

Abbildung 89: Einsetzen der Fertigteile

Nach dem Ausbau des Altbetons (Abbildung 87) wurden die Fertigteile auf der Baustelle angeliefert (Abbildung 88) und in die entsprechenden Positionen eingesetzt (Abbildung 89). Die Fertigteile wurden lagemäßig ausgerichtet und sollten anschließend in der Höhe justiert werden. Die verwendeten Auflagerstahlplatten waren jedoch zu schwach dimensioniert und es kam zum Durchstanzen der Justierschrauben (Abbildung 90).



Abbildung 90: durch den Bolzen des Höhenjustiersystems durchstanzte dünne Stahlplatte

Daraufhin mussten alle Fertigteilplatten wieder herausgehoben werden und stärkere Platten untergelegt werden. Ebenfalls erfolgte die Herstellung der Anschlussfuge für die Messensorik, welche wie auch bei den kreisrunden Fertigteilen durch Brunnenschaum geschützt wurde. Nach erfolgter Unterpressung mit Silikatharz wurden die Arbeiten beendet. Am Mittwoch rollte bereits der Verkehr über die hergestellten Fertigteile.

Da die Montage in 2 Bauabschnitten stattfand, in denen jeweils 3 Fertigteile verlegt wurden, wurde die unvergossene 4 cm Nut mit der Verkehrsbelastung beaufschlagt. Trotz Einlage von XPS Platten kam es zu einem Bruch der Nut auf der Länge von ca. 1,20 m (siehe Abbildung 91). Die Ursache für den Abbruch konnte nicht schlüssig ermittelt werden. Der Abbruch wurde fachgerecht saniert (siehe Abbildung 92).



Abbildung 91: Schadstelle im Fertigteil



Abbildung 92: Mit Reparaturmörtel reparierte Schadstelle im Fertigteil

Für künftige Projekte lassen sich aus dem Sachverhalt aber folgende Empfehlungen erkennen: Ist eine Maßnahme nur mit verschiedenen Bauabschnitten mit Zwischenverkehrsbelastung möglich, ist eine offene Nut am Übergang der Bauabschnitte zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sollte bereits im Betonfertigteilwerk ein ausreichend tragfähiger Füllkörper in der betroffenen Nut verbaut werden. Die hinsichtlich der übertragenen Kräfte als gleichwertig anzusehende 3 cm tiefe Nut ist weniger bruchgefährdet und daher vorzuziehen.

In der folgenden Nacht erfolgten wiederum das problemlose Herausnehmen der einzelnen Teile des Altbetons (Abbildung 93) und das Verlegen der restlichen drei Fertigteil-Platten. Durch die vorhandene leichte Kurve mussten die Platten mehrmals ausgerichtet werden. Die Kopplung des letzten Fertigteiles zum Bestand erfolgte in diesem Fall mit dem System Dübel/Dübelkammer. Die Dübelkammern waren bereits im Fertigteil vorgesehen (Abbildung 94, rechts). Die Dübel wurden in gebohrten Dübellöchern im Bestand eingeklebt (Abbildung 94, links).

Nach erfolgter Höhenjustierung erfolgte das Unterpressen der Fertigteile (Abbildung 95) und im Anschluss die Instandsetzung der Nut mittels schnellhärtendem Reparaturmörtel. Der Fugenverguß wurde um alle eingesetzten Fertigteile noch in derselben Nacht hergestellt. Die Verkehrsfreigabe erfolgte um ca. 06.00 Uhr. Abbildung 96 zeigt die verlegten Fertigteile vor der Verkehrsfreigabe.



Abbildung 93: Einbaustelle und Anlieferung



Abbildung 94: Übergang zum Bestand mit Dübel/Dübelkammern



Abbildung 95: Fertigteile beim Unterpressen



Abbildung 96: Fertigteile nach dem Einbau

8.4 Fertigteile für den Verschluss von Bohrlöchern

8.4.1 Planung und Herstellung der Fertigteile

Für Versuche zum Verschließen von Bohrlöchern mittels Fertigteilen musste eine geeignete Vorgehensweise gefunden werden, um diese im Bohrloch auszurichten, zu justieren und die Hohlräume verfüllen zu können. Letztendlich entschied man sich dazu, die Fertigteile an einer Justiereinrichtung zu fixieren, die an drei Punkten um das Fertigteil herum in Bezug zur angrenzenden Oberfläche ausgerichtet werden kann.

Für die Versuche wurden Fertigteile mit den Durchmessern 98 mm und 146 mm vom Forschungspartner Stelcon hergestellt und an die Firma Otto Alte-Teigeler geliefert.

Eine Halterung für die Fertigteile wurde durch die Firma Otto Alte-Teigeler hergestellt. Auf einer vorhandenen Baustelle auf der BAB A7 bei Hildesheim, Bereich km 185+200 bis 183+750 mussten acht Bohrkerne mit DU 150 mm gezogen werden. Diese Maßnahme bot sich an, um den Verschluss mit den Fertigteilen zu testen.

8.4.2 Einbauversuche

Am 14.11.2018 wurde der Versuch zum Bohrlochverschluss mittels Fertigteil durchgeführt. Die Bohrungen wurden im Voraus durchgeführt. Bei trockener aber kühler Witterung wurden am Einsatztag die Bohrkerne gezogen, die Bohrlöcher händisch gereinigt und die Tiefe ermittelt. Die FT wurden bei Bedarf entsprechend gekürzt. Dies erfolgte mit einem Trennjäger. Bei Bohrlöchern, die eine größere Tiefe als die 25 cm Länge der FT aufwiesen, wurde zum Auffüllen grobe Gesteinskörnung verwendet. Die FT wurden in das Bohrloch gesetzt und

ausgerichtet. Das Silikatharz zur dauerhaften Fixierung der FT wurde manuell angerührt (Abbildung 97) und in den Hohlraum gefüllt (Abbildung 98). Nach Aushärtung des Harzes konnte die Montagehilfe entfernt und für das nächste Bohrloch verwendet werden. Auf diese Weise konnten innerhalb eines Tages alle Bohrlöcher mit qualitativ hochwertigen Betonfertigteilen verschlossen werden. Es ist zu erwarten, dass diese Variante des Bohrlochverschlusses wesentlich dauerhafter ist, als dies die bisher üblichen Vorgehensweisen mit Kaltasphalt oder Auffüllen mit losem Material und Verschluss der obersten cm mit einem Betonersatzstoff.



Abbildung 97: Anrühren des Silikatharzes



Abbildung 98: Einfüllen des Silikatharzes

9 MESSTECHNISCHE ÜBERWACHUNG

An den eingebauten Demonstratoren wurden im Zuge des Projekts mehrere Messungen durchgeführt. So wurde die Einbaugenauigkeit mit dem mobilen Straßenzustandserfassungslabor RoadSTAR erfasst und Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) durchgeführt. Über einen längeren Zeitraum wurden außerdem noch mechanische Kennwerte und Temperaturen mit faseroptischen Sensoren an mehreren Stellen in zwei versetzten Fertigteilen einem Monitoring unterzogen. Mit diesen Sensoren sollen über die Messungen Rückschlüsse auf die Tragwirkung sowie dynamische Effekte erfolgen, um die numerischen Berechnungen validieren zu können.

9.1 FWD-Messergebnisse

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit sowohl im Bereich der Fertigteile als auch der angrenzenden Betondecke waren Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) vorgesehen. Die Messungen erfolgten bei den Demonstratoren jeweils vor dem Einbau der Fertigteile sowie direkt nach dem Einbau. Die Messungen beim Probefertigteil wurden hingegen ca. 1 Jahr nach dem Einbau durchgeführt.

Die Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer erfolgten nacheinander mit einer Stoßbelastung von 50 kN, 75 kN und 100 kN in Plattenmitte, an den Querfugen und Plattenecken des Altbetons sowie an verschiedenen Messpunkten auf den Fertigteilen.

Die Auswertung der FWD-Messergebnisse führte zur Ermittlung des äquivalenten Verformungsmoduls E_a auf OK Beton, des Bettungsmoduls E_0 und des Wirksamkeitsindex' der Querkraftübertragung sowie der Relativdeflexion an den Querfugen und Plattenecken unter Berücksichtigung der jeweils wirksamen Schichtdicke der Befestigung.

Bei den Auswertungen wurden die gemessenen Deflexionen auf die jeweilige Stoßbelastung von 50 kN, 75 kN und 100 kN umgerechnet und aus den dargestellten Deflexionsmulden folgende Parameter ermittelt:

- Aus der Deflexion im Lastzentrum berechneter äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Beton nach Gleichung (19).
- Aus der Deflexion in 1,8 m Abstand vom Lastzentrum berechneter Bettungsmodul E_0 [MN/m²] unter der gebundenen Befestigung.

- Aus $E_{\bar{a}}$ und E_0 mithilfe der Zweischichttheorie berechneter Schichtmodul E_1 der gebundenen Befestigung.

Der Schichtmodul E_1 hängt wesentlich von der Schichtdicke ab. Da die Berechnung mit einer durchschnittlichen Schichtdicke vorgenommen wurde, die von der an dem jeweiligen Messpunkt vorhandenen tatsächlich wirksamen Dicke abweichen kann, ergeben sich zwangsläufig für diesen Kennwert größere Toleranzen als für die Gesamttragfähigkeit $E_{\bar{a}}$ und den Bettungsmodul E_0 . Diese Toleranzen sind aber ohne größere praktische Bedeutung, da der Schichtmodul nur als Orientierungswert dient.

- Aus der Relativdeflexion benachbarter Platten berechneter Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung an der Querfuge, Plattenecke und Anschlussfuge W [%].

Der äquivalente Verformungsmodul $E_{\bar{a}}$ wird mithilfe von Gleichung (19) berechnet:

$$E_{\bar{a}} = \frac{2 * (1 - \mu_0^2) * F}{\pi * a * s_{\max}} \quad (19)$$

mit

Poissonzahl $\mu = 0,35$

Radius der Belastungsfläche $a = 150$ mm

Maximale Stoßkraft $F = 50.000$ N bzw. 75.000 N bzw. 100.000 N

Maximale Deflexion im Lastzentrum s_{\max} [mm]

Aus den Prüfprotokollen ist ersichtlich, dass die Höhe der Stoßkraft keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Tragfähigkeitskennwerte $E_{\bar{a}}$, E_0 , E_1 und W hat.

Die Auswertung erfolgt daher für die jeweiligen Mittelwerte aus den bei den drei Stoßkräften berechneten Parametern.

Orientierungswerte für diese Tragfähigkeitskennwerte sind im Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil C 2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen – Betonbauweise – AP Trag Teil C 2.2 [AP FWD] angegeben.

Für Betonbefestigungen auf hydraulisch gebundenen Tragschichten betragen beispielsweise für die Belastungsklasse Bk 100 der äquivalente Verformungsmodul in Plattenmitte mindestens $E_{\bar{a}M\min} = 1.700$ MN/m² und der Bettungsmodul mindestens $E_{0M\min} = 130$ MN/m².

An der Querfuge betragen die Orientierungswerte bei positivem Temperaturgradienten dementsprechend mindestens $E_{\text{äRmin}} = 1.550 \text{ MN/m}^2$ und der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung mindestens $W_{\text{min}} = 89 \%$.

9.1.1 Probefertigteil

Die FWD-Messungen wurden am 21.8.2018 von 20:40 Uhr bis 21:30 Uhr auf der A 1 bei km 146,240 ein Jahr nach dem Einbau des kreisförmigen Probefertigteiles durchgeführt.

Die insgesamt 30 FWD-Messungen (Messpunkte siehe Abbildung 99) erfolgten durch die Hochschule Anhalt, Fachbereich 3, Forschungsgruppe Straßenbau mit dem Falling Weight Deflectometer, Typ SN 0411-103.

Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der FWD-Messungen zwischen 26,0°C und 27,0°C.

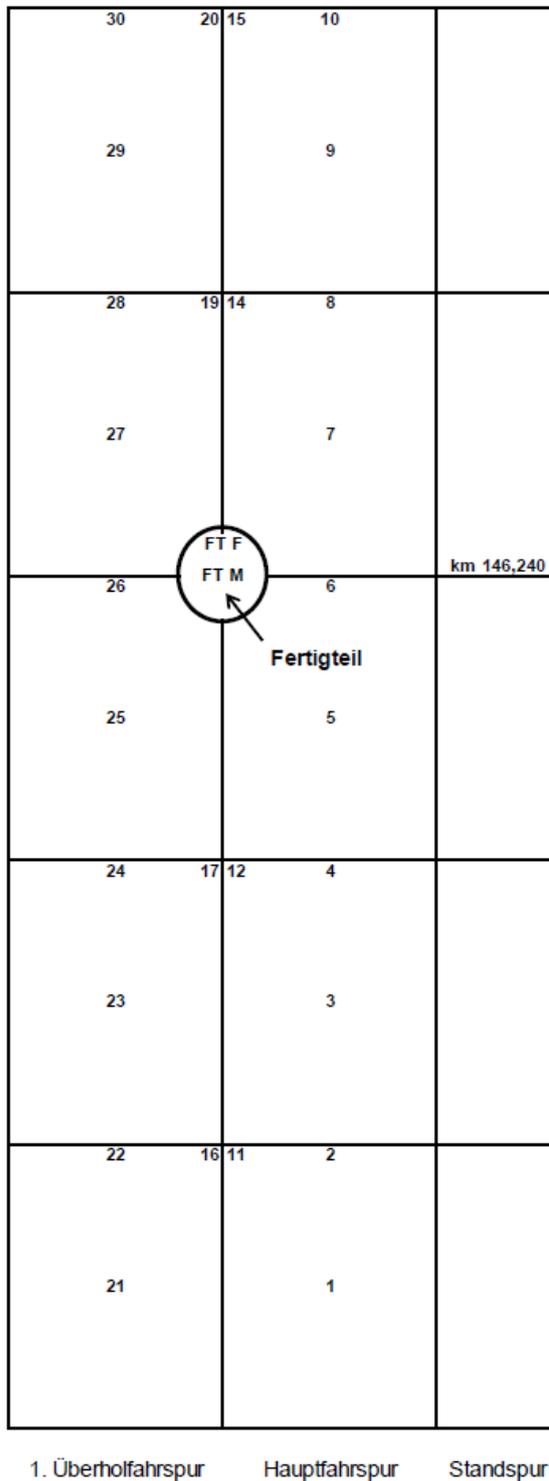


Abbildung 99: FWD-Messpositionen 1 bis 30 sowie FT M und FT F

In Abbildung 100 bis Abbildung 103 sind zur Veranschaulichung der Messergebnisse die Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls $E_{\text{ä}}$, des Bettungsmoduls E_0 und des

Wirksamkeitsindex' der Querkraftübertragung sowie der Relativdeflexion einander gegenübergestellt.

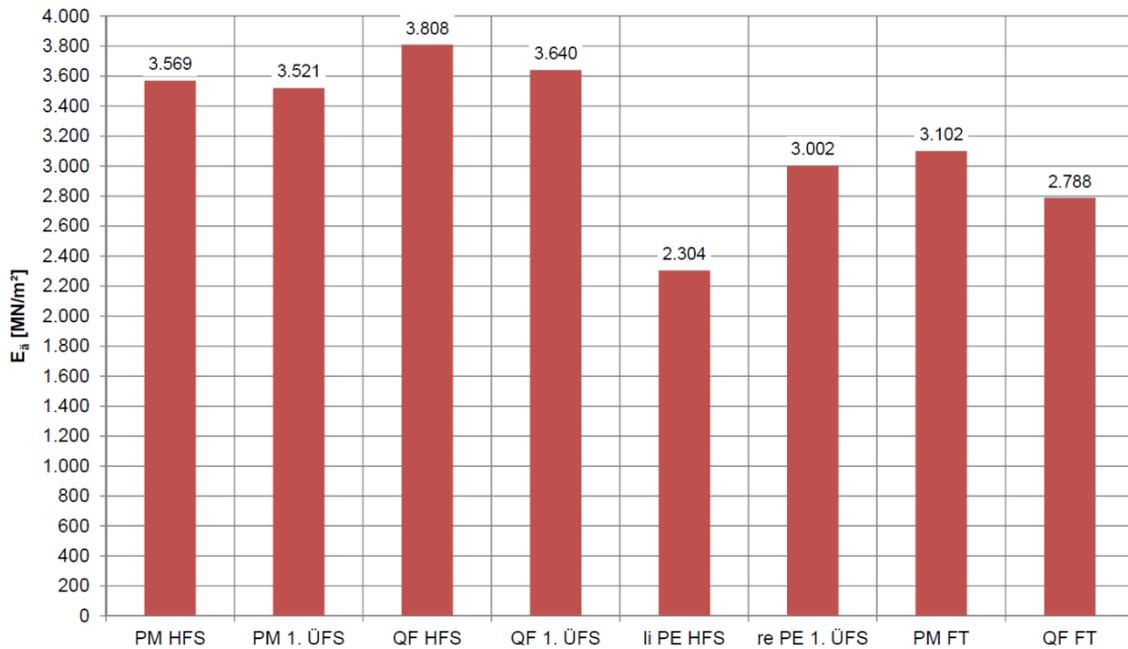


Abbildung 100: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a auf OK Fahrbahn [MN/m²]

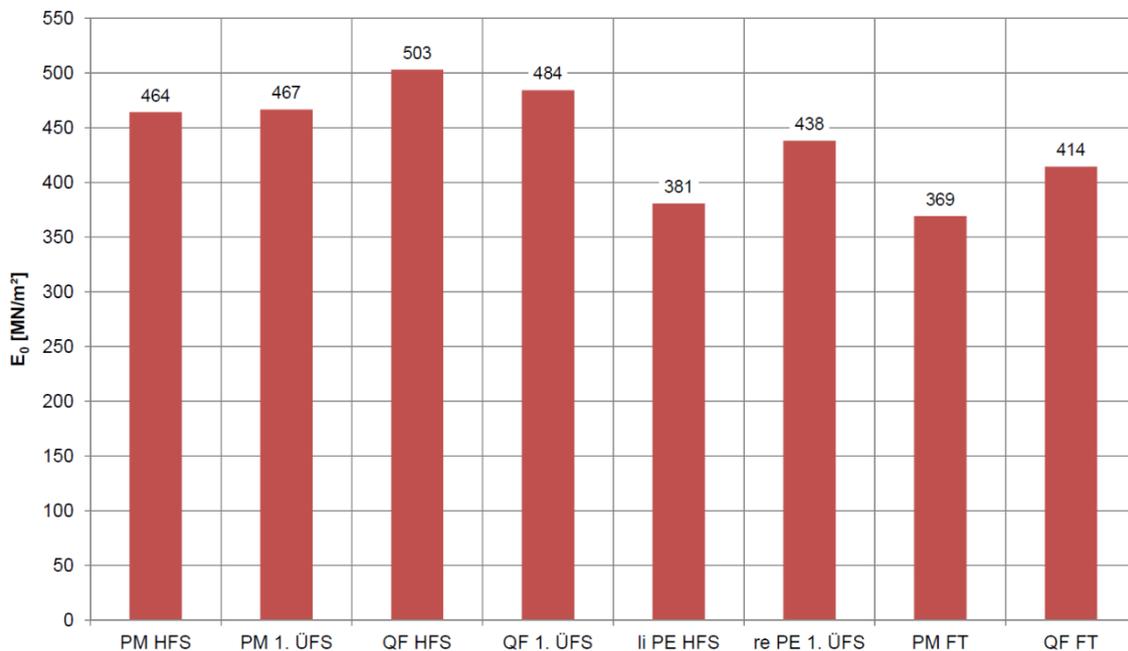


Abbildung 101: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m²]

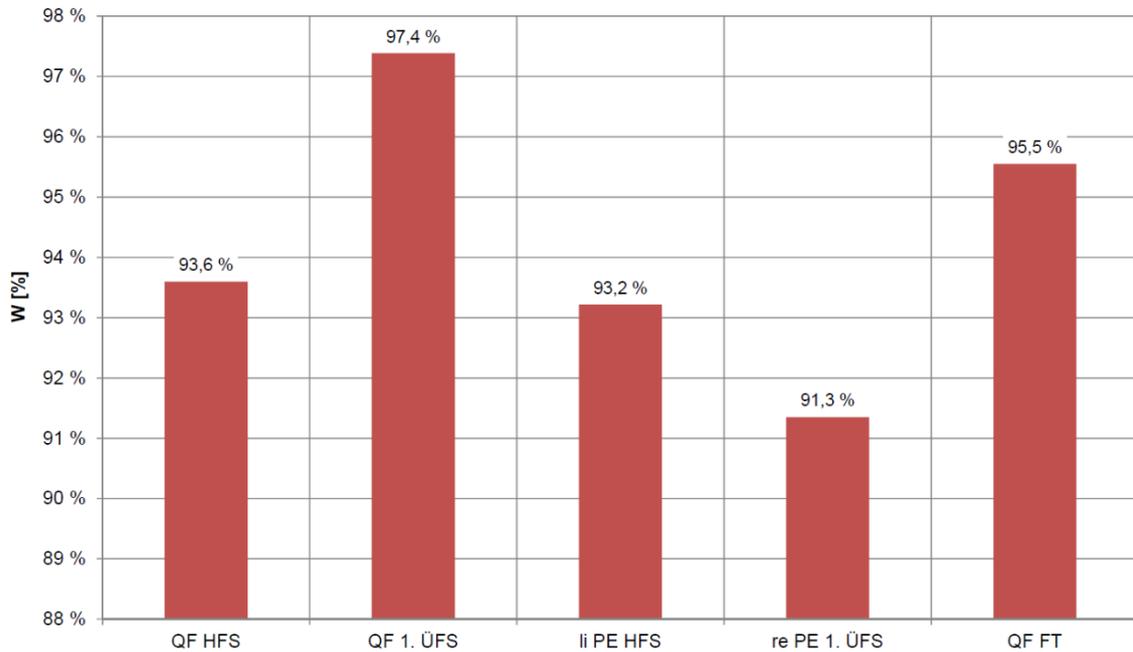


Abbildung 102: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%]

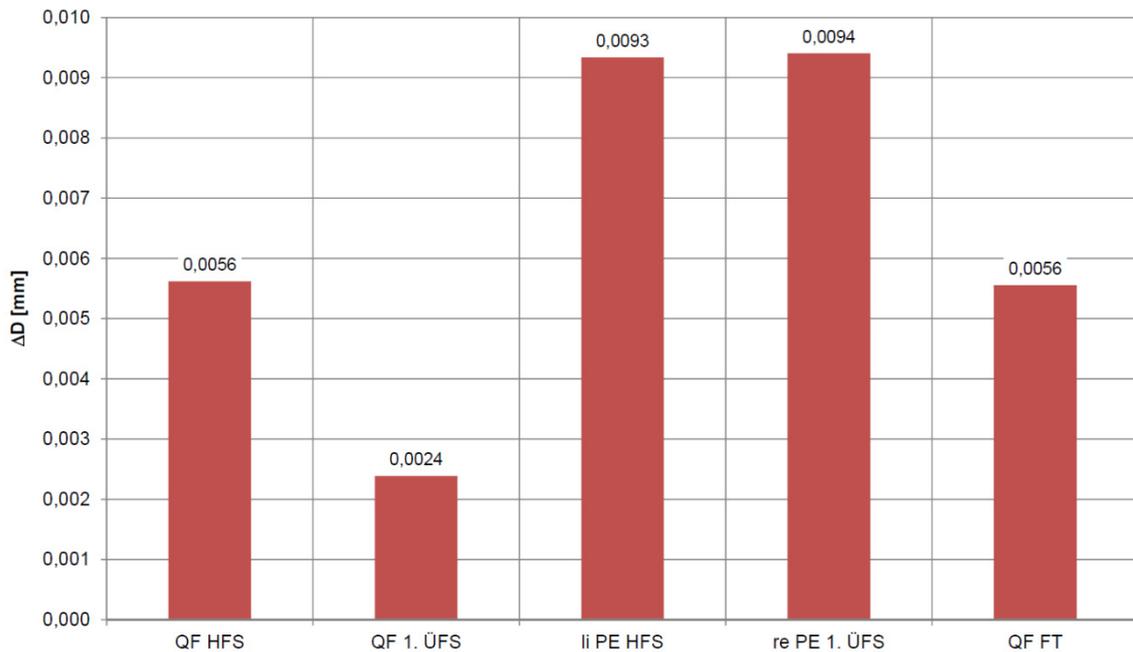


Abbildung 103: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm]

Der äquivalente Verformungsmodul beträgt auf OK Altbeton am 21.8.2018 in Plattenmitte durchschnittlich $E_a \approx 3.545 \text{ MN/m}^2$.

Auch an den Querfugen ist ein sehr hoher äquivalenter Verformungsmodul von im Mittel $E_a \approx 3.724 \text{ MN/m}^2$ vorhanden.

Dies deutet darauf hin, dass zum Messzeitpunkt in der Betondecke hohe Längsdruckspannungen wirksam waren.

Lediglich an den Plattenecken wurde ein etwas geringerer äquivalenter Verformungsmodul von im Mittel $E_a \approx 2.653 \text{ MN/m}^2$ ermittelt (siehe Abbildung 100).

In Plattenmitte des Fertigteils liegt der äquivalente Verformungsmodul aufgrund der kleineren Plattenabmessungen mit $E_a = 3.102 \text{ MN/m}^2$ nur geringfügig unter dem des Altbetons.

An der Anschlussfuge des Fertigteils ergab sich ein äquivalenter Verformungsmodul von $E_a = 2.788 \text{ MN/m}^2$, der den an den Plattenecken des Altbetons vorhandenen Tragfähigkeitskennwert etwas überschreitet.

Die hohe Gesamttragfähigkeit resultiert u. a. aus der hohen Bettungstragfähigkeit.

Der Bettungsmodul beträgt auf OK Altbeton in Plattenmitte, an den Querfugen und Plattenecken im Gesamtmittel $E_0 \approx 456 \text{ MN/m}^2$.

Unter dem Fertigteil ist etwa die gleiche Bettungstragfähigkeit vorhanden. Sie beträgt im Mittel $E_0 \approx 392 \text{ MN/m}^2$ (siehe Abbildung 101).

Es kann somit weitgehend von einer vollflächigen Unterpressung des Fertigteils ausgegangen werden.

Die an den Querfugen und Plattenecken gemessene hohe Gesamttragfähigkeit ergibt sich ferner aus dem hohen Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung.

Der Gesamtmittelwert beträgt an den Querfugen des Altbetons $W \approx 95,5 \%$ und an den Plattenecken $W \approx 92,3 \%$.

Im Vergleich hierzu ist an der Anschlussfuge des Fertigteils ebenfalls ein hoher Wirksamkeitsindex von $W \approx 95,5 \%$ gemessen worden (siehe Abbildung 102).

Dementsprechend niedrig sind die Relativdeflexionen von i. M. $\Delta D \approx 0,004 \text{ mm}$ an den Querfugen bzw. $\Delta D \approx 0,009 \text{ mm}$ an den Plattenecken des Altbetons.

Die Relativdeflexion an der Anschlussfuge des Fertigteils von $\Delta D \approx 0,006 \text{ mm}$ liegt zwischen diesen beiden Vergleichswerten des Altbetons (siehe Abbildung 103).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Fertigteil nach einem Jahr Verkehrsbelastung im Vergleich zum Altbeton ein sehr gutes Tragverhalten aufweist.

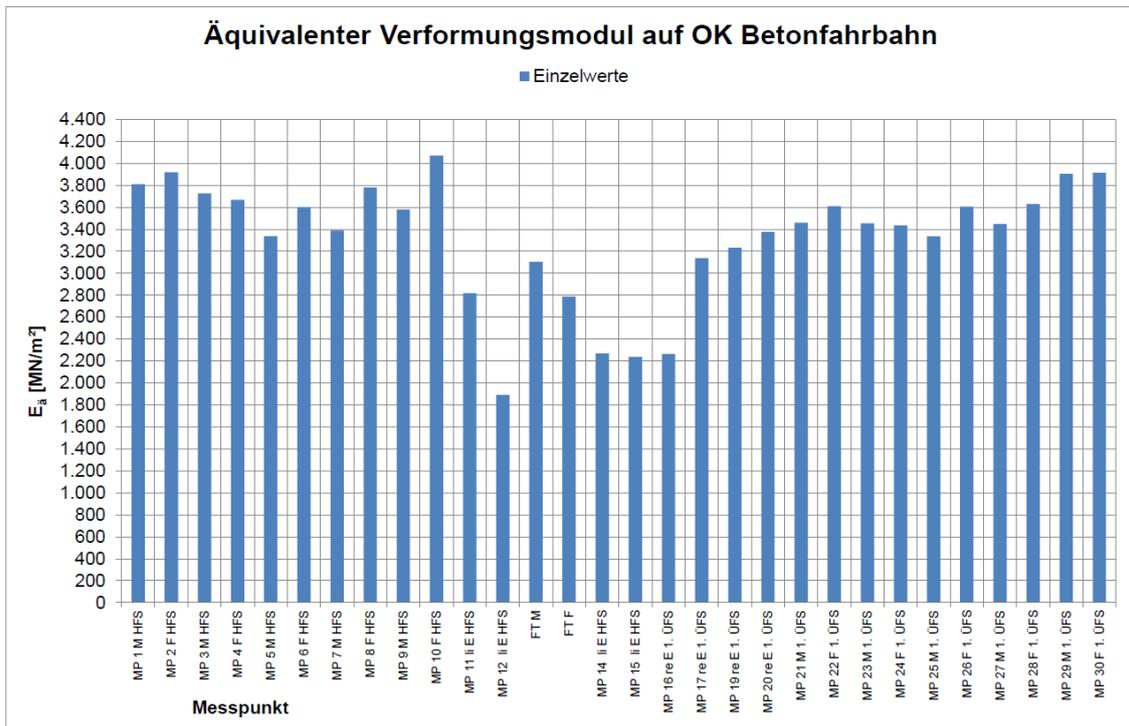


Abbildung 104: Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul E_a auf OK Fahrbahn [MN/m²]

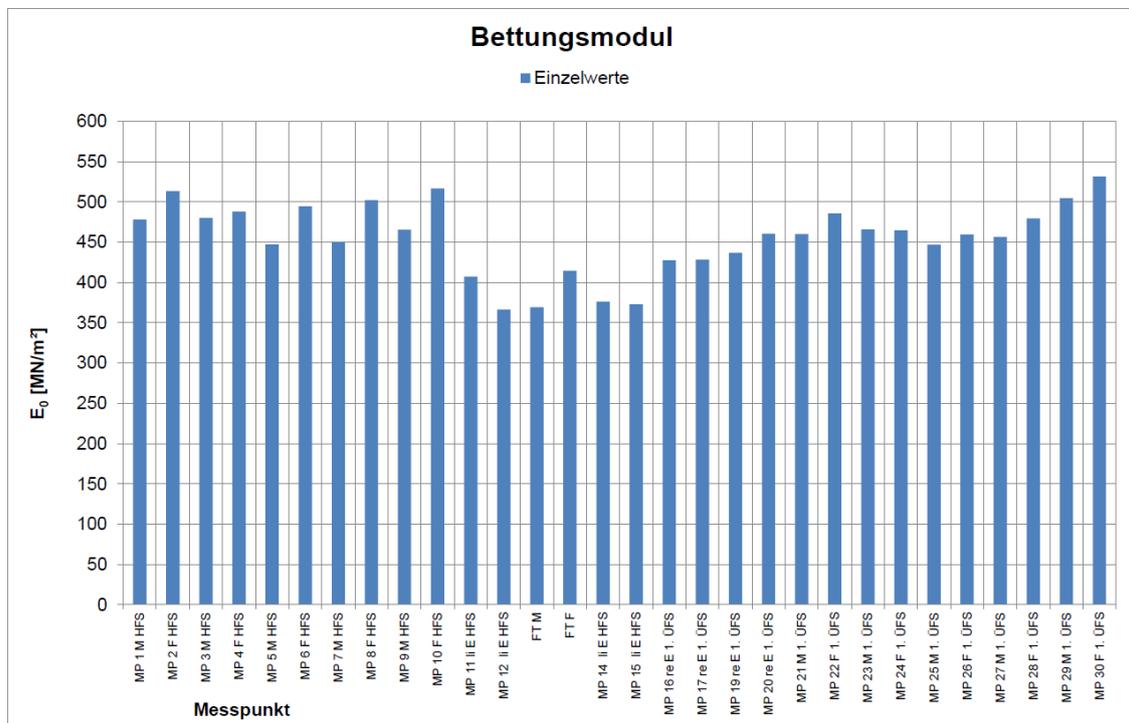


Abbildung 105: Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m²]

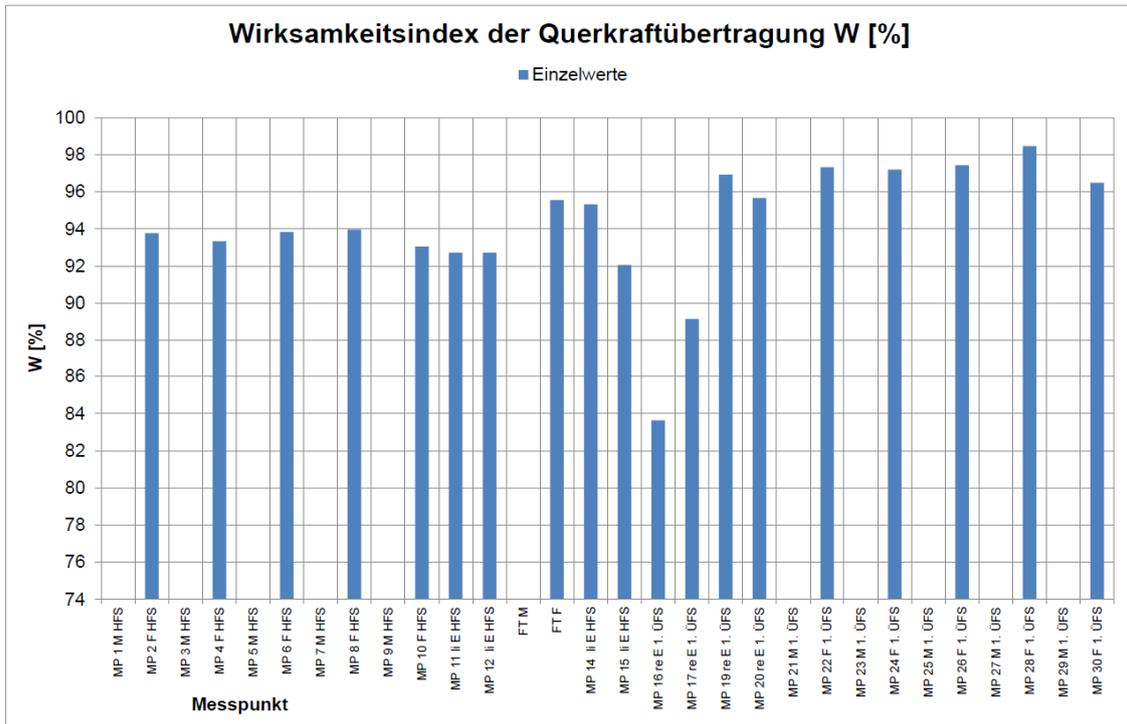


Abbildung 106: Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%]

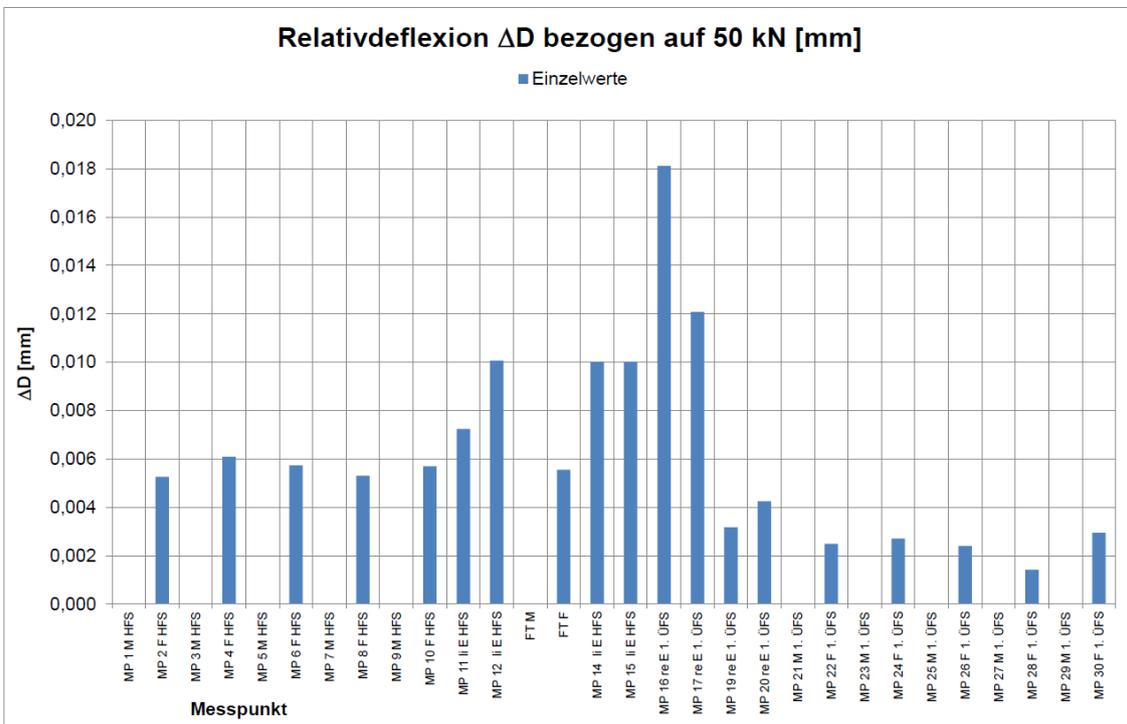


Abbildung 107: Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm]

9.1.2 Kreisrunde Fertigteile

Die FWD-Messungen wurden auf der A 1 bei km 143,500 auf OK Altbeton vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018 von 18:10 Uhr bis 20:15 Uhr durchgeführt. Messungen auf den Fertigteilen I bis III erfolgten ca. 1 Std. nach dem Einbau am 21.8.2018 von 4:40 Uhr bis 4:55 Uhr. Weitere Messungen auf OK Altbeton und auf den Fertigteilen I bis III wurden ca. 16 Std. nach dem Einbau der Fertigteile am 21.8.2018 von 19:30 Uhr bis 20:30 Uhr durchgeführt.

Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der FWD-Messungen vor Einbau der Fertigteile zwischen 28,8 °C und 34,6 °C, ca. 1 Std. nach Einbau der Fertigteile zwischen 19,1 °C und 19,5 °C und ca. 16 Stunden nach Einbau der Fertigteile zwischen 26,7 °C und 28,5 °C.

Die insgesamt 30 FWD-Messungen vor dem FT-Einbau und die nachfolgenden 36 FWD-Messungen nach dem FT-Einbau erfolgten durch die Hochschule Anhalt, Fachbereich 3, Forschungsgruppe Straßenbau mit dem Falling Weight Deflectometer, Typ SN 0411-103.

Die Messpositionen sind nachfolgenden Skizzen in Abbildung 108 und Abbildung 109 zu entnehmen:

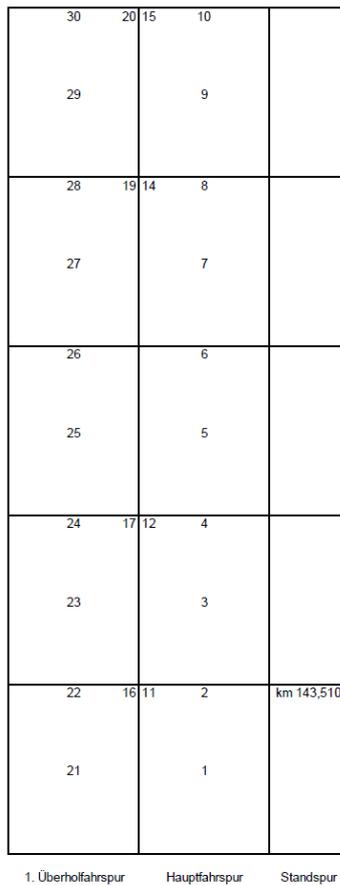


Abbildung 108: FWD-Messpositionen vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018

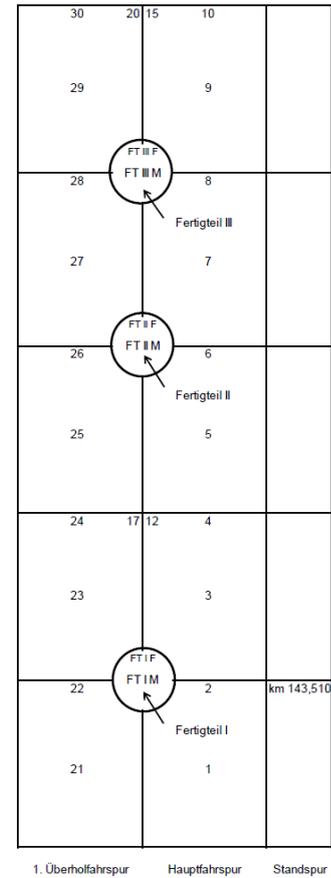


Abbildung 109: FWD-Messpositionen nach Einbau der Fertigteile am 21.8.2018

In Abbildung 110 bis Abbildung 117 sind zur Veranschaulichung der Messergebnisse die Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a , des Bettungsmoduls E_0 und des Wirksamkeitsindex' der Querkraftübertragung sowie der Relativdeflexion einander gegenübergestellt.

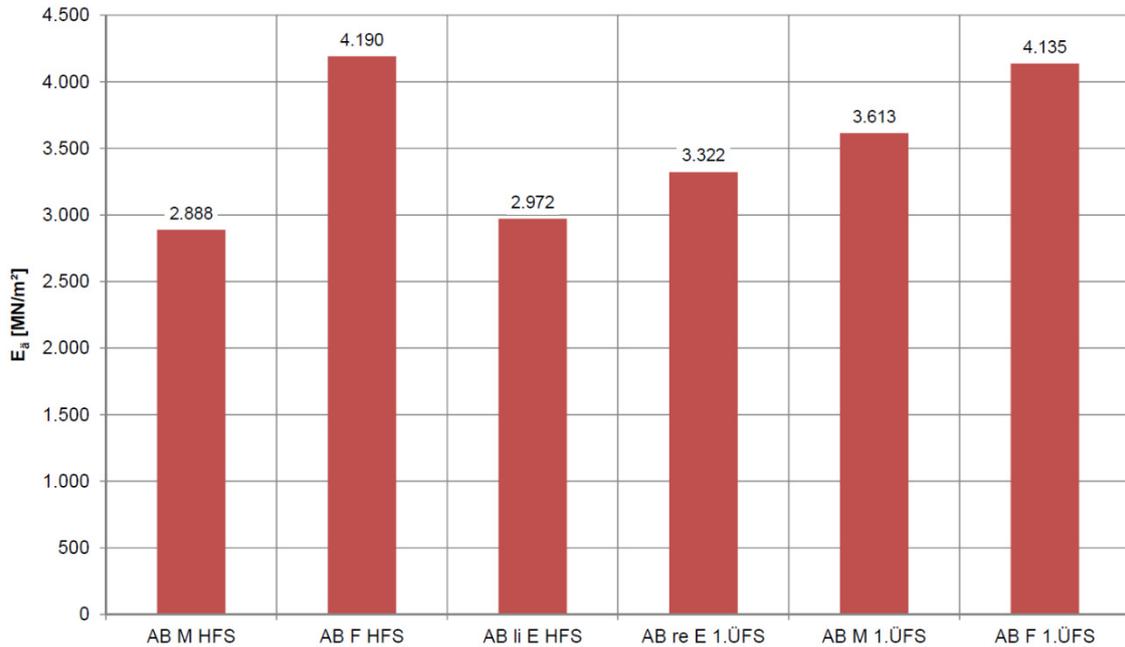


Abbildung 110: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn vor dem Einbau der Fertigteile

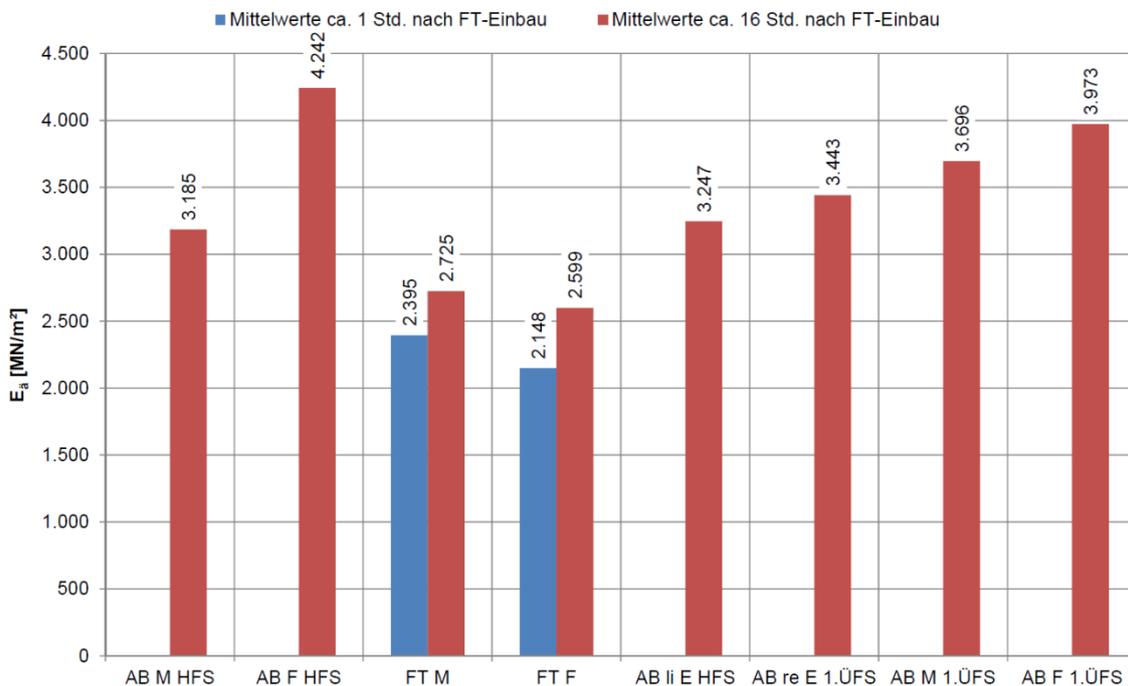


Abbildung 111: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile

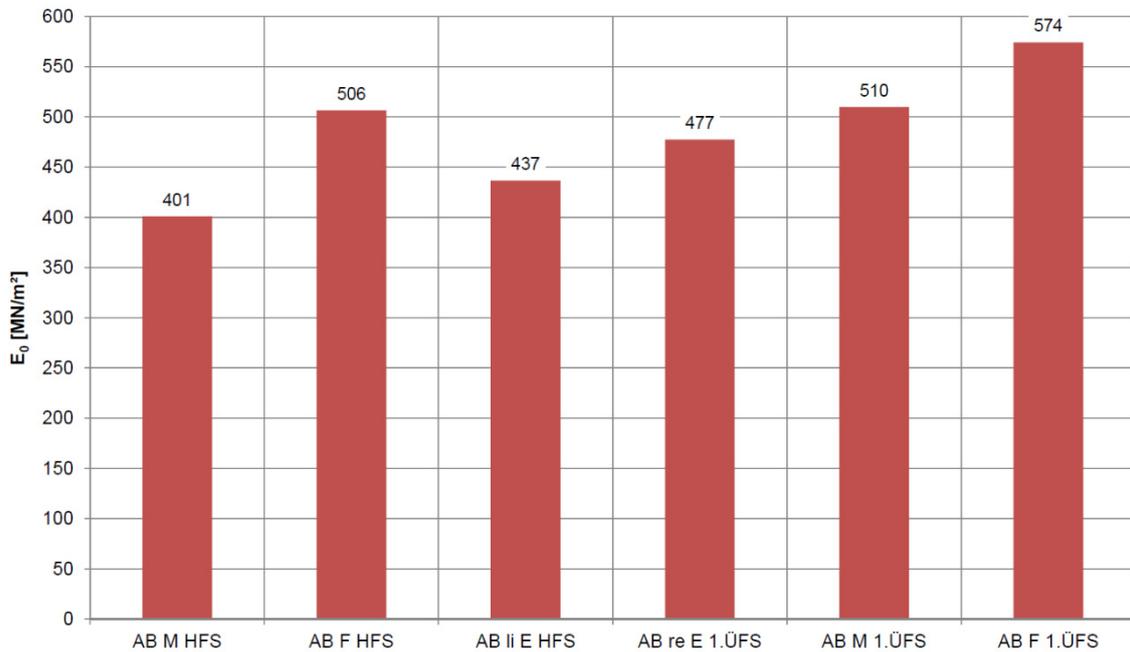


Abbildung 112: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m²] vor dem Einbau der Fertigteile

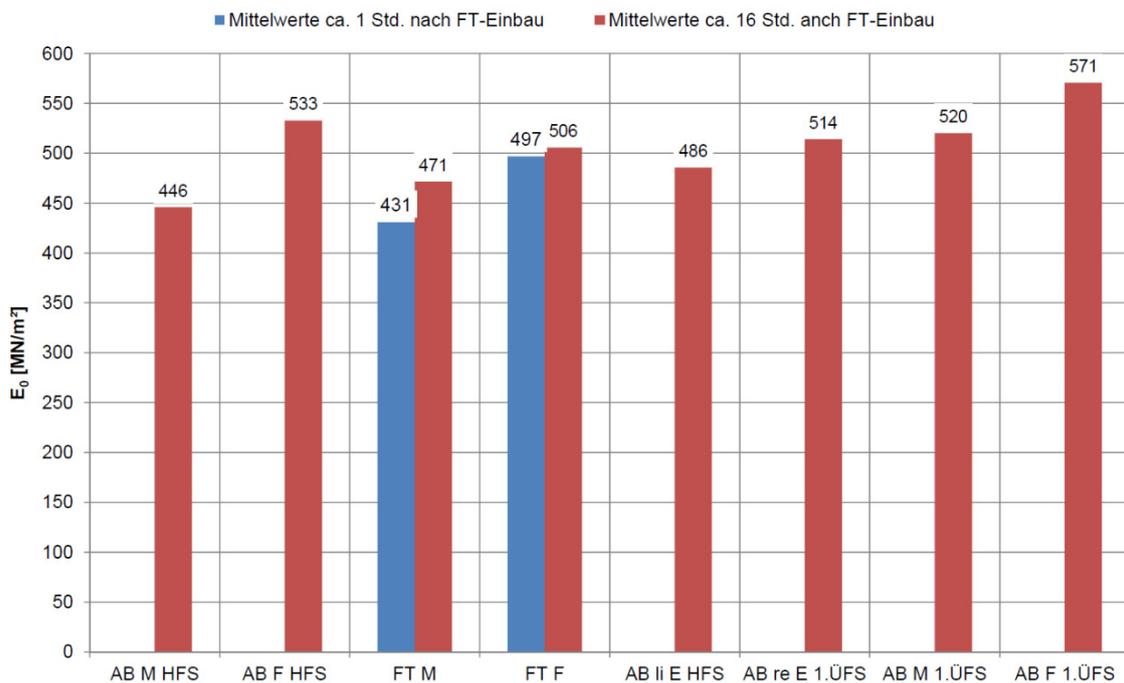


Abbildung 113: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m²] nach dem Einbau der Fertigteile

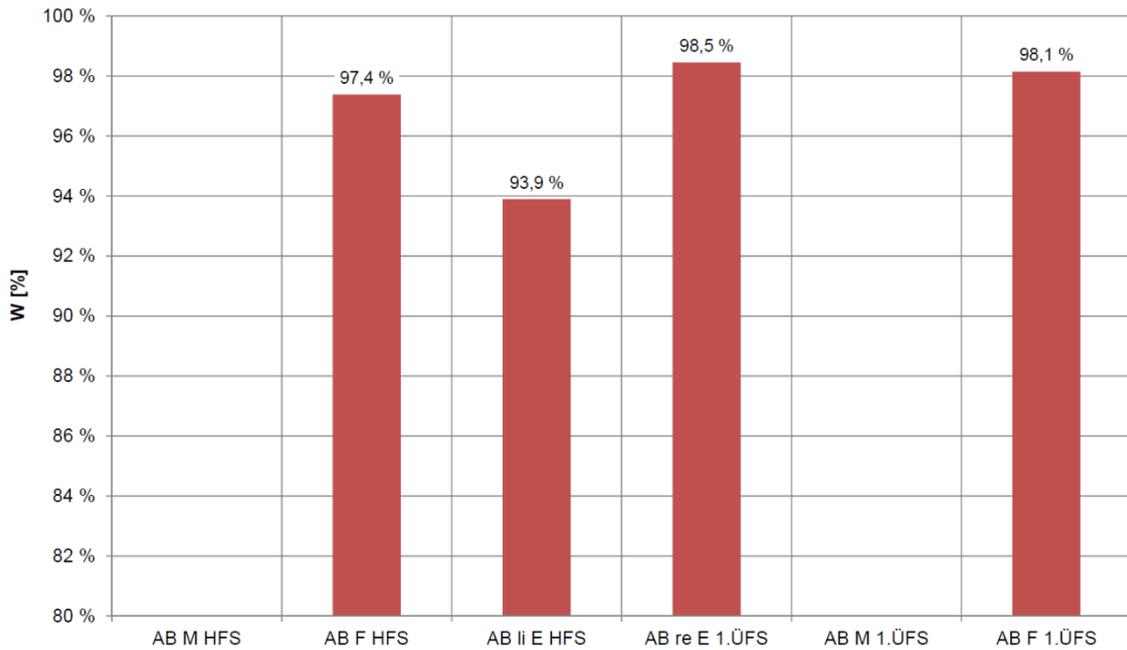


Abbildung 114: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor dem Einbau der Fertigteile

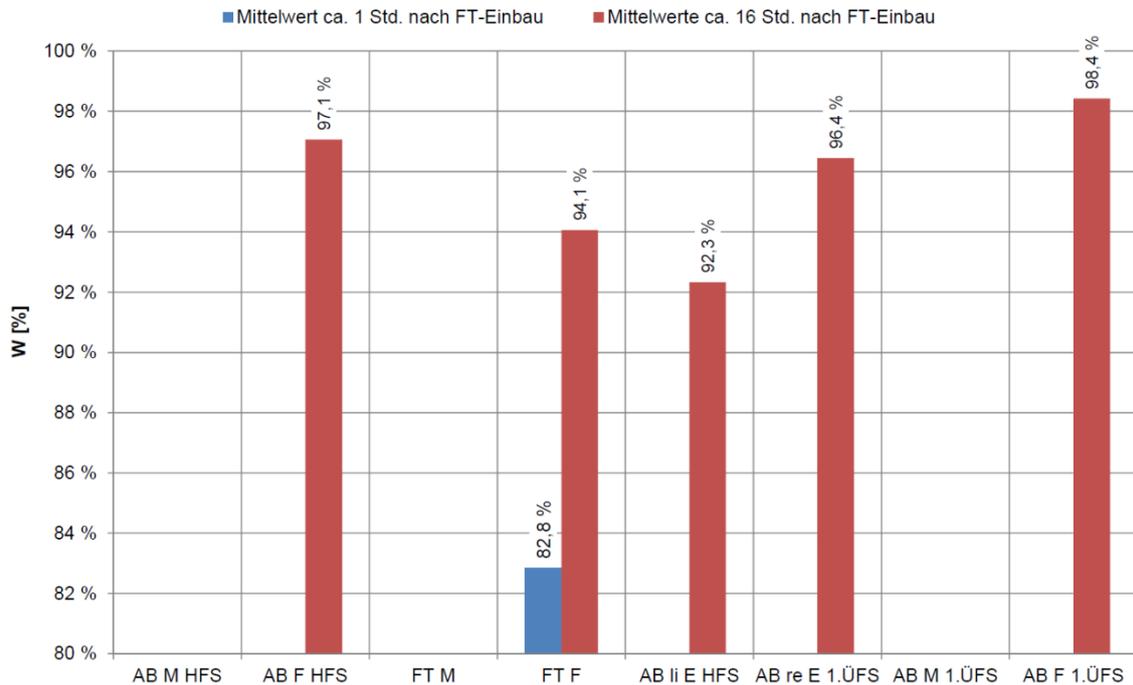


Abbildung 115: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile

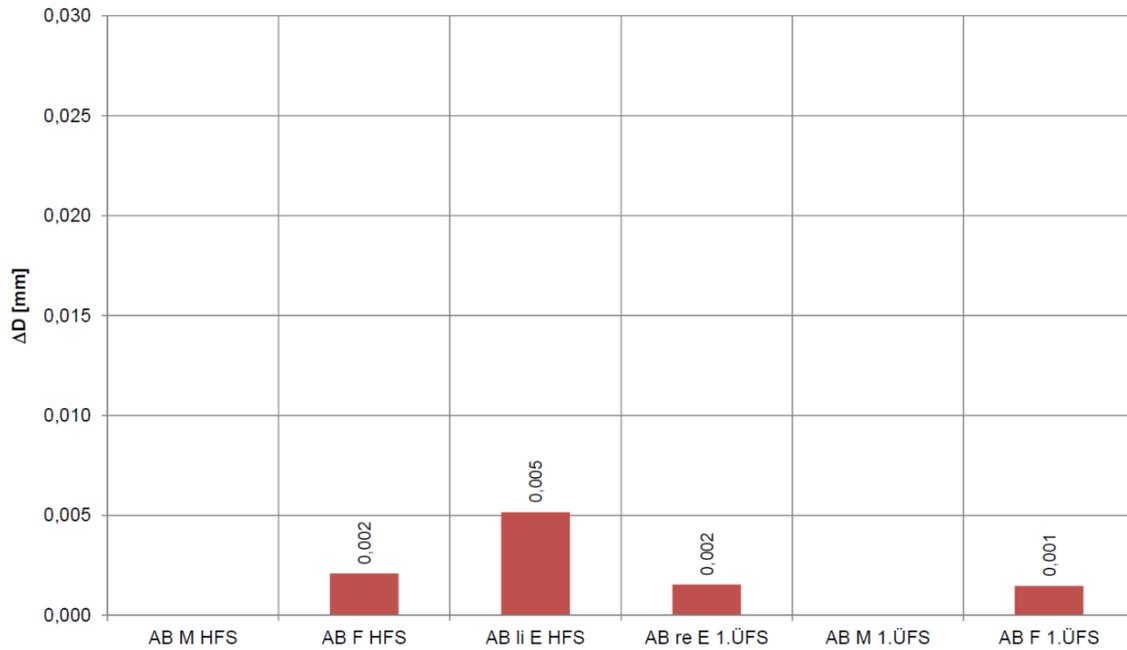


Abbildung 116: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor dem Einbau der Fertigteile

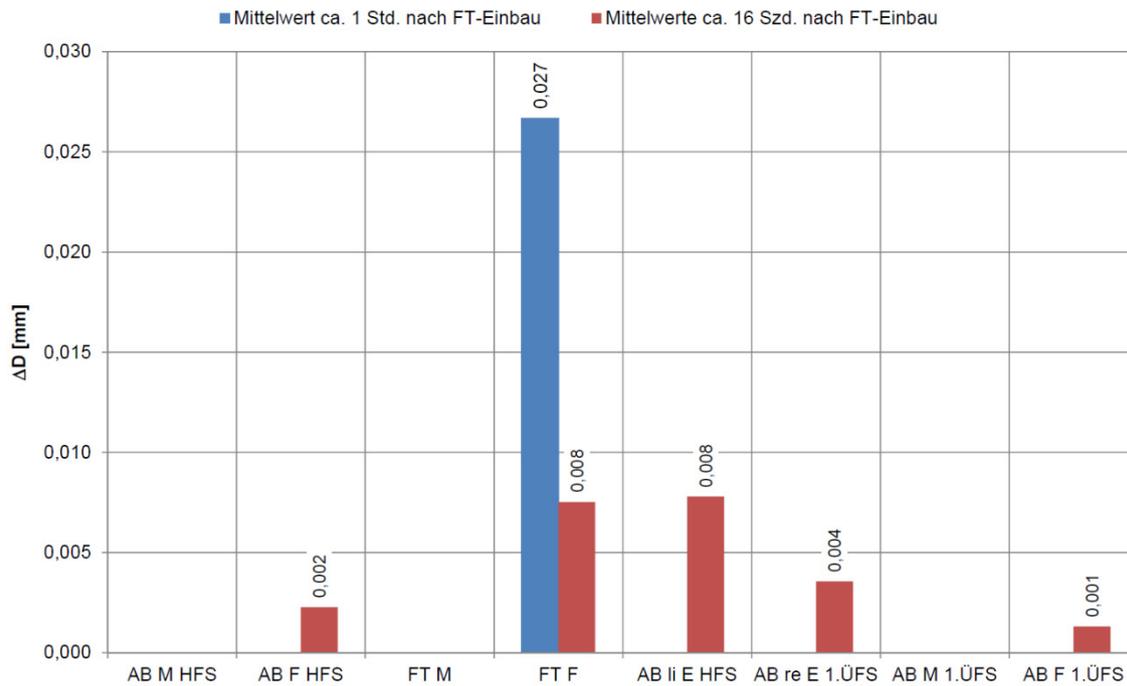


Abbildung 117: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile

Der äquivalente Verformungsmodul beträgt auf OK Altbeton in Plattenmitte vor und nach dem FT-Einbau durchschnittlich $E_a \approx 3.350 \text{ MN/m}^2$.

An den Querfugen des Altbetons ist vor und nach dem FT-Einbau im Gesamtmittel mit $E_a \approx 4.140 \text{ MN/m}^2$ ein größerer äquivalenter Verformungsmodul als in Plattenmitte vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass zu beiden Messzeitpunkten in der Betondecke aufgrund der hohen Lufttemperaturen Längsdruckspannungen wirksam waren.

An den linken und rechten Plattenecken des Altbetons wurde vor und nach dem FT-Einbau im Gesamtmittel mit $E_a \approx 3.250 \text{ MN/m}^2$ etwa der gleiche äquivalente Verformungsmodul wie in Plattenmitte ermittelt.

In Plattenmitte der Fertigteile unterschreitet der äquivalente Verformungsmodul aufgrund der kleineren Plattenabmessungen den in Plattenmitte des Altbetons ermittelten Modul.

Er beträgt ca. 1 Std. nach FT-Einbau im Mittel $E_a = 2.400 \text{ MN/m}^2$ und ca. 16 Std. nach FT-Einbau im Mittel $E_a = 2.730 \text{ MN/m}^2$ mit einem Variationskoeffizienten von 5 %.

Die Tragfähigkeitszunahme um 14 % ergibt sich durch die weitere Aushärtung des zum Unterpressen eingesetzten Silikatharzes im Zeitraum von 16 Stunden nach Einbau der Fertigteile.

Bemerkenswert ist die Feststellung, dass an den Anschlussfugen der Fertigteile etwa die gleichen Tragfähigkeitskennwerte wie in Plattenmitte der Fertigteile vorliegen.

Als Gesamtmittel ergibt sich 16 Std. nach dem FT-Einbau für die Anschlussfugen der Fertigteile $E_a \approx 2.600 \text{ MN/m}^2$ mit einem geringen Variationskoeffizienten von 6 %.

Auf den Fertigteilen liegt also eine sehr gleichmäßige Tragfähigkeit vor, unabhängig davon, ob in Plattenmitte oder an den Anschlussfugen belastet wurde.

Es kann somit weitgehend von einer vollflächigen Unterpressung der Fertigteile ausgegangen werden.

Die Gesamttragfähigkeit E_a korrespondiert mit der Bettungstragfähigkeit E_0 .

Demzufolge ist der Bettungsmodul in Plattenmitte Altbeton vor und nach Fertigteil-Einbau mit $E_0 \approx 470 \text{ MN/m}^2$ niedriger als unter den Querfugen des Altbetons von $E_0 \approx 550 \text{ MN/m}^2$, was auf eine Aufwölbung in Plattenmitte hinweist.

An den linken und rechten Plattenecken des Altbetons wurde vor und nach dem FT-Einbau im Gesamtmittel mit $E_0 \approx 480 \text{ MN/m}^2$ wiederum etwa der gleiche Bettungsmodul wie in Plattenmitte gefunden.

Unter den Fertigteilen ist in Plattenmitte im Durchschnitt ebenfalls etwa die gleiche Bettungstragfähigkeit wie in Plattenmitte unter dem Altbeton vorhanden.

Sie beträgt 16 Std. nach dem Einbau der Fertigteile im Gesamtmittel $E_0 \approx 470 \text{ MN/m}^2$ mit einem Variationskoeffizienten von 10 %. An den Anschlussfugen der Fertigteile ist 16 Std. nach dem Einbau ein mittlerer Bettungsmodul von $E_0 \approx 510 \text{ MN/m}^2$ mit einem Variationskoeffizienten von nur 9 % festgestellt worden.

Die an den Querfugen und Plattenecken gemessene hohe Gesamttragfähigkeit spiegelt sich auch im Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung wider.

Der Gesamtmittelwert ist infolge der im Altbeton wirkenden Längsdruckspannungen an den Querfugen vor und nach dem FT-Einbau mit $W \approx 98 \%$ und an den linken und rechten Plattenecken $W \approx 95 \%$ relativ hoch.

Dementsprechend niedrig sind auch vor und nach dem FT-Einbau die Relativdeflexionen von i. M. $\Delta D \approx 0,002 \text{ mm}$ an den Querfugen und $\Delta D \approx 0,005 \text{ mm}$ an den linken und rechten Plattenecken des Altbetons.

Im Vergleich hierzu ist an den Anschlussfugen der Fertigteile 16 Std. nach dem Einbau der Fertigteile ein Wirksamkeitsindex von $W \approx 94 \%$ bzw. eine Relativdeflexion von i. M. $\Delta D \approx 0,008 \text{ mm}$ gemessen worden.

Die am 21.8.2018 eingebauten kreisrunden Fertigteile weisen somit nach 16 Stunden etwa das gleiche Tragverhalten auf, wie das im Jahr 2017 eingebaute kreisrunde Probefertigteil. Nachfolgend sind in Abbildung 118 bis Abbildung 121 die einzelnen Messergebnisse dargestellt. Abbildung 122 bis Abbildung 125 zeigen die Entwicklung der Messwerte direkt nach dem Einbau zu der Messung ca. 16 Stunden danach.

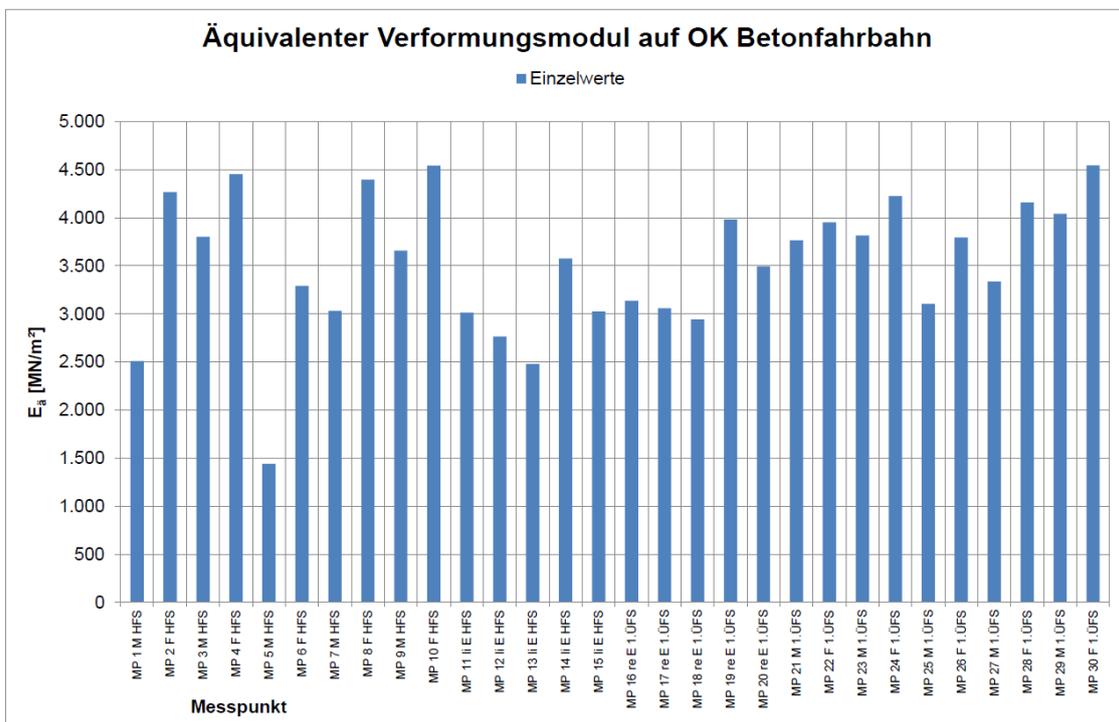
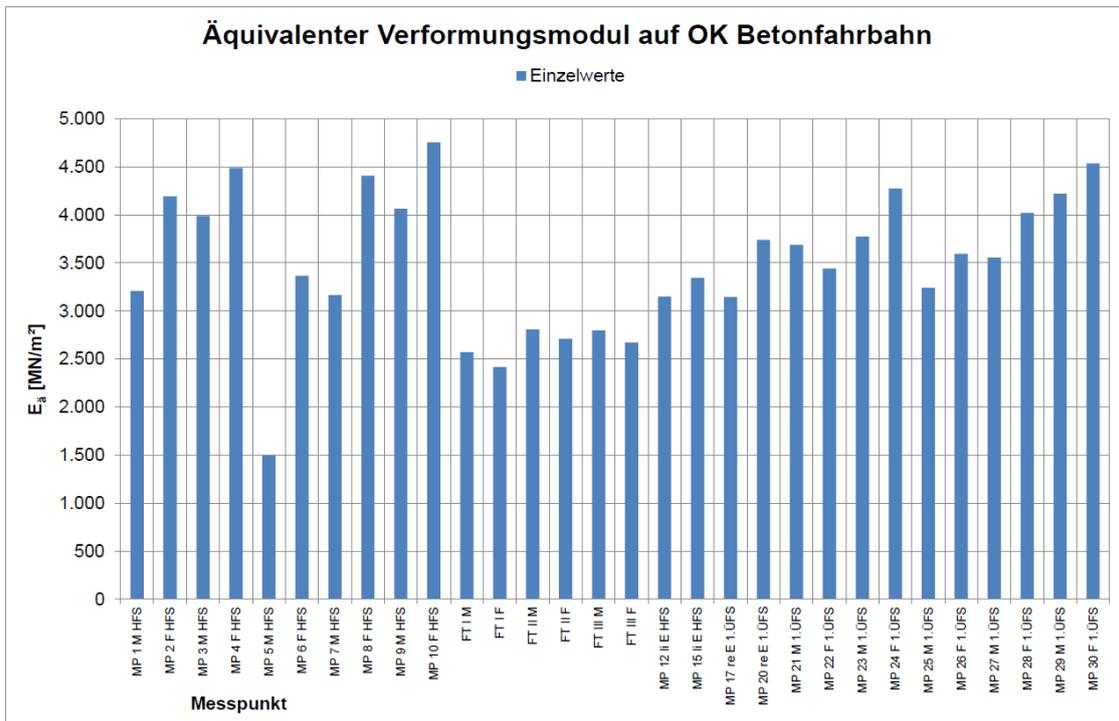


Abbildung 118: Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn vor und nach dem Einbau der Fertigteile

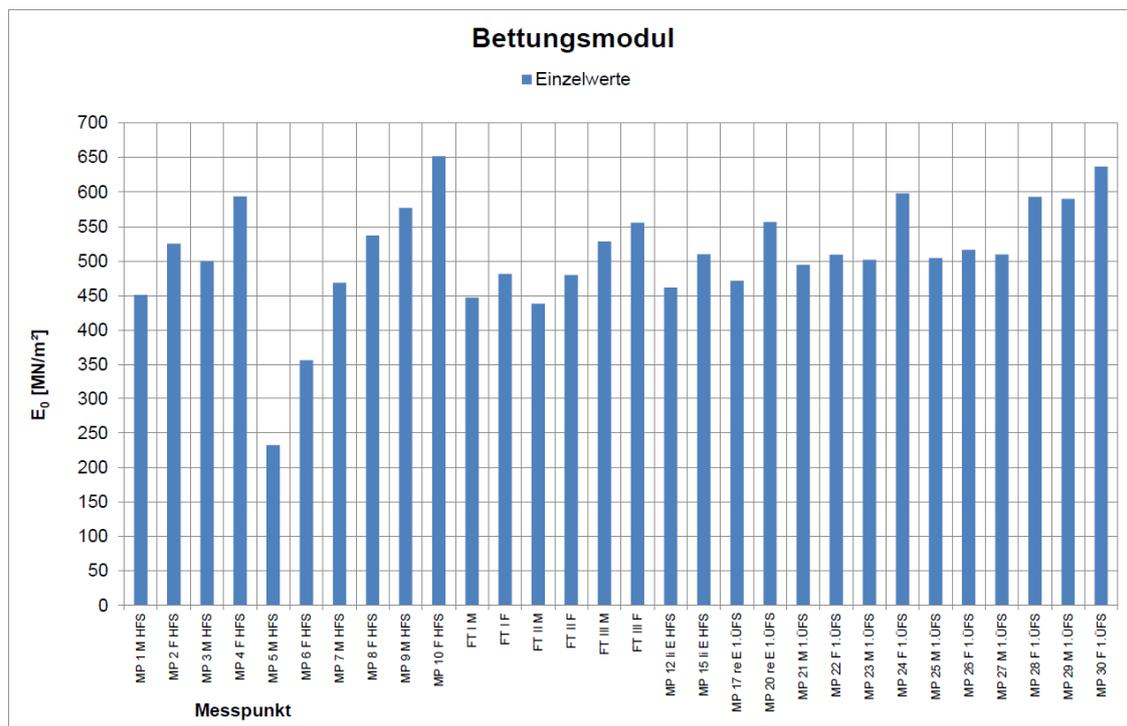
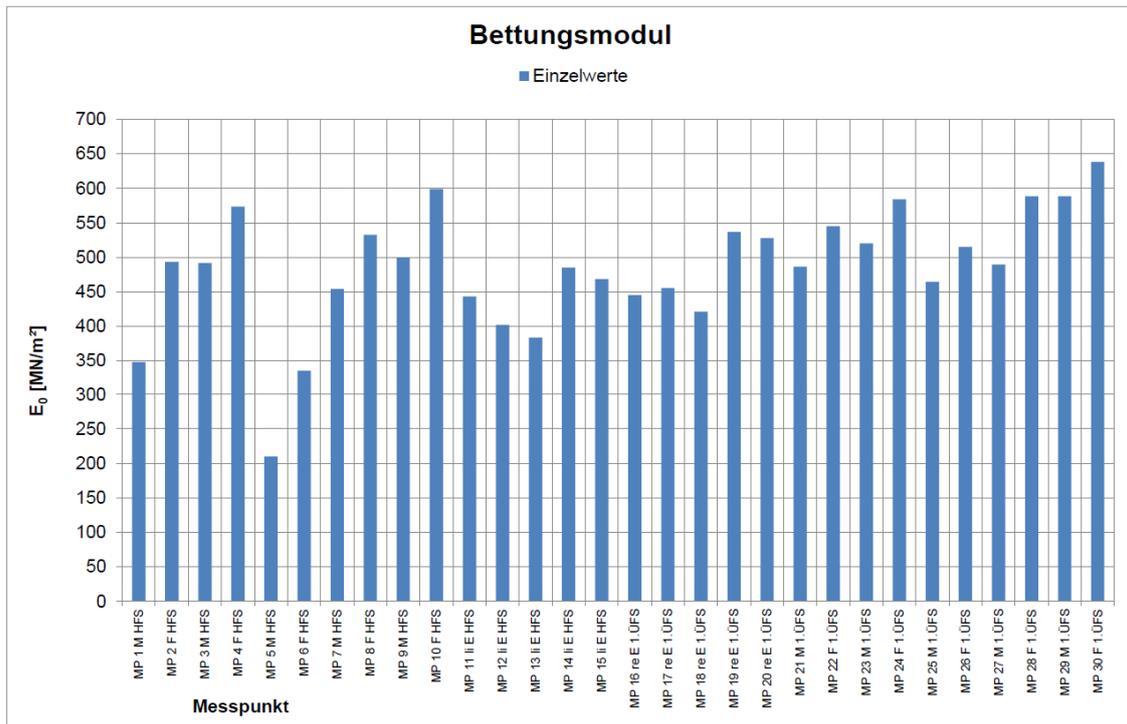


Abbildung 119: Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m²] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

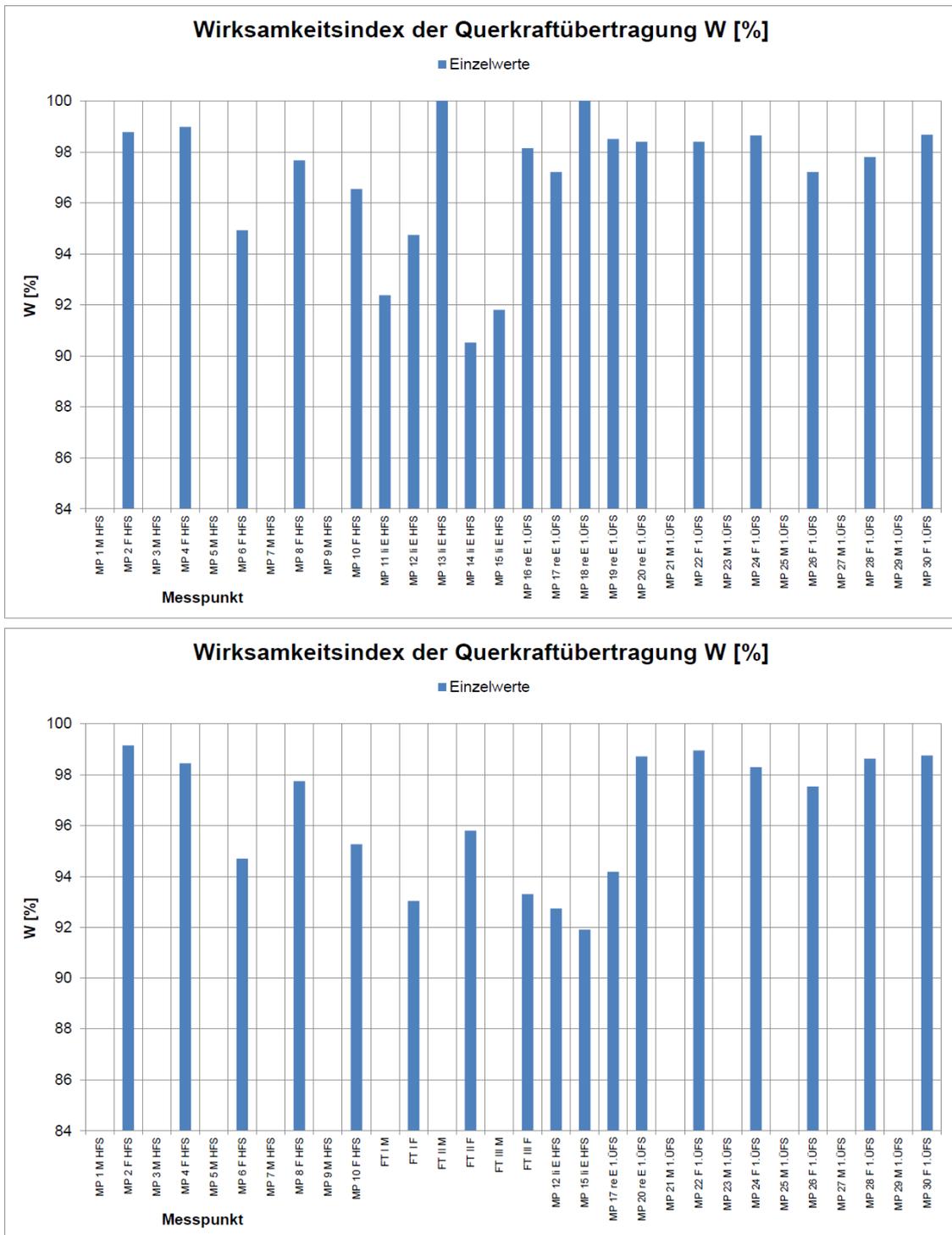


Abbildung 120: Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

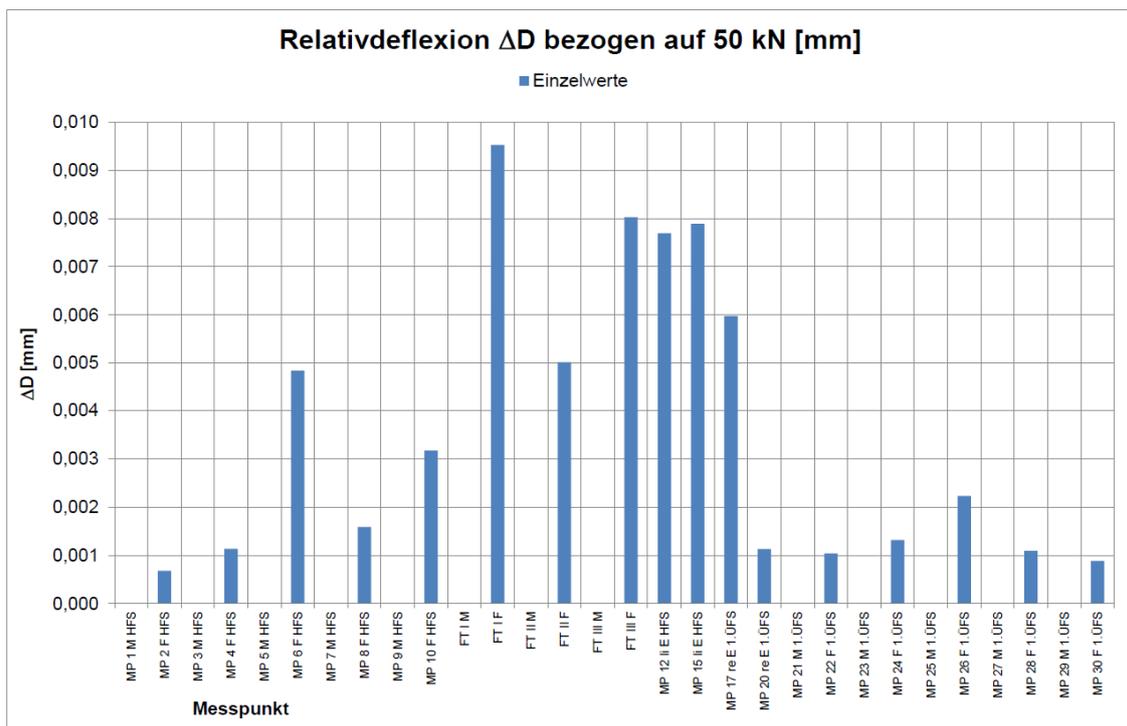
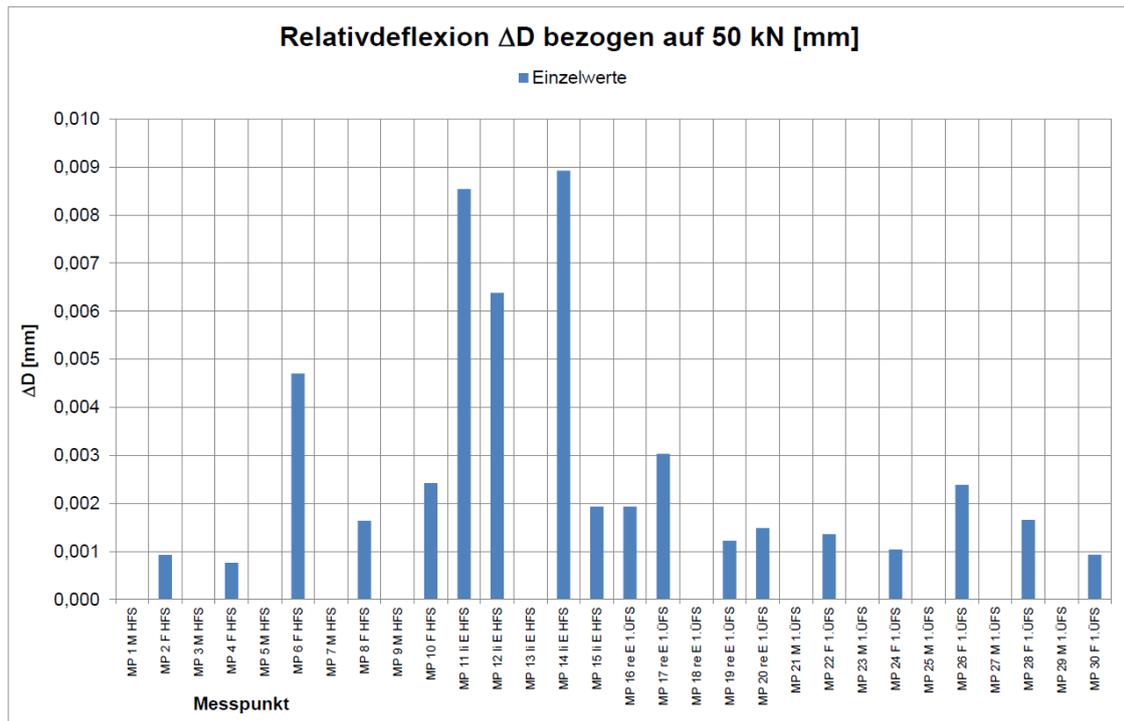


Abbildung 121: Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

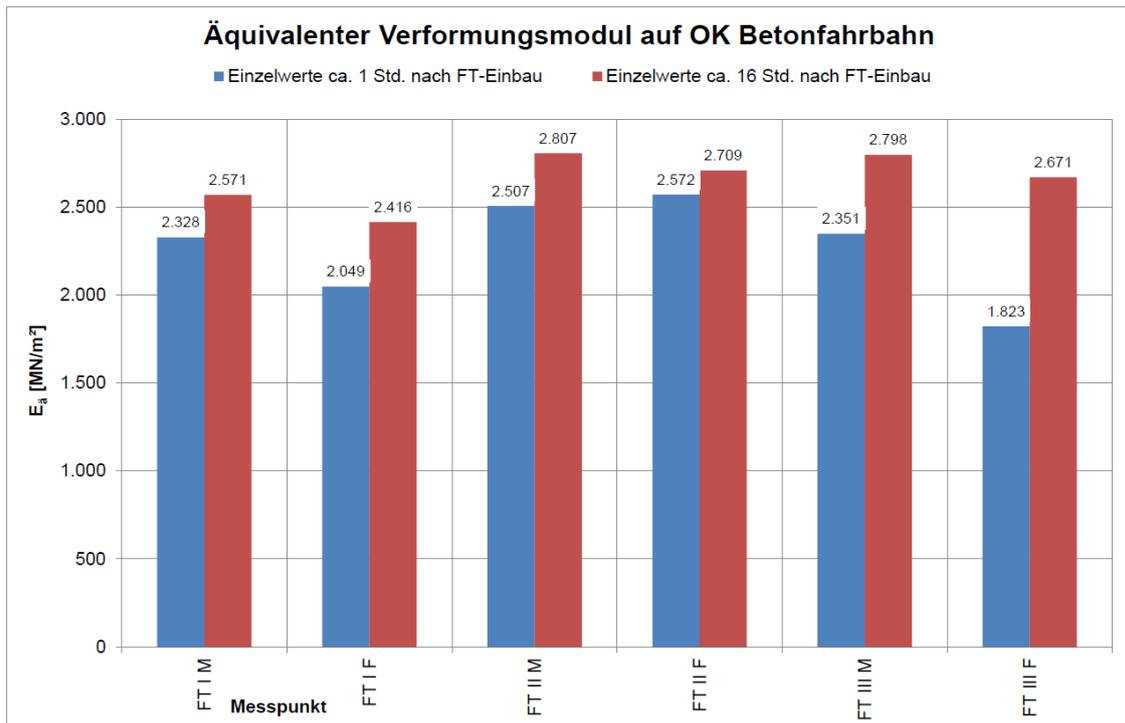


Abbildung 122: Entwicklung äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile

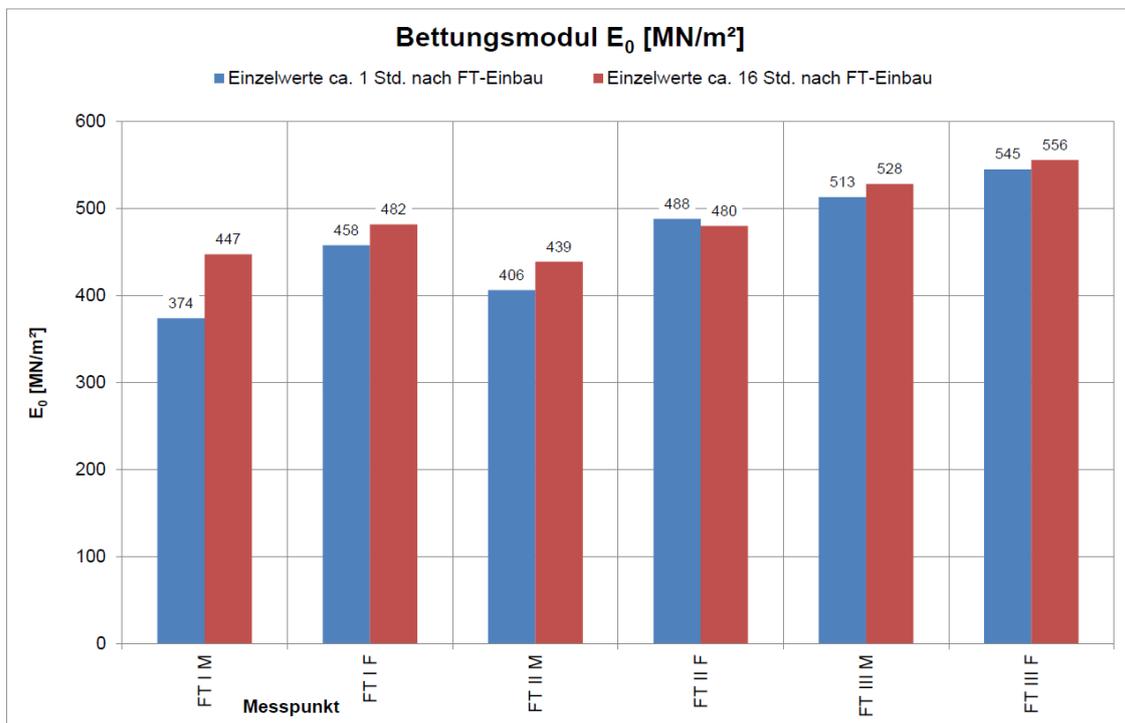


Abbildung 123: Entwicklung Bettungsmodul E_0 [MN/m²] nach dem Einbau der Fertigteile

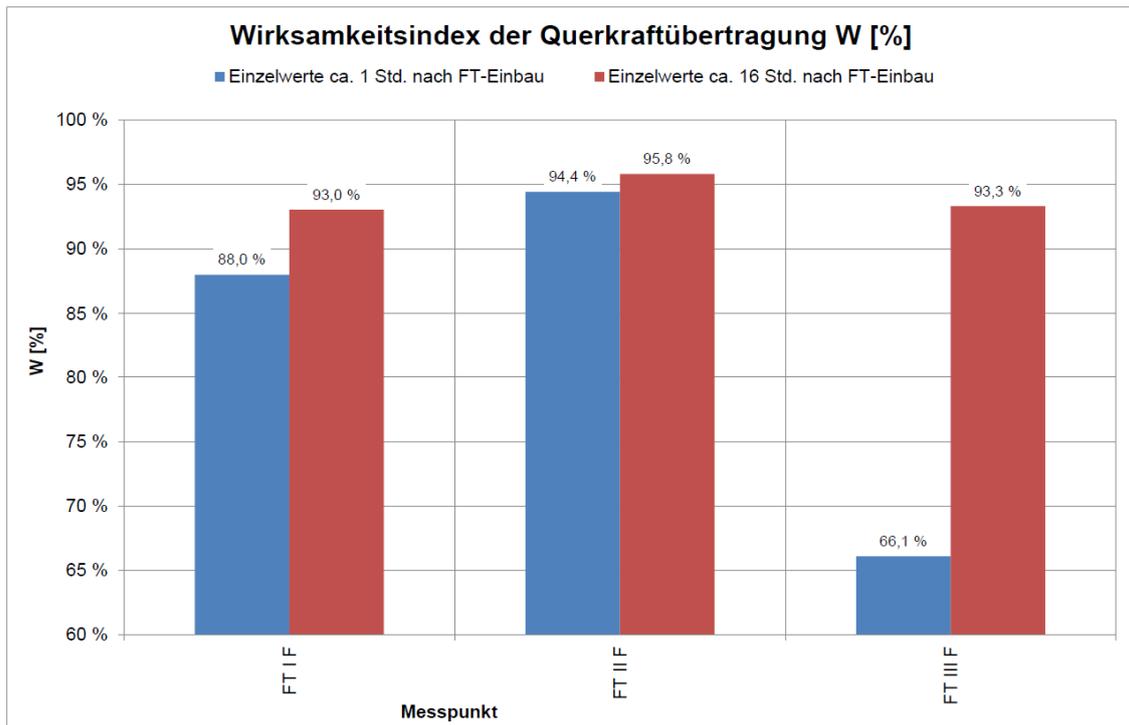


Abbildung 124: Entwicklung Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile

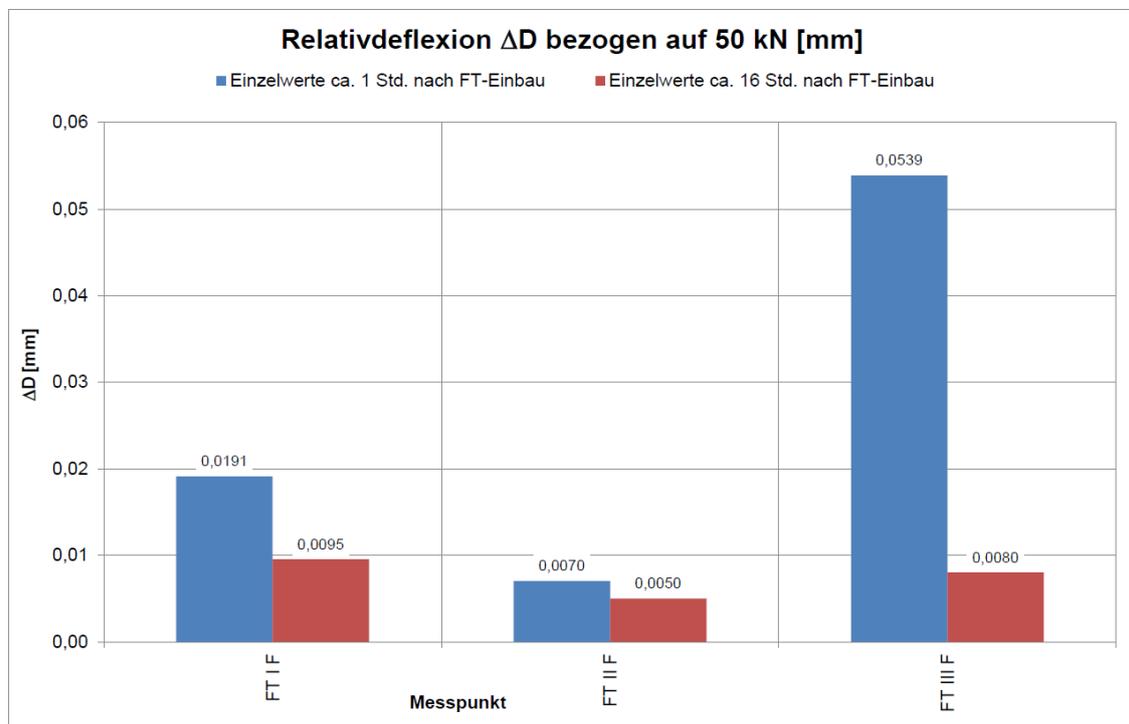


Abbildung 125: Entwicklung Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile

9.1.3 Plattenreihe im Hauptfahrstreifen

Die FWD-Messungen wurden auf der A 1 bei km 151,500 vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018 von 21:20 Uhr bis 22:00 Uhr und auf den Fertigteilen 1 bis 3 ca. 24 Std. bzw. auf den Fertigteilen 4 bis 6 ca. 1,5 Std. nach Einbau der Fertigteile am 23.8.2018 von 4:40 Uhr bis 5:45 Uhr durchgeführt.

Zum Zeitpunkt der FWD-Messungen auf dem Altbeton waren die Betonplatten der Hauptfahrspur in Plattenmitte 10 cm tief eingeschnitten (siehe Abbildung 126).

Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der FWD-Messungen vor Einbau der Fertigteile zwischen 25,7 °C und 27,1 °C und nach Einbau der Fertigteile zwischen 18,5 °C und 19,9 °C Die insgesamt 20 FWD-Messungen vor dem FT-Einbau und die nachfolgenden 32 FWD-Messungen nach dem FT-Einbau erfolgten durch die Hochschule Anhalt, Fachbereich 3, Forschungsgruppe Straßenbau mit dem Falling Weight Deflectometer, Typ SN 0411-103. Die Messpositionen sind nachfolgenden Skizzen in Abbildung 126 und Abbildung 127 zu entnehmen:

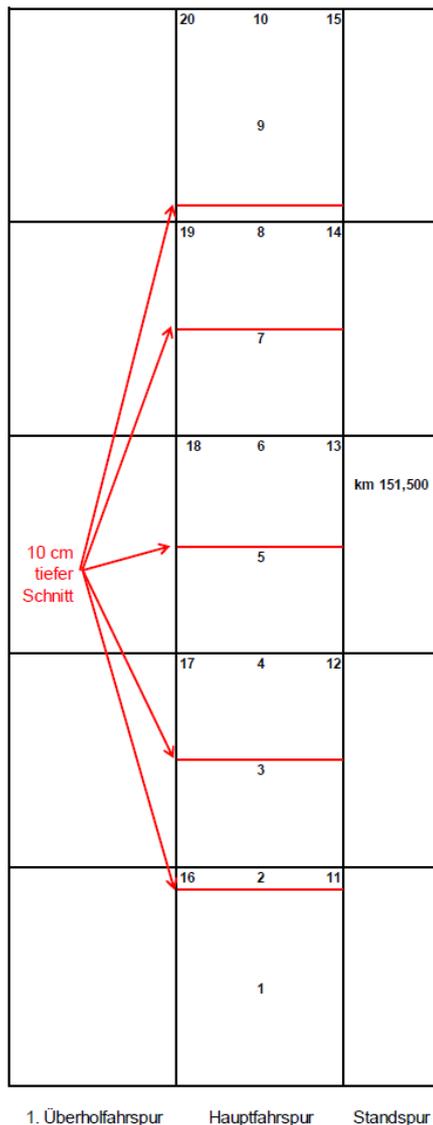


Abbildung 126: FWD-Messpositionen vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018

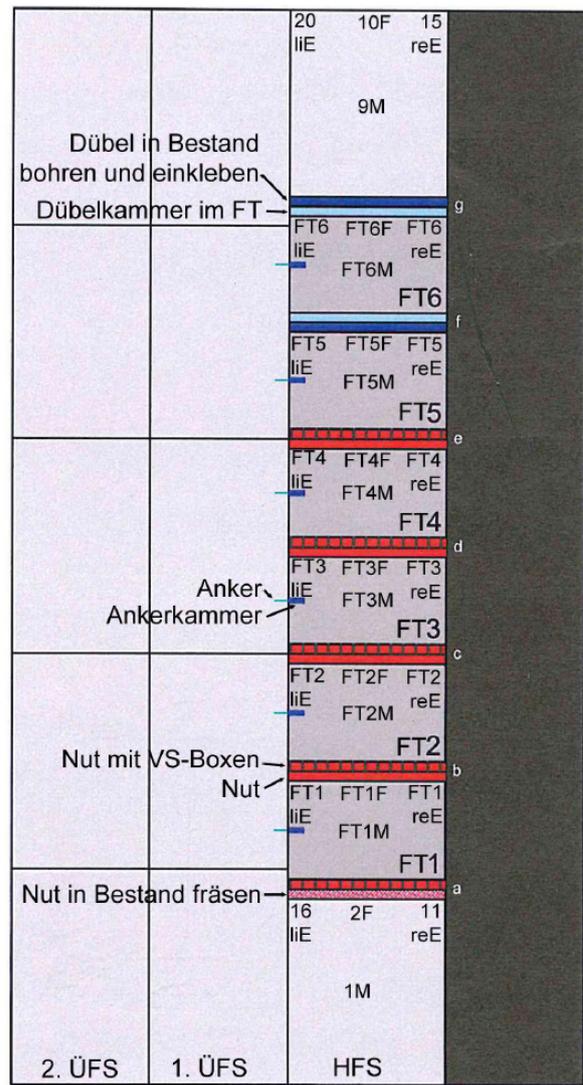


Abbildung 127: FWD-Messpositionen nach Einbau der Fertigteile am 23.8.2018

In Abbildung 128 bis Abbildung 135 sind zur Veranschaulichung der Messergebnisse die Mittelwerte des äquivalenten Verformungsmoduls E_a , des Bettungsmoduls E_0 und des Wirksamkeitsindex' der Querkraftübertragung sowie der Relativdeflexion einander gegenübergestellt.

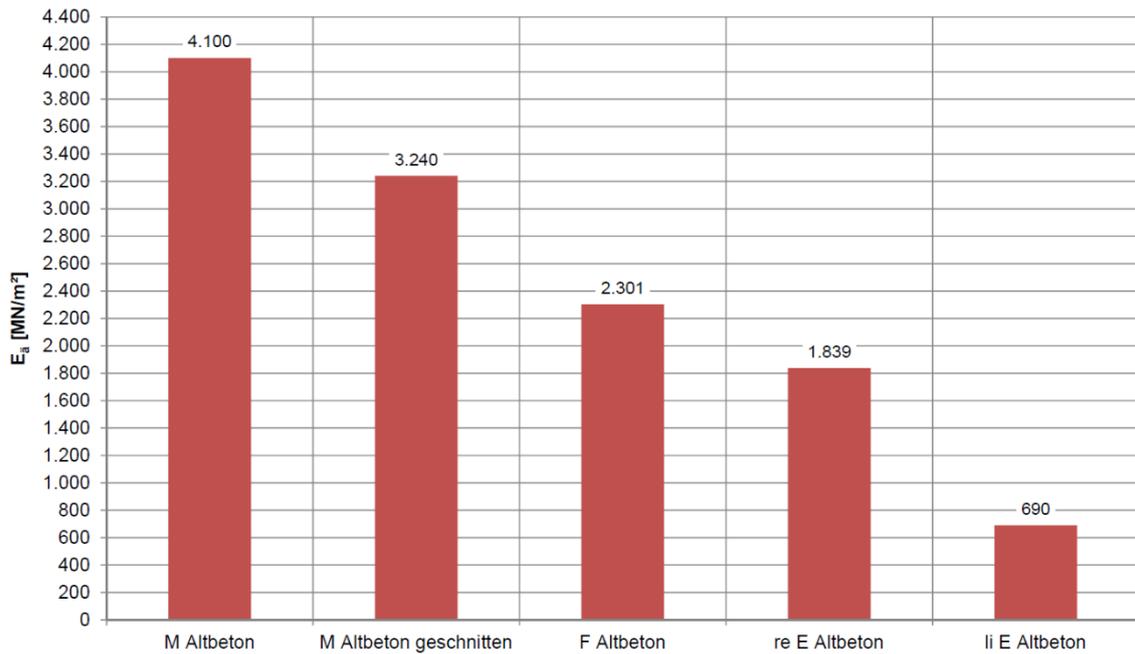


Abbildung 128: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn vor dem Einbau der Fertigteile

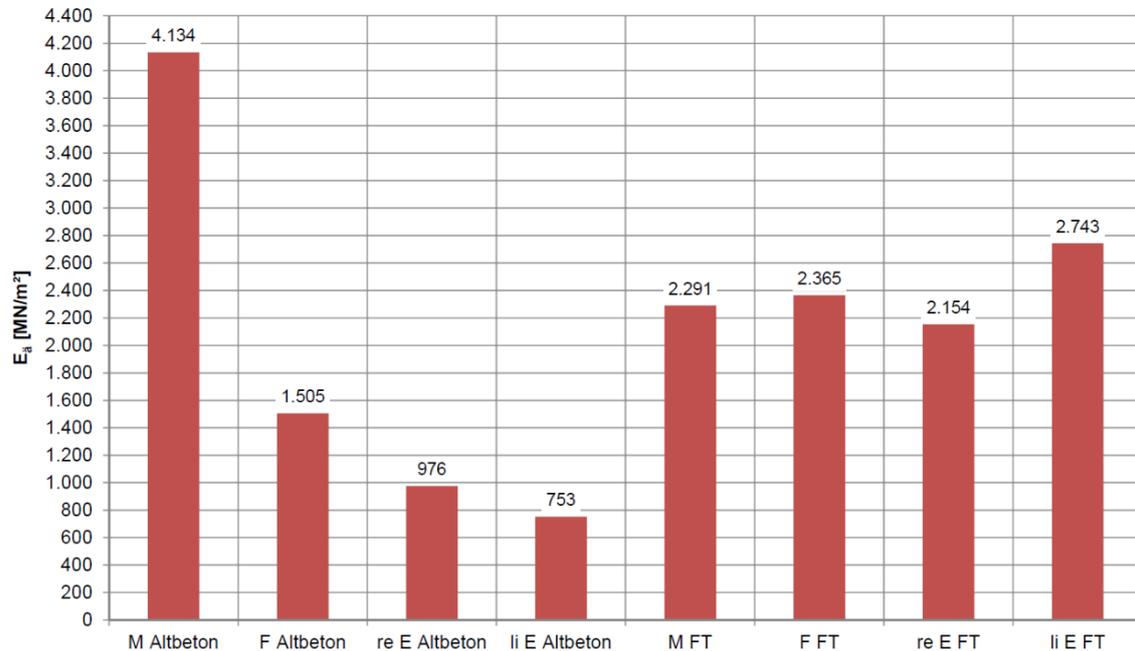


Abbildung 129: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile

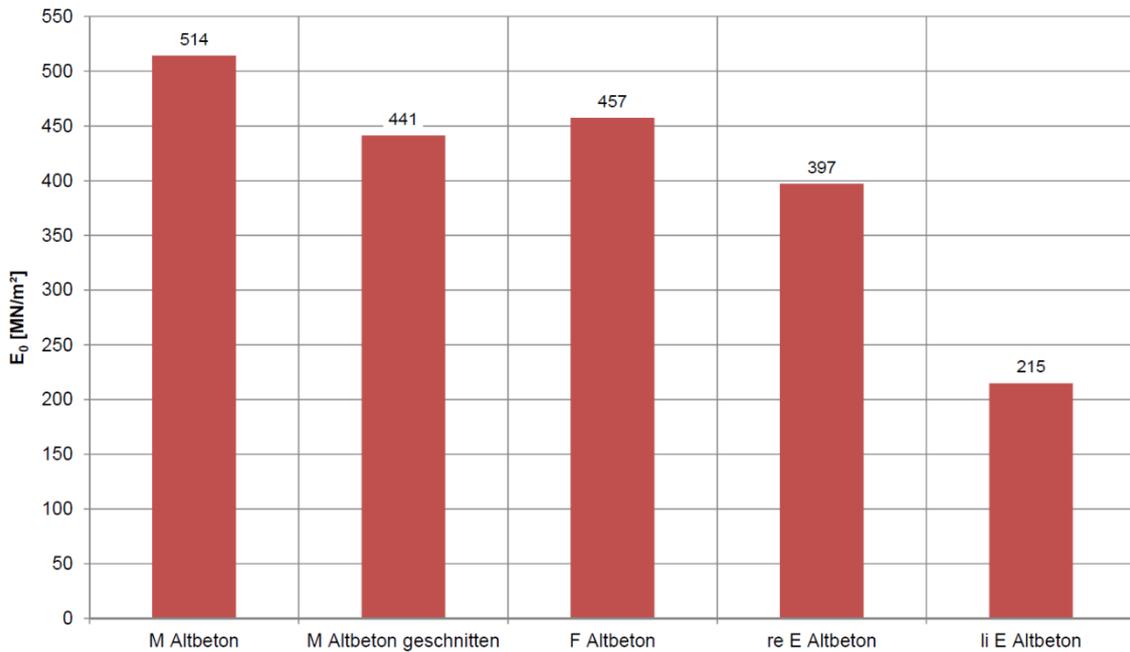


Abbildung 130: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m²] vor dem Einbau der Fertigteile

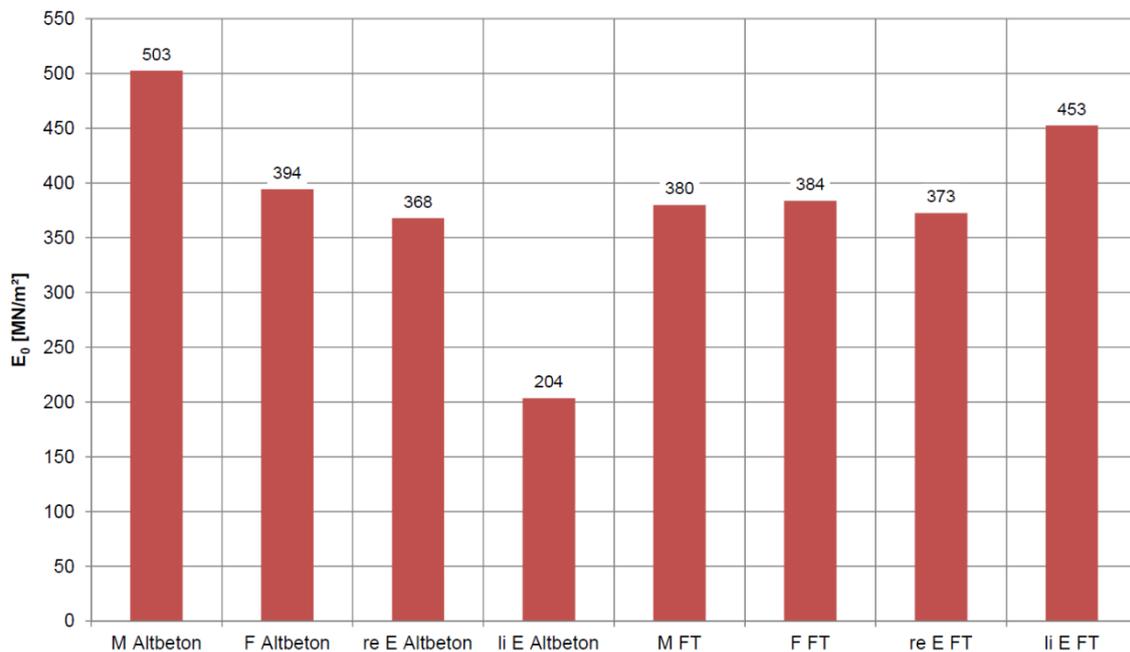


Abbildung 131: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m²] nach dem Einbau der Fertigteile

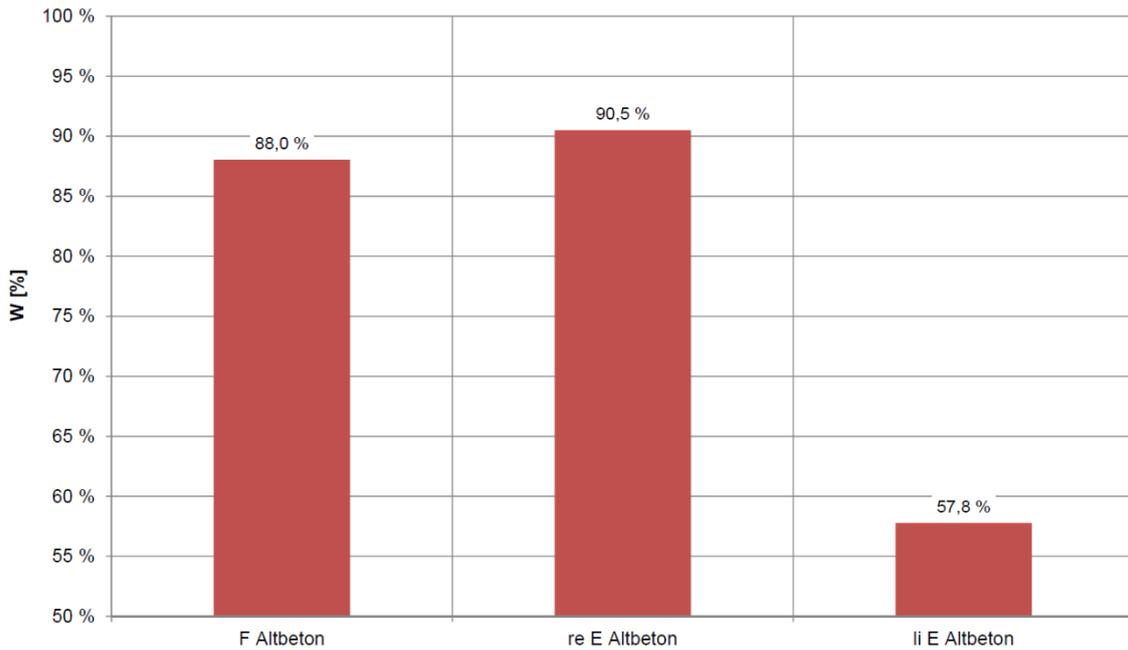


Abbildung 132: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor dem Einbau der Fertigteile

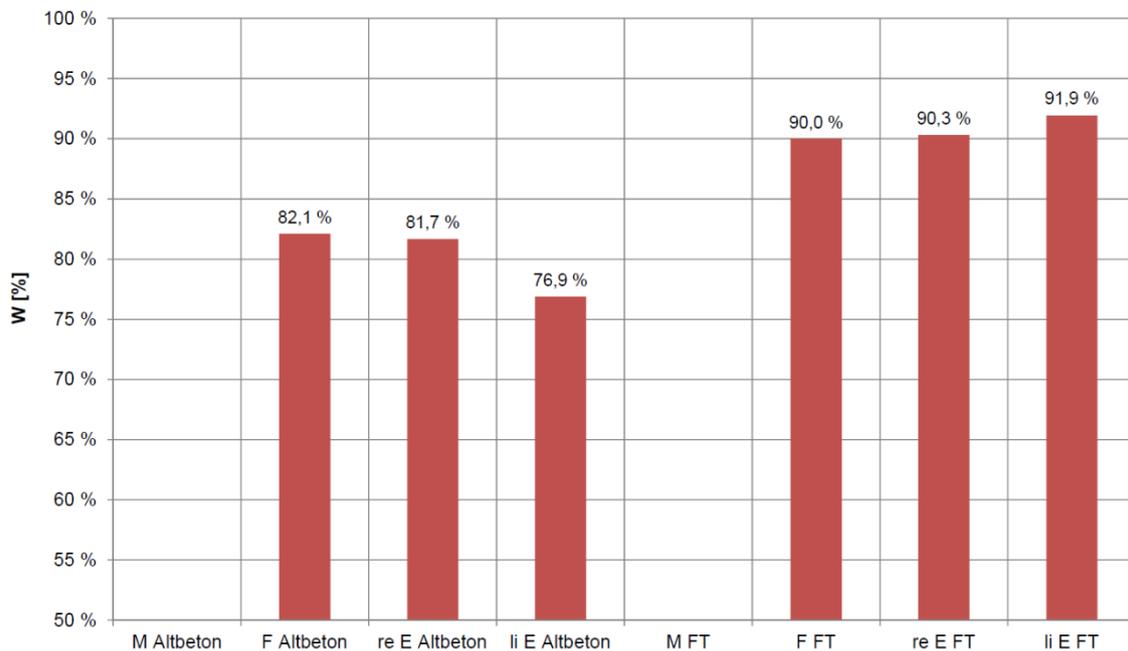


Abbildung 133: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile

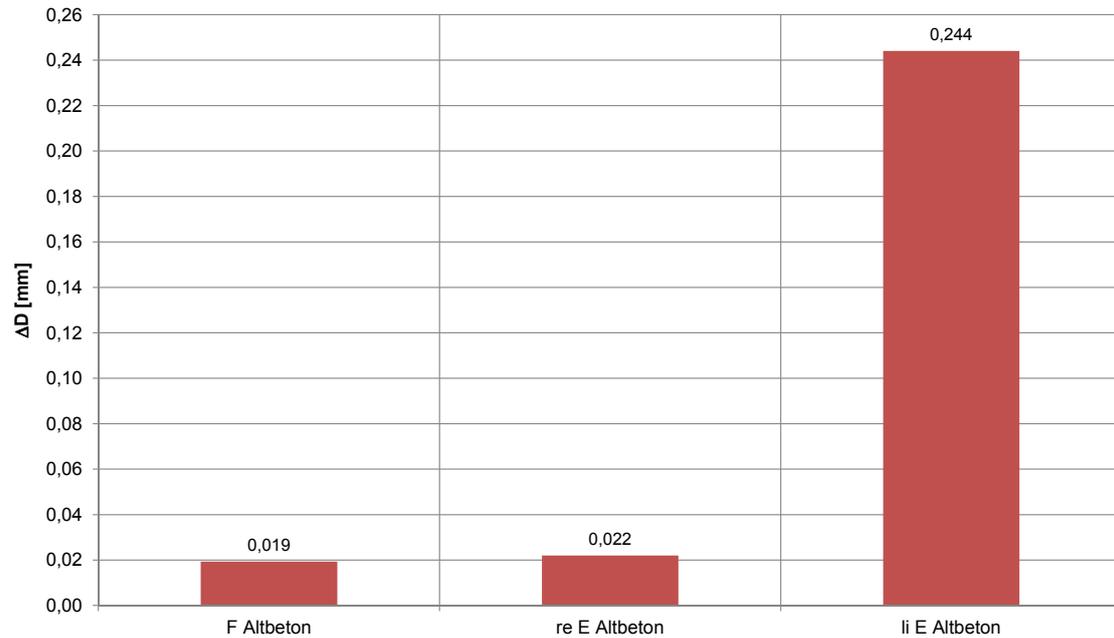


Abbildung 134: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor dem Einbau der Fertigteile

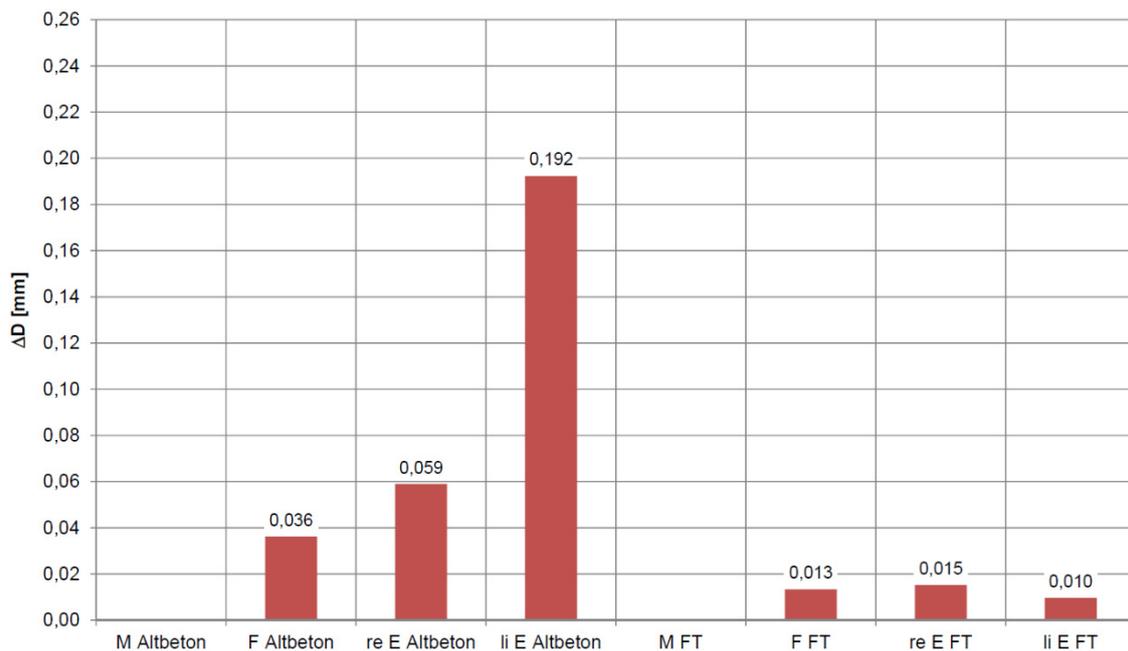


Abbildung 135: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile

Der äquivalente Verformungsmodul beträgt auf OK Altbeton am 20.8.2018 in Plattenmitte vor und nach dem FT-Einbau durchschnittlich $E_{\bar{a}} \approx 4.120 \text{ MN/m}^2$.

An den geschnittenen Platten ist der äquivalente Verformungsmodul demgegenüber mit i.M. $E_{\bar{a}} \approx 3.240 \text{ MN/m}^2$ etwas geringer.

An den Querfugen des Altbetons ist vor dem FT-Einbau mit $E_{\bar{a}} \approx 2.300 \text{ MN/m}^2$ ein kleinerer äquivalenter Verformungsmodul als in Plattenmitte vorhanden.

Dies deutet darauf hin, dass zum Messzeitpunkt in der Betondecke temperaturbedingt keine hohen Längsdruckspannungen wirksam waren.

Nach dem Einbau der Fertigteile ergab sich an der Querfuge des Altbetons am MP 10 eine weitere Entspannung, sodass der Verformungsmodul von $E_{\bar{a}} = 1.824 \text{ MN/m}^2$ auf $E_{\bar{a}} = 1.334 \text{ MN/m}^2$ zurückging.

An den rechten Plattenecken des Altbetons wurde vor dem FT-Einbau noch ein geringerer äquivalenter Verformungsmodul von im Mittel $E_{\bar{a}} \approx 1.839 \text{ MN/m}^2$ als an den Querfugen ermittelt.

Das gilt insbesondere auch nach dem Einbau der Fertigteile für die rechte Plattenecke des Altbetons am MP 15, an dem der Verformungsmodul von $E_{\bar{a}} = 1.262 \text{ MN/m}^2$ auf $E_{\bar{a}} = 882 \text{ MN/m}^2$ zurückging. Dies weist darauf hin, dass sich die Tragfähigkeit der Betonplatte an diesem Messpunkt durch den Ausbau der angrenzenden Platten für den nachfolgenden Fertigteileinbau weiter verschlechtert hat.

Besonders niedrig sind die Tragfähigkeiten an den linken Plattenecken des Altbetons, sie betragen im Mittel nur $E_{\bar{a}} \approx 690 \text{ MN/m}^2$.

Speziell an der linken Plattenecke des Altbetons am MP 20 wurde bereits vor dem FT-Einbau ein extrem niedriger äquivalenter Verformungsmodul von $E_{\bar{a}} = 337 \text{ MN/m}^2$ gemessen, der sich nach dem FT-Einbau noch weiter auf $E_{\bar{a}} = 286 \text{ MN/m}^2$ verringert hat. Die Änderung des äquivalenten Verformungsmoduls an den Messstellen MP 15 und MP 20 weist darauf hin, dass die Randbedingungen am fertigteilabgewandten Rand der Bestandsplatte durch den Einbau der Fertigteile deutlich beeinflusst wurden. Ein größerer Einfluss zeigte sich dabei am Messpunkt an der Außenseite der Betonplatte am Übergang zum Asphalt.

In Plattenmitte der Fertigteile liegt der äquivalente Verformungsmodul aufgrund der kleineren Plattenabmessungen mit $E_{\bar{a}} = 2.290 \text{ MN/m}^2$ unter dem in Plattenmitte des Altbetons.

Besonders bemerkenswert ist jedoch die Feststellung, dass an den Querfugen und Plattenecken der Fertigteile etwa die gleichen Tragfähigkeitskennwerte vorliegen. Als Gesamtmittel ergibt sich für die Fertigteile $E_{\bar{a}} \approx 2.390 \text{ MN/m}^2$ mit einem geringen Variationskoeffizienten von 11 %.

Auf den Fertigteilen liegt also eine sehr gleichmäßige hohe Tragfähigkeit vor, unabhängig davon, ob in Plattenmitte, an den Querfugen oder an den Plattenecken gemessen wurde. Dieses Tragverhalten entspricht dem einer durchgehend langen Platte ohne signifikante Querschnittsschwächungen.

Es ist zu empfehlen, die Tragfähigkeitsmessungen nach Verkehrsbelastung zu wiederholen, um festzustellen, ob dieses Tragverhalten dauerhaft ist oder ob die Fertigteile sich voneinander lösen und als Einzelplatten wirken.

Die Gesamttragfähigkeit E_a korrespondiert mit der Bettungstragfähigkeit E_0 . Danach ist der Bettungsmodul in Plattenmitte Altbeton vor und nach FT-Einbau mit $E_0 \approx 508 \text{ MN/m}^2$ am höchsten, an den linken Plattenecken des Altbetons am niedrigsten, was auf eine teilweise Hohlagerung hinweist.

Unter den Fertigteilen ist demgegenüber an allen Messpunkten etwa die gleiche Bettungstragfähigkeit vorhanden. Sie beträgt im Gesamtmittel $E_0 \approx 400 \text{ MN/m}^2$ mit einem Variationskoeffizienten von nur 9 %.

Besonders bemerkenswert ist der hohe Bettungsmodul an den linken Plattenecken der Fertigteile. Es kann somit von einer vollflächigen Unterpressung der Fertigteile ausgegangen werden.

Die an den Querfugen und Plattenecken gemessene niedrigere Gesamttragfähigkeit des Altbetons spiegelt sich auch im Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung wider.

Der Gesamtmittelwert beträgt an den Querfugen und rechten Plattenecken des Altbetons vor dem FT-Einbau $W \approx 89 \%$ und an den linken Plattenecken nur $W \approx 58 \%$. In ähnlicher Größenordnung liegen auch die Wirksamkeitsindizes nach dem FT-Einbau mit $W \approx 83 \%$ an den Querfugen und rechten Plattenecken des Altbetons bzw. $W \approx 77 \%$ an den linken Plattenecken.

Im Vergleich hierzu ist an den Querfugen und an allen Plattenecken der Fertigteile ein gleichmäßig hoher Wirksamkeitsindex von $W \approx 91 \%$ gemessen worden.

Dementsprechend niedrig sind auch die Relativdeflexionen von i. M. $\Delta D \approx 0,013 \text{ mm}$ an den Querfugen und Plattenecken der Fertigteile.

Die Relativdeflexionen an den linken Plattenecken des Altbetons betragen vergleichsweise vor dem FT-Einbau im Mittel $\Delta D \approx 0,24 \text{ mm}$.

In Abbildung 136 bis Abbildung 139 sind die Einzelwerte der Messungen für die einzelnen Messpunkte dargestellt.

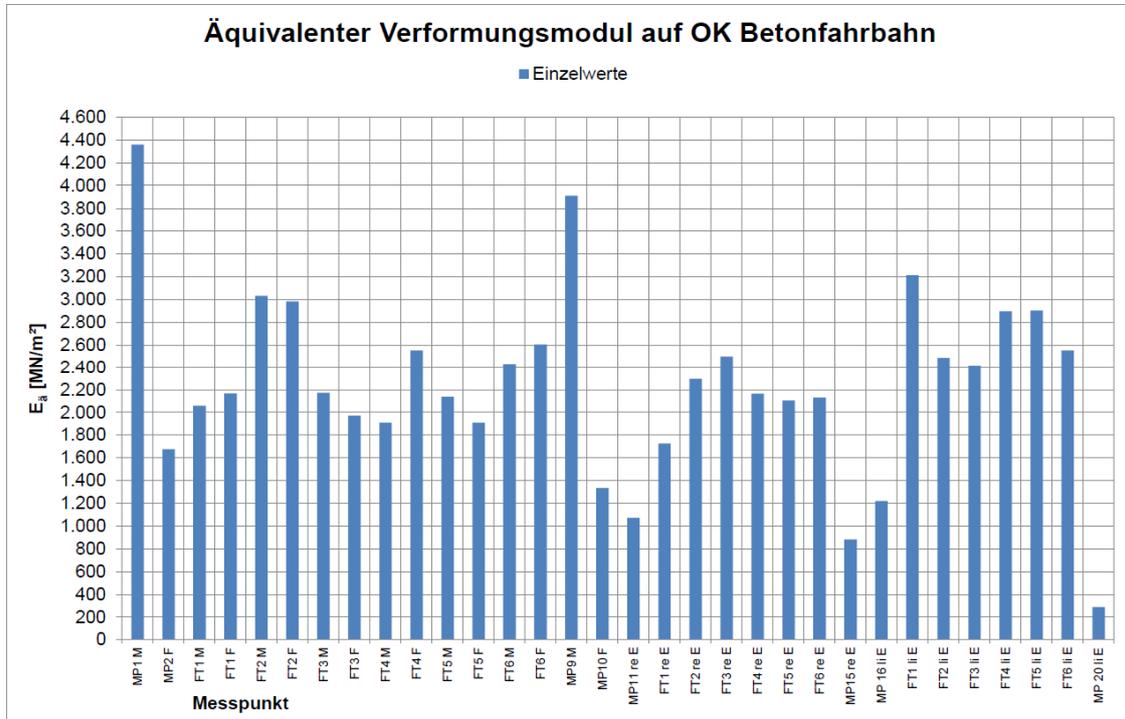
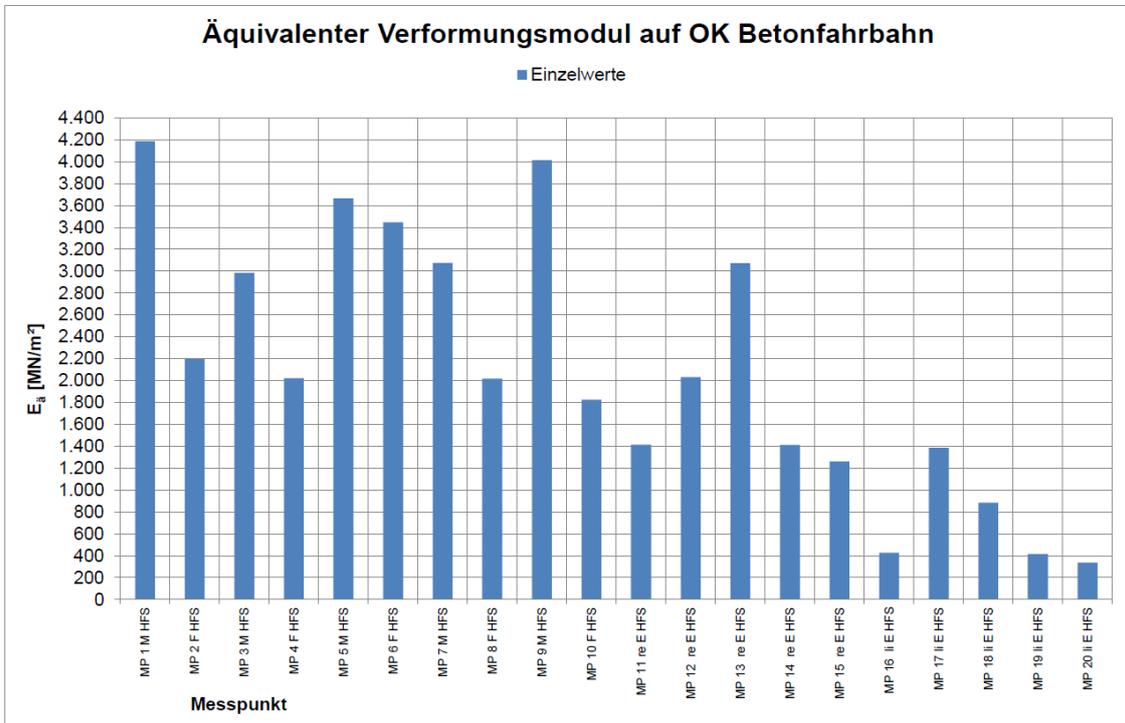


Abbildung 136: Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m²] auf OK Fahrbahn vor und nach dem Einbau der Fertigteile

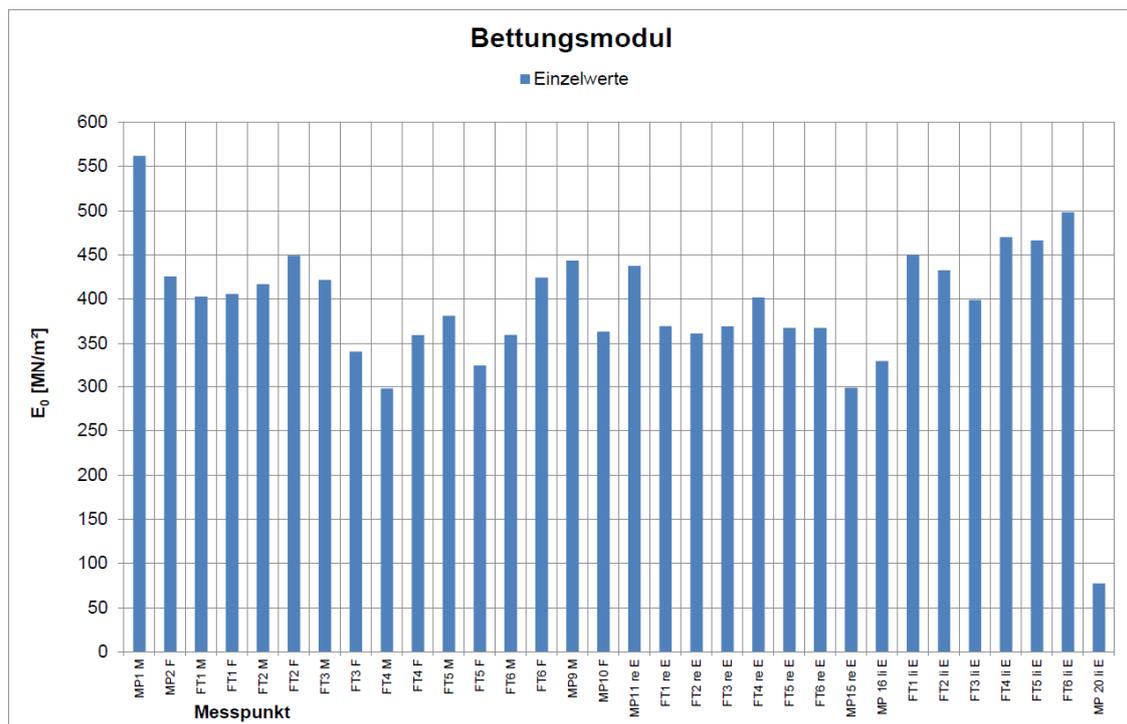
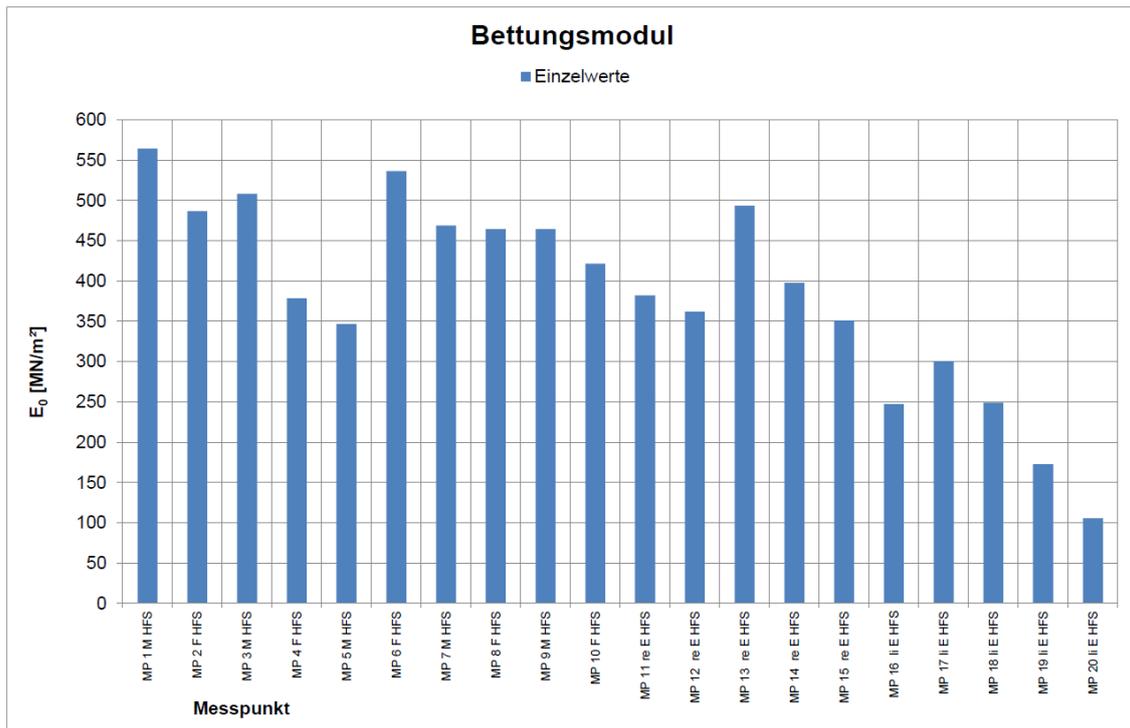


Abbildung 137: Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m²] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

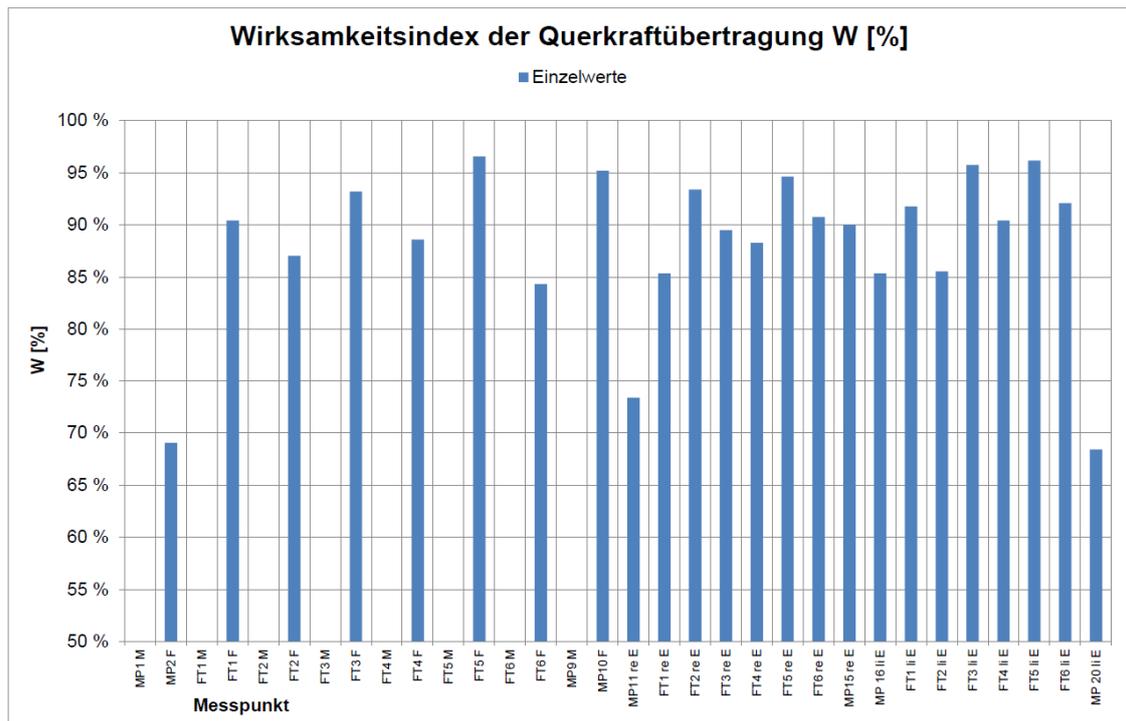
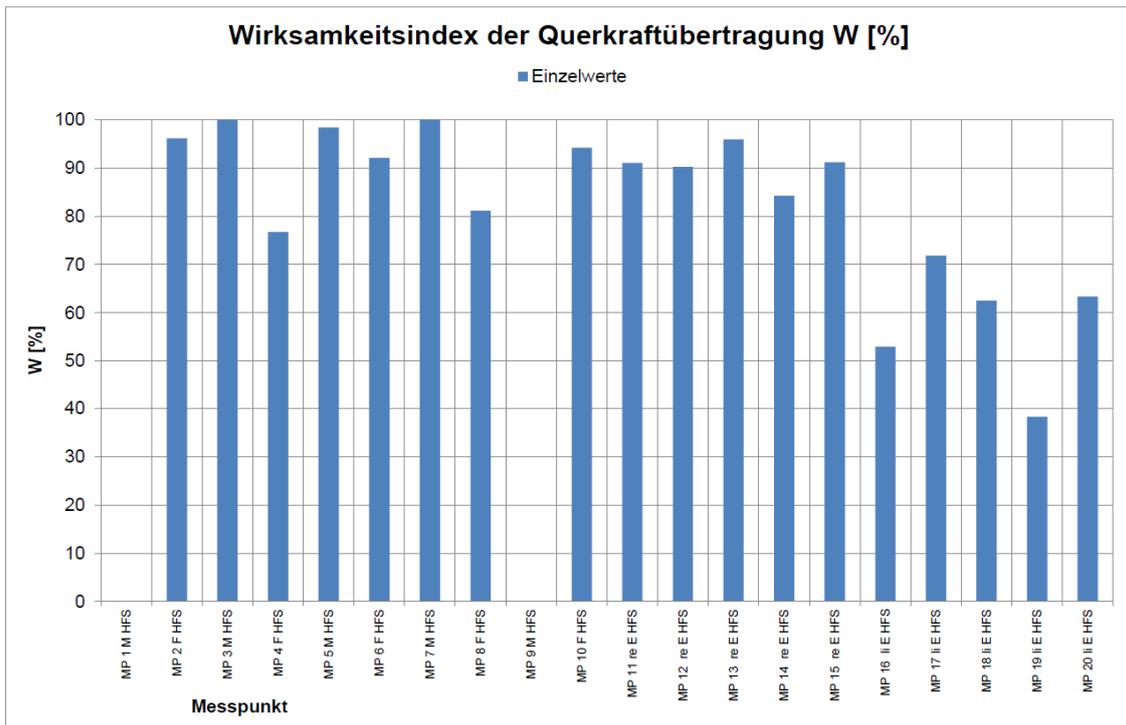


Abbildung 138: Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

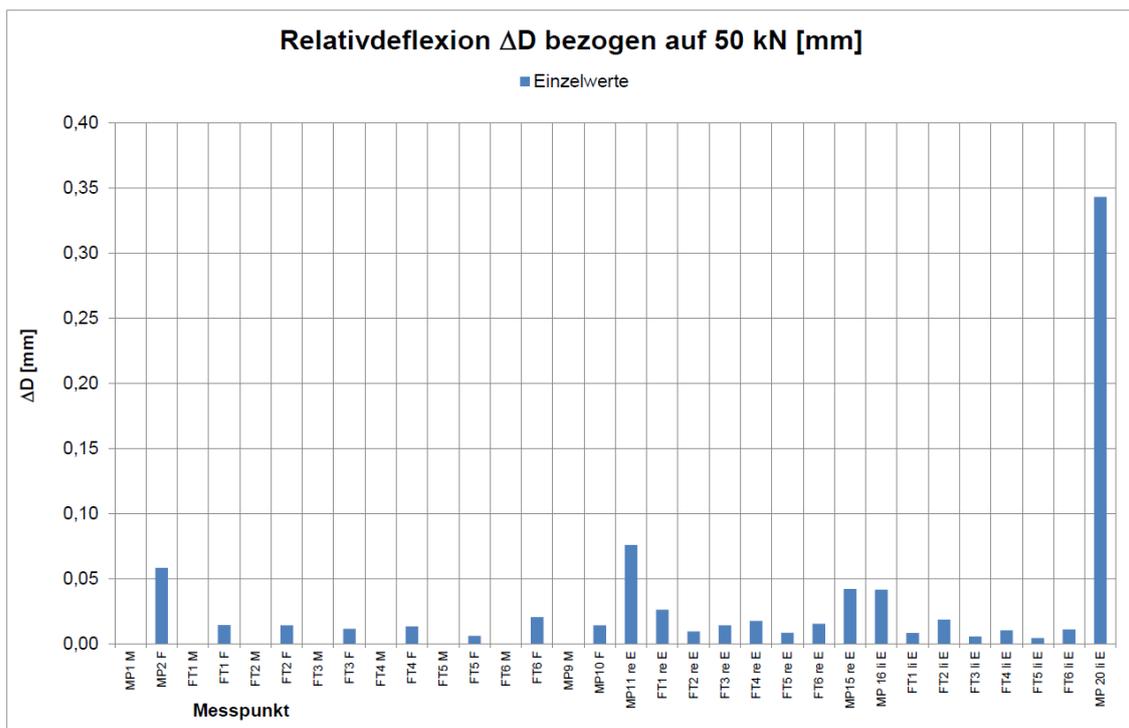
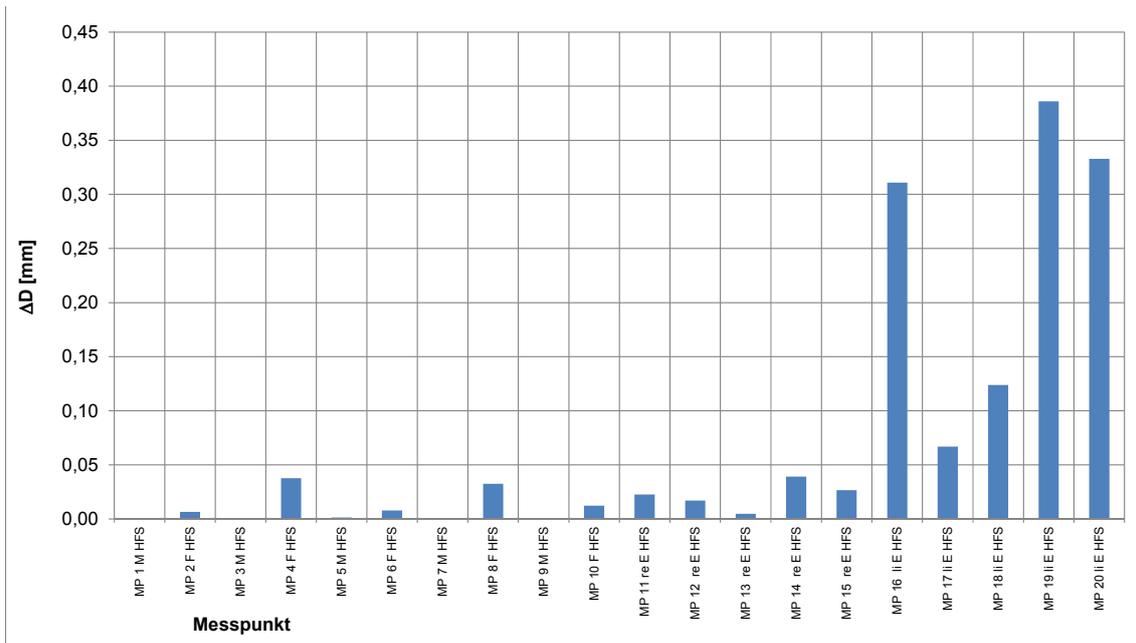


Abbildung 139: Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor und nach dem Einbau der Fertigteile

9.2 Messsensorik

Zur Erfassung der Einbaugenauigkeit der Fertigteile bzw. möglicher dadurch im Fugenbereich entstandener Sprünge / Versätze und in weiterer Folge zur Bestimmung der Rauigkeitsänderungen wurden beide Einbaustellen unmittelbar nach dem Einbau der letzten rechteckigen Platten (Platten 4/5/6) am 23. August mit dem mobilen Straßenzustandserfassungslabor RoadSTAR (siehe Abbildung 140) befahren. Mit dem RoadSTAR können die wichtigsten Oberflächeneigenschaften und Trassierungsparameter mit höchster Qualität und Genauigkeit erfasst und ausgewertet werden. Die Messungen erfolgen ohne Beeinträchtigung des fließenden Verkehrs mit einer Standardmessgeschwindigkeit von 60 km/h. Im Zuge der Auswertung lag der Fokus auf der Einbaugenauigkeit. Daher wurden vor allem die Daten der Laserscannmessung mit einer Auflösung von 11.000 Punkten/m² (dies entspricht in Längsrichtung ~20 mm, Querrichtung ~5 mm) und einer vertikalen Genauigkeit von 0,2 mm verwendet. Des Weiteren wurde die Überfahrt des Messfahrzeuges mit bekannten Achslasten zur Validierung der Auswertung der in den Demonstratoren eingebetteten Dehnungssensoren verwendet.

Zur Bestimmung und Darstellung der Rauigkeitsänderung wurden Schnitte durch die Punktwolke der Laserscandaten gemacht, anhand derer in Profilauswertungen die Einbaugenauigkeit ermittelt wurde (Abbildung 141, Abbildung 142 und Abbildung 143). Zusätzlich wurden entzerrte Grafiken aus den Oberflächenscandaten erstellt.



Abbildung 140: Erfassung der Oberflächeneigenschaften und Geometrie mit dem Hochleistungsmessfahrzeug RoadSTAR.

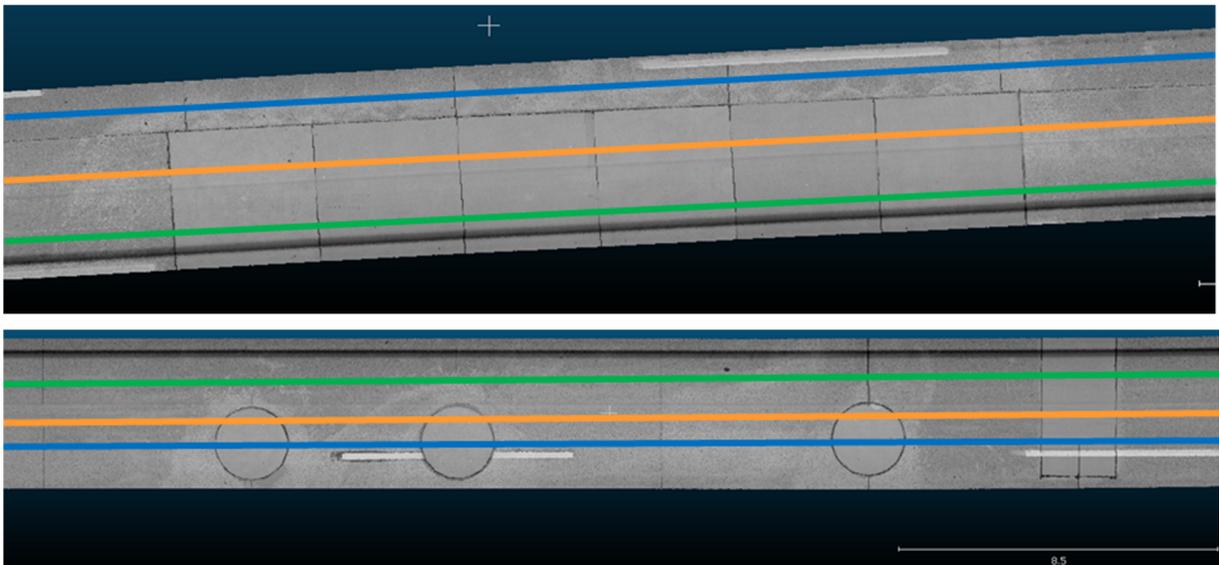


Abbildung 141: Draufsicht der Laserscan-Punktwolken der eingebauten rechteckigen (oben) und runden (unten) Platten. Die farbigen Linien kennzeichnen die Auswertungsprofile, welche in Abbildung 142 und Abbildung 143 (farblich gleich) dargestellt sind.

Die Profile der Einbaustelle der sechs rechteckigen Platten wurden eineinhalb Tage (Platten 1/2/3) bzw. einen halben Tag (Platten 4/5/6) nach dem Einbau gemessen und sind in Abbildung 142 einzusehen. Es wurden Schnitte durch den Bestand, den linken Plattenrand sowie Plattenmitte gelegt.

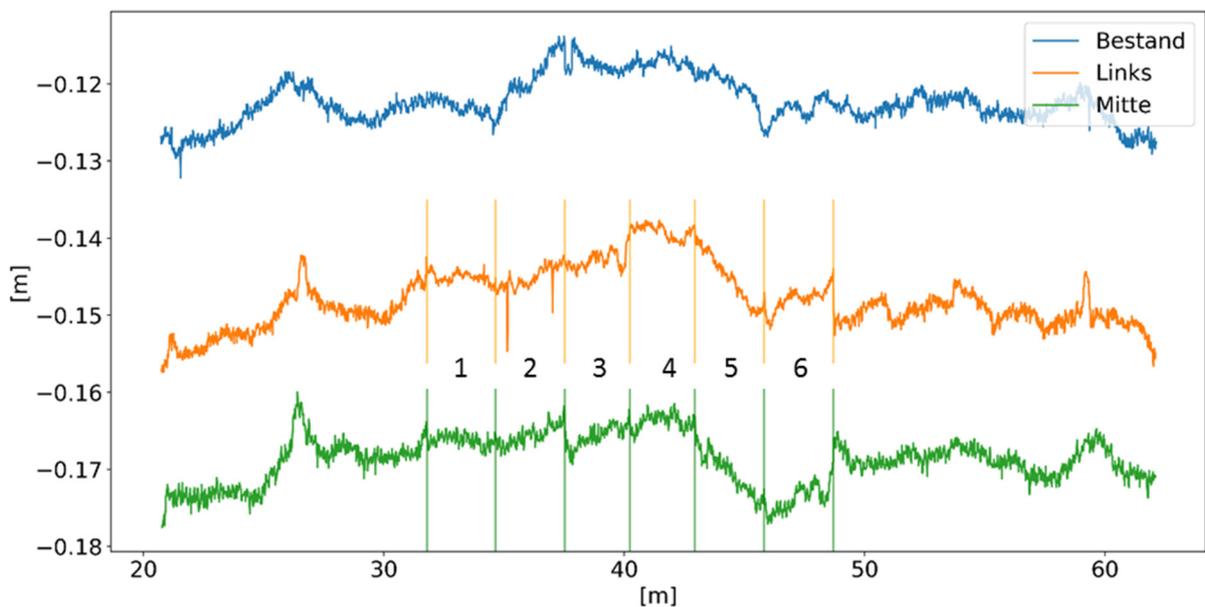


Abbildung 142: Längsunebenheit im Einbaubereich der rechteckigen Platte 3 Tage nach dem Einbau. Die vertikalen Linien stellen die Fugen zwischen den Fertigteilen dar.

Aus der detaillierten Betrachtung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Allgemein kann gesagt werden, dass die bestehende Straßenoberfläche eine ähnliche Oberflächenebenheit wie die Fertigteilplatten besitzt, allerdings gibt es hier, sofern noch der Originalbelag erhalten ist, keine Sprünge oder vertikalen Versätze. Der einzige Sprung der im Profil Bestand (blaue Linie) erkennbar ist, befindet sich im Bereich zwischen dem 2. und 3. Fertigteil, dieser ist allerdings auf eine bereits zurückliegende Reparatur mit schnell aushärtendem Beton zurückzuführen und hat mit dem Einbau direkt nichts zu tun. Diese ca. 35 cm lange Ausbesserungsstelle hat eine Tiefe von etwa 5 mm und ist im gemessenen Profil deutlich erkennbar.

Im Detail ergibt sich für die rechteckigen Fertigteile folgendes Bild:

An der Unstetigkeitsstelle des linken Profils (orange Linie) ist zwischen der Platte 3 und Platte 4 ein Versatz von ca. 5 mm messbar. Dies wurde als jene Stelle identifiziert die beim Einbau im Kantenbereich beschädigt und repariert wurde. Die signifikanten Stellen in der Platte 2 stellen Messausreißer dar (aufgrund der Auflösung können diese kleine Fehlstellen wie Kieselsteine oder größere Poren sein, werden aber nicht weiterverfolgt). Beim Übergang von der Platte 6 auf den Bestand ist im Profil ein Abfall von zirka 8 mm erkennbar.

Im Profil Plattenmitte (grüne Linie) ist zwischen dem 2. und 3. Fertigteil einen Versatz von 6 mm nach unten vorhanden, beim Übergang zum Bestand (Platte 6) liegt ein Sprung nach oben von 8 mm vor.

Die Ebenheit der Fahrbahn in 3 verschiedenen Profilen der runden Fertigteile ist in Abbildung 143 dargestellt, grün ist der Bestand, orange der Plattenrand sowie blau die Plattenmitte.

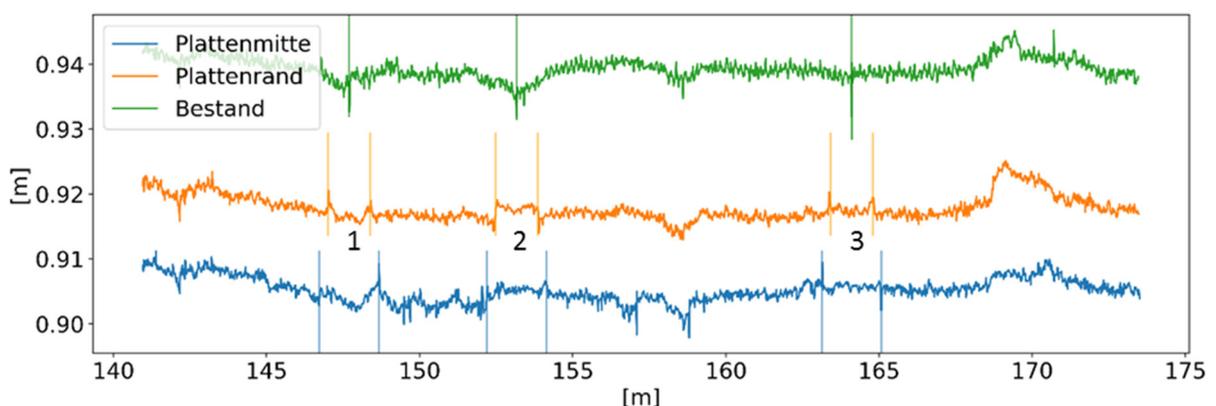


Abbildung 143: Längsunebenheit im Einbaubereich der runden Platte 3 Tage nach dem Einbau. Die vertikalen Linien stellen die Fugen dar (Das Orange Profil befindet sich 30 cm vom Plattenrand entfernt).

Im Bestand (grün) sind hier die Plattenfugen, und somit die Einbaustelle der Fertigteile, gut erkennbar. Im Profil in Plattenmitte (blau) können Sprünge beim ersten und beim dritten

Fertigteile erkannt werden, wobei diese maximal 3 mm betragen. Im Profil Rand (Stelle 30 cm vom Plattenrand) sind ebenfalls Unebenheiten von maximal 3 mm bei allen drei Fertigteilen zu erkennen.

Die gemessene Einbaugenauigkeit ist bei den runden Platten größer als bei den rechteckigen Platten. Die rechteckigen Platten haben Sprünge von max. ± 8 mm. Vor allem beim Übergang zum Bestand sind bei der rechteckigen Platte größere Sprünge vorhanden. Die runden Fertigteile haben Einbaugenauigkeiten von ± 3 mm. Verglichen mit den Erkenntnissen aus der numerischen Parameterstudie der Plattensprünge (Kapitel 6.1.1) sind die dynamischen Lasteffekte bei den runden Fertigteileplatten eher von untergeordneter Bedeutung, bei den rechteckigen jedoch zu berücksichtigen. Die Messungen stellen eine Bestandsaufnahme unmittelbar nach dem Einbau dar, und beinhalten keine Langzeiteffekte und Setzungen. Aussagen zu diesen Effekten könnten z. B. durch eine detaillierte Auswertung künftiger Messfahrten gewonnen werden.

9.3 Dauerüberwachung der Demonstratoren

9.3.1 Messkonzept

Die Dauerüberwachung der Fertigteileplatten erfolgt mittels eingebetteten Sensoren. Dazu werden diese direkt an ausgewählten Stellen in den Platten einbetoniert. Mit diesen Sensoren sollen über die Messung von mechanischen Kenngrößen Rückschlüsse auf die Tragwirkung sowie dynamische Effekte gezogen und die numerischen Berechnungen validiert werden.

Wichtig dabei ist, dass diese Sensoren eine gewisse Größe nicht überschreiten, um hier die Messung nicht zu verfälschen. Aus diesem Grund hat sich im Zuge der detaillierten Versuchsplanung ergeben, faseroptische Dehnungssensoren zu verwenden, welche hochfrequent abgetastet werden können. Damit können auch hier dynamische Effekte erfasst werden. Die Messung von Eigenfrequenzen hat nach Erkenntnissen der numerischen Detailanalyse (siehe Kapitel 6.1.2) geringe bis keine Aussagekraft, da diese stark von Aufstandsflächen bzw. Verbundverhältnissen mit dem Untergrund abhängt. Aus den Dehnungsmesssensoren könnten, für den Fall, dass eine dynamische Interaktion vorliegt, mit den gewählten Einstellungen auch die Eigenfrequenzen bestimmt werden. Mit der Bestimmung von Dehnung und Temperatur während des Messzeitraums können zum einen Kenntnisse über Einwirkungen aus Umwelteinflüssen gewonnen werden, zum anderen soll das numerische Modell mit realen Daten abgeglichen und dynamische Interaktionen von

Überfahrten bestimmt werden. Zum Test des Konzepts wurden anhand von Vorversuchen von einbetonierten Sensoren die Machbarkeit und Umsetzbarkeit getestet.

Es wurden sowohl eine rechteckige, als auch eine runde Platte, der eingebauten Fertigteile mit Sensoren bestückt. Die erste Messanlage wurde am 21.08.2019 morgens kurz nach Mitternacht in Betrieb genommen, in der folgenden Nacht folgte kurz vor 24:00 die zweite Messanlage. Beide Anlagen sind so ausgestattet, dass über die Projektlaufzeit hinaus noch immer Daten aufgezeichnet werden können. Sie sind sowohl für dynamische (hochfrequente) als auch für statische Messungen (Temperatur/Zwang) geeignet. Mit der dynamischen Messung kann der Dehnungsverlauf eines Einzelfahrzeuges bei der Überfahrt hochauflösend registriert werden, während die statische Messung Aussagen über den Temperatur-Dehnungs-Verlauf und damit über das statische System der Platte sowie auch das zeitliche Verhalten der Demonstratoren über den Messzeitraum zulässt.

Zusätzlich wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient bestimmt, um aus den instrumentierten Platten aus Kombination von gemessenen Temperatur und Dehnungen auf Zwangskräfte rückschließen zu können. Dazu erfolgten eigene Materialtests zur exakten Bestimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten, sowie zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des verwendeten Betons. Diese Daten werden für ein FEM-Model Updating verwendet, das in der Datenauswertung herangezogen wird.

Die Messung, die Nachrechnung mit aktualisierten Kennwerten sowie die Auswertung sind in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

9.3.2 Messlayout

Zur Dauermessung wurden, wie bereits oben angeführt, zwei Platten installiert. Bei km 143,5 an der A1 in Fahrtrichtung Linz wurde eine runde und bei km 151,5 in Fahrtrichtung Wien eine rechteckige Fertigteilplatte mit Sensorik ausgestattet. Die gesamte Messung wurde mit faseroptischen Sensoren durchgeführt, da diese eine Reihe von Vorteilen bieten. Diese sind langzeitstabil, haben eine geringe Ausfallrate, weisen eine hohe Genauigkeit auf, kommen ohne Strom im Messkörper aus und sind praktikabel für die Einbaubedingungen, denn es können sich an einem Messstrang (Kabel) mehrere Sensoren befinden. Damit können sowohl dynamische als auch statische Messungen durchgeführt werden. Nachteile der faseroptischen Messung sind die Sensibilität des Kabels auf Hitze und Knicken sowie der relativ hohe Preis des Messsystems.

In Abbildung 144 und Abbildung 145 sind die beiden Messstellen sowie der prinzipielle Messaufbau in einem Orthofoto dargestellt, wobei an jedem Standort zwei Sensorketten

bestehend aus sechs bzw. sieben Sensoren verbaut sind. Jede Sensorkette ist mit einem faseroptischen Kabel mit dem Interrogator in der Messbox verbunden, wobei die Messbox im Falle der rechteckigen Platte zum Schutz in einem kleinen Raum unter einer Brücke in der Nähe der Messstelle (Brücke über den Ennskanal) montiert wurde. Im Falle der runden Platte ist die Box an der Rückseite der Lärmschutzwand in unmittelbarer Nähe befestigt. In der Messbox befindet sich ein PC, von welchem die Messdaten vom Interrogator abgefragt, zwischengespeichert und in 15 min Intervallen via mobilem Internet auf einen AIT hausinternen Datenserver verschickt werden. Die mechanischen Kenngrößen und Temperaturänderungen werden mittels Phasenverschiebungen von Lichtimpulsen und Interferenzen bestimmt, zur Umwandlung der Lichtimpulse dient der Interrogator. In diesem Projekt wurden Interrogatoren der Firma Smartfibres verwendet, wobei bei der runden Platte einer mit vier (SmartScan) und bei der rechteckigen einer mit acht (Modular SmartScan 08-40) Eingangskanälen verwendet wurde. Die Stromversorgung der Interrogatoren und der Messbox wurde bei der rechteckigen Platte über eine Photovoltaikanlage sichergestellt, die von der ASFINAG zur Verfügung gestellt wurde. Bei der runden Platte befindet sich in unmittelbarer Nähe der Messbox ein Schaltschrank des Autobahnbetreibers ASFINAG welcher 230V Versorgungsspannung zur Verfügung stellt. Dieser konnte für den hier vorgesehenen Anschluss genutzt werden.

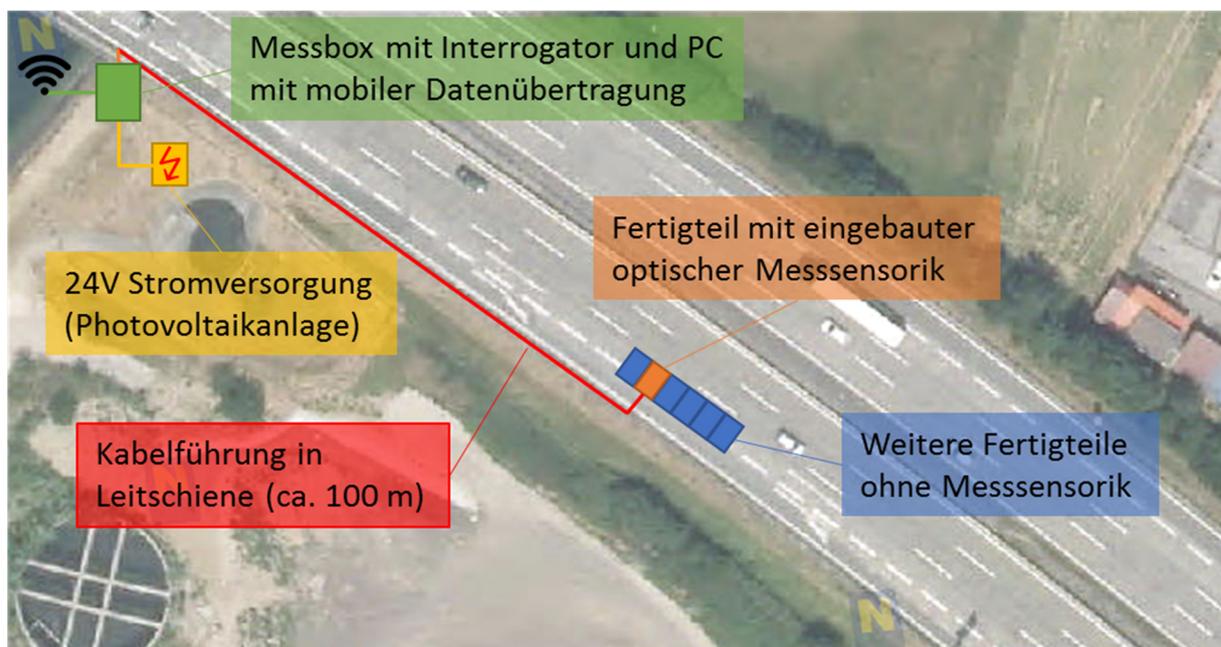


Abbildung 144: Übersichtsdarstellung des Messaufbaues im Bereich der Abfahrt St. Valentin (rechteckige Fertigteile) [Quelle Luftbild:atlas.noe.gv.at]

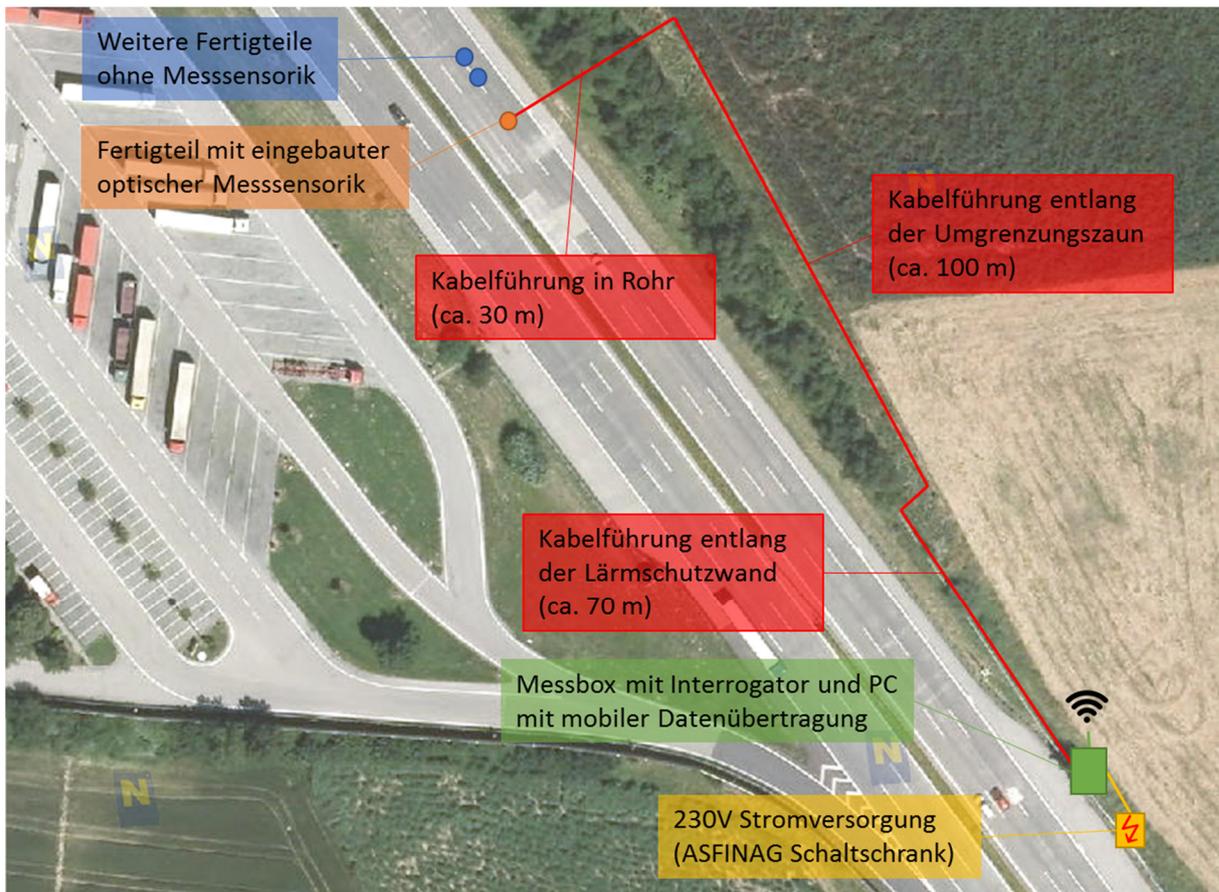


Abbildung 145: Übersichtsdarstellung des Messaufbaues im Bereich km 143,5 (runde Fertigteile) [Quelle Luftbild: atlas.no.e.gv.at]

Für die Dehnungsmessung wurden Sensoren mit der Bezeichnung ES-01 der Firma Sylex Fiber Optics verwendet (Abbildung 146). Diese haben einen Messbereich von $\pm 200 \mu\text{m}$ und eine Genauigkeit von $<0,23\%$ (entspricht $< 1\mu\text{m}$) über den gesamten Messbereich. Die Temperaturmessung wurde mit Sensoren der Bezeichnung TP-02 durchgeführt, welche ebenfalls von Sylex stammen. Der Messbereich dieser Sensoren, welche mit den Dehnungssensoren an einem Messstrang angeordnet werden können, liegt zwischen -20°C und $+60^\circ\text{C}$ mit einer garantierten Genauigkeit von 1°C . Die Dehnungen werden einachsig in Sensorrichtung gemessen.

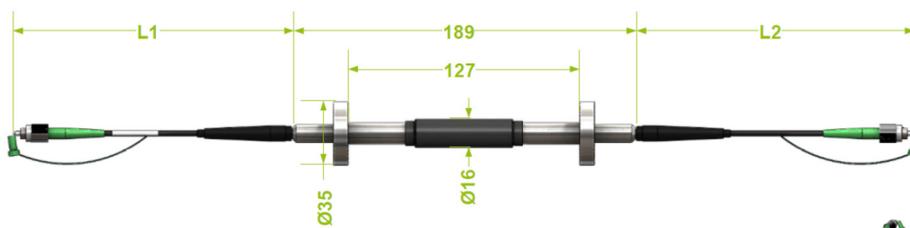


Abbildung 146: Verwendeter faseroptischer Dehnungssensor.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den FE-Berechnungen (Kapitel 6) wurde das **Messlayout** abgeleitet. Wie in Abbildung 147 ersichtlich, wurden bei der **runden** Platte vor allem die Dehnungen in Plattenmitte erfasst. Hier sind, bis auf zwei Dehnungssensoren (Line 1 S3 und S4) alle Temperatur- und Dehnungssensoren in verschiedenen Höhen im Bauteil und sowohl in Längs- als auch Querausrichtung verteilt. Die beiden Dehnungssensoren im Randbereich befinden sich an der Plattenoberseite und sind in Längsrichtung orientiert.

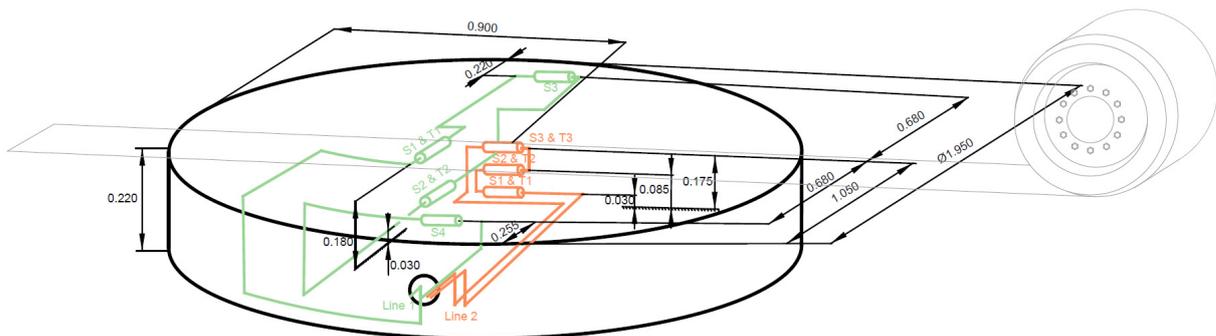


Abbildung 147: Sensorbezeichnungen und -positionen im runden Fertigteile, grau dargestellt ist die mögliche Position der linken Fahrspur eines LKWs. (Bezeichnungen S... Dehnung, T... Temperatur).

Bei der **rechteckigen** Platte wurde die Platte 2 instrumentiert. Diese hatte erwartungsgemäß keinen Versatz zur vorangehenden Fertigteileplatte. Um für die Einbauarbeiten ausreichend Zeit zur Verfügung zu haben, fiel die Wahl auf die zweite Platte der Reihe. Diese wurde frühzeitig im Rahmen der Bauarbeiten verlegt, grenzte aber nicht direkt an den Bestand an. Unzulänglichkeiten aus dem Übergang vom Bestand auf die Fertigteilereihe werden so bei den Messungen nicht berücksichtigt. Zudem stand dadurch ausreichend Zeit zur Verfügung, um die Messsensorik anschließen und testen zu können sowie die Nebenarbeiten (Verschluss der Kabelausleitung) abschließen zu können. In Abbildung 148 ist das Layout aller Sensoren dargestellt. Die Sensoren wurden hauptsächlich im Randbereich positioniert, wobei jeweils vier Dehnungssensoren in Längs- als auch in Querrichtung messen. Da die Anzahl der Sensoren mit 14 Stück limitiert war, musste ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Zuständen (Sommer/Winter) gefunden werden, um möglichst alle Zustände abdecken zu können. Aus diesem Grund musste auf Sensoren in Plattenmitte verzichtet werden, obwohl auch hier mit hohen Belastungen zu rechnen ist. Dieser Bereich liegt im Winter jedoch voll auf, so dass hier kein Schwingen stattfinden kann. Des Weiteren erschien auch die Dehnung in unmittelbarer Nähe zur Radlast von großer Bedeutung, weshalb versucht wurde, die Sensoren möglichst im Bereich der Fahrspuren zu positionieren. An zwei unterschiedlichen Stellen wird außerdem auch das Temperaturprofil in drei Höhenstufen bestimmt.

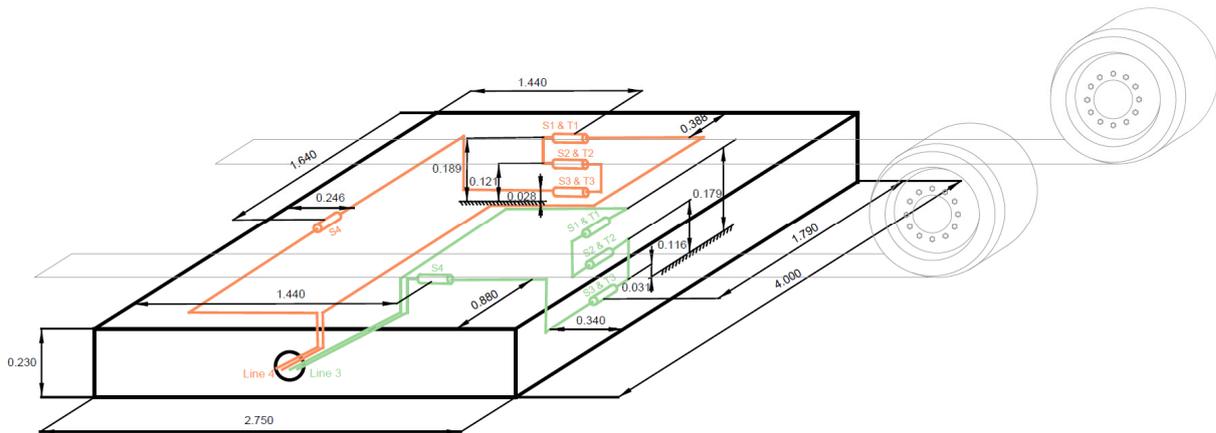


Abbildung 148: Sensorbezeichnungen und -positionen im rechteckigen Fertigteil, grau dargestellt ist die mögliche Position der LKW Fahrspuren.

9.3.3 Einbau der Sensoren und Fertigteile

Bei der Positionierung der Sensoren in der Schalung bzw. im Bewehrungskorb mussten folgende Aspekte beachtet werden:

- Gut definierte Lage der Sensoren im Betonkörper
- Möglichst geringe Störung der Betonmatrix in Sensornähe (Um möglichst gute Messwerte zu bekommen, sollte der Krafffluss im Gefüge möglichst ungestört sein.)
- Temperatursensoren sollten nicht in der Nähe von vertikalen Bewehrungsstäben positioniert werden (aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Metalls).
- Die Bewegungsenergie des Rütteltisches, welche auf die Sensoren übertragen wird, sollte, um Beschädigung zu vermeiden, möglichst geringgehalten werden.

Aufgrund dieser Aspekte wurden die Sensoren an zwei etwa 20 cm langen Stücken einer Kunststoff Abstandsleiste (welche normalerweise als Betonabstandhalter von Bewehrung dienen) befestigt, wobei an einer Seite Dehnungs- und an der anderen Temperatursensoren mit Kabelbindern befestigt wurden (Abbildung 149). Die Abstandsleisten wurden gewählt, weil sie Stabilität, geringe Störung des Betongefüges und geringe Wärmeleitfähigkeit verbinden. Sensoren und Abstandsleisten wurde mit Kabelbindern am Bewehrungskorb befestigt, wobei diese nicht ganz festgezogen wurden, um einen Bewegungsspielraum, welcher eine direkte Kraftübertragung der Bewegungsenergie des Rütteltisches über den Bewehrungskorb in die Sensoren verhindern soll, zu lassen. Um die Funktionalität und die Beanspruchung der Messsensorik beim Verdichten des Betons zu überprüfen, wurde während des gesamten Betoniervorganges gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Dehnungssensoren bei beschriebener Befestigung nur gering gedehnt wurden. Die größte Beschädigungsgefahr, vor allem der optischen Kabel, geht von Handrüttlern aus, da diese leicht gequetscht und damit

abschnittsweise zerstört werden können. Beim Einbau der Sensorik ins Fertigteil war kein Ausfall zu beklagen. Es wurde allerdings ein Kabel des runden Fertigteils gequetscht. Dies führte allerdings nicht zu einem Datenverlust da die Sensorketten redundant an beiden Enden mit einer Kopplung angefertigt waren, und daher die Möglichkeit bestand die Daten der Sensoren hinter dem beschädigten Kabel über die Gegenseite auszulesen.



Abbildung 149: Positionierte Sensoren (drei Dehnungs- sowie drei Temperatursensoren) unmittelbar vor dem Betonieren.

Kritischer stellte sich der Platteneinbau der instrumentierten Platten dar. Es musste zu jedem Zeitpunkt des Einbaus beachtet werden, eine mechanische Beschädigung des Kabels zu vermeiden. So sollte das Kabel nicht in Radien kleiner 3 cm geführt werden. Zudem wird das Kabel bei Temperaturen größer 80°C irreparabel zerstört. Da das Silikatharz beim Einbau jedoch Temperaturen von bis zu 110°C erreichen kann, musste darauf geachtet werden, dass Kabel und Harz nicht in Kontakt kommen. Um zu verhindern, dass das Kabel direkt auf der Schalung aufliegt wurde dieses an der Bewehrung in kurzen Abständen mit Kabelbindern befestigt. Bei der Ausleitung aus dem Fertigteil wurde das Kabel mit PU-Schaum geschützt (Abbildung 150 links). Durch die Fahrbahn bis zum Bankett wurde das Kabel dann in einem 1 cm breiten Schnitt geführt, welcher mit zwei Lagen Fugenband und heißer Bitumendichtmasse geschlossen wurde. Bei den runden Fertigteilen konnte die Ausleitung im Bereich der Betondecke innerhalb der Querfuge erfolgen, so dass keine weitere Öffnung in der Betonoberfläche geschaffen werden musste. Zum zusätzlichen Schutz und um Mindestradien nicht zu unterschreiten, wurde das Kabel zusätzlich noch in einem PVC-

Schlauch geführt (Abbildung 150 rechts). Diese fordernde Aufgabe konnte nur durch das gute Zusammenwirken aller Projektpartner erfolgreich umgesetzt werden. Die Messung konnte unmittelbar nach dem Einsetzen der Platten, noch vor dem Vergießen mit Silikat Harz, erfolgreich gestartet werden.

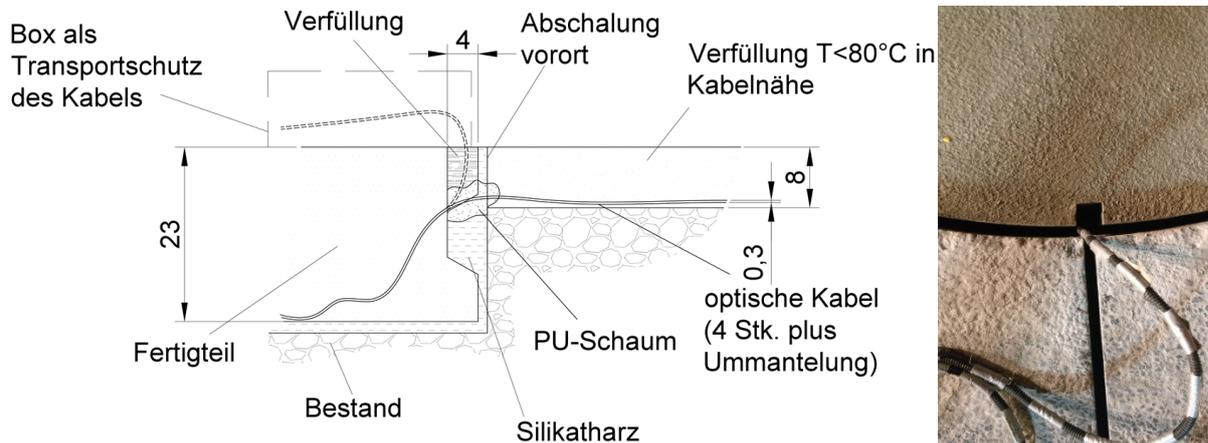


Abbildung 150: Detail der Kabelausleitung aus dem Fertigteil (rund und rechteckig) im eingebauten Fertigteil, gestrichelt ist die Kabelposition beim Transport dargestellt (links). Foto der Einbaustelle vor dem Verfüllen (rechts).



Abbildung 151: Runde Fertigteile nach dem Einbau, beim ersten Fertigteil rechts ist der Schnitt zur Ausleitung der optischen Kabel erkennbar.



Abbildung 152: Rechteckige Fertigteile nach dem Einbau, beim zweiten Fertigteil ist rechts der Schnitt zur Ausleitung der optischen Kabel erkennbar.

9.3.4 Ergänzende Materialtests

Es wurde der **Temperaturausdehnungskoeffizient** für die verwendeten Betone in einem Klimakammertest in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. Die Betonproben wurden aus den Mischungen der Fertigteilplatten entnommen und anschließend in der Klimakammer des AIT's (siehe Abbildung 153) mit Temperaturen von -20°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ in 10°C Schritten getestet. Jeder Temperaturschritt wurde 7 Stunden lang gehalten.

Zur Bestimmung der verschiedenen Wärmeoeffizienten (Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit / Kapazität) wurde zum einen die Oberflächen- und die Kerntemperatur mit einem Temperatursensor (PT 100) gemessen und zum anderen die Dehnung in Längsrichtung in Bauteilmitte mit einem 2 cm DMS Sensor, kalibriert für Beton, der Firma HBM bestimmt. Die Messung wurde an 75 Tagen alten Proben vom 8. bis 10. Oktober 2018 durchgeführt.

Es zeigte sich, dass die Temperatur im Kern nach 3-4 Stunden erreicht wird. Bei tiefen Temperaturen ist nach dieser Zeit keine Änderung der Dehnung mehr zu beobachten. Aufgrund von zusätzlichen Effekten aus Trocknungsschwinden dauert es bei steigender Temperatur aber immer länger bis keine Dehnungsänderungen mehr messbar sind. Ab einer Temperatur von ca. 40°C reichen 7 Stunden nicht mehr aus, um eine endgültige Dehnung bei

dieser Temperatur definieren zu können, weshalb der Ausdehnungskoeffizient bis 30°C bestimmt wurde.



Abbildung 153: Klimakammer mit Betonproben zur Bestimmung des Temperaturexpansionskoeffizienten

Temperatursprünge bei Temperatureaufbringung sind in Abbildung 154 ersichtlich. Da sich DMS und Betonkörper unterschiedlich schnell erwärmen, stellt sich hier anfangs ein Dehnungssprung nach unten dar, dieser gleicht sich aber nach und nach mit Erwärmung des Betons wieder aus.

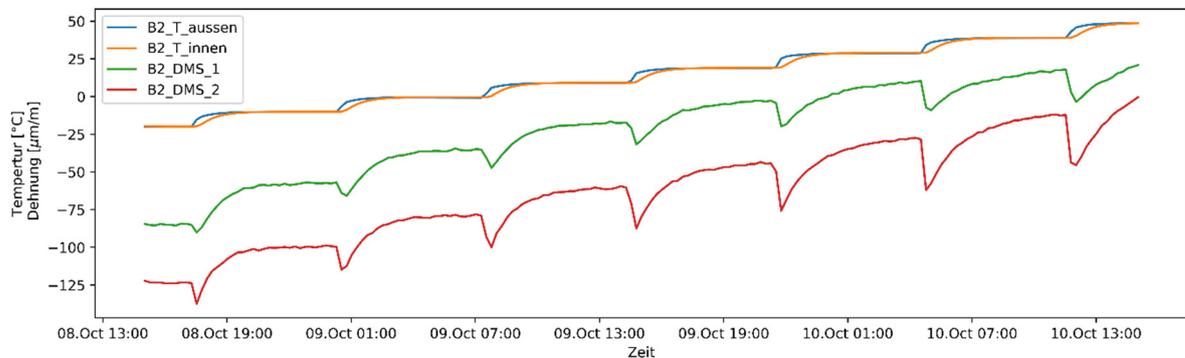


Abbildung 154: Messwerte der Temperatur und der am Messgerät angezeigten Dehnungen

In den Ergebnissen (Abbildung 155) ist zu sehen, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient temperaturabhängig ist und mit zunehmender Temperatur abnimmt. Die Streuung der 4 gemessenen Koeffizienten beträgt zwischen -10°C und +20°C ca. $1,1 \cdot 10^{-6}$ 1/K (oder 10 %), danach nimmt die Streuung stark zu, weshalb hier die Auswertung der Daten nur bis zu 30°C verwendet wurde. Für die Nachrechnung wurde vereinfachend ein Wärmeausdehnungskoeffizient von $1,1 \cdot 10^{-5}$ 1/K über dem gesamten betrachteten Temperaturbereich angewandt.

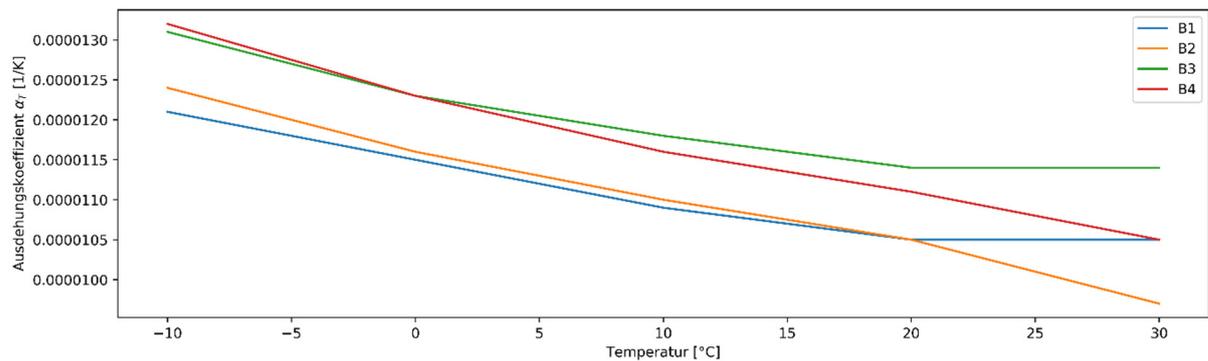


Abbildung 155: Berechneter Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur für 4 Betonproben

Der **E-Modul** wurde zur Nachrechnung ebenfalls aus den entnommenen Materialdaten ermittelt. Da im Zuge der Fertigteilherstellung ohnehin Betonproben zur Bestimmung der Festigkeit genommen und ausgewertet wurden, wurde der E-Modul von der gemessenen Würfeldruckfestigkeit abgeleitet. Nach DIN EN 1992-1-1 ergibt sich für den Beton mit der Sortennummer 142016 und einer gemessenen Würfeldruckfestigkeit von 60,1 MPa ein Elastizitätsmodul von 37.000 MPa.

9.3.5 Nullmessung und Start des Monitorings beim Einbau der Platten

Die Messung der runden Platte wurde am 21. August 2018 um 00:15 und die der rechteckigen Platte am 21. August 2018 um 23:45 gestartet. Alle angeführten Zeitangaben, sowohl im Text als auch in den Bildern sind in UTC Zeit angegeben und entsprechen nicht der lokalen Zeit. Die Messung wurde noch während der Einbauarbeiten gestartet. Da auch beim Einbau bereits durch Temperaturänderungen Kräfte aus der umliegenden Beton- bzw. Asphaltfahrbahn in die Fertigteile induziert werden, war es wichtig, die Messung bereits unmittelbar nach der Positionierung der Platte zu beginnen, um die Nullmessung bei möglichst spannungsfreier Lage zu kennen.

In Abbildung 156 und Abbildung 157 sind die Dehnungsmesswerte der Sensoren in Längsrichtung und die Temperaturmesswerte der ersten 4 Tage des **rechteckigen Fertigteils** dargestellt. Bei Betrachtung der Dehnungen zeigt sich zum einen der Einfluss der Erwärmung an der Plattenunterseite durch die Wärmeentwicklung und die damit verbundene Dehnungszunahme bei der Verfüllung des Silikatharzes (grauer Graph) nach den ersten Stunden. Beim Betrachten der Dehnungssensoren an der Oberfläche (rote Graphen) zeigt sich außerdem, dass sich bereits zu Beginn unterschiedliche Dehnungszustände einstellen. Interessant ist ferner, dass in der Nacht nach dem Einbau die Arbeitstätigkeiten des Einbaus der Nachbar--Fertigteile 4 – 6 ebenfalls anhand von Unstetigkeitsstellen während der Nacht

vom 22. auf 23. August zu erkennen sind. Dies alles deutet auf eine Interaktion der Fertigteile untereinander und mit dem Bestand hin.

Beim Betrachten der Temperaturverläufe zeigt sich, dass das Harz den Beton in 3 cm Tiefe an der Unterseite um etwa 7°C erwärmt. Die Erwärmung ist auch in der Mitte des Fertigteils bzw. nahe der Oberfläche messbar, wenngleich die Erwärmung hier mit 1,5°C und 0,5°C wesentlich kleiner ist.

Die Tagesgänge sind durch Erwärmung tagsüber und Abkühlung nachts sowohl oben als auch unten erkennbar. Die Dehnungen folgen sinngemäß. Erwartungsgemäß reagiert der oberflächennahe Temperatursensor sensibler als der an der Plattenunterseite.

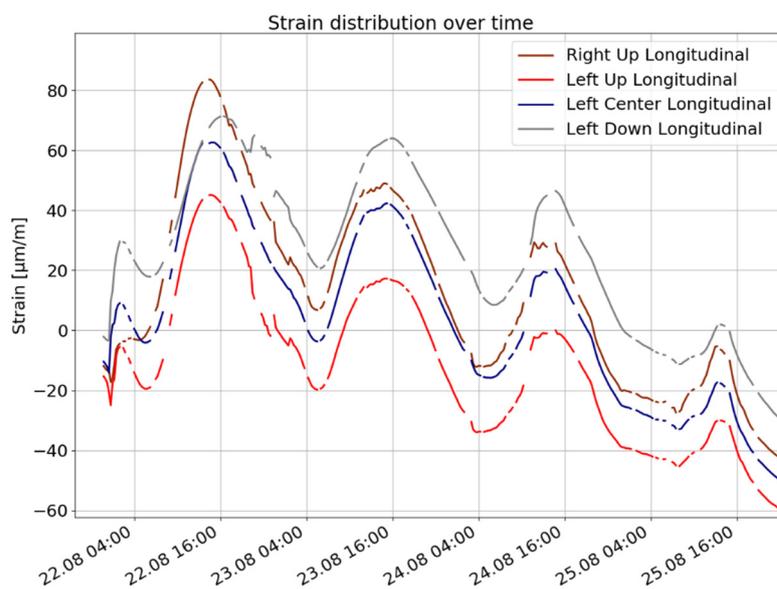


Abbildung 156: Dehnungsmessung der rechteckigen Platte in den ersten vier Tagen

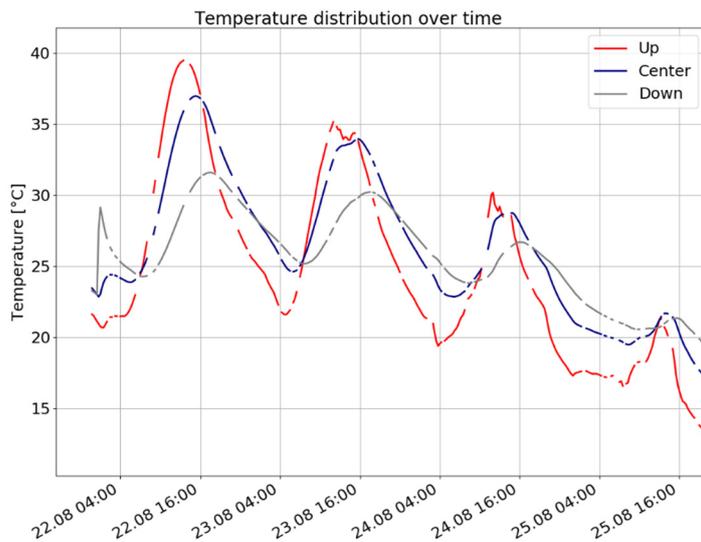


Abbildung 157: Temperaturmessung der rechteckigen Platte in den ersten vier Tagen

In Abbildung 158 und Abbildung 159 sind die Dehnungsmesswerte der Sensoren in Längsrichtung und die Temperaturmesswerte der ersten vier Tage des **runden Fertigteils** dargestellt. Bei Betrachtung der Dehnungen zeigt sich ebenfalls zum einen der Einfluss der Erwärmung an der Plattenunterseite durch die Wärmeentwicklung bei der Verfüllung des Silikatharzes (schwarze Graphen). Bei diesem Fertigteil ist der Einfluss der Erwärmung des Fertigteils auf den Spannungszustand viel ausgeprägter als beim rechteckigen Fertigteil. Da bei diesem Fertigteil vorab keine Kernbohrungen zur Ermittlung des Fahrbahnaufbaus genommen wurden und dadurch die Dicke des Fertigteils sehr niedrig angenommen wurde, war die Wärmeentwicklung durch die große Menge an verfülltem Silikatharz sehr hoch.

Die Temperaturverläufe zeigen, dass das Harz den Beton in 3 cm Tiefe an der Unterseite um etwa 20°C auf 39°C erwärmte. Die Erwärmung ist auch in der Mitte des Fertigteils bzw. nahe der Oberfläche deutlich erkennbar, so stieg die Temperatur in Plattenmitte um etwa 13°C auf zirka 30°C und an der Plattenoberseite um 6°C auf rund 23°C.

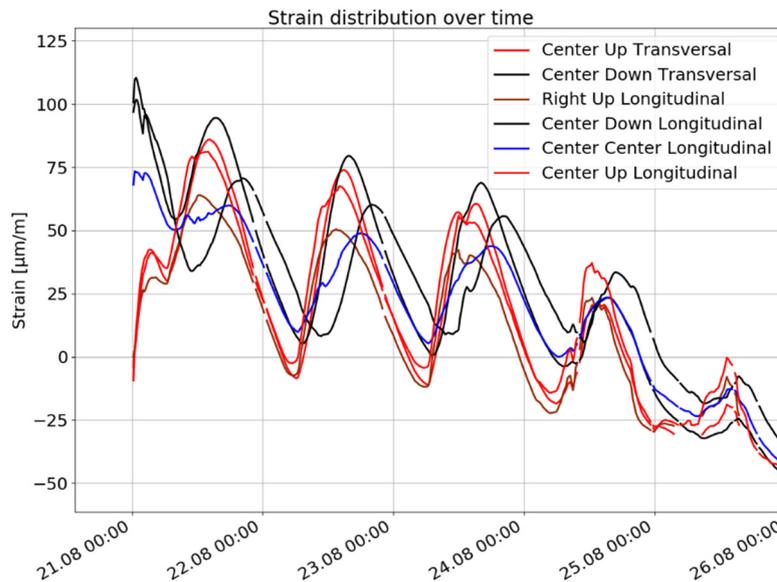


Abbildung 158: Dehnungsmessung der runden Platte in den ersten 4 Tagen

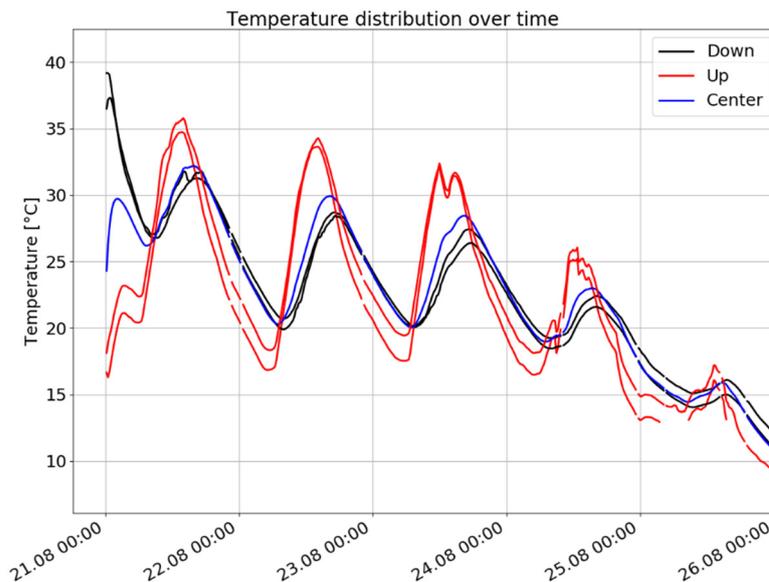


Abbildung 159: Temperaturmessung der runden Platte in den ersten 4 Tagen.

9.3.6 Datenaufzeichnung und Messdaten

Die Messung wurde, wie bereits beschrieben, im Falle der runden Platte am 21. August 2018 und im Falle der rechteckigen Platte in der Nacht zum 22. August 2018 noch während der Einbauarbeiten gestartet. Sie läuft seitdem durchgehend, mit Ausnahme einiger Unterbrechungen. Die störenden Ursachen konnten nach der Anlaufzeit erfolgreich behoben werden, die Anlage läuft stabil und zeichnet Daten auf. Die Auswertungen wurden

mit Messdaten von Messbeginn bis 31. Oktober 2018 durchgeführt. Alle Daten wurden mit einer Messfrequenz von 1250 Hz aufgezeichnet, um Einzelüberfahrten möglichst genau erfassen zu können.

Im ersten Schritt wird folgend der **Plausibilitätscheck der Messung** beschrieben:

Es wurden dazu die Aufzeichnungen der Überfahrt des RoadSTAR Messfahrzeugs im Detail betrachtet. Aus den gemessenen Dehnungs-Zeit-Diagrammen der Einzelüberfahrten in Abbildung 160 und Abbildung 161 lässt sich über die bekannte Kenntnis des Abstandes der Sensoren in Querrichtung (vorne und hinten im Fertigteil) eine Überfahrtsgeschwindigkeit von 58 km/h zurück rechnen. Diese stimmt mit der tatsächlich im Messfahrzeug gemessenen Geschwindigkeit von 57,25 km/h sehr gut überein. Mit dieser Information kann auch der Abstand der beiden Radachsen von 3,9 m (Messung) bzw. 4,2 m (tatsächlich) verifiziert werden. Vergleicht man die Dehnungen an unterschiedlichen Querpositionen, zeigt sich, dass die Überfahrt nicht zentral, sondern eher auf der linken Seite des Fertigteils stattgefunden hat. Dies ist übrigens auch anhand der Oberflächenscans erkennbar (Abbildung 141). Die gezeigten Dehnungen werden durch eine Belastung der Vorderachse von etwa 5,5 t und der Hinterachse von rund 7,4 t erreicht.

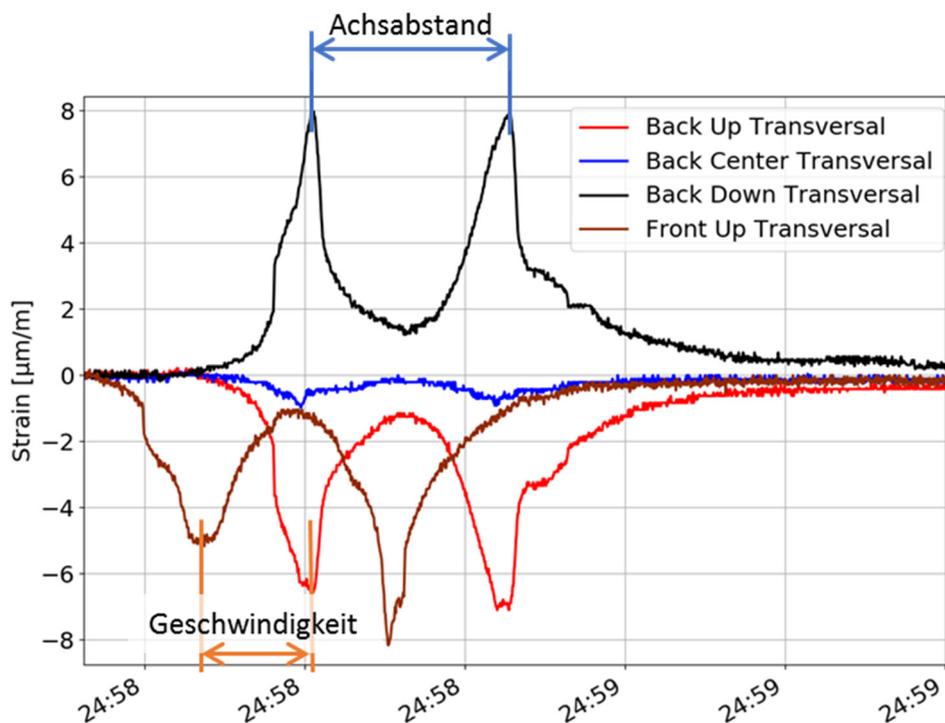


Abbildung 160: Gemessene Dehnung in Querrichtung in Abhängigkeit der Zeit bei der Überfahrt des RoadSTAR. Achsabstands- und Geschwindigkeitsbestimmung aus Messdaten.

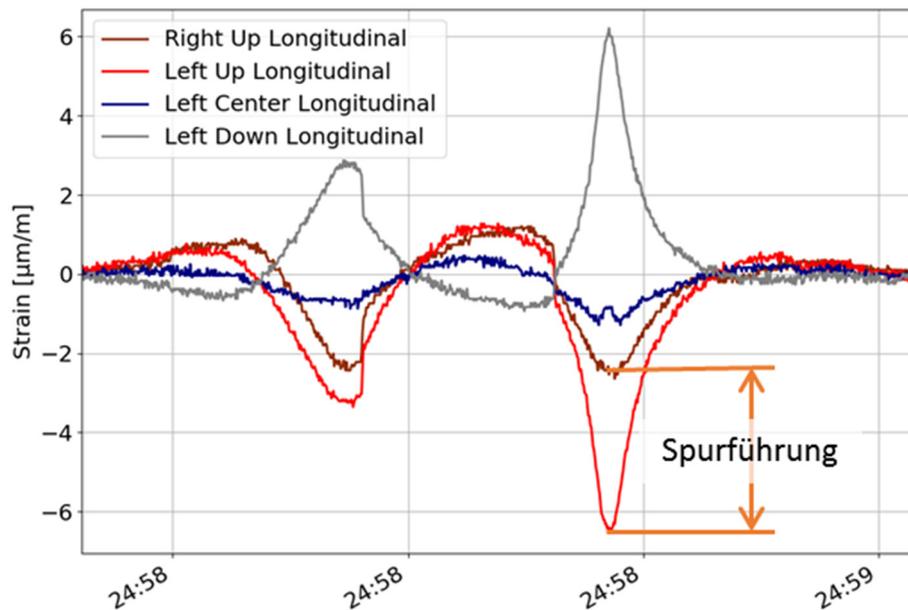


Abbildung 161: Gemessene Dehnung in Längsrichtung in Abhängigkeit der Zeit bei der Überfahrt des RoadSTAR. Zu erkennen ist, dass das Fahrzeug das Fertigteil eher auf der linken Seite passiert hat.

Da bei Messfahrten des RoadSTAR auch die Umgebung permanent mit fünf Kameras ab fotografiert wird, wurde die Überfahrt der vor dem Fahrzeug fahrenden PKW's dokumentiert. Bei dieser Überfahrt wurde eine minimale Dehnungsänderung von etwa $0,4 \mu\text{m}/\text{mm}$ bei einer Umgebungstemperatur von über 30°C registriert. Das genaue Gewicht des Fahrzeugs ist nicht bekannt, allerdings liegt das Leergewicht bei ca. 1,1 t (Abbildung 162 und Abbildung 163 (links)). Diese Achslast stellt bei gegebener Umgebungstemperatur in etwa das minimale detektierbare Gewicht dar. Im Vergleich dazu verursachte ein Kleintransporter mit einem Leergewicht von ca. 2,2 t, welcher das Fertigteil wenige Sekunden später passierte, eine um ein Vielfaches ($1,5 \mu\text{m}/\text{mm}$) größere Dehnung (Abbildung 162 und Abbildung 163 (rechts)).



Abbildung 162: Dokumentierte Überfahrt eines PKWs mit ca. 1,1 t Leergewicht (links) und eines Kleintransporters mit ca. 2,2 t Leergewicht (rechts).

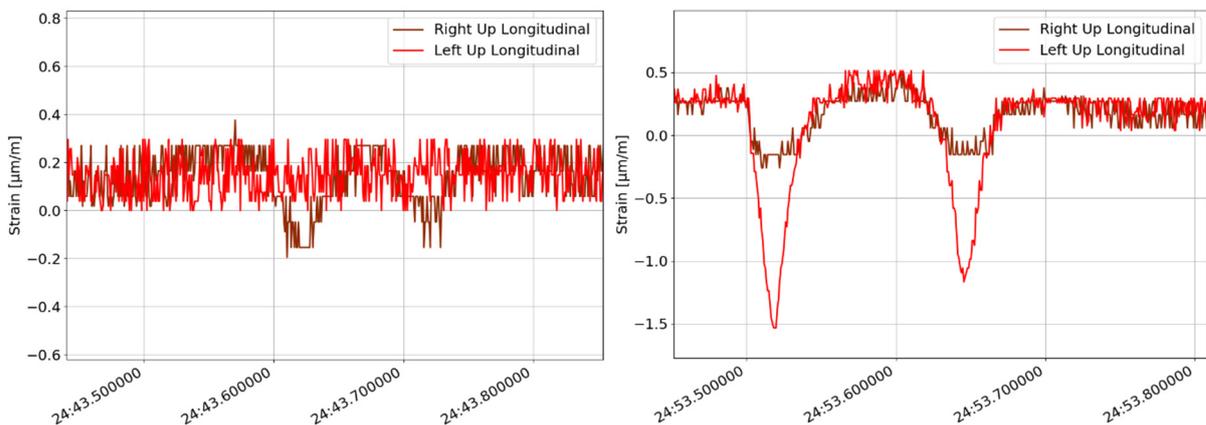


Abbildung 163: Dehnungsänderung des Sensors auf der rechten Seite des Fertigteils verursacht bei der dokumentierten Überfahrt eines PKWs mit ca. 1,1 t Leergewicht (links) und eines Kleintransporters mit ca. 2,2 t Leergewicht (rechts).

Eine exakte Bestimmung der Achslast lässt sich nicht direkt rückschließen. Dies liegt vor allem daran, dass einige Details, vor allem aber die Lage des Rades zum Sensor, während der Überfahrt nicht klar sind.

Eine **detaillierte Darstellung von Messwerten von Einzelüberfahrten eines Sattelschleppers** sind in Abbildung 164 und Abbildung 165 erkennbar. Wesentlich ist, dass die genaue Position in Querrichtung der Überfahrt einen großen Einfluss auf den Messwert hat. Davon ausgehend, dass die Radlasten der zweiten Achse eines Sattelschleppers annähernd gleich groß sind, sind die in Abbildung 164 unterschiedlichen Dehnungen abhängig von Lage der Fahrspur zum Sensor gemessen worden. Der maximale Messwert der beiden Dehnungssensoren in Längsrichtung weicht hier sehr voneinander ab. Daraus lässt sich auch

schließen, dass die Lage des Rades zum Sensor einen großen Einfluss hat. Es ist auf Basis diskreter Sensoren nicht möglich, die genaue Reifenposition in Bezug auf den Sensor zu identifizieren. Fährt ein Rad direkt über den Sensor, hat auch die Aufstandsfläche des Reifens einen Einfluss, die nicht genau bekannt ist. In Abbildung 165 ist ein Sattelschlepper zu sehen, der wahrscheinlich von der Autobahn abfährt. Hier zeigte der Dehnungssensor in der linken Fertigteilstseite einen starken Ausschlag, während der Sensor auf der rechten Seite kaum bzw. nur minimale Dehnungen aufzeichnet. Auf Basis der gegebenen Messdaten scheint eine Bestimmung der Achslasten unter Verwendung von FE- Berechnungen mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 30\%$ als möglich.

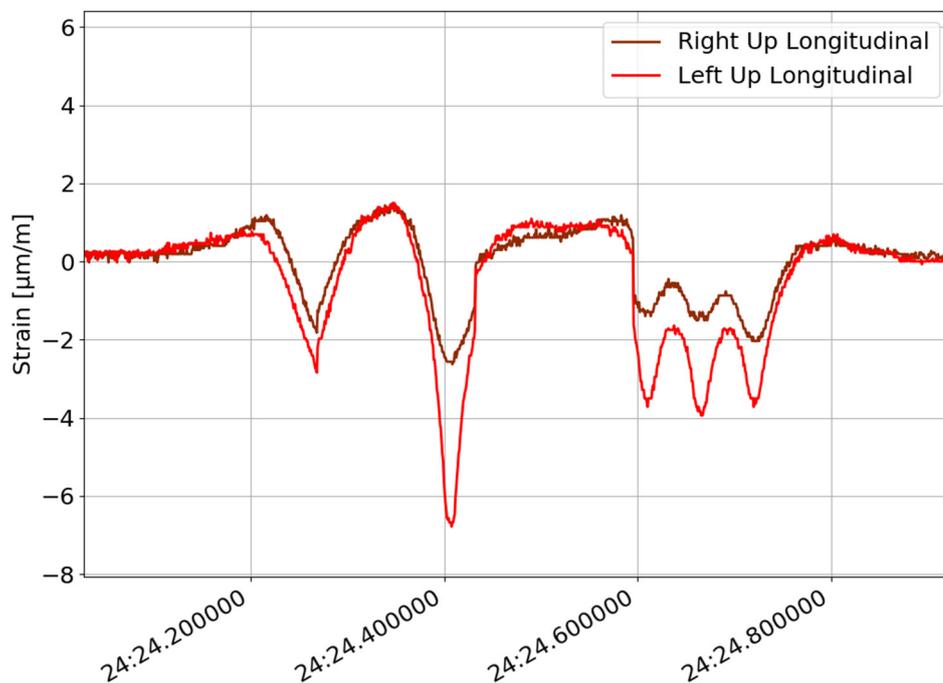


Abbildung 164: Überfahrt eines Sattelschleppers mit fünf Achsen.

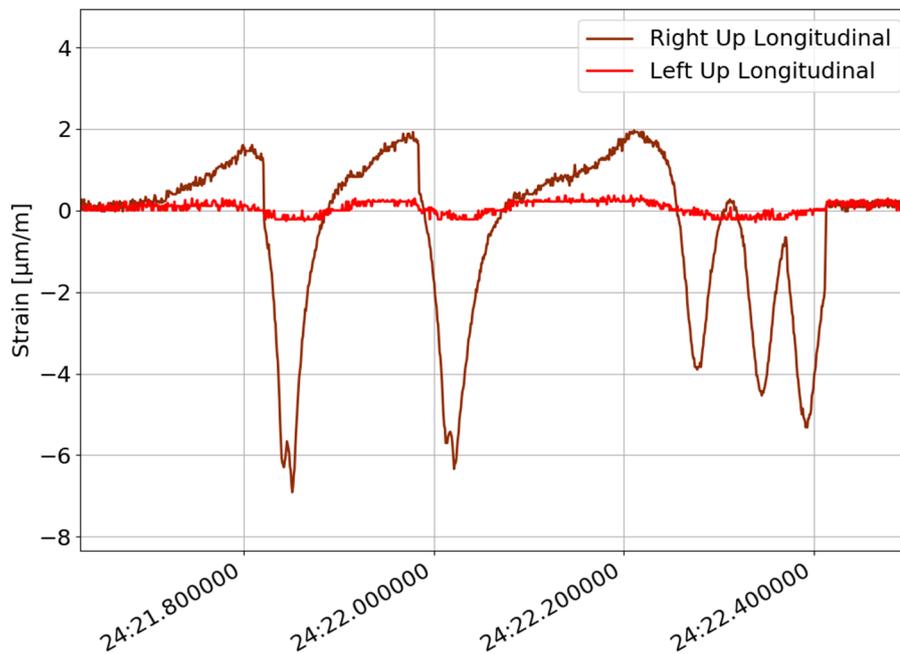


Abbildung 165: Überfahrt eines von der Autobahn abfahrenden Sattelschleppers mit fünf Achsen (lediglich die linke Fahrzeugseite befindet sich über dem Fertigteil).

Zur **Auswertung der Langzeitmessung** bzw. der Dehnungen ohne Verkehrsbelastung wurde aus den Messdaten eines Zeitraumes von 15 min, welche üblicherweise mit 1200 Hz aufgezeichnet wurden, der Median bestimmt. So können die Messwerte unbeeinflusst von Dehnungsspitzen durch Verkehrslasten und anderer Ausreißer dargestellt werden (siehe Abbildung 166 und Abbildung 169).

Beim Betrachten der **Dauermessungen der rechteckigen Platte** ist der Dehnungsabfall in Korrelation mit dem Temperaturabfall messbar. Im Vergleich mit den gemessenen Temperaturen (Abbildung 167) zeigt sich bereits deutlich der Zusammenhang zwischen Dehnungen und Temperaturen.

Bei Darstellung des Zusammenhangs aus gemessener Dehnung und Temperatur kann im Durchschnitt ein linearer Zusammenhang von 60-70 $\mu\text{m/m}$ pro 10°C beobachtet werden. Wobei die in Längsrichtung messenden Sensoren nahe der Oberfläche ab etwa 23°C eine Abflachung zeigen. Diese deutet auf eine Wirkung von Zwangskräften ab dieser Temperatur an der Oberfläche hin.

Beim Betreiben von Dauermonitoringanlagen kommt es gerade in der Anfangsphase immer wieder zu Störeinflüssen aufgrund von Einstellungsanpassungen von Hard- und Software sowie zu Unterbrechungen der Stromversorgung. Vor allem bei neuartigen Messsystemen, um das es sich bei diesem System handelt, lässt sich dieser Umstand leider nicht gänzlich vermeiden. Bei der rechteckigen Platte trat leider aus obengenannten Gründen eine 2-wöchige

Unterbrechung vom 19. September 2018 bis 2. Oktober 2018 auf. Diese konnte behoben werden, so dass die Anlage zum gegenwärtigen Zeitpunkt wieder stabil läuft. Auch bei der runden Platten sind kurze Unterbrechungen von einigen Tagen aufgetreten, deren Ursachen jedoch nun ebenfalls beseitigt wurden.

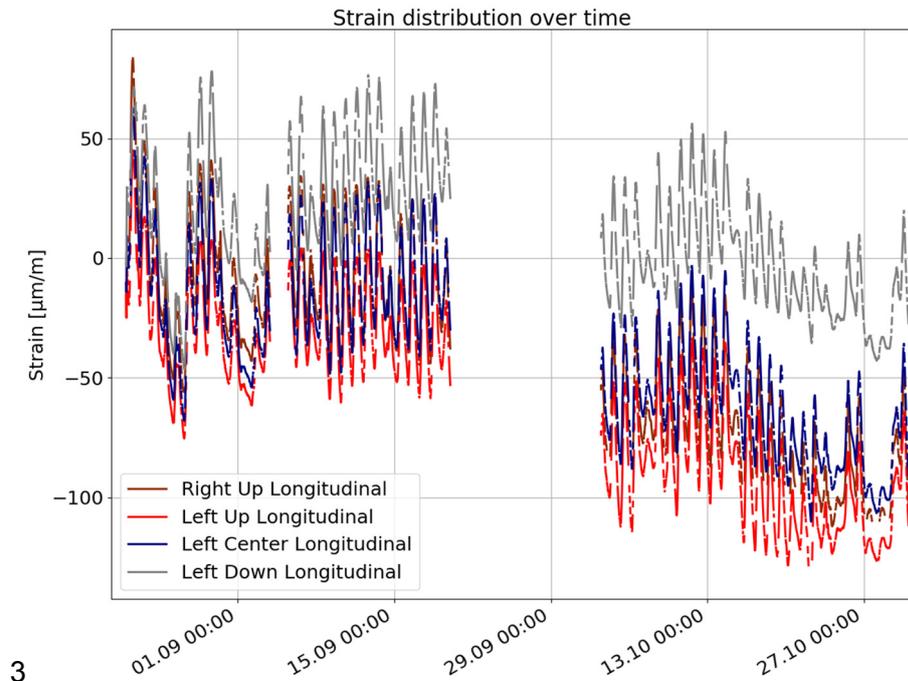


Abbildung 166: Darstellung der Dehnungen ohne Verkehrsbelastung in Längsrichtung des rechteckigen Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum

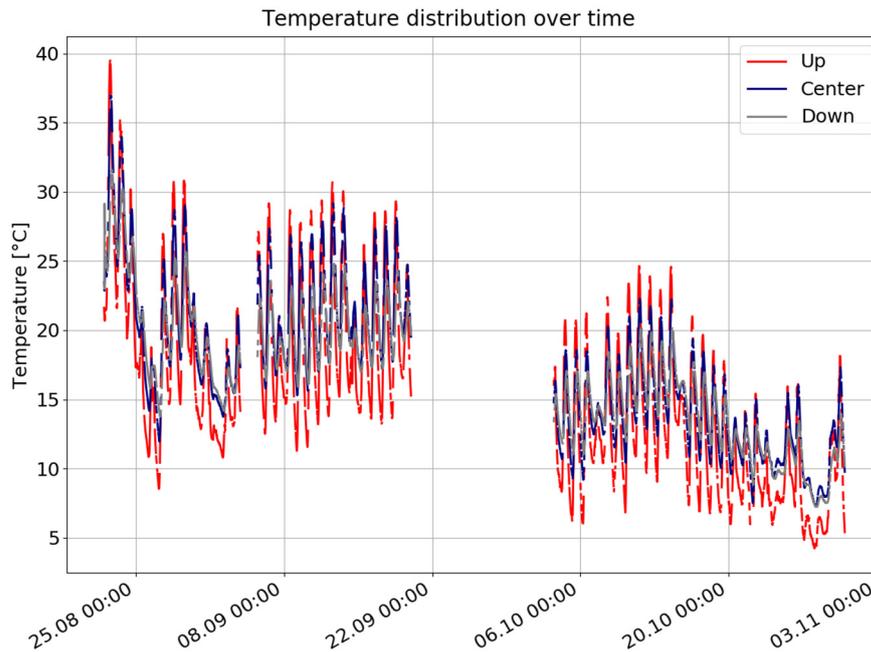


Abbildung 167: Darstellung der Temperaturmessung des rechteckigen Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum

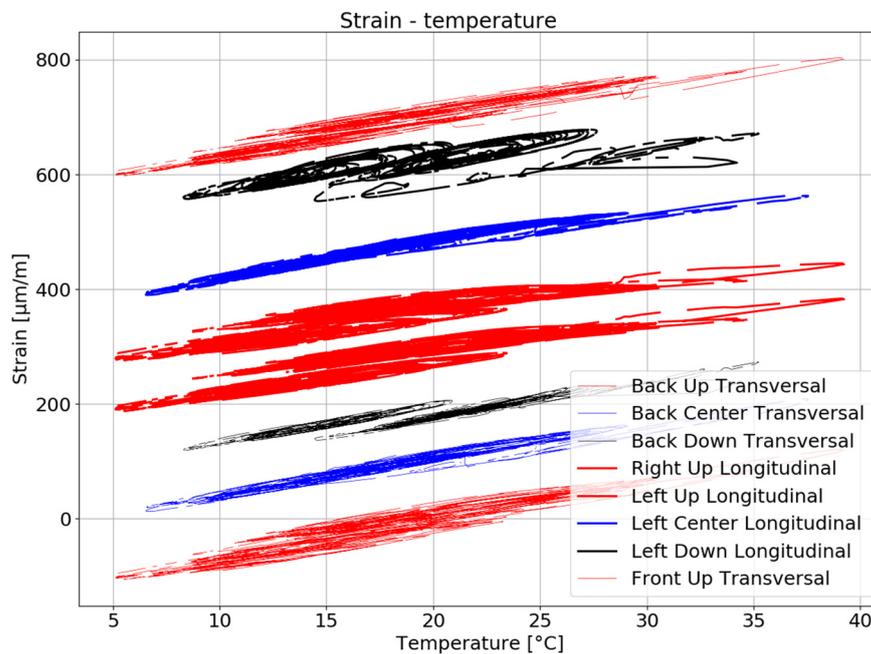


Abbildung 168: Zusammenhang von gemessener Dehnung und Temperatur der rechteckigen Platte

Beim Betrachten der **Dauermessungen der runden Platte** ist ebenfalls ein Temperatur und Dehnungsabfall nach dem 22. September 2018 zu beobachten. Im Vergleich mit den

gemessenen Temperaturen (Abbildung 170) zeigt sich bereits deutlich der Zusammenhang zwischen Dehnungen und Temperaturen.

Bei Darstellung des Zusammenhangs aus gemessener Dehnung und Temperatur kann im Durchschnitt ein linearer Zusammenhang von 60-70 $\mu\text{m/m}$ pro 10°C beobachtet werden, wobei die in Längsrichtung messenden Sensoren ab etwa 22°C wieder eine Abflachung zeigen, was auf eine Einspannung in diese Richtung ab dieser Temperatur hindeutet.

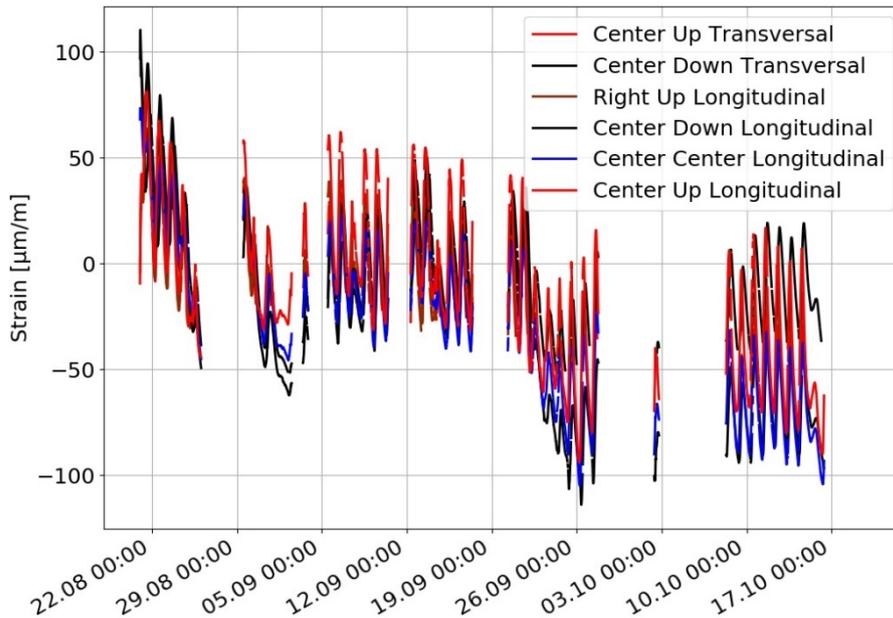


Abbildung 169: Darstellung der der Dehnungen ohne Verkehrsbelastung in Längsrichtung des runden Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum.

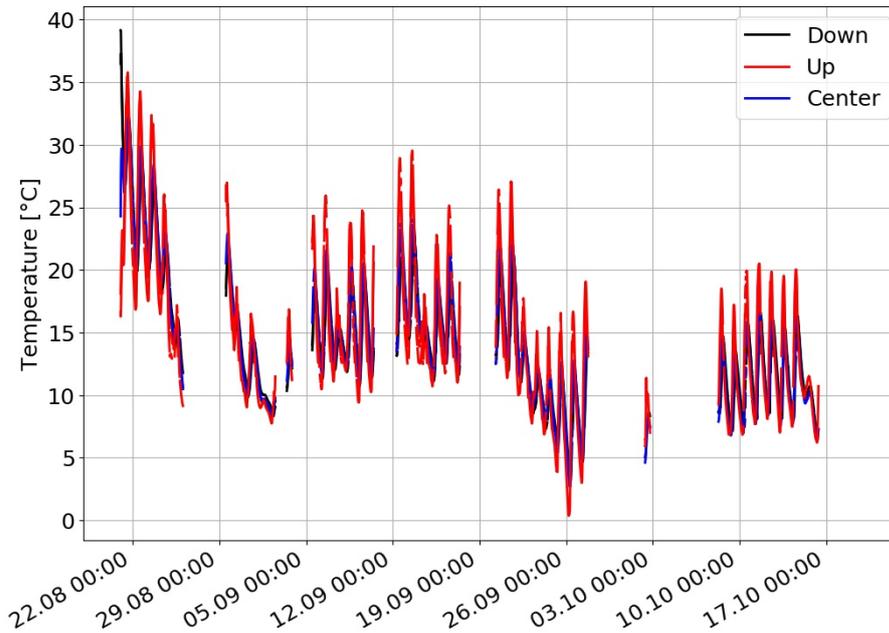


Abbildung 170: Darstellung der der Temperaturmessung des runden Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum.

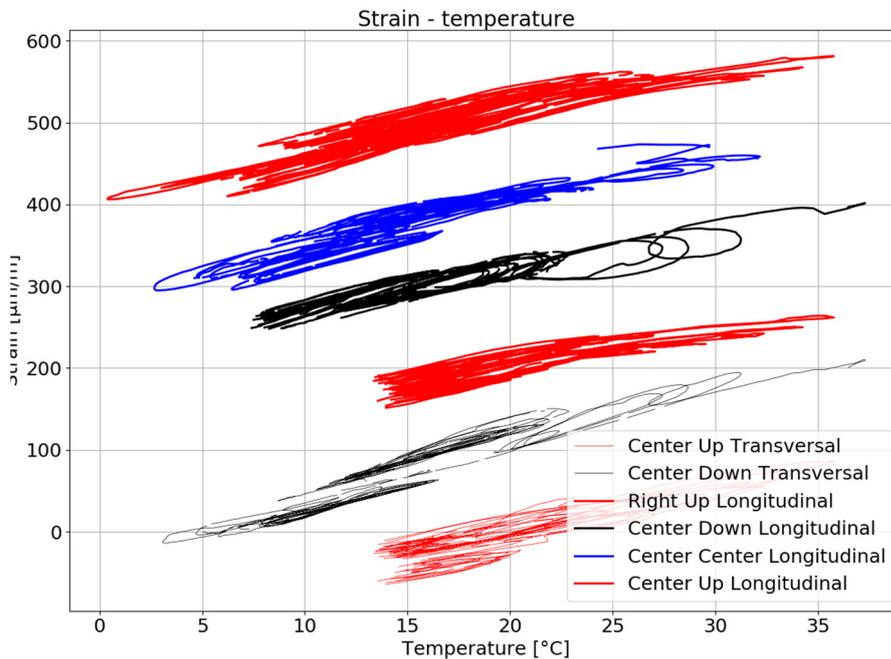


Abbildung 171: Zusammenhang von gemessener Dehnung und Temperatur der runden Platte.

9.3.7 Interpretation der Messdaten in Kombination mit einem aktualisierten FE-Modell

Zur Validierung der Simulationen werden die Ergebnisse mit den Messergebnissen verglichen und weitere Interpretationen des Verhaltens der Platte am upgedateten FE-Modell durchgeführt.

Für die statische bzw. **Langzeitauswertung** werden die gemessenen Temperaturen als thermische Belastung im Zuge einer instationären Temperatur-Rechnung auf das FE Modell aufgebracht. Zur Erfassung der Temperaturverteilung waren drei Sensoren über der Elementhöhe installiert. Die tatsächliche Boden- und Oberflächentemperatur konnte nicht direkt gemessen werden, da die Anforderung an die Betondeckung von ca. 3 cm erfüllt werden musste. Für jeden Zeitschritt wurde daher die Temperatur extrapoliert: linear für die Unterseite und parabolisch für die Oberseite, um auch die Wirkung der Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen.

In den Ergebnissen (Abbildung 172 und Abbildung 173) wird nun ersichtlich, dass der Tagesgang und der Dehnung-Temperatur-Zusammenhang mit diesem Ansatz in der FE-Simulation gut nachvollzogen werden kann. Bei Betrachtung des Tagesgangs über einen längeren Zeitraum zeigt sich allerdings, dass sich mit fortschreitender Zeit ein immer größer werdender Verstaz einstellt. Die Ursache dafür konnte im Zuge der Projektbearbeitung nicht vollständig ermittelt werden. Diese können in den nicht exakt bekannten Initialbedingungen, sowie in den in der Simulation nicht erfassten Effekten von Kriechen und Schwinden liegen. Einfluss haben auch nicht genau bekannte Effekte des Verbundes von Silikatharz mit dem Untergrund bzw. dem Fertigteil.

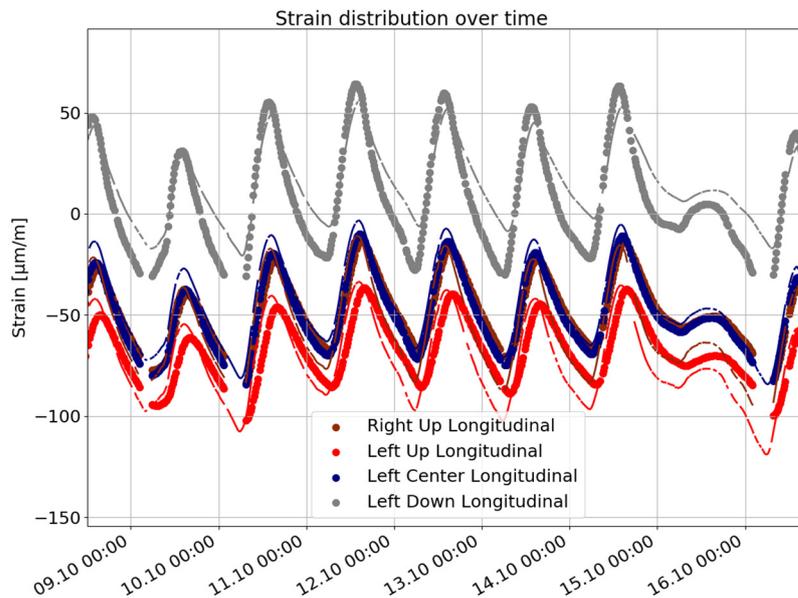


Abbildung 172: Vergleich der Dehnungen Langzeitmessung (dünne Linien) mit den Dehnungen aus der Simulation (dick Punkte).

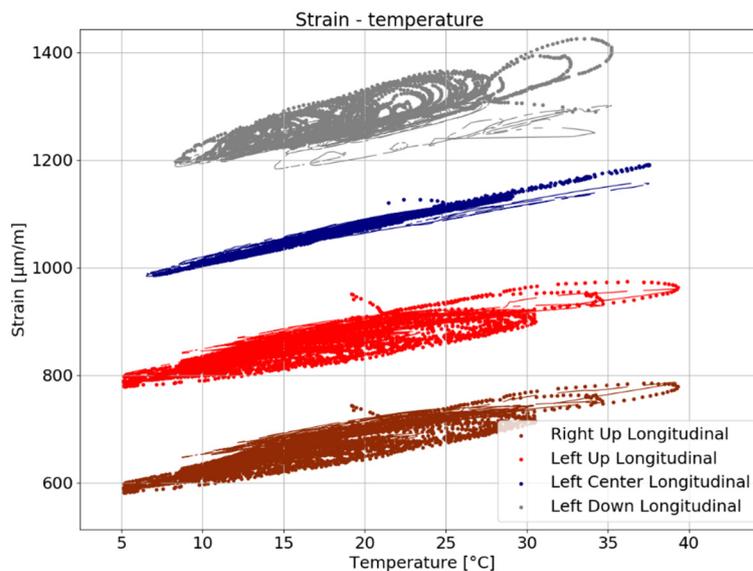


Abbildung 173: Vergleich des Dehnungs-Temperatur-Zusammenhangs der Langzeitmessung (dünne Linien) mit den Dehnungen aus der Simulation (dick Punkte).

Der Vergleich von **Messung und Simulation einer Einzelüberfahrt** zeigt im Allgemeinen eine sehr gute Übereinstimmung. Bei der Überfahrt eines LKWs an einem Sommertag (ca. 35°C Lufttemperatur und einem Temperaturgradienten der Platte von 0,06 K/mm) werden gemessene Dehnungsspitzen in den Sensorpositionen in einer Größenordnung von etwa 10-15 µm/m ermittelt. Rechnerische Spitzenwerte der Dehnung von zirka 20-25 µm/m werden in Plattenmitte bei dieser Belastung erwartet. Des Weiteren werden, wie in Abbildung 174

ersichtlich, auch Detaileffekte wie der kurzzeitige Abfall der Dehnungsspitze bei direkter Überfahrt des radnahen Sensors sowohl in der Messung als auch in der Simulation erfasst. Die Ursache der Abfälle sind lokale Quertrageffekte die sich unter dem Reifen einstellen.

Folgend werden nun Messung und Simulation im Detail gegenübergestellt: in Abbildung 174 ist die Messung und Abbildung 175 Simulation der LKW-Überfahrt mit unterschiedlichen Parametern dargestellt. Da nicht ganz klar ist, wie weit sich hier das Harz vom Untergrund gelöst hat, wurden in der Simulation zwei Grenzfälle untersucht. Zum einen wirkt auch das Harz im Verbund mit dem Untergrund und Platte bei Aufwölbung mit (folgend mit Verbund), zum anderen wird der Fall untersucht, wenn sich das Harz beim Aufwölben löst und kein Verbund zwischen der Platte im aufgewölbten Bereich der Platte vorliegt. Druckkräfte werden aber sehr wohl übertragen.

Die Abbildung 175 zeigt hier den Unterschied der Rechenwerte mit und ohne Verbundwirkung der Silikatharzschicht. In diesen Simulationen wurde die Radposition so gewählt, dass die Sensoren der linken Plattenseite direkt überrollt werden, während die rechten Räder die Platte relativ mittig, und damit mit einem Abstand von zirka 90 cm zum Sensor, überfahren. Es ist nun zu erkennen, dass die rechnerischen Amplituden der linken Seite (Left Longitudinal Up and Down bzw. rote und graue Linie) mit und ohne Verbund qualitativ sehr ähnlich aussehen. In Absolutwerten sind die Amplituden des Modells ohne Verbund allerdings um etwa 25 % kleiner. Interessant ist jedoch vor allem der Rechenwert des Sensors der rechten Seite nahe der Oberfläche (Right Up Longitudinal bzw. braune Linie). Hier zeigt sich ein merkbarer Unterschied im Verlauf gerade bei den enger beisammen liegenden Achsen 3-5. Im Modell ohne Verbund stellt sich die Platte auf, die Kräfte werden über die Eckpunkte in den Untergrund abgeleitet, die Dehnungen im gesamten Fertigteil sind vergleichsweise hoch. Der Wert des Sensors auf der rechten Seite (Right Up Longitudinal bzw. brauner Graph) ist ebenfalls relativ hoch, fällt aber nach Überfahrt nicht wie beim Modell mit Verbund auf null ab. Die gemessenen Dehnungen (Abbildung 174) sind geringer, als die errechneten (Abbildung 175), und auch der Verlauf des Sensors Right up Longitudinal der Simulation der Achsen 3-5 ist jenem mit vollem Verbund ähnlicher. Daraus wird rückgeschlossen, dass zum Zeitpunkt der Messung ein sehr guter Verbund der Silikatharzschicht mit Platte und Untergrund gegeben war. Ein Lösen des Verbundes zu einem späteren Zeitpunkt (nach Ende der Messperiode) kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

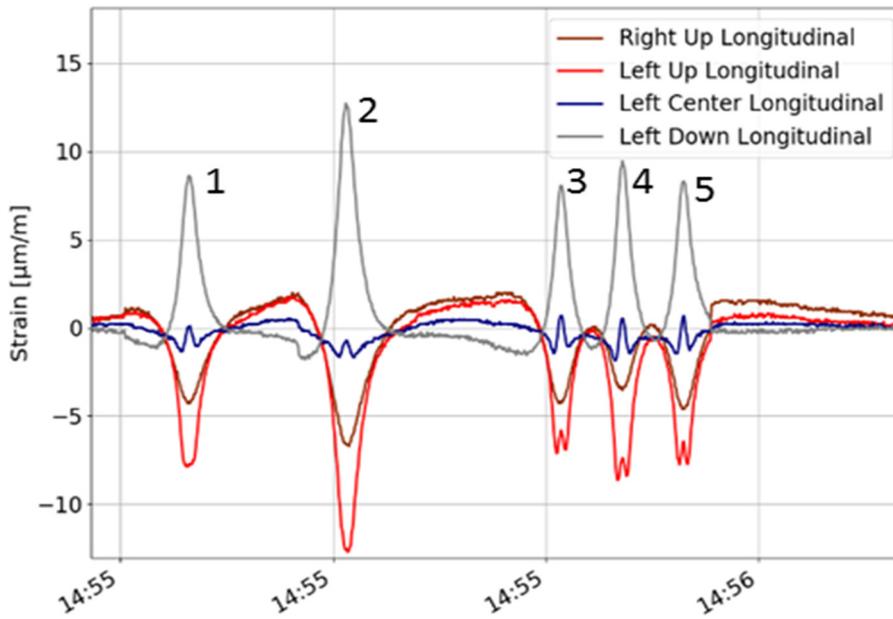


Abbildung 174: Messung einer Überfahrt eines etwa 40 t LKWs am 23. August (einem heißen Sommertag).

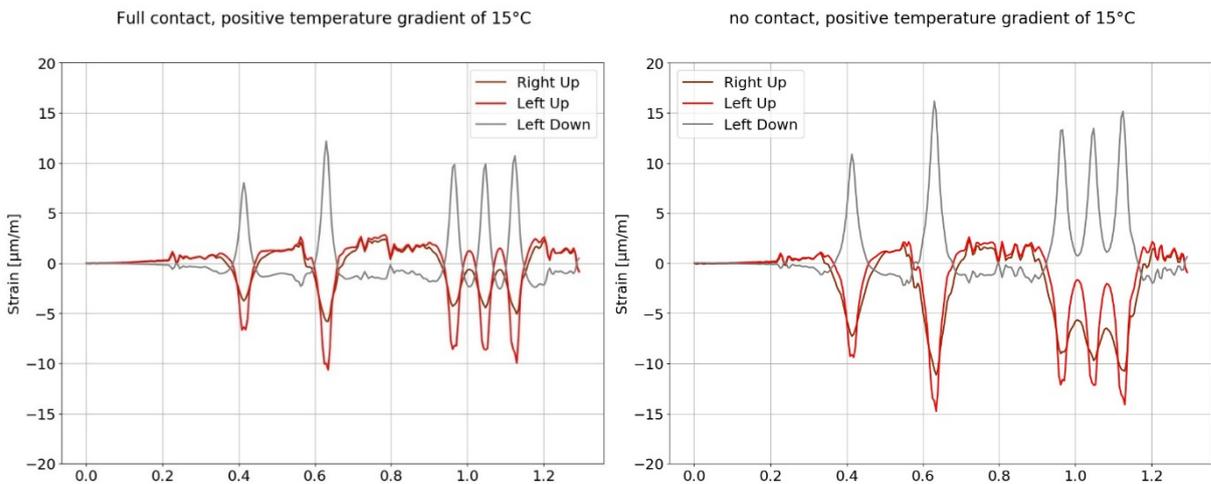


Abbildung 175: Simulation einer Überfahrt eines etwa 40 t LKWs an einem heißen Sommertag. Mit (links) und ohne (rechts) Verbund des Harzes mit dem Untergrund und Fertigteilplatte beim Aufwölben des Fertigteils.

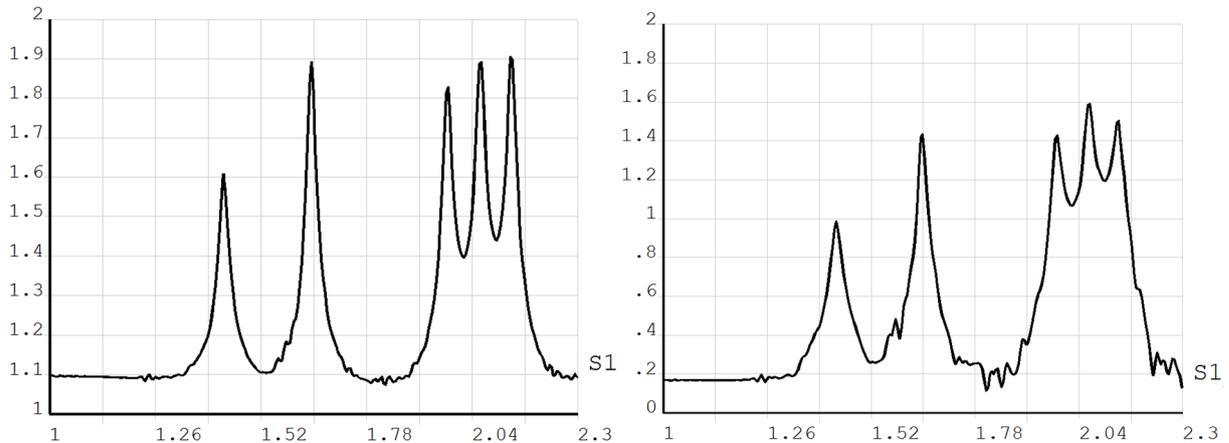


Abbildung 176: Zeitlicher Verlauf der Hauptzugspannungen [MPa] in Plattenmitte in Abhängigkeit der Zeit mit (links) und ohne (rechts) Verbund an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm).

Wird der rechnerische zeitliche Verlauf der Hauptzugspannungen mit und ohne Verbund miteinander verglichen (Abbildung 176), so wird deutlich, dass für den Grenzfall ohne Verbund die Spannungen größer sind. Aus diesem Grund wird für die Detailbetrachtung der weiteren Hauptzugspannungen am aktualisierten Modell das Modell ohne Verbundwirkung der Silikatharzschicht mit dem Untergrund gewählt. Dies entspricht dem ursprünglichen Modell im Zuge der Parameterstudie im Kapitel 6.1.2. In den folgenden Abbildungen sind die errechneten Hauptzugspannungsverläufe (ohne Angabe der Richtung) am upgedateten Modell für Temperaturbelastungen Sommer (0,06 K/mm) und Winter (-0,035 K/mm) und Radlastfälle (Überfahrt mit 40 t LKW) wie folgt dargestellt:

- Unbelastet (nur Temperatureinwirkung und Eigengewicht)
- Achse 2 (9 t) Position an der Nachbarplatte unmittelbar neben der Fuge
- Achse 2 (9 t) am Plattenrand positioniert
- Achse 2 (9 t) in der Plattenmitte positioniert

Bei Betrachtung der Hauptzugspannungen am Sommertag (Abbildung 177 und mit variierenden Randpositionen in Abbildung 178) treten die Zugspannungen an der Plattenunterseite auf. Im Lastfall ohne Radlast ist bereits eine errechnete Zugbeanspruchung von 0,92 MPa zu beobachten. Bei der Belastung der davorliegenden Nachbarplatte unmittelbar neben der Fuge steigt die maximale Hauptzugspannung auf etwa 1,00 MPa. In unmittelbarer Nähe des Rades ist ein Spannungszuwachs von etwa 0,3 MPa aufgrund der Dübelwirkung zu beobachten. In Abbildung 178 sind die Belastungen am Plattenrand und in Plattenmitte nebeneinander dargestellt. Die maximalen Hauptzugsspannungen treten jeweils unterhalb der Räder auf. Auffallend ist, dass hier die Spannungen bei Radlast am Rand höher

sind als beim Fall „Radlast in Plattenmitte“. Die Erklärung dafür ist, dass sich die Platte auch in Querrichtung aufwölbt. Die Platte liegt nur in den Ecken auf. Bei Belastung des verdübelten Plattenrandes stellt sich eine Tragwirkung verstärkt in Richtung der Plattenecken ein, wodurch eine höhere Hauptzugspannung (1,63 MPa) als bei Belastung in Plattenmitte (1,28 MPa) entsteht.

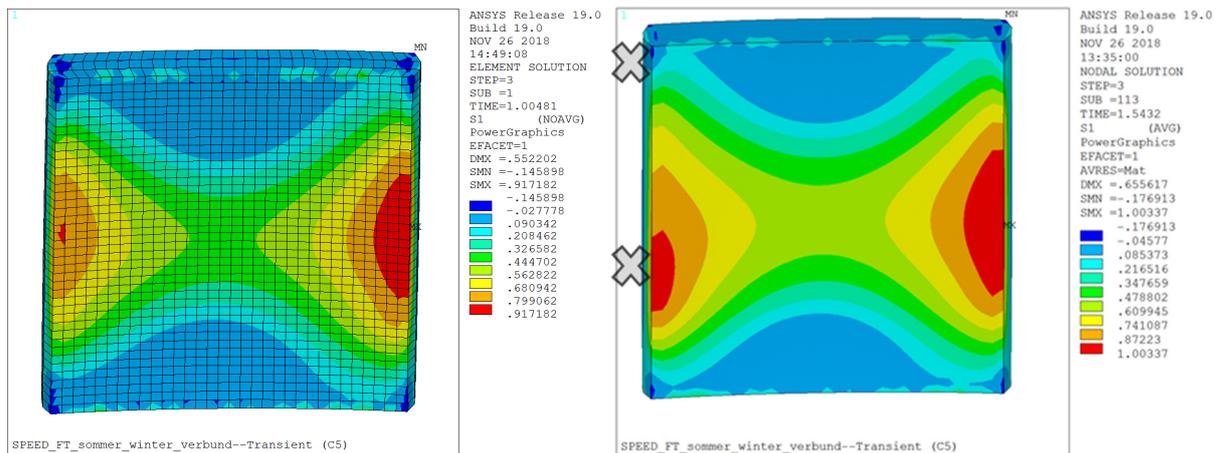


Abbildung 177: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm) ohne (links) und mit Belastung des angrenzenden Fertigteils (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von unten). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt.

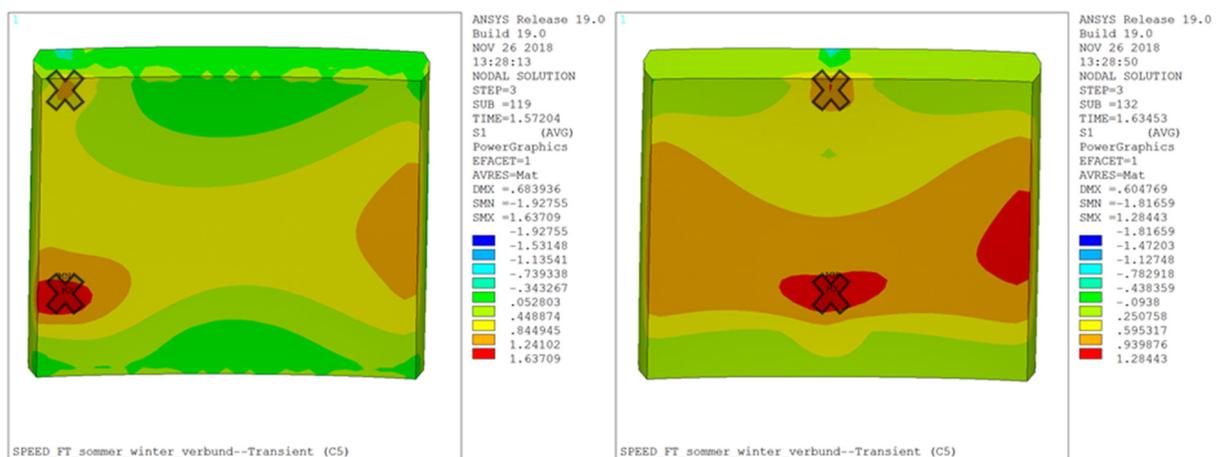


Abbildung 178: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm) mit Belastung am Plattenrand (links) und in Plattenmitte (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von unten). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt.

Bei Betrachtung der Hauptzugspannungen an einem Wintertag (Abbildung 179 und Abbildung 180) treten die Zugspannungen aufgrund der Wölbung an der Plattenoberseite auf. Im Lastfall Temperatur und Eigengewicht ist bereits eine Zugbeanspruchung von 1,76 MPa zu

beobachten. Auffällig ist im Lastfall Winter, dass die Maximalspannung weniger von der LKW-Überfahrt abhängen. So steigt die Maximalhauptzugspannung bei Belastung der Nachbarplatte unmittelbar neben der Fuge um lediglich 0,05 MPa. Bei Belastung am Plattenrand beträgt das Maximum 1,86 MPa und bei der Last in der Mitte 1,92 MPa. Verursacht wird dieses Maximum in der Mitte durch ein Aufwölben in der Querrichtung. Die beiden LKW Räder wirken entsprechend entgegen.

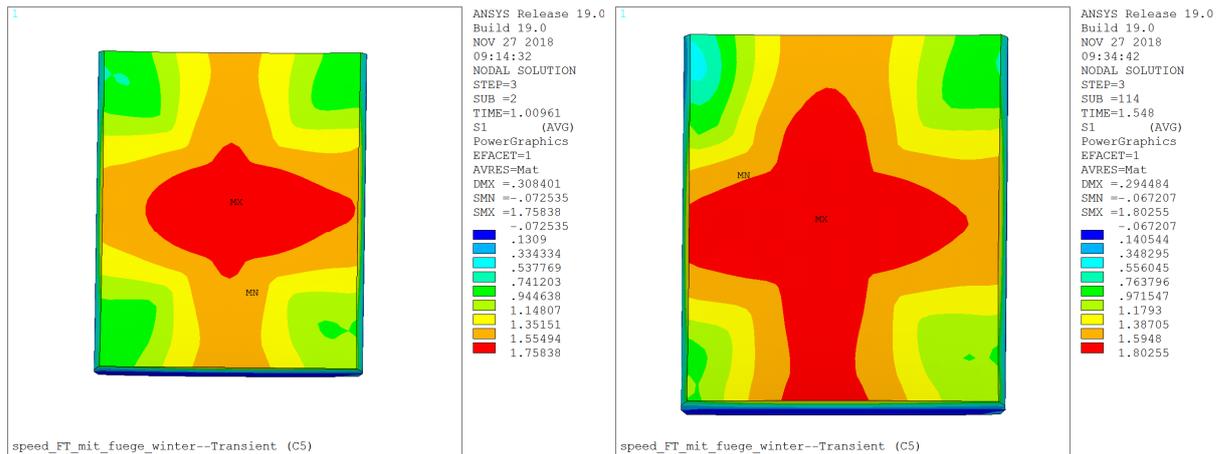


Abbildung 179: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem Wintertag (-0,035 K/mm) ohne (links) und mit Belastung des angrenzenden Fertigteils (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von oben). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt.

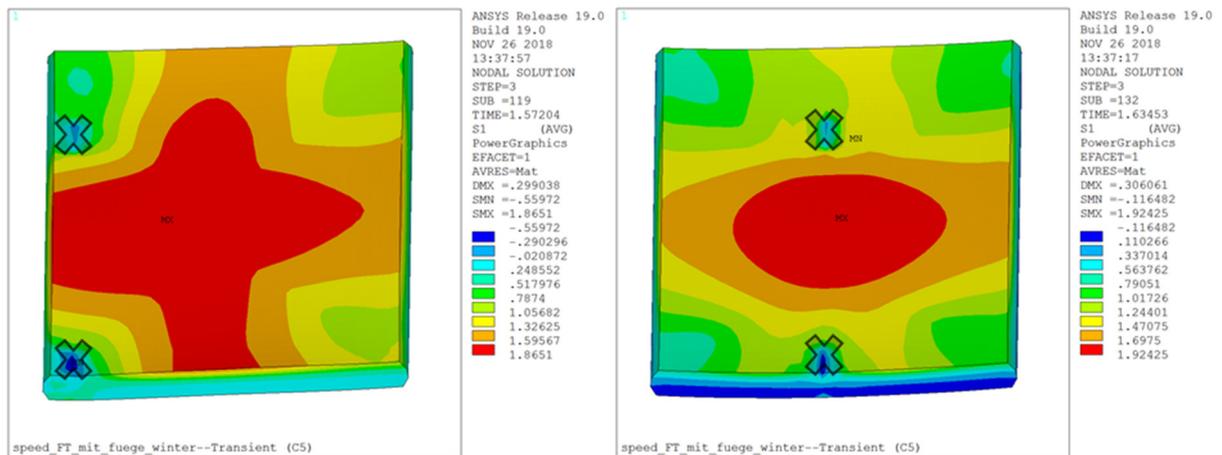


Abbildung 180: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem Wintertag (-0,035 K/mm) mit Belastung am Plattenrand (links) und in Plattenmitte (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von oben). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt.

9.3.8 Zusammenfassende Erkenntnisse aus Dauermessung und FE-Nachrechnung

Die **Laserscannmessungen des RoadSTAR** zeigten keine wesentlichen Unterschiede der Unebenheiten zwischen verlegten Fertigteilen zu den Unebenheiten des Bestandes. Bei den runden Platten wurden Sprünge von ca. 3 mm gemessen. Gemäß Erkenntnissen mit der numerischen Parameterstudie Kapitel 6.1.1, kommt es bei Unebenheiten in dieser Größenordnung zu keiner wesentlichen dynamischen Vergrößerung von Kontaktkräften. Bei den rechteckigen Platten betragen die Fugenversätze ± 8 mm, gerade zum Anschluss zur Bestandsfuge sind diese deutlich größer. Diese resultieren hauptsächlich an die beim Einbau notwendige Anpassung an den verwundenen Bestand. Zwischen den Fertigteilplatten selbst ist kaum ein Versatz vorhanden.

Das **Konzept der Messung** von Dehnung und Temperatur im Fertigteil in der Fahrbahn konnte erfolgreich umgesetzt werden. Gemessen werden konnte der Vorgang der Betoneinbringung in die Fertigteile, Einbau der Platte sowie Temperatur und Dehnungsverläufe und Fahrzeugüberfahrten über den gesamten Messzeitraum. Die Messanlage ist im Betrieb und ist so ausgelegt, dass die Anlage auch nach dem Projektabschluss noch weiter betrieben werden kann. Damit wäre die Basis vorhanden, um noch weitere fundierte wissenschaftliche Daten zu generieren. Beim Betoneinbringen sind nur geringe Dehnungen gemessen worden, alle Sensoren sind intakt geblieben.

Die **Messung des Einbaus der Platte** ist vor allem gekennzeichnet durch eine Temperaturbelastung aufgrund der Reaktion des Harzes. Hier ist selbst die Erwärmung der Platte durch das Harz deutlich messbar, bei der runden Platte war dies auch wegen der Harzmenge und der gedrunghenen Oberfläche stärker ausgeprägt als bei der rechteckigen. Überfahrtssignale von LKW sowie Temperaturganglinien werden seit Beginn der Dauermessung erfolgreich gemessen. Das Messsystem ist sehr sensibel, es können sogar Überfahrten von PKW erkannt werden.

Beim **Langezeitverhalten** stimmen Einzeltagesganglinien sehr gut mit der FE- Nachrechnung mit upgedateten Materialkennwerten überein. Auch bei längerfristigen Zeiträumen ist eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung vorhanden. Es ergeben sich jedoch mit der Zeit Abweichungen, deren Ursache in messtechnisch nicht gänzlich erfassbaren Phänomenen (wie z. B. Kriechen, Schwinden, Initialbedingungen, Mitwirkung des Untergrundes etc...) liegen. Hier gibt es noch ein Potenzial für künftige Untersuchungen.

Bis zur Einbautemperatur von ca. 23°C ist eine gemessene Dehnung von rund 60-70 µm/m pro 10°C zu verzeichnen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient kann daraus aufgrund der Randbedingungen (Bodenreibung etc.) nicht direkt bestimmt werden und wurde im Labor mit 110 µm/m pro 10°C bestimmt. Ab ca. 23°C bilden sich in Längsrichtung Zwangsspannungen aus, dies entspricht in etwa der Einbautemperatur der Platten und ist anhand der Abflachung der Dehnungs-Temperatur-Ganglinien zu erkennen. Im Vergleich dazu sind diese Effekte in Querrichtung geringer. Dies gilt sowohl für die rechteckige als auch für die runde Platte.

Auch die detaillierte Betrachtung der **Einzelüberfahrten** ergibt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Es konnte kein messbares dynamisches Nachschwingen identifiziert werden. Auch im FE - Vergleichsmodell sind keine merklichen Schwingungen der Platten aufgrund der Überfahrt aufgetreten. Eine Auswertung der Eigenfrequenzen wurde daher nicht weiterverfolgt. Der Vergleich der Simulation mit der Messung deutet darauf hin, dass innerhalb der Messperiode noch ein relativ guter Haftverbund der Silikatharzschiicht mit dem Untergrund und der Platte vorliegt. Extreme gemessene Temperaturunterschiede zwischen Plattenober- und Plattenunterseite gab es aufgrund der kurzen Messdauer nur sehr wenige am Anfang der Messperiode. Ein Lösen des Verbundes zu einem späteren Zeitpunkt kann jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden. Auch die Interaktion zwischen den einzelnen Fertigteileplatten ist in den Überfahrten messbar. Radpositionen auf der Nachbarplatte induzieren messbare Dehnungen in der Messplatte. Das Vorzeichen dieser Dehnungen ist von der Wölbungsrichtung abhängig.

Tatsächliche Radlasten können nur in Kombination mit der Nachrechnung mit einer Genauigkeit von $\pm 30\%$ bestimmt werden. Hier besteht noch Forschungspotenzial, insbesondere bei der Untersuchung von langen Zeitreihen und Machine Learning Ansätzen, um die Genauigkeit zu verbessern, da vor allem die Lage Sensor zum Rad einen entscheidenden Einfluss auf die gemessene Dehnung hat.

Die Position der Radlast, wo die maximalen Spannungen generiert werden, ist äußerst komplex und von der Kombination aus Temperaturverformung und Radaufstellpunkt abhängig und somit im Sommer wie Winter unterschiedlich. Die Rückrechnung in Kombination mit 40 t Lkw und 9 t Achslast ergibt Hauptzugspannungen im Grenzfall Modell ohne Verbund der Silikatharzschiicht von ca. 1,9 MPa.

Ein **Meilenstein wurde im Hinblick der Anwendung und Umsetzung der Messtechnik erreicht**. Das Messkonzept mit im Betonfertigteile eingebetteten Sensoren kann erstmalig im Autobahnnetz in einer Betonfahrbahnplatte Temperatur und mechanische Kenngrößen aufzeichnen. Das komplexe Zusammenwirken von Witterung (Temperatur) und

Fahrzeugüberfahrt konnte mit einer sehr hohen Abtastrate aufgezeichnet werden. Eine Messstelle (an rechteckigen Fertigteilen) wird dazu auch energieautark mit einer mobilen PV-Anlage der ASFINAG betrieben.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN FÜR REGELWERKE

Die Fertigteiltechnologie weist derzeit einen technischen Stand auf, der es ermöglicht, nicht nur die notwendigen Tragfähigkeiten zu erreichen, sondern auch die Gebrauchseigenschaften sicher herstellen zu können. Zudem lassen die entwickelten Konstruktionen erwarten, dauerhaft zu sein. Es ist zu vermuten, dass die Lebensdauer der eingebauten Fertigteile einer klassisch gebauten Strecke entspricht.

Die Technologie wurde schrittweise soweit entwickelt, dass eine schnelle und sichere Verlegung ausführbar ist und die Nutzbarkeit unmittelbar nach der Verlegung bereits ermöglicht wird. Im Gegensatz zu anderen Erhaltungsmethoden wird beim Einsatz der Fertigteiltechnik ein Endzustand erreicht, der mit dem eines Neubaus gleichzusetzen ist. Andere Erhaltungsmethoden weisen deutlich kürzere Lebensdauern und / oder schlechtere Gebrauchseigenschaften auf. Schnellbeton weist zwar die erforderlichen Tragfähigkeiten auf, die Oberflächeneigenschaften lassen jedoch oftmals zu wünschen übrig.

Ein maßgebliches Manko der Fertigteiltechnologie ist die momentan noch unzureichende Wirtschaftlichkeit. Dies ist zum einen in dem Einsatz teurer Materialien (wie beispielsweise dem Silikatharz) begründet und zum anderen darauf zurückzuführen, dass noch keine serienmäßige Produktion erfolgen kann. Die bisherigen Fertigteile wurden ausschließlich in Einzelprojekten bzw. Pilotanwendungen eingebaut. Folglich ist anzustreben, die Wirtschaftlichkeit der Bauweise zu verbessern. Ein wesentlicher Beitrag, um Fertigteile regelmäßig anwenden zu können, ist die Einführung in das deutsche und österreichische Regelwerk. Hierfür ist eine ausreichende Anzahl an Erprobungen und Testungen durchzuführen und über mehrere Jahre hinweg zu beobachten. Das Monitoring sollte dabei neben den Tragfähigkeitseigenschaften und den Gebrauchseigenschaften wie Griffigkeit, Ebenheit und Lärminderung auch die Untersuchungen der Dauerhaftigkeit der Fugenkonstruktionen und –ausbildungen umfassen. Diese stellt einen entscheidenden Faktor für die Langlebigkeit der gesamten Konstruktion dar.

Diese und vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fertigteiltechnologie ebenso ein großes Potenzial für die Sanierung hochbelasteter Verkehrsflächen und plangleicher Knotenpunkte bietet. Die Herausforderung besteht dabei insbesondere darin, die verschiedenen vorkommenden Höhenverhältnisse nachzubilden und die Fertigteile auch in mehreren Richtungen verlegen zu können.

11 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Liste Schäden und mögliche Fertigteillösungen.....	41
Tabelle 2:	Mögliche Randbedingungen für Plattengeometrien.....	47
Tabelle 3:	Für die Berechnung angenommene Materialparameter (In der Nachrechnung Kapitel 8 wurden die gemessenen Daten angepasst.).....	69
Tabelle 4:	Ergebnisse der transienten Analyse aus kombinierter Belastung Temperatur + Überfahrt.	74
Tabelle 5:	Richtwerte für die Schalungshaftung	77
Tabelle 6:	Richtwerte für den Hublastfaktor.....	77
Tabelle 7:	Werte für den Zug-E-Modul der einzelnen Straßenbetonklassen entsprechend [RDO BETON 2009].....	79
Tabelle 8:	Werte für die Wärmedehnzahl entsprechend [RDO BETON 2009]	80
Tabelle 9:	Anpassungsfaktor γ_{LF} für die Radlast entsprechend [RDO BETON 2009]	85
Tabelle 10:	Stoßfaktoren γ_s für die Radlast nach [RDO BETON 2009]	85
Tabelle 11:	Anpassungsfaktor C_1 für den Temperaturgradienten entsprechend [RDO BETON 2009].....	85

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: SPEED-FT Projektstruktur	11
Abbildung 2: Super-Slab®-System [https://www.super-slab.com/route-17-bridge-approach-slabs-vestal-ny].....	16
Abbildung 3: Michigan Methode [TAY 2010].....	18
Abbildung 4: Ausräumen der Aussparungen [BRODAL 2011].....	18
Abbildung 5: KWIK JOINT [KWIKSLAB 2006]	19
Abbildung 6: Anschnitt einer KWIK SLAB [KWIKSLAB 2006].....	19
Abbildung 7: Lage der Löcher (GROUT HOLES) und Kanäle (GROUTING GROOVES an der Plattenunterseite) für den Bettungsmörtel [KWIKSLAB 2006]	19
Abbildung 8: quadratisches Fertigteil mit abgerundeten Ecken im Fugenkreuzbereich	21
Abbildung 9: Fertigteil mit integrierten Bauteilen zur Befeuern am Flughafen in München	23
Abbildung 10: verlegte Fertigteilplatten auf dem duraBAST- Gelände [HESTER 2018].....	24
Abbildung 11: Fertigteilreihe im Bereich einer Bushaltestelle in Berlin Marzahn [HESTER 2018]	25
Abbildung 12: gekrümmte Fertigteile im Bereich einer Bushaltestelle in Berlin Marzahn [HESTER 2018]	25
Abbildung 13: Beispiel Schnitfführung	27
Abbildung 14: Betonbrücken (Schnittbereich ist deutlich zu erkennen)	28
Abbildung 15: Aufteilen der auszubauenden Betonfläche und Anbringen von Ösen	28
Abbildung 16: Bohrstelle Ø1950, BAB A14	29
Abbildung 17: Bohrung Ø1950	29
Abbildung 18: zum Ausheben vorbereitete Platte Ø 1950	29
Abbildung 19: Ausheben der ausgebohrten Eckstücke	29
Abbildung 20: an der Betondecke anhaftendes Tragschichtmaterial.....	31

Abbildung 21: Auffüllen von Fehlstellen mit Splitt und Füllen der Hohlräume mit Silikatharz	31
Abbildung 22: Auffüllen von Fehlstellen mit Sand und Füllen mit Silikatharz.....	32
Abbildung 23: Dübelverbindung mit nach unten offener Dübelkammer	33
Abbildung 24: Vakuumhebergerät	35
Abbildung 25: Einheben der Fertigteile mit Hilfe von Hochleistungsgurten [HESTER 2018]	35
Abbildung 26: Verpressöffnungen mit Packern.....	36
Abbildung 27: Schraube System HESTER-Kombi.....	48
Abbildung 28: Schutzmatte um HESTER-Kombi und abgeklebte Verpressöffnungen	48
Abbildung 29: Ausbildung der Kanäle an der Unterseite	49
Abbildung 30: System Nut-Nut in den Ausführungsunterlagen.....	50
Abbildung 31: System Dübel-Dübelkammer in den Ausführungsunterlagen	50
Abbildung 32: „HESTER-Kombi“-System	51
Abbildung 33: Edelstahlverschlussschraube für „HESTER-Kombi“-System	52
Abbildung 34: Arbeitslinie Silikatharz [Wieland 2011].....	54
Abbildung 35: Finite-Elemente-Volumenmodell zur Untersuchung der Interaktion zwischen Dübel und Fugenverfüllung	56
Abbildung 36: Setzungsmulde am Plattenrand bei der Radüberrollung	57
Abbildung 37: Dehnfuge zwischen Fertigteile und traditionell gefertigter Strecke	58
Abbildung 38: Exemplarische Darstellung des gemessenen dynamischen Lasterhöhungsfaktors einer Brücke [RAL 2014]. Mit zunehmender Fahrzeugmasse (Strain peak to peak) ist eine Abnahme des Faktors erkennbar.....	61
Abbildung 39: Beispiel der gemessenen Längsebenheit, welche für die Simulation und Parameterstudie verwendet wurde.....	62
Abbildung 40: Model des LKWs in den Überfahrtsberechnungen. Als idealisiertes mechanisches Feder-Masse-Dämpfer-System (links, Abmessungen in [m]), und im FE - Modell implementiert (rechts).	63
Abbildung 41: Radlasten eines 40 t LKWs bei Überfahrt eines 5 mm Versatzes (links) und maximale Kontaktkräfte bei v = 60 km/h und realem	

Straßenprofil in Kombination mit vertikalem Versatz von 0, 2, 5 und 10mm (rechts).....	64
Abbildung 42: Radlasten bei veränderlicher Fahrtgeschwindigkeit von 80 und 90 km/h.....	65
Abbildung 43: Radlasten bei unterschiedlichen Profiltypen ideal „flat“ (oben links), real uneven (unten links) und das generische Profil „artificial good“ (unten rechts) für v=60 km/h.....	66
Abbildung 44: Dynamischer Vergrößerungsfaktor DAF (Dynamic Amplification Factor) für ein ideal glattes Profil (links) und ein real gemessenes Profil (rechts)	67
Abbildung 45: Dynamischer Vergrößerungsfaktor DAF (Dynamic Amplification Factor) für ein künstlich generiertes Straßenprofil	68
Abbildung 46: Detailausbildung der Kontaktfläche der Dübelkammer (links), Darstellung des gemeshen 3-dimensionalen FE Modells (rechts)....	69
Abbildung 47: Detailausbildung der Plattenaufbauten (links) und Detail Kontaktfläche der Nut (rechts)	70
Abbildung 48: Aufstandsflächen (rot = aufliegend, gelb = abhebend) bei der Temperaturbelastung für Sommer (links) und Winter(rechts).	71
Abbildung 49: Exemplarische Zeitverläufe für Verformungen (links) und Spannungen (rechts) für den Lastfall Winter und 40 t LKW.....	72
Abbildung 50: Exemplarische Zeitverläufe für Verformungen (links) und Spannungen (rechts) für den Lastfall Sommer 40 t LKW.....	73
Abbildung 51: Temperaturanteile.....	83
Abbildung 52: Schalung und Bewehrung vor dem Betonieren.....	97
Abbildung 53: Nachbehandlung nach dem Ausbürsten.....	97
Abbildung 54: Schadhafter Bereich - Einbaustelle.....	98
Abbildung 55: Spezialkernbohrgerät.....	98
Abbildung 56: Einbaustelle mit im Bestand eingeklebten Dübeln	98
Abbildung 57: Einheben des Fertigteils	98
Abbildung 58: eingesetztes Fertigteil beim Unterpressen.....	98
Abbildung 59: Fertigteil nach dem Abbau der Traversen.....	98

Abbildung 60: Einbaubereich runde Fertigteile A1, RF Salzburg, km 143,500 [QUELLE: https://www.openstreetmap.de/karte.html].....	100
Abbildung 61: Einbaustelle 1 – Platte 3, km 143,458	101
Abbildung 62: Einbaustelle 2 – Platte 2, km 143,523	101
Abbildung 63: Einbaustelle 3 – Platte 1, km 143,528	102
Abbildung 64: Ausbau vorhandener Betonschichten	104
Abbildung 65: Einbaustellen für Fertigteile nach dem Bohren der Aussparungen ..	105
Abbildung 66: Einheben des Fertigteils	105
Abbildung 67: Höhenjustierung der Fertigteile	106
Abbildung 68: Fertigteil nach dem Unterpresse und Fugenverguss	106
Abbildung 69: Fertigteil 3, Einbaustelle 1 nach dem Einbau.....	106
Abbildung 70: Fertigteil 2, Einbaustelle 2 nach dem Einbau.....	106
Abbildung 71: Fertigteil 1, Einbaustelle 3 nach dem Einbau.....	107
Abbildung 72: Fertigteile 2 und 1 nach dem Einbau	107
Abbildung 73: Einbaubereich Fertigteile A1, RF Wien, km 151,500 [QUELLE: https://www.openstreetmap.de/karte.html].....	108
Abbildung 74: erste zu ersetzende Betonplatte im HFS	108
Abbildung 75: zweite zu ersetzende Betonplatte im HFS	109
Abbildung 76: dritte zu ersetzende Betonplatte im HFS	109
Abbildung 77: Einbaubereich zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme.....	110
Abbildung 78: Flickstelle im 2. Fahrstreifen im Fugenkreuzbereich mit deutlichem Höhenversatz	110
Abbildung 79: Höhenversatz im Bereich des 1./2. Fahrstreifens	111
Abbildung 80: Höhenversatz zum angrenzenden Asphaltstreifen	111
Abbildung 81: entnommene Bohrkern	112
Abbildung 82: Skizze Schadenserfassung	112
Abbildung 83: Skizze messtechnische Aufnahme und Bohrkern.....	113
Abbildung 84: Skizze Fertigteile im Hauptfahrstreifen – geplante Kopplungselemente	114
Abbildung 85: Ausbau der alten Betonschichten durch Schneiden kleinerer Plattenteile	115
Abbildung 86: Herstellung Nut im Bestand	116

Abbildung 87: Einbaubereich Fertigteile 1 bis 3.....	116
Abbildung 88: Anlieferung der Fertigteile.....	116
Abbildung 89: Einsetzen der Fertigteile.....	117
Abbildung 90: durch den Bolzen des Höhenjustiersystems durchstanzte dünne Stahlplatte.....	117
Abbildung 91: Schadstelle im Fertigteil.....	118
Abbildung 92: Mit Reparaturmörtel reparierte Schadstelle im Fertigteil.....	118
Abbildung 93: Einbaustelle und Anlieferung.....	119
Abbildung 94: Übergang zum Bestand mit Dübel/Dübelkammern.....	119
Abbildung 95: Fertigteile beim Unterpressen.....	119
Abbildung 96: Fertigteile nach dem Einbau.....	120
Abbildung 97: Anrühren des Silikatharzes.....	121
Abbildung 98: Einfüllen des Silikatharzes.....	121
Abbildung 99: FWD-Messpositionen 1 bis 30 sowie FT M und FT F.....	125
Abbildung 100: Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a auf OK Fahrbahn [MN/m ²].....	126
Abbildung 101: Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m ²].....	126
Abbildung 102: Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%]....	127
Abbildung 103: Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm].....	127
Abbildung 104: Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul E_a auf OK Fahrbahn [MN/m ²].....	129
Abbildung 105: Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m ²].....	129
Abbildung 106: Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%]130	
Abbildung 107: Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm].....	130
Abbildung 108: FWD-Messpositionen vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018 132	
Abbildung 109: FWD-Messpositionen nach Einbau der Fertigteile am 21.8.2018.....	132

Abbildung 110:	Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul $E_{\text{ä}}$ [MN/m ²] auf OK Fahrbahn vor dem Einbau der Fertigteile	133
Abbildung 111:	Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul $E_{\text{ä}}$ [MN/m ²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile.....	133
Abbildung 112:	Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] vor dem Einbau der Fertigteile.....	134
Abbildung 113:	Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] nach dem Einbau der Fertigteile.....	134
Abbildung 114:	Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor dem Einbau der Fertigteile.....	135
Abbildung 115:	Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile.....	135
Abbildung 116:	Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor dem Einbau der Fertigteile.....	136
Abbildung 117:	Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile.....	136
Abbildung 118:	Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul $E_{\text{ä}}$ [MN/m ²] auf OK Fahrbahn vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	139
Abbildung 119:	Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	140
Abbildung 120:	Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	141
Abbildung 121:	Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor und nach dem Einbau der Fertigteile	142
Abbildung 122:	Entwicklung äquivalenter Verformungsmodul $E_{\text{ä}}$ [MN/m ²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile.....	143
Abbildung 123:	Entwicklung Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] nach dem Einbau der Fertigteile.....	143
Abbildung 124:	Entwicklung Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile.....	144
Abbildung 125:	Entwicklung Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile	144

Abbildung 126:	FWD-Messpositionen vor Einbau der Fertigteile am 20.8.2018	146
Abbildung 127:	FWD-Messpositionen nach Einbau der Fertigteile am 23.8.2018.....	146
Abbildung 128:	Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m ²] auf OK Fahrbahn vor dem Einbau der Fertigteile	147
Abbildung 129:	Mittlerer äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m ²] auf OK Fahrbahn nach dem Einbau der Fertigteile.....	147
Abbildung 130:	Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] vor dem Einbau der Fertigteile.....	148
Abbildung 131:	Mittlerer Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] nach dem Einbau der Fertigteile.....	148
Abbildung 132:	Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor dem Einbau der Fertigteile.....	149
Abbildung 133:	Mittlerer Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] nach dem Einbau der Fertigteile.....	149
Abbildung 134:	Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor dem Einbau der Fertigteile.....	150
Abbildung 135:	Mittlere Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] nach dem Einbau der Fertigteile.....	150
Abbildung 136:	Einzelwerte äquivalenter Verformungsmodul E_a [MN/m ²] auf OK Fahrbahn vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	153
Abbildung 137:	Einzelwerte Bettungsmodul E_0 [MN/m ²] vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	154
Abbildung 138:	Einzelwerte Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung W [%] vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	155
Abbildung 139:	Einzelwerte Relativdeflexion bezogen auf einen Kraftstoß von 50 kN ΔD [mm] vor und nach dem Einbau der Fertigteile.....	156
Abbildung 140:	Erfassung der Oberflächeneigenschaften und Geometrie mit dem Hochleistungsmessfahrzeug RoadSTAR.....	157
Abbildung 141:	Draufsicht der Laserscan-Punktwolken der eingebauten rechteckigen (oben) und runden (unten) Platten. Die farbigen	

Linien kennzeichnen die Auswertungsprofile, welche in Abbildung 142 und Abbildung 143 (farblich gleich) dargestellt sind.	158
Abbildung 142: Längsunebenheit im Einbaubereich der rechteckigen Platte 3 Tage nach dem Einbau. Die vertikalen Linien stellen die Fugen zwischen den Fertigteilen dar.	158
Abbildung 143: Längsunebenheit im Einbaubereich der runden Platte 3 Tage nach dem Einbau. Die vertikalen Linien stellen die Fugen dar (Das Orange Profil befindet sich 30 cm vom Plattenrand entfernt).	159
Abbildung 144: Übersichtsdarstellung des Messaufbaues im Bereich der Abfahrt St. Valentin (rechteckige Fertigteile) [Quelle Luftbild:atlas.noe.gv.at].....	162
Abbildung 145: Übersichtsdarstellung des Messaufbaues im Bereich km 143,5 (runde Fertigteile) [Quelle Luftbild:atlas.noe.gv.at]	163
Abbildung 146: Verwendeter faseroptischer Dehnungssensor.	163
Abbildung 147: Sensorbezeichnungen und -positionen im runden Fertigteil, grau dargestellt ist die mögliche Position der linken Fahrspur eines LKWs. (Bezeichnungen S... Dehnung, T... Temperatur).....	164
Abbildung 148: Sensorbezeichnungen und -positionen im rechteckigen Fertigteil, grau dargestellt ist die mögliche Position der LKW Fahrspuren.	165
Abbildung 149: Positionierte Sensoren (drei Dehnungs- sowie drei Temperatursensoren) unmittelbar vor dem Betonieren.	166
Abbildung 150: Detail der Kabelausleitung aus dem Fertigteil (rund und rechteckig) im eingebauten Fertigteil, gestrichelt ist die Kabelposition beim Transport dargestellt (links). Foto der Einbaustelle vor dem Verfüllen (rechts).	167
Abbildung 151: Runde Fertigteile nach dem Einbau, beim ersten Fertigteil rechts ist der Schnitt zur Ausleitung der optischen Kabel erkennbar.	167

Abbildung 152: Rechteckige Fertigteile nach dem Einbau, beim zweiten Fertigteil ist rechts der Schnitt zur Ausleitung der optischen Kabel erkennbar.	168
Abbildung 153: Klimakammer mit Betonproben zur Bestimmung des Temperatureausdehnungskoeffizienten.....	169
Abbildung 154: Messwerte der Temperatur und der am Messgerät angezeigten Dehnungen	169
Abbildung 155: Berechneter Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur für 4 Betonproben.....	170
Abbildung 156: Dehnungsmessung der rechteckigen Platte in den ersten vier Tagen	171
Abbildung 157: Temperaturmessung der rechteckigen Platte in den ersten vier Tagen	172
Abbildung 158: Dehnungsmessung der runden Platte in den ersten 4 Tagen	173
Abbildung 159: Temperaturmessung der runden Platte in den ersten 4 Tagen. ...	173
Abbildung 160: Gemessene Dehnung in Querrichtung in Abhängigkeit der Zeit bei der Überfahrt des RoadSTAR. Achsabstands- und Geschwindigkeitsbestimmung aus Messdaten.	174
Abbildung 161: Gemessene Dehnung in Längsrichtung in Abhängigkeit der Zeit bei der Überfahrt des RoadSTAR. Zu erkennen ist, dass das Fahrzeug das Fertigteil eher auf der linken Seite passiert hat.	175
Abbildung 162: Dokumentierte Überfahrt eines PKWs mit ca. 1,1 t Leergewicht (links) und eines Kleintransporters mit ca. 2,2 t Leergewicht (rechts).	176
Abbildung 163: Dehnungsänderung des Sensors auf der rechten Seite des Fertigteils verursacht bei der dokumentierten Überfahrt eines PKWs mit ca. 1,1 t Leergewicht (links) und eines Kleintransporters mit ca. 2,2 t Leergewicht (rechts).....	176
Abbildung 164: Überfahrt eines Sattelschleppers mit fünf Achsen.....	177
Abbildung 165: Überfahrt eines von der Autobahn abfahrenden Sattelschleppers mit fünf Achsen (lediglich die linke Fahrzeugseite befindet sich über dem Fertigteil.	178

Abbildung 166: Darstellung der Dehnungen ohne Verkehrsbelastung in Längsrichtung des rechteckigen Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum	179
Abbildung 167: Darstellung der Temperaturmessung des rechteckigen Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum	180
Abbildung 168: Zusammenhang von gemessener Dehnung und Temperatur der rechteckigen Platte	180
Abbildung 169: Darstellung der der Dehnungen ohne Verkehrsbelastung in Längsrichtung des runden Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum.	181
Abbildung 170: Darstellung der der Temperaturmessung des runden Fertigteils über den gesamten Auswertungszeitraum.	182
Abbildung 171: Zusammenhang von gemessener Dehnung und Temperatur der runden Platte.	182
Abbildung 172: Vergleich der Dehnungen Langzeitmessung (dünne Linien) mit den Dehnungen aus der Simulation (dick Punkte).....	184
Abbildung 173: Vergleich des Dehnungs-Temperatur-Zusammenhangs der Langzeitmessung (dünne Linien) mit den Dehnungen aus der Simulation (dick Punkte).	184
Abbildung 174: Messung einer Überfahrt eines etwa 40 t LKWs am 23. August (einem heißen Sommertag).	186
Abbildung 175: Simulation einer Überfahrt eines etwa 40 t LKWs an einem heißen Sommertag. Mit (links) und ohne (rechts) Verbund des Harzes mit dem Untergrund und Fertigteilplatte beim Aufwölben des Fertigteils.	186
Abbildung 176: Zeitlicher Verlauf der Hauptzugspannungen [MPa] in Plattenmitte in Abhängigkeit der Zeit mit (links) und ohne (rechts) Verbund an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm).	187
Abbildung 177: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm) ohne (links) und mit Belastung des angrenzenden Fertigteils (rechts) mit einem 40 t LKW	

- (Ansicht von unten). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt. 188
- Abbildung 178: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem heißen Sommertag (0,06 K/mm) mit Belastung am Plattenrand (links) und in Plattenmitte (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von unten). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt. 188
- Abbildung 179: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem Wintertag (-0,035 K/mm) ohne (links) und mit Belastung des angrenzenden Fertigteils (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von oben). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt. 189
- Abbildung 180: Darstellung der Hauptzugspannungen im Fertigteil an einem Wintertag (-0,035 K/mm) mit Belastung am Plattenrand (links) und in Plattenmitte (rechts) mit einem 40 t LKW (Ansicht von oben). Radpositionen sind als schwarzes X dargestellt. 189

13 LITERATURVERZEICHNIS

- [AP FWD] AP Trag Teil C 2.2 - Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil C 2.2: Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen – Betonbauweisen, FGSV-Nr. 433 C 2.2
- [AWD 1.7] AWDSTAKO, Vers.1.7 System und Software zur Berechnung der Solldicke unbewehrter Betondecken von Verkehrsflächen
- [BAST 2018] Geprüfte, AKR-unbedenkliche Vorkommen von groben Gesteinskörnung für den Einsatz in Fahrbahndecken aus Beton – WS Grundprüfung, BAST 22.11.2018
- [BLAB et. al 2012] BLAB, R., STEIGENBERGER J., HOFFMANN M., LANGER M., MARCHTRENKER S., NISCHER P., PEYERL, M.
Betonstraßen; Das Handbuch. Zement + Beton, Handels- und Werbeges.m.b.H.
- [BRODAL 2011] BRODAL, A. “Precast Concrete Paving Slabs: Built to Last and Install Fast”, Precast Solutions Magazine, 2011-Spring
- [DA220 1979] GRASSER, E., KORDINA, K., QUAST, U.: „Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen“
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 220, 1979
- [DIN EN 206] DIN EN 206, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Ausgabe 1/ 2017

- [DIN EN 1990] DIN EN 1990: 2010-12: 2010-12 „Grundlagen der Tragwerksplanung“
Beuth-Verlag, 2010
- [DIN EN 1990 NA] DIN EN 1990: 2010-12/NA: 2010-12 „Grundlagen der Tragwerksplanung / Nationaler Anhang“
Beuth-Verlag, 2010
- [DIN EN 1991-2] DIN EN 1991-2: 2010-12 „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken“
Beuth-Verlag, 2010
- [DIN EN 1991-2/NA] DIN EN 1991-2/NA: 2012-8 „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken/Nationaler Anhang“
Beuth-Verlag, 2012
- [DIN EN 1992-1-1] DIN EN 1992-1-1: 2011-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“
Beuth-Verlag, 2011
- [DIN EN 1992-1-1 NA] DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau / Nationaler Anhang“
Beuth-Verlag, 2011
- [DIN EN 1992-2 NA] DIN EN 1992-2/NA: 2013-4 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2:

Betonbrücken / Nationaler Anhang”, Beuth-Verlag,
2013

[EI/LEY 2003]

EISENMANN, JOSEF; LEYKAUF, GÜNTHER:
Betonfahrbahnen. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2003

[FE 08.0236/2015]

PICHOTTKA, ST., RIWE, A.; TSCHERNACK, T.;
VILLARET, ST., WEINGART, W.:
“Einsatz von Fertigteilen für die dauerhafte
Instandsetzung sowie die Schaffung von
Entspannungsbereichen an Betonfahrbahndecken“,
Bundesanstalt für Straßenwesen 2016

[FE 08.0253/2017]

ALTE TEIGELER, T.,et. al.
„Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die
grundhafte Erneuerung auf der duraBAST“

[FE 89.0279/2012]

RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.:
“Machbarkeitsstudie zum Einsatz von vorgefertigten
Betonfertigteilen zur schnellen Sanierung lokaler
Schadstellen“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2012

[FE 89.0283/2013]

RIWE, A.; TSCHERNACK, T.; VILLARET, ST.:
Weiterentwicklung und Erweiterung der theoretischen
Grundlagen für die Instandsetzungsmethode mittels
Betonfertigteilen“, Bundesanstalt für Straßenwesen 2014

[FLESCH 1997]

Flesch, R.: Baudynamik praxisgerecht, Bauverlag, ISBN
3-7625-3072-6, 1997

- [FOB NRW 1959] Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Nr. 675 Beanspruchung der Straße durch Kraftfahrzeuge. Westdeutscher Verlag, 1959.
- [HESTER 2018] VILLARET, St. , et.al.: „Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe – HESTER“, Forschungsrahmenprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“, Fördermaßnahme BMBF „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen - HighTechMatBau“, 2018
- [MC90 1991] Comite Euro-International du Beton: „Bulletin d’Information No 203, CEB-FIB Model Code 1990“ Lausanne 1991
- [ÖNORM EN 1991-2] ÖNORM EN 1991-2: 2012-3 „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken“ Austrian Standards, 2012
- [ÖNORM B 1991-2] ÖNORM B 1991-2: 2011-4 „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Nationale Festlegungen“ Austrian Standards, 2011
- [ÖNORM EN 1992-1-1] ÖNORM EN 1992-1-1: 2011-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“ Austrian Standards, 2015
- [ÖNORM B 1992-1-1] ÖNORM EN 1992-1-1: 2011-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken-

Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“, Nationale Festlegungen, Austrian Standards, 2018

- [PFEIFER 1973] PFEIFER, L.: Beitrag zur Ermittlung der relativen Verformungen und der Spannungen von Betonstraßen auf starrer unterer Tragschicht, Hochschule für Bau-wesen Leipzig, 1973
- [RAA 2008] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, FGSV 2008, Nr. 202
- [RAL 2014] Ralbovsky et. al. Forschungsbericht TRIMM 2014
- [RDO Beton 09] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Betondecke. FGSV 2009, Nr. 497
- [RStO 12] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, FGSV, Ausgabe 2012, Nr. 499
- [RVS 03.03.31 2018] RVS 03.03.31 Querschnittselemente sowie Verkehrs- und Lichtraum von Freilandstraßen, FSV 2018
- [TAY 2010] TAYABJI, S., Buch, N., YE, D. “Precast Concrete Pavement for Intermittent Concrete Pavement Repair Applications”, Vortrag zur 11th International Symposium on Concrete Roads, Sevilla, Spanien 13.-15.Oktober 2010
- [TP B-StB, Teil 3.1.05] Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen, Teil

3.1.05 „Spaltzugfestigkeit von Beton an Zylinderscheiben“, FGSV, Nr. 893

- [WESTERGAARD 1926] Westergaard, H. M.: Stresses in Concrete Pavements computed by Theoretical Analysis, Public Roads 7, Heft 2/1926
- [WIELAND 2011] WIELAND, M. „Instandsetzung von Betonfahrbahnplatten durch Unterpressung – Laboruntersuchungen und messtechnische Nachweis des Instandsetzungserfolgs“, Dissertation TU Dresden, 2011
- [ZTV Beton-StB 07] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, FGSV, Ausgabe 2007, Nr. 899