

**Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe**

**Untersuchungen zur
Beanspruchung und Dauerhaftigkeit
von Betonfahrbahnen**

FE-Vorhaben 08.156/1999/LRB

Im Auftrag des Bundesministeriums für

Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

Schlussbericht



Untersuchungen zur Beanspruchung und Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen

FE-Vorhaben 08.156/1999/LRB

**Im Auftrag des Bundesministeriums für
Verkehr, Bau- und Wohnungswesen**

Schlussbericht

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller

Projektbearbeitung: Dr.-Ing. U. Guse

Karlsruhe, 26.09.2005

Kurzfassung

Neben den Beanspruchungen durch den Verkehr unterliegen Betonfahrbahnen auch Beanspruchungen durch Temperatur- und Feuchteänderungen infolge der klimatischen Umgebungsbedingungen. Ziel des Vorhabens war es, die Kenntnisse darüber zu erweitern.

Als Untersuchungsobjekt diente ein Abschnitt der Autobahn BAB A 5 bei Kronau. In zwei Fahrstreifen dieses Streckenabschnitts wurden Temperatursensoren eingebaut und die Messwerte kontinuierlich über einen Zeitraum von Juni 1999 bis Juni 2005 erfasst. Ausgewertet wurden die Daten hinsichtlich des Temperaturgradienten in der Fahrbahndecke sowie extremer Temperaturbeanspruchungen (Hitze, Gewitter, Frost).

Die tiefenabhängige Bestimmung der Feuchte in der Fahrbahndecke erfolgte an Bohrkernen und zerstörungsfrei mit einem im Institut für Massivbau und Baustofftechnologie entwickelten dielektrischen Messverfahren.

Insgesamt gesehen lag der Messzeitraum in einer Phase mit einem tendenziell wärmeren Klima als in der klimatologischen Bezugsperiode der Jahre von 1961 bis 1990.

Der größte negative Gradient betrug $-0,035$ K/mm und der größte positive Gradient $0,080$ K/mm. Die größte Erwärmung an der Oberseite der stark befahrenen Betonplatten erreichte 45 °C.

In der kalten Jahreszeit trat im Messzeitraum keine extreme Beanspruchung, bezogen auf die Referenzperiode von 1961 - 1990, auf. Für den Messzeitraum (6 Winter) wurden die Eis- und Frosttage, die Häufigkeitsverteilung der dabei zu beobachtenden Minimal und Maximaltemperaturen der Lufttemperatur und die Anzahl der Nulldurchgänge der Temperatur sowie die Abkühl- und Auftauraten ermittelt.

Die Auswertung von schockartigen Abkühlungen der erwärmten Betonfahrbahn (z.B. Gewitter) zeigte, dass sich ausgeprägte negative Temperaturgradienten an der Oberseite der Betondecke ausbilden. Die Messungen lieferten Werte, die darauf hindeuten, dass der Gradient um einen Faktor 2 bis 3 höher liegt, als der aus der Literatur bisher bekannte Wert von $-0,13$ K/mm.

Aus den Feuchtebestimmungen ist abzuleiten, dass die Betonfahrbahn an der Oberseite austrocknen kann und in der Oberflächenzone auch deutliche Schwankungen des Feuchtegehalts infolge der Witterungsverhältnisse auftreten. Die Werte lagen zu den Messterminen zwischen 1,5

und 5,5 Masse-%. In den tieferen Bereichen ab ca. 2 cm unterhalb der Oberfläche blieb der Feuchtegehalt im Untersuchungszeitraum praktisch unverändert. Er betrug im Mittel 4,5 Masse-%.

Infolge einer gleichmäßigen Temperaturänderung über den Querschnitt entstehen horizontale Bewegungen der Fahrbahnplatten. Verwölbungen resultieren aus Temperatur- und Feuchtegradienten. Ungünstige Erhärtungstemperaturen bei der Herstellung der Betondecke können diese Effekte verstärken und bisher nicht zielsicher ausgeschlossen werden. Dementsprechend kommt der Ausbildung der Tragschicht und damit der Gestaltung der Auflagerbedingungen besondere Bedeutung zu. Die Tragschicht oder eine entsprechende Zwischenlage sollte eine weitgehend vollständige Auflagerung der verformten Betonplatte langfristig sicherstellen. Mit den Bauweisen, die in der Tafel 2 der RStO 01 aufgeführt sind, wird dieser Anforderung entsprochen.

Abstract

Besides loads resulting from traffic, concrete pavements are also subjected to loads by changes in temperature and moisture as a result of the ambient climatic conditions. The objective of this project was to extend the knowledge on these loads.

A section of the freeway A 5 near Kronau served as a research object. In two lanes of this section, temperature sensors were installed and continuously monitored over a period between June 1999 and June 2005. The data were evaluated with regard to the temperature gradient in the concrete pavement as well as the extreme temperature loads (heat, thunder storm, frost).

The moisture depending on the depth of the concrete pavement was determined on drilling cores as well as with a non-destructive method. The non-destructive dielectric measuring method was developed at the Institute of Concrete Structures and Building Materials.

In comparison to the climatologic reference period between 1961 and 1990 the measuring period indicated a somewhat warmer climate.

The greatest negative temperature gradient detected was found to be -0.035 K/mm and the greatest positive gradient was 0.080 K/mm. The highest temperature on the upper side of the highly

frequented concrete pavement reached about 45 °C.

However no extreme loadings, compared to the reference period 1961 - 1990, were measured during the cold seasons. During the measuring period (6 winters) the numbers of ice and frost days, the frequency distribution of the observed minimum and maximum temperatures of the air and the number of zero-crossing of the temperature as well as the cooling and melting rates were determined.

The evaluation of shock-wise cooling of the heated concrete pavement, for example during a thunder storm, showed that pronounced negative gradients will develop on the upper side of the concrete pavement. The measurements provided data which indicate that the temperature gradient is about a factor of 2 to 3 higher than the value given in the literature which is -0.13 K/mm.

The determination of the moisture content shows that the concrete pavement on the upper side may desiccate and the moisture of the surface varies with the season as a result of the weather conditions. The measured data ranged between 1.5 and 5.5 % by mass. With increasing depth of about 2 cm beneath the surface, the moisture content practically did not change during the measuring period. The average was found to be 4.5 % by mass.

As a result of a uniform change in the temperature of the whole cross section horizontal movements can be stated. A bulging of the slabs can be traced back to temperature and moisture gradients. Adverse temperatures during the manufacturing of the concrete pavement can amplify these effects and are not be eliminated for sure. Therefore the construction of the base layer and the configuration of the foundation are of specific importance. The base layer or an appropriate interlayer, respectively, should guarantee an extensive and complete bearing of the deformed concrete pavement for a long period. The building methods according to standard RStO 01, table 2, meet this requirement.

Inhalt

1	Einführung	7
2	Untersuchte Strecke	7
3	Temperaturmessungen	9
3.1	Methode	9
3.2	Ergebnisse	11
3.2.1	Vorbemerkungen.....	11
3.2.2	Temperaturgang.....	11
3.2.3	Temperaturgradient.....	14
3.2.4	Hitzebeanspruchung	18
3.2.5	Temperaturschock.....	19
3.2.6	Frostbeanspruchung	21
4	Feuchtemessungen	23
4.1	Methoden	23
4.2	Ergebnisse	25
5	Diskussion	26
6	Schlussfolgerungen	28
7	Zusammenfassung	30
8	Literatur	32
9	Anlagenverzeichnis	33

Beilage

CD-ROM mit Messdaten

1 Einführung

Die Beanspruchungen von Betonfahrbahnen durch den Verkehr (Fahrzeuganzahl, Achslast) lassen sich zutreffend abschätzen. Über die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in einer Betonfahrbahn, d.h. die in der Praxis tatsächlich auftretenden Beanspruchungen einer Betondecke bzw. das damit einhergehende Schadensrisiko, liegen dagegen vergleichsweise wenige Erkenntnisse vor.

Ziel des Vorhabens war es, die Kenntnisse über die Temperatur- und Feuchteverhältnisse durch entsprechende Messungen an einer ausgeführten Fahrbahndecke aus Beton zu erweitern.

Als Untersuchungsobjekt diente ein im Juni 1999 unter Verwendung eines CEM II/B-S 32,5 erneuertes Abschnitt der Autobahn BAB A 5, Frankfurt - Basel, bei Kronau.

In zwei Fahrstreifen dieses Streckenabschnitts wurden an einem Messort Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Die Messwerte registrierte eine prozessorgesteuerte Speichereinheit kontinuierlich über den Zeitraum von Juni 1999 bis März 2005. Ausgewertet wurden die Daten insbesondere hinsichtlich des Temperaturgradienten in der Fahrbahndecke sowie extremer Temperaturbeanspruchungen (Hitze, Frost, Gewitter).

Die tiefenabhängige Bestimmung der Feuchte in der Fahrbahndecke (Feuchteprofil) erfolgte im Zeitraum von 1999 bis 2004 an Bohrkernen und zerstörungsfrei mittels eines im Institut für Massivbau und Baustofftechnologie entwickelten dielektrischen Messverfahrens.

2 Untersuchte Strecke

Im Juni 1999 wurde der Streckenabschnitt der BAB A 5, Frankfurt - Basel, AK Walldorf - AS Bruchsal, vom Betriebskilometer 594+255 bis 598+210 (FDE St. Leon II/99) erneuert. Während der Herstellung des Fahrbahndeckenbetons konnten Temperatursensoren in den rechten und den mittleren Fahrstreifen eingebaut und eine Messstelle eingerichtet werden.

Die Lage der Strecke ist dem Plan in der Anlage 1 zu entnehmen. Geographisch befindet sie sich im nördlichen Oberrheingraben zwischen den Städten Mannheim und Karlsruhe auf einer Höhe über NN von ca. 107 m.

Eine Ansicht des Streckenabschnitts, in dem auch die Messstelle für die Erfassung der Temperatur in der Fahrbahn sowie der lokalen Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte liegt, zeigt das Bild 2.1.



Bild 2.1: Streckenabschnitt der BAB A 5 bei Kronau (Blick Richtung Norden); der Pfeil zeigt auf den Ort, an dem die Messstelle installiert wurde

Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV-Wert) wird für den beobachteten Streckenabschnitt auf der BAB A 5 in der Karte der Verkehrsstärken von 2000 wie folgt angegeben:

- nördlich der AS Kronau: 96390 Kraftfahrzeuge in 24 Stunden, davon Schwerverkehr 15110,
- südlich der AS Kronau: 89480 Kraftfahrzeuge in 24 Stunden, davon Schwerverkehr 12590,

bezogen auf den gesamten Querschnitt mit insgesamt 6 Fahrstreifen.

Der Fahrbahnaufbau gliedert sich im untersuchten Streckenabschnitt von oben nach unten wie folgt:

- Fahrbahndecke, 26 cm,
- Bitumenversiegelung mit U 60 K und Splittabstreuerung 2/5,
- Verfestigung, 30 cm,
- Kiessand.

Im Bild 2.2 ist der Fahrbahnaufbau an einem Bohrkern aus dem Bereich der Temperaturmessstelle dargestellt.

Angaben zur Zusammensetzung des Betons der Fahrbahndecke enthält die Tabelle 2.1 und zur Verfestigung die Tabelle 2.2.

In der Tabelle 2.3 sind Ergebnisse von Untersuchungen an Bohrkernen zusammengestellt, die im Alter von 5 Monaten und nach 5 Jahren aus der Fahrbahndecke entnommen wurden.



Bild 2.2: Bohrkern aus der Plattenmitte
oben: bei Betriebskilometer 594+835
unten: bei Betriebskilometer 597+905
 (linkes Probenteil: Betondecke;
 rechtes Probenteil: Verfestigung)

Tab. 2.1: Zusammensetzung des Betons im Untersuchungsabschnitt der BAB A 5 bei Kronau

Zement	CEM II/B-S 32,5 R im Mittel 360 kg/m ³
Gesteinskörnung	Sand 0/2 und Feinkies 2/8 aus dem nördlichen Oberrheingebiet Splitt (Quarzporphyr) 8/11, 11/16 und 16/22 aus dem Nordschwarzwald
Wasserzementwert	im Mittel 0,43
Zusatzmittel	LP-Bildner und Fließmittel

Tab. 2.2: Zusammensetzung der Verfestigung im Untersuchungsabschnitt der BAB A 5 bei Kronau

Bindemittel	HT 35 im Mittel 190 kg/m ³
Gesteinskörnung	Sand 0/2 sowie rezykliertes Ausbaumaterial (Beton, Teer-Pectacrete-Verfestigung)

Tab. 2.3: Ergebnisse der Untersuchungen (Mittelwerte) an Bohrkernen aus der Fahrbahndecke in verschiedenem Alter

Prüfung	Einheit	Alter	
		5 Monate	5 Jahre
Druckfestigkeit	N/mm ²	61	73
Rohdichte	kg/m ³	2331	2357
statischer E-Modul	N/mm ²	34000	35600
Gesamtporosität	Vol.-%	15,5	14,9
Oberseite			
Unterseite	14,7	11,9	
Luftgehalt	Vol.-%	2,2	2,9
Mikroluftporengehalt A ₃₀₀	Vol.-%	1,4	1,7
Abstandsfaktor	mm	0,23	0,20
Gesamtmasseverlust nach 28 Frost-Tausalz-Zyklen im CDF-Test	g/m ²	530	nicht bestimmt

3 Temperaturmessungen

3.1 Methode

Während der Herstellung der Fahrbahndecke im Streckenabschnitt der BAB A 5, Frankfurt - Basel, AK Walldorf - AS Bruchsal, wurden beim Betriebskilometer 597+906 in den rechten und den mittleren Fahrstreifen der Strecke jeweils 4 Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Das Bild 3.1 zeigt die Messstelle mit der Lage der Temperatursensoren in der Fahrbahn.

Die Lage der Messstelle ist in der Anlage 1 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Streckenabschnitt der BAB A 5 nahezu in Nord-Süd-Richtung verläuft und von einem Waldgebiet umgeben ist. Der Abstand zwischen der Fahrbahn und dem Waldrand beträgt etwa 15 m (vgl. Bild 2.1). Damit ist der Bereich der Fahrbahn, indem sich die Temperatursensoren befinden, folglich ganzjährig der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Durch die Bäume wird der Bereich nur beim unmittelbaren Auf- bzw. Untergang der Sonne verschattet.

Die Positionierung der Sensoren erfolgte vor dem Betoneinbau in einem Haltegestell, um eine stabile Lage während des Übergangs des Gleitschalungsfertigers zu gewährleisten. Das Haltegestell bestand aus einem Stahlprofil mit PVC-Buchsen, in denen die Sensoren stecken. Dargestellt ist die Einbausituation in den Bildern 3.2 und 3.3.

Der Abstand zwischen den 4 Temperatursensoren innerhalb der Fahrbahndecke ist jeweils durch das Haltegestell einheitlich vorgegeben (vgl. Bild 3.2). Er beträgt zwischen dem 1. (oberen) und dem 2. Sensor 40 mm, zwischen dem 2. und dem 3. Sensor 60 mm und dem 3. und dem 4. Sensor 120 mm.

Aufgrund der Einbaubedingungen vor Ort waren geringfügige Unterschiede in der Höhenlage unter der Fahrbahnoberfläche zwischen den Sensoren im rechten und mittleren Fahrstreifen unvermeidlich. So liegt der obere Sensor im rechten Fahrstreifen 20 mm und im mittleren Fahrstreifen 15 mm unter der Oberfläche. Daraus ergeben sich die Einbautiefen:

- im rechten Fahrstreifen von
 - 20 mm, - 60 mm, - 120 mm und - 240 mm,
- im mittleren Fahrstreifen von
 - 15 mm, - 55 mm, - 115 mm und - 235 mm.



Bild 3.1: Ansicht der Messstelle (Blick Richtung Süden); die roten Pfeile markieren die Orte der Temperaturmessung in der Fahrbahndecke; rechts im Bild ist der Schutzkasten für die Datenerfassungseinheit und die Stromversorgung sowie der Mast mit den Sensoren für die Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte zu erkennen

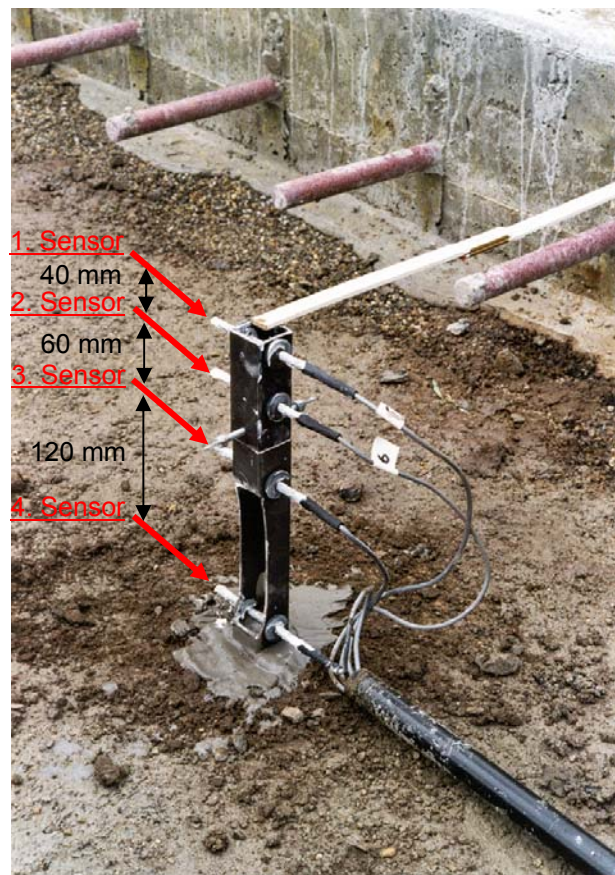


Bild 3.2: Anordnung der Sensoren für die Temperaturmessung in der Fahrbahndecke



Bild 3.3: Einbau der Haltegestelle mit den Sensoren für die Temperaturmessung im rechten und mittleren Fahrstreifen, jeweils im Bereich der rechten Rollspur

Der Abstand der Temperaturmessstellen von der Außenkante der Fahrbahndecke beträgt 3,5 m (rechter Fahrstreifen) bzw. 7,5 m (mittlerer Fahrstreifen). Damit liegen die Sensoren jeweils im Bereich der rechten Rollspuren (vgl. Bild 3.3).

An einem Mast neben der Fahrbahn befand sich zusätzlich zu den Messstellen in den Fahrstreifen ein Sensor, mit dem die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte am Einbauort in ca. 2 m Höhe über der Fahrbahn gemessen werden konnte (vgl. Bild 3.1).

Weiterhin war am Mast auch der Schutzkasten für die prozessorgesteuerte Speichereinheit vom Typ Squirrel 1202 der Fa. Grant (GB) und die Stromversorgung (12 V Akkumulator) montiert.

Für die Temperaturmessungen in den Fahrbahnen wurden Thermistoren Typ U mit einer Genauigkeit im Bereich zwischen 0 °C und 75 °C von $\pm 0,2$ °C verwendet. Die Thermistoren befanden sich in Edelstahlhülsen (vgl. Bild 3.2).

Die Messung der Lufttemperatur erfolgt mittels Platin-Widerstand Pt 1000, der eine Genauigkeit im Bereich zwischen -10 °C und 40 °C von $\pm 0,3$ °C, aufweist.

Zur Messung der relativen Luftfeuchte (r.F.) diente ein kapazitiver Polymer-Sensor des Typs Humicap® 180 mit einer Genauigkeit im Bereich zwischen 0 und 90 % r.F. von ± 2 % r.F. und im Bereich zwischen 90 und 100 % r.F. von ± 3 % r.F.. Der Feuchtesensor wurde im zeitlichen Abstand

von jeweils ca. 1,5 Jahren kalibriert bzw. ausgetauscht.

Die einbaufertigen und geeichten Sensoren wurden, ebenso wie auch die prozessorgesteuerte Speichereinheit, von der Fa. Driesen+Kern, Bad Bramstedt, bezogen. Bei dieser Firma erfolgte auch die Kalibrierung bzw. Erneuerung des Feuchtesensors.

Die Messwerte wurden kontinuierlich vom Einbau des Betons am 08. Juni 1999 bis zum 08. Juni 2005 im 10-Minuten-Takt aufgezeichnet. Ausnahmen davon (zwei Lücken in der Darstellung der Ergebnisse) ergaben sich durch den Ausfall der Stromversorgung (eine Woche im Januar 2000) und den Ausfall der Speichereinheit (eine Woche im November 2001).

Die Aufzeichnungen der Messdaten erfolgten auf der Grundlage der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ). Während des gesamten Messzeitraumes wurde diese Zeiteinstellung (MESZ) ununterbrochen beibehalten. Alle Zeitangaben im vorliegenden Untersuchungsbericht basieren darauf.

Aufgrund der begrenzten Kapazität der Speichereinheit wurden die Daten in regelmäßigen Abständen (2 bis 3 Monate) ausgelesen.

Die Rohdaten wurden zunächst so aufbereitet, dass sämtliche Messwerte für den gesamten Messzeitraum, getrennt nach Jahren und innerhalb der Jahre aufgeteilt in die Kalenderwochen, als Excel-Dateien vorliegen. Eine Datei umfasst folglich die Daten einer Kalenderwoche, die an den insgesamt 10 Messstellen (8 in der Fahrbahn, 2 am Mast) im Abstand von 10 Minuten aufgezeichnet wurden, d.h. eine Datei enthält 10 x 1008 Werte. Weiterhin sind in diesen Dateien der Temperaturverlauf in der Fahrbahndecke, getrennt nach rechtem und linkem Fahrstreifen, und der Verlauf der Lufttemperatur sowie der relativen Luftfeuchte grafisch dargestellt. Diese Dateien liegen dem Bericht auf einer CD-ROM bei. Basierend auf diesen Datensätzen erfolgte die weitere Auswertung, auf die in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Vorbemerkungen

Die Rohdaten wurden zunächst wochenweise in Excel-Dateien übertragen. Diese Dateien mit den Messwerten jeweils einer Kalenderwoche (10080 Werte) sind auf der beiliegenden CD-ROM für den Zeitraum vom 08.06.1999 bis 08.06.2005 abgelegt und im Bericht nicht weiter dargestellt bzw. ausgedruckt. Das Bild 3.4 zeigt exemplarisch die auch in diesen Dateien enthaltenen grafischen Darstellungen des Temperaturgangs in der Fahrbahndecke des rechten und des linken Fahrstreifens sowie des Verlaufs der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte für eine Woche des Messzeitraums.

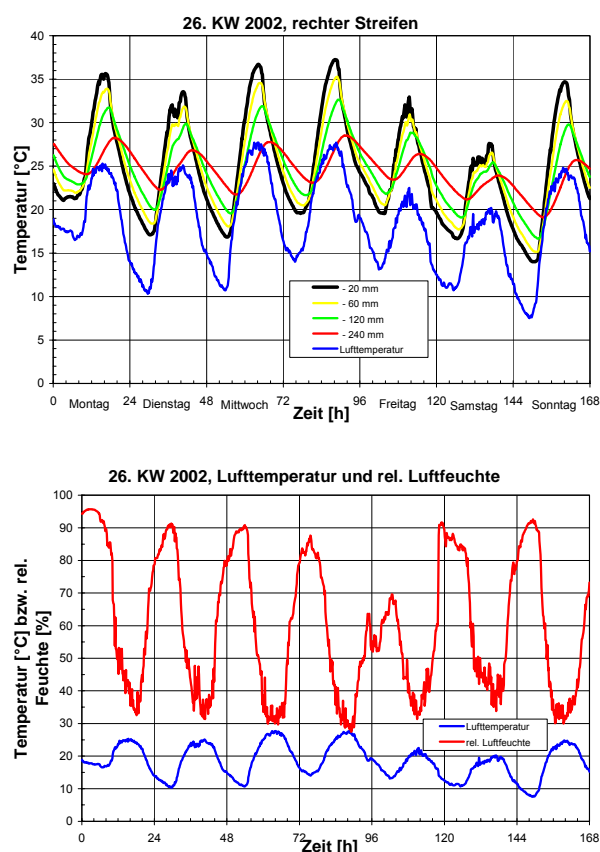


Bild 3.4: Beispiel für die wochenweise Darstellung der Messdaten in Excel-Dateien auf der beiliegenden CD-ROM
oben: Lufttemperatur und Temperaturgang in der Betondecke
unten: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte

Weiterhin wurden die Daten (Temperatur in der Fahrbahndecke, Lufttemperatur, Luftfeuchte) hinsichtlich der Maximal-, der Minimal und der Mittelwerte sowie hinsichtlich der Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Sensor in

der Fahrbahndecke im Tages-, Monats- und Jahresgang ausgewertet und für alle Jahre des Messzeitraums in Dateien zusammengefasst. Diese Jahresübersichten (1999 – 2005) enthält ebenfalls die CD-ROM.

3.2.2 Temperaturgang

An der Messstelle wurden neben dem Temperaturgang in der Fahrbahndecke auch die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte erfasst. Hinsichtlich der Einordnung dieser lokalen Klimadaten kann ein Vergleich mit den Daten der nächstgelegenen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes im Oberrheingraben vorgenommen werden. Dies sind die Stationen Mannheim und Karlsruhe, die nördlich bzw. südlich der Strecke gelegen sind. Für den Zeitraum von 1961 – 1990, d.h. für die klimatologische Bezugsperiode, sind die in der Tabelle 3.1 zusammengestellten Mittelwerte verfügbar (MÜLLER-WESTERMEIER, 1996).

In der Anlage 2 sind die täglichen Maximal- und Minimalwerte der Lufttemperatur für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Die Tabelle 3.2 enthält die Zusammenstellung der über ein Jahr gemittelten Daten und die Extremwerte, die an der Messstelle beobachtet wurden.

Das nachfolgend (Tabellen 3.2, 3.3, 3.4) angegebene mittlere tägliche Maximum mX bzw. Minimum mN der Temperatur ist dabei der Quotient aus der Summe der Tagesmaxima bzw. Tagesminima des Jahres und der Anzahl der Tage des Jahres. Der Quotient aus der Summe der Tagesmittelwerte und der Anzahl der Tage des Jahres liefert das mittlere tägliche Mittel mM . Der Tagesmittelwert berechnet sich als Quotient aus der Summe der Einzelwerte eines Tages und der Anzahl der registrierten Messwerte eines Tages (144 Messwerte). Berücksichtigt wurden bei der Berechnung dieser Daten nur die Jahre des Messzeitraums für die jeweils die kompletten Daten vom 01. Januar bis 31. Dezember vorliegen. Dementsprechend fehlen die Jahre 1999 (Daten ab 08.06.1999) und 2005 (Daten bis 08.06.2005).

Aus der Tabelle 3.2 erkennt man, dass die gemessenen mittleren Werte gegenüber den in der Tabelle 3.1 für die Bezugsperiode angegebenen Werten, etwas nach oben verschoben sind. Das absolute Temperaturmaximum der Bezugsperiode 1961-1990 wurde im Messzeitraum überschritten, das absolute Temperaturminimum aber nicht erreicht.

Tab. 3.1: Klimadaten der Stationen in Mannheim (nördlich der Messstelle) und Karlsruhe (südlich der Messstelle) für den Zeitraum 1961-1990 (MÜLLER-WESTERMEIER, 1996)

	Mannheim	Karlsruhe
mittlere tägliche Temperatur		
Maximum mTX / Minimum mTN [°C]		
Januar	3,8 / -1,4	3,8 / -1,4
Februar	6,0 / -0,7	6,0 / -0,7
März	10,5 / 1,9	10,7 / 1,9
April	15,0 / 4,9	15,1 / 4,9
Mai	19,7 / 9,0	19,7 / 8,9
Juni	22,8 / 12,2	22,8 / 12,2
Juli	24,8 / 13,8	25,2 / 14,0
August	24,6 / 13,6	24,8 / 13,8
September	21,1 / 10,6	21,2 / 10,6
Oktober	15,0 / 6,6	15,1 / 6,7
November	8,3 / 2,4	8,5 / 2,4
Dezember	4,7 / -0,4	4,8 / -0,4
gesamtes Jahr mTX / mTN	14,7 / 6,1	14,8 / 6,1
mittleres tägliches Temperaturmittel im Zeitraum 1961-1990 mTM [°C]	10,2	10,3
absolutes Temperaturmaximum xTX im Zeitraum 1961-1990 [°C]	36,7	38,5
absolutes Temperaturminimum xTN im Zeitraum 1961-1990 [°C]	-20,5	-20,0
mittlere jährliche Anzahl der Eistage (Temperaturmaximum < 0 °C) [d]	14	14
mittlere jährliche Anzahl der Frosttage (Temperaturminimum < 0 °C) [d]	66	68
mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (Temperaturmaximum ≥ 25 °C) [d]	51	53
mittlere relative Feuchte [%]	75	76
mittlere jährliche Niederschlagshöhe [mm]	668	770
mittlere jährliche Sonnenscheindauer [h]	1673	1691

Tab. 3.2: Jahresmittelwerte und -extremwerte der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchte im Messzeitraum

		2000	2001	2002	2003	2004	Mittel
Lufttemperatur [°C]	mX	16,2	16,2	16,2	17,2	16,1	16,4
	xX	34,8	34,8	36,4	39,8	33,7	35,9
	mN	7,3	7,1	7,2	6,4	6,6	6,9
	xN	-10,2	-14,9	-16,8	-13,1	-8,4	-12,7
	mM	11,8	11,5	11,6	11,6	11,2	11,5
relative Luftfeuchte [%]	mX	94	92	92	91	93	92
	xX	99	99	98	100	100	99
	mN	56	54	56	48	53	53
	xN	15	22	21	15	20	19
	mM	79	77	77	71	76	76
mX: mittleres tägliches Maximum xX: absolutes Maximum mN: mittleres tägliches Minimum xN: absolutes Minimum mM: mittleres tägliches Mittel							

Insgesamt gesehen lag der Messzeitraum in einer Periode mit einem tendenziell wärmeren Klima als in der Bezugsperiode 1961 - 1990 (vgl. Tabelle 3.1 und 3.2). Dies resultiert insbesondere daraus, dass das Jahr 2000 als das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts (1901 - 2000) eingestuft wird und im Jahr 2003 der heißeste Sommer in Süddeutschland seit Beginn der Aufzeichnung der Klimadaten im Jahr 1755 auftrat (MÜLLER-WESTERMEIER et al., 1999 - 2003). In Karlsruhe wurde mit 40,2 °C das absolute Temperaturmaximum für Deutschland am 9. und 13. August 2003 registriert. An der Messstelle trat ein absolutes Temperaturmaximum mit 39,8 °C am 13.08.2003 auf.

Weiterhin enthält die Tabelle 3.2 die über ein Jahr gemittelte rel. Luftfeuchte und deren Extremwerte. Der Gang der täglichen Maximal- und Minimalwerte der rel. Luftfeuchte ist in der Anlage 3 für den gesamten Messzeitraum zusammengestellt. Das mittlere tägliche Mittel der rel. Luftfeuchte lag in 4 von 5 Jahren mit 76 % bis 79 % etwas über dem Mittelwert der Bezugsperiode 1961-1990 (75 % bzw. 76 %). Auffällig ist die niedrige rel. Luftfeuchte im Jahr 2003. Der heiße Sommer war auch durch geringe Niederschlagsmengen gekennzeichnet, die in Süddeutschland zum Teil nur bei 50 bis 75 % des vieljährigen Mittels der Bezugsperiode von 1961 - 1990 lagen.

Die jeweils über ein Jahr gemittelten Daten zum Temperaturgang in der Fahrbahndecke sowie die Extremwerte sind in der Tabelle 3.3 zusammengefasst. In der Anlage 4 sind die täglichen Minimal- und Maximalwerte für jeden Sensor im rechten und mittleren Fahrstreifen für jeweils ein Jahr des Messzeitraums grafisch dargestellt. Diese Grafiken enthält auch die CD-ROM sowie darüber hinaus sämtliche Tagesdaten (Minimum, Maximum, Mittelwert) und eine nach Monaten getrennte Mittelwertbildung.

Aus der Tabelle 3.3 ist zu entnehmen, dass im mittleren Fahrstreifen größere Extremwerte als im rechten Fahrstreifen auftraten. Das absolute Maximum im Messzeitraum zeigte sich mit 43,9 °C und das absolute Minimum mit -12,9 °C jeweils im mittleren Fahrstreifen. Auch im mittleren Mittel (mM) unterscheiden sich die Fahrstreifen. Ein etwas höherer Wert ist für den rechten Fahrstreifen festzustellen. Als Ursache für dieses Phänomen ist der stärkere Verkehr, insbesondere der stärkere Schwerlastverkehr, im rechten Fahrstreifen anzunehmen, der eine stärkere Luftbewegung erzeugt und damit die Erwärmung des rechten Fahrstreifens im Sommer sowie dessen Abkühlung im Winter geringfügig vermindert.

Tab. 3.3: Jahresmittelwerte und -extremwerte der Temperatur in der Fahrbahndecke im Messzeitraum

Temperatur im:		2000	2001	2002	2003	2004	Mittel
rechten Fahrstreifen [°C] - 20 mm	mX	19,6	19,4	19,3	20,9	19,3	19,7
	xX	41,3	40,2	42,1	43,5	41,6	41,7
	mN	10,4	10,0	10,2	10,1	9,7	10,1
	xN	-7,3	-9,5	-12,4	-9,4	-5,2	-8,8
	mM	14,2	13,9	14,0	14,6	13,6	14,1
rechten Fahrstreifen [°C] - 60 mm	mX	18,2	18,1	18,1	19,5	18,0	18,4
	xX	38,6	37,9	39,7	41,2	39,2	39,3
	mN	11,0	10,6	10,8	10,8	10,3	10,7
	xN	-6,5	-8,3	-11,4	-8,4	-4,3	-7,8
	mM	14,1	13,8	13,9	14,5	13,6	14,0
rechten Fahrstreifen [°C] - 120 mm	mX	17,0	16,9	16,9	18,0	16,7	17,1
	xX	35,7	34,8	36,5	38,4	35,9	36,3
	mN	11,7	11,5	11,6	11,7	11,1	11,5
	xN	-5,4	-6,5	-10,0	-7,1	-3,1	-6,4
	mM	14,1	13,9	14,0	14,6	13,7	14,1
rechten Fahrstreifen [°C] - 240 mm	mX	15,6	15,3	15,5	16,5	15,7	15,7
	xX	31,0	30,6	31,4	34,1	31,6	31,7
	mN	12,7	12,5	12,6	13,2	12,7	12,7
	xN	-3,5	-3,6	-7,4	-4,6	-1,9	-4,2
	mM	14,1	13,8	13,9	14,8	14,2	14,2
mittleren Fahrstreifen [°C] - 15 mm	mX	19,8	19,5	19,5	21,0	19,4	19,8
	xX	42,1	40,7	42,9	43,9	42,0	42,3
	mN	9,8	9,5	9,6	9,5	9,0	9,5
	xN	-8,4	-9,9	-12,9	-9,8	-5,4	-9,3
	mM	13,9	13,6	13,7	14,2	13,2	13,7
mittleren Fahrstreifen [°C] - 55 mm	mX	18,4	18,2	18,2	19,6	18,0	18,5
	xX	39,3	38,2	40,1	41,5	39,3	39,7
	mN	10,7	10,4	10,5	10,5	10,0	10,4
	xN	-7,3	-8,5	-11,7	-8,6	-4,2	-8,1
	mM	14,1	13,8	13,9	14,4	13,4	13,9
mittleren Fahrstreifen [°C] - 115 mm	mX	16,8	16,6	16,6	17,7	16,3	16,8
	xX	35,7	34,6	36,3	38,1	35,4	36,0
	mN	11,4	11,0	11,1	11,3	10,6	11,1
	xN	-6,3	-6,8	-10,4	-7,3	-3,5	-6,9
	mM	13,5	13,2	13,3	13,8	12,9	13,3
mittleren Fahrstreifen [°C] - 235 mm	mX	15,5	15,2	15,2	16,0	14,9	15,4
	xX	31,4	30,6	31,5	34,1	31,2	31,8
	mN	12,3	12,0	12,1	12,4	11,5	12,1
	xN	-4,3	-4,1	-7,9	-5,1	-3,3	-4,9
	mM	13,8	13,5	13,6	14,1	13,1	13,6
mX: mittleres tägliches Maximum xX: absolutes Maximum mN: mittleres tägliches Minimum xN: absolutes Minimum mM: mittleres tägliches Mittel							

Weiterhin ist zu erkennen, dass die jahreszeitliche Spannweite (Sommer - Winter) zwischen der Maximal- und Minimaltemperatur mit zunehmender Tiefe abnimmt. Betrachtet man die Mittelwerte der Jahre 2000 - 2004, so verringert sie sich zwischen absolutem Maximum und absolutem Minimum von ca. 51 K (42 °C bis -9 °C) am oberen Sensor auf ca. 37 K (32 °C bis -5 °C) am unteren Sensor und zwischen mittlerem täglichem Maximum und mittlerem täglichem Minimum von ca. 10 K (20 °C bis 10 °C) am oberen Sensor auf ca. 3 K (15,5 °C bis 12,5 °C) am unteren Sensor. Die Maximalwerte

(mittlere und absolute) sinken dabei mit zunehmender Tiefe und die Minimalwerte (mittlere und absolute) steigen leicht an.

In den Bildern 3.5 und 3.6 sind die Häufigkeitsverteilungen der Maximal- und Minimaltemperaturen am oberen bzw. unteren Sensor in der Fahrbahndecke dargestellt.

Zugrunde liegen den Bildern 3.5 und 3.6 die maximale und die minimale Temperatur, die jeweils an den Tagen eines Zeitraums von 6 Jahren, beginnend mit dem Start der Messungen am 08.06.1999 bis zum 07.06.2005, auftraten.

Es zeigt sich, dass das mittlere tägliche Maximum und das mittlere tägliche Minimum nach Tabelle 3.3 nicht in den Temperaturbereichen liegen, die am häufigsten auftreten, sondern jeweils genau zwischen den zwei ausgeprägten Peaks der Häufigkeitsverteilungen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrstreifen besteht hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens einzelner Temperaturbereiche nicht.

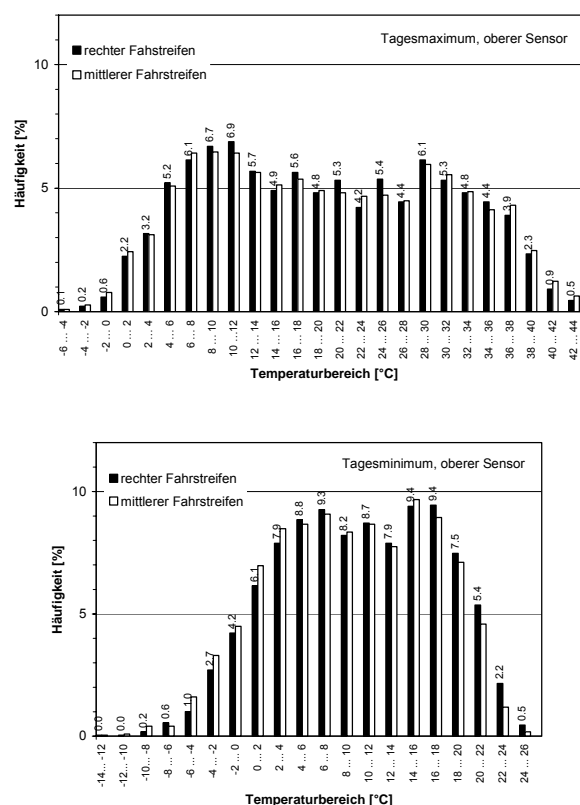


Bild 3.5: Häufigkeitsverteilung der Temperaturen am oberen Sensor in der Fahrbahndecke (-20 bzw. -15 mm) im Zeitraum vom 08.06.1999 bis 07.06.2005 (6 Jahre)
oben: Tagesmaximum
unten: Tagesminimum

Ansatzweise ist aus dem Bild 3.5 zu erkennen, dass im mittleren Fahrstreifen Temperaturen über 36 °C bei den Tagesmaxima und Temperaturen unter 4 °C bei den Tagesminima etwas häufiger auftreten als im rechten Fahrstreifen, was auch auf den Einfluss des stärkeren Schwerlastverkehrs im rechten Fahrstreifen, verbunden mit einer stärkeren Luftbewegung, hindeutet.

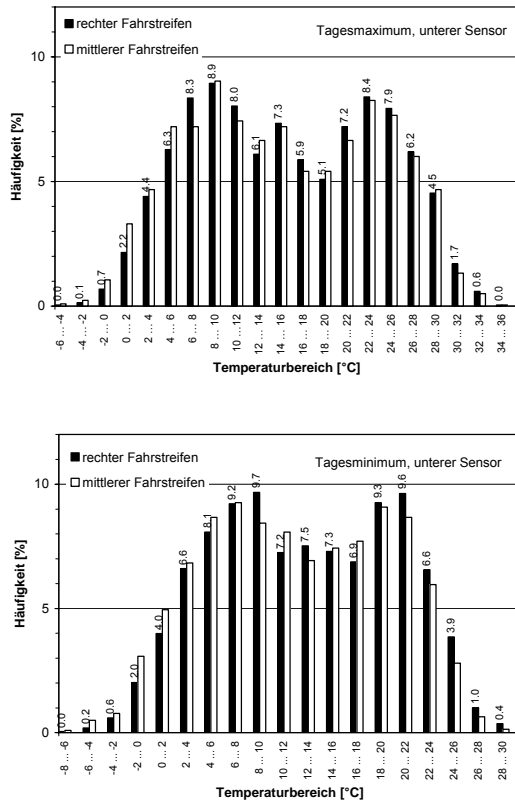


Bild 3.6: Häufigkeitsverteilung der Temperaturen am unteren Sensor in der Fahrbahndecke (-240 bzw. -235 mm) im Zeitraum vom 08.06.1999 bis 07.06.2005 (6 Jahre)
oben: Tagesmaximum
unten: Tagesminimum

3.2.3 Temperaturgradient

Gleichmäßige Temperaturänderungen über den gesamten Querschnitt der Fahrbahndecke führen zu Längsspannungen bzw. horizontalen Längenänderungen der Fahrbahnplatten. Veränderungen der Fugenbreiten ("Fugenatmung") sind ein sichtbares Zeichen für diesen Vorgang. LEYKAUF und BIRMANN (2001) ermittelten, dass die horizontale temperaturbedingte Fugenbewegung 0,016 bis 0,040 mm/K, bezogen auf die Temperaturänderung in der Plattenmitte, betragen kann.

Ungleichmäßige Temperaturänderungen führen zu Wölbspannungen bzw. Verwölbungen der Platten. Eine stärkere Erwärmung der Oberseite der Fahrbahnplatte (positiver Temperaturgradient) kann folglich zu einer konvexen (nach außen bzw. nach oben gewölbten) und eine stärkere Abkühlung der Oberseite der Fahrbahnplatte (negativer Temperaturgradient) zu einer konkaven Verformung (Aufschüsselung) führen. Inwieweit sich solche Verformungen der Fahrbahnplatte tatsächlich einstellen, hängt neben den Eigenschaften der Tragschicht und dem Verbund zwischen den Schichten auch wesentlich von den Erhärtungsbedingungen des Fahrbahnbetons ab (EISENMANN und LEYKAUF, 1991).

Messungen von LEYKAUF und BIRMANN (2001) ergaben, dass die relative konvexe Verformung (Aufwölbung) zwischen der Plattenmitte und den Plattenecken 0,015 bis 0,020 mm/K, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen der Plattenober- und -unterseite, betragen kann.

Als Maß für die ungleichmäßige Erwärmung von Betonfahrbahnen wird allgemein der Temperaturgradient Δt herangezogen (z.B. EISENMANN und LEYKAUF, 2003).

Für die Ermittlung der täglichen Extremwerte des Temperaturgradienten wurde im vorliegenden Fall die Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Sensor für jeden Messzeitpunkt (144 pro Tag) berechnet. Da der Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Sensor in beiden Fahrstreifen einheitlich ist, ergibt sich der Temperaturgradient [K/mm] als Quotient aus der Temperaturdifferenz ΔT und dem Abstand von 220 mm.

Die täglichen Extremwerte der Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Sensor sind in der Anlage 5 für den gesamten Messzeitraum grafisch dargestellt sowie auch auf der CD-ROM abgelegt.

Tabelle 3.4 enthält eine Zusammenstellung der Jahreswerte.

Tab. 3.4: Jahresmittelwerte und -extremwerte der Temperaturdifferenz ΔT zwischen dem oberen und dem unteren Sensor im Messzeitraum

Temperaturdifferenz ΔT im:			2000	2001	2002	2003	2004	Mittel
rechten Fahrstreifen [K]	mX	5,4	5,4	5,3	6,0	5,2	5,5	
	xX	14,2	13,3	13,7	14,0	14,2	13,9	
	mN	-3,0	-3,1	-3,1	-3,9	-3,9	-3,4	
	xN	-7,0	-6,8	-6,4	-7,2	-7,6	-7,0	
	mM	0,1	0,1	0,0	-0,2	-0,5	-0,1	
mittleren Fahrstreifen [K]	mX	5,9	6,0	5,9	6,9	6,4	6,2	
	xX	14,6	13,7	14,3	14,9	17,4	15,0	
	mN	-3,3	-3,3	-3,2	-3,8	-3,5	-3,4	
	xN	-7,4	-7,1	-6,7	-7,4	-7,1	-7,1	
	mM	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	

mX: mittleres tägliches Maximum
 xX: absolutes Maximum
 mN: mittleres tägliches Minimum
 xN: absolutes Minimum
 mM: mittleres tägliches Mittel

Aus der Tabelle 3.4 ist zu ersehen, dass die Schwankungen zwischen den Jahren gering sind und die Fahrstreifen sich in der positiven Temperaturdifferenz unterscheiden.

Weiterhin ist aus der Tabelle 3.4 zu erkennen, dass im mittleren Fahrstreifen, in dem auch das absolute Maximum im gesamten Messzeitraum auftrat ($\Delta T = 17,4$ K bzw. $\Delta t = 0,079$ K/mm), die Temperaturdifferenz etwas größer ist als im rechten Fahrstreifen. Dementsprechend beträgt das über die Jahre 2000 - 2004 gemittelte absolute Maximum xX (größter positiver Temperaturgradient) im rechten Fahrstreifen $\Delta t = 0,063$ K/mm ($\Delta T = 13,9$ K) und im mittleren Fahrstreifen $\Delta t = 0,068$ K/mm ($\Delta T = 15,0$ K). Das über die Jahre 2000 - 2004 gemittelte absolute Minimum xN (größter negativer Temperaturgradient) unterscheidet sich in den Fahrstreifen kaum und beträgt $\Delta t = -0,032$ K/mm ($\Delta T = -7,0$ bzw. $-7,1$ K). In der Mehrzahl der Jahre waren die extremen negativen Temperaturdifferenzen im mittleren Fahrstreifen größer. Das absolute Minimum im gesamten Messzeitraum trat aber im rechten Fahrstreifen auf ($\Delta T = -7,6$ K bzw. $\Delta t = -0,035$ K/mm).

Der größte tägliche positive Temperaturgradient, der Jahre 2000 - 2004, d.h. das mittlere tägliche Maximum mX, liegt mit $0,025$ K/mm ($\Delta T = 5,5$ K) bzw. $0,028$ K/mm ($\Delta T = 6,2$ K) bei 40 % des größten positiven Temperaturgradienten (absolutes Maximum xX 2000 - 2004). Für den größten täglichen negativen Temperaturgradienten, d.h. das mittlere tägliche Minimum mN, ergibt sich ein Wert von 48 % des größten negativen Temperaturgradienten (absolutes Minimum xN 2000 - 2004) bzw. $0,016$ K/mm.

Hinsichtlich der Beanspruchung der Fahrbahndecke ist die Häufigkeit des Auftretens der Temperaturgradienten von Bedeutung. Für die Berechnung der Häufigkeitsverteilung wurde ein Zeitraum von 6 Jahren zugrunde gelegt. Dieser Zeitraum beginnt mit dem Start der Messungen am 08.06.1999 und endet am 07.06.2005.

Das Ergebnis ist im Bild 3.7 dargestellt. Zugrunde gelegt wurde die größte positive und die größte negative Temperaturdifferenz, die an den Tagen des betrachteten Zeitraums jeweils auftrat. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass in der Regel an einem Tag ein positiver Wert (Tag) und ein negativer Wert (Nacht) auftreten. Es gibt aber auch einzelne Ausnahmen, bei denen die Temperaturdifferenz am gesamten Tag nicht das Vorzeichen wechselt (vgl. Anlage 5). Für diese Tage wurde nur ein Wert in die Häufigkeitsbetrachtungen einbezogen, und zwar der mit dem größten Betrag.

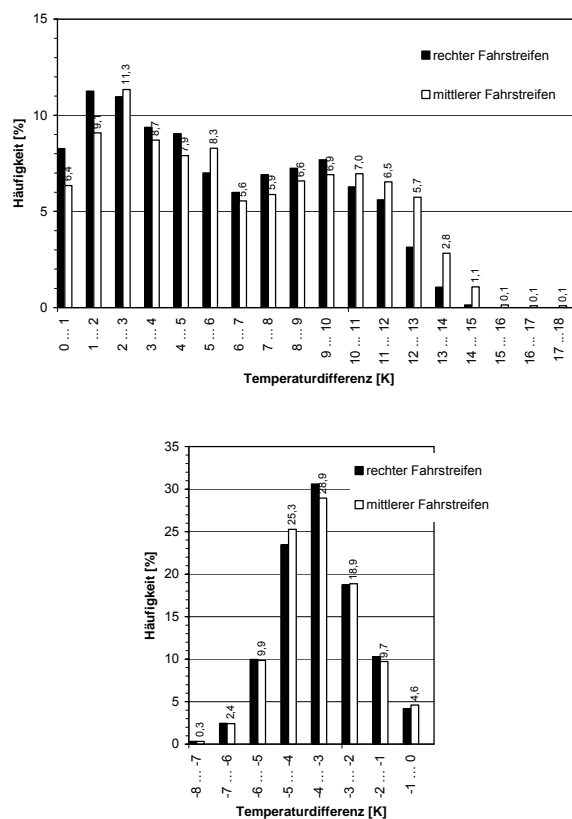


Bild 3.7: Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Sensor im Zeitraum vom 08.06.1999 bis 07.06.2005 (6 Jahre)

oben: positive Werte (Oberseite wärmer)

unten: negative Werte (Oberseite kälter)

Es zeigt sich, dass das mittlere tägliche Minimum (Tabelle 3.4) mit der am häufigsten auftretenden negativen Temperaturdifferenz übereinstimmt. Beim mittleren täglichen Maximum trifft dies nicht zu. Das Auftreten von Werten bei 5,5 K bzw. 6,2 K (Tabelle 3.4) liegt bei einer Häufigkeit von etwa 6 bzw. 7 %. Am häufigsten wurden positive Temperaturdifferenzen von 1 ... 2 K und 2 ... 3 K (11 %) beobachtet. Weiterhin ist zu erkennen, dass im mittleren Fahrstreifen große positive Temperaturdifferenzen (ab 10 K) häufiger auftreten als im rechten Fahrstreifen. Positive Temperaturdifferenzen ab 15 K ($\Delta t \geq 0,07$ K/mm) waren mit Häufigkeiten $< 0,1$ % sehr selten (je Klasse höchstens zwei Ereignisse in 6 Jahren).

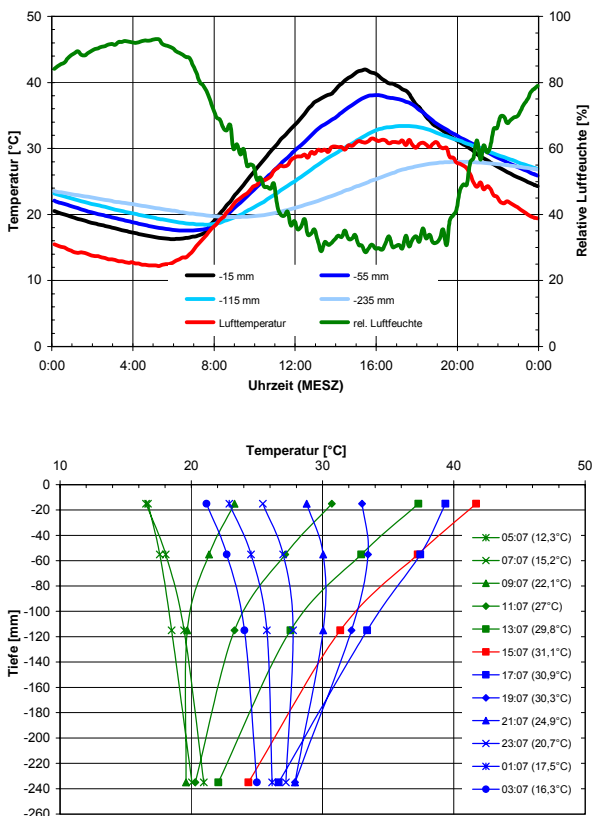


Bild 3.8: Größter positiver Temperaturgradient im Messzeitraum

$\Delta t = 0,079$ K/mm ($\Delta T = 17,4$ K)

oben: Temperaturgang am 08. Juni 2004 (24. KW) in der Fahrbahndecke (mittlerer Fahrstreifen)

unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz); rechts: Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern

Die Entwicklung des größten positiven Temperaturgradienten im gesamten Messzeitraum zeigt das Bild 3.8. Hinsichtlich der klimatischen Bedingungen entstand dieser positive Temperaturgradient in einer mehrtägigen Phase des Anstiegs der Lufttemperatur am Tage von 20 °C auf über 30 °C im Juni 2004 (24. KW). In der Nacht kühlte sich die Lufttemperatur in dieser Woche im Mittel bis auf etwa 10 °C ab. Im Tagesgang änderte sich die Temperatur am oberen Sensor um bis zu 26 K.

Insgesamt traten in den Jahren 2000 - 2004 die größten positiven Temperaturgradienten stets im Mai und Juni bei vergleichbaren klimatischen Bedingungen auf (frühe Sommerperioden).

Aus dem Bild 3.8 erkennt man auch, dass der Verlauf des Temperaturgradienten nicht linear ist. Im oberen Bereich, d.h. bis etwa zur Mitte der Betondecke, ist der Gradient größer ($\Delta t = 0,1$ K/mm) als im unteren Bereich der Fahrbahndecke ($\Delta t = 0,06$ K/mm).

Bild 3.9 zeigt den größten negativen Temperaturgradient bei warmer Witterung im gesamten Messzeitraum. Dieser trat in einer Phase mit deutlicher Abkühlung der Lufttemperatur im Mai 2004 (21. KW) auf. Vorausgegangen waren mehrere warme Tage mit Lufttemperaturen am Tage von ca. 26 °C (Nacht ca. 10 °C). Danach folgte eine Abkühlung am Tage auf 15 °C und in der Nacht bis auf 2 °C.

Im Bild 3.10 ist der größte negative Temperaturgradient bei einer Frosteinwirkung (1. März 2005, 9. KW) im gesamten Messzeitraum dargestellt. Die Temperaturdifferenz von -7,6 K entspricht exakt dem Wert, der am 23. Mai 2004 bei warmer Witterung auftrat.

Insgesamt wurden in den Jahren 1999 - 2004 die größten negativen Temperaturgradienten aber überwiegend im Mai, Juni und August beobachtet. Die klimatischen Bedingungen waren dabei insbesondere durch eine stärkere Abkühlung in der Nacht gegenüber den vorangegangenen Nächten gekennzeichnet (Ende von frühen bzw. späten Sommerperioden).

Sämtliche Extremwerte, die in den Jahren des Messzeitraumes auftraten, sind in der Anlage 6 für den rechten und den mittleren Fahrstreifen grafisch dargestellt. Diese Bilder enthalten stets den Temperaturgang des Tages in der Fahrbahndecke und die Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (positive und negative Temperaturgradienten).

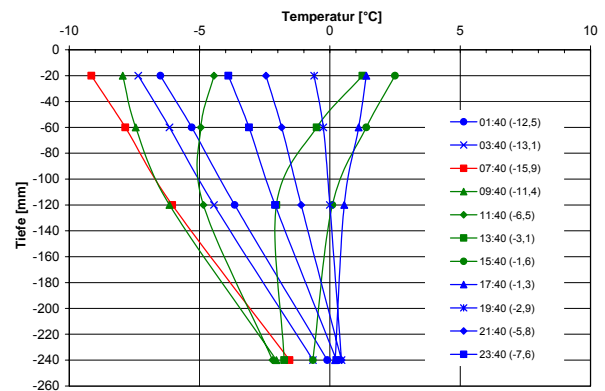
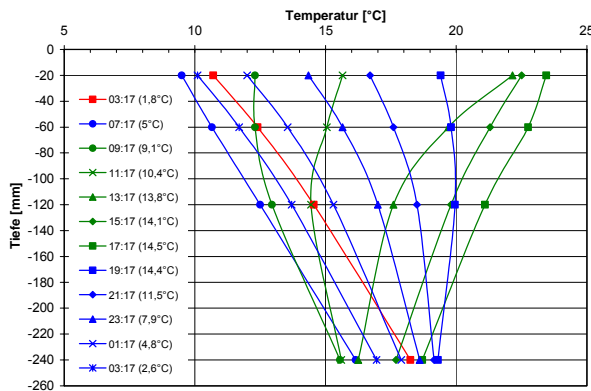
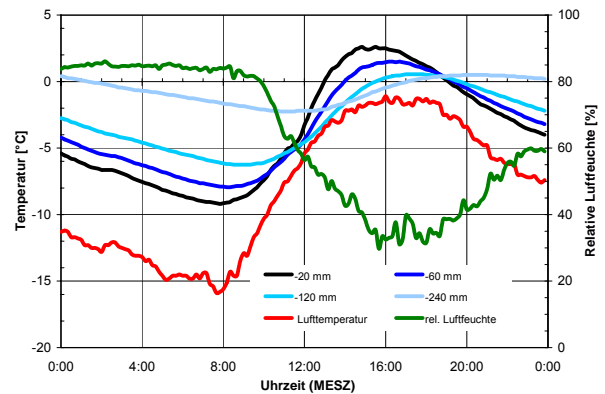
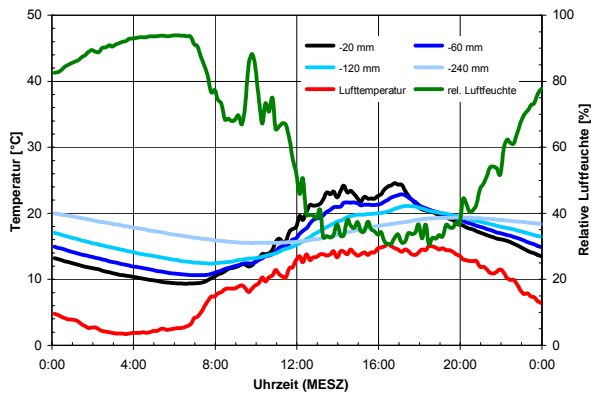


Bild 3.9: Größter negativer Temperaturgradient im Messzeitraum bei warmer Witterung

$$\Delta t = -0,035 \text{ K/mm} (\Delta T = -7,6 \text{ K})$$

oben: Temperaturgang am 23. Mai 2004 (21. KW) in der Fahrbahndecke (rechter Fahrstreifen)

unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz); rechts: Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern

Bild 3.10: Größter negativer Temperaturgradient im Messzeitraum bei Frosteinwirkung

$$\Delta t = -0,035 \text{ K/mm} (\Delta T = -7,6 \text{ K})$$

oben: Temperaturgang am 1. März 2005 (9. KW) in der Fahrbahndecke (rechter Fahrstreifen)

unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz); rechts: Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern

3.2.4 Hitzebeanspruchung

Infolge einer Hitzebeanspruchung können hohe Druckspannungen entstehen. Eine Überbeanspruchung von raumfugenlosen Betonfahrbahnen in Form eines Ausknickens bzw. "blow-up" ist dabei relativ selten und tritt zumeist nur in Kombination mit anderen Einflussfaktoren auf, die die Kraftübertragung in der Betondecke ungünstig beeinflussen. Dazu zählen insbesondere Querschnittsänderungen, hervorgerufen z.B. durch ungünstig ausgebildete Fugen oder Ausbesserungen in Asphaltbauweise.

Im Jahr 2003 war der Sommer extrem heiß. In Süddeutschland war es der heißeste Sommer seit Beginn der Klimamessungen in Deutschland. Hinsichtlich der Sonnenscheindauer gab es im Jahr 2003 nur überdurchschnittliche Monate. Die Globalstrahlung überschritt im Gebiet der Messstelle 1300 kWh/m² und lag damit über dem Flächenmittel der Globalstrahlung für das Bundesgebiet im Jahr 2003 von 1170 kWh/m² sowie deutlich über dem vieljährigen Flächenmittel von 1037 kWh/m² (MÜLLER-WESTERMEIER, 1999-2003).

Dementsprechend wurde im Jahr 2003 auch die absolut höchste Temperatur in der Fahrbahndecke erreicht. Den Temperaturgang in der Woche mit diesem Extremwert zeigt das Bild 3.11. Am Freitag dieser Woche erreichte die Temperatur am oberen Sensor des mittleren Fahrstreifens 43,9 °C.

Den Temperaturgang an diesem heißesten Tag und die Entwicklung des Temperaturgradienten zeigt das Bild 3.12. Die größte Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Sensor betrug an diesem Tag 12,9 K. Damit erreichte der Temperaturgradient einen hohen Wert (0,056 K/mm), blieb aber unter dem im Abschnitt 3.2.3 dargestellten höchsten positiven Temperaturgradienten (vgl. Bild 3.8).

Die Erwärmungsrate der Betondecke, d.h. der zeitbezogene Temperaturanstieg, erreichte im Zeitraum zwischen 9:00 Uhr und 11:00 Uhr am oberen Sensor 3,85 K/h (Bild 3.12). Übertroffen wurde dieser an vergleichbaren Tagen oft zu beobachtende Wert nur am 08. Juni 2004 mit 4,15 K/h.

Die Erwärmungsrate der Lufttemperatur war am 08. August 2003 anfangs (7:00 - 9:00 Uhr) etwas größer als die der Betondecke. Danach erwärmte sich die Luft bis zum Tagesmaximum langsamer als die Betondecke. Diese Entwicklung ist typisch für warme Tage mit starker Sonneneinstrahlung.

Extreme Hitzebeanspruchungen traten insgesamt in den Monaten Juni, Juli und bis Mitte August auf. In der Anlage 7 sind die stärksten Erwärmungen

der Betondecke für jedes Jahr des Messzeitraums zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass die größte Erwärmung und der größte positive Temperaturgradient gemeinsam auftreten können, wie z.B. am 08. Juni 2004 geschehen, häufig aber zeitlich getrennt sind.

Die höchste Temperatur der Betondecke im Jahr 1999 mit 38,5 °C (oberer Sensor) entwickelte sich am Tag nach dem Betoneinbau (Anlage 7, Bilder 1 und 2). Hierbei überlagerten sich die Wärmefreisetzung infolge der Hydratation des Zements und die Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung.

Aus dem Temperaturverlauf während der Erhärtungsphase nach dem Betoneinbau am 08. Juni 1999 (ab 14:10 Uhr) kann grob abgeschätzt werden, bei welcher Temperatur der Querschnitt der Betondecke im Bereich der Messstelle spannungsfrei bleibt. Realistisch erscheint dabei die Annahme der Temperaturverteilung, die in den frühen Morgenstunden des 09. Juni 1999 zwischen Mitternacht (0.00 Uhr) und 6.00 Uhr auftrat.

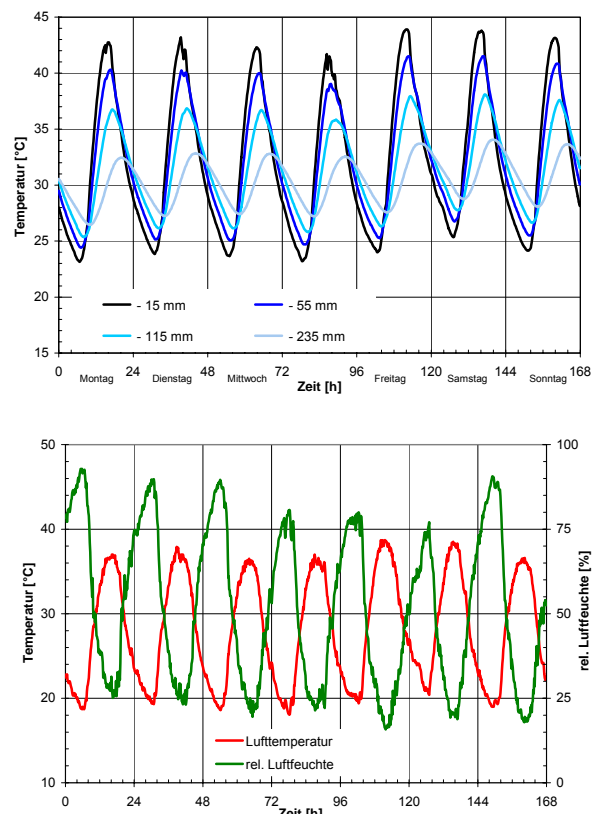


Bild 3.11: Größte Erwärmung im Messzeitraum, Temperaturgang in der 32. KW 2003

oben: Temperatur in der Fahrbahndecke (mittlerer Fahrstreifen) in unterschiedlichen Tiefen
unten: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte

Dabei betrug die Temperatur im rechten Fahrstreifen am oberen Sensor ca. 23 °C und am unteren Sensor ca. 29 °C sowie im mittleren Fahrstreifen am oberen Sensor ca. 21 °C und am unteren Sensor ca. 27 °C (vgl. 23. KW 1999).

Ausgehend von dieser Annahme (negativer Nullspannungstemperaturverlauf in der Betondecke an der Messstelle) führen folglich Temperaturprofile mit höheren Temperaturen als zu diesem Zeitpunkt zu Druckspannungen bzw. zur Ausdehnung und niedrigere Temperaturen zu Zugspannungen bzw. zur Verkürzung der betroffenen Fasern der Betondecke.

Es muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass diese Abschätzung des Nullspannungstemperaturverlaufs eine grobe Annahme darstellt, da parallel zur Temperaturmessung weder Spannungs- noch Verformungsmessungen erfolgten.

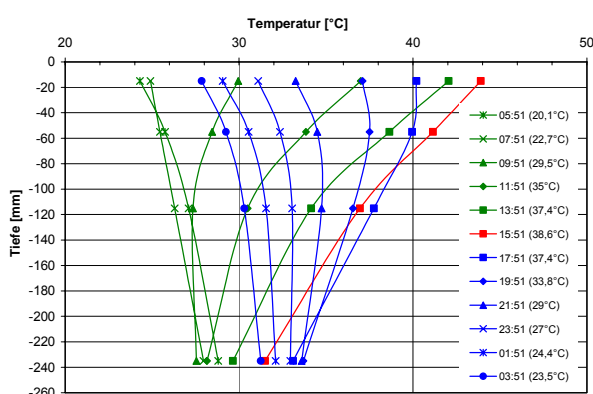
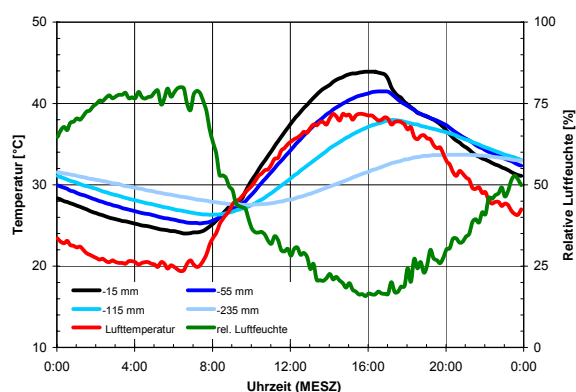


Bild 3.12: Größte Erwärmung im Messzeitraum

oben: Temperaturgang am 08. August 2003 (32. KW) in der Fahrbahndecke (mittlerer Fahrstreifen)

unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur am oberen Sensor); rechts: Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern

3.2.5 Temperaturschock

Wird eine stark erwärmte Fahrbahndecke aus Beton innerhalb kurzer Zeit abgekühlt, z.B. durch einen Gewitterregen oder durch einen Hagelschauer, so entsteht an der Oberseite ein ausgeprägter negativer Temperaturgradient. Infolge des ausgeprägten nichtlinearen Verlaufs der Temperatur über den Querschnitt entwickeln sich dabei auch Eigenspannungen. Diese Spannungen können unter ungünstigen Randbedingungen die Zugfestigkeit des Betons erreichen und zur Rissbildung an der Oberfläche führen. Ungünstige Randbedingungen liegen vor, wenn die Betondecke bei hohen Temperaturen (positiver Nullspannungstemperaturverlauf) erhärtet und sich somit bei der Erwärmung vor einem Temperaturschock (schnelle Abkühlung) keine nennenswerten Druckspannungen in der Fahrbahndecke entwickeln. Die Folge ist, dass der entstehende negative Temperaturgradient sofort zu Zugspannungen führt.

Aus den Daten des Messzeitraums wurden die Tage ermittelt an denen eine starke Abkühlung der Betondecke auftrat, um die Abkühlung und die entstehenden negativen Temperaturgradienten zu quantifizieren. In der Anlage 8 sind die Tage mit den größten schockartigen Abkühlraten der Oberseite der Betondecke für jedes Jahr des Messzeitraums zusammengestellt. Die dort angegebenen Abkühlraten beziehen sich auf den Zeitraum vom Beginn des ausgeprägten Abfalls der Lufttemperatur bis zum Tiefpunkt, der meistens nach etwa einer halben Stunde erreicht wurde.

Das Bild 3.13 zeigt den Tag des Messzeitraums, an dem sich die größte Abkühlrate nach einer sommerlichen Erwärmung einstellte. Innerhalb von 10 Minuten (von 15:56 bis 16:06 Uhr) sank die Temperatur am oberen Sensor des mittleren Fahrstreifens von 35,1 °C auf 28,8 °C, d.h. mit einer Abkühlrate von 38 K/h. Betrachtet man den Zeitraum vom Beginn des Abfalls der Lufttemperatur bei 30,9 °C (15:26 Uhr) bis zum Tiefpunkt bei 17,3 °C (16:06 Uhr), so ergibt sich eine Abkühlrate für die Lufttemperatur von 20,4 K/h. Ausgelöst wurde der Temperaturschock in diesem Zeitraum durch einsetzenden Niederschlag, was anhand der schnell ansteigenden rel. Luftfeuchte von 52 % auf 90 % erkennbar ist.

Infolge der Abkühlung bildete sich an der Oberseite der Fahrbahn kurzzeitig ein extremer negativer Temperaturgradient aus. Folgende maximale Temperaturdifferenzen traten um 16:06 Uhr auf (Bild 3.13):

- zwischen den oberen Sensoren bei - 15 mm und -55 mm $\Delta T = -5,25 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,131 \text{ K/mm}$),

- zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Sensor bei - 15 mm $\Delta T = -11,45 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,76 \text{ K/mm}$) bzw. dem Sensor bei - 55 mm $\Delta T = -16,7 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,30 \text{ K/mm}$), jeweils unter der Annahme einer Oberflächentemperatur der Fahrbahn, die mit der gemessenen Lufttemperatur von $17,3 \text{ }^\circ\text{C}$ übereinstimmt.

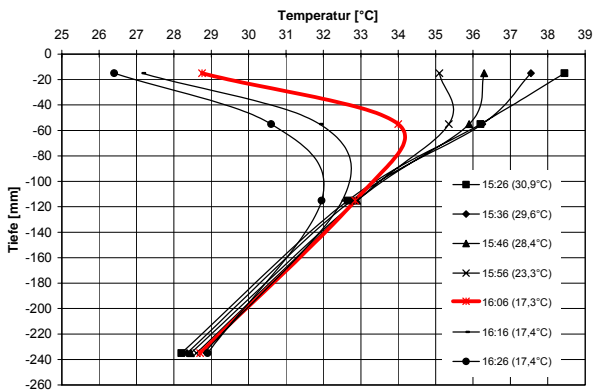
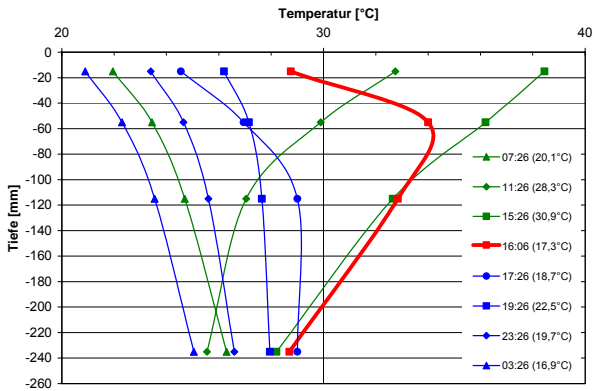
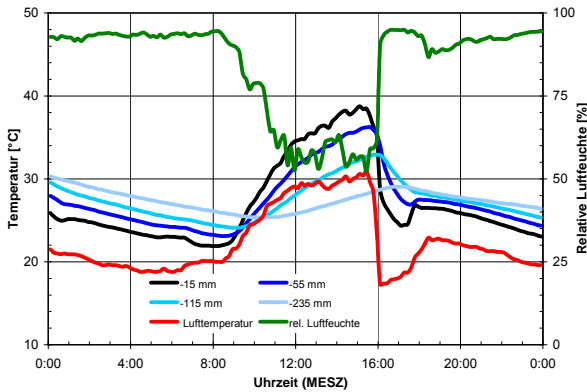


Bild 3.13: Größter Temperaturschock im Messzeitraum
oben: Temperaturgang am 20. Juni 2002 (25. KW) im mittleren Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf); rechts: Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern
unten: Detail, Zeitraum von 15:26 bis 16:26 Uhr

Diese kurzfristig auftretenden Temperaturgradienten übersteigen die in den Abschnitten 3.2.3 und 3.2.4 dargestellten Gradienten infolge einer mehrstündigen Erwärmung bzw. Abkühlung im Tagesgang deutlich. Inwieweit sich dabei Zugspannungen an der Oberfläche ausbilden können hängt wesentlich vom eingprägten Nullspannungstemperaturverlauf ab.

Hinsichtlich der schockartigen Abkühlung einer im Sommer (Juni, Juli, August) stark erwärmten Fahrbahndecke, z.B. durch einen Gewitterregen oder Hagel, ist anhand der vorliegenden Messungen davon auszugehen, dass die Oberflächentemperatur nicht unter die jeweils gemessene Lufttemperatur absinkt. Bei dem im Bild 3.13 dargestellten Ereignis betrug die minimale Lufttemperatur $17,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Auch bei einem weiteren vergleichbaren Ereignis am 01. Juli 2000 (26. KW) sank die Lufttemperatur nicht unter $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ab.

Eine schockartige Abkühlung in der kalten Jahreszeit und den dabei auftretenden Temperaturgang zeigt die Anlage 8, Bilder 5 und 6, für den 01. März 2000. An diesem Tag sank innerhalb von 10 Minuten (von 15:51 bis 16:01 Uhr) die Temperatur am oberen Sensor des mittleren Fahrstreifens von $10,2 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $6,8 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. mit einer Abkühlrate von 20 K/h . Betrachtet man den Zeitraum vom Beginn des Abfalls der Lufttemperatur bei $9,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (15:41 Uhr) bis zum Tiefpunkt bei $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (16:11 Uhr), so ergibt sich eine Abkühlrate für die Lufttemperatur von 17 K/h . Ausgelöst wurde der Temperaturschock in diesem Zeitraum auch durch einsetzenden Niederschlag, was auch hier anhand der schnell ansteigenden rel. Luftfeuchte von $62 \text{ } \%$ auf $97 \text{ } \%$ erkennbar ist.

Infolge der Abkühlung bildete sich am 01. März 2000 an der Oberseite der Fahrbahn kurzzeitig ein extremer negativer Temperaturgradient aus. Folgende maximale Temperaturdifferenzen traten um 16:01 Uhr auf (vgl. Anlage 8):

- zwischen den oberen Sensoren bei - 15 mm und -55 mm $\Delta T = -3,1 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,078 \text{ K/mm}$),
- zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Sensor bei - 15 mm $\Delta T = -5,1 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,34 \text{ K/mm}$) bzw. dem Sensor bei - 55 mm $\Delta T = -8,15 \text{ K}$ ($\Delta t = -0,15 \text{ K/mm}$), unter der Annahme einer Oberflächentemperatur der Fahrbahn, die mit der gemessenen Lufttemperatur von $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$ übereinstimmt.

3.2.6 Frostbeanspruchung

Eine Betonfahrbahn unterliegt in der kalten Jahreszeit infolge der hohen Wassersättigung und der Verwendung von Tausalz im Winterdienst einer Beanspruchung, die der Expositionsklasse XF4 nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 zuzuordnen ist.

Anhand der Daten des Messzeitraums (6 Winter) wurden im Zusammenhang mit der Frostbeanspruchung die Eis- und Frosttage, die Häufigkeitsverteilung der dabei zu beobachtenden Minimal- und Maximaltemperaturen der Lufttemperatur und die Anzahl der Nulldurchgänge der Temperatur an den oberen Sensoren (vgl. Bild 3.2) in den Fahrstreifen sowie die dabei auftretenden Abkühl- und Auftausraten ermittelt.

Beispiele für die Frostbeanspruchung der Fahrbahndecke zeigt das Bild 3.14.

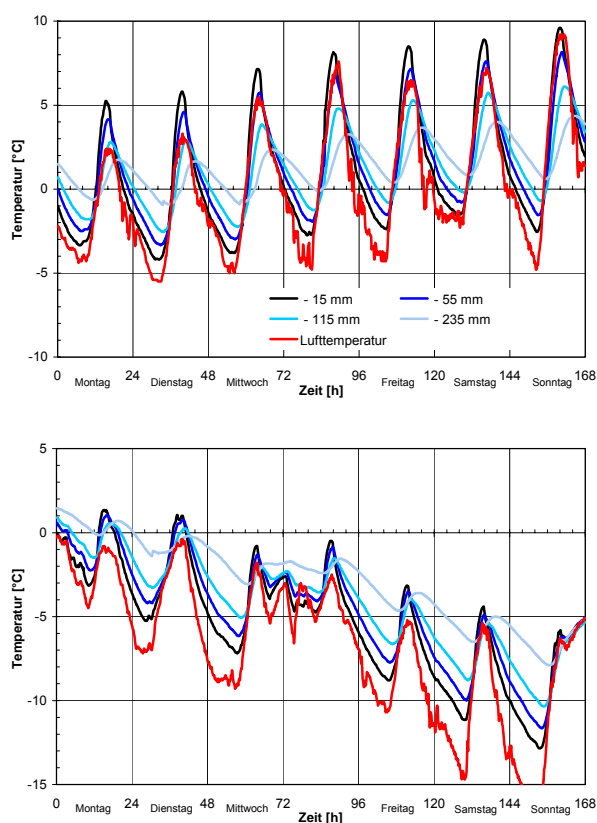


Bild 3.14: Frostbeanspruchung im Messzeitraum

oben: Temperaturgang in der 8. KW 2003 mit häufigen Frost-Tauwechseln in der Fahrbahndecke (mittlerer Fahrstreifen)

unten: Temperaturgang in der 1. KW 2002 mit der tiefsten Temperatur im Messzeitraum

Im Bild 3.14 ist eine Woche mit einer großen Anzahl von Nulldurchgängen der Lufttemperatur (Anzahl: 15) und am oberen Sensor (Anzahl: 13, in einer Tiefe von -15 mm) sowie die Woche, in der die tiefste Temperatur registriert wurde (Luft und Fahrbahn), dargestellt.

Insgesamt ist festzustellen, dass im Messzeitraum keine extreme Frostbeanspruchung auftrat. Die niedrigste Lufttemperatur lag bei $-16,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ und damit deutlich unter dem absoluten Minimum, das vom DWD für die Stationen Karlsruhe bzw. Mannheim für die Bezugsperiode von 1961 bis 1990 mit $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben wird (vgl. Tabelle 3.1).

Das Bild 3.15 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximaltemperatur der Luft an den Frost- und Eistagen. Daraus erkennt man, dass die häufigste Minimaltemperatur im Bereich zwischen -1 und $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, d. h. knapp unterhalb des Gefrierpunkts, liegt. Als häufigste Maximaltemperatur ist aus dem Bild 3.15 eine Temperatur zwischen 3 und $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ abzulesen.

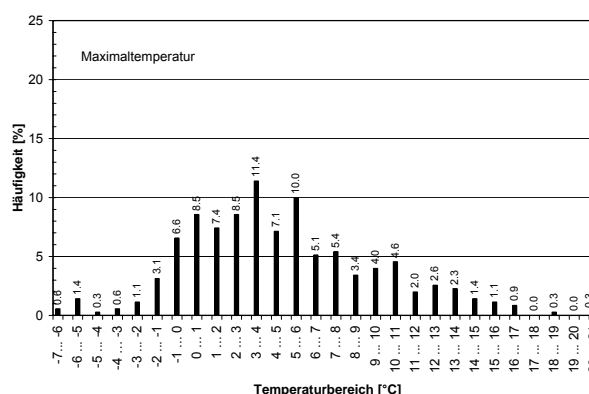
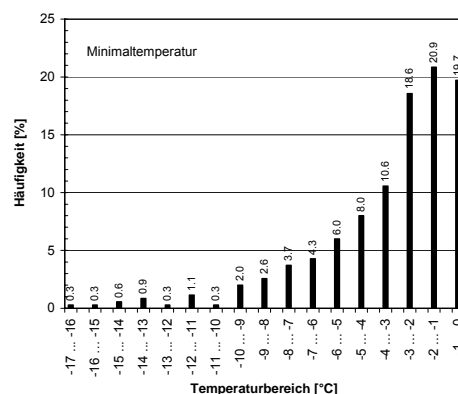


Bild 3.15: Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximalwerte der Lufttemperatur an Frost- und Eistagen im Messzeitraum (6 Winter)

oben: Minimaltemperatur

unten: Maximaltemperatur

Tab. 3.5 Anzahl der Frost- und Eistage sowie der Nulldurchgänge am oberen Sensor im rechten und im mittleren Fahrstreifen (-20 mm bzw. -15 mm) im Messzeitraum

Winter	Lufttemperatur		Fahrbahntemperatur Nulldurchgänge	
	Frosttage	Eistage	-15 mm	-20 mm
1999/2000	43	6	38	36
2000/2001	42	1	40	36
2001/2002	42	16	52	48
2002/2003	53	14	74	58
2003/2004	66	2	92	70
2004/2005	52	14	104	76
Frosttag: Temperaturminimum der Luft unter 0 °C Eistag: Temperaturmaximum der Luft unter 0 °C Nulldurchgang: Vorzeichenwechsel der Temperatur (Frost-Tauwechsel-Beanspruchung des Betons)				

Aus der Tabelle 3.5 ist die Anzahl der Frost- und Eistage im Messzeitraum zu entnehmen. Weiterhin sind darin auch die Anzahl der Nulldurchgänge an den oberen Sensoren in der Fahrbahndecke zusammengestellt. Man erkennt, dass insbesondere die ersten zwei Winter des Messzeitraums sehr mild waren. Vom DWD wird für die Stationen Karlsruhe bzw. Mannheim, ausgehend von der Bezugsperiode von 1961 bis 1990, eine mittlere Anzahl von 66 bzw. 68 Frosttagen und 14 Eistagen angegeben (vgl. Tabelle 3.1).

Die Nulldurchgänge an den oberen Sensoren stellen die Anzahl der Frost-Tauwechsel dar, denen die Oberseite der Betondecke im Messzeitraum ausgesetzt war. Es ist zu erkennen, dass im rechten Fahrstreifen eine geringere Anzahl registriert wurde als im mittleren Fahrstreifen.

Für die Abschätzung der bei der Frostbeanspruchung auftretenden Amplituden der Temperatur kann das Bild 3.15 herangezogen werden. Aus dem Bild 3.14 oben ist zu erkennen, dass bei den dort dargestellten Temperaturverläufen der Gang der Lufttemperatur und der Gang der Temperatur an der Oberseite der Betondecke näherungsweise übereinstimmen. Die größte winterliche Temperaturspanne betrug am 01.03.2005 (9. KW 2005) am oberen Sensor ca. 13 K (von -6 °C bis 7 °C).

Hinsichtlich der größten Abkühl- bzw. der Auftauraten während der Frost-Tauwechselbeanspruchung ergaben die Messungen an den oberen Sensoren in der Betondecke, dass während der ca. 16-stündigen Phase der Abkühlung (vgl. Bild 3.14) die Temperatur am oberen Sensor (-15 bzw. -20 mm)

bis zu 0,8 K/h (gemessen am 21.11.1999) sinkt und während der 8-stündigen Phase der Erwärmung um bis zu 2,0 K/h (gemessen am 03.03.2002) steigt.

Die Abkühlung erfolgt am Abend (16.30 bis 17.30 Uhr) zunächst häufig schneller als bei Betrachtung der gesamten 16-stündigen Abkühlphase. Das dabei am Abend erreichte Maximum der Abkühlrate betrug 2,3 K/h (24. und 25.02.2001). Auch das Auftauen beschleunigt sich zur Mittagszeit (12.00 bis 13.00 Uhr). Gemessen wurde am 01. und 03.03.2005 in dieser Zeitspanne eine maximale Rate von 3,5 K/h.

Die maximale mittägliche Auftaurate im Winter erreicht damit fast die höchsten sommerlichen Erwärmungsraten von ca. 4 K/h.

4 Feuchtemessungen

4.1 Methoden

Für die Feuchtebestimmungen im Zeitraum von 1999 bis 2004 dienten Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm die aus dem Standstreifen und dem rechten Fahrstreifen, verteilt über die gesamte Strecke (vgl. Anlage 1) von ca. 4 km, entnommen wurden.

Nach der Entnahme trocknete zunächst die Oberfläche dieser Bohrkern ab. Danach wurden die Bohrkern in PE-Folie verpackt in das Labor transportiert. Dort wurden die Bohrkern in dünne Scheiben mittels der im Bild 4.1 dargestellten Versuchsmethode (modifizierter Spaltzugversuch) zerlegt, um die Feuchteverteilung (Profil) zu bestimmen. Die abgespaltenen Scheiben trockneten bei $105 \pm 2 \text{ °C}$ bis zur Massekonstanz (7 ... 10 Tage).

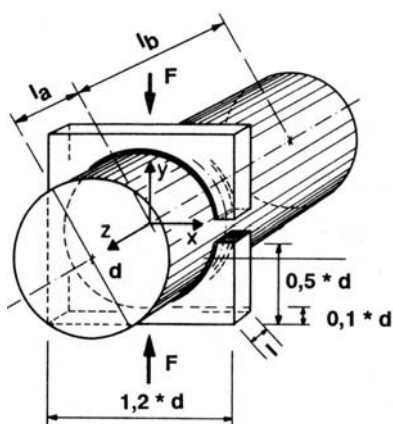


Bild 4.1: Modifizierter Spaltzugversuch an Bohrkernen
oben: Prinzipdarstellung
unten: minimale Dicke der abspaltbaren Scheiben

Aus der Differenz zwischen der Masse nach dem Abspalten und der Masse nach der Trocknung wurde der Feuchtegehalt der einzelnen Scheiben in Prozent [%], bezogen auf die Trockenmasse, berechnet. Dieses Verfahren wird im Weiteren als gravimetrische Methode bezeichnet.

Für die Umrechnung der massebezogenen Feuchte in eine volumenbezogene Feuchte ist von einer Trockenrohddichte des Betons von $2,25 \pm 0,03 \text{ kg/dm}^3$ auszugehen.

Neben der gravimetrischen Feuchtebestimmung an Bohrkernen wurde die Feuchteverteilung auch zerstörungsfrei ermittelt. Zur Anwendung kam dabei ein eigenes Hochfrequenzmessverfahren, das auf dem Dielektrizitätsprinzip basiert (MÜLLER et al., 2002).

Das Messprinzip der zerstörungsfreien Feuchtemessmethode beruht auf der Reflexion hochfrequenter elektromagnetischer Wellen, wobei die Phasenverschiebung zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle sowie die Dämpfung bestimmt wird. Der resultierende Reflexionsfaktor hängt von den dielektrischen Eigenschaften des anliegenden Mediums ab und wird messtechnisch mit einem Vektor-Voltmeter erfasst. Aus dem im Frequenzbereich 100 MHz - 500 MHz gemessenen Reflexionsfaktor kann der komplexe Dielektrizitätskoeffizient des Mediums ermittelt und auf dessen Grundlage der Wassergehalt des anliegenden Mediums, z.B. des Betons, berechnet werden.

Gemessen wird bei dem Verfahren mit Sensoren in Form einer Koaxialleitung mit offenem Ende, die hier als oberflächensonden bezeichnet werden. Das Bild 4.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der eingesetzten oberflächensonden.

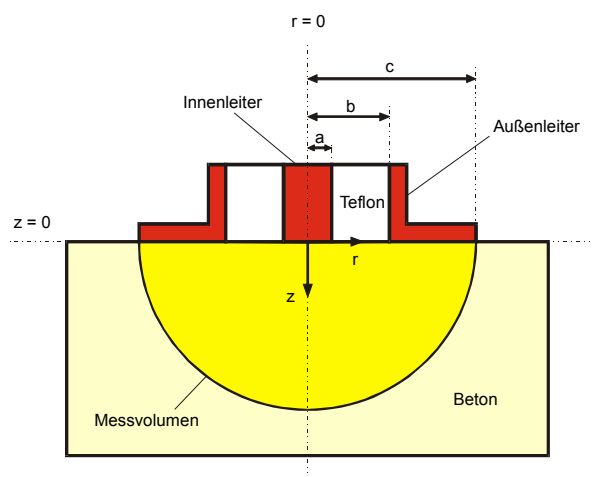


Bild 4.2: Prinzipskizze der Koaxialleitung mit offenem Ende als Sensor zur Feuchtebestimmung

Um ein Feuchteprofil, d.h. die Feuchteverteilung im Querschnitt, zu ermitteln, muss in unterschiedlichen Tiefen gemessen werden. Dazu werden Oberflächensonden mit verschiedenen Durchmessern ($2c = 19\text{ cm}$, $13,5\text{ cm}$, 8 cm und $2,5\text{ cm}$) eingesetzt, um jeweils verschieden große Volumina unterhalb der Sensoren zu erfassen.

Der Messaufbau, der auch für die Untersuchungen vor Ort diente, ist im Bild 4.3 dargestellt. Die dort abgebildeten Oberflächensonden A, B, C und D wurden im Rahmen der Bearbeitung des vorliegenden Forschungsvorhabens angefertigt und erprobt.



Bild 4.3: Messaufbau zur Bestimmung des Feuchtegehalts im Beton (dielektrische Methode) in verschiedenen Tiefen

oben: Netzwerkanalysator (HP 8712 ET), Notebook zur Steuerung der Messung einschließlich der Datenerfassung und die Oberflächensonden A, B, C und D (v.l.n.r.)

unten: Einsatz des Messsystems vor Ort

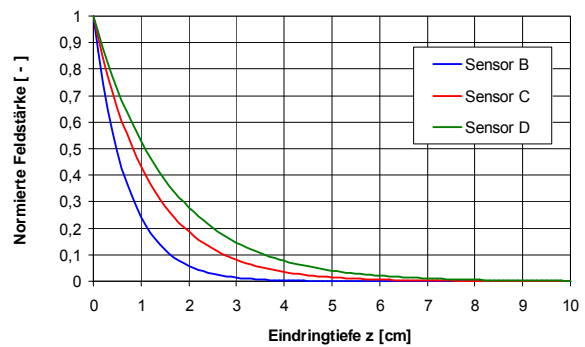


Bild 4.4: Normierter Betrag des elektrischen Feldstärkevektors an der Symmetrieachse als Funktion des Abstands zur Sensorebene für die Sensoren B, C und D bei einer Frequenz von 250 MHz und einem Dielektrizitätskoeffizienten des Mediums von $\epsilon = 10 - j0$

Dementsprechend liefen parallel zu den Untersuchungen Arbeiten zur Weiterentwicklung des Messverfahrens. So erfolgten insbesondere Untersuchungen zur Frage der Eindringtiefe des elektromagnetischen Felds der im Bild 4.3 dargestellten Sensoren in den Beton. Die dabei ausgeführten Berechnungen erbrachten den im Bild 4.4 dargestellten Verlauf der normierten Feldstärke für die Sensoren B, C und D.

Der Sensor A ist in dieser Darstellung nicht enthalten, da dieser praktisch ohne Tiefenwirkung arbeitet, d.h. die Feuchte der Oberfläche erfasst. Man erkennt aus dem Bild 4.4, dass die Feldstärke mit zunehmender Tiefe exponentiell abnimmt, was bedeutet, dass die Tiefenwirkung der Sensoren auf eine Randzone des Betons von ca. 2 cm begrenzt ist.

Die Einzelmessungen mit den Sensoren liefern jeweils einen integralen Wert für den Feuchtegehalt im jeweiligen Messvolumen. Um eine Feuchteverteilung in der Randzone des Betons darstellen zu können, wurde für jeden Sensor eine mittlere Eindringtiefe bzw. ein Schwerpunkt \bar{z} ermittelt. Dieser Schwerpunkt des ebenen Flächenstücks, das von der jeweiligen Kurve im Bild 4.4 und den Achsen des Koordinatensystems begrenzt wird, wurde wie folgt berechnet bzw. ergibt sich in allgemeiner Form zu:

$$\bar{z} = \frac{\int_0^{\infty} x y dx}{\int_0^{\infty} y dx} \quad (4.1)$$

mit: \bar{z} = Schwerpunkt der Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes der Sensoren

Die berechneten mittleren Eindringtiefen sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tab. 4.1: Schwerpunkte bzw. mittlere Eindringtiefe der Sensoren

Sensor	A	B	C	D
Eindringtiefe \bar{z} [cm]	0	0,7	1,2	1,6

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Feuchtebestimmungen mittels gravimetrischer und dielektrischer Methode sind im Bild 4.5 zusammengestellt. Darin sind die dielektrisch ermittelten integralen Feuchtegehalte des jeweiligen Messvolumens der Oberflächensonden bei deren mittleren Eindringtiefen nach Tabelle 4.1 eingetragen. Die gravimetrisch ermittelten Feuchtegehalte beziehen sich jeweils auf die Mitte der abgespaltenen Bohrkernscheiben mit Dicken von 30 bis 60 mm.

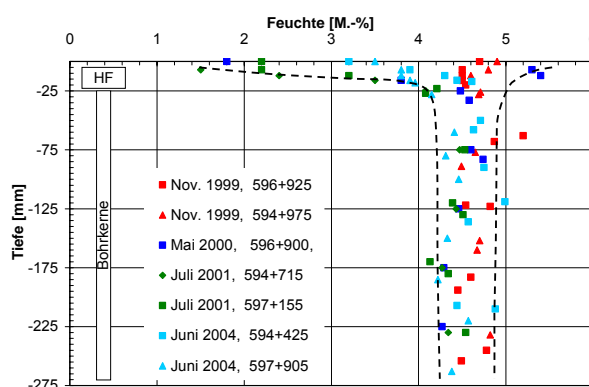


Bild 4.5: Feuchteverteilung in der Fahrbahndecke im Zeitraum von 1999 bis 2004 an verschiedenen Orten des Untersuchungsabschnitts (vgl. Abschnitt 2)

HF: Bereich der Feuchtebestimmung mit dem Hochfrequenzmessverfahren (Dielektrizitätsprinzip)

Bohrkerne: Bereich der Feuchtebestimmung durch Trocknung von Bohrkernstückchen

Aus dem Bild 4.5 ist zu entnehmen, dass in der Oberflächenzone (bis etwa 1 cm Tiefe unterhalb der Fahrbahnfläche) deutliche Schwankungen des Feuchtegehalts infolge der Witterungsverhältnisse auftreten. Die Werte lagen zu den Messterminen zwischen 1,5 M.-% und 5,5 M.-%. In den tieferen Bereichen ab ca. 2 cm blieb der Feuchtegehalt im Untersuchungszeitraum (1999 bis 2004) praktisch unverändert. Er betrug im Mittel 4,5 M.-% (Spannweite von 4,2 bis 4,9 M.-%).

5 Diskussion

Die gewonnenen Daten zum Temperaturverlauf in der Betonfahrbahndecke bestätigen und ergänzen die bisher vorliegenden Untersuchungen. Verwiesen sei hier insbesondere auf die nachfolgend aufgeführten Arbeiten, die Ergebnisse von Temperaturmessungen enthalten.

Umfangreiche Untersuchungen bündelte EISENMANN (1979) und legte sie seinen Berechnungen zur Beanspruchung von Betonfahrbahnen zugrunde. Diese Arbeiten wurden kontinuierlich fortgesetzt (LEMPE, 1997; EISENMANN und LEYKAUF, 2003).

Spannungsberechnungen für Betonfahrbahnen infolge der Temperaturbeanspruchung veröffentlichte WICKE (1974). Die Temperaturdaten für die Spannungsberechnungen basierten auf der Auswertung der bis dahin vorliegenden Literaturangaben und wurden später durch eigene Messungen ergänzt (WICKE, 1979).

Bei den von WIEHLER (1996) dargelegten Spannungsberechnungen infolge ungleichmäßiger Temperaturverteilung wird von Temperaturmessungen an Betonfahrbahnplatten in Belgien ausgegangen.

Temperaturmessungen an Mustern von Betonfahrbahnplatten auf verschiedenen Tragschichten liegen von WEIL und REINHARDT (1974) vor. Daraus geht neben dem Temperaturgang in den Betonplatten insbesondere der Temperaturgang bis in eine Tiefe von 85 cm hervor. Man erkennt, dass ab einer Tiefe von 30 cm praktisch keine Schwankungen der Temperatur im Tagesgang auftreten. Die jahreszeitliche Temperaturänderung ab 30 cm Tiefe bewegte sich bei diesen Messungen zwischen ca. 0 °C (-2 ... 2 °C) im Winter und ca. 15 °C (10 ... 20 °C) im Sommer.

Temperaturmessungen an zwei Brücken (bei Mannheim und bei Rottweil) führten HILSDORF und KOTTAS (1995) durch. In diesen Untersuchungen wurde der Temperaturgang in den Brückenkappen im Tiefenbereich bis 150 mm unterhalb der Betonoberfläche bestimmt.

Aus diesen Arbeiten geht hervor, dass der positive Temperaturgradient Werte zwischen 0,06 K/mm und 0,08 K/mm und der negative Temperaturgradient -0,035 K/mm erreichen kann. Diese Werte werden mit 0,08 K/mm und -0,035 K/mm durch die vorgelegten Versuchsergebnisse exakt bestätigt.

Die Häufigkeitsverteilung der Temperaturgradienten auf der Basis eines sechsjährigen Messzeitraums weist aus, dass das mittlere tägliche Minimum mit dem am häufigsten (30 %) auftretenden

negativen Temperaturgradienten (-0,016 K/mm) übereinstimmt. Das mittlere tägliche Maximum (0,026 ... 0,028 K/mm) liegt bei einer Häufigkeit von etwa 6 bis 7 %. Am häufigsten (11 %) wurden positive Temperaturgradienten von 0,005 ... 0,014 K/mm beobachtet. Weiterhin ist zu erkennen, dass im mittleren Fahrstreifen große positive Temperaturgradienten (ab 0,05 K/mm) häufiger auftreten als im rechten Fahrstreifen. Positive Temperaturgradienten ab 0,07 K/mm waren mit Häufigkeiten $\leq 0,1$ % sehr selten. Auch diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit den bereits vorliegenden Daten in der Literatur (EISENMANN, 1979; WIEHLER, 1996; LECHNER, 1997).

Auch hinsichtlich der maximalen Erwärmung decken sich die vorliegenden Ergebnisse mit den Angaben aus der Literatur. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass sich Fahrbahnplatten in extremen Hitzeperioden (z.B. Sommer 2003) an der Oberseite bis etwa 45 °C (extrapolierter Wert, vgl. Bild 3.12) erwärmen können.

In der kalten Jahreszeit trat im Messzeitraum keine extreme Beanspruchung auf. Die niedrigste Lufttemperatur lag bei -16,8 °C und damit deutlich unter dem absoluten Minimum von -20 °C, das vom DWD für die Stationen Karlsruhe bzw. Mannheim für die Bezugsperiode von 1961-1990 angegeben wird (MÜLLER-WESTERMEIER, 1996). Hinsichtlich der Abkühl- bzw. der Auftaurate während der Frostbeanspruchung ergaben die Messungen, dass während der ca. 16-stündigen Phase der Abkühlung die Temperatur am oberen Sensor (-15 bzw. -20 mm) um 0,8 K/h (Maximum am Abend mit 2,3 K/h) sinkt und während der 8-stündigen Phase der Erwärmung um 2,0 K/h (Maximum am Mittag mit 3,5 K/h) steigt. Die maximale mittägliche Auftaurate im Winter erreicht damit fast die höchsten sommerlichen Erwärmungsraten von ca. 4 K/h.

Die in der DAfStb-Richtlinie Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (DAfStb, 1996) dargestellten Temperaturverläufe über den Querschnitt einer erdberührten Bodenplatte (Dicke 80 cm) im Winter und im Sommer zeigen gegenüber den oben aufgeführten Literaturangaben und den eigenen Messungen größere Maximal- und Minimaltemperaturen und ergeben im oberen Bauteilbereich größere Gradienten. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei den in dieser Richtlinie behandelten Bodenplatten aus Beton nicht um stark befahrene Flächen handelt. Deshalb ist sowohl von einer stärkeren Erwärmung als auch von einer stärkeren Abkühlung auszugehen. Ansatzweise zeigte sich bei den vorliegenden Untersuchungen dieser Einfluss des Verkehrs auch im unterschiedlichen Temperaturgeschehen der unter-

suchten Fahrstreifen. Im mittleren Fahrstreifen traten gegenüber dem stärker befahrenen rechten Fahrstreifen größere Extremwerte auf, die Gradienten sind etwas größer und das mittlere tägliche Mittel liegt etwas niedriger. Als Ursache für dieses Phänomen ist der stärkere Verkehr, insbesondere der stärkere Schwerverkehr, im rechten Fahrstreifen anzunehmen, der eine stärkere Luftbewegung erzeugt und damit die Erwärmung im Sommer sowie die Abkühlung im Winter geringfügig beeinflusst.

Die Auswertung von schockartigen Abkühlungen der erwärmten Betonfahrbahn im Messzeitraum zeigte, dass sich infolge dieser Ereignisse (z.B. Gewitter) ausgeprägte negative Temperaturgradienten an der Oberseite ausbilden. Die Messungen lieferten Werte, die darauf hindeuten, dass der Gradient um einen Faktor 2 bis 3 höher liegen dürfte als der von WICKE (1979) in diesem Zusammenhang angegebene Wert von $-0,13$ K/mm. Die Angabe eines exakten Betrags ist auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse allerdings nicht möglich, da die Temperatur an der unmittelbaren Oberfläche nicht erfasst wurde.

Betrachtet man die kurzzeitig (innerhalb von 10 Minuten) auftretenden Abkühlraten bei einer schockartigen Abkühlung, so betrug das gemessene Maximum 38 K/h. Hierbei ist aber zu beachten, dass die Temperaturverringerung an der Oberfläche der Betonfahrbahn im Zeitraum von einer Stunde nach dem Beginn einer solchen Abkühlung nie eine Differenz von 20 K überschritt.

Die aus Temperaturänderungen resultierenden Verformungen wurden von LEYKAUF und BIRMANN (2001) gemessen. Nach ihren Untersuchungen betragen die Plattenbewegungen infolge eines positiven Temperaturgradienten, der zu einer relativen konvexen Verformung (Aufwölbung) zwischen der Plattenmitte und den Plattenecken führen kann, $0,015$ bis $0,020$ mm/K, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen der Plattenober- und -unterseite. Die horizontale temperaturbedingte Fugenbewegung infolge einer gleichmäßigen Temperaturänderung über den Plattenquerschnitt wird von diesen Autoren mit $0,016$ bis $0,040$ mm/K, bezogen auf die Temperaturänderung in der Plattenmitte, angegeben.

Um die aus den Temperaturänderungen resultierenden Beanspruchungen von Betonfahrbahnen zutreffend abzuschätzen, sind numerische Untersuchungen auf der Basis wirklichkeitsnaher Stoffgesetze erforderlich. Ausgehend von den im vorliegenden Forschungsvorhaben gewonnenen Daten berechneten MÜLLER und FOOS (2004) im Rahmen des Forschungsvorhabens "Verfor-

mungsverhalten von Betonfahrbahndecken unter kritischen Beanspruchungen" (08.159/2000/CGB) Spannungsverteilungen an einem heißen Sommertag unter Berücksichtigung verschiedener Nullspannungstemperaturen sowie infolge der schockartigen Abkühlung einer stark erwärmten Platte durch einen Gewitterregen.

Diese Rechnungen ergaben, dass insbesondere eine hohe Erhärtungstemperatur mit ausgeprägtem positivem Verlauf der Nullspannungstemperatur (Oberseite wärmer als die Unterseite), die sich beim Betonieren am Vormittag eines Sommertags einprägen kann, als kritisch zu bewerten ist. Dies resultiert daraus, dass bei der Abkühlung einer solchen Platte (niedrige Nachttemperaturen) eine ausgeprägte konkave Verformung entsteht (Aufschüsselung der Plattenränder) bzw. bei einer schockartigen Abkühlung (Gewitter im Sommer) im Oberflächenbereich die Zugfestigkeit erreicht werden kann.

Wird die Betonplatte dagegen so hergestellt, dass sich eine niedrigere Erhärtungstemperatur einstellt und der Verlauf der Nullspannungstemperatur über den Querschnitt konstant oder negativ ist, so entstehen keine kritischen Verformungen bzw. Spannungen infolge starker Erwärmung und anschließender Abkühlung, auch bei einer schockartigen Abkühlung.

Zur konkaven Verformung (Aufschüsselung) der Fahrbahnplatte trägt weiterhin eine ungleichmäßige Feuchteverteilung bei (trockenere Oberseite). Aus den Feuchtebestimmungen erkennt man, dass die Betonfahrbahn an der Oberseite (Tiefe bis ca. 10 mm) austrocknen kann. Im Querschnitt dagegen bleibt der Feuchtegehalt über mehrere Jahre unverändert. Er bewegt sich dort zwischen $4,2$ M.-% und $4,9$ M.-%. Diese Spannweite zeigt, dass ein ständiger, relativ hoher Sättigungsgrad des Porensystems mit Wasser vorliegt. Ausgehend von einer Porosität des Betons von $12 - 15$ Vol.-% (vgl. Tabelle 2.2) und einer mittleren Trockenrohdichte des Betons von $2,25$ kg/dm³ ergibt sich der entsprechende Wassersättigungsgrad im Mittel zu 76 % (LP-Beton).

Obwohl der Feuchtegehalt im Plattenquerschnitt kaum Veränderungen unterliegt, ist bei Langzeitmessungen der Fugenbewegungen (bis 35 Jahre) eine zunehmende, bleibende Fugenöffnung festgestellt worden. Diese wird unter anderem auf das Schwinden des Betons zurückgeführt. Aus Messungen leiten LEYKAUF und BIRMANN (2001) ab, dass die Verkürzung einer 5 m langen Fahrbahnplatte durch das Schwinden $0,6$ mm bis $1,5$ mm betragen kann.

Eine Feuchteverteilung mit einem deutlichen Anstieg der Feuchte an der Unterseite der Fahrbahndecke, z.B. infolge einer unzureichenden Entwässerung (SPRINGENSCHMID und FLEISCHER, 1993), wurde im Untersuchungszeitraum nicht beobachtet.

Feuchtemessungen an zwei Brücken (bei Mannheim und bei Rottweil) führten HILSDORF und KOTTAS (1995) durch. In diesen Untersuchungen wurde der Feuchtegehalt der Brückenkappen im Tiefenbereich bis 50 mm unterhalb der Betonoberfläche bestimmt. An der Oberfläche schwankte der Feuchtegehalt zwischen 2,2 und 7,7 M.-% und in einer Tiefe von 45 bis 50 mm zwischen 2,9 und 5,7 M.-%.

6 Schlussfolgerungen

Die in Deutschland übliche Bauweise der Betonfahrbahnen ohne Bewehrung erfordert die Unterteilung der Fahrbahndecke in kurze Platten (Länge/Plattendicke ≤ 25). Infolge der Temperatur- und Feuchteänderungen entstehen Bewegungen dieser Platten einer Betonfahrbahn. Gleichmäßige Temperaturänderungen über den Querschnitt bedingen horizontale Bewegungen. Verwölbungen resultieren aus Temperatur- und Feuchtegradienten. Eine hohe Temperatur während der Erhärtung und die Trocknung der oberflächennahen Zone fördern insbesondere eine konkave Verformung, d. h. eine Aufschüsselung der Plattenränder.

Wird die Betonfahrbahn im Verbund mit einer Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel hergestellt, so übertragen sich diese Plattenbewegungen auf die Tragschicht. Passt sich die Tragschicht den Verformungen der Betonplatte an, so ist die Beanspruchung der Verbundzone gering. Ist dies nicht gegeben, z.B. bei steifen Tragschichten, so löst sich häufig der Verbund, ausgehend von den Plattenrändern, wie entsprechende Untersuchungen zeigten (FREUND, GUSE et al., 2005). Durch die Verkehrsbeanspruchung entstehen Pumpbewegungen der Platte. Wasser, das in den Fahrbahnaufbau eindringt und nicht abgeleitet werden kann, erreicht dabei hohe Fließgeschwindigkeiten unterhalb der Betondecke. Dadurch können sich Erosionsprozesse an der Tragschicht vollziehen, durch die sich die Auflagerbedingungen der Fahrbahnplatte und damit auch deren Tragverhalten verschlechtern. Diese Problematik wurde in der Literatur bereits behandelt und Konsequenzen für den Aufbau von Tragschichten unter Betonfahrbahnen abgeleitet (PFEIFFER, 1974, 1989, 1996, 1997; STRUNCK, 1989; WIEHLER, 1996).

Einen Überblick zum gegebenen Klimageschehen und den damit verbundenen Temperatur- und Feuchteänderungen in einer Betonfahrbahn (BAB A 5 bei Kronau) gibt die Auswertung der vorliegenden Messungen über den Zeitraum von 1999 bis 2005.

Diese Messungen ergaben eine Spannweite für die Temperatur an der Oberseite der Fahrbahn von 44 °C bis -13 °C. Die Spannweite der Temperaturgradienten betrug -0,035 K/mm (Oberseite kälter) bis 0,08 K/mm (Oberseite wärmer). Schockartige Abkühlungen der Betonfahrbahn, z.B. durch ein Gewitter, führten zu ausgeprägten negativen Temperaturgradienten mit Werten, die darauf hindeuten, dass der Gradient um einen Faktor 2 bis 3 höher liegen dürfte als der aus der Literatur bisher bekannte Wert von -0,13 K/mm.

Die Feuchtebestimmungen im Zeitraum von 1999 - 2004 zeigten, dass die Oberflächenzone der Betondecke bis etwa 1 cm Tiefe deutlichen Schwankungen des Feuchtegehalts (1,5 bis 5,5 M.-%) infolge der Witterungsverhältnisse unterliegt. In den tieferen Bereichen ab ca. 2 cm blieb der Feuchtegehalt mit 4,5 M.-% praktisch unverändert.

Aus dem Blickwinkel einer wirtschaftlichen und termingebundenen Fertigung der Betonfahrbahn können ungünstige Erhärtungstemperaturen bisher nicht zielsicher ausgeschlossen werden. Dies bedeutet, dass unter den gegebenen klimatischen Bedingungen auch ungünstige Verformungen bzw. Verwölbungen der Platten einer Betonfahrbahn auftreten können. Dementsprechend kommt der Ausbildung der Tragschicht und damit der Gestaltung der Auflagerbedingungen besondere Bedeutung zu. Die Tragschicht muss den Bewegungen der Betondecke folgen oder diese Bewegungen durch Verformungen kompensieren können, um dauerhaft eine weitgehend vollständige Auflagerung der verformten Betonplatten sicherzustellen ("weiche" Tragschicht). Dabei muss aber sowohl bei der Herstellung der Betondecke als auch unter der Verkehrseinwirkung sichergestellt sein, dass sich die Tragschicht nicht verlagert und keine plastischen Verformungen auftreten (WIEHLER, 1996). Weiterhin sollte diese Schicht so beschaffen sein, dass in den Fahrbahnaufbau eindringendes Oberflächenwasser abgeleitet wird und sich nicht zwischen oder in den Schichten ansammelt.

Eine ungebundene Schottertragschicht nach ZTV T-Stb 95/02 erfüllt diese Anforderungen hinsichtlich der Verformungsfähigkeit und der Wasserdurchlässigkeit. Diese Tragschicht ist Bestandteil des bestehenden Regelwerks (Tafel 2 der RStO 01).

Darüber hinaus sind in der Tafel 2 der RStO 01 zwei weitere Bauweisen enthalten, die Bewegungen bzw. Verformungen kompensieren und eine weitgehend vollflächige Auflagerung der Betonplatten sichern. Neben der Variante, bei der dies durch den Einbau einer Asphalttragschicht unter der Betondecke realisiert wird, ist auch der Einbau eines Vliesstoffs mit einem Flächengewicht von 500 g/m² (Dicke ca. 5 mm) zwischen der Betondecke und der hydraulisch gebundenen Tragschicht bzw. Verfestigung nach ZTV T-Stb 95/02 möglich. Damit wird neben dem günstigen Einfluss auf die Bettung auch eine unkontrollierte Trennung der Betondecke von der hydraulisch gebundenen Tragschicht bzw. Verfestigung ausgeschlossen. Darüber hinaus soll durch den Vliesstoff die Fließgeschwindigkeit des Wassers, das in den Fahrbahnaufbau eindringen konnte, reduziert werden, wodurch sich die Beanspruchung (Erosion) der Tragschicht bei

Pumpbewegungen der Platten verringert. Die Bewährung dieser Bauweise wurde bereits durch Untersuchungen an entsprechend ausgeführten Strecken mit einer Liegedauer von bis zu 17 Jahren bestätigt (LEYKAUF und BIRMANN, 2004).

Die Anwendung der Bauweise mit Verbund ist in der RStO 01 mit Einschränkungen versehen worden. Insbesondere bei einer hohen Steifigkeit der hydraulisch gebundenen Tragschicht besteht das Risiko einer unkontrollierten Verbundlösung, ausgehend von den Plattenrändern. Diese Trennung vollzieht sich häufig knapp unterhalb der Verbundzone im oberen Bereich der Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel. Sammelt sich zudem Wasser in diesem Bereich, ist damit, wie entsprechende Untersuchungen zeigten, meist auch eine Erosion der Tragschicht verbunden.

7 Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Neben den Beanspruchungen durch den Verkehr (Fahrzeuganzahl, Achslast), die sich zutreffend abschätzen lassen, unterliegen Betonfahrbahnen auch Beanspruchungen durch Temperatur- und Feuchteänderungen infolge der klimatischen Bedingungen. Ziel des Vorhabens war es, die Kenntnisse über die Temperatur- und Feuchteverhältnisse durch entsprechende Messungen an einer ausgeführten Fahrbahndecke aus Beton zu erweitern.

Untersuchungsmethoden

Als Untersuchungsobjekt diente ein im Juni 1999 unter Verwendung eines CEM II/B-S 32,5 erneuertes Abschnitt der BAB A 5, Frankfurt - Basel, bei Kronau.

In zwei Fahrstreifen dieses Streckenabschnitts wurden an einem Messort Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Die Messwerte registrierte eine prozessorgesteuerte Speichereinheit kontinuierlich über den Zeitraum von Juni 1999 bis Juni 2005. Ausgewertet wurden die Daten insbesondere hinsichtlich des Temperaturgradienten in der Fahrbahndecke sowie extremer Temperaturbeanspruchungen (Hitze, Gewitter, Frost). An der Messstelle wurden neben dem Temperaturgang in der Fahrbahndecke auch die lokale Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte erfasst.

Die tiefenabhängige Bestimmung der Feuchte in der Fahrbahndecke (Feuchteprofil) erfolgte im Zeitraum von 1999 bis 2004 an Bohrkernen und zerstörungsfrei mittels eines im Institut für Massivbau und Baustofftechnologie entwickelten dielektrischen Messverfahrens.

Untersuchungsergebnisse - Temperaturmessungen

Insgesamt gesehen lag der Messzeitraum in einer Periode mit einem tendenziell wärmeren Klima als in der klimatologischen Bezugsperiode der Jahre von 1961-1990. Dies resultiert insbesondere daraus, dass das Jahr 2000 als das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts (1901 - 2000) eingestuft wird und im Jahr 2003 der heißeste Sommer in Süddeutschland seit Beginn der Aufzeichnungen von Klimadaten im Jahr 1755 auftrat. In Karlsruhe wurde mit 40,2 °C das absolute Temperaturmaximum für Deutschland am 9. und 13. August 2003 registriert. An der Messstelle trat ein absolutes Temperaturmaximum mit 39,8 °C am 13.08.2003 auf.

Die aus den Temperaturmessungen ermittelten Temperaturgradienten betragen -0,035 K/mm für den größten negativen Gradient (Oberseite kälter) und 0,08 K/mm für den größten positiven Gradient (Oberseite wärmer). Diese Extremwerte, die mit den aus der Literatur bekannten Werten übereinstimmen, traten insbesondere im Frühsommer (Mai, Juni) auf.

Die Häufigkeitsverteilung der Temperaturgradienten auf der Basis eines sechsjährigen Messzeitraums weist aus, dass der am häufigsten auftretende negative Gradient -0,016 K/mm beträgt. Bei dem positiven Gradienten liegt die größte Häufigkeit im Bereich von 0,005 ... 0,014 K/mm. Im mittleren Fahrstreifen traten große positive Temperaturgradienten (ab 0,05 K/mm) häufiger auf als im rechten Fahrstreifen. Positive Temperaturgradienten ab 0,07 K/mm waren mit Häufigkeiten $\leq 0,1$ % sehr selten.

Hinsichtlich der maximalen Erwärmung decken sich die vorliegenden Ergebnisse auch mit den Angaben aus der Literatur. Es ist davon auszugehen, dass sich stark befahrene Betondecken in extremen Hitzeperioden (z. B. im Sommer 2003) an der Oberseite bis etwa 45 °C erwärmen können.

In der kalten Jahreszeit trat im Messzeitraum keine extreme Beanspruchung im Vergleich zur Bezugsperiode 1961 - 1990 auf. Die niedrigste Lufttemperatur lag bei -16,8 °C und damit deutlich unter dem absoluten Minimum von -20 °C, das vom DWD für die Stationen Karlsruhe bzw. Mannheim für die Bezugsperiode von 1961 - 1990 angegeben wird. Die niedrigste Temperatur an der Oberseite der Betondecke betrug -12,9 °C (Sensor 15 mm unter der Oberfläche).

Anhand der Daten des Messzeitraums (6 Winter) wurden im Zusammenhang mit der Frostbeanspruchung die Eis- und Frosttage, die Häufigkeitsverteilung der dabei zu beobachtenden Minimal- und Maximaltemperaturen der Lufttemperatur und die Anzahl der Nulldurchgänge der Temperatur an den oberen Sensoren in den Fahrstreifen sowie die dabei auftretenden Abkühl- und Auftauraten ermittelt.

Hinsichtlich der größten Abkühl- bzw. Auftaurate während der Frostbeanspruchung ergaben die Messungen, dass während der ca. 16-stündigen Phase der Abkühlung die Temperatur an der Oberseite der Betondecke um bis zu 0,8 K/h (Maximum am Abend mit 2,3 K/h) sinken und während der 8-stündigen Phase der Erwärmung um bis zu 2,0 K/h (Maximum am Mittag mit 3,5 K/h) ansteigen kann. Die maximale mittägliche Auftaurate im Winter er-

reicht damit fast die größte sommerliche Erwärmungsrate von ca. 4 K/h.

Die Auswertung von schockartigen Abkühlungen der erwärmten Betonfahrbahn im Messzeitraum zeigte, dass sich infolge dieser Ereignisse (z.B. Gewitter) ausgeprägte negative Temperaturgradienten an der Oberseite ausbilden. Die Messungen lieferten Werte, die darauf hindeuten, dass der Gradient um einen Faktor 2 bis 3 höher liegen dürfte als der aus der Literatur bisher bekannte Wert von -0,13 K/mm. Die Angabe eines exakten Betrags ist auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse allerdings nicht möglich, da die Temperatur an der unmittelbaren Oberfläche nicht erfasst wurde. Die kurzzeitig (innerhalb von 10 Minuten) auftretenden Abkühlraten bei einer schockartigen Abkühlung erreichten maximal 38 K/h. Dabei ist zu beachten, dass die Temperaturverringering an der Oberfläche der Betonfahrbahn im Zeitraum von einer Stunde nach dem Beginn einer solchen Abkühlung nie eine Differenz von 20 K überschritt.

Um die aus den Temperaturänderungen resultierenden Beanspruchungen von Betonfahrbahnen zutreffend abschätzen zu können, erfolgten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Verformungsverhalten von Betonfahrbahndecken unter kritischen Beanspruchungen" (08.159/2000/CGB) numerische Untersuchungen auf der Basis wirklichkeitsnaher Stoffgesetze. Die Basis bildeten die vorliegenden Daten. Diese Rechnungen ergaben, dass insbesondere eine hohe Erhärtungstemperatur, die sich beim Betonieren am Vormittag eines Sommertags einprägen und einen positiven Verlauf der Nullspannungstemperatur im Querschnitt der Fahrbahndecke (Oberseite wärmer als die Unterseite) bewirken kann, als kritisch zu bewerten ist.

Untersuchungsergebnisse - Feuchtemessungen

Aus den Feuchtebestimmungen erkennt man, dass in der Oberflächenzone der Betondecke bis etwa 1 cm Tiefe deutliche Schwankungen des Feuchtegehalts infolge der Witterungsverhältnisse zu beobachten sind. Die Werte lagen zu den Messterminen zwischen 1,5 M.-% und 5,5 M.-%. In den tieferen Bereichen ab ca. 2 cm blieb der Feuchtegehalt im Untersuchungszeitraum praktisch unverändert. Er betrug im Mittel 4,5 M.-% (Spannweite von 4,2 bis 4,9 M.-%). Dies zeigt, dass das Porensystem des Fahrbahndeckenbetons ständig einen relativ hohen Sättigungsgrad mit Wasser aufweist (ca. 76 %).

Folgerungen für die Praxis

Die in Deutschland übliche Bauweise der Betonfahrbahnen ohne Bewehrung erfordert die Unterteilung in kurze Platten, die sich infolge einer gleichmäßigen Temperaturänderung über den Querschnitt horizontal bewegen. Verwölbungen resultieren aus Temperatur- und Feuchtegradienten. Ungünstige Erhärtungstemperaturen im Anschluss an die Herstellung können diese Effekte verstärken.

Da aus dem Blickwinkel einer wirtschaftlichen und termingebundenen Fertigung der Betondecke ungünstige Erhärtungstemperaturen bisher nicht ziel-sicher ausgeschlossen werden können, bedeutet dies, dass unter den gegebenen klimatischen Bedingungen auch ungünstige Verformungen bzw. Verwölbungen der Platten einer Betonfahrbahn auftreten können. Dementsprechend kommt der Ausbildung der Tragschicht und damit der Gestaltung der Auflagerbedingungen besondere Bedeutung zu. Die Tragschicht oder eine entsprechende Zwischenlage sollte eine weitgehend vollständige Auflagerung der verformten Betonplatte langfristig sicherstellen. Mit den Bauweisen, die in der Tafel 2 der RStO 01 dargestellt sind, wird dieser Anforderung entsprochen.

8 Literatur

- DAfStb (1996): Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Teil 1, Beuth, Berlin, 1996
- EISENMANN, J. (1979): Betonfahrbahnen. Ernst & Sohn, Berlin, 1979
- EISENMANN, J.; LEYKAUF, G. (1991): Hochwölbung der Plattenränder von Betonfahrbahnen. Straße + Autobahn, 42. Jg. (1991) Nr. 10, S. 565 – 570
- EISENMANN, J.; LEYKAUF, G. (2003): Betonfahrbahnen. Ernst & Sohn, Berlin, 2003
- FREUND, H.; GUSE, U. et al. (2005): Untersuchungen an Betonfahrbahnen mit hydraulisch gebundenen Tragschichten. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag der BASt FE 08.172/2000/CRB, 2005 (in Vorbereitung)
- HILSDORF, H. K.; KOTTAS, R. (1995): Beanspruchung von Brückenbauwerken durch Frost und Tausalze - Messungen an Brücken. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben DBV 119/AiF 7189, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 1995
- LECHNER, B. (1997): Der Temperaturgradient als Bemessungsgröße bei der Dimensionierung von dicken Betondecken. Straße + Autobahn, 48. Jg. (1997) Nr. 6, S. 311 – 317
- LEYKAUF, G.; BIRMAN, D. (2001): Langzeitverhalten von Betondecken mit über 20 Jahren Liegedauer. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMVBW, Heft 807, 2001
- LEYKAUF, G.; BIRMAN, D. (2004): Verhalten von Betondecken auf Geotextil-Einlagen und Anforderungen an Geotextilien. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMVBW, Heft 901, 2004
- MÜLLER, H. S., MOUHASSEB, H., GUSE, U. (2002): Weiterentwicklung und Praxiserprobung eines neuen dielektrischen Messverfahrens zur Feuchtebestimmung bei Beton. Arbeitsbericht zum Forschungsvorhaben DBV 226 des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins e.V., Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 2002
- MÜLLER, H. S.; FOOS, S. (2004): Verformungsverhalten von Betonfahrbahndecken unter kritischen Beanspruchungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 08.159/2000/CGB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 2004
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1996): Klimadaten Deutschland Zeitraum 1961 – 1990. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 1996
- MÜLLER-WESTERMEIER, et al. (1999-2003): Die Witterung in Deutschland. in: Klimastatusberichte des Deutschen Wetterdienstes der Jahre 1999, 2000, 2001, 2002, 2003
- PFEIFFER, L. (1974): Verbundwirkung zwischen Zementbetondecke und zementgebundener Tragschicht? Die Strasse, 14. Jg. (1974) Nr. 9, S. 378 - 383
- PFEIFFER, L. (1989): Vorschädigung von Betondeckschichten auf gebundener Unterlage. Die Strasse, 29. Jg. (1989) Nr. 11, S. 336 - 338
- PFEIFFER, L. (1996): Bau von Betondecken auf ungebundenen Tragschichten. Straße + Autobahn, 47. Jg. (1996) Nr. 3, S. 143 - 147
- PFEIFFER, L. (1997): Bauliche Schlussfolgerungen aus dem Längsdehnungsbestreben von Betonfahrbahnen. Straße + Autobahn, 48. Jg. (1997) Nr. 6, S. 302 - 306
- SPRINGENSCHMID, R.; FLEISCHER, W. (1993): Untersuchung der Ursachen von Oberflächenrissen (Netzrissen) in Betondecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 651, BMV, 1993
- STRUNCK, K. (1989): Tragschichten unter Betonfahrbahnen. Die Strasse, 29. Jg. (1989) Nr. 7, S. 205 – 207
- WEIL, G.; REINHARDT, H. W. (1974): Temperaturverhalten von Betonfahrbahnplatten auf unterschiedlichen Tragschichten. Straße + Autobahn, 25 Jg. (1974) Nr. 7, S. 257 – 260
- WICKE, M. (1974): Theoretische Untersuchungen der Längsdruckkräfte in raumfugenlosen Betonfahrbahnen. Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung Heft 15, Wien, 1974
- WICKE, M. (1979): Der Randbereich raumfugloser Betonfahrbahndecken. Betonstraßentagung 1979, in: FGSV Schriftenreihe der AG Betonstrassen, Heft Nr.14, Bonn, 1980, S. 27 - 30
- WIEHLER, H.-G. (1996): Straßenbau Konstruktion und Ausführung. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1996
- RStO 01 Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001
- ZTV T - Stb 95/02 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Ausgabe 1995/2002

9 Anlagenverzeichnis

Anlage 1

Lageplan

Anlage 2

Lufttemperatur

Tägliche Maximal- und Minimalwerte der Jahre
1999 bis 2005

Anlage 3

Luftfeuchte

Tägliche Maximal- und Minimalwerte der Jahre
1999 bis 2005

Anlage 4

Fahrbahntemperatur

Tägliche Maximal- und Minimalwerte der Jahre
1999 bis 2005

Anlage 5

Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und
dem unteren Sensor

Tägliche Maximal- und Minimalwerte der Jahre
1999 - 2005

Anlage 6

Gradient

Jährliche Extremwerte der Jahre 1999 bis 2004

Anlage 7

Hitzebeanspruchung

Jährliche Extremwerte der Jahre 1999 bis 2004

Anlage 8

Temperaturschock

Jährliche Extremwerte der Jahre 1999 bis 2004

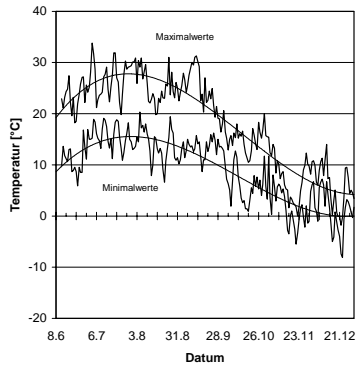


Bild 1: 1999 (Juni - Dezember)

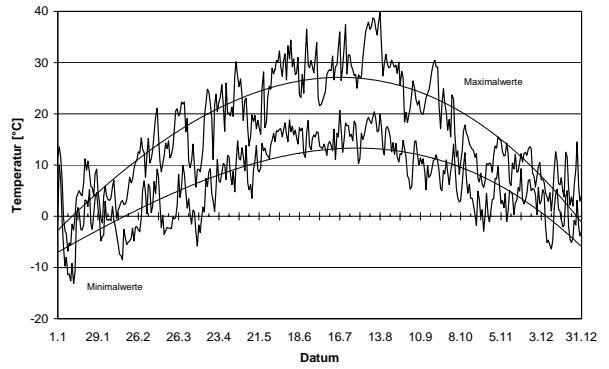


Bild 5: 2003 (Januar - Dezember)

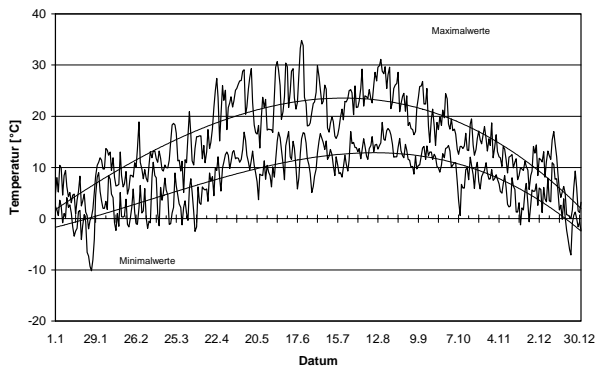


Bild 2: 2000 (Januar - Dezember)

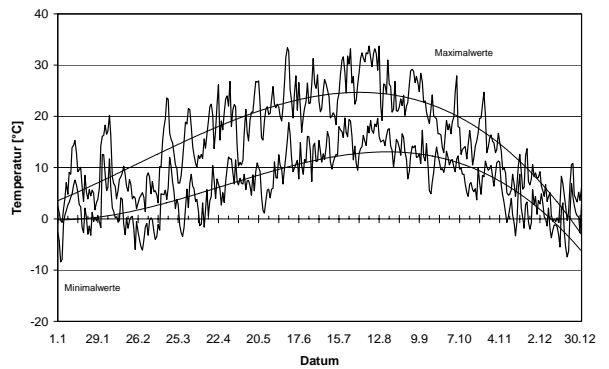


Bild 6: 2004 (Januar - Dezember)

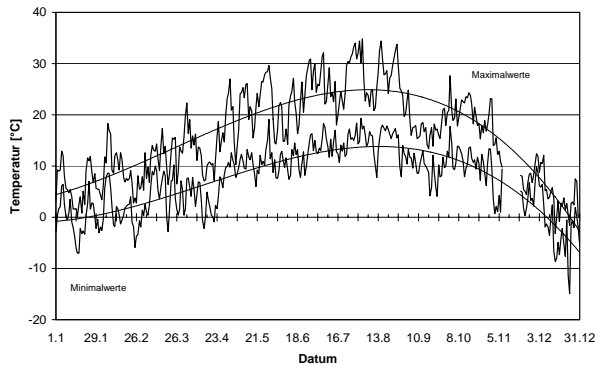


Bild 3: 2001 (Januar - Dezember)

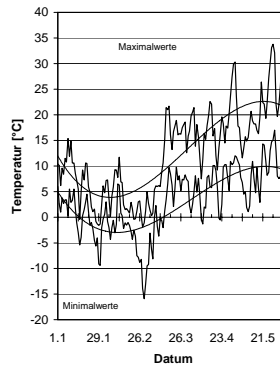


Bild 7: 2005 (Januar - Juni)

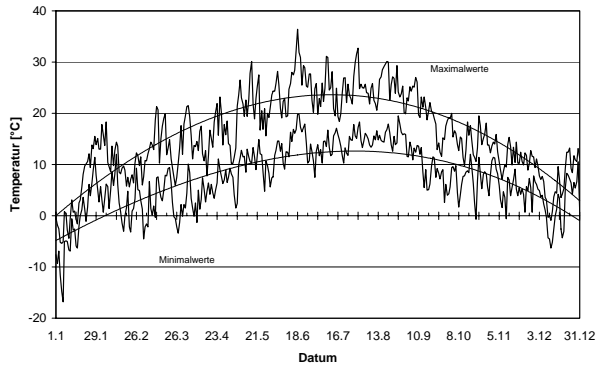


Bild 4: 2002 (Januar - Dezember)

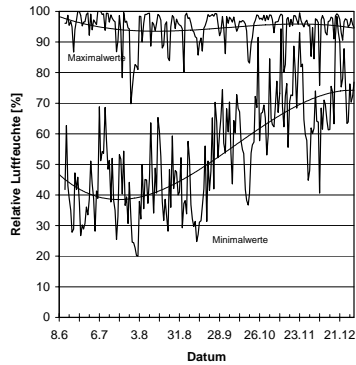


Bild 1: 1999 (Juni - Dezember)

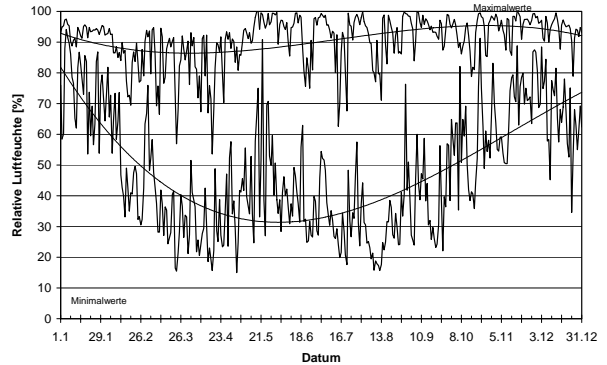


Bild 5: 2003 (Januar - Dezember)

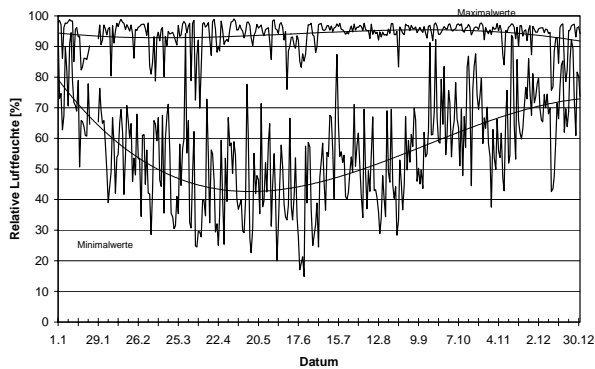


Bild 2: 2000 (Januar - Dezember)

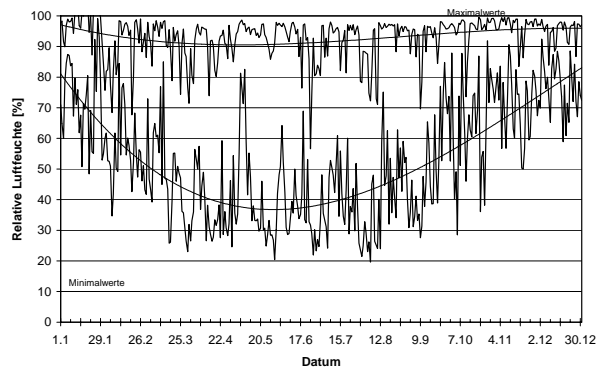


Bild 6: 2004 (Januar - Dezember)

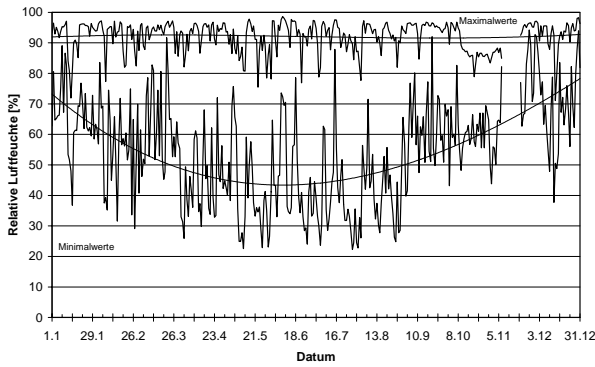


Bild 3: 2001 (Januar - Dezember)

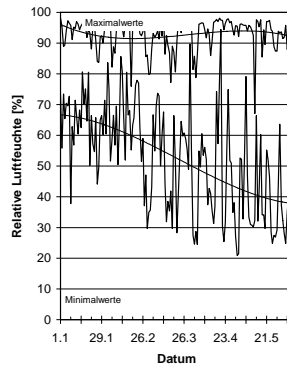


Bild 7: 2005 (Januar - Juni)

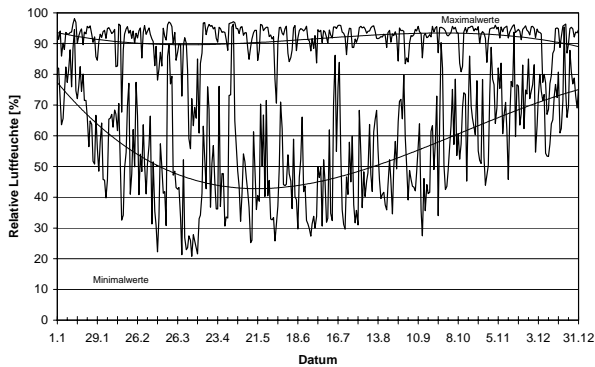


Bild 4: 2002 (Januar - Dezember)

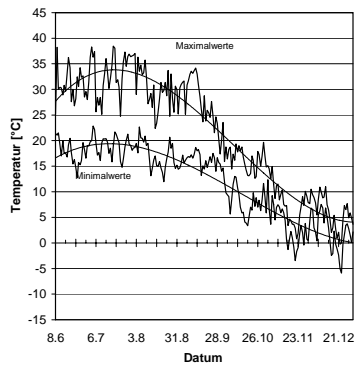


Bild 1: 1999 (Juni - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

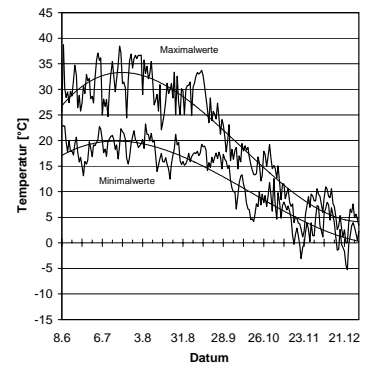


Bild 5: 1999 (Juni - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -20 mm

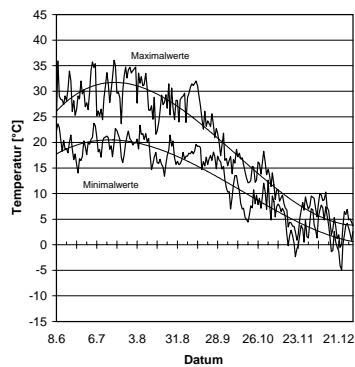


Bild 2: 1999 (Juni - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

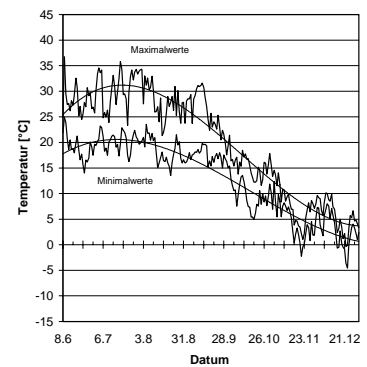


Bild 6: 1999 (Juni - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -60 mm

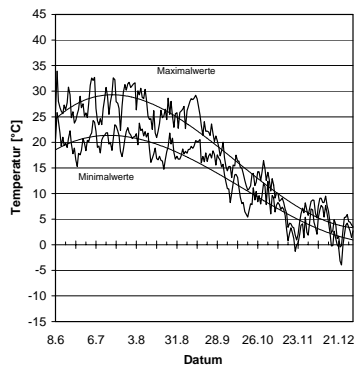


Bild 3: 1999 (Juni - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

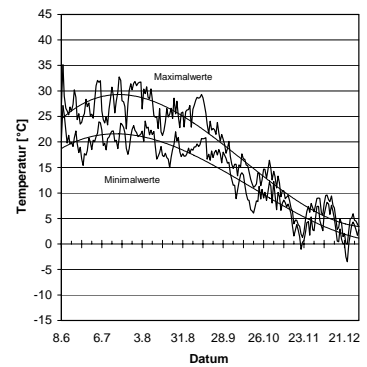


Bild 7: 1999 (Juni - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -120 mm

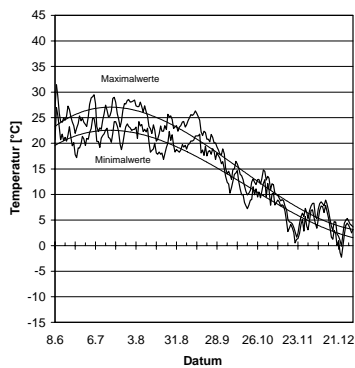


Bild 4: 1999 (Juni - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

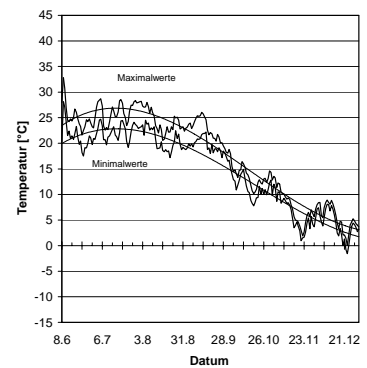


Bild 8: 1999 (Juni - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -240 mm

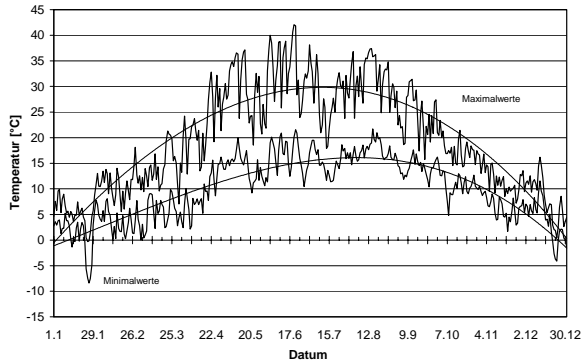


Bild 9: 2000 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

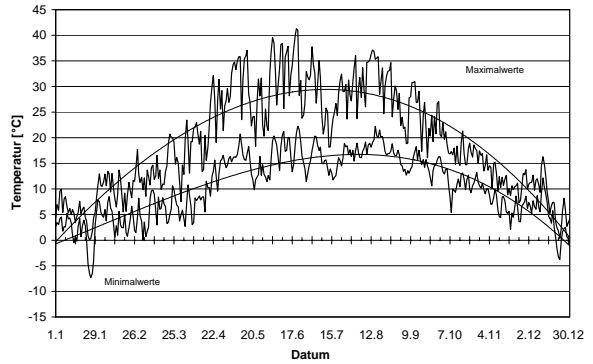


Bild 13: 2000 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -20 mm

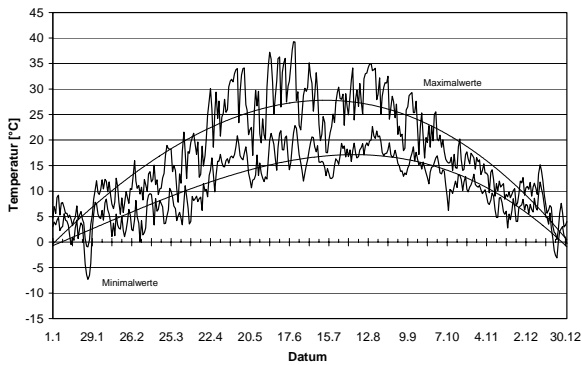


Bild 10: 2000 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

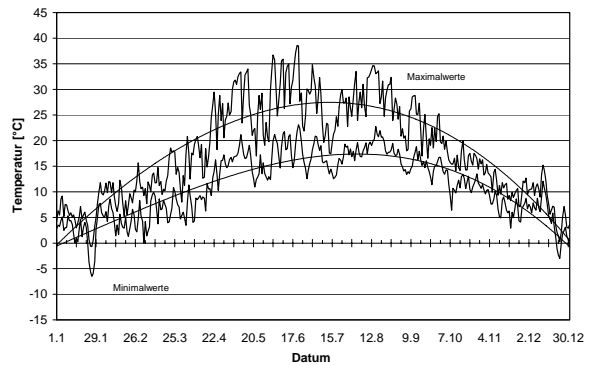


Bild 14: 2000 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -60 mm

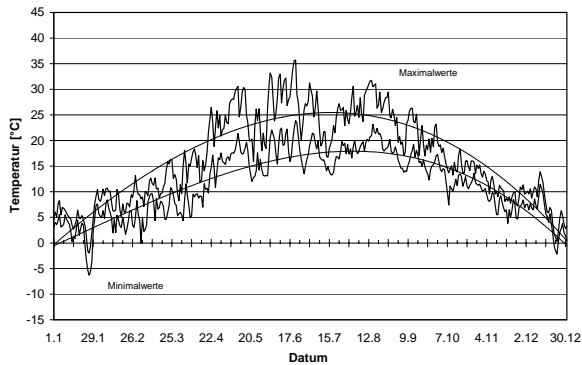


Bild 11: 2000 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

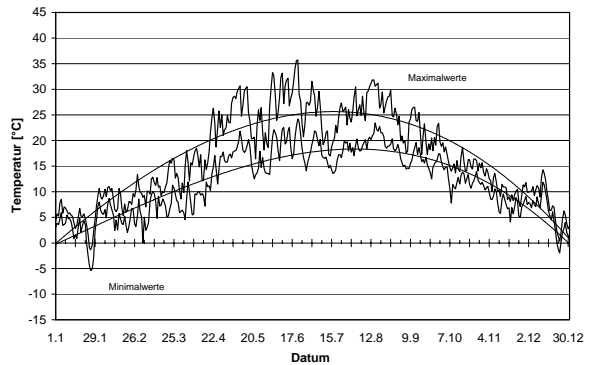


Bild 15: 2000 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -120 mm

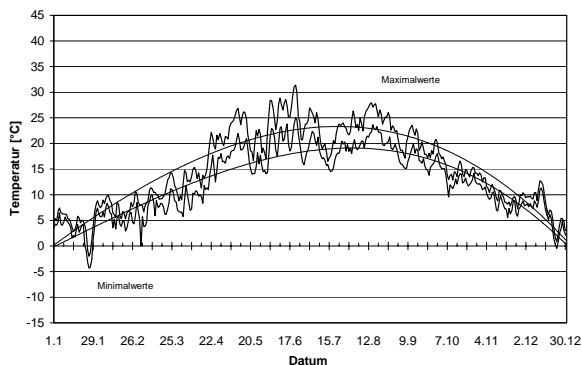


Bild 12: 2000 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

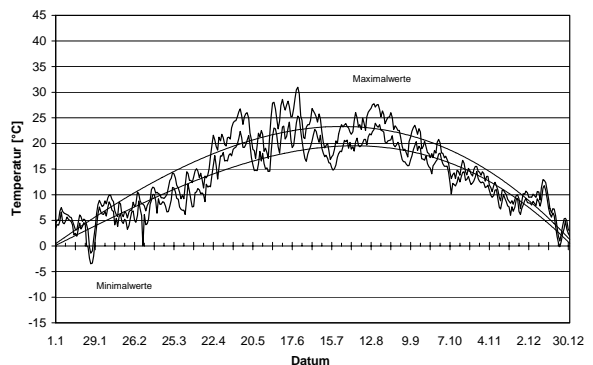


Bild 16: 2000 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -240 mm

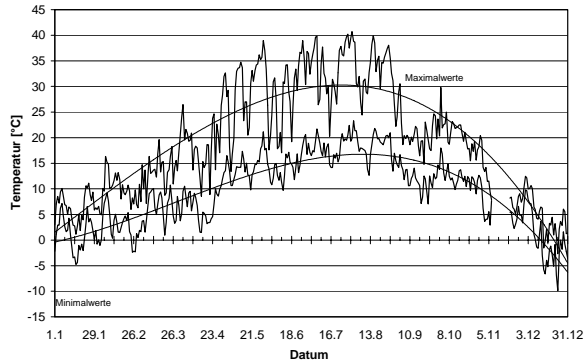


Bild 17: 2001 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

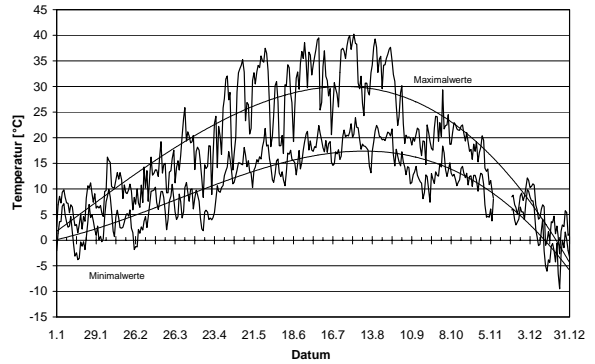


Bild 21: 2001 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 20 mm

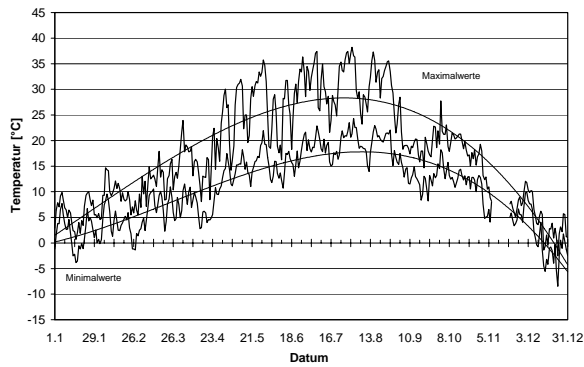


Bild 18: 2001 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

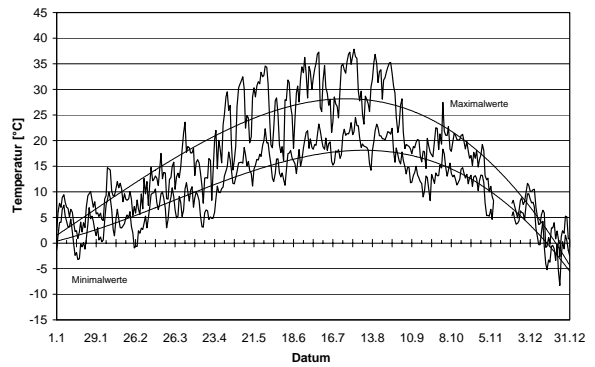


Bild 22: 2001 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 60 mm

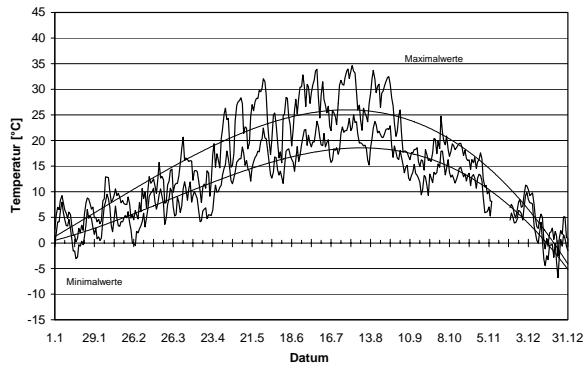


Bild 19: 2001 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

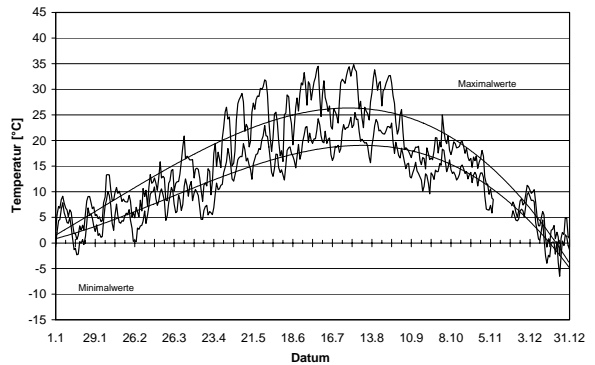


Bild 23: 2001 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 120 mm

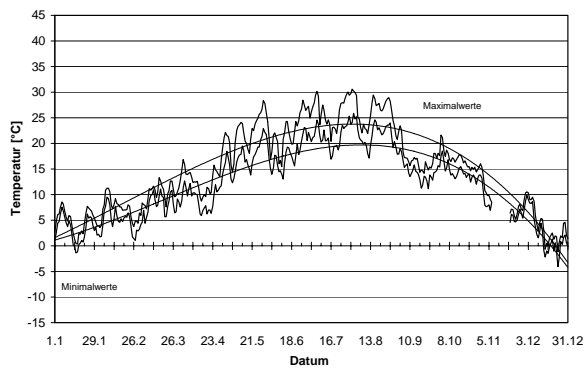


Bild 20: 2001 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

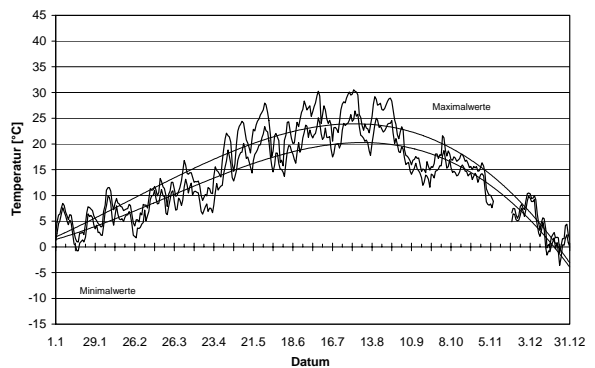


Bild 24: 2001 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 240 mm

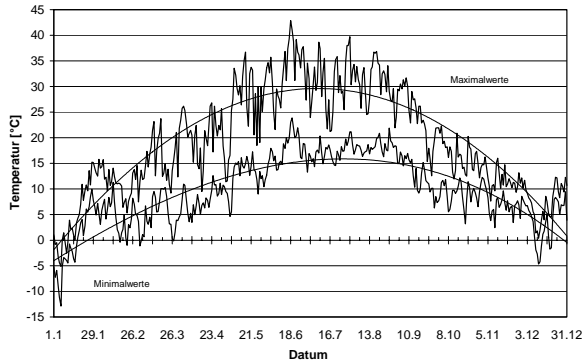


Bild 25: 2002 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

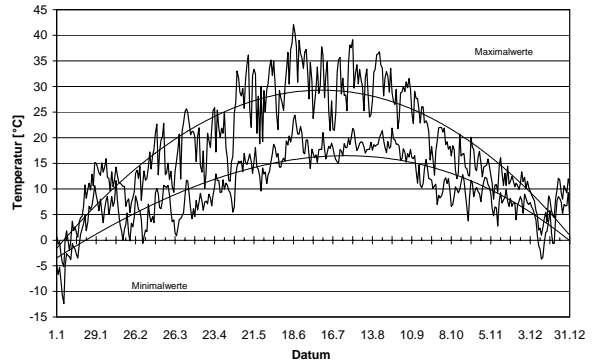


Bild 29: 2002 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -20 mm

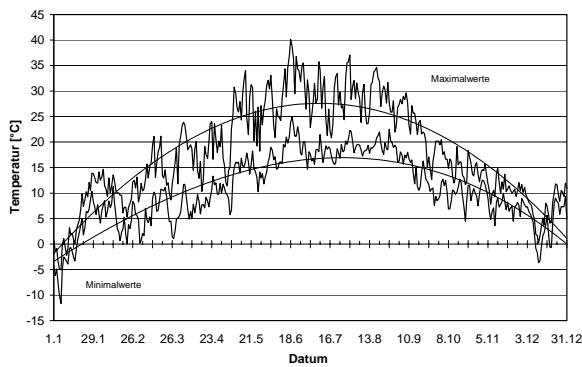


Bild 26: 2002 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

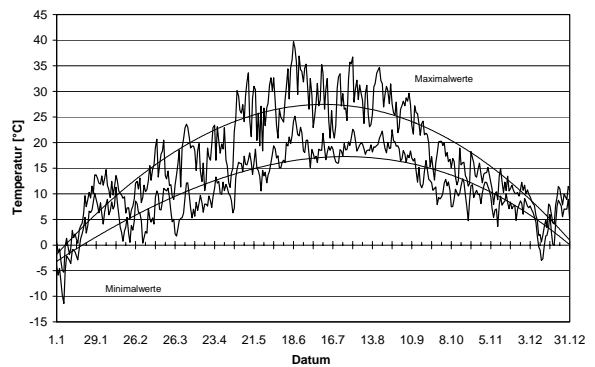


Bild 30: 2002 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -60 mm

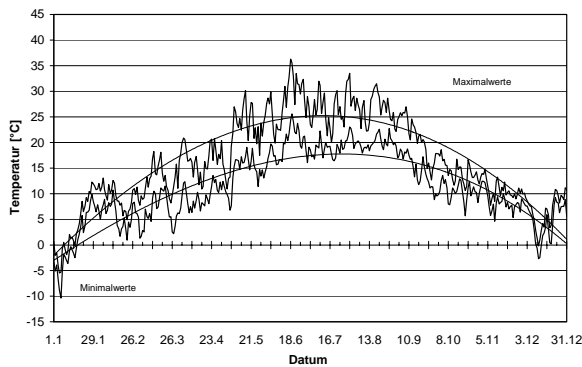


Bild 27: 2002 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

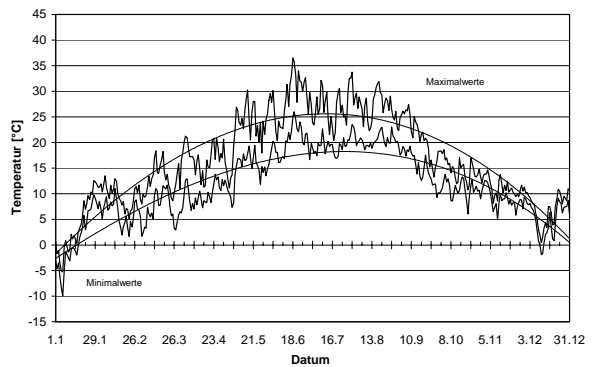


Bild 31: 2002 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -120 mm

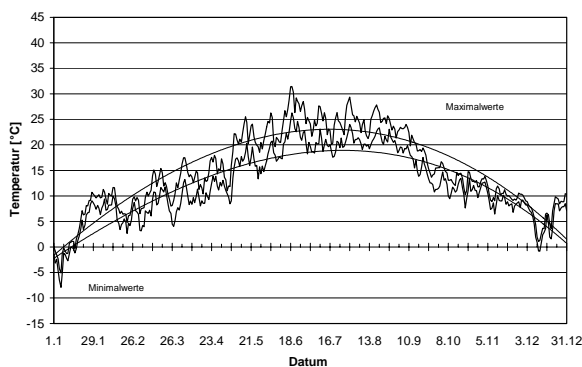


Bild 28: 2002 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

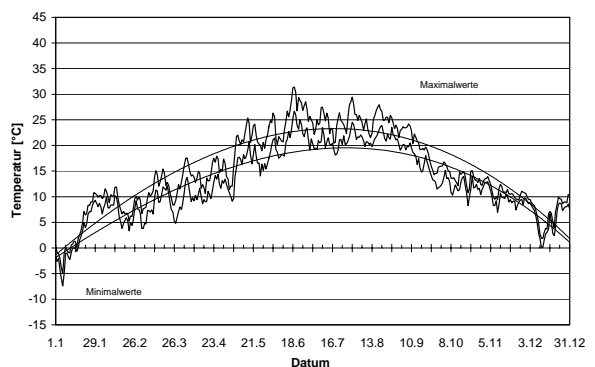


Bild 32: 2002 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -240 mm

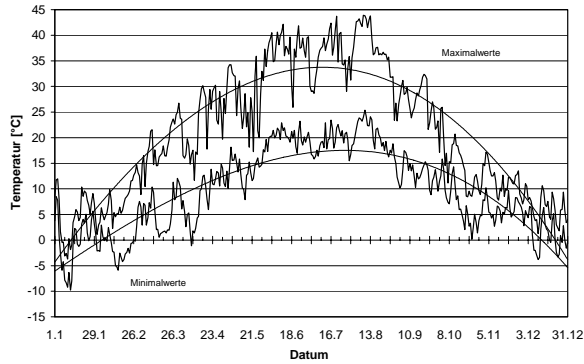


Bild 33: 2003 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

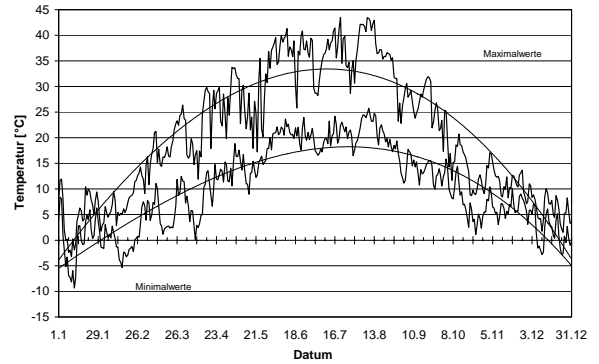


Bild 37: 2003 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 20 mm

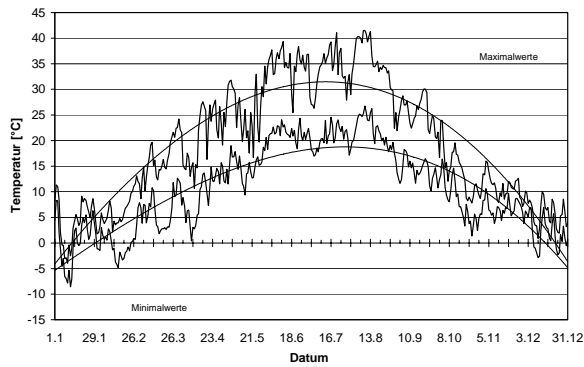


Bild 34: 2003 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

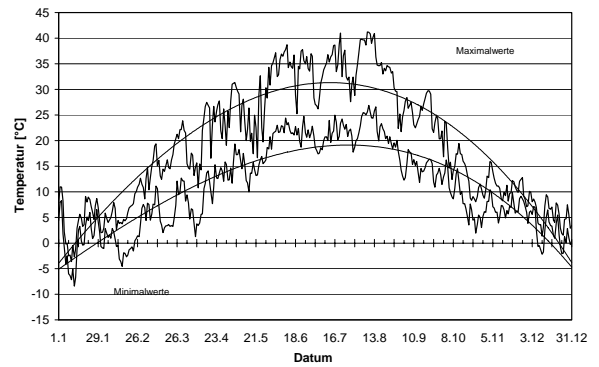


Bild 38: 2003 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 60 mm

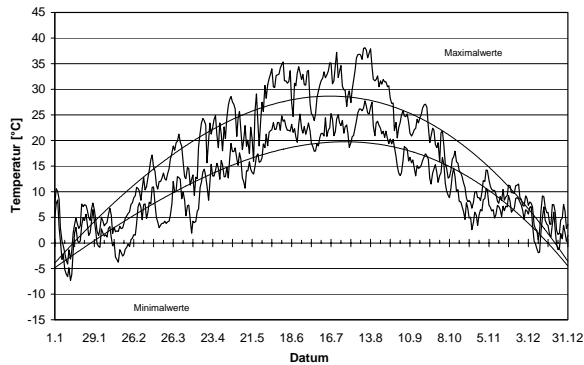


Bild 35: 2003 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

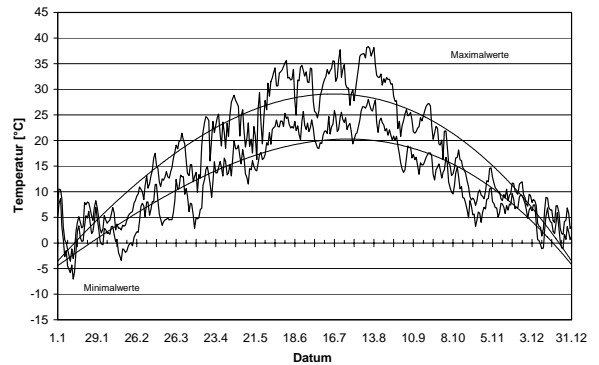


Bild 39: 2003 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 120 mm

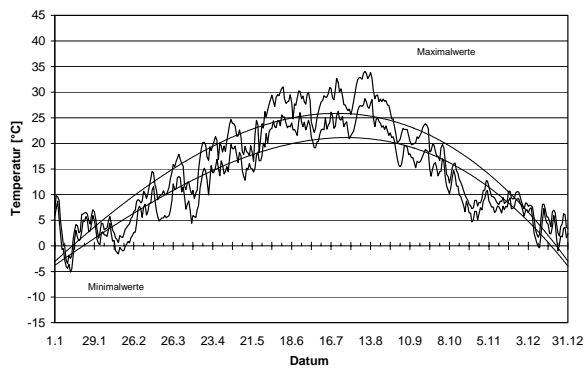


Bild 36: 2003 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

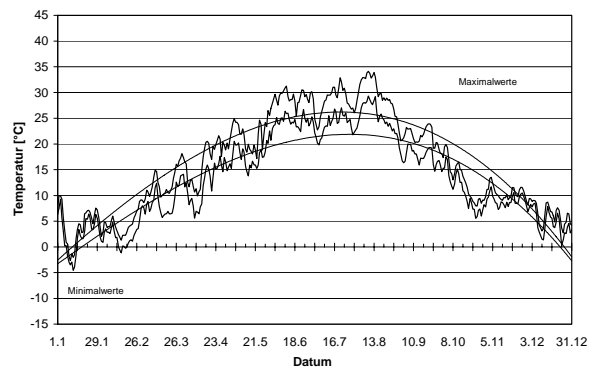


Bild 40: 2003 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, - 240 mm

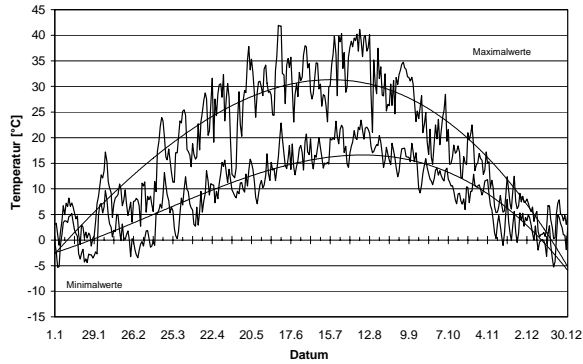


Bild 41: 2004 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

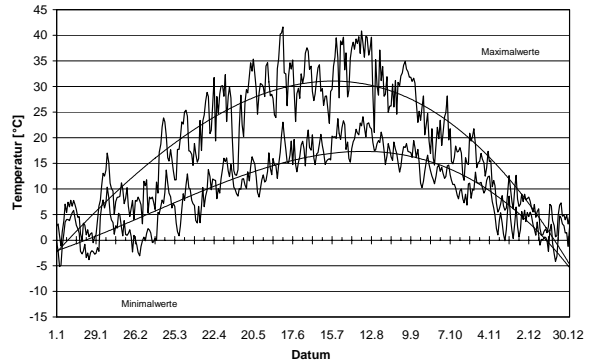


Bild 45: 2004 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -20 mm

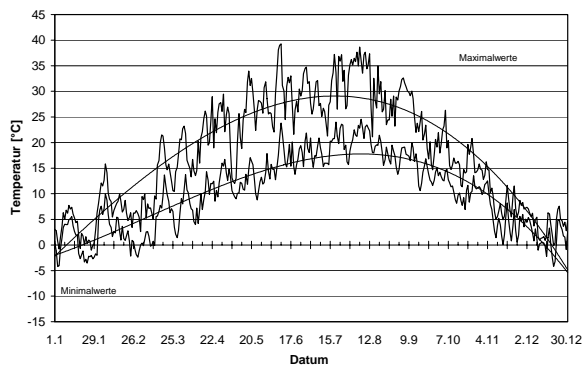


Bild 42: 2004 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

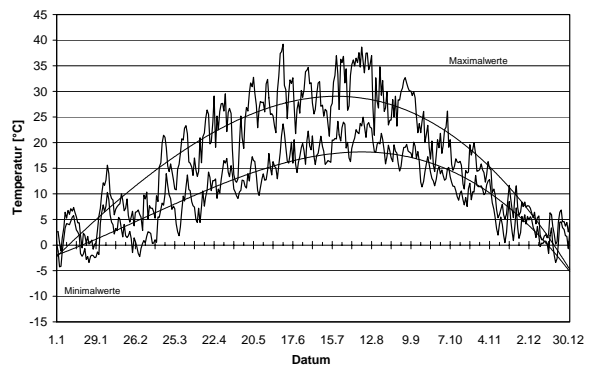


Bild 46: 2004 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -60 mm

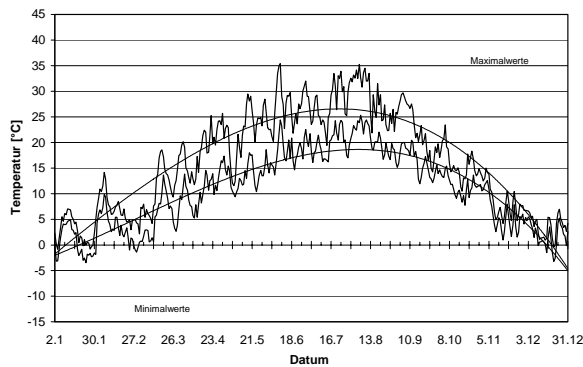


Bild 43: 2004 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

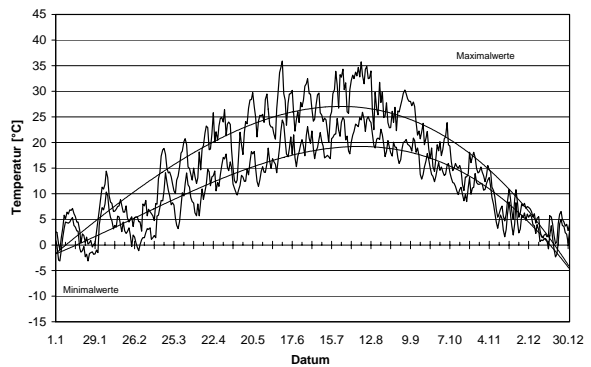


Bild 47: 2004 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -120 mm

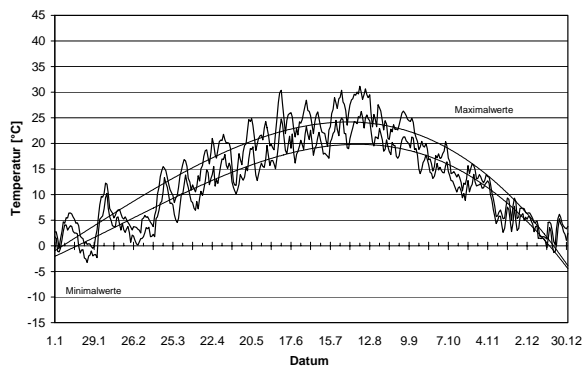


Bild 44: 2004 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

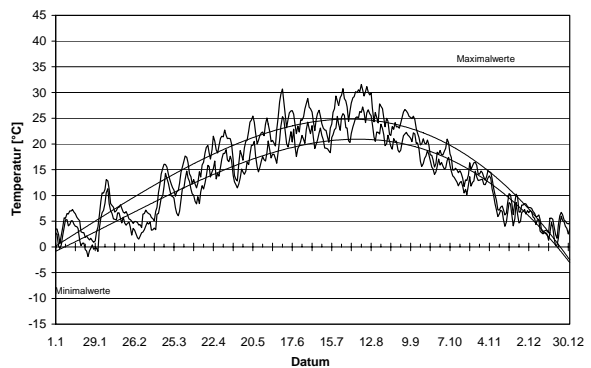


Bild 48: 2004 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, -240 mm

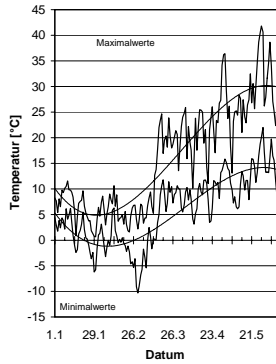


Bild 49: 2005 (Januar - Juni)
mittlerer Fahrstreifen, -15 mm

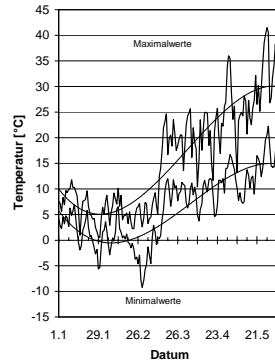


Bild 53: 2005 (Januar - Juni)
rechter Fahrstreifen, - 20 mm

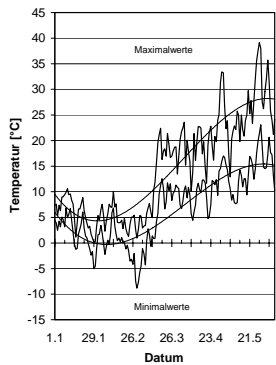


Bild 50: 2005 (Januar - Juni)
mittlerer Fahrstreifen, -55 mm

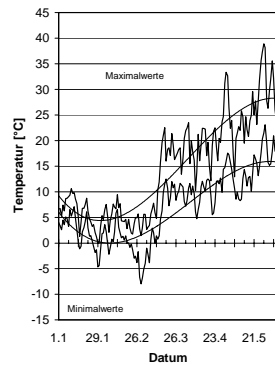


Bild 54: 2005 (Januar - Juni)
rechter Fahrstreifen, - 60 mm

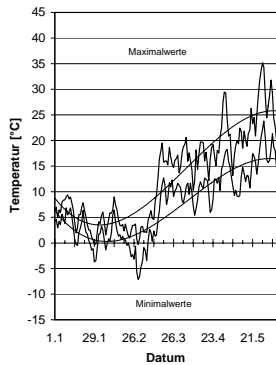


Bild 51: 2005 (Januar - Juni)
mittlerer Fahrstreifen, -115 mm

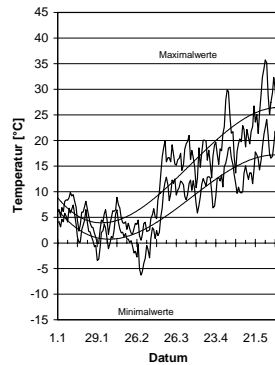


Bild 55: 2005 (Januar - Juni)
rechter Fahrstreifen, - 120 mm

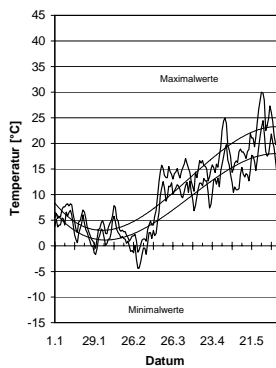


Bild 52: 2005 (Januar - Juni)
mittlerer Fahrstreifen, -235 mm

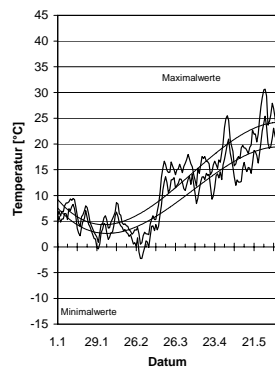


Bild 56: 2005 (Januar - Juni)
rechter Fahrstreifen, - 240 mm

Anlage 5

Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und unteren Sensor
Tägliche Maximal- und Minimalwerte

Seite 1 von 2 Seiten

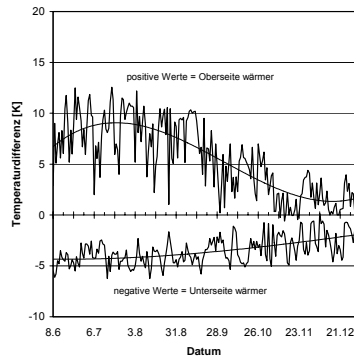


Bild 1: 1999 (Juni - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

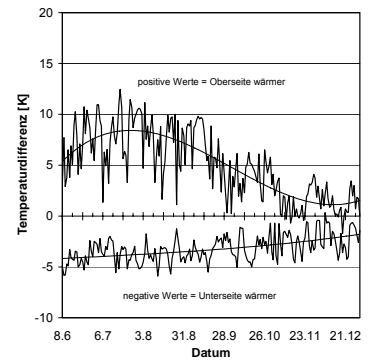


Bild 2: 1999 (Juni - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

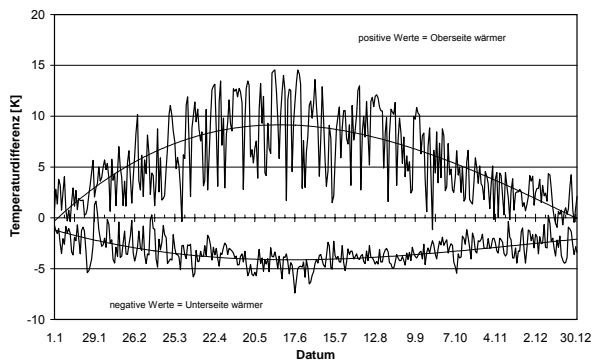


Bild 3: 2000 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

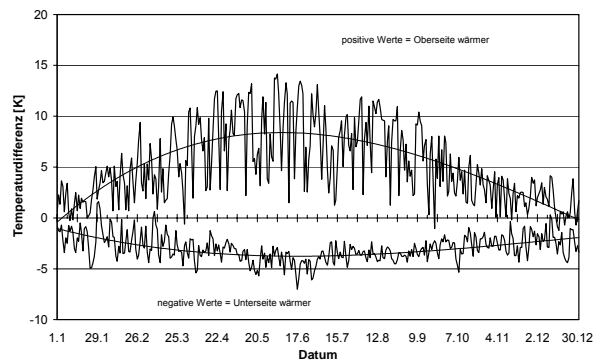


Bild 4: 2000 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

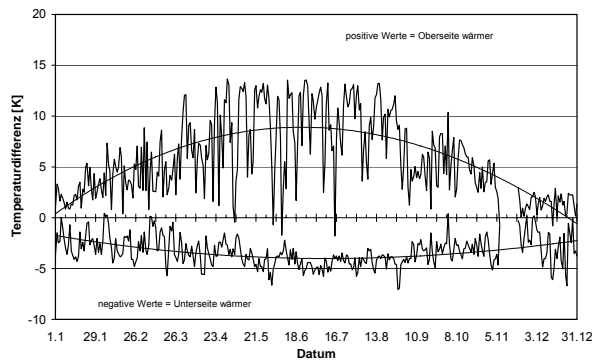


Bild 5: 2001 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

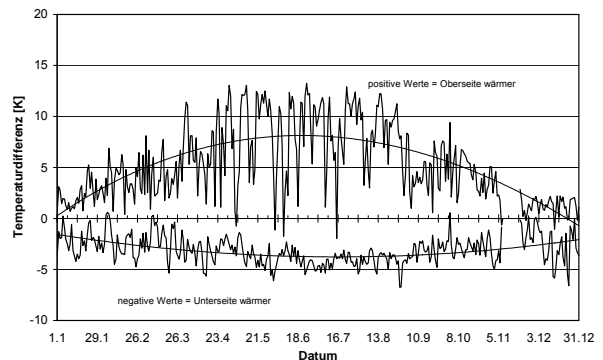


Bild 6: 2001 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

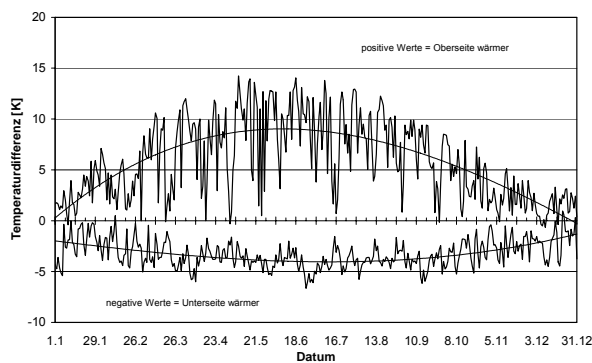


Bild 7: 2002 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

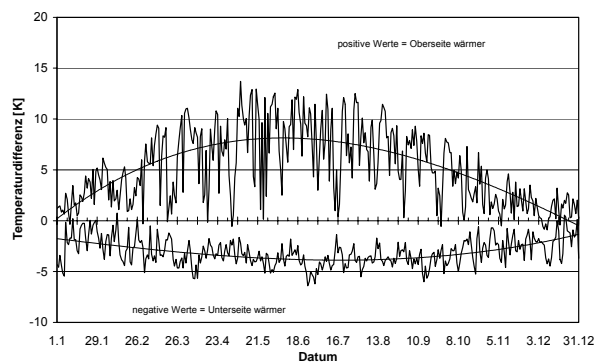


Bild 8: 2002 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

Anlage 5

Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und unteren Sensor
Tägliche Maximal- und Minimalwerte

Seite 2 von 2 Seiten

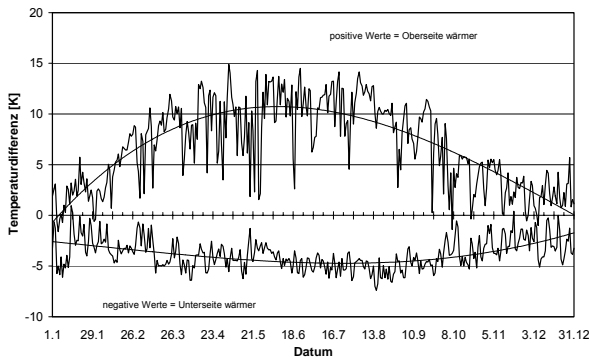


Bild 9: 2003 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

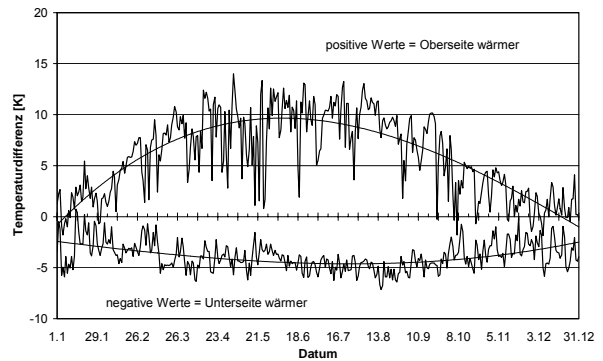


Bild 10: 2003 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

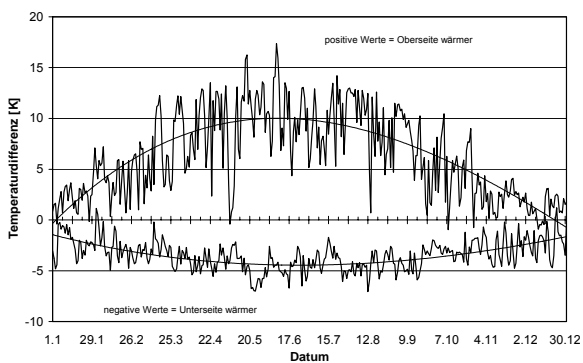


Bild 11: 2004 (Januar - Dezember)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

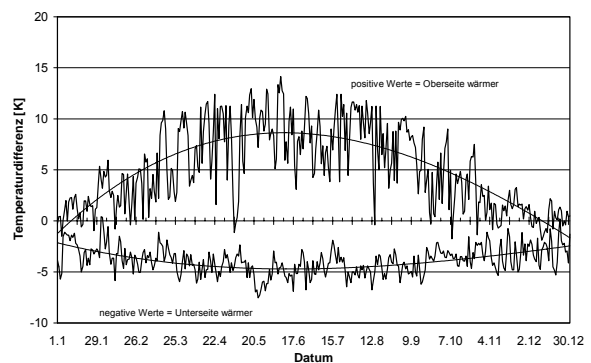


Bild 12: 2004 (Januar - Dezember)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

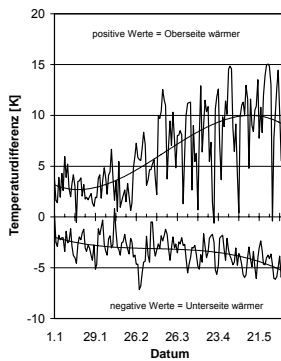


Bild 13: 2005 (Januar - Juni)
mittlerer Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

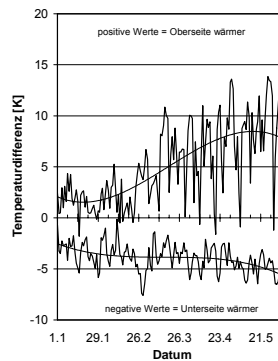


Bild 14: 2005 (Januar - Juni)
rechter Fahrstreifen, $\Delta h = 220$ mm

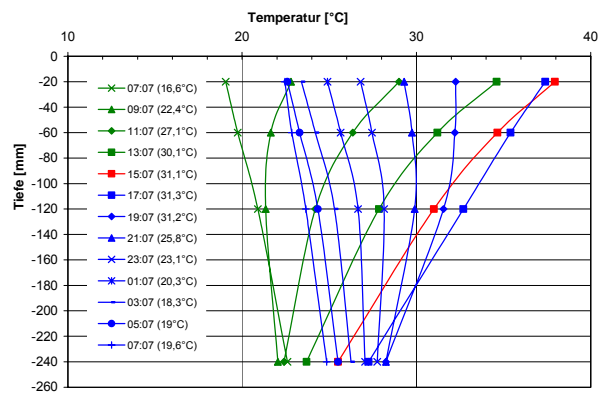
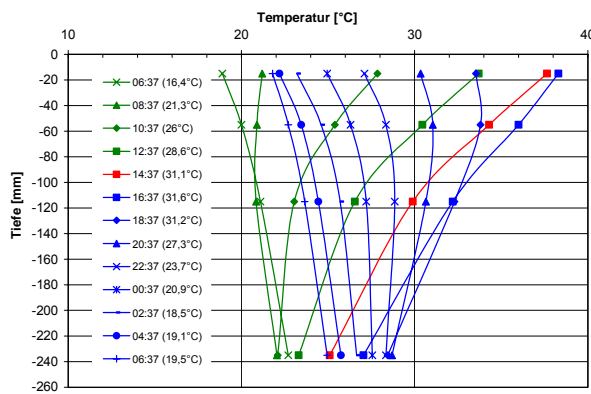
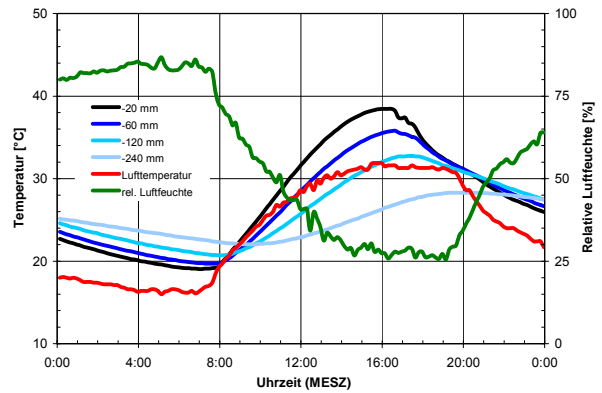
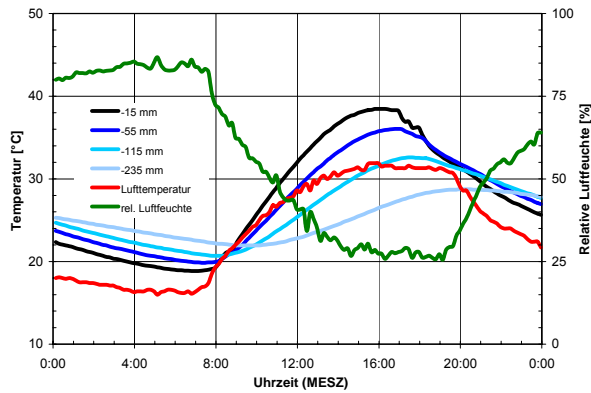


Bild 1: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 1999 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,057 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,6 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 18. Juli 1999 (28. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 2: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 1999 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,057 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,5 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 18. Juli 1999 (28. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

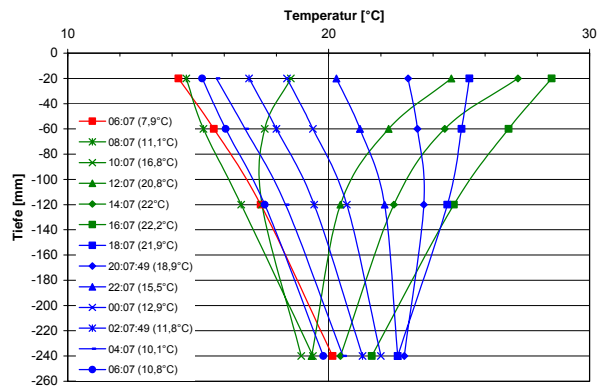
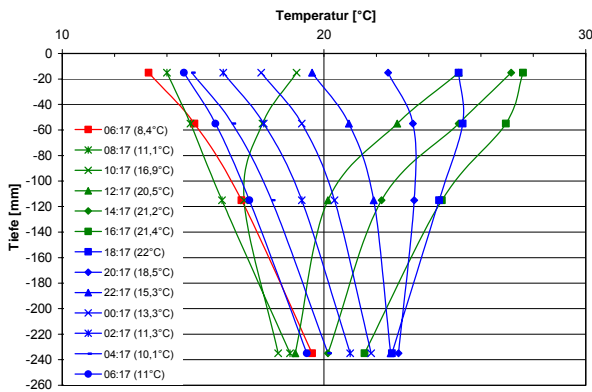
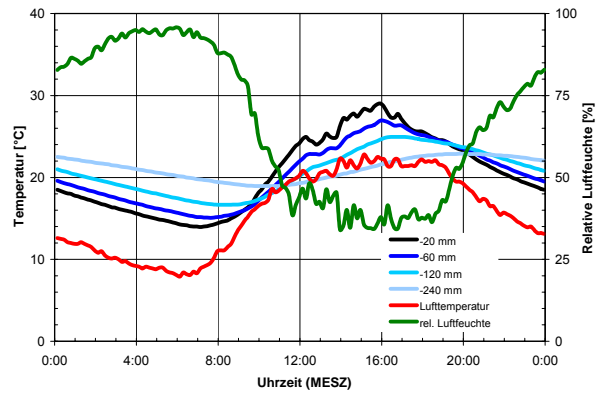
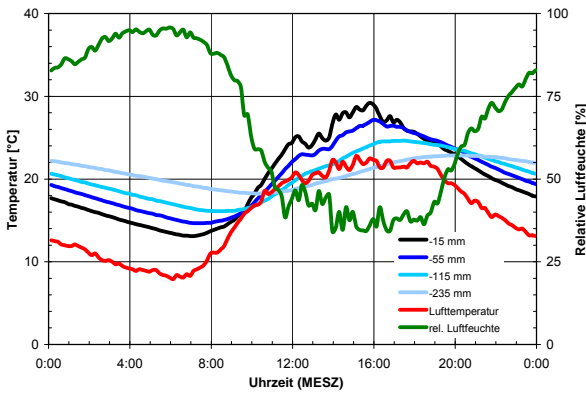


Bild 3: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 1999 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,029 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 6,3 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 13. August 1999 (32. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)
 (gleiche Temperaturdifferenz am 15.07.1999)

Bild 4: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 1999 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,027 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 5,9 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 13. August 1999 (32. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

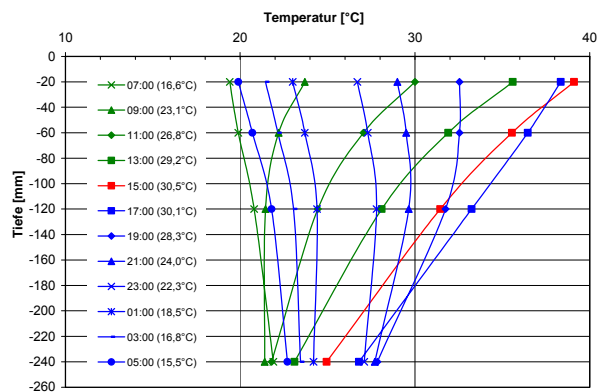
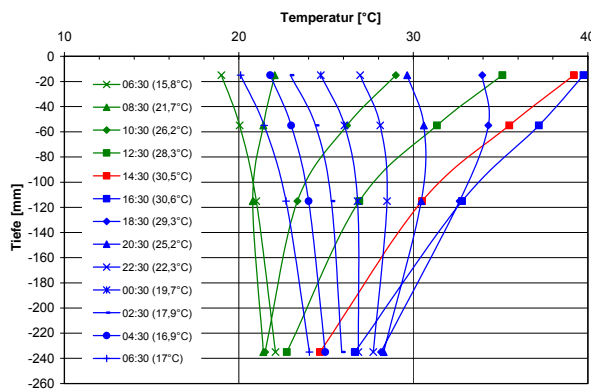
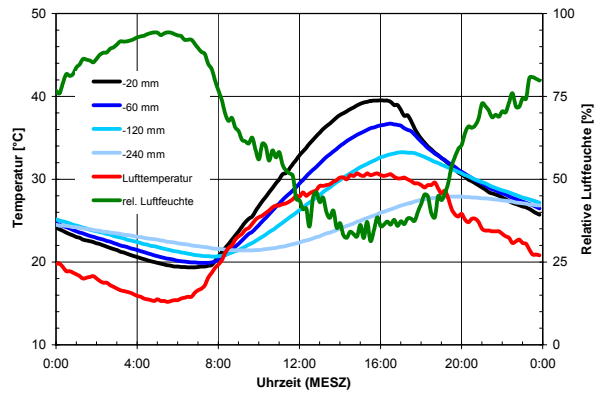
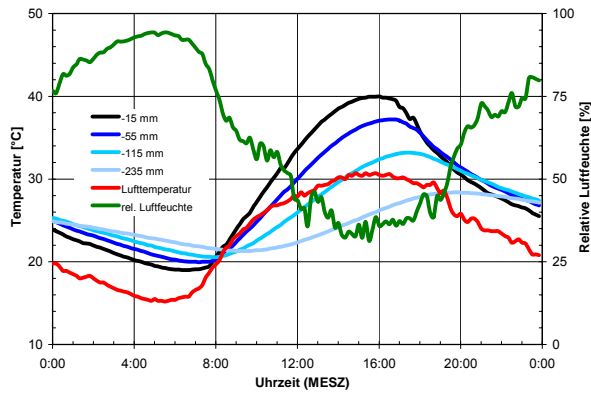


Bild 5: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2000 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,066 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,6 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 3. Juni 2000 (22. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)
 (gleiche Temperaturdifferenz am 19.06.2000)

Bild 6: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2000 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,065 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,2 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 3. Juni 2000 (22. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

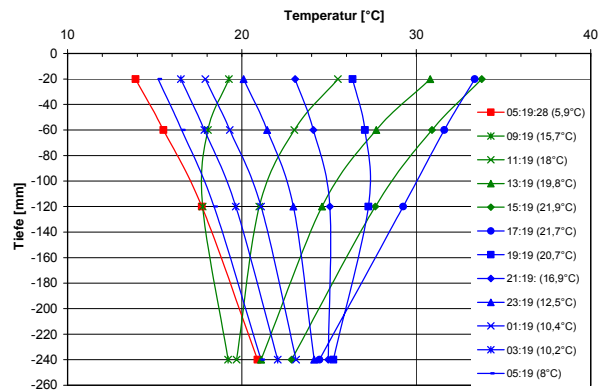
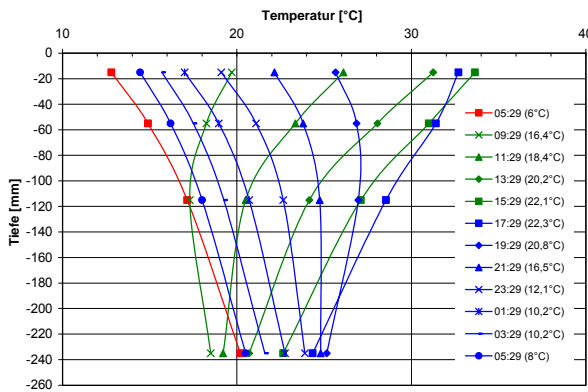
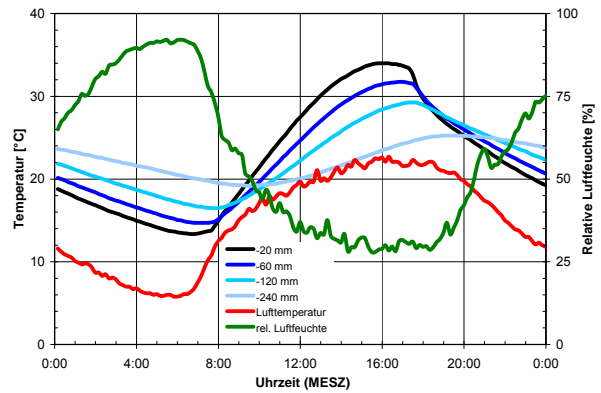
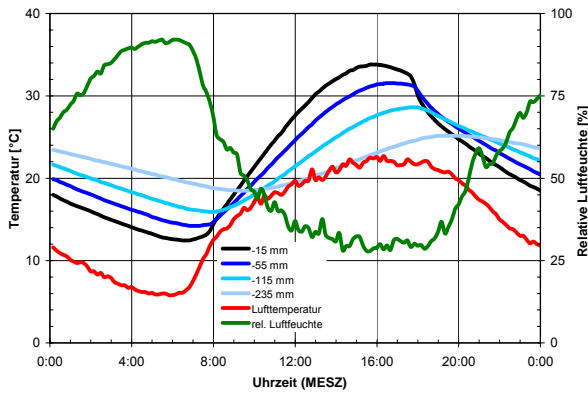


Bild 7: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2000 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,034 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 17. Juni 2000 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 8: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2000 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,032 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,0 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 17. Juni 2000 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

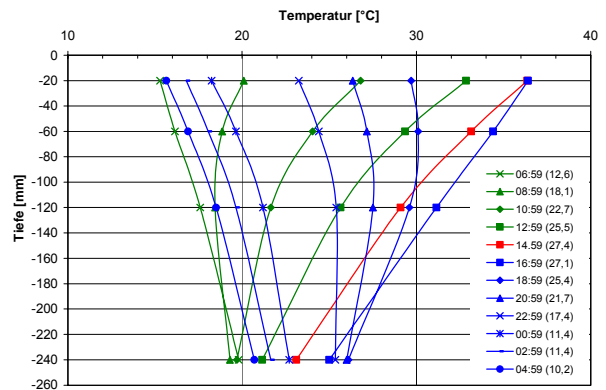
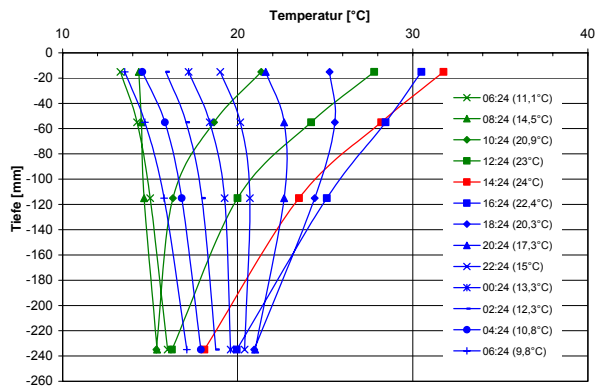
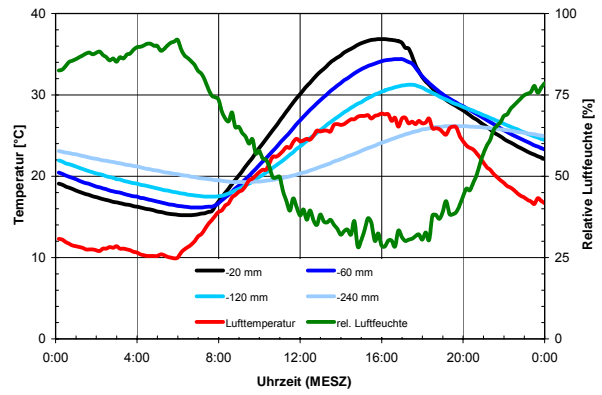
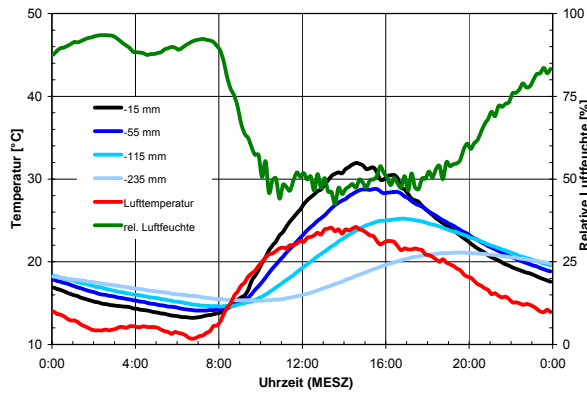


Bild 9: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2001 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,062 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 13,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 1. Mai 2001 (18. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 10: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2001 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,060 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 13,3 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 24. Juni 2001 (25. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

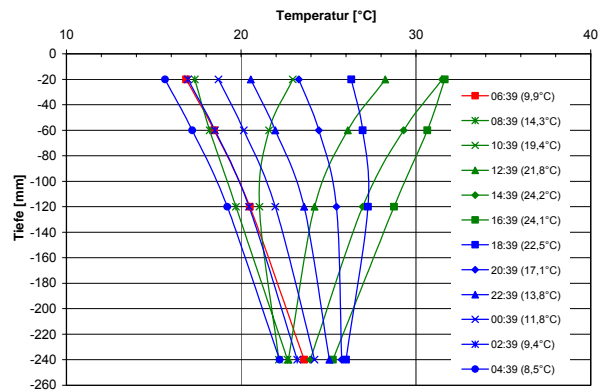
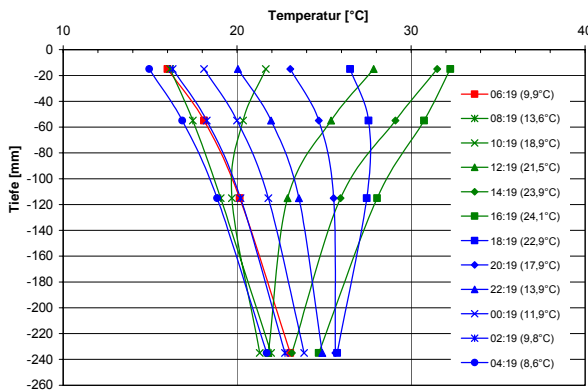
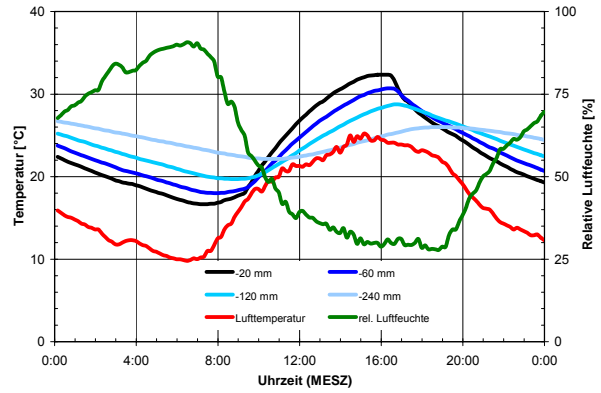
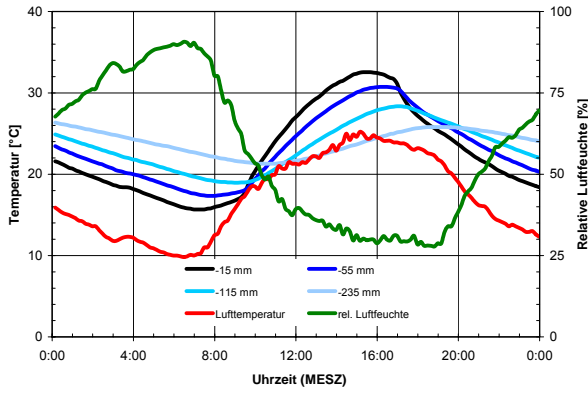


Bild 11: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2001 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,032 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,1 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 28. August 2001 (35. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 12: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2001 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,031 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 6,8 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 28. August 2001 (35. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

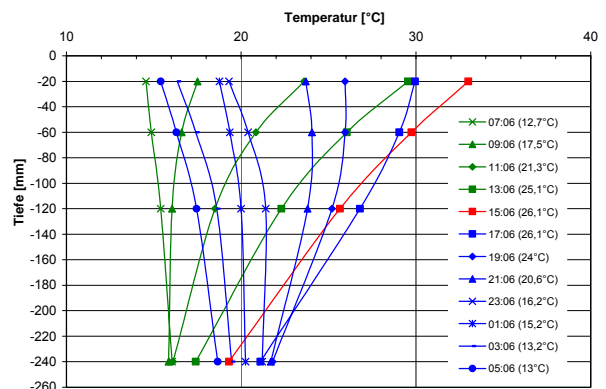
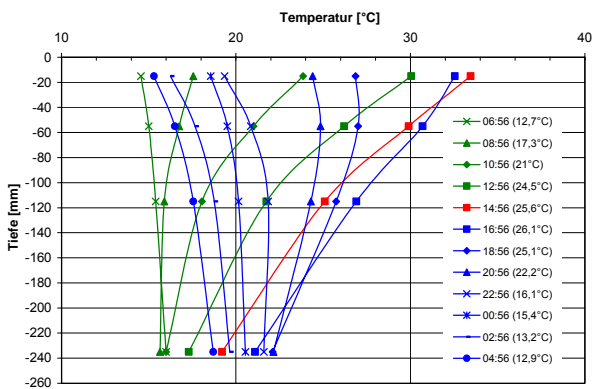
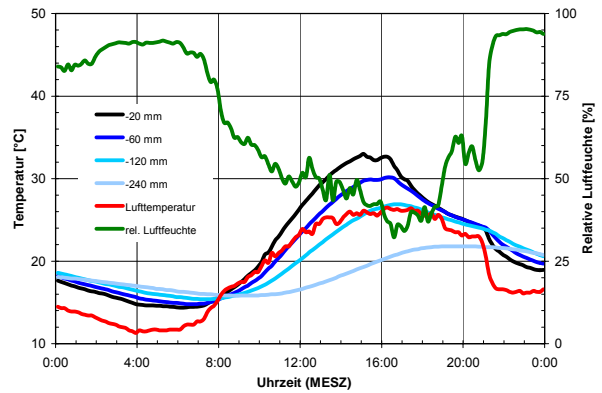
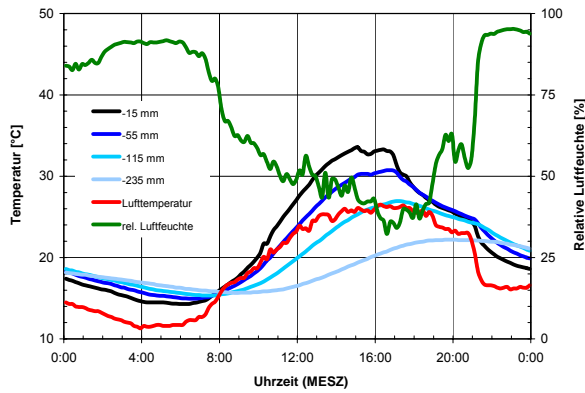


Bild 13: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2002 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,065 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,3 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 9. Mai 2002 (19. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 14: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2002 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,062 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 13,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 9. Mai 2002 (19. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

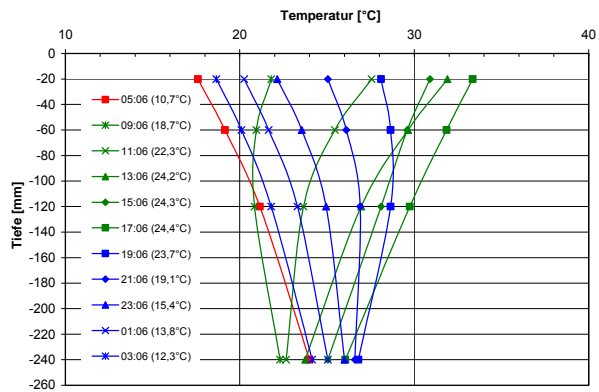
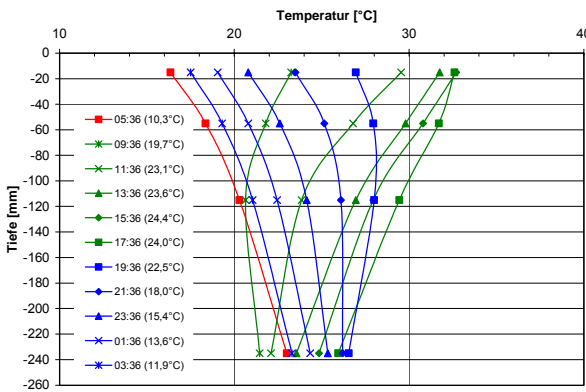
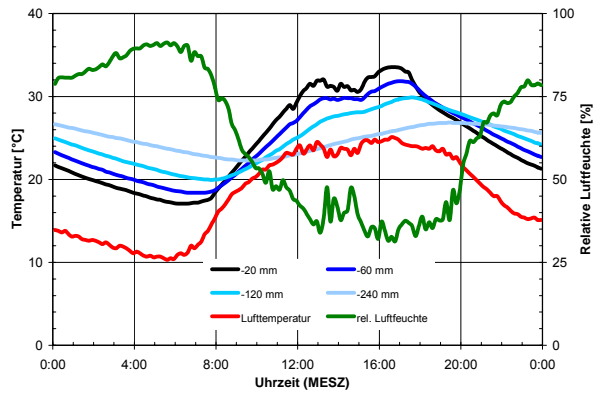
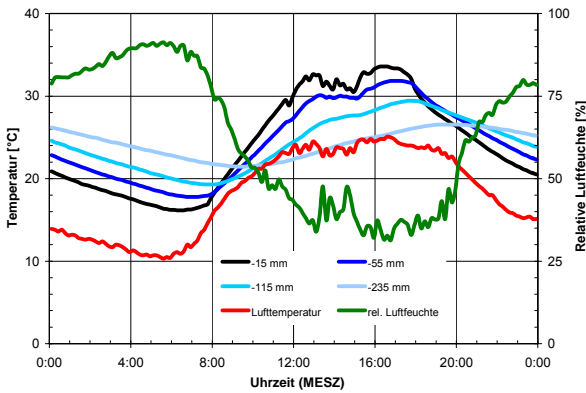


Bild 15: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2002 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,030 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 6,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 25. Juni 2002 (26. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 16: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2002 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,029 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 6,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 25. Juni 2002 (26. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

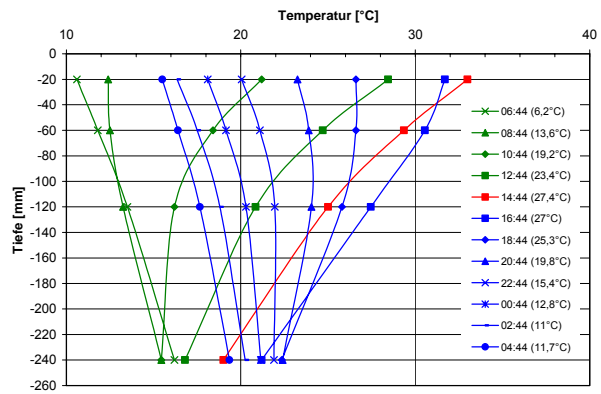
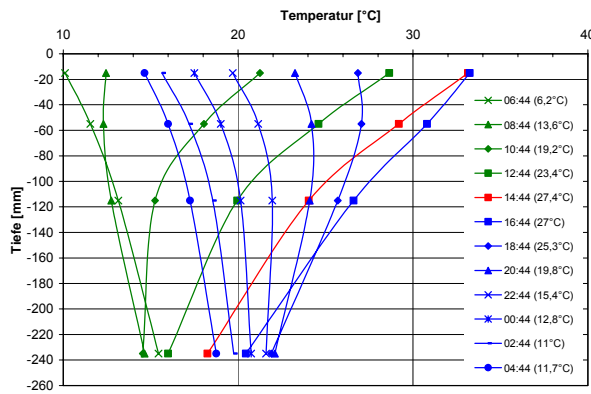
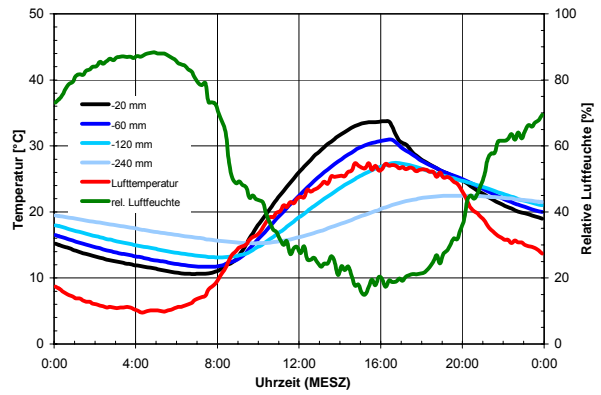
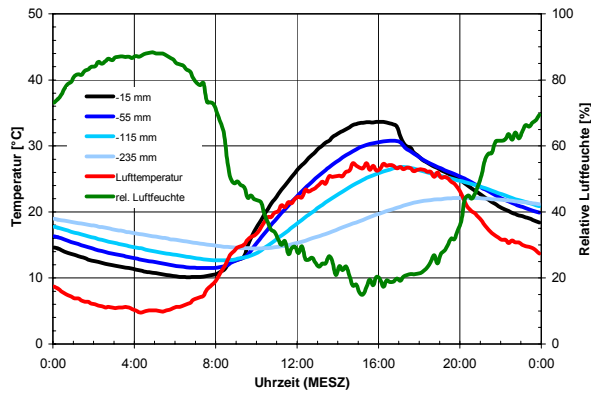


Bild 17: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2003 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,068 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,9 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 4. Mai 2003 (19. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 18: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2003 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,064 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,0 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 4. Mai 2003 (19. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

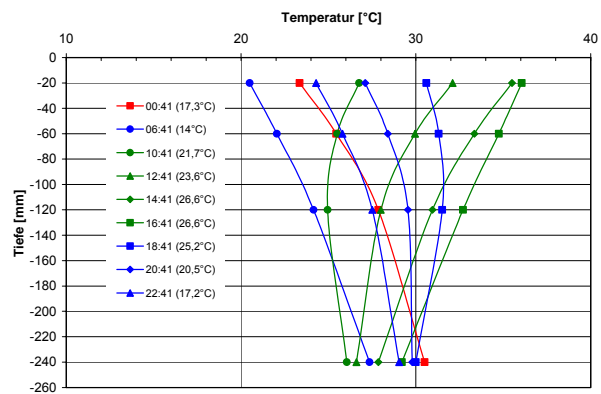
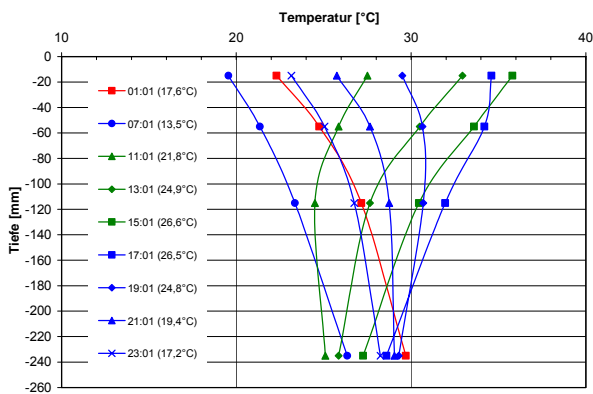
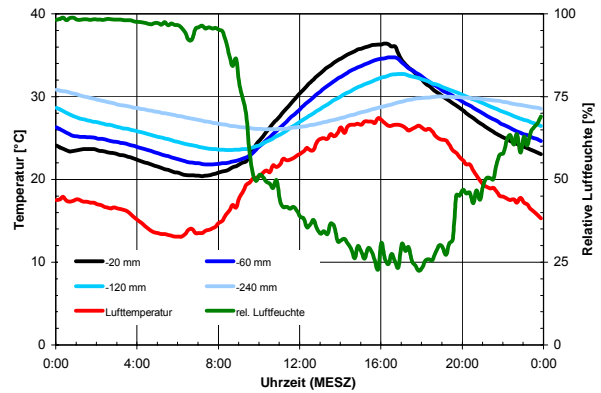
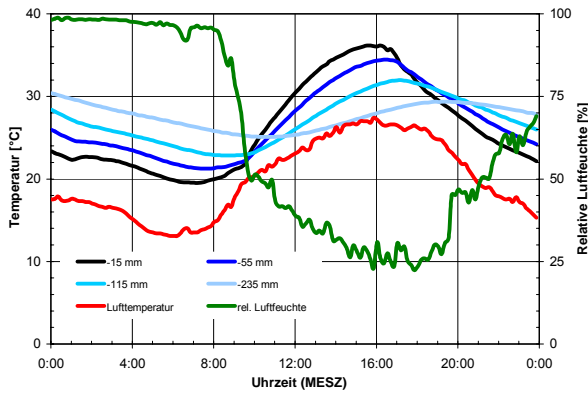


Bild 19: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2003 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,034 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 15. August 2003 (33. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 20: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2003 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,033 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,2 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 15. August 2003 (33. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

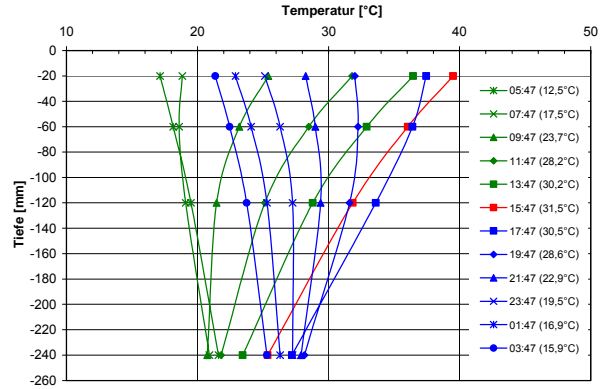
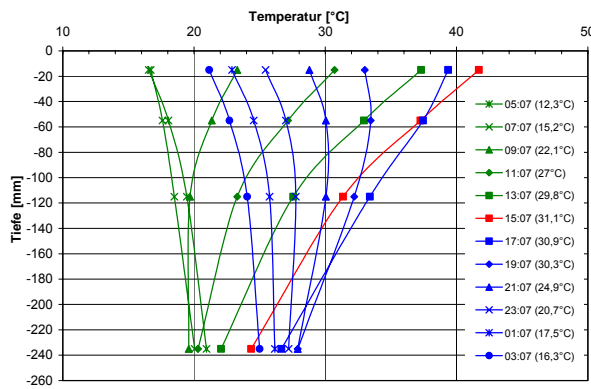
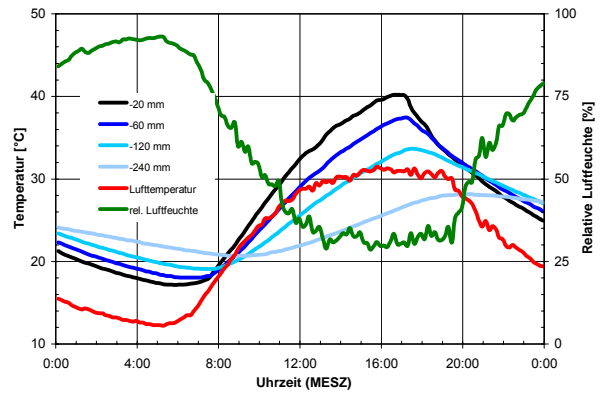
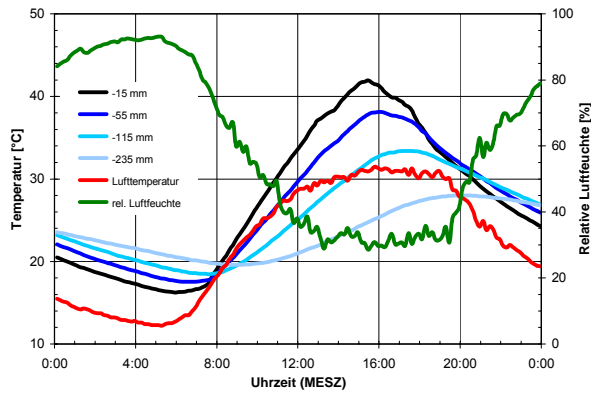


Bild 21: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2004 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,079 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 17,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 8. Juni 2004 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 22: Größter positiver Temperaturgradient im Jahr 2004 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = 0,065 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,2 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 8. Juni 2004 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

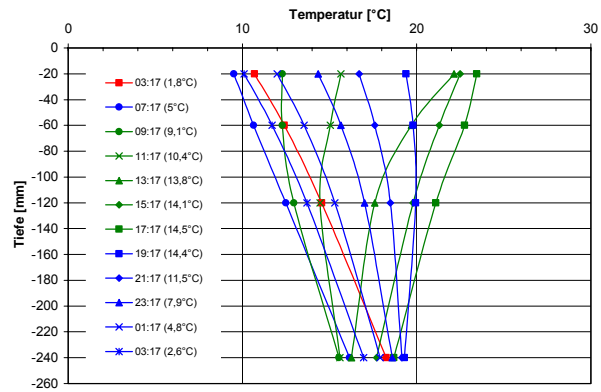
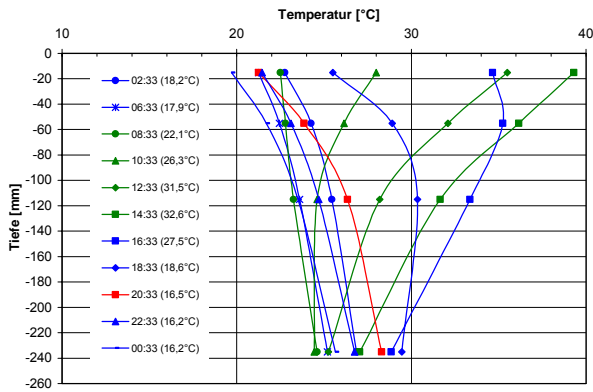
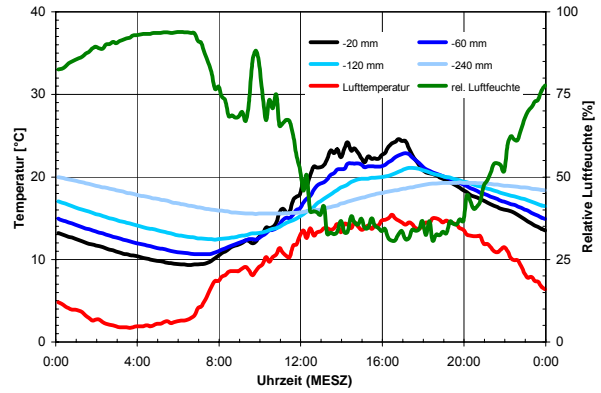
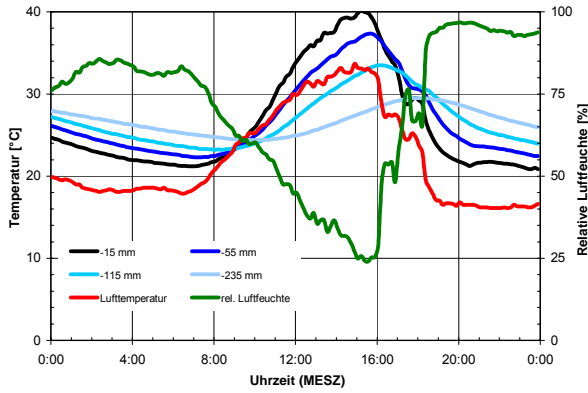


Bild 23: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2004 im mittleren Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,032 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,1 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 12. August 2004 (33. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 24: Größter negativer Temperaturgradient im Jahr 2004 im rechten Fahrstreifen
 $\Delta t = - 0,035 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = - 7,6 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 23. Mai 2004 (21. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz, Lufttemperatur in Klammern)

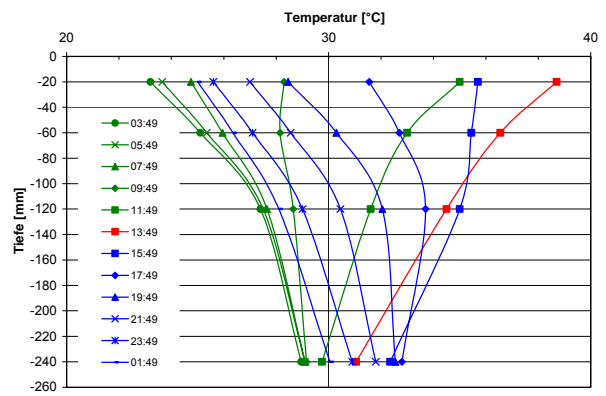
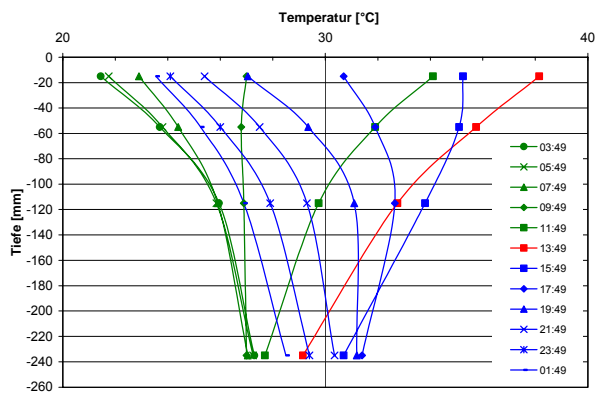
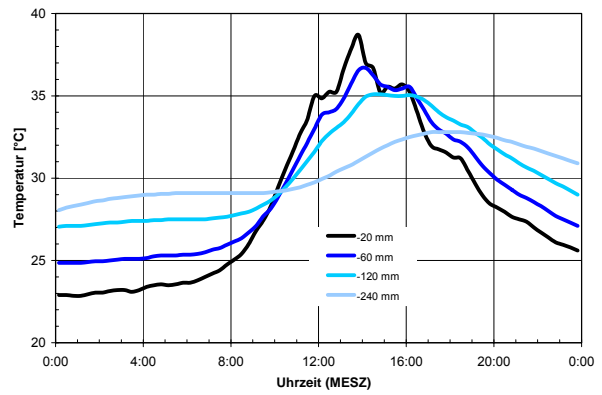
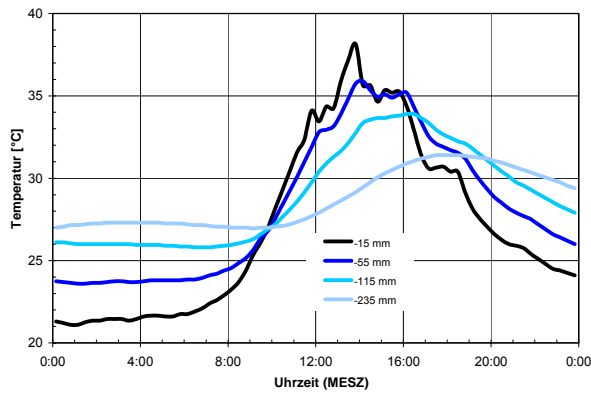


Bild 1: Größte Erwärmung im Jahr 1999 im mittleren Fahrstreifen am Tag nach der Herstellung der Betondecke (8. Juni 1999), $\Delta t = 0,041 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 9,0 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 9. Juni 1999 (23. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 2: Größte Erwärmung im Jahr 1999 im rechten Fahrstreifen am Tag nach der Herstellung der Betondecke (8. Juni 1999), $\Delta t = 0,035 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 7,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 9. Juni 1999 (23. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

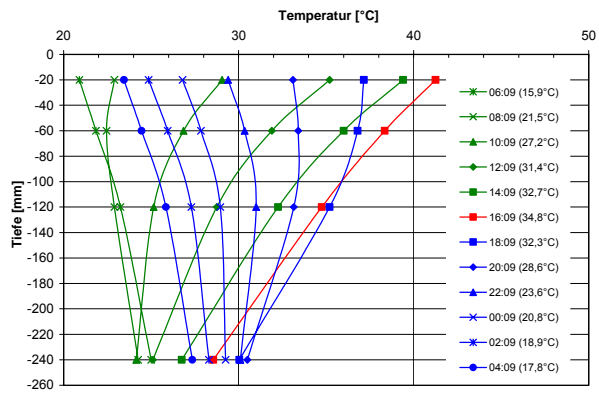
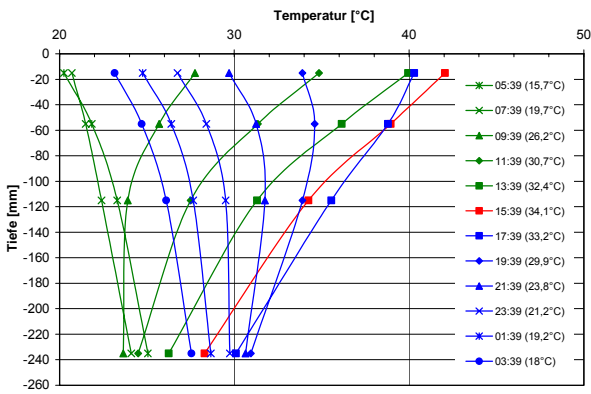
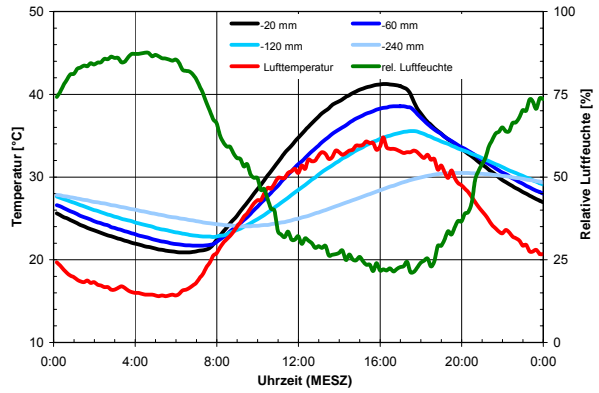
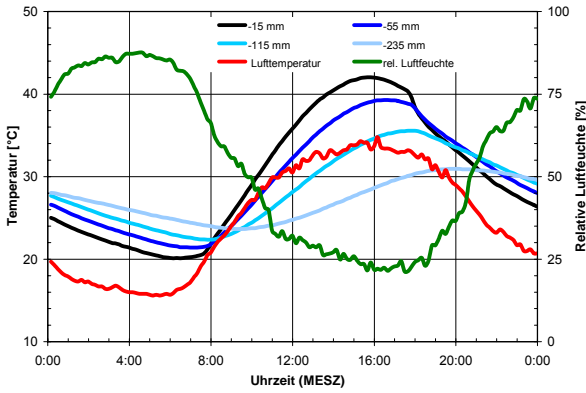


Bild 3: Größte Erwärmung im Jahr 2000 im mittleren Fahrstreifen, $\Delta t = 0,063 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 13,8 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 20. Juni 2000 (25. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 4: Größte Erwärmung im Jahr 2000 im rechten Fahrstreifen, $\Delta t = 0,058 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 20. Juni 2000 (25. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

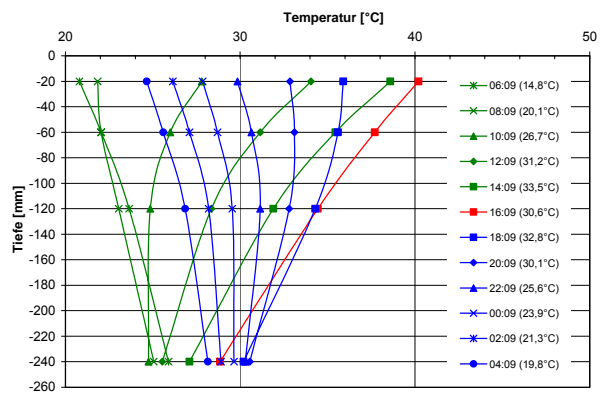
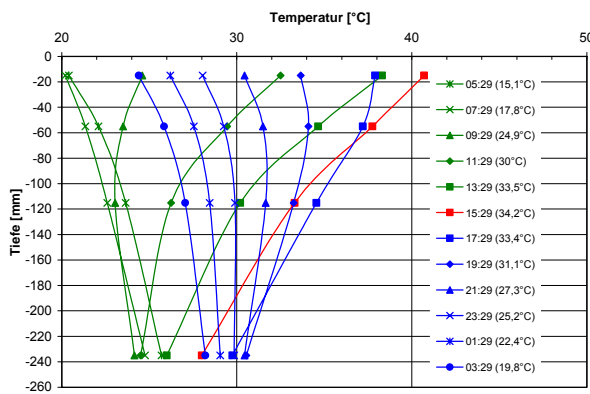
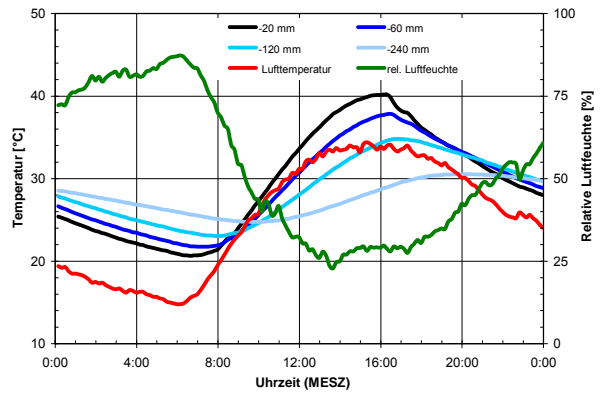
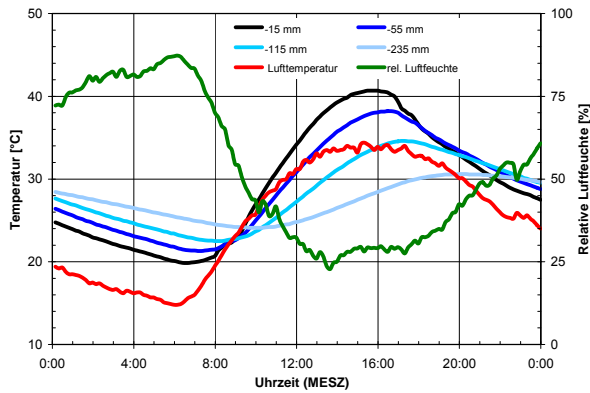


Bild 5: Größte Erwärmung im Jahr 2001 im mittleren Fahrstreifen, $\Delta t = 0,058 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,7 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 31. Juli 2001 (31. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 6: Größte Erwärmung im Jahr 2001 im rechten Fahrstreifen, $\Delta t = 0,052 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 11,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 31. Juli 2001 (31. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

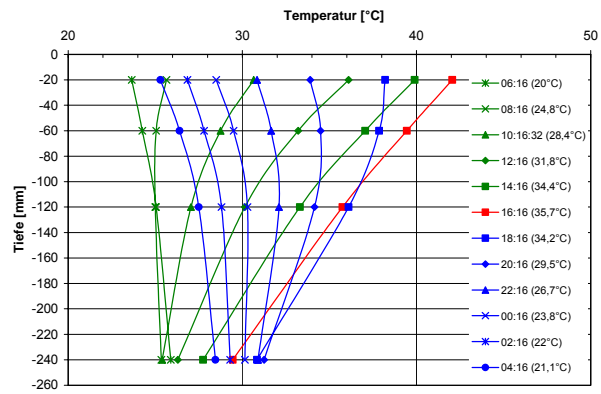
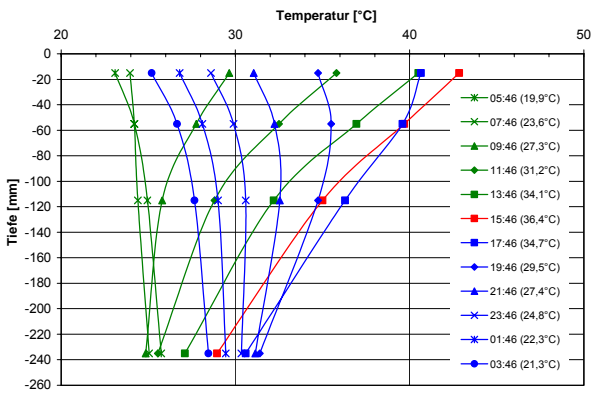
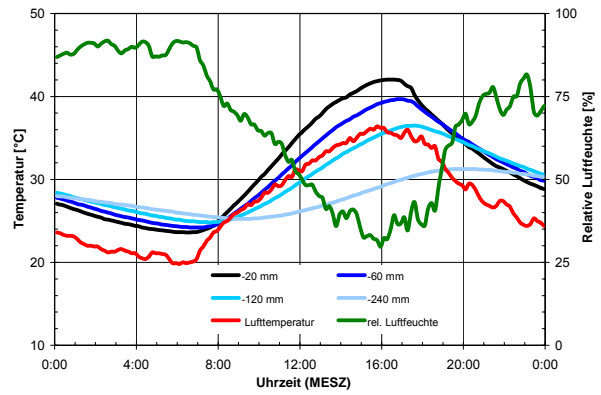
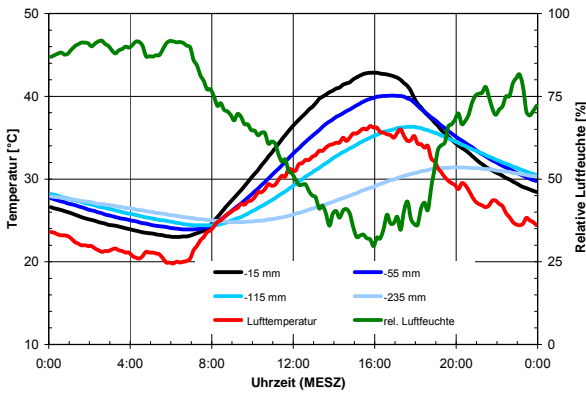


Bild 7: Größte Erwärmung im Jahr 2002 im mittleren Fahrstreifen, $\Delta t = 0,064 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 14,1 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 18. Juni 2002 (25. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 8: Größte Erwärmung im Jahr 2002 im rechten Fahrstreifen, $\Delta t = 0,059 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,9 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 18. Juni 2002 (25. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

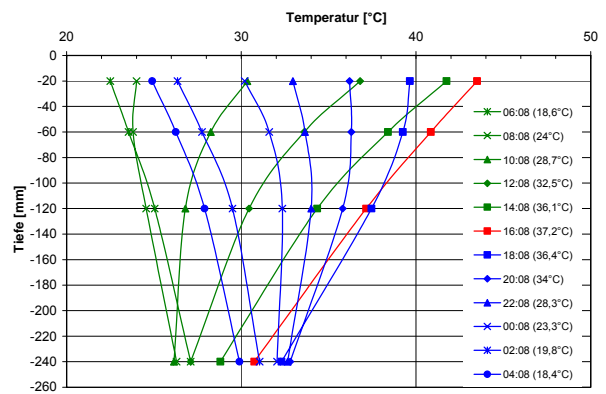
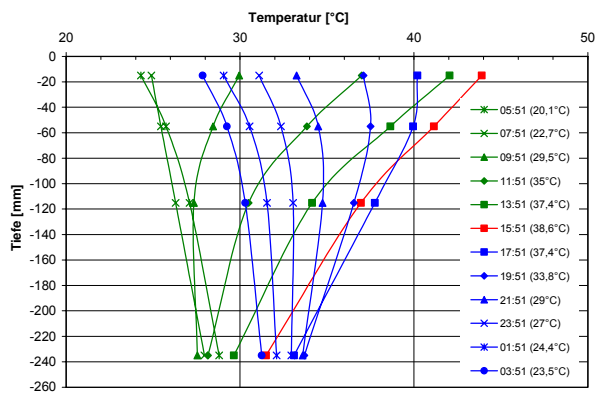
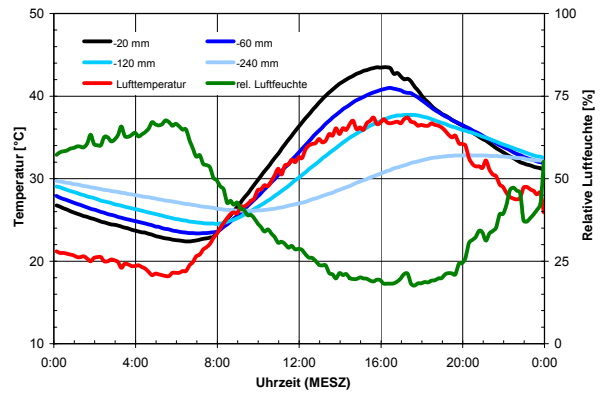
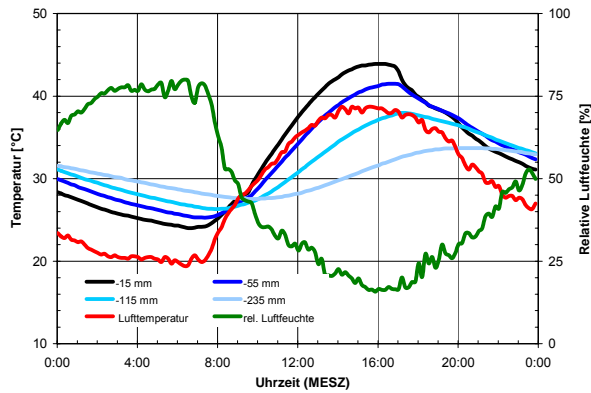


Bild 9: Größte Erwärmung im Jahr 2003 im mittleren Fahrstreifen, $\Delta t = 0,059 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,9 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 8. August 2003 (32. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 10: Größte Erwärmung im Jahr 2003 im rechten Fahrstreifen, $\Delta t = 0,060 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 13,3 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 20. Juli 2003 (29. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

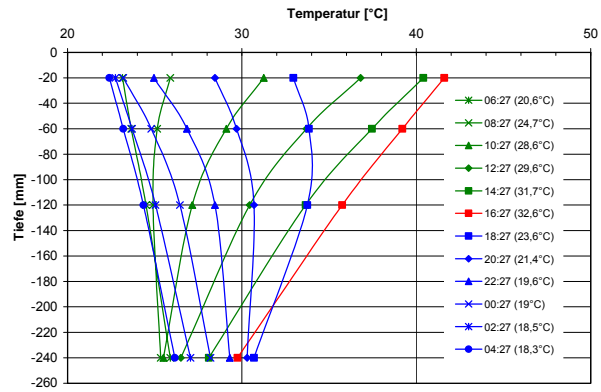
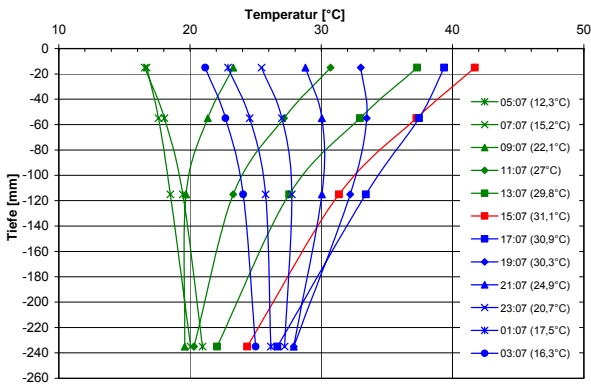
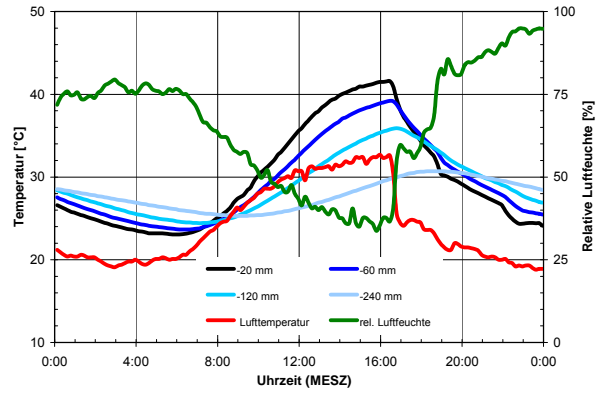
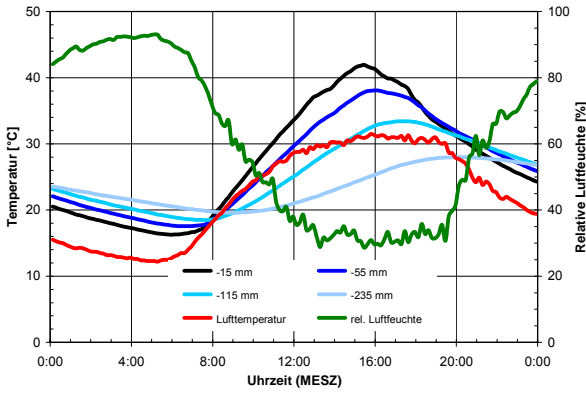


Bild 11: Größte Erwärmung im Jahr 2004 im mittleren Fahrstreifen, $\Delta t = 0,080 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 17,4 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 8. Juni 2004 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

Bild 12: Größte Erwärmung im Jahr 2004 im rechten Fahrstreifen, $\Delta t = 0,057 \text{ K/mm}$ ($\Delta T = 12,5 \text{ K}$)
oben: Temperaturgang am 10. Juni 2004 (24. KW)
unten: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = höchste Temperatur, Lufttemperatur in Klammern)

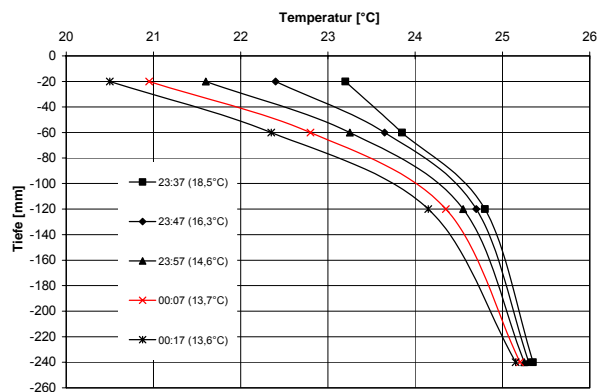
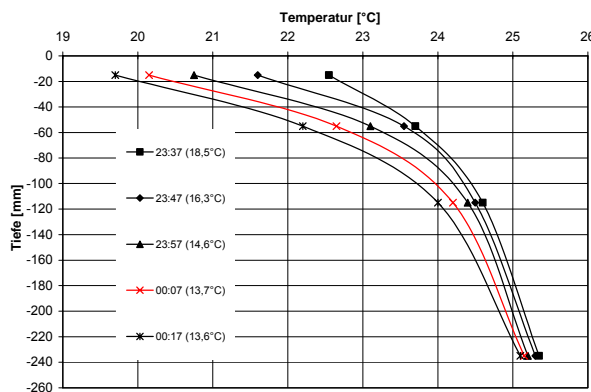
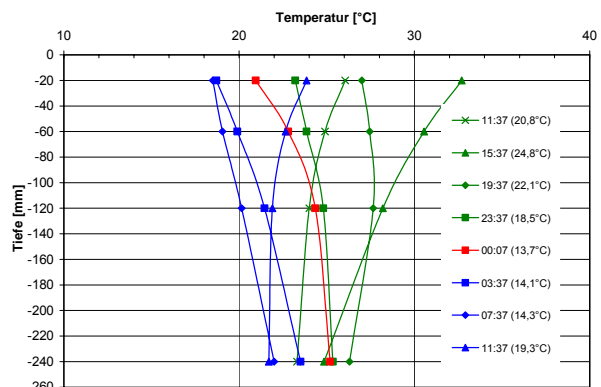
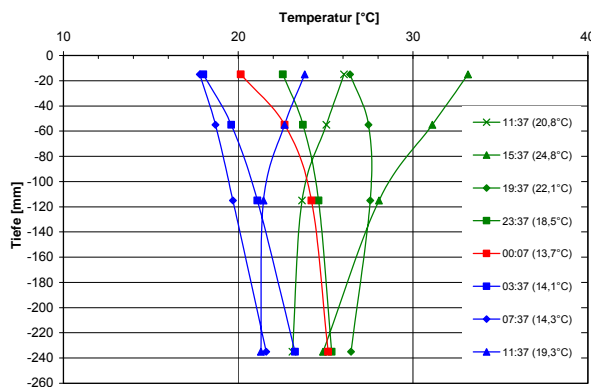
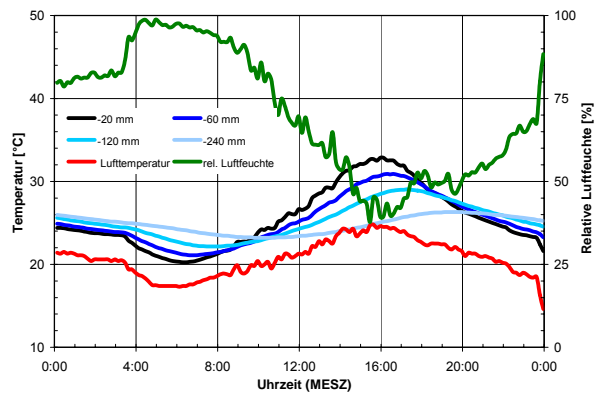
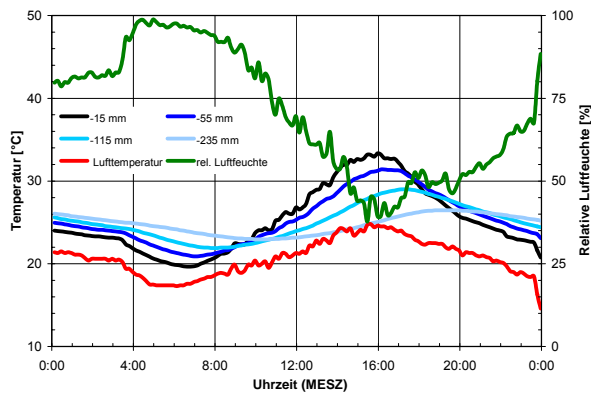


Bild 1: Größter Temperaturschock im Jahr 1999 im mittleren Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 9,6 K/h
oben: Temperaturgang am 14. Juli 1999 (28. KW) im mittleren Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 23:37 bis 00:17 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,323 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,149 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,063 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)
(vgl. 3. August 1999, 31. KW, mit 9,2 K/h)

Bild 2: Größter Temperaturschock im Jahr 1999 im rechten Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 9,6 K/h
oben: Temperaturgang am 14. Juli 1999 (28. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 23:37 bis 00:17 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,363 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,152 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,046 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)
(vgl. 3. August 1999, 31. KW, mit 9,2 K/h)

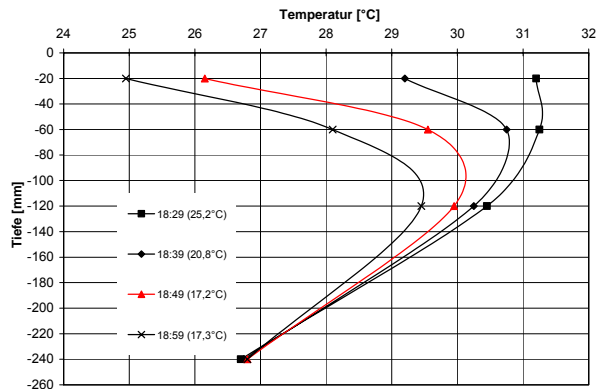
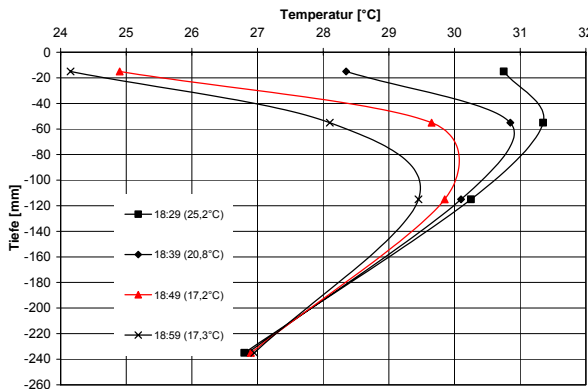
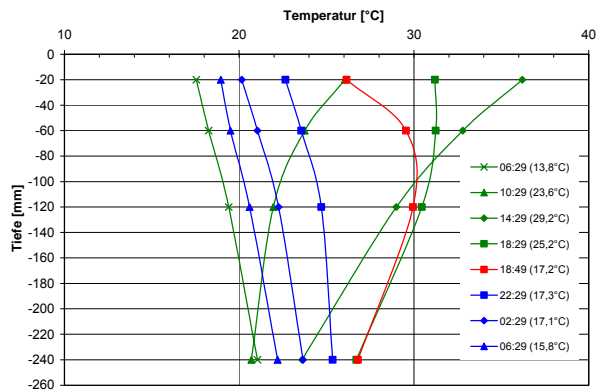
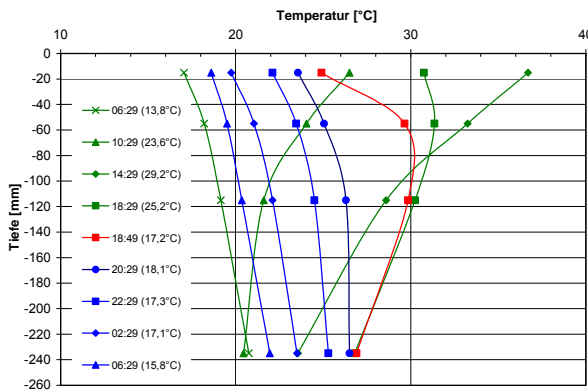
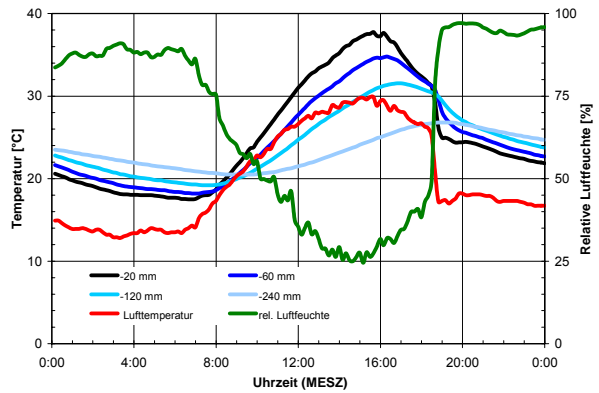
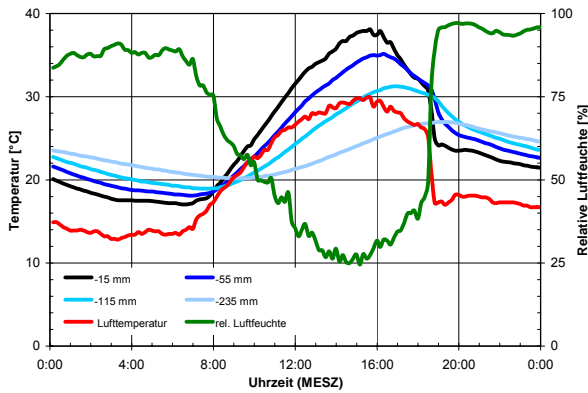


Bild 3: Größter sommerlicher Temperaturschock im Jahr 2000 im mittleren Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 15,8 K/h
oben: Temperaturgang am 1. Juli 2000 (26. KW) im mittlerer Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf , Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 18:29 bis 18:59 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,513 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,226 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,119 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 4: Größter sommerlicher Temperaturschock im Jahr 2000 im rechten Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 15,8 K/h
oben: Temperaturgang am 1. Juli 2000 (26. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf , Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 18:29 bis 18:59 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,448 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,206 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,085 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

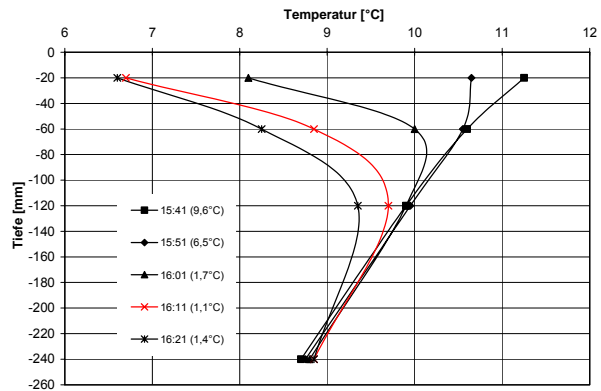
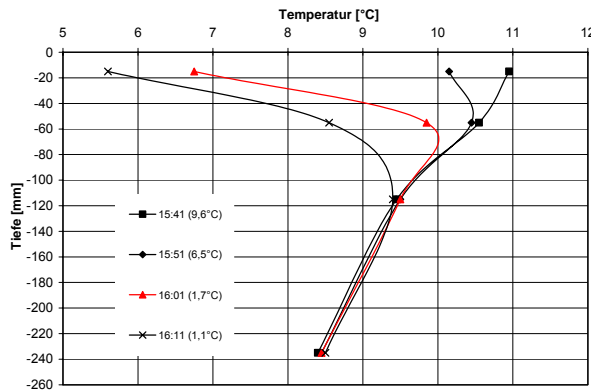
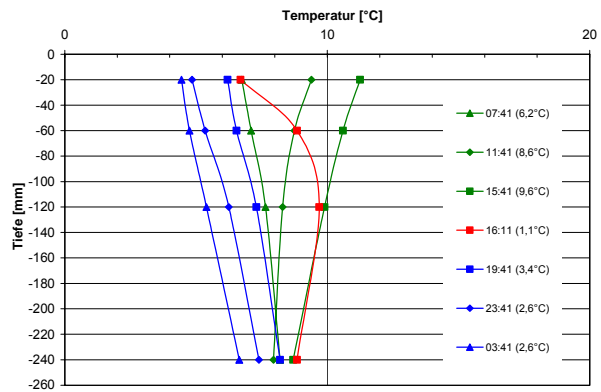
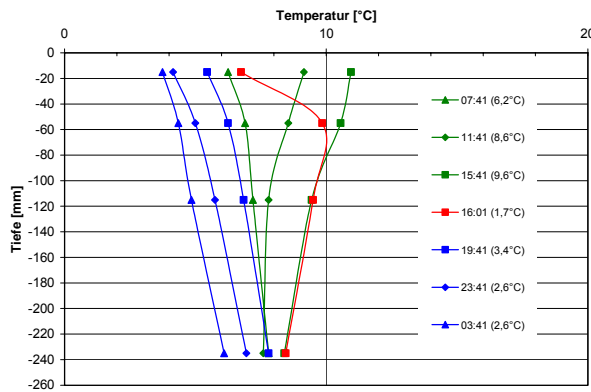
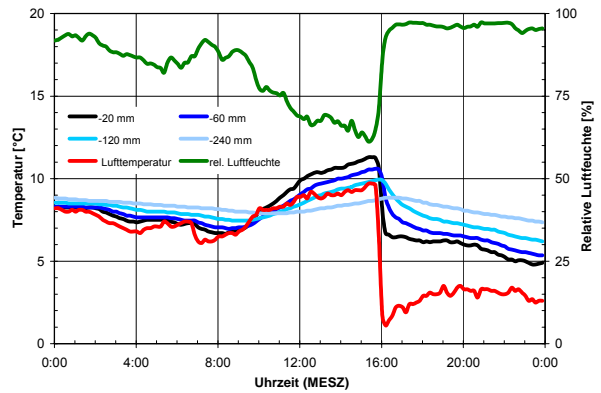
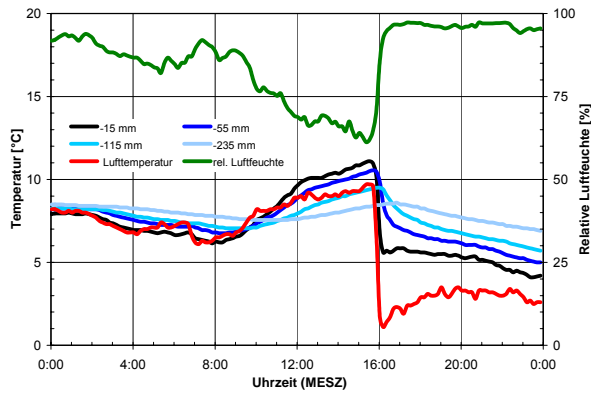


Bild 5: Größter winterlicher Temperaturschock im Jahr 2000 im mittleren Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 17 K/h
oben: Temperaturgang am 1. März 2000 (9. KW) im mittleren Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 15:41 bis 16:11 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,337 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,148 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,078 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 6: Größter winterlicher Temperaturschock im Jahr 2000 im rechten Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 17 K/h
oben: Temperaturgang am 1. März 2000 (9. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 15:41 bis 16:21 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,280 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,129 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,054 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

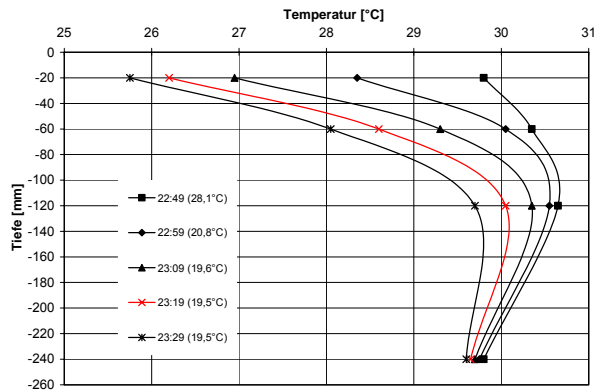
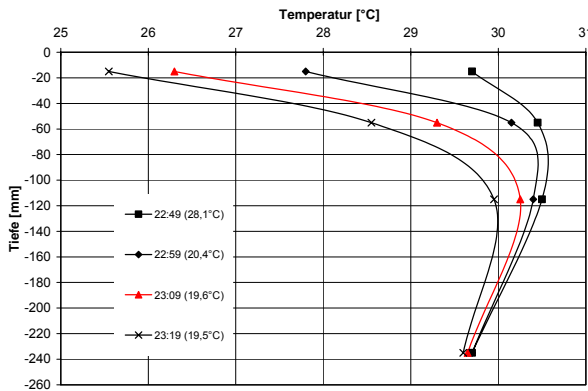
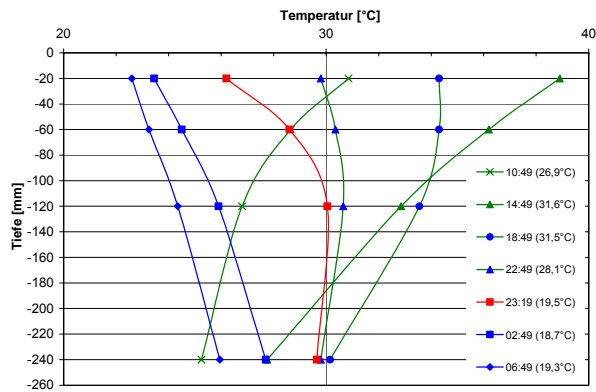
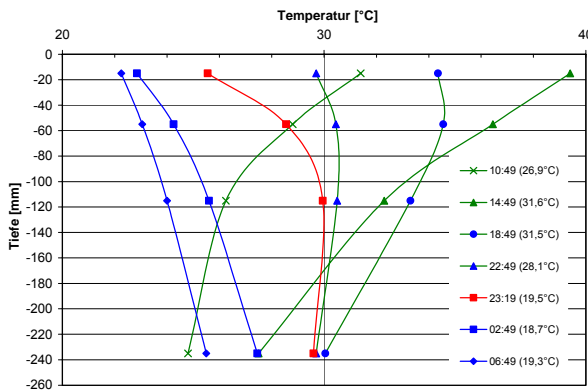
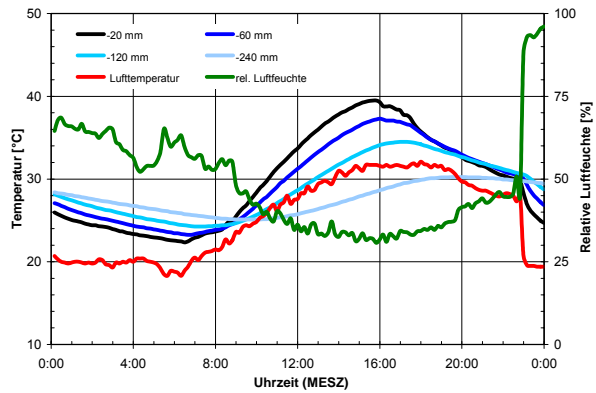
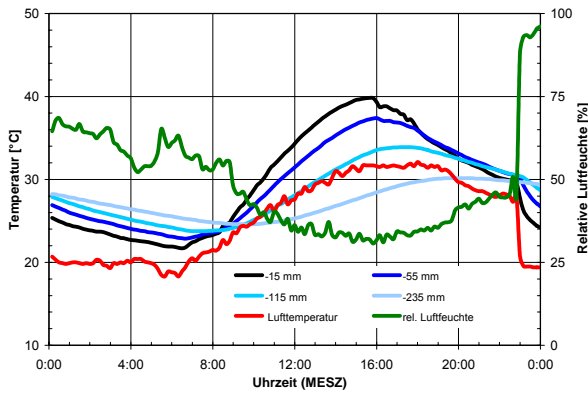


Bild 7: Größter Temperaturschock im Jahr 2001 im mittleren Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 17,2 K/h
oben: Temperaturgang am 6. Juli 2001 (27. KW) im mittlerer Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 22:49 bis 23:19 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,447 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,176 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,075 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 8: Größter Temperaturschock im Jahr 2001 im rechten Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 17,2 K/h
oben: Temperaturgang am 6. Juli 2001 (27. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 22:49 bis 23:29 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,335 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,152 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,060 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

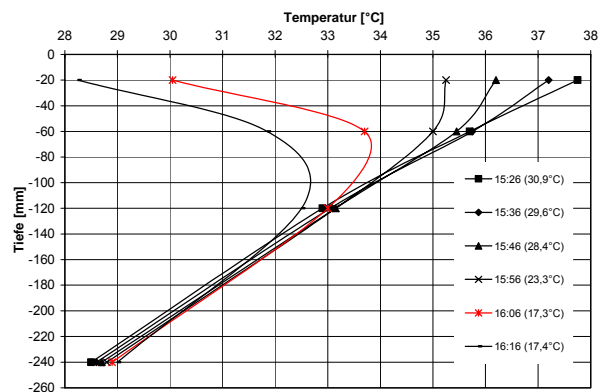
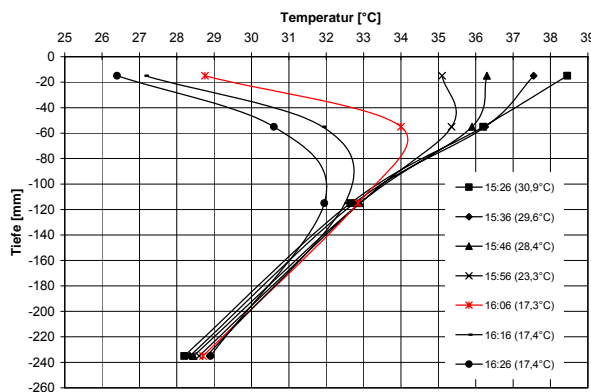
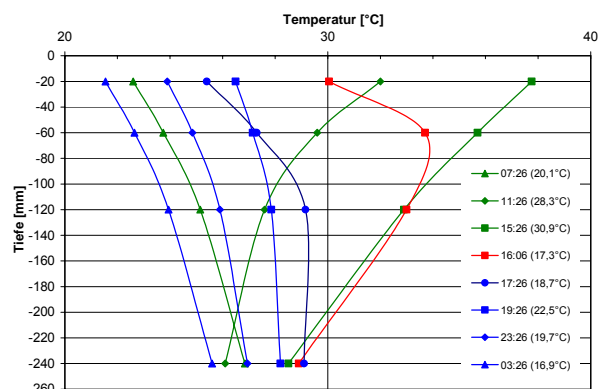
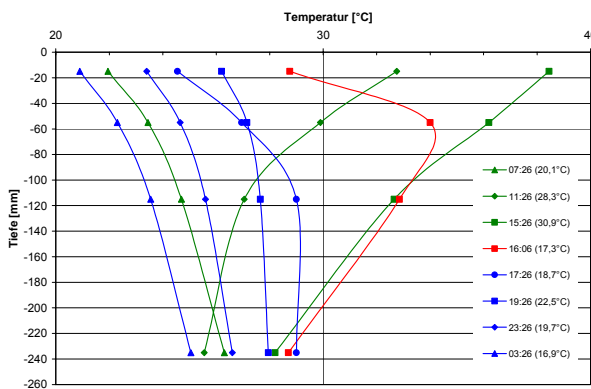
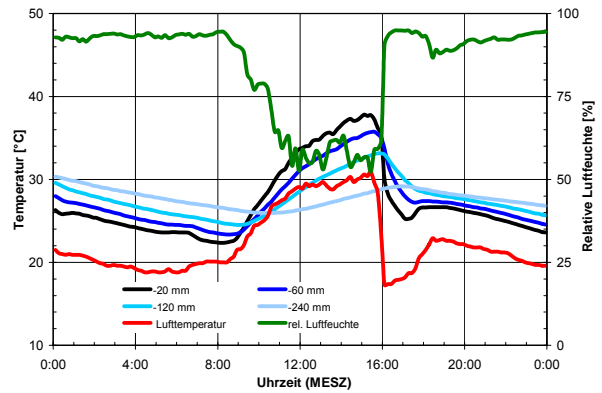
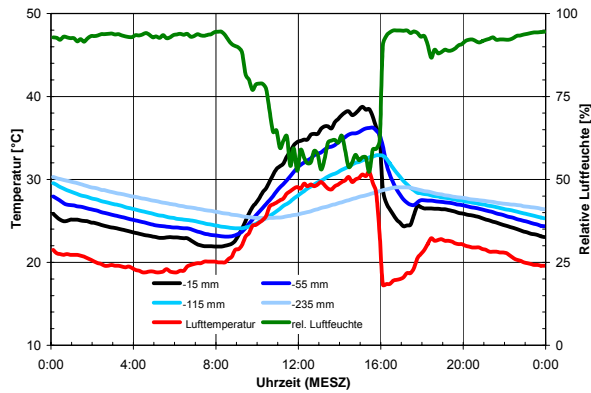


Bild 9: Größter Temperaturschock im Jahr 2002 im mittleren Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 20,4 K/h
oben: Temperaturgang am 20. Juni 2002 (25. KW) im mittleren Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 15:26 bis 16:26 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,763 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,304 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,131 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 10: Größter Temperaturschock im Jahr 2002 im rechten Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 20,4 K/h
oben: Temperaturgang am 20. Juni 2002 (25. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 15:26 bis 16:16 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,638 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,273 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,091 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

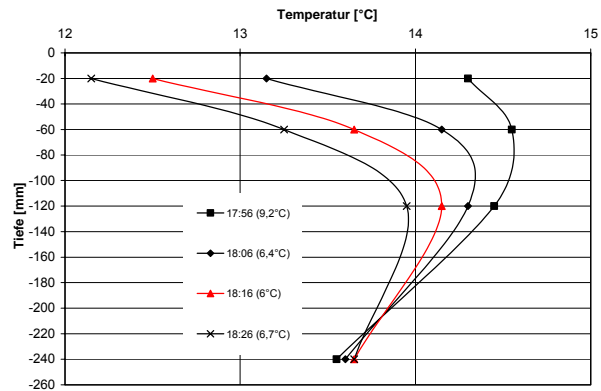
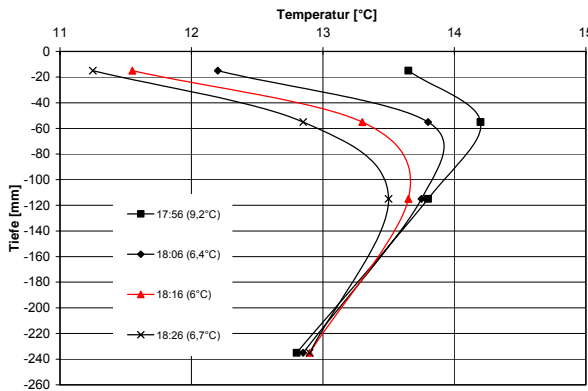
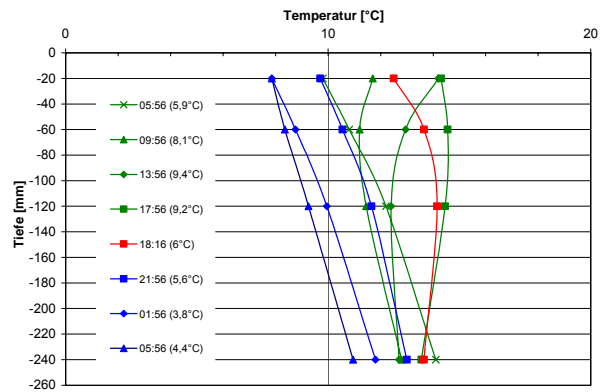
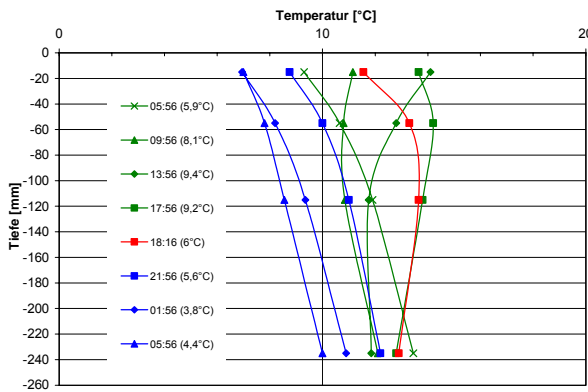
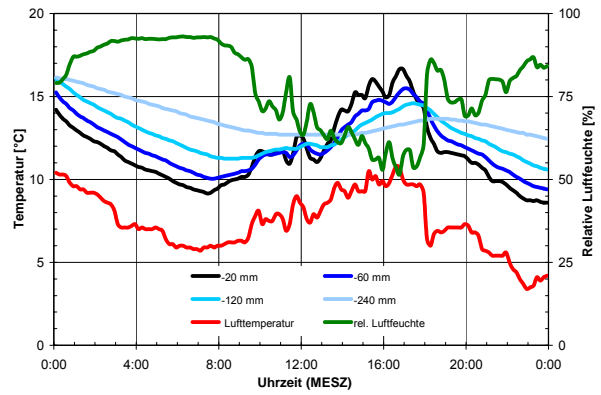
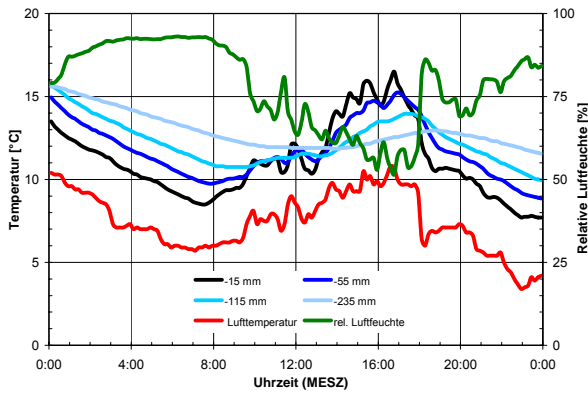


Bild 11: Größter Temperaturschock im Jahr 2003 im mittleren Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 9,6 K/h
oben: Temperaturgang am 2. April 2003 (14. KW) im mittlerer Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 17:56 bis 18:26 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,370 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,133 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,044 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 12: Größter Temperaturschock im Jahr 2003 im rechten Fahrstreifen
 Abkühlrate der Lufttemperatur: 9,6 K/h
oben: Temperaturgang am 2. April 2003 (14. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 17:56 bis 18:26 Uhr
 rote Linie:
 $\Delta t = 0,325 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,128 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,029 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

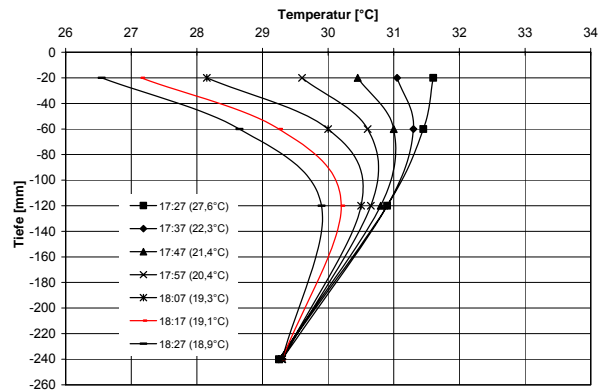
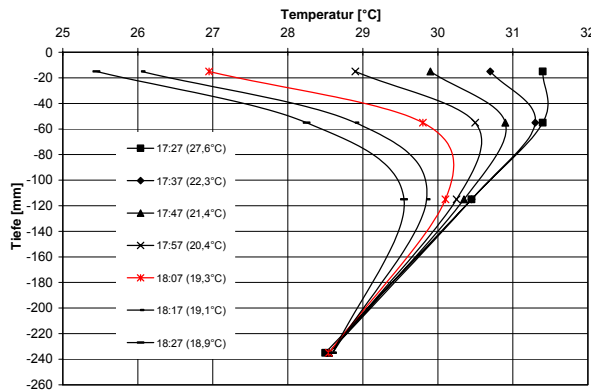
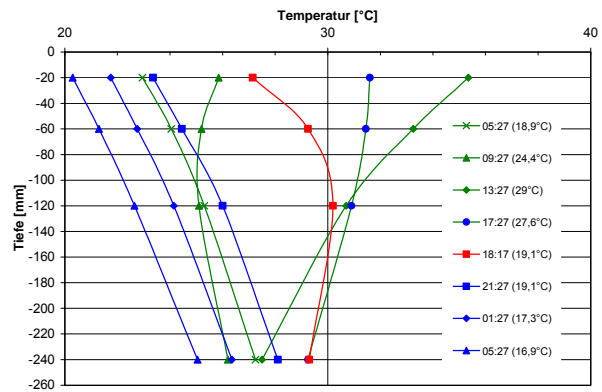
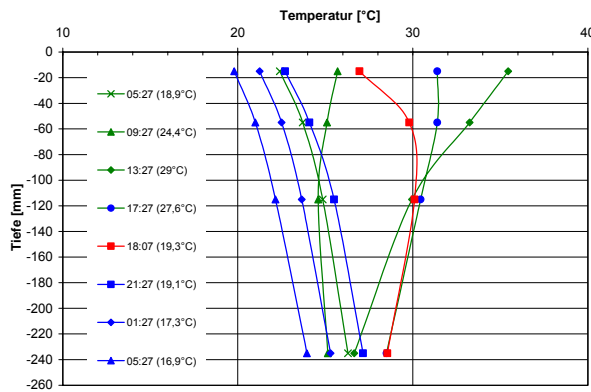
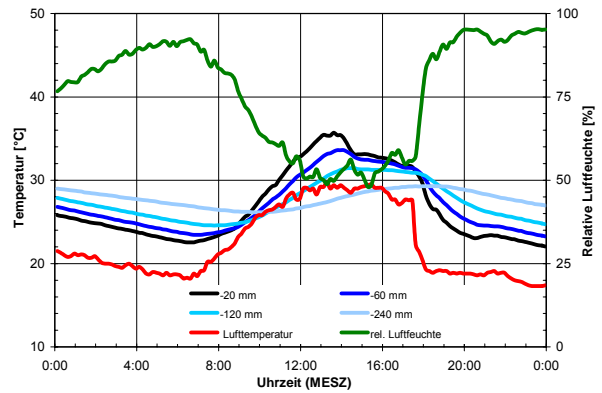
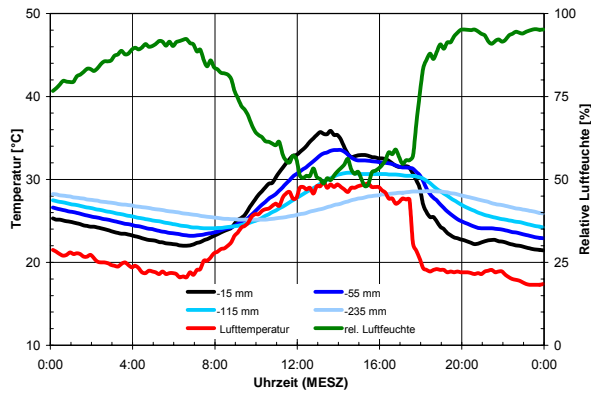


Bild 13: Größter Temperaturschock im Jahr 2004 im mittleren Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 8,7 K/h
oben: Temperaturgang am 7. August 2004 (32. KW) im mittleren Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 17:27 bis 18:27 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,510 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,193 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,071 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)

Bild 14: Größter Temperaturschock im Jahr 2004 im rechten Fahrstreifen
Abkühlrate der Lufttemperatur: 8,7 K/h
oben: Temperaturgang am 7. August 2004 (32. KW) im rechten Fahrstreifen
Mitte: Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = extremer nichtlinearer Verlauf, Lufttemperatur in Klammern)
unten: Detail, Zeitraum von 17:27 bis 18:27 Uhr
rote Linie:
 $\Delta t = 0,403 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 1. Sensor)
 $\Delta t = 0,169 \text{ K/mm}$ (Lufttemperatur - 2. Sensor)
 $\Delta t = 0,053 \text{ K/mm}$ (1. Sensor - 2. Sensor)