

Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen

Dirk Jansen

**Heft 2
Essen 2009**



Schriftenreihe

Dirk Jansen

**Temperaturkorrektur von mit dem
Falling-Weight-Deflectometer
gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen**

2009

Vorwort

Das Straßennetz in Deutschland ist nahezu vollständig, so dass der Erhaltung des Straßennetzes eine große Bedeutung zukommt. Zur Planung von Erhaltungsmaßnahmen müssen Zustandsmerkmale auf der Fahrbahnoberfläche wie z.B. Spurrinnen, Längsunebenheiten, Risse erfasst werden. Es handelt sich hierbei um Oberflächenmerkmale, mit denen keine vollständige Bewertung der Substanz einer Straßenbefestigung möglich ist. Tragfähigkeitsmessungen ermöglichen in Verbindung mit den Zustandsmerkmalen eine zerstörungsfreie Beurteilung der Substanz. Ein weltweit eingesetztes Messgerät zur Beurteilung der Tragfähigkeit ist das Falling-Weight-Deflectometer (FWD). Aus FWD-Messungen werden Deflexionsmulden abgeleitet.

Zur vergleichenden Bewertung von Tragfähigkeitsmessergebnissen müssen die Messwerte (Deflexionen) unabhängig von äußeren Einflüssen sein. Die Asphaltkörpertemperatur besitzt bei FWD-Messungen auf Asphaltbefestigungen einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Deflexionsmulde. Eine vergleichende Bewertung ist nur dann möglich, wenn die Deflexionen auf eine Standardtemperatur korrigiert werden.

Zur Schaffung einer Datenbasis zur quantitativen und qualitativen Erfassung des Temperatureinflusses auf die Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen wurden Temperaturmessstationen (TMS) in zwei vorhandene Straßenbefestigungen eingebaut und meteorologische Daten sowie Strahlungsdaten einbezogen. An 20 Streckenabschnitten in Asphaltbauweise unterschiedlicher Bauklassen wurden Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen entwickelt.

Die Arbeit basiert auf einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhaben (Nummer STR 877/2-1).

Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen

Vom Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften, der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dirk Jansen

aus Neuss

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

Koreferent: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Wistuba

Tag der Einreichung: 16. Januar 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juni 2009

Essen 2009

	Seite
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 TRAGFÄHIGKEIT VON ASPHALTBEFESTIGUNGEN	3
3 EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE TRAGFÄHIGKEIT VON ASPHALTBEFESTIGUNGEN	10
3.1 Schichttemperatur	10
3.1.1 Asphaltsschichten	10
3.1.2 Schichten ohne Bindemittel und Untergrund/Unterbau	11
3.2 Belastungsfrequenz	12
3.3 Wassergehalt.....	13
3.4 Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum	13
3.5 Fazit.....	16
4 UNTERSUCHUNGEN ZUM TEMPERATUREINFLUSS AUF DIE TRAGFÄHIGKEIT VON ASPHALTBEFESTIGUNGEN	19
4.1 Auswahl von Streckenabschnitten	20
4.2 Bohrkernentnahmen und Untersuchungsumfang	22
4.3 Temperaturmessstationen.....	23
4.3.1 Messaufbau und Einbau der Temperaturmessstationen	27
4.3.2 Datenaufzeichnung	29
4.4 Meteorologische Daten und Strahlungsdaten	29
4.5 FWD Messungen	30
4.5.1 FWD Messungen im Bereich der Temperaturmessstationen	31
4.5.2 FWD Messungen auf 20 Streckenabschnitten.....	32
4.6 Bohrlochtemperaturmessungen	35
5 ERGEBNISSE UND DARAUS RESULTIERENDE SENSITIVITÄTSUNTERSUCHUNGEN	37
5.1 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen	37
5.1.1 Bestimmung der Asphaltarten.....	37
5.1.2 Schichtdickenschwankungen und Verifizierung der NWSIB Aufbaudaten	38
5.1.3 Asphalt E-Modul Berechnungen	42
5.2 Ergebnisse der Temperaturmessungen	44
5.2.1 Meteorologische Beurteilung.....	45
5.2.2 Temperaturmessspektrum und Häufigkeitsverteilung	48
5.2.3 Temperaturgradienten, Ganglinien und Phasenverschiebung	49
5.3 Ergebnisse der FWD Messungen.....	58
5.3.1 Punktmessungen	58

5.3.2	Streckenmessungen	61
5.4	Ergebnisse der Bohrlochtemperaturmessungen	63
5.4.1	Alternativen zu Bohrlochtemperaturmessungen	64
5.4.2	Ergebnisse einer Umfrage unter FWD Betreibern	65
5.4.3	Ergebnisse der Bohrlochtemperaturmessungen.....	66
6	AUSWERTUNG UND BEWERTUNG HINSICHTLICH TEMPERATURKORREKTUR	70
6.1	Messtiefe zur Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur	70
6.1.1	Korrelationsanalyse.....	71
6.1.2	Grafische Auswertung.....	73
6.1.3	Sensitivitätsanalyse.....	75
6.1.4	Fazit.....	77
6.2	Zusammenhang von Deflexion und Lastgröße in Abhängigkeit von der Asphaltkörpertemperatur.....	77
6.3	Geofonpositionen für die Temperaturkorrektur	78
6.3.1	Korrelationsanalyse.....	79
6.3.2	Grafische Auswertung.....	80
6.3.3	Fazit.....	81
7	TEMPERATURKORREKTUR	82
7.1	Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes.....	85
7.1.1	Bezugsdeflexionen.....	87
7.1.2	Berechnung von Korrekturfaktoren	88
7.1.3	Auswertung der Korrekturfaktoren	88
7.1.4	Fehlertoleranzen bei der Herleitung der Temperaturkorrekturfunktion.....	94
7.1.5	Temperaturkorrekturfunktion.....	96
7.2	Verifizierung des Temperaturkorrekturansatzes	99
7.2.1	Sensitivitätsuntersuchung	99
7.2.2	Auswertung der Messdaten	100
7.3	Anwendungsbeispiel.....	103
8	ZUSAMMENFASSUNG	104
9	QUELLENVERZEICHNIS	110
ANLAGEN		

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 2-1: Reaktion einer Straßenbefestigung auf eine Belastung [49]	3
Abbildung 2-2: FWD Messprinzip gemäß [3].....	5
Abbildung 2-3: Darstellung der FWD Messwerte als Deflexionsmulde	8
Abbildung 2-4: Deflexionsprofile der Deflexion im Lastzentrum und Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt (oben), zugehörige Darstellung der kumulativen Summe für die Deflexion im Lastzentrum (unten)	9
Abbildung 3-1: E-Modul-Verlauf eines Modellasphaltes in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Belastungsfrequenzen [10]	11
Abbildung 3-2: Charakteristische Jahresganglinie der E-Moduln des Untergrundes und von unteren Tragschichten aus Lavaschlacke nach [52].....	12
Abbildung 3-3: Deflexionsmulden bei Variation des Asphalt E-Moduls	15
Abbildung 3-4: Deflexionsmulden bei Variation der ToB Dicke	16
Abbildung 3-5: Deflexionsmulden bei Variation des Untergrund E-Moduls	16
Abbildung 3-6: FWD Deflexionsmulden bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen an demselben Messpunkt	18
Abbildung 4-1: Lageplan Temperaturmessstation B 515, Menden.....	25
Abbildung 4-2: Lageplan Temperaturmessstation L 574, Heek.....	25
Abbildung 4-3: Querschnittsskizze Temperaturmessstation B 515, Menden, Blickrichtung Nordwest.....	26
Abbildung 4-4: Querschnittsskizze Temperaturmessstation L 574, Heek, Blickrichtung Nord	26
Abbildung 4-5: Schematischer Messaufbau und Lage der Temperaturmessstation	28
Abbildung 4-6: Aufbau eines Temperatursensors	28
Abbildung 4-7: Aufbau der Datendatei	29
Abbildung 4-8: Lage der FWD Messpunkte an den TMS (unmaßstäblich)	32
Abbildung 5-1: E-Modulverläufe einzelner Asphaltsschichten - Strecke III-2	43
Abbildung 5-2: E-Modulverläufe der untersuchten Streckenabschnitte.....	44
Abbildung 5-3: Vergleich meteorologischer Kenndaten aus 2007/08 zur Referenzperiode.....	47
Abbildung 5-4: Häufigkeitsverteilung der in Heek gemessenen Asphaltkörpertemperaturen (30. März 2007 – 27. März 2008).....	49
Abbildung 5-5: Positiver (links) und negativer (rechts) Temperaturgradient (idealisiert).....	50
Abbildung 5-6: Temperaturgradienten an einem Sommertag, TMS Heek.....	50
Abbildung 5-7: Grundtypen Tagesganglinien der Oberflächentemperatur	52
Abbildung 5-8: Tagesganglinien - 32. KW 2007 - Heek	53
Abbildung 5-9: Temperaturganglinien in verschiedenen Tiefen nach Regenschauer, Heek, 14.06.2007.....	54
Abbildung 5-10: Vergleich der Tagesganglinien einer Schönwetterperiode	56
Abbildung 5-11: Auswertung gleicher Temperaturgradienten	57
Abbildung 5-12: Deflexionsmulden Menden, Bauklasse I	59
Abbildung 5-13: Deflexionsmulden Heek, Bauklasse III.....	60
Abbildung 5-14: Deflexionsmulden verschiedener Bauklassen.....	62
Abbildung 5-15: Spannweiten der Deflexionen am letzten Geofon	63
Abbildung 5-16: Bei gleichen Randdaten (vgl. BELLS3) gemessene Temperaturgradienten.....	65
Abbildung 6-1: Deflexionsmulden mit zugehörigen Temperaturgradienten, Messpunkt 1 Heek	74

Abbildung 6-2:	Einfluss des temperaturabhängigen Asphalt E-Moduls auf die Deflexion im Lastzentrum.....	75
Abbildung 6-3:	Mögliche Spannweiten von Temperaturgradienten bei fixer Temperatur in 5 cm Tiefe	76
Abbildung 6-4:	Deflexionen im Lastzentrum bei einer Last von 50 kN und 90 kN .	78
Abbildung 6-5:	Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulde – Heek, Station 1	80
Abbildung 6-6:	Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulde – Menden, Station 1	81
Abbildung 7-1:	Schematische Darstellung der Auswertung von FWD Messungen	83
Abbildung 7-2:	Auswertung der Temperaturkorrektur nach SCHULTE – Deflexionsmulde.....	84
Abbildung 7-3:	Auswertung der Temperaturkorrektur nach SCHULTE – Deflexion im Lastzentrum.....	85
Abbildung 7-4:	Bestimmung der Bezugsdeflexion (Beispiel).....	88
Abbildung 7-5:	Korrekturfaktoren Heek und Menden, Deflexion im Lastzentrum..	90
Abbildung 7-6:	Variationskoeffizienten der Korrekturfaktoren für das Lastzentrum aller 20 Streckenabschnitte gruppiert nach Asphaltkörpertemperaturen.....	90
Abbildung 7-7:	Variationskoeffizienten der Korrekturfaktoren für das Lastzentrum aller 20 Streckenabschnitte gruppiert nach Bauklassen.....	91
Abbildung 7-8:	Regression (linear/polynomisch (4.Grades)) Korrekturfaktoren der Station Heek.....	94
Abbildung 7-9:	Messpunktabhängige Korrekturfaktoren Station Heek mit einhüllenden Linien zur Fehlertoleranzabschätzung, Beispiel.....	95
Abbildung 7-10:	Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes – Heek, Messpunkt 4, Lastzentrum	98
Abbildung 7-11:	Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes – Heek, Messpunkt 4, 600 mm vom Lastzentrum entfernt.....	98
Abbildung 7-12:	Untersuchung zur Sensitivität des Temperaturkorrekturansatzes (oben: kleine Deflexionen, unten: große Deflexionen)	100
Abbildung 7-13:	Häufigkeitsverteilung der relativen Fehler (aus 1.719 Deflexionsmulden)	102
Foto 2-1:	FWD, Typ Dynatest 8000	4
Foto 4-1:	Aufbau der mobilen Temperaturmessstation.....	35

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 3-1: Eingabedaten für die Mehrschichtenrechnung	14
Tabelle 4-1: Ergebnis der Untersuchungsstreckenauswahl	22
Tabelle 4-2: Lage, Straßenaufbau und Sensorpositionen der Temperaturmessstationen.....	24
Tabelle 4-3: Lage der Wetterstationen	30
Tabelle 5-1: Asphaltarten der Untersuchungsstrecken	38
Tabelle 5-2: Mittlere Schichtdicken, Variationskoeffizienten (VarK) und Sollschichtdicken.....	40
Tabelle 5-3: Ergebnisse der Mehrschichtenrechnung	41
Tabelle 5-4: Höchst- und Tiefstwerte (April 2007 – April 2008).....	48
Tabelle 5-5: Temperatur nach 15 Minuten Wartezeit mit und ohne Kontaktflüssigkeit	67
Tabelle 5-6: Wartezeiten (Abkühlzeiten) bis zum Erreichen der Referenztemperatur	69
Tabelle 6-1: Bestimmtheitsmaße der Temperaturmesstiefe zur Deflexion im Lastzentrum	72
Tabelle 6-2: Bestimmtheitsmaße der Geofonpositionen zur Asphaltkörpertemperatur.....	79
Tabelle 7-1: Mittlere Korrekturfaktoren der Streckenmessungen in verschiedenen Deflexionsbereichen bei Asphaltkörpertemperaturen unter 10 °C	92
Tabelle 7-2: Anpassungsgüte Regressionsberechnung der Temperaturkorrekturfaktoren.....	93
Tabelle 7-3: Gewählte Fehlertoleranzen für die Herleitung der Temperaturkorrekturfunktionen	95
Tabelle 7-4: Relative Abweichungen bei Korrektur mit neuem Ansatz.....	103

Abkürzungsverzeichnis

DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DWD	Deutscher Wetterdienst
FWD	Falling-Weight-Deflectometer
NWSIB	Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
TMS	Dauertemperaturmessstation
ToB	Tragschicht ohne Bindemittel
UTC	Universal Time Coordinated
WMO	World Meteorological Organization
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung

1 Einleitung und Problemstellung

Das Straßennetz in Deutschland besteht aus circa 627.000 km, davon 12.000 km Autobahnen, 42.000 km Bundesstraßen, 87.000 km Landesstraßen, 91.000 Kreisstraßen und 395.000 km Gemeindestraßen und ist nahezu vollständig ausgebaut. Der Erhaltung dieser Straßen, die einen Anlagewert von rund 250 Mrd. Euro für den Bund, die Länder und die Gemeinden darstellen, kommt somit eine stetig wachsende Bedeutung zu [33] [34].

Für die wirtschaftlich optimierte, technisch angepasste und bedarfsgerechte Planung von Erhaltungsmaßnahmen sind Kenntnisse des Zustandes der bestehenden Straßenbefestigung nötig. Für die Erhaltungsplanung eines gesamten Straßennetzes einer Klassifikation, beispielsweise des Bundesfernstraßennetzes, wird seit einigen Jahren eine Systematik, die sogenannte Zustandserfassung und -bewertung (ZEB), angewendet. Dabei werden Oberflächenmerkmale wie beispielsweise die Griffigkeit und die Unebenheiten messtechnisch mit schnellfahrenden Messsystemen erfasst, ausgewertet und bewertet.

Auf dem Niveau der Projektebene kann die Erhaltungsplanung mit Ergebnissen von Tragfähigkeitsmessungen ergänzt werden. Tragfähigkeitsmessungen erlauben es, Aussagen über den Zustand des Untergrundes bzw. Unterbaues und des Oberbaues zum Zeitpunkt der Messung zu treffen. Die Messungen erfolgen dabei zerstörungsfrei an der Oberfläche der Straßenbefestigung. Ein seit den 1960er Jahren weltweit angewendetes Verfahren für Tragfähigkeitsmessungen sind Deflexionsmessungen bei definierten Lastimpulsen mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD). FWD Messungen können sowohl auf allen gebundenen wie auch ungebundenen Befestigungsarten durchgeführt werden.

Für eine vergleichbare Darstellung und Bewertung der Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD müssen die Messwerte unabhängig von Einflüssen sein, die nicht im direkten Zusammenhang mit der Tragfähigkeit an dem jeweiligen Messpunkt stehen. Die Asphaltkörpertemperatur hat bei FWD Messungen auf Asphaltbefestigungen einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Deflexionsmulde. Zur Berücksichtigung der Asphaltkörpertemperatur, also für die Temperatur-

korrektur der mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulde, existiert in Deutschland derzeit kein wissenschaftlich begründeter Ansatz. Ersatzweise wird ein Ansatz verwendet, der für Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken entwickelt und adaptiert wurde. Da das Messprinzip des Benkelman-Balkens im Gegensatz zum FWD ein statisches Verfahren ist, ist die Anwendung dieses Ansatzes auf die Deflexion jedoch in Frage zu stellen.

International existieren einige Ansätze zur Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden. Hauptsächlich wurden diese Ansätze an und für Straßenbefestigungen in den USA entwickelt. Problematisch hierbei für die Anwendung in Deutschland ist, dass sowohl davon auszugehen ist, dass in Deutschland, bedingt durch die geographische Lage, nicht zwingend gleiche klimatische Verhältnisse herrschen und die Asphaltstärken i.A. in den USA dünner dimensioniert sind als in Deutschland. Eine geeignete Datenbasis zur Überprüfung, inwiefern diese Gegebenheiten einen Einfluss auf die Übertragbarkeit von Korrekturfunktionen haben, existiert in Deutschland bislang nicht.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden zu entwickeln, der für die klimatischen Verhältnisse und die anzutreffenden Asphaltstärken in Deutschland geeignet ist.

2 Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen

Die Tragfähigkeit einer Asphaltbefestigung wird als Widerstand derselben gegen eine kurzzeitige Verformung der Oberfläche definiert [2]. Die kurzzeitige Verformung der Oberfläche beschränkt sich dabei auf eine vertikale Verformung, im Folgenden als Deflexion bezeichnet, und wird durch eine ebenso kurzzeitige Impulsbelastung erzeugt. Diese Impulsbelastung wird durch den rollenden Straßenverkehr verursacht, wobei die Belastungsdauer je nach Fahrzeuggeschwindigkeit im Millisekundenbereich liegt. Als Kennwert für die Tragfähigkeit ist die dynamische Steifigkeit $S = P_0/w_0$ definiert [10], vgl. Abbildung 2-1.

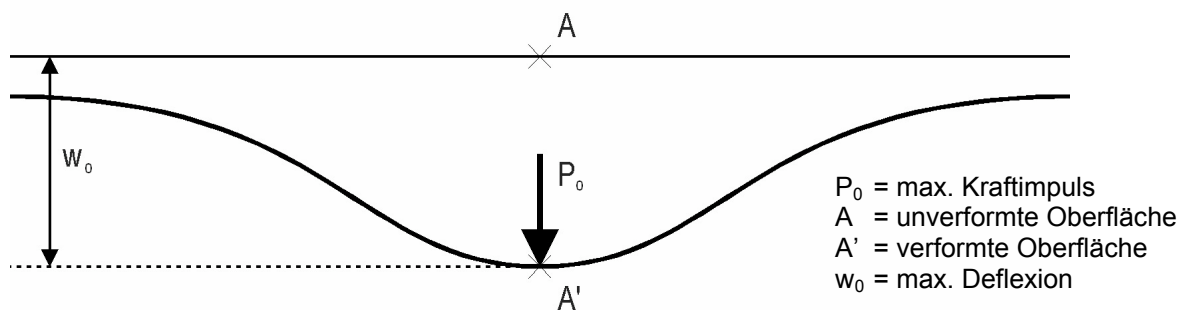


Abbildung 2-1: Reaktion einer Straßenbefestigung auf eine Belastung [49]

Zur Herstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung werden Anforderungen hinsichtlich Art und Ausführung (Baustoffe, Dicke, Verdichtungsgrad, etc.) der einzelnen Schichten des Straßenoberbaues bzw. Anforderungen an den Untergrund bzw. Unterbau gestellt.

Tragfähigkeitsmessungen finden derzeit vor allem bei der Erhaltungsplanung Anwendung, da bei dem Neubau des Straßenoberbaues gemäß den RStO [41] nicht mit Tragfähigkeitsproblemen zu rechnen ist. Mit zunehmender Anwendung der so genannten freien Dimensionierung für den Neubau von Straßenbefestigungen, bei der die Schichtdicken des Straßenoberbaues individuell berechnet werden, gewinnen Tragfähigkeitsmessungen für die Abnahme von Bauleistungen und für die Dimensionierung von Erneuerungsschichtdicken im Hocheinbau an Bedeutung.

Für eine optimale Erhaltungsplanung, insbesondere bei Erneuerungsmaßnahmen, nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien ist die Berücksichtigung der Ergebnisse aus Tragfähigkeitsmessungen von wichtiger Bedeutung. Die Bestimmung der

Tragfähigkeit dient dabei gemäß den RStO [41] der Ermittlung von visuell nicht erkennbaren Schwachstellen und der Festlegung von Erhaltungsabschnitten gleicher Tragfähigkeit. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen können zudem für die Ermittlung der erforderlichen Schichtdicken bei der Erneuerung im Hocheinbau verwendet werden.

Ein weltweit angewendetes Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen anhand von Deflexionen ist das Falling-Weight-Deflectometer (FWD, dt. Fallgewichtsdeflektometer). Das Messprinzip FWD wurde in den 1960er Jahren in Frankreich und Dänemark entwickelt [22] und wurde in Deutschland 1996 mit dem Forschungsvorhaben „Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland“ [10] eingeführt.

Am Fachgebiet Straßenbau, Flugplatzbau und Eisenbahnoberbau der Universität Duisburg-Essen wird seit 1996 ein FWD der Firma Dynatest vom Typ 8000 eingesetzt, vgl. Foto 2-1.

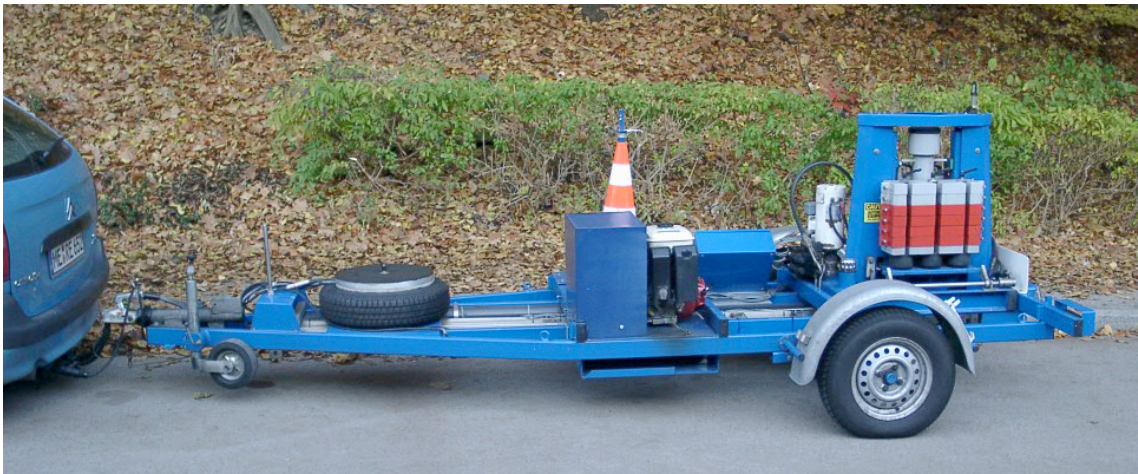


Foto 2-1: FWD, Typ Dynatest 8000

Beim FWD, vgl. Abbildung 2-2, wird über eine Lastplatte ein Kraftimpuls auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht. Der Kraftimpuls wird durch eine Fallmasse erzeugt, die aus frei wählbarer Höhe auf Gummipuffer (Feder-Dämpfer-System) herabfällt. Mit einer Kraftmessdose wird der zeitliche Verlauf des Kraftimpulses erfasst. Der von dem FWD erzeugte Kraftimpuls dient zur Simulation einer Radüberrollung und sollte aus diesem Grund eine Impulsdauer aufweisen, wie sie durch die Radüberrollung mit einem Fahrzeug entsteht (Impulsdauer zwischen 20 ms und 30 ms). Die Größe des

Kraftimpulses sollte etwa der Radlast eines Lastkraftwagens entsprechen. Die kurzzeitige vertikale Verformung der Fahrbahnoberfläche (Deflexionsmulde) als Reaktion auf den Kraftimpuls wird von Geofonen aufgenommen. Geofone bestehen aus einem Permanentmagneten und einer Spule. Durch die Relativbewegung zwischen Spule und Magnet, hier die Bewegung der Fahrbahnoberfläche, wird durch Induktion eine Spannung erzeugt, die Abhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung ist. Durch Ableitung der so ermittelten Deflexionsgeschwindigkeit über die Zeit, wird die Deflexion bestimmt. Ein Geofon befindet sich im Lastzentrum, die anderen acht sind in bestimmten Abständen vom Lastzentrum entfernt angeordnet (Geofonabstände: 0 – 200 – 300 – 450 – 600 – 900 – 1.200 – 1.500 – 1.800 [mm]). Zur gleichmäßigen Einleitung des Kraftimpulses und zur besseren Anpassung an die Straßenoberfläche ist die Lastplatte segmentiert und besitzt eine ca. 5 mm dicke Gummiplatte an ihrer Unterseite. Der Durchmesser der Lastplatte beträgt 300 mm.

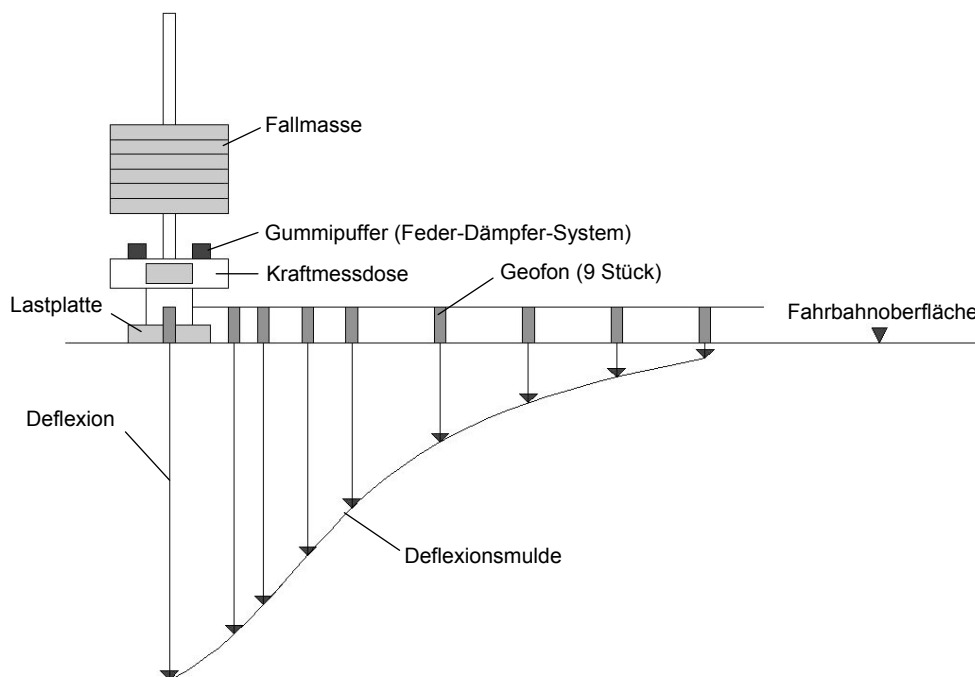


Abbildung 2-2: FWD Messprinzip gemäß [3]

Für Tragfähigkeitsmessungen auf Asphaltstraßen erfolgen in Deutschland die Messungen in der Regel gemäß dem FGSV Arbeitspapier Tragfähigkeit [3] mit einer Last von 50 kN. Es werden mindestens zwei Lastschläge pro Messpunkt, in der Regel aber drei Lastschläge eingeleitet. Der Messpunktabstand sollte 25 m betragen, kann

aber je nach Aufgabenstellung und Kenntnis der örtlichen Verhältnisse vergrößert oder verkleinert werden.

Eine Messequenz besteht aus dem Herablassen der Lastplatte mitsamt des Geofonbalkens, einem Setzungsschlag zur Anpassung der Lastplatte auf der Straßenoberfläche und den Lastschlägen. Anschließend wird die Lastplatte mitsamt Geofonbalken wieder angehoben. Die eigentliche Messung und der gesamte Sequenzablauf werden durch den Fahrer aus dem Zugfahrzeug am PC gestartet und gesteuert. Eine typische Messequenz dauert circa eine Minute, die Messleistung liegt bei circa 50 Messpunkten pro Stunde. Die Messungen erfolgen nach [3] in der Regel in der rechten Rollspur eines Fahrstreifens. Während der FWD Messungen ist von dem Messtechniker ein Feldbuch zu führen, in dem Wetter, Oberflächenmerkmale und sonstige Unregelmäßigkeiten bzw. Besonderheiten festgehalten werden.

Wie in dieser Arbeit noch gezeigt wird, hat die aktuelle Asphaltkörpertemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses muss die Asphaltkörpertemperatur gemessen werden. Dies erfolgt in der Regel in Bohrlöchern mit einer bestimmten Tiefe. Da die Messung der Asphaltkörpertemperatur mit einem relativ hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist, wird sie nicht an jedem Messpunkt durchgeführt, sondern nur an repräsentativ ausgewählten Messpunkten. Die Messungen der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur können dagegen ohne zeitlichen Aufwand an jedem Messpunkt erfolgen, sie geben jedoch nur vage Hinweise auf die Asphaltkörpertemperatur und sind daher nur als Ergänzung zu den gemessenen Asphaltkörpertemperaturen anzusehen. Die Messung der Lufttemperatur erfolgt durch einen am FWD angebrachten Temperaturfühler, die Messung der Oberflächentemperatur erfolgt durch ein Infrarotthermometer.

Während einer Messequenz wird durch das FWD Steuersystem laufend überprüft, ob die gemessenen Deflexionen und die aufgebrachten Lasten sich innerhalb der im Arbeitspapier Tragfähigkeit [3] festgelegten Toleranzbereiche befinden. Systembedingt kommt es zu geringen Abweichungen bei der Größe des aufgebrachten Lastimpulses an einem Messpunkt. Zur vergleichenden Auswertung wird daher für jeden Messpunkt eine Lastkorrektur der Deflexionen auf die gewünschte Ziellast vorge-

nommen. Da die Abweichungen von der Ziellast nur gering sind, ist die Lastkorrektur durch lineare Interpolation zulässig.

Um Messwerte untereinander vergleichen zu können, müssen diese bei den gleichen Standardbedingungen gemessen worden sein oder den gleichen Standardbedingungen angepasst werden. Standardbedingungen, die im Falle von FWD Messungen immer gleich sind, sind beispielsweise die Lastgröße, die Impulsdauer und die Geofonpositionen. Die Standardbedingung, die während der Messung in der Regel nicht vorliegt und daher erst durch Korrektur der Deflexionen hergestellt wird, ist die Standardoberbautemperatur. Sie ist regional verschieden. In Skandinavien liegt die Standardoberbautemperatur beispielsweise bei 15 °C, in tropischen Zonen zwischen 30 und 35 °C [11]. Die Standardoberbautemperatur für Deutschland wird im Arbeitspapier für Tragfähigkeitsmessungen mit dem Benkelman-Balken [4] mit 20 °C angegeben und kann für FWD Messungen übernommen werden.

Für die Auswertung der FWD Messungen empfiehlt das Arbeitspapier Tragfähigkeit [5] die grafische Darstellung der last- und temperaturkorrigierten Deflexionen als Deflexionsmulden für jeden Messpunkt, vgl. Abbildung 2-3, und als Deflexionsprofile entlang der Messlinie, vgl. Abbildung 2-4. Anhand des Deflexionsprofils können homogene Teilabschnitte für die Erhaltungsplanung und die Abnahme von Neubauten abgeleitet werden. Die Bildung von homogenen Teilabschnitten kann zudem unterstützt werden durch die Profildarstellung der aus den Deflexionen berechneten kumulativen Summen, vgl. Abbildung 2-4.

Derzeit existiert in Deutschland kein Bewertungshintergrund für FWD Messungen. Der aktuelle Stand der Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes kann dem Arbeitspapier Tragfähigkeit [5] entnommen werden.

International existieren Ansätze zur qualitativen und quantitativen Auswertung von FWD Messungen. Sie sind teilweise nur schwer für die hiesige Bewertung von FWD Messungen zu übertragen, da sie an meist viel dünneren Asphaltoberbauten hergeleitet wurden, als sie in Deutschland üblich sind. Es können folgende Vorgehen bei der Bewertung unterschieden werden:

- Rückrechnung und Bewertung von Schicht E-Moduln aus den Werten der Deflexionsmulde
- Vergleich der gemessenen Deflexionsmulde mit Referenzdeflexionsmulden
- Berechnung von Hilfswerten aus den Deflexionen, z.B. des AREA Parameters
- weitere Ansätze, die beispielsweise die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Deflexionsmulde auswerten und bewerten

Für hiesige Verhältnisse zutreffende qualitative Aussagen über die Tragfähigkeit lassen sich dennoch beispielsweise mit dem Ansatz von JENDIA [28] herleiten.

Unabhängig von diesem Ansatz können quantitative Aussagen über die Untergrundtragfähigkeit beispielsweise anhand der Deflexion am letzten Geofon, 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt, getroffen werden.

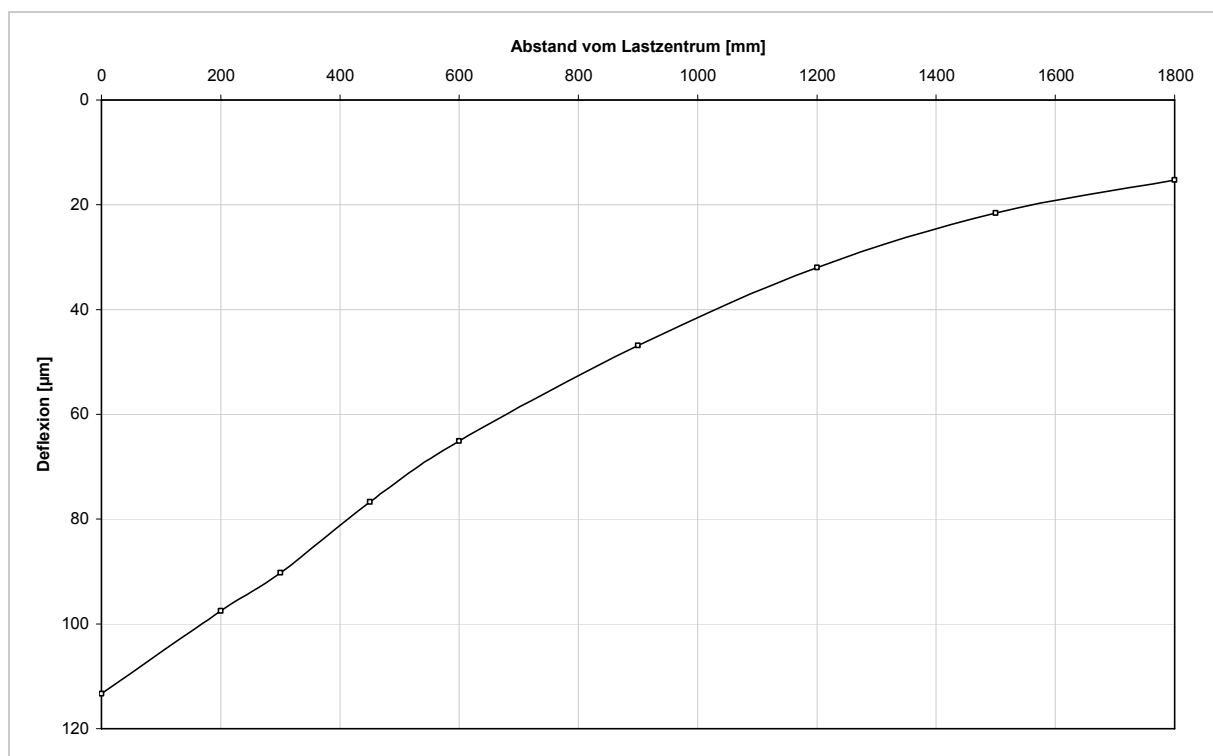


Abbildung 2-3: Darstellung der FWD Messwerte als Deflexionsmulde

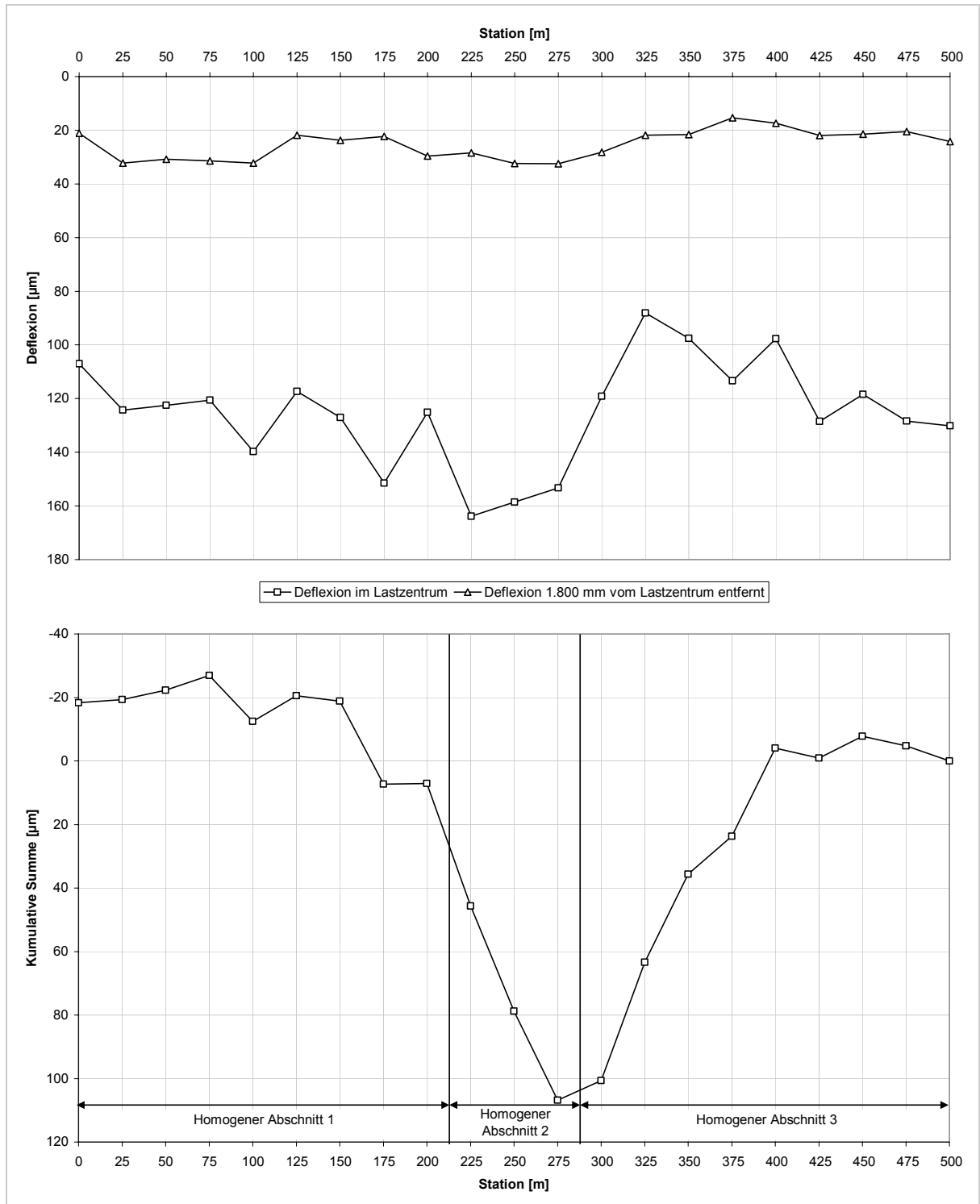


Abbildung 2-4: Deflexionsprofile der Deflexion im Lastzentrum und Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt (oben), zugehörige Darstellung der kumulativen Summe für die Deflexion im Lastzentrum (unten)

3 Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen

Die Tragfähigkeit einer Asphaltbefestigung wird bei Messungen mit dem FWD durch die Deflexion bzw. Deflexionsmulde beschrieben. Die mit dem FWD gemessenen Deflexionen werden je nach Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum unterschiedlich ausgeprägt von den Eigenschaften und den Zuständen der einzelnen Schichten des Straßenoberbaues, des Untergrundes bzw. Unterbaues und den Kombinationen daraus beeinflusst. Aus dem dynamischen Steifigkeitsmodul (E-Modul), der Schichtdicke und der Querkontraktionszahl jeder Schicht kann das Verformungsverhalten an der Oberfläche abgeleitet werden. Während die Dicke der einzelnen Schichten messpunktabhängig ist und die Querkontraktionszahl bei nicht gerissenen Asphaltsschichten näherungsweise als konstant angenommen werden kann, ist der E-Modul je nach Baustoffart und Baustoffzusammensetzung den Einflüssen aus Verkehr, Wetter bzw. Klima unterworfen. Innerhalb der Beharrungsphase, also wenn keine weitere Konsolidierung zu erwarten ist, werden die E-Moduln der Schichten somit primär beeinflusst von:

- bei Asphaltsschichten
 - o Schichttemperatur
 - o Belastungsfrequenz
- bei Schichten ohne Bindemittel und Untergrund/Unterbau
 - o Schichttemperatur (bei Temperaturen $< 0\text{ °C}$)
 - o Wassergehalt

3.1 Schichttemperatur

Gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit [3] sind Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD auf Oberbautemperaturen von 5 bis 30 °C begrenzt.

3.1.1 Asphaltsschichten

Einen größeren Einfluss auf den E-Modul von Asphalt als die Belastungsfrequenz hat die Schichttemperatur [52]. Mit steigender Schichttemperatur sinkt der E-Modul des Asphaltes, vgl. Abbildung 3-1, und die durch das FWD erzeugte Deflexion wird größer. Nach VON BECKER [52] beginnen die Verformungseigenschaften bei hohen Temperaturen sich weitgehend denen der bindemittelfreien Gemische aus Gesteinskörnungen anzugleichen. Die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls ist je nach Asphaltzusammensetzung unterschiedlich, da sie maßgeblich beeinflusst wird von u.a.

der Bindemittelart und –viskosität sowie dem Bindemittelgehalt und der Bindemittelhärte und kaum von der Kornform oder dem Hohlraumgehalt [52]. Abbildung 3-1 und eigene Berechnungen von temperaturabhängigen E-Moduln verschiedener Asphaltarten verdeutlichen, dass die Temperaturabhängigkeit, also die Änderung der E-Moduln pro °C, zudem von dem Temperaturniveau abhängig ist. Bei hohen Temperaturen nimmt die Temperaturabhängigkeit deutlich ab.

3.1.2 Schichten ohne Bindemittel und Untergrund/Unterbau

Der E-Modul der Schichten ohne Bindemittel ist weitestgehend unabhängig von der Schichttemperatur im Temperaturbereich über dem Gefrierpunkt. Im Falle von Frost und der damit verbundenen Eislinsenbildung in der Schicht, kann der E-Modul der Schichten ohne Bindemittel jedoch erheblich zunehmen. Nach [52] ist eine Zunahme um den Faktor 4 möglich, vgl. Abbildung 3-2. Da in der Regel der Grad der Durchfrostung der Schicht nicht genau bestimmt werden kann, sollten Tragfähigkeitsmessungen während der Frostperiode nicht durchgeführt werden.

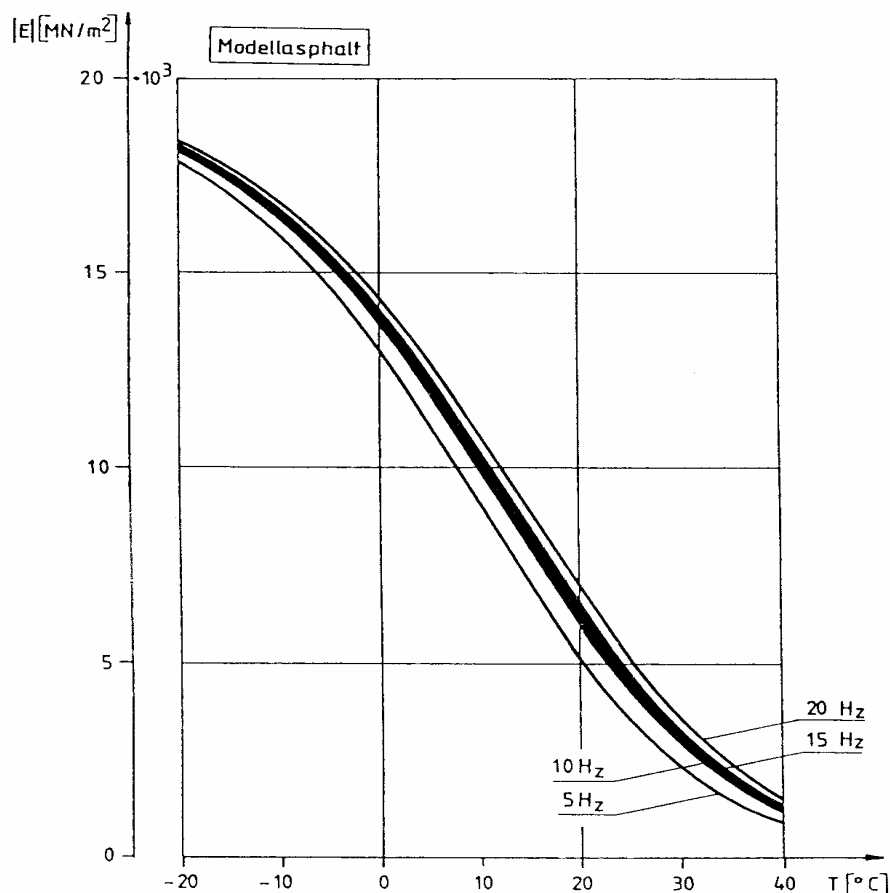


Abbildung 3-1: E-Modul-Verlauf eines Modellasphaltes in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Belastungsfrequenzen [10]

Der E-Modul von Schichten ohne Bindemittel kann somit außerhalb der Frostperiode, und, wie im Folgenden beschrieben, im Falle von F2- und F3-Böden außerhalb der Tauperiode näherungsweise als konstant angenommen werden und ist dann lediglich von der Materialzusammensetzung abhängig.

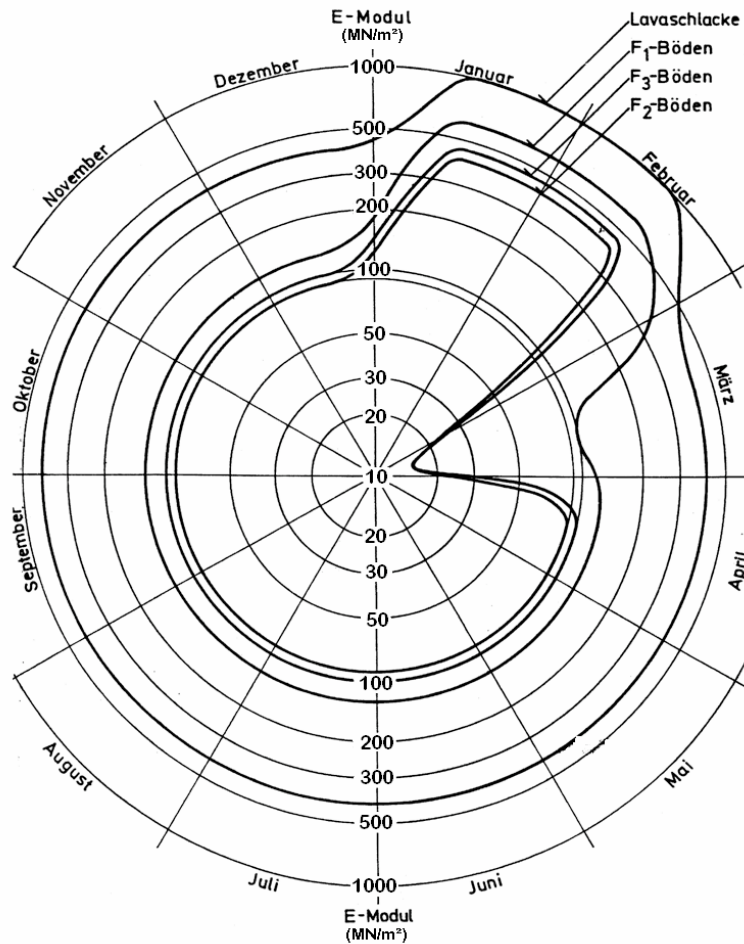


Abbildung 3-2: Charakteristische Jahresganglinie der E-Moduln des Untergrundes und von unteren Tragschichten aus Lavaschlacke nach [52]

3.2 Belastungsfrequenz

Der E-Modul von Asphalt ist abhängig von der aufgetragenen Belastungsfrequenz. Mit zunehmender Belastungsfrequenz bzw. kürzerer Belastungszeit, steigt der E-Modul des Asphaltes an, vgl. Abbildung 3-1. Die durch das FWD aufgetragene Impulsdauer entspricht einer Belastungsfrequenz von circa 10 Hz [10] und kann für die Beurteilung von FWD Messergebnissen als konstant angenommen werden. Die Belastungsfrequenz von 10 Hz entspricht dabei einer Radüberrollung mit einer mittleren Geschwindigkeit von 60 km/h [26].

3.3 Wassergehalt

Der Wassergehalt hat einen großen Einfluss auf den E-Modul von Schichten ohne Bindemittel und den Untergrund/Unterbau. Änderungen des Wassergehaltes in den Schichten ohne Bindemittel und dem Untergrund/Unterbau entstehen u.a. durch ansteigende Grundwasserstände, fehlende oder defekte Entwässerungseinrichtungen oder Versickerungen bei strukturellen Schädigungen der darüberliegenden gebundenen Schichten. Als saisonaler Einfluss ist das Entstehen von Tauwasser im Untergrund während der Tauperiode zu nennen. Der E-Modul des Untergrundes, und somit die Tragfähigkeit, kann nach [52] im Falle der Tauperiode für F2- und F3-Böden nur noch rund 20 % des Ausgangswertes betragen, vgl. Abbildung 3-2. Soll bei der Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen dieser Einfluss vernachlässigt werden, so sind die Tragfähigkeitsmessungen nicht innerhalb der Tauperiode, oder wenn aus anderen Gründen Wasser in den Schichten ohne Bindemittel oder im Untergrund/Unterbau vermutet wird, durchzuführen.

Für spezielle Aufgabenstellungen jedoch können Tragfähigkeitsmessungen während der Tauperiode durchgeführt werden, da sie Auskunft geben können über die Tragfähigkeit im schlechtesten anzunehmenden Fall. Die Dauer der Tauperiode kann nur schwer abgeschätzt werden. Sie hängt einerseits von der Frosteindringtiefe ab, andererseits aber auch von dem Frostverlauf während des Winters und von den örtlichen Gegebenheiten. In [18] wird als Zeitspanne für die Dauer der Tauperiode wenige Tage bis hin zu mehreren Wochen angegeben. Besonders nach milden Wintern ist der Tragfähigkeitsverlust des Untergrundes während der Tauperiode besonders hoch [52].

3.4 Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum

Die gemessenen Deflexionen werden je nach Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum unterschiedlich von den einzelnen Schichten des Straßenaufbaus beeinflusst. Nach einer von STRAUBE [48] durchgeführten Sensitivitätsuntersuchung nimmt der Einfluss der tiefer liegenden Schichten und des Untergrundes/Unterbaues mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum zu, während der Einfluss der oberflächennahen Schichten mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum abnimmt. Die Deflexionen ab circa 1.500 mm vom Lastzentrum entfernt werden dabei nur noch von

dem Untergrund/Unterbau beeinflusst. Folgendes einfaches Beispiel (aus [48]) verdeutlicht dies.

Beispiel:

Mit dem Mehrschichtenprogramm BISAR werden die Deflexionen an einem Dreischichtensystem in verschiedenen Abständen vom Lastzentrum berechnet. Das Dreischichtensystem besteht aus einer Asphaltenschicht, einer Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) und dem Untergrund. Für die Berechnung in einem Mehrschichtenprogramm müssen für jede Schicht der E-Modul, die Querkontraktionszahl μ und die Dicke bekannt sein. Die Dicke des Untergrundes/Unterbaues ist im Modell unendlich. Die Eingabedaten für die Mehrschichtenrechnung sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Der E-Modul für die Asphaltenschicht wurde für 20 °C und 10 Hz nach HÜRTGEN [10] gewählt, der E-Modul für die ToB nach VON BECKER [52]. Der nach den RStO [41] geforderte statische E-Modul auf dem Untergrund/Unterbau beträgt 45 MN/m² (10 %-Mindestquantil Anforderung an das Planum beim Neubau). Der dynamische E-Modul entspricht circa dem 2,0 bis 2,5 fachen des statischen E-Moduls und sollte daher mindestens 115 MN/m² betragen. Im vorliegenden Beispiel wurde er zu 150 MN/m² gewählt. Nach WEHNER et al. [54] können für Beanspruchungsberechnungen im Straßenbau Querkontraktionszahlen μ im Bereich von 0,35 bis 0,5 verwendet werden. Der eingeleitete Lastimpuls entspricht 50 kN auf einer Kreisfläche mit einem Radius von 150 mm (Flächenpressung = 0,707 MN/m²), was einem durch ein FWD erzeugten Lastimpuls entspricht.

Tabelle 3-1: Eingabedaten für die Mehrschichtenrechnung

Schicht	E-Modul [MN/m ²]	Dicke [mm]	μ [-]
1- Asphalt	5.000	220	0,35
2- ToB	300	430	0,35
3- Untergrund	150	-	0,35

Zur Darstellung der Einflüsse der verschiedenen Schichten auf die Deflexion in Abhängigkeit von dem Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum werden die Parameter E-Modul und Dicke um das genannte Ausgangssystem nacheinander variiert und die Deflexionen berechnet. Die Variation der Querkontraktionszahl hat einen zu

vernachlässigenden Einfluss. Die Querkontraktionszahl wird daher für alle Berechnungen konstant gehalten. In den folgenden Abbildungen sind exemplarisch die Deflexionsmulden bei Variation des Asphalt E-Moduls und der ToB Dicke dargestellt. Bei Variation der Asphaltstärke und des ToB E-Moduls ergeben sich ähnliche Abbildungen, auf die Darstellung wird daher verzichtet. Wie aus beiden Abbildungen deutlich zu erkennen ist, nimmt der Einfluss der Asphalttschicht bzw. der ToB mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum ab und hat auf die vom Lastzentrum entferntesten gemessenen Deflexionen keinen Einfluss mehr.

In Abbildung 3-5 sind die Deflexionsmulden bei Variation des Untergrund E-Moduls dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, ist der Einfluss des Untergrund E-Moduls auf die gesamte Deflexionsmulde im Vergleich zu den anderen Schichten am größten.

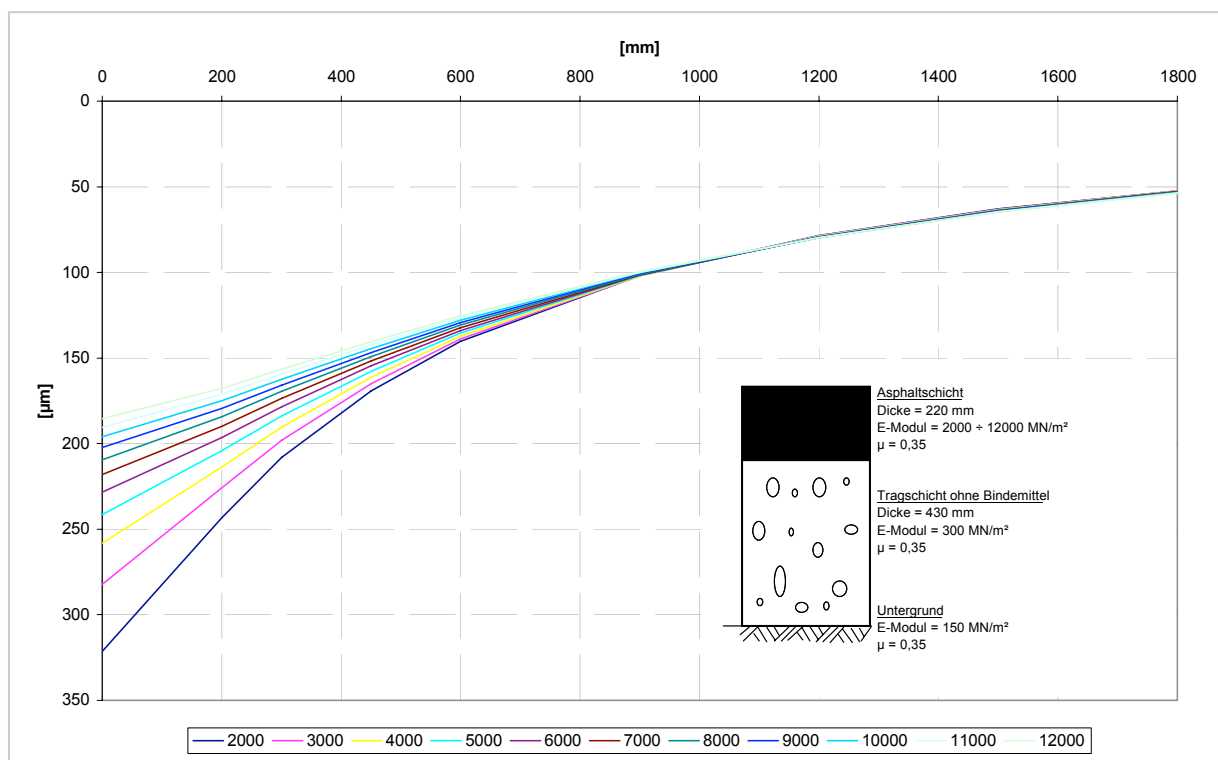


Abbildung 3-3: Deflexionsmulden bei Variation des Asphalt E-Moduls

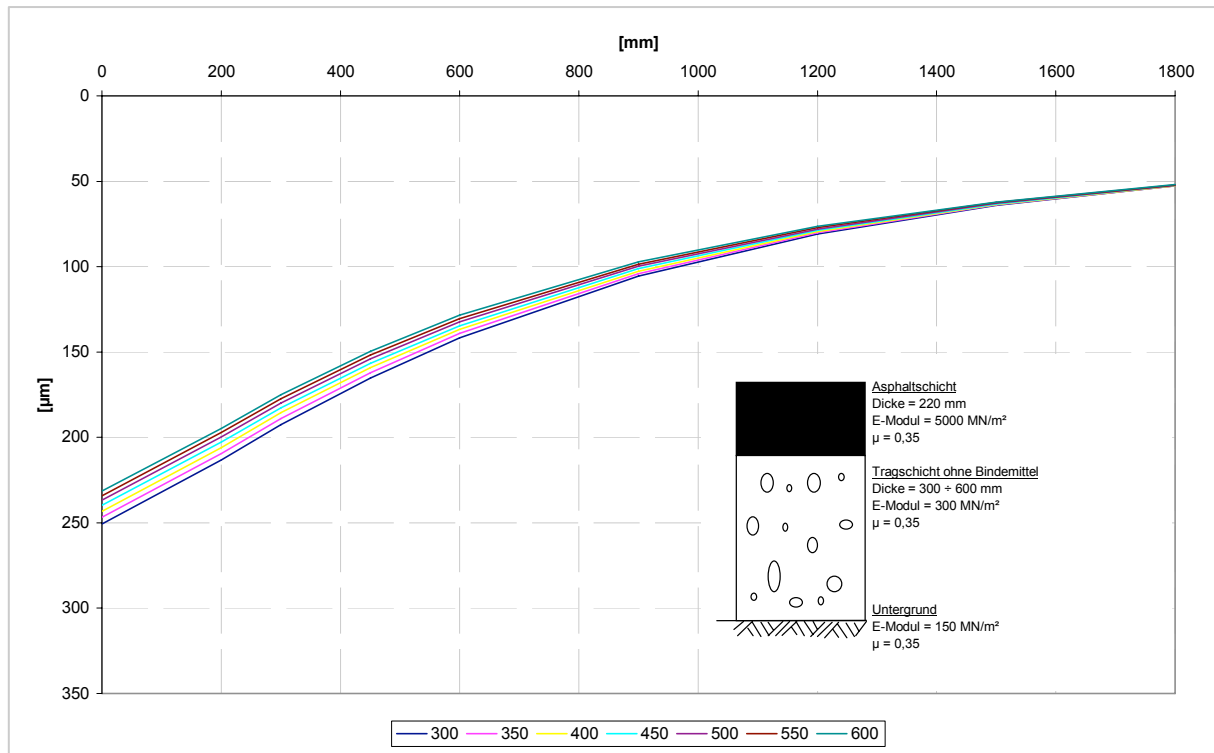


Abbildung 3-4: Deflexionsmulden bei Variation der ToB Dicke

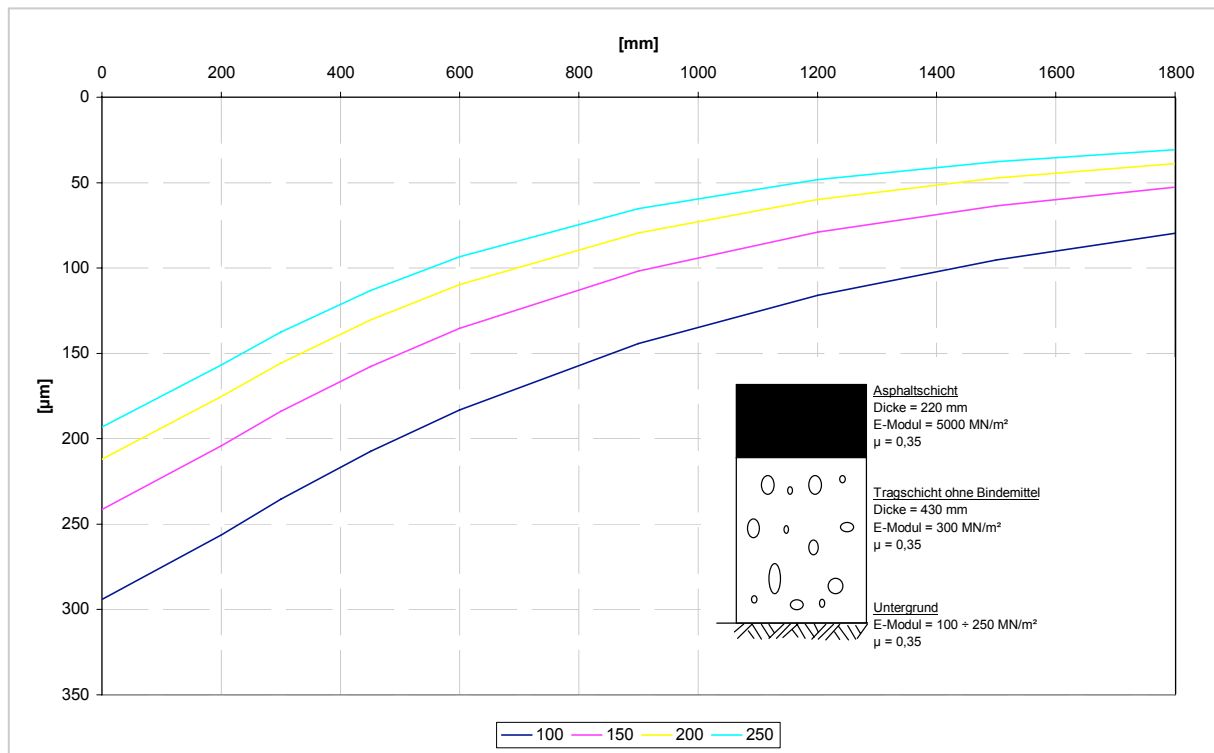


Abbildung 3-5: Deflexionsmulden bei Variation des Untergrund E-Moduls

3.5 Fazit

Wie gezeigt wurde, werden die mit dem FWD gemessenen Deflexionen, und somit die Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen, neben den Schichtdicken von den E-

Moduln der einzelnen Schichten beeinflusst. Die E-Moduln der Schichten und des Untergrundes/Unterbaues sind wiederum von der Belastungsfrequenz, der Schichttemperatur und dem Wassergehalt abhängig:

- Der E-Modul der Asphalttschicht ist temperaturabhängig.
- Der Einfluss der Belastungsfrequenz auf den E-Modul der Asphalttschicht ist geringer als der Temperatureinfluss.
- Der E-Modul der Schichten ohne Bindemittel und des Untergrundes/Unterbaues ist außerhalb der Frost- und Tauperiode temperaturunabhängig.
- Der Wassergehalt von F2- und F3-Böden und der Tragschicht ohne Bindemittel hat einen bedeutenden Einfluss auf den E-Modul des Untergrundes/Unterbaues bzw. der Tragschicht ohne Bindemittel.
- Der Einfluss des E-Moduls des Asphalttschichtes ist im Lastzentrum am ausgeprägtesten und nimmt mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum ab.

Zusammenfassend heißt dies für die Beschreibung des Temperatureinflusses auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionen:

Bei einer Straßenbefestigung in Asphaltbauweise werden die mit dem FWD außerhalb der Frost- und Tauperiode an demselben Messpunkt gemessenen Deflexionen lediglich von der Temperatur des Asphaltts beeinflusst, da die Belastungsfrequenz des FWDs konstant ist.

Der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf die mit dem FWD gemessene Deflexion ist dabei, trotz Begrenzung des Anwendungsbereiches hinsichtlich der Asphaltkörpertemperaturen für FWD Messungen, relativ hoch. Verdeutlicht wird dies durch die Betrachtung der Asphalt E-Modul Differenz bei 5 und 30 °C des Modellasphaltts nach HÜRTGEN, vgl. Abbildung 3-1, die rund 8.800 MN/m² beträgt. Zur weiteren Verdeutlichung sind in Abbildung 3-6 zwei Deflexionsmulden dargestellt, die an demselben Messpunkt bei 5 °C und 30 °C Asphaltkörpertemperatur gemessen worden sind. Die durch die Temperatur hervorgerufene Spannweite der Deflexionen im Lastzentrum beträgt bei diesem Beispiel rund 40 % des Maximalwertes.

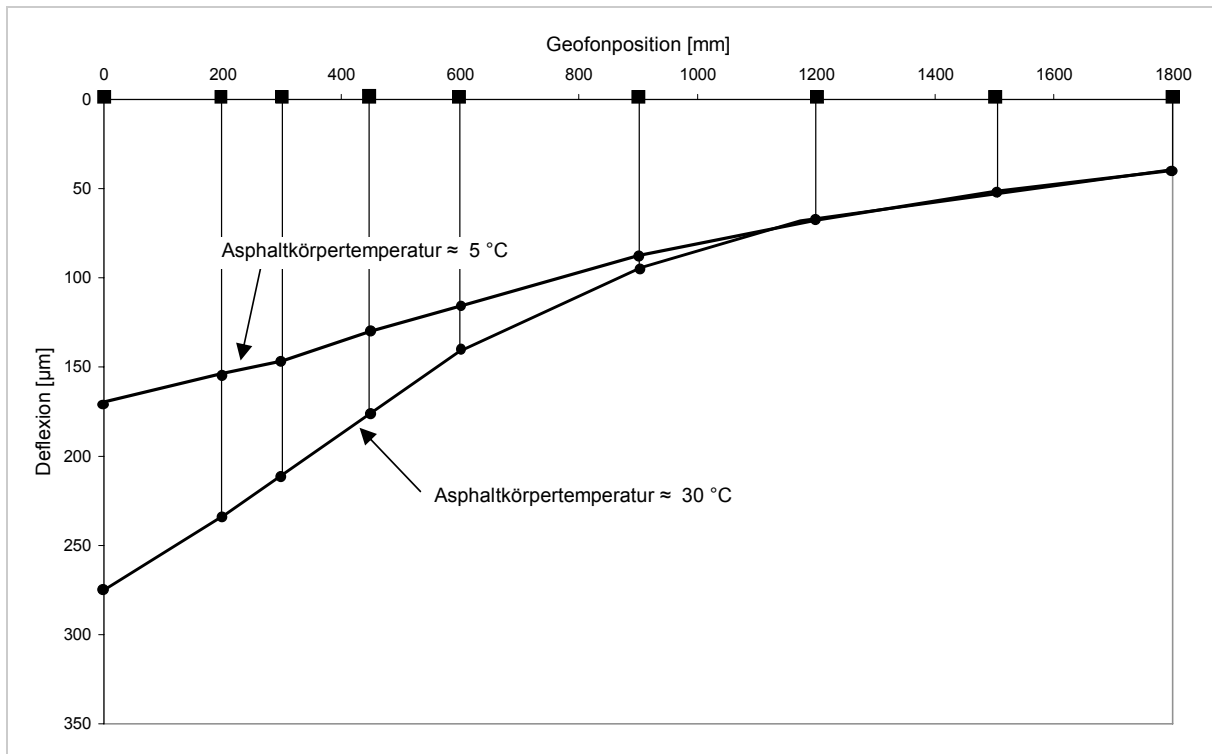


Abbildung 3-6: FWD Deflexionsmulden bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen an demselben Messpunkt

4 Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf die Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen

Wie herausgestellt wurde, hat die Asphaltkörpertemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionen und somit auf die Interpretation der Messwerte hinsichtlich der Tragfähigkeit der Asphaltbefestigung. Für die vergleichende Auswertung von Tragfähigkeitsmessungen ist es daher notwendig, die mit dem FWD gemessenen Deflexionen auf eine Standardoberbautemperatur zu korrigieren. Zur Herleitung einer derartigen Temperaturkorrekturfunktion wurde zunächst eine möglichst repräsentative Datenbasis aufgestellt, mithilfe derer der Temperatureinfluss qualitativ wie auch quantitativ erfasst und beschrieben werden kann.

Die durchgeführten Untersuchungen bestehen im Wesentlichen aus:

1. Messung von Asphalttemperaturgradienten über mehrere Monate hinweg
2. Wiederholende FWD Messungen an denselben Messpunkten zu verschiedenen Jahreszeiten und bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen

zu 1

Für die Beschreibung des Temperatureinflusses auf die mit dem FWD gemessene Deflexionsmulde ist die Kenntnis der Temperaturverteilung im Asphaltkörper unerlässlich. Daher wurden an zwei Streckenabschnitten, Bauklasse I und III, Temperatursensoren in verschiedenen Tiefen des Asphaltkörpers fest installiert. Mithilfe ergänzender meteorologischer Daten sollen die Temperaturverteilungen sowohl als Gradient, also über die Tiefe hinweg, als auch als Ganglinie, über die Zeit hinweg, zu verschiedenen Tageszeiten, Jahreszeiten, Wettern und Witterungen dokumentiert und ausgewertet werden.

zu 2

Zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Asphaltkörpertemperatur und gemessener Deflexion in verschiedenen Abständen vom Lastzentrum wurden wiederholt FWD Messungen im unmittelbaren Bereich der o.g. Temperaturmessstationen durchgeführt. Weitere FWD Messungen wurden wiederholt an über 20 Streckenabschnitten, jeweils fünf Streckenabschnitte der Bauklasse I, II, III und IV, durchge-

führt, um die aus den FWD Messungen im Bereich der Temperaturmessstationen erlangten Erkenntnisse zu verifizieren.

An jedem der 20 Streckenabschnitte wurden mehrere Bohrkerne entnommen und im Labor untersucht, um den Aufbau des Asphaltkörpers zu dokumentieren und um zu überprüfen, ob die Schichtenfolgen und –dicken den vorab recherchierten Schichtenfolgen und –dicken entsprachen. Des Weiteren wurden verschiedene Asphaltmischgut- und Bitumenkennwerte der Bohrkerne analysiert, um die nötigen Eingabegrößen für die Berechnung von Asphalt E-Moduln zu erhalten.

Zusätzlich wurden, zur Erarbeitung von Vorschlägen für die Durchführung von Asphalttemperaturmessungen während FWD Messungen, im Bereich der Temperaturmessstationen Asphaltkörpertemperaturmessungen in Bohrlöchern durchgeführt.

4.1 Auswahl von Streckenabschnitten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 20 Streckenabschnitte in Nordrhein-Westfalen (NRW) ausgewählt. In Betracht kamen Kreis-, Landes- und Bundesstraßen. Bundesautobahnen wurden u.a. aufgrund der besonderen Anforderungen an die Verkehrssicherung ausgeschlossen. Die auszuwählenden Streckenabschnitte hatten einer Reihe von Kriterien zu genügen. So sollten beispielsweise die Streckenabschnitte keine ausgeprägten Oberflächenschäden aufweisen, was nur durch die Beschränkung auf neuere Streckenabschnitte realisiert werden konnte. Zusammenfassend lassen sich die Auswahlkriterien wie folgt beschreiben:

- jeweils fünf Streckenabschnitte in Asphaltbauweise für die Bauklasse I, II, III, IV
- Schichtenaufbau nach den RStO, Zeile 1
- Mindestlänge eines Streckenabschnittes 500 m
- Außerortslage
- Deckschicht aus Asphaltbeton oder Splittmastixasphalt
- Alter der gebundenen Schichten maximal zehn Jahre
- Keine ausgeprägten Oberflächenschäden
- Genügend große Haltesichtweiten für die Sicherung der FWD Messungen

Von den 20 ausgewählten Streckenabschnitten sollten zudem zwei Streckenabschnitte in jeweils einem Unterabschnitt besonderen Kriterien genügen, damit dort

Dauertemperaturmesstationen (TMS) eingerichtet werden konnten. Diese besonderen Kriterien, ergänzend zu den o.g. Kriterien, waren:

- Mindestlänge des Bereichs 50 m
- keine zufällige Beschattung (auch z.B. durch wildes Parken in der Nähe von Badeseen, o.ä.)
- geringe Längsneigung
- keine Damm-, Anschnitt- oder Einschnittlage
- verträgliche Behinderung des Verkehrs während länger dauernder FWD Messungen

Die Auswahl der Streckenabschnitte erfolgte in drei Schritten:

In einem ersten Schritt wurde die Straßeninformationsbank NWSIB des Landesbetriebes Straßenbau NRW nach geeigneten Strecken durchsucht, und zwar abwärts chronologisch, beginnend mit dem Jahr 2006.

In einem zweiten Schritt wurden die geeigneten Streckenabschnitte (Vorauswahl) abgefahren und folgende Punkte mithilfe eines Dokumentationsbogens und Fotografien dokumentiert:

- Außerortslage
- Oberflächenzustand
- Querschnitt (vorh. Geh-/Radwege, Grünstreifen, Anzahl der Fahrstreifen)
- Gradientenlage (Ebene, Anschnitt, Einschnitt, Damm)
- Steigung bzw. Gefälle
- Beschattung
- Randbereiche (Entwässerung über Rinne, unbefestigt)
- Sonstiges

In einem dritten Schritt wurden nach Auswertung der Streckenbefahrung die endgültigen Streckenabschnitte aus der Vorauswahl ausgewählt und weitere streckenbezogene Daten (DTV, Lage und Länge von Brücken, Lage von Querdurchlässen) in der NWSIB recherchiert. Das Ergebnis der Streckenabschnittsauswahl ist der Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Es wurden nur relativ wenige Streckenabschnitte in der NWSIB gefunden, die mindestens auf einer Länge von zusammenhängend 500 m Aufbauten gemäß den RStO ohne Erhaltungsmaßnahmen aufweisen. An vielen Streckenabschnitten wurden laut den Aufbauschichten Instandhaltungsmaßnahmen sowie Erneuerungsmaßnahmen im Hocheinbau oder der Kombination aus Hoch- und Tiefeinbau durchgeführt. Dies betraf besonders die Streckenabschnitte der Bauklasse IV. Zur vorläufigen Verifizierung des Datenbestandes der NWSIB wurden die zuständigen Straßenmeistereien vor der endgültigen Streckenauswahl kontaktiert.

Tabelle 4-1: Ergebnis der Untersuchungsstreckenauswahl

ID ¹	Strasse	Abs.-Nr.	von Station	bis Station	von NK	bis NK
I-1	B 236	46	0+300	0+900	4611005	4611051A
I-2	B 239	55	0+500	1+073	3918093	3917001
I-3	B 239	54,2	0+000	0+500	3918123A	3918093
I-4	B 239	55	0+000	0+500	3918093	3917001
I-5	B 515	6,1	2+000	2+500	4512041	4512037
I-6 ²	B 515	6,1	1+303	0+803	4512037	4512041
II-1	B 233	6	0+200	0+700	4512010	4512015
II-2	B 233	6	1+800	2+300	4512010	4512015
II-3	B 226	35	0+134	0+634	4510023	4610026
II-4	B 234	2	0+400	0+900	4609023	4610019
II-5	B 234	2	1+152	1+652	4609023	4610019
III-1	L 574	12,1	0+070	0+570	3808005C	3808001A
III-2	L 574	12,1	1+803	2+303	3808005C	3808001A
III-3	B 235	44	0+810	1+310	4110008	4110031
III-4	B 235	44	1+310	1+810	4110008	4110031
III-5	B 235	44	2+600	3+100	4111008	4110031
IV-1	L 582	12,2	0+030	0+530	3809022D	3809044A
IV-2	K 3 Borken	2	0+200	0+700	4105030	4105029
IV-3	K 3 Borken	2	0+700	1+200	4105030	4105029
IV-4	K 3 Borken	2	3+200	3+700	4105030	4105029
IV-5	K 3 Borken	2	3+700	4+200	4105030	4105029

¹ die erste(n) Ziffer(n) der ID geben die Bauklasse des Streckenabschnittes an

² I-6 wurde nachträglich mit aufgenommen, da auf I-2 und I-4 zeitweise nicht gemessen werden konnte, vgl. Ziffer 4.5.2

4.2 Bohrkernentnahmen und Untersuchungsumfang

Zur Verifizierung der gemäß dem Datenbestand der NWSIB erwarteten Schichtfolgen und -dicken, zur Dokumentation der Schichtdickenschwankungen, zur Beurteilung der eingebauten Asphalte und zur Berechnung von temperatur- und frequenzabhän-

gigen Asphalt E-Moduln wurden an jedem der Streckenabschnitte (vgl. Tabelle 4-1) im Januar 2007 drei Bohrkerne entnommen.

Die Positionen der Bohrkerne wurden über den Streckenabschnitt gleichmäßig verteilt und erfolgten in der Regel im rechten Fahrstreifen. Die Bohrkernentnahmen erfolgten innerhalb des jeweiligen 500 m Streckenabschnittes in der Regel nach 50, 250 und 450 m vom Streckenabschnittsbeginn. Ausnahmen hiervon waren beispielsweise nur dann erforderlich, wenn der Streckenabschnitt durch eine Brücke getrennt wurde oder die Positionen zur Bohrkernentnahme im Knotenpunktbereich gelegen hätten. In diesen Fällen wurde der Bohrpunkt in den unmittelbaren Bereich der geplanten Entnahmestelle verlegt. Nachfolgende Bohrkernuntersuchungen wurden anschließend durch ein RAP Stra [39] anerkanntes Prüfinstitut durchgeführt:

- Schichtdicken und Schichtenfolge
- Korngrößenverteilung
- Verdichtungsgrad
- Hohlraumgehalt am Bohrkern und am Marshall-Probekörper
- Porenfüllungsgrad
- Bindemittelgehalt
- Penetration bei 25 °C
- Erweichungspunkt Ring und Kugel
- Bitumendichte
- Dichte der groben und feinen Gesteinskörnungen
- Raumdichte am Bohrkern und am Marshall-Probekörper
- Rohdichte

4.3 Temperaturmessstationen

Für die Messung von Temperaturgradienten im Asphaltkörper wurden an zwei bestehenden Straßenaufbauten, Bauklasse I und III, Temperaturmessstationen fest installiert. Der Streckenabschnitt der Bauklasse I befindet sich auf der B 515 nahe der Stadt Menden im Sauerland. Die zweite Station, Bauklasse III, wurde auf einem Abschnitt der L 574 nahe dem Ort Heek im Münsterland eingebaut. Beide Temperaturmessstationen liegen außerorts und erfüllen die unter Ziffer 4.1 genannten Kriterien. Die Temperaturmessstationen haben untereinander eine Luftlinienentfernung von 94 km. Die Lage und die Schichtenfolgen sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Die Orte der Temperaturmessstationen können den klimaindizierten Temperaturzonen KIST

= 4 (Menden) bzw. KIST = 5 (Heek) zugeordnet werden, die bei der Dimensionierung die schädigende Wirkung regional klimatischer Einflüsse berücksichtigen, vgl. WELLNER et al. [55]. Dabei wird durch KIST = 5 ein für die Straßenbefestigung weniger schädigendes Klima als durch KIST = 4 ausgedrückt (bei der Anwendung von sechs ermüdungsbasierten Straßentemperaturzonen / hergeleitet anhand von Oberflächentemperaturen). In Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-4 sind die Lage und die Straßenquerschnitte im Bereich der Temperaturmessstationen dargestellt. In Anlage A-2 finden sich Umgebungsfotos der Temperaturmessstationen.

Tabelle 4-2: Lage, Straßenaufbau und Sensorpositionen der Temperaturmessstationen

Temperaturmessstation	Lage Geometrie	Schichtenfolge	Asphaltart	Sensorpositionen
Menden ID I-5	B 515	4,0 cm Deckschicht	SMA 0/11S	0 cm
	Abschnitt 6,1	6,5 cm Binderschicht	ABi 0/22S	2 cm
	Station 2+100	9,0 cm obere Tragschicht	Mischgutart C	5 cm
	geogr. Breite 51° 25'	<u>8,5 cm untere Tragschicht</u>	Mischgutart C	7 cm
	Länge 07° 48'	28,0 cm Gesamtdicke		9 cm
	Höhe über NN = 162 m			14 cm
	Fahrstreifenbreite: 3,75 m + 1,75 m Mehrzweckstr. KIST-Zone 4			20 cm 28 cm
Heek ID III-2	L 574	4,0 cm Deckschicht	AB 0/11	0 cm
	Abschnitt 12,1	4,0 cm Binderschicht	ABi 0/16	2 cm
	Station 1+850	6,5 cm obere Tragschicht	Mischgutart C	4 cm
	(gegen die Stationierungsrichtung)	<u>7,0 cm untere Tragschicht</u>	Mischgutart C	5 cm
	geogr. Breite 52° 08'	21,5 cm Gesamtdicke		7 cm
	Länge 07° 05'			9 cm
	Höhe über NN = 44 m			14 cm
Fahrstreifenbreite: 3,30 m KIST-Zone 5			20 cm	

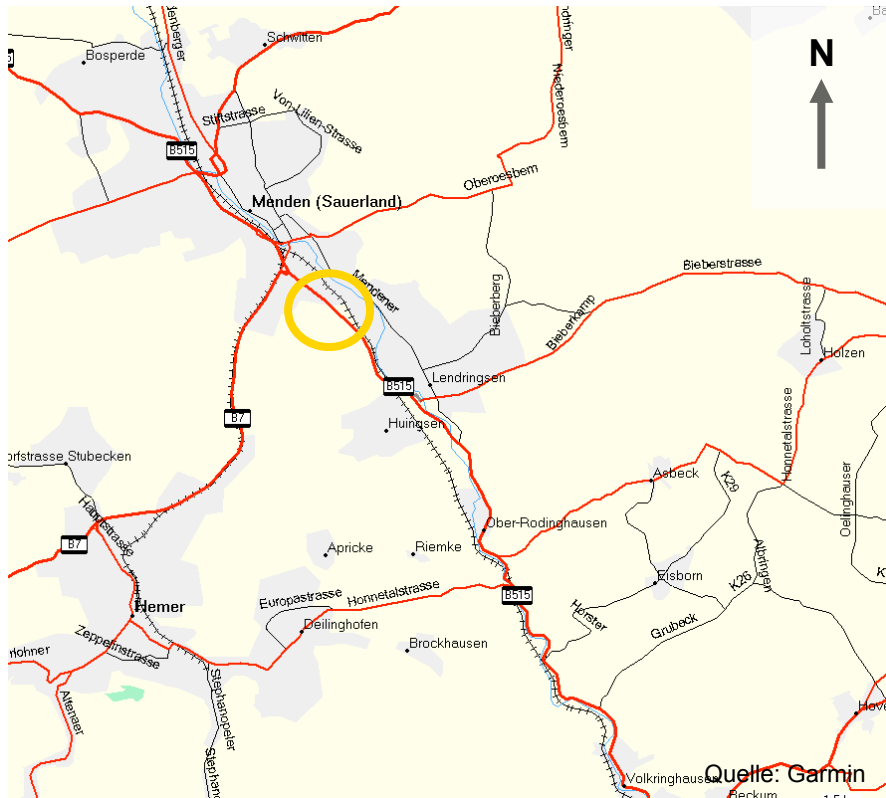


Abbildung 4-1: Lageplan Temperaturmessstation B 515, Menden

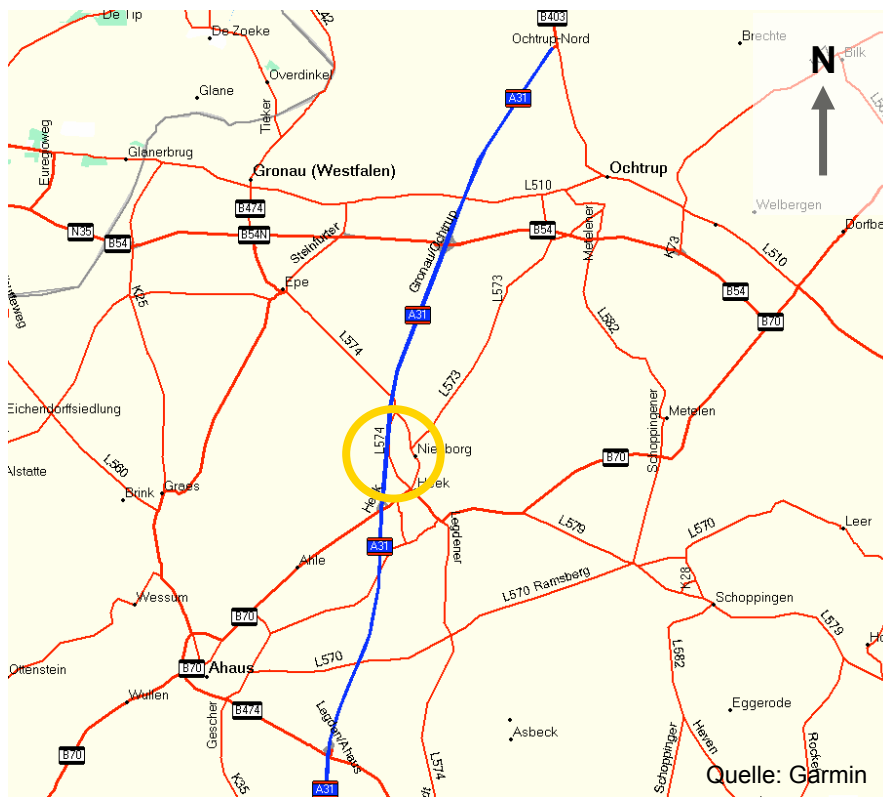


Abbildung 4-2: Lageplan Temperaturmessstation L 574, Heek

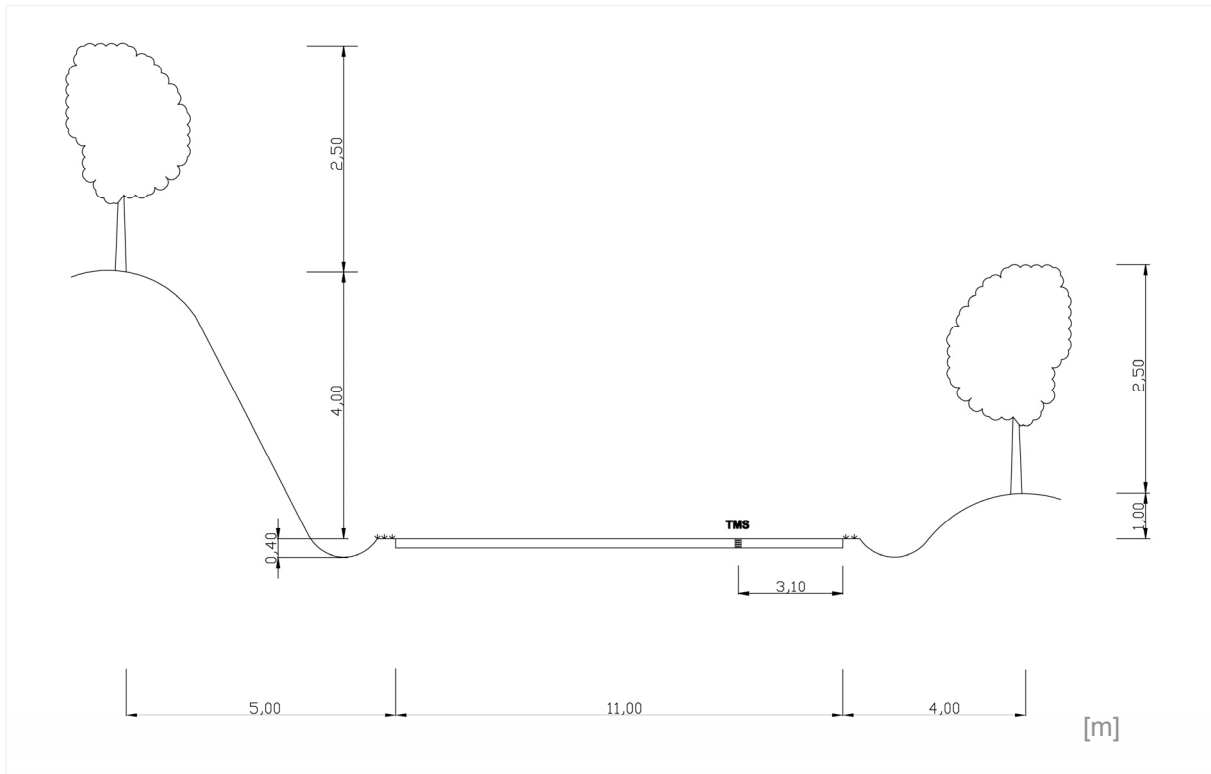


Abbildung 4-3: Querschnittsskizze Temperaturmessstation B 515, Menden, Blickrichtung Nordwest

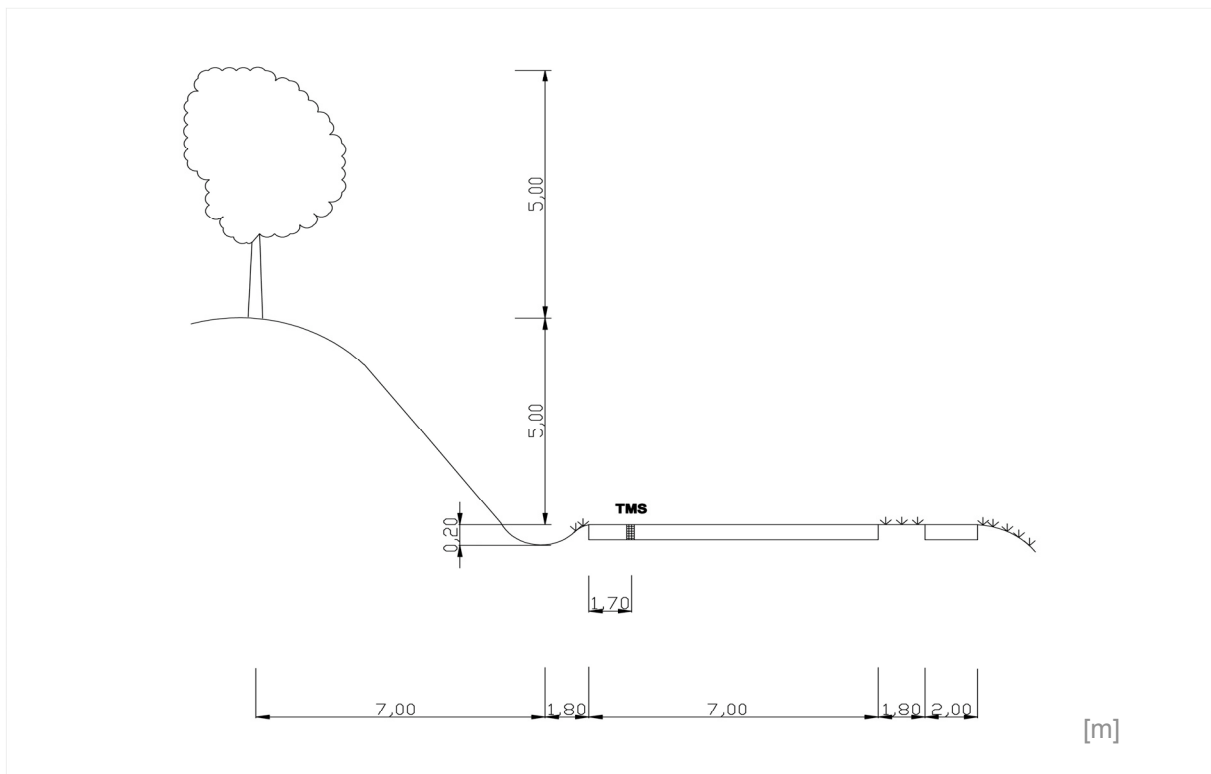


Abbildung 4-4: Querschnittsskizze Temperaturmessstation L 574, Heek, Blickrichtung Nord

4.3.1 Messaufbau und Einbau der Temperaturmessstationen

Die Installation der Temperaturmessstationen erfolgte im Frühjahr 2007. Hierzu wurden pro Temperaturmessstation jeweils zwei sich halb überlappende Bohrkern mit 150 mm Durchmesser entnommen, vgl. Abbildung 4-5. An der in Fahrtrichtung weisenden Seite des Bohrloches wurde eine circa 2 cm Breite und Tiefe Nut über die komplette Bohrlochtiefe eingefräst, in der insgesamt 8 Temperatursensoren in vorab festgelegten Tiefen befestigt wurden. Die Befestigung der Sensoren erfolgte mit einem thermisch gut leitenden Zweikomponenten-Klebstoff. Eine weitere Nut wurde in die Straßenoberfläche gefräst, um das Datenkabel zu einer Aufzeichnungsstation am Straßenrand zu führen. Anschließend wurden beide Bohrkern wieder in das Bohrloch eingesetzt und die Zwischenräume mit einem schnell aushärtenden Zweikomponenten-Schaum in voller Tiefe ausgefüllt. Die Oberfläche sowie die Nut für das Datenkabel wurden mit einem schwarzen Dichtstoff auf Polyurethanbasis verfüllt.

Die Temperatursensoren, vgl. Abbildung 4-6, wurden im Rahmen dieser Arbeit gefertigt. Hierbei wurde Wert darauf gelegt, dass die Temperaturmessung lediglich an der Sensorspitze erfolgt und eine thermische Entkopplung zu dem Sensorgehäuse besteht, so dass die durch die Temperaturmessstation selbst erzeugte Störung der Temperaturverhältnisse im Asphaltkörper so gering wie möglich auf die Temperaturmessung einwirkt.

Die Aufzeichnungsstation befand sich in einem schlagfesten und wasserdichten Koffer mit Vorhängeschloss und wurde im Straßenbankett halb eingegraben. Die Datenaufzeichnung erfolgte in Minutenintervallen mit einem akkubetriebenen Datenlogger auf eine SD-Speicherkarte. Der Batterieakku erlaubte einen autarken Betrieb der Station von circa 1 ½ Monaten.

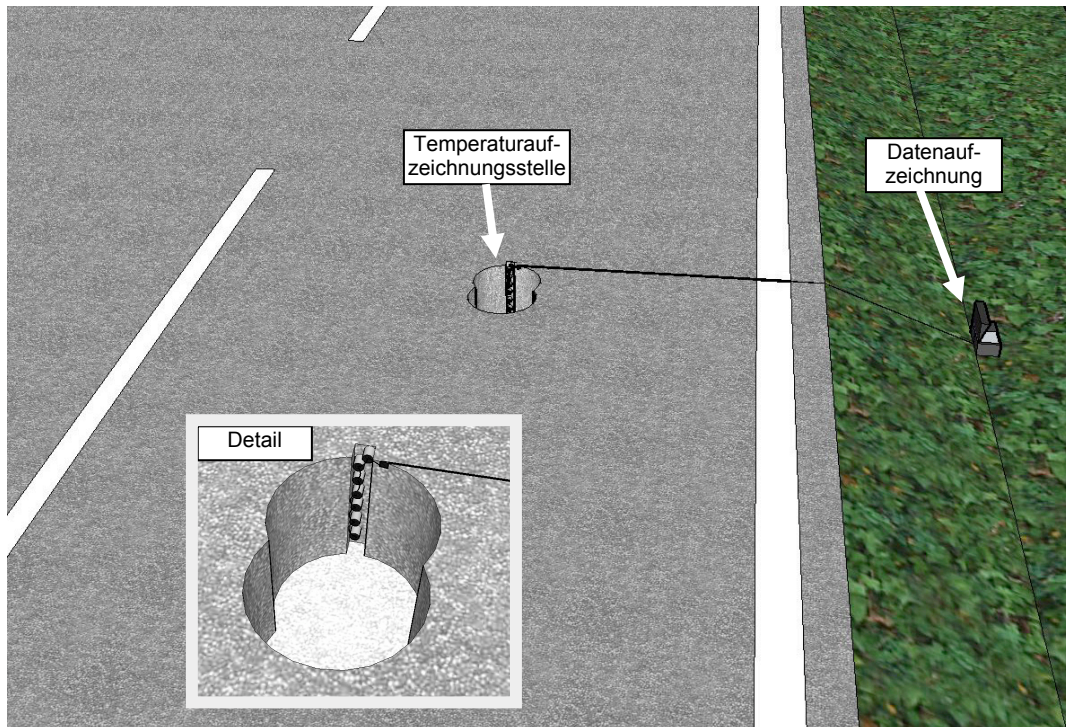


Abbildung 4-5: Schematischer Messaufbau und Lage der Temperaturmessstation

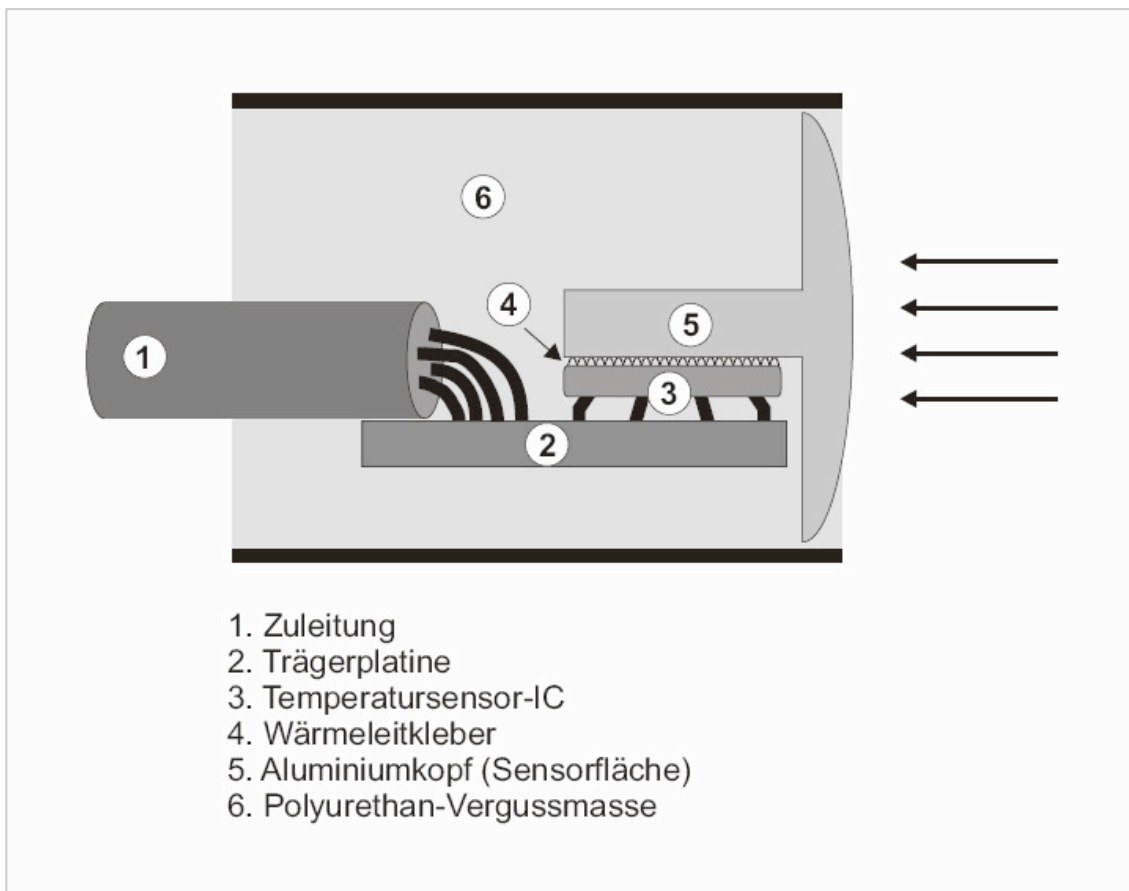


Abbildung 4-6: Aufbau eines Temperatursensors

4.3.2 Datenaufzeichnung

Die Temperaturdaten wurden als Textdateien gespeichert. Für jeden Tag wurde eine neue Datei angelegt, in der die Messzeitpunkte im UTC Zeitformat (koordinierte Weltzeit) aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurde die Batteriespannung zur Kontrolle der Station mit aufgezeichnet. In Abbildung 4-7 ist eine Datendatei exemplarisch dargestellt.

Date	Time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Ubat
22.04.07	00:00:10	8.8	9.5	11.0	12.0	12.8	13.9	15.8	16.3	12.71
22.04.07	00:01:08	8.8	9.5	11.0	12.0	12.7	13.8	15.8	16.4	12.74
22.04.07	00:02:08	8.9	9.5	10.9	12.1	12.7	13.9	15.8	16.2	12.71
22.04.07	00:03:08	8.8	9.6	11.0	12.0	12.8	13.9	15.7	16.3	12.71
22.04.07	00:04:08	8.8	9.5	11.0	12.0	12.7	13.9	15.7	16.2	12.71
22.04.07	00:05:08	8.8	9.5	10.8	12.0	12.7	13.8	15.8	16.3	12.71
22.04.07	00:06:08	8.8	9.5	10.9	12.0	12.6	13.8	15.7	16.2	12.71
22.04.07	00:07:08	8.8	9.5	10.8	12.0	12.7	13.8	15.8	16.2	12.71
22.04.07	00:08:08	8.8	9.5	10.9	11.9	12.7	13.8	15.7	16.3	12.71
22.04.07	00:09:08	8.8	9.5	10.9	12.0	12.6	13.8	15.6	16.3	12.71
22.04.07	00:10:08	8.8	9.5	10.9	11.9	12.6	13.8	15.6	16.2	12.71
22.04.07	00:11:08	8.8	9.5	10.8	11.9	12.6	13.8	15.6	16.2	12.74
22.04.07	00:12:08	8.7	9.5	10.8	11.9	12.6	13.8	15.6	16.2	12.74
22.04.07	00:13:08	8.8	9.5	10.8	11.9	12.6	13.8	15.6	16.3	12.71
22.04.07	00:14:08	8.8	9.4	10.8	11.9	12.6	13.7	15.6	16.2	12.71
22.04.07	00:15:08	8.8	9.5	10.8	11.9	12.6	13.8	15.6	16.2	12.74
22.04.07	00:16:08	8.7	9.5	10.8	11.8	12.6	13.7	15.6	16.1	12.74
22.04.07	00:17:08	8.8	9.4	10.8	11.8	12.5	13.7	15.6	16.2	12.74
22.04.07	00:18:08	8.8	9.4	10.8	11.8	12.6	13.7	15.6	16.1	12.74
22.04.07	00:19:08	8.7	9.4	10.8	11.8	12.6	13.7	15.6	16.1	12.71
22.04.07	00:20:08	8.7	9.3	10.8	11.8	12.5	13.7	15.6	16.2	12.74
22.04.07	00:21:08	8.6	9.3	10.7	11.8	12.6	13.6	15.6	16.1	12.74
22.04.07	00:22:08	8.7	9.3	10.7	11.8	12.6	13.6	15.5	16.1	12.74
22.04.07	00:23:08	8.8	9.3	10.7	11.8	12.6	13.6	15.6	16.1	12.71
22.04.07	00:24:08	8.7	9.4	10.7	11.8	12.6	13.6	15.5	16.1	12.74

Abbildung 4-7: Aufbau der Datendatei

4.4 Meteorologische Daten und Strahlungsdaten

Die gemessenen Asphaltkörpertemperaturen wurden durch meteorologische Daten und Globalstrahlungsdaten ergänzt. Da eigene Messungen nicht möglich waren, wurden die meteorologischen Daten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und die Globalstrahlungsdaten von Messstationen der Universität Duisburg-Essen bezogen. Für die beiden Asphaltkörpertemperaturmessstationen wurde jeweils die am nächsten liegende Station aus dem Messnetz des DWD ausgewählt bzw. Wert darauf gelegt, dass die Luftlinienentfernung weniger als 100 km betrug. Diese maximale Entfernung wurde bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens „Wiederholungsmessungen an flexiblen Fahrbahnbefestigungen ehemaliger Untersuchungsstrecken“ [57] für geeignet befunden, um meteorologische Daten und Globalstrahlungsdaten einer Untersuchungsstrecke zuzuordnen.

Die meteorologischen Daten wurden täglich per e-Mail vom DWD in Form einer Textdatei übermittelt. Angefordert wurden die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit als stündlicher Wert sowie die Sonnenscheindauer und die Niederschlagsmenge als stündlicher Summenwert. Der Tabelle 4-3 ist die Zuordnung der Wetterstationen zu den Asphaltkörpertemperaturmessstationen, deren geographische Lage und Luftlinienentfernung zu entnehmen.

Die Globalstrahlungsdaten wurden von zwei Wetterstationen des Institutes für Geographie an der Universität Duisburg-Essen bezogen. Die Station „Campus“ befindet sich auf dem Campus Essen der Universität, die Umgebung wird von den Betreibern als „Urban geprägtes Umfeld am Kreuzungspunkt zwischen nord-süd-verlaufender Schneise und ost-west-verlaufendem Straßenzug“ [27] charakterisiert. Die Station „Harscheidweg“ befindet sich auf einer Freifläche zwischen den Städten Essen und Mülheim/Ruhr, die Umgebung wird von den Betreibern als „Kuppenlage oberhalb des Ruhrtales. Der Standort liegt je nach Wetterlage im Bereich der warmen Hangzone.“ charakterisiert. Die Daten wurden monatlich als Stundenmittelwerte per e-Mail übermittelt. Die geographische Lage und Luftlinienentfernung zu den Asphaltkörpertemperaturmessstationen ist der Tabelle 4-3 zu entnehmen.

Tabelle 4-3: Lage der Wetterstationen

Station / Betreiber	Zuordnung zu Temperaturmessstation	geographische Lage	Höhe über NN	Luftlinienentfernung zur Temperaturmessstation
Greven DWD	Heek	N 52° 08' E 07° 42'	48 m	42 km
Werl DWD	Menden	N 51° 35' E 07° 53'	85 m	19 km
Campus Essen Uni DuE	Heek / Menden	N 51° 27' E 07° 00'	56 m	Heek 75 km Menden 56 km
Harscheidweg Uni DuE	Heek / Menden	N 51° 25' E 06° 56'	130 m	Heek 81 km Menden 60 km

4.5 FWD Messungen

Zur Dokumentation und Auswertung der Temperaturabhängigkeit, der mit dem FWD gemessenen Deflexionen, wurden sowohl FWD Messungen im unmittelbaren Bereich der Temperaturmessstationen durchgeführt, als auch auf den zuvor ausgewählten 20 Streckenabschnitten.

4.5.1 FWD Messungen im Bereich der Temperaturmessstationen

Im unmittelbaren Bereich der Temperaturmessstation wurden jeweils vier Messpunkte mit Messpunktnägeln am Straßenrand dauerhaft markiert. Der Abstand der Messpunkte wurde mit 15 m derart gewählt, dass das Gespann, bestehend aus Zugfahrzeug und FWD, bei der Messung an einem Messpunkt nicht den jeweils nächsten Messpunkt beschattet.

Die Messungen mit dem FWD erfolgten nach [3] in der rechten Rollspur des Fahrstreifens. Die Wahl dieser Messlinie beruht im Wesentlichen darauf, dass Aussagen über den Einfluss der Verkehrsbelastung auf die Oberbaueigenschaften möglich sind [22]. Messungen zwischen den Rollspuren sollen den Zustand der ursprünglichen unbefahrenen Straßenkonstruktion repräsentieren und haben bei großen Querunebenheiten im Rollspurbereich den Vorteil, dass die Lastplatte des FWD vollflächigen Kontakt mit der Straßenoberfläche hat. Die Messungen zwischen den Rollspuren bleiben somit speziellen Fragestellungen vorbehalten. Die Lage der rechten Rollspur ist nach [52] abhängig von der Fahrstreifenbreite, der Kurvigkeit und der Randgeometrie des Streckenabschnittes. Bei breiten Fahrstreifen, in Kurven und bei sehr naher Randbebauung, beispielsweise durch Lärmschutzwände, orientieren sich die Fahrzeuge mehr zur Fahrbahnmitte. Um die Wiederholbarkeit aller FWD Messungen im Rahmen dieses Projektes zu gewährleisten, musste ein fester Abstand vom rechten Fahrbahnrand als Rollspur definiert werden. Hierzu wurde der aus einschlägigen Regelwerken [50] genannte Wert von 70 cm vom rechten Fahrbahnrand adaptiert, der auch mit der Geometrie des FWDs sehr gut vereinbar ist, da der Abstand von Reifenmitte des FWDs bis Mitte der Lastplatte auch 70 cm beträgt. Geringere Abstände zum Fahrbahnrand sind daher meist durch die Breite des FWD und des Zugfahrzeuges nicht möglich. Messungen in der linken Rollspur werden vor allem wegen der schwierigen verkehrlichen Absicherung, das Zugfahrzeug befindet sich dann teilweise im Gegenverkehr, nicht durchgeführt.

Die Lage der Messpunkte im Querprofil wurde daher für alle FWD Messungen im Rahmen dieser Arbeit konstant mit 70 cm Abstand vom rechten Fahrbahnrand festgelegt. Aus Abbildung 4-8 ist die Lage der einzelnen Messpunkte zu entnehmen.

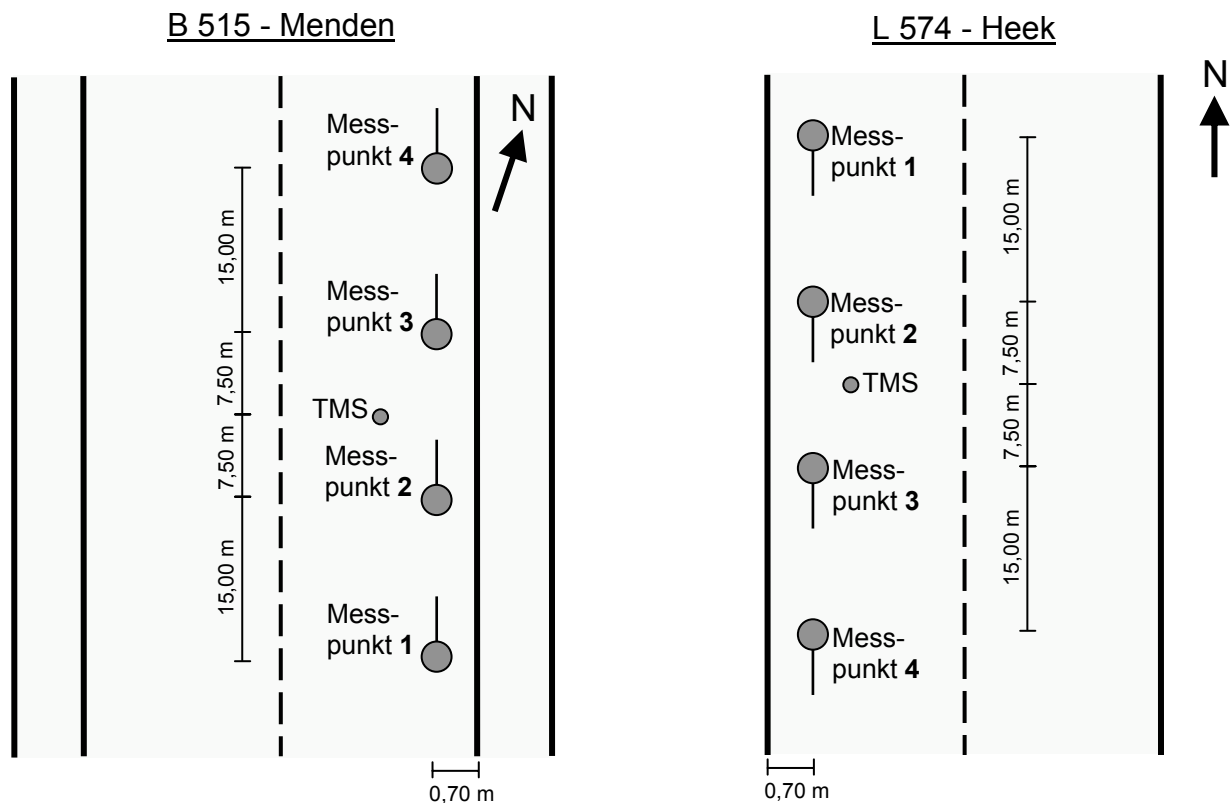


Abbildung 4-8: Lage der FWD Messpunkte an den TMS (unmaßstäblich)

An jedem Messpunkt wurden FWD Messungen, im Folgenden als Punktmessungen bezeichnet, mit einer Messsequenz, bestehend aus drei Lastschlägen mit 50 kN und drei folgenden Lastschlägen mit 90 kN, durchgeführt. An der TMS Menden erfolgten im Beobachtungszeitraum pro Messpunkt 36 Messungen, an der TMS Heek erfolgten im Beobachtungszeitraum pro Messpunkt 55 Messungen.

Auf den Streckenabschnitten, an denen die TMS installiert waren, wurden zudem an den Tagen, an denen die Punktmessungen durchgeführt wurden, FWD Messungen auf einer Länge von 500 m mit einem Messpunktabstand von 25 m wiederholend an denselben Positionen durchgeführt. Diese Messungen werden im Folgenden als Profilmessungen bezeichnet.

4.5.2 FWD Messungen auf 20 Streckenabschnitten

Auf den in Absatz 4.1 beschriebenen Streckenabschnitten I-1 bis IV-5 wurden im Rahmen von Messkampagnen mehrere FWD Messungen durchgeführt. Die Anzahl der durchgeführten Messungen pro Streckenabschnitt sind unterschiedlich, da einige Streckenabschnitte begleitend zu den o.g. Punktmessungen wegen ihrer Nähe zu den Temperaturmessstationen angefahren worden sind.

Die FWD Messungen wurden jeweils auf einer Länge von 500 m mit einem konstanten Messpunktabstand von 25 m durchgeführt, was 21 Messpunkten pro Streckenabschnitt entspricht. Ausnahmen hiervon waren:

- Streckenabschnitt I-1: Bedingt durch ein Brückenbauwerk innerhalb der Messstrecke und da die letzten Messpunkte innerhalb eines verkehrsreichen Knotenpunktes lagen, wurde die Anzahl der Messpunkte auf 19 begrenzt.
- Streckenabschnitte I-2 und I-4: Während des Beobachtungszeitraumes wurde auf den aufeinander folgenden Streckenabschnitten eine Brückenbaustelle eingerichtet. Wie bei allen ausgewählten Streckenabschnitten erfolgte bei Projektbeginn ein Gespräch mit Vertretern der zuständigen Straßenmeisterei und der zuständigen Verwaltungsstelle für die verkehrsrechtliche Anordnung. Trotz dieser Absprachen machten die durch die Brückenbaustelle entstandenen Verkehrseinschränkungen eine weitere Sperrung für die Durchführung der FWD Messungen teilweise unmöglich. Im Streckenabschnitt erfolgten daher die FWD Messungen nur an zwei Terminen, im Streckenabschnitt I-4 nur an einem Termin.

Als Ersatzstrecke wurde ab Oktober 2007 ein weiterer Abschnitt der B 515 bei Menden in das Streckenkollektiv aufgenommen. Der Abschnitt wurde mit der ID I-6 bezeichnet, vgl. Tabelle 4-1. Der Abschnitt liegt in unmittelbarer Nähe des Abschnitts I-5 in Gegenfahrtrichtung. Bohrkernentnahmen erfolgten nicht. Der Aufbau ist jedoch nach Informationen der NWSIB gleich dem in Abschnitt I-5.

Die Anfangspunkte der Streckenabschnitte wurden entweder anhand markanter unveränderlicher Gegebenheiten vor Ort oder mithilfe von Vermessungsnägeln im Straßenrand festgelegt. Die Messungen erfolgten in der rechten Rollspur bei einem konstanten Abstand von 70 cm zum Fahrbahnrand. Die Messsequenz bestand bei allen Messungen aus drei Lastschlägen mit jeweils 50 kN Last.

Am Beginn bzw. innerhalb der ersten 100 m, eines Streckenabschnittes wurde bei jeder Messung eine mobile Temperaturmessstation aufgebaut, die während der Verweildauer auf dem Streckenabschnitt die Asphaltkörpertemperaturen kontinuierlich aufgezeichnet hat. Diese Temperaturmessstation besteht aus fünf Temperatursensoren, die mit einem Notebook verbunden sind, das sich in einer wettergeschützten

Aluminiumbox befindet, vgl. Foto 4-1. Mittels einer Softwaresteuerung kann die Temperatur der einzelnen Temperatursensoren fortlaufend in einem frei gewählten Intervall aufgezeichnet werden. Zur Messung der Asphaltkörpertemperaturen in verschiedenen Tiefen wurden vier Löcher in den Tiefen 4, 8, 12 und 16 cm mithilfe einer selbstkonstruierten Bohrschablone gebohrt, mit Druckluft gereinigt und die Temperatursensoren in die Löcher eingeführt. Der Abstand der Löcher zueinander betrug 10 cm. Die Löcher wurden längs zur Fahrtrichtung in circa 40 cm Abstand vom Fahrbahnrand gebohrt. In einigen Fällen wurden aufgrund der teilweise schwierigen verkehrlichen Absicherung der anschließend allein stehenden Temperaturmessstation die Löcher näher am Fahrbahnrand angeordnet. Ein weiterer Sensor wurde mit Klebeband an der Fahrbahnoberfläche fixiert. Bei der ersten Messkampagne wurde in die Löcher Silikonöl als Kontaktflüssigkeit gefüllt. Bei den weiteren Messungen wurde aus Gründen, die in dieser Arbeit später erläutert werden, darauf verzichtet. Die Temperaturmessungen wurden dann im trockenen Bohrloch durchgeführt. Die Löcher wurden während der Messungen von oben nicht verschlossen, da die Dicke der Zuleitungen in etwa dem Bohrlochdurchmesser entsprach. Das Aufzeichnungsintervall wurde auf 10 Sekunden eingestellt. Bei jedem Besuch des Streckenabschnittes wurden neue Löcher gebohrt, die nach Gebrauch mit einer bituminösen Dichtungsmasse wieder verschlossen wurden.

Zusätzlich wurden an Unterabschnitten, die sich von ihrer Beschattung her grundsätzlich von der Situation an der mobilen Temperaturmessstation unterschieden, einzelne Bohrlochtemperaturmessungen in 4 cm Tiefe mit einem digitalen Einstichthermometer durchgeführt. Die Bohrlöcher wurden während der Temperaturmessung mit einem Klebeband verschlossen, das mit dem Einstichthermometer durchstoßen wurde. Nach Gebrauch wurden die Bohrlöcher mit einer bituminösen Dichtungsmasse wieder verschlossen.

An den FWD Messpunkten wurde die Oberflächentemperatur mit einem Infrarotthermometer gemessen. Während der FWD Messungen wurden Feldbücher geführt, vgl. Anlage A-1, die u.a. folgende Daten erfassten:

- Identifizierung des Streckenabschnittes und Messzeitpunkt
- Position der mobilen Temperaturmessstation
- Positionen und Werte der einzelnen Bohrlochtemperaturmessungen

- Wetter
- Oberflächentemperatur an den einzelnen Messpunkten
- Beschattung der einzelnen Messpunkte
- Oberflächenzustandsmerkmale



Foto 4-1: Aufbau der mobilen Temperaturmessstation

4.6 Bohrlochtemperaturmessungen

Im Bereich der festinstallierten Temperaturmessstationen wurden Nagel- bzw. Bohrlochtemperaturmessungen mit verschiedenen Parametern, z.B. Wahl der Kontaktflüssigkeit und unterschiedlicher Wartezeiten, bevor die Temperatur abgelesen wird, durchgeführt. Die gesammelten Daten und Erfahrungen aus diesen Bohrlochtemperaturmessungen dienen der Erarbeitung von Hinweisen für die Durchführung von Temperaturmessungen während FWD Messungen. Hierzu wurde zusätzlich eine internationale und nationale Umfrage unter FWD Betreibern durchgeführt, die einen Überblick über die verschiedenen Vorgehensweisen bei der Temperaturmessung bietet, vgl. Anlage C-4.

Bei verschiedenen Witterungen wurden jeweils drei 5 cm tiefe Löcher nebeneinander gebohrt und anschließend mit Druckluft gereinigt. Die Festlegung der Bohrlochtiefe von 5 cm erfolgte nach vorangegangener Auswertung der ersten FWD Messungen an den Temperaturmessstationen, vgl. Ziffer 6.1. In ein Bohrloch wurde Wasser, in ein anderes Bohrloch Silikonöl eingefüllt. Das dritte Bohrloch wurde im trockenen Zustand belassen. Mithilfe der o.g. mobilen Temperaturmessstation und teilweise auch mit manuellen Ablesungen von einem Einstichthermometer wurde der Temperaturverlauf im Bohrloch über mindestens 15 Minuten aufgezeichnet. Zusätzlich wurden weitere Umfelddaten dokumentiert, u.a. Lufttemperatur, Wetter, Oberflächentemperatur, Ausgangstemperatur der Kontaktflüssigkeit, Datum und Uhrzeit.

Die so aufgezeichneten Temperaturdaten wurden anschließend mit den Temperaturdaten der festinstallierten Temperaturmessstationen verglichen und ausgewertet.

5 Ergebnisse und daraus resultierende Sensitivitätsuntersuchungen

Die Ergebnisse der unter Ziffer 4 beschriebenen Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt. Des Weiteren wurden anhand der Ergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, die unter anderem die Datenbasis bewerten sowie die Plausibilität der Daten überprüfen. Zudem dienen die durchgeführten Untersuchungen der Erlangung eines vertieften Verständnisses hinsichtlich der Einflussgrößen auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen zusammengefasst und hinsichtlich Asphaltarten, Schichtdicken und E-Moduln ausgewertet. Im Weiteren wird der Beobachtungszeitraum aufgrund der meteorologischen Daten ausgewertet und bewertet. Die an den Temperaturmessstationen gemessenen Asphaltkörpertemperaturen werden beschrieben und die Messtage durch den Oberflächentemperaturverlauf typisiert. Die Ergebnisse, der bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen durchgeführten FWD Messungen, werden zusammengefasst und mit Blick auf deren Temperaturabhängigkeit ausgewertet.

5.1 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Anhand der auf den 20 Streckenabschnitten entnommenen Bohrkern wurden die Asphaltarten und die Schichtdicken bestimmt und ausgewertet. Zudem konnten mithilfe der untersuchten Kenngrößen die temperaturabhängigen E-Moduln rechnerisch abgeschätzt werden. Insgesamt wurden 60 Bohrkern entnommen, mit in der Summe 200 Schichten (60 Asphaltdeckschichten, 45 Asphaltbinderschichten, 60 Asphalttragschichten, wobei davon 35 in obere und untere Asphalttragschicht unterteilt wurden). Die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen sind in Anlage B-1 zusammengestellt.

5.1.1 Bestimmung der Asphaltarten

Aufgrund der gegebenen Korngrößenverteilungen aus den Bohrkernuntersuchungen wurden die Asphaltarten der Untersuchungsstreckenabschnitte bestimmt. Hierzu wurden die Korngrößenverteilungen der ZTV Asphalt-StB, Ausgabe 2001 [60] und der ZTV T-StB, Ausgabe 1995, Fassung 2002 [61], als Referenz verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Auf die Angabe der jeweiligen Bitumensorte wird verzichtet. Für eine eindeutige Zuordnung der Bitumensorten muss das Alter der jeweiligen Schicht mitberücksichtigt werden. Aufgrund der Alterung des Bitumens kommt es zu einer Verhärtung des Bitumens. Dies spiegelt sich wider in einer Abnahme des Wertes für die Penetration und einer Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel. Die Alterung von Asphalt während der Verarbeitung und Nutzungsdauer unter Verkehr wird gefördert u.a. durch Oxidationsprozesse, hohe Gebrauchstemperaturen und UV-Strahlung [49]. Die Berechnung der Alterung von Bitumen kann beispielsweise nach SHAHIN (in [12]) erfolgen. Die Berechnungen des E-Moduls, vgl. Ziffer 5.1.3, erfolgten jedoch mit den Bitumenkennwerten aus den Laboruntersuchungen, da im Rahmen dieser Arbeit die Werte der Asphalt E-Moduln im Beobachtungszeitraum von Bedeutung sind.

Tabelle 5-1: Asphaltarten der Untersuchungsstrecken

ID	Deckschicht	Binderschicht	obere Asphalttragschicht	untere Asphalttragschicht
I-1	SMA 0/8	ABi 0/16	Mischgutart C	Mischgutart C
I-2	SMA 0/8	ABi 0/22S	Mischgutart C	Mischgutart C
I-3	SMA 0/8	ABi 0/22S	Mischgutart C	Mischgutart C
I-4	SMA 0/8	ABi 0/16 *	Mischgutart C	Mischgutart C
I-5	SMA 0/11S	ABi 0/22S *	Mischgutart C	Mischgutart C
II-1	AB 0/11S	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
II-2	AB 0/11S	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
II-3	SMA 0/8	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
II-4	AB 0/11	ABi 0/22S *	Mischgutart C	-
II-5	AB 0/11	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
III-1	AB 0/11	ABi 0/16	Mischgutart C	Mischgutart C
III-2	AB 0/11	ABi 0/16	Mischgutart C	Mischgutart C
III-3	AB 0/11	ABi 0/16	Mischgutart C	-
III-4	AB 0/11S	ABi 0/16	Mischgutart C	-
III-5	AB 0/11	ABi 0/16	Mischgutart C	-
IV-1	AB 0/11	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
IV-2	AB 0/11S	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
IV-3	AB 0/11S	ABi 0/22S	Mischgutart C	-
IV-4	AB 0/11S	ABi 0/16	Mischgutart C	-
IV-5	AB 0/11	ABi 0/16	Mischgutart C	-

* = Identifizierung nicht eindeutig (meist nur Abweichung an einer Sieblochweite)

5.1.2 Schichtdickenschwankungen und Verifizierung der NWSIB Aufbaudaten

Die 20 ausgewählten Streckenabschnitte sollten ihrem Schichtenaufbau den Bauklassen I bis IV entsprechen. Anhand der Bohrkernuntersuchungen sollte u.a. überprüft werden, ob die in der NWSIB recherchierten Schichtdicken auch denen in situ













entsprechen. Für jede Schicht am Bohrkern wurden daher die Schichtdicken bestimmt und der erwarteten Schichtdicke nach den RStO, Asphaltbauweisen, Zeile 1, gegenübergestellt.

In Anlage B-2 sind die gemessenen Schichtdicken, die absoluten und relativen Abweichung von den Sollschichtdicken sowie die Mittelwerte und Variationskoeffizienten pro Streckenabschnitt tabellarisch zusammengestellt. In Tabelle 5-2 sind die Mittelwerte der gemessenen Schichtdicken und die zugehörigen Variationskoeffizienten aufgeführt. Die Asphalttragschichtlage von Bohrkern Nr. 21 (Strecke I-1) wurde bei den Auswertungen nicht betrachtet, da diese zum Teil aus einer zementgebundenen Tragschicht besteht.

Es ist zu erkennen, dass die mittleren Dicken der Deckschicht bei allen Bauklassen nahe dem Sollwert liegen. Die mittleren Dicken der Binderschicht liegen in allen Bauklassen über dem Sollwert, die Variationskoeffizienten sind deutlich größer als diejenigen der Deckschicht. Die mittlere Dicke der Asphalttragschicht der Bauklasse I ist größer als die Sollschichtdicke. Im Falle der Bauklassen II bis IV werden die Solldicken der Asphalttragschicht unterschritten.

Die mittleren Summen der gesamten Asphaltschichtdicke entsprechen nahezu den Solldicken der Asphaltschicht. Eine Ausnahme stellt die Bauklasse IV dar, bei der die Solldicke der gesamten Asphaltschicht im Mittel um 2,5 cm unterschritten wird. Hierzu ist anzumerken, dass diese mittlere Unterschreitung auf die Dicken der Asphalttragschicht der Streckenabschnitte IV-2 bis IV-5 zurückzuführen ist und diese Streckenabschnitte allesamt auf einem circa 5 km langen Abschnitt der gleichen Kreisstraße liegen.

Tabelle 5-2: Mittlere Schichtdicken, Variationskoeffizienten (VarK) und Sollsichtdicken

		Bauklasse			
		I	II	III	IV
IST	Deckschicht	∅ 4,0 cm VarK 13 %	∅ 4,1 cm VarK 11 %	∅ 3,9 cm VarK 9 %	∅ 3,7 cm VarK 12 %
	Binderschicht	∅ 8,2 cm VarK 19 %	∅ 8,2 cm VarK 11 %	∅ 4,6 cm VarK 25 %	-
	Asphalttragschicht	∅ 20,0 cm VarK 19 %	∅ 13,7 cm VarK 6 %	∅ 13,4 cm VarK 9 %	∅ 11,9 cm VarK 14 %
	Gesamt	∅ 32,0 cm VarK 11 %	∅ 26,2 cm VarK 6 %	∅ 21,9 cm VarK 6 %	∅ 15,5 cm VarK 12 %
SOLL	RStO, Tafel 1, Zeile 1				
	Asphaltdeckschicht	4 cm 	4 cm 	4 cm 	4 cm 
	Asphaltbinderschicht	8 cm 	8 cm 	4 cm 	<u>14 cm</u> 
	Asphalttragschicht	<u>18 cm</u> 30 cm 	<u>14 cm</u> 26 cm 	<u>14 cm</u> 22 cm 	18 cm 

In den ZTV Asphalt-StB [60] und ZTV T-StB [61] werden Grenzwerte für die Unterschreitung der Einbaudicke (Einzelwerte) ohne Abzug vom Einheitspreis genannt. Diese sind

- für die Asphaltdeckschicht max. 25 % Unterschreitung
- für die Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht zusammen max. 15 % Unterschreitung
- für die Asphalttragschicht max. 3 cm Unterschreitung.

Eine Überprüfung der am Bohrkern gemessenen Schichtdicken hat zum Ergebnis, dass in

- 0 % der Fälle der Asphaltdeckschicht
- 7 % der Fälle der Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht zusammen
- 8 % der Fälle der Asphalttragschicht

die Schichtdicken gemäß den genannten Regelwerken unterschritten werden. Da der Großteil der Asphalt-schichtdicken im Toleranzbereich der genannten Regelwerke liegt, können die untersuchten Streckenabschnitte den vorab in der NWSIB recherchierten Bauklassen (gemäß Schichtdicken) zugeordnet werden.

Zur Beurteilung der Auswirkung von Schichtdickenschwankungen auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionen wurden mit dem Mehrschichtenprogramm BISAR Deflexionsmulden an Drei-Schichten-Systemen für die Bauklasse I bis IV berechnet.

Die Dicke des Oberbaues wurde für alle Ausgangssysteme zu 65 cm gewählt. Die Asphalt-schichtdicken der Ausgangssysteme entsprechen denen der RStO, Tafel Asphaltbauweisen, Zeile 1. Die übrigen Eingabegrößen (E-Moduln, Querkontraktionszahl, usw.) wurden wie in Tabelle 3-1 bzw. Ziffer 3.4 gewählt. Die Asphalt-schichtdicken der Ausgangssysteme wurden um jeweils $\pm 10\%$ bei gleichbleibender Dicke der ToB variiert. In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse der Berechnungen als absolute und relative Differenzen im Lastzentrum der Variationen zu den Ausgangssystemen zusammengefasst.

Die Unterschreitung der Sollschichtdicke um 10% , dies entspricht in etwa den gemessenen Unterschreitungen der Sollschichtdicke, vgl. Tabelle 5-2, bewirkt eine Zunahme der Deflexion im Lastzentrum von rund $7,5\%$, eine Überschreitung der Sollschichtdicke um 10% bewirkt eine Verringerung der Deflexion im Lastzentrum von rund $6,4\%$. Werden die in Tabelle 5-3 genannten Deflexionen im Lastzentrum als Grenzwerte für die jeweilige Bauklasse (nur gültig für die verwendeten Eingabegrößen!) angesehen, so ist zu erkennen, dass eine Asphalt-schichtdickenunterschreitung von 10% noch keinen Bauklassensprung bewirkt. Zum Beispiel heißt dies, dass die Deflexion im Lastzentrum auf einer Straßenbefestigung der Bauklasse III, deren Asphalt-schichtdicke um 10% unterschritten wird, eine bessere Tragfähigkeit besitzt als eine Bauklasse IV bei unveränderter (Soll-)Oberbaudicke ($241\ \mu\text{m} + 18\ \mu\text{m} < 273\ \mu\text{m}$). Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es sich hierbei um eine rein theoretische Betrachtung handelt, die aufgrund des fehlenden Bewertungshintergrundes von FWD Messergebnissen nicht verallgemeinert werden kann.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Mehrschichtenrechnung

		Bauklasse			
		I	II	III	IV
Deflexion im Lastzentrum		199 μm	217 μm	241 μm	273 μm
Differenz im Lastzentrum bei Veränderung der Asphalt-schichtdicke um	+10 %	-13 μm -6,4 %	-14 μm -6,4 %	-15 μm -6,4 %	-17 μm -6,2 %
	-10 %	15 μm 7,7 %	17 μm 7,6 %	18 μm 7,5 %	20 μm 7,2 %

Da die NWSIB Hinweise auf das Baustoffgemisch aller Schichten der Befestigung enthält, wurden die aus den Bohrkernuntersuchungen abgeleiteten Asphalt-sorten den Angaben der NWSIB gegenübergestellt. Bis auf eine Ausnahme entsprachen die

Angaben der NWSIB bzgl. der Asphaltarten den an den Bohrkernen bestimmten Asphaltarten.

5.1.3 Asphalt E-Modul Berechnungen

Wie in Ziffer 3.1.1 erläutert wurde, sind die mit dem FWD gemessenen Deflexionen von der Asphaltkörpertemperatur abhängig. Ursächlich hierfür ist die Temperaturabhängigkeit des Asphalt E-Moduls. Zur Untersuchung dieser Abhängigkeit wurden anhand der entnommenen Bohrkern Materialparameter für jede Asphalterschicht pro Strecke bestimmt, mit denen der temperaturabhängige Asphalt E-Modul rechnerisch abgeschätzt werden kann.

Für die Berechnung des Asphalt E-Modul wurde das Programm PRADO - *Program for Road Asphalt Mix Design and Optimization* - [12] verwendet. Die Berechnung des Asphalt E-Moduls in PRADO basiert auf der Theorie von FRANCKEN und VANELSTRAETE [19] und ist eine Weiterentwicklung der nur für Asphaltbetone mit reinem Bitumen gültigen Theorie von FRANCKEN und VERSTRAETEN [20][21]. Die Anwendbarkeit des Programms zur Berechnung von Asphalt E-Moduln wurde durch verschiedene Vergleiche mit empirisch ermittelten E-Moduln bestätigt [15][51].

Für jeden im Rahmen dieses Projektes untersuchten Streckenabschnitt wurde der E-Modul pro Schicht im Temperaturbereich von 0 bis 45 °C bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz berechnet. Die Ergebnisse sind in Anlage B-3 zusammengestellt. In Abbildung 5-1 sind exemplarisch die berechneten E-Moduln des Streckenabschnittes III-2 dargestellt. In der Regel verlaufen die berechneten E-Moduln der Streckenabschnitte wie folgt:

- E-Modul Größenordnung:
Deckschicht < Binderschicht < (obere und untere) Asphalttragschicht
- Mit zunehmender Temperatur nähern sich die E-Moduln der einzelnen Schichten einander an.

Bei einigen wenigen Streckenabschnitten liegt der E-Modul der Binderschicht über denen der Asphalttragschicht oder auf gleichem Niveau.

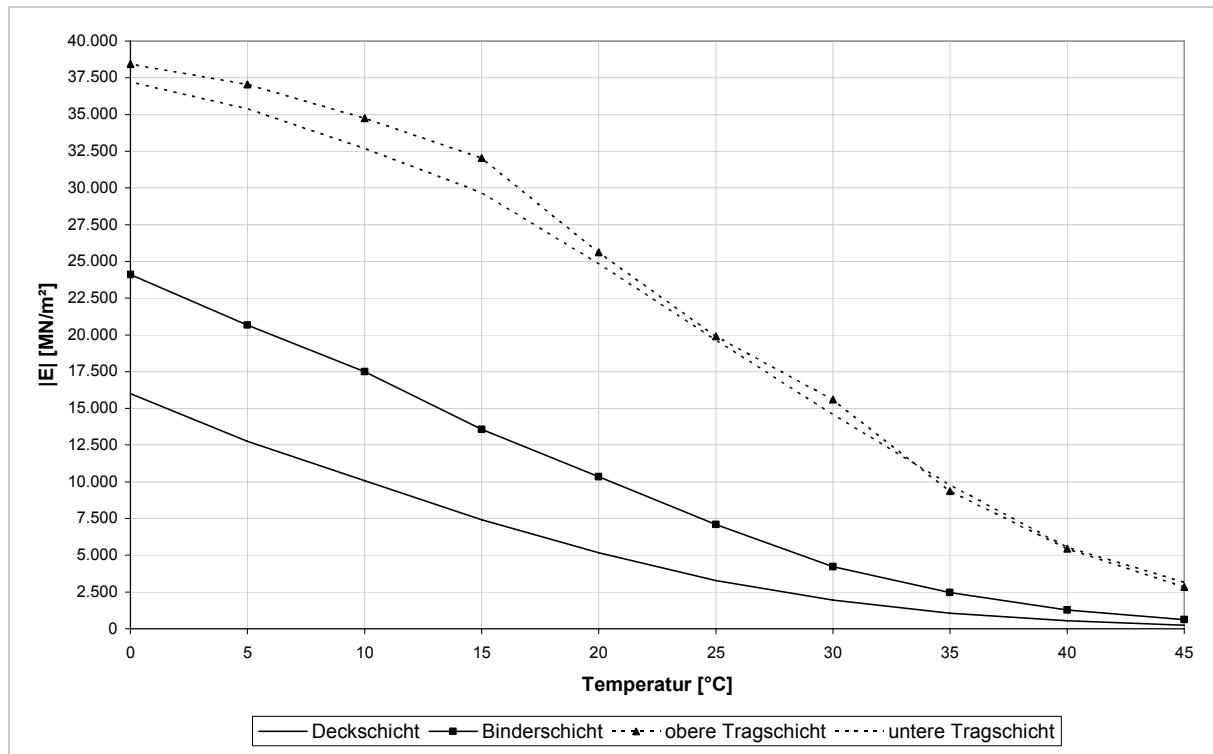


Abbildung 5-1: E-Modulverläufe einzelner Asphaltsschichten - Strecke III-2

In Abbildung 5-2 sind die Berechnungsergebnisse der Asphaltsschichten der Streckenabschnitte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der E-Modulverläufe einer Asphaltssorte teilweise groß ist. Die Streuung der E-Modulverläufe nimmt mit zunehmender Temperatur ab.

Die Streubreiten der E-Modulverläufe sind zum Teil direkt mit den Bitumenkennwerten „Erweichungspunkt Ring und Kugel“ sowie „Nadelpenetration bei 25 °C“ zu erklären. Es sind lineare Abhängigkeiten vorhanden. Aus den Streubreiten der E-Modulverläufe ist abzuleiten, dass, auch wenn die gleiche Asphaltssorte vorliegt, jeder Streckenabschnitt ein aus den E-Moduln abzuleitendes individuelles Verformungsverhalten aufweist.

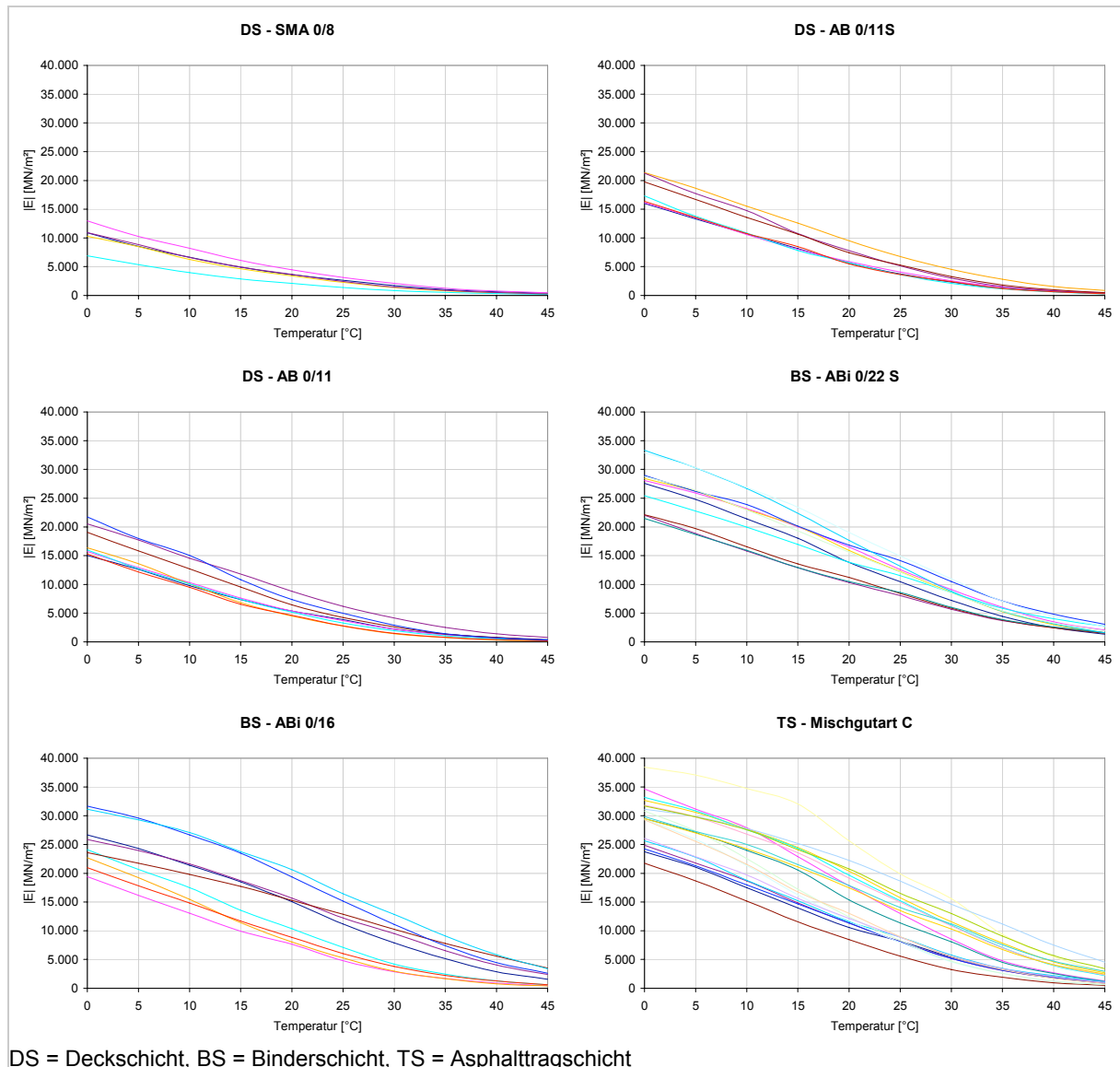


Abbildung 5-2: E-Modulverläufe der untersuchten Streckenabschnitte

5.2 Ergebnisse der Temperaturmessungen

Die Asphaltkörpertemperaturmessungen an den Temperaturmessstationen erfolgten im Jahr 2007 von Mitte April bis zum Ende des Jahres durchgehend. Im Jahr 2008 wurden die Messungen fortgesetzt. Die Temperaturmessstationen wurden über die Fertigstellung der vorliegenden Arbeit hinaus in Betrieb gehalten. Im Folgenden wird der Beobachtungszeitraum anhand der vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellten meteorologischen Daten beurteilt. Die vom DWD übermittelten meteorologischen Daten liegen als stündliche Werte vor. Sie wurden von April 2007 bis über die Fertigstellung dieser Arbeit hinaus bezogen.

Die an den Temperaturmessstationen gemessenen Asphaltkörpertemperaturen werden anhand des erfassten Messspektrums und anhand von Häufigkeitsverteilungen zusammengefasst. Mithilfe der vergleichenden Auswertung der Temperaturgradienten und Tagesganglinien erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Daten. Die hierdurch hergeleiteten Erkenntnisse werden mit vorhandenen Forschungsergebnissen abgeglichen. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Bohrlochtemperaturmessungen ausgewertet sowie die während der Durchführung gesammelten Erfahrungen zusammengefasst.

Die Temperaturmesswerte der Temperaturmessstationen wurden minütlich aufgezeichnet. So liegen für jede Messstation [1.440 Minuten pro Tag] · [8 Tiefenpositionen] = 11.520 Messwerte pro Tag vor. Zur besseren Verarbeitbarkeit der Messwerte bei generellen Betrachtungen wurden die viertelstündlichen Temperaturmesswerte herausgefiltert (768 Messwerte pro Tag). Diese Messwerte geben das Temperaturgeschehen ausreichend genau wieder:

- Innerhalb einer Minute ändert sich die Asphaltkörpertemperatur um circa max. $\pm 0,2$ °C.
- Innerhalb von 15 Minuten ändert sich die Asphaltkörpertemperatur an der Oberfläche in 98 % der Fälle um max. $\pm 2,0$ °C, ab einer Tiefe von 4 cm in 100 % der Fälle um max. $\pm 2,0$ °C.

Zur Darstellung und Auswertung von Ereignissen, die eine sehr kurzfristige Änderung der Asphaltkörpertemperaturen bewirken, z.B. ein Niederschlagsereignis, wurden die minütlich aufgezeichneten Werte verwendet.

5.2.1 Meteorologische Beurteilung

Zur Beurteilung der meteorologischen Daten des Beobachtungszeitraumes wurden die Daten der Referenzperiode 1961 bis 1990 des DWD an der Wetterstation Greven, vgl. Tabelle 4-3, verwendet. Die Referenzperiode, auch Normalperiode genannt, ist ein per Definition der *World Meteorological Organization* (WMO) auf jeweils 30 Jahre festgelegter Zeitraum, für den jeweils die monatlichen Mittelwerte meteorologischer Kenngrößen, bzw. die monatliche Niederschlagssumme, berechnet werden. Die derzeit aktuellste und abgeschlossene Normalperiode umfasst die Jahre 1961 bis 1990. Entsprechende Daten für die Wetterstation Werl, vgl. Tabelle 4-3, liegen nicht

vor. Die Niederschlagsdaten der Referenzperiode liegen zudem nur für die Wetterstation Steinfurt vor, die sich in kurzer Distanz zu der Wetterstation Greven befindet.

Die Daten der Referenzperiode und der im Jahr 2007 und 2008 aufgezeichneten Daten sind in Abbildung 5-3 gegenübergestellt:

- Lufttemperatur

Es ist zu erkennen, dass das Frühjahr 2007 deutlich zu warm war, während die meteorologischen Kenndaten des Jahres 2007 dem Durchschnitt der Referenzperiode entsprachen. Die durchschnittlichen Lufttemperaturen Anfang 2008 liegen im Januar und Februar deutlich über den Werten der Referenzperiode, entsprechen aber im März und April den nach der Referenzperiode zu erwartenden Temperaturen.

- Niederschlag

Während in den Monaten März und April 2007 deutlich zu geringe Niederschläge registriert wurden, lagen die monatlichen Niederschlagssummen in den Sommermonaten deutlich über denen der Referenzperiode. Im Oktober und November 2007 fiel weniger Niederschlag relativ zu der Referenzperiode. Im Januar 2008 fiel deutlich mehr, im Februar und April 2008 weniger Niederschlag relativ zu der Referenzperiode.

- Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer im Jahr 2007 lag im April deutlich über dem Wert der Referenzperiode und im Sommer 2007 darunter. In den übrigen Monaten 2007 bis 2008 entsprach die Sonnenscheindauer in etwa der Referenzperiode.

Die Darstellungen und Auswertungen der Daten der genannten Stationen entsprechen weitestgehend den Beobachtungen und Auswertungen des DWD der deutschlandweiten Wetteraufzeichnungen für diesen Zeitraum. Demnach war das Frühjahr 2007 deutlich zu trocken und zu warm, während der Sommer 2007 zu verregnet gewesen ist. Das restliche Jahr 2007 und der Anfang des Jahres 2008 entsprachen der durchschnittlichen Wetterlage für diese Jahreszeiten. Das Jahr 2007 war zudem das zweitwärmste Jahr seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnungen in Deutschland im Jahr 1901 [16], was auf den sehr milden Winter und den überdurchschnittlich heißen Monat April zurückzuführen ist.

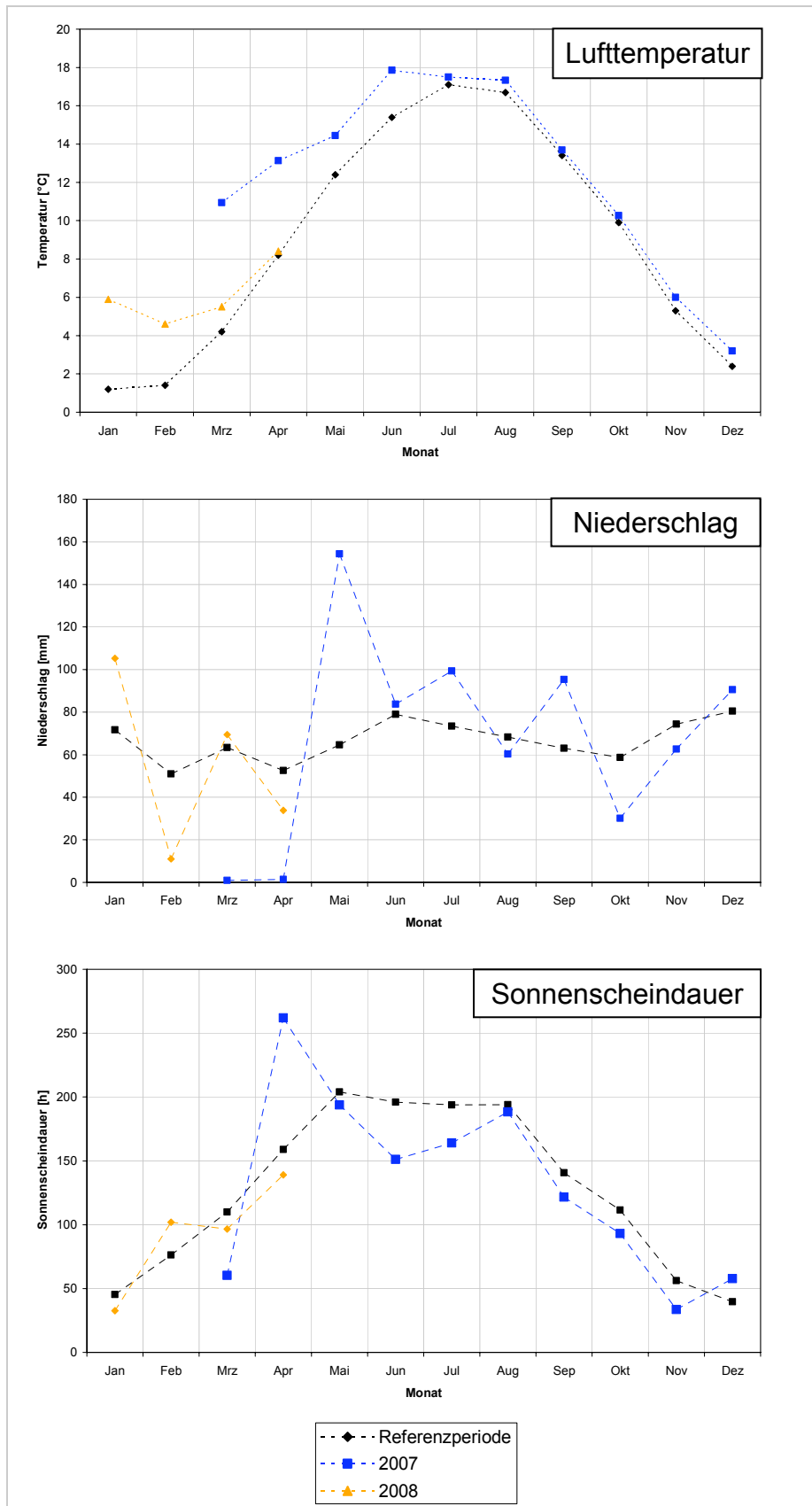


Abbildung 5-3: Vergleich meteorologischer Kenndaten aus 2007/08 zur Referenzperiode

5.2.2 Temperaturmessspektrum und Häufigkeitsverteilung

Zur Beurteilung des Messspektrums der Asphaltkörpertemperaturen im Beobachtungszeitraum wurden die Häufigkeitsverteilungen sowie Höchst- und Tiefsttemperaturen ausgewertet.

Die Häufigkeitsverteilung der von Ende März 2007 bis Ende März 2008 an der Temperaturmessstation Heek (Bauklasse III) gemessenen Asphaltkörpertemperaturen an der Oberfläche, in 5 cm und in 20 cm Tiefe, ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen an der Station Menden (Bauklasse I) ist ähnlich, so dass auf die Darstellung verzichtet wird. Die an den Stationen Heek und Menden gemessenen Höchst- und Tiefsttemperaturen im Zeitraum Ende April 2007 bis Ende April 2008 sind in Tabelle 5-4 zusammengestellt.

Aus der Häufigkeitsverteilung, Abbildung 5-4, ist zu erkennen, dass nur wenige Frosttage im Beobachtungszeitraum aufgetreten sind. Des Weiteren ist zu erkennen, dass nur wenige Tage mit hohen Temperaturen über 30 °C an der Oberfläche zu verzeichnen waren. Diese Beobachtungen decken sich mit den Meldungen des DWD, aus denen abzuleiten ist, dass eine stetige Aufheizung des Asphaltkörpers aufgrund der Abkühlung durch die häufigen Niederschlagsereignisse im Sommer 2007 nur selten möglich war.

Tabelle 5-4: Höchst- und Tiefstwerte (April 2007 – April 2008)

Tiefenposition	Minimum		Maximum	
	Heek	Menden	Heek	Menden
0 cm	-6,1 °C 22.12.2007 06:59h	-9,1 °C 22.12.2007 05:42 h	53,3 °C 15.07.2007 12:34:00h	51,8 °C * 08.06.2007 12:48 h
2 cm	-5,3 °C 22.12.2007 06:23h	-8,7 °C 22.12.2007 07:18 h	49,1 °C 15.07.2007 12:49h	47,8 °C * 08.06.2007 12:50 h
4 cm	-4,5 °C 22.12.2007 06:06h	-	45,9 °C 08.06.2007 13:57h	-
5 cm	-4,2 °C 22.12.2007 07:19h	-8,0 °C 22.12.2007 06:22 h	44 °C 08.06.2007 13:51h	43,8 °C 08.06.2007 13:16 h
7 cm	-4,1 °C 22.12.2007 08:04h	-7,3 °C 22.12.2007 07:30 h	41,2 °C 08.06.2007 14:28 h	41,5 °C 16.07.2007 16:16 h
9 cm	-3,5 °C 22.12.2007 07:52 h	-6,8 °C 22.12.2007 07:07 h	39,9 °C 08.06.2007 14:29 h	39,9 °C 16.07.2007 16:16 h
14 cm	-2,6 °C 22.12.2007 08:21 h	-6,3 °C 22.12.2007 08:35 h	36,5 °C 08.06.2007 14:51 h	36,8 °C 16.07.2007 16:20 h
20 cm	-1,9 °C 22.12.2007 08:54 h	-4,4 °C 22.12.2007 08:48 h	33,6 °C 16.07.2007 15:10 h	34,6 °C 16.07.2007 17:20 h
28 cm	-	-3,5 °C 22.12.2007 10:04 h	-	37,1 °C 19.04.2007 11:41 h

* = Die Station Menden ist am 15.07.2007 ausgefallen. Die an dieser Station maximal gemessenen Temperaturen wären daher am 15.07.2007 evtl. höher gewesen (vgl. Station Heek)

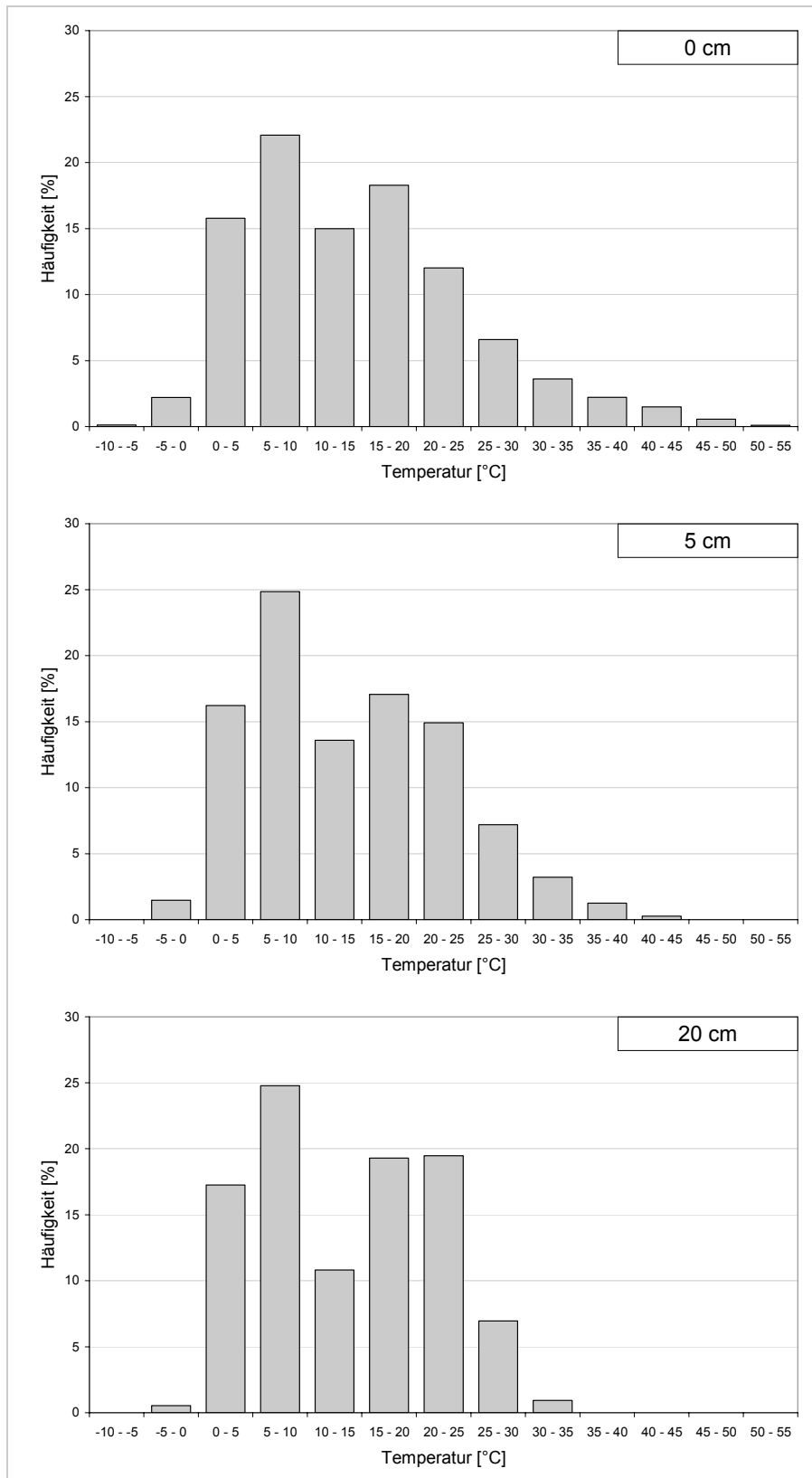


Abbildung 5-4: Häufigkeitsverteilung der in Heek gemessenen Asphaltkörpertemperaturen (30. März 2007 – 27. März 2008)

5.2.3 Temperaturgradienten, Ganglinien und Phasenverschiebung

Als Temperaturgradient wird der räumliche Temperaturunterschied bezeichnet, der durch einen mathematischen Gradienten beschrieben wird [58]. Für die Betrachtung

der Temperaturverteilung in einem Asphaltkörper kann die räumliche Betrachtung auf ein zweidimensionales Problem reduziert werden. Die Richtung des Temperaturgradienten unterscheidet positive und negative Temperaturgradienten. Für diese Arbeit wird definiert, dass im Falle eines positiven Temperaturgradienten die Temperatur an der Unterkante des Asphaltkörpers niedriger ist als die Oberflächentemperatur. Für den negativen Temperaturgradienten gilt die entsprechend umgekehrte Situation, vgl. Abbildung 5-5. Exemplarisch sind in Abbildung 5-6 Temperaturgradienten eines Sommertages, gemessen an der Temperaturmessstation Heek, dargestellt.

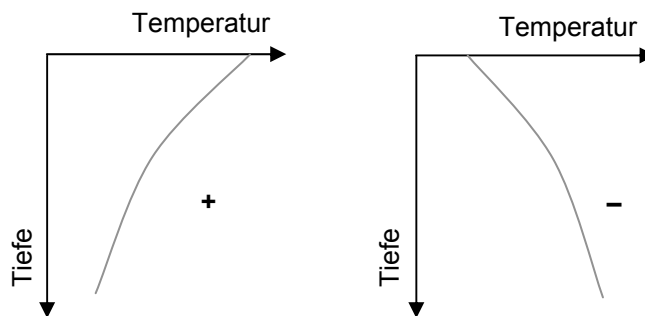


Abbildung 5-5: Positiver (links) und negativer (rechts) Temperaturgradient (idealisiert)

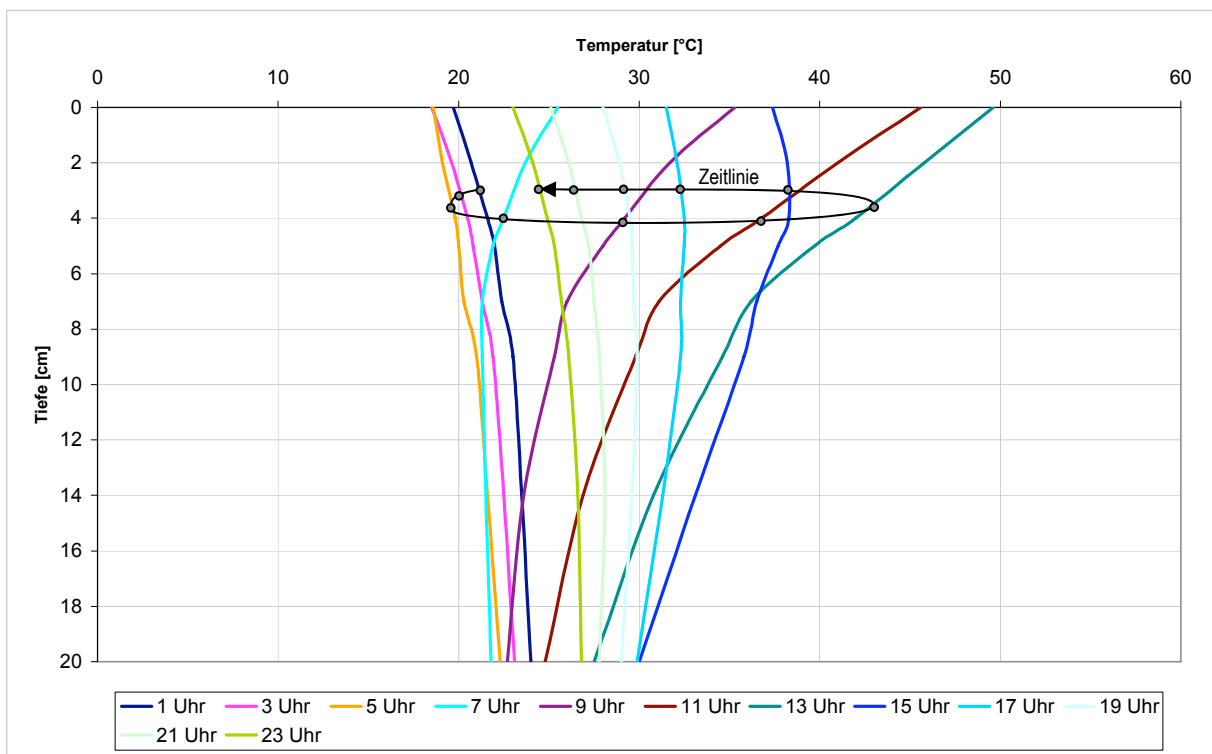


Abbildung 5-6: Temperaturgradienten an einem Sommertag, TMS Heek

Ganglinien beschreiben den zeitlichen Verlauf einer Messgröße, hier die Temperatur in einer bestimmten Tiefe. Je nach Darstellung können mithilfe der Ganglinien die Einflüsse von wechselndem Wetter in Form von Tagesganglinien untersucht werden

oder saisonale Einflüsse anhand einer Jahresganglinie identifiziert werden. Ganglinien können in zwei Tagesphasen eingeteilt werden: Aufheizphase und Abkühlphase. Die Aufheizphase beginnt mit Sonnenaufgang und endet in etwa mit dem Sonnenhöchststand [44]. Danach folgt die Abkühlphase, die über den Zeitpunkt des Sonnenunterganges hinausgeht, da der Asphaltkörper über die Nacht hinweg noch Wärmeenergie abgibt. Aus diesem Grund ist die Aufheizphase kürzer als die Abkühlphase.

Die an den Temperaturmessstationen gemessenen Temperaturen wurden in Verbindung mit den meteorologischen Daten und den Globalstrahlungsdaten ausgewertet. Dazu wurden u.a. alle Werte vergleichend als Ganglinien über die Zeit aufgetragen. Die so entstehenden Tagesganglinien der Oberflächentemperaturen konnten dabei zunächst augenscheinlich in drei verschiedene Grundtypen unterteilt werden, vgl. Abbildung 5-7. Für die anschließende zahlenmäßige Beschreibung dieser Unterteilung der Ganglinien in die Grundtypen wurden folgende Kennwerte verwendet:

- Tagesminimum der Oberflächentemperatur [max]
- Tagesmaximum der Oberflächentemperatur [min]
- absolutes Maximum der Erwärmung (= [max] - [min]) [deltaE]
- Summe der Tagessonnenscheindauer [Sonne]
- Summe der Tagesglobalstrahlungsleistung [Global]

Die Auswertung der Kennwerte ließ folgende Zusammenhänge erkennen:

- Typ 1 [Sonne] > 600 Minuten
Typ 1 beschreibt einen überwiegend sonnigen Tag mit klarem Himmel. Die eingetragene Energie heizt die Oberfläche auf. Aufheizphase und Abkühlphase sind klar voneinander zu unterscheiden.
- Typ 2 [Sonne] ≤ 600 Minuten und [deltaE] > 5 °C
Typ 2 beschreibt einen Tag mit sehr wechselhaftem Wetter. Kürzere Aufheizphasen und Abkühlphasen wechseln sich ab, der Tag lässt sich trotzdem in eine generelle Aufheizphase und Abkühlphase einteilen. Typ 2 lässt sich in zwei Untertypen einteilen:
 - Typ 2.1 [Sonne] ≥ 60 Minuten
Trotz wechselhaftem Wetter ist noch ausreichend direkte Sonneneinstrahlung vorhanden, um die Oberfläche deutlich aufzuheizen.

- Typ 2.2 [Sonne] < 60 Minuten und [Global] > 1.000 Wh/(m²·d)
Der Himmel ist überwiegend bedeckt. Der Anteil der diffusen Strahlung ist dennoch hoch genug um die Oberfläche deutlich aufzuheizen, obwohl weniger als 60 Minuten direkte Sonneneinstrahlung vorhanden sind.

- Typ 3 [deltaE] < 5 °C oder

[Sonne] < 60 Minuten und [Global] < 1.000 Wh/(m²·d)

Typ 3 beschreibt einen durchweg sehr bedeckten Tag. Die Oberfläche heizt sich kaum auf. Es kann in der Regel nicht zwischen Aufheiz- und Abkühlphase unterschieden werden.

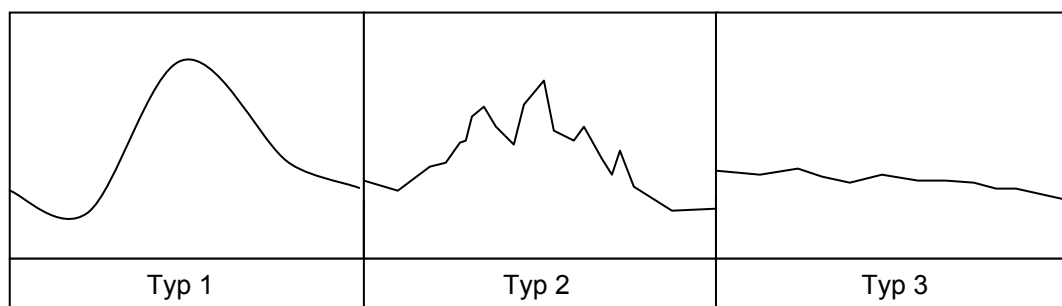


Abbildung 5-7: Grundtypen Tagesganglinien der Oberflächentemperatur

Den Tagen, die dem Ganglinientyp 1 entsprechen, sind in der Regel zugleich ein Wärmeenergiezuwachs in allen Tiefen am Tagesende gegenüber dem Tagesanfang zuzuordnen. Es findet also eine langfristige Aufheizung der Asphaltbefestigung statt. Einzelne Niederschlagsereignisse, wie im „zu feuchten“ Sommer 2007, mindern bereits den Wärmeenergiezuwachs in der Regel derart, dass keine Aufheizung stattfinden kann.

Als Beispiel sind in Abbildung 5-8 die Temperaturganglinien der 32. Kalenderwoche 2007 an der Temperaturmessstation Heek dargestellt. Es sind alle drei genannten Tagesganglinientypen zu erkennen.

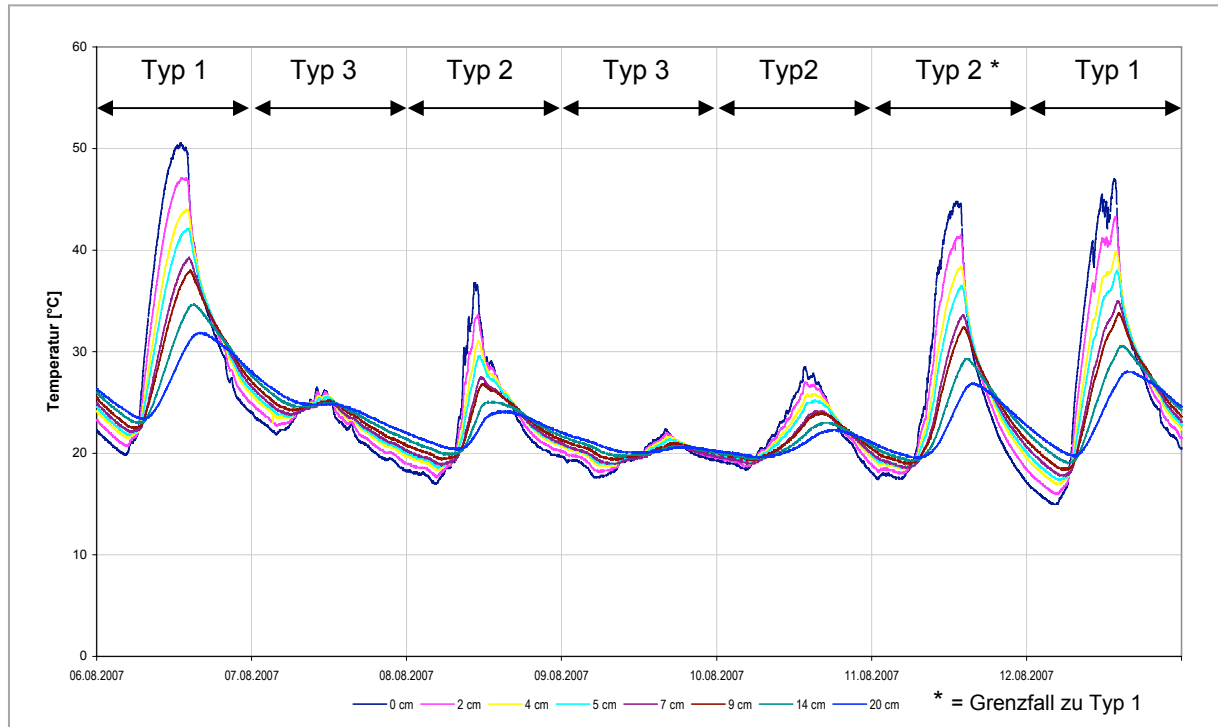


Abbildung 5-8: Tagesganglinien - 32. KW 2007 - Heek

Änderungen der Temperaturverhältnisse an der Oberfläche wirken sich verzögert und gedämpft auf die Temperaturen in der Tiefe aus. Die Verzögerung, hier **Phasenverschiebung** genannt, und die Dämpfung nehmen mit zunehmender Tiefe zu. Änderungen der Temperaturverhältnisse an der Oberfläche, die deutlich in den verschiedenen Tiefen zu erkennen sind, entstehen durch den Wechsel von Aufheiz- zur Abkühlphase und umgekehrt, durch Niederschlagsereignisse, vgl. Abbildung 5-9, und dichte Bewölkung.

Zur Beschreibung der Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Tiefe wurden die Tagesganglinien vom Ganglinientyp 1 innerhalb des Zeitraumes April bis Oktober 2007 ausgewertet. Dazu wurden die Zeitpunkte des Auftretens der maximalen und minimalen Temperatur, getrennt nach der Tiefe, bestimmt. Gleichzeitig konnten so die Zeitpunkte für den Beginn und das Ende der Aufheiz- sowie Abkühlphase ermittelt werden. Die Feststellung der Phasenverschiebung der Tagesganglinientypen 2 und 3, bei der sich Niederschlagsereignisse und aufziehende Bewölkung überlagern können, gelingt nicht, da hierfür genaueste Angaben über Zeitpunkte, Dauer und Grad der Bewölkung, bzw. des Niederschlagsereignisses erforderlich wären.

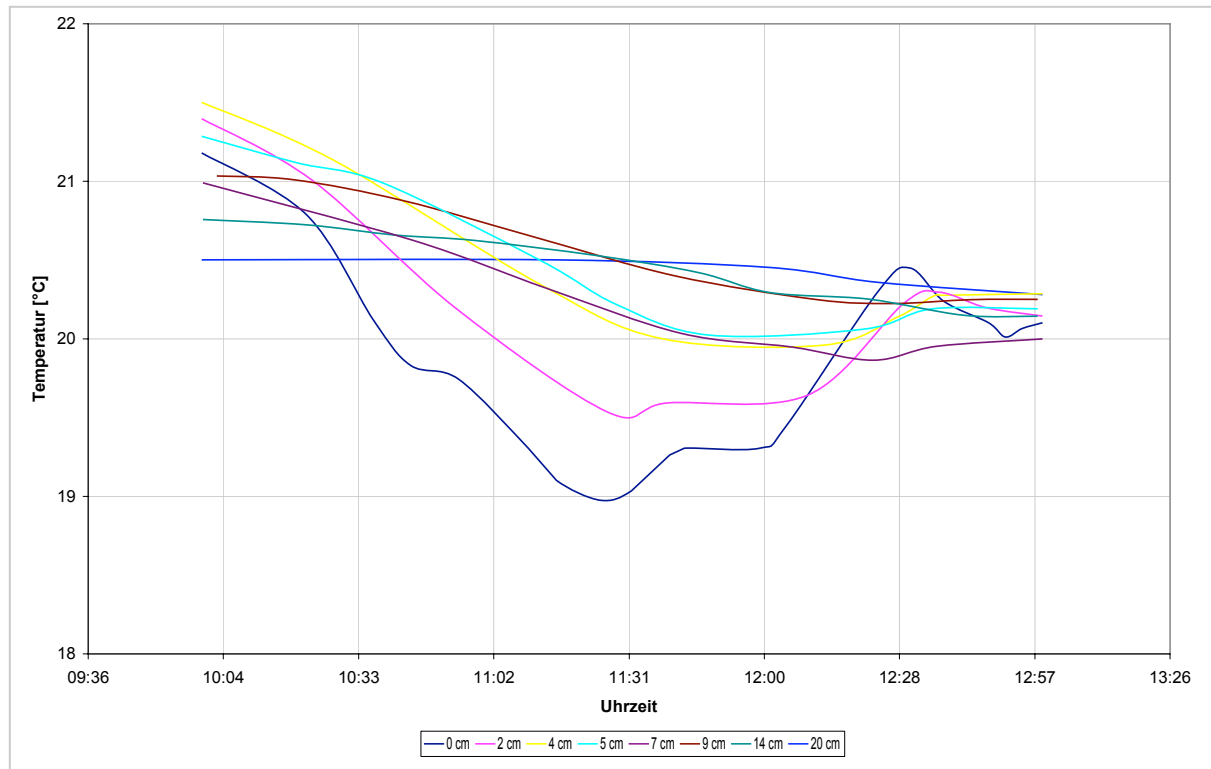


Abbildung 5-9: Temperaturganglinien in verschiedenen Tiefen nach Regenschauer, Heek, 14.06.2007

Die Phasenverschiebung wird hier beschrieben durch die Verzögerung der Temperaturänderung über die Tiefe hinweg als Einheit „Minute pro cm Tiefe“. Für die Temperaturmessstationen Heek und Menden wurden die Phasenverschiebungen zwischen den vorhandenen Sensorpositionen berechnet. Die so ausgedrückte Verzögerung streut teilweise sehr, es kann aber eine mittlere Verzögerung von circa 7 bis 10 Minuten pro cm Tiefe angenommen werden. Eine Temperaturänderung an der Oberfläche ist also nach circa 1,5 Stunden in 10 cm Tiefe feststellbar. Diese relativ kurze Zeitspanne überrascht insofern, da von SCHULTE [44] eine Zeitspanne zwischen 2,6 und 5,4 Stunden angegeben wurde, bestätigt jedoch auch die Aussage von SCHULTE, dass die Verzögerung erheblich von wärmespezifischen (z.B. Temperaturleitfähigkeit) und somit streckenspezifischen Materialparametern abhängig ist.

Der Beginn der Aufheizphase findet circa eine viertel Stunde nach dem Sonnenaufgang statt. Das Ende der Aufheizphase und somit der Beginn der Abkühlphase liegt circa eineinviertel Stunden nach dem Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes.

Plausibilitätsprüfung und Vergleich der Temperaturgradienten beider Temperaturmessstationen

Da Asphaltkörpertemperaturdaten von zwei nicht voneinander abhängigen Temperaturmessstationen vorliegen, können die Messdaten untereinander verglichen werden und somit eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden. Des Weiteren ermöglicht der Vergleich der Messdaten der beiden Temperaturmessstationen Aussagen zum Einfluss der verschiedenen Asphalt-schichtdicken auf die Asphaltkörpertemperatur zu treffen.

Nach SCHULTE [44] haben wärmespezifische Eigenschaften der einzelnen Oberbauschichten, deren Schichtkombinationen und Schichtdicken, einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung des Temperaturverlaufs und die Höhe der Temperaturen im Asphalt bei gleichen Randbedingungen. Anhand von Messdaten unmittelbar nebeneinander liegender Versuchsfelder, haben Untersuchungen von [44] und STRAUB et al. [47] ergeben, dass Abhängigkeiten der Asphalt-schichtdicke auf die Ausbildung des Temperaturgradienten nicht bzw. kaum feststellbar sind. Das heißt, dass auch bei verschiedenen Temperaturhöchstwerten, sich die Temperaturgradienten in der Asphalt-schicht unabhängig von der Asphalt-schichtdicke verhalten. So stellen STRAUB et al. anhand von zwei direkt nebeneinander liegenden Versuchsfeldern verschiedener Dicke fest, dass die Temperaturgradienten um max. 0,5 bis 1,0 °C voneinander abweichen.

Für eine Plausibilitätsprüfung der Messdaten der Temperaturmessstationen Heek und Menden werden die Temperaturganglinien vergleichend ausgewertet und das Zutreffen der o.g. Aussagen überprüft. Zudem wird überprüft, ob die in den USA hergeleitete Aussage von [47] zur Dickenunabhängigkeit des Temperaturgradienten anzuwenden ist. Bei den vergleichenden Auswertungen der Temperaturganglinien und -gradienten der Temperaturmessstationen Heek und Menden ist zu beachten, dass die Temperaturmessstationen 94 km Luftlinie voneinander entfernt liegen. D.h., dass auch bei gleicher Wetterlage mikroklimatische Unterschiede vorhanden sein können, die mit der verfügbaren Datenbasis nicht näher quantifiziert werden können.

Für die Plausibilitätsprüfung wurden Ganglinien beider Temperaturmessstationen gegenübergestellt, die dem Ganglinientyp 1 entsprechen. Durch die Beschränkung auf

diesen Ganglinientyp kann der Einfluss unterschiedlicher Wetterverhältnisse minimiert werden. In Abbildung 5-10 sind die Ganglinien in verschiedenen Tiefen während einer Schönwetterperiode vergleichend dargestellt. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die Form der Ganglinien beider Temperaturmessstationen in allen Tiefen übereinstimmt. Es werden zudem sehr ähnliche Höchst- und Tiefsttemperaturen erreicht. Die Messwerte der Temperaturmessstationen können somit als plausibel angenommen werden.

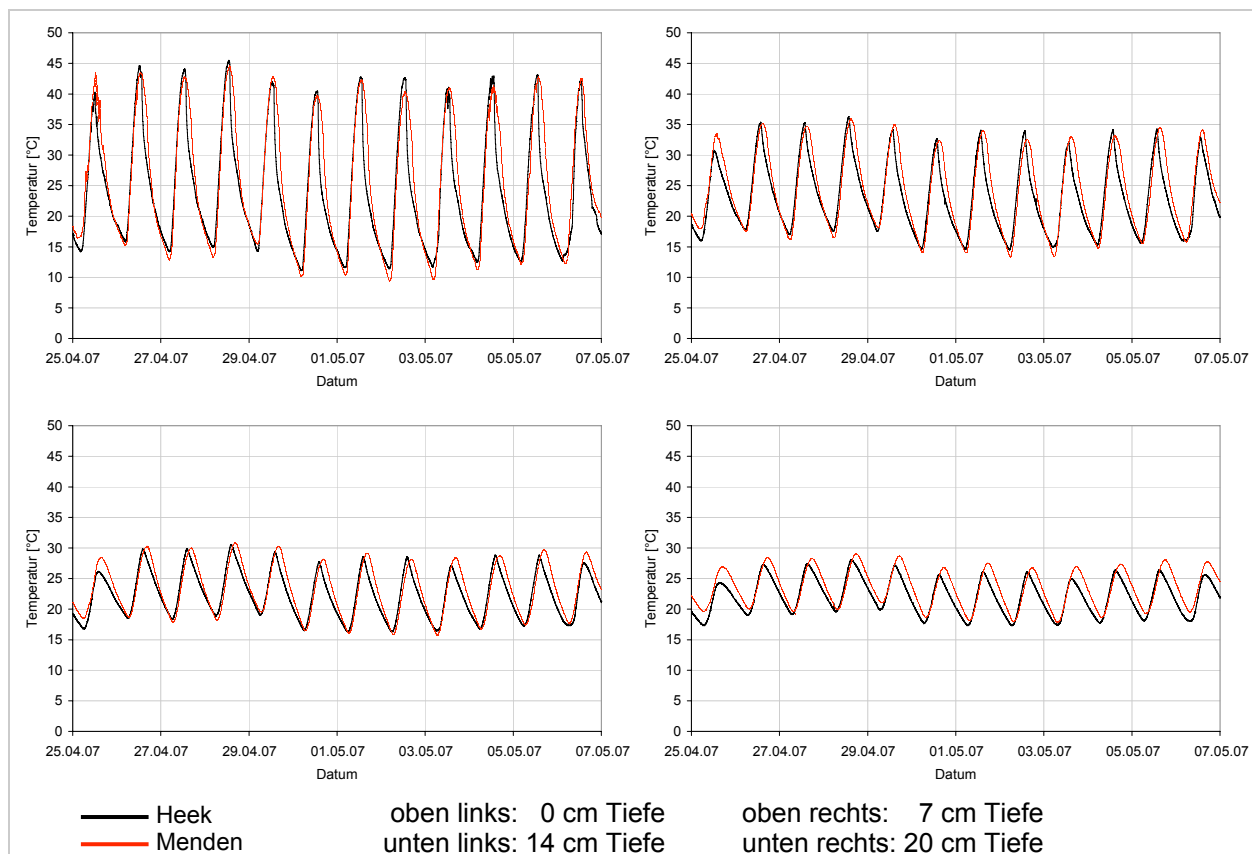


Abbildung 5-10: Vergleich der Tagesganglinien einer Schönwetterperiode

Nach [47] hat die Asphaltstichtdicke keinen Einfluss auf die Ausbildung des Temperaturgradienten. Zur Überprüfung dieser Aussage wurden die Temperaturgradienten beider Temperaturmessstationen miteinander verglichen. Hierzu wurden verschiedene Temperaturgradienten beider Temperaturmessstationen aus der Datenbasis (April 2007 bis Januar 2008) herausgesucht, die zur gleichen Zeit (stundengenau) bei gleicher Lufttemperatur (Stundenwert $\pm 0,5$ °C) die gleiche Oberflächentemperatur ($\pm 0,5$ °C) aufweisen. Die Auswahl dieser Kriterien orientiert sich dabei an den Umfelddaten, die in der Regel während FWD Messungen aufgenommen werden.

Anschließend wurden die Differenzen der so ausgewählten Temperaturgradienten zueinander berechnet und ausgewertet, vgl. Abbildung 5-11. Rund 61 % der 1074 ausgewerteten Temperaturgradienten der Stationen Heek und Menden weichen bei gleichen genannten Randbedingungen nicht mehr als 1,5 °C voneinander ab. Es ist zu beachten, dass Einflüsse, die aus der Entfernung der beiden Temperaturmessstationen und der verschiedenen Materialzusammensetzungen resultieren, bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt werden können.

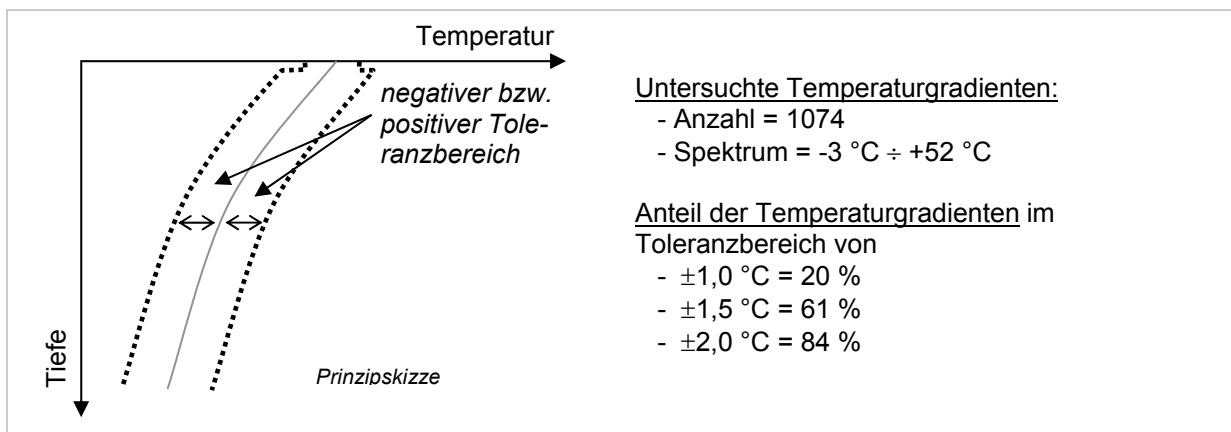


Abbildung 5-11: Auswertung gleicher Temperaturgradienten

Ergänzend wurden anhand der ausgewählten Temperaturgradienten die Asphaltkörpertemperaturen in den verschiedenen Messtiefen ausgewertet. Hervorzuheben ist dabei die Auswertung der Tiefenposition 20 cm, in der trotz der exponierten Lage im Falle der Bauklasse III (Unterkante Asphaltkörper) im Vergleich zur Bauklasse I (in etwa Unterkante 2/3 der Gesamtdicke) die Asphaltkörpertemperaturen in 68 % der Fälle nicht mehr als 1 °C voneinander abweichen.

Es kann gefolgert werden, dass bei gleichen Randbedingungen keine wesentlichen Unterschiede der Temperaturgradienten der beiden Temperaturmessstationen existieren. Die Aussage von STRAUB et al. [47], dass die Asphaltschichtdicke von Straßenbefestigungen keinen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung des Temperaturgradienten innerhalb der Asphaltschicht hat, kann somit bestätigt werden und generelle Aussagen zu Temperaturgradienten sind demnach für beide Stationen übertragbar, bzw. unabhängig von der Asphaltschichtdicke.

5.3 Ergebnisse der FWD Messungen

Wie unter Ziffer 4.5 erläutert, wurden im Rahmen dieser Arbeit FWD Messungen bei unterschiedlichen Asphaltkörpertemperaturen bzw. Jahreszeiten im unmittelbaren Bereich der Temperaturmessstationen (Punktmessungen) und auf 20 Streckenabschnitten verschiedener Bauklassen (Streckenmessungen) durchgeführt.

5.3.1 Punktmessungen

Für die Auswertung der Punktmessungen wurden die an der jeweiligen Temperaturmessstation gemessenen Asphaltkörpertemperaturen den FWD Messungen zum selben Zeitpunkt zugeordnet.

Die an der Temperaturmessstation Menden, Bauklasse I, durchgeführten FWD Messungen umfassen ein Temperaturspektrum von 4 bis 34 °C Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe. In Abbildung 5-12 sind die dort gemessenen Deflexionsmulden, getrennt nach Messpunkten, dargestellt.

Das Spektrum der Deflexionen im Lastzentrum beträgt am

- Messpunkt 1: $\Delta = 30 \mu\text{m}$ ($30 \mu\text{m} \div 60 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 2: $\Delta = 34 \mu\text{m}$ ($32 \mu\text{m} \div 66 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 3: $\Delta = 31 \mu\text{m}$ ($38 \mu\text{m} \div 69 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 4: $\Delta = 50 \mu\text{m}$ ($57 \mu\text{m} \div 107 \mu\text{m}$)

Die Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt beträgt im Mittel am

- Messpunkt 1 = 12 μm
- Messpunkt 2 = 13 μm
- Messpunkt 3 = 13 μm
- Messpunkt 4 = 10 μm .

Der prozentuale Temperatureinfluss auf die Deflexion im Lastzentrum beträgt am

- Messpunkt 1 = 62 %
- Messpunkt 2 = 64 %
- Messpunkt 3 = 69 %
- Messpunkt 4 = 64 %

bei einer Temperaturdifferenz von 25 °C (5 °C bis 30 °C), bezogen auf die Deflexion bei 30 °C.

Trotz annähernd gleicher Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt, also bei annähernd gleichen Untergrundverhältnissen und gleichem Aufbau, unterscheiden sich die Deflexionsmulden nahe dem Lastzentrum der Messpunkte 1 bis 3 in Menden deutlich von den Deflexionsmulden des Messpunktes 4 in Menden ohne sich auf den prozentualen Temperatureinfluss auszuwirken.

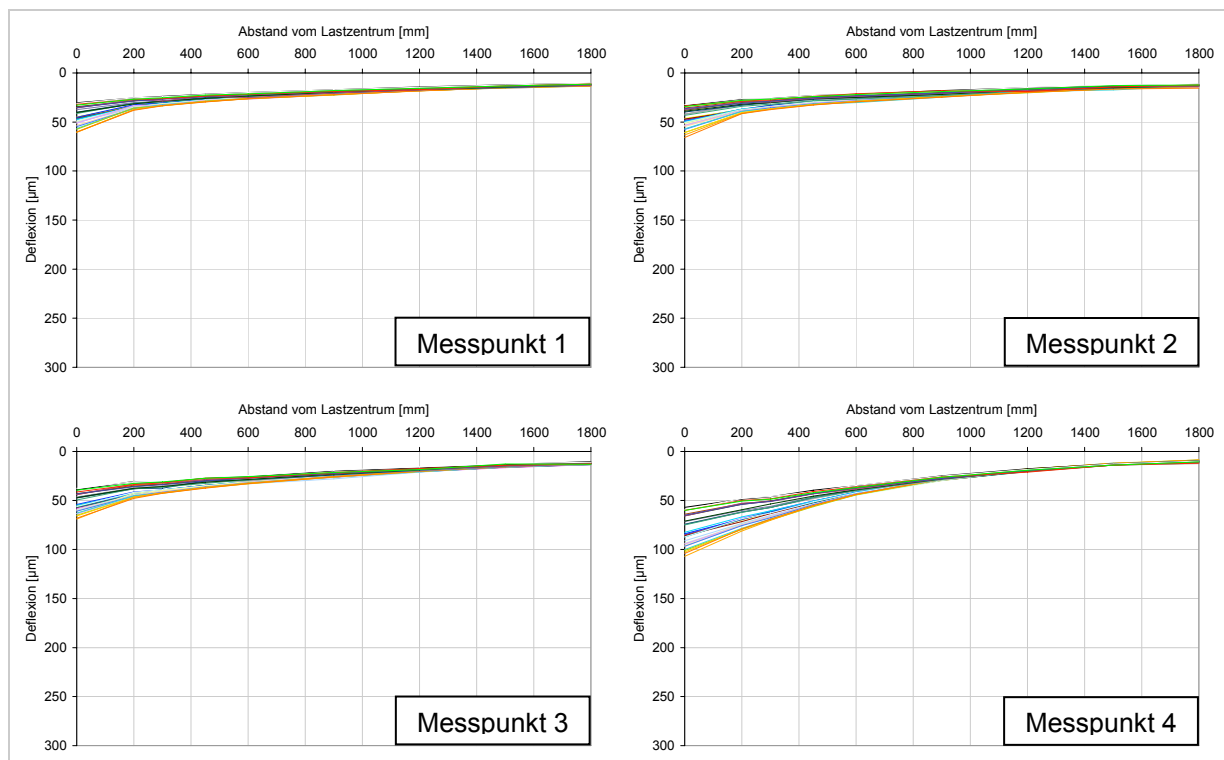


Abbildung 5-12: Deflexionsmulden Menden, Bauklasse I

Die an der Temperaturmessstation Heek, Bauklasse III, durchgeführten FWD Messungen umfassen ein Temperaturspektrum von 4 bis 35 °C Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe. In Abbildung 5-13 sind die dort gemessenen Deflexionsmulden, getrennt nach Messpunkten, dargestellt.

Das Spektrum der Deflexionen im Lastzentrum beträgt am

- Messpunkt 1: $\Delta = 118 \mu\text{m}$ ($174 \mu\text{m} \div 292 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 2: $\Delta = 132 \mu\text{m}$ ($170 \mu\text{m} \div 302 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 3: $\Delta = 95 \mu\text{m}$ ($161 \mu\text{m} \div 256 \mu\text{m}$)
- Messpunkt 4: $\Delta = 93 \mu\text{m}$ ($174 \mu\text{m} \div 267 \mu\text{m}$)

Die Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt beträgt im Mittel am

- Messpunkt 1 = 40 μm
- Messpunkt 2 = 38 μm
- Messpunkt 3 = 44 μm
- Messpunkt 4 = 43 μm .

Der prozentuale Temperatureinfluss auf die Deflexion im Lastzentrum beträgt am

- Messpunkt 1 = 66 %
- Messpunkt 2 = 63 %
- Messpunkt 3 = 70 %
- Messpunkt 4 = 72 %

bei einer Temperaturdifferenz von 25 °C (5 °C bis 30 °C), bezogen auf die Deflexion bei 30 °C.

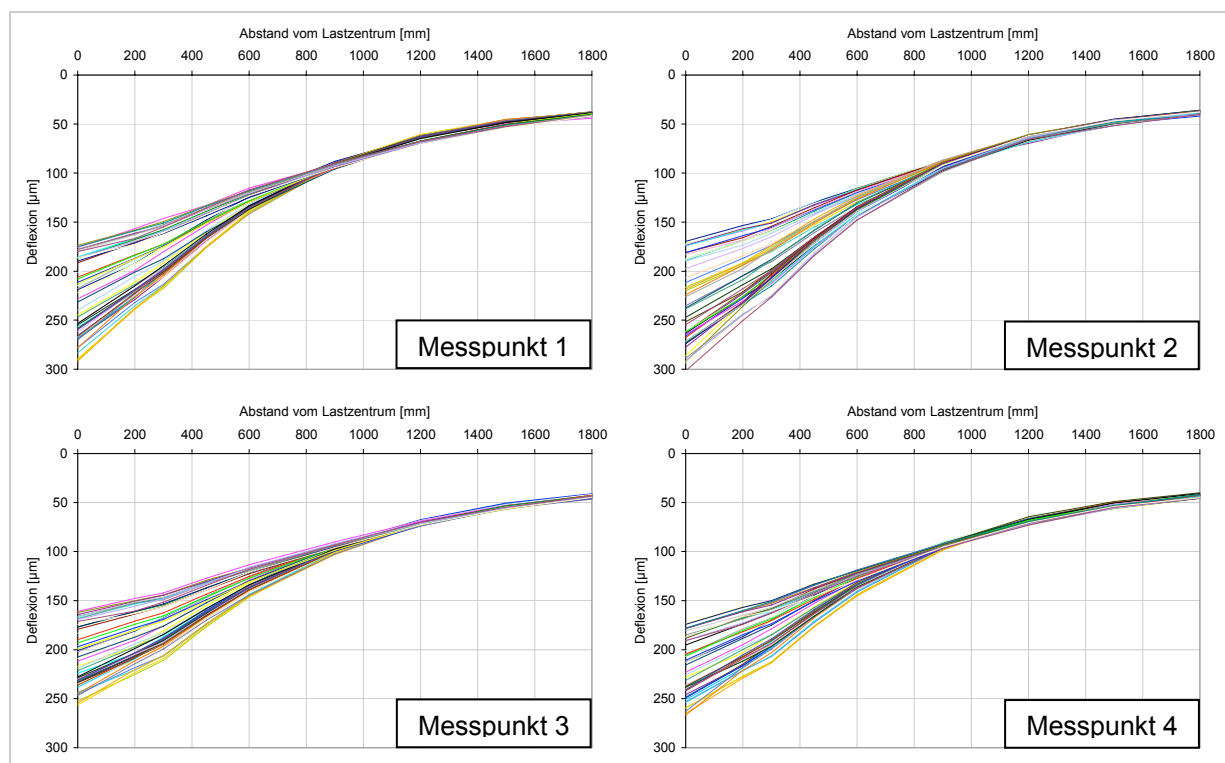


Abbildung 5-13: Deflexionsmulden Heek, Bauklasse III

Obwohl die Ausprägung und Form der Deflexionsmulden der beiden Stationen Heek und Menden sehr unterschiedlich ist, ist der prozentuale Einfluss der Asphaltkörpertemperatur annähernd gleich. Daraus ist für die Herleitung einer Temperaturkorrekturfunktion zu folgern, dass die Korrektur bauklassenunabhängig erfolgen kann. Der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexionsmulde verhält sich relativ zu

der Ausprägung der Deflexionsmulde. Dies kann bei der Temperaturkorrektur der Deflexionsmulde beispielsweise durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt werden.

Anhand der an der Station Heek gemessenen Deflexionsmulden ist deutlich (aufgrund der wesentlich größeren Deflexionen gegenüber Menden) der mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum abnehmende Einfluss der Asphaltkörpertemperatur zu erkennen.

5.3.2 Streckenmessungen

Die bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen an den 20 Streckenabschnitten der Bauklassen I bis IV gemessenen Deflexionsmulden wurden als Deflexionsmulden pro Messpunkt dargestellt und vergleichend ausgewertet. Eine Beurteilung der Tragfähigkeit ist aufgrund des fehlenden Bewertungshintergrundes nicht möglich.

Die Deflexionsmulden der Bauklassen I und II verlaufen bis auf wenige Ausnahmen nicht ausgeprägt, die Deflexionsmulden der Bauklassen III und IV beschreiben in der Regel hingegen eine typisch ausgeprägte Deflexionsmuldenform, vgl. Abbildung 5-14. Unabhängig von der Asphaltkörpertemperatur kann festgestellt werden, dass die Deflexionen im Lastzentrum in der Regel im Falle der

- Bauklasse I zwischen 50 μm und 100 μm
- Bauklasse II zwischen 100 μm und 150 μm
- Bauklasse III zwischen 150 μm und 250 μm
- Bauklasse IV zwischen 250 μm und 400 μm

liegen. Das Niveau der Deflexionsmulde und somit die Deflexion im Lastzentrum wird wesentlich beeinflusst von der Tragfähigkeit des Untergrundes/Unterbaues, vgl. Ziffer 3.4. Beispiele hierfür sind Streckenabschnitt II-3 (Deflexionen im Lastzentrum zwischen circa 200 μm und 250 μm) und die Streckenabschnitte III-3 bis III-5 (Deflexionen im Lastzentrum zwischen circa 50 μm und 100 μm) sowie einzelne Messpunkte des Streckenabschnitts IV-1 (Deflexionen im Lastzentrum weit unter 250 μm). Im Falle des Streckenabschnittes II-3 ist anhand der Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt ein, im Vergleich zu den anderen Streckenabschnitten, wenig tragfähiger Untergrund festzustellen, während im Falle der Streckenabschnitte III-3 bis III-5 und IV-1 eine relativ hohe Untergrundtragfähigkeit vorliegt. Des Weiteren können die genannten Ausnahmen teilweise zusätzlich anhand der berechneten Asphalt E-Moduln

erklärt werden. So ist der E-Modul der Deckschicht im Falle des Streckenabschnittes II-3 deutlich geringer als die übrigen E-Moduln der untersuchten Deckschichten der Bauklasse II. Die E-Moduln der Deck- und Binderschichten der Streckenabschnitte III-3 und III-4 sind deutlich höher als die der übrigen Streckenabschnitte der Bauklasse III.

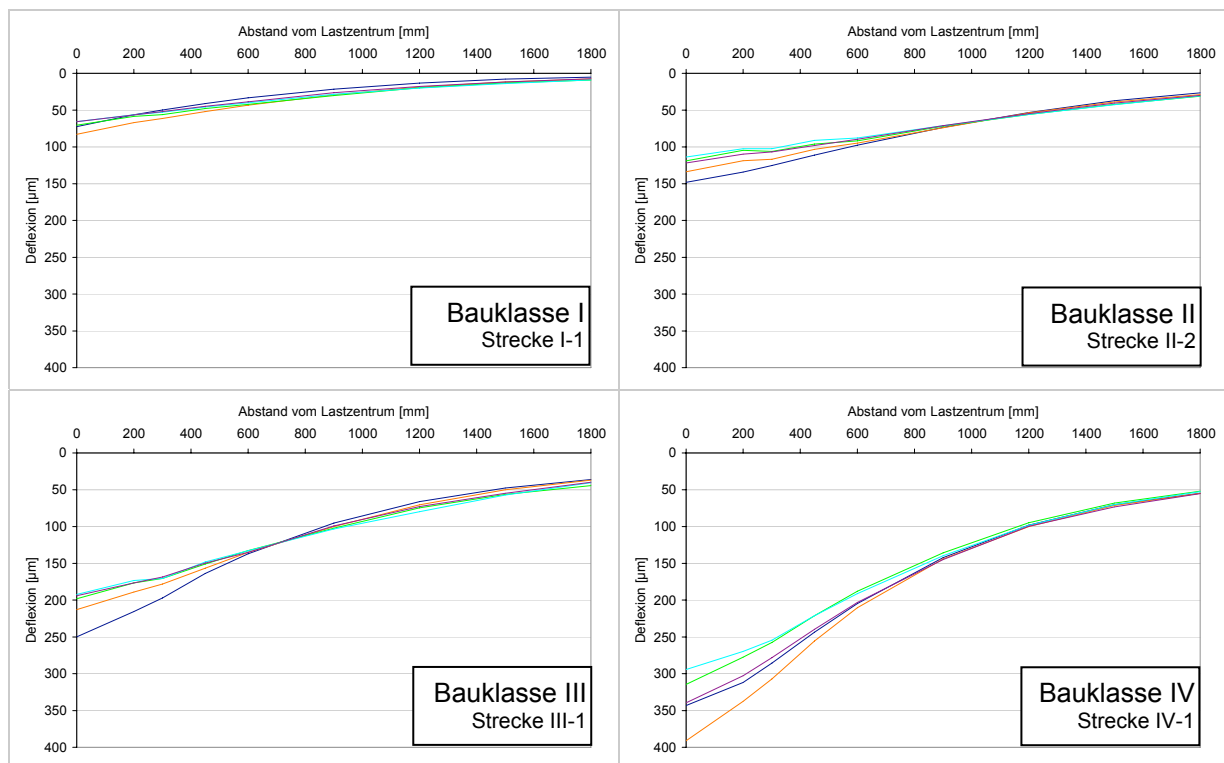


Abbildung 5-14: Deflexionsmulden verschiedener Bauklassen

Nach der von STRAUBE [48] durchgeführten Sensitivitätsuntersuchung, vgl. Ziffer 3.4, kann die Tragfähigkeit des Untergrundes/Unterbaues aus der Deflexion am letzten Geofon, 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt, abgeleitet werden. Für die Mindesttragfähigkeit des Untergrundes/Unterbaues, abgeleitet aus dem nach den RStO [41] geforderten statischen E-Modul auf dem Planum von 45 MN/m^2 , dies entspricht nach EISENMANN et al. [17] in etwa einem dynamischen E-Modul von $90 - 115 \text{ MN/m}^2$, kann als maximale Deflexion am letzten Geofon 70 µm angenommen werden. Dieser Grenzwert wird auf allen Streckenabschnitten an allen Messpunkten nicht überschritten. Die Untergründe/Unterbaue aller betrachteten Streckenabschnitte sind demnach ausreichend tragfähig. Bei der vergleichenden Darstellung aller Deflexionen am letzten Geofon, getrennt nach Bauklassen, vgl. Abbildung 5-15, ist zu erkennen, dass bis auf wenige Ausnahmen die Deflexionen am letzten Geofon mit abnehmender Bauklasse zunehmend sind, also die Tragfähigkeit des Untergrundes/Unterbaues ab-

hängig von der Bauklasse des Oberbaues scheint. Erklärungen für diese Beobachtung können nicht aus Anforderungen der Regelwerke oder aus der Bautechnik abgeleitet werden. Es ist daher anzunehmen, dass die höhere Tragfähigkeit des Untergrundes/Unterbaues der höheren Bauklassen auf die Nachverdichtung des Untergrundes/Unterbaues durch das bauklassenabhängige Eigengewicht des Oberbaues und der höheren Verkehrsbelastung zurückzuführen ist.

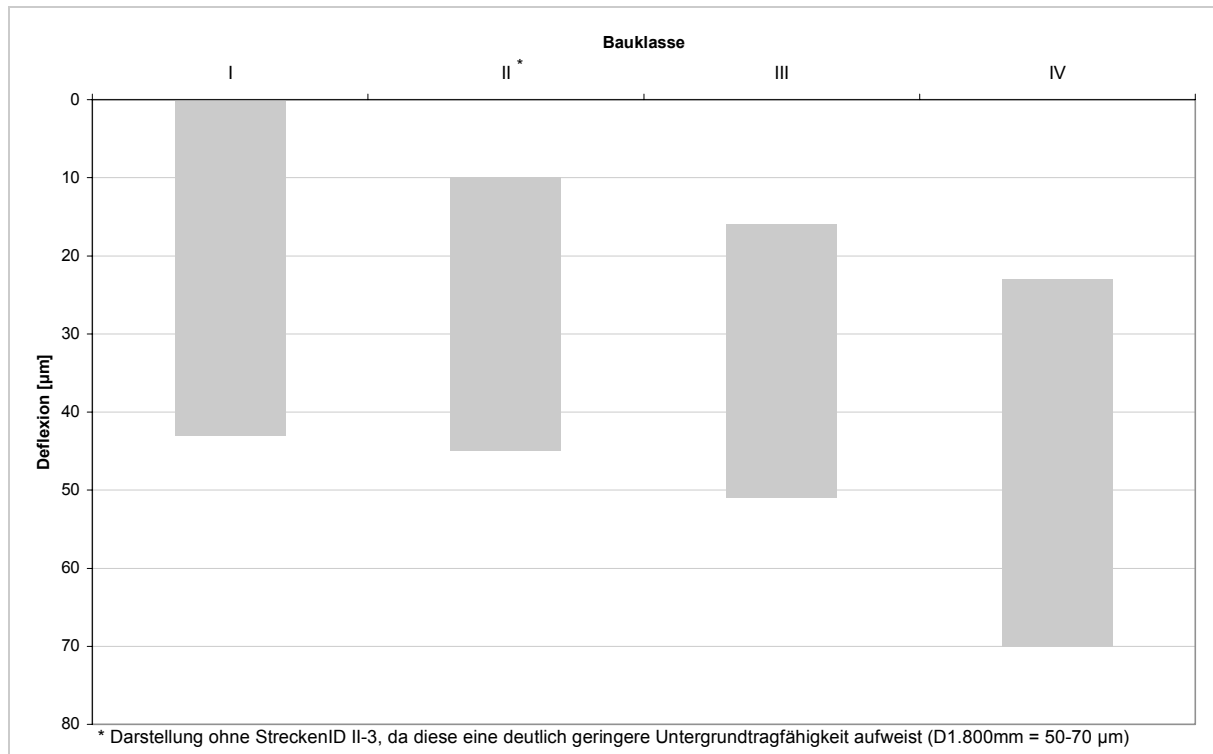


Abbildung 5-15: Spannweiten der Deflexionen am letzten Geofon

5.4 Ergebnisse der Bohrlochtemperaturmessungen

Die Kenntnis der aktuellen Asphaltkörpertemperatur ist für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen unerlässlich. Die Messung der Asphaltkörpertemperatur kann den Ablauf von FWD Messungen unter anderem aus folgenden Gründen erheblich stören:

- Es müssen ein oder mehrere Löcher in den Asphalt eingebracht werden, was je nach Bohrlochtiefe(n), Asphaltzusammensetzung und –temperatur zeitintensiv sein kann und erhöhte Anforderungen an die eingesetzten Werkzeuge stellen kann.
- Wartezeiten nach dem Bohrvorgang müssen eingehalten werden, damit die durch den Bohrvorgang erzeugte Reibungshitze abgebaut wird.

Im Folgenden werden daher Alternativen zur Bohrlochmessung diskutiert und die Ergebnisse der im unmittelbaren Bereich der Temperaturmessstationen durchgeführten Bohrlochmessungen dargestellt und ausgewertet. Des Weiteren werden Hinweise zur Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen im Rahmen von FWD Messungen gegeben, die aus den Erkenntnissen der durchgeführten Bohrlochtemperaturmessungen abgeleitet werden konnten.

5.4.1 Alternativen zu Bohrlochtemperaturmessungen

In der Literatur finden sich Ansätze, die für die Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur meteorologische Daten und Oberflächentemperaturen verwenden und somit auf die Messung der Temperatur im Asphaltkörper verzichten, vgl. [8][9][13][30][31][35][40][44]. Zu nennen sind hierbei vor allem zwei Ansätze; das Differenzenverfahren, da es auf der theoretischen Auswertung physikalischer Zusammenhänge beruht, und die BELLS3-Methode, da sie empirisch hergeleitet wurde und im US amerikanischen ASTM Normenwerk [6] verankert ist. Im Folgenden wird geprüft, in wieweit diese Ansätze für die Anwendung im Rahmen von FWD Messungen geeignet sind.

Das Differenzenverfahren wertet die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeübertragung aus. Das Verfahren und die notwendigen physikalischen Grundlagen des Wärmetransports werden unter anderem in [1] und [59] beschrieben und sind in Anlage C-1 und Anlage C-2 zusammengefasst. Das Verfahren ist für die Anwendung im Rahmen von FWD Messungen nur bedingt geeignet, da sowohl materialspezifische Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte der Oberbauschichten bekannt sein müssen und darüber hinaus für die Berechnung von Asphaltkörpertemperaturen ein Anfangstemperaturprofil bekannt sein muss, das entweder abgeschätzt oder in situ gemessen wird.

Die BELLS3-Methode wird in [6] und [8] beschrieben und ist in Anlage C-3 zusammengefasst. Das Verfahren wurde für die Anwendung im Rahmen von FWD Messungen entwickelt. Mithilfe der BELLS3-Methode können Asphaltkörpertemperaturen in frei wählbarer Tiefe berechnet werden. Als Eingangsdaten für die Berechnung werden lediglich die Tageszeit, die aktuelle Oberflächentemperatur und die mittlere Lufttemperatur des Vortages benötigt.

Die Bestimmung der Temperatur in einer bestimmten Tiefe eines Asphaltkörpers mithilfe der Oberflächentemperatur, ohne Temperaturmessung im Asphaltkörper selber, ist immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden, da die Oberflächentemperatur kurzzeitigen Wiedereinflüssen unterworfen ist, die bereits in geringer Asphaltkörpertiefe vollständig gedämpft werden können. Zur Verdeutlichung der Problematik wurden aus der Datenbasis der Temperaturmessstellen Heek und Menden sehr unterschiedliche Temperaturgradienten herausgesucht, deren für die Berechnung nach der BELLS3-Methode erforderlichen Randdaten (Oberflächentemperatur, mittlere Temperatur des Vortages, Tageszeit) jedoch gleich sind. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-16 dargestellt. Ohne die nach der BELLS3-Methode berechneten Temperaturen den gemessenen Gradienten gegenüberzustellen, wird deutlich, dass Berechnungsverfahren, die ohne direkte Messung der Asphaltkörpertemperatur in mindestens einer Tiefe auskommen, bereits in geringer Tiefe unterhalb der Oberfläche Berechnungsfehler erzeugen können.

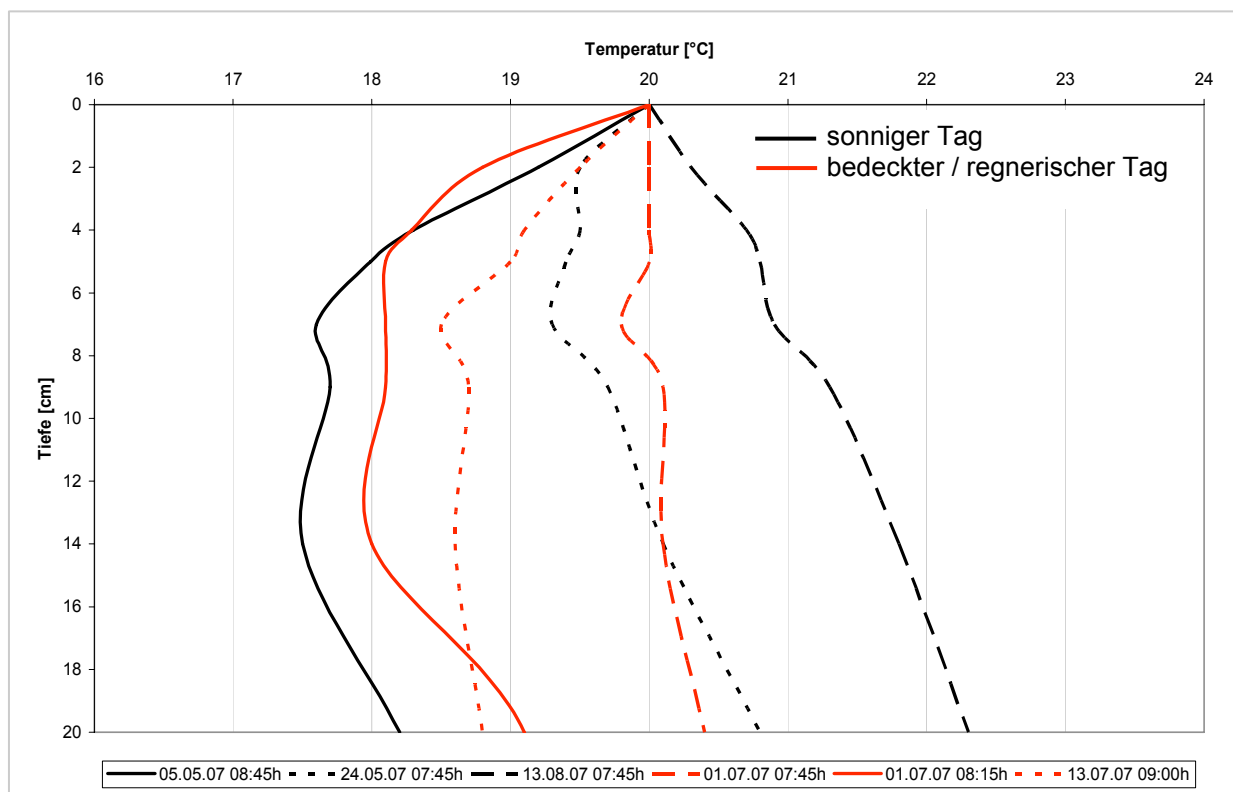


Abbildung 5-16: Bei gleichen Randdaten (vgl. BELLS3) gemessene Temperaturgradienten

5.4.2 Ergebnisse einer Umfrage unter FWD Betreibern

Für die Durchführung einer internationalen Umfrage unter FWD Betreibern, wurde ein Fragebogen formuliert und an die „FWD User’s Group“ [23] verschickt. Dort wurde

der Fragebogen an die Mitglieder der „FWD User’s Group“ per e-Mail verteilt. Für die nationale Umfrage wurden die deutschen FWD Betreiber direkt angeschrieben. Insgesamt wurde die Umfrage von 28 Betreibern beantwortet. Die Mehrzahl der Betreiber stammt aus den USA und Kanada und ist öffentlichen bzw. staatlichen Einrichtungen zuzuordnen. Obwohl im US amerikanischen Regelwerk für die Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur bei FWD Messungen die BELLS3 Methode verankert ist, wird von einer Vielzahl der dortigen Betreiber die Asphaltkörpertemperatur im Bohrloch gemessen. Dabei werden oft relative Vorgaben für die Bohrlochtiefe umgesetzt (z.B. „in einem Drittel der Asphaltenschichtdicke“). Die Messungen erfolgen in der Regel nur in einer Tiefe unter Verwendung von Wasser oder Öl als Kontaktmittel. In den wenigsten Fällen wird das Bohrloch an der Oberseite vor Luftzutritt, z.B. durch Klebeband, geschützt. Die Teilnehmer der Umfrage geben sehr unterschiedliche Wartezeiten von wenigen Sekunden bis zu 15 Minuten an für die Abkühlung des durch den Bohrvorgang aufgeheizten Asphaltes. Die Hälfte der im Bohrloch messenden FWD Betreiber verwendet keine feste Wartezeit, sondern wartet solange, bis eine konstante Ablesung am Thermometer möglich ist. Die meisten FWD Betreiber gaben an, dass die Asphaltkörpertemperaturmessungen im Bohrloch in zeitlich oder örtlich festgelegten Intervallen wiederholt werden, oder wenn sich die Umfeldbedingungen (Beschattung) ändern. Die detaillierten Fragen und Ergebnisse der Umfrage finden sich in Anlage C-4.

5.4.3 Ergebnisse der Bohrlochtemperaturmessungen

Die Bohrlochtemperaturmessungen an den Temperaturmessstationen Heek und Menden wurden bei verschiedenen Witterungen und Lufttemperaturen durchgeführt. Als Referenz zu den Temperaturen im Bohrloch wurden die Daten der Temperaturmessstationen verwendet. Die Messungen erfolgten jeweils in einem 5 cm tiefen Bohrloch mit einem Durchmesser von 8 mm. Weitere Messungen erfolgten in 5 cm tiefen Nagellöchern (Durchmesser: 9 mm), die im Folgenden auch als Bohrlochmessungen bezeichnet werden, bzw. wenn nötig kenntlich gemacht werden.

Zunächst wurde überprüft, ob die Verwendung eines flüssigen Kontaktmittels Einfluss auf die Messung besitzt. Hierzu wurden drei Löcher nebeneinander in den Asphalt gebohrt. In ein Loch wurde Wasser, in eins Silikonöl eingefüllt. Dabei wurde jeweils nur eine geringe Menge eingefüllt, so dass das Loch nur im unteren Drittel gefüllt ist. Das dritte Bohrloch wurde trocken belassen. Es konnte festgestellt werden, dass in

allen drei Bohrlöchern sich nach einer einheitlichen Wartezeit von 15 Minuten in der Regel dieselbe Temperatur (Toleranz $\pm 0,5$ °C, entspricht der Genauigkeit der eingesetzten Thermometer) einstellt, vgl. Tabelle 5-5. Die weiteren Bohrlochtemperaturmessungen wurden daher im trockenen Bohrloch durchgeführt.

Tabelle 5-5: Temperatur nach 15 Minuten Wartezeit mit und ohne Kontaktflüssigkeit

Messung ID	Lufttemperatur [°C]	Lochart	Kontaktflüssigkeit		trockenes Loch [°C]
			Wasser [°C]	Silikonöl [°C]	
1	5	Nagelloch	4,9	-	4,9
2	7	Bohrloch	12,6	13,1	12,4
3	7	Nagelloch	6,2	-	6,1
4	8	Bohrloch	12,0	12,0	12,6
5	8	Bohrloch	13,8	13,4	13,3
6	9	Bohrloch	14,5	14,7	15,1
7	9	Bohrloch	10,2	9,9	10,4
8	12	Nagelloch	12,8	-	12,4
9	14	Nagelloch	18,2	-	18,3
10	17	Nagelloch	20,5	-	20,6
11	17	Nagelloch	24,4	-	24,6
12	24	Bohrloch	38,2	37,1	38,3

Anschließend wurde anhand von Temperaturmessungen im trockenen Bohrloch ausgewertet, nach wie viel Minuten Wartezeit die Referenztemperatur der TMS ($\pm 1,0$ °C, gemäß [3]) erreicht wird. Dabei wurde zunächst überprüft, ob die Steigung der Referenztemperatur innerhalb eines 15 Minuten Intervalls zu den jeweiligen Messzeitpunkten maximal $\pm 0,1$ °C/Minute betrug. Die Ergebnisse sind somit untereinander vergleichbar und Messungenauigkeiten der verschiedenen Thermometer (innerhalb der vom Hersteller benannten und vorab im Wasserbad bei verschiedenen Temperaturen überprüften Toleranzen) beeinflussen nicht die Auswertungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Die Wartezeiten sind unterschiedlich und reichen von 0 bis 15 Minuten. Eine Systematik ist nicht festzustellen. Auf die Angabe einer konkreten Mindestwartezeit wird daher verzichtet. Allen Messergebnissen gleich ist, dass die im Bohrloch gemessene Temperatur nach Ablauf der Wartezeit weiterhin der Referenztemperatur entspricht. Die Wartezeit kann somit in situ bestimmt werden, in dem die zeitliche Änderung der am Thermometer angezeigten Temperatur überprüft wird. Die Messdaten wurden dahingehend ausgewertet, mit dem Ergebnis, dass die Wartezeit (Abkühlzeit) ermittelt werden kann, wenn sich im Bohrloch innerhalb von zwei Minuten die am Thermometer abgelesene Temperatur nicht mehr als um $0,2$ °C ändert (der zuletzt abgelesene Wert ist dann maßgebend).

Der Einsatz von Temperaturdatenloggern gehört zum Stand der Technik bei der Messung der Asphaltkörpertemperatur während FWD Messungen, vgl. beispielsweise die unter Ziffer 4.5.2 beschriebene eingesetzte mobile Temperaturmessstation. Der Einsatz eines Datenloggers erlaubt es, den Verlauf der Asphaltkörpertemperatur kontinuierlich aufzuzeichnen. Da vermutet wurde, dass die in das Bohrloch eintretende Luft die Temperaturverhältnisse im Bohrloch beeinflusst, wurde mithilfe von Langzeitmessungen untersucht, ob der Verlauf der Asphaltkörpertemperatur mithilfe der Bohrlochmessung ausreichend dokumentiert werden kann. Des Weiteren wurde überprüft, ob ein „altes“ Bohrloch wieder verwendet werden kann und ob Unterschiede zwischen einem abgeklebten und offenen Bohrloch festzustellen sind. Die Langzeitmessungen wurden dabei für jeweils maximal zwei Stunden durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass bei einer stündlichen Messleistung des FWD von rund 50 Messpunkten und einem Messpunktabstand von 25 m innerhalb von zwei Stunden eine Strecke von circa 2,5 km zurückgelegt wird und somit die Rückkehr zum Bohrloch danach mehr Zeit beanspruchen würde, als ein neues Bohrloch anzulegen. Des Weiteren können circa zwei Stunden Verweildauer für FWD Messungen innerhalb eines rund ein Kilometer langen Erhaltungsabschnittes (beide Fahrtrichtungen) eingeplant werden. Die Langzeitmessungen haben gezeigt, dass die Verwendung eines offenen Bohrlochs bis zu zwei Stunden nach der Bohrung möglich ist. Unterschiede zwischen dem abgeklebten und offenen Bohrloch sind nicht festzustellen. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Thermometerfühler wenige Minuten Zeit brauchen, bis sie die Asphaltkörpertemperatur angenommen haben und eine konstante Ablesung möglich ist, wenn sie zwischenzeitlich aus dem Bohrloch entfernt wurden.

Zur Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen finden sich in Anlage C-5 Hinweise, welche die gesammelten Erfahrungen wiedergeben.

Tabelle 5-6: Wartezeiten (Abkühlzeiten) bis zum Erreichen der Referenztemperatur

Messung ID	Referenztemperatur [°C]	Lochart	trockenes Loch [Minuten]
A	5	Nagelloch	3
B	6	Nagelloch	1
C	6	Nagelloch	2
D	12	Nagelloch	5
E	12	Nagelloch	5
F	14	Bohrloch	0
G	14	Bohrloch	7
H	16	Bohrloch	5
I	18	Nagelloch	11
J	19	Bohrloch	3
K	20	Nagelloch	1
L	24	Nagelloch	1
M	24	Bohrloch	0
N	28	Bohrloch	15

6 Auswertung und Bewertung hinsichtlich Temperaturkorrektur

Für die quantitative Beschreibung des Einflusses der Asphaltkörpertemperatur auf die mit dem FWD gemessene Deflexionsmulde sollte idealerweise der vollständige Temperaturgradient im Asphaltkörper bekannt sein. Genaue Temperaturmessungen sind nur möglich, wenn keine Beeinflussung der Asphaltkörpertemperatur durch die Messung und Messvorbereitung selber erfolgt. Dies ist theoretisch nur mit, in einem ausreichend großen zeitlichen Abstand vorher, fest in dem Asphaltkörper installierten Temperatursensoren möglich. Dies ist im Rahmen von FWD Messungen in der Regel nicht ausführbar. Daher ist die Bestimmung einer für den Asphaltkörper repräsentativen Temperaturmesstiefe erforderlich, welche die Temperaturverhältnisse im Asphaltkörper ausreichend genau für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen beschreibt.

Die mit dem FWD gemessenen Deflexionen sind neben dem Aufbau und Zustand der Straßenbefestigung, einschließlich des Untergrundes/Unterbaues, unter anderem abhängig von der Größe der aufgebrachten Impulsbelastung und dem Abstand vom Lastzentrum, vgl. Ziffer 3. Für die Herleitung einer Temperaturkorrekturfunktion müssen diese Einflüsse qualitativ und quantitativ bekannt sein.

Im Folgenden werden die gemessenen Deflexionsmulden und Asphaltkörpertemperaturen hinsichtlich der auf die Temperaturkorrektur relevanten Einflüsse ausgewertet und bewertet.

6.1 Messtiefe zur Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur

Für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden ist die Angabe der Asphaltkörpertemperatur notwendig. Wie in Ziffer 5.4 erläutert, ist die Berechnung von Asphaltkörpertemperaturen mit Unsicherheiten verbunden. Auf eine in situ Messung der Asphaltkörpertemperatur sollte daher nicht verzichtet werden. Empfehlungen zu der Anzahl, Position und Tiefe(n) der Bohrlöcher für die Asphaltkörpertemperaturmessung sind in [22] enthalten. Demnach soll nach Möglichkeit der vollständige Temperaturgradient erfasst werden oder je nach Asphalt-schichtdicke aus zwei oder drei Messtiefen (oberer und unterer Bereich sowie mittig) abgeschätzt werden. Oft reicht nach [22] eine einzige Messtiefe in 4 bis 10 cm oder circa in einem Drittel der Asphalt-schichtdicke aus.

Relative Angaben zur Messtiefe, z.B. „in einem Drittel der Asphalt-schichtdicke“, können nur dann umgesetzt werden, wenn die Dicke der Asphalt-schicht genau bekannt ist. Diese Angabe fehlt nach eigenen Erfahrungen in der Regel bei der Durchführung von FWD Messungen, da erst aufgrund der Ergebnisse der FWD Messungen die Positionen zur Bohrkernentnahme ermittelt werden. Messungen des kompletten Temperaturgradienten bzw. Temperaturmessungen in mehreren Messtiefen sind zeitaufwendig und stören erheblich den Messablauf.

Gemäß [22] werden die in verschiedenen Tiefen gemessenen Asphaltkörpertemperaturen anschließend arithmetisch gemittelt. Der Mittelwert wird dann zur Korrektur der Deflexionen herangezogen. Die Verwendung nur eines mittleren Temperaturwertes bei der Temperaturkorrektur von Deflexionen, statt mehrerer Werte des Temperaturgradienten, findet sich in weiteren internationalen Veröffentlichungen wieder, u.a. in [7][13][14][36].

Aus rein praktischen Aspekten kann die Messtiefe auf circa 4 cm bis 10 cm eingeschränkt werden: Der Temperaturgradient im Bereich zwischen der Oberfläche und 4 cm Tiefe wird bei kurzzeitigen Wetteränderungen erheblich beeinflusst und steht daher unter Umständen nur wenig im Zusammenhang zum restlichen Temperaturgradienten. Messtiefen über circa 10 cm sind prinzipiell möglich, stellen aber, gerade bei tiefen Temperaturen, erhöhte Anforderungen an das Bohrgerät und die Bohrdauer, bzw. können nicht mehr mit dem Nagel geschlagen werden.

Aufgrund der recherchierten Empfehlungen und Erfahrungen aus verschiedenen Literaturquellen und der durchgeführten Umfrage, vgl. Ziffer 5.4, sowie unter Berücksichtigung der genannten praktischen Aspekte, wird eine Messtiefe von 5 cm gewählt, um mit der dort gemessenen Asphaltkörpertemperatur die Temperaturkorrektur der Deflexionen durchzuführen. Im Folgenden wird überprüft, ob diese Wahl zulässig ist.

6.1.1 Korrelationsanalyse

Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Deflexion im Lastzentrum und der gemessenen Temperatur in verschiedenen Tiefen wurden Regressionsberechnungen durchgeführt. Die höchsten Bestimmtheitsmaße wurden dabei mit polynomi-schen Funktionen vierten Grades erzielt. In Tabelle 6-1 sind die Bestimmtheitsmaße

der Regressionsberechnungen für verschiedene Temperaturmessstiefen zusammengefasst.

Anhand der hohen Bestimmtheitsmaße ist zu erkennen, dass ein enger Zusammenhang zwischen der Deflexion im Lastzentrum und der Asphaltkörpertemperatur besteht. Im Falle der Temperaturmessstation Heek ist der Zusammenhang im Messtiefenbereich von circa 5 bis 9 cm besonders hoch.

Tabelle 6-1: Bestimmtheitsmaße der Temperaturmessstiefe zur Deflexion im Lastzentrum

Temperaturmessstiefe		TMS Heek		TMS Menden	
2 cm	Messpunkt 1	0,95	} \varnothing 0,94	} \varnothing 0,92	0,94
	Messpunkt 2	0,95			0,92
	Messpunkt 3	0,94			0,88
	Messpunkt 4	0,91			0,92
4 cm	Messpunkt 1	0,93	} \varnothing 0,96	-	
	Messpunkt 2	0,98			
	Messpunkt 3	0,97			
	Messpunkt 4	0,95			
5 cm	Messpunkt 1	0,99	} \varnothing 0,97	} \varnothing 0,94	0,96
	Messpunkt 2	0,99			0,94
	Messpunkt 3	0,95			0,91
	Messpunkt 4	0,96			0,95
7 cm	Messpunkt 1	0,99	} \varnothing 0,99	} \varnothing 0,96	0,97
	Messpunkt 2	0,99			0,96
	Messpunkt 3	0,98			0,93
	Messpunkt 4	0,98			0,96
9 cm	Messpunkt 1	0,99	} \varnothing 0,99	} \varnothing 0,97	0,98
	Messpunkt 2	0,99			0,96
	Messpunkt 3	0,98			0,94
	Messpunkt 4	0,98			0,98
20 cm	Messpunkt 1	0,93	} \varnothing 0,94	} \varnothing 0,99	0,99
	Messpunkt 2	0,95			0,99
	Messpunkt 3	0,94			0,98
	Messpunkt 4	0,95			0,99

Im Falle der Temperaturmessstation Menden fällt auf, dass das höchste Bestimmtheitsmaß bei einer Messtiefe von 20 cm auftritt. Obwohl der prozentuale Temperatureinfluss auf die Deflexion im Lastzentrum ähnlich dem an der Temperaturmessstation Heek ist, ist der absolute Temperatureinfluss (Delta Deflexion in Abhängigkeit von der Asphaltkörpertemperatur) an der Temperaturmessstation Menden gering. Die Bestimmung einer geeigneten Temperaturmessstiefe anhand des Bestimmtheitsmaßes bildet daher nicht die gleiche Eindeutigkeit wie an der Station Heek ab. Für die Station Menden lässt sich jedoch aufgrund der generell hohen Bestimmtheitsmaße ableiten, dass der Messtiefenbereich von 5 bis 9 cm als Temperaturmessstiefe nicht ungeeignet ist.

6.1.2 Grafische Auswertung

In einem weiteren Schritt wurden die gemessenen Deflexionsmulden und deren zugehörige Temperaturgradienten grafisch dargestellt. Für eine vergleichende Darstellung wurden die Deflexionsmulden gruppiert. Als Gruppenmerkmal wurde die Deflexion im Lastzentrum verwendet. Die Gruppierung erfolgte anhand eines 10 µm Rasters, d.h. die Deflexionsmulden mit der Deflexion im Lastzentrum von beispielsweise 150 bis 160 µm, 160 bis 170 µm, usw. wurden zusammen mit den zugehörigen Temperaturgradienten jeweils einer Gruppe zugeordnet. In Abbildung 6-1 sind exemplarisch jeweils drei Gruppierungen, gekennzeichnet mit den Farben blau, orange, rot sowie die dazugehörigen Temperaturgradienten (gekennzeichnet jeweils mit derselben Farbe) dargestellt. Die Gruppierung der Deflexionsmulden zur Beurteilung der zugeordneten Temperaturgradienten ist zulässig, da die FWD Messungen nicht aufgrund bestimmter vorherrschender Temperaturgradienten erfolgt sind.

Aus Abbildung 6-1 ist zu erkennen, dass, obwohl die gruppierten Deflexionsmulden sich sehr ähnlich sind, die zugehörigen gruppierten Temperaturgradienten sehr unterschiedlich sind. Besonders deutlich ist dies im Falle der bei niedrigen Temperaturen gemessenen Deflexionsmulden (blau) zu erkennen. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse der o.g. Korrelationsanalyse ist daher nicht möglich. Lediglich im Falle der bei mittleren und hohen Temperaturen gemessenen Deflexionsmulden (orange, rot) ist eine Bündelung der Temperaturgradienten im Tiefenbereich 4 bis 9 cm zu erkennen. Je enger die gruppierten Temperaturgradienten zusammenlaufen, desto eindeutiger ist deren Beziehung zu den zugehörigen gruppierten Deflexionsmulden.

Wie aus Abbildung 6-1 zu erkennen ist, nimmt die Streubreite der Temperaturgradienten einer Gruppe mit sinkendem Temperaturbereich zu. Mithilfe von Mehrschichtenrechnungen kann diese Beobachtung bestätigt werden. Hierzu wurden Deflexionen bei verschiedenen Asphalt E-Moduln an einem 3-Schichten-System berechnet. Die Deflexionen wurden anschließend zu Klassen mit einer Klassenbreite von 10 µm zusammengefasst. Die den Klassen zugehörigen E-Modul Spannweiten sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Hieraus kann abgeleitet werden, dass bei steigendem E-Modul (sinkender Temperatur) der Einfluss des Asphalt E-Moduls (bzw. der Temperatur) auf die Deflexion abnimmt. Beispiel: Im Asphalt E-Modul Bereich von rund 3.000 MN/m² genügt eine Variation des E-Moduls um 350 MN/m² um eine Änderung

der Deflexion von $\pm 10 \mu\text{m}$ im Lastzentrum zu erzeugen, im E-Modul von rund 20.000 MN/m^2 beträgt diese Variation rund 3.700 MN/m^2 . Diese Beobachtung lässt sich auf die in Abbildung 6-1 dargestellten Deflexionsmulden und Temperaturgradienten übertragen. Des Weiteren kann daraus gefolgert werden, dass die Anforderungen an die Genauigkeit der Asphaltkörpertemperaturmessung mit zunehmender Asphaltkörpertemperatur zunehmen müssen.

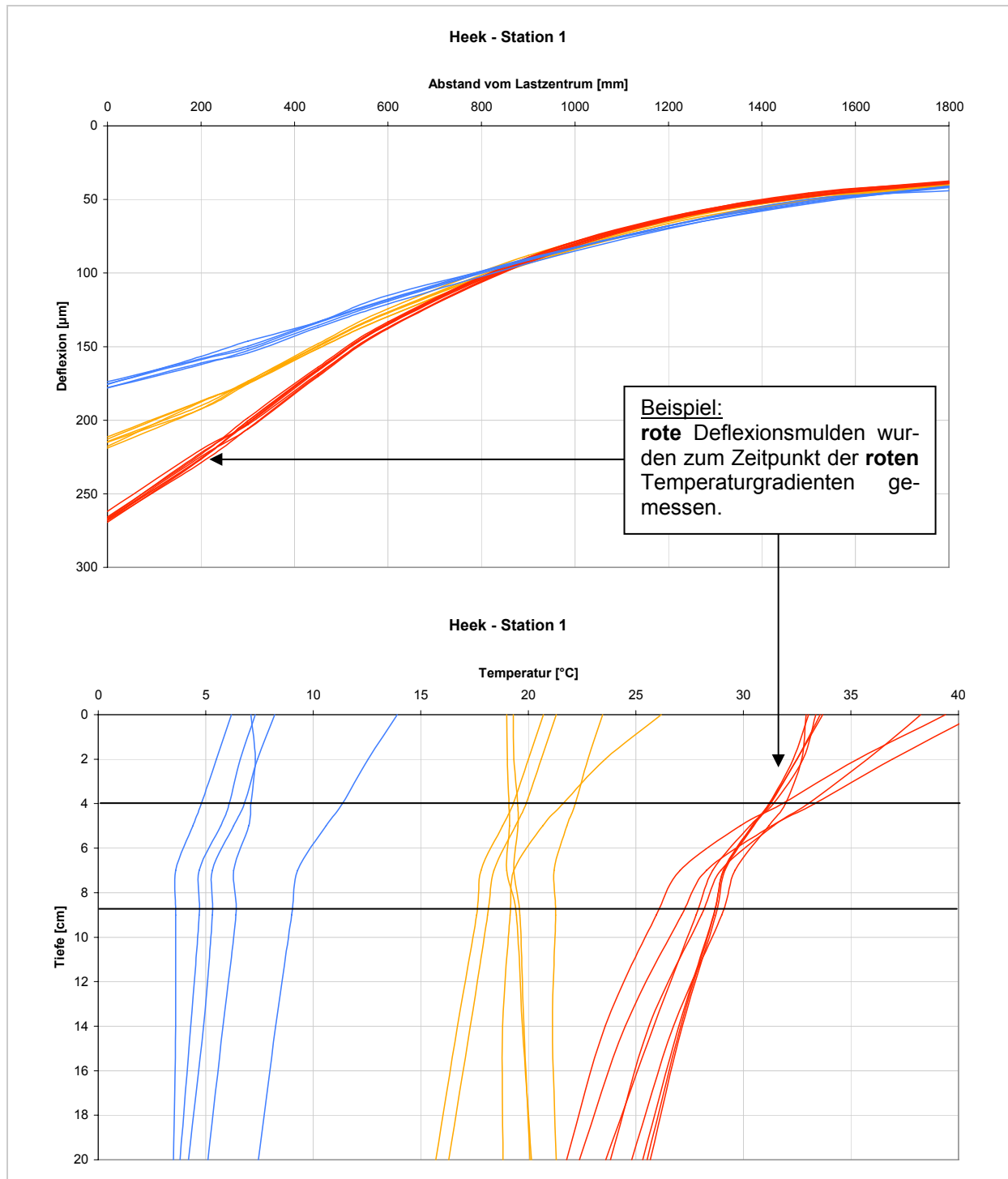


Abbildung 6-1: Deflexionsmulden mit zugehörigen Temperaturgradienten, Messpunkt 1 Heek

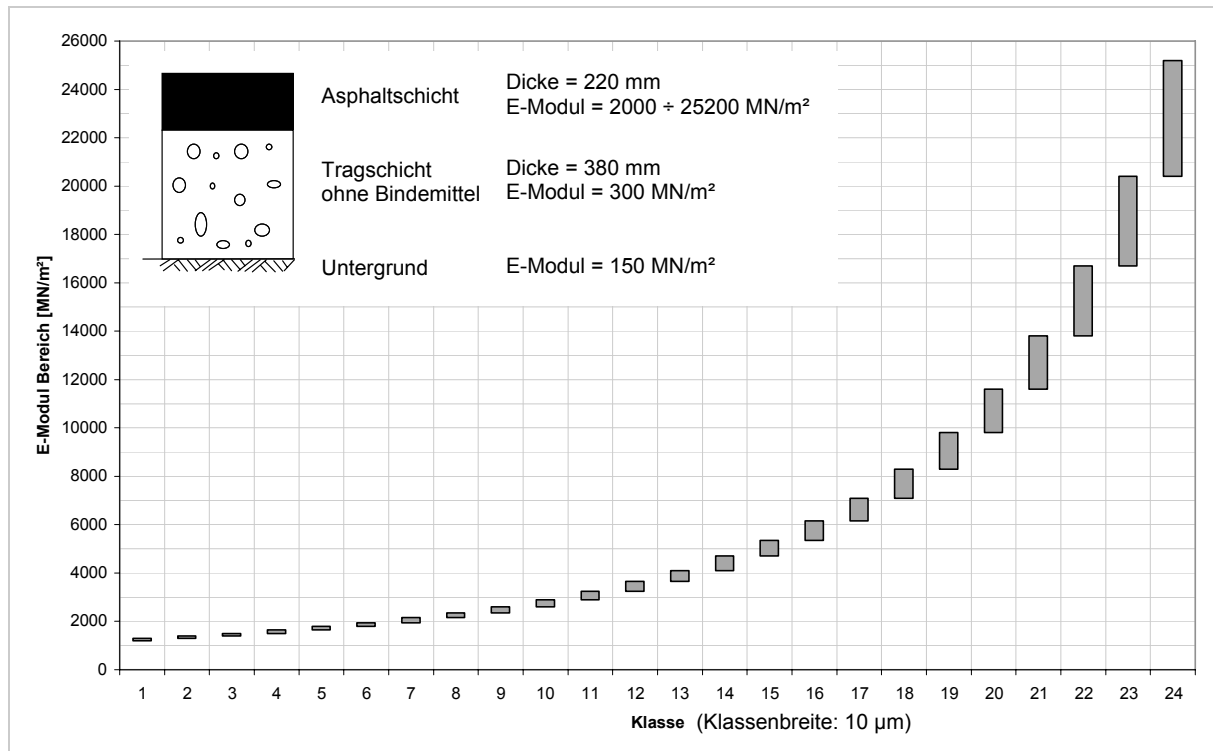


Abbildung 6-2: Einfluss des temperaturabhängigen Asphalt E-Moduls auf die Deflexion im Lastzentrum

6.1.3 Sensitivitätsanalyse

Aus einer einzelnen Messung der Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe kann keine Aussage zu dem Verlauf des Temperaturgradienten über und unter dieser Tiefe abgeleitet werden. Der Temperaturgradient oberhalb von 5 cm kann bei Bedarf durch einfache lineare Interpolation zur Oberflächentemperatur berechnet werden. Der Temperaturgradient unterhalb von 5 cm, also in der Hauptsache der Temperaturgradient der Asphalttragschicht, muss jedoch innerhalb einer Toleranz als konstant angenommen werden.

Die Asphalttragschicht bestimmt wegen ihrer im Vergleich zur Asphaltdecke großen Dicke und wegen ihres relativ hohen E-Moduls entscheidend die Ausprägung der mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulde. Bei der alleinigen Messung der Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe kann keine Aussage über den Temperaturgradienten innerhalb der Asphalttragschicht getroffen werden. Im Weiteren bedeutet dies, dass angenommen wird, dass trotz des großen Einflusses der Asphalttragschicht auf die Ausprägung der Deflexionsmulde der Temperaturgradient innerhalb derselbigen keinen oder nur einen geringen Einfluss besitzt.

Um zu überprüfen, welchen Einfluss der Temperaturgradient in der Asphalttragschicht auf die Deflexionsmulde besitzt, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, vgl. Anlage D-1. Hierzu wurden an den Temperaturmessstationen gemessene Temperaturgradienten ausgewertet und untersucht, in welchem Ausmaß die vereinfachte Annahme eines konstanten Temperaturgradienten für die Asphalttragschicht (in Abhängigkeit von der Temperatur in 5 cm Tiefe), statt der Betrachtung des detaillierten Temperaturgradienten einen Einfluss auf die Deflexionsmulde besitzt. Es wurde zunächst untersucht, welche Temperaturen in der Asphalttragschicht, in Abhängigkeit von der Temperatur in 5 cm Tiefe, zu erwarten sind. Anschließend erfolgten vergleichende Mehrschichtenrechnungen mit realen und vereinfachten Temperaturgradienten. In Abbildung 6-3 sind drei Temperaturgradientenbereiche für eine fixe Temperatur in 5 cm Tiefe von 5, 20 und 30 °C dargestellt.

Die Sensitivitätsanalyse hat zum Ergebnis, vgl. Anlage D-1, dass auch bei sehr ausgeprägten Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht der Ersatz dieser Temperaturgradienten durch einen konstanten Temperaturgradienten keinen wesentlichen Einfluss auf die Deflexionsmulde besitzt.

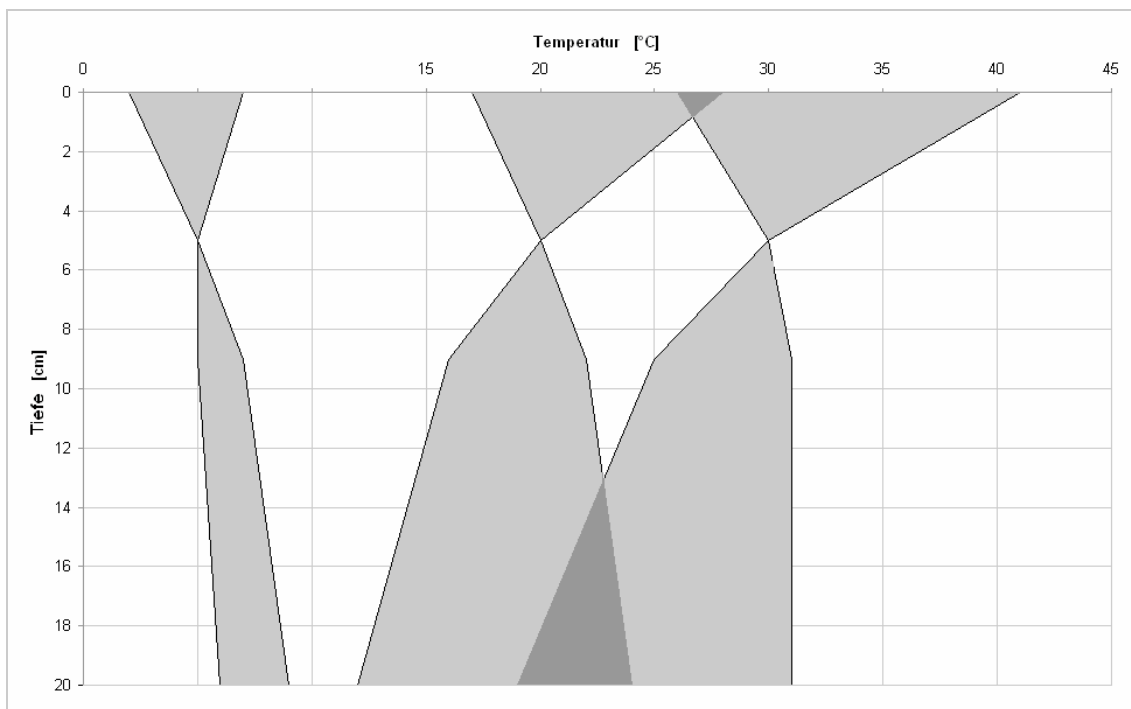


Abbildung 6-3: Mögliche Spannweiten von Temperaturgradienten bei fixer Temperatur in 5 cm Tiefe

6.1.4 Fazit

Mithilfe der Analyse der Bestimmtheitsmaße aus Regressionsberechnungen, vgl. Ziffer 6.1.1, konnte gezeigt werden, dass die Asphaltkörpertemperatur ab einer Tiefe von circa 5 cm in einem sehr guten Zusammenhang zur Deflexionsmulde steht.

Die Darstellung von gruppierten Deflexionsmulden und den zugehörigen Temperaturgradienten, vgl. Ziffer 6.1.2, lieferte Hinweise darauf, dass bei hohen Asphaltkörpertemperaturen ab circa 20 °C ein Zusammenhang der Asphaltkörpertemperatur im Bereich 4 bis 9 cm Tiefe zur Deflexionsmulde besteht.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass für die Interpretation der Deflexionsmulde eine Vereinfachung des Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht zulässig ist. Es muss angemerkt werden, dass hiermit nicht überprüft wurde, inwieweit derartige Vereinfachungen im Rahmen von Dimensionierungsberechnungen, bei denen beispielsweise auch Spannungen und Dehnungen untersucht werden, zulässig sind.

Aufgrund dieser Auswertungen konnte gezeigt werden, dass die vorab gewählte Messtiefe von 5 cm als Temperaturmesstiefe im Rahmen der Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen geeignet ist.

6.2 Zusammenhang von Deflexion und Lastgröße in Abhängigkeit von der Asphaltkörpertemperatur

Die Punktmessungen mit dem FWD an den Temperaturmessstationen erfolgten jeweils mit einer Last von 50 kN und 90 kN. Hiermit sollte der Einfluss der Temperatur auf das Verhältnis von Deflexion zur Lastgröße untersucht werden.

In Abbildung 6-4 sind alle bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen gemessenen Deflexionen im Lastzentrum bei einer Last von 50 kN und 90 kN dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein nahezu direkt proportionaler Zusammenhang besteht, der das anzunehmende linear elastische Materialverhalten von Asphalt unter einer Impulsbelastung bestätigt. Dieser Zusammenhang, hier nicht dargestellt, ist zudem für die anderen Geofonabstände erkennbar.

Ein Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf das Verhältnis der Deflexionen bei einer Last von 50 kN und 90 kN ist nicht erkennbar.

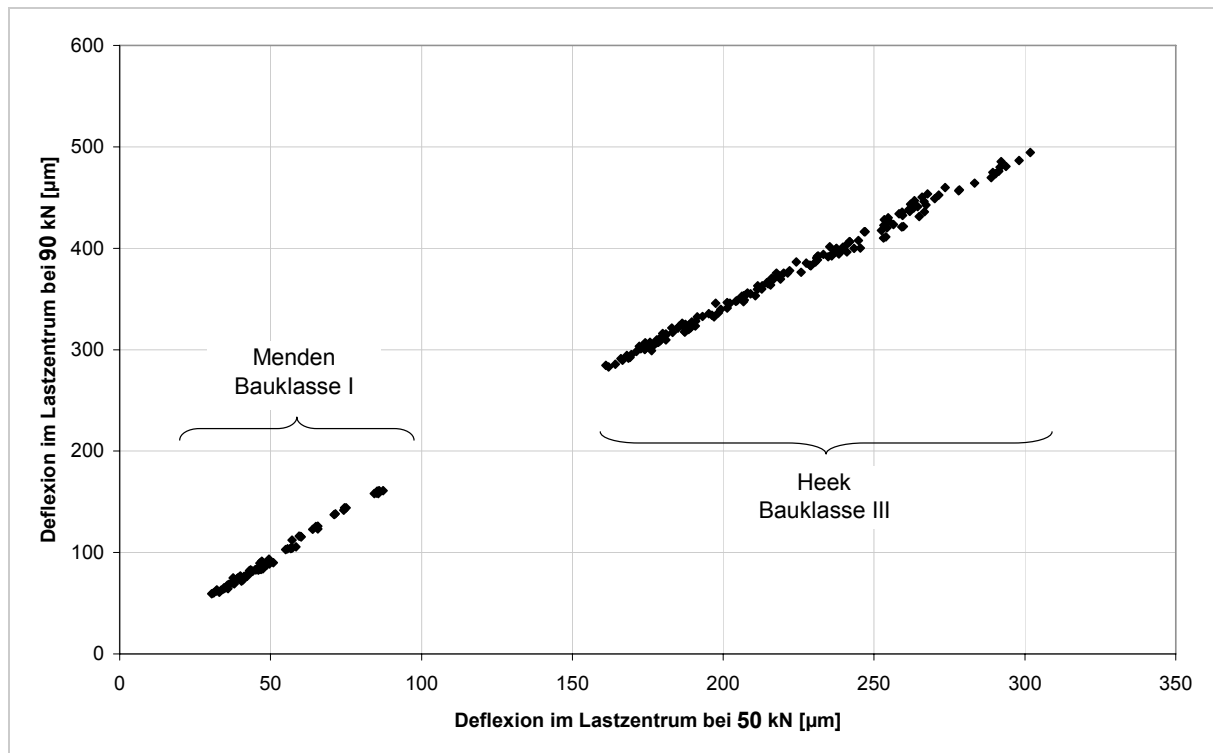


Abbildung 6-4: Deflexionen im Lastzentrum bei einer Last von 50 kN und 90 kN

6.3 Geofonpositionen für die Temperaturkorrektur

Die mit dem FWD gemessenen Deflexionen werden in Abhängigkeit von dem Abstand des jeweiligen Geofons vom Lastzentrum unterschiedlich von den einzelnen Schichten des Straßenaufbaus beeinflusst, vgl. Ziffer 3.4. Der Einfluss des Oberbaues wird mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum kleiner, der Einfluss des Untergrundes/Unterbaues nimmt hingegen zu. Der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur ist infolge dessen nicht in der gesamten Deflexionsmulde erkennbar, d.h. dass eine Temperaturkorrektur der Deflexionen auch nur bis zu einem gewissen Abstand vom Lastzentrum durchgeführt werden muss.

Laut BERGSTEDT [11] ist die Temperaturkorrektur der Deflexionen bis zu einem Abstand von 500 mm vom Lastzentrum erforderlich. Gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit [5] ist die Temperaturkorrektur der Deflexionen bis zu einem Abstand von 600 mm vom Lastzentrum erforderlich. Nach PARK et al. [36] nimmt der zu korrigierende Abstand vom Lastzentrum mit zunehmender Dicke der Asphaltsschicht linear zu; im

Falle einer Asphaltsschicht von 22 cm Dicke (Bauklasse III) beträgt der Abstand 632 mm und im Falle einer Asphaltsschicht von 30 cm Dicke (Bauklasse I) beträgt der Abstand 1.012 mm. Zur Anwendung dieses Ansatzes muss jedoch die Asphaltsschichtdicke bekannt sein, was in der Regel nicht der Fall ist.

6.3.1 Korrelationsanalyse

Zur Bestimmung des abstandsbezogenen Einflusses der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexionsmulde wurden die an den Temperaturmessstationen Heek und Menden gemessenen FWD Deflexionsmulden ausgewertet. Hierzu wurde der lineare Zusammenhang der gemessenen Deflexionen jeweils einer Geofonposition zu der Temperatur in 5 cm Tiefe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bestimmtheitsmaße der Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum abnehmen. Ausnahmen hiervon sind teilweise an den in Menden gemessenen Deflexionen zu erkennen. Diese Ausnahmen sind auf die dort gemessenen relativ kleinen und flachen Deflexionsmulden zurückzuführen, da die absoluten und relativen Unterschiede der Deflexionen zweier benachbarter Geofone sehr gering sind und der lineare Zusammenhang daher weniger eindeutig ist. Zudem ist zu erkennen, dass an den Messpunkten 1 und 2 in Menden auch bei einem Abstand von 900 mm vom Lastzentrum entfernt hohe Bestimmtheitsmaße erreicht werden, was ein Hinweis auf die von PARK et al. [36] (siehe oben) genannte lineare Abhängigkeit ist.

Ein Zusammenhang der Asphaltkörpertemperatur zu der Geofonposition ist demnach in einem ausreichenden Maße bis zu einem Abstand vom Lastzentrum von 600 mm vorhanden.

Tabelle 6-2: Bestimmtheitsmaße der Geofonpositionen zur Asphaltkörpertemperatur

Geofonposition	TMS Menden				TMS Heek			
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4
	t_5	t_5	t_5	t_5	t_5	t_5	t_5	t_5
0 mm	0,98	0,96	0,95	0,97	0,99	0,99	0,98	0,98
200 mm	0,92	0,93	0,91	0,96	0,99	0,99	0,99	0,98
300 mm	0,96	0,97	0,94	0,97	0,98	0,99	0,98	0,97
450 mm	0,97	0,96	0,92	0,95	0,98	0,98	0,97	0,95
600 mm	0,92	0,96	0,91	0,91	0,94	0,95	0,95	0,91
900 mm	0,92	0,92	0,82	0,54	-0,18	0,55	0,74	0,26
1.200 mm	0,78	0,81	0,75	-0,52	-0,90	-0,62	-0,29	-0,74
1.500 mm	0,86	0,89	0,59	-0,71	-0,87	-0,57	-0,53	-0,65
1.800 mm	0,77	0,63	0,28	-0,65	-0,76	-0,26	-0,09	-0,30

MP = Messpunkt t_5 = Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe

6.3.2 Grafische Auswertung

In Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 sind die im Bereich der Station Heek bzw. Men-den gemessenen Deflexionsmulden dargestellt. Zudem wurden die Geofonpositionen in die Diagramme eingezeichnet. Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass die Deflexionsmulden bis zu einem Abstand von 600 mm vom Lastzentrum entfernt deutlich von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst werden. Dieser deutliche Einfluss ist an der Geofonposition 900 mm vom Lastzentrum entfernt und darüber hinaus nicht zu erkennen. Die vorhandenen Spannweiten der Deflexionen an den Geofonpositionen über 600 mm Entfernung vom Lastzentrum sind auf tolerierbare Messungenauigkeiten des FWD (lt. [3] max. $\pm 2 \mu\text{m}$), geringe Einflüsse des Untergrundes (z.B. Schwankungen des Wassergehaltes) und auf geringe Abweichungen bei der Positionierung des FWD zurückzuführen. Zudem ist aus Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 zu erkennen, dass der Temperatureinfluss mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum abnehmend ist.

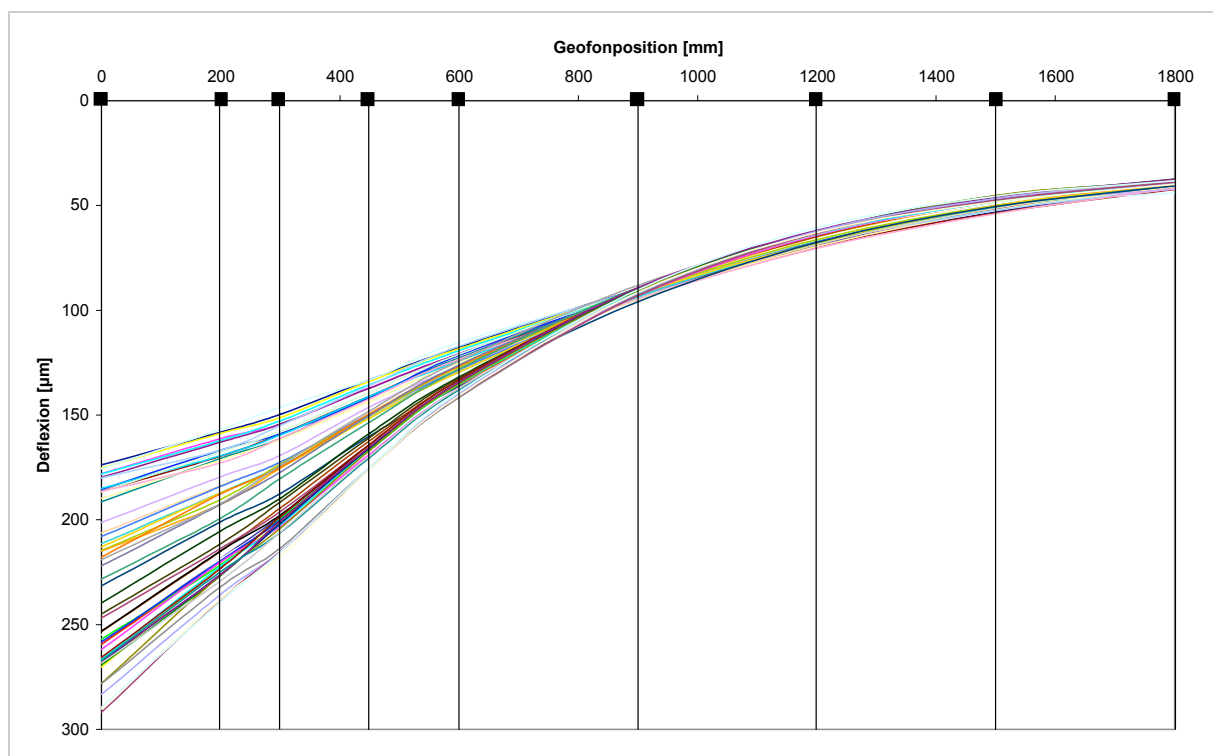


Abbildung 6-5: Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulde – Heek, Station 1

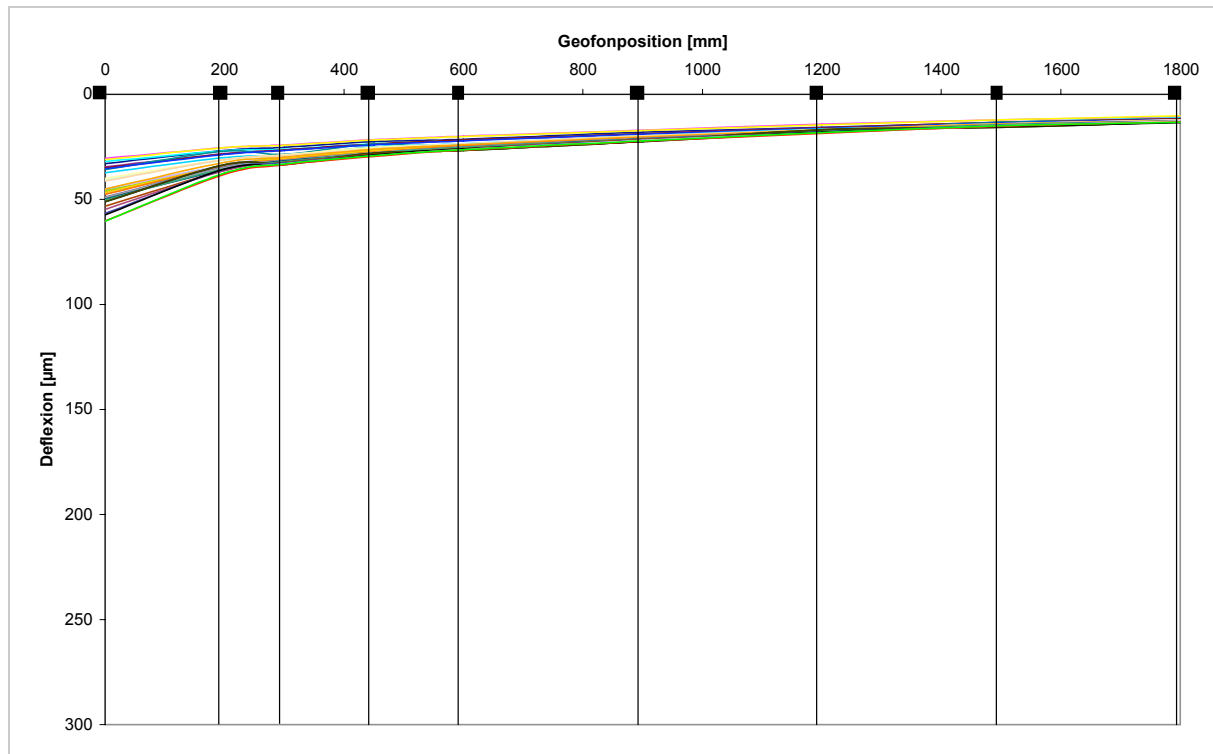


Abbildung 6-6: Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulde – Menden, Station 1

In einem weiteren Schritt wurden die an den 20 Streckenabschnitten gemessenen FWD Deflexionsmulden ausgewertet. Aus der vergleichenden Darstellung, der zu verschiedenen Jahreszeiten gemessenen Deflexionsmulden pro Station und aus der Berechnung des prozentualen Temperatureinflusses auf die Deflexionsmulden, vgl. Anlage D-2, ist erkennbar, dass der von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusste Abstand vom Lastzentrum strecken- bzw. messpunktspezifisch ist, jedoch auf der sicheren Seite liegend auch zu 600 mm gewählt werden kann.

6.3.3 Fazit

Anhand der Korrelationsanalyse und der grafischen Auswertungen konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexionsmulde sehr von dem Abstand der Geofonposition vom Lastzentrum abhängig ist. Streckenspezifische Unterschiede sind erkennbar.

Da, wie in dieser Arbeit noch gezeigt wird, vgl. Ziffer 7.1, die Temperaturkorrektur relativ zur Größe der Deflexion an jedem Geofon und nicht mit einem absoluten Wert durchgeführt wird, kann auf der sicheren Seite liegend der von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusste Abstand vom Lastzentrum auf die Deflexionsmulde zu 600 mm angenommen werden.

7 Temperaturkorrektur

Wie gezeigt werden konnte, werden die mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden wesentlich von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst. Für die vergleichende Darstellung und Bewertung von Deflexionsmulden ist es daher notwendig, die gemessenen Deflexionen auf eine Standardoberbautemperatur zu korrigieren.

Für die genaue Quantifizierung des Temperatureinflusses eines jeden Streckenabschnittes oder Messpunktes müssten FWD Messungen bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen durchgeführt werden, aus denen dann eine streckenspezifische, bzw. messpunktspezifische Temperaturkorrektur abgeleitet werden könnte. In der Regel werden FWD Messungen jedoch nur einmalig an einem Streckenabschnitt durchgeführt, sodass für die Temperaturkorrektur ein streckenunabhängiger Ansatz angewendet werden muss. In Ziffer 5.1.3 konnte gezeigt werden, dass die Temperaturabhängigkeit von Asphalt gewissen Regelmäßigkeiten folgt, jedoch innerhalb dieser Regelmäßigkeiten für jeden Asphalt eine Streubreite besitzt. Die Anwendung eines streckenunabhängigen Ansatzes kann daher nie die Genauigkeit eines streckenspezifischen Ansatzes erreichen.

Für die Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes wurden die im Rahmen dieser Arbeit an den Temperaturmessstationen Heek und Menden gemessenen FWD Deflexionen und Temperaturgradienten ausgewertet. Zur Überprüfung des so hergeleiteten Temperaturkorrekturansatzes wurde der Ansatz an den Deflexionsdaten der übrigen 20 Streckenabschnitte angewendet.

Es sind zwei verschiedene Arten von Temperaturkorrekturansätzen für FWD Messungen zu unterscheiden: die ‚direkte‘ Korrektur der gemessenen Deflexionen und die ‚indirekte‘ Korrektur der aus den Deflexionsmulden zurückgerechneten Asphalt E-Moduln, vgl. Abbildung 7-1. Wie in [10] gezeigt wurde, ist jedoch die Rückrechnung der Schicht E-Moduln eines Straßenoberbaues aus einer Deflexionsmulde mit vielen Unsicherheiten und Annahmen verbunden, besonders dann, wenn nicht der genaue Schichtenaufbau des Straßenoberbaues bekannt ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden lediglich auf die direkte Temperaturkorrektur, vgl. in Abbildung 7-1 Alternative 1 und 2, der Deflexionen eingegangen.

Die Temperaturkorrektur von FWD Deflexionen erfolgt in der Regel derart, dass ein von der Asphaltkörpertemperatur abhängiger Korrekturfaktor λ berechnet wird, der mit der gemessenen Deflexion multipliziert wird:

$$D_{20} = \lambda \cdot D_T \quad \text{Gl. 1}$$

mit D_{20} = Deflexion bei Standardoberbautemperatur 20 °C
 D_T = gemessene Deflexion bei Asphaltkörpertemperatur T
 λ = Temperaturkorrekturfaktor

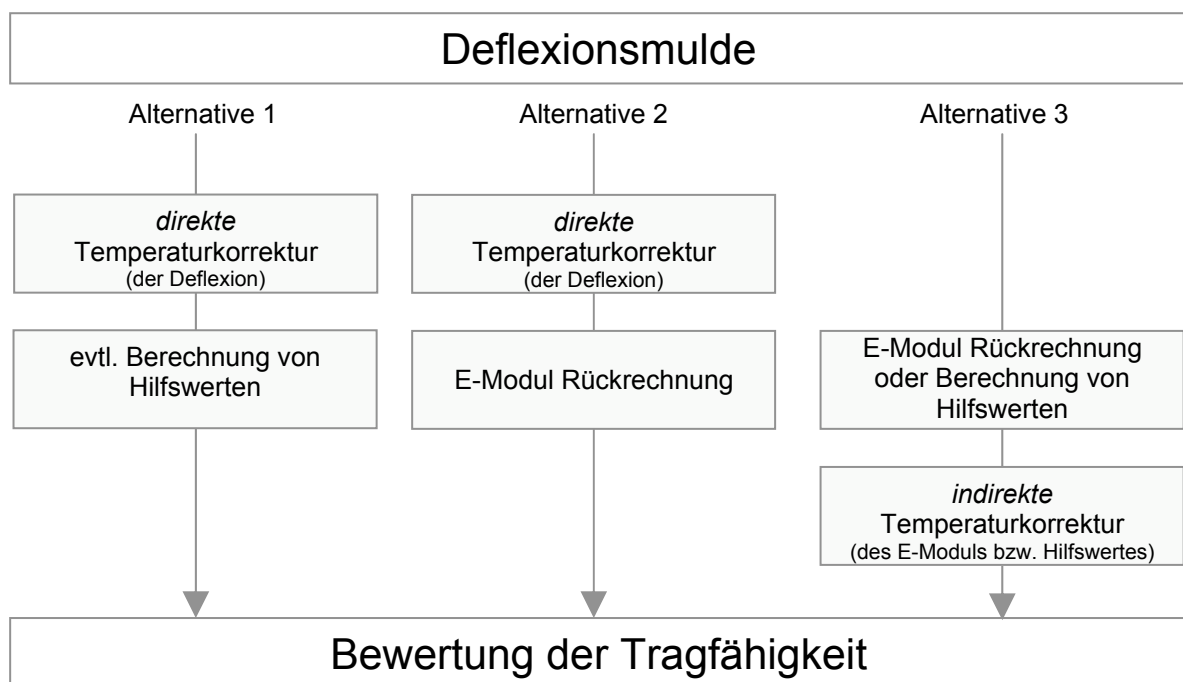


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Auswertung von FWD Messungen

In Deutschland existiert kein Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen. Ersatzweise wird der Ansatz von SCHULTE [44] verwendet, der für die Temperaturkorrektur von Benkelman-Balken Messungen hergeleitet wurde und von JENDIA [28] für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen ausgewertet wurde. Bei der Übertragung von Temperaturkorrekturansätzen, die für den Benkelman-Balken hergeleitet wurden, ist zu beachten, dass das Messverfahren im Gegensatz zum FWD ein statisches Verfahren ist und auch nur die Einsenkung im Lastzentrum gemessen wird. Welche Fehler entstehen können, wenn für Deflexionen außerhalb des Lastzentrums die gleiche Temperaturkorrekturfunktion wie im Lastzentrum angewendet wird, zeigt Abbildung 7-2. In dieser

Abbildung sind die bei 20 °C und 35 °C Asphaltkörpertemperatur an demselben Messpunkt gemessenen Deflexionsmulden im Vergleich zu der nach SCHULTE von 35 °C auf 20 °C korrigierten Deflexionsmulde dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Deflexionen außerhalb des Lastzentrums mit einem zu kleinem Faktor, nämlich dem gleichen wie im Lastzentrum, korrigiert werden. Bei der gleichen Darstellung der Korrektur nach SCHULTE für den Fall der Temperaturkorrektur von 5 °C auf 20 °C, nicht dargestellt, ergibt sich ein ähnliches Bild, d.h. die Deflexionen außerhalb des Lastzentrums werden mit einem zu großem Faktor korrigiert.

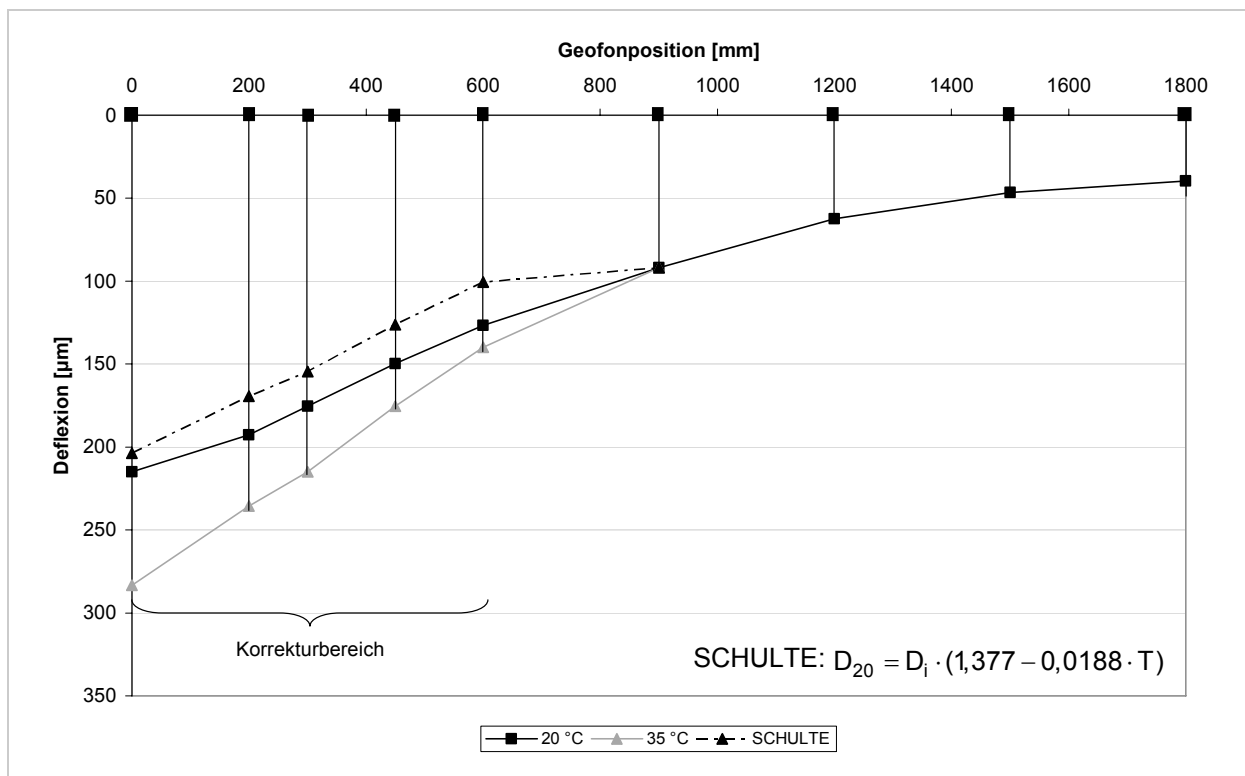


Abbildung 7-2: Auswertung der Temperaturkorrektur nach SCHULTE – Deflexionsmulde

In Abbildung 7-3 sind Deflexionen im Lastzentrum dargestellt, die mit einem Mehrschichtenprogramm an einem Dreischichtensystem berechnet worden sind. Dabei wurde der Asphalt E-Modul nach FRANCKEN und VERSTRAETEN in Abhängigkeit von der Asphaltkörpertemperatur berechnet. Die so berechneten Deflexionen wurden anschließend nach SCHULTE auf 20 °C temperaturkorrigiert. Es ist zu erkennen, dass die Korrektur im Temperaturbereich unter 20 °C gute Ergebnisse erzielt, jedoch im Temperaturbereich über 20 °C mit zunehmender Asphaltkörpertemperatur deutliche Schwächen zeigt.

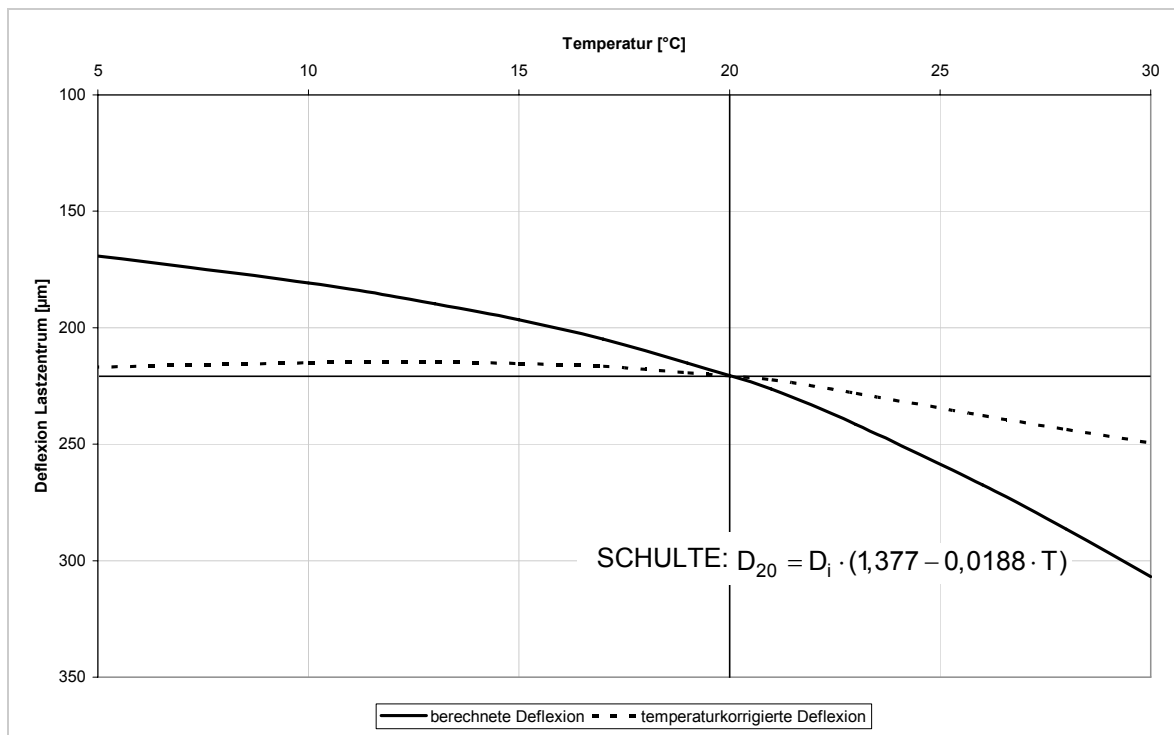


Abbildung 7-3: Auswertung der Temperaturkorrektur nach SCHULTE – Deflexion im Lastzentrum

International existieren einige Ansätze zur Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen, vgl. u.a. [7][11][14][29][36][37][46]. Hauptsächlich wurden diese Ansätze an und für Straßenbefestigungen in den USA entwickelt. Problematisch hierbei für die Anwendung in Deutschland ist, dass sowohl davon auszugehen ist, dass in Deutschland, bedingt durch die geografische Lage, andere klimatische Verhältnisse herrschen können, die Ansätze sich teilweise auf andere Standardoberbautemperaturen beziehen und die Asphaltkörperdicken in den USA sehr viel dünner dimensioniert sind als in Deutschland.

7.1 Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes

Anhand der an den Temperaturmessstationen Heek und Menden durchgeführten Punktmessungen wurde ein Temperaturkorrekturansatz hergeleitet. Die an den 20 Streckenabschnitten gemessenen Deflexionen wurden dabei für die Verifizierung der im Rahmen der Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes aufgezeigten Zusammenhänge ausgewertet.

Für die Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes gelten folgende, in den vorangegangenen Kapiteln hergeleitete, Grundannahmen:

- *Berücksichtigung der Asphalt-schichtdicke*

Der prozentuale Einfluss der Asphaltkörpertemperatur, auf die mit dem FWD gemessene Deflexionsmulde, ist weitestgehend unabhängig von der Asphalt-schichtdicke am Messpunkt, vgl. Ziffer 5.3.1. Die Temperaturkorrektur kann daher ohne Kenntnis der Asphalt-schichtdicke erfolgen. Da sich die Deflexion relativ zur Asphaltkörpertemperatur verhält, ist die Temperaturkorrektur multiplikativ, also relativ, vorzunehmen.

- *Messtiefe zur Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur*

Als Messtiefe für die Angabe einer den gemessenen Deflexionen zugeordneten Asphaltkörpertemperatur wurde 5 cm gewählt. Es konnte gezeigt werden, dass diese Messtiefe aus den folgenden Gründen geeignet ist, vgl. Ziffer 6.1:

- Sehr kurzfristige Wetteränderungen, zum Beispiel durch einzeln aufziehende Bewölkung, wirken sich lediglich auf die oberflächennahen Asphaltkörpertemperaturen aus und werden über die Tiefe hinweg gedämpft. Sie sind daher nicht repräsentativ für die Temperaturverhältnisse der gesamten Asphalt-schicht.
- Das Einbringen von Bohrlöchern für die Asphaltkörpertemperaturmessungen kann in tieferen Schichten, in etwa ab 10 cm Tiefe, bei niedrigen Temperaturen schwierig und entsprechend zeitintensiv sein.
- Die Vernachlässigung des Temperaturgradienten in der Asphalt-trag-schicht, d.h. es wird die gleiche Temperatur wie in 5 cm Tiefe angenommen, besitzt keinen relevanten Einfluss auf die Ausprägung der Deflexionsmulde.

- *Qualitativer Zusammenhang von Deflexion und Asphaltkörpertemperatur*

Mit abnehmender Asphaltkörpertemperatur, also steigendem Asphalt E-Modul, ist die Eindeutigkeit des Zusammenhanges von Deflexion und Asphaltkörpertemperatur abnehmend, vgl. Ziffer 6.1.2. Hierdurch wird die erreichbare Genauigkeit einer Temperaturkorrekturfunktion bei tiefen Temperaturen unmittelbar beeinflusst.

- *Einfluss der Lastgröße auf die Temperaturkorrektur*

Die Asphaltkörpertemperatur besitzt keinen Einfluss auf das Verhältnis der

Deflexion zur Lastgröße, vgl. Ziffer 6.2. Die Temperaturkorrektur kann daher unabhängig von der Größe des durch das FWD aufgebracht Lastimpulses erfolgen.

- *Abstand vom Lastzentrum*

Die Deflexionen bis einschließlich 600 mm vom Lastzentrum entfernt werden von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst und müssen daher temperaturkorrigiert werden, vgl. Ziffer 6.3. Die an der gemäß [3] benachbarten Geofonposition, 900 mm vom Lastzentrum entfernt, gemessene Deflexion wird nicht mehr von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst. Der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexion ist abhängig von dem Abstand vom Lastzentrum, d.h. für die Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes muss jede Geofonposition einzeln betrachtet werden.

Für die Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes wurden für jeden Messpunkt und jede Geofonposition bis 600 mm vom Lastzentrum entfernt Korrekturfaktoren berechnet und Regressionsberechnungen durchgeführt. Die so hergeleiteten Korrekturfunktionen wurden anschließend messpunktweise angewendet, überprüft und angepasst.

7.1.1 Bezugsdeflexionen

Für die Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes wurde zunächst für jeden Messpunkt an den Stationen Heek und Menden und für jede Geofonposition bis einschließlich 600 mm vom Lastzentrum entfernt, die jeweiligen lastkorrigierten Deflexionen bei einer Standardoberbautemperatur in 5 cm Tiefe von 20 °C (Bezugsdeflexion) bestimmt. Hierzu wurden die gemessenen Deflexionen den Asphaltkörpertemperaturen für jeden Messpunkt gegenübergestellt und mithilfe von Regressionsberechnungen die jeweiligen Bezugsdeflexionen bestimmt, vgl. Abbildung 7-4.

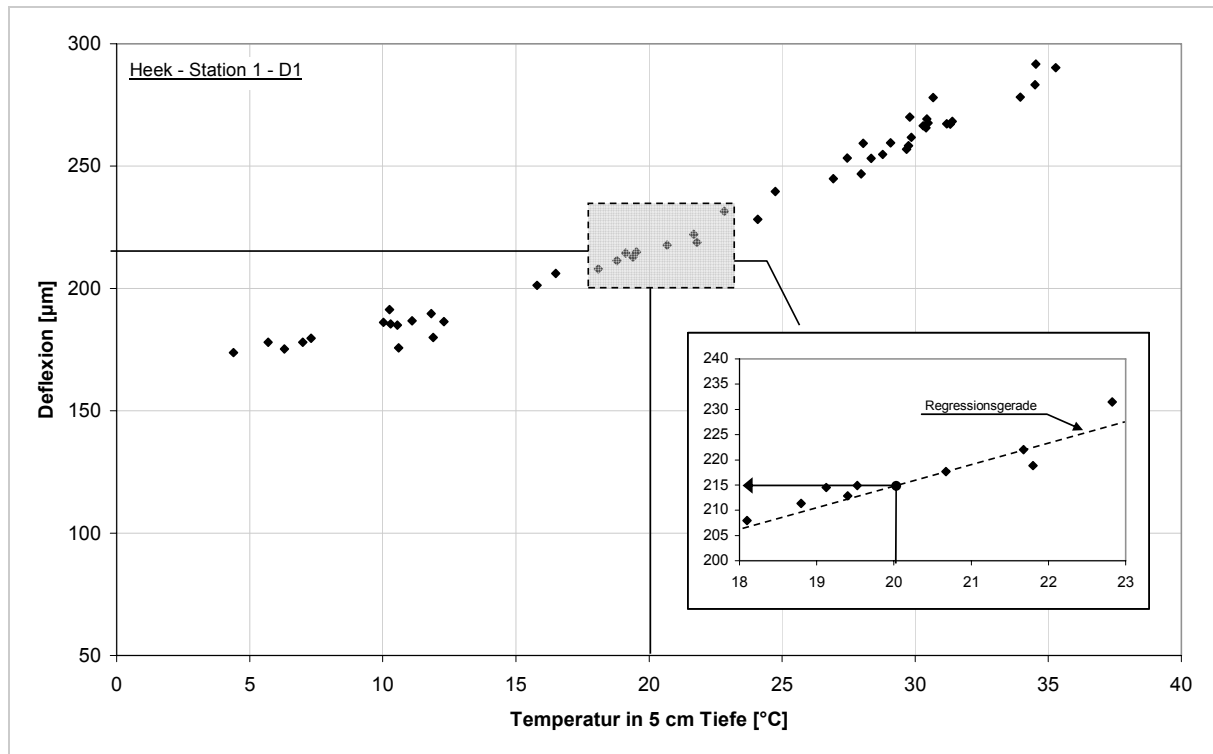


Abbildung 7-4: Bestimmung der Bezugsdeflexion (Beispiel)

7.1.2 Berechnung von Korrekturfaktoren

Für jeden Messpunkt und jede Geofonposition bis einschließlich 600 mm vom Lastzentrum entfernt wurden Korrekturfaktoren berechnet, welche die gemessenen Deflexionen auf die Standardoberbautemperatur in 5 cm Tiefe von 20 °C korrigieren. Die Korrekturfaktoren wurden wie folgt berechnet:

$$\lambda = \frac{D_{20}}{D_T} \quad \text{Gl. 2}$$

mit D_{20} = Deflexion bei Standardoberbautemperatur 20 °C (Bezugsdeflexion)

D_T = gemessene Deflexion bei Asphaltkörpertemperatur T

λ = Temperaturkorrekturfaktor

7.1.3 Auswertung der Korrekturfaktoren

Für die weiteren Regressionsberechnungen wurden die berechneten Korrekturfaktoren den Asphaltkörpertemperaturen in 5 cm Tiefe gegenübergestellt, vgl. Abbildung 7-5. Der durch die Messungen abgedeckte Temperaturbereich umfasst 3 °C bis 35 °C Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe. Aus den Darstellungen der Korrekturfaktoren ist erkennbar, dass

- die Streuung der Korrekturfaktoren (messpunktunabhängig) über 20 °C geringer ist als im Asphaltkörpertemperaturbereich unter 20 °C und

- im Asphaltkörpertemperaturbereich unter 20 °C die Korrekturfaktoren der Stationen in Heek geringer sind als die Korrekturfaktoren in Menden.

Anhand der an den 20 Streckenabschnitten gemessenen Deflexionen wurde diese Beobachtung auf ihre Gültigkeit hin überprüft. Hierzu wurden analog zu Ziffer 7.1.1 und Ziffer 7.1.2 für jede gemessene Deflexion im Lastzentrum (1.831 Einzelwerte) ein Korrekturfaktor berechnet. Anschließend wurden die Korrekturfaktoren nach Bauklassen sowie nach der Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe gruppiert und die jeweiligen Variationskoeffizienten berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7 dargestellt. Für die Bewertung wurden zu den nach den Asphaltkörpertemperaturen gruppierten Variationskoeffizienten, vgl. Abbildung 7-6, die kumulierten Summen dargestellt. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Der Variationskoeffizient der Korrekturfaktoren, als Maß der Streuung, ist bis circa 17 °C höher und nimmt mit zunehmender Asphaltkörpertemperatur leicht ab, vgl. auch den durch die kumulierte Summe dargestellten Abschnittswechsel. Im Asphaltkörpertemperaturbereich über 33 °C nimmt er wieder zu, vgl. Abbildung 7-6.
- Der Variationskoeffizient der Korrekturfaktoren nimmt mit abnehmender Asphalt-schichtdicke bzw. Bauklasse ab, vgl. Abbildung 7-7.
- Die Korrekturfaktoren im Asphaltkörpertemperaturbereich unter circa 10 °C liegen, analog zu Abbildung 7-5, bei der Bauklasse I und II etwas höher als bei den Bauklassen III und IV.

Die Streuung der Korrekturfaktoren bei niedrigen Asphaltkörpertemperaturen kann zum Teil anhand der unter Ziffer 6.1 beschriebenen abnehmenden Sensitivität der Deflexionen mit abnehmender Asphaltkörpertemperatur erklärt werden. Weitere Einflüsse auf die Streuung der Korrekturfaktoren können auch durch Einflüsse aus dem Untergrund/Unterbau verursacht werden. Hierzu wurden die Deflexionen am letzten Geofon, 1.800 mm vom Lastzentrum entfernt, für alle Streckenabschnitte ausgewertet. Die Streuung der dort gemessenen Deflexionen beträgt, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten, im Mittel 7 % (hiervon ausgenommen sind sieben Stationen der Strecke I-1, da aufgrund der dort gemessenen Werte ($< 10 \mu\text{m}$ am letzten Geofon und Variationskoeffizienten $> 40\%$) eine HGT oder Betontragschicht vermutet wird). Die Feststellung der Streuungen anhand der gesamten Datenbasis der Stre-

ckenmessungen bestätigt die an den Temperaturmessstationen Heek und Menden festgestellten Streuungen.

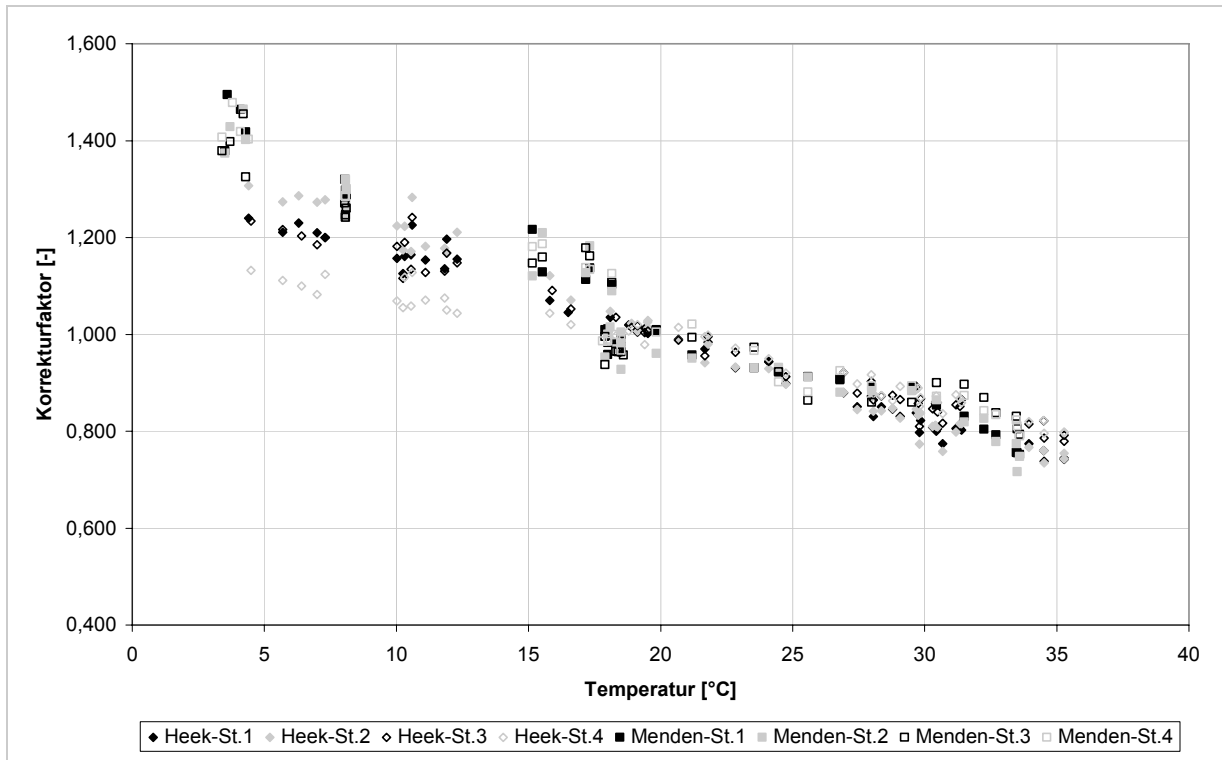


Abbildung 7-5: Korrekturfaktoren Heek und Menden, Deflexion im Lastzentrum

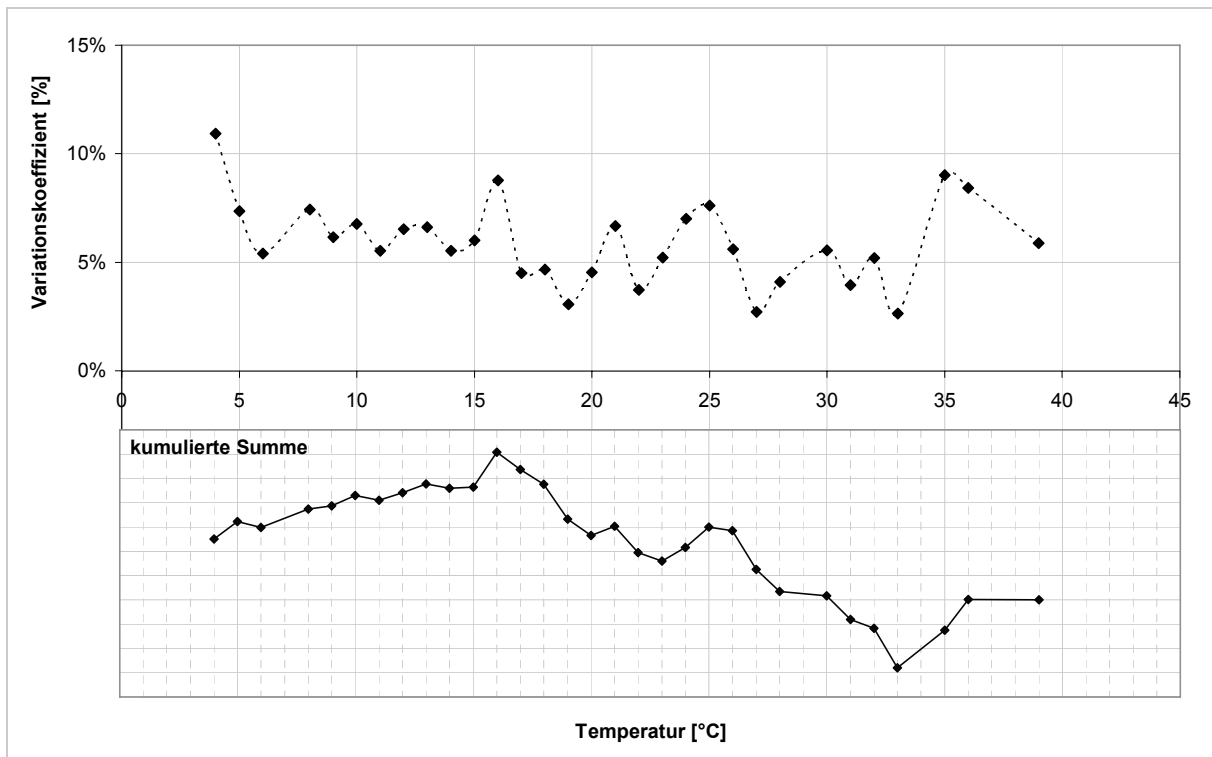


Abbildung 7-6: Variationskoeffizienten der Korrekturfaktoren für das Lastzentrum aller 20 Streckenabschnitte gruppiert nach Asphaltkörpertemperaturen

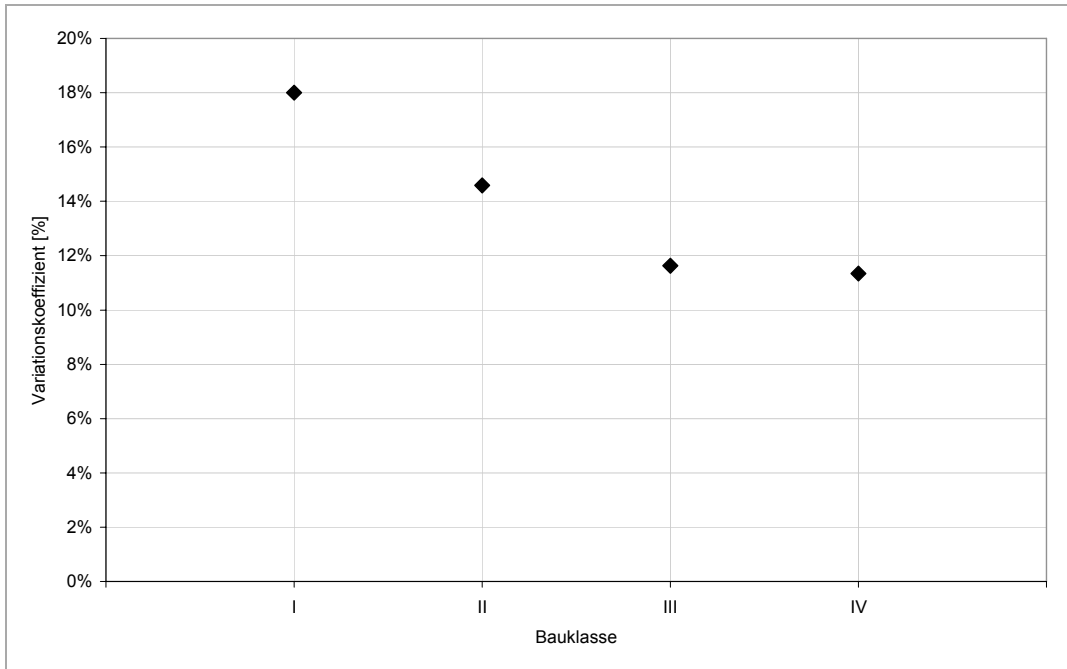


Abbildung 7-7: Variationskoeffizienten der Korrekturfaktoren für das Lastzentrum aller 20 Streckenabschnitte gruppiert nach Bauklassen

Da die Korrekturfaktoren einen relativen Bezug der Temperatur zur Deflexion herstellen, sind die höheren Korrekturfaktoren der Station Menden im Vergleich zu den Korrekturfaktoren der Station Heek im Temperaturbereich unter 20 °C auf die an der Station Menden gemessenen kleineren Deflexionen zurückzuführen. Die an der Station Menden gemessenen Deflexionen sind aufgrund eigener Erfahrungen für Messungen auf Asphaltbefestigungen verhältnismäßig klein. Die höheren Korrekturfaktoren im Temperaturbereich unter 20 °C, im Falle kleiner Deflexionen, bedürfen einer besonderen Berücksichtigung bei der Temperaturkorrektur im Hinblick auf eine spätere Bewertung der korrigierten Deflexionen. Erfolgt diese Berücksichtigung nicht, so werden zu kleine Korrekturfaktoren für diese Fälle angewendet, was zu Folge hat, dass die auf 20 °C korrigierten Deflexionen zu gering sind und daher hinsichtlich einer Tragfähigkeitsbewertung besser beurteilt werden. Eine eventuell zu große Korrektur einer Deflexion liegt somit auf der sicheren Seite im Hinblick auf die Beurteilung der Tragfähigkeit.

Anhand der an den 20 Streckenabschnitten gemessenen Deflexionen wurde untersucht, welche Deflexionen im Hinblick auf die Temperaturkorrektur als gering einzuordnen sind. Hierzu wurden aus der gesamten Datenbasis die Deflexionsmulden und zugehörigen Korrekturfaktoren herausgefiltert, die unter 10 °C Asphaltkörpertempe-

ratur gemessen worden sind. Anschließend erfolgten in verschiedenen Schritten Gruppierungen der Deflexionen nach ihrer Größe und die Berechnung des mittleren Korrekturwertes pro Gruppe. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Anhand der Ergebnisse aus Schritt 1 kann erkannt werden, dass eine Unterscheidung der Korrekturfaktoren im Bereich von mindestens 100 μm zu suchen ist, da die mittleren Korrekturfaktoren von Gruppe 1 rund 9 % höher als die der Gruppe 2 sind und sich somit deutlich voneinander unterscheiden.

In Schritt 2, vgl. Tabelle 7-1, wurden die Deflexionen über 100 μm weiter gruppiert. Einen deutlichen Niveauunterschied der gemittelten Korrekturfaktoren, jeweils rund 9 %, ist zu erkennen bei

- Geofon $D_{0\text{mm}}$: 140 μm
- Geofon $D_{200\text{mm}}$: 130 μm
- Geofon $D_{300\text{mm}}$: 120 μm
- Geofon $D_{450\text{mm}}$: 110 μm
- Geofon $D_{600\text{mm}}$: 100 μm

Die so ermittelten Grenzwerte werden bei der Herleitung der Temperaturkorrekturfunktion berücksichtigt. Eine Überprüfung des Temperaturbereiches über 20 °C hatte zum Ergebnis, dass ähnliche Zusammenhänge in diesem Temperaturbereich nicht festzustellen sind.

Tabelle 7-1: Mittlere Korrekturfaktoren der Streckenmessungen in verschiedenen Deflexionsbereichen bei Asphaltkörpertemperaturen unter 10 °C

Schritt	Gruppen	Deflexionsbereich	Mittelwert der Korrekturfaktoren [-]				
			$D_{0\text{mm}}$	$D_{200\text{mm}}$	$D_{300\text{mm}}$	$D_{450\text{mm}}$	$D_{600\text{mm}}$
1	Gruppe 1	0 – 100 μm	1,307	1,252	1,197	1,171	1,115
	Gruppe 2	> 100 μm	1,230	1,193	1,144	1,095	1,043
2	Gruppe 1	0 – 100 μm	1,307	1,252	1,197	1,171	1,115
	Gruppe 2	101 – 110 μm	1,316	1,309	1,236	1,167	1,014
	Gruppe 3	111 – 120 μm	1,319	1,255	1,194	1,074	1,038
	Gruppe 4	121 – 130 μm	1,273	1,233	1,127	1,079	1,037
	Gruppe 5	131 – 140 μm	1,301	1,179	1,163	1,080	1,038
	Gruppe 6	> 140 μm	< 1,200	< 1,200	< 1,200	< 1,100	< 1,100

Aus Abbildung 7-5 ist erkennbar, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen den Asphaltkörpertemperaturen und den Korrekturfaktoren vorliegt. Dieser lineare Zusammenhang wird auch in einschlägigen Quellen beschrieben, z.B. in [7]. Zudem wird in einigen Quellen, z. B. in [7] und [29], ein logarithmischer Zusammenhang nachgewiesen.

Anhand von Regressionsberechnungen wurde diese erste Beobachtung überprüft. Hierzu wurden verschiedene Funktionstypen (linear, polynomisch, logarithmisch) für die Regression der in Abbildung 7-5 dargestellten Korrekturfaktoren verwendet und die Anpassungsgüte berechnet. Die Ergebnisse sind Tabelle 7-2 zu entnehmen. Demnach sind alle drei Funktionstypen für die Regression der Korrekturfaktoren geeignet. Die polynomische und lineare Funktion erzielen die höchsten Bestimmtheitsmaße. Höhere Bestimmtheitsmaße können theoretisch mit polynomischen Funktionen höherer Ordnung erzielt werden, da die Anzahl der Wendepunkte der Funktionskurve steigt. Allerdings werden hierdurch nur die vorhandenen Streuungen der Werte auf der Ordinate, vgl. Abbildung 7-5, ausgeglichen, d.h. die Gültigkeit der Regressionsfunktion für andere Streckenabschnitte wird eingeschränkt.

Tabelle 7-2: Anpassungsgüte Regressionsberechnung der Temperaturkorrekturfaktoren

Datenbasis	R ²		
	linear	Funktionstyp polynomisch (4. Grades)	logarithmisch
Heek und Menden	0,903	0,916	0,893
Heek	0,936	0,938	0,878
Menden	0,912	0,941	0,915

Die streckenbezogene Betrachtung der Bestimmtheitsmaße und der Funktionskurven zeigt, dass im Falle der Station Heek kaum Unterschiede zwischen der linearen und der polynomischen Funktion bestehen, vgl. Abbildung 7-8. Das höhere Bestimmtheitsmaß der polynomischen Funktion im Falle der Regression beider Stationen zusammen ist daher auf den Einfluss der niedrigeren Deflexionen an der Station Menden zurückzuführen.

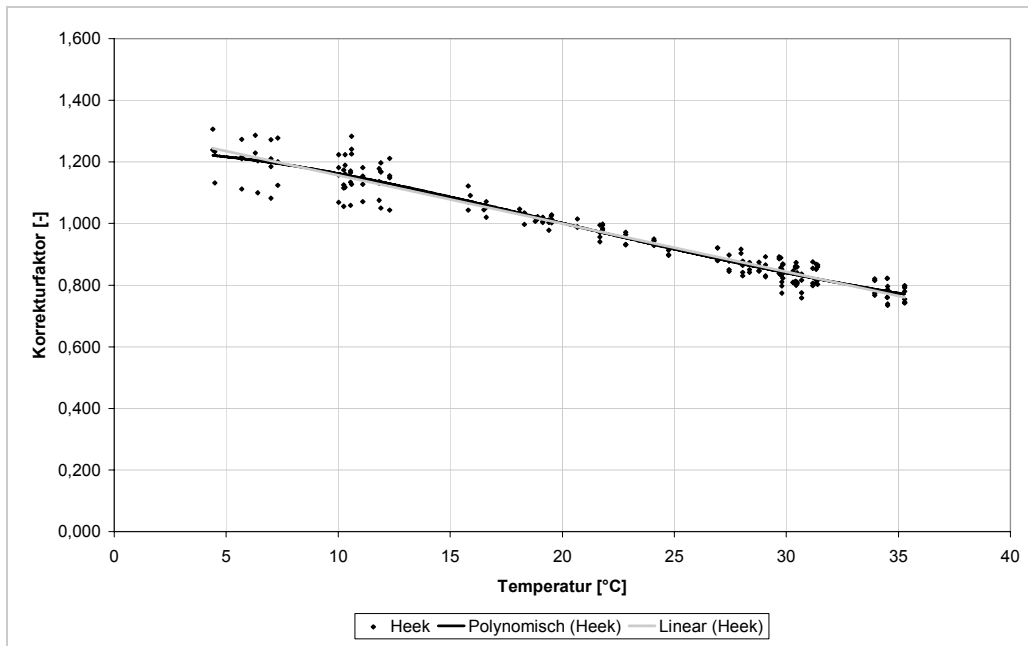


Abbildung 7-8: Regression (linear/polynomisch (4.Grades)) Korrekturfaktoren der Station Heek

7.1.4 Fehlertoleranzen bei der Herleitung der Temperaturkorrekturfunktion

Es wurde herausgestellt, dass besonders im Temperaturbereich unter 20 °C die Korrekturfaktoren bei gleicher Asphaltkörpertemperatur streuen. Die erreichbare Genauigkeit einer Temperaturkorrekturfunktion wird unmittelbar von dieser Streuung beeinflusst. In Abbildung 7-9 sind die Korrekturfaktoren (Lastzentrum) für die an der Station Heek gemessenen Deflexionen messpunktabhängig dargestellt. Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Streuung durch messpunktspezifische Einflüsse verursacht wird, die unabhängig von der Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe sind. Zudem ist in diesem Zusammenhang die erreichbare Messgenauigkeit des FWD zu beachten. Bei der Überprüfung der Kurzzeitwiederholbarkeit (10 Lastschläge an derselben Position) sollen die mit der Kraftmessdose registrierten Lasten nicht mehr als $\pm 2\%$ voneinander abweichen [22]. Die mit den Geofonen gemessenen Deflexionen sollen bei der Überprüfung der Kurzzeitwiederholbarkeit eine maximale Standardabweichung von $1,5 + (1,25\% \text{ der mittleren aufgezeichneten Deflexion})$ betragen, sofern die Deflexionen $> 40 \mu\text{m}$ sind. Für den Deflexionsbereich von 50 bis $350 \mu\text{m}$ entspricht dies circa einer Standardabweichung von $\pm 2\%$ der Deflexion. Im Falle von Deflexionen $\leq 40 \mu\text{m}$ beträgt die maximal zulässige Standardabweichung $\pm 2 \mu\text{m}$ [22]. Zur Berücksichtigung der messpunktspezifischen Einflüsse und der Genauigkeit des FWD, muss eine Fehlertoleranz bei der Temperaturkorrektur der Deflexionen angenommen werden. Diese Fehlertoleranz dient zur Orientierung bei der Herleitung des

Temperaturkorrekturansatzes und wurde an den Korrekturfaktoren der Station Heek hergeleitet, da diese weniger streuen als die der Station Menden. Ziel für die Korrektur, speziell der in Menden gemessenen Deflexionen, ist demnach innerhalb dieser Fehlertoleranz zu bleiben. Die in Abbildung 7-9 eingezeichneten einhüllenden Linien weisen auf die benötigten Fehlertoleranzen aufgrund der Messwerte hin. Die in Tabelle 7-3 zusammengefassten Fehlertoleranzen wurden für die Geofone $D_{0\text{mm}}$ bis $D_{600\text{mm}}$ gewählt.

Tabelle 7-3: Gewählte Fehlertoleranzen für die Herleitung der Temperaturkorrekturfunktionen

	$D_{0\text{mm}}$	$D_{200\text{mm}}$	$D_{300\text{mm}}$	$D_{450\text{mm}}$	$D_{600\text{mm}}$
< 20°C	± 8,0 %	± 4,5 %	± 4,5 %	± 3,5 %	± 3,5 %
	bei 5°C, linear abnehmend bis zu bei 20 °C				
> 20°C	± 2,5 %	± 2,5 %	± 2,5 %	± 2,5 %	± 2,5 %
bei 20 °C bis 35 °C					

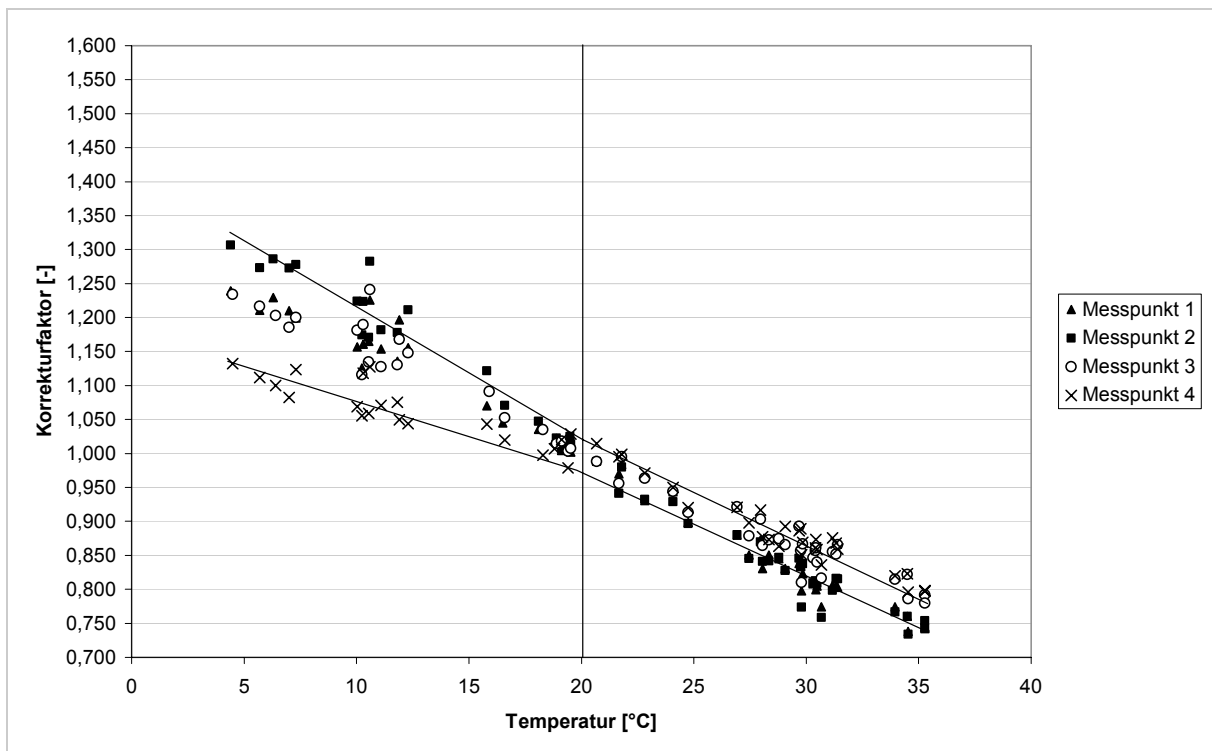


Abbildung 7-9: Messpunktabhängige Korrekturfaktoren Station Heek mit einhüllenden Linien zur Fehlertoleranzabschätzung, Beispiel

7.1.5 Temperaturkorrekturfunktion

Wie gezeigt wurde, können die Korrekturfaktoren für die Temperaturkorrektur der Deflexionen mit polynomischen Funktionen 4. Grades und mit linearen Funktionen berechnet werden. Zudem wurde festgestellt, dass sowohl Unterschiede bei der Temperaturabhängigkeit der Korrekturfaktoren über und unter 20 °C existieren als auch streckenspezifische Unterschiede der Korrekturfaktoren unter 20 °C. Für die Herleitung der Temperaturkorrekturfunktion wurden daher die Temperaturbereiche über und unter 20 °C getrennt voneinander untersucht.

Für die Temperaturkorrekturfunktionen beider Temperaturbereiche wurde jeweils eine lineare Funktion gewählt. Mithilfe von Regressionsberechnungen wurden für jeden Temperaturbereich und jede Geofonposition, unter Berücksichtigung der unter Ziffer 7.1.3 genannten Grenzwerte für kleine Deflexionen, bis einschließlich 600 mm vom Lastzentrum entfernt, Funktionen zur Berechnung der Korrekturfaktoren hergeleitet. Die Funktionen wurden anschließend ausgewertet und angepasst. Die Auswertung der Funktionen erfolgte aufgrund von vergleichenden Darstellungen der unkorrigierten und korrigierten Deflexionen sowie der Bezugsdeflexion einschließlich der in Tabelle 7-3 genannten Fehlertoleranzen, vgl. beispielhaft Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11. Die Funktionen wurden dabei so angepasst, dass die korrigierten Deflexionen möglichst nahe der Bezugsdeflexion und möglichst innerhalb der Fehlertoleranz liegen sowie die Korrekturfunktionen bei 20 °C den Wert 1,0 annehmen.

Zur Berücksichtigung der unter Ziffer 7.1.3 genannten Grenzwerte für kleine Deflexionen wird jeweils eine zusätzliche Korrekturfunktion für kleine Deflexionen unter 20 °C angegeben.

In Anlage D-3 sind für jede Geofonposition die gemessenen Deflexionen und die nach den hergeleiteten Temperaturkorrekturfunktionen (siehe unten) berechneten Deflexionen vergleichend dargestellt.

Asphaltkörpertemperaturbereich < 20 °C

Für die Temperaturkorrektur der Deflexionen im Lastzentrum und in verschiedenen Abständen vom Lastzentrum entfernt bei Asphaltkörpertemperaturen in 5 cm Tiefe unter 20 °C wurden folgende Funktionen hergeleitet:

$D_{20,1} = (1,3052 - 0,0152 \cdot T) \cdot D_{T,1}$	für $D_{0\text{mm}}$	> 140 μm	Gl. 3a
$D_{20,2} = (1,2784 - 0,0139 \cdot T) \cdot D_{T,2}$	für $D_{200\text{mm}}$	> 130 μm	Gl. 3b
$D_{20,3} = (1,2317 - 0,0115 \cdot T) \cdot D_{T,3}$	für $D_{300\text{mm}}$	> 120 μm	Gl. 3c
$D_{20,4} = (1,1779 - 0,0089 \cdot T) \cdot D_{T,4}$	für $D_{450\text{mm}}$	> 110 μm	Gl. 3d
$D_{20,5} = (1,1158 - 0,0058 \cdot T) \cdot D_{T,5}$	für $D_{600\text{mm}}$	> 100 μm	Gl. 3e

bzw. für kleine Deflexionen:

$D_{20,1} = (1,5183 - 0,0259 \cdot T) \cdot D_{T,1}$	für $D_{0\text{mm}}$	≤ 140 μm	Gl. 4a
$D_{20,2} = (1,4308 - 0,0215 \cdot T) \cdot D_{T,2}$	für $D_{200\text{mm}}$	≤ 130 μm	Gl. 4b
$D_{20,3} = (1,3102 - 0,0155 \cdot T) \cdot D_{T,3}$	für $D_{300\text{mm}}$	≤ 120 μm	Gl. 4c
$D_{20,4} = (1,3131 - 0,0156 \cdot T) \cdot D_{T,4}$	für $D_{450\text{mm}}$	≤ 110 μm	Gl. 4d
$D_{20,5} = (1,2392 - 0,0122 \cdot T) \cdot D_{T,5}$	für $D_{600\text{mm}}$	≤ 100 μm	Gl. 4e

Asphaltkörpertemperaturbereich > 20 °C

Für die Temperaturkorrektur der Deflexionen im Lastzentrum und in verschiedenen Abständen vom Lastzentrum entfernt bei Asphaltkörpertemperaturen in 5 cm Tiefe über 20 °C wurden folgende Funktionen hergeleitet:

$D_{20,1} = (1,3005 - 0,0153 \cdot T) \cdot D_{T,1}$	für $D_{0\text{mm}}$		Gl. 5a
$D_{20,2} = (1,2713 - 0,0137 \cdot T) \cdot D_{T,2}$	für $D_{200\text{mm}}$		Gl. 5b
$D_{20,3} = (1,2709 - 0,0133 \cdot T) \cdot D_{T,3}$	für $D_{300\text{mm}}$		Gl. 5c
$D_{20,4} = (1,2303 - 0,0110 \cdot T) \cdot D_{T,4}$	für $D_{450\text{mm}}$		Gl. 5d
$D_{20,5} = (1,1600 - 0,0077 \cdot T) \cdot D_{T,5}$	für $D_{600\text{mm}}$		Gl. 5e

mit $D_{20,i}$ = Deflexion bei Standardoberbautemperatur 20 °C (Bezugsdeflexion) am Geofon i [μm]

T = Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe [°C]

$D_{T,i}$ = gemessene Deflexion bei Asphaltkörpertemperatur T am Geofon i [μm]

In Anlage D-4 befinden sich Hinweise zur Umsetzung der Temperaturkorrektur in Microsoft Excel Tabellenblättern.

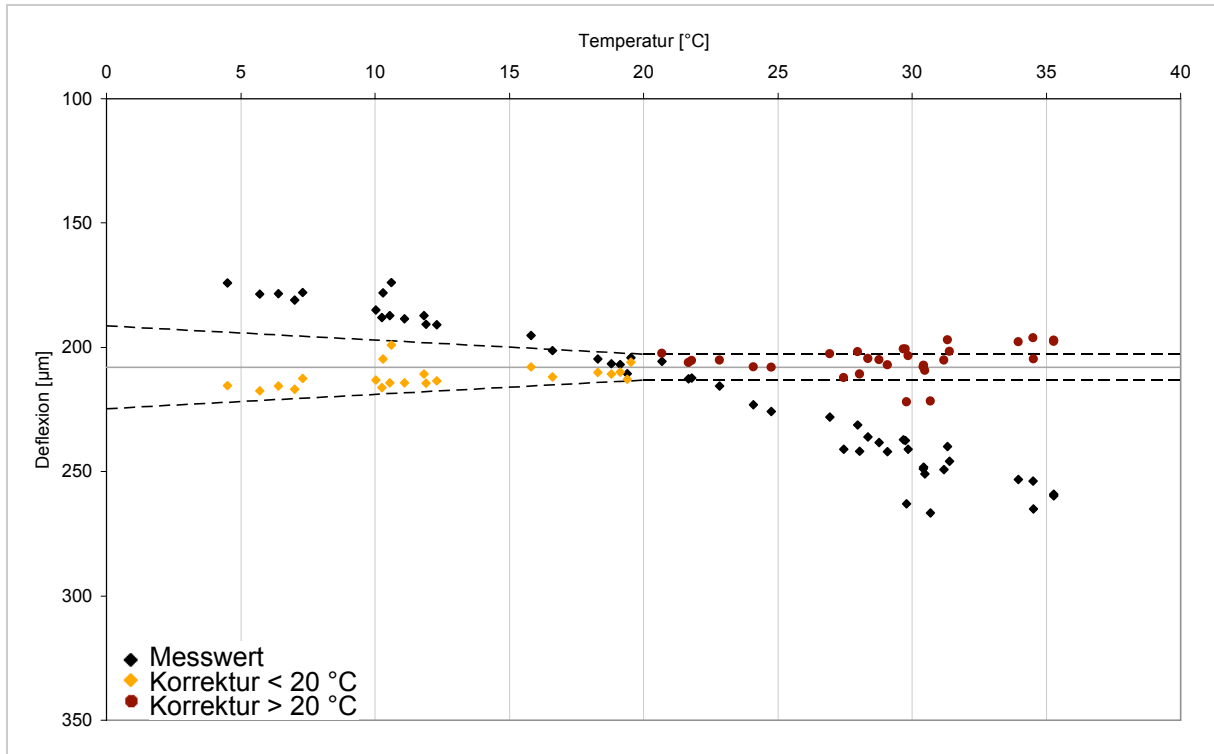


Abbildung 7-10: Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes – Heek, Messpunkt 4, Lastzentrum

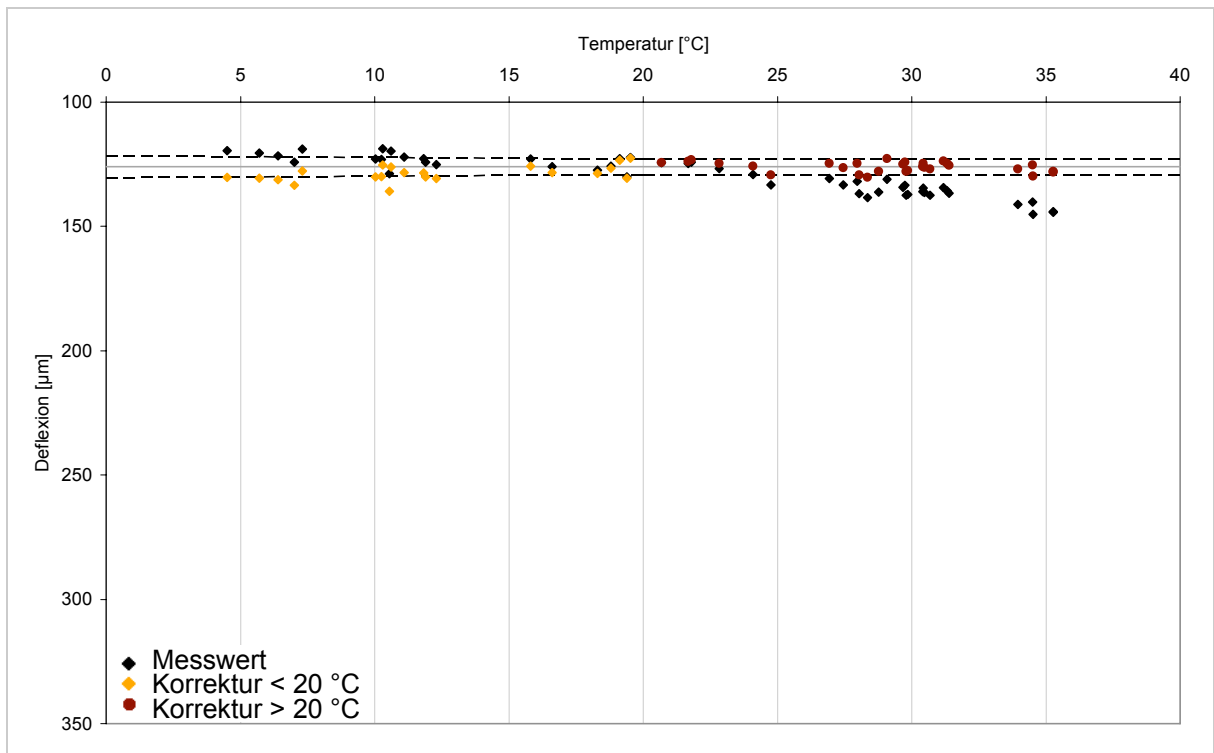


Abbildung 7-11: Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes – Heek, Messpunkt 4, 600 mm vom Lastzentrum entfernt

7.2 Verifizierung des Temperaturkorrekturansatzes

Die Gültigkeit der anhand der an den Temperaturmessstationen gemessenen Daten hergeleiteten Temperaturkorrekturfunktionen wurde an den gemessenen Daten der 20 Streckenabschnitte verschiedener Bauklassen überprüft.

7.2.1 Sensitivitätsuntersuchung

Im Rahmen von FWD Messungen erfolgt die Messung der Asphaltkörpertemperatur in kleinen Bohrlöchern. Diese Messungen sollten gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit [3] mit einer Toleranz von ± 1 °C durchgeführt werden. In einer Sensitivitätsuntersuchung wurde überprüft, welchen Einfluss diese Toleranz und allgemein eine ungenaue Angabe der Asphaltkörpertemperatur auf die Genauigkeit der Temperaturkorrektur von Deflexionen mit dem vorgestellten Ansatz hat.

Hierzu wurden kleine und große Deflexionen gemäß Ziffer 7.1.5 ausgewertet. Deflexionen, die bei Temperaturen unter und über 20 °C gemessen worden sind, wurden temperaturkorrigiert. Dabei wurden statt der gemessenen Asphaltkörpertemperatur hiervon abweichende Asphaltkörpertemperaturen verwendet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind exemplarisch in Abbildung 7-12 dargestellt. Auf der Abszisse sind die gemessenen Asphaltkörpertemperaturen aufgetragen. Auf der Ordinate die Berechnungsergebnisse, der mit den davon abweichenden fiktiven Asphaltkörpertemperaturen korrigierten Deflexionen.

Beispiel (vgl. Abbildung 7-12): Bei 15 °C wurde eine Deflexion von 200 μm im Lastzentrum gemessen. Die Temperaturkorrektur ergibt 215 μm . Bei einer davon abweichenden „falschen“ Asphaltkörpertemperaturmessung von +2 °C, also 17 °C, ergibt die Temperaturkorrektur eine Deflexion von 209 μm . Die Abweichung zur „wahren“ Bezugsdeflexion von 215 μm beträgt 2,8 %.

Aus mehreren Berechnungsergebnissen kann gefolgert werden, dass eine Toleranz von ± 2 °C bei der Asphaltkörpertemperaturmessung keine wesentlichen Fehler (gewählt max. ± 5 % der Deflexion) bei der Temperaturkorrektur von Deflexionen erzeugt.

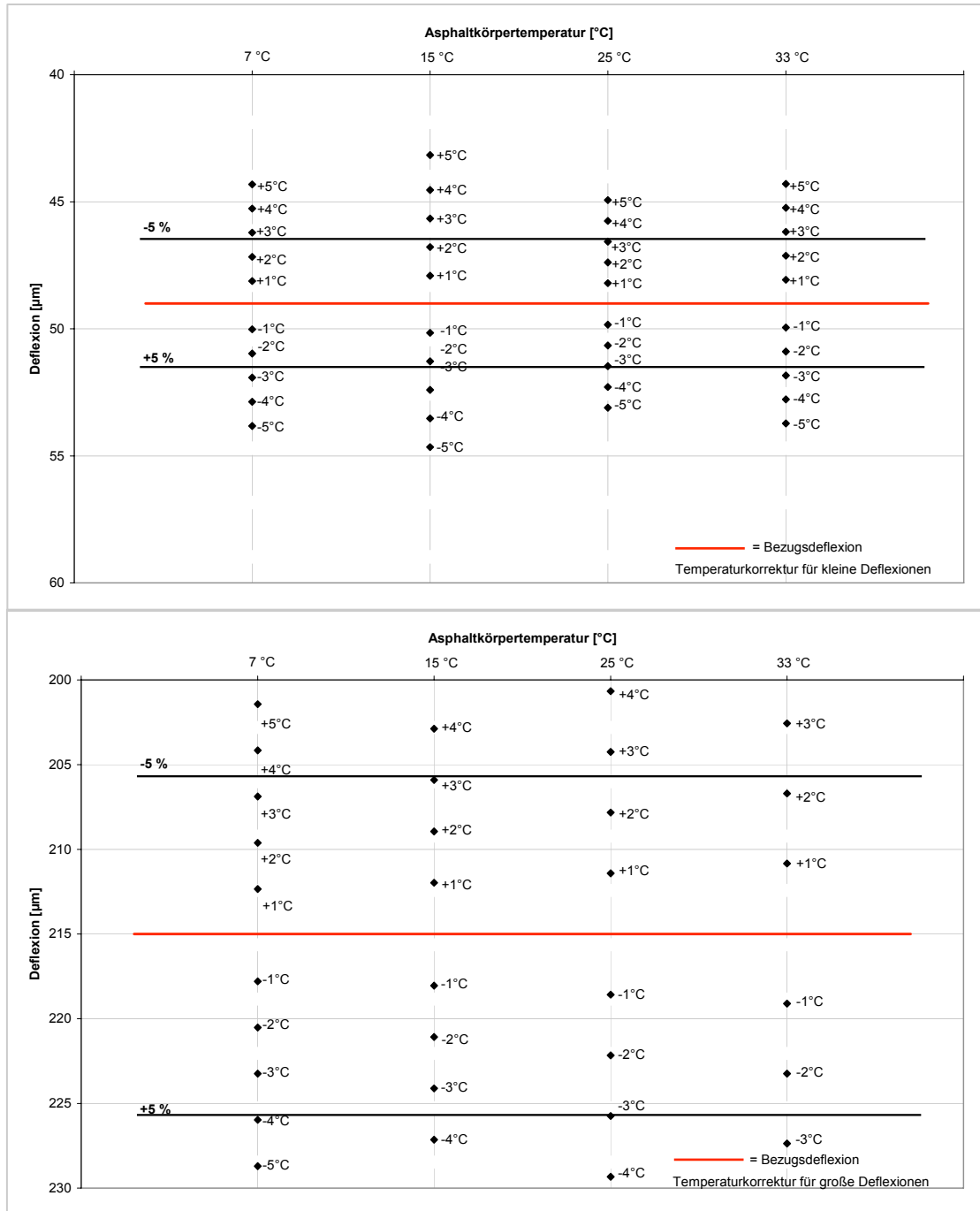


Abbildung 7-12: Untersuchung zur Sensitivität des Temperaturkorrekturansatzes (oben: kleine Deflexionen, unten: große Deflexionen)

7.2.2 Auswertung der Messdaten

Die während der FWD Messungen aufgezeichneten Asphaltkörpertemperaturen wurden den jeweiligen Deflexionsmulden zugeordnet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden an den 20 Streckenabschnitten die Asphaltkörpertemperaturen in 4, 8, 12 und 16 cm Tiefe gemessen. Die Wahl dieser Messtiefen erfolgte zu Projektbeginn und wurde über die Bearbeitungszeit beibehalten. Da für die Anwendung des Temperaturkorrekturansatzes die Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe benötigt wird, aber in die-

ser Tiefe keine Aufzeichnung erfolgte, wurde die Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe mithilfe linearer Interpolation berechnet. Die Zulässigkeit dieses Vorgehens wurde vorab anhand der Daten der fest installierten Temperaturmessstationen überprüft.

Anhand der so bestimmten Asphaltkörpertemperaturen wurden die Deflexionen jedes Messpunktes bis einschließlich 600 mm vom Lastzentrum mit den o.g. Gleichungen 3a bis 3e bzw. 4a bis 4e und 5a bis 5e auf die Deflexion bei 20 °C Asphaltkörpertemperatur korrigiert. Mithilfe von Regressionsberechnungen und grafischer Auswertungen wurde aus den wiederholten Messungen für jeden Messpunkt der 20 Streckenabschnitte die Bezugsdeflexion bei 20 °C bestimmt.

Für die Auswertung wurde die jeweilige absolute und relative Abweichung von der korrigierten Deflexion zur Bezugsdeflexion berechnet und in Häufigkeitsverteilungen dargestellt. So konnte unter anderem überprüft werden, ob die durch die Korrekturfunktionen verursachten Abweichungen im positiven wie auch negativen Bereich annähernd gleichverteilt sind, also beispielsweise keine generelle zu hohe Korrektur der Deflexionen verursacht wird.

Die Auswertung erfolgte sowohl für die gesamte Datenbasis, als auch nach Bauklassen getrennt, vgl. Tabelle 7-4. Die Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zeigt, dass die Abweichungen normalverteilt sind und fast ausschließlich im Bereich von $\pm 10\%$ liegen, vgl. Abbildung 7-13. Bauklassenabhängige Unterschiede sind kaum zu erkennen, lediglich im Falle der Bauklasse IV streuen die Ergebnisse etwas mehr im Bereich $\pm 10\%$ bis $\pm 20\%$. Die Berechnung der Standardabweichungen ergibt für alle betrachteten Geofonpositionen eine Standardabweichung von 7,4 % der korrigierten Deflexion zur berechneten Bezugsdeflexion.

Wie schon anhand der an den Temperaturmessstationen gemessenen Deflexionsmulden erkennbar, sind streckenspezifische und messpunktspezifische Einflüsse vorhanden, die nicht vollständig mit einer streckenunabhängigen Temperaturkorrektur erfasst werden können. Welchen Einfluss die genannten relativen Abweichungen auf die nach der Temperaturkorrektur durchzuführende Beurteilung der Tragfähigkeit besitzen, kann aufgrund eines fehlenden Bewertungshintergrundes für die Tragfähig-

keit nicht beurteilt werden. Es wird daher angenommen, dass die genannten Abweichungen sowie die Standardabweichung der korrigierten Deflexionen in Bezug zu den berechneten Bezugsdeflexionen tolerierbar sind, u.a. weil diese sich auch nahe der Messgenauigkeit des FWD befinden.

Strecken- oder messpunktspezifische Einflüsse, die nicht mit dem vorgestellten Temperaturkorrekturansatz erfasst werden können, sind beispielsweise:

- Baustoffspezifische Temperaturabhängigkeiten der E-Moduln der verschiedenen Asphaltsschichten
- Struktureller Zustand und Alter der Asphaltsschichten (laut [11] ist die Temperatursensitivität von Asphaltbefestigungen mit zunehmendem Alter abnehmend)
- Wassergehalt der ungebundenen Schichten (z.B. bei unzureichender Entwässerungseinrichtung)
- Sonstige Einflüsse aus den Schichten unterhalb der Asphaltsschicht und des Untergrundes / Unterbaues

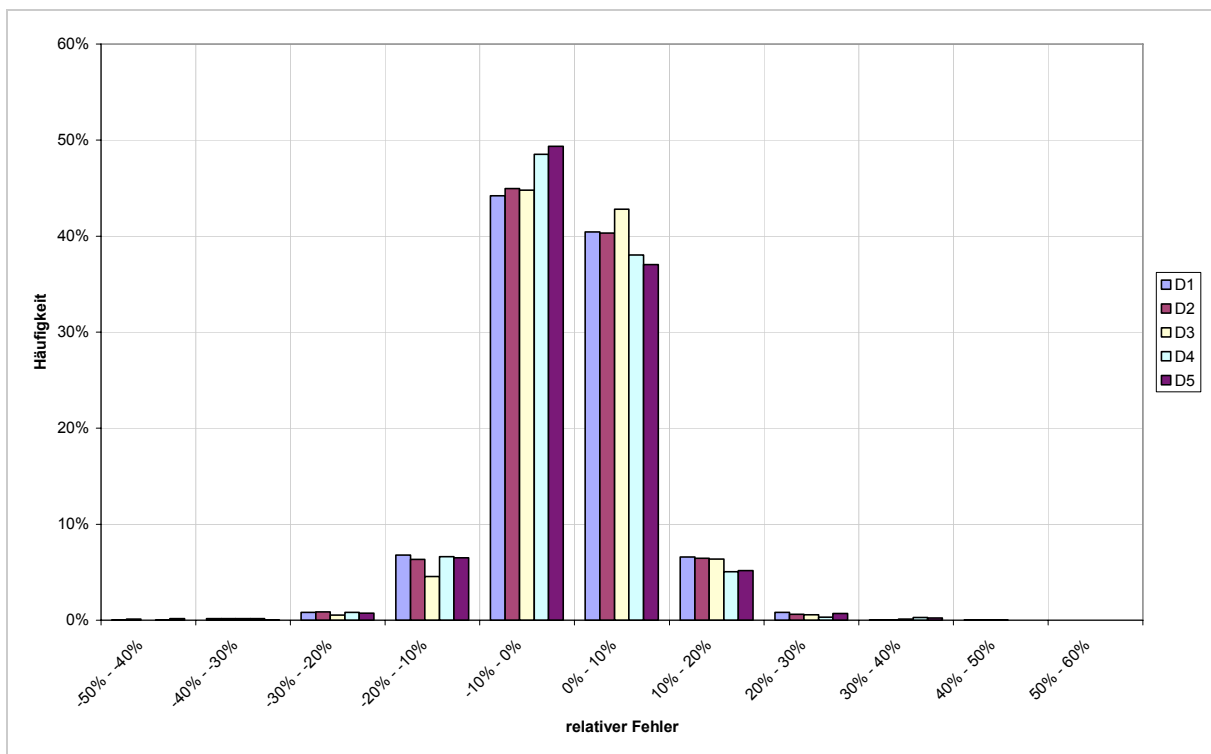


Abbildung 7-13: Häufigkeitsverteilung der relativen Fehler (aus 1.719 Deflexionsmulden)

Tabelle 7-4: Relative Abweichungen bei Korrektur mit neuem Ansatz

$t_5 < 20\text{ °C} < t_5$		relative Häufigkeit an Geofonposition				
Abweichung der korrigierten Deflexion von der berechneten Bezugsdeflexion innerhalb von:		D0	D2	D3	D4	D5
		0 mm	200 mm	300 mm	450 mm	600 mm
±5 %	gesamte Datenbasis	57%	57%	60%	59%	59%
±10 %		85%	85%	88%	87%	86%
±10 %	Bauklasse I	84%	84%	88%	85%	84%
±10 %	Bauklasse II	88%	91%	92%	93%	94%
±10 %	Bauklasse III	89%	87%	93%	94%	95%
±10 %	Bauklasse IV	78%	79%	77%	75%	73%
$t_5 < 20\text{ °C}$		relative Häufigkeit an Geofonposition				
Abweichung der korrigierten Deflexion von der berechneten Bezugsdeflexion innerhalb von:		D1	D2	D3	D4	D5
		0 mm	200 mm	300 mm	450 mm	600 mm
±5 %	gesamte Datenbasis	52%	53%	56%	54%	53%
±10 %		82%	84%	86%	84%	85%
±10 %	Bauklasse I	72%	74%	80%	75%	76%
±10 %	Bauklasse II	82%	86%	89%	90%	92%
±10 %	Bauklasse III	95%	95%	96%	95%	93%
±10 %	Bauklasse IV	82%	83%	81%	78%	78%
$t_5 > 20\text{ °C}$		relative Häufigkeit an Geofonposition				
Abweichung der korrigierten Deflexion von der berechneten Bezugsdeflexion innerhalb von:		D1	D2	D3	D4	D5
		0 mm	200 mm	300 mm	450 mm	600 mm
±5 %	gesamte Datenbasis	63 %	60 %	63 %	64 %	64 %
±10 %		86 %	86 %	88 %	88 %	87 %
±10 %	Bauklasse I	94 %	95 %	97 %	95 %	92 %
±10 %	Bauklasse II	95 %	98 %	97 %	98 %	97 %
±10 %	Bauklasse III	84 %	81 %	91 %	93 %	98 %
±10 %	Bauklasse IV	69 %	73 %	72 %	71 %	65 %

7.3 Anwendungsbeispiel

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise werden im Folgenden zwei Anwendungsbeispiele für die Temperaturkorrektur vorgestellt.

Beispiel 1 – Lastzentrum, über 20 °C:

Messwerte:

Temperatur in 5 cm Tiefe = 24 °C [Fall: > 20 °C]

Deflexion im Lastzentrum = 251 µm [Fall: 0 mm]

Temperaturkorrektur:

$$D_{20,1} = (1,3005 - 0,0153 \cdot 24) \cdot 251 = 234$$

Ergebnis:

Deflexion im Lastzentrum bei 20 °C = 234 µm

Beispiel 2 – 300 mm vom Lastzentrum, unter 20 °C, kleine Deflexion:

Messwerte:

Temperatur in 5 cm Tiefe = 14 °C [Fall: < 20 °C]

Deflexion bei 300 mm = 117 µm [Fall: 300 mm / < 120 µm]

Temperaturkorrektur:

$$D_{20,3} = (1,3102 - 0,0155 \cdot 14) \cdot 117 = 128$$

Ergebnis:

Deflexion bei 300 mm und bei 20 °C = 128 µm

8 Zusammenfassung

Tragfähigkeitsmessungen auf Asphaltbefestigungen werden seit Jahren sowohl international als auch national mit dem Falling-Weight-Deflectometer durchgeführt. Für die vergleichbare Darstellung und Bewertung der Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD müssen die Messwerte unabhängig von Einflüssen sein, die nicht im direkten Zusammenhang mit der Tragfähigkeit an dem jeweiligen Messpunkt stehen. Hierzu werden Anforderungen an das Messgerät FWD für Messungen auf Asphaltbefestigungen im Arbeitspapier Tragfähigkeit [3] standardisiert. Diese Standardisierungen umfassen unter anderem die Anforderungen an den Kraftimpuls (Lastgröße und Belastungsdauer bzw. -frequenz) und die Anordnung der Geophone am FWD.

Klimatische Einflüsse auf die mit dem FWD gemessene Deflexionsmulde sind die Asphaltkörpertemperatur, der Wassergehalt und die Temperatur (sofern unter 0 °C) der Schichten ohne Bindemittel bzw. des Untergrundes/Unterbaues. In dieser Arbeit wurden die klimatischen Einflüsse auf die Deflexionsmulde definiert und deren Wirkung qualitativ dargestellt. Eine Standardisierung der Messwerte hinsichtlich klimatischer Einflüsse kann entweder durch Einschränkung des Zeitraumes für die Messungen oder durch Bereinigung der Messwerte von diesen Einflüssen erfolgen. Schwankungen des Wassergehaltes und Temperaturen unter 0 °C in den Schichten ohne Bindemittel und im Untergrund/Unterbau sind in der Regel nur während der Frost- und Tauperiode zu erwarten. Da der Wassergehalt und der Grad der Durchfrostung nicht ohne vertretbaren Aufwand bestimmt werden kann, sollten innerhalb dieser Perioden keine FWD Messungen durchgeführt werden. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexionsmulde erfolgt eine Umrechnung der gemessenen Deflexionen auf eine Standardoberbautemperatur von 20 °C, die sogenannte Temperaturkorrektur.

Ein wissenschaftlich begründeter Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen existiert derzeit nicht in Deutschland. Ersatzweise wird ein Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem Benkelman-Balken gemessenen Einsenkungen verwendet. International existierende Ansätze, es handelt sich dabei in der Regel um empirisch hergeleitete Ansätze, können nicht ohne weiteres

für die Anwendung in Deutschland übernommen werden, da diese in und für Regionen mit anderen klimatischen Verhältnissen oder an Asphaltbefestigungen mit deutlich geringeren Asphaltstärken hergeleitet worden sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen solchen Ansatz für die Temperaturkorrektur von mit dem FWD gemessenen Deflexionen herzuleiten. Die für die Anwendung des Temperaturkorrekturansatzes benötigten Eingabegrößen sollten dabei für die praktische Anwendung mit vertretbarem Aufwand zu ermitteln sein, d.h. dass beispielsweise detaillierte Baustoffparameter, die nicht in situ bestimmt werden können, als Eingabegröße nicht in Betracht kamen. Es sollte somit ein streckenunabhängiger Ansatz hergeleitet werden.

Hierzu wurde eine umfangreiche Datenbasis aufgestellt, die sowohl die Temperaturverhältnisse in einer Asphaltbefestigung beschreibt, als auch den Temperatureinfluss auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionen. Das Untersuchungsprogramm bestand im Wesentlichen aus zwei Kernpunkten, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- Messung von Asphalttemperaturgradienten über mehrere Monate hinweg
- Wiederholende FWD Messungen an den selben Messpunkten zu verschiedenen Jahreszeiten und verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen

An zwei Streckenabschnitten, Schichtenfolge und –dicken gemäß Bauklasse I und III der Zeile 1 der RStO [41], wurden Temperatursensoren in verschiedenen Tiefen des Asphaltkörpers fest installiert. Die Daten dieser Temperaturmessstationen wurden ununterbrochen minütlich über ein Jahr hinweg aufgezeichnet. Die so gemessenen Asphaltkörpertemperaturen wurden durch meteorologische Daten und Globalstrahlungsdaten ergänzt.

Im unmittelbaren Bereich der Temperaturmessstationen wurden FWD Messungen an dauerhaft markierten Messpunkten durchgeführt (Punktmessungen). Die Messungen wurden bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen und Jahreszeiten durchgeführt. Zusätzlich wurden auf zwanzig Streckenabschnitten in Nordrhein-Westfalen wiederholend FWD Messungen bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen und Jahreszeiten durchgeführt (Streckenmessungen). Die Auswahl der zwanzig Stre-

ckenabschnitte setzte sich aus jeweils fünf Streckenabschnitten der Bauklasse I, II, III und IV zusammen, die aufgrund vorab festgelegter Kriterien ausgewählt wurden. An jedem der zwanzig Streckenabschnitte wurden mehrere Bohrkerne entnommen und untersucht. Die Bohrkernentnahmen dienen der Dokumentation des Aufbaues des Asphaltkörpers, und um die nötigen Eingabegrößen für die Berechnung von temperaturabhängigen Asphalt E-Moduln zu erhalten.

Ergänzend wurden im unmittelbaren Bereich der fest installierten Temperaturmessstationen Asphaltkörpertemperaturmessungen mit einem mobilen Temperaturmesssystem in kleinen Bohrlöchern durchgeführt. Diese Messungen werden üblicherweise während FWD Messungen an ausgewählten Positionen durchgeführt. Ergebnis dieser Messungen war, dass die Verwendung einer Kontaktflüssigkeit im Bohrloch keinen Vorteil erbringt und dass die erste Ablesung am Thermometer, des durch den Bohrvorgang zunächst erhitzten Asphaltes, erfolgen kann, wenn sich die Temperatur innerhalb von zwei Minuten um nicht mehr als 0,2 °C ändert. Zudem wurde eine internationale Umfrage unter FWD Betreibern durchgeführt, in der die verschiedenen Vorgehensweisen zur Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur abgefragt worden sind.

Die gemessenen Temperaturdaten, FWD Deflexionen und Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen wurden zunächst zur Bewertung der Datenbasis sowie zur Plausibilitätsprüfung verschiedenen Auswertungen unterzogen. Für die qualitative und quantitative Beschreibung des Einflusses der Asphaltkörpertemperatur auf die mit dem FWD gemessenen Deflexionen und zur Herleitung des Temperaturkorrekturansatzes wurden verschiedene Auswertungen und Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden.

Temperaturabhängigkeit des Asphalt E-Moduls

Anhand der an den betrachteten Streckenabschnitten entnommenen Bohrkerne wurden verschiedene Materialparameter für jede Asphaltsschicht bestimmt und daraus E-Moduln nach FRANCKEN und VANELSTRAETE [19] für verschiedene Temperaturen und eine konstante Belastungsfrequenz berechnet. Aus den Berechnungsergebnissen wurde abgeleitet, dass die E-Moduln in der Regel von der Deckschicht bis zur Asphalttragschicht zunehmend sind sowie

die Differenzen der verschiedenen E-Moduln untereinander mit zunehmender Temperatur abnehmend sind. Zudem wurde aus den Berechnungsergebnissen abgeleitet, dass die E-Moduln der einzelnen Schichten der Streckenabschnitte sich teilweise sehr voneinander unterscheiden. Jeder Streckenabschnitt weist daher ein aus den E-Moduln abzuleitendes eigenes temperaturabhängiges Verformungsverhalten auf.

Temperaturgradienten und Temperaturganglinien

Mithilfe der Auswertung der meteorologischen Randdaten, der Globalstrahlungsdaten und der Oberflächentemperaturen konnten Kriterien hergeleitet werden, welche die gemessenen Temperaturtagesganglinien in drei Grundtypen einteilen und somit sonnige, wechselhafte und sehr bedeckte bzw. niederschlagsreiche Tage voneinander unterscheiden. Dies ermöglichte die Reduzierung der beeinflussenden Faktoren (bspw. Niederschlagsdauer und -menge) bei der Auswertung von Temperaturgradienten und Tagesganglinien durch gezielte Selektierung von Messtagen.

Anhand von vergleichenden Darstellungen und Auswertungen konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Temperaturganglinien und Temperaturgradienten im Asphaltkörper unabhängig von dessen Schichtdicke sind. Lediglich bezüglich der Tageshöchsttemperaturen können Unterschiede durch das größere volumenbezogene Speichervermögen des dickeren Asphaltkörpers festgestellt werden.

Bauklassenabhängigkeit

Anhand der Punktmessungen an den Temperaturmessstationen konnte gezeigt werden, dass, obwohl die absolute Ausprägung der Deflexionsmulden bauklassenabhängig sehr unterschiedlich ist, der prozentuale Temperatureinfluss weitestgehend unabhängig von der jeweiligen Bauklasse ist.

Abstand vom Lastzentrum

Anhand von Ergebnissen aus Mehrschichtenrechnungen und der mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Asphaltkörpertemperatur auf die Deflexionsmulde mit zunehmendem Abstand vom Lastzentrum abnimmt. Anhand der an allen Streckenabschnitten

gemessenen Deflexionsmulden wurde analog zum Arbeitspapier Tragfähigkeit [5] gezeigt, dass die Deflexionen im Abstand von 600 mm vom Lastzentrum noch von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst werden, während die Deflexionen an der nächsten Geofonposition, 900 mm vom Lastzentrum entfernt, nicht mehr von der Asphaltkörpertemperatur beeinflusst werden. Zudem wurde festgestellt, dass die Temperaturkorrektur in Abhängigkeit von der Geofonposition durchzuführen ist.

Lastabhängigkeit

Die FWD Messungen im unmittelbaren Bereich der fest installierten Temperaturmessstationen wurden jeweils mit einer Last von 50 kN und 90 kN durchgeführt. Aus der Gegenüberstellung der bei verschiedenen Asphaltkörpertemperaturen gemessenen Deflexionen konnte abgeleitet werden, dass ein von der Asphaltkörpertemperatur unabhängiger linearer Zusammenhang zwischen den Deflexionen bei einer Last von 50 kN und 90 kN besteht. Auf eine Berücksichtigung der Lastgröße bei der Temperaturkorrektur kann daher verzichtet werden.

Messtiefe zur Bestimmung der Asphaltkörpertemperatur

Im Rahmen von FWD Messungen wird aus ablauftechnischen Gründen in der Regel nicht der komplette Temperaturgradient im Asphaltkörper erfasst. Stattdessen wird eine mittlere Asphaltkörpertemperatur bzw. eine Asphaltkörpertemperatur in einer definierten Bohrlochtiefe für die Temperaturkorrektur verwendet. Die Bohrlochtiefe sollte derart gewählt werden, dass die dort gemessene Asphaltkörpertemperatur repräsentativ für die Verwendung im Rahmen der Temperaturkorrektur ist, und die Herstellung des Bohrloches sich aus praktischen Gründen gut in den Ablauf von FWD Messungen integrieren lässt.

Der oberflächennahe Temperaturgradient ist sehr dem Einfluss kurzfristiger Wetteränderungen unterlegen und stellt daher keinen eindeutigen Zusammenhang zu den mit dem FWD gemessenen Deflexionen her. Andererseits sollte die Bohrlochtiefe nicht zu tief gewählt werden, da der Aufwand für die Herstellung des Bohrloches, vor allem bei niedrigen Temperaturen, mit zunehmender Bohrlochtiefe steigt. Aus diesen Gründen wurde eine Bohrlochtiefe von 5 cm

für die Messung der Asphaltkörpertemperatur gewählt. Anhand einer Sensitivitätsuntersuchung konnte gezeigt werden, dass die Vernachlässigung des Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht, d.h. es wird die gleiche Temperatur wie in 5 cm Tiefe angenommen, keinen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Deflexionsmulde hat. Die Wahl der Bohrlochtiefe konnte somit aufgrund aller genannten Aspekte für geeignet befunden werden.

Anhand der an den fest installierten Temperaturmessstationen gemessenen Asphaltkörpertemperaturen und Deflexionsmulden wurde ein Ansatz zur Temperaturkorrektur von FWD Deflexionen hergeleitet. Hierzu wurde zunächst für jeden FWD Messpunkt die Bezugsdeflexion bei 20 °C bestimmt und anschließend für jede gemessene Deflexion ein Korrekturfaktor berechnet. Mithilfe von Regressionsberechnungen wurde für jede Geofonposition eine Berechnungsgleichung für den Korrekturfaktor hergeleitet. Dabei wurde festgestellt, dass die Trennung in zwei Temperaturbereiche bei 20 °C Asphaltkörpertemperatur die Genauigkeit der Berechnungsgleichungen steigert. Des Weiteren wurden relativ geringe Deflexionen bei Temperaturen unter 20 °C durch weitere Temperaturkorrekturfunktionen berücksichtigt.

Zur Verifizierung, der so hergeleiteten Temperaturkorrekturfunktionen, wurden die an den zwanzig Streckenabschnitten gemessenen Deflexionen verwendet. Diese Deflexionen wurden mit dem hergeleiteten Ansatz temperaturkorrigiert und ausgewertet. Die vorgestellten Temperaturkorrekturfunktionen erzielen dabei eine Genauigkeit, die für einen streckenunabhängigen Ansatz als ausreichend angenommen wird. Eine Steigerung der Genauigkeit wäre evtl. durch die Erweiterung der Eingabegrößen, wie beispielsweise Bitumenkennwerte, möglich, schränkt jedoch die Anwendbarkeit eines Temperaturkorrekturansatzes erheblich ein.

9 Quellenverzeichnis

- [1] Arand, W., Lorenzl, H.: Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 696, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1995
- [2] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil A „Messverfahren“ (Entwurf), FGSV Arbeitskreis 4.5.2, Stand März 2008
- [3] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B2.1 „Falling-Weight-Deflectometer (FWD): Beschreibung, Messdurchführung“ – Asphaltbauweisen, FGSV-Verlag, Köln, 2007
- [4] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil C1 „Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen“, FGSV-Verlag, Köln, 2005
- [5] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil C2 „FWD: Auswertung“ (Entwurf), FGSV Arbeitskreis 4.5.2, Stand Februar 2006
- [6] ASTM-Norm Nr. D 7228: Standard test method for prediction of asphalt-bound pavement layer temperatures
- [7] Baltzer, S., Jansen, J.M.: Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements, Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, 1994
- [8] Baltzer, S., Ertman-Larsen, H.J, Lukanen, E.O., Stubstad, R.N.: Prediction of AC mat temperatures for routine load/deflection measurements, Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, 1994
- [9] Barber, E.S.: Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports, Highway Research Board, Bulletin 168, Washington D.C., 1957
- [10] Beckedahl, H.; Hürtgen, H.; Straube, E.: Begleitende Forschung zur Einführung des Falling-Weight-Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 733, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1996
- [11] Bergstedt, B.: Temperature correction of falling weight deflectometer data, Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, 1990
- [12] BRRC (Belgian Road Research Centre): PRADOWIN (Version: 1.2.0.0), Hilfe-Datei, Brüssel, 2007
- [13] Buch, N., Park, D.-Y., Chatti, K.: Effective layer temperature prediction model and temperature correction via Falling Weight Deflectometer deflections, Transportation Research Record 1764, Washington D.C., 2001

- [14] Chen, D.-H., Bilyeu, J., Lin, H.-H., Murphy, M.: Temperature correction on Falling Weight Deflectometer measurements, Transportation Research Record 1716, Washington D.C., 2000
- [15] De Jonghe, T., Van den Bergh, W., Verheyen, J.: Studie in verband met een wegopbouw bestaande uitsluitend uit bitumineus gebonden materialen: aB³, Hogeschool Antwerpen, opleiding Bouwkunde, [<http://www.ha.be/iwt/antwerpen/bouwkunde/alg/doc1.pdf>] (Stand: 19.02.2008)
- [16] Deutscher Wetterdienst - Pressemeldungen [<http://www.dwd.de>] (Stand: 20.05.2008)
- [17] Eisenmann, J, Lempe, U., Leykauf, G.: Straßenbeanspruchung. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 26, München, 1976
- [18] FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln: Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 105, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1994
- [19] Francken, L., Vanelstraete, A.: Complex moduli of bituminous binders and mixtures. Interpretation and evaluation, Paper 4.047 Eurasphalt & Eurobitume Congress Straßburg, 1996
- [20] Francken, L., Verstraeten, J.: Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending, Transportation Research Record 515, Washington D.C., 1974
- [21] Francken, L.: Module complexe de melanges bitumineux, Rapport de recherche, Centre de Recherches Routières, Brüssel, 1973
- [22] Fuchs, M.: Fallgewichtsdeflektionsmessungen zur Tragfähigkeitsbestimmungen (Endbericht COST 336), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2001
- [23] FWD User's Group [<http://pms.nevadadot.com>] (Stand: 20.09.2007)
- [24] Gröber, H.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- [25] Häckel, H.: Meteorologie, 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2005
- [26] Hürtgen, H.: Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 361, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1982
- [27] Institut für Geographie an der Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie: Klimastationen, [<http://www.uni-duisburg-essen.de/klimatologie/technik/klimastationen>] (Stand: 19.02.2008)

- [28] Jendia, S.: Analyse des Falling-Weight-Deflectometers (FWD) und seine Interpretationsmöglichkeiten, Veröffentlichung des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1995
- [29] Kim, Y.R., Hibbs, B.O., Lee, Y.-C.: Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli, Transportation Research Record 1473, Washington D.C., 1995
- [30] Kirk, J.M.: Berechnung der Temperaturhöchstwerte in Asphalt, Bitumen 1/95, Hamburg, 1995
- [31] Krebs, H.G., Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 347, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1981
- [32] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, 16. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1999
- [33] Kunz, J.: Bessere Verkehrsinfrastruktur durch Public-Private-Partnership?, Vorlesung am Fachgebiet Straßenbau, Universität Duisburg-Essen, unveröffentlicht
- [34] Kunz, J.: Erhaltung der Bundesfernstraßen, Vorlesung am Fachgebiet Straßenbau, Universität Duisburg-Essen, unveröffentlicht
- [35] Lukanen, E.O., Stubstad, R., Briggs, R.: Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, McLean, 2000
- [36] Park, H.M., Kim, Y.R., Park, S.W.: Temperature correction of multiloading-level Falling Weight Deflectometer deflections, Transportation Research Record 1806, Washington D.C., 2002
- [37] Park, S.W., Kim, Y.R.: Temperature correction of backcalculated moduli and deflections using linear viscoelasticity and time-temperature superposition, Transportation Research Record 1570, Washington D.C., 1997
- [38] Pohlmann, P.: Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen, Schriftenreihe Heft 9, TU Braunschweig Institut für Straßenwesen, Braunschweig, 1989
- [39] RAP Stra 04 - Richtlinien für die Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau, Ausgabe 2004, FGSV-Verlag, Köln, 2005
- [40] Robinson, R.G.: A model for calculating pavement temperatures from meteorological data, TRRL Research Record, Heft 44, Washington D.C., 1985
- [41] RStO 01, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001

- [42] Schlünder, E.U., Martin, H.: Einführung in die Wärmeübertragung, 8. Auflage, Verlag Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1995
- [43] Schönwiese, C.-D.: Klimatologie, 2. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2003
- [44] Schulte, W.: Analyse des Temperaturgeschehens im Straßenoberbau und dessen Einfluss auf Ergebnisse von Einsenkungsmessungen nach Benkelman, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 423, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1984
- [45] Southgate, H.F., Deen, R.C.: Temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection, Highway Research Record 291, Washington D.C., 1969
- [46] St-Laurent, D.: A simple rational approach for temperature correction of deflection basins, Präsentation im Rahmen des FWD User's Group Meeting, Cornell University, Ithaca, 2000
- [47] Straub, A.L., Schenck jr., H.N., Przybycien, F.E.: Bituminous pavement temperature related to climate, Highway Research Record 256, Washington D.C., 1968
- [48] Straube, E.: Sensitivitätsuntersuchungen zu den Einflüssen auf Deflexionsmulden, Fachgebiet Straßenbau, Universität Duisburg-Essen, unveröffentlicht
- [49] Straube, E., Krass, K.: Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis, 8. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2005
- [50] TP GRIFF-STB BMV ARS 24/03, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Allgemeines Rundschreiben 24/03, FGSV-Verlag, Köln 2001
- [51] Volny, D.: Die analytische Methode zur Erstellung von Mischgutrezepturen für technische Asphalte, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien, 2005 (unveröffentlicht)
- [52] Von Becker, P.: Zur Annahme wirklichkeitsnäherer E-Moduli als Kennwerte für das elastische Verformungsverhalten flexibler Straßenbefestigungen bei elastizitätstheoretischer Beanspruchungsrechnungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 204, Bundesministerium für Verkehr, 1976
- [53] Wagner, W.: Wärmeübertragung, 3. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991
- [54] Wehner, B.; Siedek, P.; Schulze, K.-H.: Handbuch des Straßenbaus, Band 3, Bemessungsverfahren und besondere Bauweisen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977

- [55] Wellner, F.; Kayser, S.: Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 996, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2008
- [56] Wendehorst, R.: Baustoffkunde, 26. Auflage, Vincentz Verlag, Hannover, 2004
- [57] Wiederholungsmessungen an flexiblen Fahrbahnbefestigungen ehemaliger Untersuchungsstrecken, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 739, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 1996
- [58] Wikipedia, Suchwort „Temperaturgradient“
[<http://de.wikipedia.org/wiki/temperaturgradient>] (Stand: 20.07.2007)
- [59] Wistuba, M.: Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen, Mitteilungen Heft 15, TU Wien Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien, 2003
- [60] ZTV Asphalt-StB 01 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, FGSV-Verlag, Köln 2001
- [61] ZTV T-StB 95/02 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Ausgabe 1995/Fassung 2002, FGSV-Verlag, Köln 2002

ANLAGEN

ANLAGENVERZEICHNIS

FWD Feldbuch	A-1
Umgebungsfotos Temperaturmessstationen	A-2
Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen	B-1
Auswertung der Bohrkernschichtdicken	B-2
Ergebnisse der E-Modul Berechnungen mit PRADO	B-3
Physikalische Grundlagen des Wärmetransports	C-1
Differenzverfahren	C-2
BELLS-Verfahren	C-3
Nationale und internationale Umfrage zur Vorgehensweise bei Asphaltkörpertemperaturmessungen im Rahmen von FWD Messungen	C-4
Hinweise zur Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen	C-5
Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Temperaturgradienten der Asphalttragschicht auf die Deflexionsmulde	D-1
Prozentualer Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulden der Streckenmessungen	D-2
Gemessene und auf 20 °C korrigierte Deflexionen an den Temperaturmessstationen Heek und Menden	D-3
Hinweise zur Umsetzung der Temperaturkorrektur in Microsoft Excel Tabellenblättern	D-4

FWD Feldbuchvorlage zur Dokumentation der Streckenmessungen

Messkampagne-Nr.		Abschnitt		Lage		von Station		bis Station	
ID	Straßenbezeichnung	von Netzknoten	bis Netzknoten	Uhrzeit Start	Uhrzeit Ende	von Station	bis Station	Witterung	
Messrichtung		Messlinie	Datum	:		Uhrzeit Ende	Witterung	SO	TB
Dateiname		Messtechniker KFZ		Messtechniker FWD		Temp.-Messstation			
.mdb									
M.Punkt	Station [m]	Hindernis	Foto	Temp. Oberfläche	Beschattung	Zustandsmerkmal / Sonstiges			
1					nein / teilw. / voll				
2					nein / teilw. / voll				
3					nein / teilw. / voll				
4					nein / teilw. / voll				
5					nein / teilw. / voll				
6					nein / teilw. / voll				
7					nein / teilw. / voll				
8					nein / teilw. / voll				
9					nein / teilw. / voll				
10					nein / teilw. / voll				
11					nein / teilw. / voll				
12					nein / teilw. / voll				
13					nein / teilw. / voll				
14					nein / teilw. / voll				
15					nein / teilw. / voll				
16					nein / teilw. / voll				
17					nein / teilw. / voll				
18					nein / teilw. / voll				
19					nein / teilw. / voll				
20					nein / teilw. / voll				
21					nein / teilw. / voll				

Umgebungsfotos Temperaturmessstationen

Menden – Blickrichtung Nord



Heek – Blickrichtung Nord



Strecken ID: I - 1						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %			1,5	
	16 - 22,4	M %		4,7	12,0	
	11,2 - 16	M %		22,1	15,3	
	8 - 11,2	M %	4,0	19,1	14,8	
	5 - 8	M %	49,4	11,4	14,0	
	2 - 5	M %	19,4	9,4	13,8	
	0,71 - 2	M %	7,3	15,9	10,6	
	0,25 - 0,71	M %	3,7	7,3	6,4	
	0,09 - 0,25	M %	3,4	3,5	4,6	
Füllergehalt < 0,09	M %	12,8	6,6	8,5	8,4	
Splittgehalt	M %	72,8	66,7	69,9	70,3	
Sandgehalt	M %	14,4	26,7	21,6	21,3	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,823	2,671	2,730	2,709	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,801	2,678	2,737	2,721	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,821	3,110	2,611	2,775	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	41,8	44,2	35,0	39,7	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,71	4,25	4,44	4,29	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,27	0,19	0,21	0,21	
Bindemittelgehalt	M %	7,0	4,4	4,7	4,5	
Erweichungspunkt RuK	°C	64,2	59,4	59,0	56,4	
Penetration	Mm	33	24	36	45	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,052	1,060	1,065	1,062	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,524	2,526	2,536	2,539	
Raumdichte	g/cm ³	2,438	2,362	2,446	2,462	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,4	6,5	3,5	3,0	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	20,1	16,8	14,7	13,9	
Porenfüllungsgrad	%	83,0	61,3	75,9	78,2	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,383	2,356	2,339	2,494
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,439	2,433	2,453	Beton
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,397	2,435	2,468	2,494
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	97,7	99,7	95,6	101,2
	2. Bohrkern	%	100,0	103,0	100,3	Beton
	3. Bohrkern	%	98,3	103,1	100,9	101,2
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	5,6	6,7	7,8	1,8
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,4	3,7	3,3	Beton
	3. Bohrkern	g/cm ³	5,0	3,6	2,7	1,8

Strecken ID: I - 2						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %			15,8	
	16 - 22,4	M %		1,4	13,8	
	11,2 - 16	M %		24,5	15,3	
	8 - 11,2	M %		12,6	12,3	
	5 - 8	M %	2,9	12,4	8,3	
	2 - 5	M %	49,8	12,2	9,9	
	0,71 - 2	M %	20,1	8,7	6,8	
	0,25 - 0,71	M %	8,6	9,9	7,1	
	0,09 - 0,25	M %	3,7	6,8	11,1	
Füllergehalt < 0,09	M %	12,2	6,8	9,4	8,7	
Splittgehalt	M %	72,8	71,8	66,4	66,4	
Sandgehalt	M %	15,0	21,4	24,2	24,9	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,757	2,791	2,709	2,708	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,740	2,786	2,684	2,696	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,661	2,625	2,798	2,651	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	36,6	34,6	30,6	36,7	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,94	4,25	3,55	3,49	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,26	0,19	0,22	0,21	
Bindemittelgehalt	M %	7,2	4,4	3,8	3,7	
Erweichungspunkt RuK	°C	63,4	58,6	53,6	54,8	
Penetration	Mm	30	29	43	39	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,057	1,048	1,076	1,078	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,460	2,590	2,563	2,558	
Raumdichte	g/cm ³	2,398	2,487	2,463	2,402	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,5	4,0	3,9	6,1	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	19,4	14,8	13,0	14,8	
Porenfüllungsgrad	%	87,0	73,1	70,0	58,8	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,405	2,496	2,494	2,474
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,356	2,523	2,446	2,490
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,368	2,473	2,442	2,390
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,3	100,4	101,3	103,0
	2. Bohrkern	%	98,2	101,4	99,3	103,7
	3. Bohrkern	%	98,7	99,4	99,1	99,5
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,2	3,6	2,7	3,3
	2. Bohrkern	g/cm ³	4,2	2,6	4,6	2,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	3,7	4,5	4,7	6,6

Strecken ID: I - 3						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			1,5	
	22,4 - 31,5	M %			8,6	
	16 - 22,4	M %		1,1	7,9	
	11,2 - 16	M %		24,9	14,2	
	8 - 11,2	M %		18,9	14,3	
	5 - 8	M %	2,3	11,8	12,0	
	2 - 5	M %	45,8	9,4	12,0	
	0,71 - 2	M %	24,5	7,8	7,3	
	0,25 - 0,71	M %	8,2	9,4	7,5	
	0,09 - 0,25	M %	3,9	5,5	7,6	
Füllergehalt < 0,09	M %	3,2	4,0	5,6	6,5	
Splittgehalt	M %	12,1	7,2	9,4	9,8	
Sandgehalt	M %	72,6	73,9	69,9	62,7	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	15,3	18,9	20,7	27,5	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,755	2,821	2,708	2,714	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,807	2,810	2,703	2,724	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	2,995	2,893	2,785	2,717	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	43,2	39,8	39,0	36,0	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	6,90	3,66	3,54	4,17	
Bindemittelgehalt	M %	0,26	0,19	0,22	0,23	
Erweichungspunkt RuK	°C	7,2	3,9	3,8	4,4	
Penetration	Mm	60,0	60,0	60,4	54,8	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	38	26	24	51	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	1,038	1,078	1,048	1,059	
Raumdicke	g/cm ³	2,488	2,656	2,559	2,542	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,399	2,475	2,423	2,430	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	3,6	6,8	5,3	4,4	
Porenfüllungsgrad	%	20,4	16,2	14,3	14,9	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,407	2,400	2,348	2,486
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,394	2,566	2,402	2,469
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,360	2,504	2,430	2,516
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,3	97,0	96,9	102,3
	2. Bohrkern	%	99,8	103,7	99,1	101,6
	3. Bohrkern	%	98,4	101,2	100,3	103,5
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,3	9,6	8,2	2,2
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,8	3,4	6,1	2,9
	3. Bohrkern	g/cm ³	5,1	5,7	5,0	1,0

Strecken ID: I - 4						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			2,0	
	22,4 - 31,5	M %			2,9	
	16 - 22,4	M %		0,6	11,7	
	11,2 - 16	M %		20,3	10,8	
	8 - 11,2	M %		17,0	12,4	
	5 - 8	M %	2,2	12,4	12,2	
	2 - 5	M %	52,1	8,8	10,7	
	0,71 - 2	M %	18,8	9,5	7,0	
	0,25 - 0,71	M %	8,0	12,6	9,8	
	0,09 - 0,25	M %	3,7	6,6	8,0	
Füllergehalt < 0,09	M %	3,0	4,2	5,6	5,9	
Splittgehalt	M %	12,2	8,0	9,8	10,8	
Sandgehalt	M %	73,1	68,6	66,8	62,5	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	14,7	23,4	23,4	26,7	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,738	2,845	2,731	2,726	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,729	2,784	2,741	2,722	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	2,860	2,747	2,694	2,690	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	43,2	37,4	35,2	35,1	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	6,85	4,12	3,59	4,04	
Bindemittelgehalt	M %	0,26	0,20	0,23	0,24	
Erweichungspunkt RuK	°C	7,1	4,3	3,8	4,3	
Penetration	Mm	60,4	52,6	58,6	55,4	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	56	60	26	41	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	1,046	1,052	1,036	1,058	
Raumdicke	g/cm ³	2,466	2,632	2,570	2,549	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,381	2,459	2,445	2,456	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	3,4	6,6	4,9	3,6	
Porenfüllungsgrad	%	20,0	17,0	14,0	14,0	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	82,8	61,3	65,3	73,9
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,364	2,468	2,361	2,428
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,309	2,449	2,514	2,494
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	2,355	2,486	2,342	2,468
	2. Bohrkern	%	99,3	100,4	96,6	98,9
	3. Bohrkern	%	97,0	99,6	102,8	101,5
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	98,9	101,1	95,8	100,5
	2. Bohrkern	g/cm ³	4,1	6,2	8,1	4,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	6,4	7,0	2,2	2,2
		g/cm ³	4,5	5,5	8,9	3,2

Strecken ID: I - 5						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %		0,5	5,0	7,4
	16 - 22,4	M %		20,6	15,5	15,7
	11,2 - 16	M %	3,2	21,8	16,9	12,9
	8 - 11,2	M %	34,9	9,8	11,4	14,6
	5 - 8	M %	22,8	9,8	8,8	9,7
	2 - 5	M %	13,9	8,9	10,4	9,4
	0,71 - 2	M %	6,0	9,1	10,4	10,1
	0,25 - 0,71	M %	3,2	6,9	7,5	7,2
	0,09 - 0,25	M %	3,0	4,7	4,8	4,5
Füllergehalt < 0,09	M %	13,0	7,9	9,3	8,5	
Splittgehalt	M %	74,8	71,4	68,0	69,7	
Sandgehalt	M %	12,2	20,7	22,7	21,8	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,814	2,670	2,703	2,697	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,874	2,707	2,699	2,696	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,836	2,821	2,885	2,928	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	41,2	40,2	39,0	42,5	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,28	3,83	3,95	3,75	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,27	0,20	0,22	0,21	
Bindemittelgehalt	M %	6,5	4,0	4,2	4,0	
Erweichungspunkt RuK	°C	56,6	57,8	55,4	54,6	
Penetration	Mm	32	30	45	38	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,050	1,064	1,058	1,048	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,541	2,534	2,550	2,553	
Raumdichte	g/cm ³	2,433	2,365	2,412	2,402	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	4,3	6,7	5,4	5,9	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	19,9	16,0	15,3	15,2	
Porenfüllungsgrad	%	78,6	58,4	64,6	61,2	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,475	2,425	2,501	2,364
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,453	2,446	2,430	2,459
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,495	2,450	2,460	2,467
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	101,7	102,5	103,7	98,4
	2. Bohrkern	%	100,8	103,4	100,7	102,4
	3. Bohrkern	%	102,5	103,6	102,0	102,7
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,6	4,3	1,9	7,4
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,5	3,5	4,7	3,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	1,8	3,3	3,5	3,4

Strecken ID: II - 1						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht		
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %		4,6	0,6	
	16 - 22,4	M %		28,5	13,1	
	11,2 - 16	M %	1,1	16,9	16,4	
	8 - 11,2	M %	15,1	7,7	16,7	
	5 - 8	M %	18,8	7,7	10,6	
	2 - 5	M %	19,5	9,8	12,6	
	0,71 - 2	M %	17,6	8,5	10,2	
	0,25 - 0,71	M %	11,1	6,2	6,5	
	0,09 - 0,25	M %	6,7	3,9	4,5	
Füllergehalt < 0,09	M %	10,1	6,2	8,8		
Splittgehalt	M %	54,5	75,2	70,0		
Sandgehalt	M %	35,4	18,6	21,2		
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,820	2,660	2,683		
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,798	2,691	2,697		
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,975	2,830	2,983		
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	42,5	40,1	42,0		
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,04	3,36	3,99		
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,23	0,18	0,21		
Bindemittelgehalt	M %	6,3	3,5	4,2		
Erweichungspunkt RuK	°C	55,6	66,4	51,2		
Penetration	Mm	39	33	66		
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,052	1,049	1,058		
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,555	2,540	2,543		
Raumdichte	g/cm ³	2,451	2,325	2,388		
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	4,1	8,5	6,1		
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	19,1	16,5	15,9		
Porenfüllungsgrad	%	78,7	48,8	61,8		
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,507	2,459	2,507	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,471	2,430	2,499	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,493	2,334	2,467	
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	102,3	105,8	105,0	
	2. Bohrkern	%	100,8	104,5	104,6	
	3. Bohrkern	%	101,7	100,4	103,3	
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	1,9	3,2	1,4	
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,3	4,3	1,7	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,4	8,1	3,0	

Strecken ID: II - 2						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht		
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %			3,1	
	16 - 22,4	M %		24,4	12,1	
	11,2 - 16	M %	1,4	15,1	15,6	
	8 - 11,2	M %	17,4	10,3	16,8	
	5 - 8	M %	18,5	10,9	13,5	
	2 - 5	M %	18,3	10,9	10,6	
	0,71 - 2	M %	18,9	11,6	10,4	
	0,25 - 0,71	M %	10,5	5,5	6,1	
	0,09 - 0,25	M %	6,0	3,3	3,6	
Füllergehalt < 0,09	M %	9,0	8,0	8,2		
Splittgehalt	M %	55,6	71,6	71,7		
Sandgehalt	M %	35,4	20,4	20,1		
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,811	2,676	2,696		
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,813	2,682	2,702		
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,952	2,659	2,781		
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	41,9	39,2	37,9		
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,37	3,96	3,91		
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,22	0,20	0,21		
Bindemittelgehalt	M %	6,6	4,2	4,1		
Erweichungspunkt RuK	°C	59,8	64,2	55,6		
Penetration	Mm	30	38	31		
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,059	1,040	1,046		
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,544	2,510	2,539		
Raumdichte	g/cm ³	2,480	2,381	2,394		
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,5	5,1	5,7		
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	18,5	14,9	15,4		
Porenfüllungsgrad	%	86,4	65,4	62,9		
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,425	2,372	2,476	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,468	2,377	2,344	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,464	2,456	2,501	
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	97,8	99,8	103,4	
	2. Bohrkern	%	99,5	99,8	97,9	
	3. Bohrkern	%	99,4	103,1	104,5	
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	4,7	5,5	2,5	
	2. Bohrkern	g/cm ³	4,7	5,5	2,5	
	3. Bohrkern	g/cm ³	4,7	5,5	2,5	

Strecken ID: II - 3						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht		
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %			0,6	0,7
	16 - 22,4	M %		24,4	18,1	16,2
	11,2 - 16	M %		15,1	18,3	17,4
	8 - 11,2	M %	4,3	10,3	11,5	13,2
	5 - 8	M %	52,1	10,9	11,3	13,8
	2 - 5	M %	13,9	10,9	12,5	11,4
	0,71 - 2	M %	8,4	11,6	10,7	8,3
	0,25 - 0,71	M %	5,2	5,5	6,0	7,6
	0,09 - 0,25	M %	3,5	3,3	3,6	
Füllergehalt < 0,09	M %	12,6	7,7	7,8		
Splittgehalt	M %	70,3	72,3	72,7		
Sandgehalt	M %	17,1	20,0	19,5		
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,813	2,732	2,751		
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,848	2,677	2,692		
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,744	2,857	2,821		
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	38,0	41,9	38,9		
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	6,84	3,75	3,67		
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,26	0,20	0,20		
Bindemittelgehalt	M %	7,1	4,0	3,9		
Erweichungspunkt RuK	°C	59,6	61,6	55,0		
Penetration	Mm	41	37	48		
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,038	1,048	1,054		
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,506	2,565	2,583		
Raumdichte	g/cm ³	2,425	2,383	2,401		
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,2	7,1	7,0		
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	20,1	16,3	16,2		
Porenfüllungsgrad	%	83,9	56,5	56,4		
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,468	2,488	2,533	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,444	2,476	2,506	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,360	2,436	2,491	
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	101,8	104,4	105,5	
	2. Bohrkern	%	100,8	103,9	104,4	
	3. Bohrkern	%	97,3	102,2	103,7	
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	1,5	3,0	2,7	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,5	3,5	3,7	
	3. Bohrkern	g/cm ³	5,8	5,0	4,3	

Strecken ID: II - 4				Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht
Schicht / Lage						
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %		0,7	1,3	
	16 - 22,4	M %		22,2	11,5	
	11,2 - 16	M %	2,7	19,9	13,3	
	8 - 11,2	M %	24,8	9,3	15,0	
	5 - 8	M %	14,2	9,9	13,1	
	2 - 5	M %	15,1	10,6	11,5	
	0,71 - 2	M %	18,0	10,5	10,7	
	0,25 - 0,71	M %	10,4	5,5	8,6	
	0,09 - 0,25	M %	6,5	3,5	5,2	
Füllergehalt < 0,09	M %	8,3	7,9	9,8		
Splittgehalt	M %	56,8	72,6	65,7		
Sandgehalt	M %	34,9	19,5	24,5		
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,842	2,718	2,745		
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,787	2,700	2,712		
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,652	2,603	2,657		
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	35,9	36,2	35,2		
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	5,39	4,02	4,12		
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,21	0,20	0,23		
Bindemittelgehalt	M %	5,6	4,2	4,3		
Erweichungspunkt RuK	°C	57,4	64,4	58,0		
Penetration	Mm	45	33	41		
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,059	1,050	1,054		
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,569	2,537	2,550		
Raumdichte	g/cm ³	2,469	2,364	2,462		
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,9	6,8	3,5		
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,4	16,6	13,9		
Porenfüllungsgrad	%	77,7	58,9	75,3		
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,480	2,367	2,528	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,435	2,314	2,517	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,413	2,419	2,485	
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,4	100,1	102,7	
	2. Bohrkern	%	98,6	97,9	102,2	
	3. Bohrkern	%	97,7	102,3	100,9	
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,5	6,7	0,9	
	2. Bohrkern	g/cm ³	5,2	8,8	1,3	
	3. Bohrkern	g/cm ³	6,1	4,7	2,5	

Strecken ID: II - 5				Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht
Schicht / Lage						
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %		0,7		
	16 - 22,4	M %		33,5	13,6	
	11,2 - 16	M %	3,2	20,4	17,8	
	8 - 11,2	M %	21,9	9,1	13,0	
	5 - 8	M %	13,3	7,2	13,8	
	2 - 5	M %	17,3	7,7	12,2	
	0,71 - 2	M %	19,3	7,8	8,2	
	0,25 - 0,71	M %	10,0	4,2	7,7	
	0,09 - 0,25	M %	6,0	2,4	4,4	
Füllergehalt < 0,09	M %	9,0	7,0	9,3		
Splittgehalt	M %	55,7	78,6	70,4		
Sandgehalt	M %	35,3	14,4	20,3		
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,839	2,699	2,782		
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,814	2,688	2,732		
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,783	2,610	2,807		
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	40,2	38,0	40,3		
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	5,82	3,29	4,29		
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,22	0,19	0,22		
Bindemittelgehalt	M %	6,0	3,5	4,5		
Erweichungspunkt RuK	°C	56,8	65,0	50,4		
Penetration	Mm	40	29	61		
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,039	1,049	1,049		
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,561	2,551	2,583		
Raumdichte	g/cm ³	2,484	2,365	2,505		
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,0	7,3	3,0		
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,7	15,4	14,1		
Porenfüllungsgrad	%	83,0	52,5	78,6		
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,451	2,342	2,555	
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,393	2,307	2,493	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,499	2,387	2,536	
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	98,7	99,0	102,0	
	2. Bohrkern	%	96,3	97,5	99,5	
	3. Bohrkern	%	100,6	100,9	101,2	
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	4,3	8,2	1,1	
	2. Bohrkern	g/cm ³	6,6	9,6	3,5	
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,4	6,4	1,8	

Strecken ID: III - 1						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %				
	22,4 - 31,5	M %		10,8	15,6	
	16 - 22,4	M %		0,5	9,3	
	11,2 - 16	M %	1,1	24,5	9,6	
	8 - 11,2	M %	15,6	15,6	8,2	
	5 - 8	M %	20,4	15,5	9,7	
	2 - 5	M %	19,1	11,0	13,0	
	0,71 - 2	M %	11,8	8,6	3,8	
	0,25 - 0,71	M %	10,8	9,9	13,3	
	0,09 - 0,25	M %	12,1	6,6	10,4	
Füllergehalt < 0,09	M %	9,1	7,8	8,3	7,4	
Splittgehalt	M %	56,2	67,1	64,2	62,6	
Sandgehalt	M %	34,7	25,1	27,5	30,0	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,870	2,975	2,640	2,651	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,700	2,679	2,642	2,653	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,700	2,763	2,733	2,643	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	36,8	39,4	38,1	35,0	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	5,83	4,05	3,81	3,90	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,22	0,20	0,21	0,20	
Bindemittelgehalt	M %	6,0	4,3	4,0	4,1	
Erweichungspunkt RuK	°C	49,6	50,4	49,2	51,6	
Penetration	Mm	62	64	68	62	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,038	1,037	1,060	1,063	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,532	2,674	2,498	2,498	
Raumdichte	g/cm ³	2,475	2,575	2,417	2,408	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,3	3,7	3,2	3,6	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,9	14,4	12,8	13,3	
Porenfüllungsgrad	%	86,7	74,4	74,6	72,9	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,481	2,550	2,440	2,448
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,469	2,620	2,438	2,430
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,469	2,538		
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,2	99,0	101,0	101,7
	2. Bohrkern	%	99,8	101,7	100,9	100,9
	3. Bohrkern	%	99,8	98,6		
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,0	4,6	2,3	2,0
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,5	2,0	2,4	2,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,5	5,1		

Strecken ID: III - 2						
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht obere Lage	Tragschicht untere Lage	
Mineral						
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			1,5	
	22,4 - 31,5	M %			20,8	
	16 - 22,4	M %		1,4	14,5	
	11,2 - 16	M %	1,2	23,5	7,9	
	8 - 11,2	M %	17,8	18,5	9,1	
	5 - 8	M %	19,6	12,6	9,2	
	2 - 5	M %	20,4	11,7	10,5	
	0,71 - 2	M %	9,8	9,0	3,0	
	0,25 - 0,71	M %	9,1	9,6	11,3	
	0,09 - 0,25	M %	13,4	6,0	6,1	
Füllergehalt < 0,09	M %	8,7	7,7	6,1	6,9	
Splittgehalt	M %	59,0	67,7	73,5	69,0	
Sandgehalt	M %	32,3	24,6	20,4	24,1	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,850	2,968	2,644	2,641	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,672	2,672	2,653	2,640	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,912	2,897	2,655	2,704	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	42,0	39,1	37,5	37,8	
Bindemittel						
lösliches Bindemittel	M %	5,76	3,93	3,21	3,35	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,21	0,20	0,18	0,19	
Bindemittelgehalt	M %	6,0	4,1	3,4	3,5	
Erweichungspunkt RuK	°C	54,2	53,0	56,8	58,8	
Penetration	Mm	46	51	27	25	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,031	1,034	1,053	1,044	
Mischgut						
Rohdichte	g/cm ³	2,535	2,687	2,517	2,510	
Raumdichte	g/cm ³	2,456	2,538	2,378	2,376	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,1	5,5	5,5	5,3	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,5	15,8	13,4	13,6	
Porenfüllungsgrad	%	82,2	65,0	58,9	60,7	
Bohrkern						
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,461	2,549	2,335	2,369
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,450	2,550	2,408	2,390
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,470	2,436	2,304	2,349
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,2	100,4	98,2	99,5
	2. Bohrkern	%	99,8	100,5	101,3	100,4
	3. Bohrkern	%	100,6	96,0	96,9	98,7
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,9	5,1	7,2	5,6
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,4	5,1	4,3	4,8
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,6	9,3	8,5	6,4

Strecken ID: III - 3					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			3,3
	16 - 22,4	M %		2,1	13,5
	11,2 - 16	M %	4,4	23,8	15,2
	8 - 11,2	M %	23,8	24,5	11,4
	5 - 8	M %	13,7	8,7	11,8
	2 - 5	M %	14,4	11,3	13,4
	0,71 - 2	M %	18,0	10,2	10,9
	0,25 - 0,71	M %	10,7	7,0	7,6
	0,09 - 0,25	M %	5,4	4,5	4,0
Füllergehalt < 0,09	M %	9,6	7,9	8,9	
Splittgehalt	M %	56,3	70,4	68,6	
Sandgehalt	M %	34,1	21,7	22,5	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,844	2,676	2,712	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,892	2,690	2,693	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,587	2,590	2,575	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	32,6	36,0	33,1	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,43	4,03	3,50	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,22	0,20	0,22	
Bindemittelgehalt	M %	5,7	4,2	3,7	
Erweichungspunkt RuK	°C	60,6	63,6	66,8	
Penetration	Mm	26	20	15	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,058	1,046	1,047	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,586	2,508	2,547	
Raumdichte	g/cm ³	2,509	2,320	2,364	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,0	7,5	7,2	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,9	17,1	15,8	
Porenfüllungsgrad	%	82,4	56,2	54,5	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,507	2,303	2,294
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,500	2,330	2,377
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,493	2,338	2,412
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	99,9	99,3	97,0
	2. Bohrkern	%	99,6	100,4	100,5
	3. Bohrkern	%	99,4	100,8	102,0
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,1	8,2	9,9
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,3	7,1	6,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	3,6	6,8	5,3

Strecken ID: III - 4					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			6,7
	16 - 22,4	M %		1,6	14,3
	11,2 - 16	M %	4,3	23,2	17,0
	8 - 11,2	M %	26,1	19,3	15,5
	5 - 8	M %	11,8	12,6	9,6
	2 - 5	M %	14,3	12,9	8,5
	0,71 - 2	M %	17,4	10,6	8,8
	0,25 - 0,71	M %	10,2	6,9	7,3
	0,09 - 0,25	M %	5,6	4,0	4,6
Füllergehalt < 0,09	M %	10,3	8,9	7,7	
Splittgehalt	M %	56,5	69,6	71,6	
Sandgehalt	M %	33,2	21,5	20,7	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,854	2,682	2,680	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,846	2,700	2,679	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,841	2,812	2,877	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	38,4	46,7	41,9	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,46	4,02	3,46	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,23	0,22	0,20	
Bindemittelgehalt	M %	5,7	4,2	3,7	
Erweichungspunkt RuK	°C	60,6	71,2	58,8	
Penetration	Mm	26	13	28	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,038	1,049	1,051	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,592	2,530	2,547	
Raumdichte	g/cm ³	2,511	2,286	2,388	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,1	9,6	6,2	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,1	19,1	14,8	
Porenfüllungsgrad	%	81,8	49,6	57,9	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,514	2,230	2,430
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,513	2,314	2,453
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,498	2,210	2,428
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,1	97,6	101,8
	2. Bohrkern	%	100,1	101,2	102,7
	3. Bohrkern	%	99,5	96,7	101,7
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,0	11,9	4,6
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,0	8,5	3,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	3,6	12,6	4,7

Strecken ID: III - 5					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			8,4
	16 - 22,4	M %		1,0	13,1
	11,2 - 16	M %	3,3	26,9	15,2
	8 - 11,2	M %	22,3	22,1	13,6
	5 - 8	M %	12,2	9,6	11,0
	2 - 5	M %	15,8	11,3	7,2
	0,71 - 2	M %	19,0	10,3	8,1
	0,25 - 0,71	M %	10,9	6,8	9,0
	0,09 - 0,25	M %	5,6	4,6	7,0
Füllergehalt < 0,09	M %	10,9	7,4	7,4	
Splittgehalt	M %	53,6	70,9	68,5	
Sandgehalt	M %	35,5	21,7	24,1	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,860	2,685	2,692	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,851	2,687	2,692	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,755	2,734	2,668	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	40,0	39,0	36,7	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,65	4,15	4,86	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,24	0,20	0,20	
Bindemittelgehalt	M %	5,9	4,3	4,1	
Erweichungspunkt RuK	°C	55,2	54,8	56,0	
Penetration	Mm	38	48	45	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,032	1,037	1,053	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,578	2,513	2,529	
Raumdicke	g/cm ³	2,525	2,362	2,406	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,1	6,0	4,9	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,6	16,1	14,4	
Porenfüllungsgrad	%	87,6	62,6	66,3	
Bohrkern					
Raumdicke am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,482	2,367	2,373
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,497	2,385	2,361
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,520	2,254	2,425
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	98,3	100,2	98,6
	2. Bohrkern	%	98,9	101,0	98,1
	3. Bohrkern	%	99,8	95,4	100,8
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,7	5,8	5,8
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,1	5,1	6,3
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,2	10,3	3,7

Strecken ID: IV - 1					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			1,7
	16 - 22,4	M %		20,6	14,8
	11,2 - 16	M %	1,8	17,7	18,1
	8 - 11,2	M %	20,9	11,9	12,9
	5 - 8	M %	18,4	10,2	11,6
	2 - 5	M %	18,4	8,6	10,0
	0,71 - 2	M %	14,2	5,3	7,6
	0,25 - 0,71	M %	9,8	9,6	10,1
	0,09 - 0,25	M %	5,1	7,6	6,7
Füllergehalt < 0,09	M %	11,4	6,8	7,7	
Splittgehalt	M %	59,5	70,7	67,9	
Sandgehalt	M %	29,1	22,5	24,4	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,799	2,713	2,732	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,686	2,694	2,689	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,727	2,906	2,688	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	36,4	39,4	35,9	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	6,17	3,35	3,82	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,25	0,19	0,20	
Bindemittelgehalt	M %	6,4	3,5	4,0	
Erweichungspunkt RuK	°C	52,2	55,6	53,2	
Penetration	Mm	55	43	53	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,064	1,049	1,038	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,502	2,577	2,553	
Raumdicke	g/cm ³	2,447	2,448	2,476	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,2	5,0	3,0	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,6	13,5	12,8	
Porenfüllungsgrad	%	87,5	62,9	76,4	
Bohrkern					
Raumdicke am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,387	2,358	2,435
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,421	2,465	2,474
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,402	2,498	2,508
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	97,5	96,3	98,3
	2. Bohrkern	%	98,9	100,7	99,9
	3. Bohrkern	%	98,2	102,0	101,3
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	4,6	8,5	4,6
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,2	4,3	3,1
	3. Bohrkern	g/cm ³	4,0	3,1	1,8

Strecken ID: IV - 2					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %		1,5	1,4
	16 - 22,4	M %		12,4	16,0
	11,2 - 16	M %	2,4	19,8	18,4
	8 - 11,2	M %	15,2	11,8	15,0
	5 - 8	M %	20,3	9,9	9,3
	2 - 5	M %	18,5	12,8	9,0
	0,71 - 2	M %	15,1	8,3	9,4
	0,25 - 0,71	M %	14,4	9,4	8,4
	0,09 - 0,25	M %	6,3	7,2	4,8
Füllergehalt < 0,09	M %	7,8	6,9	8,3	
Splittgehalt	M %	56,4	68,2	69,1	
Sandgehalt	M %	35,8	24,9	22,6	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,822	2,708	2,702	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,669	2,664	2,709	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,608	2,704	2,636	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	36,5	37,1	35,8	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,68	3,43	3,65	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,20	0,19	0,21	
Bindemittelgehalt	M %	5,9	3,6	3,9	
Erweichungspunkt RuK	°C	53,8	60,8	59,8	
Penetration	Mm	50	32	29	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,046	1,057	1,051	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,507	2,554	2,543	
Raumdichte	g/cm ³	2,458	2,427	2,445	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,0	5,0	3,9	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,1	13,6	13,1	
Porenfüllungsgrad	%	87,9	63,4	70,6	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,433	2,428	2,361
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,417	2,372	2,396
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,409	2,399	2,425
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	99,0	100,0	96,6
	2. Bohrkern	%	98,3	97,7	98,0
	3. Bohrkern	%	98,0	98,8	99,2
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	3,0	4,6	7,2
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,6	6,8	5,8
	3. Bohrkern	g/cm ³	3,9	5,7	4,6

Strecken ID: IV - 3					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %		0,7	0,8
	16 - 22,4	M %		11,6	12,5
	11,2 - 16	M %	2,9	18,4	20,0
	8 - 11,2	M %	16,7	15,4	13,5
	5 - 8	M %	21,3	10,2	10,6
	2 - 5	M %	17,7	11,5	11,0
	0,71 - 2	M %	14,5	9,6	9,2
	0,25 - 0,71	M %	13,4	8,9	8,3
	0,09 - 0,25	M %	5,9	5,4	6,3
Füllergehalt < 0,09	M %	7,6	8,3	7,8	
Splittgehalt	M %	58,8	67,8	68,4	
Sandgehalt	M %	33,8	23,9	23,8	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,834	2,711	2,707	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,648	2,706	2,686	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,858	2,741	2,713	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	37,5	43,7	39,8	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,65	3,73	3,56	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,20	0,21	0,20	
Bindemittelgehalt	M %	5,8	3,9	3,8	
Erweichungspunkt RuK	°C	52,6	59,8	63,6	
Penetration	Mm	49	32	24	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,035	1,039	1,051	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,521	2,552	2,554	
Raumdichte	g/cm ³	2,427	2,425	2,395	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	3,7	5,0	6,2	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	17,6	14,3	15,1	
Porenfüllungsgrad	%	78,9	65,3	58,7	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,448	2,419	2,306
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,418	2,427	2,352
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,392	2,401	2,355
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	100,9	99,8	96,3
	2. Bohrkern	%	99,6	100,1	98,2
	3. Bohrkern	%	98,6	99,0	98,3
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,9	5,6	9,7
	2. Bohrkern	g/cm ³	4,1	5,3	7,9
	3. Bohrkern	g/cm ³	5,1	6,3	7,8

Strecken ID: IV - 4					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			
	16 - 22,4	M %		10,1	14,7
	11,2 - 16	M %	2,2	17,4	17,2
	8 - 11,2	M %	15,3	19,8	16,6
	5 - 8	M %	21,9	11,3	9,5
	2 - 5	M %	18,0	10,0	9,1
	0,71 - 2	M %	12,2	8,2	9,3
	0,25 - 0,71	M %	13,7	8,5	8,7
	0,09 - 0,25	M %	7,3	6,3	5,7
Füllergehalt < 0,09	M %	9,4	8,4	9,2	
Splittgehalt	M %	57,4	68,6	67,1	
Sandgehalt	M %	33,2	23,0	23,7	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,828	2,723	2,715	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,662	2,653	2,697	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,625	2,692	2,733	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	36,0	36,8	36,3	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,47	3,50	3,57	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,22	0,21	0,22	
Bindemittelgehalt	M %	5,7	3,7	3,8	
Erweichungspunkt RuK	°C	57,0	60,4	63,4	
Penetration	Mm	35	27	20	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,045	1,059	1,057	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,517	2,557	2,560	
Raumdichte	g/cm ³	2,445	2,401	2,406	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,9	6,1	6,0	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,5	14,8	15,0	
Porenfüllungsgrad	%	82,7	58,9	59,8	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,386	2,387	2,371
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,374	2,361	2,426
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,423	2,374	2,373
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	97,6	99,4	98,5
	2. Bohrkern	%	97,1	98,3	100,8
	3. Bohrkern	%	99,1	98,9	98,6
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	5,2	7,4	7,9
	2. Bohrkern	g/cm ³	5,7	8,4	5,7
	3. Bohrkern	g/cm ³	3,7	7,9	7,8

Strecken ID: IV - 5					
Schicht / Lage		Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	
Mineral					
Korndurchmesser [mm]	> 31,5	M %			
	22,4 - 31,5	M %			1,7
	16 - 22,4	M %		7,6	7,6
	11,2 - 16	M %	1,4	17,8	17,0
	8 - 11,2	M %	15,1	19,5	18,5
	5 - 8	M %	20,1	12,6	12,8
	2 - 5	M %	18,8	9,5	11,5
	0,71 - 2	M %	12,2	8,3	7,4
	0,25 - 0,71	M %	14,1	9,7	8,2
	0,09 - 0,25	M %	8,0	6,6	5,9
Füllergehalt < 0,09	M %	10,3	8,4	9,4	
Splittgehalt	M %	55,4	67,0	69,1	
Sandgehalt	M %	34,3	24,6	21,5	
Dichte d. groben Gesteinskörn.	g/cm ³	2,806	2,714	2,732	
Dichte d. feinen Gesteinskörn.	g/cm ³	2,700	2,685	2,701	
Dichte des Füllers	g/cm ³	2,703	2,807	2,874	
Hohlraumg. d. Füllers n. Rigden	Vol. %	38,5	38,6	39,7	
Bindemittel					
lösliches Bindemittel	M %	5,60	3,69	3,70	
Zuschlag für unlösl. Bindemittel	M %	0,23	0,21	0,22	
Bindemittelgehalt	M %	5,8	3,9	3,9	
Erweichungspunkt RuK	°C	53,2	64,0	62,0	
Penetration	Mm	40	18	24	
Dichte des Bindemittels	g/cm ³	1,038	1,053	1,038	
Mischgut					
Rohdichte	g/cm ³	2,516	2,557	2,574	
Raumdichte	g/cm ³	2,462	2,403	2,423	
Hohlraumgeh. d. Marshallpr.	Vol. %	2,1	6,0	5,9	
Hohlraumgeh. d. Mineralgemisch	Vol. %	16,2	15,2	15,2	
Porenfüllungsgrad	%	86,8	60,4	61,4	
Bohrkern					
Raumdichte am	1. Bohrkern	g/cm ³	2,451	2,386	2,344
	2. Bohrkern	g/cm ³	2,424	2,402	2,465
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,444	2,411	2,401
Verdichtungsgrad	1. Bohrkern	%	99,6	99,3	96,7
	2. Bohrkern	%	98,5	100,0	101,7
	3. Bohrkern	%	99,3	100,3	99,1
Hohlraumgehalt	1. Bohrkern	g/cm ³	2,6	7,1	8,9
	2. Bohrkern	g/cm ³	3,7	6,4	4,2
	3. Bohrkern	g/cm ³	2,9	6,1	6,7

Auswertung der Bohrkernschichtdicken

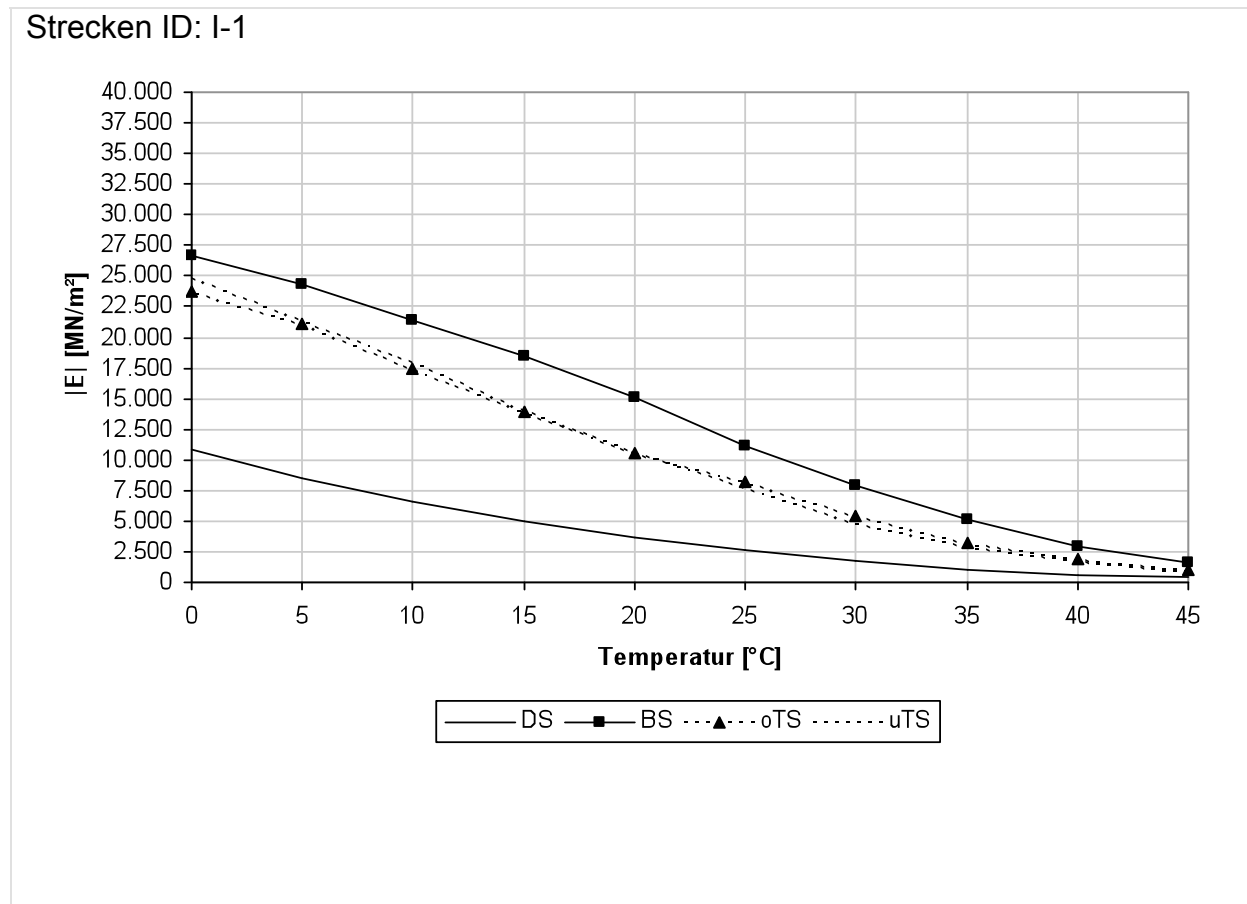
Abschnitt	Station	Deckschicht			Binderschicht			Tragschicht			Gesamt			VarK	Abschnitt					
		ist	delta	Ø	VarK	ist	delta	Ø	VarK	ist	delta	Ø	ist			delta	Ø			
I-1	0+330	4,0	3,8	-0,2	-5%	8,0	9,0	1,0	13%	18,0	16,0	-2,0	-11%	30,0	28,8	-1,2	-4%	31,7	13%	I-1
	0+705 *	4,0	4,5	0,5	13%	8,0	10,2	2,2	28%	8,0	10,2	2,2	28%	30,0	34,5	4,5	15%			
	0+825	4,0	4,3	0,3	8%	8,0	11,7	3,7	46%	8,0	4,7	-3,3	-41%	18,0	23,2	5,2	29%	22,5	5%	I-2
I-2	0+580	4,0	5,0	1,0	25%	8,0	9,0	1,0	13%	8,0	9,0	1,0	13%	18,0	21,1	3,1	17%	34,0	3%	I-2
	0+987	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	8,2	0,2	2%	8,0	8,2	0,2	2%	18,0	23,2	5,2	29%			
	1+100	4,0	3,5	-0,5	-13%	8,0	7,7	-0,3	-4%	8,0	20,5	2,5	14%	18,0	20,5	2,5	14%	32,7	10%	I-3
I-3	0+170	4,0	3,5	-0,5	-13%	8,0	8,4	0,4	5%	8,0	8,4	0,4	5%	18,0	18,0	0,0	0%			
	0+450	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	7,2	-0,8	-10%	8,0	7,2	-0,8	-10%	18,0	25,2	7,2	40%			
	0+000	4,0	3,5	-0,5	-13%	8,0	8,0	0,0	0%	8,0	22,3	4,3	24%	18,0	33,8	3,8	13%	34,6	4%	I-4
I-4	0+200	4,0	3,5	-0,5	-13%	8,0	8,3	0,3	4%	8,0	8,3	0,3	4%	18,0	24,5	6,5	36%			
	0+400	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	8,1	0,1	1%	8,0	21,5	3,5	19%	18,0	33,6	3,6	12%			
	0+050	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	7,0	-1,0	-13%	8,0	18,5	0,5	3%	18,0	29,5	0,5	-2%	27,0	8%	I-5
I-5	2+250	4,0	4,5	0,5	13%	8,0	7,5	-0,5	-6%	8,0	7,5	-0,5	-6%	18,0	13,0	-5,0	-28%			
	2+450	4,0	5,1	1,1	28%	8,0	7,4	-0,6	-8%	8,0	14,0	-4,0	-22%	18,0	14,0	-4,0	-22%	27,1	5%	II-1
	0+450	4,0	4,4	0,4	10%	8,0	9,2	1,2	15%	8,0	14,0	0,0	0%	14,0	14,0	0,0	0%	27,1	6%	II-2
II-1	0+650	4,0	5,0	1,0	25%	8,0	8,5	0,5	6%	8,0	9,5	1,5	19%	14,0	14,5	0,5	4%			
	1+850	4,0	4,5	0,5	13%	8,0	8,5	0,5	6%	8,0	9,5	1,5	19%	14,0	15,0	1,0	7%	14,3	2%	II-2
	2+087	4,0	4,5	0,5	13%	8,0	8,5	0,5	6%	8,0	8,5	0,5	6%	14,0	13,5	-0,5	-4%	14,2	5%	II-3
II-2	0+584	4,0	3,5	-0,5	-13%	8,0	8,3	0,3	4%	8,0	8,3	0,3	4%	14,0	14,1	0,1	1%	13,6	7%	II-3
	0+184	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	8,2	0,2	2%	8,0	8,2	0,2	2%	14,0	14,2	0,2	1%	25,9	4%	II-4
	0+384	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	8,4	0,4	5%	8,0	8,4	0,4	5%	14,0	14,0	0,0	0%	25,9	4%	II-5
II-3	0+584	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	8,3	0,3	4%	8,0	8,3	0,3	4%	14,0	12,5	-1,5	-11%			
	0+450	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	9,5	1,5	19%	8,0	9,5	1,5	19%	14,0	13,3	-0,7	-5%	25,5	5%	II-4
	0+650	4,0	3,9	-0,1	-3%	8,0	9,1	1,1	14%	8,0	9,1	1,1	14%	14,0	12,3	-1,7	-12%	25,5	5%	II-4
II-4	0+850	4,0	4,0	0,0	0%	8,0	7,8	-0,2	-3%	8,0	7,8	-0,2	-3%	14,0	12,6	-1,4	-10%			
	1+202	4,0	4,5	0,5	13%	8,0	7,0	-1,0	-13%	8,0	7,0	-1,0	-13%	14,0	14,0	0,0	0%	25,6	11%	II-5
	1+402	4,0	4,4	0,4	10%	8,0	10,0	2,0	25%	8,0	10,0	2,0	25%	14,0	14,0	0,0	0%	25,6	11%	II-5
III-1	1+602	4,0	3,1	-0,9	-23%	8,0	7,0	-1,0	-13%	8,0	7,0	-1,0	-13%	14,0	12,8	-1,2	-9%	13,8	1%	III-1
	0+094	4,0	4,3	0,3	8%	4,0	4,3	0,3	8%	4,0	4,3	0,3	8%	14,0	13,6	-0,4	-3%	22,6	6%	III-1
	0+294	4,0	4,3	0,3	8%	4,0	6,0	2,0	50%	4,0	6,0	2,0	50%	14,0	13,8	-0,2	-1%	22,6	6%	III-1
III-2	0+494	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	4,0	0,0	0%	4,0	4,0	0,0	0%	14,0	13,9	-0,1	-1%			
	1+853	4,0	4,1	0,1	2%	4,0	4,5	0,5	13%	4,0	4,5	0,5	13%	14,0	12,5	-1,5	-11%	20,9	4%	III-2
	2+053	4,0	4,1	0,1	2%	4,0	3,6	-0,4	-10%	4,0	3,6	-0,4	-10%	14,0	12,3	-1,7	-12%	20,9	4%	III-2
III-3	2+253	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	4,5	0,5	13%	4,0	4,5	0,5	13%	14,0	13,3	-0,7	-5%			
	0+825 **	4,0	4,2	0,2	5%	4,0	5,6	1,6	40%	4,0	5,6	1,6	40%	14,0	11,6	-2,4	-17%	22,0	9%	III-3
	1+000 **	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	6,2	2,2	55%	4,0	6,2	2,2	55%	14,0	14,2	0,2	1%	22,0	9%	III-3
III-4	1+200 **	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	5,5	1,5	38%	4,0	5,5	1,5	38%	14,0	11,2	-2,8	-20%	22,0	9%	III-3
	1+400 **	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	2,4	-1,6	-40%	4,0	2,4	-1,6	-40%	14,0	15,0	1,0	7%	22,0	9%	III-3
	1+600 **	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,3	-0,7	-18%	4,0	3,3	-0,7	-18%	14,0	14,6	0,6	4%	21,3	2%	III-4
III-5	1+800 **	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	3,4	-0,6	-15%	4,0	3,4	-0,6	-15%	14,0	14,5	0,5	4%			
	2+650 **	4,0	4,5	0,5	13%	4,0	6,1	2,1	53%	4,0	6,1	2,1	53%	14,0	12,7	-1,3	-9%	22,6	3%	III-5
	2+850 **	4,0	3,4	-0,6	-15%	4,0	4,8	0,8	20%	4,0	4,8	0,8	20%	14,0	14,5	0,5	4%	22,6	3%	III-5
IV-1	3+082 **	4,0	3,9	-0,1	-3%	4,0	5,2	1,2	30%	4,0	5,2	1,2	30%	14,0	12,8	-1,2	-9%	17,6	10%	IV-1
	0+050	4,0	4,8	0,8	20%	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	14,7	0,7	5%			
	0+250	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	-	-	-	4,0	12,2	-1,8	-13%	14,0	12,2	-1,8	-13%	17,6	10%	IV-1
IV-2	0+450	4,0	3,4	-0,6	-15%	4,0	3,4	-0,6	-15%	4,0	3,4	-0,6	-15%	14,0	13,8	-0,2	-1%	16,6	9%	IV-2
	0+200	4,0	3,3	-0,7	-18%	4,0	3,3	-0,7	-18%	4,0	3,3	-0,7	-18%	14,0	15,1	1,1	8%	16,6	9%	IV-2
	0+400	4,0	4,0	0,0	0%	4,0	3,3	-0,7	-18%	4,0	3,3	-0,7	-18%	14,0	11,6	-2,4	-17%	16,6	9%	IV-2
IV-3	0+600	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	3,8	-0,2	-5%	14,0	12,1	-1,9	-14%	13,7	12%	IV-3
	1+000	4,0	4,0	0,0	0%	4,0	4,0	0,0	0%	4,0	4,0	0,0	0%	14,0	10,1	-3,9	-28%	13,7	12%	IV-3
	0+800	4,0	3,7	-0,3	-8%	4,0	4,0	0,0	0%	4,0	4,0	0,0	0%	14,0	11,4	-2,6	-19%	13,7	12%	IV-3
IV-4	3+200	4,0	3,9	-0,1	-3%	4,0	3,4	-0,6	-15%	4,0	3,4	-0,6	-15%	14,0	11,1	-2,9	-21%	14,3	5%	IV-4
	3+400	4,0	3,0	-1,0	-25%	4,0	3,0	-1,0	-25%	4,0	3,0	-1,0	-25%	14,0	11,1	-2,9	-21%	14,3	5%	IV-4
	3+600	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	14,0	11,8	-2,2	-16%	14,3	5%	IV-4
IV-5	3+800	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	14,0	11,8	-2,2	-16%	15,5	2%	IV-5
	4+000	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	4,0	3,5	-0,5	-13%	14,0	11,7	-2,3	-16%	15,5	2%	IV-5
	4+200	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	3,8	-0,2	-5%	4,0	3,8	-0,2	-5%	14,0	12,1	-1,9	-14%	15,5	2%	IV-5

* = untere Tragschichtlage besteht aus 14 cm zementgebundener Tragschicht
 ** = Oberflächenbehandlung (s 0.8 cm) vorhanden

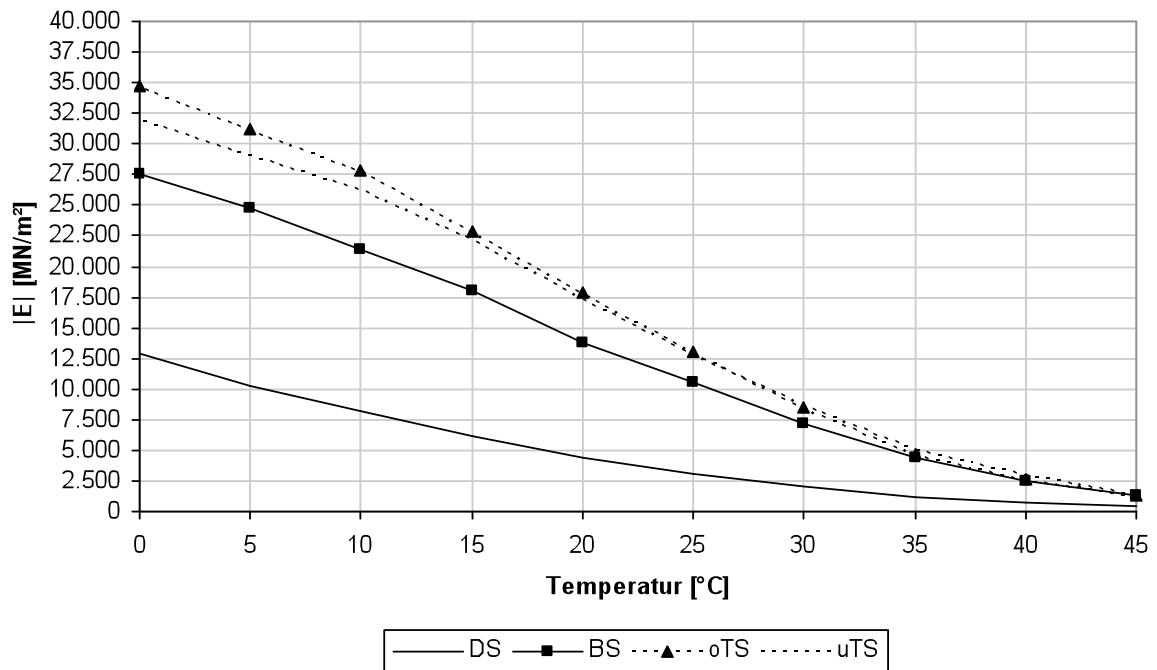
Ergebnisse der E-Modul Berechnungen mit PRADO

Darstellung des absoluten bzw. komplexen Asphalt E-Moduls

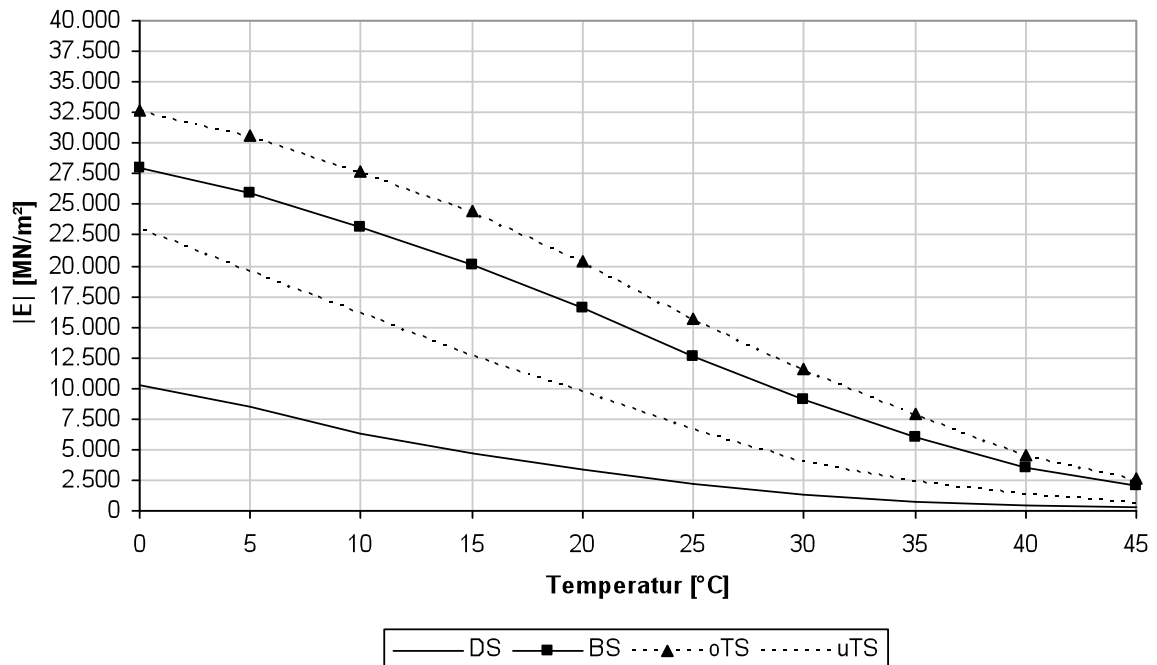
- Belastungsfrequenz: 10 Hz
- Temperaturbereich: 0 bis 45 °C
- DS = Asphaltdeckschicht
- BS = Asphaltbinderschicht
- TS = Asphalttragschicht
- oTS = obere Asphalttragschicht (falls vorhanden)
- uTS = untere Asphalttragschicht (falls vorhanden)



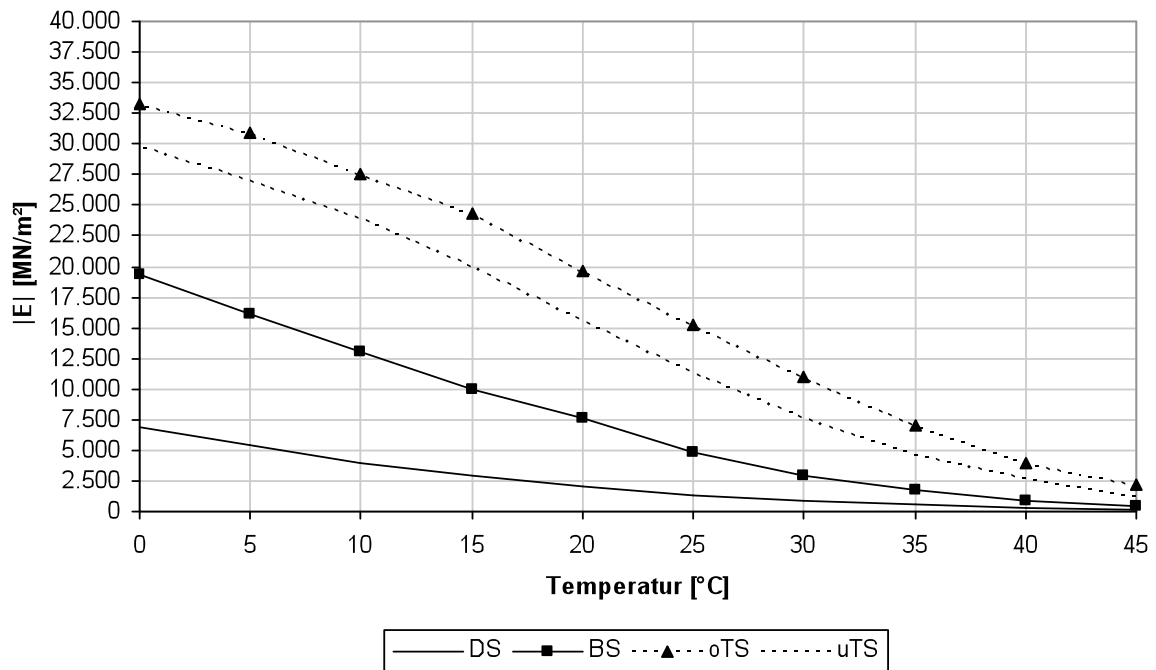
Strecken ID: I-2



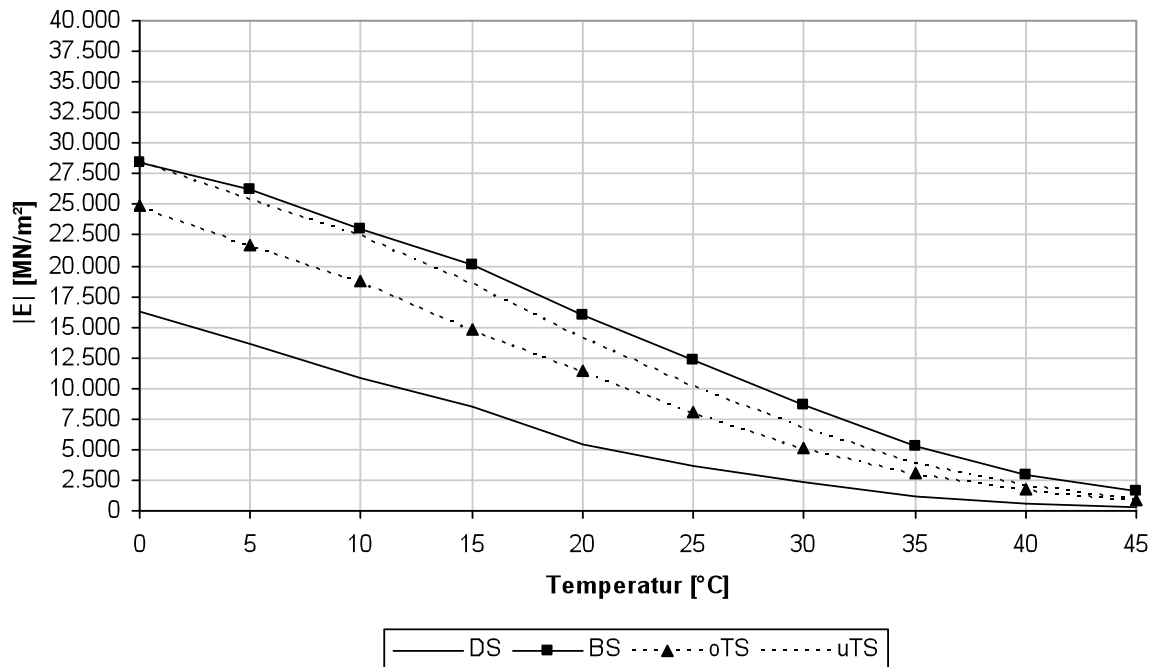
Strecken ID: I-3



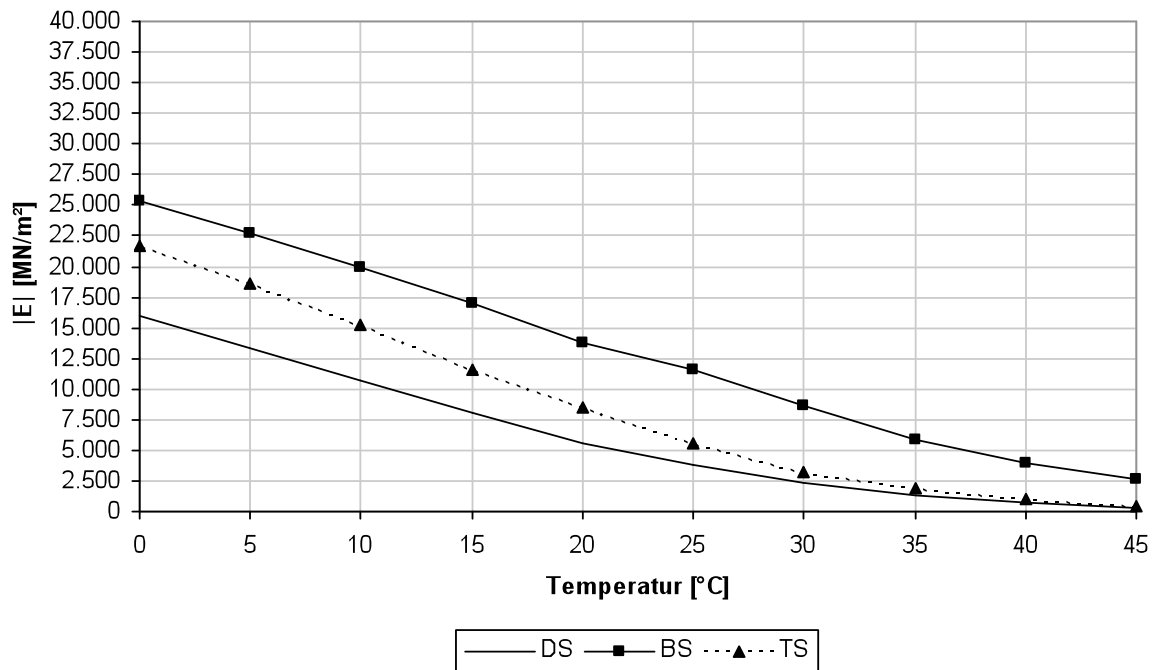
Strecken ID: I-4



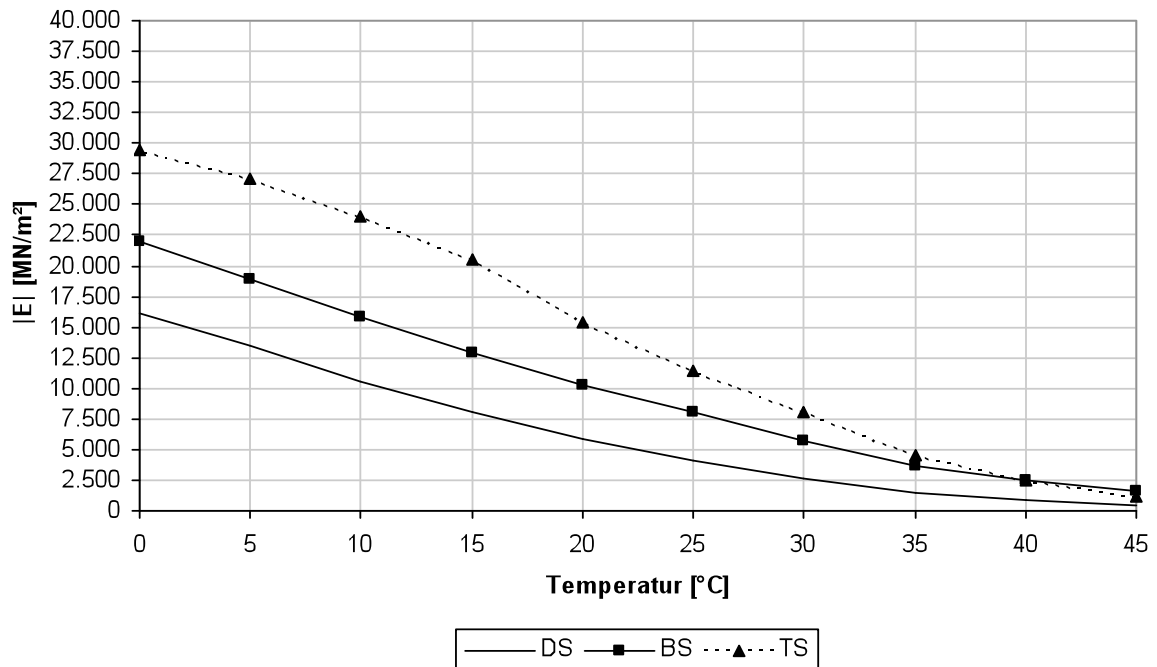
Strecken ID: I-5



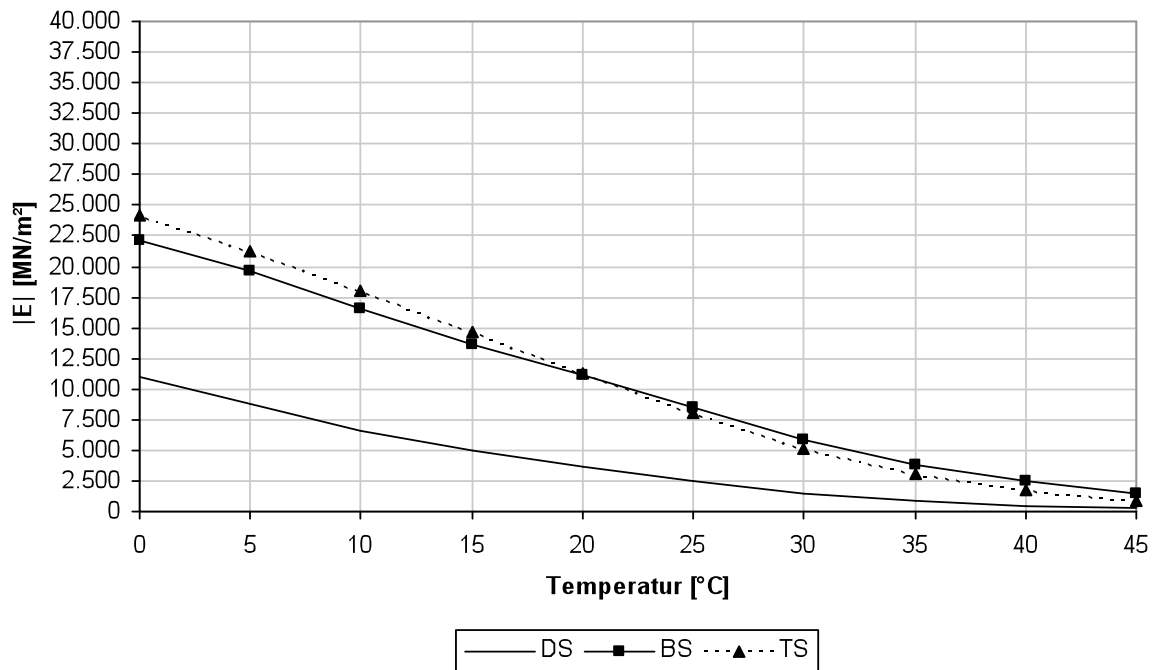
Strecken ID: II-1



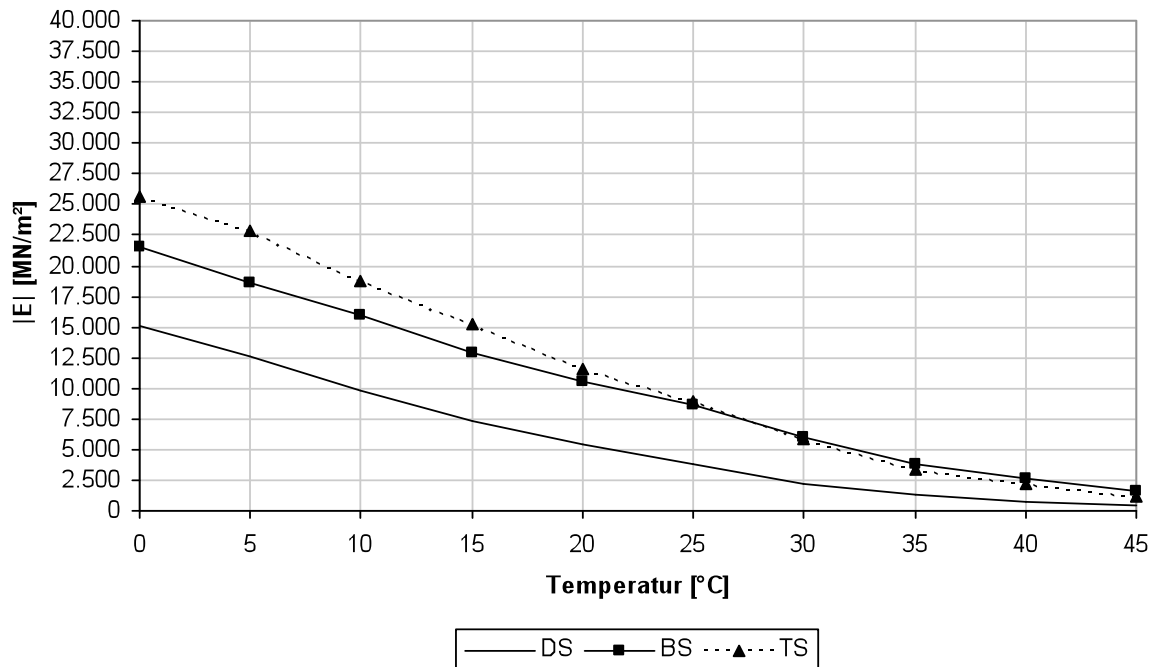
Strecken ID: II-2



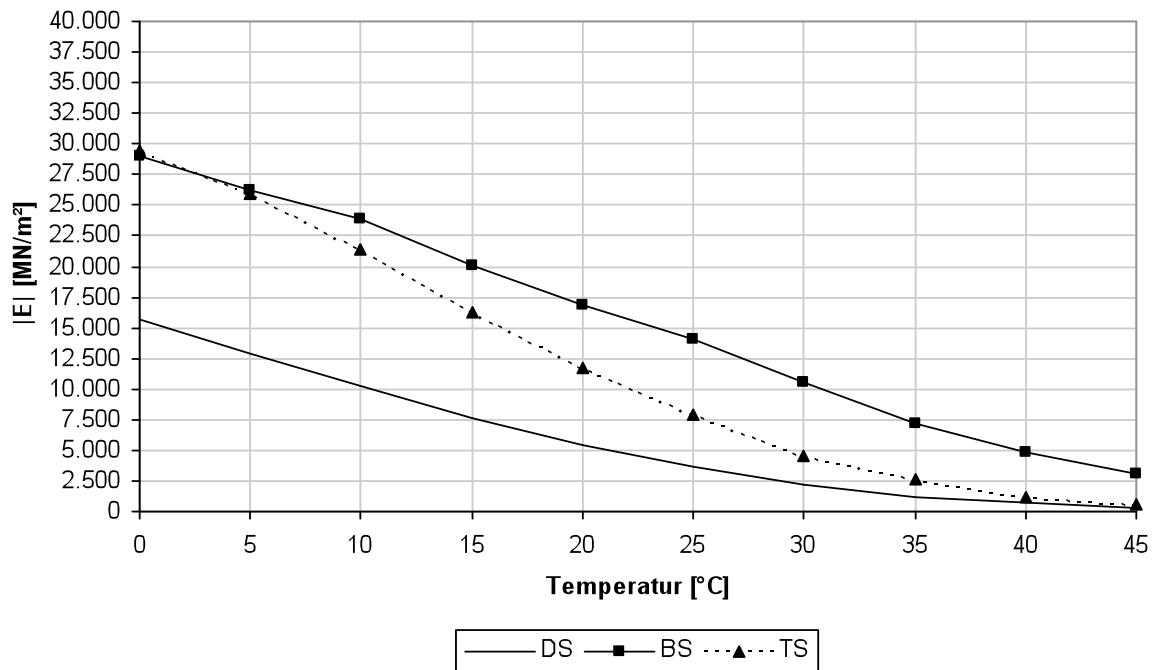
Strecken ID: II-3



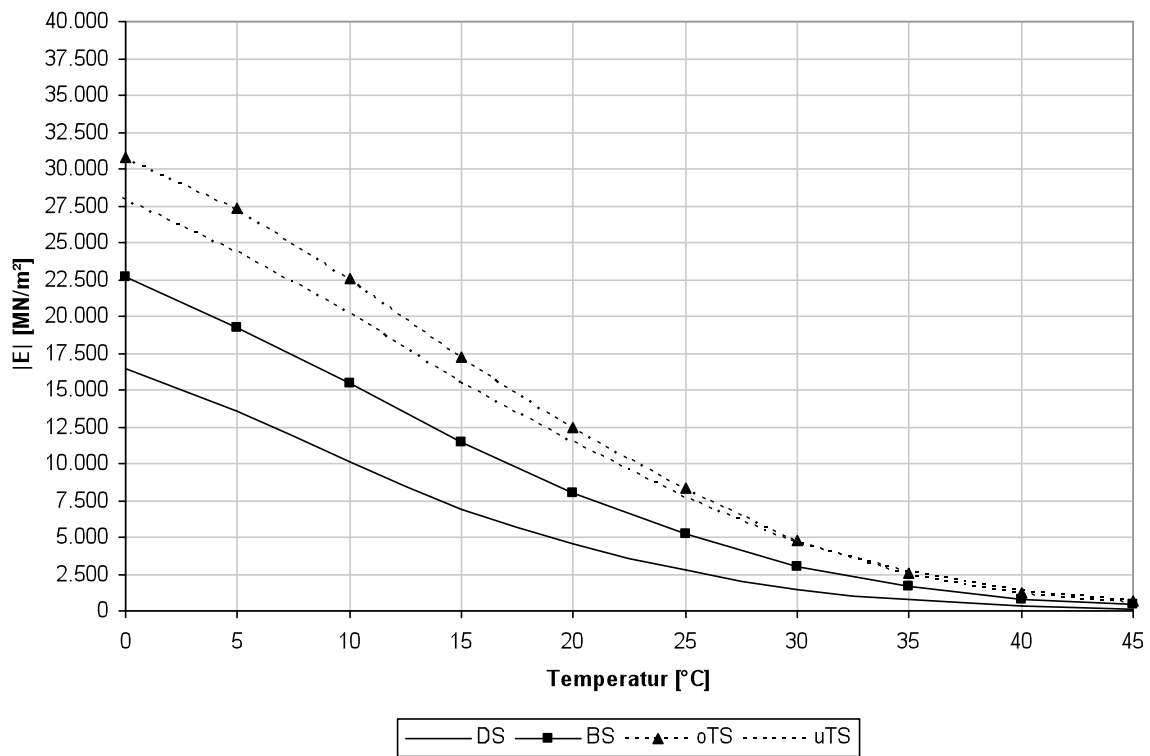
Strecken ID: II-4



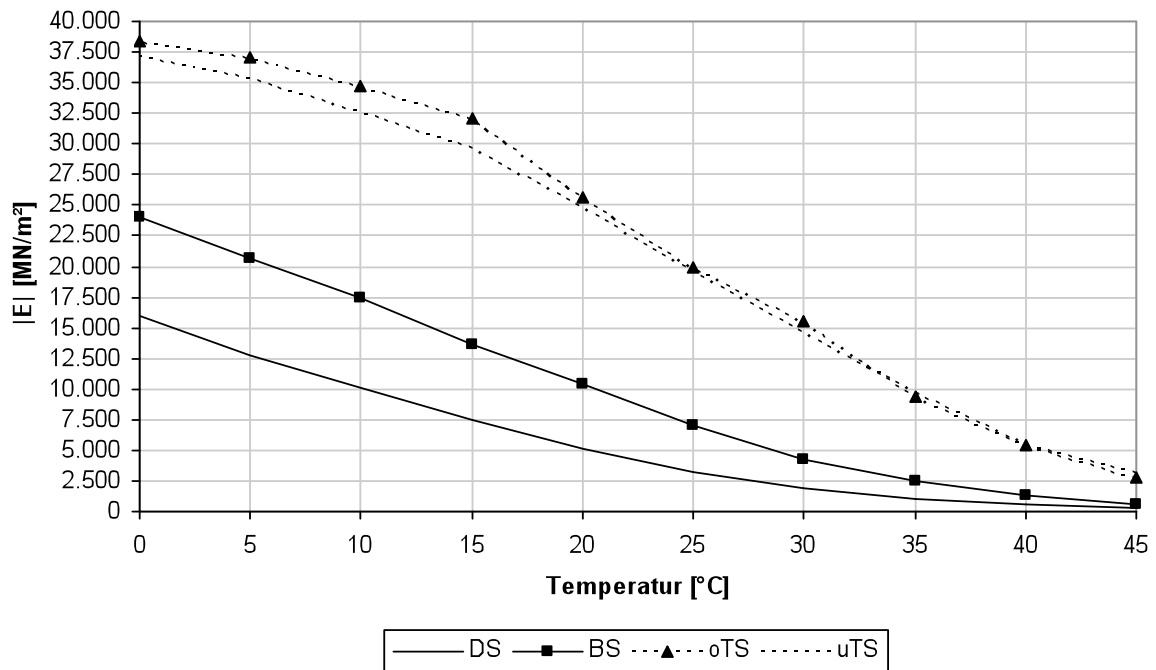
Strecken ID: II-5



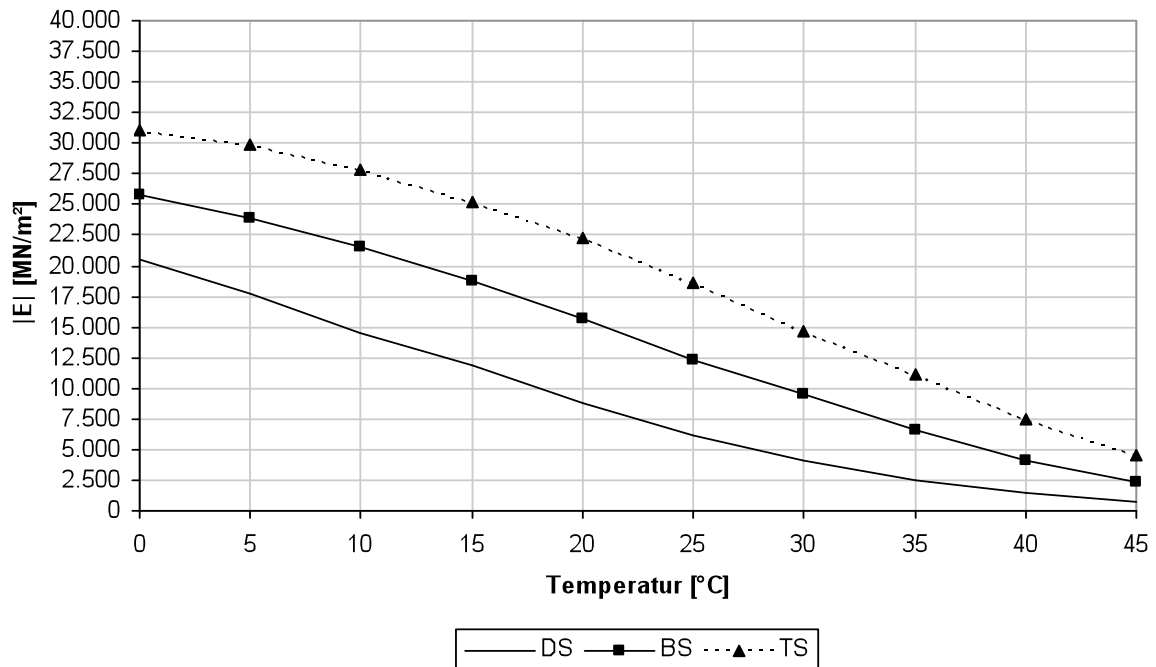
Strecken ID: III-1



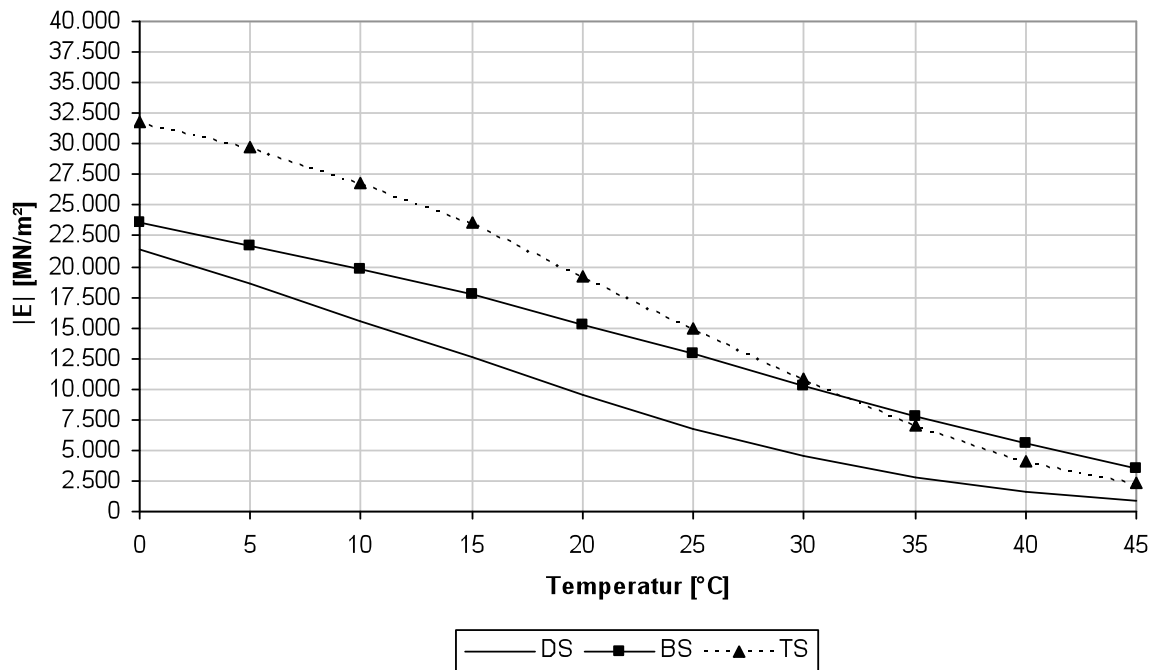
Strecken ID: III-2



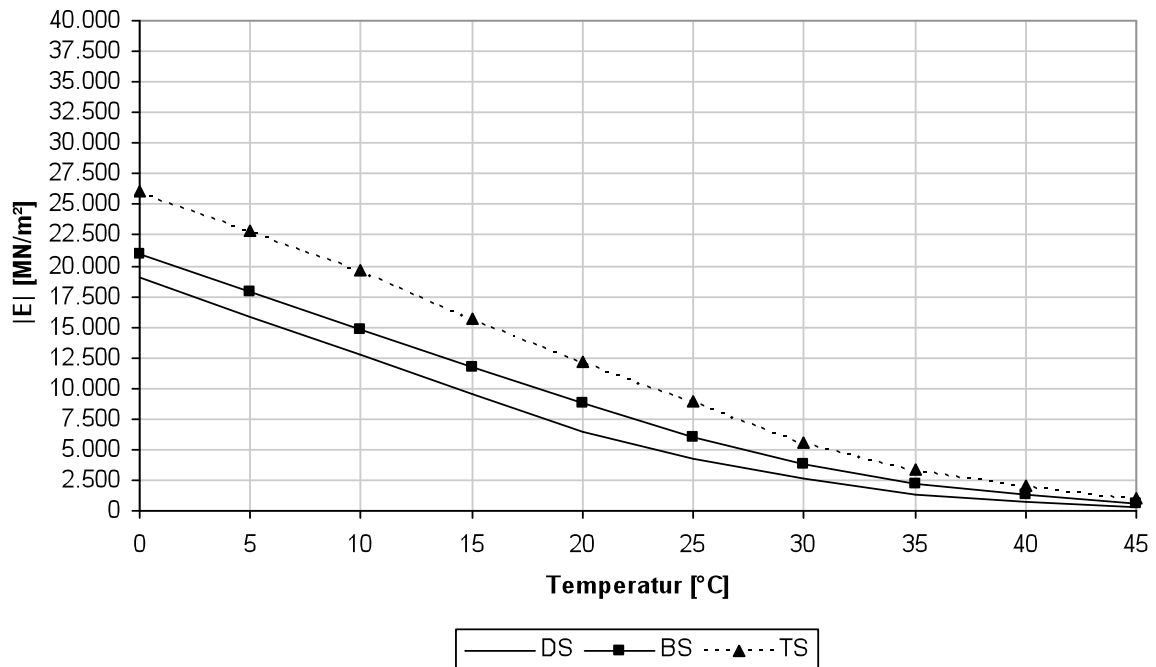
Strecken ID: III-3



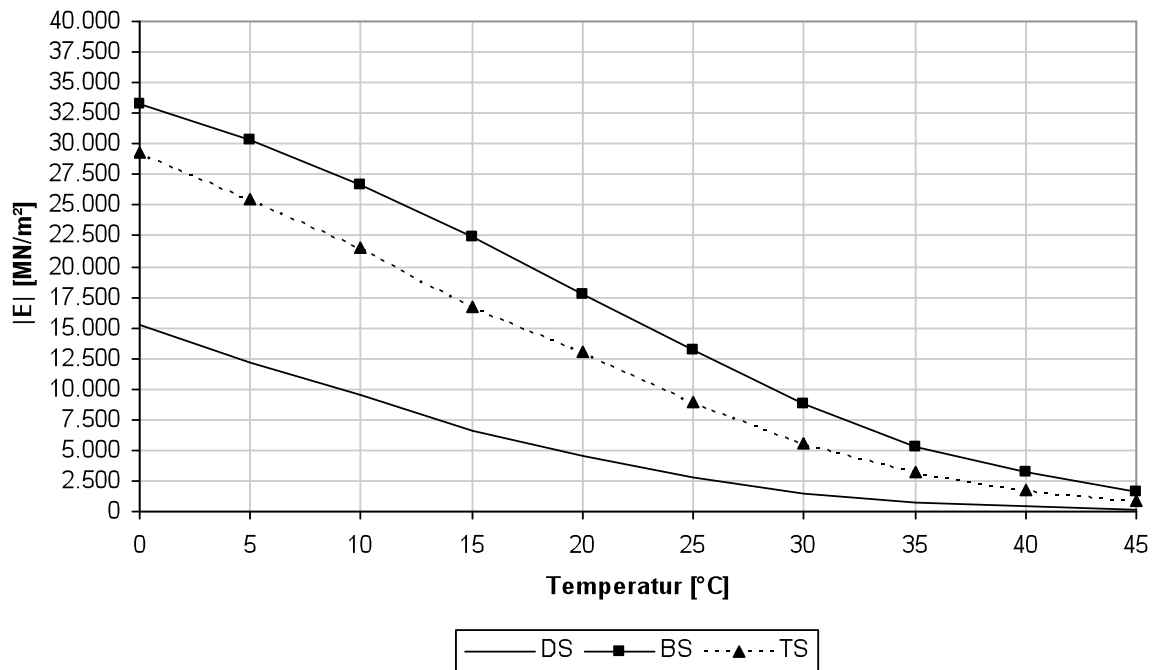
Strecken ID: III-4



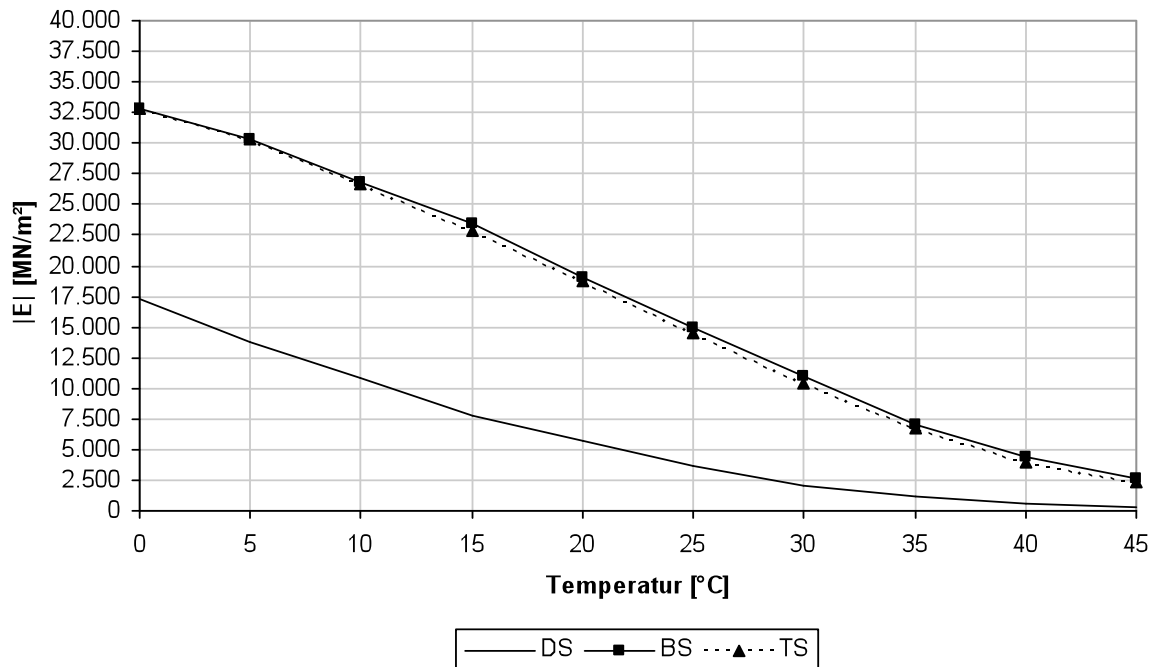
Strecken ID: III-5



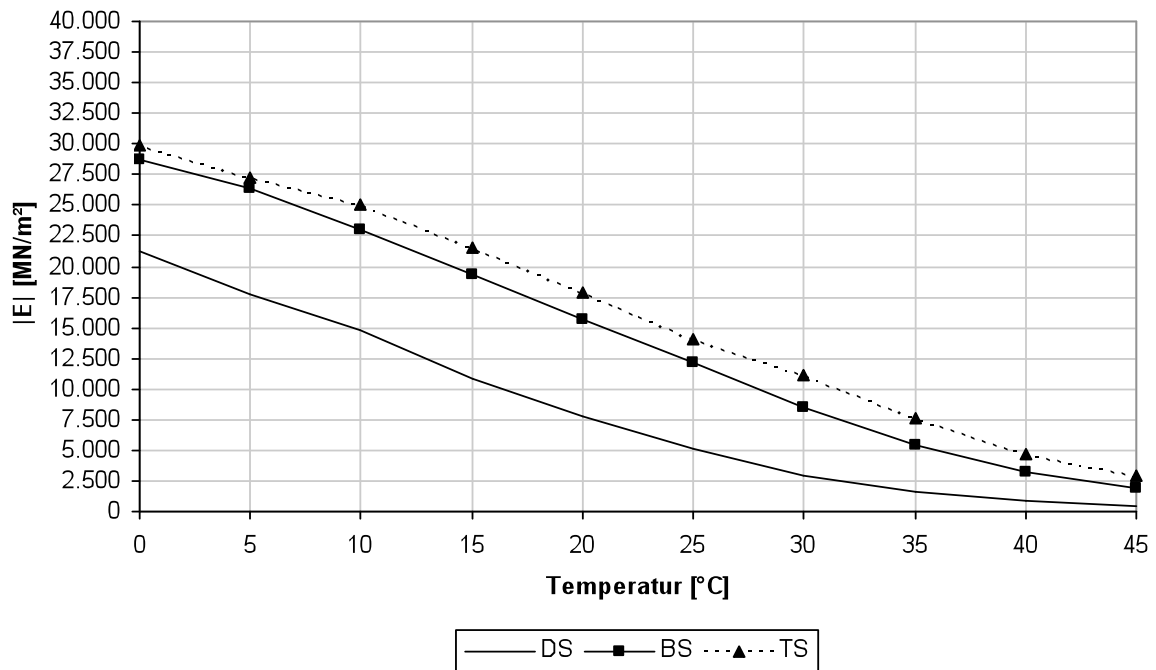
Strecken ID: IV-1



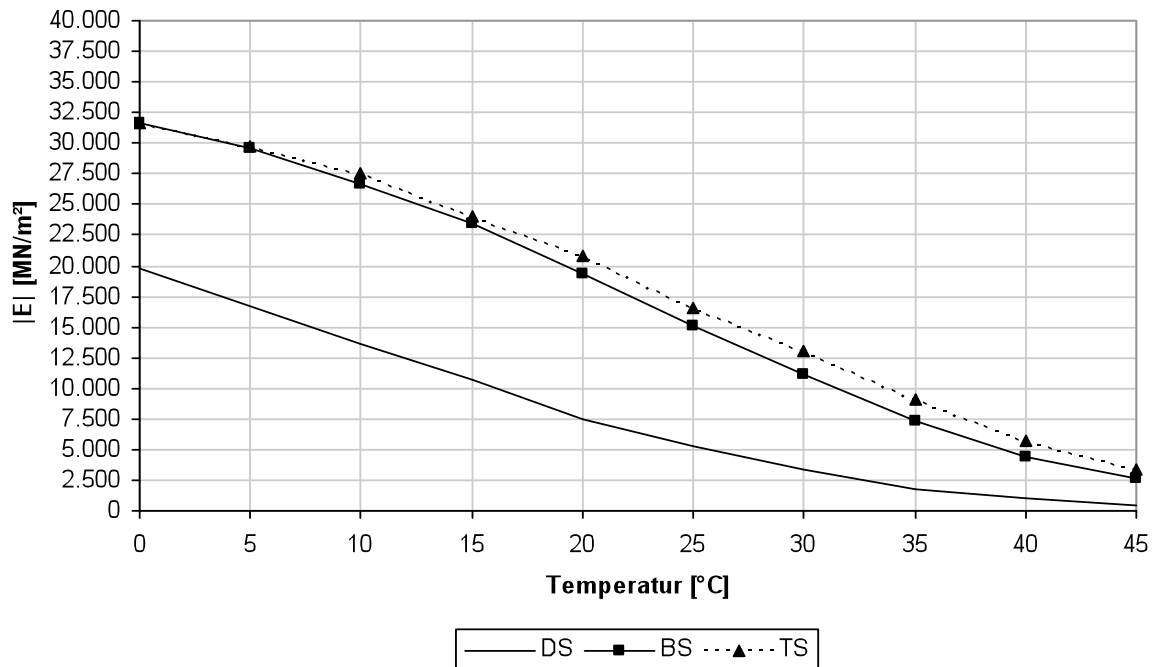
Strecken ID: IV-2



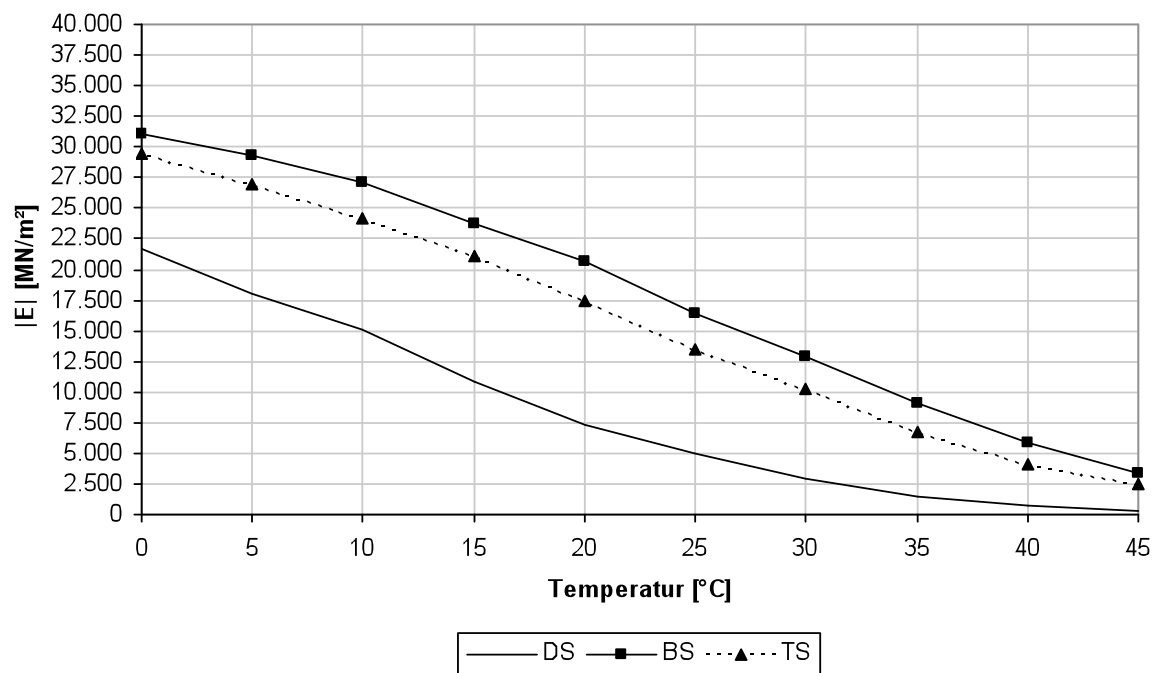
Strecken ID: IV-3



Strecken ID: IV-4



Strecken ID: IV-5



Physikalische Grundlagen des Wärmetransports

Der Straßenoberbau unterliegt grundsätzlich den gleichen geophysikalischen Gesetzmäßigkeiten wie ein natürlicher Boden. Aufgrund der sehr andersartigen material- und oberflächenspezifischen Eigenschaften, speziell der des Asphaltkörpers, unterscheiden sich jedoch die thermischen Reaktionen auf äußere energetische Bewegungen erheblich von denen des natürlichen Bodens. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass bei einem natürlichen Boden eine stetige Verdunstung von Bodenwasser stattfindet, die den Wärmestrom in den Boden erheblich beeinflusst. Bei Straßenoberflächen ist diese Verdunstungskomponente lediglich kurzfristig nach Niederschlagsereignissen feststellbar und somit vernachlässigbar [31].

Wärmestrom an der Erdoberfläche

Da nach dem Energieerhaltungssatz Energie weder im Nichts verloren geht, noch aus diesem entsteht, gilt für den Übergang der Wärmeenergie an der Grenzfläche Atmosphäre und Erdkörper folgende Energiehaushaltsgleichung:

$$Q + B + L + V = 0$$

Gl. 1

mit

Q	= Strahlungsbilanz der Erdoberfläche
B	= Bodenwärmestrom
L	= Konvektion
V	= Kondensation

Die Komponenten der Gleichung 1 sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

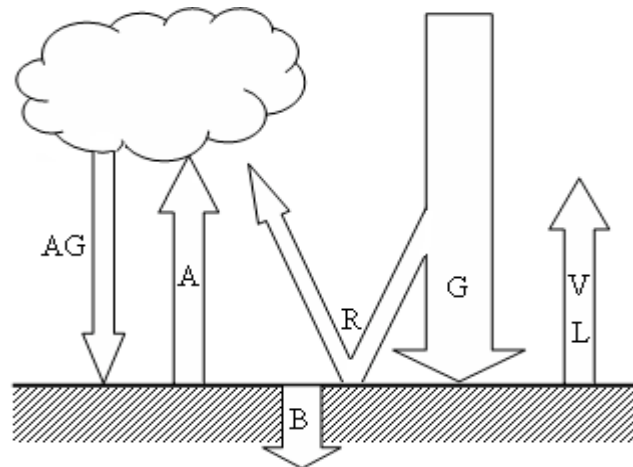


Abbildung 1: Wärmestrom an der Straßenoberfläche, tagsüber (idealisiertes System)

Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche setzt sich aus den Strahlungsbilanzen der kurzwelligen und langwelligen Strahlung zusammen. Als kurzwellige Strahlung wird die von der Sonne ausgehende Strahlung bezeichnet. Langwellige Strahlung ist hingegen Strahlung, die durch die Erdoberfläche, Atmosphäre und der gesamten Umwelt emittiert wird, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Strahlungstypen und Wellenlängen

Strahlungstyp	Wellenlänge	
kurzwellige Strahlung		
- äußerer Rand der Atmosphäre	0,15 bis 10 μm	
- Erdoberfläche	0,30 bis 2 μm	UV, sichtbares Licht, IR
langwellige Strahlung	4,00 bis 60 μm	IR

Die kurzwellige Strahlung wird auf dem Weg durch die Atmosphäre teilweise absorbiert, gestreut oder reflektiert. Beim Auftreffen auf die Erdoberfläche wird sie zudem teilweise reflektiert und kann durch erneute Reflexion wieder auf der Erdoberfläche auftreffen. Die somit nicht auf dem direkten Weg eintreffende kurzwellige Strahlung wird als diffuse Himmelsstrahlung oder Streustrahlung bezeichnet. Die Summe aus direkter Sonneneinstrahlung I_S und diffuser Himmelsstrahlung I_H wird als Globalstrahlung G oder Insolation bezeichnet. Wird hiervon der Anteil der an der Oberfläche reflektierten Strahlung R abgezogen, ergibt sich die kurzwellige Strahlungsbilanz Q_k :

$$Q_k = G - R = I_S + I_H - R \quad \text{Gl. 2}$$

Der Anteil der reflektierten Strahlung R gegenüber der auftreffenden Globalstrahlung G wird als Albedo bezeichnet.

Da jeder Körper, dessen Temperatur sich von 0 °K unterscheidet, Strahlungsenergie abgibt, ist die langwellige Strahlung bei der Strahlungsbilanz zu berücksichtigen. Die Strahlungsleistung kann, unabhängig von der Wellenlänge, nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz berechnet werden:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{Gl. 3}$$

mit ε = Emissionsgrad der strahlenden Fläche
 σ = Stefan-Boltzmann-Konstante (= $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
 A = strahlende Körperoberfläche
 T = Körpertemperatur

Aus Gleichung 6 ist zu erkennen, dass die Strahlungsleistung eines Körpers wesentlich von dessen Temperatur abhängig ist. Ein weiterer Faktor ist der Emissionsgrad eines Körpers, der nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz gleich dem Absorptionsgrad ist. Als Bezugsgröße für den Emissionsfaktor wird ein nicht realer ‚schwarzer Körper‘ mit $\varepsilon = 1,0$ verwendet, dessen Emission maximal ist. Die Differenz von dem Emissionsfaktor eines beliebigen Körpers zu dem Emissionsfaktor des ‚schwarzen Körpers‘ ist somit die Albedo (lat. *albus* = weiß). Mit abnehmendem Emissionsfaktor nimmt der Anteil der reflektierten Strahlung zu (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Emissionsvermögen und Albedo ausgewählter Oberflächen [25]

Oberfläche	Emissionsfaktor	Albedo
‚schwarzer Körper‘	1,00	0 %
Eisen, poliert	0,02	98%
Glas	0,89-0,94	6-11 %
Asphaltstraßen	0,96	4%

Da wie bereits erwähnt jeder Körper Strahlungsenergie abgibt, geben auch die Wassertröpfchen der Wolken und die festen Verunreinigungen in der Atmosphäre Strahlungsenergie ab, die sog. atmosphärische Gegenstrahlung. Die langwellige Strahlungsbilanz setzt sich somit aus den Anteilen der atmosphärischen Gegenstrahlung AG und der Strahlung des Bodens A zusammen:

$$Q_L = AG - A \quad \text{Gl. 4}$$

Die Strahlungsbilanz Q der Erdoberfläche ergibt sich somit zu

$$Q = Q_k - Q_L \quad \text{Gl. 5}$$

Bedingt durch die fehlende Globalstrahlung in der Nacht entsteht ein Energiedefizit (Q ist negativ), welches durch den Energieüberschuss tagsüber (Q ist positiv) wieder ausgeglichen wird [25][43].

Wie einleitend beschrieben ist der Einfluss der Kondensation für den Energiehaushalt an einer Straßenoberfläche vernachlässigbar klein, zudem können die benötigten Größen für die Berechnung der Verdunstungsmenge, wie die Menge und Temperatur des Niederschlags, nicht erfasst werden [31]. Der Anteil für die Kondensation wird daher für die Betrachtung einer Straßenoberfläche zu $V=0$ gesetzt.

Der Wärmeenergieaustausch zwischen Bodenoberfläche und der angrenzenden Luft wird als Konvektion oder Strom fühlbarer Wärme L bezeichnet und kann wie folgt berechnet werden:

$$L = -u \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta}{dh} \quad \text{Gl. 6}$$

mit

u	= Austauschkoeffizient
c_p	= spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck
ϑ	= Temperatur
h	= Höhe über der Bodenoberfläche

Die Gleichung gilt jedoch nur für den Bereich in wenigen Metern über der Bodenoberfläche, da der Einfluss der Bodenwärmeenergie mit zunehmender Höhe abnimmt. Der Austauschkoeffizient u beschreibt sozusagen die Transportbedingung des Wärmestroms und ist abhängig von der Oberflächenstruktur der Umgebung, der Windgeschwindigkeit und des Temperaturgradienten der Luft. Das negative Vorzeichen beschreibt die Strömungsrichtung von unten nach oben [25].

Gasförmige Körper, somit auch die Atmosphäre, die mit einem festen Körper anderer Temperatur in Berührung kommen, geben Wärme an ihn ab oder übernehmen sie von ihm [32]. Dieser Wärmeübergang wird im Sinne der o.g. Energiehaushaltsgleichung als Bodenwärmestrom bezeichnet und ist für die folgenden Betrachtungen der Wärmeenergieeintrag in den Straßenoberbau. Allgemein gilt für den Bodenwärmestrom [25][38]:

$$B = \alpha \cdot \frac{d\vartheta}{dz} \quad \text{Gl. 7}$$

mit α = Wärmeübergangskoeffizient
 z = Tiefe ab Bodenoberfläche

Der Faktor α beschreibt die Transportbedingung des Wärmestroms. Er ist abhängig von der Luftbewegung und der Oberflächenbeschaffenheit des festen Körpers [24]. Mit Hilfe des Bodenwärmestroms, als Teil der Energiehaushaltsgleichung, soll die Grenzflächensituation beschrieben werden, weniger die tatsächliche Temperaturverteilung innerhalb des Straßenoberbaus.

Wärmestrom in Körpern

Bestimmende Materialparameter für den Wärmestrom in Körpern sind Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität.

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt an, welche Wärmemenge von einer Seite eines Körpers mit 1 m² Fläche und 1 m Dicke bei einem Temperaturunterschied von 1 K/h zur anderen Seite fließt.

Die Porosität und der Feuchtigkeitsgehalt des Materials sind dabei bestimmend für die Größe der Wärmeleitfähigkeit. Mit abnehmendem Porengehalt eines trockenen und porösen Materials, und damit steigender Rohdichte, nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu. Durch die 20mal größere Wärmeleitfähigkeit von Wasser als Luft steigt die Wärmeleitfähigkeit eines Materials mit Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts an [56]. Zudem ist der Bewegungsgrad des Wassers oder der Luft entscheidend für die Wärmeleitfähigkeit; turbulentes Wasser oder Luft leiten weniger gut als im unbewegten Zustand [25].

Die Wärmeleitfähigkeit eines Materials ist mit Druck und Temperatur veränderlich. Zahlenmäßig ist sie, genauso wie deren Änderungsgesetze, mit Temperatur und Druck empirisch bestimmbar [24].

Die spezifische Wärmekapazität c ist die massenbezogene Wärmeenergie, die erforderlich ist, um 1 kg Masse um 1 K zu erwärmen [56].

Typische Werte für die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von straßenbautypischen Materialien sind für eine mittlere Probertemperatur von 10 °C in Tabelle 3 zusammengestellt.

Ausgangspunkt aller analytischen Untersuchungen der Wärmeleitung in Gasen, Fluiden und Festkörpern ist die Fouriersche Gleichung für die Wärmeleitung, auch thermische Diffusionsgleichung genannt [31][42]. Diese kann für instationäre wie stationäre Zustände, eindimensionale und mehrdimensionale Strömungen als partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung angegeben werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Gl. 8}$$

mit T = Temperatur
 t = Zeit
 x = Ortskoordinate
 a = Temperaturleitzahl
 λ = Wärmeleitfähigkeit
 c = Wärmekapazität
 ρ = Dichte

Gleichung 8 gilt unter Berücksichtigung folgender Annahmen [44][53]:

- der durchflossene Körper ist wärmequellenfrei und einseitig begrenzt
- der durchflossene Körper besteht aus einem homogenen und isotropen Material
- die Wärmeströmung ist eindimensional
- die Koeffizienten sind konstant, d.h. Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität sollen unabhängig von Temperatur und Druck sein
- es treten keine Aggregatzustandsänderungen in dem Körper auf

Die Fouriersche Gleichung kann grundsätzlich für die Beschreibung des Wärmestroms innerhalb der Straßenbefestigung verwendet werden. Jedoch macht dabei nicht nur die Lösung der Differentialgleichung Schwierigkeiten, sondern auch die getroffenen Annahmen, die nicht alle mit den realistischen Bedingungen in Einklang zu bringen sind.

Tabelle 3: Thermophysikalische Kennziffern [18]

Stoff	Trockendichte ρ (g/cm ³)	Wassergehalt w (Gew.-%)	spez. Wärmekap. c (J/ kg·K)	Wärmeleitfähigkeit λ (W/m·K)
Bituminös gebundene Baustoffe				
Gussasphalt	2,38	0	880	1,09
Asphaltfeinbeton	2,63	0	880	1,31
Asphaltbinder	2,45 – 2,56	0	880	1,05 – 1,34
Asphalt – Tragschicht aus Basaltsplitt	2,56	0	880	0,90
aus Kies	2,09 – 2,39	0 – 4	905 – 1345	1,61 – 2,43
Bitumensand	1,85	0	965	0,62
Teerschotter (L381)	1,88	0		0,54
Asphaltschicht mit LD- Schlacke	2,38 – 2,63	0		0,76 – 0,87
Leichtasphalt aus - Blähton	0,80 – 0,97	0		0,24 – 0,29
- Blähschiefer	1,12 – 1,14	0 – 1	670	0,33 – 0,35
- Schaumlava	1,84	0		0,38
- Schaumslagge	1,36 – 2,11	0		0,27 – 0,55
- Schaumsilikat	1,05	0		0,20
Böden				
Kiessand	1,84 – 2,00	0 – 5	785 – 1075	0,46 – 2,33
Lößlehm (UL)	1,67 – 1,78	0 – 16		0,55 – 1,64
desgl. Bei T = +7 °C	1,81	14		1,45
desgl. Bei T = -12,5 °C	1,81	14		2,19
Keupermergel (TM)	1,31 – 1,65	0 – 20		0,28 – 1,14
Sonstige Stoffe				
Diabas (Fichtelgeb.)	2,93	0		1,62
Basalt (Linz/Rh.)	3,01	0	795	1,73
Bitumen	1,05	0	1760	0,16
Wasser ($\rho = 1,0$)			4190	0,58
Eis (T = 0 °C) ($\rho = 0,91$)			2116	2,23
Schnee (T = 0 °C) ($\rho = 0,10$)			2116	0,05
desgl. ($\rho = 0,30$)			2116	0,23
desgl. ($\rho = 0,50$)			2116	0,64

Differenzenverfahren

Ein weit verbreitetes Verfahren zur Lösung der Fourierschen Differentialgleichung ist das Differenzenverfahren nach SCHMIDT. Das Differenzenverfahren kann sowohl in zeichnerischer wie auch rechnerischer Form angewendet werden, vgl. KREBS et al. [31]. In einem ersten Schritt wird Gleichung 1 (vgl. auch in Anlage C-1 Gleichung 8) unter der Annahme einer konstanten Temperaturleitzahl a , durch die Zerlegung der Zeit t in kleine, aber endliche Intervalle Δt und ebenso die Tiefe x in Intervalle Δx in eine Differenzengleichung (Gleichung 2) überführt.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

T	=	Temperatur
t	=	Zeit
x	=	Ortskoordinate
a	=	Temperaturleitzahl
λ	=	Wärmeleitfähigkeit
c	=	Wärmekapazität
ρ	=	Dichte

$$\frac{\Delta T_t}{\Delta t} = a \cdot \frac{\Delta^2 T_x}{\Delta x^2} \quad \text{Gl. 2}$$

Einer beliebigen Tiefe wird nun die Nummer n , einer beliebigen Zeit die Nummer k zugeordnet. Die übrigen Zeit- und Tiefennumerierungen ergeben sich durch fortlaufendes Abzählen (vgl. Abbildung 1). Die Größen ΔT_t und ΔT_x , sowie $\Delta^2 T_x$ ergeben sich somit zu:

$$\Delta T_t = T_{n,k+1} - T_{n,k} \quad \text{Gl. 3}$$

$$\Delta T_x = T_{n+1,k} - T_{n,k} \quad \text{Gl. 4}$$

$$\Delta^2 T_x = T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k} \quad \text{Gl. 5}$$

Wird dies nun in die Differenzengleichung eingesetzt, ergibt sich Gleichung 6, mit der sich der Temperaturverlauf zum Zeitpunkt $k+1$ berechnen lässt, wenn der Temperaturverlauf zum Zeitpunkt k bekannt ist:

$$T_{n,k+1} = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k} = A \cdot (T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k} \quad \text{Gl. 6}$$

Für die praktische Anwendung heißt dies, dass der Temperaturverlauf innerhalb der Straßenbefestigung bei bekanntem Oberflächentemperaturgang und vorhandenem Anfangstemperaturprofil iterativ berechnet werden kann. KREBS et al. [31] haben zudem das Differenzenverfahren derart modifiziert, dass statt des Oberflächentemperaturganges meteorologische Daten als Eingangsgrößen dienen können. Eine weitere Modifikation wird von ROBINSON [40] vorgestellt, die ebenfalls meteorologische Daten als Eingangsgrößen verwendet.

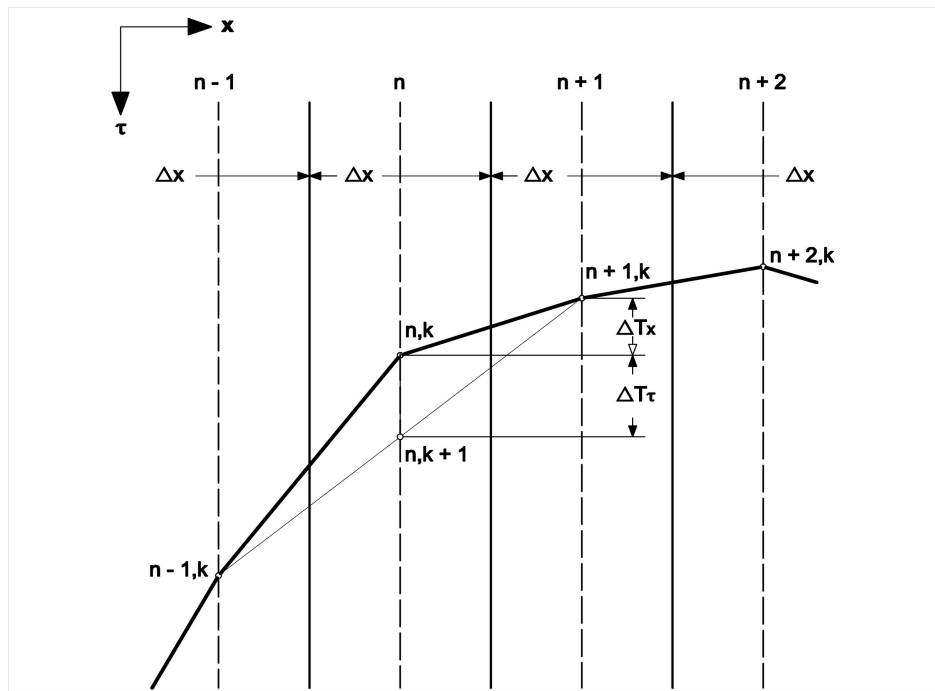


Abbildung 1: Konstruktion zum Differenzenverfahren [31]

KREBS et al. [31] haben die Berechnungen nach dem Differenzenverfahren mit eigenen Temperaturmessaufzeichnungen verglichen. Die Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Werten lagen in einem akzeptablen Toleranzbereich. Ein ähnlich gutes Bild zeigt sich bei dem Ansatz nach ROBINSON [40]. SCHULTE [44] hat das Differenzenverfahren hinsichtlich der Stabilität gegenüber sich fortpflanzenden Fehlern bei der Iteration untersucht und festgestellt, dass der Faktor A möglichst unter 0,5 liegen sollte. Mit zunehmendem Faktor A sinkt die Anzahl der Zeitschritte bis zur Einstellung des doppelten Fehlers bei der Temperaturberechnung.

BELLS-Verfahren

Der von BALTZER, ERTMAN-LARSEN, LUKANEN und STUBSTAD [8][35] entwickelte, nach den Autoren benannte, BELLS Algorithmus zur Berechnung von Asphaltkörpertemperaturen basiert auf dem Ansatz von SOUTHGATE et al. [45] und wurde für die Anwendung bei FWD Messungen entwickelt. Der Algorithmus wurde mehrfach überarbeitet und liegt nun in der dritten Version als BELLS3 vor. Der Algorithmus wird in der Literatur vielfach genannt und findet sich im Amerikanischen Regelwerk in Form einer ASTM Norm [6] wieder.

Zur Herleitung des Algorithmus wurden Temperaturdaten aus dem *Long Term Pavement Performance* (LTPP) Programm des *U.S. Department of Transportation* verwendet. Das dafür ausgesuchte Streckenkollektiv setzt sich wie folgt zusammen:

- 21 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 4,5 und 10 cm
- 53 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 10 und 20 cm
- 26 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 20 und 30 cm

Zur Anwendung des Algorithmus wird die aktuelle Oberflächentemperatur, die Uhrzeit sowie die mittlere Lufttemperatur des Vortages benötigt. Mithilfe des Algorithmus kann die Temperatur in beliebiger Tiefe berechnet werden.

$$T_x = 2,9 + 0,935 \cdot T_0 + (\log(x) - 1,25) \cdot (-0,487 \cdot T_0 + 0,626 \cdot T_{\text{vor}}) + 3,29 \cdot \sin(\text{hr}_{18} - 15,5) + 0,037 \cdot T_0 \cdot \sin(\text{hr}_{18} - 13,5) \quad \text{Gl. 1}$$

mit

- T_x = Asphalttemperatur in der Tiefe x [°C]
- x = Tiefe unter Fahrbahnoberfläche [mm]
- T_0 = Oberflächentemperatur [°C]
- T_{vor} = mittlere Lufttemperatur des Vortages [°C]
- sin = Sinus Funktion in einem 24h System, wobei 2π einem 24h Tag entsprechen
- hr_{18} = Tageszeit, Beispiel: 9:30h $\rightarrow (9,5 - 15,5)/24 = -0,1875 \rightarrow -0,1875 \times 2\pi = -1,178$ Radiant $\rightarrow \sin(-1,178) = 0,90$

Die ausschließliche Berücksichtigung der Luft- und Oberflächentemperatur ist durch die Ergänzung des Messzeitpunktes in den Algorithmus möglich. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ganglinien der Temperaturen im Asphaltkörper über einen Tag hinweg mit zwei sich überlappenden Sinuskurven angeglichen werden können. Die Wahl von zwei Sinuskurven berücksichtigt die unterschiedlichen Dauern der Aufheiz- und Abkühlphase an einem Tag, vgl. Abbildung 1. Die Aufheizphase ist dabei kürzer als die Abkühlphase.

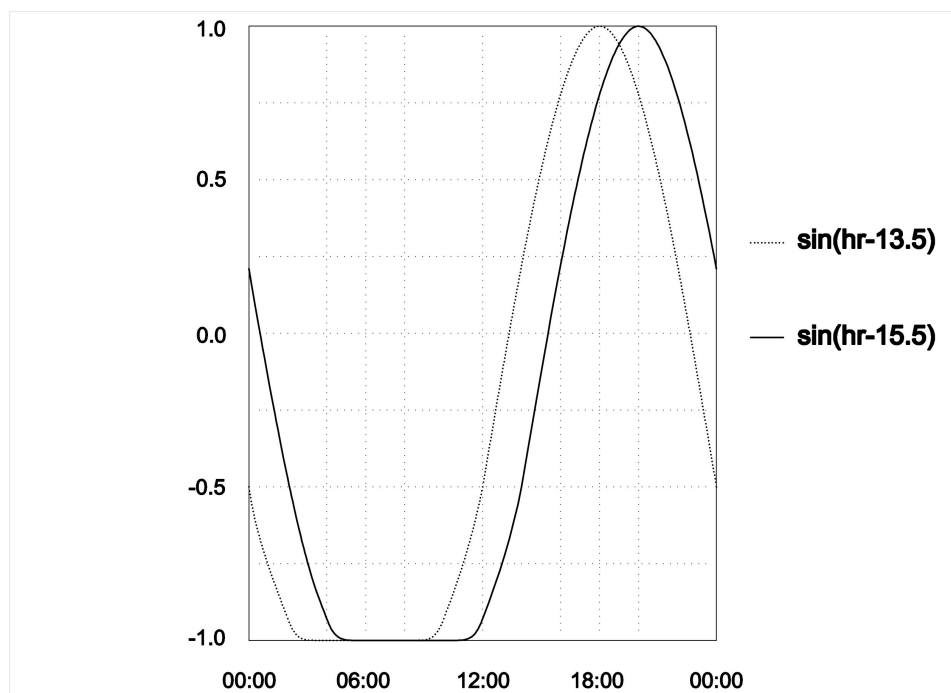


Abbildung 1: Aufteilung des Tagesgangs in zwei Sinuskurven

Nationale und internationale Umfrage zur Vorgehensweise bei Asphaltkörpertemperaturmessungen im Rahmen von FWD Messungen

Durchführung der Umfrage

Im September 2007 wurde ein Fragebogen per e-Mail an die Mitglieder der FWD User's Group [23] geschickt. Im April 2008 wurde zudem der Fragebogen an die deutschen FWD Betreiber per e-Mail verschickt. Inhalt des Fragebogens waren acht Fragen, die sich auf die Temperaturmessmethoden der jeweiligen FWD Betreiber bezogen. Die Fragen im Einzelnen waren:

1. Welche Temperaturen werden aufgezeichnet (Luft, Oberfläche, Asphaltkörper)?
2. In welchen Tiefen wird die Temperatur gemessen?
3. Wird das Temperaturmessloch mit einem Hammer geschlagen oder gebohrt?
4. Wird Wasser, Öl oder Sonstiges als Kontaktflüssigkeit verwendet?
5. Wird das Messloch während der Messung geschützt (Klebeband, Knete, ...)?
6. Wie lange wird bis zur ersten Ablesung gewartet?
7. Wird die Temperatur während der FWD Messung kontinuierlich aufgezeichnet oder erfolgt eine Einzelablesung?
8. Wie viele Temperaturmessungen werden an einem Tag oder auf einer Strecke durchgeführt?
9. Wird das Messloch im Anschluss an die Messung verfüllt?

Insgesamt gingen 31 Antworten innerhalb kürzester Zeit ein. Zwanzig Antworten kamen dabei aus den USA, zwei aus Dänemark und jeweils eine aus Kanada, Schweden, Italien und Hongkong. Fünf Antworten kamen aus Deutschland. Die Mehrheit der Antworten kam von öffentlichen/staatlichen Betreibern, zwei Antworten kamen von privaten Betreibern und eine Antwort von einem FWD Hersteller, der auch selber Messungen durchführt. Von einem Betreiber wurde der Fragebogen von mehreren Mitarbeitern ausgefüllt, so dass insgesamt 28 Betreiber an der Umfrage teilgenommen haben. Von den 31 Antworten wurde der Fragebogen 24-mal ausgefüllt, zwei Betreiber haben die Umfrage durch weiterführende Hinweise zum Thema ergänzt.

Auswertung

Im Folgenden sind die Antworten weitestgehend zusammengefasst, in Tabelle 1 sind die Umfrageergebnisse tabellarisch zusammengefasst.

Die Oberflächentemperatur wird von 21 Betreibern gemessen, fast genauso häufig wird die Lufttemperatur gemessen, 16 Betreiber messen die Asphalttemperaturen. In 46 % der Fälle werden alle drei Temperaturen in Kombination gemessen, nur Luft und Oberflächentemperatur werden in 31 % der Fälle gemessen. Auch wenn wenige Betreiber es erläuternd explizit angegeben haben, ist davon auszugehen, dass in den Fällen, bei denen keine Asphalttemperaturen gemessen werden, die Asphalttemperaturen nach der AASHTO / BELLS3 Methode berechnet werden.

Die Asphaltkörpertemperatur wird in 11 Fällen in nur einer Tiefe gemessen. Hauptsächlich wird dabei in Asphaltmittelschicht gemessen, in einigen Fällen bei circa 2,5 cm (1 inch) Tiefe. In den anderen Fällen wird die Temperatur einen Inch (2,54 cm), ausgehend von der Unterkante bzw. der Oberfläche, und in Schichtmitte gemessen.

15 Betreiber bohren die Löcher für die Temperaturmessungen in den Asphalt, ein Betreiber schlägt das Loch mit Hilfe eines Nagels. Die Lochdurchmesser variieren von drei bis 25 mm, in der Regel wird ein Loch mit circa 6 - 9 mm Durchmesser gebohrt. Kontaktflüssigkeit wird von 14 Betreibern verwendet. In der Mehrheit, neun Fälle, kommt dabei Öl zum Einsatz. Die Löcher für die Temperaturmessung werden nur von drei Betreibern während der Messung geschützt. Hierbei kommt Klebeband, Knetmasse oder Styropor zum Einsatz. Die Löcher für die Temperaturmessungen werden lediglich von drei Betreibern nach der Verwendung verschlossen.

Die Wartezeiten werden von den Betreibern sehr unterschiedlich angegeben. Sie bewegen sich von 30 Sekunden bis zu 15 Minuten. Genaue Angaben werden selten gemacht. In der Regel erfolgt die erste Ablesung nach fünf bis zehn Minuten. Sieben Betreiber führen eine Einzelablesung durch, die restlichen Betreiber lesen die Temperatur in viertelstündlichen oder stündlichen Intervallen ab.

Die Angaben über die Anzahl der Temperaturmesspunkte zeigen kein einheitliches Bild. Einige Betreiber messen die Temperatur in festgelegten Häufigkeiten, beispielsweise an drei Punkten pro Strecke, stündlich oder jede Meile. Andere Betreiber messen pro Strecke mindestens einmal und weitere Male bei sich ändernden Umgebungsbedingungen.

ID	Land	Frage 1		Frage 2		Frage 3		Frage 4		Frage 5		Frage 6		Frage 7		Frage 8		Frage 9		Sonstiges
		Luft	Oberfläche / Asphalt	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Nagel	Bohrer	Durchmesser	ja	nein	ja	nein	Zeit	stabile Abl.	Einzelablesung	Mehrfachablesung	Anzahl	ja	
FWD 1	USA	x	x	2,54 cm			x			x	x	30-60 sec	x				Streckebeg. + bei veränderten Beding.			
FWD 2	Schweden	x	x	Dickenabhängig bis zu 3 Löcher (25 mm / Mitte / h-25 mm)					Glycerol + Min.Öl		x	10 min			1 pro Stunde		Beginn, Ende, jede Stunde, vera. Bed.			
FWD 3	USA	x	x																	
FWD 4	USA	x	x																	BELLS
FWD 5	USA	x	x	Mitte			x	9,5 mm	Wasser		x	5 min			1 pro Stunde		~ 3 pro Projekt			
FWD 6	USA	x	x	Mitte			x		Wasser		x	5-10 min enge Min. (-15 min bei heißen Wetter)	x				2 oder 3			
FWD 7	USA	x	x	Mitte			x	9,5 mm	Hydrauliköl		x		x				1 pro Stunde			
FWD 8	USA	x	x																	
FWD 9	USA	x	x	Mitte			x	25 + 12,5 mm	Mineral Öl		x	3 min	x				jede Meile			
FWD 10	USA		x																	
FWD 11	USA																			
FWD 12	USA	x	x																	
FWD 13	Italien		x	Mitte					Wasser			10 min			1 min Intervall (bis deltat < 0,1 °C)		jede 1/2 h bei Tag, jede 2 h bei Nacht			
FWD 14	Dänemark	x	x	Mitte	alt. 6 cm		x	6 mm	Wasser		x	10 min	x				Wetterabhängig, wenn della 10beris-54°C			
FWD 15	USA	x	x	2,54 cm	Mitte	2,54 cm ü. UK	x		Öl			10 min			30-60 min		1 oder 2			
FWD 16	USA	x	x																	
FWD 17	Kanada		x	2/3 Dicke			x		Öl			10 min	x				???			
FWD 18	USA	x	x	1,9 cm			x	3 bis 9,5 mm	Öl			15 min (mit Öl / 1 min trocken bei Beton)			mind. 1 pro Stunde		mind. 4 pro Strecke			
FWD 19	Dänemark	x	x	4 cm			x		Öl o. trocken		x	einige Min.	x		Projektabhängig		mind. jede Stunde, verä. Bed.			
FWD 20	Hongkong	x	x	Mitte			x		Wasser		x	~3 min	x		Projektabhängig; mind. 1 Ablesung		1			
FWD 21	USA	x	x																	
FWD 22	USA	x	x																	
FWD 23	USA																			
FWD 24	Deutschland	x	x	4 cm			x	6 bis 8 mm					x				Streckenbeg. + bei veränderten Beding.			
FWD 25	Deutschland	x	x	gemäß COST / AP B2			x		Silikonöl		x	3 - 4 min	x				je nach Dauer der Messung mehrfach			Messung in Messlinie Messung in Radspur oder 30 cm von Seitenmarkierung
FWD 26	Deutschland	x	x																	
FWD 27	Deutschland	x	x	4 cm	10 cm	3 cm über UK	x		Glycerin			~20 min			15 Min Intervall		-			
FWD 28	Deutschland	x	x																	im Seitenstreifen

Tabelle 1

Hinweise zur Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen können Hinweise zur Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen gegeben werden.

Für Bohrlochtemperaturmessungen empfiehlt sich der Einsatz einer leistungsstarken (Schlag-) Bohrmaschine. Bei Temperaturen unter circa 10 °C können Bohrungen mit einer Bohrmaschine mit weniger als 1.000 Watt Leistung oder mit einem Akkubohrer unter Umständen schwierig und zeitintensiv sein. Beste Erfahrungen wurden mit Betonbohrern gemacht. Darüber hinaus hat der Abnutzungsgrad der Bohrerschneide hat großen Einfluss auf die benötigte Bohrzeit.

Die Bohrlöcher sollten nach dem Bohren mithilfe von trockener Druckluft (z.B. aus Airbrush - Druckluftdosen) gereinigt werden. Eventuell muss festgesetzter Bohrstaub durch Nachbohren (ohne die Lochtiefe zu verändern) gelockert werden.

Es sollte sichergestellt sein, dass die eingesetzten Temperaturfühler nur an der Fühlerspitze messen. Es ist darauf zu achten, dass der Temperaturfühler, z.B. durch das Eigengewicht des Thermometers, Kontakt mit dem Boden des Bohrloches besitzt. Die Messung kann ohne Kontaktflüssigkeit erfolgen. Die erste Ablesung am Thermometer kann erfolgen, wenn sich die Temperatur innerhalb von zwei Minuten nicht mehr als um 0,2 °C ändert. Um Änderungen der Asphaltkörpertemperatur während der FWD Messungen zu dokumentieren, wird der Einsatz von Temperaturdatenloggern empfohlen.

Während der Temperaturmessung sollte darauf geachtet werden, dass z.B. abgestellte Fahrzeuge, Sicherungseinrichtungen und Werkzeuge die Messstelle und deren unmittelbare Umgebung nicht beschatten bzw. Motorhitze die Messstelle nicht erwärmt und somit die Messergebnisse verfälscht.

Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Temperaturgradienten der Asphalttragschicht auf die Deflexionsmulde

Mithilfe der Sensitivitätsanalyse soll untersucht werden, welchen Einfluss die vereinfachte Annahme eines konstanten Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht auf die Deflexionsmulde besitzt. Hierzu wurden mögliche Temperaturgradienten in bestimmten Asphaltkörpertemperaturbereichen und Temperaturgradienten mit maximaler Spannweite ausgewertet.

Schritt 1

In einem ersten Schritt wurden die an den Temperaturmessstationen gemessenen Temperaturgradienten ausgewertet. Es wurden die Daten von April bis November verwendet, da in diesem Zeitraum üblicherweise FWD Messungen durchgeführt werden. Für die Auswertung wurden Temperaturgradienten gefiltert, deren Temperatur in 5 cm Tiefe (t_5) 5, 10, 15, 20, 25 oder 30 °C beträgt. Anschließend wurden die minimal und maximal auftretenden Temperaturen in 9 cm Tiefe (t_9) bei jeweils den genannten t_5 bestimmt. In einem weiteren Schritt wurden die minimal und maximal auftretenden Temperaturen in 20 cm Tiefe (t_{20}) bei jeweils den genannten t_5 und t_9 bestimmt. Somit konnten jeweils die möglichen Bereiche der Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht bestimmt werden. Diese sich überlappenden Temperaturbereiche sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

	Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3		Bereich 4		Bereich 5		Bereich 6	
t_5	5		10		15		20		25		30	
t_9	5	7	8	12	12	18	16	22	20	27	25	31
t_{20}	6	9	7	14	9	19	12	24	14	28	19	31

Für jeden der sich aus Tabelle 1 ergebenden 12 Gradienten der Asphalttragschicht wurden die E-Moduln in 1 cm Schritten berechnet. Der zugehörige E-Modul der Asphaltdecke wurde aus dem Mittelwert der E-Moduln der Asphaltdeckschicht und – binderschicht bei jeweils 5, 10, 15, 20, 25 und 30 °C berechnet. Mithilfe dieser E-Moduln wurden die zugehörigen Deflexionsmulden berechnet. Hierbei wurde ein 15-Schichten-System und ein 4-Schichten-System als Vergleichssystem berechnet, vgl. Tabelle 2. In Abbildung 1 sind die so berechneten Deflexionsmulden vergleichend dargestellt. Es ist zu erkennen, dass trotz der vereinfachten Annahme eines konstanten E-Moduls für die Asphalttragschicht keine wesentlichen Fehler bei der Berechnung der Deflexionsmulden entstehen.

Tabelle 2

Schicht	15-Schichten-System		4-Schichten-System	
	Dicke	E-Modul	Dicke	E-Modul
Asphaltdecke	8 cm	∅ von Deck- und Binderschicht bei 5, 10, 15, 20, 25 oder 30 °C	8 cm	analog 15-Schichten-System
Asphalttragschicht	12 Schichten à 1 cm	12 E-Moduln in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten	12 cm	∅ E-Moduln aus 15-Schichten-System
Tragschicht ohne Bindemittel	38 cm	300 MN/m ²	38 cm	300 MN/m ²
Untergrund	-	150 MN/m ²	-	150 MN/m ²

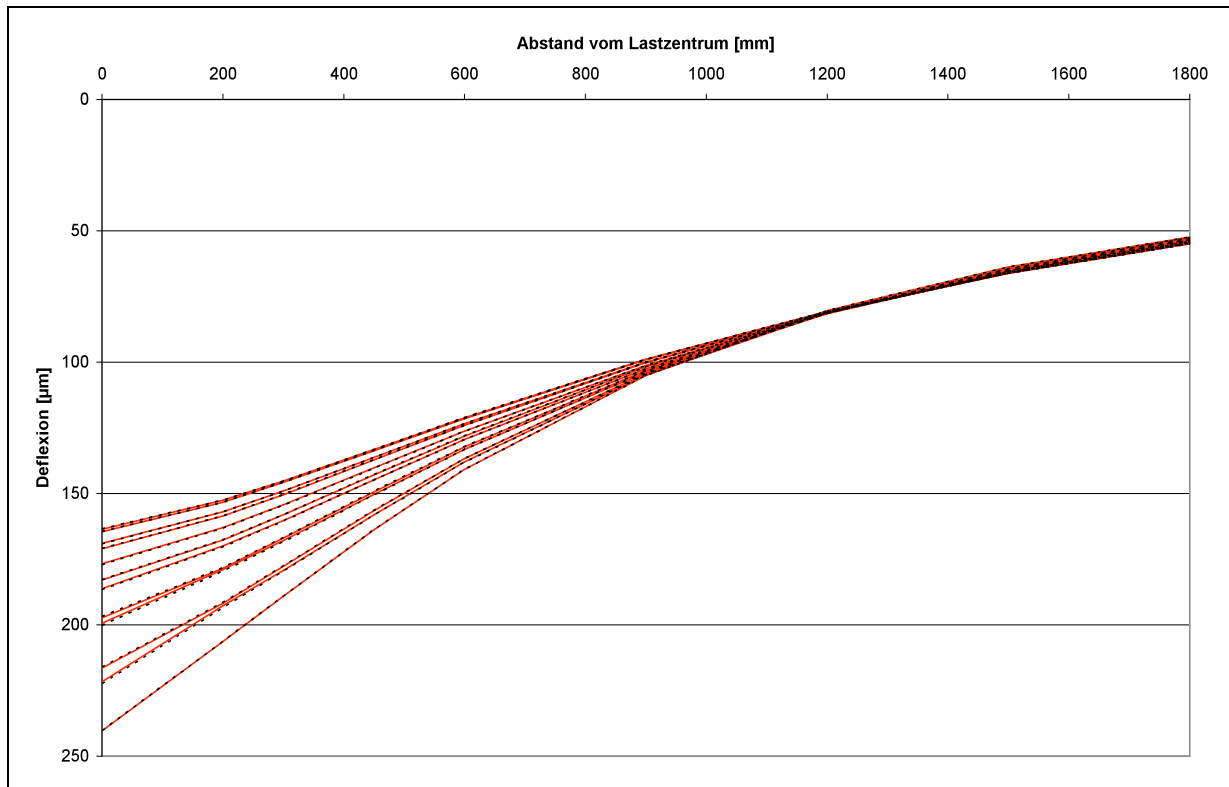


Abbildung 1 (rot = 15-Schichten-System / schwarz = 4-Schichten-System)

Schritt 2

In einem weiteren Schritt wurde für alle Temperaturgradienten der oben genannten Datenbasis die Differenz der Temperatur in 9 und 20 cm Tiefe, also die Spannweite der Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht, berechnet und anhand einer Häufigkeitsverteilung ausgewertet. Rund 80 % der Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht besitzen eine Spannweite von $-1,5\text{ °C}$ ($t_9 < t_{20}$) bzw. $+2,5\text{ °C}$ ($t_9 > t_{20}$). Die maximal auftretenden Spannweiten, in der Regel bei hohen Temperaturen, betragen $-2,5\text{ °C}$ ($t_9 < t_{20}$) bzw. $+7,5\text{ °C}$ ($t_9 > t_{20}$). Um zu überprüfen, ob auch im Falle von extremalen Temperaturgradienten in der Asphalttragschicht die vereinfachte Annahme eines konstanten Temperaturgradienten zulässig ist, wurden analog zum ersten Schritt die E-Moduln dieser Gradienten berechnet. Hierzu wurde die Temperatur in 9 cm Tiefe der Temperatur in 5 cm gleichgesetzt und der extremale Temperaturgradient in der Asphalttragschicht berechnet, vgl. Abbildung 2 System 1. Anschließend erfolgte analog zum ersten Schritt die Berechnung der Deflexionsmulden am 15- und 4-Schichtensystem (Abbildung 2 System 2). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass trotz der vereinfachten Annahme eines konstanten E-Moduls für die Asphalttragschicht und trotz Temperaturgradienten mit maximaler Spannweite keine wesentlichen Fehler bei der Berechnung der Deflexionsmulden entstehen.

Da die Deflexionen im Lastzentrum der Deflexionsmulden bei jeweils gleicher Temperatur in 9 cm Tiefe maximal 12 µm (bei $t_9 = t_{20} = 30\text{ °C}$) voneinander abweichen, vgl. Abbildung 3, kann daraus gefolgert werden, dass ein über den gesamten Asphaltkörper konstanter Temperaturgradient als hinreichend genau angenommen werden kann, vgl. Abbildung 2 System 3.

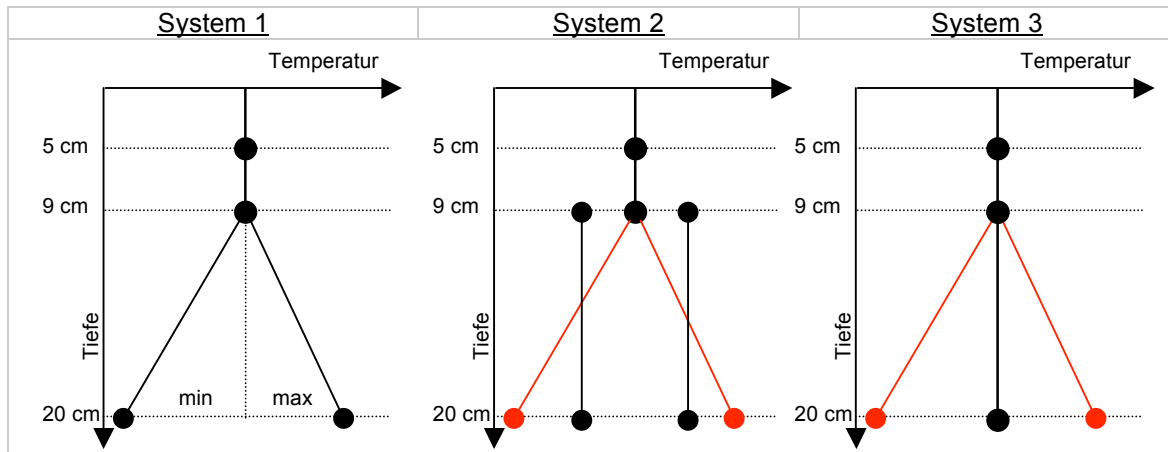


Abbildung 2

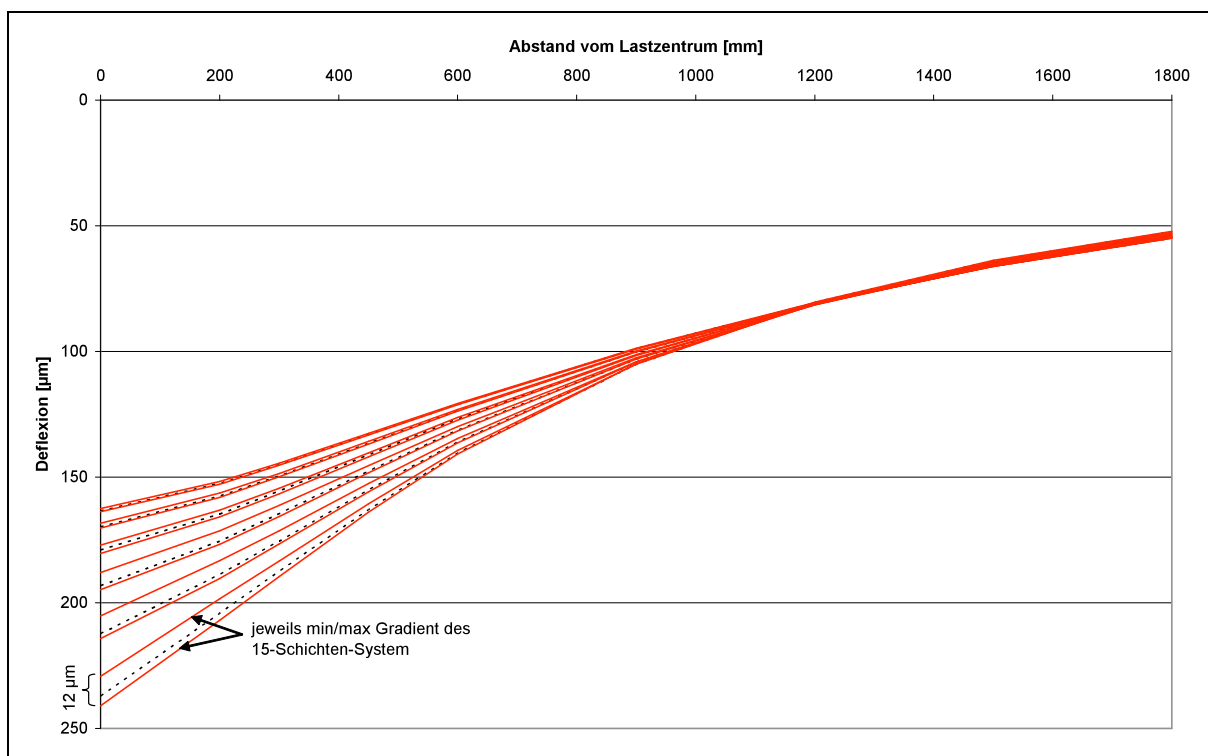


Abbildung 3 (rot = 15-Schichten-System / schwarz = 4-Schichten-System), vgl. Abbildung 2-System 3

Prozentualer Temperatureinfluss auf die Deflexionsmulden der Streckenmessungen

Ausgewertet wurde aus den FWD Deflexionsdaten, die an den 20 Streckenabschnitten (Streckenmessungen) gemessen worden sind, die jeweilige maximale und minimale Deflexion pro Messpunkt.

Daraus wurde die absolute Differenz berechnet und diese Differenz in Bezug zur Deflexion im Lastzentrum gesetzt. Als Ergebnis sind in den folgenden Tabellen die prozentualen Differenzen dargestellt, die zur Beurteilung des Temperatureinflusses dienen.

Farblich markiert sind die Differenzen, die größer als 10 % sind. Es wird davon ausgegangen, dass Differenzen bis zu 10 % i.d.R. auf temperaturunabhängige Einflüsse zurückzuführen sind (z.B. Wassergehalt der ungebundenen Schichten, Messungenauigkeit FWD, leichte Abweichungen bei der Positionierung während der Wiederholungsmessungen).

Geofonpositionen								
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm

Stationierung (Messpunkte) in [m]

Auswertung

Der Temperatureinfluss, hier dargestellt durch die prozentualen Differenzen >10 %, ist i.d.R. bis zu Geofonposition D5 erkennbar. An einzelnen Messpunkten sind auch Differenzen >10 % an den Geofonpositionen D6 bis D9 erkennbar. Diese Messpunkte sind jedoch bereits während der Messung und weiteren Auswertungen durch auffallend geringe Deflexionen, sehr flache Deflexionsmulden und Warnmeldungen bei der Messung durch das FWD-Messsystem aufgefallen. So wird beispielsweise am Streckenabschnitt I-1 vermutet, dass dort an wenigen Messpunkten eine Betontragschicht oder HGT vorhanden ist.

Bauklasse I

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
I-1	0	17%	13%	9%	8%	6%	7%	3%	8%	14%
I-1	25	28%	17%	12%	8%	7%	3%	4%	3%	4%
I-1	50	22%	14%	11%	8%	6%	7%	7%	4%	4%
I-1	225	38%	19%	16%	10%	6%	4%	3%	2%	1%
I-1	250	25%	14%	13%	12%	11%	10%	8%	7%	5%
I-1	275	40%	21%	18%	12%	7%	4%	4%	3%	1%
I-1	300	37%	17%	14%	13%	9%	10%	13%	8%	16%
I-1	325	31%	22%	18%	14%	10%	3%	3%	3%	3%
I-1	350	18%	17%	8%	10%	6%	8%	9%	7%	7%
I-1	375	28%	16%	10%	8%	6%	6%	3%	3%	4%
I-1	400	12%	18%	20%	23%	25%	24%	22%	18%	16%
I-1	425	32%	17%	12%	8%	4%	6%	3%	3%	11%
I-1	450	22%	14%	13%	16%	17%	16%	11%	7%	9%
I-1	475	38%	17%	13%	12%	11%	8%	11%	3%	8%
I-1	500	26%	9%	6%	4%	7%	8%	11%	18%	9%
I-1	525	37%	21%	13%	11%	5%	4%	3%	2%	2%
I-1	550	38%	25%	21%	14%	10%	9%	6%	3%	11%
I-1	575	37%	14%	9%	7%	7%	4%	12%	14%	15%
I-1	600	39%	26%	22%	17%	12%	5%	2%	2%	3%
I-2	0	23%	15%	13%	10%	7%	3%	4%	1%	2%
I-2	25	20%	17%	10%	11%	10%	6%	4%	5%	6%
I-2	50	24%	21%	19%	16%	13%	9%	6%	4%	2%
I-2	75	18%	16%	14%	9%	9%	12%	4%	5%	4%
I-2	175	20%	15%	12%	4%	1%	3%	1%	2%	3%
I-2	200	22%	21%	15%	9%	12%	12%	4%	4%	1%
I-2	225	25%	20%	17%	15%	8%	12%	5%	6%	4%
I-2	250	22%	21%	13%	12%	10%	3%	7%	4%	4%
I-2	275	24%	16%	19%	16%	16%	19%	8%	11%	9%
I-2	300	40%	32%	23%	20%	19%	15%	11%	6%	6%
I-2	325	32%	23%	20%	17%	12%	17%	5%	5%	3%
I-2	350	26%	25%	16%	14%	12%	11%	9%	1%	4%
I-2	375	27%	18%	18%	15%	13%	15%	5%	5%	5%
I-2	400	22%	24%	19%	13%	10%	7%	4%	4%	1%
I-2	425	23%	17%	14%	12%	10%	10%	4%	4%	1%
I-2	450	24%	20%	16%	12%	8%	6%	5%	1%	1%
I-2	475	20%	19%	12%	8%	9%	8%	4%	1%	3%
I-2	500	23%	21%	17%	14%	13%	9%	4%	5%	2%
I-2	525	19%	22%	14%	11%	8%	5%	2%	2%	2%
I-2	550	22%	17%	16%	14%	13%	8%	3%	1%	2%
I-2	575	22%	18%	15%	12%	10%	9%	5%	1%	2%
I-3	0	18%	13%	12%	9%	8%	4%	3%	1%	1%
I-3	25	24%	20%	15%	11%	8%	4%	2%	0%	1%
I-3	50	24%	18%	15%	12%	10%	6%	1%	2%	2%
I-3	75	20%	14%	11%	9%	7%	5%	4%	2%	4%
I-3	100	22%	14%	13%	11%	7%	5%	4%	1%	2%
I-3	125	24%	18%	14%	10%	7%	4%	4%	1%	1%
I-3	150	18%	15%	11%	9%	5%	4%	5%	3%	1%
I-3	175	29%	19%	13%	12%	6%	1%	3%	3%	2%
I-3	200	25%	16%	13%	8%	4%	3%	3%	3%	2%
I-3	225	28%	14%	12%	12%	8%	3%	4%	1%	5%
I-3	250	29%	23%	17%	14%	11%	6%	5%	3%	3%
I-3	275	30%	20%	13%	10%	6%	3%	2%	2%	2%
I-3	300	40%	26%	22%	16%	12%	7%	6%	3%	2%
I-3	325	28%	17%	14%	9%	6%	4%	4%	3%	2%
I-3	350	33%	23%	15%	13%	7%	5%	7%	2%	2%
I-3	375	33%	22%	16%	11%	8%	3%	6%	4%	4%
I-3	400	33%	17%	11%	9%	6%	2%	5%	3%	4%
I-3	425	23%	24%	16%	9%	4%	7%	3%	3%	3%
I-3	450	31%	23%	17%	12%	8%	5%	6%	2%	3%
I-3	475	27%	23%	16%	12%	8%	10%	8%	1%	2%
I-3	500	15%	14%	9%	6%	5%	5%	5%	5%	5%

} *

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
I-4	0	20%	24%	11%	8%	2%	6%	6%	1%	8%
I-4	25	21%	19%	12%	14%	8%	2%	3%	1%	1%
I-4	50	17%	15%	14%	8%	7%	3%	2%	1%	1%
I-4	75	20%	19%	14%	9%	3%	4%	2%	0%	2%
I-4	100	19%	13%	11%	6%	7%	1%	2%	1%	2%
I-4	125	23%	15%	14%	10%	9%	5%	3%	1%	2%
I-4	150	18%	14%	16%	13%	7%	6%	5%	1%	1%
I-4	175	19%	19%	13%	9%	9%	6%	4%	1%	1%
I-4	200	22%	20%	12%	16%	5%	11%	4%	4%	3%
I-4	225	17%	16%	16%	9%	9%	7%	2%	0%	1%
I-4	250	24%	19%	16%	12%	11%	7%	5%	1%	0%
I-4	275	22%	20%	14%	13%	11%	8%	6%	3%	1%
I-4	300	23%	25%	21%	13%	13%	7%	5%	5%	4%
I-4	325	20%	16%	15%	15%	12%	5%	2%	2%	3%
I-4	350	24%	25%	20%	16%	14%	11%	8%	4%	2%
I-4	375	19%	14%	11%	11%	7%	2%	3%	0%	0%
I-4	400	21%	15%	13%	10%	7%	4%	3%	0%	2%
I-4	425	16%	12%	15%	9%	6%	1%	2%	2%	0%
I-4	450	18%	18%	18%	13%	11%	6%	4%	0%	3%
I-4	475	16%	15%	8%	9%	2%	1%	1%	0%	1%
I-4	500	20%	15%	12%	8%	7%	3%	4%	0%	1%
I-5	0	45%	27%	21%	18%	16%	12%	8%	6%	6%
I-5	25	32%	18%	15%	13%	10%	11%	8%	7%	7%
I-5	50	33%	18%	14%	12%	10%	8%	6%	7%	6%
I-5	75	35%	29%	18%	15%	8%	4%	2%	2%	2%
I-5	100	45%	32%	21%	16%	9%	4%	3%	2%	4%
I-5	125	47%	28%	22%	15%	10%	6%	3%	2%	3%
I-5	150	45%	30%	22%	17%	12%	6%	4%	2%	2%
I-5	175	38%	25%	20%	14%	10%	7%	4%	4%	2%
I-5	200	40%	28%	20%	18%	10%	7%	5%	5%	4%
I-5	225	46%	22%	21%	18%	11%	9%	4%	5%	4%
I-5	250	45%	28%	20%	12%	9%	6%	5%	5%	5%
I-5	275	39%	24%	28%	20%	11%	18%	7%	5%	4%
I-5	300	45%	28%	19%	16%	9%	7%	4%	3%	7%
I-5	325	41%	29%	22%	19%	7%	5%	2%	4%	4%
I-5	350	52%	33%	25%	20%	15%	5%	6%	2%	2%
I-5	375	52%	32%	23%	17%	10%	7%	1%	2%	2%
I-5	400	46%	32%	26%	19%	13%	5%	2%	2%	3%
I-5	425	48%	41%	34%	26%	20%	13%	7%	7%	6%
I-5	450	49%	33%	31%	23%	20%	12%	6%	4%	2%
I-5	475	44%	30%	27%	20%	16%	14%	6%	6%	5%
I-5	500	43%	30%	26%	19%	12%	9%	5%	5%	4%
I-6	0	33%	21%	16%	9%	4%	3%	1%	1%	2%
I-6	25	34%	21%	17%	10%	6%	3%	4%	2%	1%
I-6	50	35%	21%	13%	10%	5%	2%	2%	1%	2%
I-6	75	32%	26%	15%	12%	5%	5%	3%	1%	5%
I-6	100	31%	21%	16%	11%	7%	2%	3%	1%	3%
I-6	125	35%	27%	18%	13%	8%	4%	1%	2%	2%
I-6	150	36%	24%	17%	13%	9%	7%	5%	2%	2%
I-6	175	34%	23%	18%	13%	9%	6%	4%	5%	5%
I-6	200	39%	20%	15%	14%	8%	3%	1%	1%	2%
I-6	225	33%	25%	20%	7%	4%	3%	2%	1%	4%
I-6	250	33%	19%	22%	16%	10%	4%	3%	7%	4%
I-6	275	43%	27%	19%	19%	17%	11%	6%	7%	7%
I-6	300	38%	23%	18%	15%	8%	8%	7%	8%	7%
I-6	325	34%	24%	19%	15%	9%	4%	8%	9%	6%
I-6	350	34%	24%	15%	17%	10%	6%	5%	6%	6%
I-6	375	39%	21%	15%	11%	9%	4%	7%	1%	13%
I-6	400	34%	22%	15%	9%	7%	4%	2%	1%	2%
I-6	425	37%	30%	25%	17%	9%	2%	2%	1%	2%
I-6	450	33%	22%	16%	12%	8%	3%	3%	2%	2%
I-6	475	37%	19%	15%	13%	11%	7%	6%	4%	7%
I-6	500	28%	19%	16%	17%	9%	8%	5%	3%	5%

} *

* evtl. Betontragschicht oder HGT vorhanden (sehr flache Deflexionsmulden und kleine Deflexionen), siehe oben

Bauklasse II

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
II-1	0	39%	34%	27%	24%	18%	11%	5%	4%	3%
II-1	25	39%	34%	29%	25%	18%	12%	6%	3%	2%
II-1	50	40%	36%	30%	24%	17%	11%	6%	3%	2%
II-1	75	36%	31%	25%	20%	15%	8%	6%	5%	2%
II-1	100	34%	30%	20%	21%	14%	11%	6%	5%	6%
II-1	125	40%	33%	26%	20%	15%	9%	2%	2%	2%
II-1	150	41%	32%	25%	21%	14%	9%	3%	3%	3%
II-1	175	44%	36%	30%	22%	18%	4%	2%	1%	1%
II-1	200	33%	28%	22%	19%	12%	7%	3%	4%	2%
II-1	225	37%	30%	24%	18%	12%	3%	4%	4%	3%
II-1	250	36%	29%	22%	14%	8%	3%	5%	5%	3%
II-1	275	15%	14%	11%	9%	11%	10%	11%	8%	5%
II-1	300	41%	31%	23%	17%	12%	5%	4%	5%	4%
II-1	325	37%	31%	25%	20%	11%	2%	4%	4%	4%
II-1	350	44%	34%	29%	22%	15%	6%	3%	3%	3%
II-1	375	41%	34%	29%	21%	14%	7%	2%	2%	3%
II-1	400	45%	35%	29%	23%	17%	9%	3%	1%	2%
II-1	425	43%	36%	31%	24%	18%	9%	4%	1%	2%
II-1	450	42%	34%	28%	21%	16%	9%	4%	3%	3%
II-1	475	41%	37%	30%	24%	18%	10%	5%	2%	2%
II-1	500	44%	35%	32%	25%	19%	10%	5%	3%	2%
II-2	0	33%	29%	25%	22%	17%	12%	8%	4%	3%
II-2	25	33%	27%	22%	18%	13%	10%	6%	4%	4%
II-2	50	26%	27%	19%	18%	13%	10%	7%	6%	4%
II-2	75	43%	37%	31%	25%	18%	9%	4%	1%	2%
II-2	100	35%	30%	26%	20%	14%	7%	3%	2%	3%
II-2	125	32%	30%	26%	21%	17%	8%	3%	2%	5%
II-2	150	33%	29%	23%	18%	10%	4%	1%	4%	4%
II-2	175	18%	14%	11%	8%	5%	3%	3%	4%	4%
II-2	200	38%	33%	28%	22%	14%	5%	1%	3%	4%
II-2	225	45%	37%	30%	23%	16%	7%	2%	3%	2%
II-2	250	36%	29%	26%	20%	13%	5%	4%	5%	5%
II-2	275	43%	38%	31%	26%	17%	8%	2%	3%	4%
II-2	300	41%	36%	31%	25%	17%	7%	2%	3%	5%
II-2	325	38%	34%	28%	23%	14%	5%	1%	3%	4%
II-2	350	27%	23%	15%	11%	6%	2%	3%	3%	3%
II-2	375	30%	27%	20%	16%	10%	4%	2%	3%	3%
II-2	400	39%	34%	28%	23%	16%	9%	3%	3%	4%
II-2	425	49%	38%	31%	23%	14%	4%	1%	2%	2%
II-2	450	44%	38%	32%	28%	21%	12%	7%	5%	3%
II-2	475	48%	39%	33%	27%	21%	13%	7%	5%	3%
II-2	500	44%	36%	29%	24%	18%	10%	4%	3%	1%
II-3	0	19%	17%	14%	12%	7%	4%	2%	2%	1%
II-3	25	24%	20%	17%	14%	11%	5%	5%	3%	1%
II-3	50	18%	16%	14%	13%	8%	5%	4%	3%	2%
II-3	75	22%	19%	15%	13%	11%	8%	4%	2%	2%
II-3	100	26%	23%	20%	16%	13%	8%	5%	3%	1%
II-3	125	25%	23%	18%	16%	11%	9%	6%	6%	2%
II-3	150	24%	18%	16%	12%	9%	6%	2%	3%	2%
II-3	175	22%	18%	14%	13%	12%	6%	2%	5%	2%
II-3	200	23%	21%	18%	14%	10%	6%	3%	2%	2%
II-3	225	21%	18%	13%	11%	9%	6%	4%	3%	1%
II-3	250	26%	24%	17%	14%	10%	9%	6%	5%	3%
II-3	275	21%	19%	15%	12%	10%	6%	3%	3%	2%
II-3	300	22%	18%	16%	12%	9%	5%	4%	3%	3%
II-3	325	23%	21%	18%	14%	12%	7%	4%	4%	3%
II-3	350	25%	22%	18%	14%	11%	8%	5%	4%	1%
II-3	375	21%	19%	16%	15%	11%	7%	4%	3%	2%
II-3	400	15%	12%	11%	8%	6%	3%	2%	2%	1%
II-3	425	20%	19%	14%	10%	6%	6%	3%	2%	2%
II-3	450	18%	14%	10%	8%	5%	3%	1%	3%	2%
II-3	475	24%	20%	17%	14%	10%	4%	3%	3%	2%
II-3	500	23%	22%	17%	12%	11%	8%	3%	7%	1%

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
II-4	0	20%	13%	8%	5%	4%	6%	3%	2%	3%
II-4	25	29%	25%	19%	14%	10%	4%	1%	1%	1%
II-4	50	29%	22%	19%	13%	8%	5%	2%	2%	2%
II-4	75	29%	27%	22%	20%	15%	9%	4%	2%	1%
II-4	100	30%	23%	21%	15%	10%	5%	2%	3%	2%
II-4	125	27%	22%	16%	13%	9%	7%	5%	4%	4%
II-4	150	31%	24%	19%	14%	9%	4%	3%	2%	2%
II-4	175	32%	25%	19%	13%	8%	4%	2%	2%	3%
II-4	200	32%	27%	23%	19%	15%	7%	3%	1%	1%
II-4	225	35%	29%	24%	18%	12%	7%	2%	3%	1%
II-4	250	26%	23%	19%	13%	9%	5%	1%	1%	3%
II-4	275	32%	26%	20%	15%	10%	4%	1%	2%	1%
II-4	300	25%	19%	15%	12%	9%	5%	3%	2%	2%
II-4	325	19%	7%	4%	2%	4%	3%	2%	2%	3%
II-4	350	30%	24%	19%	13%	8%	6%	3%	2%	2%
II-4	375	30%	20%	14%	8%	6%	3%	3%	2%	2%
II-4	400	24%	18%	13%	10%	8%	5%	2%	2%	1%
II-4	425	21%	14%	8%	5%	2%	3%	5%	6%	4%
II-4	450	26%	19%	15%	10%	9%	6%	6%	5%	4%
II-4	475	22%	18%	13%	9%	5%	2%	4%	5%	3%
II-4	500	23%	19%	15%	11%	7%	2%	2%	2%	1%
II-5	0	18%	12%	9%	4%	3%	4%	4%	3%	2%
II-5	25	27%	21%	16%	10%	7%	4%	3%	3%	3%
II-5	50	26%	20%	15%	9%	6%	4%	3%	3%	4%
II-5	75	28%	21%	17%	13%	8%	4%	1%	2%	3%
II-5	100	23%	18%	13%	8%	6%	3%	2%	2%	2%
II-5	125	16%	12%	9%	7%	6%	7%	4%	3%	4%
II-5	150	11%	10%	7%	8%	9%	6%	4%	4%	2%
II-5	175	31%	23%	15%	8%	4%	4%	2%	2%	3%
II-5	200	29%	23%	19%	12%	8%	3%	2%	1%	1%
II-5	225	30%	20%	16%	11%	6%	3%	2%	2%	2%
II-5	250	29%	21%	17%	14%	9%	5%	3%	2%	2%
II-5	275	23%	16%	13%	9%	5%	4%	1%	2%	3%
II-5	300	25%	21%	15%	12%	7%	4%	1%	0%	1%
II-5	325	28%	22%	17%	14%	8%	3%	2%	1%	1%
II-5	350	34%	23%	19%	12%	8%	3%	2%	1%	1%
II-5	375	32%	24%	19%	14%	8%	3%	2%	1%	1%
II-5	400	36%	26%	21%	15%	11%	4%	1%	0%	1%
II-5	425	35%	30%	25%	19%	13%	6%	2%	1%	0%
II-5	450	20%	16%	9%	5%	1%	2%	3%	1%	1%
II-5	475	18%	12%	7%	5%	4%	2%	1%	1%	1%
II-5	500	35%	26%	20%	13%	9%	3%	3%	2%	2%

Bauklasse III

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
III-1	0	23%	17%	11%	6%	4%	5%	7%	5%	4%
III-1	25	18%	13%	15%	9%	7%	7%	6%	7%	4%
III-1	50	25%	22%	17%	12%	10%	7%	5%	5%	5%
III-1	75	17%	15%	8%	5%	4%	7%	7%	6%	5%
III-1	100	10%	9%	8%	6%	5%	7%	6%	5%	2%
III-1	125	34%	26%	17%	10%	6%	6%	5%	4%	3%
III-1	150	27%	20%	14%	9%	7%	7%	6%	5%	4%
III-1	175	11%	9%	5%	4%	8%	10%	7%	7%	4%
III-1	200	25%	19%	13%	9%	7%	6%	6%	7%	4%
III-1	225	34%	27%	21%	15%	9%	7%	6%	5%	3%
III-1	250	24%	15%	6%	5%	6%	6%	5%	5%	3%
III-1	275	26%	18%	10%	7%	8%	7%	6%	6%	3%
III-1	300	24%	16%	10%	5%	4%	5%	4%	4%	3%
III-1	325	32%	23%	15%	11%	6%	7%	6%	4%	3%
III-1	350	30%	23%	15%	10%	8%	7%	4%	4%	2%
III-1	375	33%	21%	15%	8%	6%	4%	4%	3%	3%
III-1	400	31%	21%	14%	9%	6%	5%	4%	4%	2%
III-1	425	31%	19%	15%	9%	6%	5%	4%	3%	2%
III-1	450	11%	12%	7%	3%	5%	6%	7%	5%	4%
III-1	475	31%	19%	13%	8%	5%	5%	4%	4%	2%
III-1	500	26%	20%	15%	9%	5%	7%	5%	4%	3%
III-2	0	56%	42%	39%	30%	22%	10%	6%	4%	3%
III-2	25	43%	31%	27%	20%	13%	6%	6%	4%	2%
III-2	50	41%	31%	23%	17%	10%	6%	8%	6%	4%
III-2	75	39%	26%	20%	14%	9%	9%	6%	5%	3%
III-2	100	49%	33%	31%	21%	15%	10%	7%	4%	2%
III-2	125	46%	32%	31%	23%	18%	11%	10%	6%	3%
III-2	150	48%	31%	28%	20%	15%	9%	7%	5%	3%
III-2	175	45%	29%	25%	16%	10%	7%	7%	4%	3%
III-2	200	43%	32%	28%	20%	15%	8%	6%	4%	2%
III-2	225	49%	35%	31%	23%	16%	9%	6%	4%	2%
III-2	250	42%	27%	24%	15%	10%	5%	5%	3%	2%
III-2	275	43%	31%	25%	18%	10%	5%	4%	4%	4%
III-2	300	45%	29%	24%	17%	10%	6%	5%	4%	3%
III-2	325	44%	30%	23%	17%	10%	5%	6%	5%	3%
III-2	350	42%	28%	23%	15%	10%	3%	3%	3%	3%
III-2	375	44%	33%	27%	19%	11%	5%	5%	3%	3%
III-2	400	45%	25%	20%	13%	9%	6%	4%	4%	2%
III-2	425	53%	38%	33%	24%	17%	7%	6%	4%	3%
III-2	450	41%	31%	24%	16%	8%	5%	5%	4%	3%
III-2	475	52%	34%	28%	21%	15%	11%	9%	6%	3%
III-2	476	25%	13%	6%	2%	3%	5%	7%	3%	3%
III-2	500	45%	29%	26%	20%	14%	9%	7%	6%	3%
III-3	0	15%	10%	7%	8%	7%	5%	6%	3%	3%
III-3	25	10%	7%	3%	5%	2%	5%	3%	1%	2%
III-3	50	16%	11%	7%	4%	3%	2%	0%	0%	1%
III-3	75	21%	15%	11%	8%	5%	3%	4%	3%	2%
III-3	100	12%	11%	8%	6%	5%	5%	5%	4%	3%
III-3	125	15%	12%	6%	6%	3%	3%	4%	2%	1%
III-3	150	29%	10%	9%	8%	7%	9%	9%	4%	1%
III-3	175	18%	13%	10%	7%	6%	5%	5%	2%	3%
III-3	200	12%	18%	9%	6%	3%	5%	3%	3%	4%
III-3	225	14%	13%	7%	5%	2%	4%	2%	0%	2%
III-3	250	18%	15%	12%	8%	4%	8%	3%	2%	3%
III-3	275	14%	11%	9%	8%	7%	7%	5%	4%	4%
III-3	300	19%	10%	5%	5%	4%	6%	3%	2%	6%
III-3	325	20%	11%	8%	6%	5%	9%	5%	3%	5%
III-3	350	4%	2%	4%	3%	1%	3%	2%	2%	2%
III-3	375	18%	13%	5%	4%	5%	5%	6%	4%	3%
III-3	400	18%	16%	7%	6%	5%	8%	7%	9%	11%
III-3	425	13%	7%	6%	5%	1%	6%	5%	5%	6%
III-3	450	19%	15%	7%	7%	4%	6%	5%	3%	3%
III-3	475	21%	23%	14%	10%	8%	5%	9%	8%	5%
III-3	500	21%	21%	14%	12%	9%	8%	10%	8%	5%

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
III-4	0	20%	17%	16%	14%	8%	13%	10%	7%	6%
III-4	25	27%	16%	10%	10%	9%	6%	4%	4%	4%
III-4	50	23%	18%	12%	9%	6%	6%	2%	3%	5%
III-4	75	28%	20%	14%	10%	9%	7%	6%	4%	3%
III-4	100	16%	18%	9%	9%	7%	12%	9%	8%	9%
III-4	125	26%	30%	13%	8%	5%	23%	8%	8%	10%
III-4	150	23%	19%	13%	8%	7%	8%	7%	12%	10%
III-4	175	27%	16%	10%	12%	8%	9%	7%	5%	7%
III-4	200	22%	14%	10%	9%	13%	10%	11%	9%	13%
III-4	225	21%	12%	10%	11%	11%	12%	11%	9%	8%
III-4	250	24%	23%	13%	14%	7%	15%	9%	8%	5%
III-4	275	24%	11%	7%	8%	6%	7%	4%	4%	4%
III-4	300	14%	14%	8%	3%	5%	8%	7%	4%	4%
III-4	325	18%	10%	6%	7%	5%	9%	8%	5%	8%
III-4	350	30%	24%	16%	13%	8%	8%	2%	3%	5%
III-4	375	20%	20%	15%	11%	8%	4%	4%	4%	5%
III-4	400	45%	37%	29%	15%	15%	11%	6%	3%	5%
III-4	425	17%	20%	11%	11%	3%	3%	5%	3%	7%
III-4	450	38%	22%	15%	9%	7%	7%	4%	3%	4%
III-4	475	29%	21%	17%	8%	4%	9%	7%	4%	6%
III-4	500	34%	29%	23%	17%	12%	4%	3%	3%	3%
III-5	0	23%	16%	9%	8%	6%	5%	8%	3%	6%
III-5	25	15%	11%	7%	6%	3%	2%	4%	2%	1%
III-5	50	18%	13%	4%	6%	2%	4%	3%	2%	2%
III-5	75	20%	14%	9%	7%	6%	5%	4%	2%	3%
III-5	100	23%	11%	8%	6%	3%	3%	3%	2%	1%
III-5	125	14%	9%	7%	6%	5%	7%	4%	3%	2%
III-5	150	28%	13%	7%	5%	4%	6%	5%	4%	3%
III-5	175	22%	13%	10%	6%	3%	4%	4%	3%	3%
III-5	200	19%	14%	8%	6%	6%	4%	5%	6%	3%
III-5	225	15%	19%	4%	6%	2%	6%	5%	1%	4%
III-5	250	24%	19%	16%	12%	6%	3%	2%	2%	3%
III-5	275	35%	19%	11%	6%	4%	4%	2%	1%	2%
III-5	300	24%	23%	12%	10%	7%	5%	5%	2%	1%
III-5	325	35%	17%	10%	6%	5%	4%	2%	2%	3%
III-5	350	20%	14%	9%	8%	6%	7%	8%	4%	3%
III-5	375	15%	12%	6%	4%	1%	3%	6%	3%	1%
III-5	400	16%	18%	5%	7%	6%	18%	9%	7%	6%
III-5	425	21%	11%	6%	5%	8%	8%	6%	3%	4%
III-5	450	14%	10%	4%	3%	6%	6%	4%	5%	2%
III-5	475	26%	11%	6%	6%	7%	9%	5%	4%	3%
III-5	500	13%	11%	8%	6%	5%	5%	6%	7%	3%

Bauklasse IV

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
IV-1	0	25%	22%	18%	17%	13%	5%	5%	4%	3%
IV-1	25	28%	21%	16%	11%	7%	4%	2%	2%	2%
IV-1	50	29%	26%	20%	15%	10%	7%	5%	6%	4%
IV-1	75	25%	23%	17%	13%	8%	4%	3%	3%	3%
IV-1	100	26%	21%	14%	9%	5%	2%	2%	2%	2%
IV-1	125	26%	22%	17%	11%	7%	6%	2%	2%	1%
IV-1	150	24%	21%	16%	12%	9%	5%	3%	3%	1%
IV-1	175	22%	17%	14%	11%	7%	3%	2%	2%	1%
IV-1	200	20%	15%	11%	6%	3%	4%	3%	2%	1%
IV-1	225	19%	16%	13%	8%	7%	4%	4%	3%	3%
IV-1	250	22%	18%	12%	9%	7%	5%	5%	3%	1%
IV-1	275	23%	18%	16%	12%	9%	6%	4%	4%	3%
IV-1	300	26%	17%	13%	9%	6%	6%	5%	4%	3%
IV-1	325	16%	10%	10%	9%	7%	5%	6%	3%	5%
IV-1	350	48%	40%	36%	29%	23%	12%	5%	3%	1%
IV-1	375	18%	11%	7%	6%	6%	6%	5%	3%	3%
IV-1	400	19%	12%	7%	6%	5%	4%	3%	3%	4%
IV-1	425	23%	17%	13%	11%	9%	7%	6%	5%	4%
IV-1	450	25%	18%	12%	8%	6%	2%	3%	3%	2%
IV-1	475	30%	30%	25%	21%	15%	9%	6%	2%	3%
IV-1	500	44%	37%	30%	23%	17%	8%	4%	3%	2%
IV-2	0	25%	13%	12%	4%	3%	2%	1%	2%	2%
IV-2	25	7%	7%	3%	5%	6%	6%	4%	4%	1%
IV-2	50	3%	5%	4%	6%	5%	5%	3%	2%	1%
IV-2	75	15%	8%	5%	3%	5%	3%	1%	1%	1%
IV-2	100	35%	25%	16%	8%	5%	3%	2%	1%	0%
IV-2	125	29%	15%	7%	5%	5%	4%	2%	2%	1%
IV-2	150	12%	10%	7%	8%	8%	6%	3%	3%	2%
IV-2	175	19%	16%	10%	8%	7%	6%	3%	2%	1%
IV-2	200	26%	21%	15%	9%	6%	5%	3%	3%	2%
IV-2	225	19%	12%	7%	6%	6%	5%	3%	2%	2%
IV-2	250	7%	8%	10%	9%	9%	8%	4%	3%	2%
IV-2	275	12%	12%	10%	10%	9%	7%	5%	3%	3%
IV-2	300	13%	9%	7%	6%	5%	5%	3%	2%	2%
IV-2	325	4%	3%	4%	6%	6%	5%	4%	2%	1%
IV-2	350	10%	7%	5%	5%	6%	5%	3%	3%	2%
IV-2	375	13%	6%	7%	8%	9%	7%	4%	3%	2%
IV-2	400	17%	10%	10%	10%	9%	7%	3%	2%	1%
IV-2	425	12%	10%	11%	11%	10%	5%	2%	1%	1%
IV-2	450	11%	9%	4%	5%	6%	6%	3%	4%	2%
IV-2	475	21%	15%	8%	5%	5%	4%	3%	2%	2%
IV-2	500	29%	21%	14%	7%	5%	4%	3%	2%	2%
IV-3	0	31%	23%	17%	9%	6%	4%	2%	2%	3%
IV-3	25	11%	8%	4%	6%	8%	6%	4%	3%	3%
IV-3	50	27%	20%	20%	13%	12%	9%	4%	5%	3%
IV-3	75	24%	15%	15%	13%	12%	8%	4%	3%	3%
IV-3	100	24%	19%	10%	6%	7%	5%	3%	2%	3%
IV-3	125	26%	20%	13%	8%	8%	6%	3%	3%	3%
IV-3	150	21%	15%	9%	9%	8%	7%	3%	3%	2%
IV-3	175	7%	6%	4%	5%	8%	7%	4%	4%	4%
IV-3	200	29%	23%	21%	13%	11%	9%	6%	6%	5%
IV-3	225	18%	15%	12%	11%	8%	8%	4%	4%	4%
IV-3	250	8%	10%	7%	9%	11%	11%	9%	7%	5%
IV-3	275	31%	24%	18%	13%	10%	8%	5%	5%	3%
IV-3	300	34%	27%	19%	11%	8%	7%	4%	4%	1%
IV-3	325	20%	14%	9%	6%	7%	6%	4%	3%	2%
IV-3	350	39%	25%	14%	5%	6%	4%	2%	2%	1%
IV-3	375	31%	26%	20%	15%	12%	10%	8%	6%	5%
IV-3	400	37%	32%	26%	18%	13%	8%	4%	3%	4%
IV-3	425	15%	14%	14%	12%	11%	8%	4%	4%	3%
IV-3	450	22%	19%	14%	14%	14%	13%	7%	6%	5%
IV-3	475	26%	19%	18%	18%	17%	13%	8%	6%	5%
IV-3	500	23%	17%	13%	13%	13%	10%	6%	5%	4%

ID	Station	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
IV-4	0	35%	30%	26%	20%	15%	10%	5%	4%	3%
IV-4	25	23%	18%	15%	12%	10%	7%	3%	2%	1%
IV-4	50	18%	15%	12%	9%	9%	6%	3%	3%	2%
IV-4	75	33%	27%	23%	17%	16%	10%	5%	3%	2%
IV-4	100	26%	21%	18%	14%	12%	9%	6%	4%	2%
IV-4	125	12%	12%	8%	3%	5%	5%	4%	2%	1%
IV-4	150	17%	12%	8%	6%	6%	5%	3%	2%	1%
IV-4	175	22%	15%	11%	6%	6%	5%	3%	2%	1%
IV-4	200	21%	14%	9%	8%	7%	6%	2%	1%	1%
IV-4	225	10%	4%	4%	9%	10%	8%	4%	2%	1%
IV-4	250	30%	22%	15%	7%	2%	2%	2%	1%	0%
IV-4	275	16%	13%	8%	5%	3%	3%	2%	1%	1%
IV-4	300	23%	18%	12%	6%	2%	0%	2%	1%	2%
IV-4	325	29%	22%	15%	9%	5%	3%	2%	1%	1%
IV-4	350	20%	18%	12%	7%	3%	2%	2%	2%	1%
IV-4	375	21%	16%	10%	4%	2%	2%	2%	2%	2%
IV-4	400	18%	14%	9%	3%	2%	3%	2%	2%	1%
IV-4	425	17%	12%	7%	3%	3%	3%	3%	1%	1%
IV-4	450	21%	16%	9%	6%	4%	3%	3%	3%	2%
IV-4	475	5%	5%	8%	8%	8%	6%	5%	3%	2%
IV-4	500	22%	14%	10%	8%	8%	6%	5%	3%	3%
IV-5	0	19%	13%	8%	6%	6%	5%	3%	2%	2%
IV-5	25	14%	10%	7%	7%	8%	6%	4%	3%	3%
IV-5	50	19%	10%	4%	4%	5%	5%	3%	2%	1%
IV-5	75	25%	17%	10%	5%	4%	4%	3%	2%	2%
IV-5	100	30%	22%	15%	12%	9%	6%	4%	3%	2%
IV-5	125	7%	4%	2%	3%	5%	7%	3%	4%	2%
IV-5	150	21%	16%	12%	9%	7%	5%	4%	3%	3%
IV-5	175	12%	9%	7%	5%	6%	4%	2%	4%	4%
IV-5	200	12%	12%	10%	9%	9%	6%	3%	3%	3%
IV-5	225	19%	15%	11%	9%	9%	7%	4%	3%	2%
IV-5	250	19%	16%	12%	10%	6%	5%	3%	2%	2%
IV-5	275	20%	13%	7%	4%	3%	5%	2%	2%	1%
IV-5	300	16%	13%	6%	5%	6%	4%	3%	2%	2%
IV-5	325	13%	6%	2%	9%	9%	5%	4%	3%	1%
IV-5	350	7%	5%	7%	9%	10%	6%	3%	2%	1%
IV-5	375	23%	17%	12%	8%	6%	5%	3%	5%	3%
IV-5	400	30%	24%	20%	14%	9%	6%	5%	4%	4%
IV-5	425	3%	4%	4%	5%	7%	7%	4%	4%	3%
IV-5	450	11%	10%	8%	10%	9%	8%	4%	3%	1%
IV-5	475	26%	20%	14%	8%	6%	5%	3%	3%	2%
IV-5	500	30%	21%	12%	3%	4%	5%	4%	3%	1%

Gemessene und auf 20 °C korrigierte Deflexionen an den Temperaturmessstationen Heek und Menden

Dargestellt sind die gemessenen und korrigierten Deflexionen an den folgenden Geofonpositionen:

Bezeichnung	D1	D2	D3	D4	D5
Geofonposition	0 mm	200 mm	300 mm	450 mm	600 mm

Anmerkung

Bei der Messung an der Station Menden im Temperaturbereich 19,5 bis 29,5 °C ist die Temperaturmessstation ausgefallen. Die zu diesen Zeitpunkten gemessenen Deflexionen sind in den folgenden Abbildungen kenntlich gemacht (gestrichelter Rahmen). Die zugehörigen Temperaturen wurden zwischen den Ausfallzeitpunkten (siehe Abbildung 1 – links) der Temperaturmessstation interpoliert. Da der Himmel am Messtag konstant bedeckt (diesige Wetterlage) war und aufgrund der zeitgleich an der Temperaturmessstation in Heek gemessenen Temperaturen (siehe Abbildung 1 – rechts), wird hier Interpolation der Temperaturen für zulässig befunden.

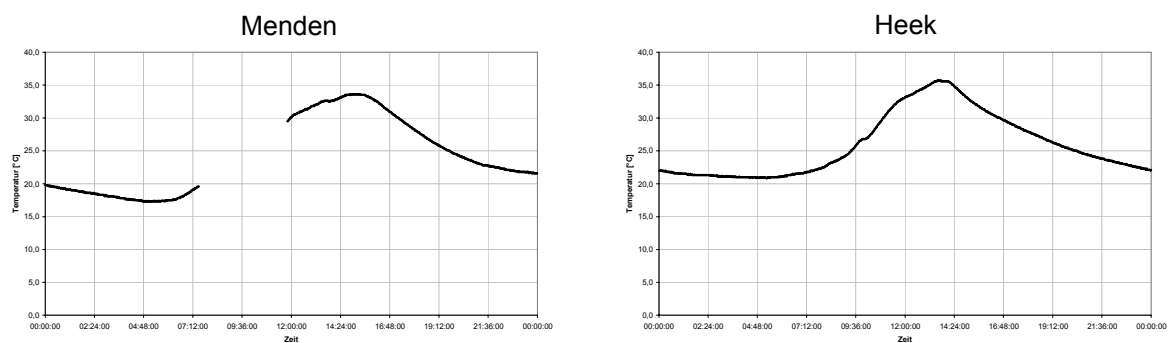
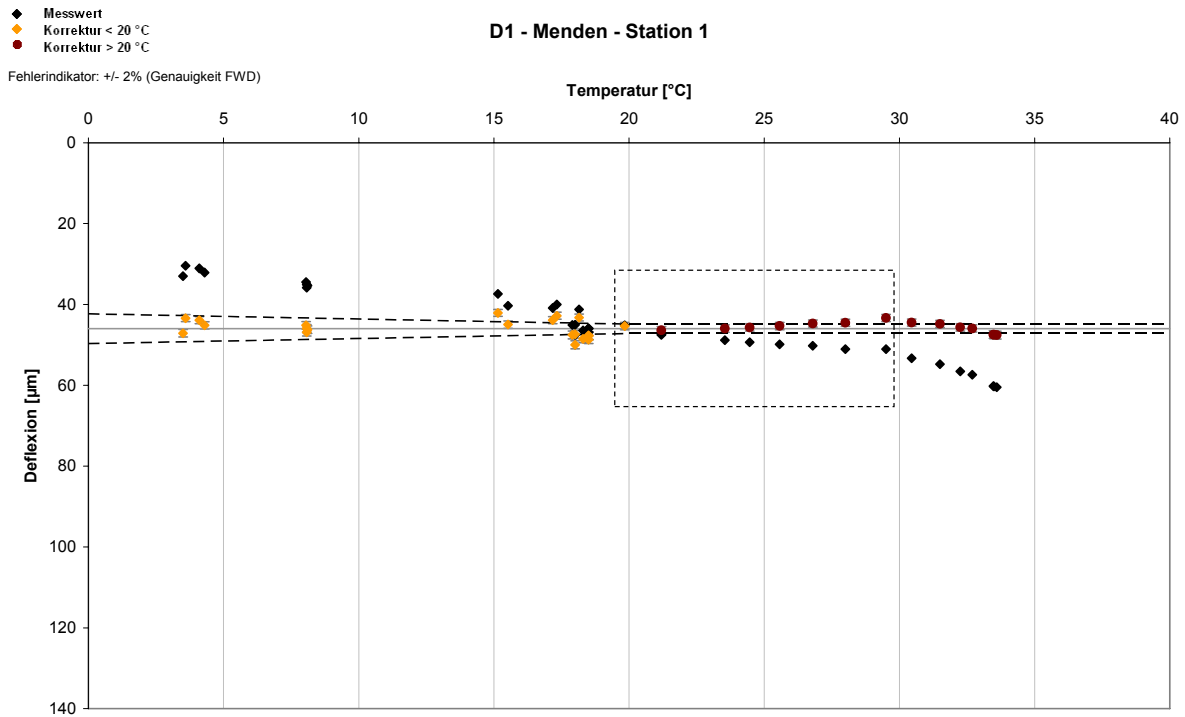
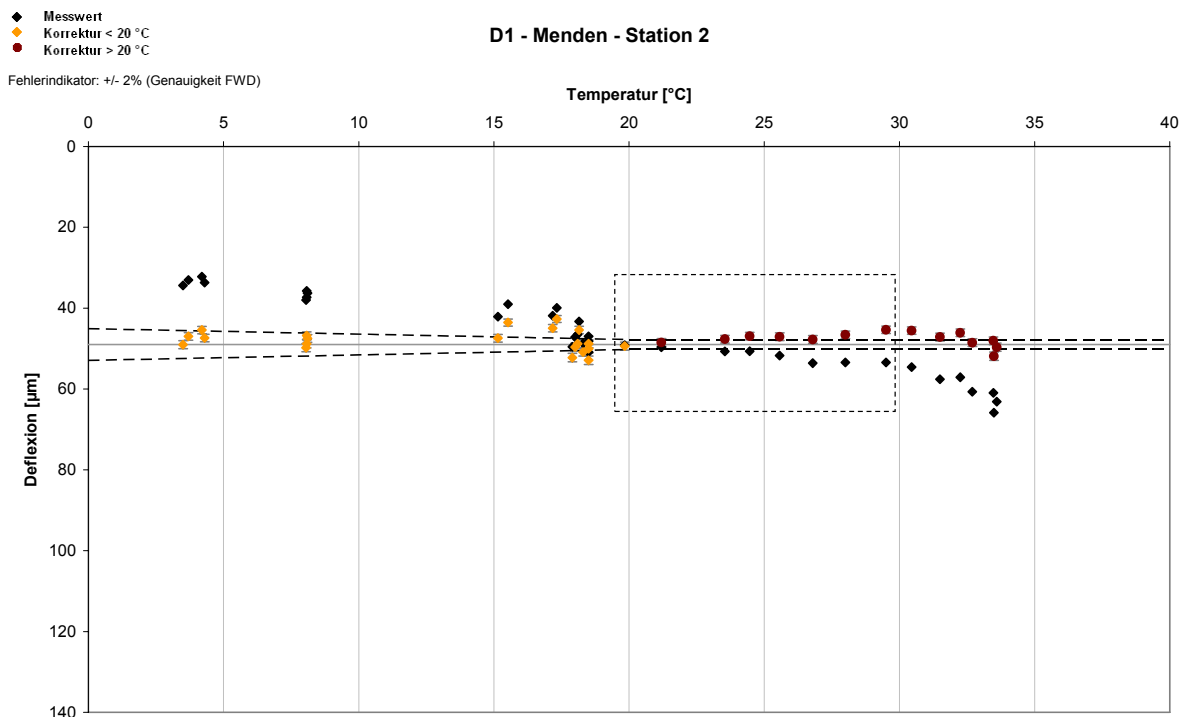


Abbildung 1: Temperaturganglinien in 5 cm Tiefe am 25.08.2008

Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm



Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm

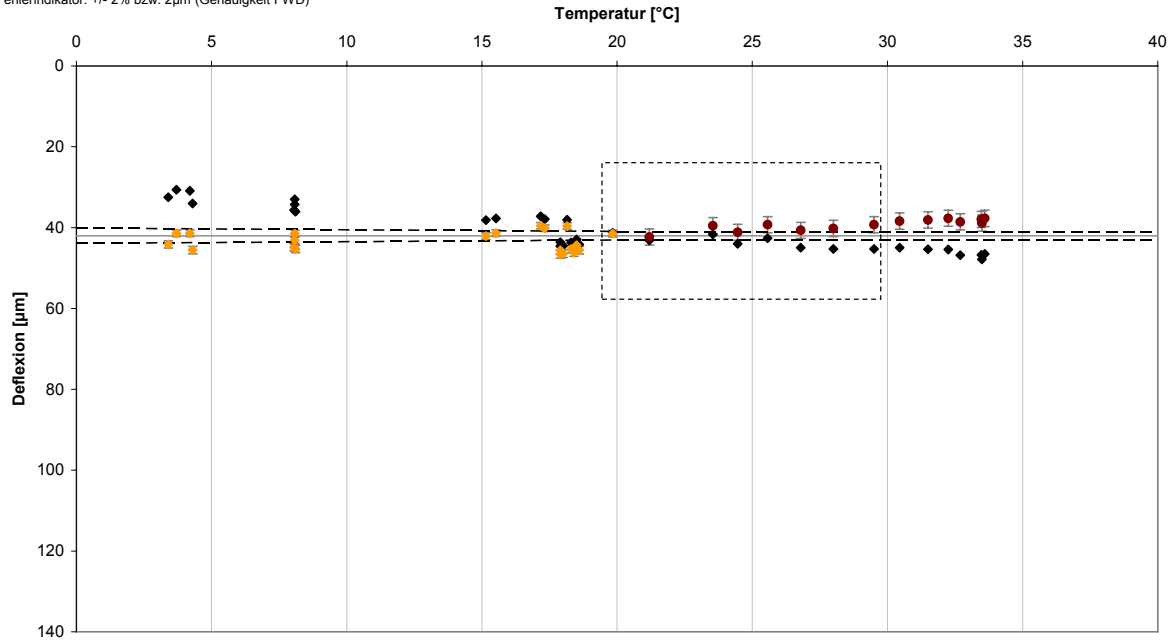


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 200 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D2 - Menden - Station 3

Fehlerindikator: +/- 2% bzw. 2µm (Genauigkeit FWD)

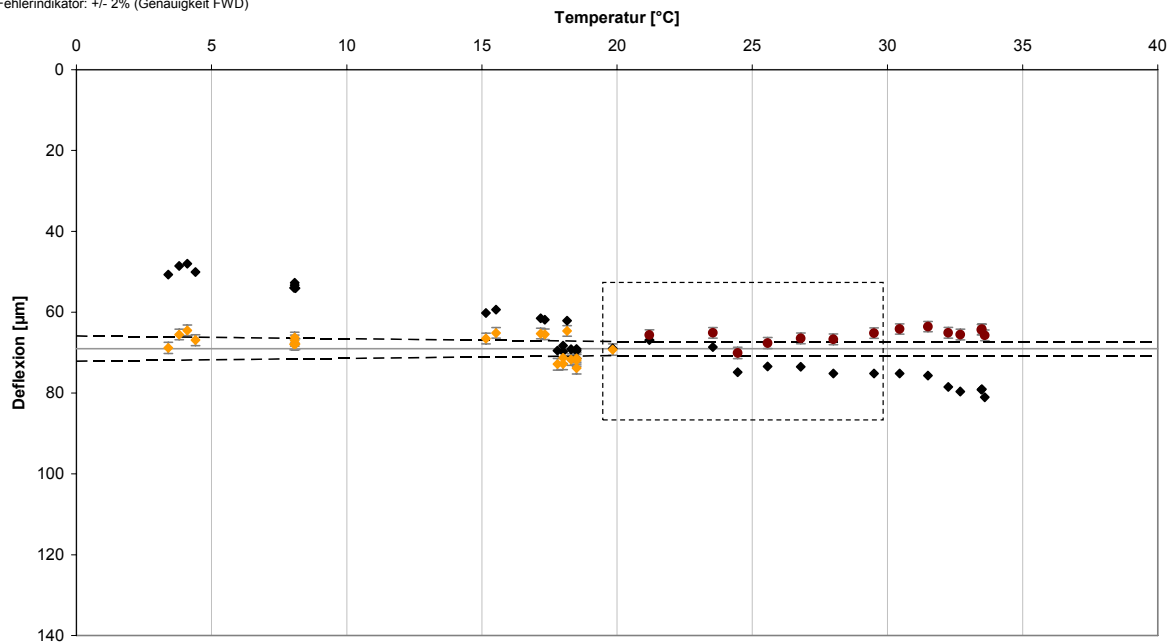


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 200 mm

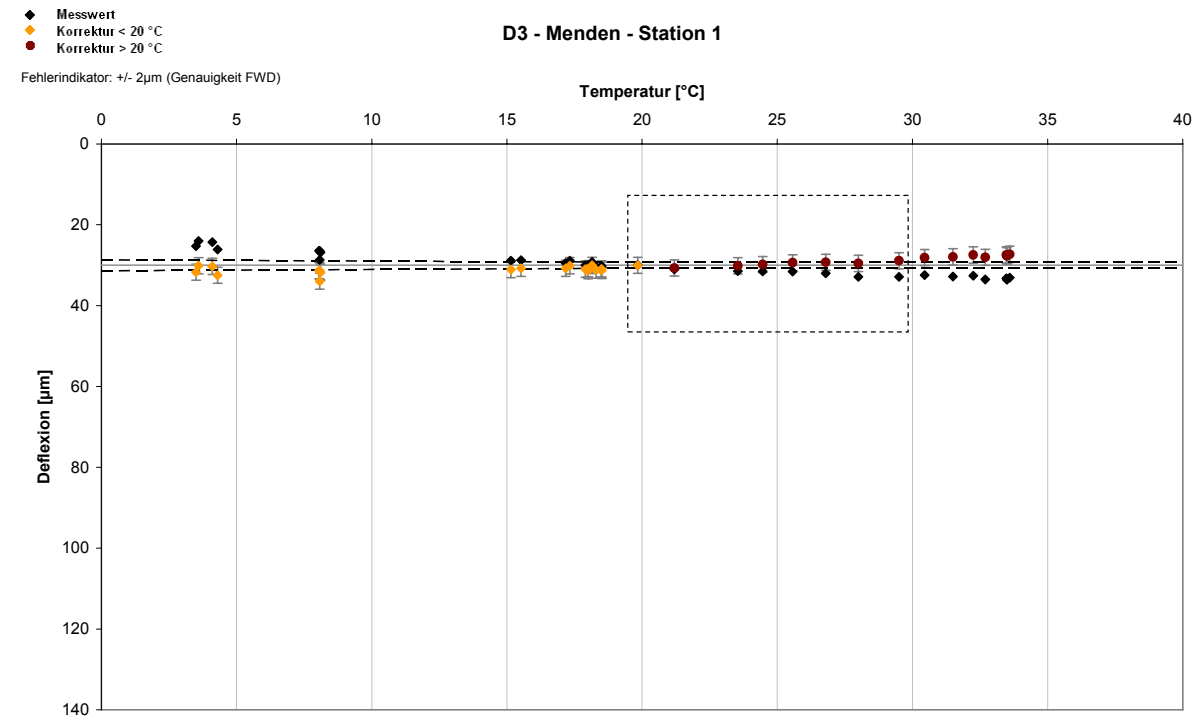
- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D2 - Menden - Station 4

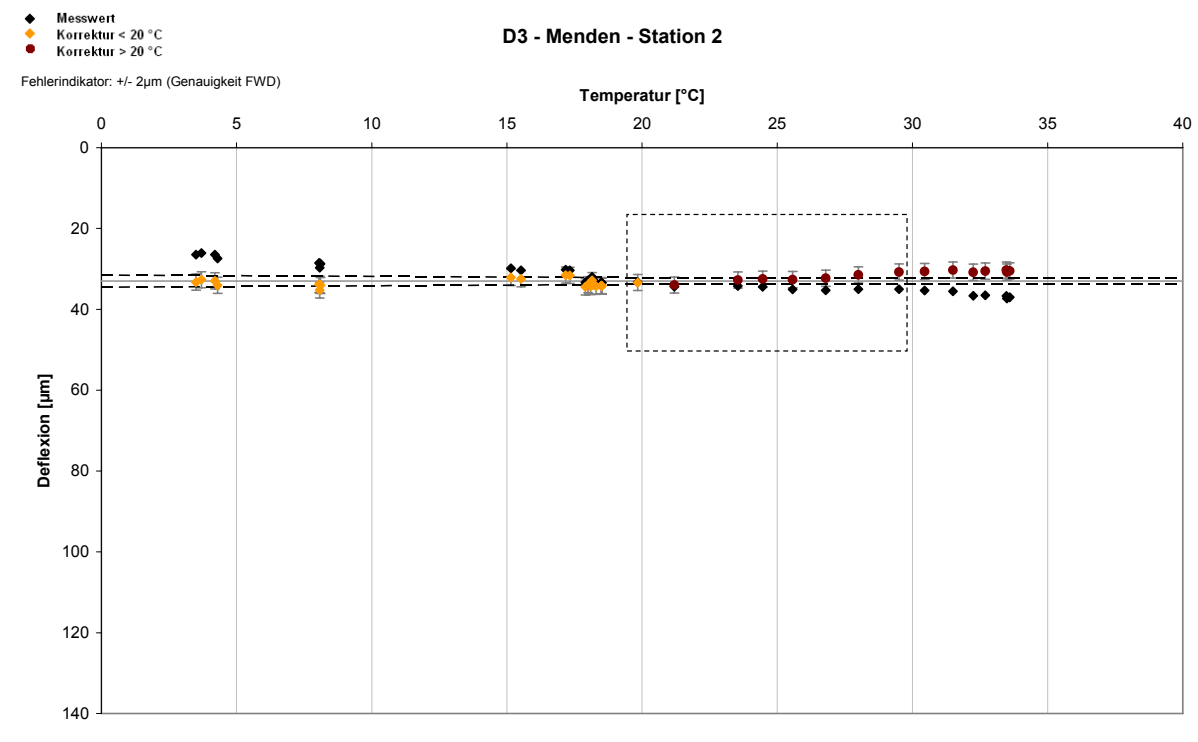
Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)



Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm



Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm

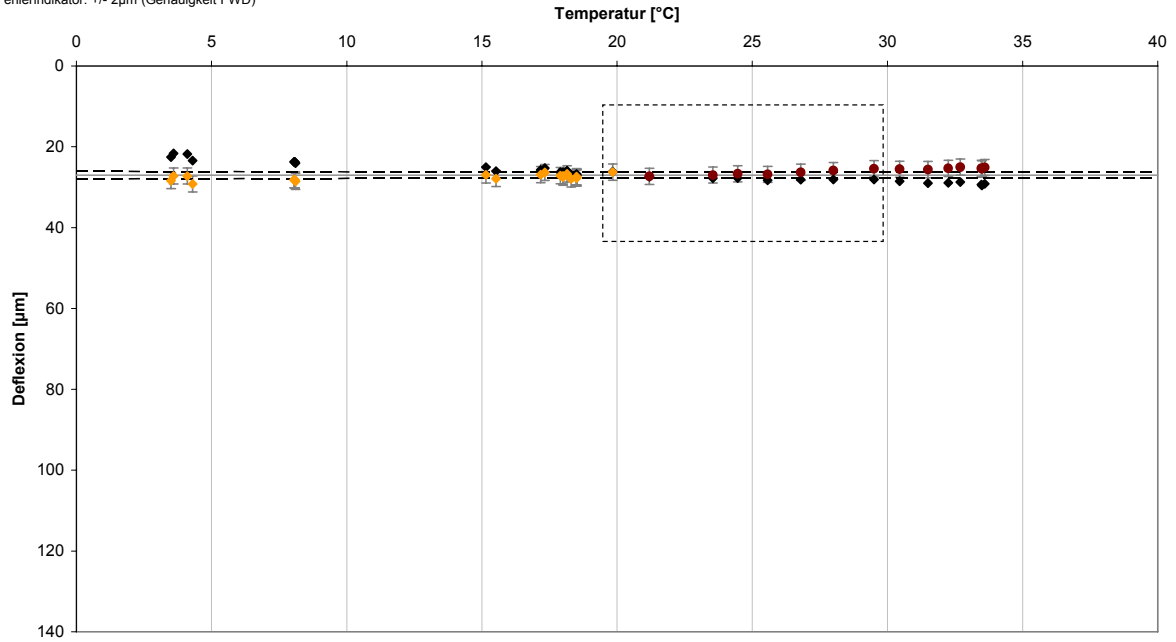


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Menden - Station 1

Fehlerindikator: +/- 2µm (Genauigkeit FWD)

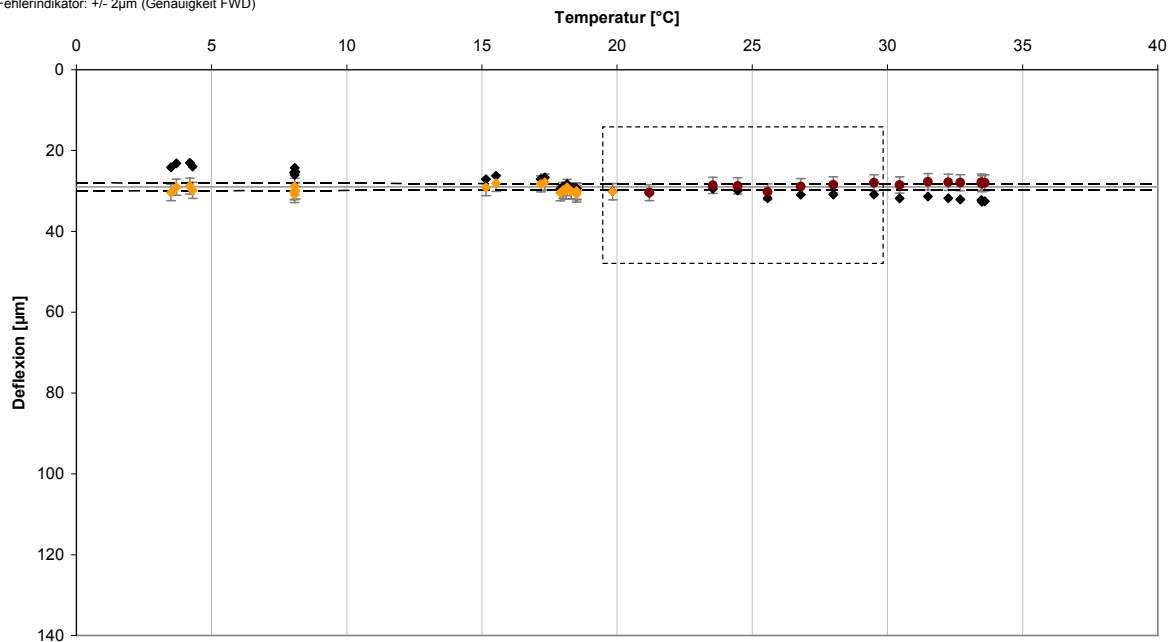


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Menden - Station 2

Fehlerindikator: +/- 2µm (Genauigkeit FWD)

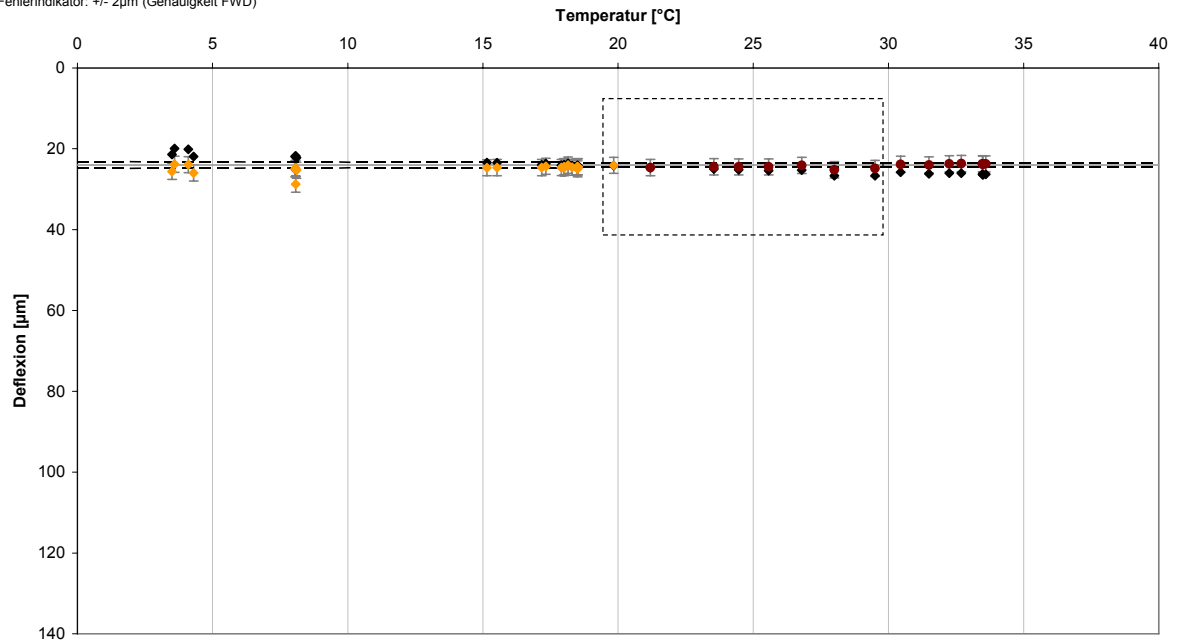


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D5 - Menden - Station 1

Fehlerindikator: +/- 2µm (Genauigkeit FWD)

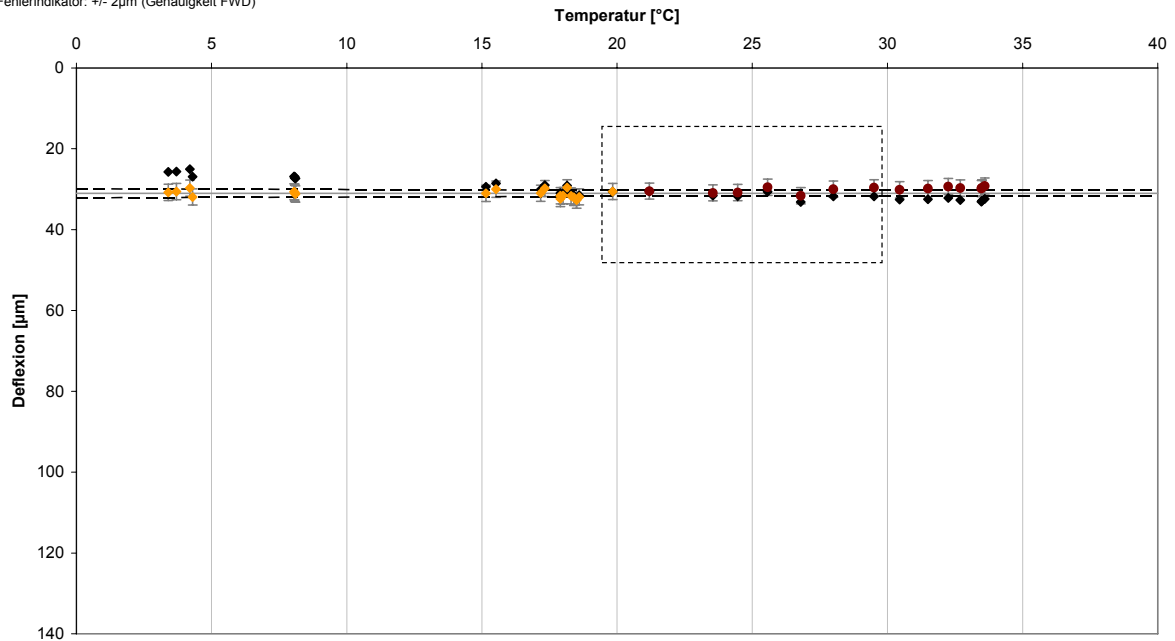


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D5 - Menden - Station 3

Fehlerindikator: +/- 2µm (Genauigkeit FWD)

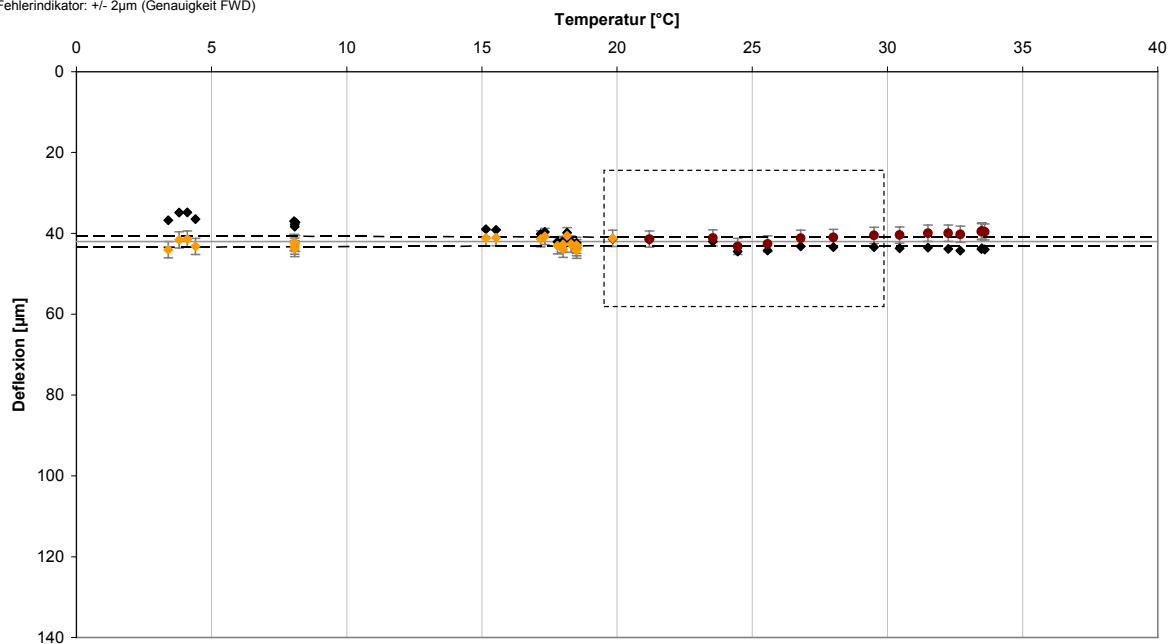


Temperaturmessstation Menden – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D5 - Menden - Station 4

Fehlerindikator: +/- 2µm (Genauigkeit FWD)

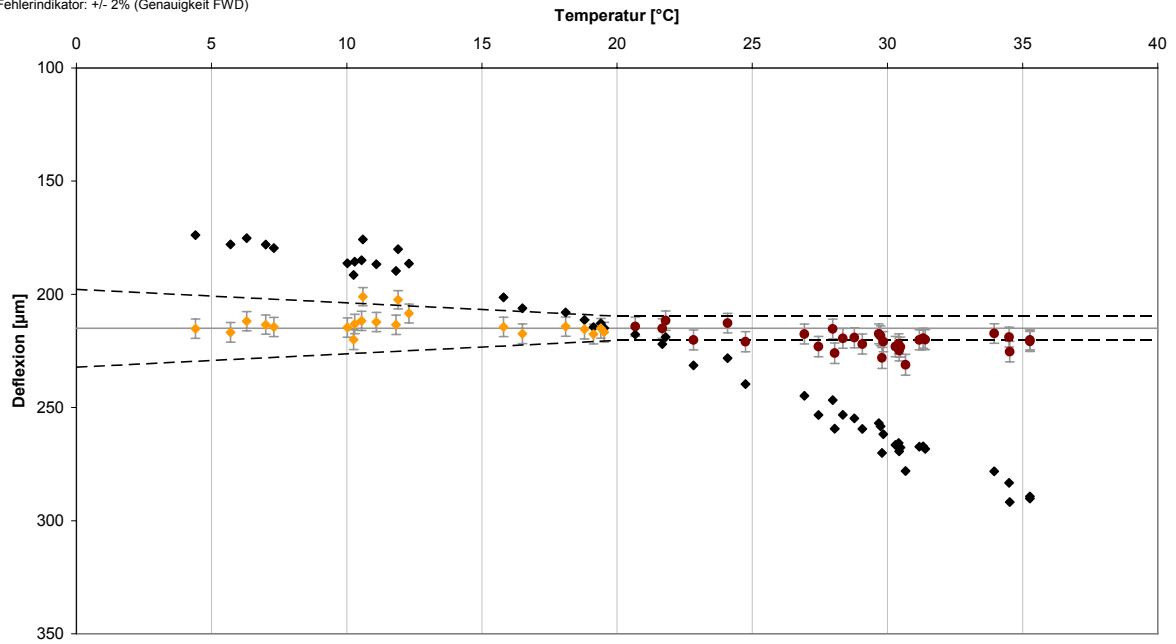


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D1 - Heek - Station 1

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

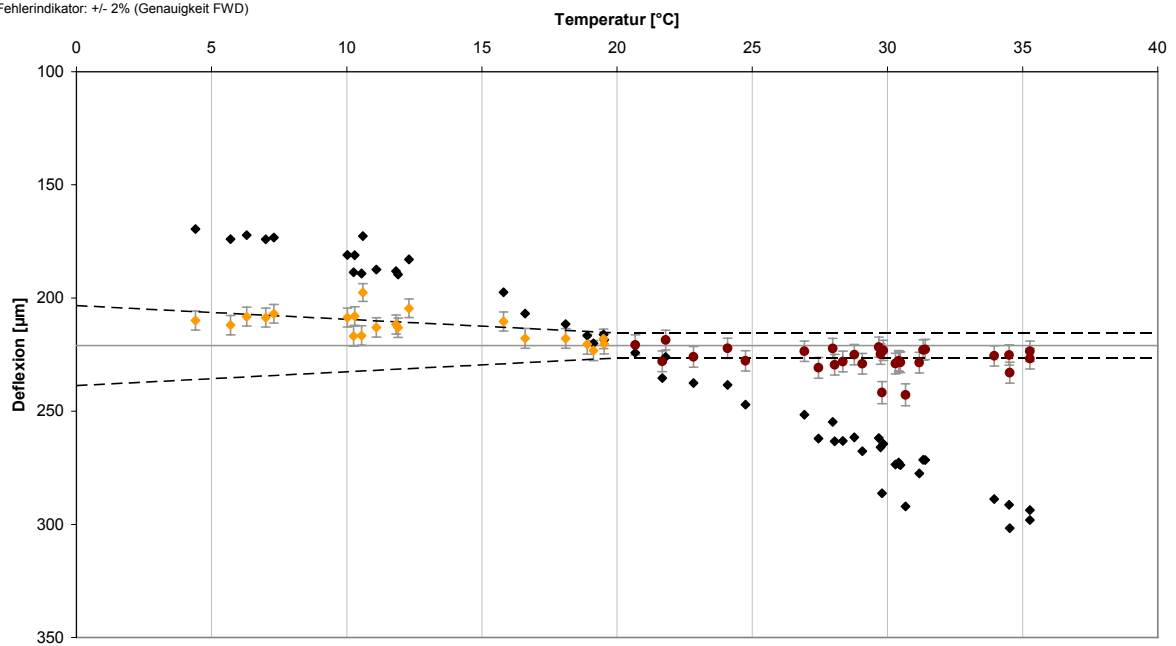


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D1 - Heek - Station 2

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

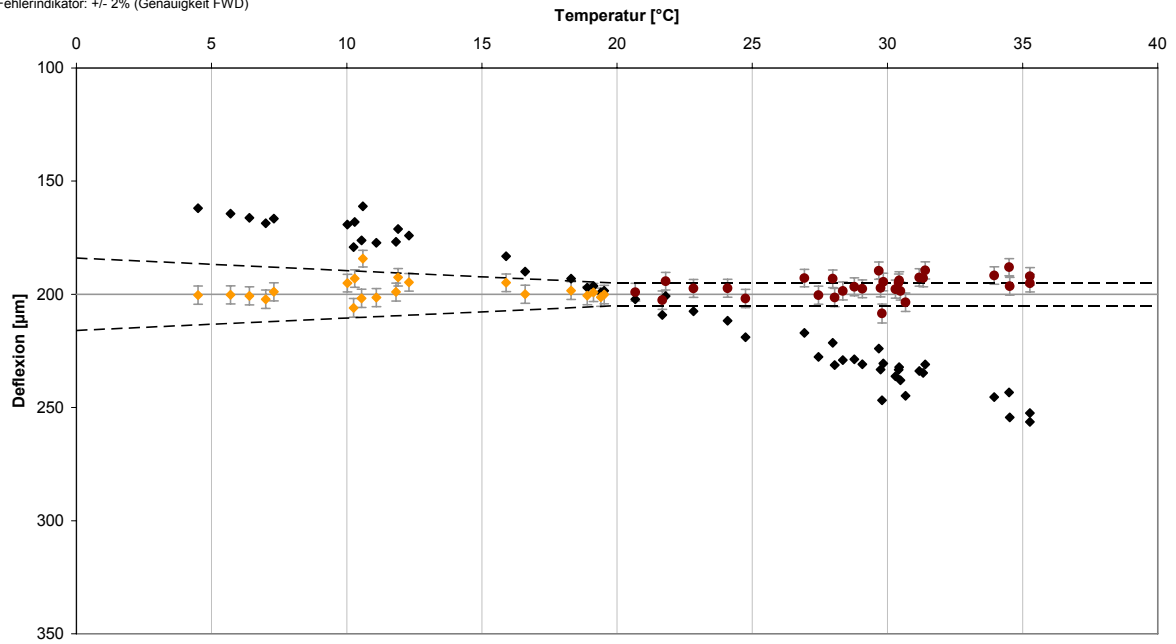


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D1 - Heek - Station 3

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

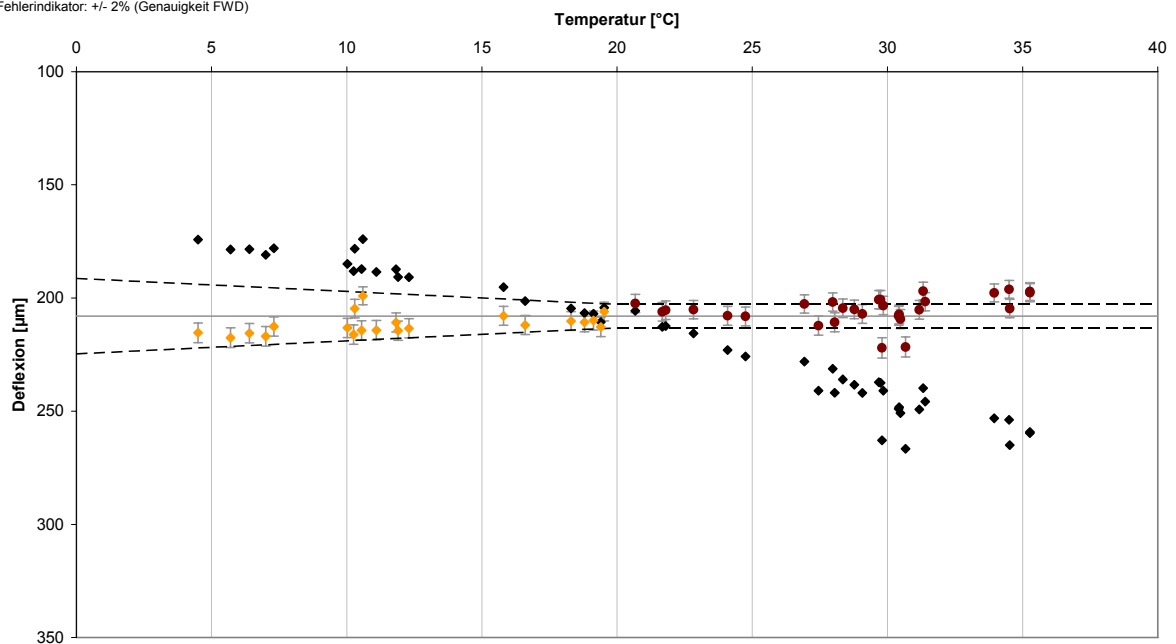


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 0 mm

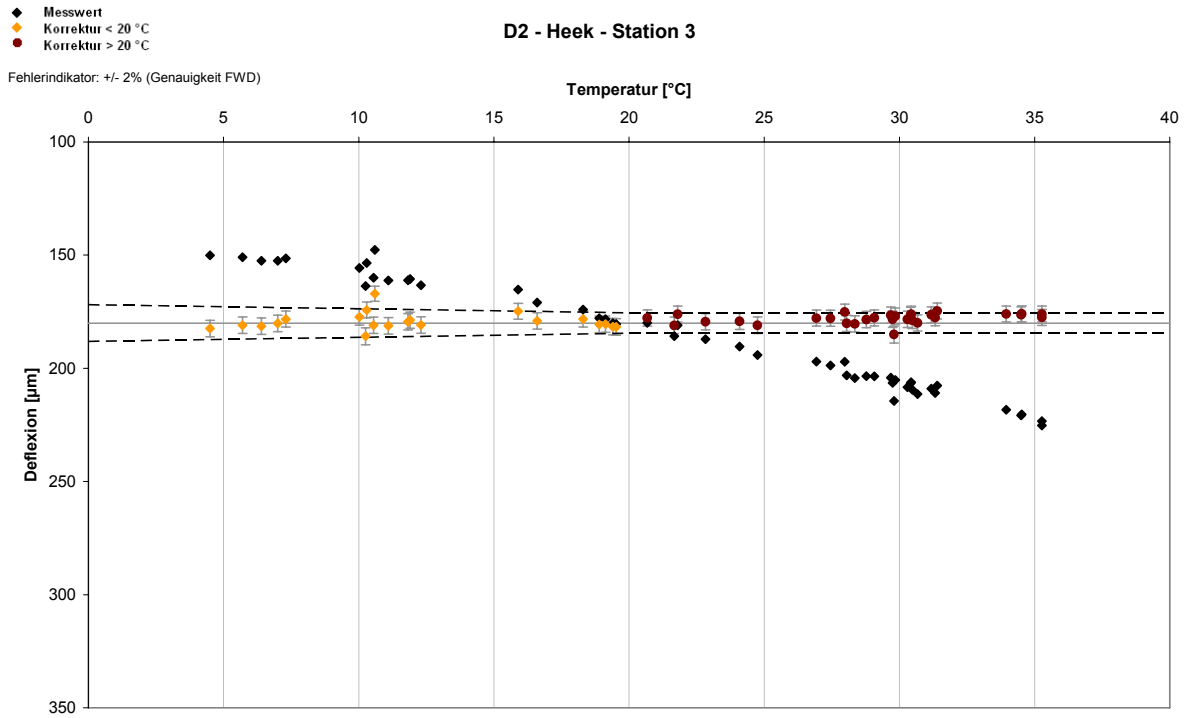
- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D1 - Heek - Station 4

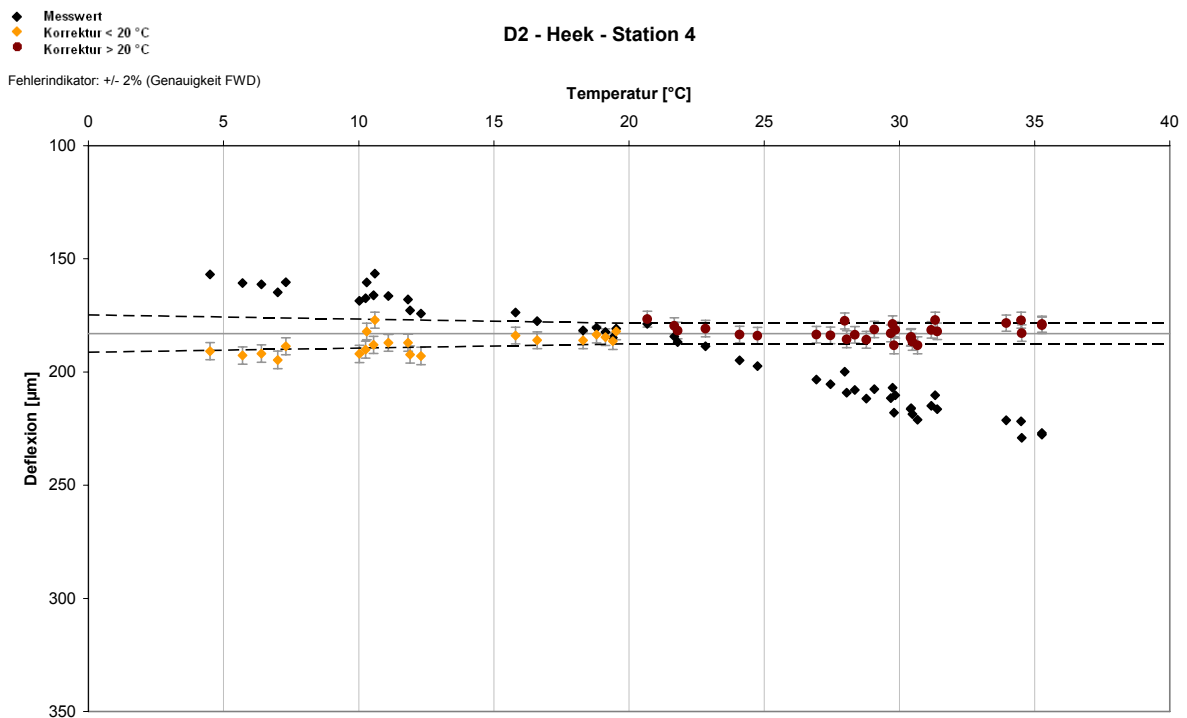
Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)



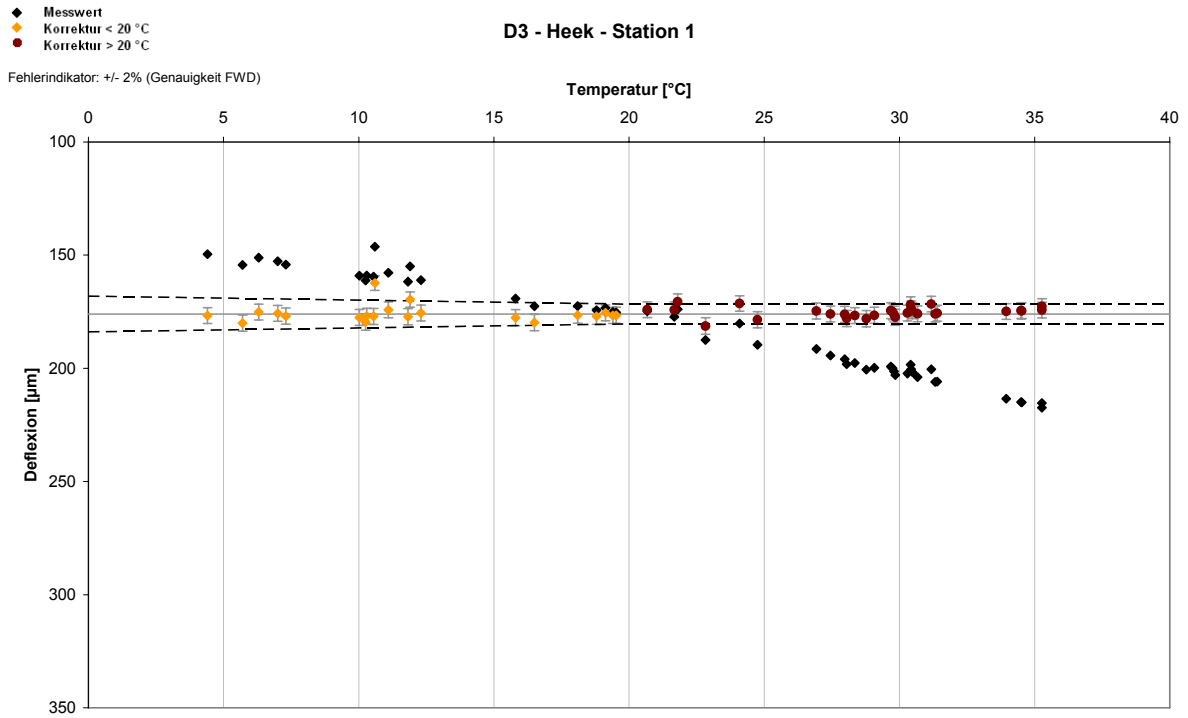
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 200 mm



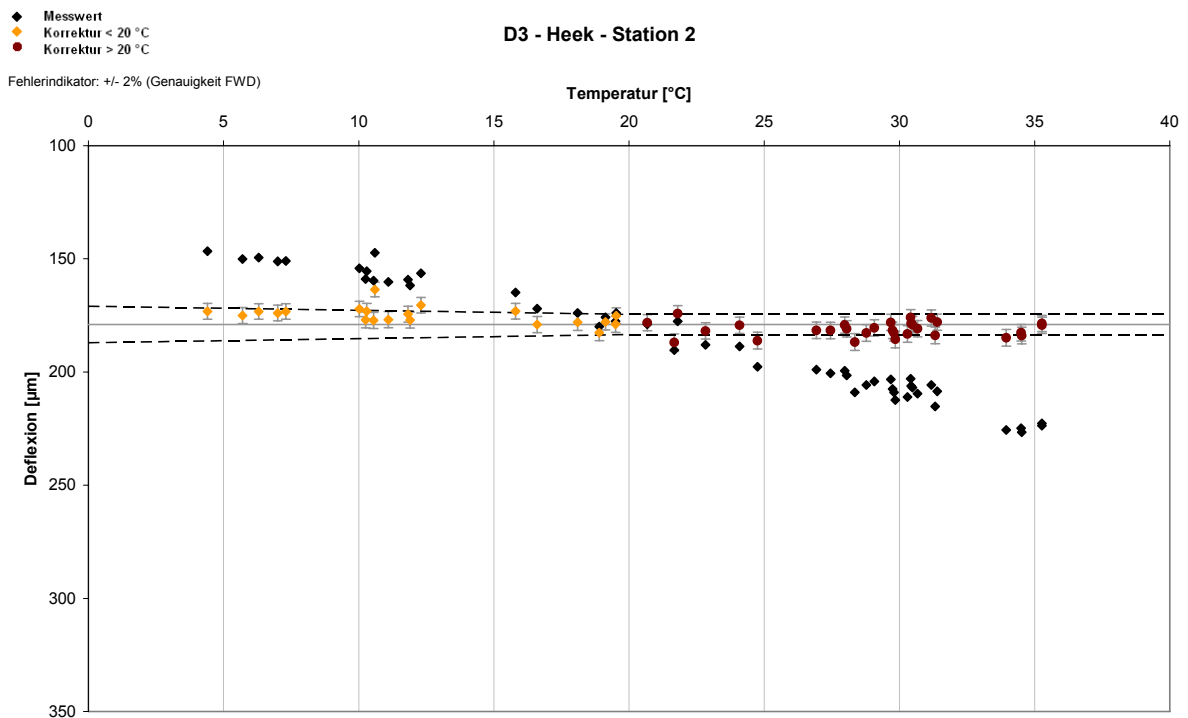
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 200 mm



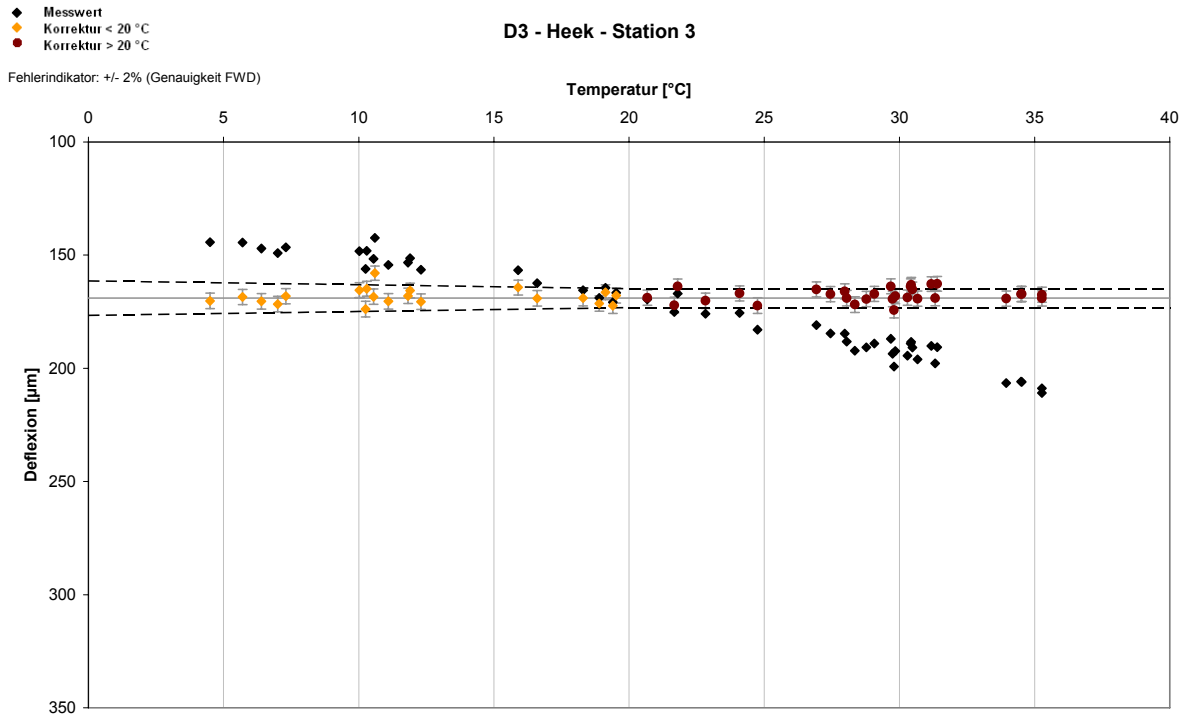
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm



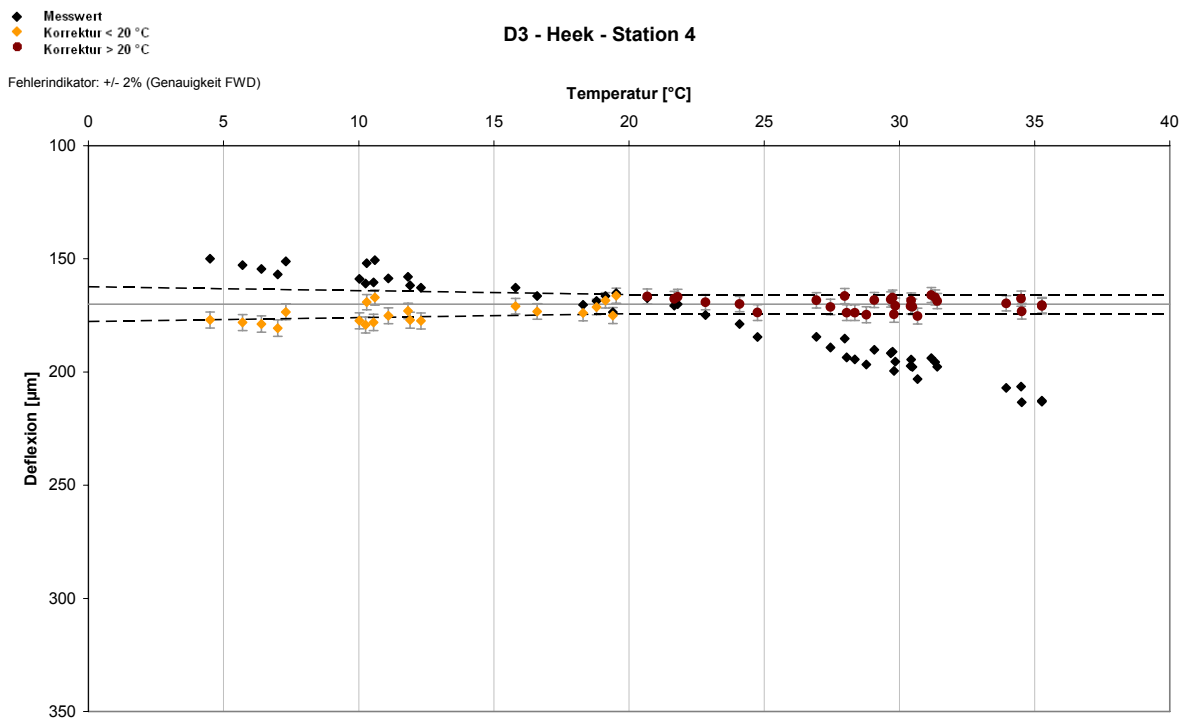
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm



Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm



Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 300 mm

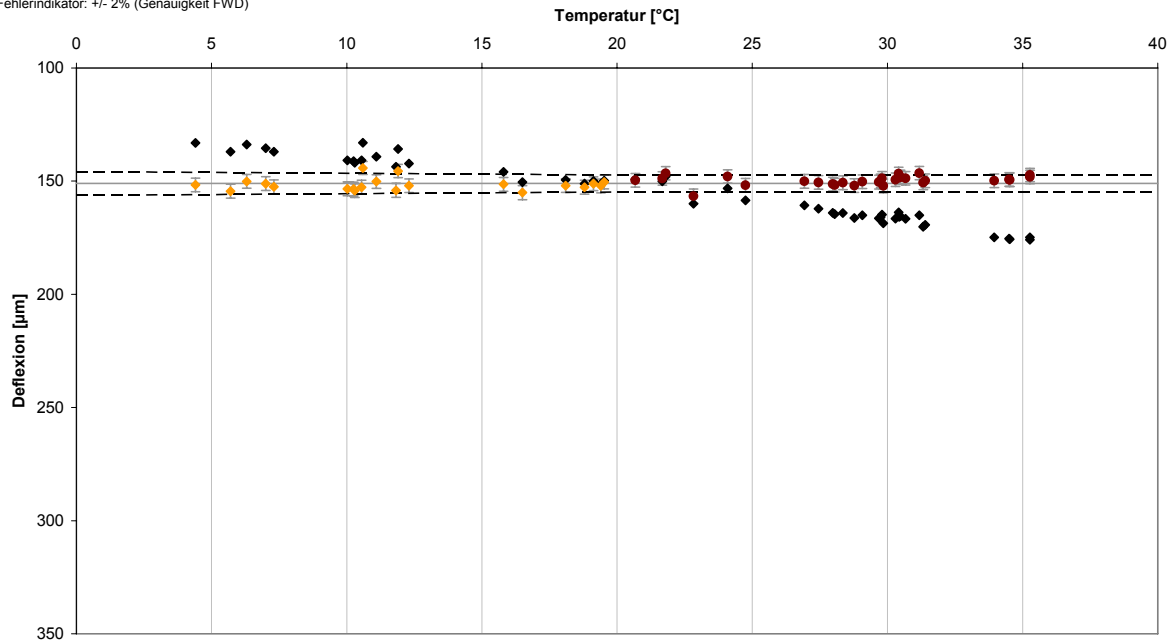


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Heek - Station 1

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

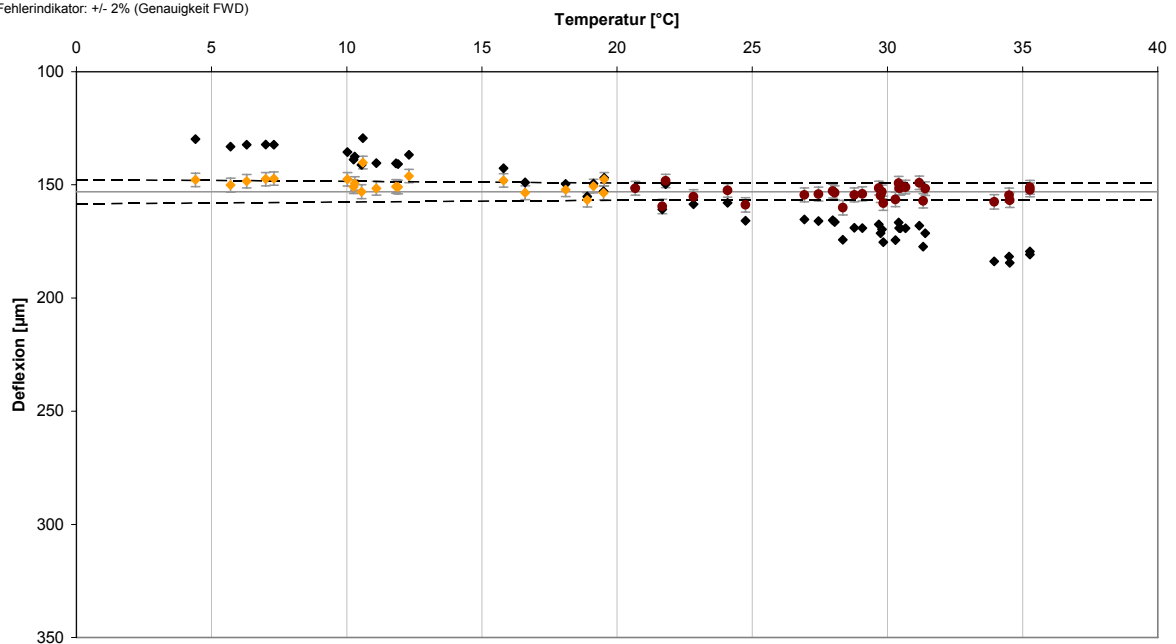


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Heek - Station 2

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

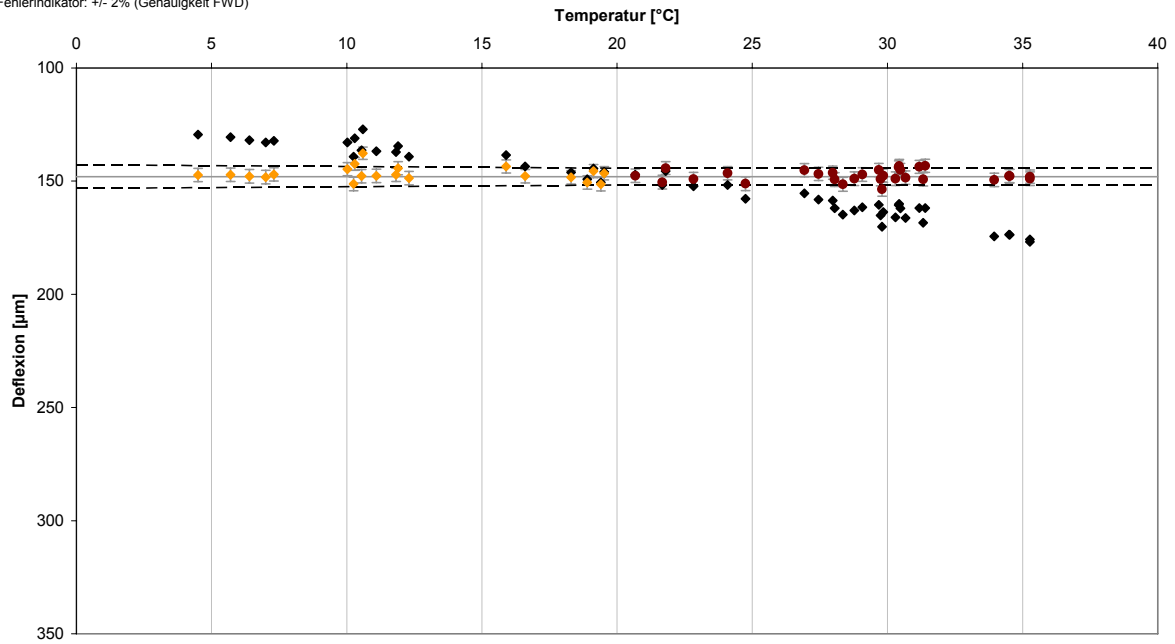


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Heek - Station 3

Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)

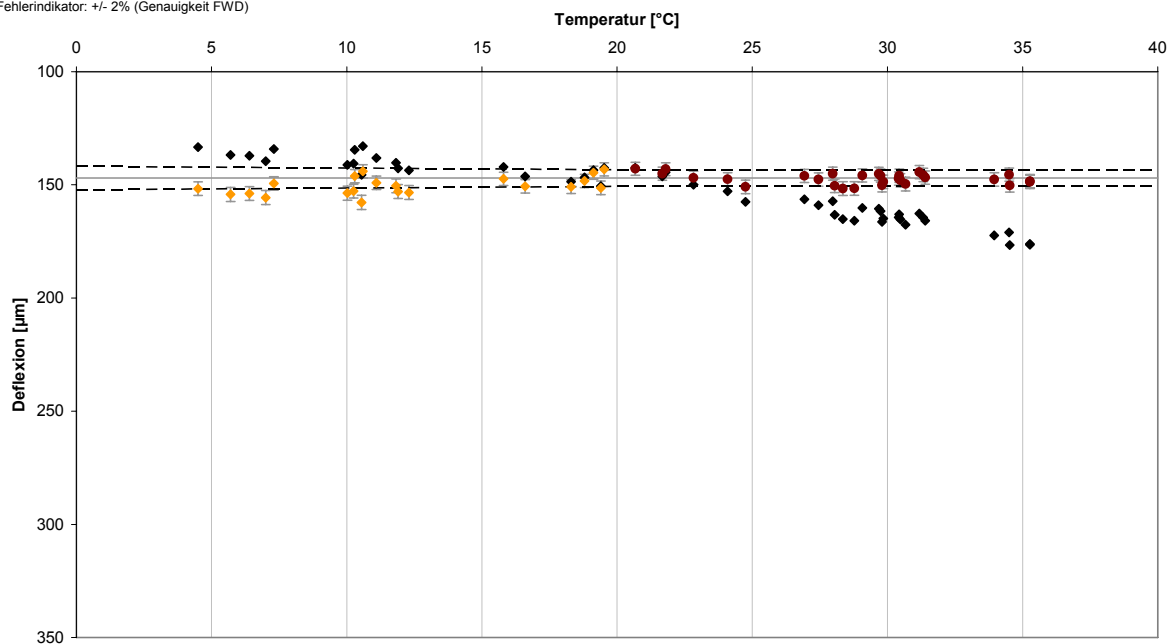


Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 450 mm

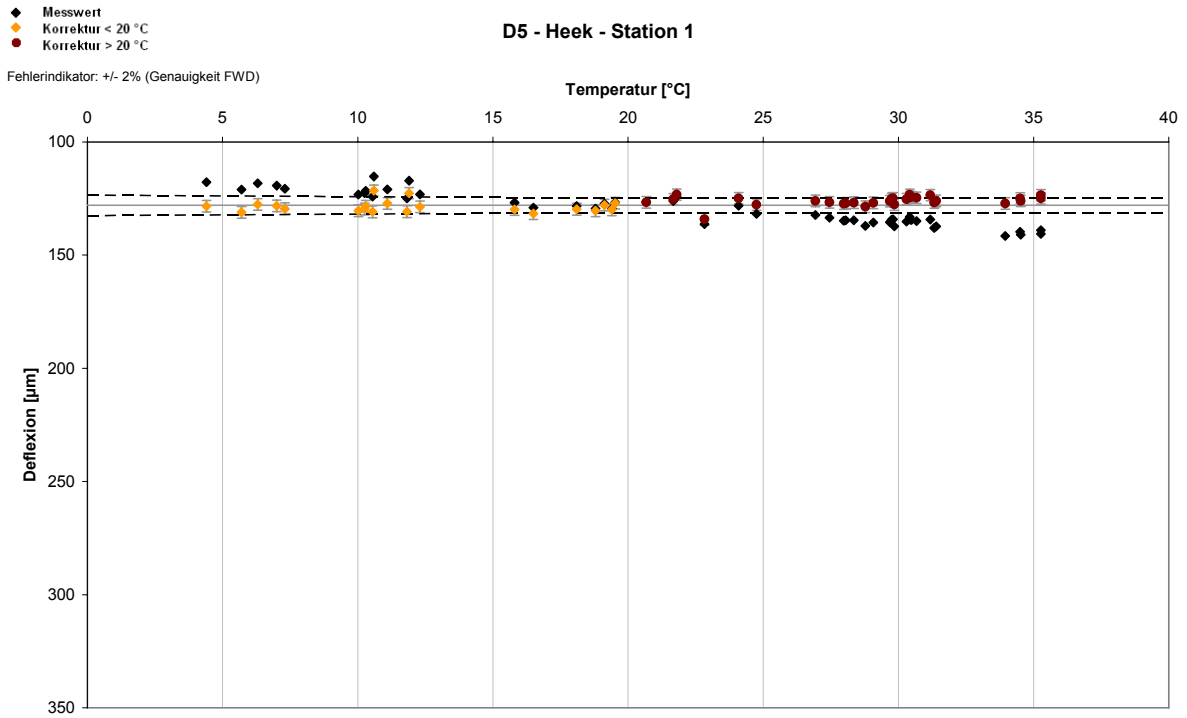
- ◆ Messwert
- ◆ Korrektur < 20 °C
- Korrektur > 20 °C

D4 - Heek - Station 4

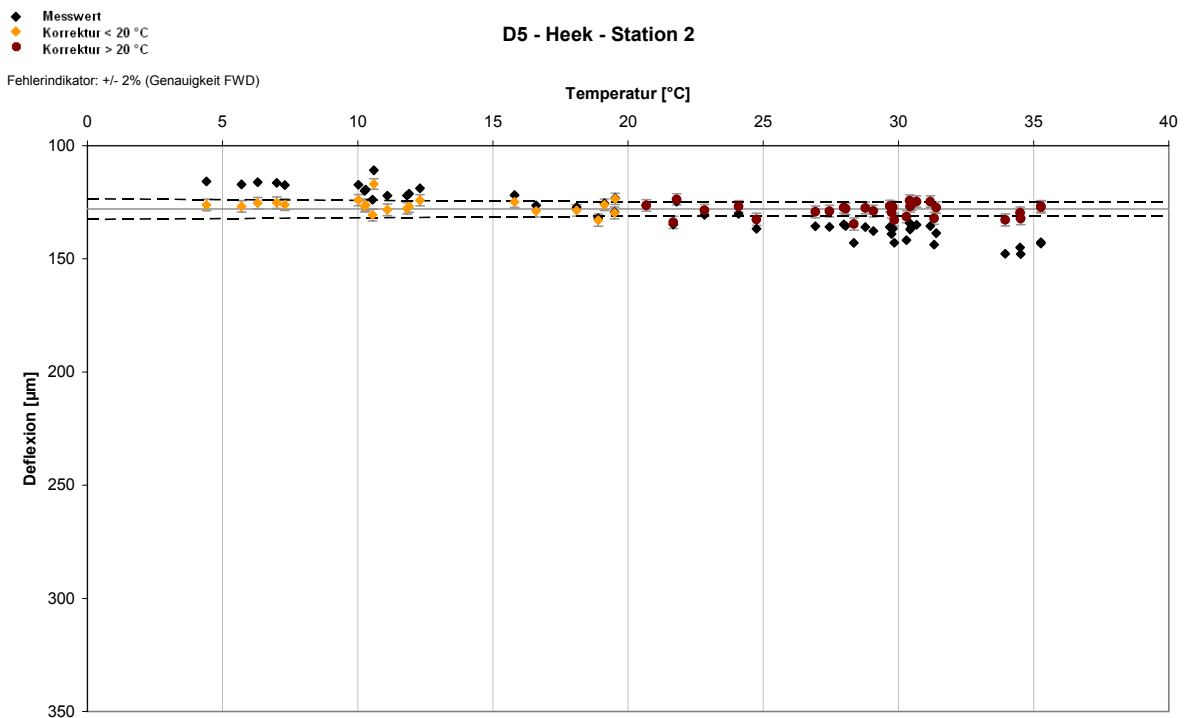
Fehlerindikator: +/- 2% (Genauigkeit FWD)



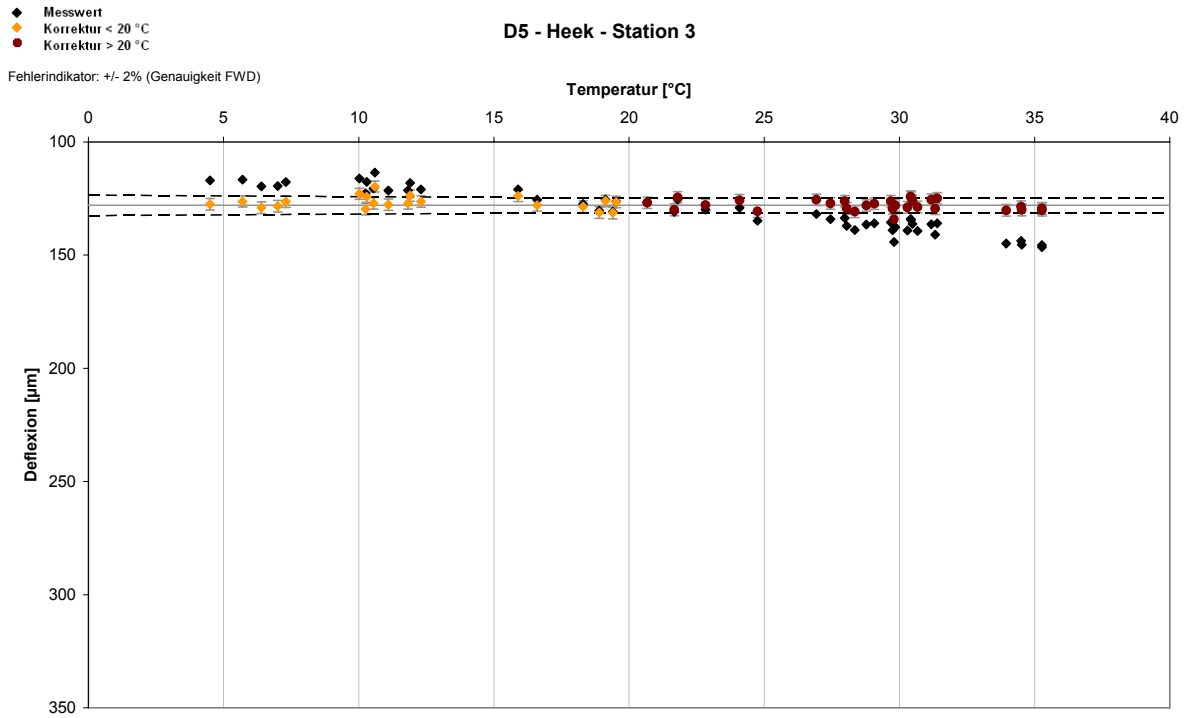
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 1 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm



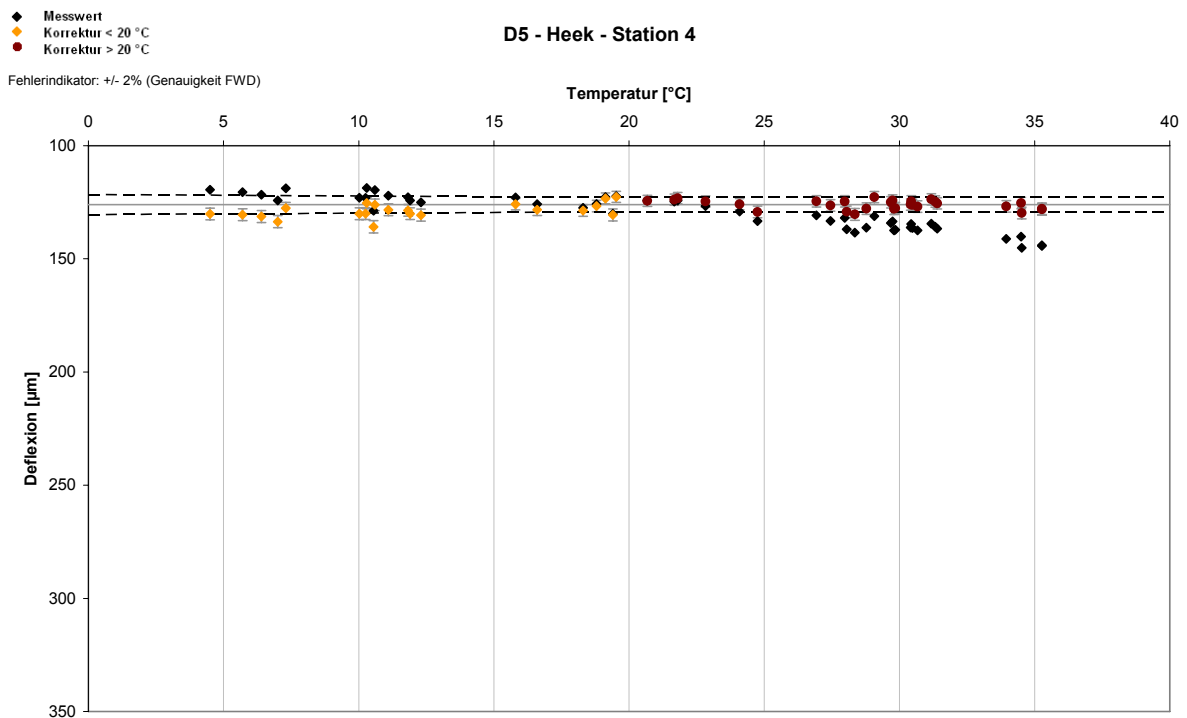
Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 2 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm



Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 3 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm



Temperaturmessstation Heek – Messpunkt 4 – Abstand vom Lastzentrum = 600 mm



Hinweise zur Umsetzung der Temperaturkorrektur in Microsoft Excel Tabellenblättern

Für die Umsetzung der Temperaturkorrekturfunktionen in Microsoft Excel Tabellenblättern empfiehlt sich die Definition von Funktionen. Hierzu ist der VBA Editor in Excel zu öffnen (ALT + F11) und ein neues Modul anzulegen. Dieses Modul sollte wie folgt aufgebaut sein:

```
Function gl_1ag(t As Single)      'D1 Gleichung für <20°C und D1>140 µm
    gl_1ag = 1.3052 - 0.0152 * t
End Function
```

```
Function gl_1ak(t As Single)      'D1 Gleichung für <20°C und D1≤140 µm
    gl_1ak = 1.5183 - 0.0259 * t
End Function
```

```
Function gl_1b(t As Single)       'D1 Gleichung für >20°C
    gl_1b = 1.3005 - 0.0153 * t
End Function
```

```
Function gl_2ag(t As Single)      'D2 Gleichung für <20°C und D1>130 µm
    gl_2ag = 1.2784 - 0.0139 * t
End Function
```

```
Function gl_2ak(t As Single)      'D2 Gleichung für <20°C und D1≤130 µm
    gl_2ak = 1.4308 - 0.0215 * t
End Function
```

```
Function gl_2b(t As Single)       'D2 Gleichung für >20°C
    gl_2b = 1.2713 - 0.0137 * t
End Function
```

```
Function gl_3ag(t As Single)      'D3 Gleichung für <20°C und D1>120 µm
    gl_3ag = 1.2317 - 0.0115 * t
End Function
```

```
Function gl_3ak(t As Single)      'D3 Gleichung für <20°C und D1≤120 µm
    gl_3ak = 1.3102 - 0.0155 * t
End Function
```

```
Function gl_3b(t As Single)       'D3 Gleichung für >20°C
    gl_3b = 1.2709 - 0.0133 * t
End Function
```

```
Function gl_4ag(t As Single)      'D4 Gleichung für <20°C und D1>110 µm
    gl_4ag = 1.1779 - 0.0089 * t
End Function
```

```
Function gl_4ak(t As Single)      'D4 Gleichung für <20°C und D1≤110 µm
    gl_4ak = 1.3131 - 0.0156 * t
End Function
```

```

Function gl_4b(t As Single)      'D4 Gleichung für >20°C
    gl_4b = 1.2303 - 0.011 * t
End Function

Function gl_5ag(t As Single)     'D5 Gleichung für <20°C und D1>100 µm
    gl_5ag = 1.1158 - 0.0058 * t
End Function

Function gl_5ak(t As Single)     'D5 Gleichung für <20°C und D1≤100 µm
    gl_5ak = 1.2392 - 0.0122 * t
End Function

Function gl_5b(t As Single)      'D5 Gleichung für >20°C
    gl_5b = 1.16 - 0.0077 * t
End Function

```

Der Aufruf der Funktionen im Tabellenblatt erfolgt analog zu herkömmlichen Arbeitsblattfunktionen. Folgendes Beispiel verdeutlicht die Vorgehensweise für die Deflexion im Lastzentrum ($t_5 < 20 \text{ °C}$ und $D1 > 140 \text{ µm}$):

A	B	C	D
1	Temperatur in 5 cm Tiefe	Deflexion im Lastzentrum	korrigierte Deflexion im Lastzentrum
2	15	245	=gl_1ag(B2)*C2

Für die Fallunterscheidung (über/unter 20 °C ; große/kleine Deflexion) empfiehlt sich die Anwendung der WENN Arbeitsblattfunktion. Folgendes Beispiel zeigt die Anwendung für die Korrektur der Deflexion im Lastzentrum. Für die weiteren Geofonpositionen sind, neben den Zellbezügen, der Grenzwert und die jeweilige Funktionsbezeichnung abzuändern (beides **fett** markiert).

A	B	C	D
1	Temperatur in 5 cm Tiefe	Deflexion im Lastzentrum	korrigierte Deflexion im Lastzentrum
2	15	245	=WENN(C2> 140 ;WENN(B2<20;gl_1ag(B2)*C2;gl_1b(B2)*C2);WENN(B2<20;gl_1ak(B2)*C2;gl_1b(B2)*C2))

Bisher erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
INSTITUTES FÜR STRASSENBAU UND VERKEHRSWESEN

- Heft 1 Stefan Ludwig
Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter
Verwendung von Epoxydharz, 2009
- Heft 2 Dirk Jansen
Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer
gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen, 2009

Ebenfalls erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
FACHGEBIETES VERKEHRSWESEN UND VERKEHRSSBAU

- Band 1 K.-G. Kuchenbecker, G. Hartkopf, R. Kühne
Festkolloquium zum 60. Geburtstag von Jörg Schönharting, 2001
- Band 2 St. Bremer, D. Bruckmann, T. Janßen, J.A. Schmidt, J. Schön-
harting, E. Wolf
Metrorapid / Transrapid: Vernetzung, Umfeld und Verkehrsträger,
2005
- Band 3 Sandra Terporten
Ein neues Verfahren zur Kombination von Mehrfahrgast-Taxi und
ÖPNV – Das KOMET-System, 2004
- Band 4 Urte Helling
Fahrzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielfüh-
rung – Der Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität unter Beach-
tung von Netzauslastungen und Alternativrouten, 2006
- Band 5 Dirk Bruckmann
Containerisierung des Einzelwagenverkehrs – Entwicklung einer
Methode zur Abschätzung des containerisierbaren Aufkommens
im Einzelwagenverkehr und Optimierung der Produktionsstruktur,
2006
- Band 6 Stefan Tetzner
Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Bei-
trag zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer,
2008

Universität Duisburg-Essen
Institut für Straßenbau und Verkehrswesen
Institute of Road and Traffic Engineering
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube

ISBN 3-922602-34-7