niedrigen Temperaturen zu einer Konsistenzveränderung führen.

Im Vorfeld war bereits die zweilagige Bewehrung auf einer Vliesstoffunterlage auf der vorgesehenen Fläche verlegt worden. Nach Vorgabe vom Partner Universität Kassel wurden Bewehrungsmatten R 9,42/6,04 verwendet, die jeweils in der oberen und unteren Lage angeordnet wurden. Die Stöße wurden mit einer Übergreifungslänge $l_s = 30$ cm ausgebildet. Zwei Gleitschalungsfertiger, Typ SP 500, vom Partner Eurovia

Förderkennzeichen 13N10492 Schlussbericht

zum Einbau der Deck- und der Nuttschicht standen bereits vor Ort (siehe Bilder D13 und D14, Anhang D).

Die vorgesehenen Abmessungen für den Demonstrator umfassten eine Einbaulänge von rd. 60 m in einer Breite von 3,75 m (siehe Abbildung II.1.19).

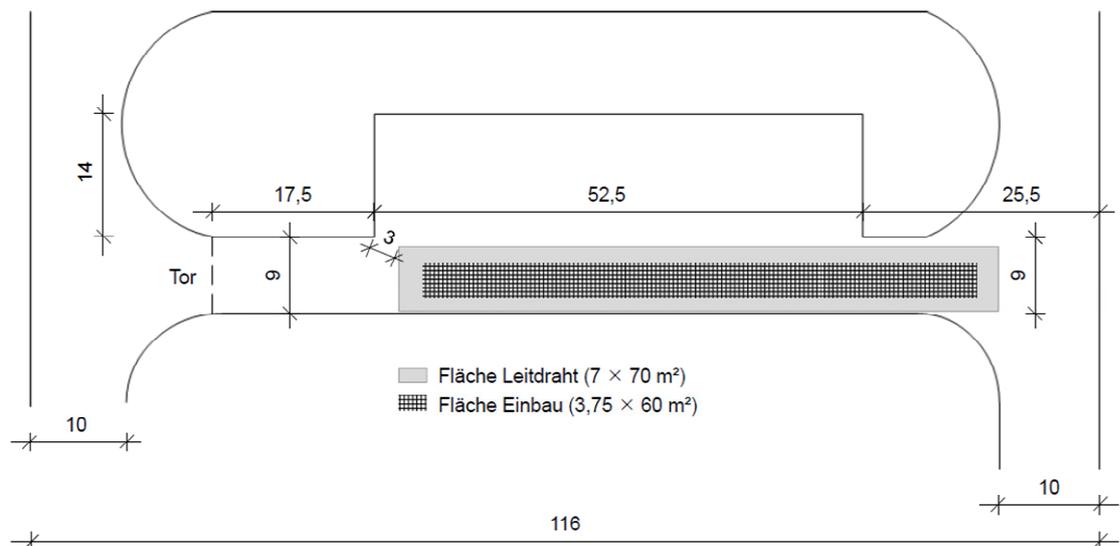


Abbildung II.1.19: Lageplan mit Abmessungen des Demonstrators auf dem Parkplatz der Fa. Eirich in Kulsheim

Nach Einbau von rd. 15 m Deckschicht (Mischung MA bzw. MC) in einer Dicke von 15 cm sollte der zweite Fertiger vom Typ SP 500 die Nuttschicht in einer Dicke von 2 cm frisch-in-frisch auf die Deckschicht aufbringen. Der Einbau der Deckschicht konnte wie vorgesehen erfolgen (siehe Abbildungen II.1.20 und II.1.21).

Durch die T-Rüttler des Gleitschalungsfertigers konnte offensichtlich eine genügend große Verdichtungsenergie in die oberen 2 cm der Deckschicht (aufgrund der zweilagigen Bewehrung) eingebracht werden, so dass ein gleichmäßiges Umschließen der Bewehrung ohne Lunker gegeben war. Das Entleeren der Wechselsilos für eine gleichmäßige Mischzeitaktung sowie die Anlieferung der fertigen Mischungen mit Muldenkipplastern funktionierte weitestgehend problemlos und war gut auf den Fortschritt des Fertigers abgestimmt. Der Einbau der Deckschicht wurde aufgrund eines technischen Defekts am R28 nach rd. 30 Metern zunächst beendet, konnte am folgenden Tag jedoch fortgesetzt werden.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht



Abbildung II.1.20: Erfolgreicher Einbau der Deckschicht mittels Gleitschalungsfertiger



Abbildung II.1.21: Anschließendes Abziehen mit Jutetuch

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

Der Einbau der Nuttschicht (Mischung M5) erfolgte dagegen nicht wie geplant. Die Konsistenz stellte sich zwar trotz der tiefen Temperaturen von maximal 4 °C in gewünschter Beschaffenheit ein, die Nuttschicht konnte anschließend jedoch nicht zufriedenstellend vom Gleitschalungsfertiger eingebaut werden (vgl. Abbildung II.1.22). In den Bereichen wo es möglich war, wurde im Anschluss die Nuttschichtoberfläche erfolgreich geprägt (Abschnitt IV, Bilder D23 und D24, Anhang D).



Abbildung II.1.22: Nuttschichteinbau

Nach zwei angelieferten Chargen der ursprünglichen Rezeptur wurde der Einbau der Nuttschicht unterbrochen und am darauffolgenden Tag mit einem Nuttschichtmörtel weicherer Konsistenz fortgesetzt. Die Konsistenzänderung wurde durch eine Erhöhung des Wassergehaltes um 3,5 M.-% herbeigeführt. Somit konnte prinzipiell ein maschineller Einbau der Nuttschicht erreicht werden. Hinsichtlich der Prägung ist anzumerken, dass diese aufgrund des Walzengewichtes erst nach rd. 90 Minuten erfolgen konnte (Prägung auf Abschnitt II, Abbildung II.1.27, siehe Bilder D25 und D26 im Anhang D). Daraufhin wurde die Nuttschichtrezeptur noch ein weiteres Mal dahingehend abgeändert, dass der Wassergehalt wieder etwas abgesenkt wurde. Dies führte erneut zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis hinsichtlich des möglichen Prägezeitpunktes und der Texturstabilität (Prägung auf Abschnitt VI, siehe Abbildung II.1.27 und Tabelle II.1.6 sowie Bilder D27 und D28 im Anhang D).

Von der Deck- sowie der Nuttschicht wurden von der BAST während des Einbauversuchs Zylinderproben mit den bekannten Maßen zur Ermittlung der Druck- und Spaltzugfestigkeit nach sieben, 28 und 60 Tagen hergestellt. Zusätzlich wurden von der Deckschicht weitere drei Biegebalken zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen angefertigt. Nach dem erfolglosen Einbauversuch der Nuttschichtmischung

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

M5 am ersten Tag wurden die bereits hergestellten Proben verworfen und Probekörper von der weicheren Nutzschichtmischung des zweiten Einbautages hergestellt.

Die ermittelten Festigkeiten finden sich in den Abbildungen II.1.23 bis II.1.25.

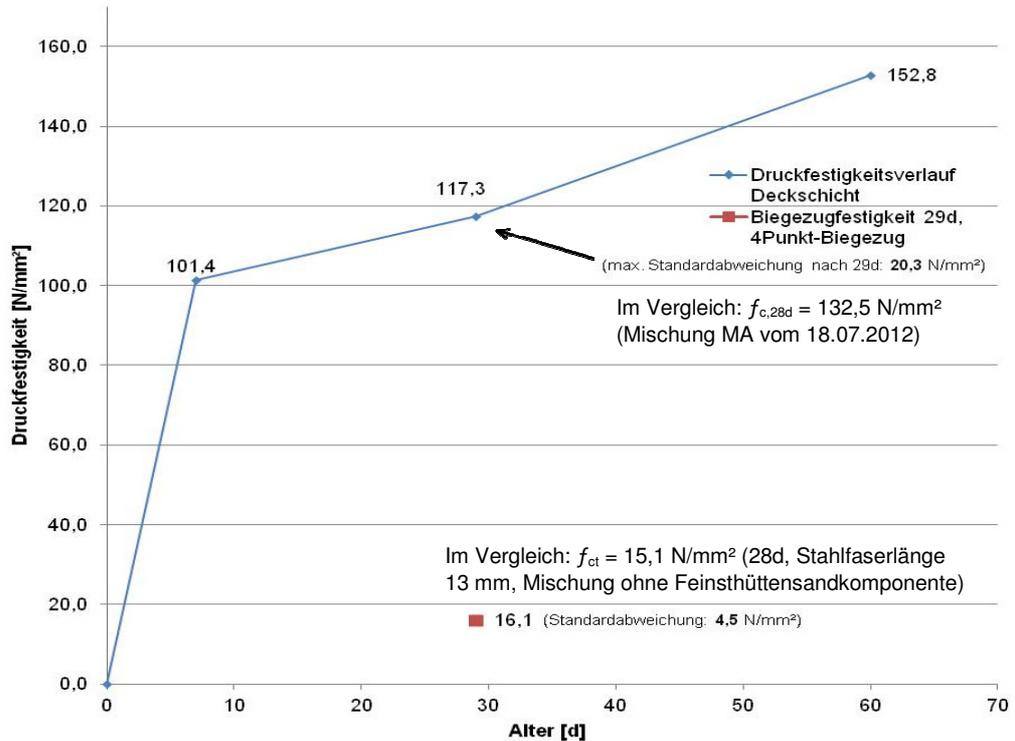


Abbildung II.1.23: Druckfestigkeitsverlauf der Deckschicht MA vom 03.04.13, Biegezugfestigkeit n. 29d

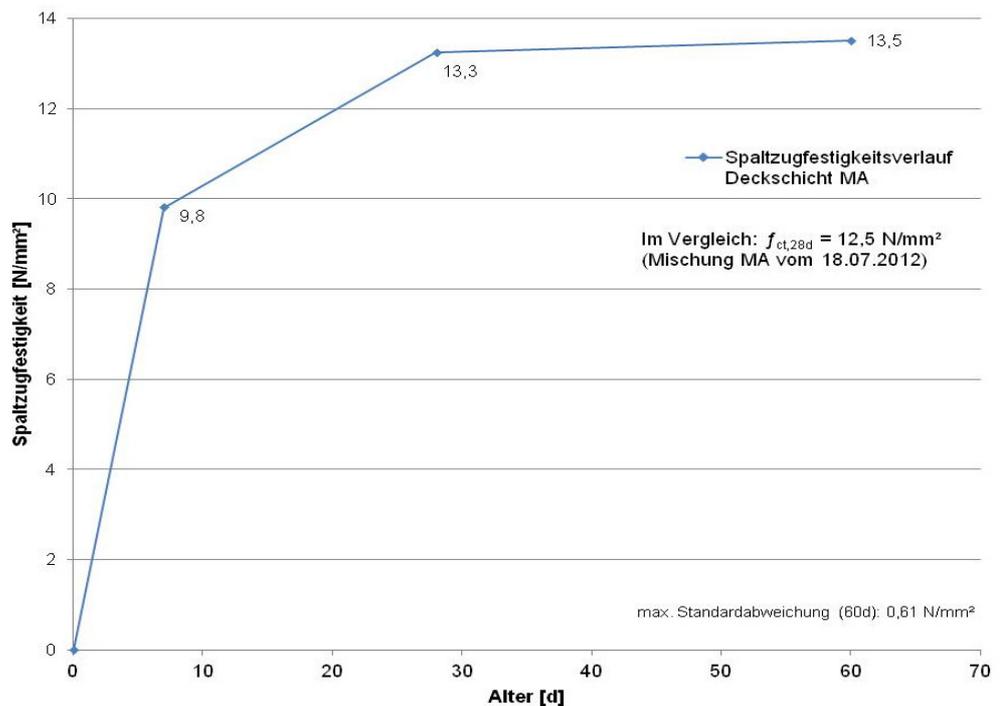


Abbildung II.1.24: Spaltzugfestigkeitsverlauf des Betons der Deckschicht MA vom 03.04.13

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

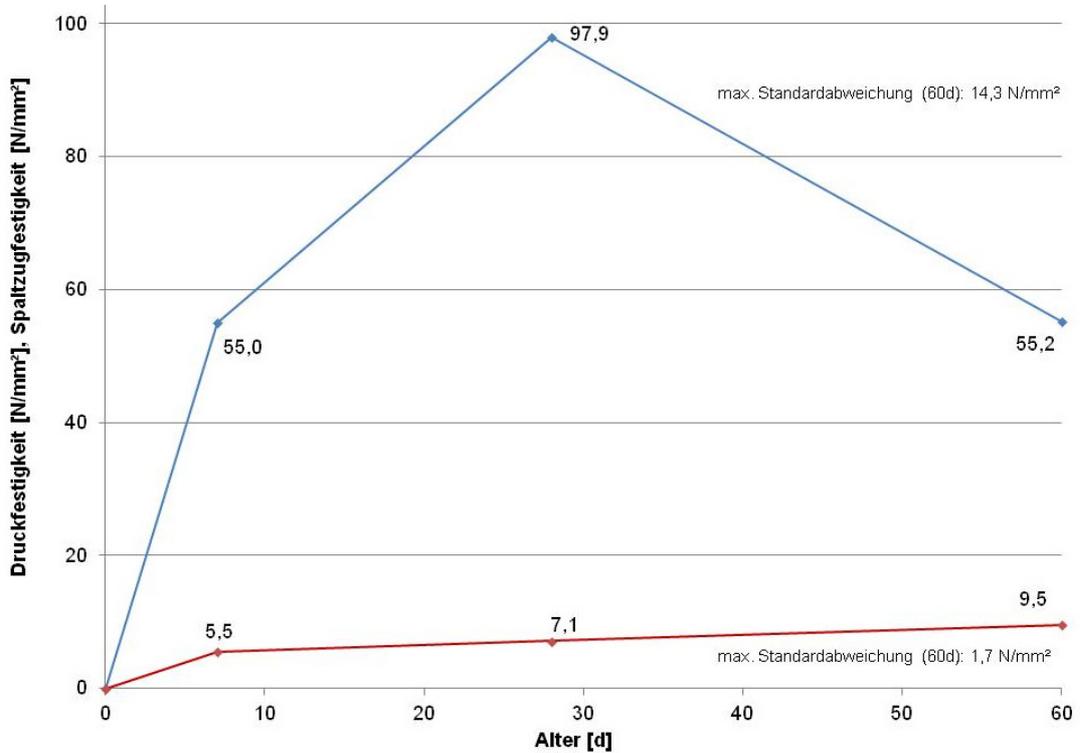


Abbildung II.1.25: Druck- (blau) und Spaltzugfestigkeitsverlauf der Nuttschicht vom 04.04.13, Abschnitt II

Der extreme Druckfestigkeitsabfall der untersuchten Nuttschichtmischung lässt sich nicht alleine durch die relativ hohe Standardabweichung von 14,3 N/mm² der im Alter von 60 Tagen durchgeführten Prüfung erklären. Auffallend ist dabei der Zuwachs der parallel bestimmten Spaltzugfestigkeit, so dass hier vermutlich ein Fehler innerhalb der Druckfestigkeitsprüfung aufgetreten ist. Der 60-Tage-Wert der Druckfestigkeit ist daher zu verwerfen.



Abbildung II.1.26: ELAtextur®-Messgerät

Im Anschluss an den Einbau wurden am 05.04.13 Textur- und Griffigkeitsmessungen mit dem ELAtextur®-Messgerät (Abbildung II.1.26) und dem SRT-Gerät an den geprägten Abschnitten II, IV und VI (siehe Abbildung II.1.27) von der BAST durchgeführt. Das ELAtextur®-Messgerät ist ein radial messendes Laserprofilometer auf Basis eines Halbkreissegments, mit dem sich die Texturkenngrößen MPD (Mean Profile Depth) und ETD (Estimated Texture Depth) in situ bestimmen lassen. Die geplanten Messungen mit dem SKM konnten aufgrund der un-

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

gleichmäßig vorliegenden geprägten Nuttschicht und des fehlenden Oberflächen-
schlusses nicht durchgeführt werden.

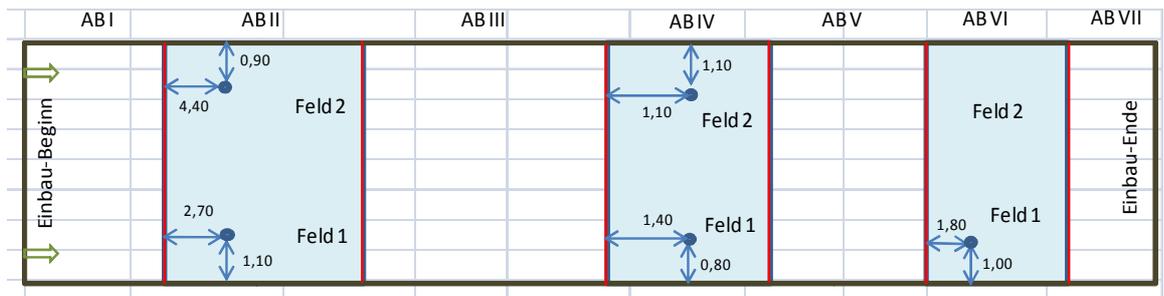


Abbildung II.1.27: geprägte Bereiche (Abschnitte II, IV und VI), Darstellung nicht maßstäblich

Während sich die Texturkenngrößen MPD bzw. ETD zwischen den gemessenen Abschnitten nur geringfügig unterscheiden (siehe Tabelle II.1.6), lassen sich hinsichtlich der mit dem SRT-Pendel gemessenen Griffigkeitswerte größere Unterschiede feststellen. Neben dem möglichen Zeitpunkt für eine Prägung unterstreichen die Messergebnisse die Notwendigkeit der für ein optimales Prägeergebnis zu verwendenden Mischung M5, wobei die geringe Anzahl der verschiedenen Messpunkte zu beachten ist. Die Prägegitter wurden beim Prägevorgang der Mischung M5 mit Walzen von je einem Meter Breite und einem Walzengewicht von je 74 kg sowie Zusatzgewichten von 60 kg auf der rechten Spur (Feld 1) und 80 kg auf der linken Spur (Feld 2) in die Nuttschichtoberfläche eingedrückt (siehe Bild D24 im Anhang D). Hinsichtlich der Einbaubarkeit mit einem Gleitschalungsfertiger und einer Konsistenz, die eine optimale und reproduzierbare Prägung gewährleistet, konnte zu diesem Zeitpunkt kein Kompromiss gefunden werden.

					Feld 1	Feld 2	Feld 1- WH.
AB I	0,00 - 8,50	[m]	Deckschicht				
AB II	8,50 - 14,70	[m]	Nuttschicht	[SRT]	47	43	[-]
				ETD	0,75	0,74	[-]
				MPD	0,68	0,68	[-]
AB III	14,70 - 23,30	[m]	Deckschicht				
AB IV	23,30 - 26,20	[m]	Nuttschicht	[SRT]	55	75	[-]
				ETD	0,70	0,77	[-]
				MPD	0,62	0,71	[-]
AB V	26,20 - 32,50	[m]	Deckschicht				
AB VI	32,50 - 37,50	[m]	Nuttschicht	[SRT]	60	[n.m.]	[-]
				ETD	0,70	[-]	0,69
				MPD	0,62	[-]	0,62
AB VII	37,50 - 61,00	[m]	Deckschicht				

Tabelle II.1.6: Textur- und Griffigkeitswerte auf den Abschnitten II, IV und VI

Am 07.06.2013 wurden abschließende Versuche auf den letzten ca. 20 m und der bis dato freiliegenden Oberfläche der Deckschicht durchgeführt, um zu erproben, ob und

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

wie die Nutzschrift in der angestrebten Konsistenz und auf größeren Flächen in hinreichender Qualität und Homogenität aufgebracht und geprägt werden kann. Gemischt wurde mit einem 150l R09-Modul der Fa. Eirich. Die Oberfläche der bestehenden Deckschicht war aufgrund der sonnigen Witterung relativ warm. Nach Aufbringen des Materials zeigte sich aufgrund einer leichten Verflüssigung des Nutzschriftmörtels, dass die hier eingesetzte leichte Doppel-Rüttelbohle eine Verdichtung bewirkte. Da teilweise Materialanhaftungen an der Rüttelbohle zurückblieben, konnte ein Deckenschluss flächenhaft jedoch nicht erreicht werden. Vermutlich hat sich durch die direkte Sonneneinstrahlung sehr schnell eine dünne, zähe Oberflächenschicht gebildet, die an der Rüttelbohle anhaftete und dadurch maßgeblich zu einer ungleichmäßigen Oberfläche beitrug.

Die Glättung der Oberfläche wurde im Anschluss händisch durch Tellerklärer oder mit Hilfe von Reibbrettern durchgeführt. Hiernach erfolgte eine Prägung mit Walzen, was in Teilbereichen erneut sehr gute Prägeergebnisse brachte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Herstellung von Oberflächen mittels Prägung ebenso wie bei der konventionellen Betondeckentexturierung eine hinreichende Verdichtung und Glättung des Betons sowie ein guter Deckenschluss die Grundvoraussetzungen für eine qualitativ hochwertige und dauerhafte Textur darstellen. In den durchgeführten Versuchen konnte lediglich die Deckschicht in zufriedenstellender Qualität eingebaut werden. Die Nutzschrift hingegen ließ sich nur mit einem unzureichenden Deckenschluss herstellen. Dies hatte zur Folge, dass lediglich in den Teilbereichen mit hinreichendem Deckenschluss eine gute Texturausbildung mittels Prägung erzielt werden konnte. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass insbesondere in den Bereichen der Einbau- und Prägetechnologie weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.4.2 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer

1.4.2.1 Messpunkte und Belastungsbedingungen

Die FWD-Messungen wurden vor dem Einbau am 19.03.13 und nach dem Einbau am 25.06.13 auf der Versuchsfläche mit dem Falling Weight Deflectometer, Typ SN 0411-103, in Fahrtrichtung Tor (siehe Abbildung II.1.28) durchgeführt.

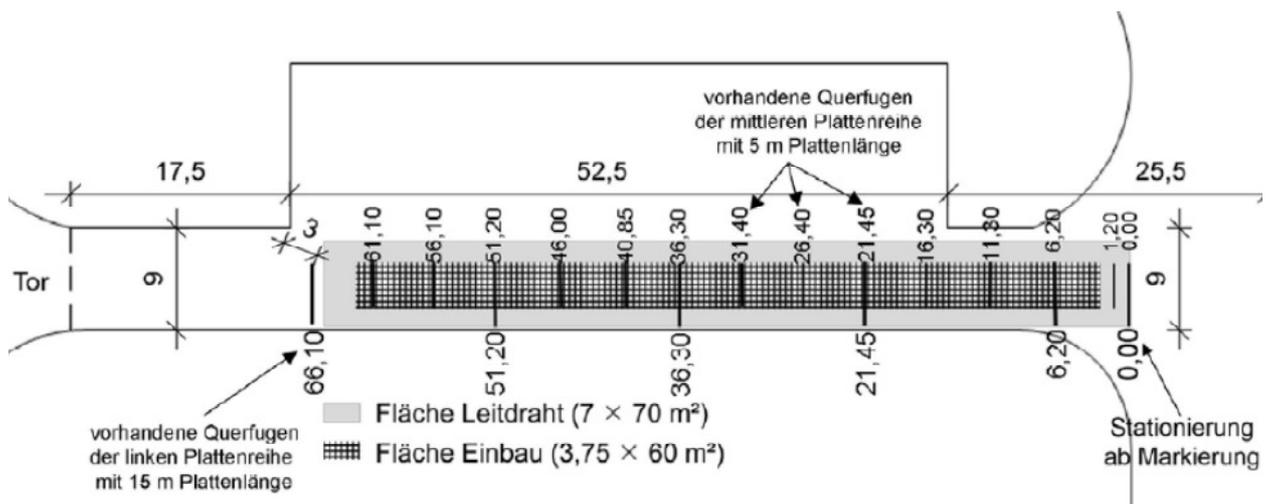


Abb. II.1.28: Lageskizze Plattenlängen/Querfugen für FWD-Messungen

Die Lasteinleitungspunkte wurden in Plattenmitte, an den Querfugen sowie an den Plattenecken angelegt. Dabei wurden die Messungen mit Stoßbelastungen von 50 kN, 75 kN und 100 kN ausgeführt.

Bereich 1	Mittlere Plattenreihe	5 m lange Platten
Bereich 2	Linke Plattenreihe	15 m lange Platten

Tabelle II.1.7: Plattengrößen der zu überbauenden Betondecke

Aus den ermittelten Deflexionen wurden folgende Parameter ermittelt:

- Aus der Deflexion im Lastzentrum berechneter äquivalenter Verformungsmodul $E_{\bar{a}}$ [MN/m²] auf OK Beton nach Gleichung {1}.
- Aus der Deflexion im Abstand von 1,80 m vom Lastzentrum berechneter Betungsmodul E_0 [MN/m²] unter der gebundenen Befestigung.
- Aus der Relativbewegung benachbarter Platten berechneter Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung an den Querfugen und Plattenecken.

$$E_{\bar{a}} = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot F}{\pi \cdot a \cdot s_{\max}} \quad \{1\}$$

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

mit

- $E_{\bar{a}}$ in MN/m²
- Poissonzahl $\mu = 0,35$
- Radius der Belastungsfläche $a = 150$ mm
- maximale Stoßkraft $F = 50.000$ N, 75.000 N oder 100.000 N
- maximale Deflexion im Lastzentrum s_{\max} in mm

1.4.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Die Höhe der Stoßkraft hatte bei keiner der beiden durchgeführten Messungen einen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Tragfähigkeitskennwerte $E_{\bar{a}}$, E_0 und W . Daher erfolgte die Auswertung für die jeweiligen Mittelwerte der aus den drei Stoßkräften berechneten Parametern.

Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der FWD-Messungen am 19.03.2013 im Mittel bei rd. 6°C und am 25.06.2013 im Mittel bei rd. 12 °C.

Zur Veranschaulichung der Messergebnisse finden sich im Anhang E, Bild E1 bis E6, die grafischen Darstellungen der Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls $E_{\bar{a}}$, des Bettungsmoduls E_0 und des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung.

Auswertung des äquivalenten Verformungsmoduls $E_{\bar{a}}$

Die ermittelten Tragfähigkeiten (hier: äquivalenter Verformungsmodul $E_{\bar{a}}$) sind für die linke Plattenreihe in Tabelle II.1.8 angeführt:

	vor UHPC-Einbau	nach UHPC-Einbau
Plattenmitte i.M.	$E_{\bar{a}} \approx 1441$ MN/m ²	$E_{\bar{a}} \approx 999$ MN/m ²
Feldmitte i.M.	-	$E_{\bar{a}} \approx 1651$ MN/m ²
Querfugen i.M.	$E_{\bar{a}} \approx 1033$ MN/m ²	$E_{\bar{a}} \approx 962$ MN/m ²
rechte Plattenecken i.M.	$E_{\bar{a}} \approx 610$ MN/m ²	$E_{\bar{a}} \approx 1270$ MN/m ²

Tabelle II.1.8: Vergleich der mittleren äquivalenten Verformungsmoduln der linken Plattenreihe

Vergleichsweise ergeben sich die äquivalenten Verformungsmoduln in der mittleren Plattenreihe wie nachfolgend angeführt:

- linke Plattenecken vor dem UHPC-Einbau i.M. $E_{\bar{a}} \approx 834$ MN/m²,
- linke Plattenecken nach dem UHPC-Einbau i.M. $E_{\bar{a}} \approx 1280$ MN/m².

Die Messergebnisse zeigen, dass die Betonunterlage vor Überbauung eine hohe Divergenz hinsichtlich der Tragfähigkeit aufweist. Diese konnte auch nach Überbauung festgestellt werden.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Durch die Überbauung konnte die Tragfähigkeit stellenweise erhöht werden. So wurde bspw. eine Erhöhung der Tragfähigkeit über den Plattenecken der mittleren Plattenreihe um ca. 50% erreicht. In einigen Bereichen wurde jedoch ein Abfall der Tragfähigkeit festgestellt. Dies betrifft insbesondere die Messwerte in Plattenmitte der linken Plattenreihe. Hier stellte sich eine Tragfähigkeitsminderung um ca. 30 % ein.

Auswertung des Bettungsmoduls

Die ermittelten Tragfähigkeiten (hier: Bettungsmodul E_0) sind für die linke Plattenreihe in Tabelle II.1.9 angeführt:

	vor UHPC-Einbau	nach UHPC-Einbau
Plattenmitte i.M.	$E_0 \approx 196 \text{ MN/m}^2$	$E_0 \approx 151 \text{ MN/m}^2$
Feldmitte i.M.	-	$E_0 \approx 210 \text{ MN/m}^2$
Querfugen i.M.	$E_0 \approx 208 \text{ MN/m}^2$	$E_0 \approx 163 \text{ MN/m}^2$
rechte Plattenecken i.M.	$E_0 \approx 131 \text{ MN/m}^2$	$E_0 \approx 226 \text{ MN/m}^2$

Tabelle II.1.9: Vergleich der mittleren Bettungsmoduln der linken Plattenreihe

Vergleichsweise ergeben sich die äquivalenten Bettungsmoduln E_0 in der mittleren Plattenreihe wie nachfolgend angeführt:

- linke Plattenecken vor dem UHPC-Einbau i.M. $E_0 \approx 146 \text{ MN/m}^2$,
- linke Plattenecken nach dem UHPC-Einbau i.M. $E_0 \approx 195 \text{ MN/m}^2$.

Die ermittelten Moduln zeigen, dass die Tragfähigkeit der Bettung ebenfalls größere Schwankungen aufweist. So wurden für den Bettungsmodul E_0 vor Einbau des UHPC Mittelwerte zwischen 131 MN/m^2 und 208 MN/m^2 berechnet.

Auswertung des Wirksamkeitsindex

Die ermittelten Wirksamkeitsindizes zur Beurteilung der Querkraftübertragung zwischen den Betonplatten der Unterlage sind für die linke Plattenreihe in Tabelle II.1.10 angeführt:

	vor UHPC-Einbau	nach UHPC-Einbau
Querfugen i.M.	$W \approx 79 \%$	$W \approx 95 \%$
rechte Plattenecken i.M.	$W \approx 73 \%$	$W \approx 98 \%$

Tabelle II.1.10: mittlere Wirksamkeitsindizes der linken Plattenreihe

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Vergleichsweise ergeben sich die Mittelwerte der Wirksamkeitsindizes in der mittleren Plattenreihe wie folgt:

- linke Plattenecken vor dem UHPC-Einbau i.M. $W \approx 79 \%$,
- linke Plattenecken nach dem UHPC-Einbau i.M. $W \approx 98 \%$.

Nach Überbauung mit der UHPC-Deckschicht konnte durchweg eine Verbesserung der Querkraftübertragung an den Quertugen und Plattenecken der alten Betondecke festgestellt werden. So konnte in den meisten Fällen eine Erhöhung des Wirksamkeitsindex auf mehr als 95% erreicht werden.

Resümee der Tragfähigkeitsuntersuchungen

Prinzipiell konnte in den Untersuchungen festgestellt werden, dass die im Ursprungszustand vorhandene Heterogenität hinsichtlich der Tragfähigkeit auch nicht durch die Überbauung mit UHPC beseitigt werden konnte. So variierte die Tragfähigkeit, ausgedrückt über den äquivalenten Verformungsmodul $E_{\bar{a}}$, an der überbauten Straßenkonstruktion i.M. zwischen $E_{\bar{a}} \approx 960 \text{ MN/m}^2$ und 1650 MN/m^2 . Diese Aussage gilt in dieser Form auch für die Bettung der vorhandenen Betondecke. Hier lagen die berechneten Mittelwerte für den Bettungsmodul zwischen $E_0 \approx 130 \text{ MN/m}^2$ und 210 MN/m^2 .

An der Konstruktion wurden nach Überbauung jedoch auch Werte ermittelt, die im Vergleich zum Ausgangszustand eine signifikante Abnahme der Tragfähigkeiten aufwiesen. Es ist anzunehmen, dass diese Tragfähigkeitsverluste insbesondere im mangelnden Haftverbund zwischen UHPC-Schicht und Betonunterlage begründet liegen. Eine weitere Möglichkeit stellt die teilweise geringfügige Verschiebung der Messpunkte dar, die infolge des mangelnden Oberflächenschlusses vorgenommen werden musste (siehe dazu Bild D29 und D30 im Anhang D). Das bedeutet, nicht alle Messpunkte lagen bei der Erst- und Zweitmessung exakt übereinander. In diesem Zusammenhang ist nochmals auf das grundlegende Vorhandensein von Inhomogenitäten der Tragfähigkeit (äquivalente Verformungsmoduln $E_{\bar{a}}$) hinzuweisen.

Hinsichtlich der Querkraftübertragung zwischen den benachbarten Betonplatten der Unterlage wurden im Ausgangszustand Wirksamkeitsindizes zwischen 56,6% und 96,6% ermittelt. Durch die Überbauung konnte hierbei eine grundlegende Verbesserung direkt nach Herstellung erwirkt werden. So lag die Größenordnung der Wirksamkeitsindizes hier bei $> 95\%$. Im Bereich der Plattenecken des Unterbetons konnte im Durchschnitt eine Verbesserung um bis zu 25% detektiert werden (siehe Tabelle II.1.10).

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die ermittelten Tragfähigkeitskennwerte Momentaufnahmen darstellen und in diesem speziellen Fall die betrachtete Versuchsfläche nach Überbauung keiner Verkehrsbelastung unterlag. Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit ist diese jedoch von wesentlicher Bedeutung.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.5 Monitoring der HPC-Versuchsstrecke „PWC Löwenburg“

Im September 2008 wurde eine 225 m lange Versuchsstrecke mit einer Deckschicht aus stahlfaserhaltigem hochfesten Beton (HPC) auf einem LKW-Parkstreifen des Autobahnparkplatzes „Löwenburg“ der BAB A2 nahe Porta Westfalica gebaut (siehe Abbildung II.1.29, linkes Bild) [SCHM08]. Die HPC-Deckschicht wurde fugenlos und durchgehend bewehrt in Abschnitten von jeweils 75 m mit Schichtdicken von 6 bzw. 8 cm mit (1 Anker je m²) bzw. ohne Verankerung zum Unterbeton eingebaut. Im Abschnitt ohne Verankerung wurde eine Bitumenemulsion als Haftvermittler im Schichtenverbund zwischen Unterbeton und HPC-Deckschicht eingesetzt. Der Betoneinbau erfolgte mit einem herkömmlichen Gleitschalungsfertiger. Bereits nach rd. 100 Tagen zeigte sich über alle Abschnitte verteilt ein Rissbild mit einzelnen durchgehenden und breiten Querrissen (vgl. Abbildung II.1.29, rechts) in Bereichen oberhalb der Querscheinfugen des Unterbetons, die zum Spannungsabbau innerhalb der Strecke geführt haben. Durch die BAST erfolgte in den Jahren 2009 bis 2013 ein Riss- und Tragfähigkeitsmonitoring dieser Versuchsstrecke. Die Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse wurden bei dem vorliegenden Projekt berücksichtigt.



Abbildung II.1.29: HPC-Versuchsstrecke „PWC Löwenburg“

1.5.1 Rissaufnahme

Im Rahmen des Rissmonitorings wurde grundsätzlich zwischen bereits kurz nach Fertigstellung der Versuchsstrecke unkontrolliert aufgetretenen breiten Querrissen (siehe Abbildung II.1.29, rechts) und dem Rissbild zwischen diesen spannungsabbauenden Querrissen unterschieden.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

In den Jahren 2009 bis 2013 wurde eine visuelle Erfassung des Zustandes der Oberfläche durchgeführt. Ergänzend wurde im Jahr 2011 die Rissaufnahme mit Hilfe des schnellfahrenden Rissersystems „RoadControl“ durch die Firma GBM Wiebe Gleisbaumaschinen GmbH im Auftrag der BAST durchgeführt (siehe Abbildung II.1.30).



Abbildung II.1.30: Schnellfahrendes Rissaufnahme-System „RoadControl“

Zur Validierung des Rissersystems wurde das Rissbild visuell aufgenommen und fotografisch dokumentiert. Neben den einzelnen breiten Querrissen, die sich meist oberhalb der Querscheinfugen des Unterbetons eingestellt haben, lag insbesondere in den beiden Abschnitten, in denen die HPC-Schicht mit dem Unterbeton verankert ist, ein gleichmäßig verteiltes Rissbild dünner und feiner Querrisse vor.

Neben den theoretisch erwarteten Querrissen zeigte sich im ersten Abschnitt, in dem beabsichtigt war, den Verbund mittels einer Haftbrücke aus Bitumenemulsion herzustellen, zusätzlich ein ausgeprägtes Längsrissbild. Hier ist anzunehmen, dass diese Längsrissbildung auf die vorliegenden konstruktiven Randbedingungen zurückzuführen ist. So wurde bautechnisch zwischen dem zu untersuchenden Straßenaufbau (Parkstreifen) und dem Zufahrtsstreifen eine Entwässerungseinrichtung (Rinne + Abflüsse) angeordnet. Die Entwässerungseinrichtung zeigte zeitnah Setzungserscheinungen, so dass von einem erhöhten Spannungseintrag am freien Plattenrand durch Radüberrollung beim Einfahren der Lkws auf den Parkstreifen ausgegangen werden kann (siehe Abbildung II.1.31).

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

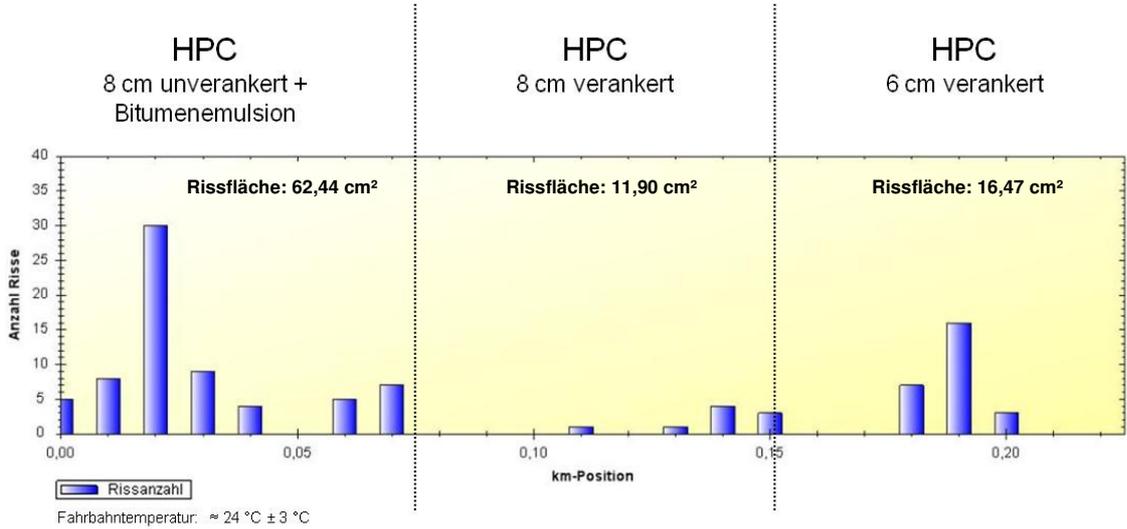


Abbildung II.1.31: Häufigkeitsverteilung der Längsrisse (alle Breiten), Aufnahme mittels „RoadControl“ im September 2011

Im Betrachtungszeitraum 2010 bis 2011 konnten keine signifikanten Veränderungen im Oberflächenrissbild festgestellt werden. So stellte sich das Rissbild wie folgt dar: In den beiden verankerten Abschnitten und dort insbesondere im 2. Abschnitt (8 cm HPC, verankert) dominierten die im Frühstadium aufgetretenen breiten Querrisse, die sich in der Regel über den Querscheinfugen der Betonunterlage eingestellt haben. Ferner konnte eine Gesamtrissfläche von rd. 10,5 cm² feiner Querrisse ($b \leq 0,1\text{ mm}$) aufgenommen werden. Vergleichsweise betrug die Gesamtrissfläche feiner Querrisse im 3. Abschnitt (6 cm HPC, verankert) rd. 4,5 cm² (Abbildung II.1.32).

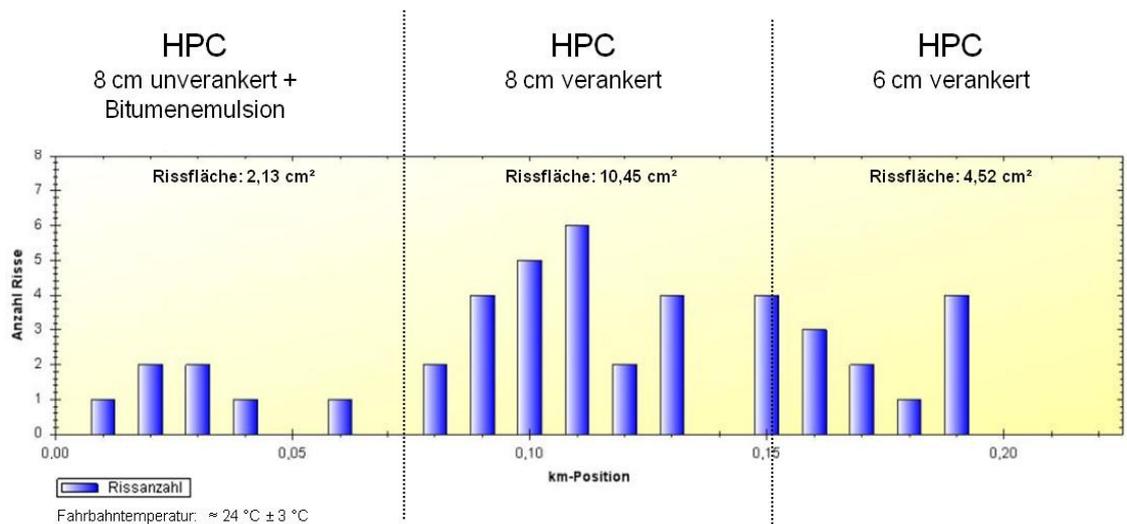


Abbildung II.1.32: Häufigkeitsverteilung feiner Querrisse ($b \leq 0,1\text{ mm}$), Aufnahme mittels „RoadControl“ im September 2011

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

Eine Aufteilung aller Rissbreiten über die gesamte Länge der Versuchsstrecke zeigt Abbildung II.1.33.

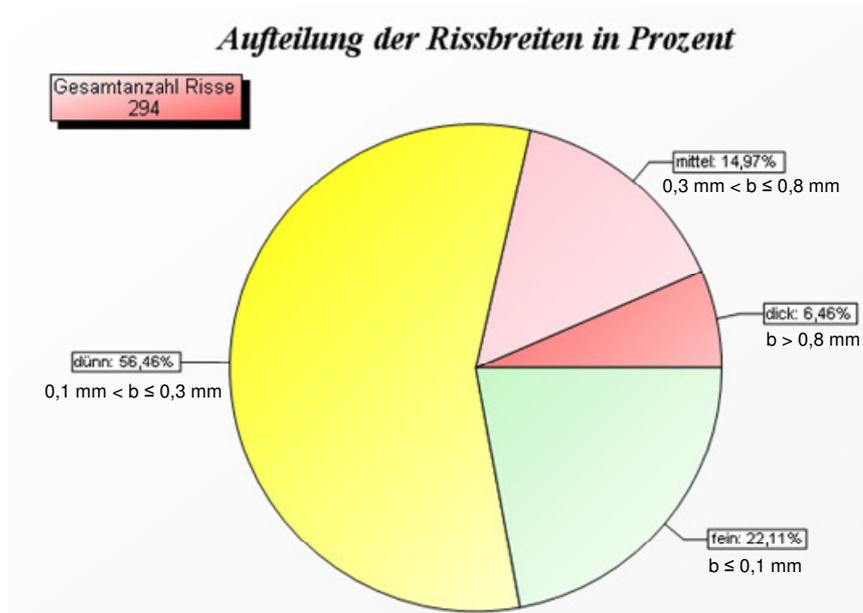


Abbildung II.1.33: Aufteilung der verschiedenen Rissbreiten auf der HPC-Versuchsstrecke (Stand 2011, gemessen mit „RoadControl“)

In den Jahren 2009, 2010, 2011 und 2013 wurden auf der Versuchsstrecke visuelle Rissaufnahmen durchgeführt. Die Tragfähigkeitsuntersuchungen fanden in den Jahren 2009 und 2013 statt. Daran anschließend wurde das Monitoring der HPC-Versuchsstrecke abgeschlossen.

Visuelle Rissaufnahmen erlauben zwar keine exakte Angabe aller Rissbreiten und Risslängen, und es besteht die Gefahr, dass sehr feine Risse ggfs. nicht detektiert werden, wohingegen mit dem schnellfahrenden Rissaufnahmesystem „RoadControl“ Risse mit Rissbreiten von 0,1 mm zuverlässig erkannt werden können. Gleichwohl konnte mit der visuellen Aufnahme die Entwicklung des Rissbildes mit den zugehörigen Risslängen bzw. den jeweils neu aufgetretenen Rissen über die fast fünfjährige Liegezeit der Versuchsstrecke unter verkehrlicher Beanspruchung durch auffahrenden und ruhenden Schwerlastverkehr aufgezeigt werden. Die visuelle Aufnahme ermöglicht somit eine Übersichtsdarstellung der aufgetretenen Rissbildentwicklung (siehe Abbildungen II.1.34 bis II.1.36). Die zugehörigen Fotos der für die jeweiligen Abschnitte kennzeichnenden Rissbilder finden sich im Anhang D, Bild D31 bis D37.

Besonders im ersten Abschnitt, dessen Fahrbahn aus einer acht Zentimeter dicken HPC-Schicht besteht, die mit dem Unterbeton nicht verankert ist und eine Bitumenemulsion als Haftvermittler aufgetragen wurde, zeigt sich ein deutliches Längsrissbild. Dieses Rissverhalten konnte auch mittels „RoadControl“ festgestellt werden.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

ne konkreten Schlüsse zulässt (siehe Abbildung II.1.36 sowie Bild D36 und D37 im Anhang D).

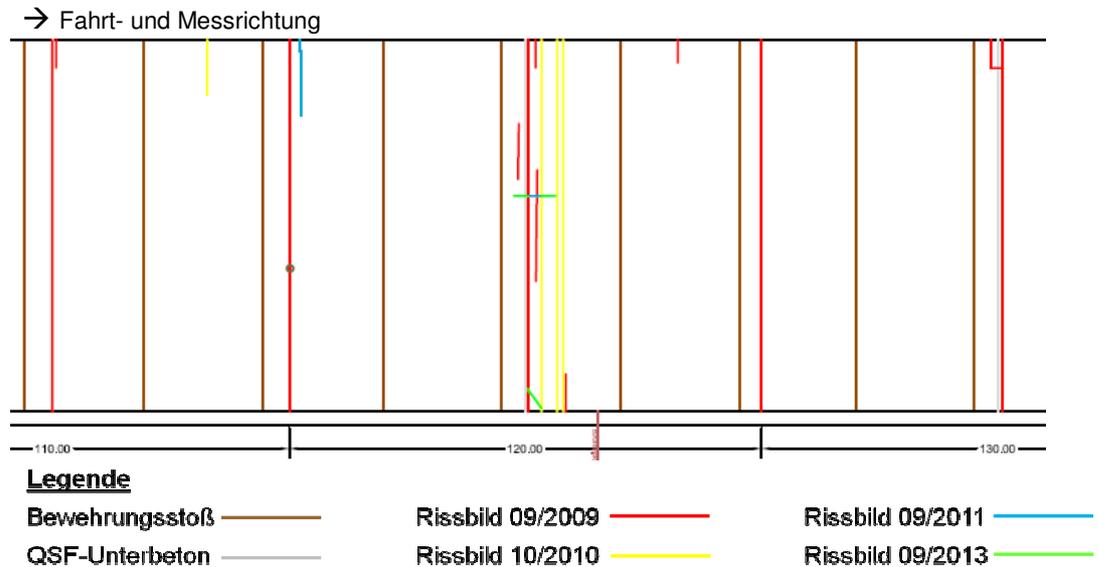


Abbildung II.1.35: Rissbild **Abschnitt 2** – vermehrt Querrisse, z.T. durchgehend oder mit Versatz

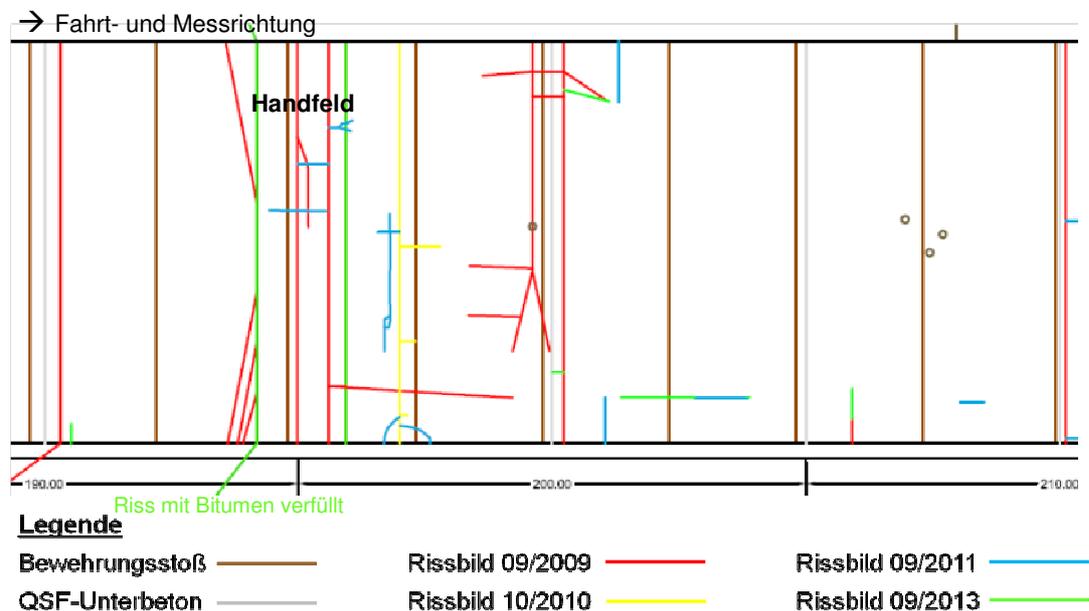


Abbildung II.1.36: heterogenes Rissbild in **Abschnitt 3** – inkl. händisch eingebauten Bereiches

Die vorliegenden Rissbilder in den Abschnitten 2 und 3 lassen die Schlussfolgerung zu, dass insbesondere die im Bereich der Querscheinfugen des Unterbetons auftretenden Horizontalbewegungen infolge thermischer Beanspruchung nicht ohne Versagen durch die HPC-Decke aufgenommen werden können.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Aufgrund der konstruktionsbedingt entstandenen Querrisse in der HPC-Fahrbahn oberhalb der Querscheinfugen wurde zudem die Ausbildung des gewünschten Rissbildes (Querrisse im Abstand von ca. 40 cm – 70 cm) weitestgehend gestört.

Berücksichtigt man die Entstehungsursache des im ersten Abschnitt vorliegenden Rissbildes, scheint bei der gewählten fugenlosen Bauweise neben einer ausreichenden Dicke die Entkopplung der tragenden HPC-Schicht von der Betonunterlage in Plattenbauweise eine notwendige Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit zu sein.

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

1.5.2 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer

Die abschließenden Tragfähigkeitsuntersuchungen wurden am 23.09.2013 mit dem Falling Weight Deflectometer, Typ SN 0411-103, durchgeführt. Die Lasteinleitungspunkte wurden jeweils auf OK HPC-Fahrbahn über der Plattenmitte und über den Querfugen des Unterbetons angelegt. Dabei wurden die Messungen mit Stoßbelastungen von 50 kN und 100 kN ausgeführt. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 15,7 °C und 17,8 °C, die Oberflächentemperaturen der HPC-Fahrbahn zwischen 16,6 °C und 19,7 °C.

Im Anhang F finden sich die Lage der Messpunkte (Bild F1 bis F3) sowie zur Veranschaulichung der Messergebnisse die grafischen Darstellungen der maximalen Deflexionen, der Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a , des Bettungsmoduls E_0 und des Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung über die Gesamtlänge der Versuchsstrecke (Bild F4 bis F9).

Auswertung der FWD-Messergebnisse:

Abschnitt	1			2			3		
Aufbau	8 cm HPC auf 300 g/m ² U60K auf 18 cm Betontragschicht auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m ²)			8 cm HPC verankert auf 18 cm Betontragschicht auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m ²)			6 cm UHPC verankert auf 20 cm Betontragschicht auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m ²)		
Messdatum	10%-Quantilwerte für Plattenmitte des Unterbetons 23.9.2013								
	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel
s_{max} [mm]	0,108	0,207	100kN/50kN = 1,92	0,125	0,247	100kN/50kN = 1,97	0,134	0,258	100kN/50kN = 1,95
E_a [MN/m ²]	1.731	1.807	1.769	1.513	1.529	1.521	1.391	1.448	1.419
E_0 [MN/m ²]	154	162	158	149	159	154	159	168	164
Messdatum	10%-Quantilwerte für Querfugen des Unterbetons (ohne Risse) 23.9.2013								
	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel
s_{max} [mm]	0,128	0,249	100kN/50kN = 1,93	0,184	0,342	100kN/50kN = 1,91	0,177	0,324	100kN/50kN = 1,90
E_a [MN/m ²]	1.453	1.501	1.477	1.076	1.145	1.111	1.061	1.158	1.110
W [%]	100	100	100	99	100	100	100	100	100
	Gesamtittel: 100kN/50kN = 1,93								
Messdatum	10%-Quantilwerte für Plattenmitte des Unterbetons 17.11.2008								
	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel
s_{max} [mm]	0,109	0,198	100kN/50kN = 1,82	0,101	0,184	100kN/50kN = 1,84	0,097	0,180	100kN/50kN = 1,85
E_a [MN/m ²]	1.720	1.882	1.801	1.831	2.020	1.925	1.907	2.065	1.986
E_0 [MN/m ²]	167	176	171	165	178	171	173	182	178
Messdatum	10%-Quantilwerte für Querfugen des Unterbetons (ohne Risse) 17.11.2008								
	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel	50 kN	100 kN	Mittel
s_{max} [mm]	0,140	0,255	100kN/50kN = 1,81	0,135	0,242	100kN/50kN = 1,81	0,126	0,228	100kN/50kN = 1,82
E_a [MN/m ²]	1.364	1.500	1.432	1.395	1.547	1.471	1.475	1.637	1.556
W [%]	98	98	98	99	99	99	99	99	99
	Gesamtittel: 100kN/50kN = 1,83								

Tabelle II.1.11: Maximale Deflexionen sowie daraus berechnete äquivalente Verformungsmoduln E_a , Bettungsmoduln E_0 und Wirksamkeitsindizes W auf den Abschnitten 1 bis 3

Das Verhältnis der Deflexion bei 100 kN Stoßbelastung zur Deflexion bei 50 kN Stoßbelastung hat sich im Laufe der ca. fünfjährigen Nutzung durchschnittlich von 1,83 auf 1,93 erhöht.

Auffallend ist, dass in jedem Versuchsabschnitt etwa in Abschnittsmitte in der HPC-Deckschicht über einer Querfuge des Unterbetons bis zum 23.09.2013 ein Querriss mit entsprechend geringer Querkraftübertragung entstanden ist, der am 17.11.2008

Förderkennzeichen 13N10492
Schlussbericht

noch nicht vorhanden war. Ferner ist an jeder Raumfuge eine signifikant geringere Querkraftübertragung sowie Tragfähigkeit im Vergleich zu allen anderen Messpunkten vorhanden. Erwartungsgemäß zeigt sich über allen anderen Querschnitten des Unterbetons auf OK des HPC sowohl am 17.11.2008 als auch am 23.09.2013 im Durchschnitt eine geringere Tragfähigkeit als über der Plattenmitte des Unterbetons (siehe Abbildung II.1.37). Die Querschnittsschwächung des Unterbetons wirkt sich demnach auch auf die Tragfähigkeit des Gesamtsystems aus.

In 2009 hat die Analyse der Ergebnisse aus den Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer gezeigt, dass die mittels FEM berechneten vertikalen Verformungen gut mit den messtechnisch in situ ermittelten Einsenkungen übereinstimmen.

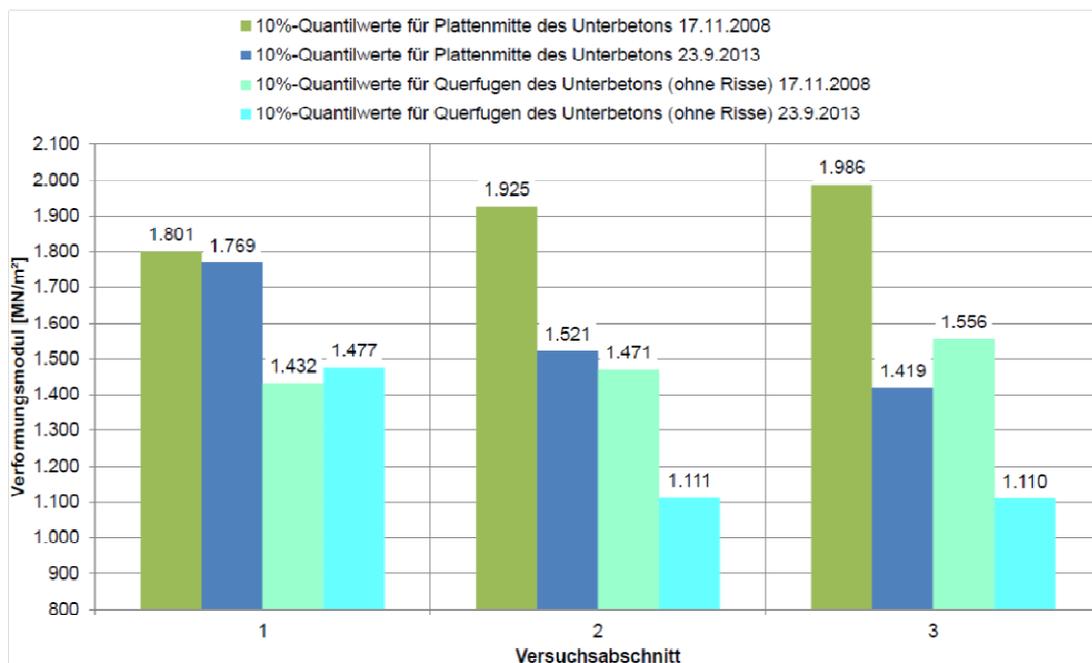


Abbildung II.1.37: Mittlere 10%-Quantilwerte des äquivalenten Verformungsmoduls auf OK HPC-Fahrbahn

Es kann zudem festgestellt werden, dass sich im Abschnitt 1 die Gesamttragfähigkeiten sowohl in Plattenmitte als auch an den Querfugen im Nutzungszeitraum nur geringfügig verändert haben. Hinsichtlich der Tragfähigkeit der Bettung konnte am 23.09.2013 eine geringere Bettungstragfähigkeit festgestellt werden als am 17.11.2008 (siehe Abbildung II.1.38).

In den Abschnitten 2 und 3 ist dies nicht der Fall. In beiden Abschnitten ist im Laufe der Nutzung stellenweise eine deutliche Tragfähigkeitsminderung in Plattenmitte und an den Querfugen des Unterbetons nachweisbar. Dies zeigt sich auch in den wesentlich höheren Variationskoeffizienten für den äquivalenten Verformungsmodul bei Messungen in Plattenmitte:

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

- Abschnitt 1: mittlerer Variationskoeffizient für $E_{\bar{a}} \approx 7,6\%$
- Abschnitt 2: mittlerer Variationskoeffizient für $E_{\bar{a}} \approx 18,1\%$
- Abschnitt 3: mittlerer Variationskoeffizient für $E_{\bar{a}} \approx 22,2\%$

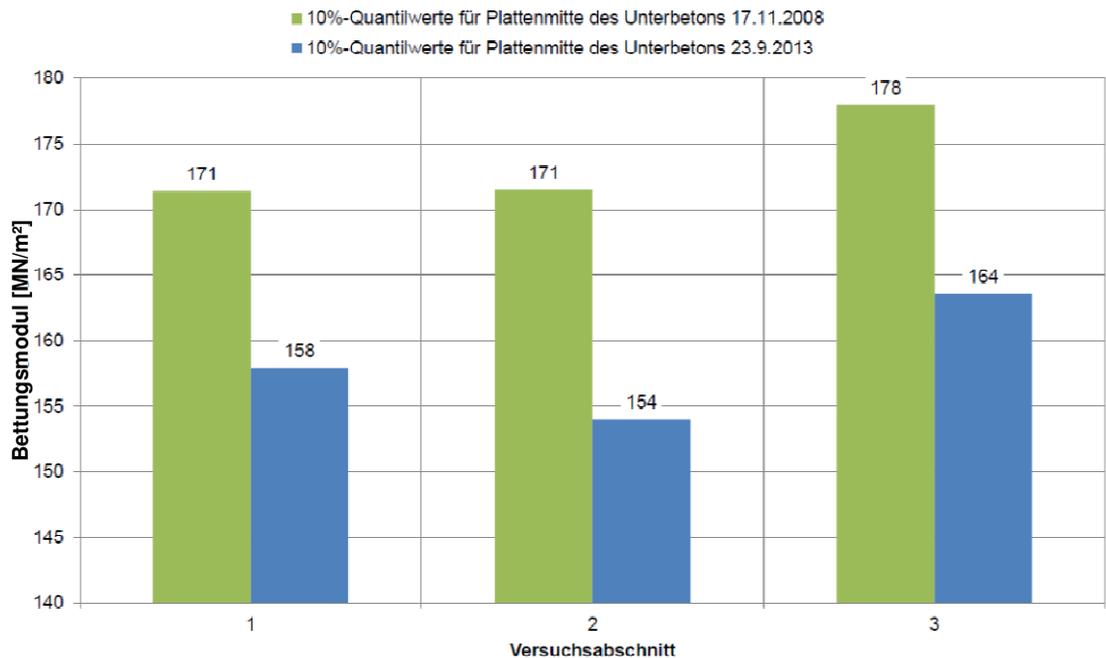


Abbildung II.1.38: Mittlere 10%-Quantilwerte des Bettungsmoduls in Plattenmitte

Fazit:

Unter Berücksichtigung des Rissmonitorings über die fast fünfjährige Liegedauer zeigen die Tragfähigkeitsuntersuchungen der Versuchsstrecke, dass sich die erforderliche Tragfähigkeit nicht mit dem gewählten Straßenaufbau bzw. der gewählten konstruktiven Ausführung realisieren lässt. Ebenso hat sich das Rissbild insbesondere in den beiden verankerten Abschnitten 2 und 3 nicht in der gewünschten Form eingestellt. In beiden Abschnitten ist eine deutliche Tragfähigkeitsminderung in Plattenmitte und an den Querfugen des Unterbetons feststellbar. Der unverankerte Abschnitt weist hingegen ein ausgeprägtes Längsrissbild auf, während sich die Gesamttragfähigkeiten sowohl in Plattenmitte als auch an den Querfugen des Unterbetons im Nutzungszeitraum kaum verändert haben.

Der Straßenoberbau muss vielen Belastungen bei einer angestrebten Nutzungsdauer von 30 Jahren standhalten. Die Beanspruchungen ergeben sich insbesondere durch den Schwerverkehr, die klimatischen Einwirkungen, wie Witterung mit Regen, z.T. schnell wechselnden Temperaturen und tiefem Frost mit bis zu -20°C sowie den Einsatz von Streusalz. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird empfohlen, die konstruktive Ausführung der angedachten Überbauung zu überarbeiten.

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis GAZV über die Verwendung der Zuwendungen mit Angabe der wichtigsten Positionen ist durch den Zuwendungsempfänger „Bundesanstalt für Straßenwesen“ am 09.12.2013 an den Zuwendungsgeber „Projektträger“ übermittelt worden.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen ist im Ergebnisbericht erfolgt. Die in den entsprechenden Kapitelabschnitten aufgeführten Bearbeitungsschritte mit den erhaltenen Ergebnissen dokumentieren das dem Projektstand entsprechende vollständige Erbringen der Leistungen gemäß Aufgabenstellung.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die insbesondere auf Bundesfernstraßen stetige Zunahme der Verkehrsbelastung in den vergangenen Jahren wird sich nach vorliegenden Prognosen in den kommenden Jahren exponentiell fortsetzen. Dieser Zuwachs führt zu einer deutlich höheren Belastung des Straßenkörpers. Der überwiegende Teil der Autobahnen aus Beton wurde in den 70er und 80er Jahren unter der damals vorliegenden Prognose bemessen und gebaut. Ausgehend von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von etwa 30 Jahren sind diese Autobahnabschnitte im Hinblick auf die aktuelle Verkehrsbelastung deutlich unterdimensioniert. Die bisher verwendeten Baustoffe und Standardbauweisen stoßen hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer dabei an Grenzen, so dass die Eignung neuer Materialien und Konstruktionen für den Einsatz im Straßenbau geprüft werden muss.

Daher ist es unter dem Aspekt der Sicherstellung von Qualität, Dauerhaftigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit des bestehenden Autobahnnetzes aus Beton erforderlich, neue bauliche Erhaltungsmaßnahmen zu erarbeiten. Mit dem Baustoff Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC) steht ein äußerst innovativer Werkstoff zur Verfügung, der die hohen und weiterhin steigenden Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer und chemischer Beanspruchung erfüllt. Zudem ist davon auszugehen, dass aufgrund der mechanischen Materialkennwerte die erforderliche Tragfähigkeit mit geringeren Schichtdicken als bei herkömmlichen Straßenbetonen erreicht werden kann.

Die Bearbeitungsdauer von 48 Monaten und die Höhe der gewährten Zuwendung waren insbesondere aufgrund

- der Anzahl der an dem Projekt beteiligten Partner,
- der Lieferschwierigkeiten bei den für UHPC benötigten sehr dünnen Stahlkurzfasern,
- der Konzipierung der UHPC-Mischungen hinsichtlich der Prägbarkeit sowie der Einbaubarkeit mit herkömmlichen Gleitschalungsfertigern,

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

- der Kapazitätsvorhaltung, der Vorbereitungszeit und des enormen technischen Aufwandes für Großversuche zweifellos angemessen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung eines Instandsetzungsverfahrens für eine zweischichtige Betonfahrbahndecke im Hocheinbau aus UHPC. Damit ließen sich Erhaltungsmaßnahmen zügiger durchführen, und die Fahrbahn könnte aufgrund des frühen Erreichens hoher Festigkeiten dem Verkehr schneller wieder freigegeben werden. UHPC weist aufgrund seines gegenüber Normalbeton außergewöhnlich dichten Gefüges und der hohen Festigkeiten eine sehr große Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer und chemischer Beanspruchung auf. Zudem ist davon auszugehen, dass er die hohen Anforderungen, die insbesondere an Bundesfernstraßen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit gestellt werden, erfüllt, und sich aufgrund der mechanischen Materialkennwerte die erforderliche Tragfähigkeit mit geringeren Schichtdicken als bei herkömmlichen Straßenbetonen erreichen lässt. Durch die Zugabe von photokatalytisch wirksamem nanoskaligem Titandioxid können der Nutzschrift darüber hinaus luftschadstoffreduzierende Eigenschaften verliehen werden.

Bezüglich der Verwertbarkeit der in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse lässt sich folgendes Resümee ziehen:

Der Einbau der zweilagig bewehrten Deckschicht in einer Stärke von ca. 15 cm lässt sich mit einem herkömmlichen Gleitschalungsfertiger realisieren. Zu beachten ist hierbei jedoch zum einen der sehr hohe zeitliche Aufwand, der für das Verlegen der Bewehrung notwendig ist. Zum anderen muss eine Mischtechnik mit der zugehörigen Anlagenkapazität bezüglich Lagerung und Dosierung der Ausgangsstoffe, sowie Dosierungsreihenfolge, Transport und Förderung des ultrahochfesten Betons zur Verfügung stehen. Diese Anforderungen können mit den im Straßenbau üblicherweise verwendeten mobilen Mischanlagen mit Tagesleistungen von 1.000 bis 5.000 m³ Frischbeton nicht erfüllt werden. Bislang werden auch in Transportbetonwerken keine ultrahochfesten Betone mit Druckfestigkeiten über 120 N/mm², für die derzeit keine Normen oder Richtlinien in Deutschland existieren, hergestellt.

Darüber hinaus war die Nutzschrift in der für eine Prägung direkt nach Betonage notwendigen Konsistenz mit einem herkömmlichen Gleitschalungsfertiger nicht einbaubar. Hier besteht Bedarf für die Weiterentwicklung der Einbautechnik und -technologie, maßgeblich die Verdichtung mit anschließender Oberflächenglättung betreffend.

Ferner wurde die gewählte Prägetechnik innerhalb der Projektlaufzeit in mehreren Schritten weiterentwickelt, konnte jedoch für eine Praxisanwendung abschließend nicht hinreichend erprobt werden. Für die Weiterentwicklung mit dem Ziel eines automatisierten und gleichmäßig arbeitenden Verfahrens, das das Prägegitter in die Be-

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

tonoberfläche eindrückt und wieder aufnimmt, ohne die Struktur der Prägung zu zerstören, sind weitere Versuche erforderlich.

Unter Berücksichtigung des Riss- und Tragfähigkeitsmonitorings der HPC-Versuchsstrecke auf dem „PWC Löwenburg“ an der BAB A2 nahe der Porta Westfalica [SCHM08] lässt sich für die Beurteilung der Wirksamkeit der gewählten Bauweise und hinsichtlich der Überbauung von Betonfahrbahnen folgendes Fazit festhalten:

Eine UHPC-Schicht mit durchgehender Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite ist als kontinuierlich arbeitendes System aufzufassen, das sein thermisches Arbeitsvermögen durch Mikrorisse verteilt über die gesamte Konstruktionslänge realisiert. Dagegen sind Betonplatten mit definierten Fugen lokal arbeitende Systeme, die ein thermisches Arbeitsvermögen über die horizontalen Relativbewegungen der Plattenränder an den Fugen gewährleisten. Werden Betondecken mit einer fugenlosen und durchgehend bewehrten UHPC-Schicht überbaut, erfolgt eine Kraftkopplung in Plattenebene sowie eine zur Wirkung des Dübels zusätzliche Lastübertragung der Kräfte in vertikaler Richtung. Durch den horizontalen Kopplungseffekt ist das Plattensystem in seiner Längsdehnung behindert, d.h. bei Temperaturänderungen entstehen Zugspannungen infolge thermischer Kontraktion, und zwischen den Platten baut sich ein komplizierter Interaktionszustand auf. Die lokalen Verschiebungsunstetigkeiten übertragen sich in die kontinuierliche Schicht aus UHPC und führen dort zu extremen Beanspruchungen. Diese Effekte werden zum Teil durch die Verkehrslasten sowie durch Aufwölbungen bzw. Aufschüsselungen des gekoppelten Plattensystems verstärkt, die zu zusätzlichen Biegebeanspruchungen in der UHPC-Schicht im Fugenbereich der überbauten Betondecke führen können, so dass es zum bekannten „Durchschlagen der Querscheinfugen“ kommen kann.

Gleichwohl wurde von der Universität Kassel, entgegen der zunächst genannten Abmessung von 10 cm, innerhalb der Projektlaufzeit nach durchgeführten Berechnungen eine Deckschichtdicke von rd. 15 cm vorgegeben. Die Bemessung ergab eine zweilagige Bewehrung mit Betonstahlmatten R 9,42/6,04, jeweils in der oberen und unteren Lage, und eine Betonüberdeckung gemäß der Expositionsklasse XF4. Ob dieses System die Beanspruchungen, die sich aus o.g. Gründen ergeben, schadensfrei aufnehmen kann, wurde bislang nur rechnerisch ermittelt. Über das tatsächliche Verhalten, insbesondere unter der dynamischen Belastung des Schwerlastverkehrs, liegen keine Erfahrungen vor. Allerdings lässt sich das ursprünglich verfolgte Ziel eines Instandsetzungssystems mit diesen Abmessungen technisch nicht anwenden und wirtschaftlich nicht vertreten (Höhe der Fahrbahnoberkante nach der Instandsetzungsmaßnahme, Einhalten von Zwangspunkten etc.).

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hinsichtlich der Entwicklung, ultrahochfesten Beton mit herkömmlichem Straßenbaugerät einzubauen sowie eine zweischichtige Bauweise mit definierter Texturprägung der Fahrbahnoberfläche auszuführen, sind von anderen Stellen momentan keine Fortschritte bzw. Aktivitäten bekannt.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Aktivitäten bzgl. geplanter Veröffentlichungen sollen innerhalb des Projektverbunds gebündelt werden. Es sind Veröffentlichungen zu den nachfolgend genannten Themenkreisen vorgesehen, bei denen aber die Gemeinsamkeit aller Teilaspekte erkennbar bleiben soll:

- a. Materialtechnik, Baustofftechnik
- b. Herstellung und Einbau
- c. Akustik

Es wird angestrebt, dass möglichst viele Partner koordiniert Veröffentlichungen schalten.

(Text Kapitel II.6: Müller-BBM)

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

Normen-, Arbeitsblatt- und Richtlinienverzeichnis

- [1] AL Sp-Beton (2006);
Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn
- [2a] DIN EN 12390 Teil 1 (02.2001);
Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
- [2b] DIN EN 12390 Teil 1 (12.2012);
Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
- [3] DIN EN 12390 Teil 2 (08.2009);
Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [4] DIN EN 12390 Teil 3 (07.2009);
Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- [5] DIN EN 12390 Teil 5 (07.2009);
Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern
- [6] Richtlinie „Stahlfaserbeton“ (03. 2010);
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
- [7] DIN EN 10036 Teil 3 (06.2003);
Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten
- [8] TP Griff-StB (SRT) (2004);
Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil Messverfahren SRT; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn
- [9] TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 (2008)
Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen

Förderkennzeichen 13N10492

Schlussbericht

- [10] ZTV-Beton StB-07 (2007);
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Trag-
schichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton;
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonbau-
weisen
- [11] DIN EN 12350 Teil 4 (08.2009);
Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß
- [12] DIN EN 12350 Teil 5 (08.2009);
Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß
- [13] DIN EN 12350 Teil 7 (08.2009);
Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt

Literaturverzeichnis

- [BECK02] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; van Blokland, G.; Kuijpers, A.; Reinik, F.; Huschek, S.; Stütze, T.; Heerkens, J.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847, BMVBW, 2002
- [ITAR07] ITARI – Integrated Tire and Road Interaction. Project within the 6th EU framework program, finalized 2007
- [KRIE99] Krieger, B; Sulten, P.: Stand der Entwicklung von lärmarmen Betondecken, Straße und Autobahn, 9/1999
- [LEIS04] Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche; Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 37 (2004)
- [SCHM08] Schmidt, M.; Freisinger, S.: Dünne Deckschichten aus Hochleistungsbeton (DDHB), Schlussbericht, FE-Nr. 89.0188/2007/AP, Dez. 2008
- [SILE08] SILENCE – Quieter surface transport in urban areas. Project within the 6th EU framework program, finalized 2008
- [WIEL12] Wieland, Marko: Waschbeton – Resümee und Perspektiven; Straße + Autobahn; ISSN: 0039-2162; Jg.: 63, Nr.9, 2012, Seite 569-580

Inhalt des Anhangs

Anhang A: T3D - Auswerteprotokolle 2010

Anhang B: T3D - Auswerteprotokolle 2011

Anhang C: T3D - Auswerteprotokolle 2012/13

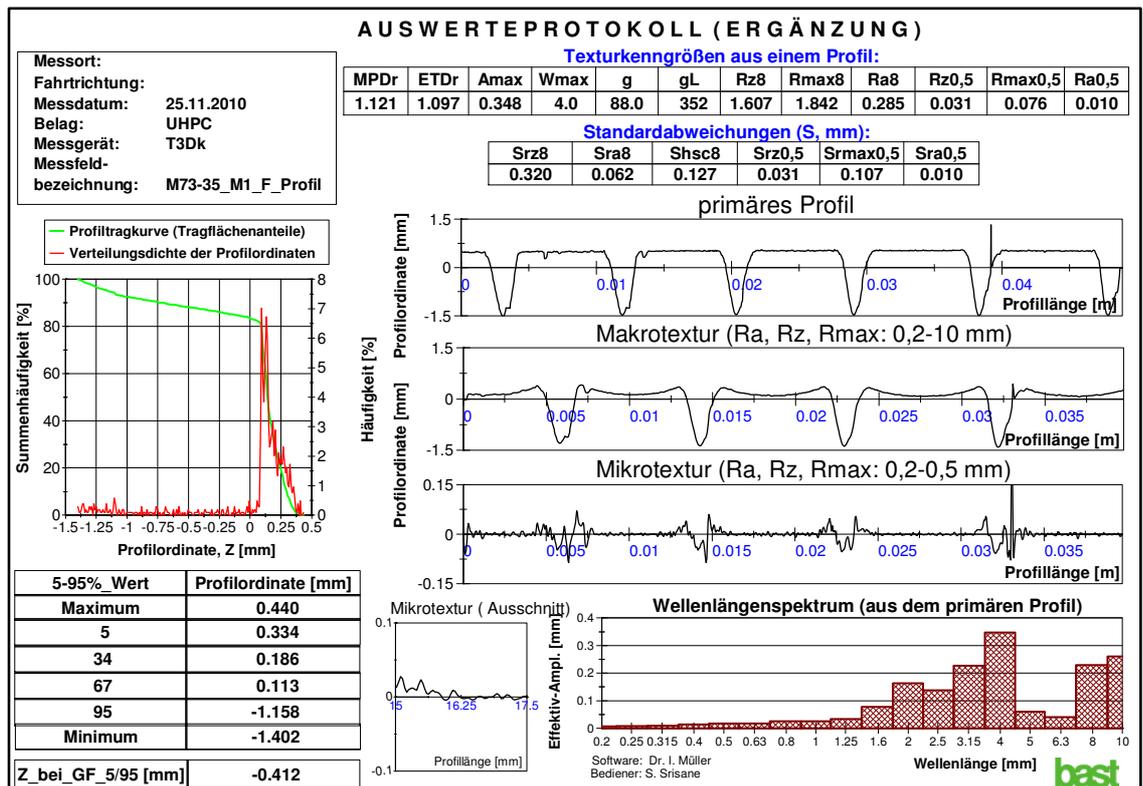
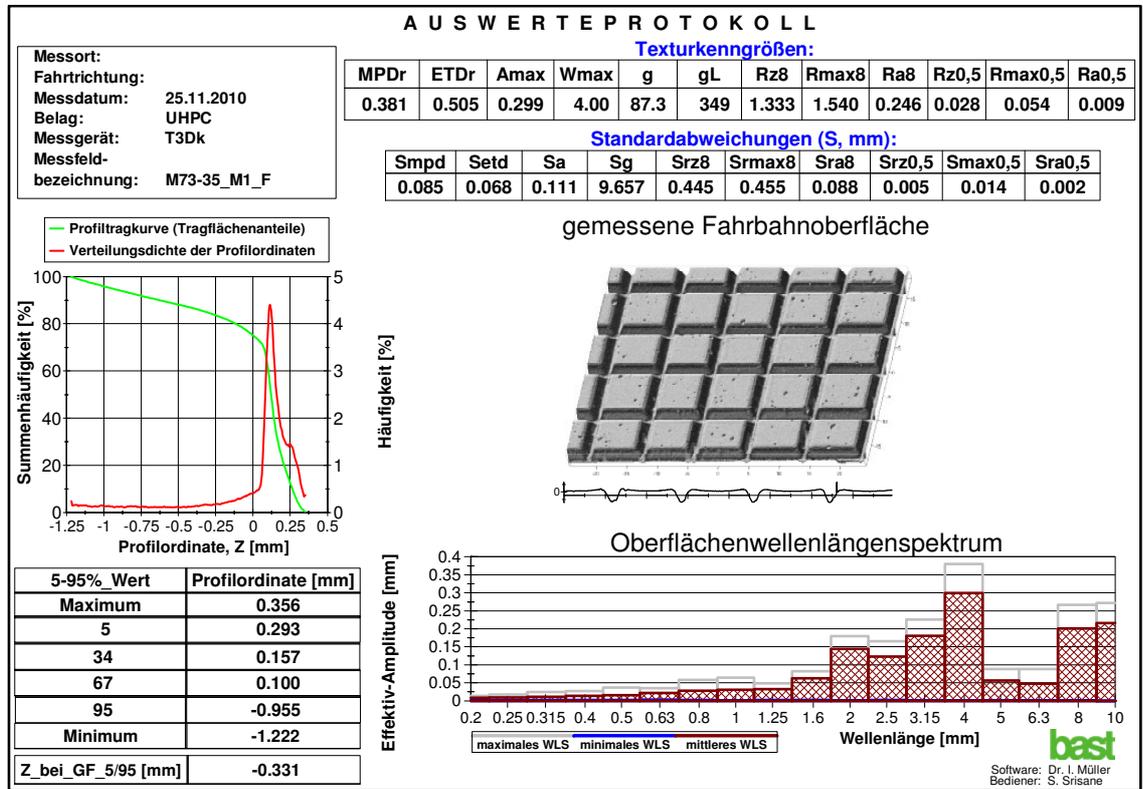
Anhang D: Fotos

Anhang E: FWD-Messungen Einbauversuch /
Demonstratorbau 2013

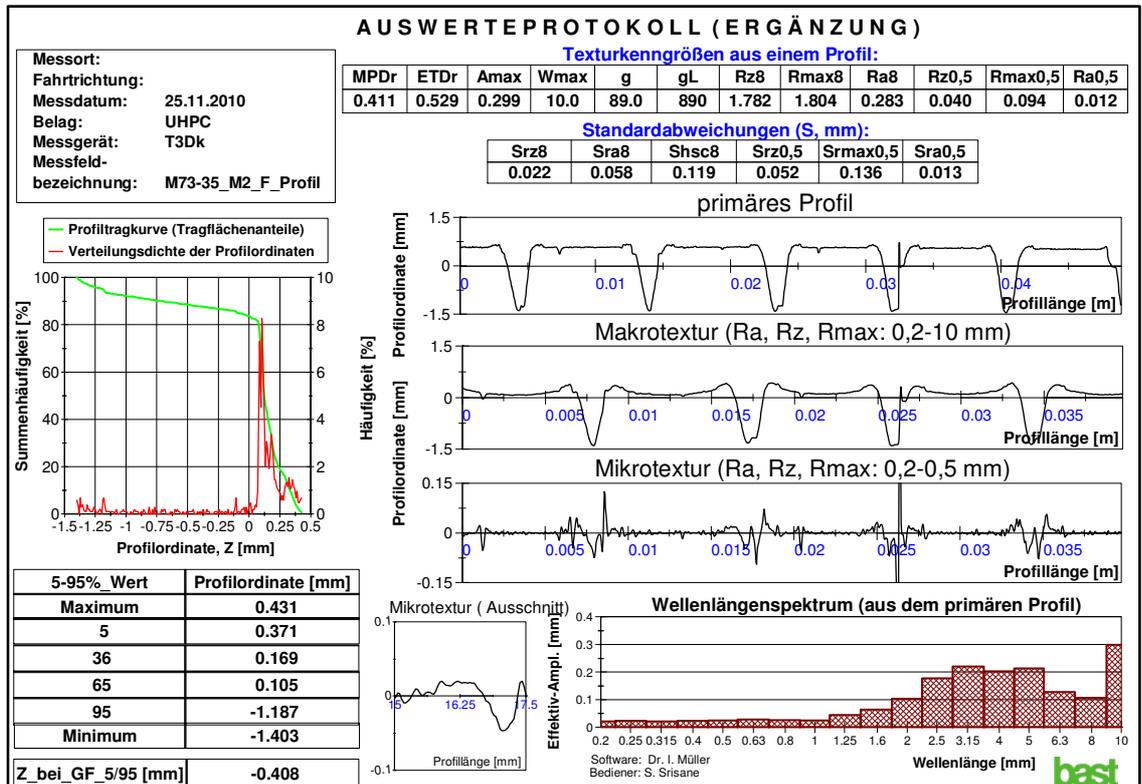
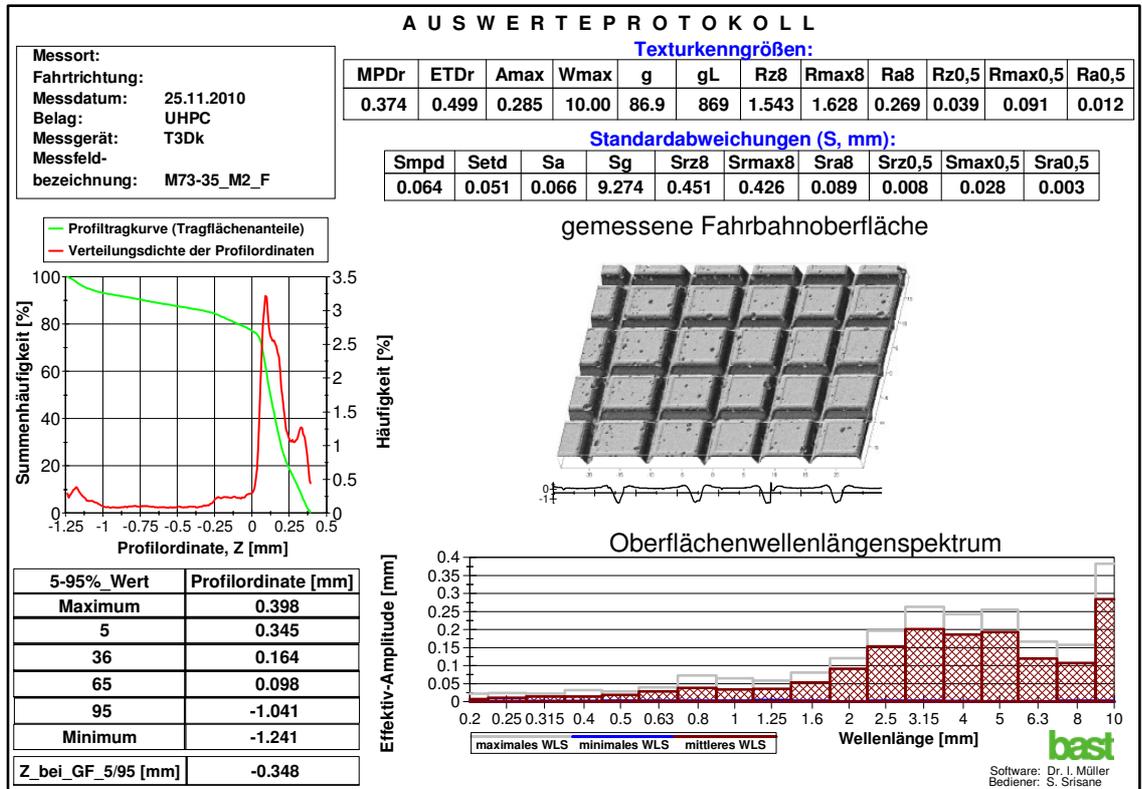
Anhang F: FWD-Messungen HPC-Versuchsstrecke
„PWC Löwenburg“

Anhang A - Messreihe 1:

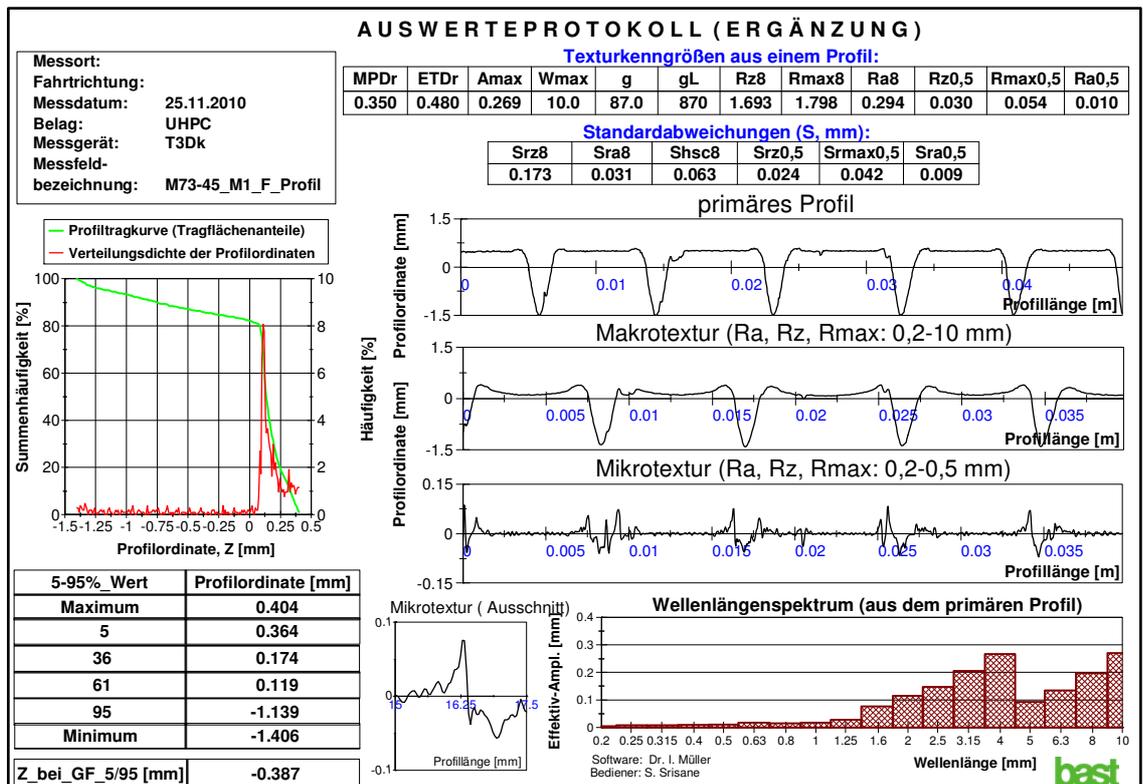
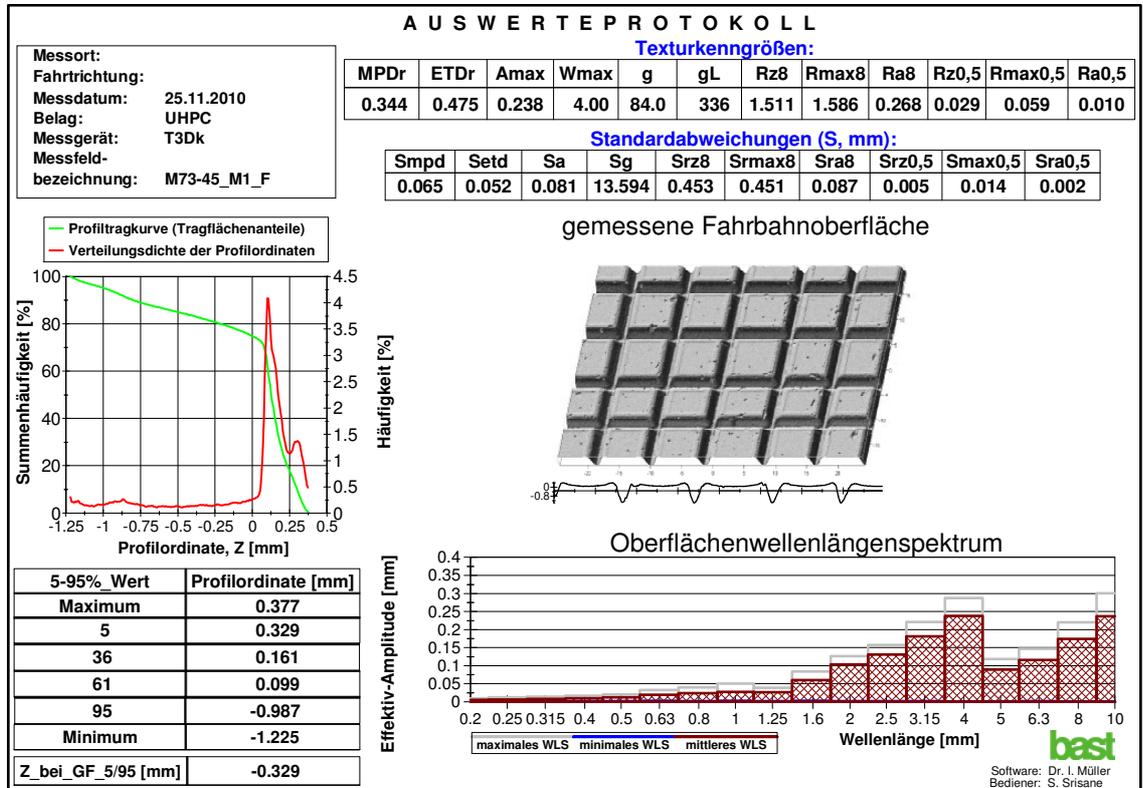
M73-35; Nullmessung; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren



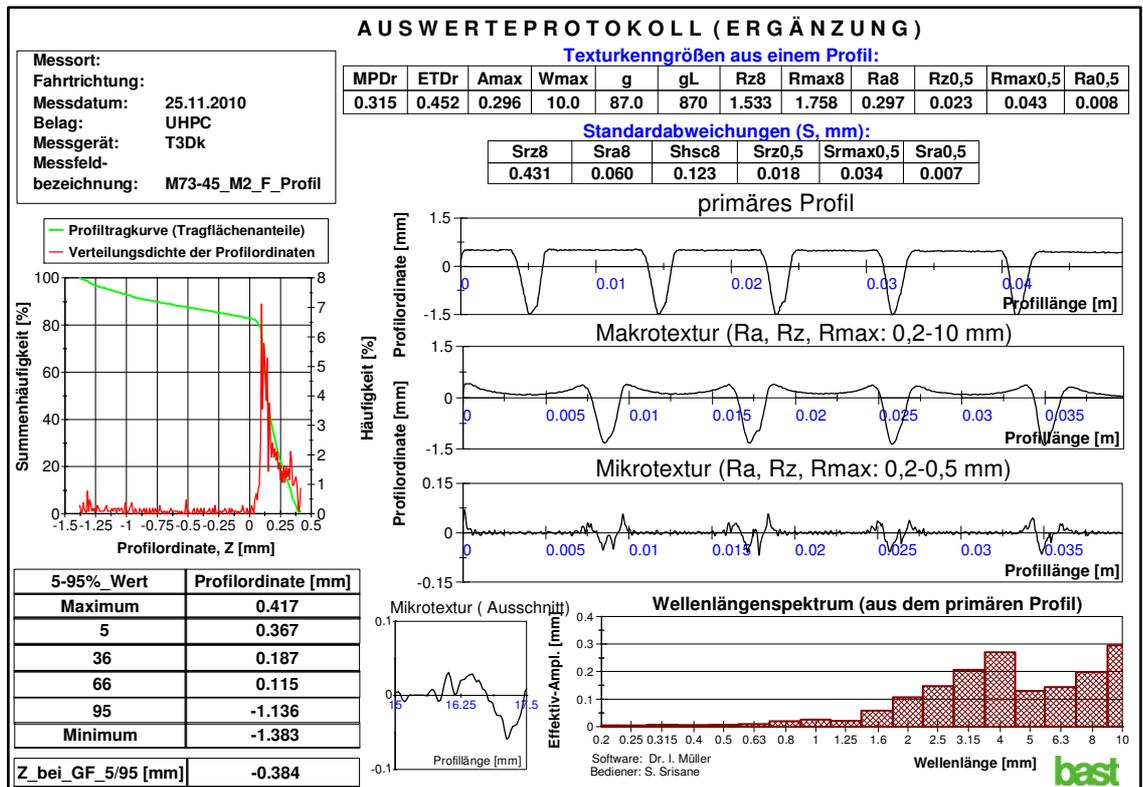
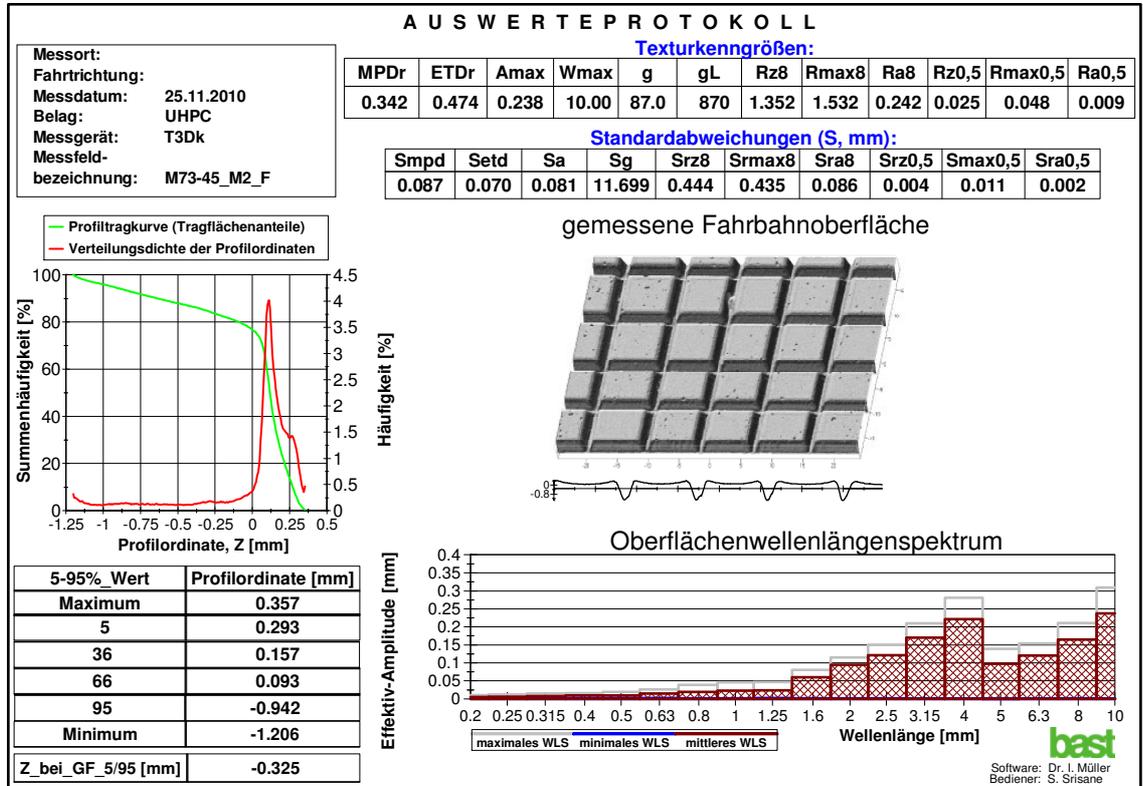
M73-35; Nullmessung; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren



M73-45; Nullmessung; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren

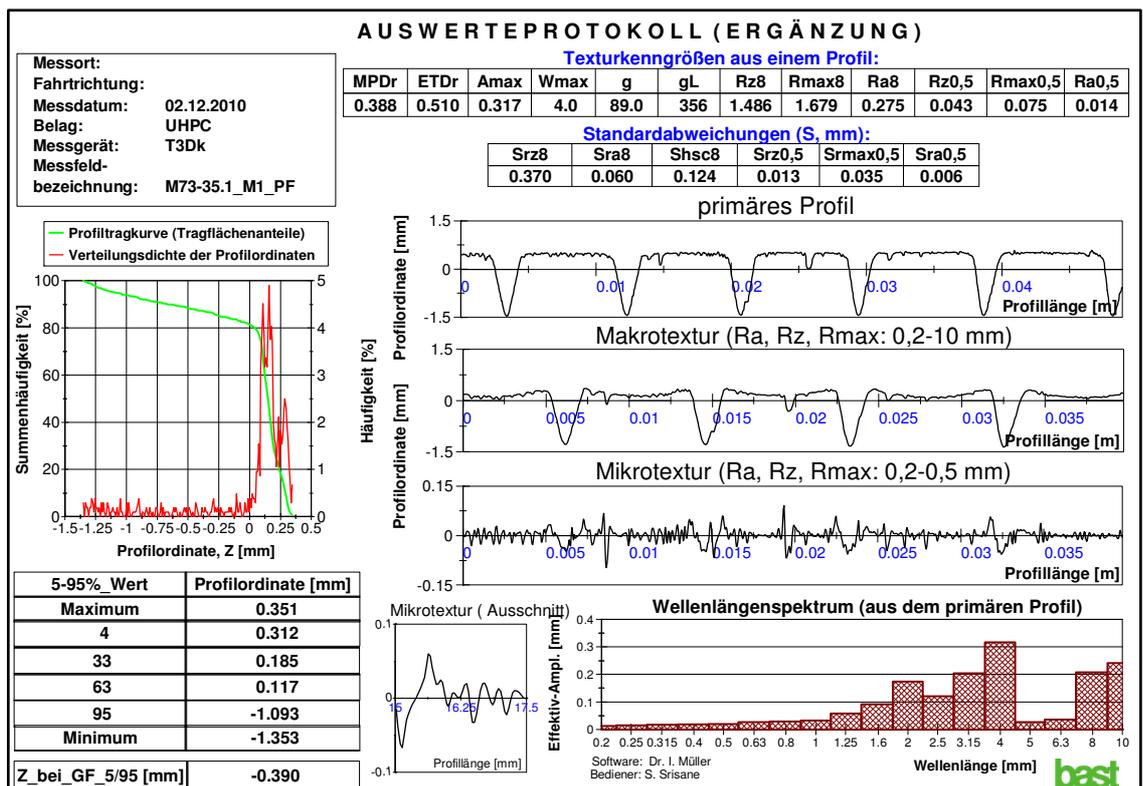
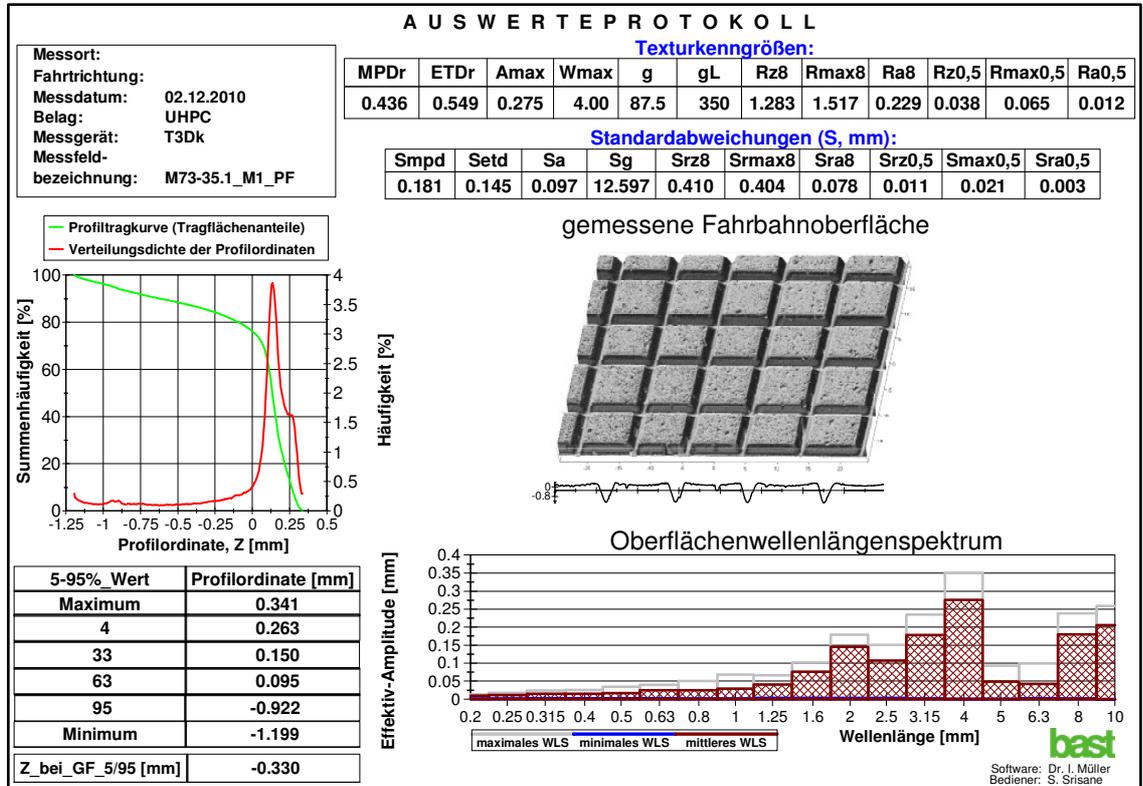


M73-45; Nullmessung; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren

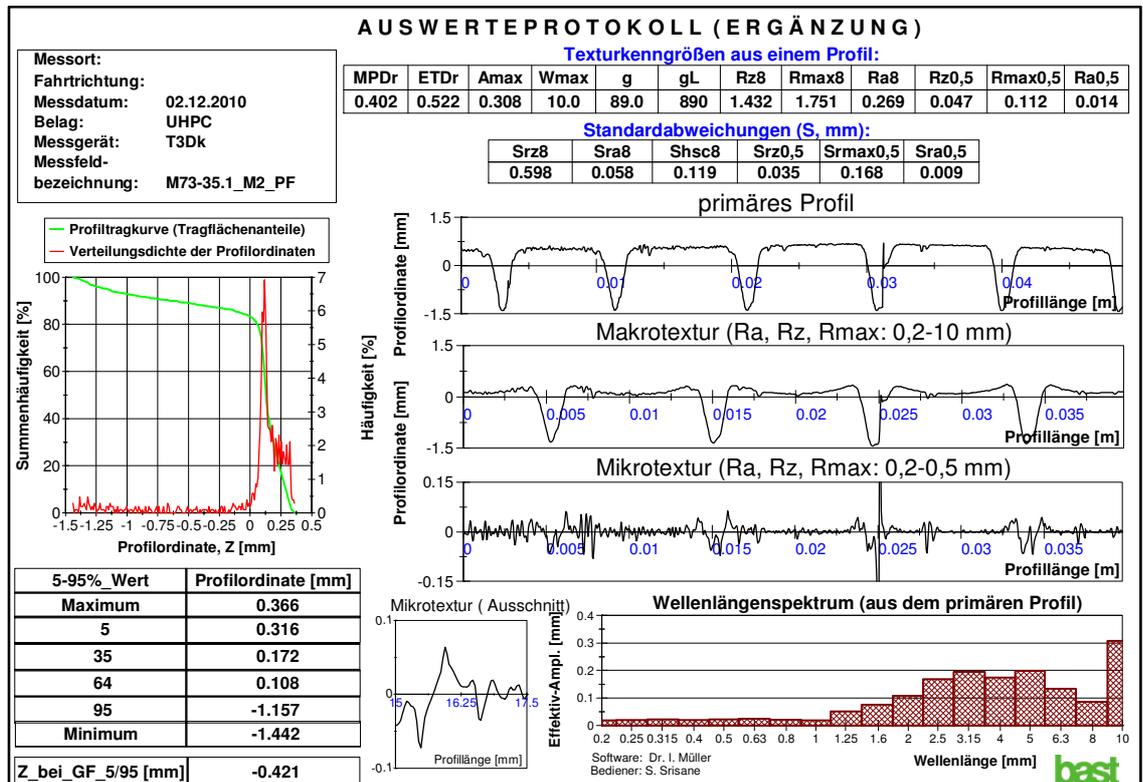
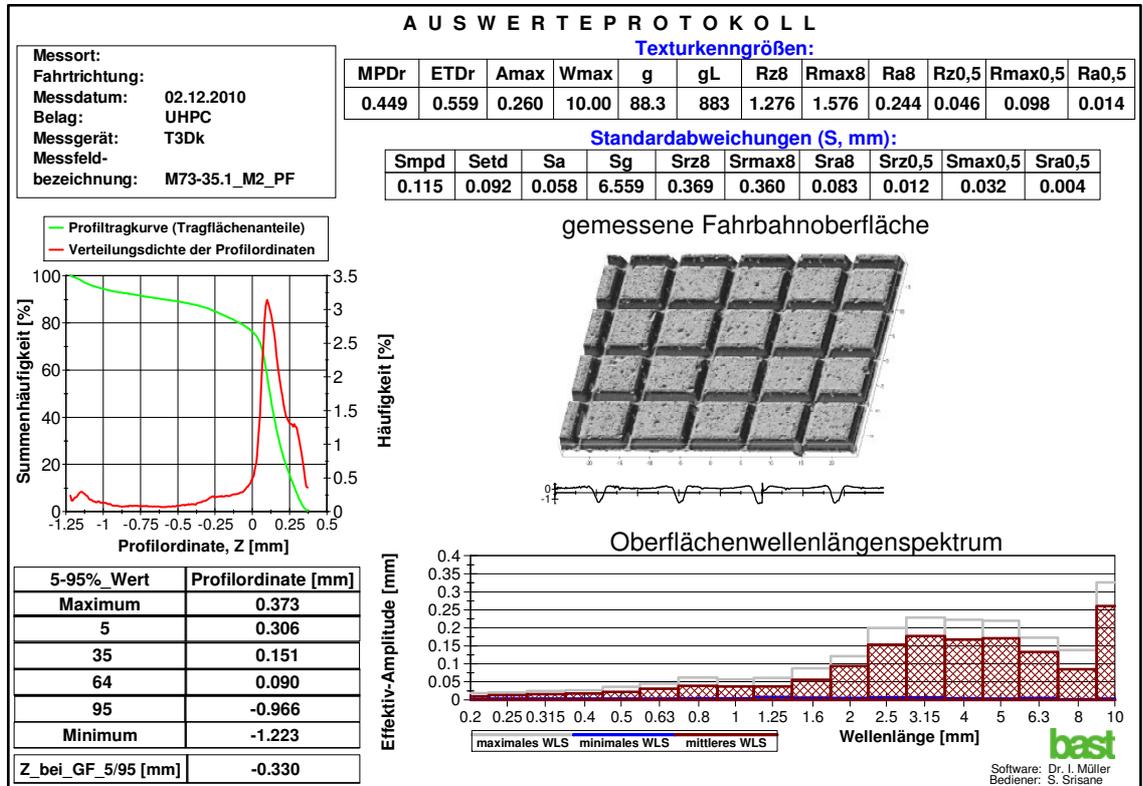


Anhang A - Messreihe 2:

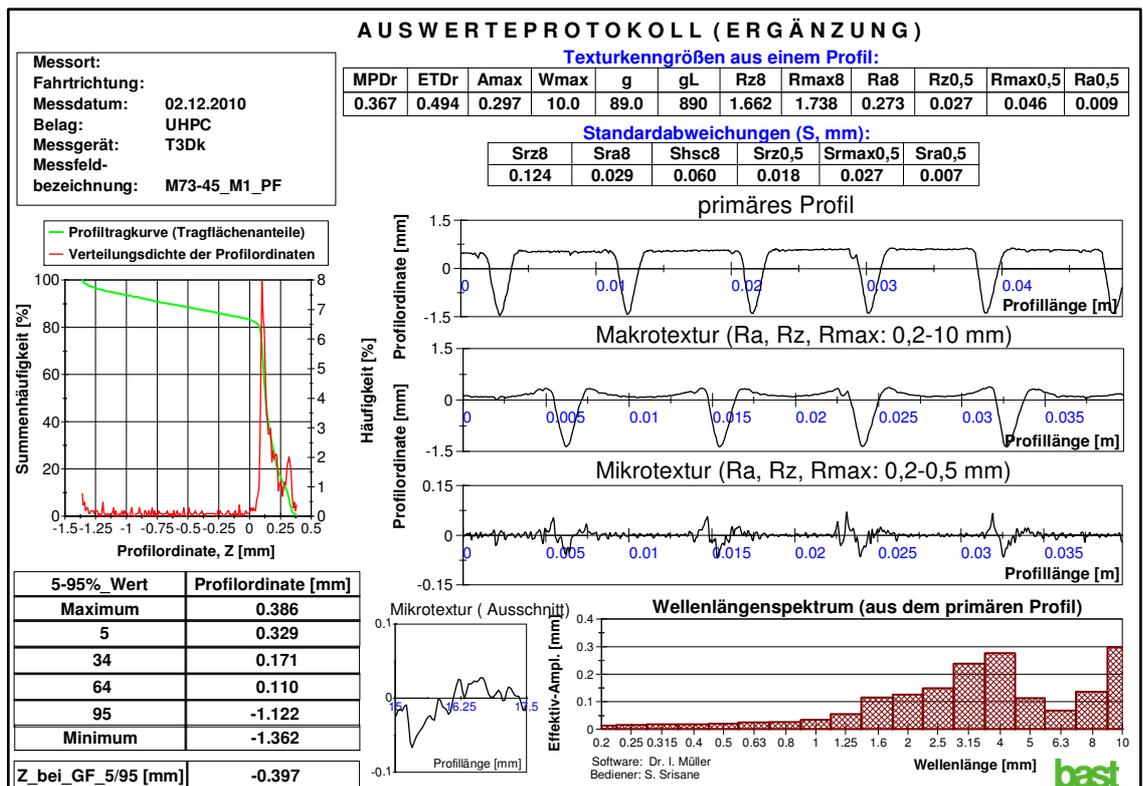
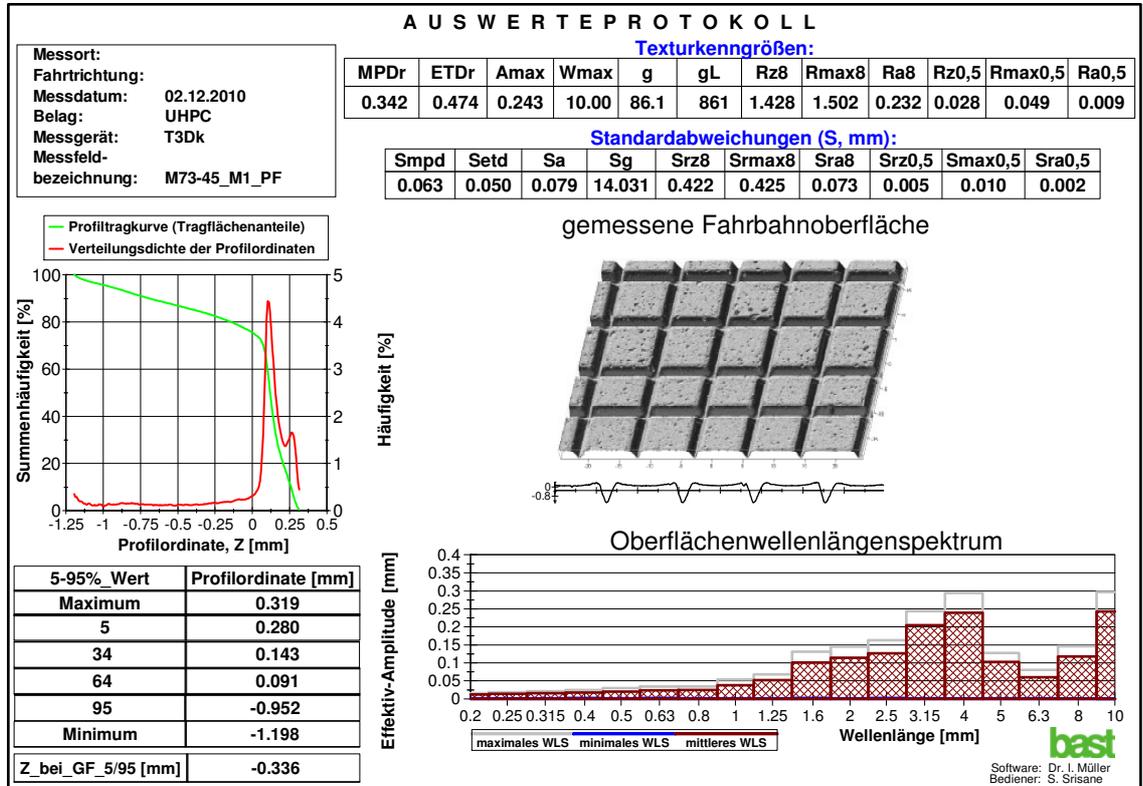
M73-35; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren



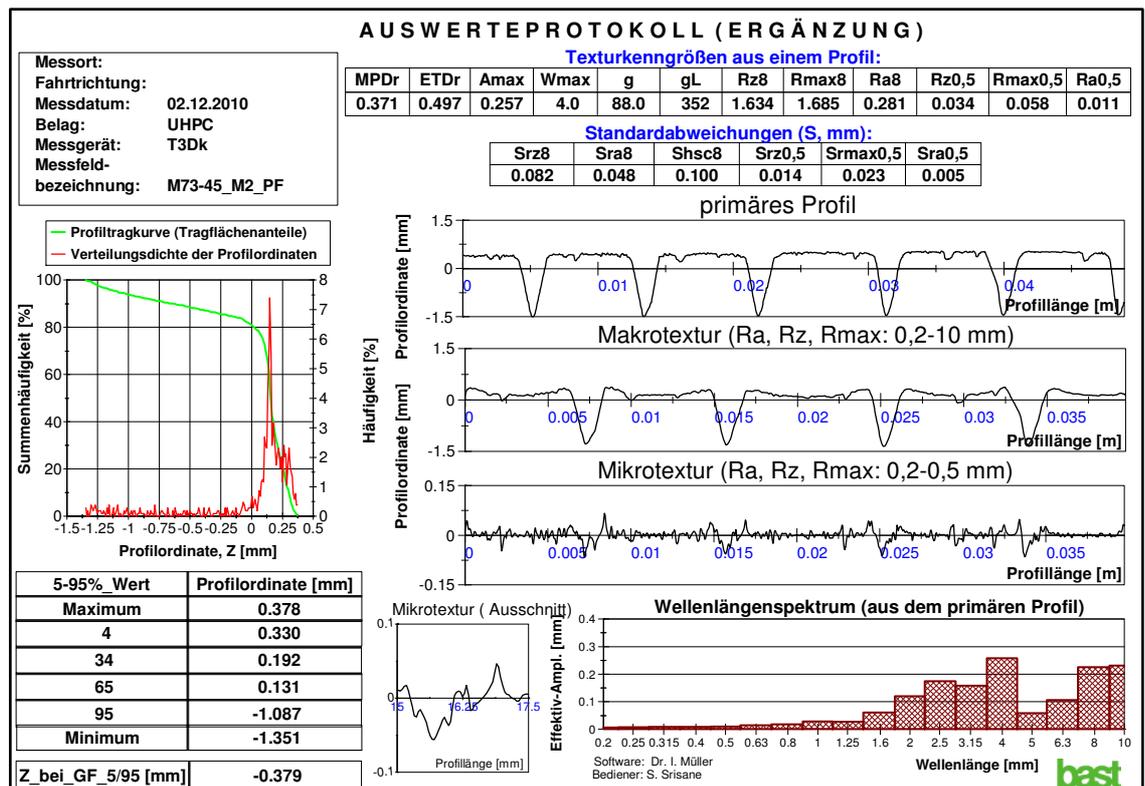
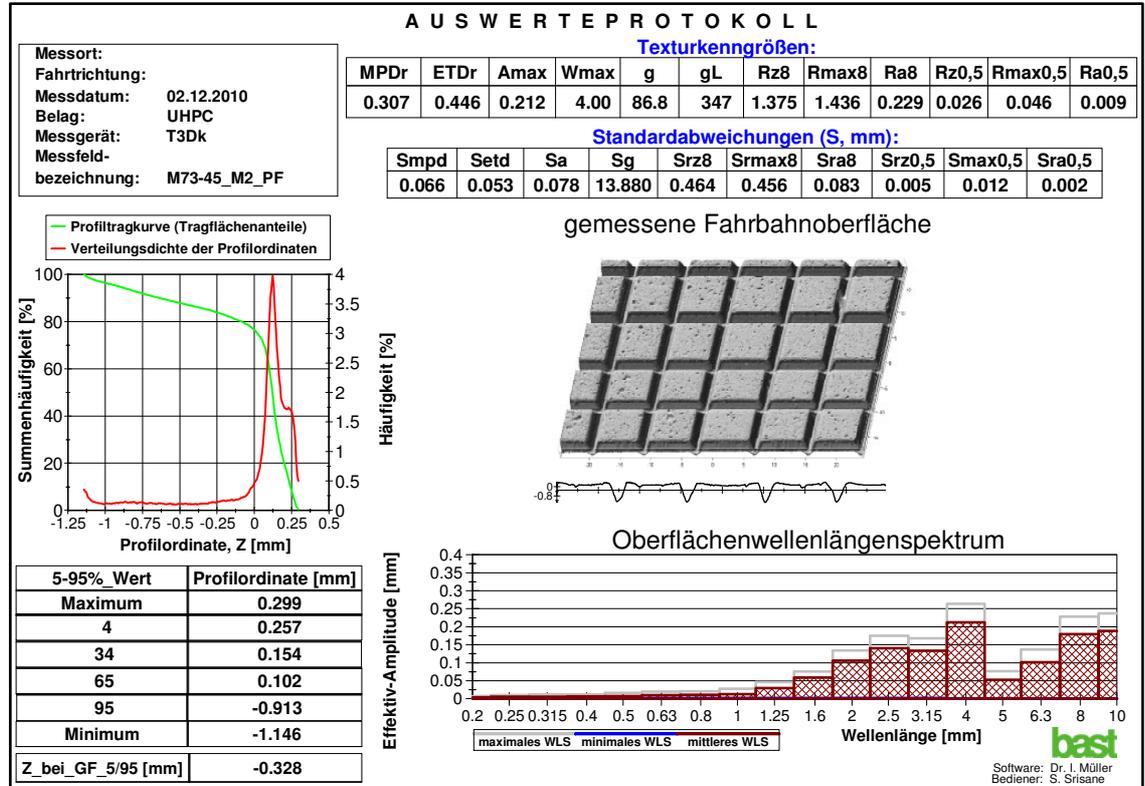
M73-35; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren



M73-45; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren

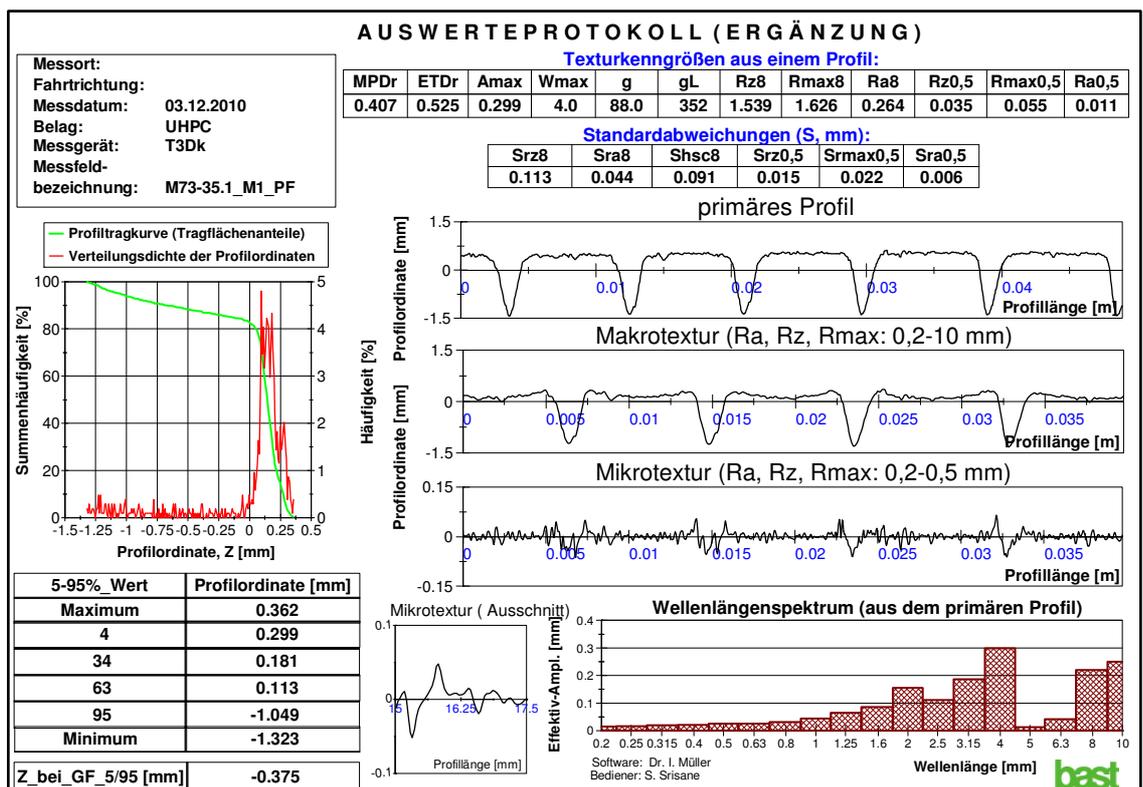
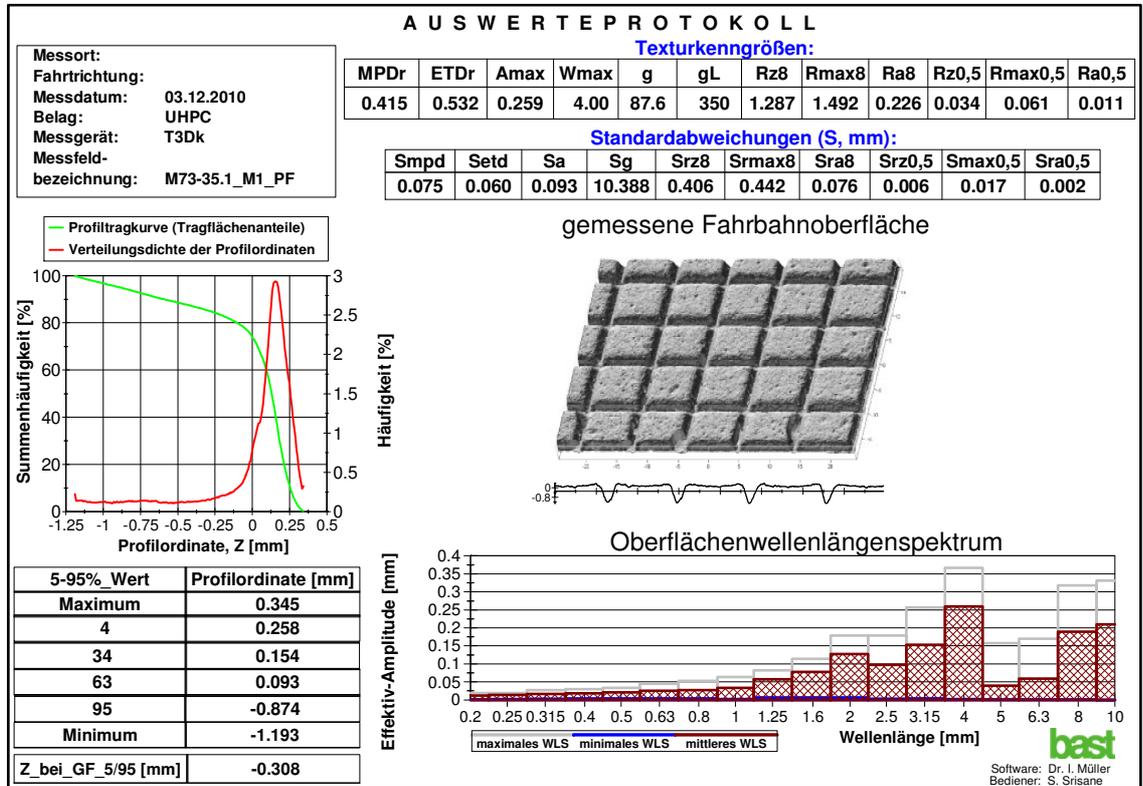


M73-45; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren

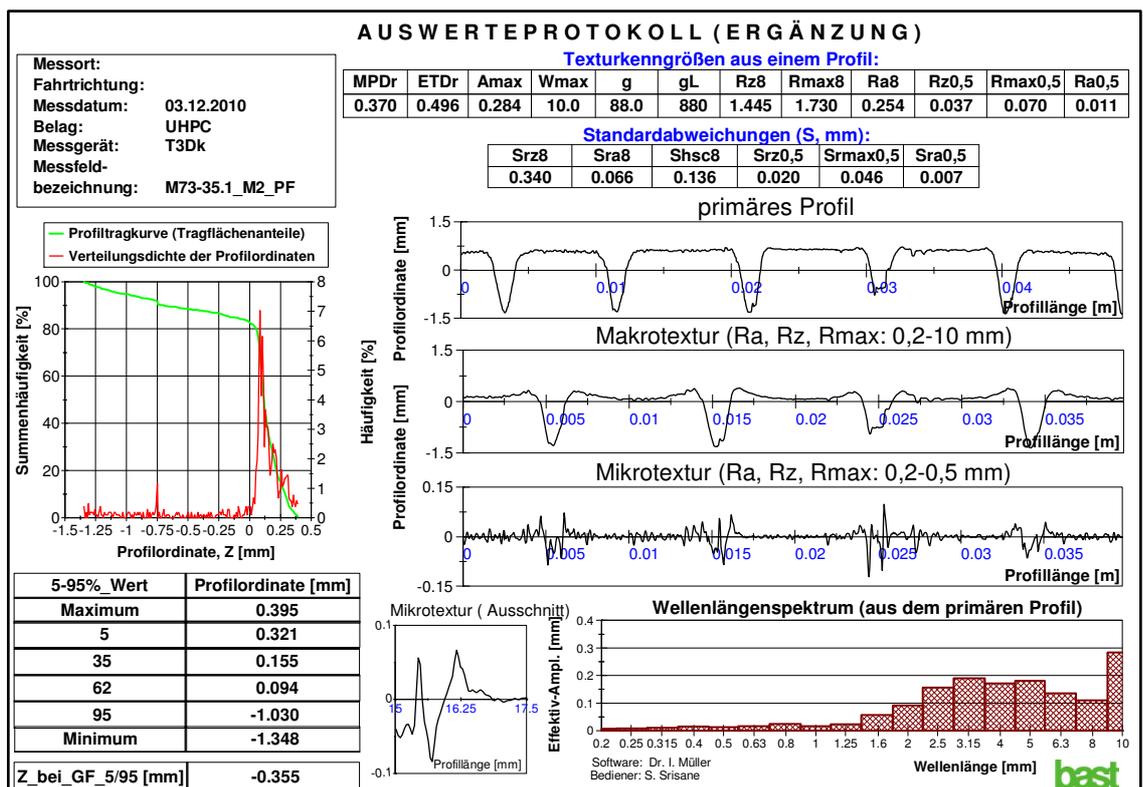
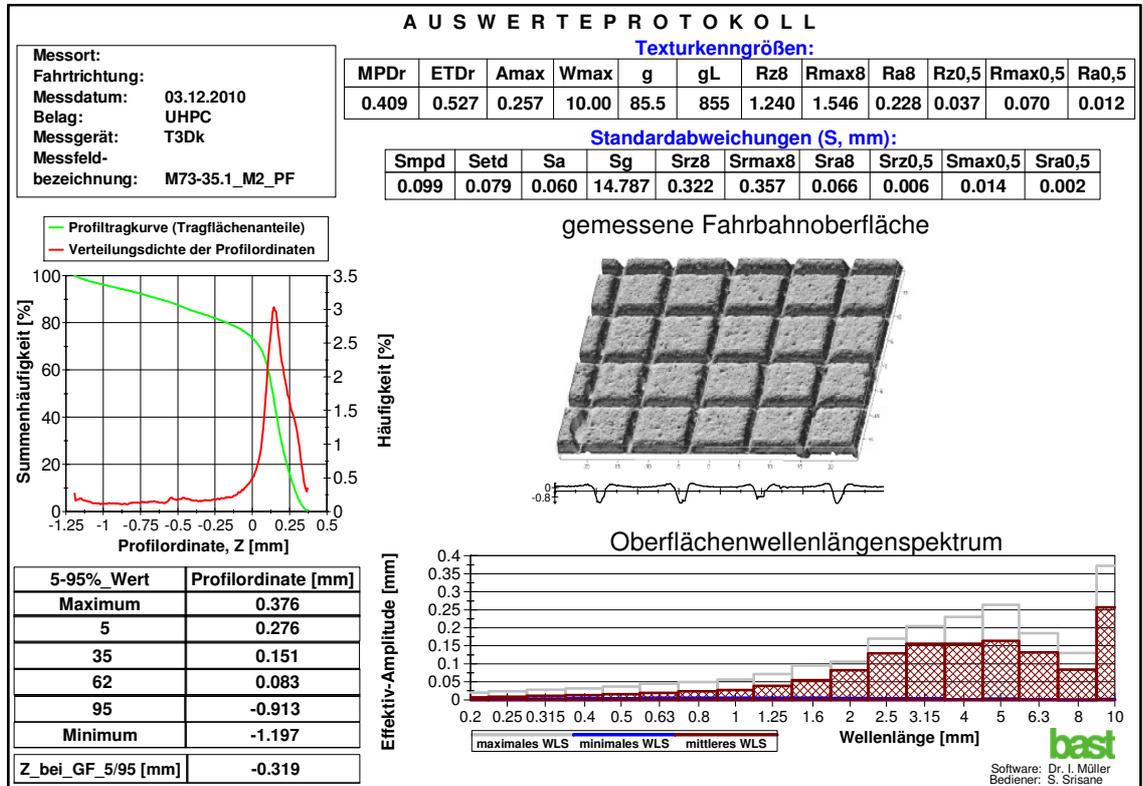


Anhang A - Messreihe 3:

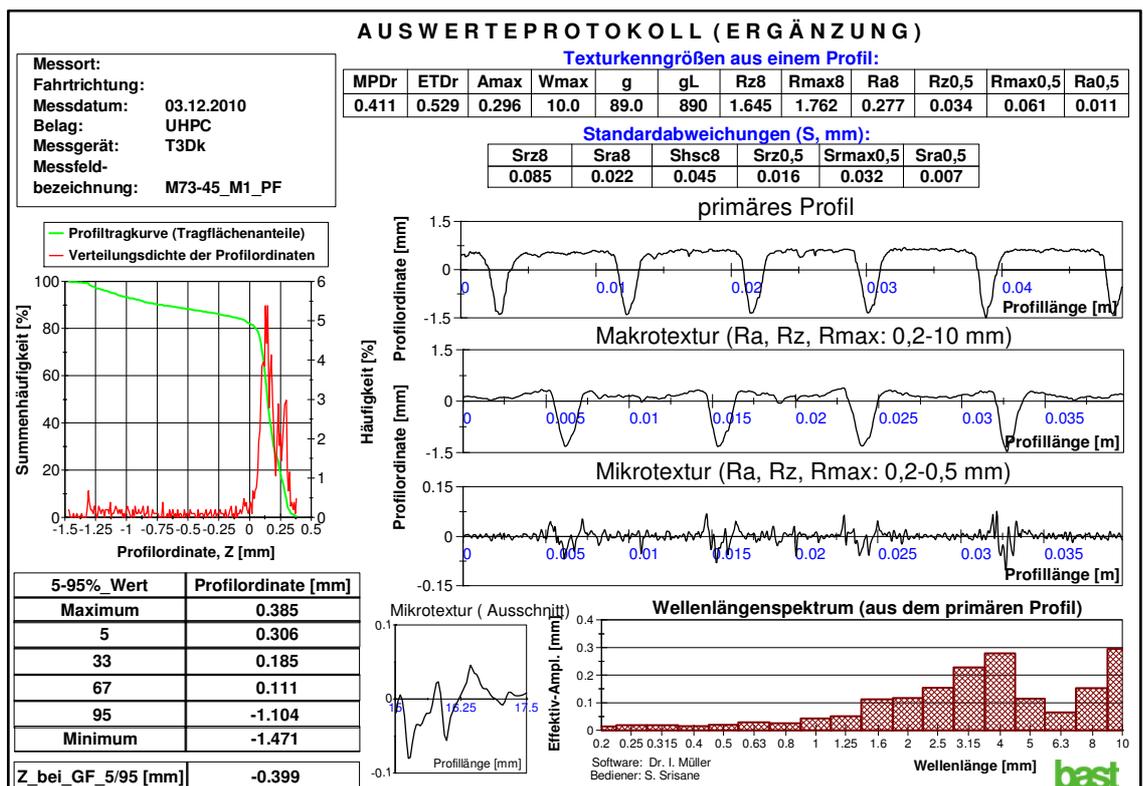
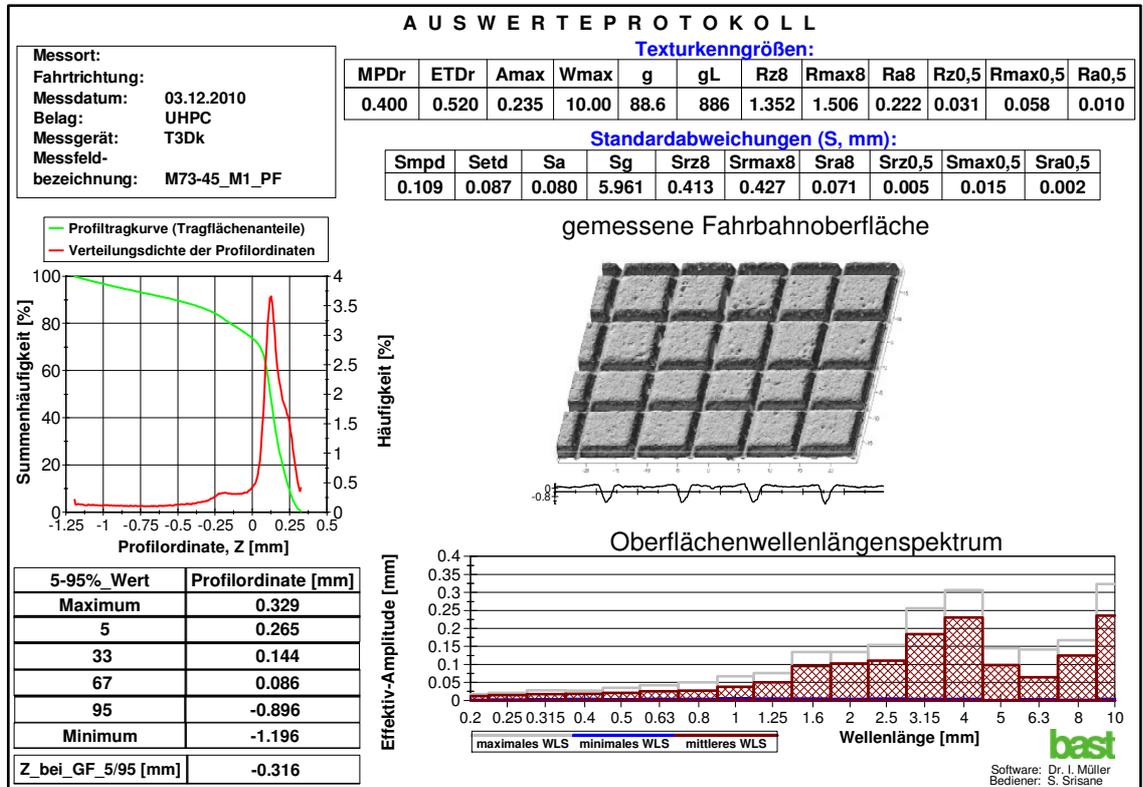
M73-35; 9 x 10⁴ Überr. + Sandstrahlen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren



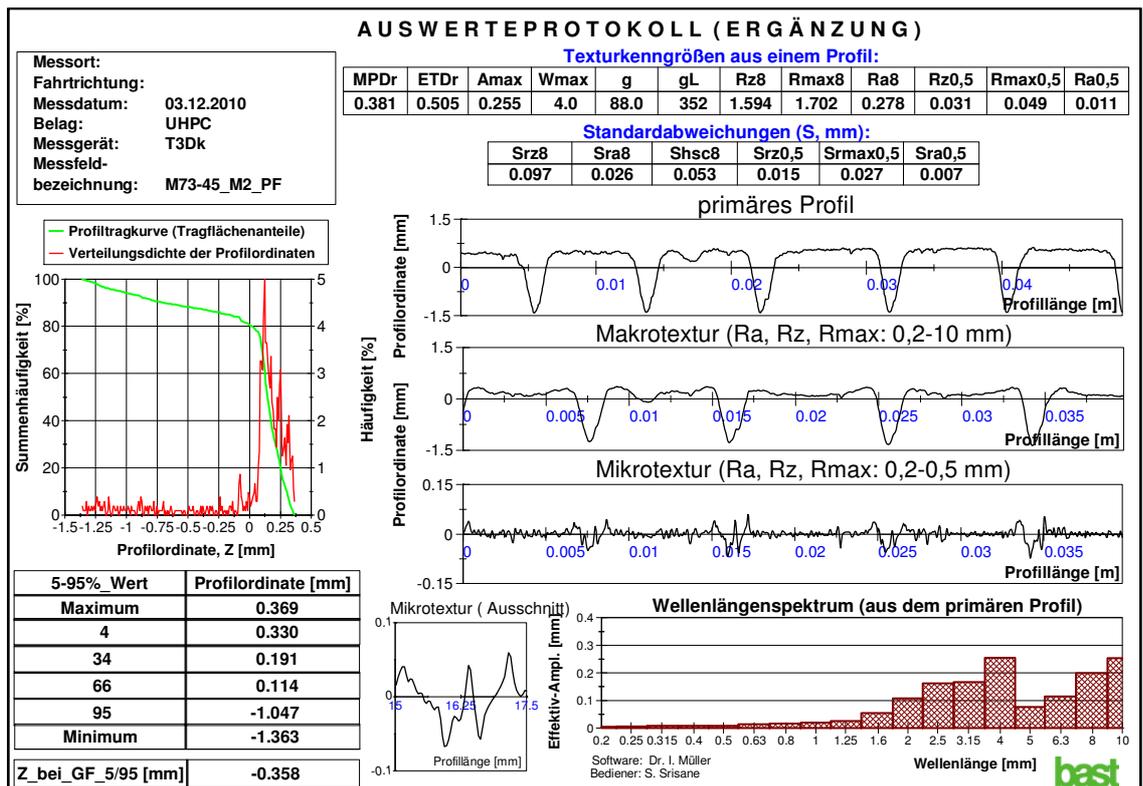
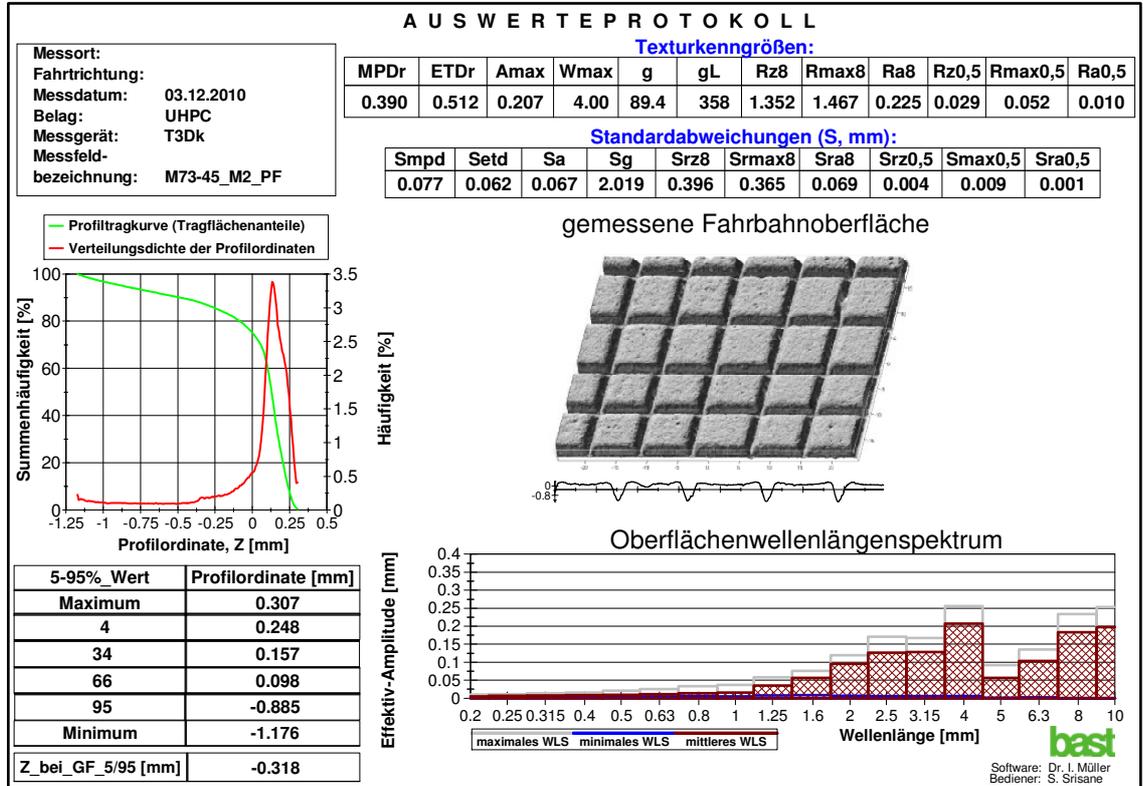
M73-35; 9 x 10⁴ Überr. + Sandstrahlen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren



M73-45; 9 x 10⁴ Überra. + Sandstrahlen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren

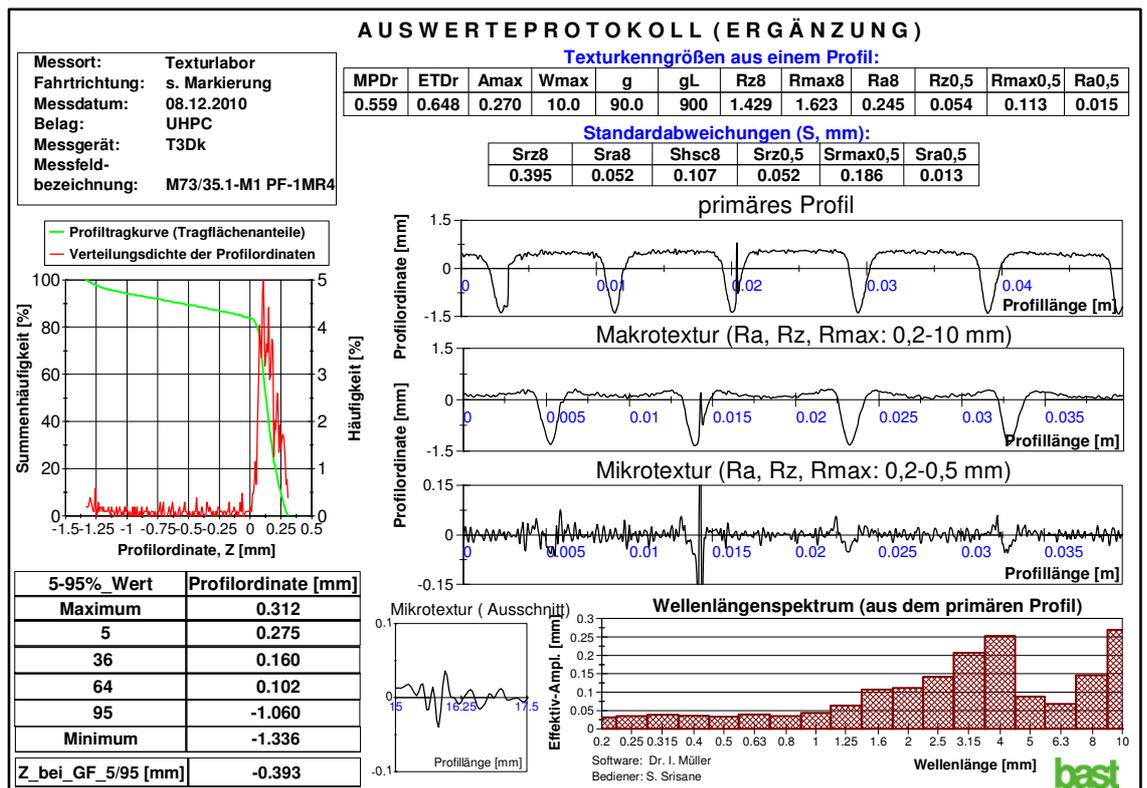
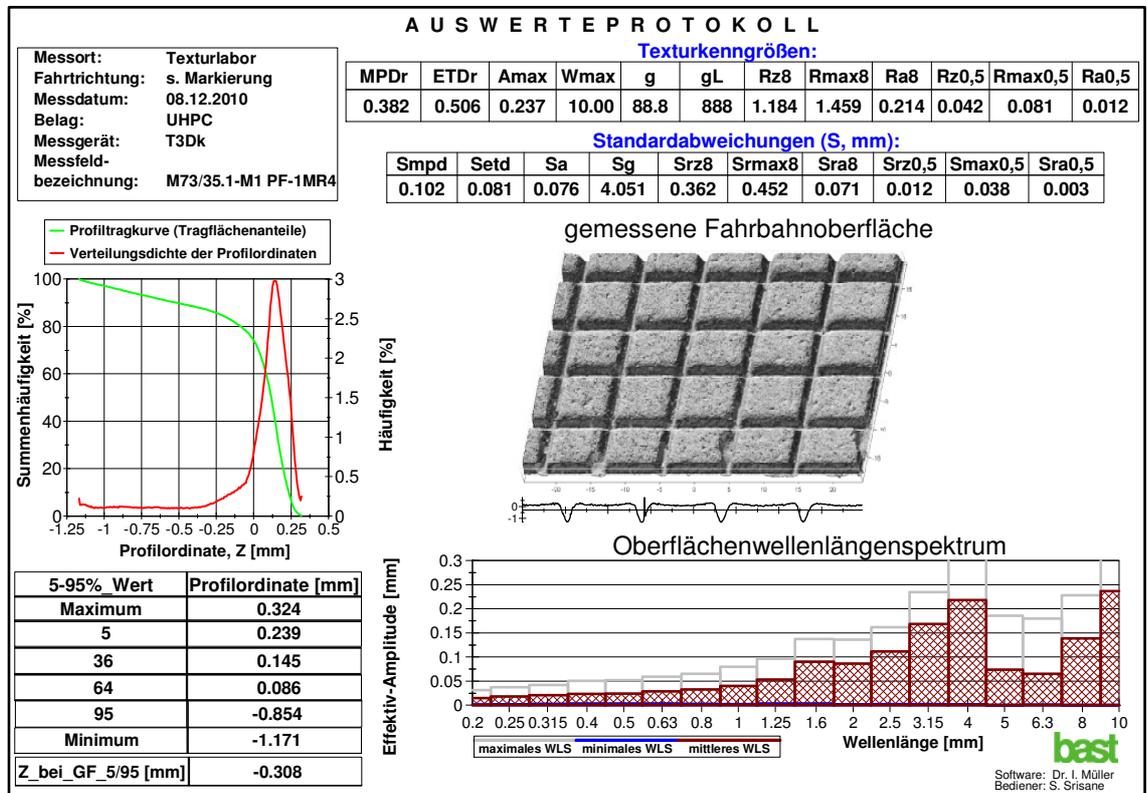


M73-45; 9 x 10⁴ Überr. + Sandstrahlen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren

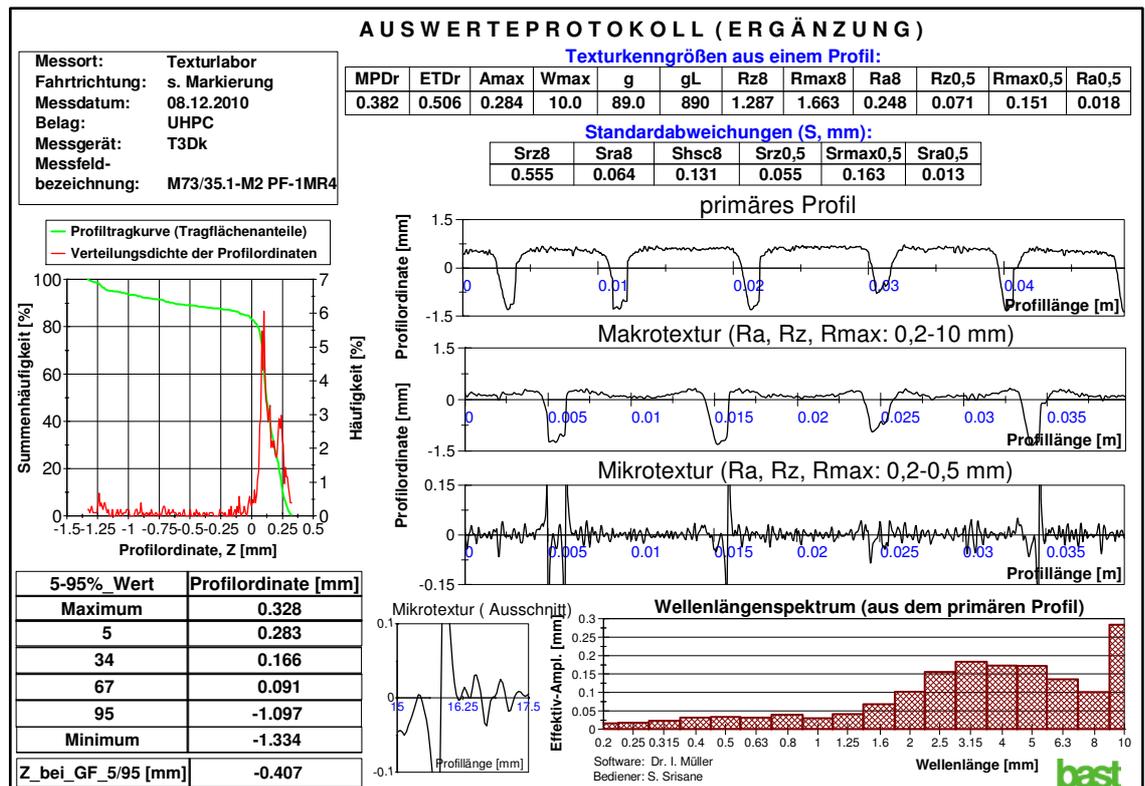
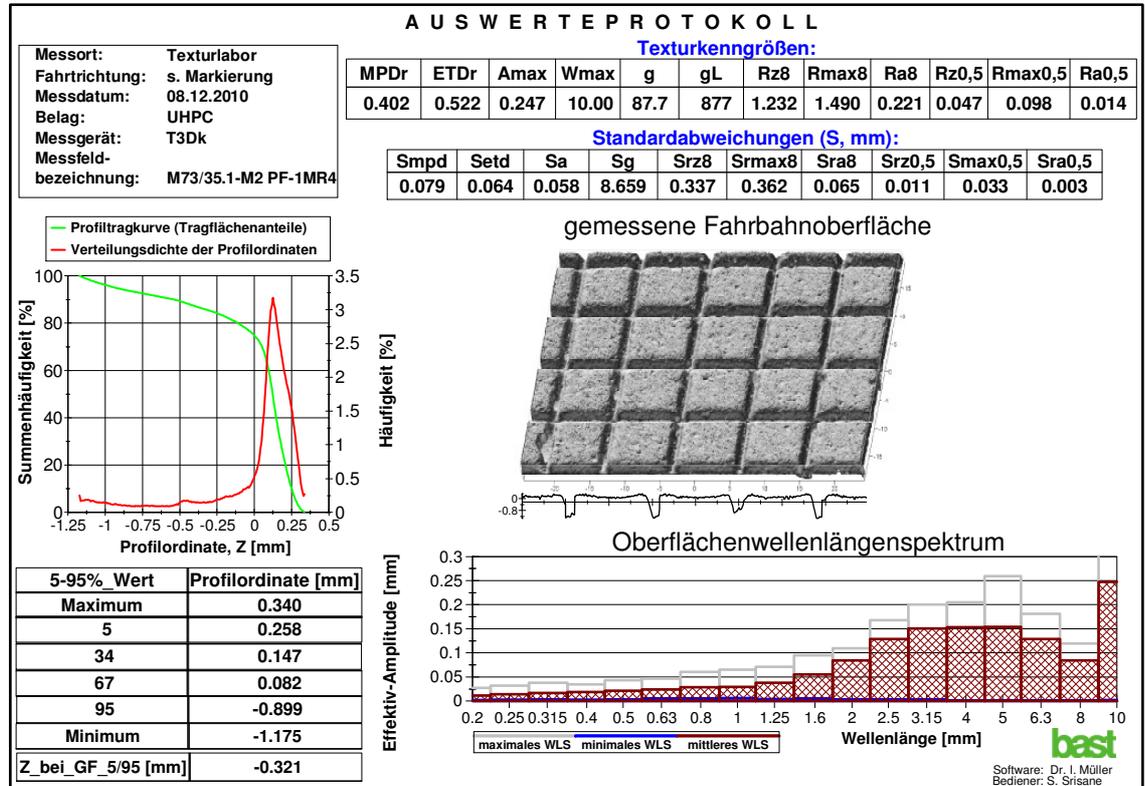


Anhang A - Messreihe 4:

M73-35; 18 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren

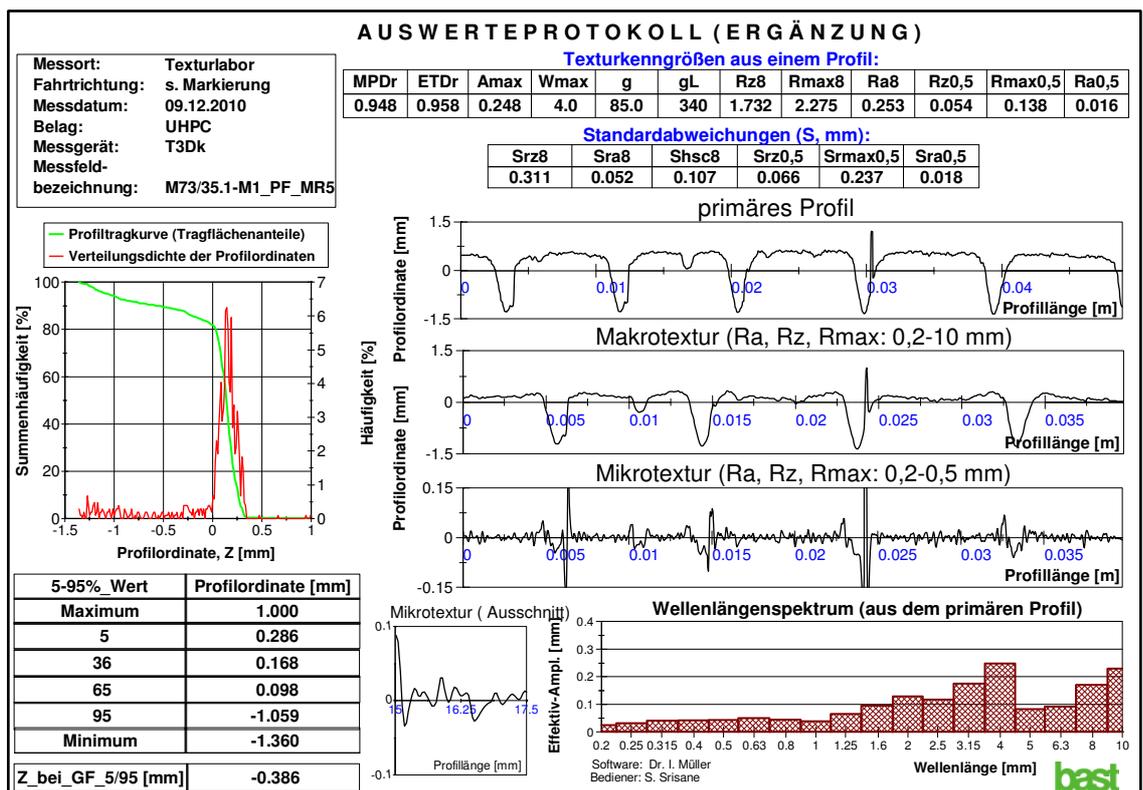
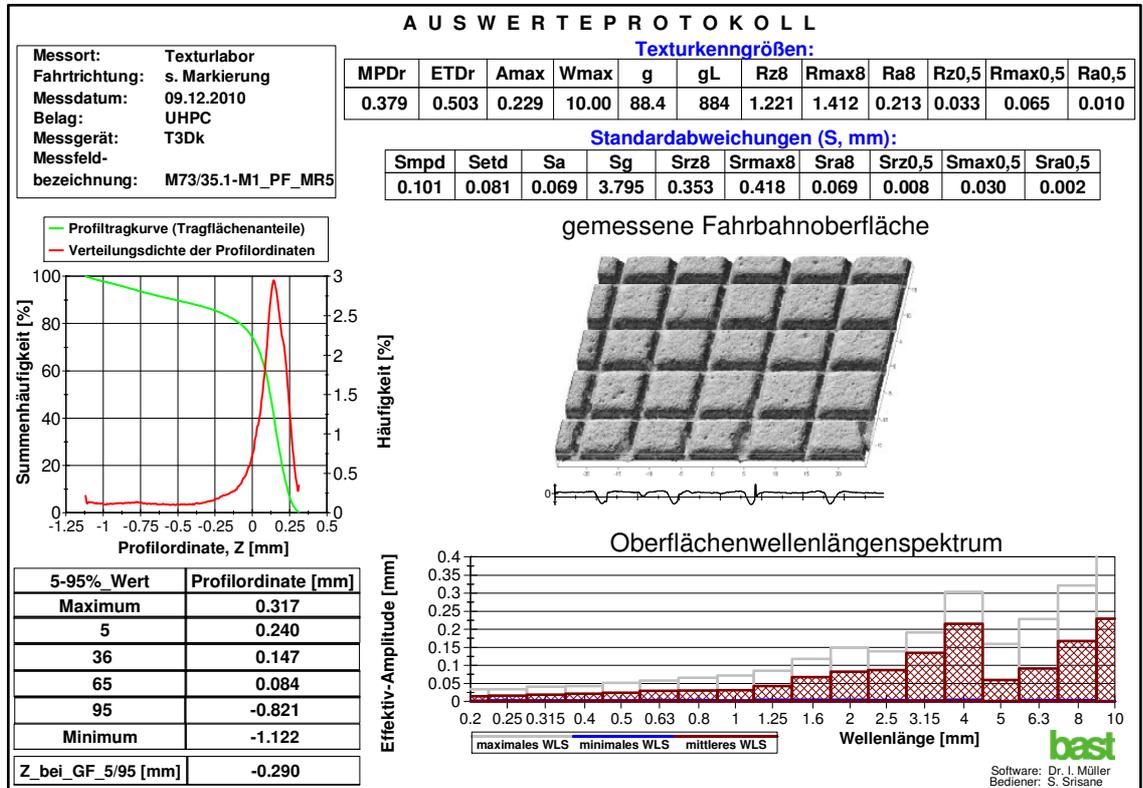


M73-35; 18 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren

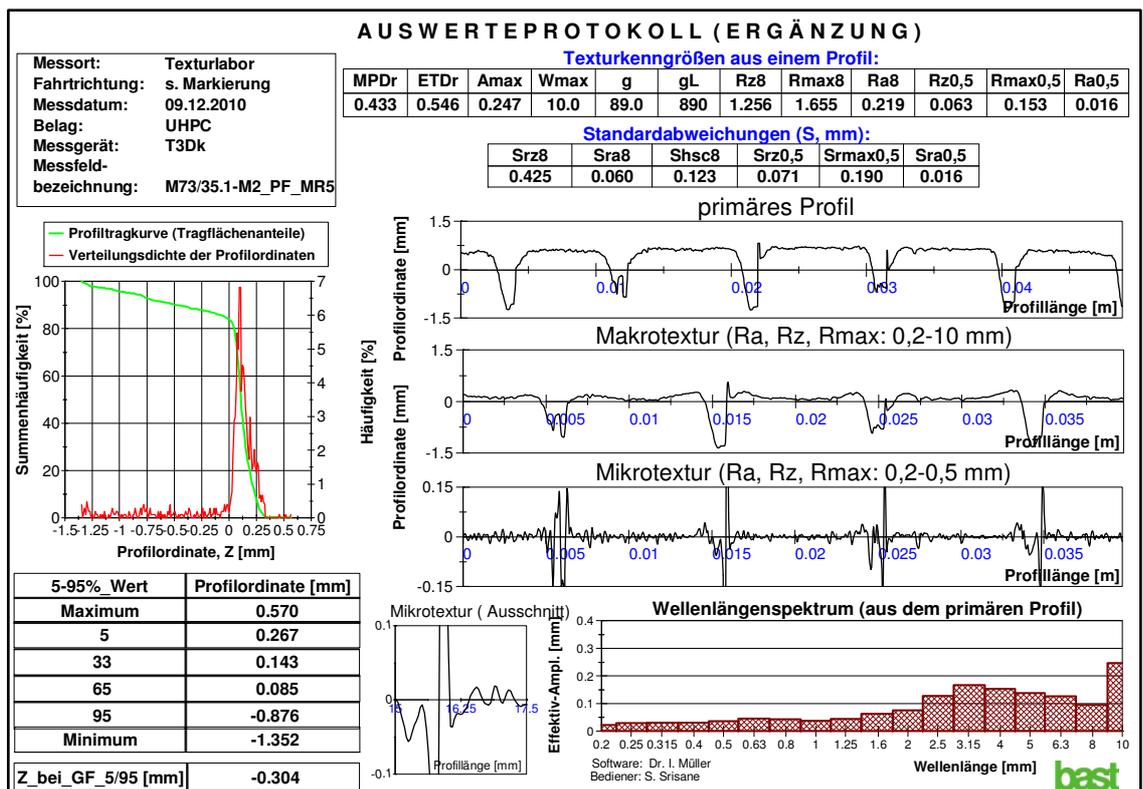
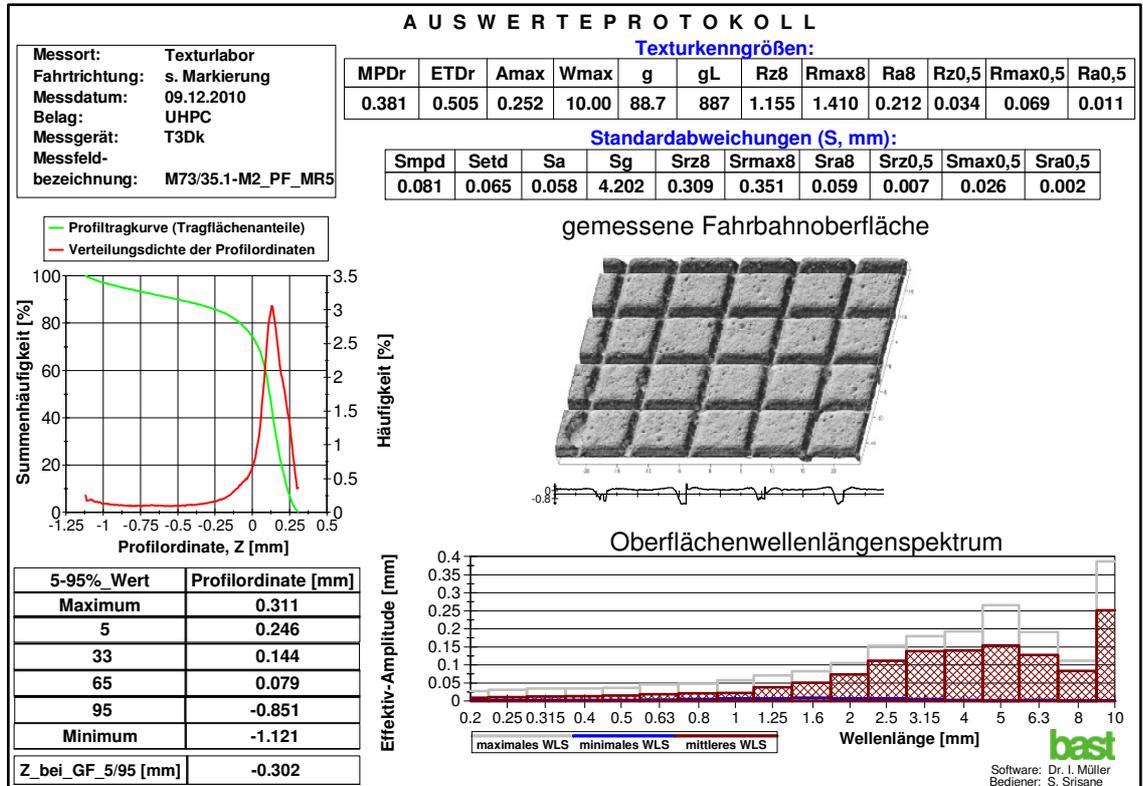


Anhang A - Messreihe 5:

M73-35; 27 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; Prägung durch Aufbetonieren

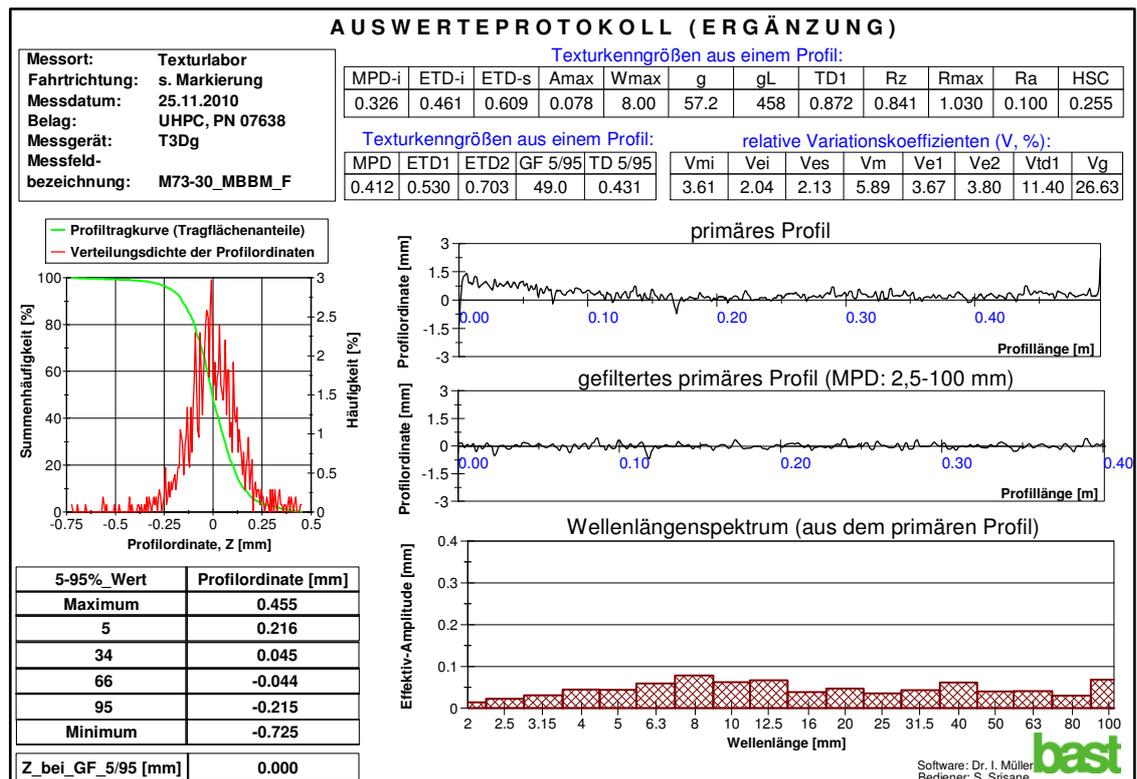
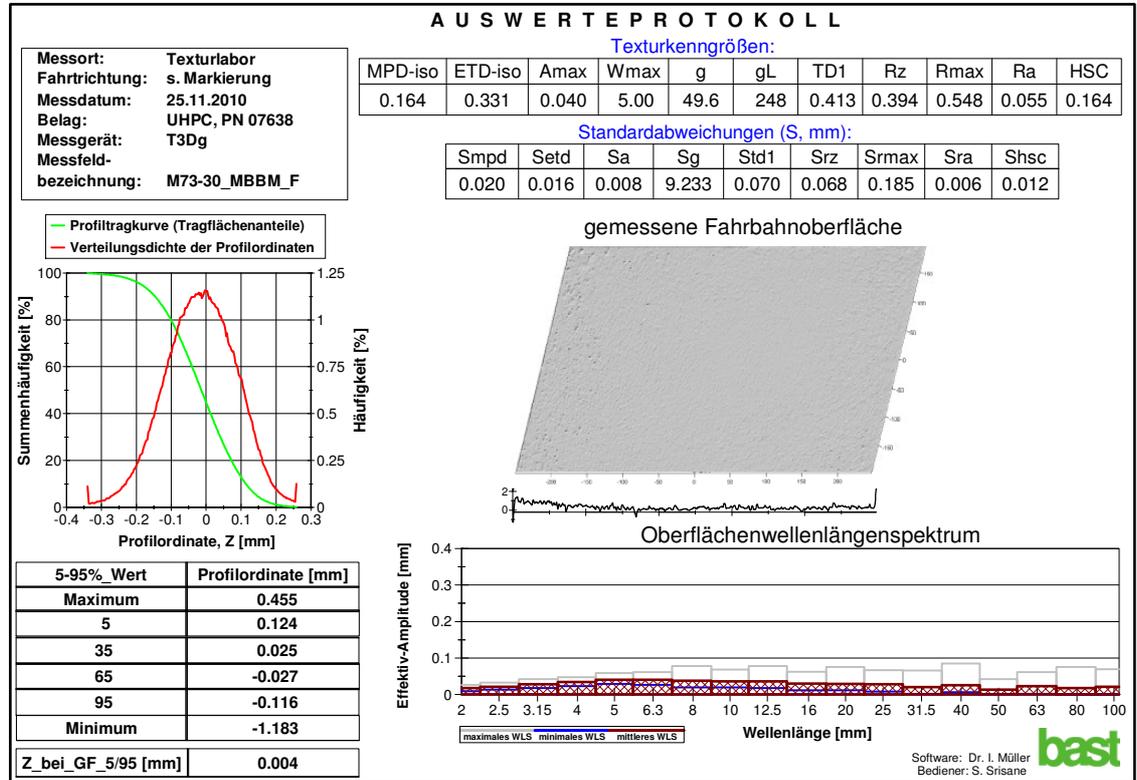


M73-35; 27 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; Prägung durch Aufbetonieren

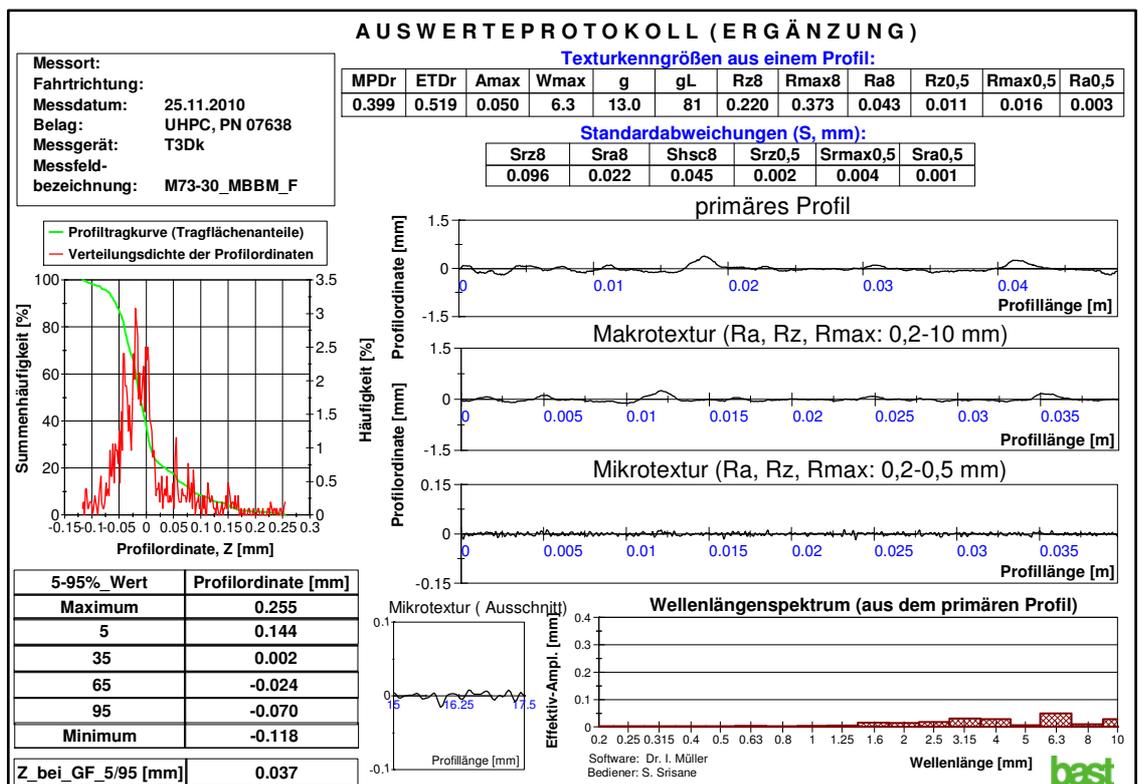
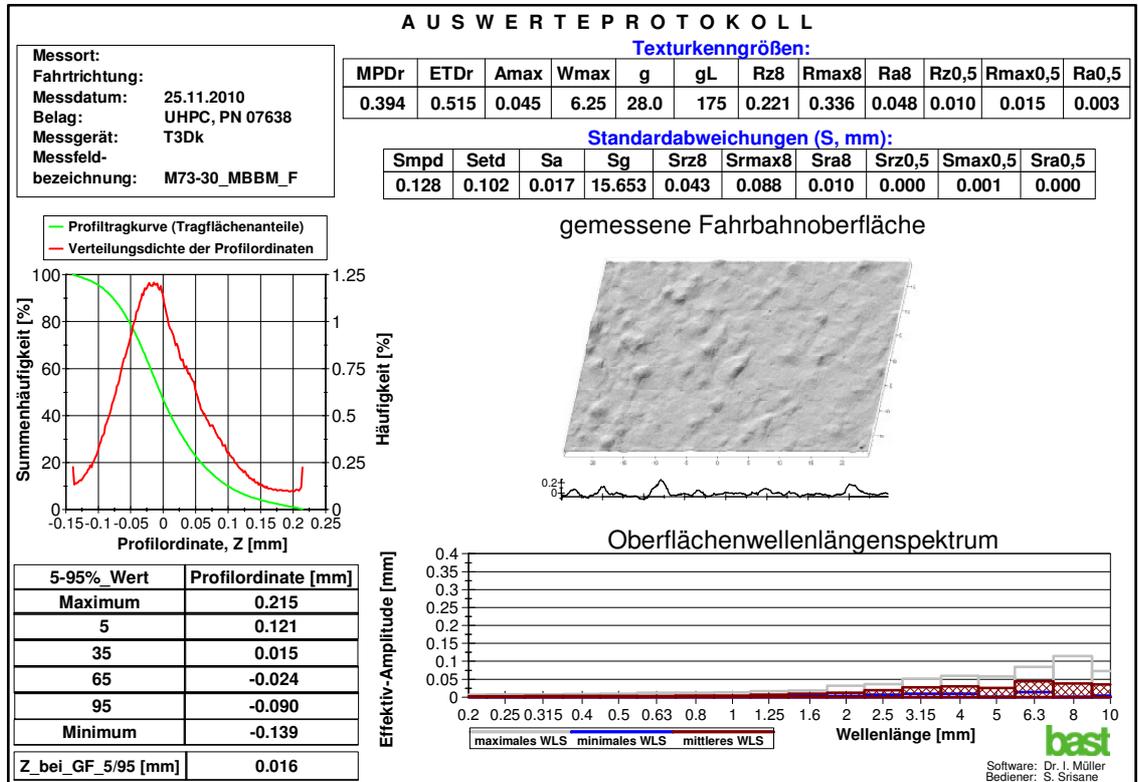


Anhang A – Messreihe 1:

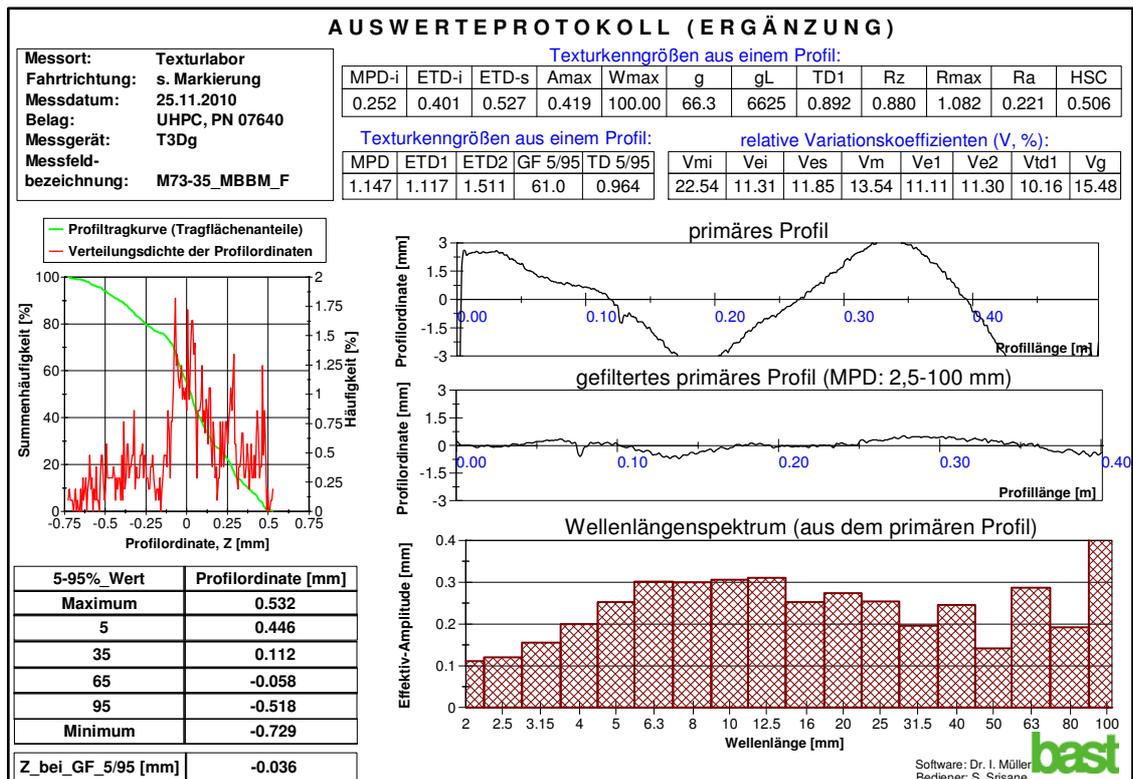
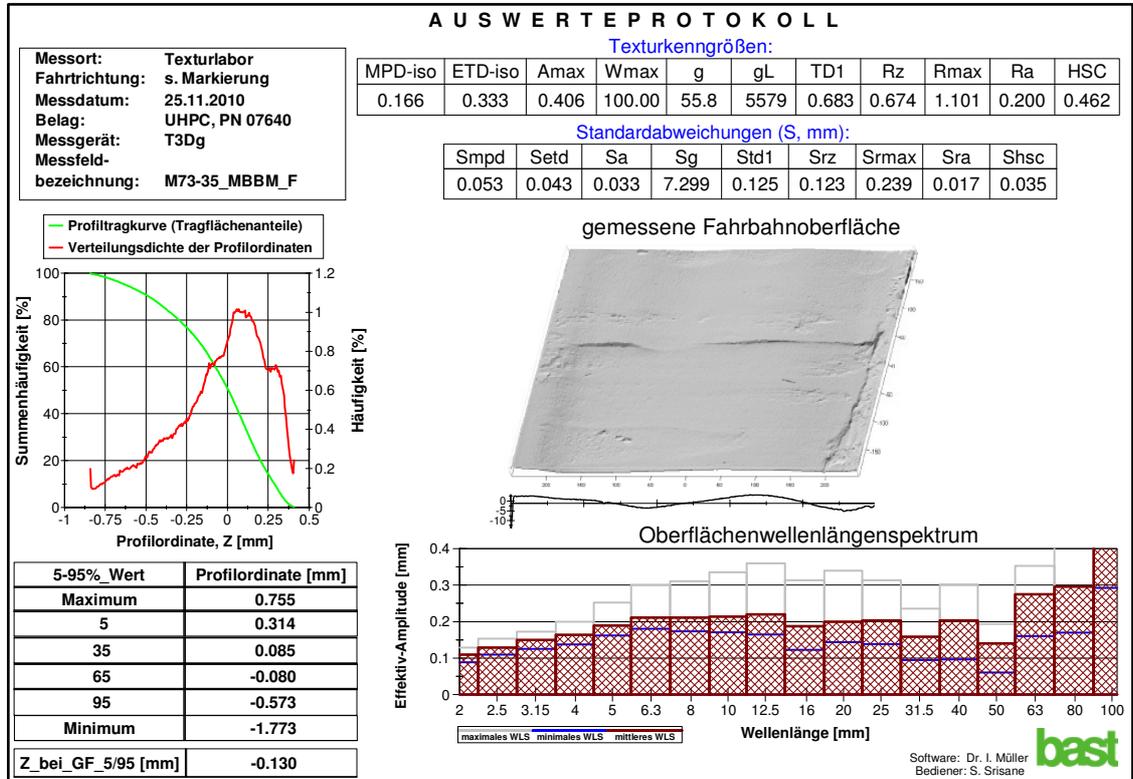
Probplatte M73-30 (ungeprägt); großes Messfeld (T3Dg)



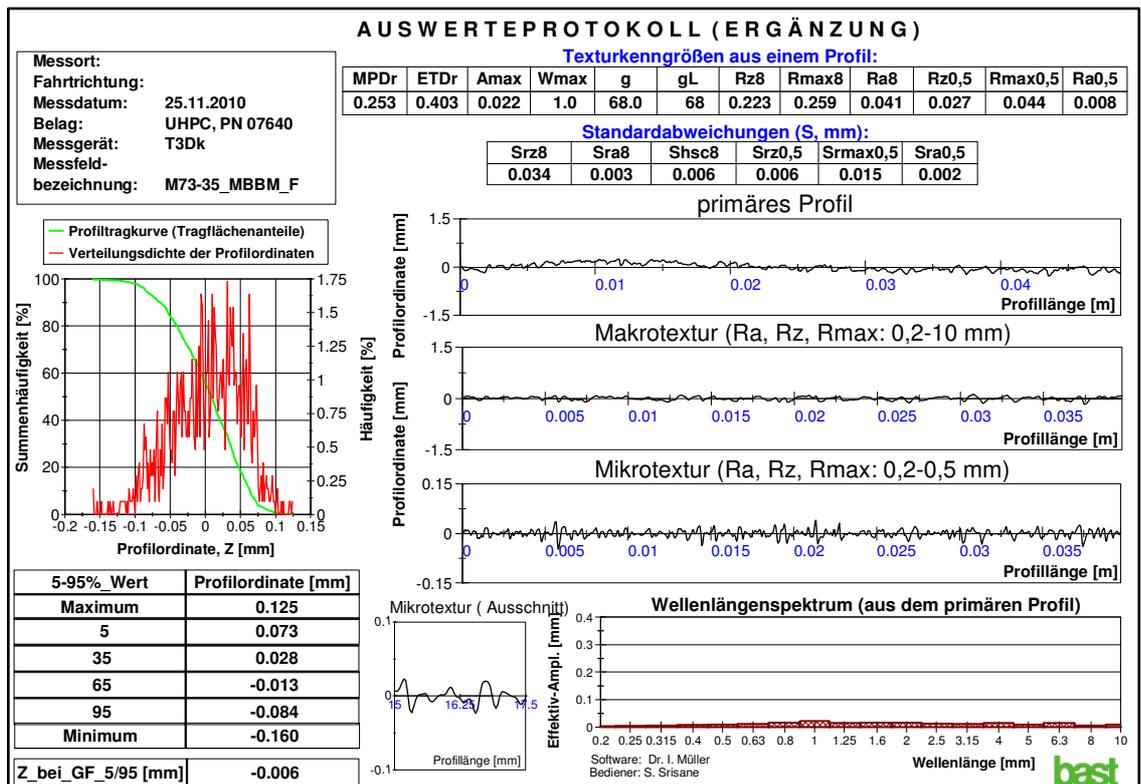
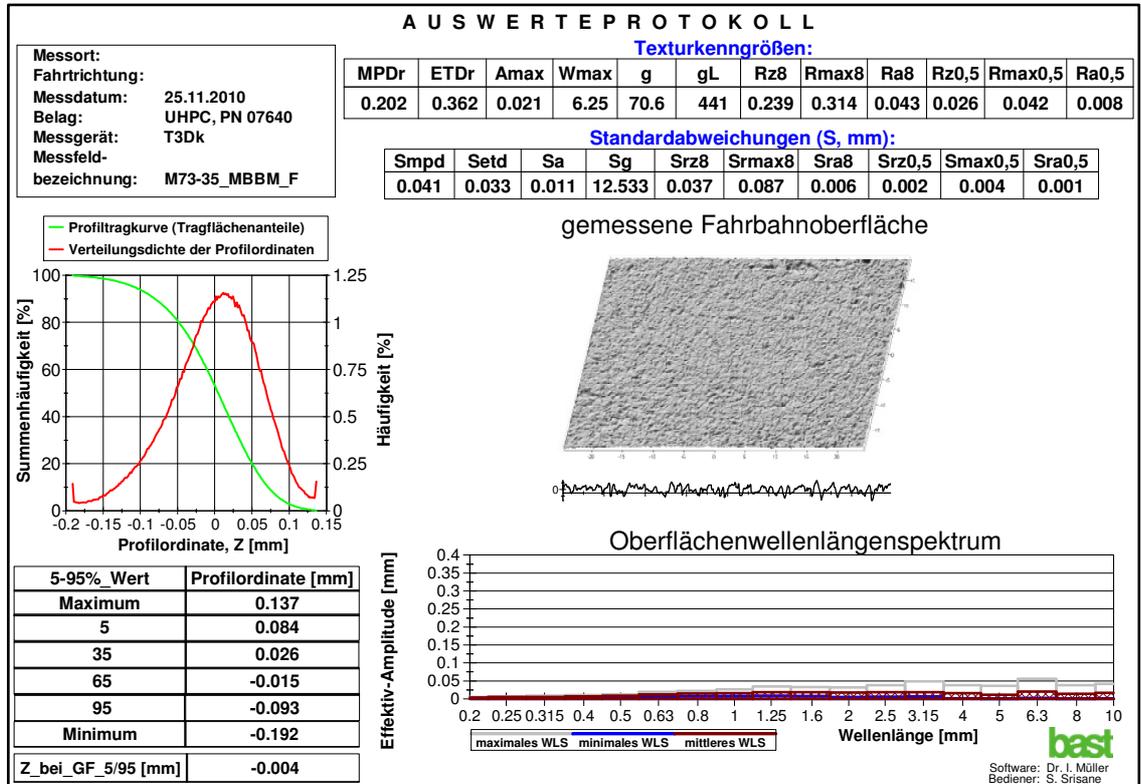
Probepatte M73-30 (ungeprägt); kleines Messfeld (T3Dk)



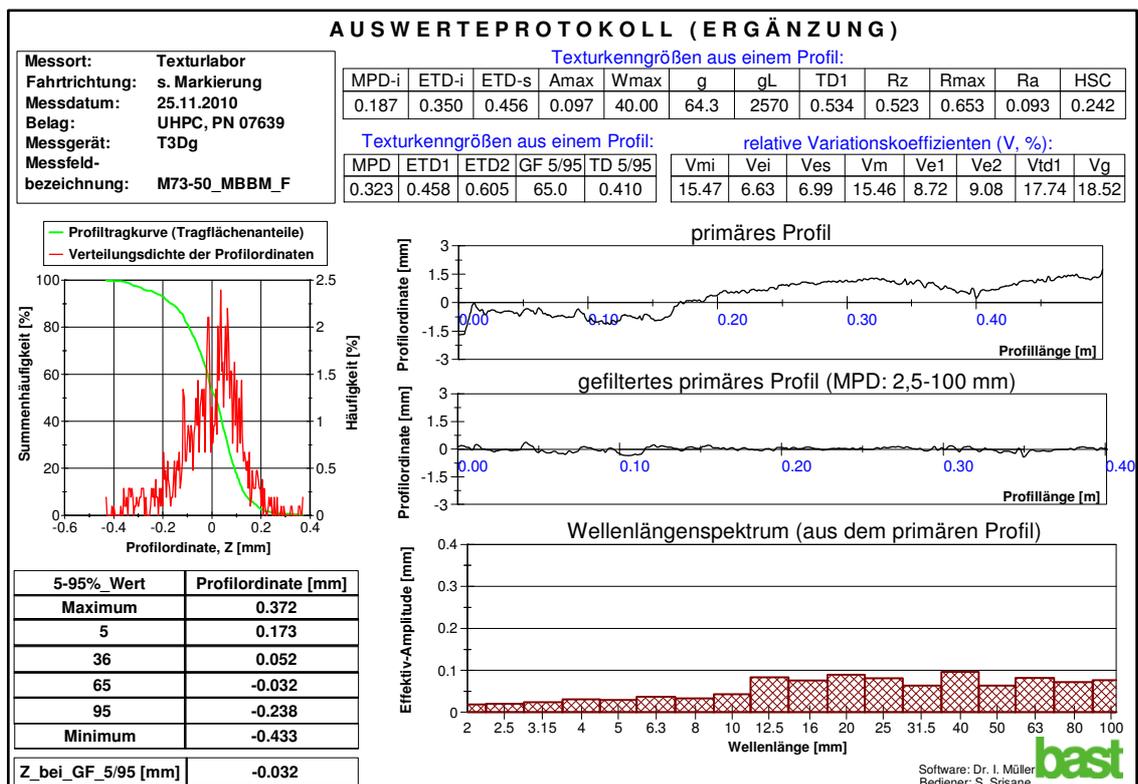
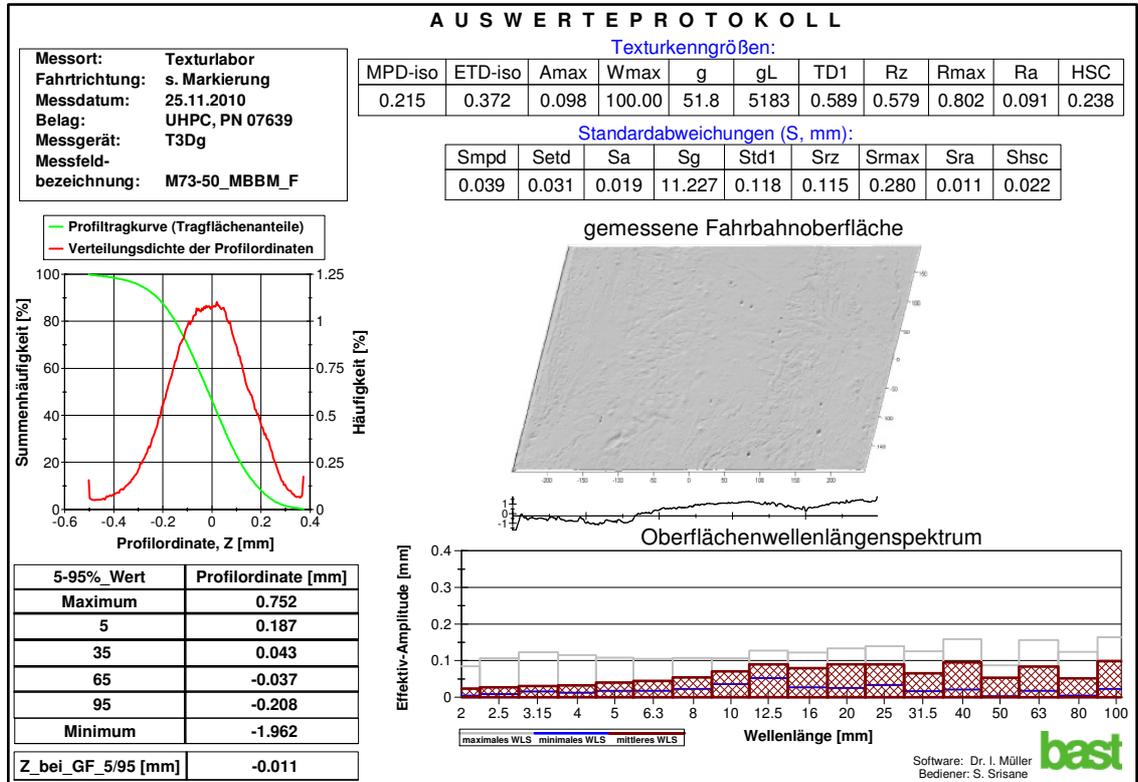
Probepatte **M73-35** (ungeprägt); großes Messfeld (T3Dg)



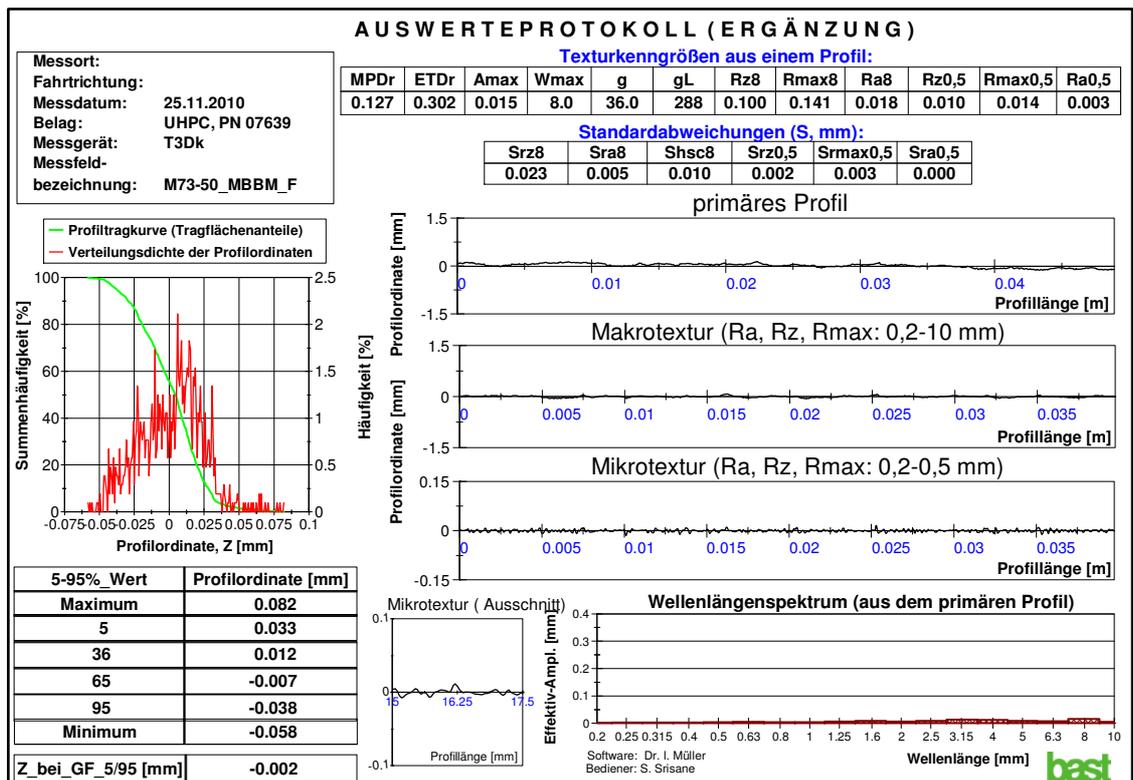
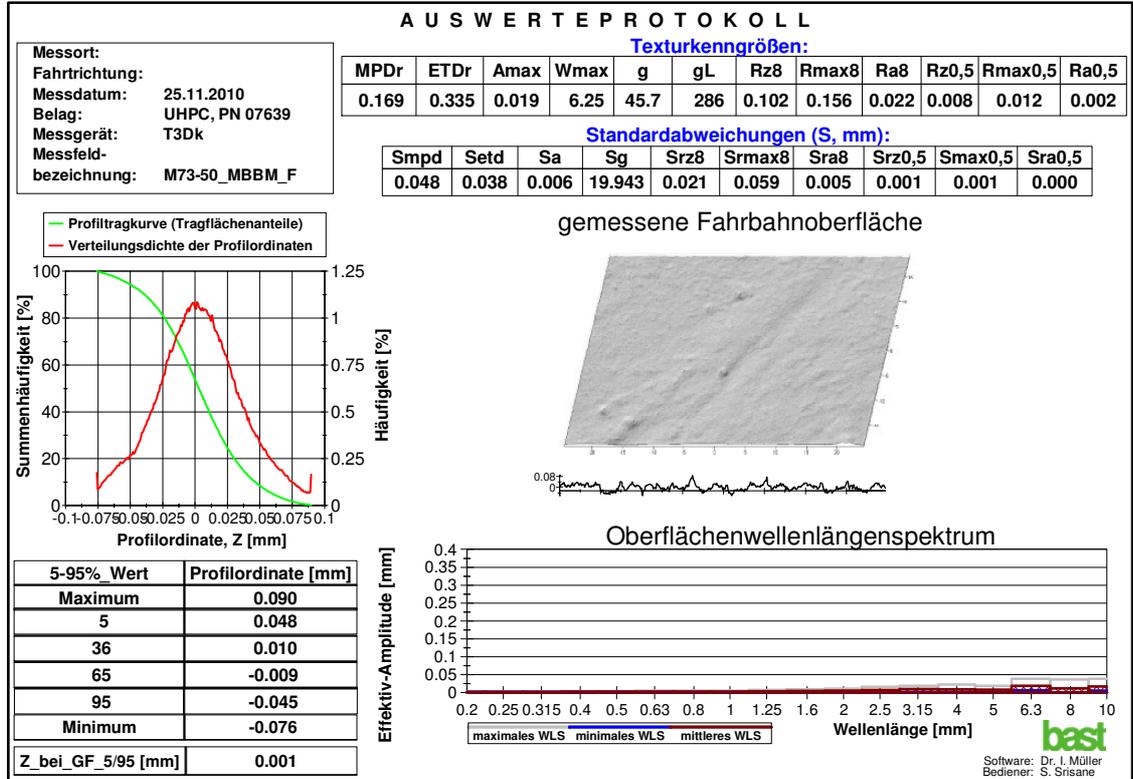
Probepatte M73-35 (ungeprägt); kleines Messfeld (T3Dk)



Probeplatte M73-50 (ungeprägt); großes Messfeld (T3Dg)

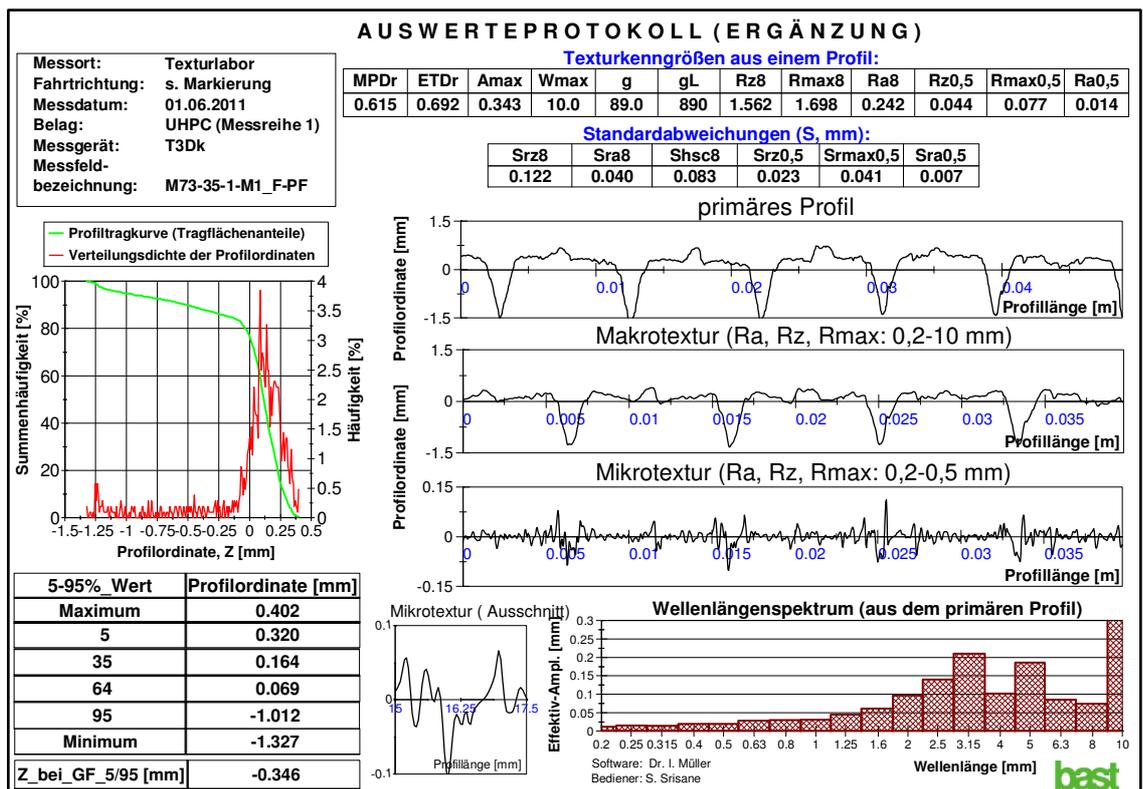
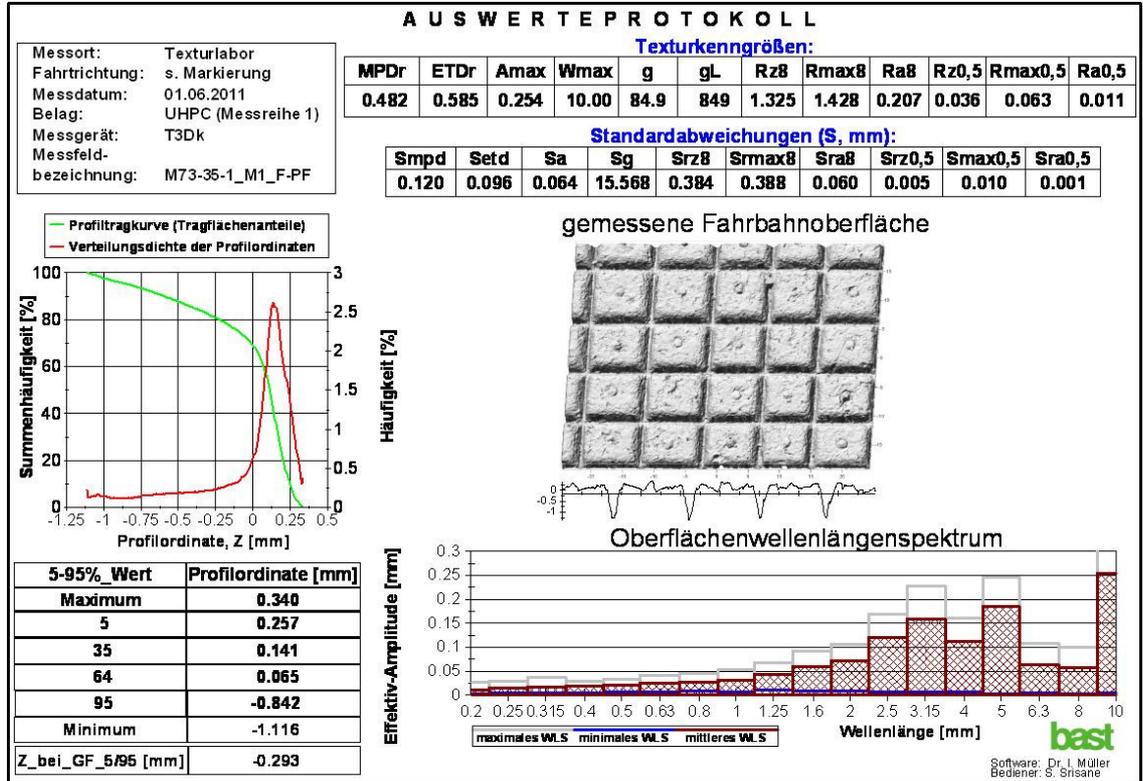


Probepatte M73-50 (ungeprägt); kleines Messfeld (T3Dk)

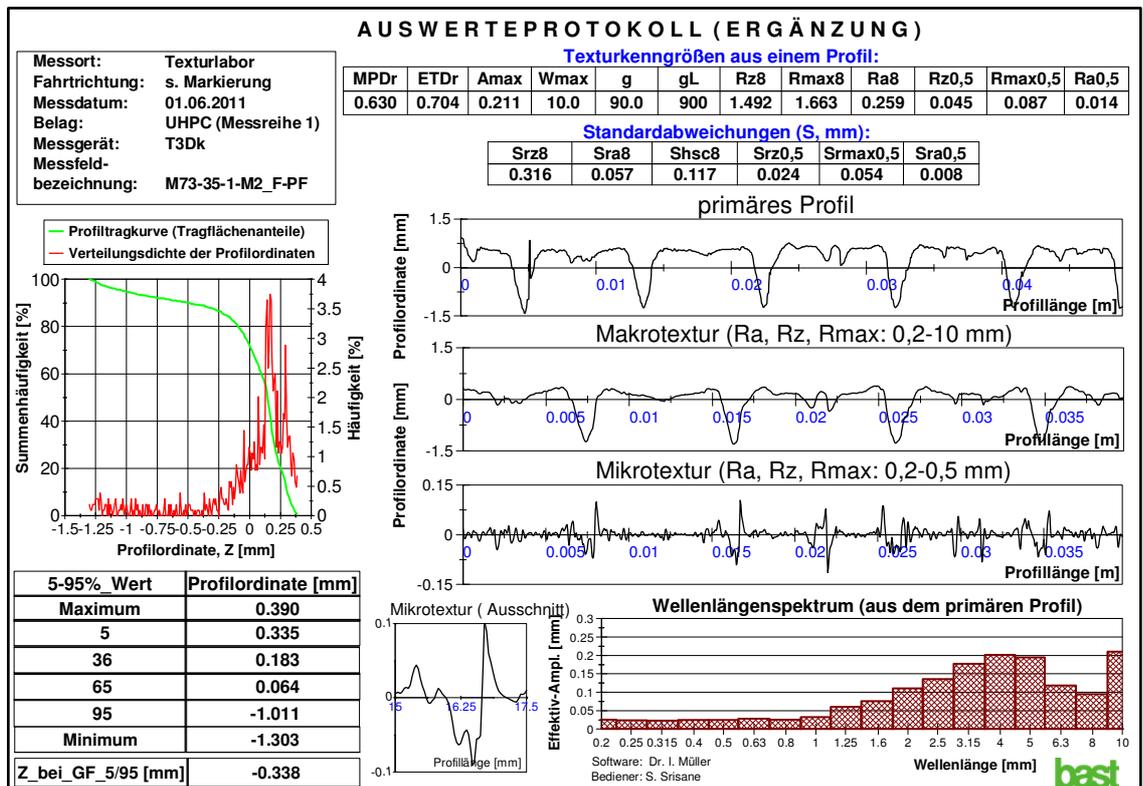
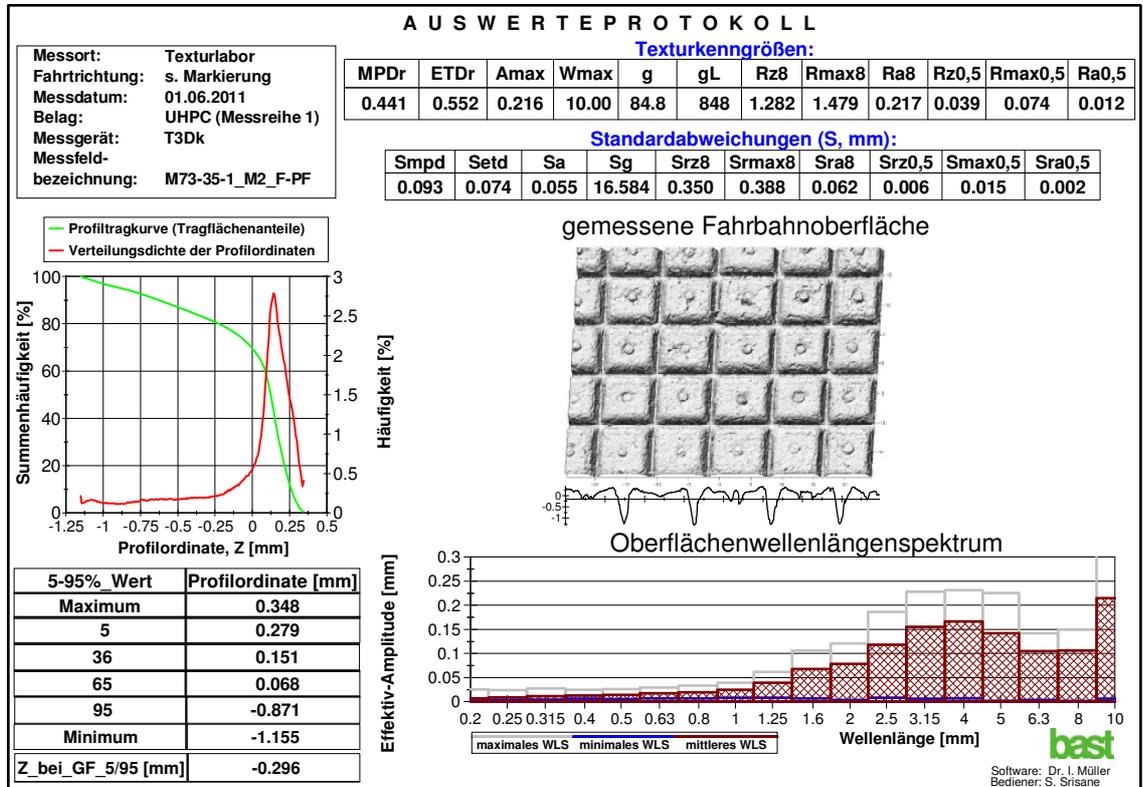


Anhang B – Messreihe 1:

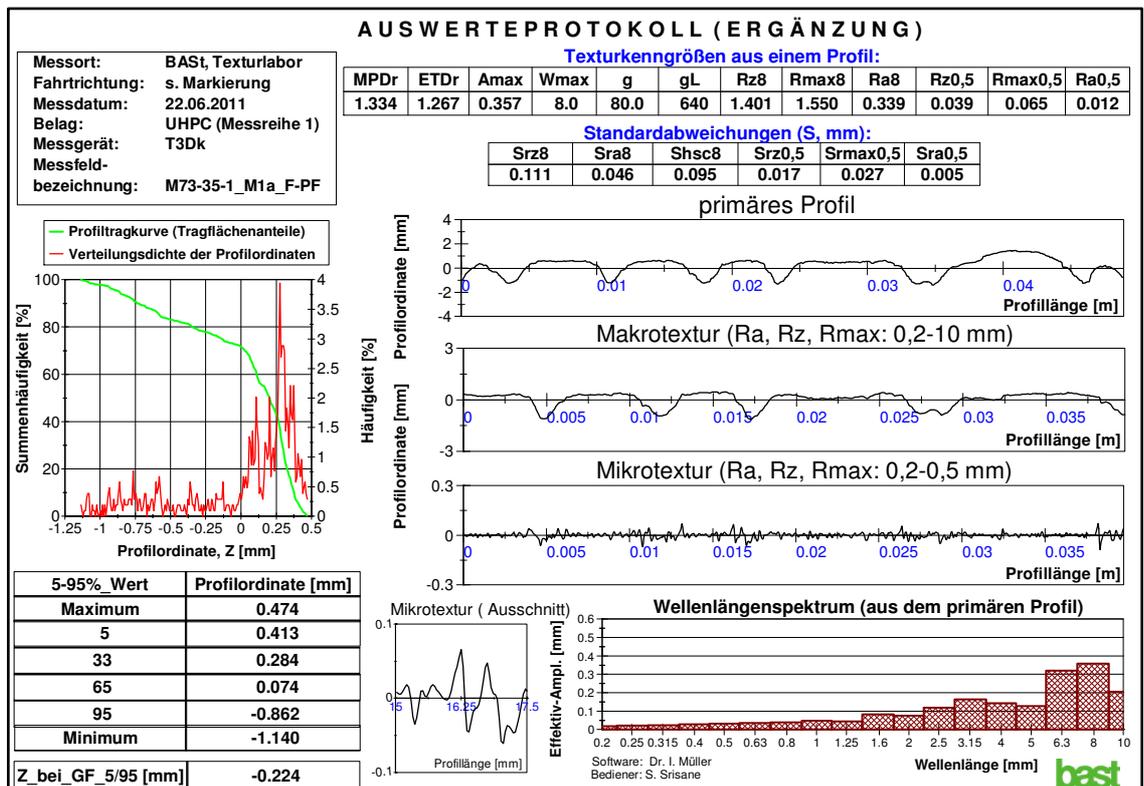
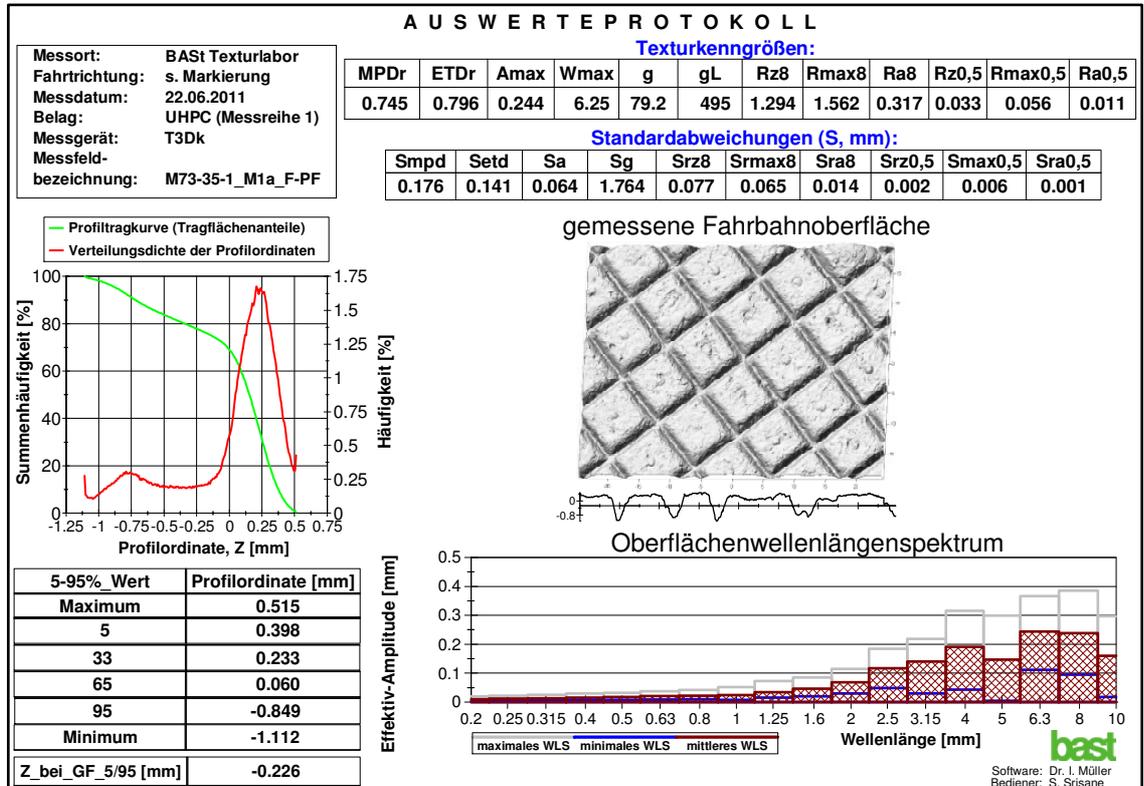
M73-35; Nullmessung; Messfeld 1; Prägegitter mit Entlüftungsloch



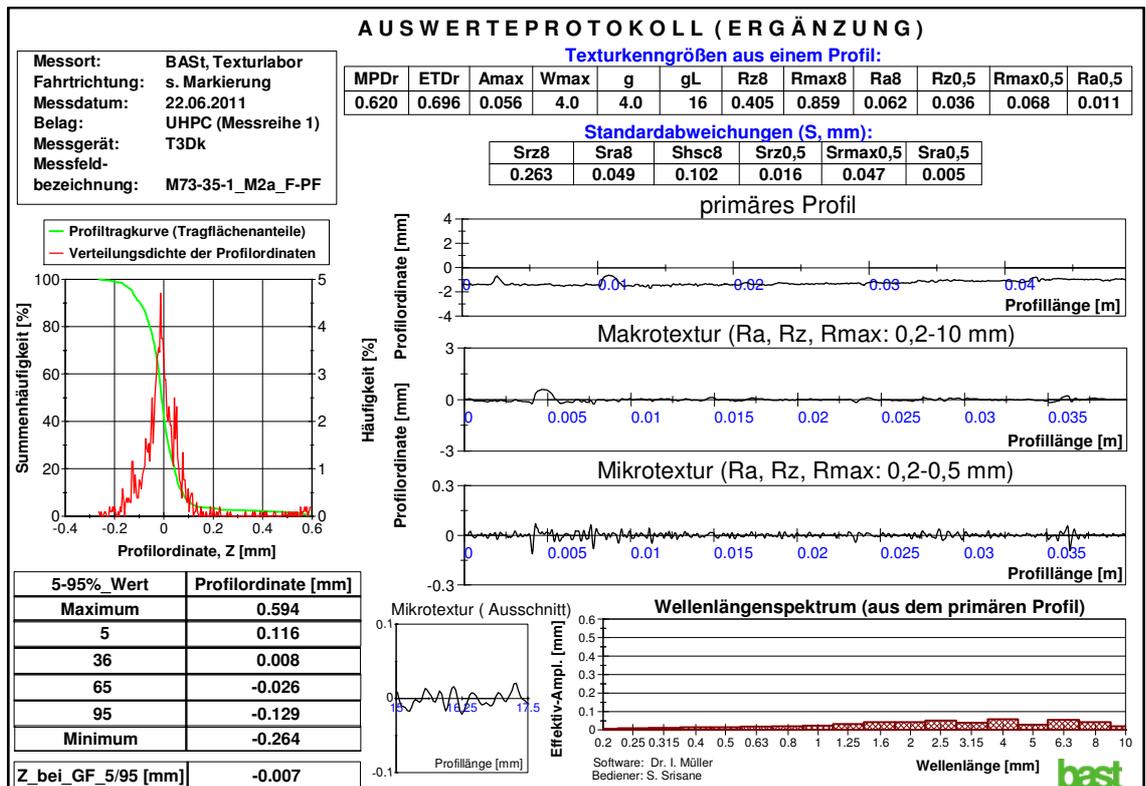
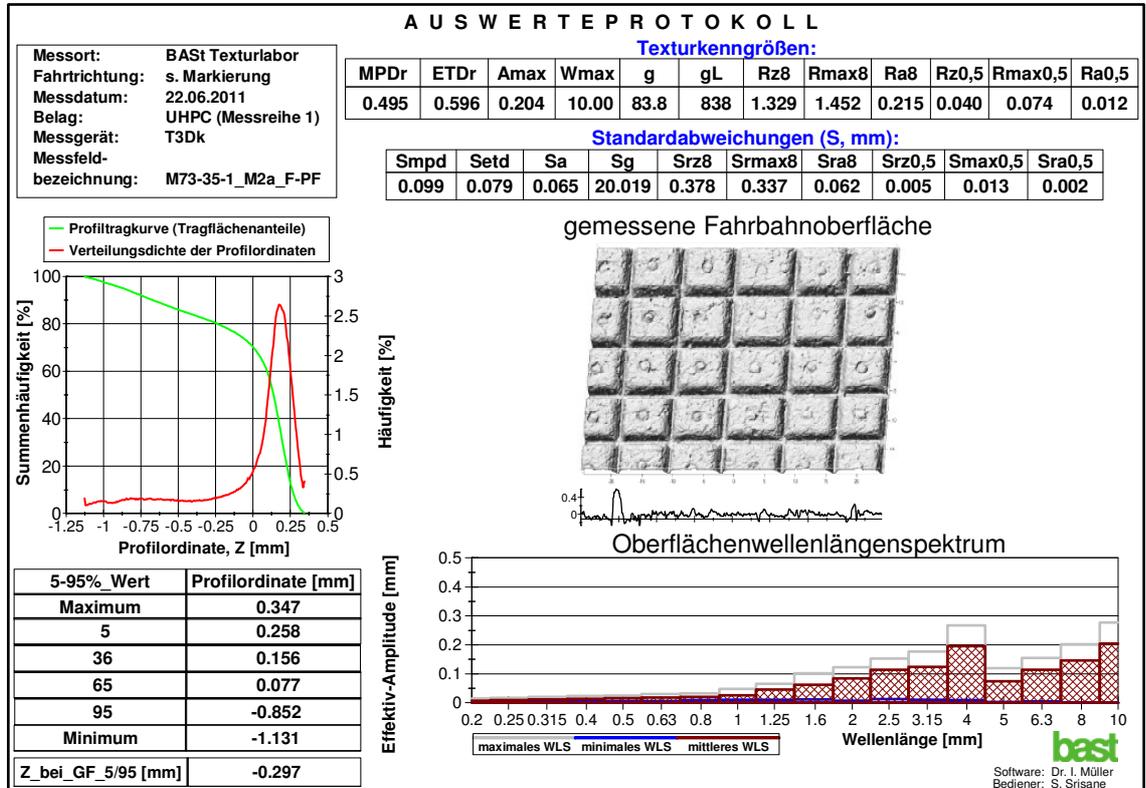
M73-35; Nullmessung; Messfeld 2; Prägegitter mit Entlüftungsloch



M73-35; Nullmessung; Messfeld 1a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

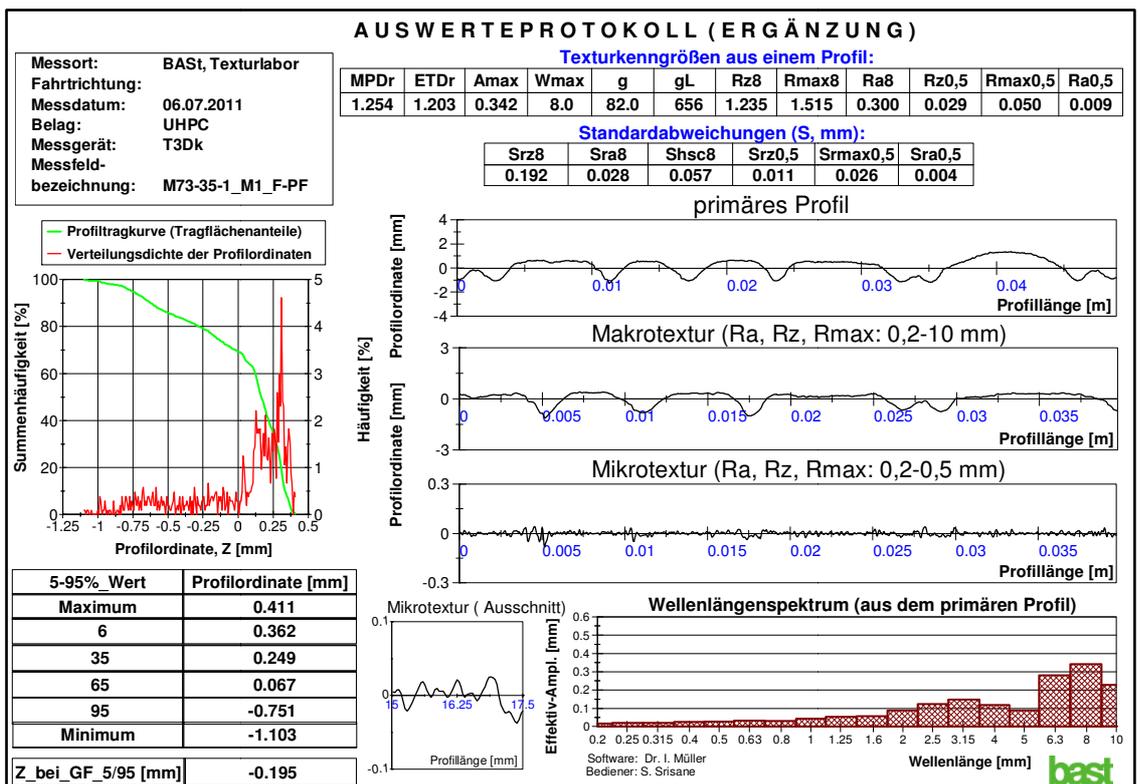
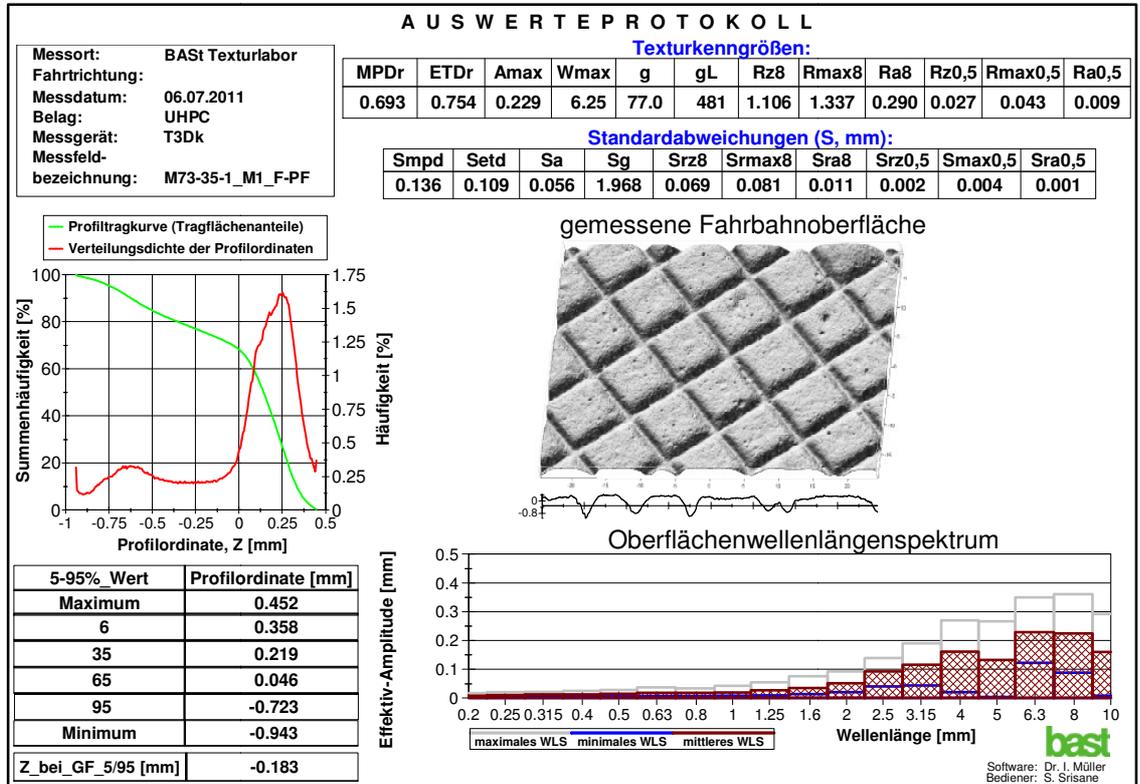


M73-35; Nullmessung; Messfeld 2a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

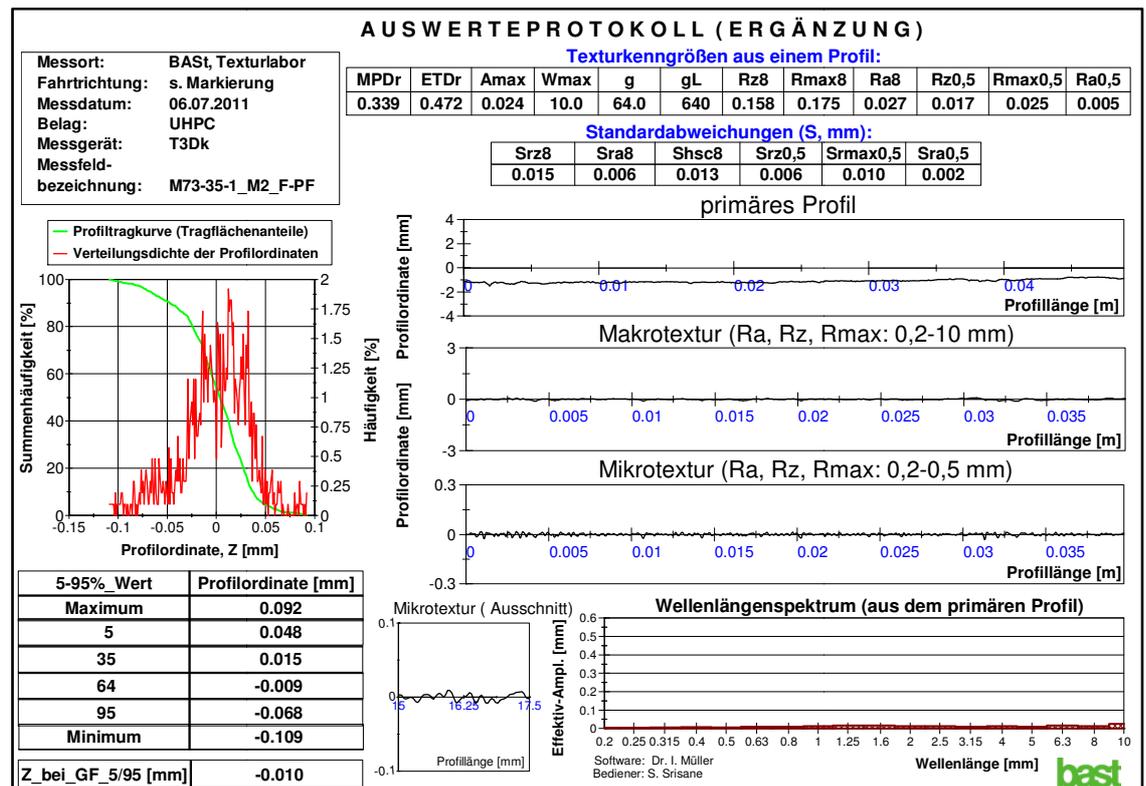
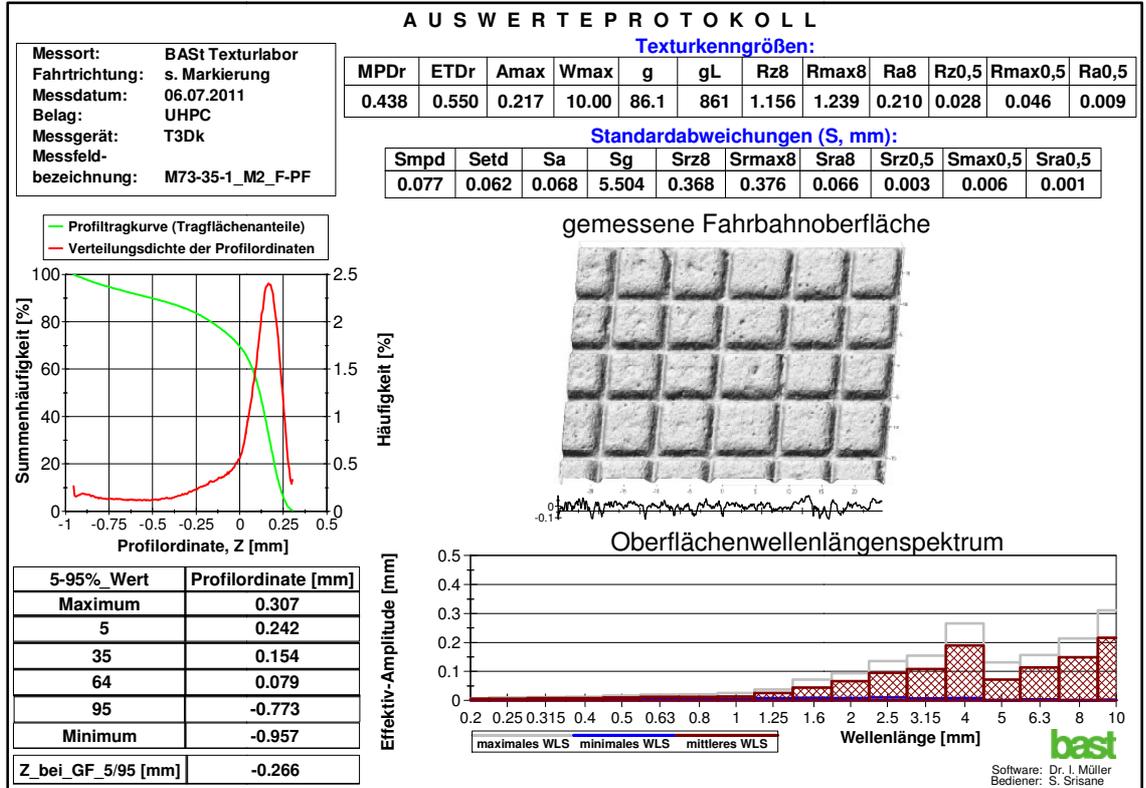


Anhang B – Messreihe 2:

M73-35; 9 x10⁴ Überra. + Sandstrahlen; Messfeld 1a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

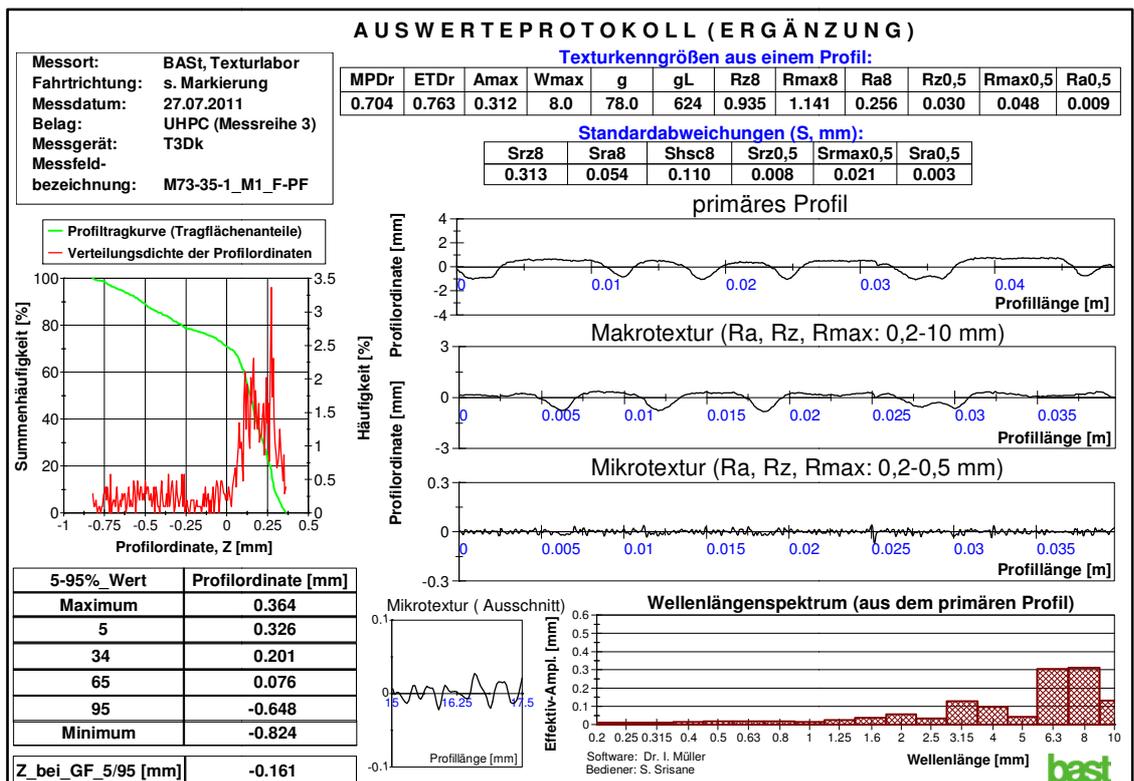
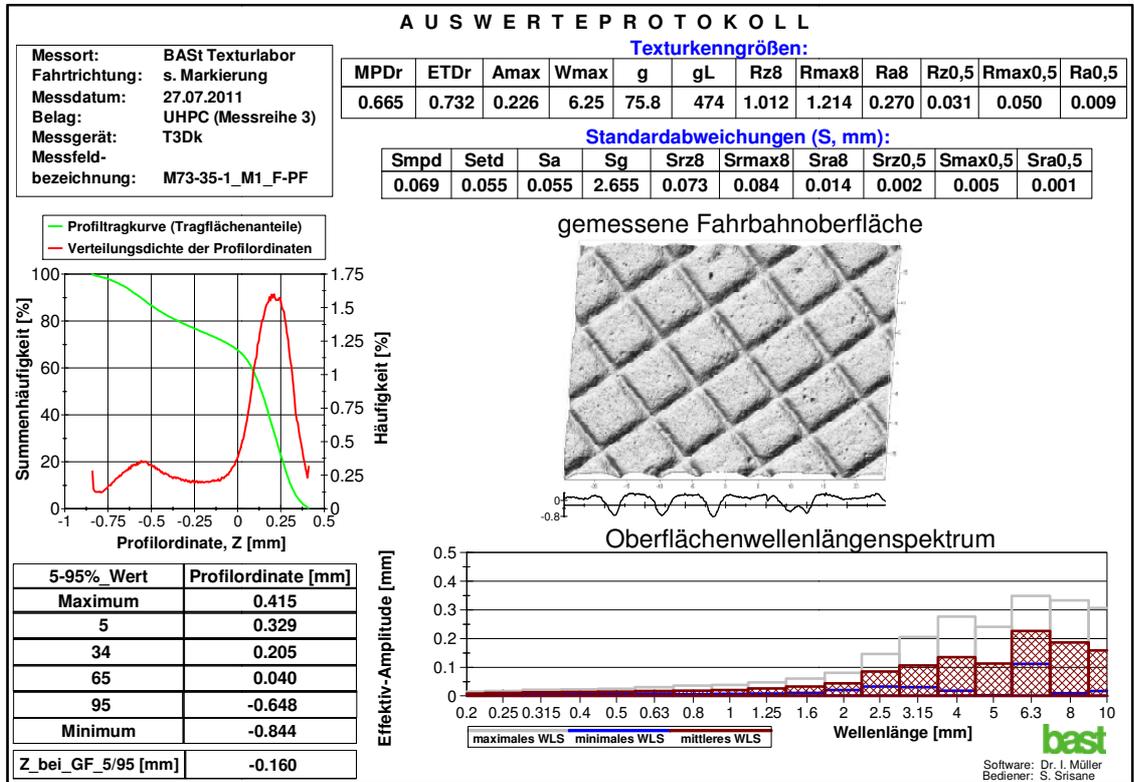


M73-35; 9 x 10⁴ Übrerr. + Sandstrahlen; Messfeld 2a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

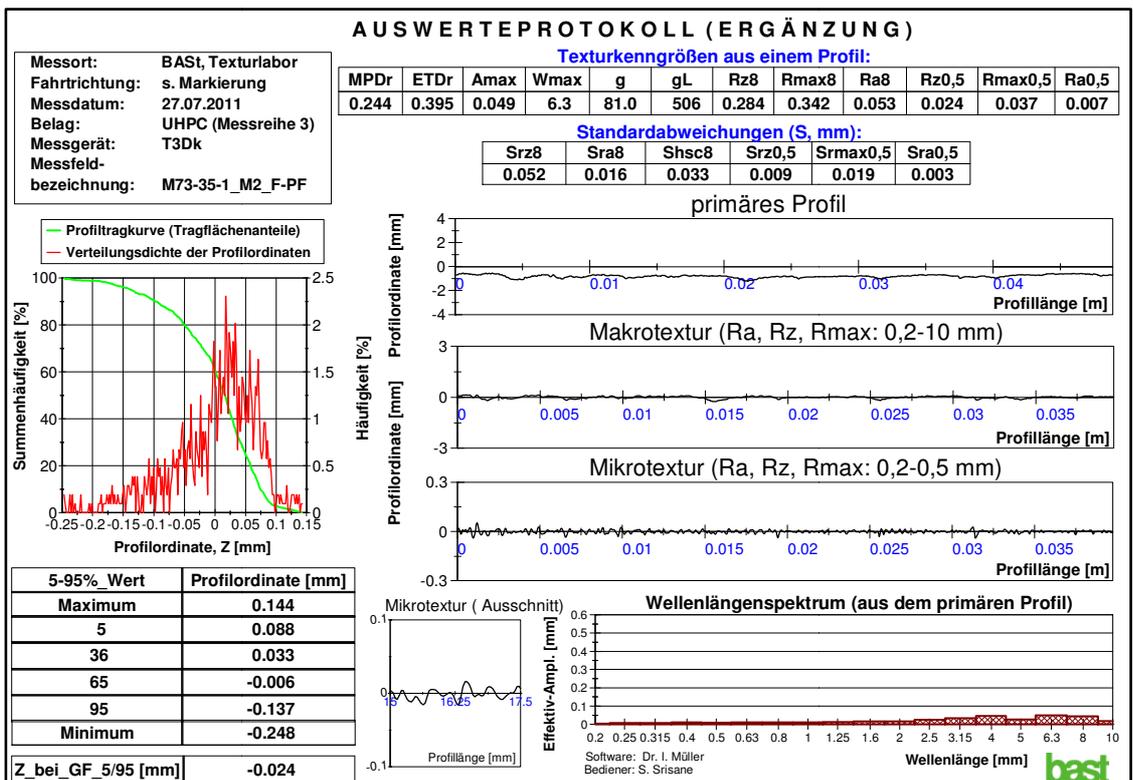
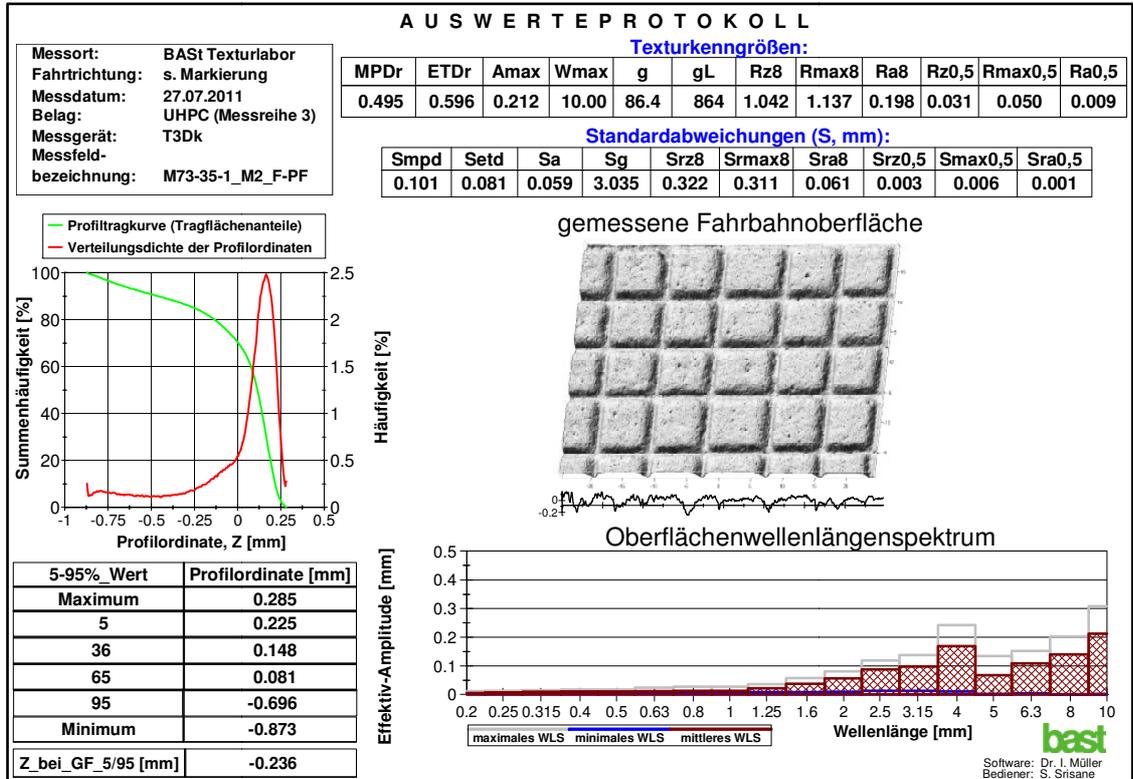


Anhang B – Messreihe 3:

M73-35; 27 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

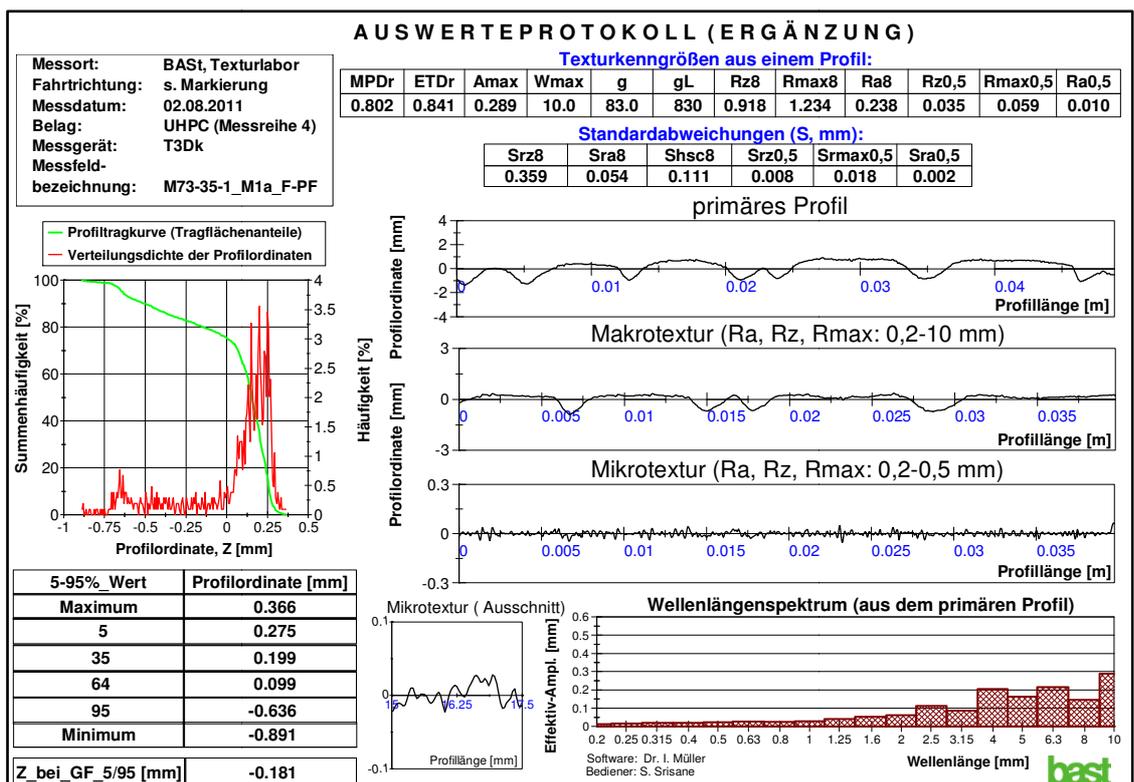
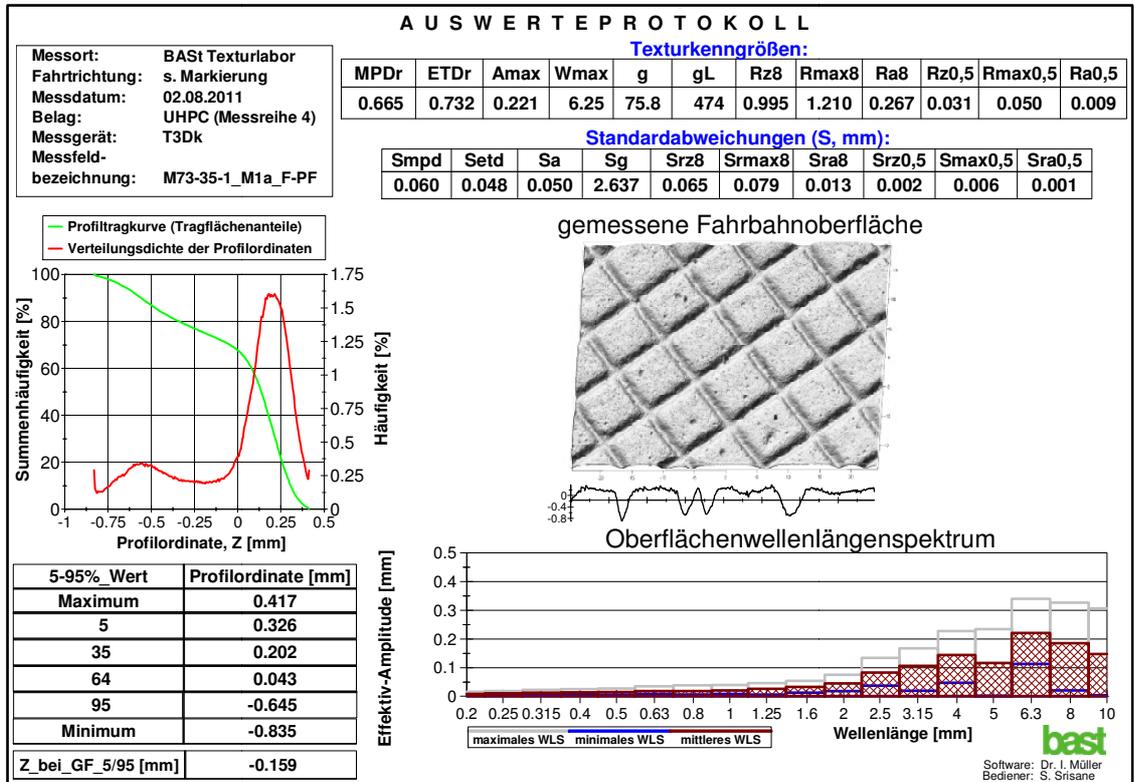


M73-35; 27 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

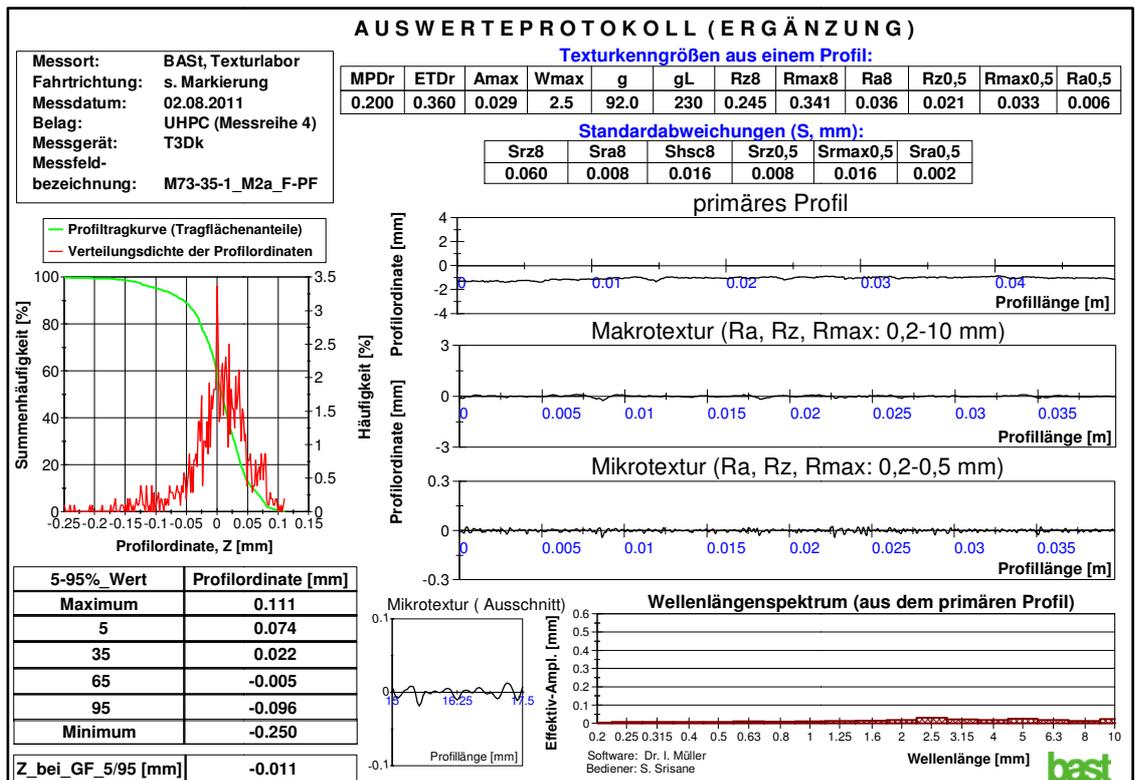
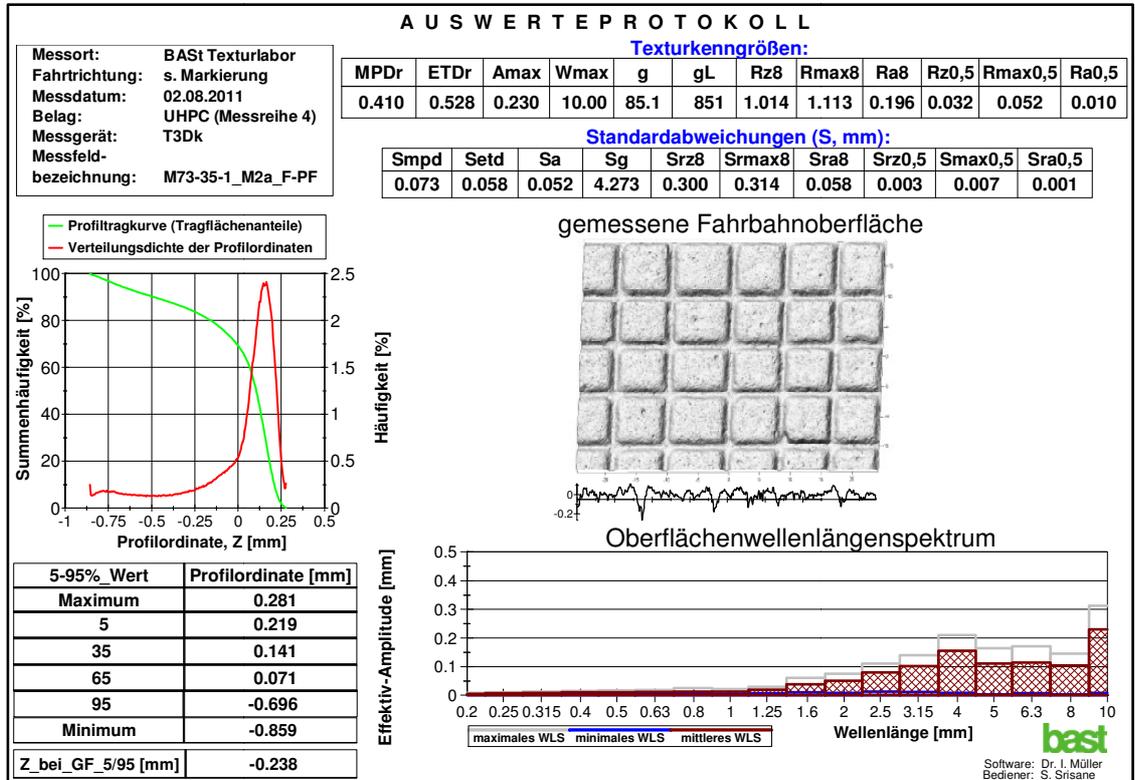


Anhang B – Messreihe 4:

M73-35; 40,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

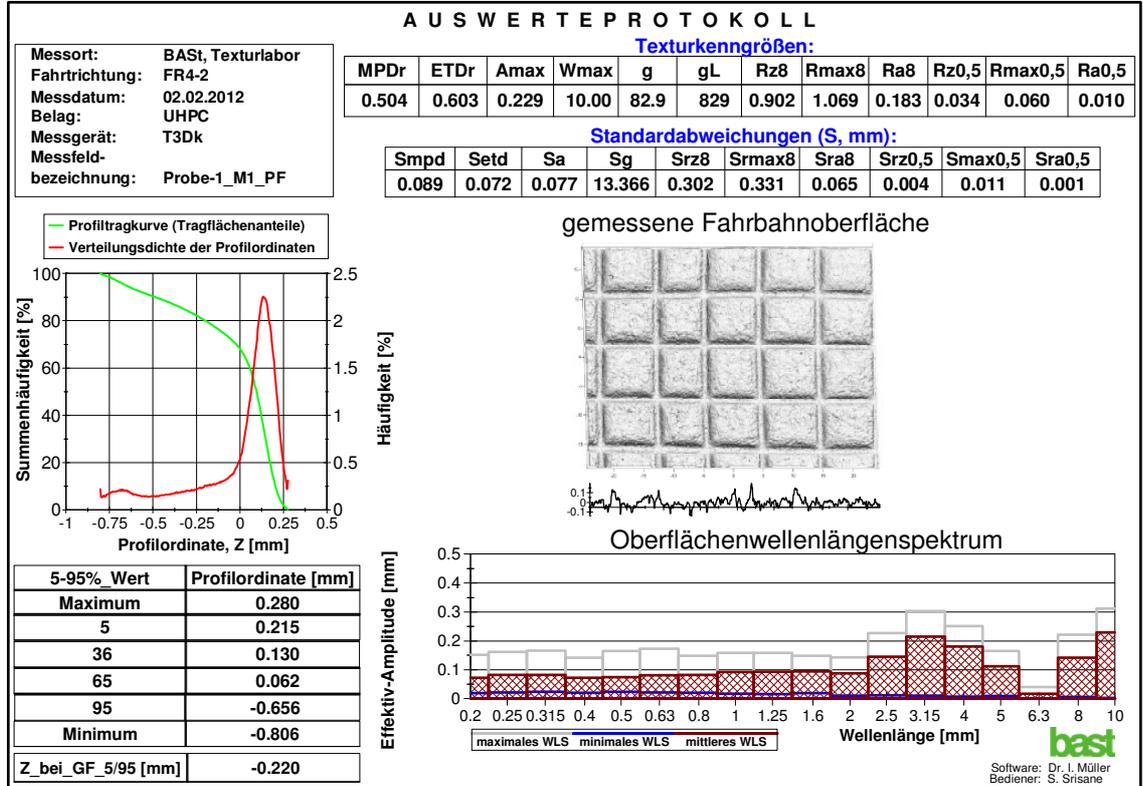


M73-35; 40,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2a; Prägegitter mit Entlüftungsloch

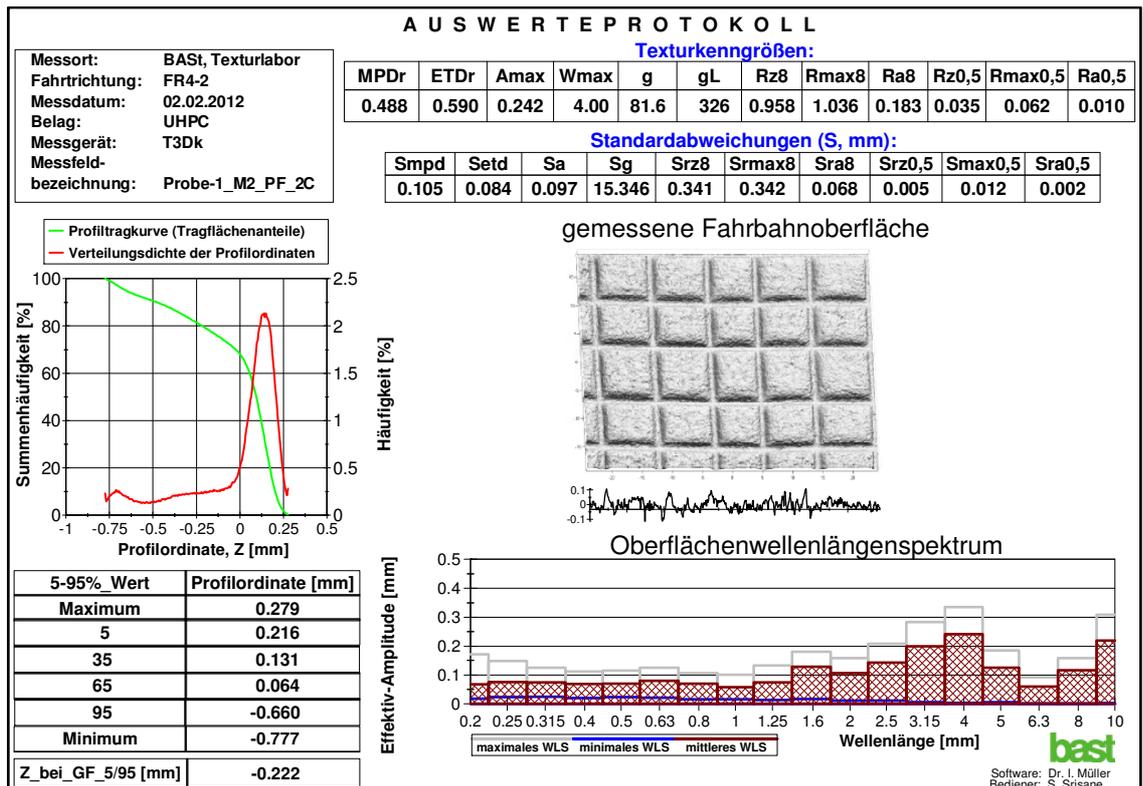


Anhang C – Messreihe 1

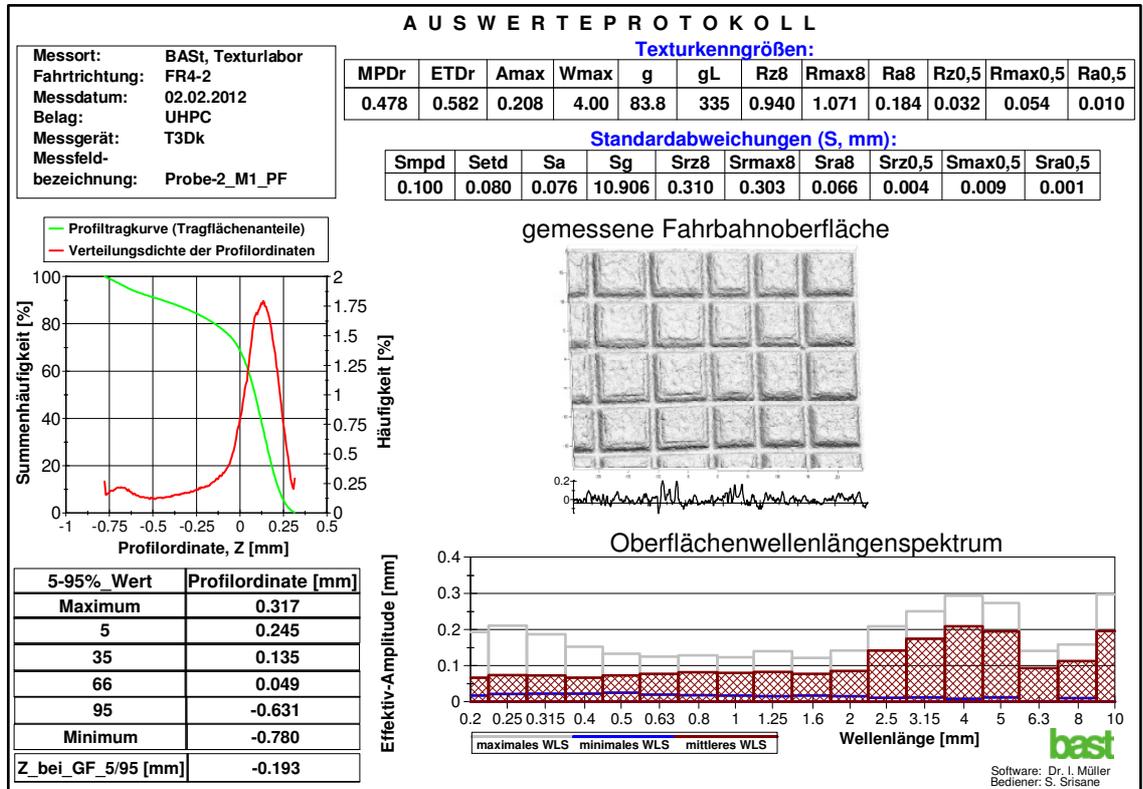
M73-35; Nullmessung; Messfeld 1; mikroperforierte Prägefolie (gerollt)



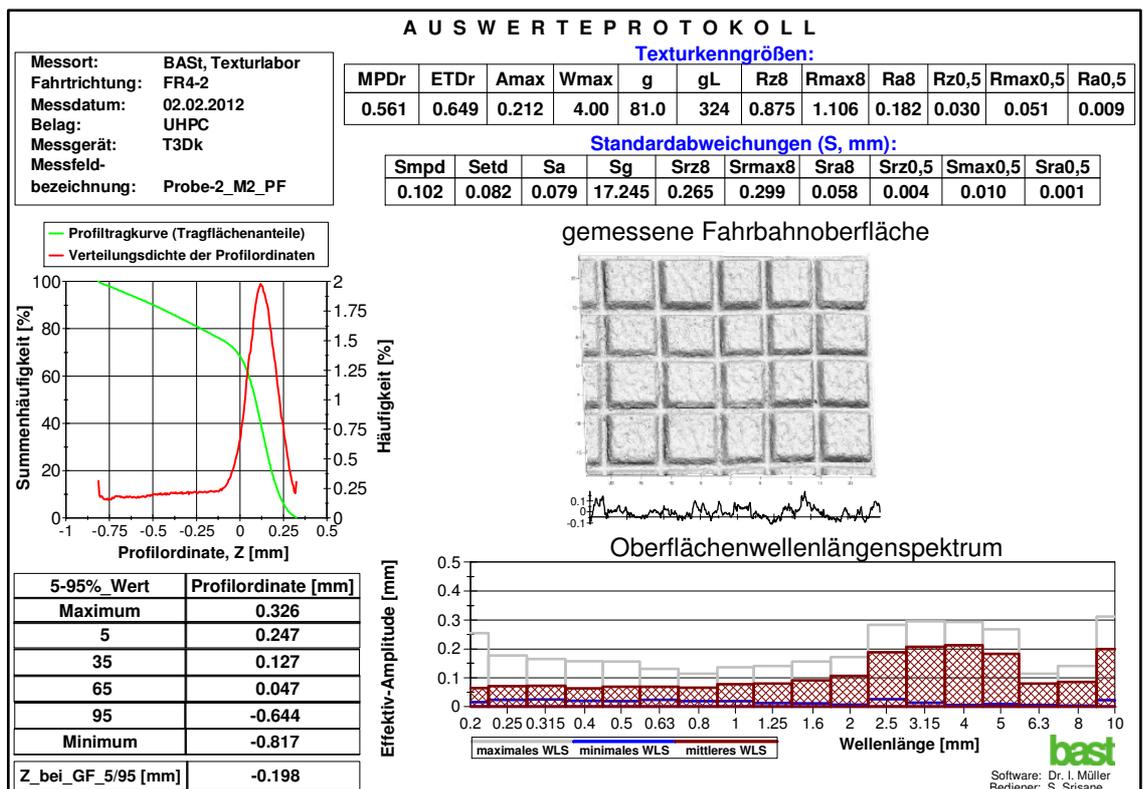
M73-35; Nullmessung; Messfeld 2; mikroperforierte Prägefolie (gerollt)



M73-35; Nullmessung; Messfeld 1; mikroperf. Prägefolie (mit Platte eingedrückt)

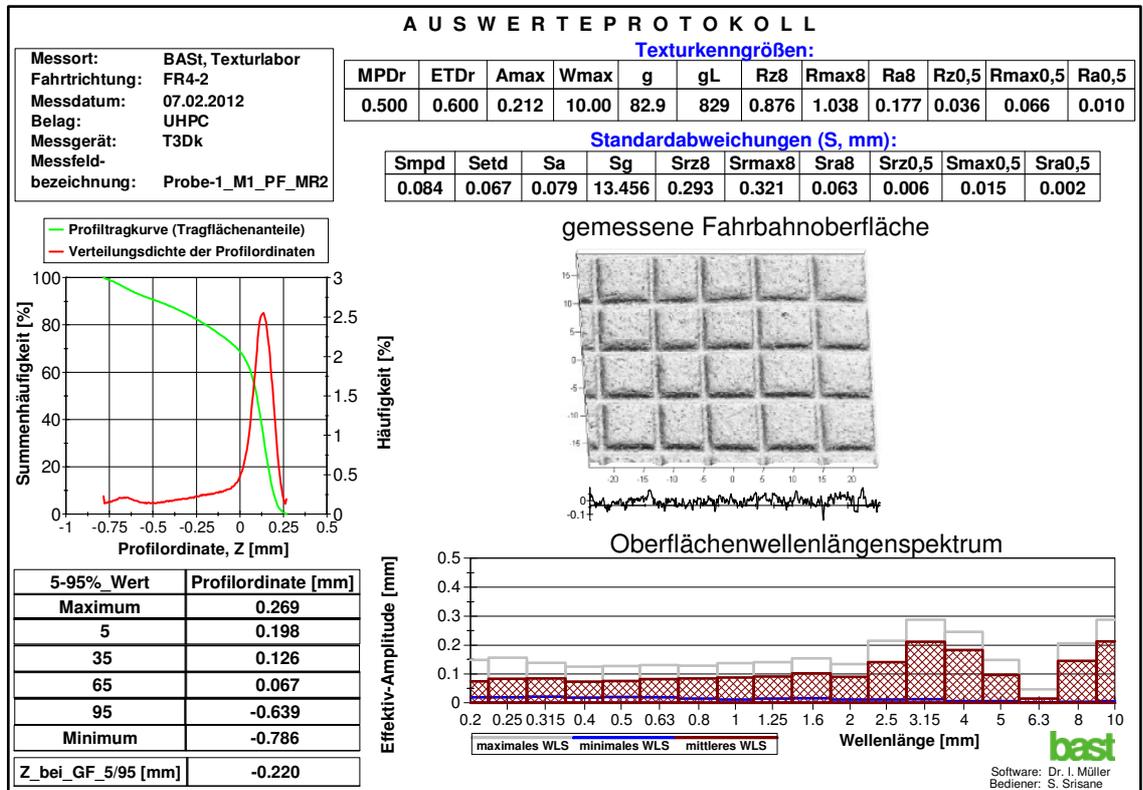


M73-35; Nullmessung; Messfeld 2; mikroperf. Prägefolie (mit Platte eingedrückt)

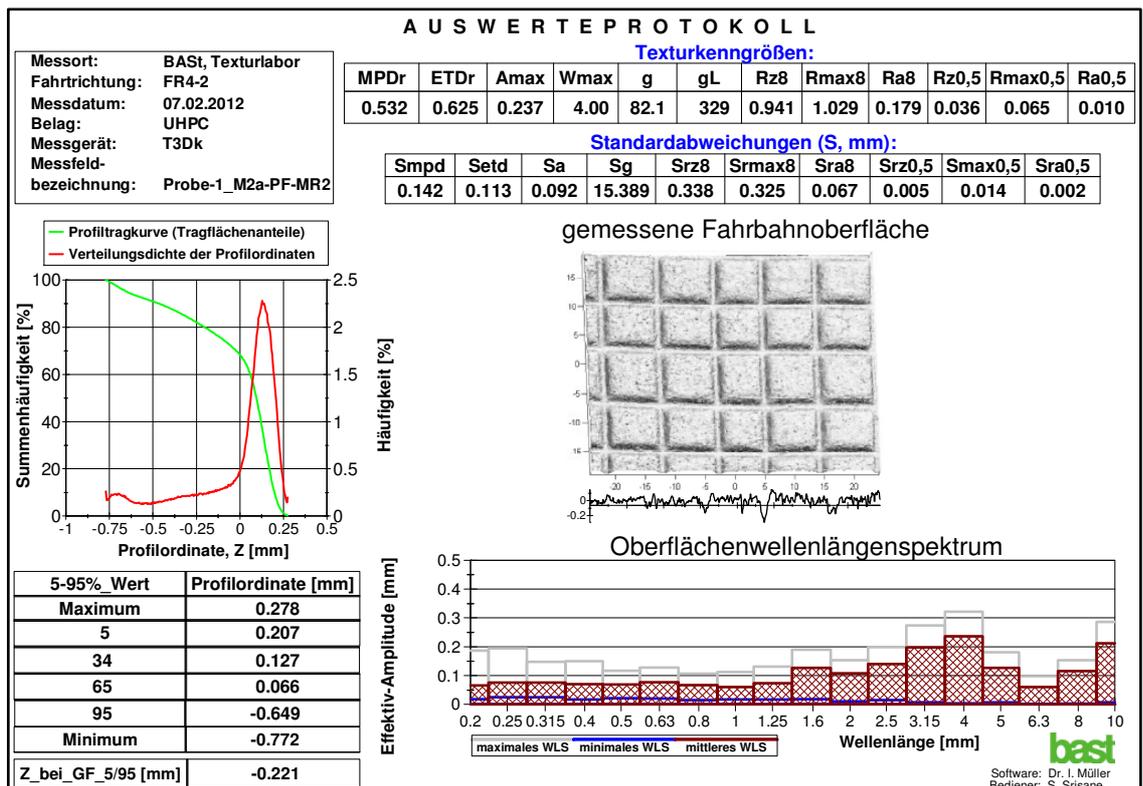


Anhang C – Messreihe 2:

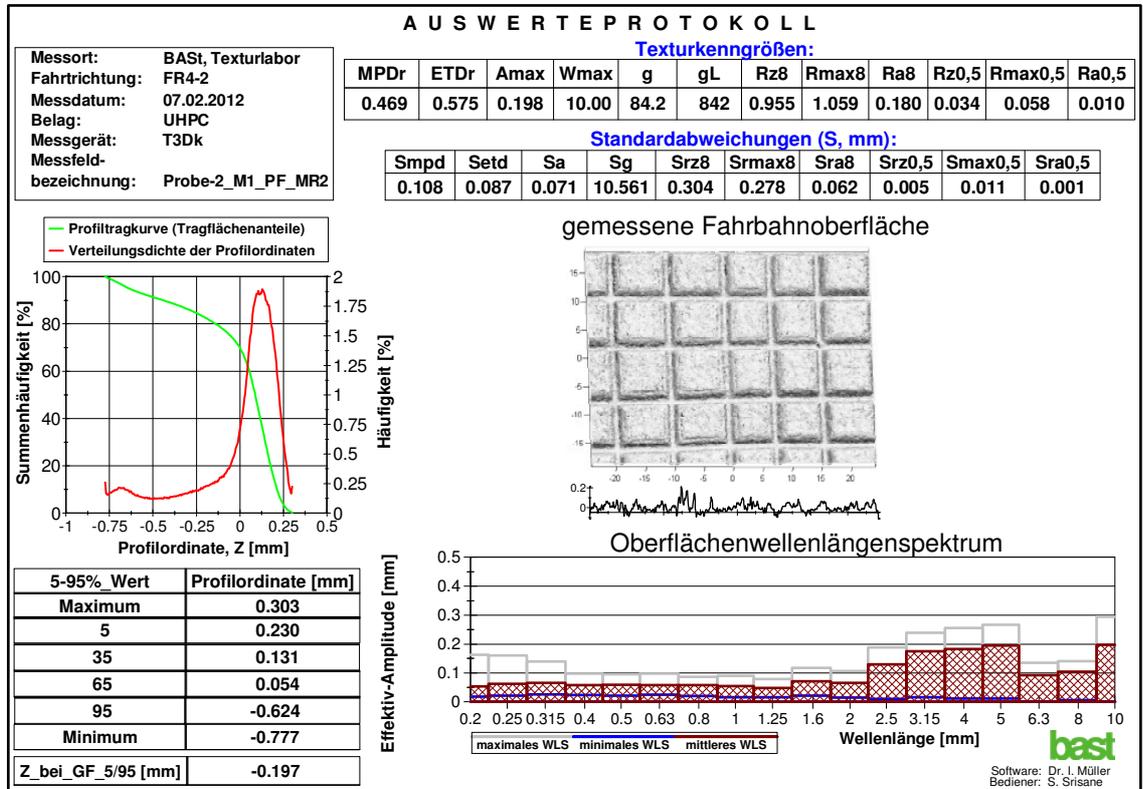
M73-35; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; mikroperforierte Prägefolie (gerollt)



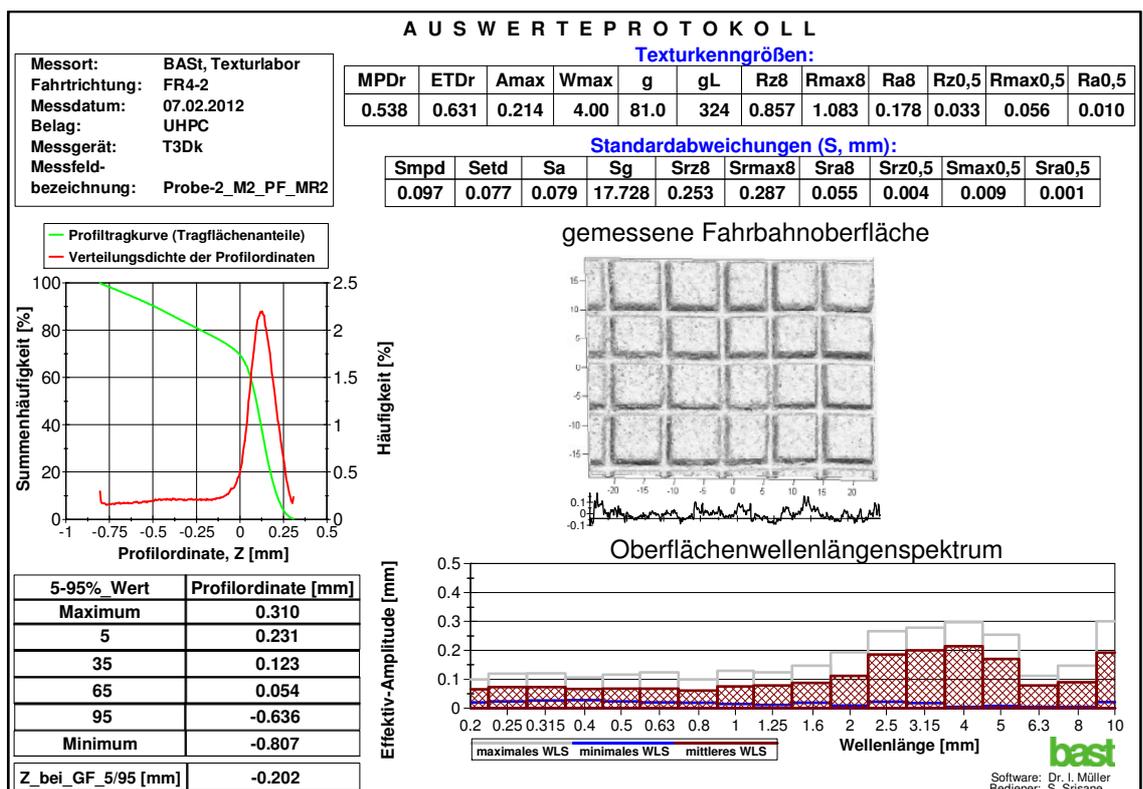
M73-35; 9 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; mikroperforierte Prägefolie (gerollt)



M73-35; 9 x 10⁴ Übr.; Messfeld 1; mikroperf. Prägefolie (mit Platte eingedrückt)

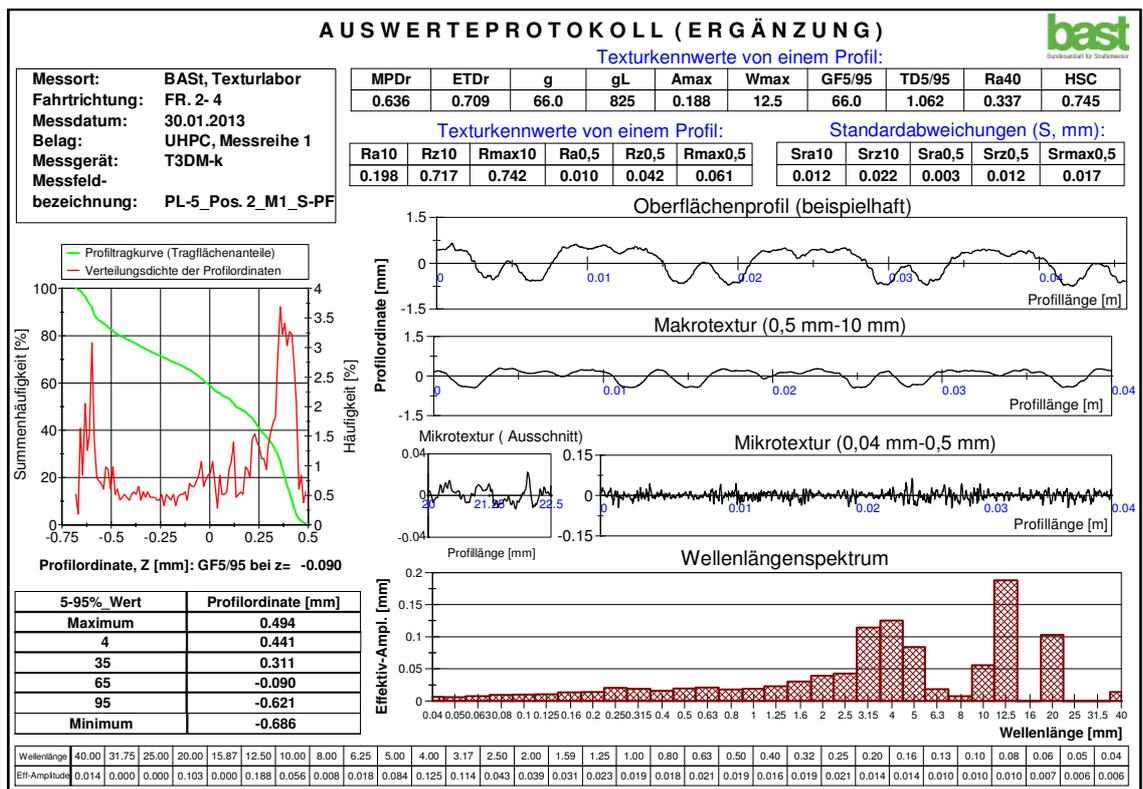
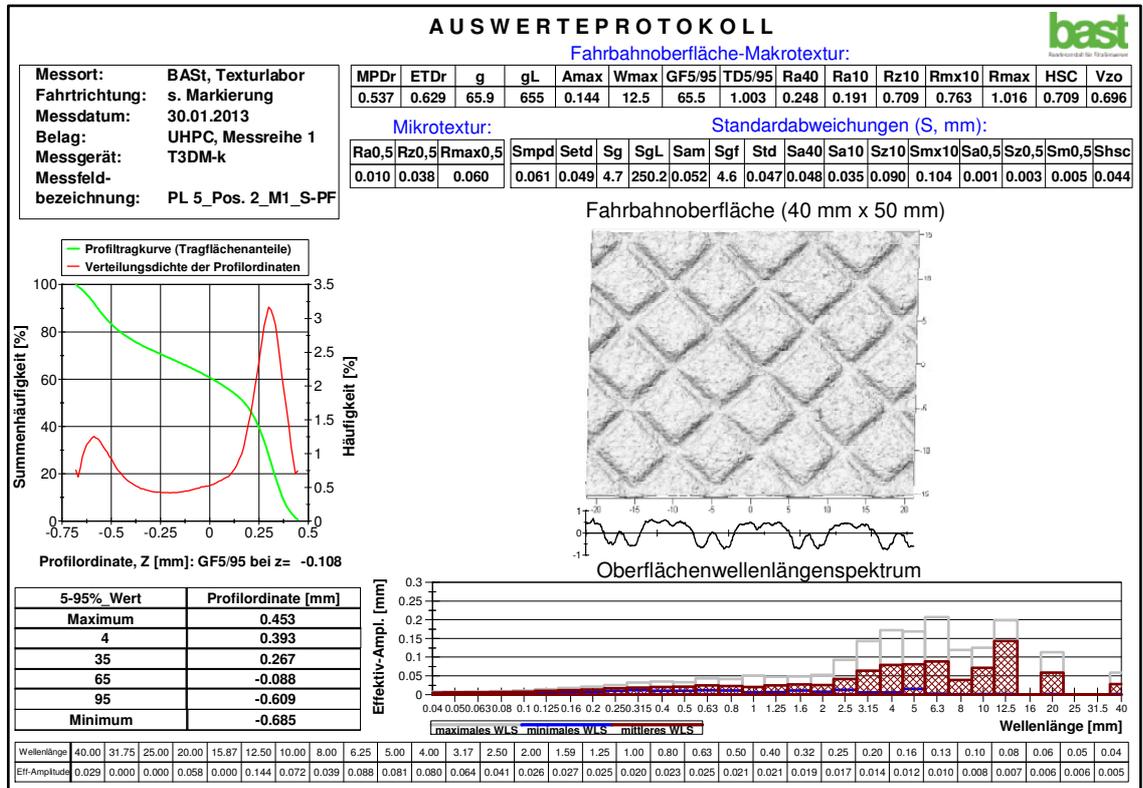


M73-35; 9 x 10⁴ Übr.; Messfeld 2; mikroperf. Prägefolie (mit Platte eingedrückt)

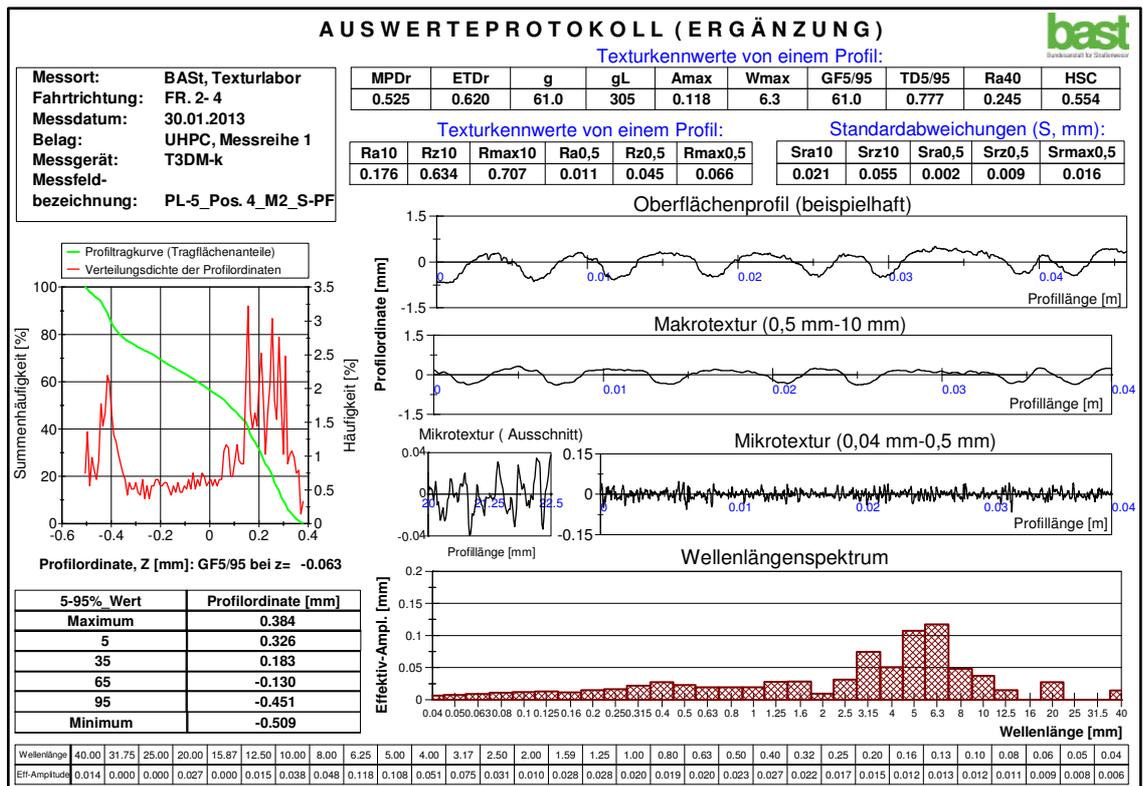
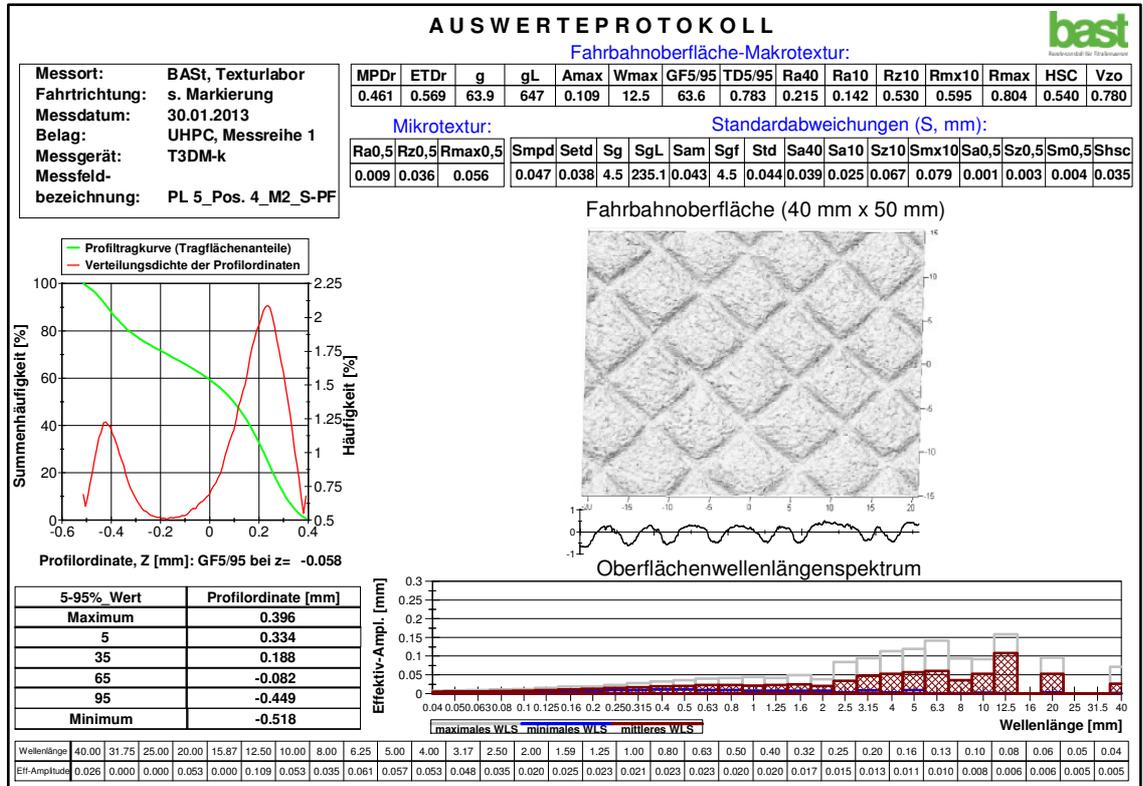


Anhang C – Messreihe 1:

Nutzschicht M5; Nullmessung; Messfeld 1; in situ-Prägung mit Walze

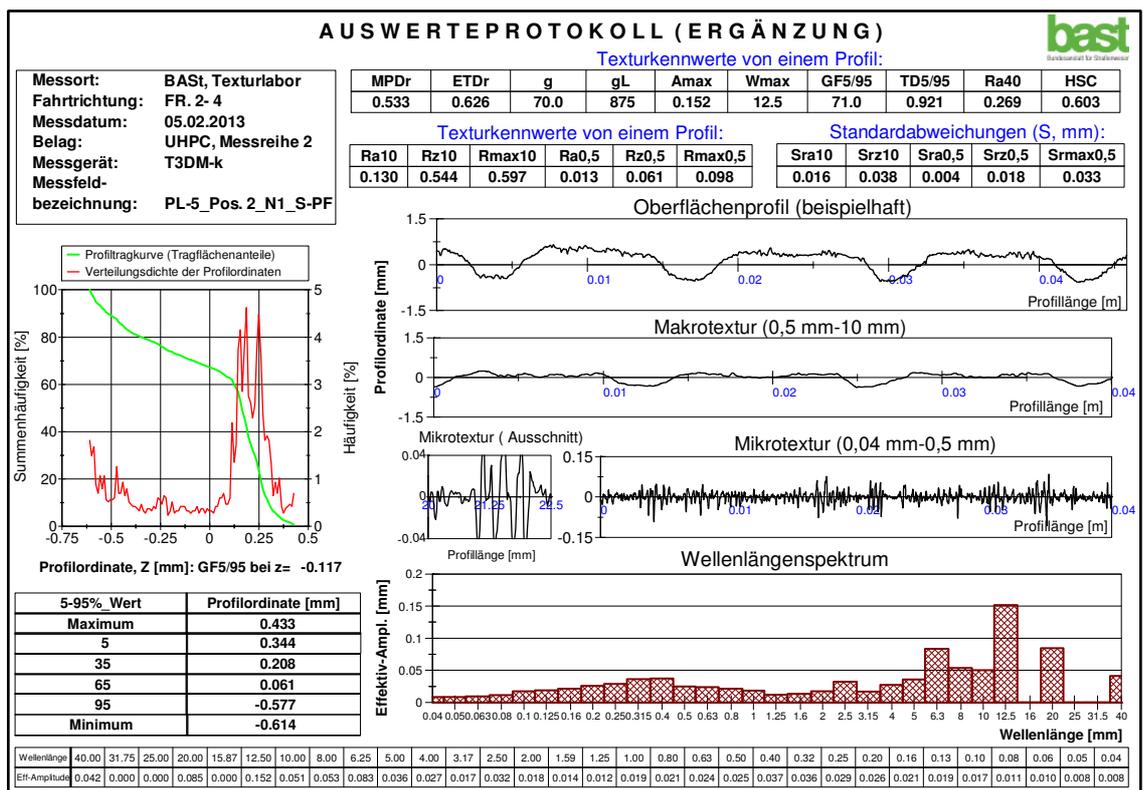
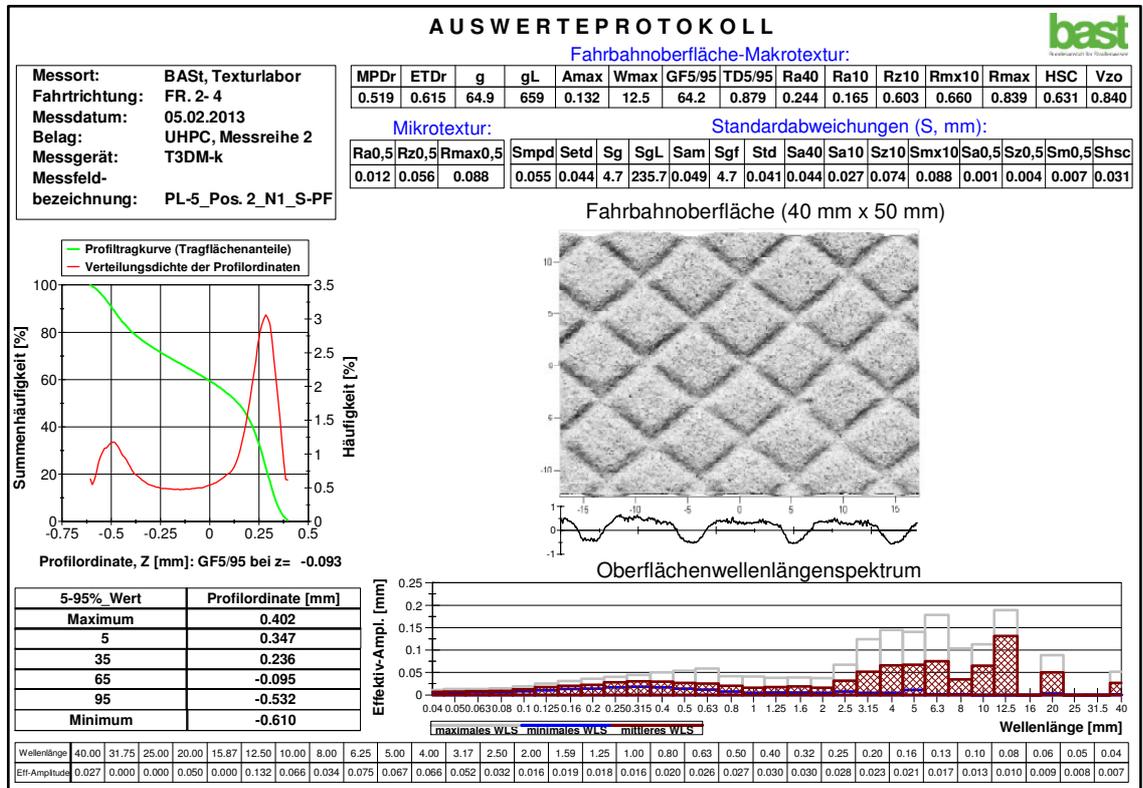


Nutzschicht M5; Nullmessung; Messfeld 2; in situ-Prägung mit Walze

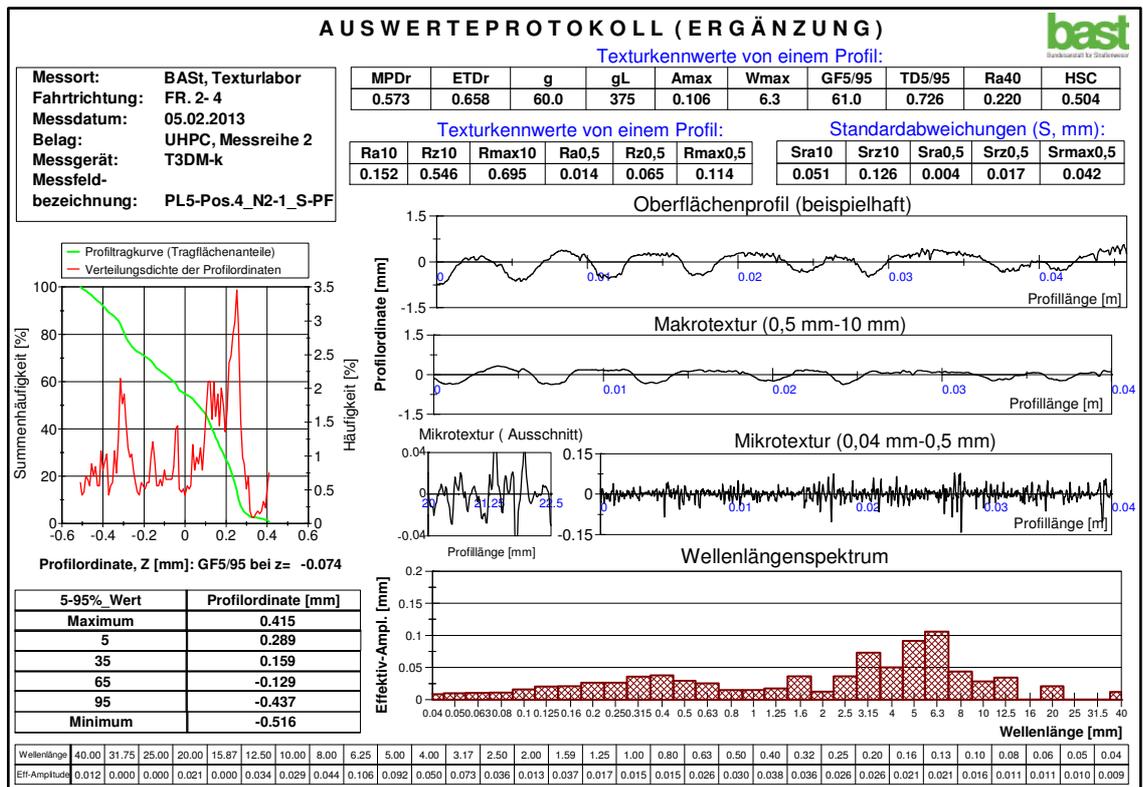
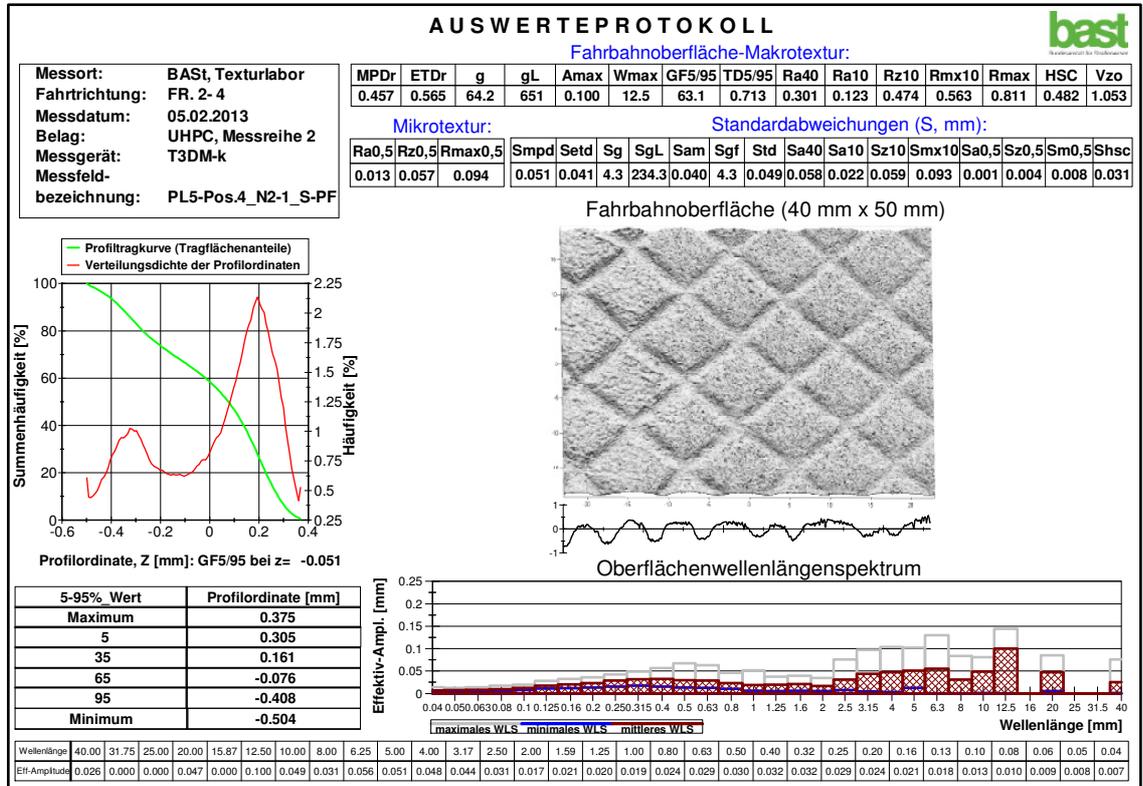


Anhang C – Messreihe 2:

Nutzschicht M5; 13,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; in situ-Prägung mit Walze

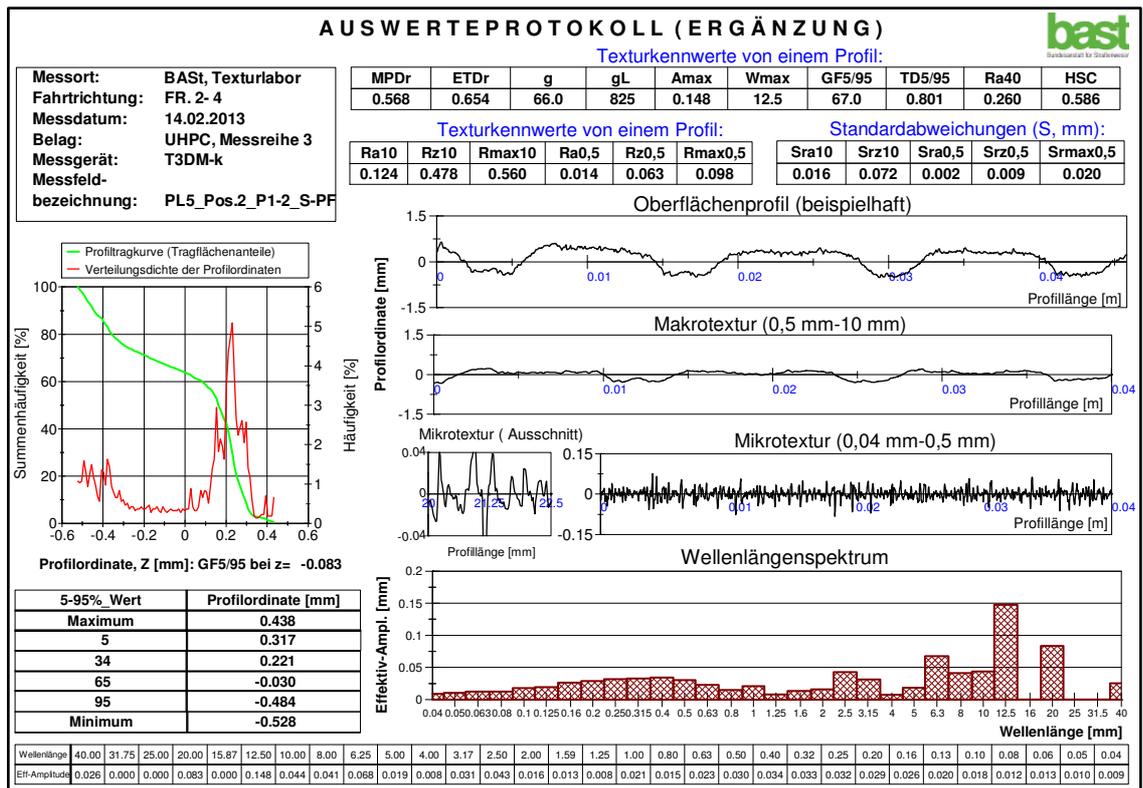
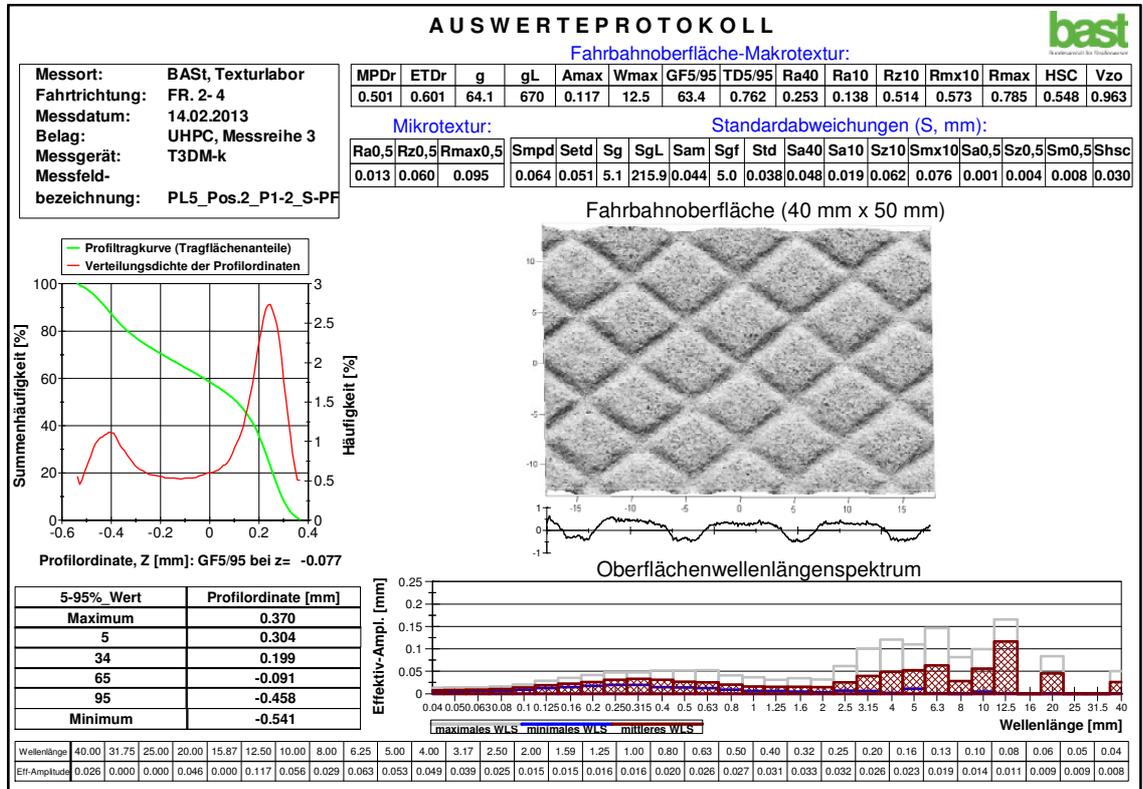


Nutzschicht M5; 13,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; in situ-Prägung mit Walze

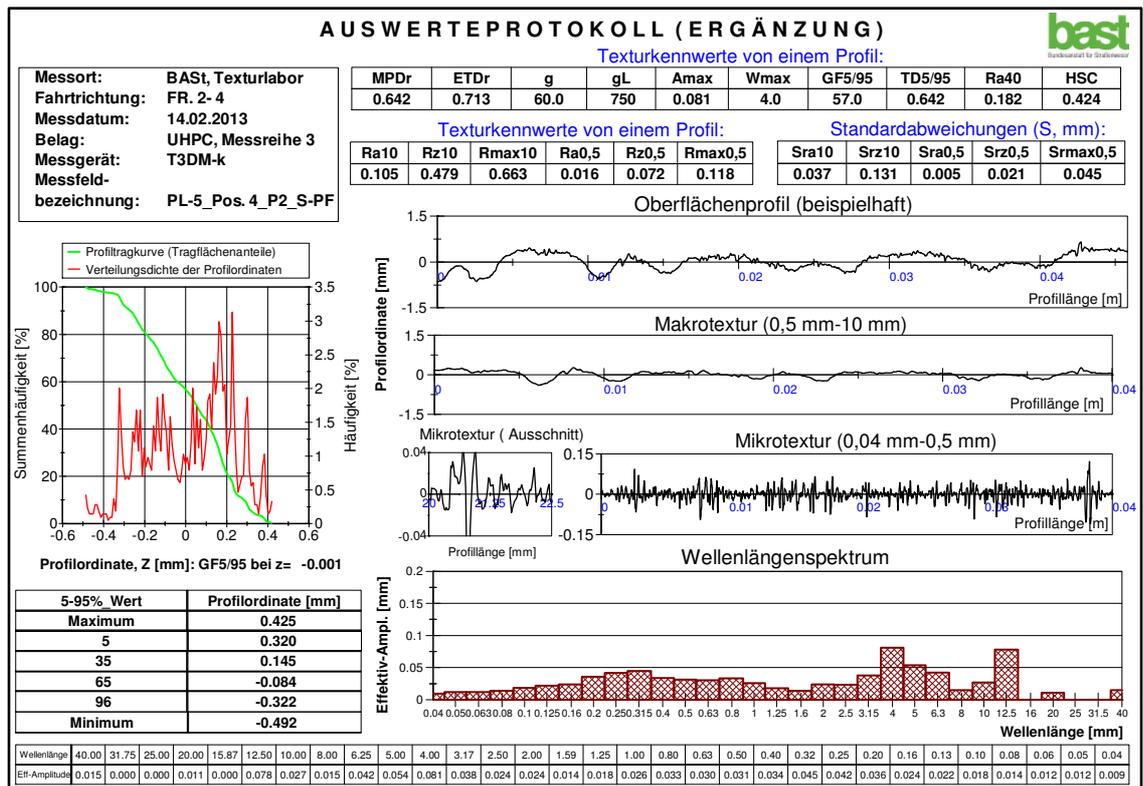
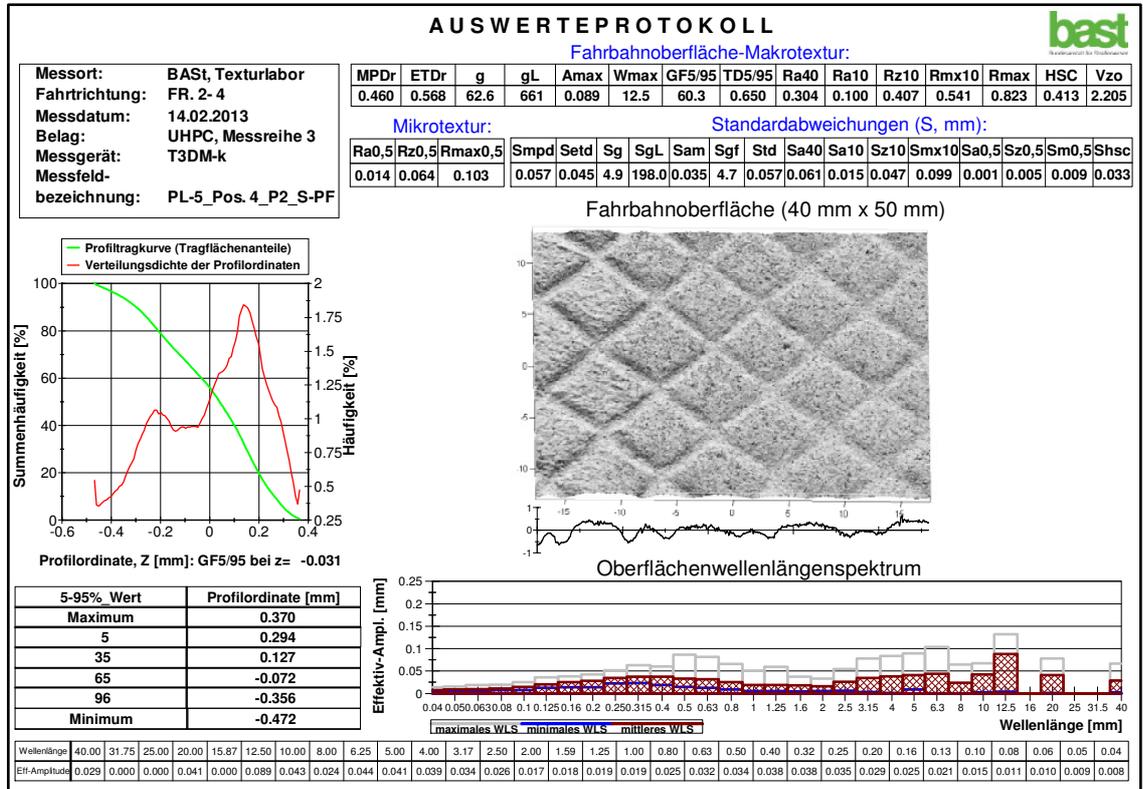


Anhang C – Messreihe 3:

Nutzschicht M5; 40,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 1; in situ-Prägung mit Walze



Nutzschicht M5; 40,5 x 10⁴ Überrollungen; Messfeld 2; in situ-Prägung mit Walze



Anhang D – Fotos – EBV in Braunschweig



Bild D1: Deckschichtmischung aus dem OAT Fahrmischer



Bild D2: Deckschichtmischung aus dem Holcim Doppelwellenzwangsmischer

Anhang D – Fotos – EBV in Braunschweig



Bild D3: Einbau der Deckschichtmischungen



Bild D4: Spaltzugprobekörper nach Prüfung (aus dem Doppelwellenzwangsmischer von Holcim; deutlich erkennbare Fasernester)

Anhang D – Fotos – Versuche auf kleinen Flächen



Bild D5: Verdichtung der Nuttschicht mit dem Innenrüttler

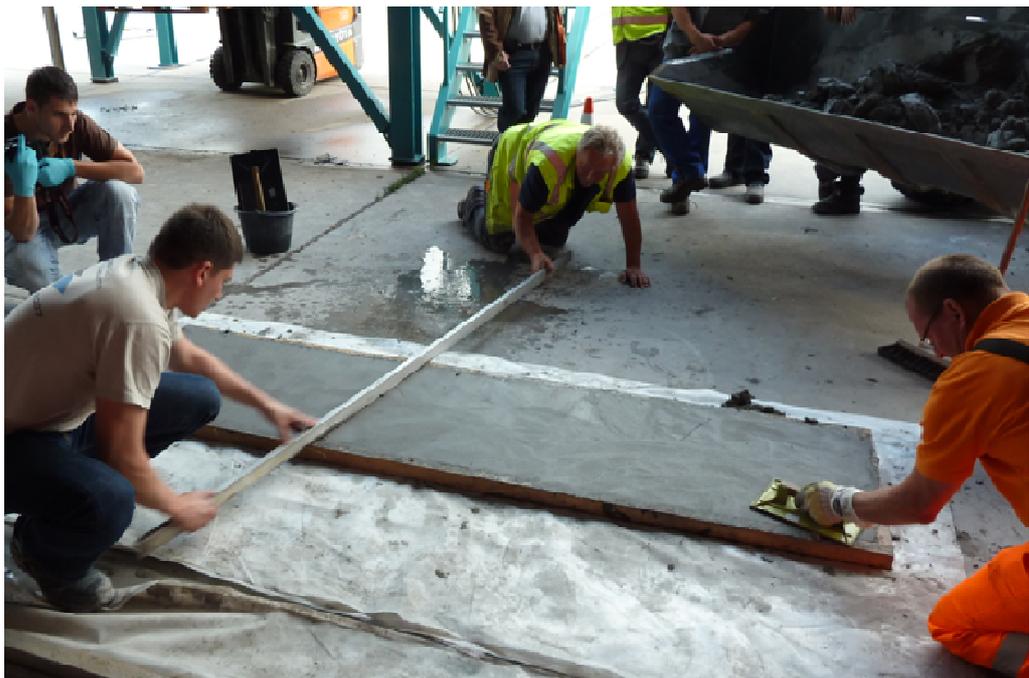


Bild D6: Abziehen der Probefläche / Vorbereitung zur Prägung

Anhang D – Fotos – Versuche auf kleinen Flächen



Bild D7: Prägung mit wassergefüllter Handwalze



Bild D8: geprägte Oberfläche

Anhang D – Fotos – Intensivmischer R15



Bild D9: Intensivmischer R15 (Nutzschicht)



Bild D10: Blick in den Mischtrog des R15 (Sternwirbler)

Anhang D – Fotos – Intensivmischer R28



Bild D11: Intensivmischer R28 (Deckenschicht)



Bild D12: Auslass Probemischung Deckschicht

Anhang D – Fotos – Vorbereitung EBV / Demonstratorbau März 2013

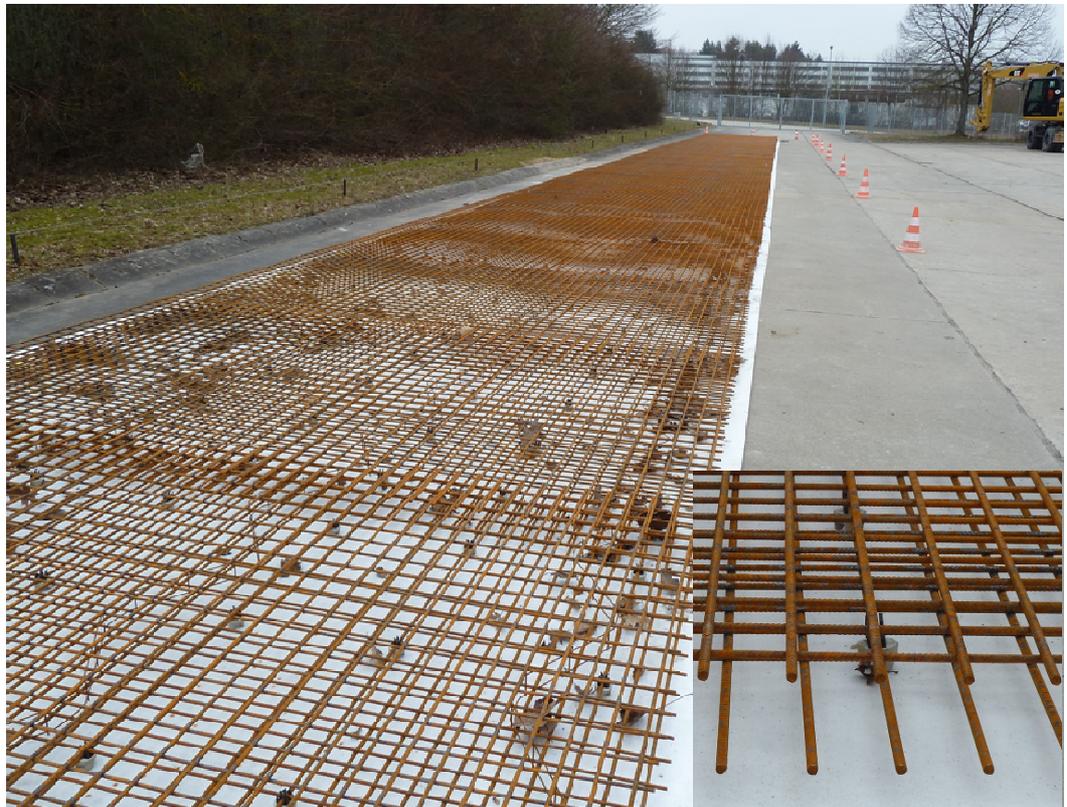


Bild D13: Bewehrungsmatten R 9,42/6,04 verlegt auf Vliesstoff (mit Abstandhalter)



Bild D14: Fertiger SP 500 der Eurovia

Anhang D – Fotos – Vorbereitung EBV / Demonstratorbau April 2013



Bild D15: Befüllen der Wechselsilos, Probelauf R28 (Deckschicht)



Bild D16: Probelauf R15 (Nutzschicht)

Anhang D – Fotos – Deckschichteinbau



Bild D17: Mischbeginn Deckschicht am 03.04.13
Versuchsstrecke im Vordergrund, Füllen des R28 im Hintergrund



Bild D18: Beginn des Deckschichteinbaus

Anhang D – Fotos – Deckschichteinbau



Bild D19: Deckschicht vor dem Verteilerschwert des SP 500



Bild D20: Übergang der Deckschichten nach ca. 30 m

Anhang D – Fotos – Deckschichteinbau



Bild D21: Mit Folie abgedeckte Deckschicht vom 03.04.13



Bild D22: Abziehen mit Jutetuch

Anhang D – Fotos – Nutzschieteinbau



Bild D23: Originalmischung M5 nur mit unzureichendem Deckenschluss einbaubar



Bild D24: anschließende Prägung mit stabiler Textur (Walzenbreite: je 1 m, Walzengewichte: je 74 kg + Zusatzgewichte 60 kg auf der rechten Spur und 80 kg auf der linken Spur)

Anhang D – Fotos – Nutzschieteinbau



Bild D25: Die geänderte Nutzschichtrezeptur (Erhöhung des Wassergehaltes um 3,5 M.-%) lässt sich mit dem Fertiger einbauen...



Bild D26: ... aber eine Prägung ist erst nach 90 min möglich (Abschnitt II).

Anhang D – Fotos – Nutzschieteinbau



Bild D27: Einbau der Nutzschichtrezeptur auf Abschnitt VI

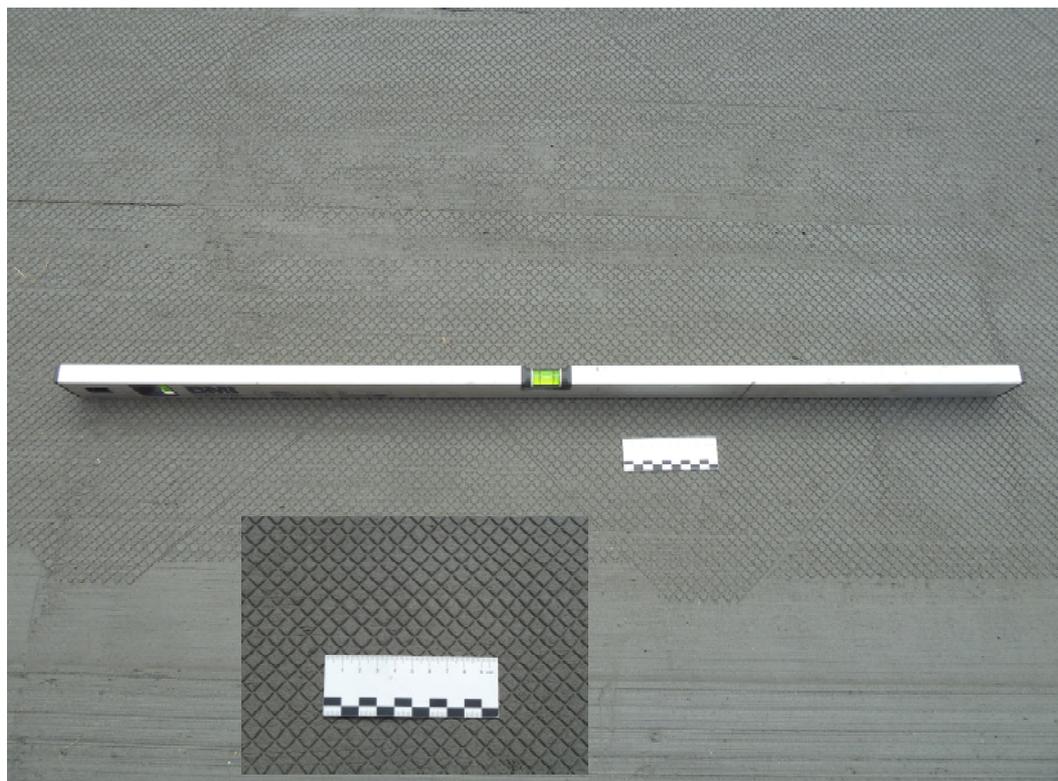


Bild D28: geprägter Bereich (Abschnitt VI)

Anhang D – Fotos – geprägte Abschnitte



Bild D29: Abschnitt II (geänderte Nuttschichtmischung; Erhöhung des Wassergehaltes um 3,5 M.-%)



Bild D30: Abschnitt IV (Original Nuttschichtmischung M5)

Anhang D – Fotos – PWC Löwenburg – Abschnitt 1



Bild D31: breiter Querriss mit zwei entnommenen Bohrkernen

Anhang D – Fotos – PWC Löwenburg – Abschnitt 1



Bild D32: Längsrisse ausgehend vom Querriss (nachgearbeitet und mit Bitumen verfüllt)



Bild D33: verzweigtes Rissbild

Anhang D – Fotos – PWC Löwenburg – Abschnitt 2



Bild D34: ausgeprägte Querrisse

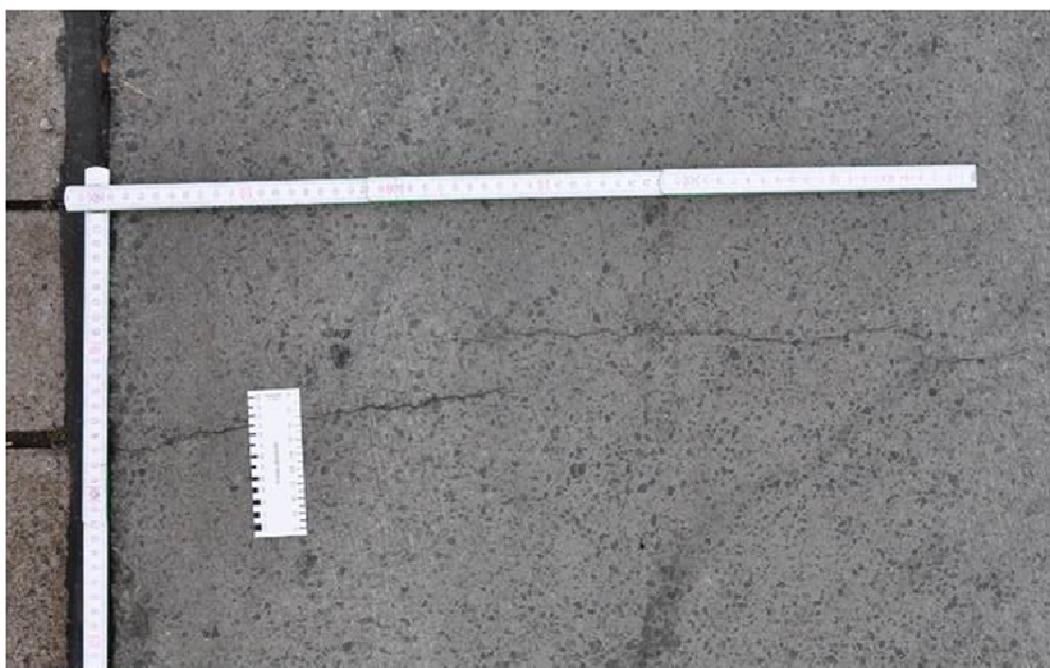


Bild D35: Querrisse z.T. mit Versatz

Anhang D – Fotos – PWC Löwenburg – Abschnitt 3



Bild D36: ausgeprägte Querrisse, z.T. nachgearbeitet und mit Bitumen verfüllt



Bild D37: Risse mit Bitumen verfüllt
(Bereich Handfeld)

Anhang E – FWD-Messungen Einbauversuch / Demonstratorbau 2013

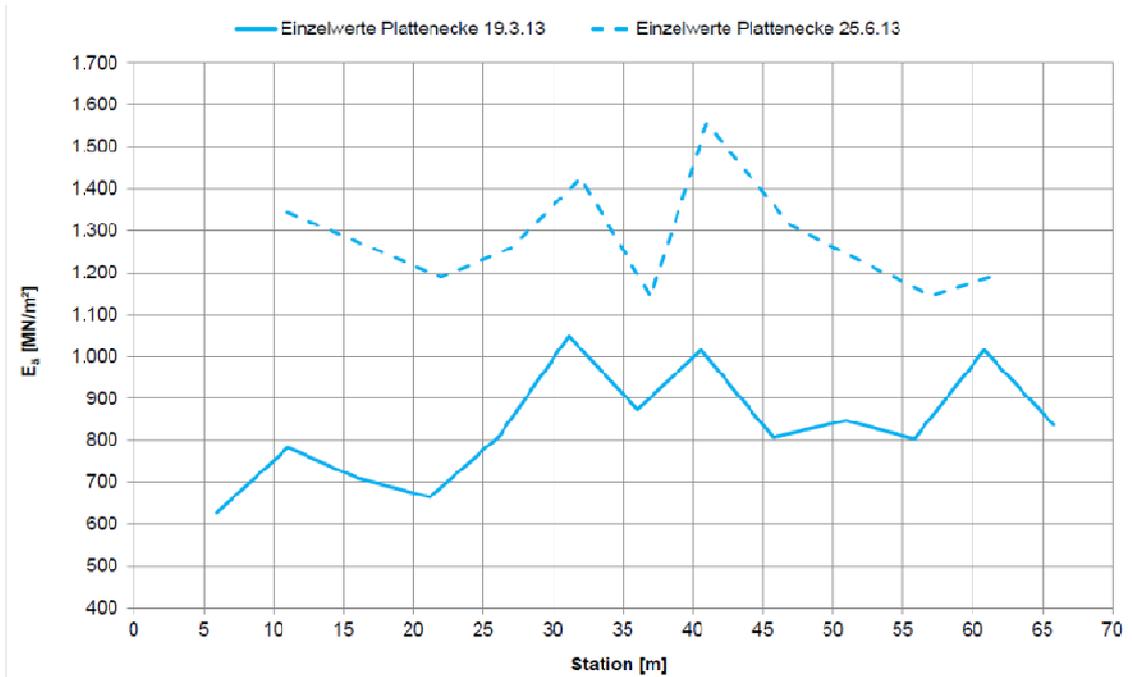


Bild E1: Äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m^2] auf OK Fahrbahn der mittleren Plattenreihe, Plattenecke

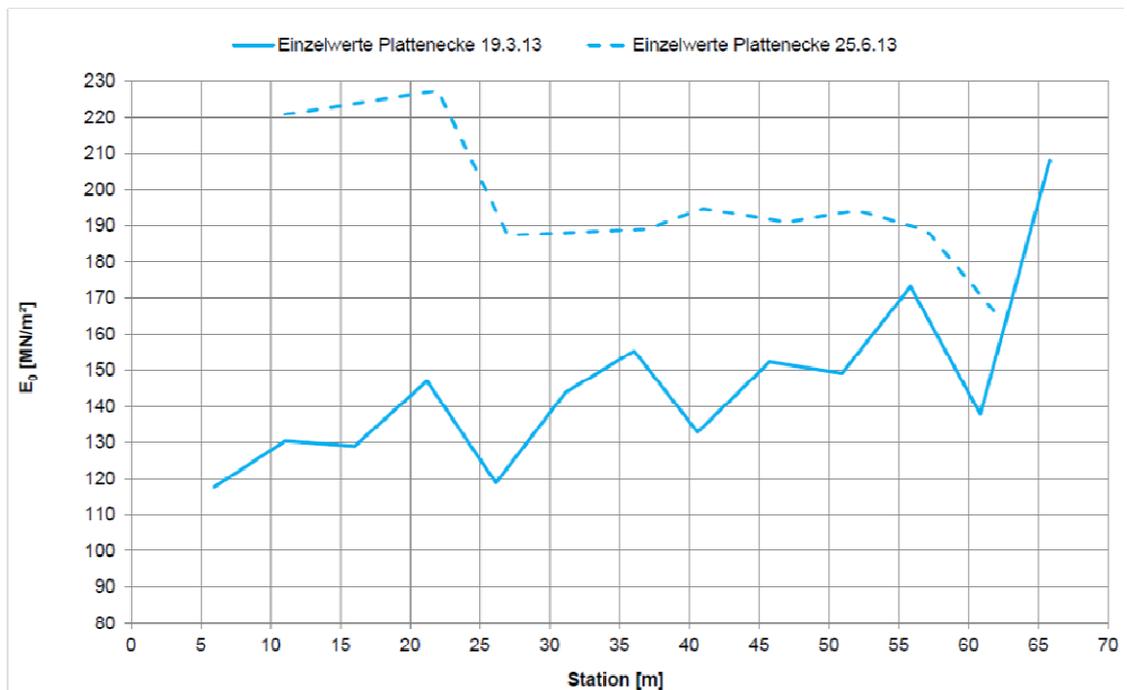


Bild E2: Bettungsmodul E_0 [MN/m^2] der mittleren Plattenreihe, Plattenecke

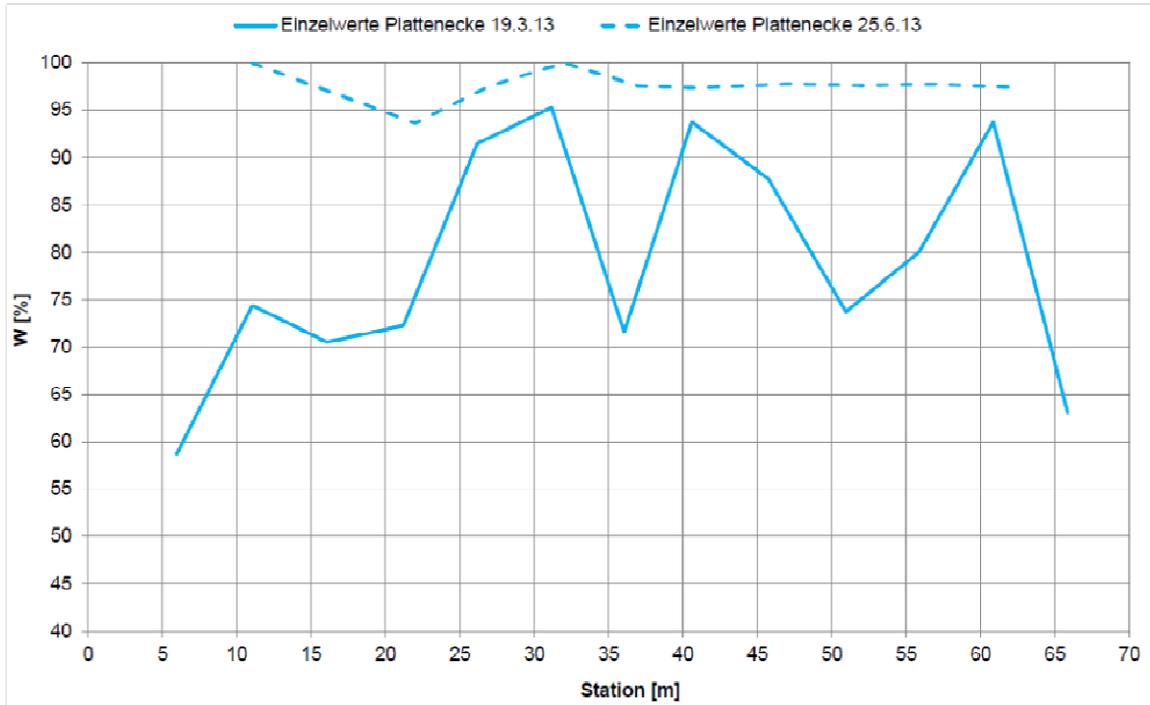


Bild E3: Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] der mittleren Plattenreihe, Plattenecke

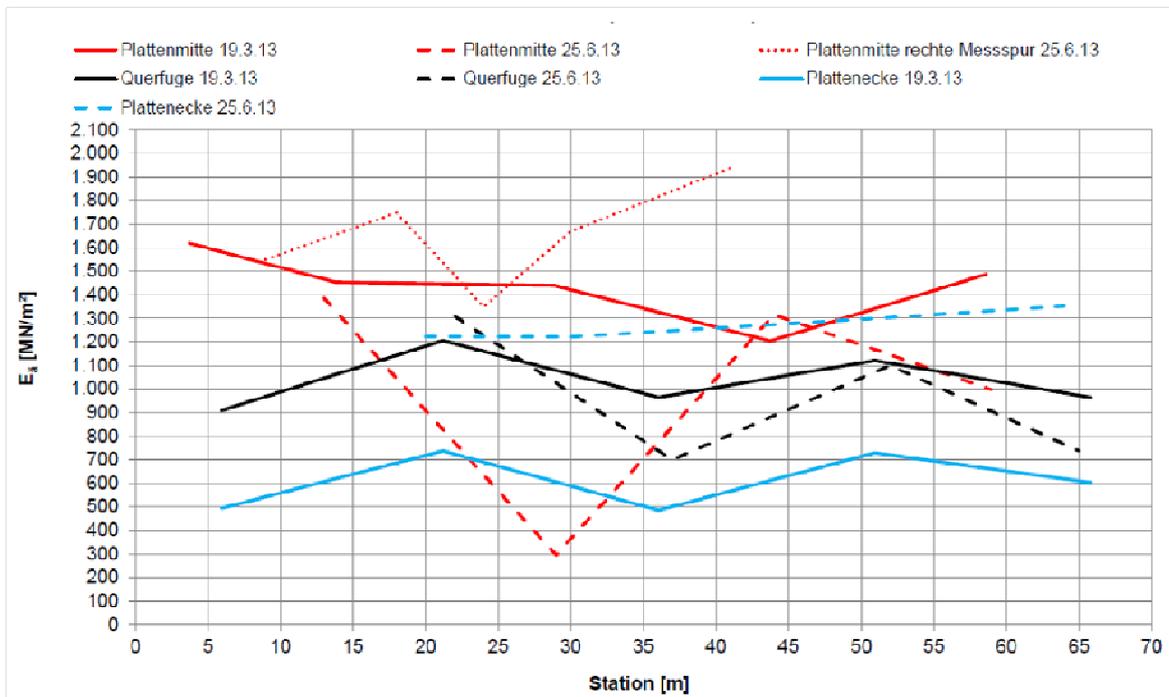


Bild E4: Äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn der linken Plattenreihe in Fahrtrichtung Tor (15 m lange Platten)

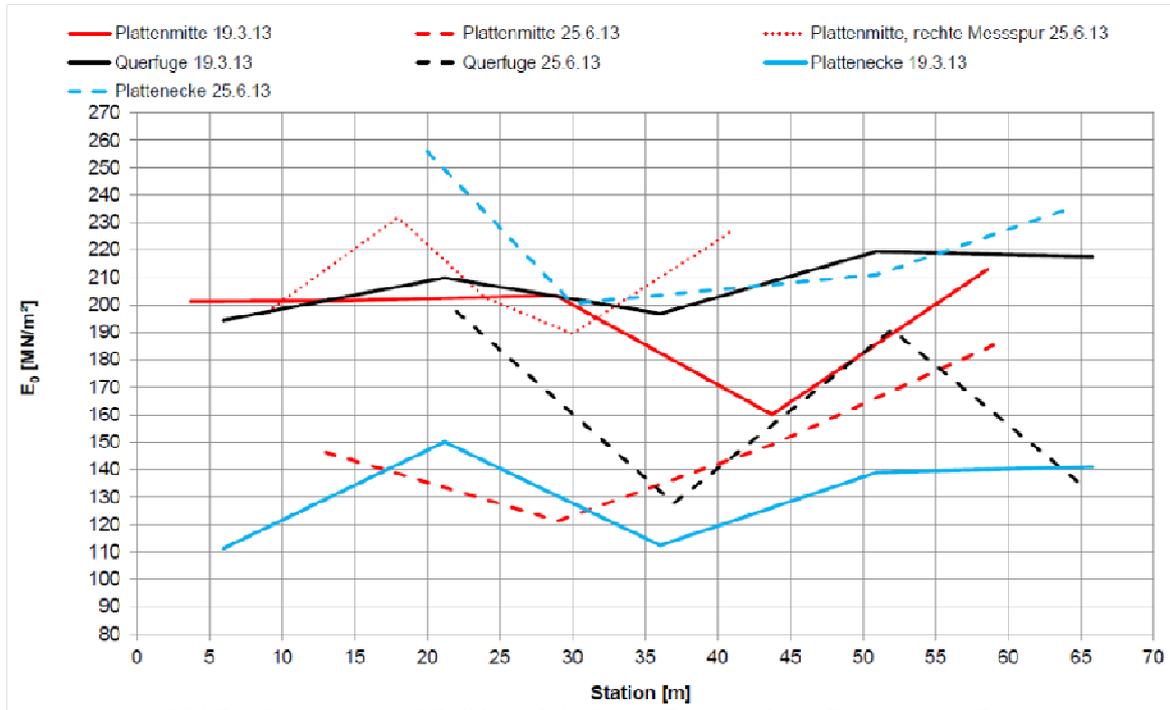


Bild E5: Bettungsmodul E_0 [MN/m²] der linken Plattenreihe in Fahrrichtung Tor (15 m lange Platten)

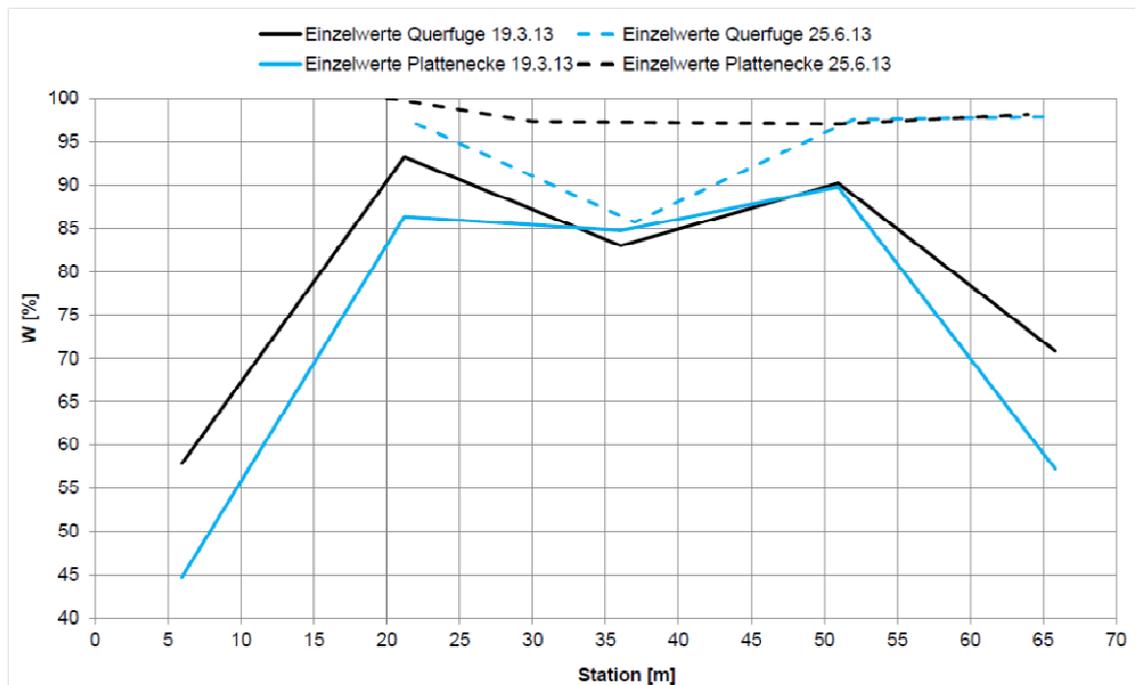


Bild E6: Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] der linken Plattenreihe in Fahrrichtung Tor (15 m lange Platten)

Anhang F – FWD-Messungen HPC-Versuchsstrecke „PWC Löwenburg“

Abschnitt 1 von Bau km 46+100 bis km 121+100, Länge: 75 m

8 cm HPC auf 300 g/m² U60K auf 18 cm BTS auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m²)

Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Plattenmitte des Unterbetons
2,5	1M
7,5	2M
12,5	3M
17,5	4M
22,5	5M
27,5	6M
32,5	7M
37,5	8M
42,5	9M
47,5	10M
52,5	11M
57,5	12M
62,5	13M
67,5	14M
72,5	15M
Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Querfuge des Unterbetons
5	1F Querfuge am 28.08.2008 noch nicht gerissen
10	2F Querfuge am 28.08.2008 mit großer Rissöffnung
15	3F
20	4F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss
25	5F Querfuge am 28.08.2008 mit großer Rissöffnung
30	6F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss (Querriss im Oberbeton)
35	7F
40	8F
45	9F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss
50	10F
55	11F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss
60	12F
65	13F
68,5	13Fa (Querfuge im Oberbeton)
70	14F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss
75	15F Raumfuge

Bild F1: Lage der Messpunkte auf der HPC-Versuchsstrecke, Abschnitt 1

Abschnitt 2 von Bau km 121+100 bis km 196+100, Länge: 75 m

8 cm HPC verankert auf 18 cm Betontragschicht auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m²)

Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Plattenmitte des Unterbetons
77,5	16M
82,5	17M
87,5	18M
92,5	19M
97,5	20M
102,5	21M
107,5	22M
112,5	23M
117,5	24M
122,5	25M
127,5	26M
132,5	27M
137,5	28M
142,5	29M
147,5	30M
Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Querfuge des Unterbetons
80	16F Querfugen- am 28.08.2008 Haarriss
85	17F
90	18F Querfuge am 28.08.2008 noch nicht gerissen
95	19F
100	20F
105	21F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
110	22F
115	23F (breiter Querriss im Oberbeton)
120	24F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
125	25F
130	26F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
135	27F
140	28F
145	29F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
150	30F Raumfuge

Bild F2: Lage der Messpunkte auf der HPC-Versuchsstrecke, Abschnitt 2

Abschnitt 3 von Bau km 196+100 bis km 271+100, Länge: 75 m

6 cm UHPC verankert auf 20 cm Betontragschicht auf 39 cm FSS 0/45 (120 MN/m²)

Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Plattenmitte des Unterbetons
152,5	31M
157,5	32M
162,5	33M
167,5	34M
172,5	35M
177,5	36M
182,5	37M
187,5	38M
192,5	39M
197,5	40M
202,5	41M
207,5	42M
212,5	43M
217,5	44M
222,5	45M
Abstand von BA [m]	Anlage Messpunkt Querfuge des Unterbetons
155	31F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
160	32F
165	33F
170	34F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
175	35F
180	36F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
185	37F (Querriss im Oberbeton)
190	38F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss (Querriss im Oberbeton)
195	39F (Querriss im Oberbeton)
200	40F Querfuge am 28.08.2008 noch nicht gerissen
205	41F
210	42F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
215	43F
220	44F Querfugen am 28.08.2008 Haarriss
225	45F (Ende Abschnitt 3)

Bild F3: Lage der Messpunkte auf der HPC-Versuchsstrecke, Abschnitt 3

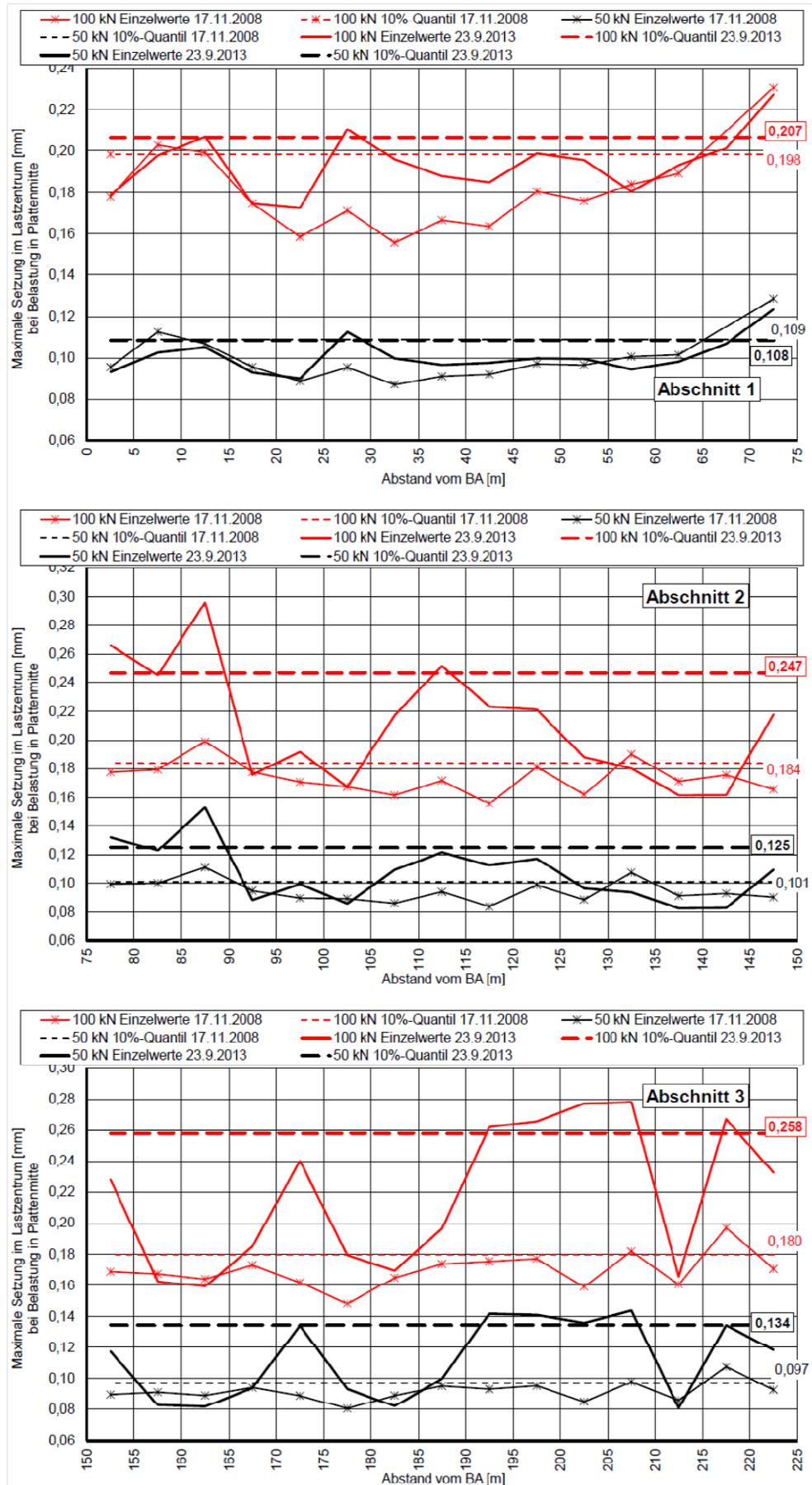


Bild F4a bis F4b: Maximale Deflexion im Lastzentrum in Plattenmitte

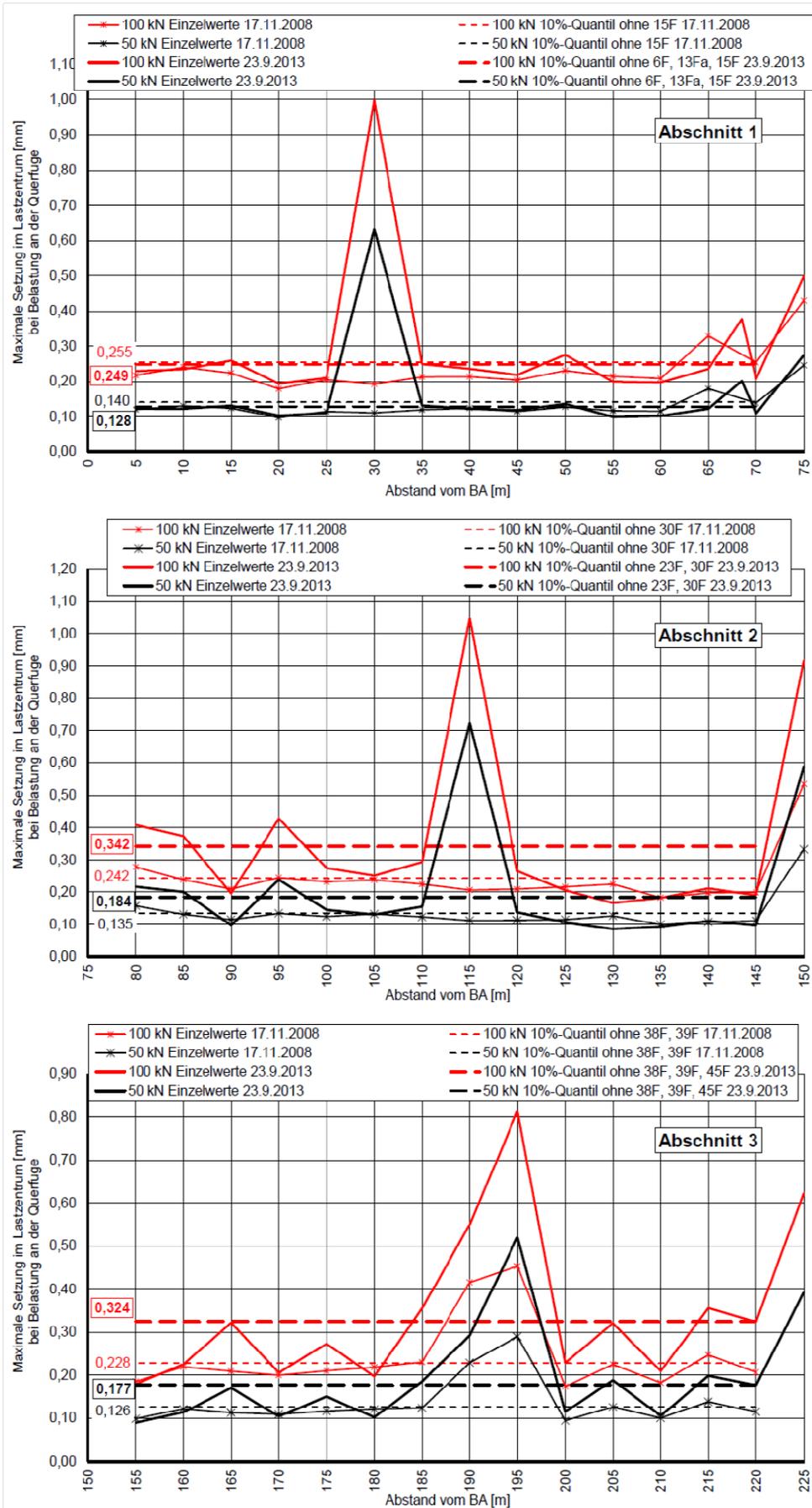


Bild F5a bis F5c: Maximale Deflexion im Lastzentrum bei Belastung an der Querfuge

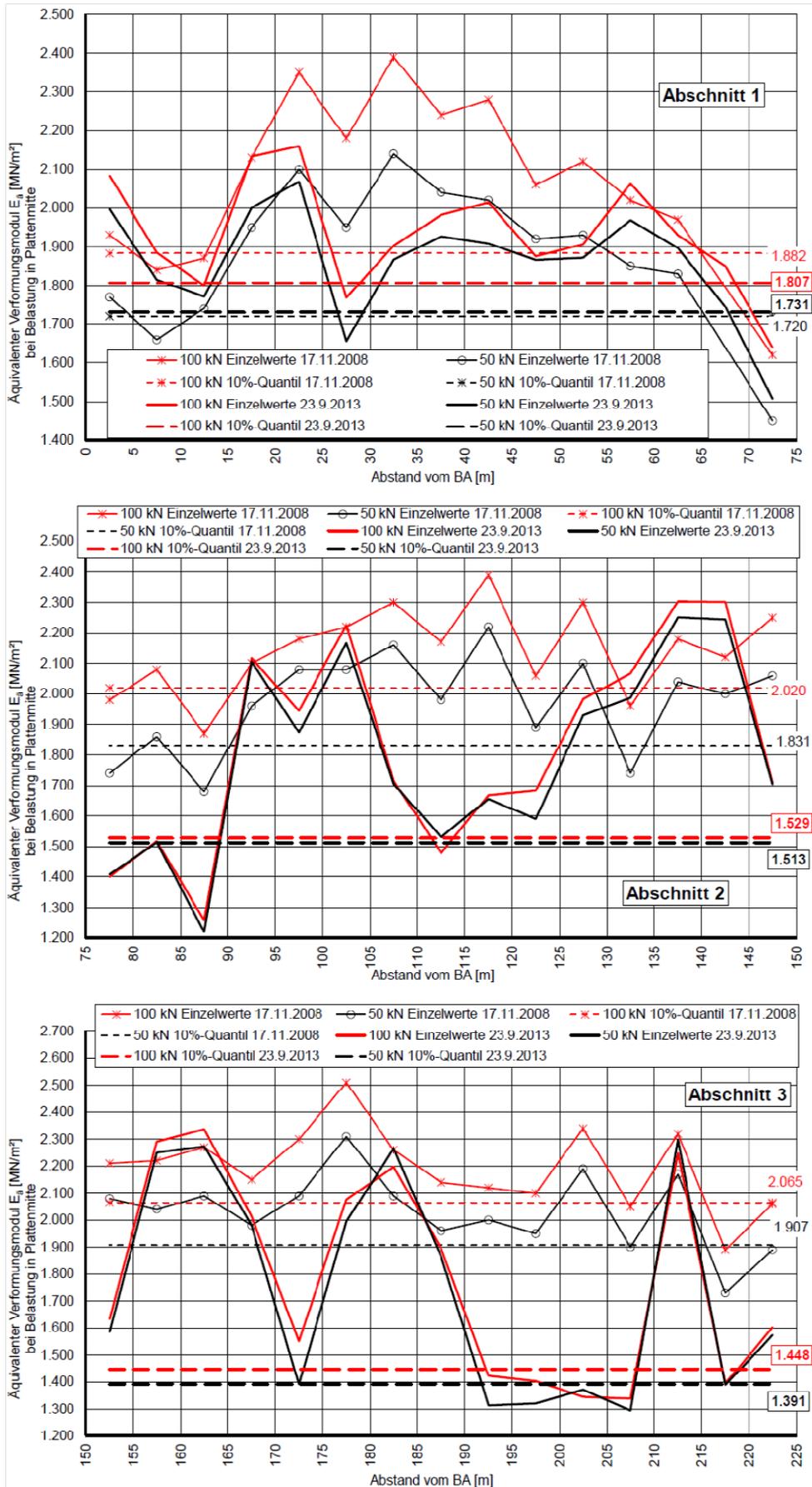


Bild F6a bis F6c: Äquivalenter Verformungsmodul im Lastzentrum in Plattenmitte

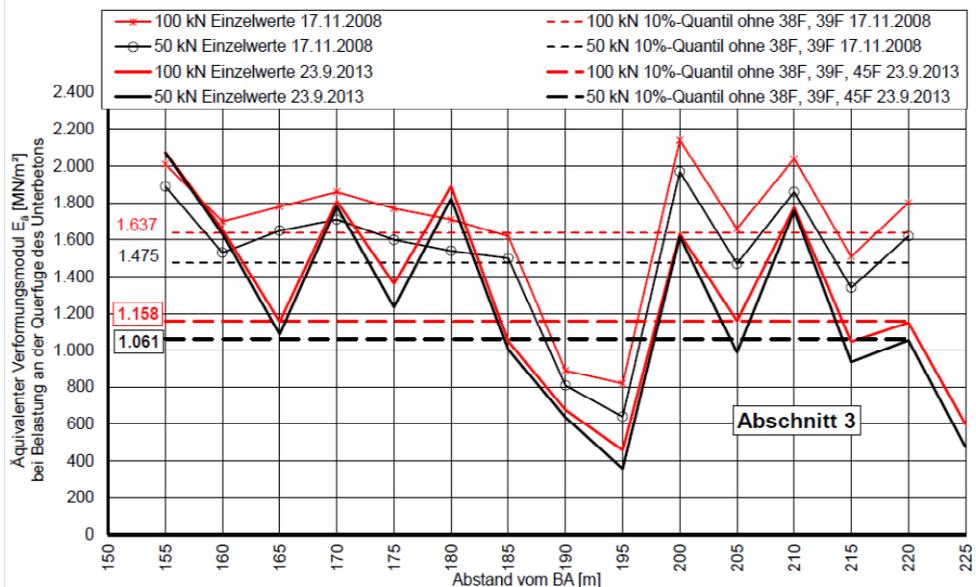
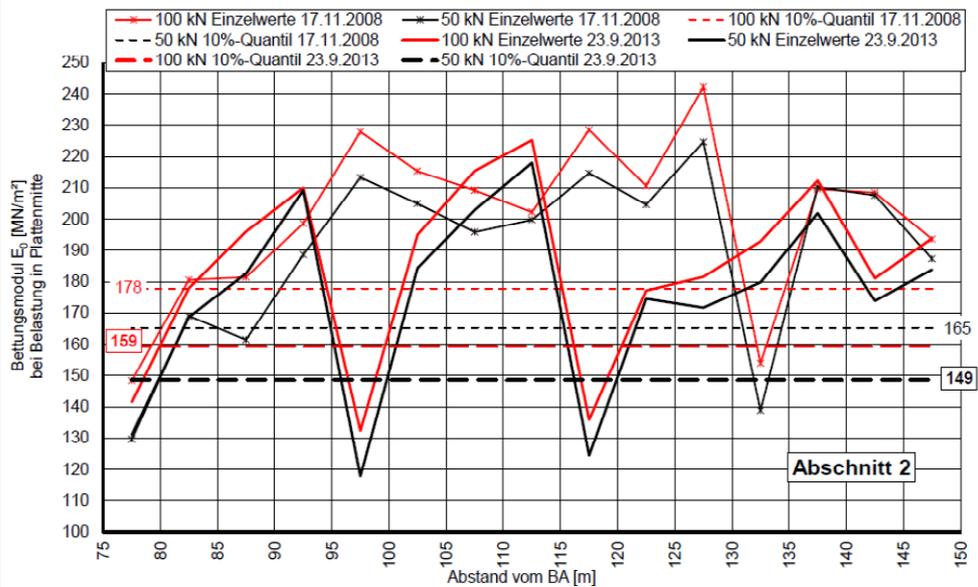
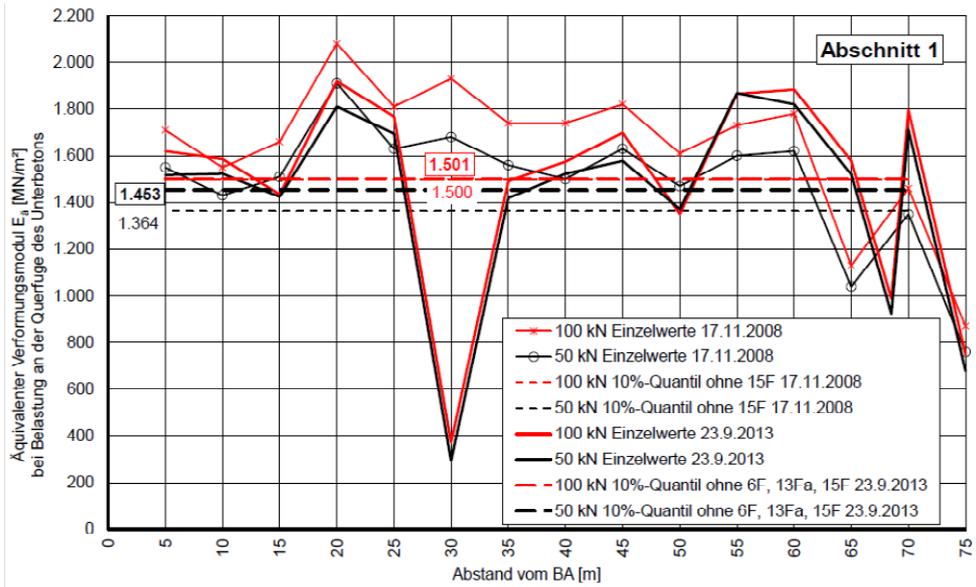


Bild F7a bis F7c: Äquivalenter Verformungsmodul bei Belastung an der Querfuge

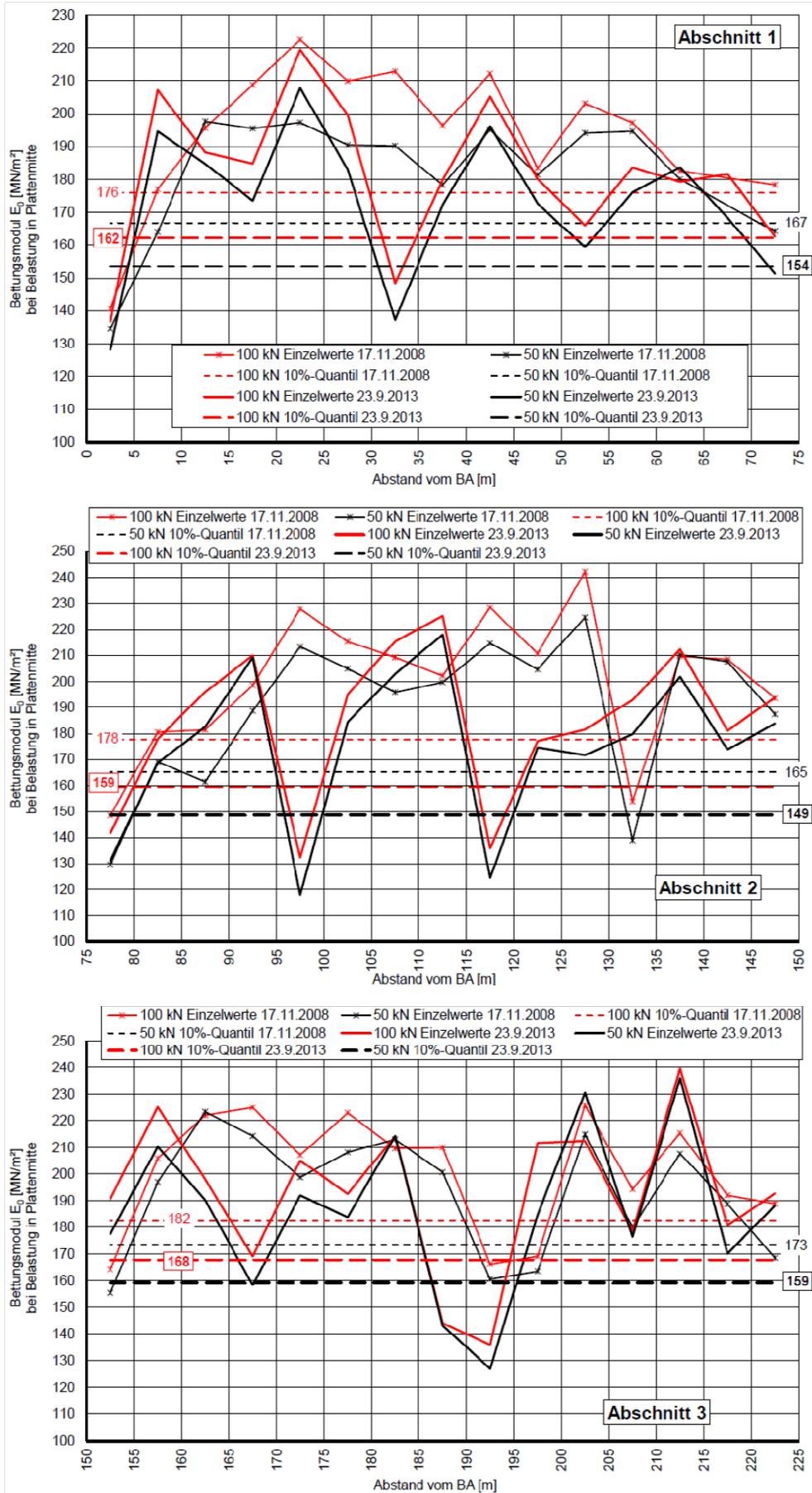


Bild F8a bis F8c: Bettungsmodul im Lastzentrum in Plattenmitte

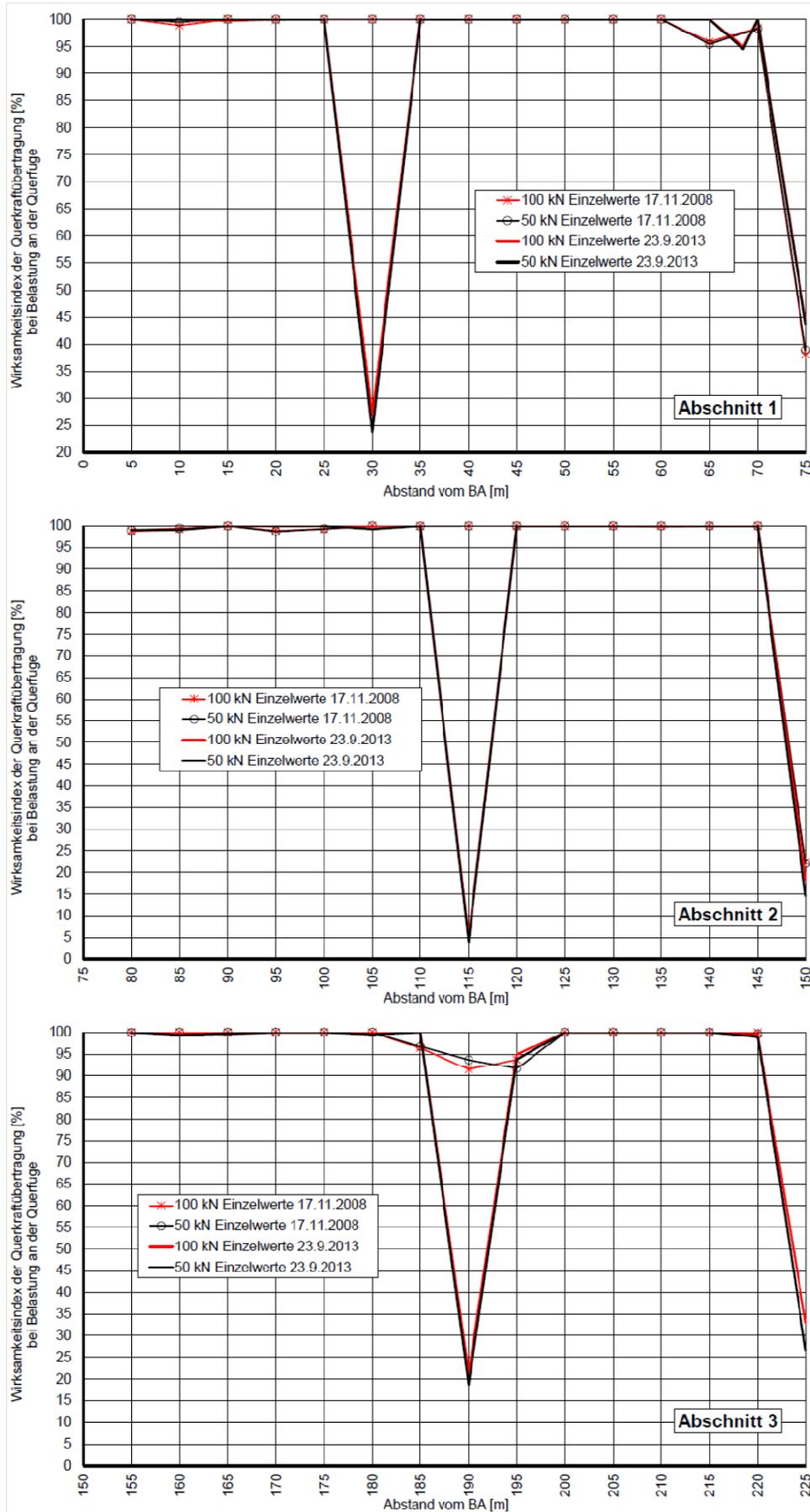


Bild F9a bis F9c: Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung an der Querfuge