

---

# **FWD**

# **Vergleichsuntersuchungen**

# **2023**

---

Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für  
Straßenwesen

---

# **FWD**

# **Vergleichsuntersuchungen**

# **2023**

---

von  
Dr.-Ing. Dirk Jansen

Fachveröffentlichung  
Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen

## Impressum

Referat:

S7 – Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Gestaltungskonzept:

MedienMélange: Kommunikation

Bergisch Gladbach, Mai 2023

---

# Inhalt

---

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsprogramm</b>	<b>9</b>
2.1	Wiederholbarkeit	10
2.2	Vergleichbarkeit	10
2.3	Untersuchung des Lastimpulses	10
2.4	Temperaturmessungen	10
2.5	Versuchsbedingungen	10
2.6	Ablauf	12
<b>3</b>	<b>Messpunkte</b>	<b>13</b>
3.1	Tragfähigkeitsmesspunkte	13
3.2	Temperaturmesspunkte	14
<b>4</b>	<b>Teilnehmer</b>	<b>15</b>
4.1	BASt (2)	16
4.2	ZETCON Ingenieure GmbH	16
4.3	TU Darmstadt / Heller Ingenieurgesellschaft mbH	17
4.4	Hochschule Anhalt	17
4.5	Karlsruher Institut für Technologie	18
4.6	SWECO A/S	18
4.7	QRoad	19
4.8	BASt (1)	19
4.9	Kiwa KOAC	20
4.10	Infralab SA	20
4.11	Service Technique de l'Aviation Civile (2)	21
4.12	Vilnius Gediminas Technical University	21
4.13	Rincent ND Technologies	22

4.14 Belgian Road Research Centre	22
4.15 Laboroute SA	23
4.16 Dynatest S/A	23
4.17 Service Technique de l'Aviation Civile (1)	24
4.18 Danish Road Directorate	24
4.19 Consultest AG	25
<b>5 Auswertung</b>	<b>26</b>
5.1 Wiederholbarkeit	26
5.2 Vergleichbarkeit	29
5.3 Auswertung der Lasteintragung	32
5.4 Temperaturen	32
5.5 Genauigkeit des GPS	35
5.6 Zusammenfassende Bewertung	35
<b>6 Fazit</b>	<b>37</b>

## Vorwort

Der vorliegende Projektbericht ist im Referat S7 „Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten“ entstanden. Die Projektergebnisse sind neben den genannten Autoren dieses Berichtes insbesondere auch durch die engagierte Mitwirkung der folgenden Personen (in alphabetischer Reihenfolge) entstanden:

- Frau Tanja Billetter
- Herr Erhard Ebbinghaus
- Frau Regina Fielenbach
- Frau Dipl.-Ing. Gudrun Golkowski
- Herr Yannick Langer
- Frau Dipl.-Ing. Bianca Leipzig
- Herr Alfred Meyer
- Herr M.Sc. Jan Ork
- Herr Benjamin Rudolph
- Herr M.Sc. Michael Scherkenbach
- Herr Niklas Schößler

# 1 Einführung und Zielsetzung

Die ersten Falling-Weight-Deflectometer (FWD) wurden Anfang der 1990er Jahre in Deutschland in Betrieb genommen. Die wissenschaftliche Einführung erfolgte im Jahr 1996. Durch den Arbeitskreis „Tragfähigkeit“ der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen wurden und werden eine Reihe von Arbeitspapieren zur Planung, Durchführung und Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen erstellt.

Im Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B2.1 [1] werden Empfehlungen zur Eigen- und Fremdüberwachung des Messequipment sowie zur Durchführung von Ringversuchen gegeben. Hierin wird gefordert: „Für die Überprüfung der Wiederhol- und Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen der in Deutschland eingesetzten FWD (Ringversuche) wird eine zentrale Prüfstelle eingerichtet werden.“

In den Jahren 2015, 2016 und 2018 wurden daher die ersten Vergleichstests auf dem Gelände der BASt in der nun vorliegenden Art durchgeführt [2], mit dem Ziel, die Grundlage für eine dauerhafte und wiederkehrende Organisation für Vergleichsmessungen zu schaffen. Ergebnisse und Nachfrage bzw. die Reaktionen der Teilnehmer sprachen deutlich für eine jährliche Wiederholung. Durch die Corona-Pandemie mussten jedoch die Vergleichsmessungen in den Jahren 2020 und 2021 entfallen. Seit dem Jahr 2022 ist wieder die jährliche Durchführung vorgesehen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat dabei zum einen in ihrer Rolle als Qualitätssicherer für eine Reihe von im Straßenwesen eingesetzten Messverfahren und zum anderen als Auftraggeber für FWD-Messungen im Rahmen von Forschungsprojekten ein hohes Interesse an der Etablierung der Vergleichsmessungen für FWD in Deutschland.

Da bereits international derartige Vergleichsmessungen langjährig etabliert sind, wurden die daraus vorliegenden Erfahrungen ebenfalls bei der Planung der Vergleichsmessungen genutzt. Insbesondere wurde dabei auf die Erfahrungen in den Niederlanden zurückgegriffen [3], die auch im Bericht zur COST-Aktion 336 [4] eingeflossen sind.

Zur Wahrung der wirtschaftlichen Interessen der FWD-Betreiber werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen im Folgenden anonymisiert wiedergegeben. Die jeweiligen FWD-Betreiber haben mit der Ergebnismitteilung die Codierung für ihr FWD mitgeteilt bekommen.

# 2 Versuchsprogramm

Die Gestaltung des Versuchsprogramms orientiert sich eng an dem in der COST-Aktion 336 ausgearbeitetem europäischem Konsens. Das Versuchsprogramm verfolgt folgende Kernpunkte:

- Untersuchung der Wiederholbarkeit (jedes FWD für sich),
- Untersuchung der Vergleichbarkeit (Vergleich der FWD untereinander),
- Untersuchung der Präzision der Temperaturmessungen.

Um möglichst unabhängig von den Aspekten der Verkehrssicherung zu handeln, wurden ausschließlich Messpunkte auf dem BAST-Gelände betrachtet. Hierdurch kann in gewissem Rahmen sichergestellt werden, dass wiederholende Messungen in den kommenden Jahren bei gleicher Situation durchzuführen sind.

Insgesamt standen 21 Messpunkte pro Messrunde zur Verfügung. Zwei Messpunkte lagen auf der Modellstraße in Versuchshalle 9, 15 Messpunkte auf der Freifläche der Fahrzeugtechnischen Versuchsanlage (FTVA) und deren Zufahrt sowie vier weitere Messpunkte auf dem Besucherparkplatz. Die Messpunkte werden im Kapitel 3 detailliert beschrieben.

Es wurden zwei Messrunden, eine vormittags und eine nachmittags, durchgeführt. Die Position der Lastplatte war an allen Messpunkten mit einem Kreis, Durchmesser 40 cm, markiert, vgl. Abbildung 1. Zudem wurden Leitkegel aufgestellt, an denen mit der linken Fahrzeugseite eng vorbeigefahren werden sollte, sodass die Ausrichtung des Geofonbalkens vergleichbar war.

Generell sollten die FWD gemäß dem FGSV Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B.2 [1] ausgestattet sein und wie für die Durchführung regulärer Messungen in Betriebsbereitschaft gebracht werden.



Abbildung 1: Beispiel für einen Messpunkt



## 2.1 Wiederholbarkeit

Gemäß [1] und [3] ist zwischen einer Kurz- und Langzeitwiederholbarkeitsprüfung zu unterscheiden. Im Rahmen der Kurzzeitwiederholbarkeitsprüfung verbleibt die Lastplatte auf dem Boden, während hingegen bei der Langzeitwiederholbarkeit der Messpunkt mehrfach (in größeren Zeitabständen) angefahren wird. Gegenstand der Vergleichsuntersuchungen war die Überprüfung der Kurzzeitwiederholbarkeit.

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit wurden zwei Messpunkte festgelegt. An diesen Messpunkten wurden 12 Lastschläge mit je 50 kN (Zielgröße) durchgeführt. Die Lastplatte durfte dabei nicht angehoben werden. Obwohl nur die letzten zehn Lastschläge ausgewertet wurden, sollten alle Lastschläge gespeichert werden.

## 2.2 Vergleichbarkeit

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit wurden 19 Messpunkte ausgewählt. An diesen Messpunkten wurden je fünf Lastschläge mit je 50 kN (Zielgröße) durchgeführt. Die Lastplatte durfte dabei nicht angehoben werden. Obwohl nur die letzten vier Lastschläge ausgewertet wurden, sollten alle Lastschläge gespeichert werden.

## 2.3 Untersuchung des Lastimpulses

Zur Untersuchung des Lastimpulses wurde gefordert die Time-History-Daten an allen Messpunkten zu erfassen. Die Untersuchung des Lastimpulses erfolgt nur anlassbezogen zur Klärung von Unstimmigkeiten.

## 2.4 Temperaturmessungen

Jeder FWD-Betreiber wurde darum gebeten, alle ihm zur Verfügung stehenden Messinstrumente zur Temperaturmessung zu verwenden. Hierzu gehören in der Regel:

- Lufttemperatur (am FWD montiert),
- Oberflächentemperatur (am FWD montiert oder Handgerät) und
- Asphaltkörpertemperatur (am FWD montiert oder Handgerät).

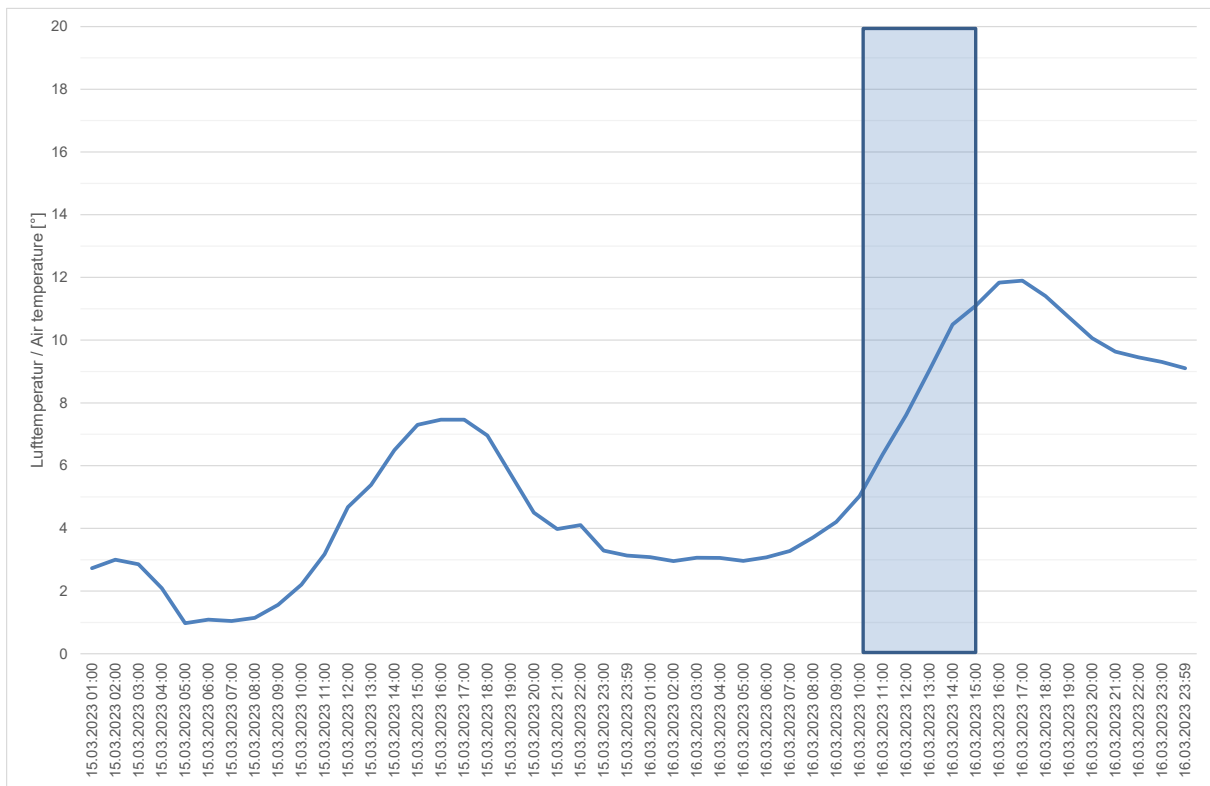
Für den Abgleich der Messinstrumente zur Asphaltkörpertemperaturmessung wurde am Messpunkt 1 ein kontrolliert temperiertes Wasserbad aufgebaut. Die Wasserbadtemperatur wurde vormittags niedrig und nachmittags hoch eingestellt. Als Referenz erfolgte die kontinuierliche Messung mit einem rückgeführten Temperaturlogger.

Zusätzlich wurden jeweils am Messpunkt 2 und 21 ein ebenfalls rückgeführter Temperaturlogger zur Messung der Oberflächentemperatur installiert.

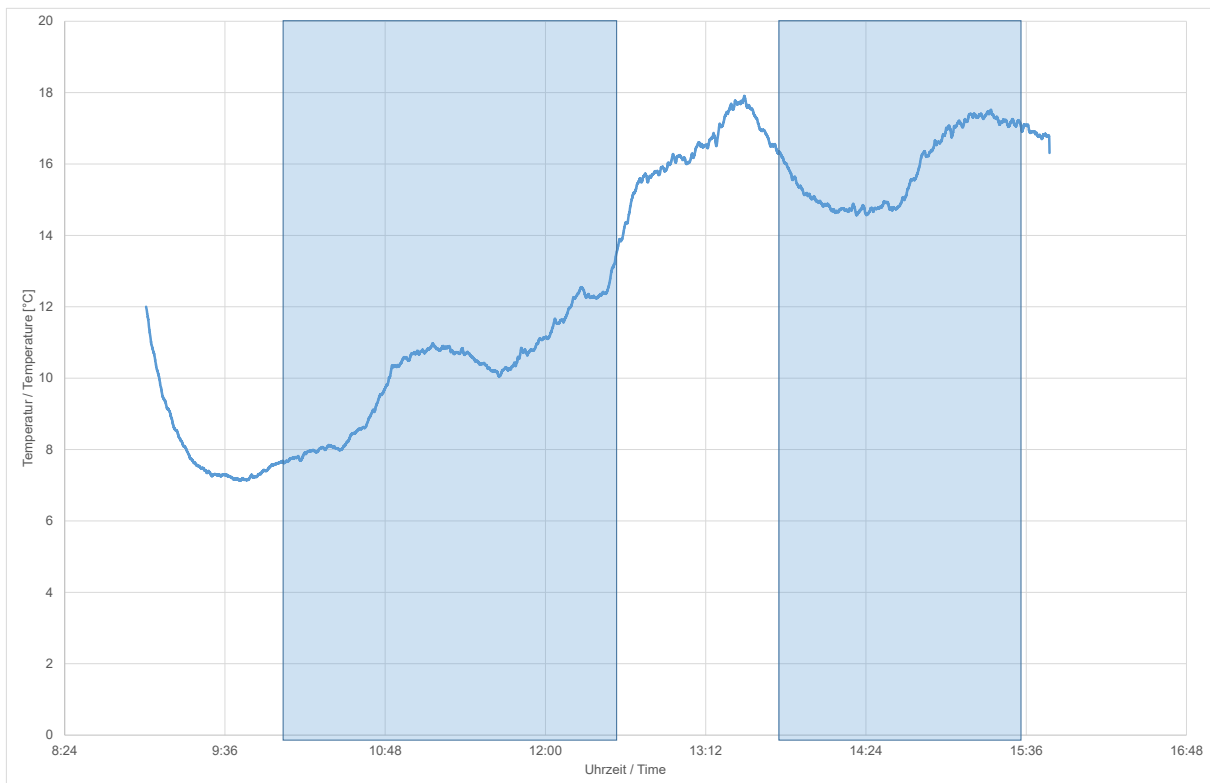
## 2.5 Versuchsbedingungen

Die Vergleichsmessungen fanden am 16. März 2023 zwischen 10 Uhr und 16 Uhr statt. Der Messtag war ein bedeckter, weitestgehend trockener Tag. Die Lufttemperaturen betragen im Messzeitraum zwischen ca. 5°C und ca. 11°C. Abbildung 2 stellt den gemessenen Tagesgang der Lufttemperatur für den Vortag und den Messtag dar. Die Messung der Lufttemperatur erfolgte mittels einer Wetterstation der BAST, die unmittelbar neben der Freifläche der Fahrzeugtechnischen Versuchsanlage (FTVA) dauerhaft installiert ist.

Die Oberflächentemperatur wurde an Messpunkt 21 gemessen. Der Temperaturverlauf über den Messzeitraum ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 2: Lufttemperatur am Vortag und am Messtag bzw. zur Vergleichsmessung (Markierung)**



**Abbildung 3: Gemessene Oberflächentemperatur zur Vergleichsmessung Nähe Messpunkt 21**

## 2.6 Ablauf

Nach dem Eintreffen aller Teilnehmer erfolgte eine kurze Vorstellung der Ablaufplanung durch den Versuchsleiter Dr. Jansen. Die verschiedenen Testsetups, die Lage der Messpunkte und allgemeine Informationen wurden dargestellt und diskutiert. Jeder Teilnehmer erhielt eine Mappe (Roadbook) mit der Zusammenstellung dieser Informationen und für jede Messrunde einen Dokumentationsbogen (Logbuch), aus dem zudem klar die Messreihenfolgen und die dazugehörigen Testsetups hervor gingen.

Im Rahmen der Anmeldung zu den Vergleichsmessungen erfolgte ein Geräteaudit, bei dem Fragen zur Modellart und -nummer, Baujahr, Anzahl der Geofone und deren Positionen, Anzahl und Positionen der Temperaturerfassungen sowie sonstige Ausstattungsmerkmale gestellt wurden. Unklarheiten wurden durch Rückfragen am Messtag ausgeräumt.

Zu Beginn der Messungen wurden alle Systemuhren der FWD-Kontrollrechner mit der durch die Versuchsleitung vorgegeben Uhrzeit abgeglichen. Die Systemuhren Temperaturlogger wurden vorab ebenfalls mit der Uhrzeit der Versuchsleitung synchronisiert.

Die Reihenfolge der FWD war beliebig aber fest während jeder Messrunde. Notwendige Änderungen in der Reihenfolge, z.B. bei Gerätedefekt, wurden protokolliert. Ein vorab festgelegter Messpunkt (außerhalb der Bewertung) wurde den FWD-Betreibern zur Einstellung der Fallhöhe angeboten (im Falle einiger Geräte notwendig zum Start einer Messung). Die Abfolge der Messungen einer Messrunde ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Zur genauen Positionierung der FWD ist es vorteilhaft, dass jeweils Teams mit zwei Personen gebildet werden (Fahrer und Einweiser). Da einige Betreiber mit zwei Personen anreisten und BASt-Mitarbeiter zur Unterstützung anwesend waren, konnte die Teambildung sichergestellt werden.

Neben den üblichen auf Anhängern verbauten FWD waren zudem sogenannte in-built-FWD, also in Transporter fest eingebaute Systeme, vertreten. Im Vergleich zu den Anhänger-Versionen zeigt bei diesen Systemen der Messbalken gegen die Fahrtrichtung. Zur Herstellung der Vergleichbarkeit haben diese FWD bei den Vergleichsmessungen jeden Messpunkt rückwärts angefahren.

Nach Abschluss der ersten Messrunde wurden die Daten von den Betreibern exportiert und von einer BASt-Mitarbeiterin grafisch aufbereitet. Vor Beginn der zweiten Messrunde konnte somit ein erster vergleichender Blick auf die bisher erzielten Ergebnisse geworfen und mit allen Teilnehmern diskutiert werden. Es erfolgte keine Anpassung der FWD oder der Test-Setups.

Im Anschluss erfolgte die zweite Messrunde, die durch die Datenübergabe an die BASt beendet wurde.

**Tabelle 1: Abfolge der Messungen**

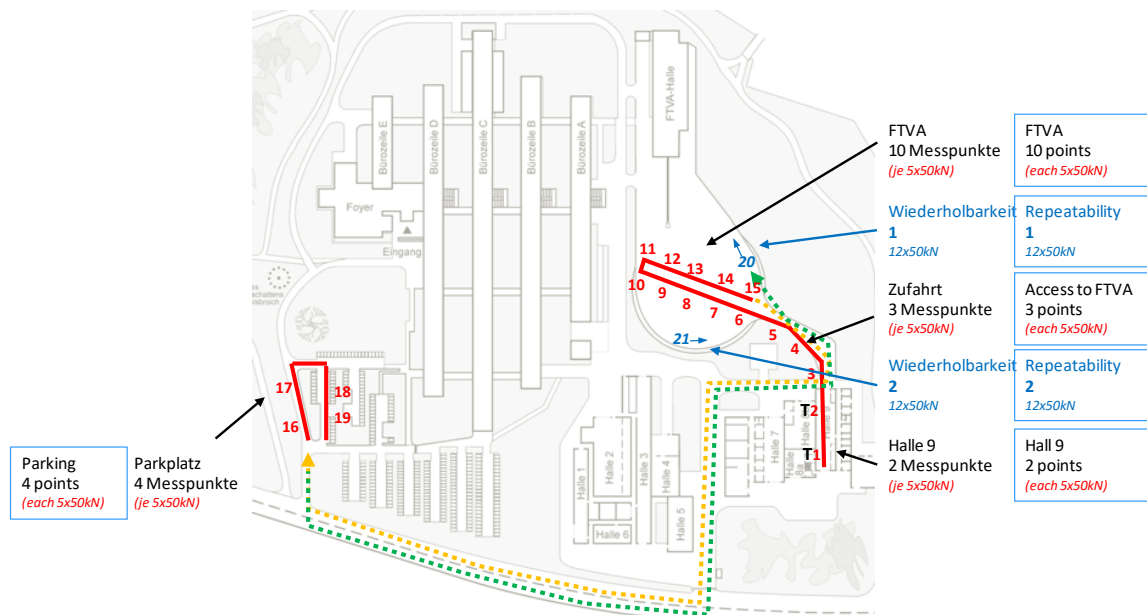
Messpunktnr.	Ort	Setup	Besonderheit
1	Halle 9		Temperaturmessung Wasserbad
2	Halle 9	5x 50 kN	Temperaturmessung Oberfläche
3-15	FTVA		-
16-19	Parkplatz		-
20-21	FTVA	12x 50 kN	-

# 3 Messpunkte

## 3.1 Tragfähigkeitsmesspunkte

Zur Vorbereitung der Vergleichsuntersuchungen wurden Tragfähigkeitsmessungen in einem engen Raster auf dem BAST Gelände durchgeführt. Auf dieser Datengrundlage erfolgte eine Auswahl der Messpunkte für die Vergleichsuntersuchungen. Die Auswahl sollte nach Möglichkeit verschiedene Tragfähigkeitsniveaus des Untergrundes und der gesamten Befestigung abbilden. Zudem wurden Anforderungen an die praktische Durchführung gestellt, so wurde zum Beispiel der Messpunktabstand so festgelegt, dass zwei FWD-Gespanne direkt hintereinander messen können. Die Anzahl der Messpunkte orientierte sich zudem an der erreichbaren Messleistung an einem Tag, unter Berücksichtigung der Untersuchungsbedingungen und der An- und Abfahrtsituation der Teilnehmer.

In Abbildung 4 ist die Lage der Messpunkte dargestellt. Anhand vorliegender Datengrundlagen und ergänzender Georadar-Messungen wurden die Schichtdicken des Asphaltpaketes bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



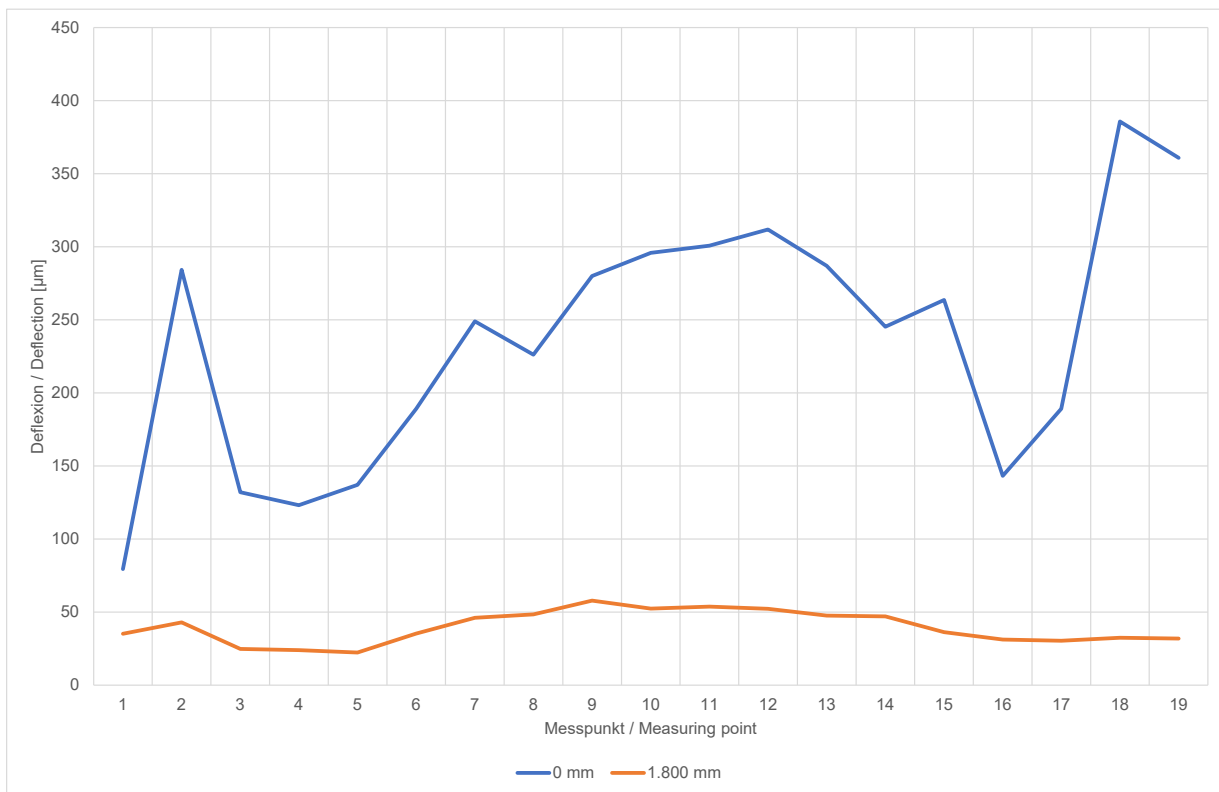
**Abbildung 4: Lage und Bezeichnung der Messpunkte (T= Temperaturmesspunkt / blau = zusätzliche Messpunkte für Wiederholbarkeitsprüfung)**

Die Charakteristik der Deflexionen der verschiedenen Messpunkte ist als Streckenband der Deflexion im Lastzentrum und in 1.800 mm Entfernung davon in Abbildung 5 dargestellt. Datengrundlage sind die während der Vergleichsmessungen bestimmten Vergleichsmulden (Herleitung siehe unten).

**Tabelle 2: Dicken des Asphaltpaketes**

Messpunktnr.	Ort	Schichtdicke des Asphaltpaketes [cm]
1	Halle 9	ca. 26 cm (auf 15 cm HGT)
2	Halle 9	ca. 12 cm
3-5	FTVA	ca. 30 cm
6-15	FTVA	ca. 18 cm <sup>1)</sup>
16	Parkplatz	ca. 20 cm <sup>1)</sup>
17	Parkplatz	ca. 17 cm <sup>1)</sup>
18	Parkplatz	ca. 17 cm <sup>1)</sup>
19	Parkplatz	ca. 20 cm <sup>1)</sup>
20-21	FTVA	ca. 30 cm

<sup>1)</sup> aus Georadarmessung



**Abbildung 5: Deflexion im Lastzentrum und 1.800 mm entfernt davon (Vergleichsmulde)**

### 3.2 Temperaturmesspunkte

Die vergleichenden Temperaturmessungen wurden an den Messpunkten 1 (im Wasserbad) und 2 (an der Oberfläche) durchgeführt. Ein weiterer Messpunkt für die Oberflächentemperatur befand sich am Messpunkt 21. Als Referenz wurden Temperaturlogger des Typs Tinytag TV-4204 mit angeschlossenen PT1000 Fühlern verwendet. Die eingesetzten Messketten wurden im Trockenblockkalibrator kalibriert.

# 4 Teilnehmer

Die Resonanz auf die Einladung zu den sechsten Vergleichsuntersuchungen war groß. Eingeladen wurden sämtliche FWD-Betreiber in Deutschland, Teilnehmer aus den Vorjahren sowie weitere internationale Interessenten.



**Abbildung 6: Gruppenbild der Teilnehmer und Helfer**



**Abbildung 7: Alle Teilnehmer und Messfahrzeuge**

An den Vergleichsmessungen im Jahr 2023 haben insgesamt 19 FWD bzw. 17 FWD-Betreiber teilgenommen. Verwendet wurden dabei 9 FWD/HWD der Herstellermarke Sweco, 7 FWD/HWD des Herstellers Dynatest und 3 FWD/HWD des Herstellers Rincnet.

Die folgende Darstellung der FWD ist nach dem Baujahr geordnet.

## 4.1 BAST (2)

Hersteller / Modell:	Sweco PRI 1509
Baujahr:	1992, Umbau Technik 2018
Kfz-Kennzeichen:	GL 2434
Anzahl Geofone:	9



Abbildung 8: FWD BAST (2)

## 4.2 ZETCON Ingenieure GmbH

Hersteller / Modell:	Dynatest 8002
Baujahr:	1993
Kfz-Kennzeichen:	BO-D 19
Anzahl Geofone:	9



Abbildung 9: FWD ZETCON

### 4.3 TU Darmstadt / Heller Ingenieurgesellschaft mbH

Hersteller / Modell: Sweco PRI 2100  
Baujahr: 2003  
Kfz-Kennzeichen: DA 20048  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 10: FWD TU Darmstadt/Heller

### 4.4 Hochschule Anhalt

Hersteller / Modell: Sweco PRI 2100  
Baujahr: 2004  
Kfz-Kennzeichen: DE-EF 396  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 11: FWD Hochschule Anhalt



## 4.5 Karlsruher Institut für Technologie

Hersteller / Modell: Sweco PRI 2100  
Baujahr: 2007  
Kfz-Kennzeichen: KA-UN 150  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 12: FWD KIT

## 4.6 SWECO A/S

Hersteller / Modell: Sweco PRI 2100  
Baujahr: 2008  
Kfz-Kennzeichen: KL-C 7611  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 13: FWD SWECO

## 4.7 QRoad

Hersteller / Modell:	Dynatest HWD 8082
Baujahr:	2009
Kfz-Kennzeichen:	76-WJ-BX
Anzahl Geofone:	9



Abbildung 14: FWD QRoad

## 4.8 BAST (1)

Hersteller / Modell:	Sweco PRI 1500
Baujahr:	2010
Kfz-Kennzeichen:	GL-BA 1032
Anzahl Geofone:	13



Abbildung 15: FWD BAST (1)

## 4.9 Kiwa KOAC

Hersteller / Modell:	Sweco PRI 1500
Baujahr:	2011
Kfz-Kennzeichen:	23-WH-RR
Anzahl Geofone:	15



Abbildung 16: FWD Kiwa KOAC

## 4.10 Infralab SA

Hersteller / Modell:	Dynatest HWD 8082
Baujahr:	2012
Kfz-Kennzeichen:	VD 1494
Anzahl Geofone:	15



Abbildung 17: FWD Infralab

## 4.11 Service Technique de l'Aviation Civile (2)

Hersteller / Modell: Dynatest Super HWD  
Baujahr: 2014  
Kfz-Kennzeichen: DL-687-HL  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 18: FWD STAC (2)

## 4.12 Vilnius Gediminas Technical University

Hersteller / Modell: Sweco PRI 2500  
Baujahr: 2018  
Kfz-Kennzeichen: LM 381  
Anzahl Geofone: 14



Abbildung 19: FWD VGTU

### 4.13 Rincent ND Technologies

Hersteller / Modell: Rincent ND Technologies Heavydyn  
Baujahr: 2019  
Kfz-Kennzeichen: FS-711-DR  
Anzahl Geofone: 12



Abbildung 20: FWD Rincent NDT

### 4.14 Belgian Road Research Centre

Hersteller / Modell: Dynatest 8012 FastFWD  
Baujahr: 2020  
Kfz-Kennzeichen: Q-ALS-940  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 21: FWD BRRC

## 4.15 Laboroute SA

Hersteller / Modell:	Rincent ND Technologies Heavydyn
Baujahr:	2021
Kfz-Kennzeichen:	FR 318651
Anzahl Geofone:	10



Abbildung 22: FWD Laboroute

## 4.16 Dynatest S/A

Hersteller / Modell:	Dynatest 8012 FastFWD
Baujahr:	2021
Kfz-Kennzeichen:	ER 4487
Anzahl Geofone:	9



Abbildung 23: FWD Dynatest

## 4.17 Service Technique de l'Aviation Civile (1)

Hersteller / Modell:	Rincint ND Technologies Heavydyn
Baujahr:	2021
Kfz-Kennzeichen:	GE-055-FQ
Anzahl Geofone:	8



Abbildung 24: FWD STAC (1)

## 4.18 Danish Road Directorate

Hersteller / Modell:	Sweco PRI 1500
Baujahr:	2022
Kfz-Kennzeichen:	DE 36 829
Anzahl Geofone:	9



Abbildung 25: FWD DRD

## 4.19 Consultest AG

Hersteller / Modell: Dynatest HWD 8082  
Baujahr: 2022  
Kfz-Kennzeichen: ZH 73006  
Anzahl Geofone: 9



Abbildung 26: FWD Consultest



# 5 Auswertung

Wie genannt, erfolgte die Auswertung unter Berücksichtigung des in [3] niedergeschriebenen Vorgehens sowie unter Anerkennung und Beachtung der Erfahrungen der Vergleichsmessungen in den Niederlanden [4] sowie der BAST-Vergleichsuntersuchungen 2015 bis 2022.

Die Daten sind anonymisiert (FWD01-19) dargestellt.

## 5.1 Wiederholbarkeit

Die Wiederholbarkeit (hier Kurzzeitwiederholbarkeit, s.o.) liegt vor, wenn ein FWD am selben Messpunkt ohne Anhebung der Lastplatte, bedient durch dieselbe Person, mit mehreren Lastschlägen reproduzierbare Ergebnisse erzeugt.

Zur Bewertung der Wiederholbarkeit wurden die letzten 10 Lastschläge jeweils auf 50 kN normiert. Anschließend wurde der Mittelwert und die Standardabweichung der 10 Lastschläge bestimmt. Die Wiederholbarkeit ist gegeben, wenn die Standardabweichung kleiner oder gleich  $2\ \mu\text{m}$  oder kleiner oder gleich der Summe aus  $1,0\ \mu\text{m}$  und  $0,75\ %$  des Mittelwertes ist (je nachdem welche Anforderung betragsmäßig größer ist) [3][4].

Abbildung 27 bis Abbildung 30 stellen den relativen Vergleich der Ergebnisse des Wiederholbarkeitstest dar, wobei der Wert 1,0 das relative Limit darstellt (je kleiner der Wert, desto besser). Darin fehlende Datenbalken sind auf unterschiedliche Anordnungen der Geofone zurückzuführen.

Mit Ausnahme von FWD09, FWD14, FWD 15 und FWD18 haben alle FWD das Wiederholbarkeitskriterium an allen Messpunkten deutlich erfüllt. Im Falle des FWD09 und FWD15 treten die Überschreitungen nur vereinzelt am Geofon d0 auf. Beim FWD14 treten die Überschreitungen nur am Messpunkt 20 (mittlere Deflexion im Lastzentrum ca.  $195\ \mu\text{m}$ ) und nicht am Messpunkt 21 (mittlere Deflexion im Lastzentrum ca.  $255\ \mu\text{m}$ ) auf, jedoch dann an allen Geofonpositionen. Beim FWD18 liegt ein genereller Fehler vor, der dem Betreiber schon mitgeteilt wurde.

Insgesamt betrachtet kann das Wiederholbarkeitskriterium für die meisten FWD bestätigt werden. Die Überprüfung der Wiederholbarkeit kann im Rahmen der Eigenüberwachung durch jeden FWD-Betreiber an beliebigem Ort durchgeführt werden. Den o.g. auffälligen FWD wird eine Wiederholung dieser Prüfung zur Klärung empfohlen.

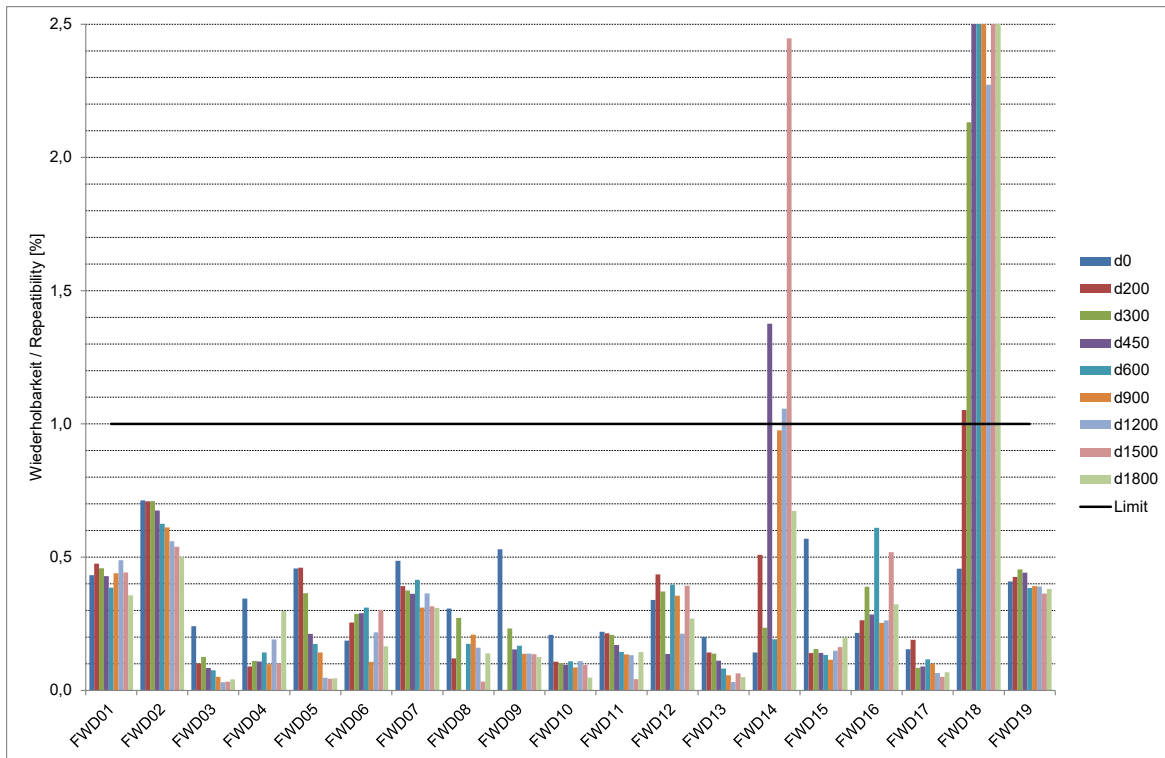


Abbildung 27: Wiederholbarkeit – Messpunkt 20, Messrunde 1

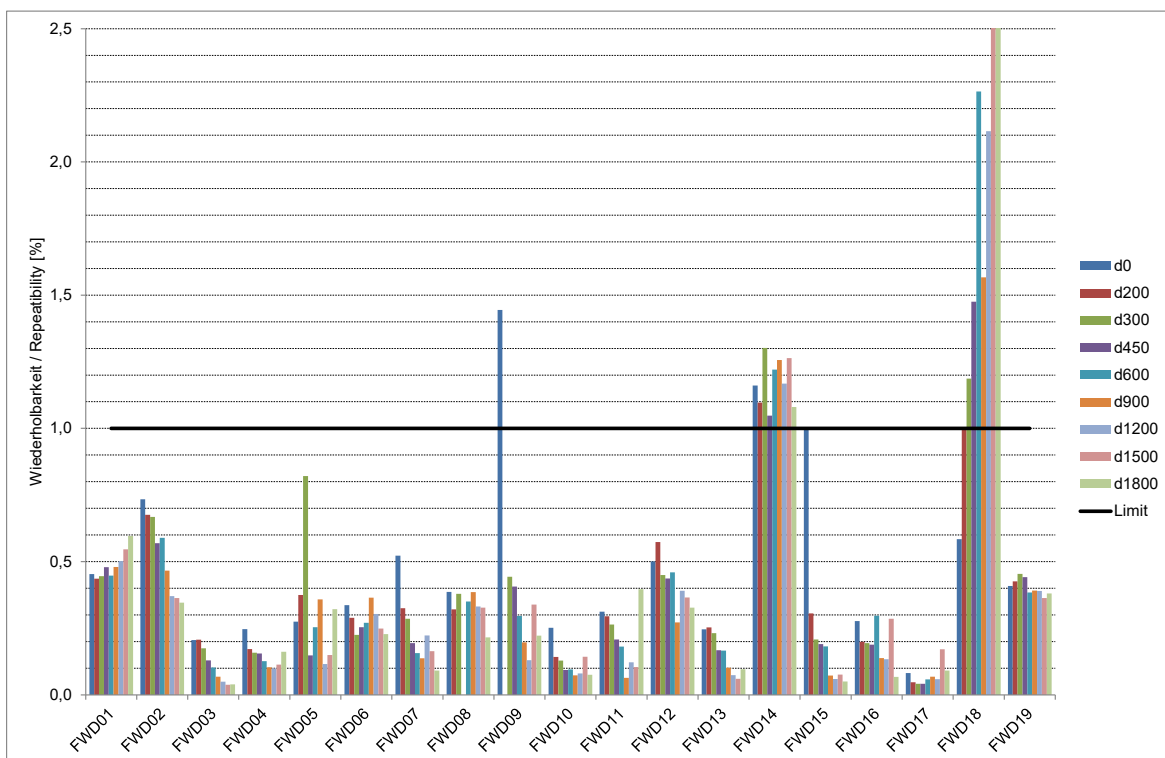


Abbildung 28: Wiederholbarkeit – Messpunkt 20, Messrunde 2

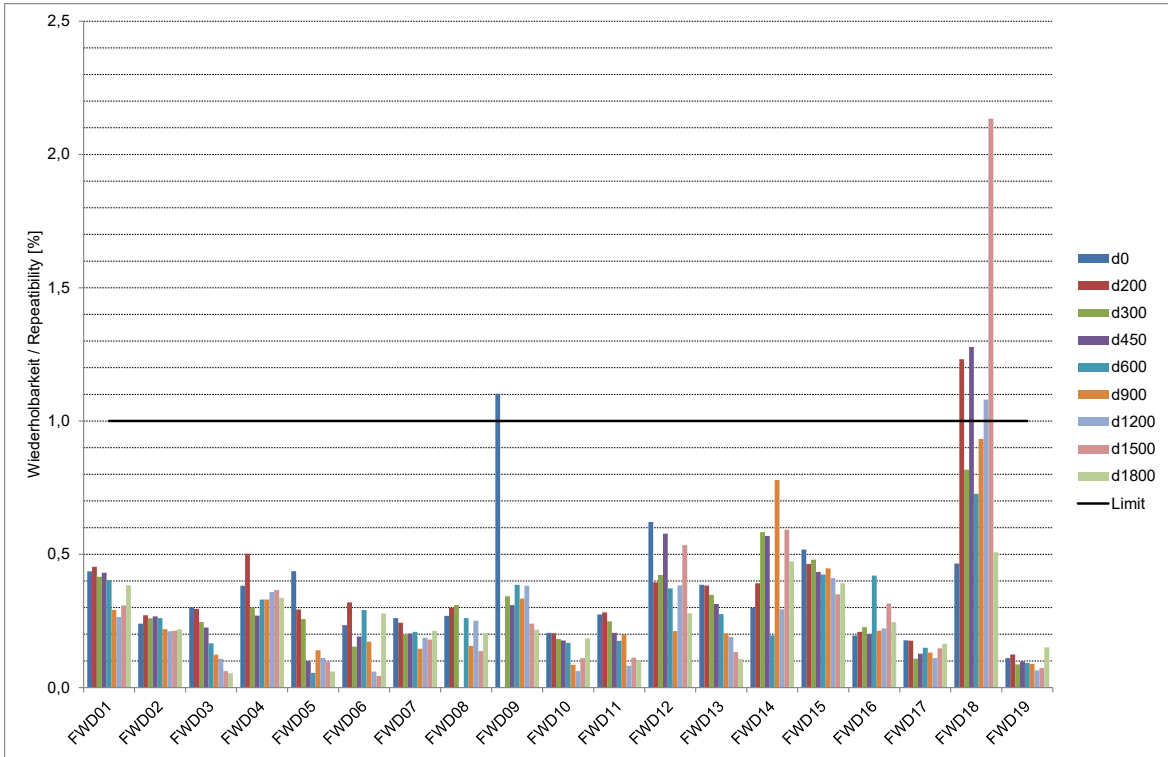


Abbildung 29: Wiederholbarkeit – Messpunkt 21, Messrunde 1

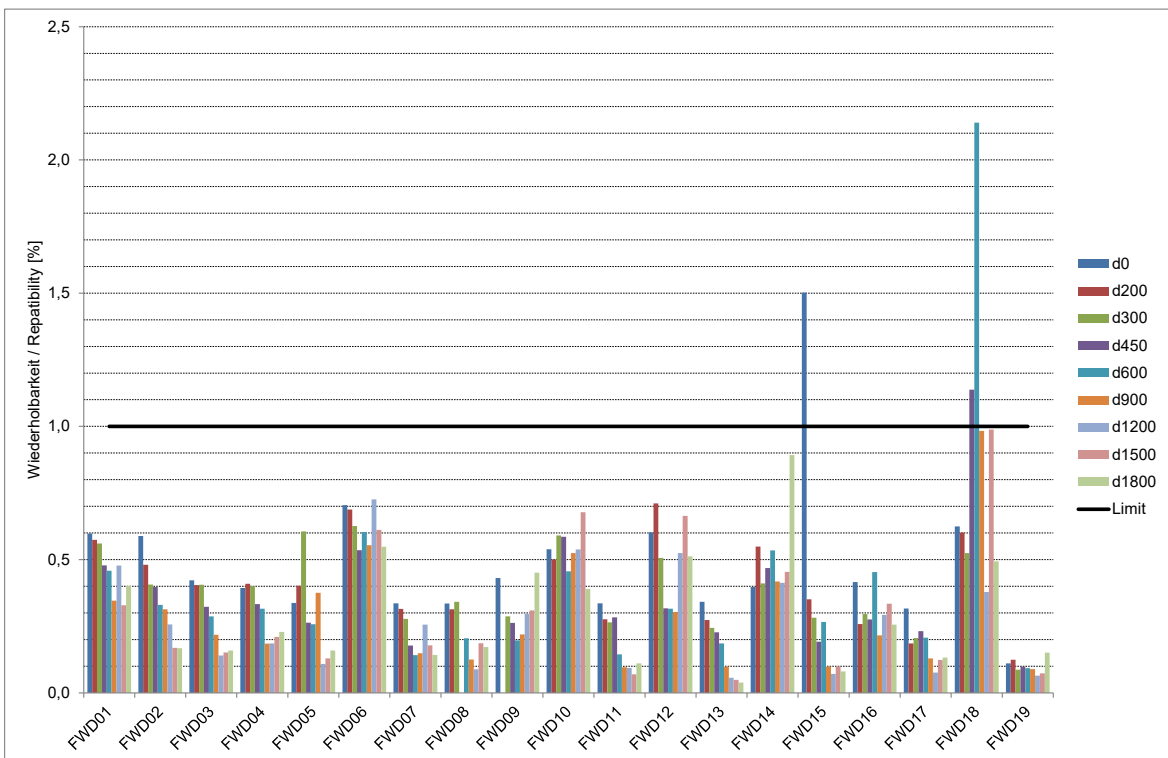


Abbildung 30: Wiederholbarkeit – Messpunkt 21, Messrunde 2

## 5.2 Vergleichbarkeit

Die Vergleichbarkeit liegt vor, wenn verschiedene FWD, bedient durch verschiedene Personen, vergleichbare Messergebnisse an den identischen Messpunkten erzeugen. Die Messungen sind zudem bei identischen Bedingungen durchzuführen.

Da die FWD in einem engen Zeitraum jeden Messpunkt pro Messrunde angefahren und gemessen haben, sind identische Bedingungen anzunehmen. Anhand der erfassten Oberflächentemperatur, vgl. Abbildung 3 ist zu erkennen, dass relativ konstante Bedingungen geherrscht haben.

Grundlage für eine vergleichende Bewertung ist die Festlegung eines Anforderungsniveaus. Dieses ist im Falle der Vergleichsuntersuchungen eine Vergleichsmulde pro Messpunkt. Die Vergleichsmulde wird aus den Messwerten aller FWD gebildet und ist für jede Vergleichsuntersuchung aufgrund sich ändernder Verhältnisse jeweils neu zu bestimmen. Zu beachten ist, dass die Vergleichsmulde keine absolute Referenz darstellt.

Folgendes Vorgehen wurde zur Bestimmung der Vergleichsmulde und für die anschließende Bewertung angewendet:

1. Normierung des Lastschlages 2 bis 5 auf 50 kN
2. Berechnung der Vergleichsmulde mittels Mittelwertbildung der lastnormierten Deflexionen pro Geofonposition aller FWD, wobei der höchste und niedrigste Wert ausgeschlossen wird
3. Berechnung der Standardabweichung der Vergleichsmulde aus den lastnormierten Deflexionen pro Geofonposition aller FWD, wobei der höchste und niedrigste Wert ausgeschlossen wird
4. Berechnung der Mittelwerte der lastnormierten Deflexionen pro Geofonposition und pro FWD
5. Prüfung für jedes FWD und jede Geofonposition, ob der Mittelwert (aus 4.) innerhalb des Bereiches der Vergleichsmulde (aus 2.)  $\pm$  der Standardabweichung (aus 3.) liegt
6. Berechnung von Korrekturfaktoren für jede Geofonposition aus dem Verhältnis des Mittelwertes (aus 4.) und der Vergleichsmulde (aus 2.)
7. Berechnung von Korrekturfaktoren für jedes FWD aus dem Mittelwert der Korrekturfaktoren (aus 6.)

Die Prüfung nach Punkt 5 hat im Wesentlichen folgendes Ergebnis:

- Das FWD01 fällt an fast allen Messpunkten auf, da Deflexionen kleiner dem Toleranzbereich der Vergleichsmulde gemessen werden.
- Das FWD10 fällt an fast allen Messpunkten auf, da Deflexionen kleiner dem Toleranzbereich der Vergleichsmulde gemessen werden.
- Das FWD16 fällt an fast allen Messpunkten auf, da Deflexionen kleiner oder größer dem Toleranzbereich der Vergleichsmulde gemessen werden.
- Das FWD17 fällt an fast allen Messpunkten auf, da Deflexionen kleiner oder größer dem Toleranzbereich der Vergleichsmulde gemessen werden.
- Das FWD19 fällt an fast allen Messpunkten auf, da Deflexionen kleiner oder größer dem Toleranzbereich der Vergleichsmulde gemessen werden.

An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass mit Ausnahme der FWD16 und 17 alle weiteren Anforderungen (s.u.) erfüllt werden, insbesondere die genannten relativen Abweichungen im zulässigen Bereich liegen.

Die nach Punkt 6 und 7 berechneten Korrekturfaktoren sollten zwischen 0,800 und 1,200 liegen [3][4]. Werte zwischen 0,995 und 1,005 können zu 1,000 gesetzt werden.

Tabelle 3 und Abbildung 31 zeigen die Zusammenstellung der Korrekturfaktoren. Es kann festgestellt werden, dass sich alle FWD innerhalb der Toleranz befinden. Eine Ausnahme bildet das Geofon  $d_{1800}$  am FWD16.

**Tabelle 3: Korrekturfaktoren**

	$d_0$	$d_{200}$	$d_{300}$	$d_{450}$	$d_{600}$	$d_{900}$	$d_{1200}$	$d_{1500}$	$d_{1800}$	FWD
FWD01	1,077	1,068	1,070	1,068	1,060	1,043	1,085	1,036	1,003	1,057
FWD02	1,002	0,982	0,985	0,991	0,988	0,974	0,972	0,959	0,951	0,978
FWD03	0,945	0,952	0,959	0,961	0,981	0,979	0,981	0,973	0,966	0,966
FWD04	0,974	0,971	0,978	0,988	0,997	0,993	0,990	0,980	0,959	0,981
FWD05	0,968	0,977	0,976	0,950	0,970	0,977	0,936	0,926	0,962	0,960
FWD06	1,032	1,023	1,033	1,032	1,055	1,046	1,050	1,065	1,007	1,038
FWD07	1,012	1,007	1,015	1,047	1,030	1,032	1,031	1,043	1,001	1,024
FWD08	1,017	1,002	1,005		1,007	1,015	1,019	0,977	0,993	1,005
FWD09	0,943		0,974	0,954	0,963	0,967	0,975	0,961	0,971	0,964
FWD10	1,070	1,068	1,069	1,073	1,078	1,074	1,075	1,061	1,045	1,068
FWD11	1,045	1,040	1,038	1,037	1,044	1,073	1,040	1,029	1,079	1,047
FWD12	0,986	0,979	0,978	0,997	0,993	0,990	0,967	0,993	1,027	0,990
FWD13	0,961	0,957	0,953	0,960	0,966	0,978	0,986	0,975	0,957	0,966
FWD14	1,010	0,991	1,005	1,001	1,002	0,989	1,007	0,997	0,936	0,993
FWD15	0,966	0,991	0,973	0,976	0,988	0,985	0,982	0,970	0,977	0,979
FWD16	1,035	1,027	1,036	0,989	0,889	0,901	0,894	1,049	1,267	1,010
FWD17	1,103	1,092	1,097	1,097	1,108	1,107	1,100	1,082	1,060	1,094
FWD18	0,996	0,997	0,985	0,998	0,996	0,983	1,022	1,032	1,013	1,003
FWD19	0,905	0,905	0,905	0,909	0,918	0,916	0,912	0,902	0,892	0,907

Des Weiteren wird als Grenzwert der aus den Korrekturfaktoren errechneten Standardabweichungen der Wert 0,090 genannt. Dieses Kriterium wird von allen FWD, außer dem FWD17, eingehalten, vgl. Abbildung 32.

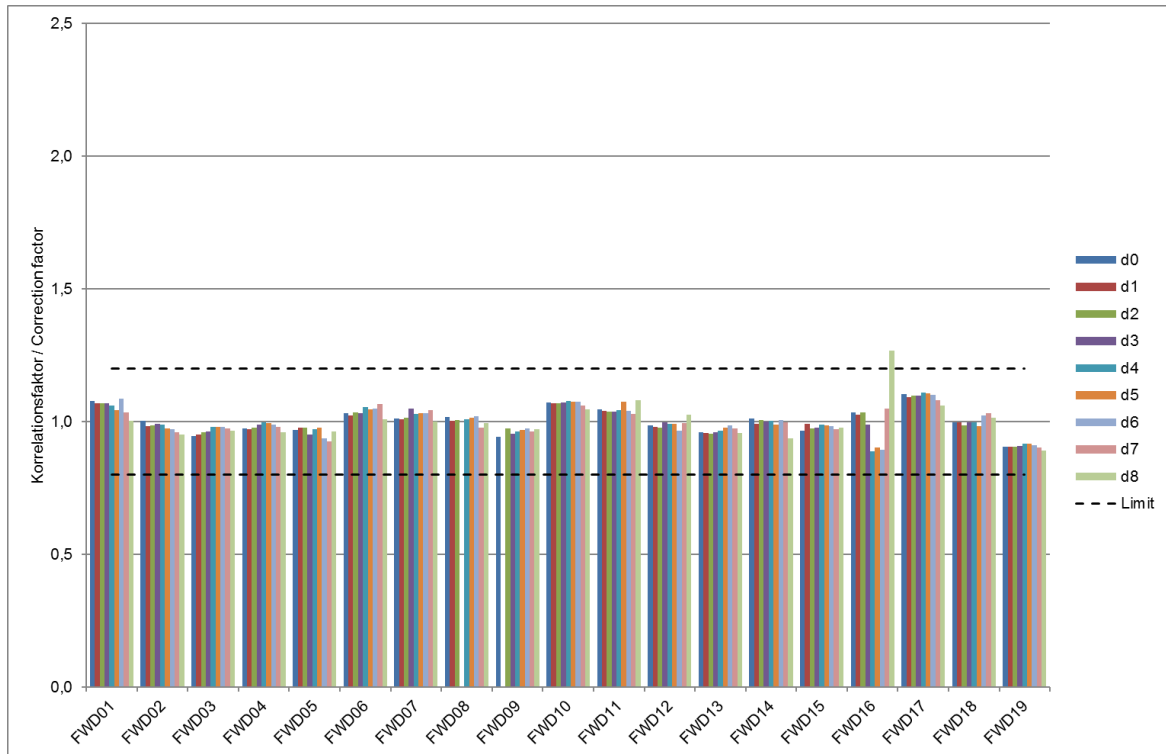


Abbildung 31: Korrekturfaktoren der Geophone

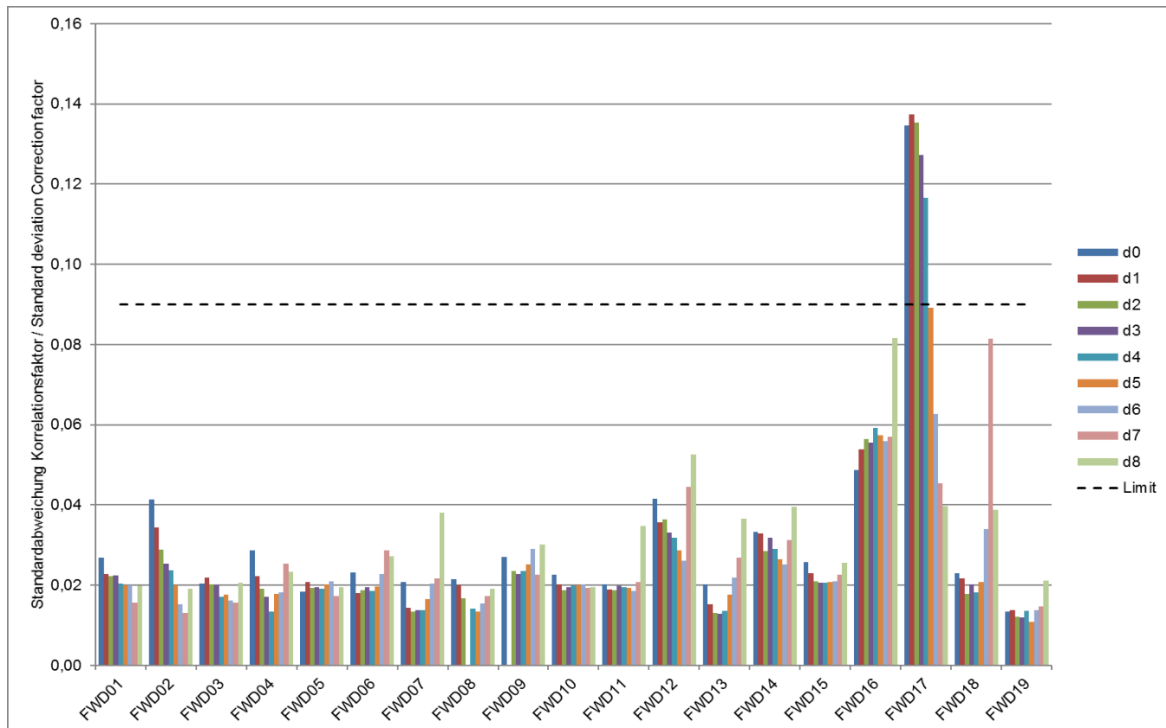


Abbildung 32: Standardabweichung der Korrekturfaktoren

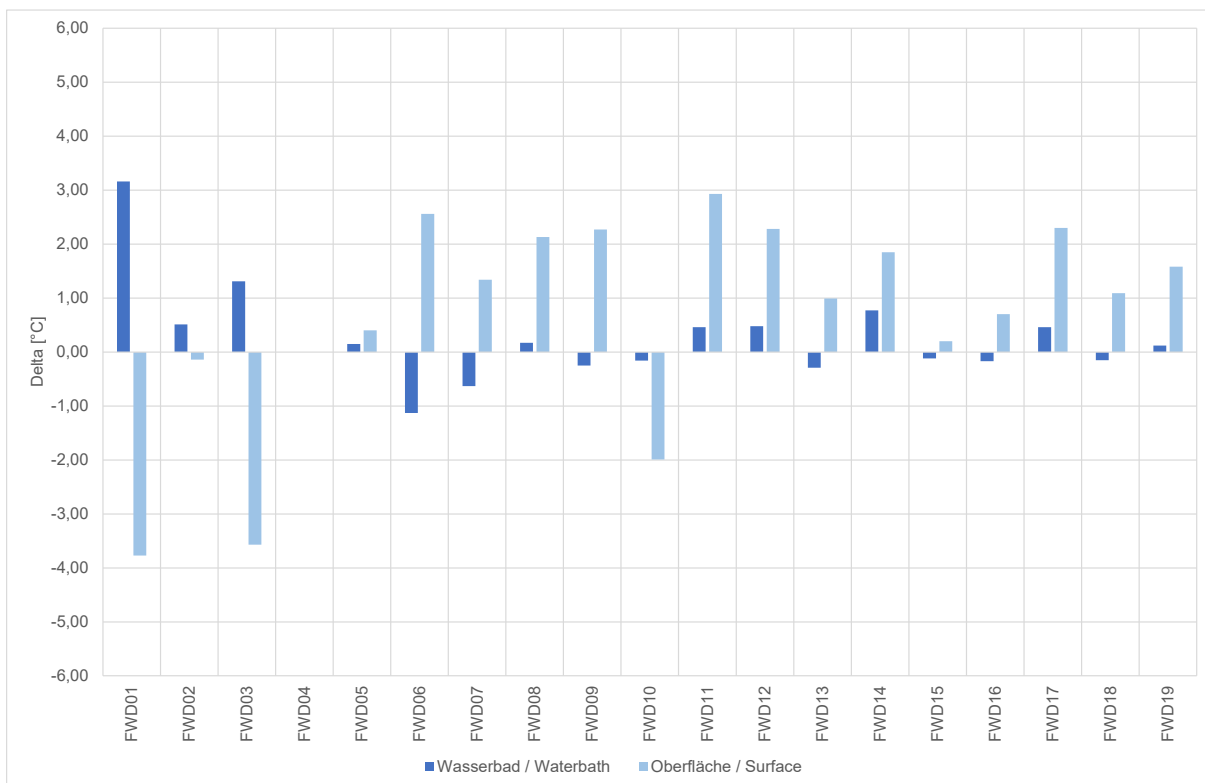
### 5.3 Auswertung der Lasteintragung

Die Impulsdauern, sofern in den Datensätzen angegeben, wurden stichprobenweise überprüft. Sie liegen in der Regel im Bereich von 25 bis 30 ms.

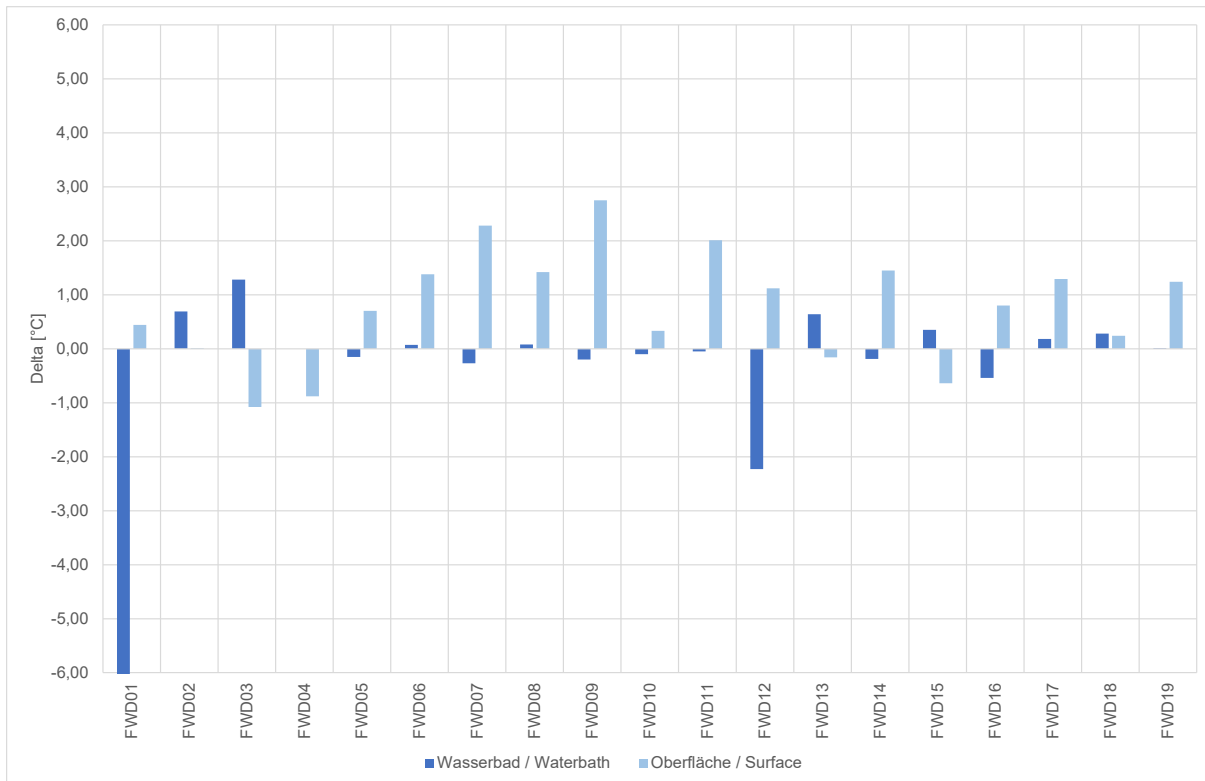
Die weitere Auswertung der Lasteintragung, d.h. Darstellung des Verlaufs der Lasteintragung und Berechnung des Energieeintrages als Integral über die Zeit, wurde bei den vorherigen Vergleichsmessungen mit relativ hohem Aufwand durchgeführt. Da die Ergebnisse im Sinne der Bestätigung der Vergleichbarkeit keinen, bzw. nur einen sehr geringen Beitrag geliefert haben, wurde hier darauf verzichtet. Die Rohdaten liegen allerdings vor und können bei Veranlassung ausgewertet werden.

### 5.4 Temperaturen

Die Ergebnisse der vergleichenden Messung der Temperaturen im Wasserbad (Messpunkt 1) und der Oberflächentemperatur (Messpunkt 2) sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 für die beiden Messreihen dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass die Temperaturmessungen im Wasserbad, die repräsentativ für die Messung der Asphalttemperatur stehen, in der Regel mit hinreichender Genauigkeit von deutlich unter +/- 1K gemessen werden. Bei der Messung der Oberflächentemperaturen sind Abweichungen im Bereich von rund +2 K und rund -1 K sowie deutliche Ausreißer zu beobachten. Im Nachgang wurde festgestellt, dass die großen Abweichungen beim FWD01 aufgrund eines technischen Defekts verursacht wurden.



**Abbildung 33: Vergleich der Temperaturmessung durch FWD im Wasserbad (Messfühler zur Asphaltkörpertemperaturmessung) und der Oberflächentemperatur im Vergleich zu den Messwerten rückgeführter Datenlogger, Messrunde 1**

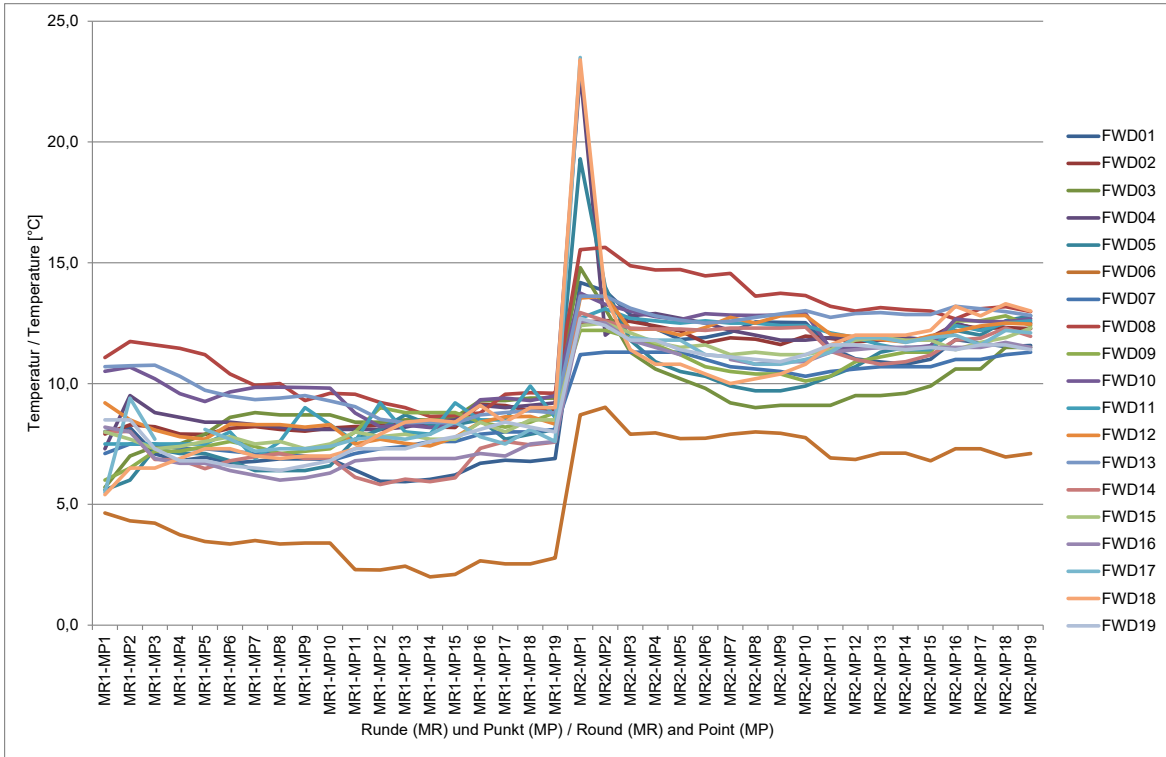


**Abbildung 34: Vergleich der Temperaturmessung durch FWD im Wasserbad (Messfühler zur Asphaltkörpertemperaturmessung) und der Oberflächentemperatur im Vergleich zu den Messwerten rückgeführter Datenlogger, Messrunde 2**

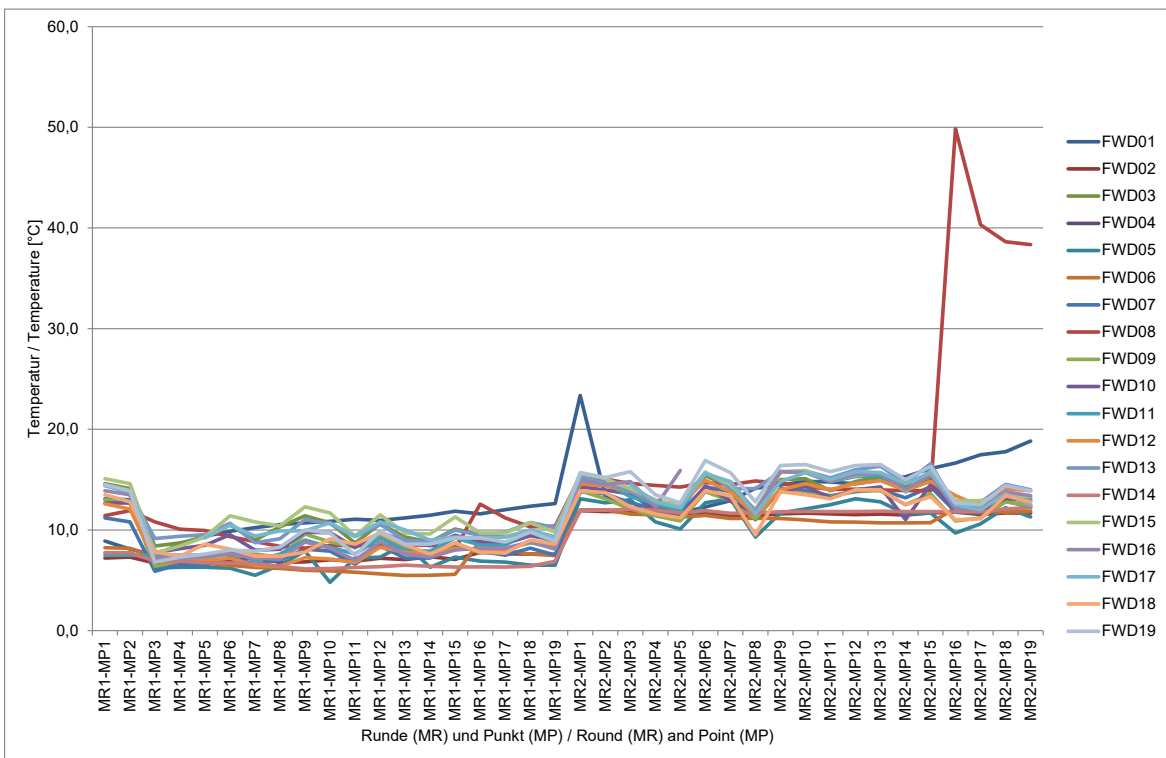
Die vergleichende Darstellung der durch die FWD gemessenen Luft- und Oberflächentemperaturen über alle Messpunkte finden sich in Abbildung 35 und Abbildung 36. Es ist zu erkennen, dass die Lufttemperaturen im Mittel circa 6 K voneinander abweichen. Das FWD06 weicht davon deutlich ab. Insgesamt sind die durch die FWD gemessenen Lufttemperaturen vergleichbar mit den an der BAST-Station gemessenen Temperaturen, vgl. Abbildung 2.

Die Oberflächentemperaturen weisen im Mittel circa 8 K Abweichungen zwischen den FWD auf. Es sind deutliche Ausreißer zu erkennen. Die gemessenen Oberflächentemperaturen der FWD01 und FWD08 weichen an einigen Messpunkten deutlich davon ab.





**Abbildung 35: Vergleichende Darstellung der gemessenen Lufttemperaturen**



**Abbildung 36: Vergleichende Darstellung der gemessenen Oberflächentemperaturen**

## 5.5 Genauigkeit des GPS

Die Mehrzahl der teilnehmenden FWD ist mit einer GPS-Antenne ausgestattet. Anforderungen hieran werden in Deutschland nicht gestellt. Zur Einschätzung der erzielbaren Genauigkeit wurden außerhalb des Versuchsprogramms die gemessenen GPS-Daten an Messpunkt 8, Messrunde 1, der sich auf freier Fläche befindet, der mit einer hochgenauen Antenne stationär eingemessenen Position verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Es ist hierbei zu beachten, dass keine Informationen darüber vorliegen, ob ein Korrektursignal verwendet worden ist, oder sonstige Konfigurationen erfolgt sind.

**Tabelle 4: Vergleich der GPS-Signale**

	<b>Abstand zur Referenz (Radius) [m]</b>
<b>FWD01</b>	4,6
<b>FWD03</b>	1,7
<b>FWD05</b>	2,0
<b>FWD06</b>	9,3
<b>FWD07</b>	2,8
<b>FWD09</b>	0,6
<b>FWD10</b>	4,3
<b>FWD11</b>	9,2
<b>FWD13</b>	1,7
<b>FWD15</b>	5,7
<b>FWD16</b>	0,5
<b>FWD17</b>	5,2
<b>FWD18</b>	3,1
<b>FWD19</b>	1,8

## 5.6 Zusammenfassende Bewertung

Alle FWD erzielen hinsichtlich der Tragfähigkeitsmessung innerhalb der gesetzten Grenzen reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse.

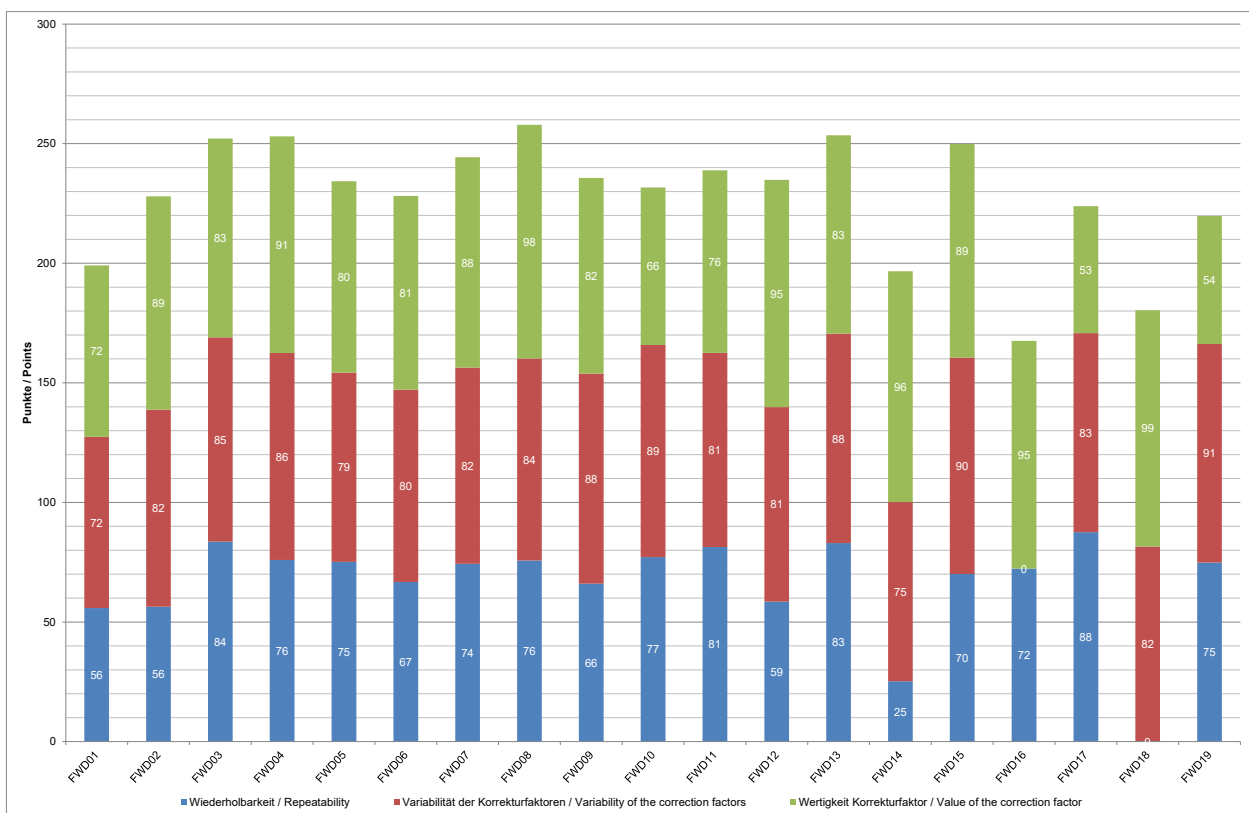
Im Falle der FWD01, 10, 16, 17 und 19 ist zu prüfen, ob Ursachen für die unter Ziffer 5.2 genannten teilweise systematischen Abweichungen von der Vergleichsmulde gefunden werden können. Am FWD09, 14, 15 und 18 sind die Ursachen für die Abweichungen bei der Wiederholbarkeitsprüfung durch wiederholte Eigenüberwachung zu verifizieren und zu beseitigen (vgl. Ziffer 5.1).

Der Vergleich der Lufttemperaturen sowie der Einrichtungen zur Messung der Asphalttemperatur ist zufriedenstellend. Die Ergebnisse des Vergleiches der Oberflächentemperaturen sind weiterhin nicht zufriedenstellend, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Oberflächentemperatur üblicherweise zur Abschätzung der Asphaltkörpertemperatur verwendet wird.

Um ein Ranking der FWD zu erhalten wird ein Punktesystem angewendet. Hierzu werden die drei in Tabelle 5 aufgelisteten Kriterien angewendet. Insgesamt sind pro Kriterium 100 Punkte zu erreichen. Zwischenwerte werden je Kriterium interpoliert. Das Berechnungsergebnis ist in Abbildung 37 dargestellt.

**Tabelle 5: Bewertungsschema**

Kriterium	Wertung	Anforderung
Wiederholbarkeit	100	Die über alle Messrunden und Messpunkte gemittelte relative Wiederholbarkeit ist gleich 0 (per Definition: je kleiner, desto besser).
	0	Die über alle Messrunden und Messpunkte gemittelte relative Wiederholbarkeit ist größer oder gleich 1,0.
Variabilität der Korrekturfaktoren für die Geophone	100	Die Standardabweichung über alle Korrekturfaktoren ist gleich 0.
	0	Die Standardabweichung über alle Korrekturfaktoren ist größer oder gleich 0,09.
Wertigkeit des Korrekturfaktors pro FWD	100	Der FWD Korrekturfaktor ist gleich 1,0.
	0	Die absolute Differenz zum FWD Korrekturfaktor ist größer oder gleich 0,2.



**Abbildung 37: Vergleichende Bewertung der FWD**

# 6 Fazit

Die Organisation der durchgeführten Vergleichsuntersuchungen wurde von allen Teilnehmern positiv aufgenommen. Das Interesse an der Durchführung solcher Messungen ist gegeben. Der damit verbundene Aufwand wurde von den teilnehmenden Betreibern als gerechtfertigt beurteilt. Dieses Meinungsbild deckt sich mit dem der Vorjahre.

Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass die verschiedenen FWD vergleichbare und auch reproduzierbare Ergebnisse erzeugen. Da sowohl FWD unterschiedlicher Hersteller, Aufbauformen und vor allem unterschiedlichen Alters teilgenommen haben, ist dies besonders positiv hervor zu heben.

Im Detail sind Auffälligkeiten erkannt worden, die mit den Betreibern noch zu diskutieren sind. Hierunter zählt auch die präzise Erfassung der wichtigen Temperaturbedingungen aber auch die Kontrolle einzelner Geofone.

Die Vergleichsuntersuchungen finden jährlich im Frühjahr statt. Die Vergleichsmessungen im Jahr 2024 sind für den 14. März geplant.

# Literatur

[1] FGSV Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B2.1 „Falling-Weight-Deflectometer (FWD): Beschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen“, FGSV-Verlag, Köln, 2008

[2] Jansen, D.; Čičković, M.: „Qualitätssicherung von FWD-Tragfähigkeitsmessungen“, in: Straße und Autobahn, Heft 8/2017, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2017

[3] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, COST 336 „Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation“, Final Report, European Commission, 2005

[4] Van Gurp, C.: „FWD Correlation Trial 2013“, CROW-report D13-05, Ede, 2013