

# Temperatur- unterschiede an Betonbrücken

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 3

**bast**

# Temperatur- unterschiede an Betonbrücken

von

Horst Knabenschuh

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 3

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht Ergebnisse aus ihrer Arbeit, vor allem Forschungsvorhaben, in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A – Allgemeines  
B – Brücken- und Ingenieurbau  
F – Fahrzeugtechnik  
M – Mensch und Sicherheit  
S – Straßenbau  
V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Am Alten Hafen 113–115, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 460 93–95, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt 79203:**  
Messungen von Temperaturunterschieden an  
Betonbrücken

### **Herausgeber:**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon (0 22 04) 4 30  
Telefax (0 22 04) 4 38 32

### **Redaktion:**

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### **Druck und Verlag:**

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 460 93–95  
Telefax (04 71) 427 65

ISSN 0943-9293

ISBN 3-89429-401-9

Bergisch Gladbach, Dezember 1993

## Kurzfassung · Abstract · Résumé

### Temperaturunterschiede an Betonbrücken

Der Schlußbericht zum Projekt „Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken“ beendet eine Reihe von bisher vier Berichten über die Belastung von Betonbrücken unterschiedlicher Querschnitte durch Wärmeeinwirkungen. Untersucht wurden Belastungen durch klimatische Einflüsse und durch Wärmeeinleitung beim Einbau bituminöser Fahrbahnbeläge.

Der Bericht erläutert die Ermittlung repräsentativer Bauwerkstemperaturen zur vereinfachten Erfassung verformungswirksamer Temperaturen bei Bauwerksprüfungen. Es werden Möglichkeiten für die Wahl von Ersatzmeßstellen aufgezeigt und Ansätze für die Gewichtung der Meßwerte vorgeschlagen.

Die statistische Auswertung von Langzeitmessungen an sieben Bauwerken führt zu dem Ergebnis, daß längsdehnungswirksame Bauteiltemperaturen mit einfachen Meßmitteln bei akzeptabler Bestimmungsgenauigkeit erfaßt werden können. Eine Vereinfachung der Erfassung von Temperaturunterschieden an Bauwerksteilen erweist sich als teilweise problematisch.

Weiterhin behandelt der Bericht die Ermittlung statistisch abgesicherter Temperaturgrenzwerte an Brückenüberbauten als Beitrag zu der Diskussion über die Bemessung von Brückenlagern. Im Vordergrund steht die Ableitung einer Extremwertprognose für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland aus den Ergebnissen von Langzeitmessungen an mehreren Brückenbauwerken und aus Sammlungen statistischer Daten des Deutschen Wetterdienstes.

### Temperature gradients in concrete bridges

The final report on the research project “Monitoring Temperature Gradients in Concrete Bridges” concludes the preceding four reports on thermal stresses in concrete bridges of different cross sections. The stresses caused by climatic effects and the thermal effects caused by the construction of bituminous surfacings were investigated.

The report explains the determination of representative bridge temperatures which are used to simplify in bridge inspections the survey of tempera-

tures affecting deformations. Possibilities of selecting alternative monitoring points are pointed out and approaches to weighting the monitoring values proposed. The statistical analysis of long-term observations of seven bridges revealed that the temperatures of structural elements affecting longitudinal strains can be monitored quite accurately by simple means. In some cases, the simplified survey of temperature gradients in structural elements turned out to be a problematical issue.

The report further deals with the determination of statistically ascertained temperature limits in bridge superstructures as a contribution to the discussion on the structural design of bridge bearings. In the foreground was the derivation of a nation-wide forecast method for the extreme values based both on the results of long-term observations of several bridge structures and on the statistics of the German Meteorological Service.

### Différences de température aux ouvrages d'art en béton

Le rapport final du projet «Mesure des différences de température aux ouvrages d'art en béton» conclut une série de jusqu'ici quatre rapports portant sur la contrainte de ponts en béton aux différents profils en travers causée par des effets de température. Des contraintes dues aux influences climatiques et à la production de chaleur lors de la mise en place de revêtements bitumineux font l'objet des études.

Le rapport traite la détermination de températures représentatives d'ouvrages d'art à base desquelles il est possible de saisir plus simplement, lors des inspections des ouvrages d'art, des températures provoquant des déformations. Sont indiquées des possibilités de choisir des points de mesure alternatifs et proposées des approches pour une pondération des valeurs de mesures.

L'évaluation statistique des résultats des mesures réalisées à sept ouvrages d'art a donné comme résultat que des températures d'éléments de construction provoquant un allongement du pont peuvent être saisies avec des moyens simples tout en obtenant une exactitude acceptable. Il poserait des problèmes de vouloir simplifier la mesure des différences de température aux éléments de construction.

En outre, le rapport décrit comment sont déterminées les valeurs limite de la température, statistiquement significatives, aux superstructures de ponts, ce qui constitue une contribution à la discussion sur le dimensionnement d'appuis de ponts. Il s'agit principalement de la déduction d'un pronostic de valeurs extrêmes pour la région de la République fédérale, basé sur des résultats de mesures réalisées sur une longue période à plusieurs ouvrages d'art et sur des données statistiques recueillies par le Service Météorologique Allemand.

## Inhalt

1	Vorbemerkungen . . . . .	7	2.4.3	Ergebnisse . . . . .	18
1.1	Zur Aufgabenstellung . . . . .	7	2.4.3.1	Vergleichstemperaturen . . . . .	18
1.2	Zur bisherigen Berichterstattung . . . . .	7	2.4.3.2	Repräsentative Überbautemperaturen . . . . .	19
1.3	Zum Schlußbericht. . . . .	8	2.4.3.3	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	19
2	<b>Repräsentative Temperaturen und Temperaturdifferenzen an Bauwerken und Bauwerksteilen . . . . .</b>	8	2.5	Brohltalbrücke . . . . .	20
2.0	Einleitung . . . . .	8	2.5.1	Bauwerksbeschreibung . . . . .	20
2.1	Bauwerk Eifeltor . . . . .	8	2.5.2	Meßstellenanordnung . . . . .	20
2.1.1	Bauwerksbeschreibung . . . . .	8	2.5.3	Messung und Auswertung . . . . .	20
2.1.2	Meßstellenanordnung . . . . .	9	2.5.4	Ergebnisse . . . . .	20
2.1.3	Messungen, Auswertung . . . . .	9	2.5.4.1	Vergleichstemperaturen . . . . .	20
2.1.4	Ergebnisse . . . . .	9	2.5.4.2	Repräsentative Überbautemperaturen . . . . .	21
2.1.4.1	Vergleichstemperaturen . . . . .	9	2.5.4.3	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	21
2.1.4.2	Repräsentative Plattentemperaturen . . . . .	9	2.6	Pfeiler 19 der Ahrthalbrücke. . . . .	22
2.1.4.3	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	10	2.6.1	Bauwerk und Messung . . . . .	22
2.2	Bauwerk Dürener Straße . . . . .	11	2.6.2	Ergebnisse . . . . .	22
2.2.1	Bauwerksbeschreibung . . . . .	11	2.6.2.1	Repräsentative Pfeilertemperatur . . . . .	22
2.2.2	Meßstellenanordnung . . . . .	11	2.6.2.2	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	23
2.2.3	Messungen, Auswertung . . . . .	11	2.7	Ergebnisübersicht . . . . .	23
2.2.4	Ergebnisse . . . . .	12	3	<b>Temperaturgrenzwerte . . . . .</b>	24
2.2.4.1	Vergleichstemperaturen . . . . .	12	3.0	Einleitung . . . . .	24
2.2.4.2	Repräsentative Überbautemperaturen . . . . .	12	3.1	Erfasste Bauwerke, Stichworte zur Vorgehensweise . . . . .	24
2.2.4.2.1	Plattentemperaturen . . . . .	12	3.1.1	Bauwerk Eifeltor . . . . .	24
2.2.4.2.2	Balkentemperaturen . . . . .	12	3.1.2	Bauwerk Dürener Straße. . . . .	24
2.2.4.2.3	Querschnittstemperaturen . . . . .	13	3.1.3	Bauwerke Kreuztal. . . . .	24
2.2.4.3	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	13	3.2	Messungen . . . . .	24
2.3	Bauwerke 18 und 19 Kreuztal . . . . .	15	3.3	Meßergebnisse . . . . .	25
2.3.1	Bauwerksbeschreibungen . . . . .	15	3.4	Statistische Kenngrößen aus den Meßwertverteilungen . . . . .	25
2.3.2	Meßstellenanordnungen . . . . .	15	3.5	Extremwertprognose . . . . .	25
2.3.3	Messungen, Auswertung . . . . .	15	3.6	Vergleichswerte . . . . .	26
2.3.4	Ergebnisse . . . . .	15	4	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	26
2.3.4.1	Vergleichstemperaturen . . . . .	15	5	<b>Literatur . . . . .</b>	28
2.3.4.2	Repräsentative Überbautemperaturen . . . . .	16	6	<b>Anlagen . . . . .</b>	29
2.3.4.3	Repräsentative Temperaturdifferenzen. . . . .	17			
2.3.4.4	Zur Erfassung der Asphalttemperaturen . . . . .	17			
2.3.4.5	Globalstrahlung . . . . .	18			
2.4	Rheinbrücke Köln-Deutz . . . . .	18			
2.4.1	Bauwerksbeschreibung . . . . .	18			
2.4.2	Anordnung und Durchführung der Messung . . . . .	18			



# 1 Vorbemerkungen

## 1.1 Zur Aufgabenstellung

Mit diesem Schlußbericht wird eine Reihe von Untersuchungen zum Schwerpunktthema „Wärmewirkungen an Betonbrücken“ abgeschlossen. Neben dem hier beschriebenen Projekt „Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken“ (FA 15.085 B 79 G) wurden weitere Detailaufgaben zu diesem Themenkreis im Zusammenhang mit „Untersuchungen über das Temperatur- und Verformungsverhalten hoher Brückenpfeiler“ (FA 15.019 B 74 G) und der „Messung von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken“ (FE 15.136 B 84 G) bearbeitet.

Diesen Untersuchungen lagen folgende Programmpunkte zugrunde:

- Wärmebelastung von Betonquerschnitten durch klimatische Einwirkungen an Brückenüberbauten und -pfeilern:  
Erfassung und statistische Beschreibung von Dehnungen und Biegungen aus gleichmäßiger und ungleichmäßiger Erwärmung infolge Änderungen der Umgebungstemperatur und aus Sonnenstrahlung. Bestimmung der Wärmedehnzahlen am Bauwerk  
Untersuchungen zur Beanspruchung von Brückenlagern
- Wärmebelastung von Betonquerschnitten beim Einbau von Fahrbahnbelägen:  
Ermittlung von Extremwerten und Einwirkungszeiten  
Prognose von Grenzflächentemperaturen
- Langfristige Ermittlung von Grenzwerten für verformungswirksame Bauteiltemperaturen:  
Langzeitmessungen, statistische Beschreibung der Grenzwerte  
Verallgemeinerung durch zeitliche und örtliche Hochrechnung
- Repräsentativtemperaturen für Bauwerksteile:  
Ersatzmeßstellen, Meßstellenkombinationen.  
Rechenansätze für die vereinfachte Temperaturerfassung bei Bauwerksprüfungen.

## 1.2 Zur bisherigen Berichterstattung

Zum hier beschriebenen Projekt sind 4 Zwischenberichte vorgelegt worden. Die Berichtsschwerpunkte werden kurz erläutert.

### 1. Zwischenbericht [1]:

Im Vordergrund stehen Temperatur- und Verformungsmessungen an der Rheinbrücke Köln-Deutz. Aus den für die Überbaudurchbiegung maßgebenden Temperaturunterschieden zwischen Deck- und Bodenplatte infolge klimatischer Einwirkungen und den mit einem Lasersystem gemessenen Durchbiegungen werden Zusammenhänge abgeleitet, die zum einen die Überprüfung der rechnerischen Annahmen zur Ermittlung dieses Lastfalles ermöglichen und zum anderen eine geschlossene statistische Beschreibung des kontinuierlichen Ablaufs der Durchbiegungen über einen Meßzeitraum von 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren erlauben. Weiterhin werden die temperaturbedingten Relativbewegungen der Gleitlager dargestellt.

### 2. Zwischenbericht [2]:

Hauptthema dieses Berichtes ist die temperaturbedingte Längsdehnung des Überbaus der Rheinbrücke Köln-Deutz. Aus langfristigen Temperatur- und Dehnungsmessungen werden die effektiven Wärmedehnzahlen für Normal- und Leichtbeton ermittelt. Es wird ein Überblick über kurz- und langwellige Relativbewegungen der Gleitlager dieses Bauwerks über einen Zeitraum von zwei Jahren gegeben. Zum Stichwort „Zwillingsbauwerke aus unterschiedlichen Werkstoffen“ wird vergleichend über das unterschiedliche Verformungsverhalten des Betonüberbaus und des parallel dazu verlaufenden Stahlüberbaus unter exakt gleichen äußeren Bedingungen berichtet.

### 3. Zwischenbericht [3]:

Es wird über die Ergebnisse von Temperaturmessungen berichtet, die an 5 Brücken mit unterschiedlichen Überbauquerschnitten beim Einbau von Gußasphaltschutzschichten auf Schweißbahnen durchgeführt worden sind. Bei Einbautemperaturen bis fast 270 °C wird die hohe Wärmedämmung der Schweißbahnen nachgewiesen, die in dem großen Temperaturgefälle zwischen OK und UK Schweißbahn zum Ausdruck kommt. Der Aufbau der Schweißbahnen (metallkaschiert oder nicht metallkaschiert) ist ohne Einfluß auf den Dämpfungsgrad. Die höchste Temperaturbelastung des Betons der Fahrbahnplatten wird mit etwa 30 % der Einbautemperatur angegeben.

### 4. Zwischenbericht [4]:

Dieser Zwischenbericht enthält die Ergebnisse von Temperaturmessungen an 3 Betonbrücken beim Einbau von Asphaltbetonschutzschichten auf Schweißbahnen. Bei Einbautemperaturen bis etwa 130 °C werden Temperaturbelastungen des Fahr-

bahnbetons von maximal 40 % der Einbautemperatur nachgewiesen. Ein Einfluß des Schweißbahnaufbaus auf den Dämpfungsgrad ist auch hier nicht festzustellen.

### 1.3 Zum Schlußbericht

Basierend auf den Datensammlungen zu den Zwischenberichten 1 und 2 und den Ergebnissen langfristiger Zusatzerhebungen an Bauwerken aus den Zwischenberichten 3 und 4 werden im folgenden Schlußbericht zwei Themen behandelt:

- Ermittlung repräsentativer Temperaturen und Temperaturdifferenzen an Brückenbauwerken zur vereinfachten Erfassung von Temperaturdaten
- Ermittlung statistisch abgesicherter Temperaturgrenzwerte an Brückenbauwerken.

In den Ausführungen zu beiden Themen wird über die in diesem Projekt gesammelten Meßdaten hinaus auf Datensammlungen zurückgegriffen, die bei den unter 1.1 genannten Projekten angelegt worden sind. Große Datenmengen stehen in diesen Sammlungen für ergänzende zielgerichtete Auswertungen und vertiefende Untersuchungen auch weiterhin zur Verfügung. Sie sollten genutzt werden, bevor erneute Datenerhebungen in Erwägung gezogen werden.

## 2 Repräsentative Temperaturen und Temperaturdifferenzen an Bauwerken und Bauwerksteilen

### 2.0 Einleitung

Die Prüfung von Ingenieurbauwerken während ihrer Herstellung, unter Betriebsbeanspruchungen und im Zusammenhang mit Instandsetzungsmaßnahmen erfordert die Beachtung und Berücksichtigung physikalischer Einflußgrößen, von denen Wärmeeinwirkungen einen hohen Stellenwert einnehmen. Die ausreichend genaue Erfassung wirksamer Bauwerks- oder Bauteiltemperaturen oder von Temperaturunterschieden am Bauwerk sind jedoch in der Regel mit einem hohen Meßaufwand verbunden, der die Möglichkeiten im Rahmen regulärer Prüfungen, z. B. bei Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, zumeist übersteigt.

Im ersten Teil dieses Berichtes wird der Versuch unternommen, am Beispiel von sieben Bauwerken unterschiedlicher Konstruktion Kriterien für die Auswahl von Ersatzmeßstellen bzw. Meßstellenkombinationen zur vereinfachten Bestimmung repräsentativer

Temperaturdaten zu ermitteln und in ggf. gewichteten Ansätzen für allgemeine Anwendungen zusammenzustellen.

Das Untersuchungsschema sieht zunächst die Ermittlung der Referenzwerte vor, die aus umfangreichen Meßdatensammlungen abgeleitet wurden. Hierbei steht zunächst die mittlere, längsdehnungswirksame Bauteiltemperatur im Vordergrund. Sie wird aus allen zur Verfügung stehenden Meßdaten in den Bauwerksquerschnitten flächenanteilig bestimmt. Biegungswirksame Temperaturunterschiede an Bauwerksteilen oder zwischen verschiedenen Bauwerksteilen werden flächenanteilig oder durch ein iteratives Ausgleichsverfahren zur Bestimmung des linearen Anteils des Temperaturfeldes (an massiven Bauteilen) ermittelt.

Die Auswahl der Ersatzmeßstellen wird wesentlich durch ihre leichte Zugänglichkeit bestimmt. Angestrebt wird die Wahl von Meßstellen zur Erfassung von Oberflächen- oder Lufttemperaturen. Allein oder in Kombinationen mit ggf. unterschiedlichen Gewichtungen werden die Ersatzwerte den Referenzwerten gegenübergestellt. Dieser Vergleich führt zu einer verlässlichen Beurteilung der Bestimmungsgenauigkeit der Ersatzwerte. Für unterschiedliche Querschnittstypen werden durch einen Genauigkeitsvergleich diejenigen Ersatzmeßstellen oder Kombinationen ermittelt, welche die Referenztemperaturen am besten repräsentieren.

Die Referenzwerte werden für diese Auswertung als fehlerfrei angenommen. Unsicherheiten aus der Referenzwertermittlung fließen also in die Bestimmungsgenauigkeiten der Repräsentativwerte ein, die somit eher höher zu bewerten sind, als nachfolgend nachgewiesen werden kann.

Zu den nachfolgend beschriebenen Ansätzen für Temperaturunterschiede an Bauwerksquerschnitten ist anzumerken, daß sie nicht zur Bestimmung von Extremwerten über den Tagesverlauf geeignet und vorgesehen sind. Sie dienen lediglich der Abschätzung von Restungengenauigkeiten bei der Beurteilung von Verformungszuständen bei möglichst ausgeglichenen Temperaturen, unter Bedingungen also, bei denen Bauwerksprüfungen im hier behandelten Sinne durchgeführt werden sollten.

### 2.1 Bauwerk Eifeltor

#### 2.1.1 Bauwerksbeschreibung

Mit dem Bauwerk „Eifeltor“ wird die Autobahn A 4 über das Bundesbahngelände im Bereich des Con-

tainer-Bahnhofs Köln Eifeltor geführt. Übersichten über die 96 m lange zweifeldrige Verbundbrücke zeigen die Anlagen 1 bis 3. Die Dicke der Betonfahrbahnplatte beträgt 25 cm, die Höhe der Hauptträger etwa 150 cm bis 170 cm. Der Fahrbahnbelag besteht aus aluminiumkaschierter Schweißbahn und zweilagig eingebautem Gußasphalt mit insgesamt etwa 8 cm Dicke.

### 2.1.2 Meßstellenanordnung

An zwei Meßorten in der Betonfahrbahnplatte sind mehrere über die Plattendicke verteilte Temperaturmeßstellen eingerichtet worden. Die Temperaturerfassung erfolgte mit Thermoelementen Chromel-Alumel (NiCr-Ni). Die Meßstellenanordnung geht aus Anlage 3 und aus der folgenden Tabelle 1 hervor.

Meßort 1 Meßstelle	Meßort 2 Meßstelle	Beschreibung
1	11	Mitte Gußasphalt
2	12	OK Schweißbahn
3	13	UK Schweißbahn = OK Betonfahrbahnplatte
4	14	2 cm unter OK Beton
5	15	10 cm unter OK Beton
6	16	UK der 25 cm dicken Betonfahrbahnplatte
7		UK des oberen Haupt- trägerflansches
8		Mitte Hauptträgersteg
9		OK des unteren Haupt- trägerflansches
10	17	Luftaußentemperatur (Schatten)

Tab. 1: Anordnung der Meßstellen Bauwerk Eifeltor

### 2.1.3 Messungen, Auswertung

Die Messungen wurden im Zeitraum zwischen dem 6. 2. 87 und dem 28. 7. 87 durchgeführt. Die Datenabfrage erfolgte in 2-Stunden-Intervallen. Insgesamt wurden 162 komplette Meßtage erfaßt. Die Auswertung beschränkt sich auf die Betonplatte. Verarbeitet wurden die Ergebnisse aus zwei Meßorten. Die Temperaturabweichungen entsprechender Meßstellen beider Meßorte sind kleiner als 2 °C.

### 2.1.4 Ergebnisse

#### 2.1.4.1 Vergleichstemperaturen

Die mittleren Überbautemperaturen werden flächenanteilig aus der Gesamtheit aller Meßdaten ermittelt. Als tatsächliche Temperaturdifferenz zwischen OK und UK Platte bzw. Balken wird der linear be-

grenzte Anteil des Temperaturfeldes gemäß DIN 1072 angesehen. Der Rechenansatz für die ausgleichende Gerade geht von der Bedingung aus, daß die Summe der Normalkräfte und die Summe der Momente für den nichtlinearen Anteil Null sein müssen (siehe Bild 1). Dieser Ansatz gilt auch für die Untersuchungen am Bauwerk Dürener Straße und an den Bauwerken Kreuztal.

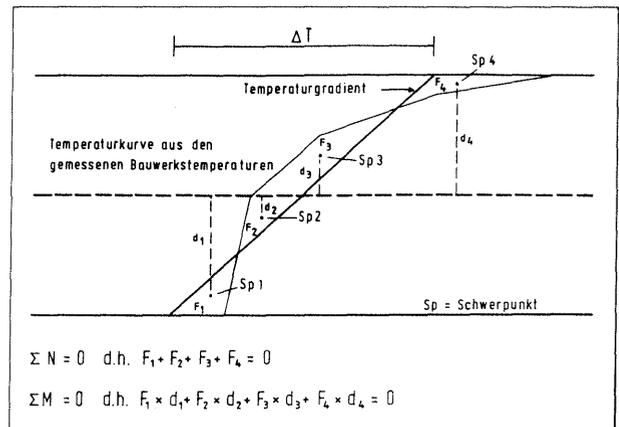


Bild 1: Berechnung des linearen Temperaturunterschiedes der Platte

#### 2.1.4.2 Repräsentative Plattentemperaturen

Aus dem Ansatz

$$TR1(l) = (TL * l + TA * (20 - l))/20$$

werden in Schritten für  $l = 0 \dots 20$  Repräsentativtemperaturen für die Betonfahrbahnplatte aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA) gerechnet und den aus der Gesamtheit der Meßstellen abgeleiteten mittleren Plattentemperaturen gegenübergestellt (vergl. Abschnitt 2.1.4.1). Die sich hieraus ergebenden Temperaturdifferenzen sind Grundlage zur Bestimmung der Standardabweichungen für bestimmte Tageszeit-Gruppen über den Gesamtmeßzeitraum. Diese Standardabweichungen sind in der Anlage 4 für die folgenden Zeitgruppen (MEZ) grafisch zusammengefaßt:

24-Std-Gruppe :	0 Uhr bis 24 Uhr (n = 1944)
4-Std-Gruppe 1:	4 Uhr bis 8 Uhr (n = 486)
4-Std-Gruppe 2:	6 Uhr bis 10 Uhr (n = 486)
4-Std-Gruppe 3:	8 Uhr bis 12 Uhr (n = 486)
2-Std-Gruppe 1:	4 Uhr bis 6 Uhr (n = 324)
2-Std-Gruppe 2:	6 Uhr bis 8 Uhr (n = 324)
2-Std-Gruppe 3:	8 Uhr bis 10 Uhr (n = 324)

n = Anzahl der verwendeten Meßreihen mit je 17 Meßwerten.

Aus

$$TR2(l) = (TB * l + TA * (20 - l))/20$$

werden in Schritten für  $l = 0 \dots 20$  Repräsentativtemperaturen für die Betonfahrbahnplatte aus Temperaturen an der UK Betonplatte und im Asphalt (TB und TA) gerechnet und – wie oben – den mittleren Plattentemperaturen gegenübergestellt. Die Standardabweichungen hieraus sind in der Anlage 5 für die oben genannten Zeitgruppen zusammengestellt.

Aus dem Verlauf der Varianzkurven ergeben sich an den Nullstellen (Steigung = 0) die günstigsten Gewichtsverteilungen. Die Standardabweichungen für die Repräsentativtemperaturen aus diesen optimalen Gewichtungen enthält die folgende Tabelle 2:

Als genaueste Kombination erweist sich das allgemeine Arithmetische Mittel aus TB und TA:

$$TR = (9 \cdot TB + TA) / 10$$

mit einer Standardabweichung von

$$s_{TR} = 0.27 \text{ °C}$$

bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Vormittagszeit. Selbst bei Erweiterung des Erfassungszeitraums auf 24 Stunden ergibt sich bei gleicher Gewichtung noch eine Genauigkeit von

$$s_{TR} = 0.41 \text{ °C.}$$

Zeitgruppe	TR1 = (TL * l + TA * (20 - l)) / 20			TR2 = (TB * l + TA * (20 - l)) / 20		
	$s_{TL}$	$s_{TL/TA}$ (l)	$s_{TA}$	$s_{TB}$	$s_{TB/TA}$ (l)	$s_{TA}$
0–24	2.34	2.02 (13)	2.92	0.66	0.41 (17)	2.92
4–8	2.58	*)	1.77	0.31	0.27 (18)	1.77
6–10	2.10	1.67 (8)	1.86	0.33	0.27 (18)	1.86
8–12	1.59	1.43 (16)	2.94	0.47	0.27 (18)	2.94
4–6	2.81	*)	2.01	0.30	0.27 (19)	2.01
6–8	2.39	*)	1.56	0.32	0.28 (18)	1.56
8–10	1.73	1.32 (11)	1.85	0.34	0.26 (18)	1.85

\*) keine Nullstellen

Tab. 2: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativtemperaturen für die mittlere Plattentemperatur

In vorstehender Tabelle bedeuten

- $s_{TL}$ : Streuung der aus Lufttemperaturen abgeleiteten Plattentemperatur
- $s_{TL/TA}$ : Streuung der aus Luft- und Asphalttemperaturen abgeleiteten Plattentemperatur (Gewichtsfaktor = l)
- $s_{TA}$ : Streuung der aus Asphalttemperaturen abgeleiteten Plattentemperatur
- $s_{TB}$ : Streuung der aus der Betontemperatur UK Platte abgeleiteten Plattentemperatur
- $s_{TB/TA}$ : Streuung der aus Betontemperaturen UK Platte und Asphalttemperaturen abgeleiteten Plattentemperatur.

Die Lufttemperatur TL wurde im Schatten unter dem Überbau gemessen. TB ist die an der Plattenunterseite gemessene Betonoberflächentemperatur. Als „Asphalttemperatur“ TA ist hier die Temperatur in der Mitte der etwa 7 cm dicken Gußasphaltschicht zu verstehen, die jedoch nur mit einem gewissen Aufwand nach Anbohren der Asphalt-schicht zu messen ist. Zusammenhänge zwischen mittlerer Asphalttemperatur, Asphaltoberflächentemperatur und Globalstrahlung werden am Bauwerk Kreuztal unter 2.3.4.4 untersucht.

Nur geringfügige Genauigkeitsverluste bringt der völlige Verzicht auf die Asphalttemperatur. So repräsentiert die Betontemperatur an der Unterseite der Platte die mittlere Plattentemperatur mit einer Genauigkeit von

$$s_{TR} < 0.35 \text{ °C}$$

für den Erfassungsbereich von 4 Uhr bis 10 Uhr und von

$$s_{TR} = 0.66 \text{ °C}$$

für den 24-Stunden-Bereich.

Zu empfehlen ist die Bestimmung der mittleren Plattentemperatur ersatzweise durch Messung der Oberflächentemperatur an der Unterseite der Betonplatte im Zeitraum zwischen 4 und 10 Uhr. Die Standardabweichung beträgt hierbei

$$s_{TR} < 0.35 \text{ °C.}$$

#### 2.1.4.3 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Auch für die näherungsweise Bestimmung von Temperaturdifferenzen zwischen OK und UK Betonplatte wurden zwei Varianten geprüft. Nach dem 1. Ansatz ergibt sich

$$DT1(l) = TA(0.8 + l/50) - TL(1.2 - l/50)$$

in Schritten für  $l = 0 \dots 20$  aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA). Der 2. Ansatz ermittelt die Temperaturdifferenz aus

$$DT2(l) = TA(0.8 + l/50) - TB(1.2 - l/50)$$

ebenfalls in Schritten für  $l = 0 \dots 20$  aus Temperaturen an der UK Betonplatte und im Asphalt (TB und TA). Beide Ergebnisse werden den Vergleichswerten aus 2.1.4.1 gegenübergestellt.

Aus dem Verlauf der Standardabweichungen (vergl. Anlagen 6 und 7) ergeben sich an den Nullstellen die günstigsten Gewichtsverteilungen für unterschiedliche Zeitgruppen. Die Standardabweichungen für die repräsentativen Temperaturdifferenzen aus diesen optimalen Gewichtungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt:

Zeitgruppe	für DT1 (l)			für DT2 (l)		
	l	s	s für l=10	l	s	s für l=10
0–24	7	1.02	2.13	9	2.00	2.11
4–8	7	0.86	1.64	11	1.03	1.23
6–10	7	0.94	1.92	9	1.42	1.43
8–12	6	1.05	2.35	7	1.62	2.28
4–6	7	0.87	1.57	12	0.84	1.38
6–8	7	0.85	1.69	11	1.00	1.07
8–10	7	0.98	2.07	8	1.23	1.50

Tab. 3: Bestimmungsgenauigkeit der repräsentativen Temperaturunterschiede OK/UK Betonplatte

Für den Erfassungszeitraum zwischen 4 und 8 Uhr ergibt Variante 1 mit der Gewichtung  $l = 7$  die genauesten Werte mit Standardabweichungen um

$$s_{DT} = 0.86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Der Rechenansatz hierfür lautet:

$$DT = 0.94 * TA - 1.06 * TL.$$

Im etwa gleichen Genauigkeitsbereich liegen Repräsentativwerte aus Variante 2 mit der Gewichtung  $l = 12$  im Zeitraum von 4 bis 6 Uhr nach folgendem Ansatz:

$$DT = 1.04 * TA - 0.96 * TB.$$

Der gleichgewichtige Ansatz von TA und TL sowie von TA und TB ( $l = 10$ ) ergibt merkbare Genauigkeitseinbußen.

Empfohlen wird die Bestimmung der Temperatur-

differenz OK/UK Platte durch Messung der Luft- (Beton-) und mittleren Asphalttemperatur und deren Gewichtung nach obenstehenden Ansätzen. Auf die Erfassung der mittleren Asphalttemperatur wird unter 2.3.4.4 (Bauwerk Kreuztal) näher eingegangen.

## 2.2 Bauwerk Dürener Straße

### 2.2.1 Bauwerksbeschreibung

Das Bauwerk „Dürener Straße“ wurde im Zuge der Verbreiterung des Kölner West-Ringes, einer Teilstrecke der A 4 zwischen den Autobahnkreuzen Köln-Süd und Köln-West, neu errichtet. Der Überbau des Bauwerks, das die Autobahn über die B 264 führt, ist als einfeldriger Plattenbalken mit 30 cm Plattendicke und 130 cm Balkenhöhe ausgebildet. Die Stützweite beträgt 25,2 m. Bauwerksübersichten sind in den Anlagen 8 und 10 beigefügt.

Der Fahrbahnbelag besteht aus aluminiumkassierter Schweißbahn und zweilagig eingebautem Gußasphalt mit insgesamt etwa 8 cm Dicke.

### 2.2.2 Meßstellenanordnung

An zwei Meßorten, je einem im Plattenbereich und im Balkenbereich, sind mehrere über die Dicke des Bauwerksteils verteilte Temperaturmeßstellen eingerichtet worden. Die Temperaturerfassung erfolgte mit Thermoelementen Chromel-Alumel (NiCr-Ni). Die Meßstellenanordnung geht aus Anlage 10 und aus der folgenden Tabelle 4 hervor.

Meßort 1 Meßstelle	Meßort 2 Meßstelle	Beschreibung
1	7	Mitte Gußasphalt
2	8	OK Schweißbahn
3	9	UK Schweißbahn = OK Betonfahrbahnplatte
4	10	2 cm unter OK Beton
5	11	10 cm unter OK Beton
6, 16 u. 19	12	25 cm unter OK Beton
		UK der 30 cm dicken Betonfahrbahnplatte
	13	65 cm unter OK Beton
	14 u. 17	UK des 130 cm hohen Balkens
	15 u. 18	Seitenfläche des Balkens in mittl. Höhe
	20	Luftaußentemperatur (Schatten)

Tab. 4: Anordnung der Meßstellen Bauwerk Dürener Straße

### 2.2.3 Messungen, Auswertung

Der Meßzeitraum erstreckt sich über die Zeit vom 14.06.86 bis 4. 2. 87. Die Datenabfrage erfolgte in 2-

Stunden-Intervallen. Es wurden 93 komplette Meßtage erfaßt. Bei der Auswertung wird unterschieden zwischen dem Querschnittsbereich „Platte“, dem Querschnittsbereich „Balken“ und dem Gesamtquerschnitt.

- 4-Std-Gruppe 2: 6 Uhr bis 10 Uhr (n = 279)
- 4-Std-Gruppe 3: 8 Uhr bis 12 Uhr (n = 279)
- 2-Std-Gruppe 1: 4 Uhr bis 6 Uhr (n = 186)
- 2-Std-Gruppe 2: 6 Uhr bis 8 Uhr (n = 186)
- 2-Std-Gruppe 3: 8 Uhr bis 10 Uhr (n = 186)

2.2.4 Ergebnisse

n = Anzahl der verwendeten Meßreihen mit je 20 Meßwerten.

2.2.4.1 Vergleichstemperaturen

Aus

Die mittleren Plattentemperaturen, mittleren Balkentemperaturen und mittleren Querschnittstemperaturen als Vergleichswerte für die nachfolgenden Repräsentativtemperaturen sowie die Vergleichswerte für Temperaturdifferenzen zwischen OK und UK der Bauwerksteile sind aus der Gesamtheit der Meßergebnisse nach dem unter 2.1.4.1 beschriebenen Schema ermittelt worden. Diese Vergleichswerte werden für die weitere Auswertung als fehlerfrei angenommen.

$$TR2(l) = (TPU * l + TA * (20 - l))/20$$

werden ebenfalls für l = 0 ... 20 die Repräsentativtemperaturen für die Betonplatte aus Temperaturen UK Platte (TPU) und im Asphalt (TA) gerechnet. Der Verlauf der Varianzen bzw. Standardabweichungen ist in den Anlagen 11 und 12 dargestellt. Die Standardabweichungen für die optimalen Gewichtungen sind in der folgenden Tabelle 5 zusammengefaßt.

2.2.4.2 Repräsentative Überbautemperaturen

Analog zu den Ergebnissen am Bauwerk „Eifeltor“ erweist sich auch am Querschnitt „Dürener Straße“ die Betontemperatur UK Platte ohne Berücksichtigung der Asphalttemperatur als ein gut geeigneter Repräsentativwert für die mittlere Plattentemperatur bei Einschränkung des Meßzeitraums auf die frühen Vormittagsstunden. Die Standardabweichung beträgt hierbei

2.2.4.2.1 Plattentemperaturen

$$s_T = 1 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Aus dem Ansatz

$$TR1(l) = (TL * l + TA * (20 - l))/20$$

werden in Schritten für l = 0 ... 20 Repräsentativwerte für die Betonplatte aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA) gerechnet und den Vergleichswerten aus 2.2.4.1 gegenübergestellt. Aus den Differenzen ergeben sich die Varianzen bzw. Standardabweichungen für die folgenden Tageszeitgruppen (MEZ):

2.2.4.2.2 Balkentemperaturen

- 24-Std-Gruppe : 0 Uhr bis 24 Uhr (n = 1116)
- 4-Std-Gruppe 1: 4 Uhr bis 8 Uhr (n = 279)

Die Ableitung von Repräsentativwerten für den Balkenbereich aus Kombinationen von Asphalttemperaturen, Betontemperaturen an der Unterseite der Platte sowie des Balkens und Betontemperaturen

Zeitgruppe	TR1 = (TL * l + TA * (20 - l)) / 20			TR2 = (TPU * l + TA * (20 - l)) / 20		
	s <sub>TL</sub>	s <sub>TL/TA (l)</sub>	s <sub>TA</sub>	s <sub>TPU</sub>	s <sub>TPU/TA (l)</sub>	s <sub>TA</sub>
0 – 24	3.66	2.67 (08)	3.00	1.18	1.00 (16)	3.00
4 – 8	4.47	*)	2.01	0.91	*)	2.00
6 – 10	3.62	*)	1.72	0.76	*)	1.72
8 – 12	2.65	2.09 (08)	2.37	0.65	0.64 (19)	2.37
4 – 6	4.95	*)	2.17	1.00	*)	2.17
6 – 8	4.14	*)	1.93	0.84	*)	1.93
8 – 10	2.86	*)	1.46	0.65	*)	1.46

\*) keine Nullstellen

- TL = Lufttemperatur
- TA = Asphalttemperatur (Mitte der Asphaltschicht)
- TPU = Betontemperatur UK Platte

Zur Asphalttemperatur vergl. 2.3.4.4 (Bauwerk Kreuztal)

Tab. 5: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Plattentemperatur

Zeitgruppe	TR3 = (TBU * I + TA * (20 - I)) / 20			TR4 = (TBS * I + TPU * (20 - I)) / 20		
	STBU	STBU/TA (I)	STA	STBS	STBS/TPU (I)	STPU
0 – 24	1.35	1.26 (18)	3.86	1.04	*)	1.40
4 – 8	1.48	*)	2.41	1.20	1.20 (17)	1.40
6 – 10	1.41	*)	2.34	1.13	*)	1.46
8 – 12	1.29	*)	2.91	1.01	*)	1.48
4 – 6	1.51	*)	2.46	1.25	1.21 (14)	1.37
6 – 8	1.49	*)	2.82	1.19	*)	1.43
8 – 10	1.34	*)	2.24	1.06	*)	1.49

\*) keine Nullstellen

TBU = Betontemperatur UK Balken

TBS = Betontemperatur Seitenfläche des Balkens in mittlerer Höhe

TPU = Betontemperatur UK Platte

TA = Asphalttemperatur

Zur Asphalttemperatur vergl. 2.3.4.4 (Bauwerk Kreuztal)

Tab. 6: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Balkentemperatur

an der abgeschatteten Seitenfläche eines Balkens wird untersucht. Die Ansätze lauten:

$$TR3 = (TBU * I + TA * (20 - I)) / 20$$

und

$$TR4 = (TBS * I + TPU * (20 - I)) / 20.$$

Der nach gleicher Vorgehensweise wie für den Plattenbereich ermittelte Verlauf der Standardabweichungen ist in den Anlagen 13 und 14 dargestellt. Die optimalen Gewichtungen enthält Tabelle 6.

Die Temperatur der im Schatten liegenden Seitenfläche des Betonbalkens in mittlerer Balkenhöhe stellt über den ganzen Tagesverlauf einen mäßig geeigneten Repräsentativwert für die Balkentemperatur dar. Mit einer Standardabweichung von

$$s_T = 1.2 \text{ °C}$$

repräsentiert er die mittlere Balkentemperatur ohne zeitliche Einschränkungen.

#### 2.2.4.2.3 Querschnittstemperaturen

In gleicher Weise werden vier verschiedene Ansätze für die Bestimmung der mittleren Querschnittstemperatur auf ihre Verwendbarkeit überprüft. Es sind Kombinationen aus den Meßwerten für Luft- und Asphalttemperatur sowie Betontemperaturen an UK Platte, UK Balken und an einer Balkenseitenfläche.

$$TR1(I) = (TL * I + TA * (20 - I)) / 20$$

$$TR2(I) = (TPU * I + TA * (20 - I)) / 20$$

$$TR3(I) = (TBU * I + TA * (20 - I)) / 20$$

$$TR4(I) = (TBS * I + TPU * (20 - I)) / 20$$

für  $I = 0 \dots 20$ . Der Verlauf der Standardabweichungen ist den Anlagen 15 bis 18 zu entnehmen. Die beiden folgenden Tabellen 7 und 8 zeigen die optimalen Gewichtungen.

Die Temperatur der Seitenfläche des Betonbalkens in mittlerer Balkenhöhe zeigt sich auch hier als akzeptabler Repräsentativwert für die mittlere Querschnittstemperatur ohne Einschränkung des Erfassungszeitraums

$$s_T = 1.1 \text{ °C.}$$

#### 2.2.4.3 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Für die näherungsweise Bestimmung von Temperaturdifferenzen zwischen OK und UK Betonplatte wie auch zwischen OK und UK Betonbalken werden je zwei Varianten geprüft. Die Ansätze für die Platte sind

$$DT1(I) = TA(0.8 + I/50) - TL(1.2 - I/50)$$

in Schritten für  $I = 0 \dots 20$  aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA sowie

$$DT2(I) = TA(0.8 + I/50) - TPU(1.2 - I/50)$$

für  $I = 0 \dots 20$  aus Temperaturen UK Betonplatte (TPU) und Asphalt (TA). Die optimalen Gewichtungen enthält Tabelle 9.

Als Näherungswert für den Temperaturunterschied OK/UK Platte steht danach lediglich der gleichgewichtige Ansatz von Asphalt- und Betontemperatur UK Platte zur Verfügung ( $I = 10$ ).

$$DT = 1.0 * TA - 1.0 * TPU$$

Zeitgruppe	TR1 = (TL * I + TA * (20 - I)) / 20			TR2 = (TPU * I + TA * (20 - I)) / 20		
	STL	STL/TA (I)	STA	STPU	STPU/TA (I)	STA
0-24	3.48	2.93 (10)	3.54	1.09	1.08 (19)	3.54
4-8	4.43	*)	2.20	1.09	*)	2.20
6-10	3.76	*)	2.07	1.10	*)	2.07
8-12	2.93	2.43 (08)	2.68	1.10	*)	2.68
4-6	4.80	*)	2.28	1.08	*)	2.28
6-8	4.23	*)	2.20	1.11	*)	2.20
8-10	3.14	*)	1.92	1.11	*)	1.92

Tab. 7: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Querschnittstemperatur (I)

Zeitgruppe	TR3 = (TBU * I + TA * (20 - I)) / 20			TR4 = (TBS * I + TPU * (20 - I)) / 20		
	STBU	STBU/TA (I)	STA	STBS	STBS/TPU (I)	STPU
0-24	1.44	1.20 (16)	3.54	1.00	0.97 (13)	1.09
4-8	1.49	1.49 (19)	2.20	1.14	1.03 (08)	1.09
6-10	1.33	1.31 (18)	2.07	0.97	0.95 (15)	1.10
8-12	1.16	1.05 (17)	2.68	0.78	*)	1.10
4-6	1.56	1.56 (19)	2.28	1.22	1.04 (06)	1.07
6-8	1.44	*)	2.20	1.07	1.02 (11)	1.10
8-10	1.22	1.17 (16)	1.92	0.83	*)	1.11

\*) keine Nullstellen

- TBU = Betontemperatur UK Balken
- TBS = Betontemperatur Seite Balken
- TPU = Betontemperatur UK Platte
- TA = Asphalttemperatur
- TL = Lufttemperatur

(Zu Asphalttemperaturen siehe 2.3.4.4 Bauwerk Kreuztal)

Tab. 8: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Querschnittstemperatur

Zeitgruppe	für DT1 (I)			für DT2 (I)		
	I	s	s für I=10	I	s	s für I=10
0-24	7	2.01	2.76	9	1.38	1.59
4-8	5	2.19	3.36	11	0.64	0.66
6-10	6	2.08	2.90	10	0.76	0.76
8-12	7	1.80	2.48	9	1.17	1.46
4-6	5	2.25	3.67	11	0.59	0.70
6-8	6	2.14	3.16	10	0.62	0.62
8-10	7	1.83	2.49	9	0.80	0.81

Tab. 9: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturunterschiede OK/UK Platte

Bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Morgenstunden bis 10 Uhr werden Genauigkeiten von

$$s_{DT} \leq 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

erreicht.

Die Ansätze für den Betonbalken lauten

$$DT1(I) = TA(0.8 + I/50) - TL(1.2 - I/50)$$

in Schritten für I = 0 ... 20 aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA) sowie

$$DT2(I) = TA(0.8 + I/50) - TBU(1.2 - I/50)$$

für I = 0 ... 20 aus Temperaturen UK Betonbalken (TBU) und Asphalt (TA). Die optimalen Gewichtungen enthält Tabelle 10.

Für den Temperaturunterschied OK/UK Betonbalken ergibt sich der Repräsentativwert nach Variante 1 aus Asphalt- und Lufttemperatur zu

$$DT = 0.98 * TA - 1.02 * TL$$

mit

$$s_{DT} = 1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bei gleichgewichtigem Ansatz (I=10) verringert sich die Bestimmungsgenauigkeit auf

$$s_{DT} = 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

alles ebenfalls bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Morgenstunden bis 10 Uhr. Die Standardabweichungen zu den Temperaturdifferenzen sind aus den Anlagen 19 bis 22 ersichtlich.

Zeitgruppe	für DT1 (I)			für DT2 (I)		
	l	s	s für l=10	l	s	s für l=10
0–24	8	1.32	1.66	9	2.72	2.81
4–8	9	1.02	1.13	13	1.61	2.26
6–10	9	1.06	1.19	11	1.87	2.00
8–12	8	1.30	1.63	9	2.22	2.37
4–6	9	1.02	1.23	13	1.66	2.41
6–8	9	1.01	1.06	13	1.57	2.18
8–10	9	1.08	1.19	10	1.77	1.77

Tab. 10: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturunterschiede OK/UK Balken

## 2.3 Bauwerke 18 und 19, Kreuztal

### 2.3.1 Bauwerksbeschreibungen

Das Bauwerk 18 bei Kreuztal führt die K 28n über die B 54/62n. Der Überbau ist als zweifeldrige Betonplatte von 70 cm Dicke ausgebildet. Die Stützweiten betragen 12,8 m und 13,0 m. Bauwerksübersichten sind in den Anlagen 23 bis 25 beigelegt.

Bauwerk 19 führt die K 28n über die zweigleisige Bundesbahnstrecke Hagen – Haiger im Raum Siegen. Der Überbau ist eine dreifeldrige, 50 cm dicke Betonplatte mit den Stützweiten 8,5 m, 10,7 m und 8,5 m. Übersichten über das Bauwerk enthalten die Anlagen 26 bis 28.

Der Fahrbahnbelag besteht bei beiden Bauwerken aus nicht metallkaschierter Schweißbahn, die auf Epoxidharz verklebt worden ist, und zwei Lagen handeingebautem Gußasphalt zu je 3,5 cm bis 4,5 cm Dicke.

### 2.3.2 Meßstellenanordnungen

Am Bauwerk 18 wurden an zwei Meßorten je 9 Thermoelemente Chromel-Alumel (NiCr-Ni) über die Plattendicke verteilt eingebaut. Die Anordnung der Meßstellen geht aus Anlage 25 und der folgenden Tabelle 11 hervor.

Insgesamt 20 Meßstellen – 10 Meßstellen je Meßort – wurden am Bauwerk 19 eingerichtet. Ihre Anordnung zeigt Anlage 28 und die folgende Tabelle 12.

Meßort 1 Meßstelle	Meßort 2 Meßstelle	Beschreibung
1	10	Mitte Gußasphalt
2	11	OK Schweißbahn
3	12	UK Schweißbahn = OK Betonfahrbahnplatte
4	13	2 cm unter OK Beton
5	14	4 cm unter OK Beton
6	15	10 cm unter OK Beton
7	16	35 cm unter OK Beton
8	17	UK der 70 cm dicken Betonplatte
9	18	Luftaußentemperatur (Schatten)

Tab. 11: Anordnung der Meßstellen Bauwerk 18 Kreuztal

Meßort 1 Meßstelle	Meßort 2 Meßstelle	Beschreibung
1	21	Mitte Gußasphalt
2	22	OK Schweißbahn
3	23	UK Schweißbahn = OK Betonfahrbahnplatte
4	24	1 cm unter OK Beton
5	25	2 cm unter OK Beton
6	26	4 cm unter OK Beton
7	27	10 cm unter OK Beton
8	28	25 cm unter OK Beton
9	29	UK der 50 cm dicken Betonplatte
10	30	Luftaußentemperatur (Schatten)

Tab. 12: Anordnung der Meßstellen Bauwerk 19 Kreuztal

Ab August 1988 wurden zusätzlich zwei Meßstellen OK Asphalt und eine Meßstelle zur Erfassung der Globalstrahlung eingerichtet.

### 2.3.3 Messungen, Auswertung

Der Meßzeitraum erstreckt sich über die Zeit vom 2. 12. 87 bis 28. 5. 89. An insgesamt 325 kompletten Meßtagen wurden die Meßdaten in 2-Stunden-Intervallen abgefragt. Die Auswertung erfolgt für Bauwerk 18 und Bauwerk 19 gesondert.

### 2.3.4 Ergebnisse

#### 2.3.4.1 Vergleichstemperaturen

Die mittleren Plattentemperaturen als Vergleichswerte für die nachfolgend erläuterten Repräsentativtemperaturen wurden flächenanteilig aus der Gesamtheit der Meßergebnisse ermittelt. Die Berechnung der Vergleichswerte für die Temperaturdifferenzen zwischen OK und UK Betonplatte erfolgte nach dem unter 2.1.4.1 beschriebenen Schema.

2.3.4.2 Repräsentative Überbautemperaturen

Aus den Ansätzen

$$TR1(l) = (TL * l + TA * (20 - l)) / 20$$

und

$$TR2(l) = (TPU * l + TA * (20 - l)) / 20$$

werden für  $l = 0 \dots 20$  Repräsentativwerte für die Betonplatten BW 18 und BW 19 aus Luft- und mittleren Asphalttemperaturen (TL und TA) bzw. aus Temperaturen an UK Platte (TPU) und in Mitte Asphalt gerechnet und den Vergleichswerten aus 2.3.4.1 gegenübergestellt. Folgende Tageszeitgruppen (MEZ) wurden zusammengefaßt:

- 24-Std-Gruppe : 0 Uhr bis 24 Uhr (n = 3696)
- 4-Std-Gruppe 1: 4 Uhr bis 8 Uhr (n = 924)
- 4-Std-Gruppe 2: 6 Uhr bis 10 Uhr (n = 924)
- 4-Std-Gruppe 3: 8 Uhr bis 12 Uhr (n = 924)
- 2-Std-Gruppe 1: 4 Uhr bis 6 Uhr (n = 616)
- 2-Std-Gruppe 2: 6 Uhr bis 8 Uhr (n = 616)
- 2-Std-Gruppe 3: 8 Uhr bis 10 Uhr (n = 616).

n = Anzahl der verwendeten Meßreihen mit je 18 (BW 18) bzw. 20 Meßwerten (BW 19).

Die Standardabweichungen für die optimalen Gewichtungen sind in den Anlagen 29, 30, 34 und 35 dargestellt und in den folgenden Tabellen 13 und 14 zusammengefaßt.

Zusammenfassend ergibt sich für das Bauwerk 18 (Plattendicke = 70 cm) die Kombination aus der Betontemperatur UK Platte und Asphalttemperatur als bester Repräsentativwert mit dem gewichteten Ansatz

$$TR = 0.75 * TPU + 0.25 * TA.$$

und einer Standardabweichung von

$$s_{TR} = 0.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

für den Erfassungszeitraum in den frühen Vormittagsstunden. Bei geringfügigem Genauigkeitsverlust kann auf die Mitwirkung der Asphalttemperatur verzichtet werden ( $s_{TR} = 1.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Am Bauwerk 19 (Plattendicke = 50 cm) ergibt die

Zeitgruppe	TR1 = (TL * l + TA * (20 - l)) / 20			TR2 = (TPU * l + TA * (20 - l)) / 20		
	s <sub>TL</sub>	s <sub>TL/TA</sub> (l)	s <sub>TA</sub>	s <sub>TPU</sub>	s <sub>TPU/TA</sub> (l)	s <sub>TA</sub>
0 - 24	2.94	2.26 (08)	2.62	1.41	1.23 (15)	2.62
4 - 8	3.48	*)	1.52	1.53	1.31 (10)	1.52
6 - 10	2.86	*)	1.50	1.25	1.07 (12)	1.50
8 - 12	2.34	1.89 (09)	2.21	1.02	0.93 (16)	2.21
4 - 6	3.87	*)	1.63	1.69	1.46 (09)	1.63
6 - 8	3.18	*)	1.48	1.38	1.21 (12)	1.48
8 - 10	2.32	1.37 (03)	1.40	1.05	0.83 (13)	1.40

\*) keine Nullstellen

TL = Lufttemperatur

TA = Asphalttemperatur (Mitte der Asphaltsschicht)

TPU = Betontemperatur UK der 70 cm dicken Platte

Tab. 13: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Plattentemperatur Bauwerk 18

Zeitgruppe	TR1 = (TL * l + TA * (20 - l)) / 20			TR2 = (TPU * l + TA * (20 - l)) / 20		
	s <sub>TL</sub>	s <sub>TL/TA</sub> (l)	s <sub>TA</sub>	s <sub>TPU</sub>	s <sub>TPU/TA</sub> (l)	s <sub>TA</sub>
0 - 24	4.58	4.08 (11)	4.84	3.01	2.99 (18)	4.84
4 - 8	4.14	*)	1.65	0.53	*)	1.65
6 - 10	3.23	2.11 (04)	2.18	0.51	*)	2.18
8 - 12	2.33	2.27 (19)	3.90	0.57	*)	3.90
4 - 6	4.68	*)	1.84	0.56	*)	1.84
6 - 8	3.71	*)	1.53	0.48	*)	1.53
8 - 10	2.40	1.82 (10)	2.34	0.51	*)	2.34

\*) keine Nullstellen

TL = Lufttemperatur

TA = Asphalttemperatur (Mitte der Asphaltsschicht)

TPU = Betontemperatur UK der 50 cm dicken Platte

Tab. 14: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Plattentemperatur Bauwerk 19

Betontemperatur an der Plattenunterseite einen guten Repräsentativwert mit einer Standardabweichung von

$$s_{TR} < 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Vormittagsstunden.

### 2.3.4.3 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Für die näherungsweise Bestimmung von Temperaturdifferenzen zwischen OK und UK Betonplatte werden wieder zwei Varianten geprüft. Die Ansätze für beide Bauwerke sind

$$DT1(l) = TA(0.8 + l/50) - TL(1.2 - l/50)$$

$$DT2(l) = TA(0.8 + l/50) - TPU(1.2 - l/50)$$

in Schritten für  $l = 0 \dots 20$  aus Luft- und Asphalttemperaturen (TL und TA) sowie aus Temperaturen UK Betonplatte (TPU) und Mitte Asphalt (TA). Die optimalen Gewichtungen sind in den folgenden Tabellen 15 und 16 zusammengestellt. Den Verlauf der Standardabweichungen enthalten die Anlagen 31, 32, 36 und 37.

Zeitgruppe	für DT1 (l)			für DT2 (l)		
	l	s	s für l=10	l	s	s für l=10
0–24	8	1.42	1.55	9	1.63	1.81
4–8	9	1.43	1.45	12	1.00	1.18
6–10	9	1.34	1.39	10	1.17	1.17
8–12	8	1.39	1.60	7	1.31	1.77
4–6	9	1.50	1.53	13	1.00	1.34
6–8	9	1.38	1.40	11	0.98	1.09
8–10	9	1.27	1.32	9	0.98	1.09

Tab. 15: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturunterschiede OK/UK Platte Bauwerk 18

Für das Bauwerk 18 ergibt sich aus vorstehender Tabelle der günstigste Schätzwert nach Variante 2 aus Asphalttemperatur und der Temperatur UK Betonplatte mit dem gleichgewichtigen Ansatz

$$DT = 1.0 \cdot TA - 1.0 \cdot TPU.$$

Selbst bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Morgenstunden zwischen 6 und 10 Uhr können hier nur grobe Schätzwerte von

$$s_{DT} = 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

erreicht werden.

Zeitgruppe	für DT1 (l)			für DT2 (l)		
	l	s	s für l=10	l	s	s für l=10
0–24	5	1.87	2.97	9	2.30	2.62
4–8	5	2.08	2.76	12	1.01	1.19
6–10	5	1.85	2.64	9	1.59	1.67
8–12	5	1.81	3.06	5	1.95	2.92
4–6	4	2.21	2.99	12	0.94	1.35
6–8	5	1.97	2.59	11	0.99	1.08
8–10	5	1.64	2.50	7	1.46	1.82

Tab. 16: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturunterschiede OK/UK Platte Bauwerk 19

Für das Bauwerk 19 sind, ebenfalls aus Variante 2, mit dem Ansatz

$$DT = 1.04 \cdot TA - 0.96 \cdot TPU$$

Schätzwerte für den Erfassungszeitraum 4 bis 8 Uhr von

$$s_{DT} = 1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

zu erreichen. Hierbei, wie bei allen zuvor beschriebenen Beispielen, sind jedoch die nachfolgend erläuterten Unsicherheiten bei der Erfassung der Asphalttemperaturen zu beachten.

### 2.3.4.4 Zur Erfassung der Asphalttemperaturen

Bei allen vorstehend beschriebenen Rechenansätzen wird von einer mittleren Asphalttemperatur, d. h. von der Temperatur in der Mitte der Asphalt-schicht ausgegangen, da nur diese als Asphalttemperatur langfristig für alle Objekte vorlag. Diese Anordnung ergab sich aus der eigentlichen Aufgabenstellung für jedes einzelne Meßobjekt.

Um diesen Meßwert als Bestimmungsgröße für Folgemessungen zu erfassen, müßte jedoch die Asphalt-schicht angebohrt werden. Besser wäre die Ableitung dieses Wertes aus gemessenen Oberflächentemperaturen am Asphalt. Eine nachträgliche Erweiterung der bestehenden Meßeinrichtungen um zusätzliche Meßwertaufnehmer auf der Asphalt-oberfläche zur Prüfung dieser Anwendung war in den meisten Fällen wegen des Verkehrs nicht möglich.

Lediglich am Bauwerk 19 bei Kreuztal ergab sich die Möglichkeit, zwei zusätzliche Oberflächenelemente für langfristige Messungen zu installieren. An

111 kompletten Meßtagen wurden hier Zusatzdaten erfaßt, mit deren Hilfe die indirekte Bestimmung der mittleren Asphalttemperatur geprüft wurde. Bei dem Ansatz

$$T_{AMitte} = T_{UKBeton} + 0.35 * (T_{Aoben} - T_{UKBeton})$$

für den eingeschränkten Erfassungszeitraum von 6 Uhr bis 10 Uhr ergab die Vergleichsrechnung eine Bestimmungsgenauigkeit von

$$T_{AMitte} = 1.0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Dieser Wert ist bei der Abschätzung der gesuchten Temperaturdifferenz nach den oben beschriebenen Ansätzen durch fehlertheoretische Addition zu berücksichtigen.

Von Bedeutung ist diese Frage nur für die Temperaturunterschiede zwischen OK und UK des Bauteils. Die für die Längendehnung wirksame Mitteltemperatur des jeweiligen Bauteils ist in den meisten Fällen aus Betonoberflächen- oder Lufttemperaturen mit hinreichender Genauigkeit abzuleiten.

#### 2.3.4.5 Globalstrahlung

Zur Beurteilung der Globalstrahlung als mögliche Repräsentativgröße für den Temperaturunterschied zwischen OK und UK des jeweiligen Bauteils wurde am Bauwerk 19 bei Kreuztal über 111 komplette Meßtage (Meßzeitraum: 13. 12. 88 bis 28. 5. 89) die Globalstrahlung zusätzlich zu den oben beschriebenen Temperaturen erfaßt. Eine Regressionsanalyse der Tagesmaxima für Globalstrahlung und Temperaturunterschiede OK/UK Betonplatte Bauwerk 18 und Bauwerk 19 ergab folgende Koeffizienten:

Korrelation Globalstrahlung/DT18 (Tagesmaxima)

Regressionsart:  $a + b * x$

Koeffizient  $a = 0.06$

Koeffizient  $b = 2.55$

Korrelationskoeffizient  $r = 0.77$

Korrelation Globalstrahlung/DT19 (Tagesmaxima)

Regressionsart:  $a + b * x$

Koeffizient  $a = 0.53$

Koeffizient  $b = 3.05$

Korrelationskoeffizient  $r = 0.80$ .

Die Ergebnisse sind in den Anlagen 33 und 38 grafisch erläutert. Zwischen den Tagesmaxima der Globalstrahlung und Temperaturdifferenz ist eine deutliche Korrelation um  $r = 0.8$  nachzuweisen. Bei Abschätzung der Temperaturunterschiede muß jedoch mit Schätzfehlern bis  $6 \text{ } ^\circ\text{C}$  gerechnet werden,

wie aus den genannten Anlagen ersichtlich ist. Der Rechenansatz für die Schätzung lautet im Mittel

$$DT_{max}' = 0.3 + 2.8 * GS_{max} \text{ [Volt]}$$

bzw.

$$DT_{max}' = 0.3 + 0.0084 * GS_{max} \text{ [W/m}^2\text{]}.$$

Für die aktuellen Einzelwerte im Tageszeitverlauf ist ein solcher Zusammenhang nicht festzustellen.

Bei maximalen Erwartungswerten um 6 K muß die Globalstrahlung als alleiniges Bestimmungselement für Temperaturdifferenzen an Bauwerkstellen ausgeschlossen werden.

## 2.4 Rheinbrücke Köln-Deutz

### 2.4.1 Bauwerksbeschreibung

Die 1979 fertiggestellte Spannbetonbrücke über den Rhein in Köln-Deutz hat eine Gesamtlänge von 437,5 m. Sie teilt sich in drei Felder von 132 m, 184,5 m und 121 m Länge und verläuft parallel zu der alten Stahlbrücke mit gleichen Außenabmessungen. Die Bauhöhe des Hohlkastens beträgt über den Pfeilern 7,80 m und in der Mitte der Stromöffnung 3,70 m. Die Dicke der Stege beträgt 50 cm. Für den Überbau wurde hochfester Beton der Güteklasse B 55 verwendet. Im Bereich der Stromöffnung wurden 61,6 m in Leichtbeton LB 45 ausgeführt. Die Anlagen 39 und 40 enthalten Übersichten über das Bauwerk.

### 2.4.2 Anordnung und Durchführung der Messung

Die Temperaturen im Beton des Überbaus und die Lufttemperaturen innerhalb und außerhalb des Hohlkastens wurden an 3 Meßprofilen mit insgesamt 44 Thermoelementen Chromel-Alumel (NiCr-Ni) erfaßt. Die Anordnung der Profile und der Meßstellen in den Profilen geht aus den Anlagen 39 und 40 hervor. Der Meßzeitraum erstreckte sich über die Zeit vom September 1980 bis April 1983. Ausgewertet werden Stichproben von insgesamt 813 vollen Meßtagen. Die Meßdaten liegen in 2-Stunden-Intervallen vor.

### 2.4.3 Ergebnisse

#### 2.4.3.1 Vergleichstemperaturen

Für einen späteren Vergleich mit den ermittelten Repräsentativwerten für Überbautemperaturen und für die Temperaturunterschiede zwischen Deck- und Bodenplatte wurden zunächst Querschnittswerte, Deck- und Bodenplattentempera-

ren für alle drei Meßprofile flächenanteilig aus allen Meßdaten gerechnet. Weiterhin erfolgte eine Längsinterpolation der Querschnittswerte zur Bestimmung der längsdehnungswirksamen „mittleren Überbautemperatur“ bzw. der „mittleren Temperaturdifferenzen“ über den gesamten Überbau.

#### 2.4.3.2 Repräsentative Überbautemperaturen

Aus den Rechenansätzen

$$TR1(I) = (TLI * I + TLA) / (I + 1)$$

$$TR2(I) = (TBI * I + TLA) / (I + 1)$$

werden für  $I = 1 \dots 20$  Repräsentativwerte für die mittlere Überbautemperatur ermittelt. Hierbei bedeuten:

TLI = Mittel aus Luftinnentemperaturen in den 3 Meßprofilen

TLA = Mittel der Luftaußentemperaturen in den Profilen 1 und 3

TBI = Mittel aus den Betoninnentemperaturen Prof.2 (MS 4 und 13).

Die Gegenüberstellung mit den Vergleichswerten aus 2.5.3.1 erfolgt in 6 Tageszeitgruppen (MEZ bzw. MESZ):

2-Std-Gruppe 1:	3 Uhr bis 5 Uhr
2-Std-Gruppe 2:	5 Uhr bis 7 Uhr
2-Std-Gruppe 3:	7 Uhr bis 9 Uhr
4-Std-Gruppe 1:	3 Uhr bis 7 Uhr
4-Std-Gruppe 2:	5 Uhr bis 9 Uhr
4-Std-Gruppe 3:	7 Uhr bis 11 Uhr.

Unter Berücksichtigung der bisher an anderen Bauwerken ermittelten Ergebnisse wird auf die Auswertung von 24-Stunden-Gruppen verzichtet. In der folgenden Tabelle 17 sind die Standardabweichungen für die optimalen Gewichtungen zusammengestellt (vergl. auch Anlagen 41 und 42).

Als Repräsentativwert ist eindeutig die Lufttemperatur innerhalb des Hohlkastens in mittlerer Höhe zu bevorzugen. Sie repräsentiert die mittlere Überbautemperatur mit einer Genauigkeit von

$$s_{T\text{Überbau}} = 1 \text{ °C.}$$

Der Erfassungszeitraum sollte hierbei auf den Vormittag beschränkt werden.

#### 2.4.3.3 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Für die Darstellung der Temperaturunterschiede zwischen mittlerer Deckplattentemperatur und mittlerer Bodenplattentemperatur wurden folgende Ansätze für  $I = 0 \dots 20$  gewählt:

$$DTR1(I) = TBloben * (0.8 + I/50) - TBlunten * (1.2 - I/50)$$

$$DTR2(I) =$$

$$\frac{TLA * I/20 + TBloben}{1 + I/20} - \frac{TLA * (1 - I/20) + TBlunten}{2 - I/20}$$

Es bedeuten:

TBloben = Betoninnentemperatur oben (UK Deckplatte)

TBlunten = Betoninnentemperatur unten (OK Bodenplatte)

TLA: = Luftaußentemperatur.

Die Standardabweichungen für die optimalen Gewichtungen sind in den Anlagen 43 und 44 und in der folgenden Tabelle 18 zusammengestellt.

Für den Erfassungszeitraum bis 11 Uhr ergibt sich danach der günstigste Repräsentativwert aus den Betoninnentemperaturen oben und unten im Hohlkasten unter Einbeziehung der Luftaußentemperatur als dämpfendes Element zu

$$DTR2 = (TBloben - TBlunten)/1.5$$

Zeitgruppe	TR1 (I) = (TLI * I + TLA) / (I + 1)				TR2 (I) = (TBI * I + TLA) / (I + 1)			
	$s_{TLI}$	$s_{I=1}$	$s_{min(I)}$	$s_{I=20}$	$s_{TBI}$	$s_{I=1}$	$s_{min(I)}$	$s_{I=20}$
3 – 7	0.95	2.45	*)	1.06	1.28	2.07	1.14 (7)	1.20
5 – 9	0.89	2.38	*)	0.99	1.27	1.97	1.08 (6)	1.17
7 – 11	0.87	2.13	*)	0.94	1.27	1.71	1.01 (4)	1.15
3 – 5	0.99	2.43	*)	1.09	1.29	2.07	1.18 (8)	1.22
5 – 7	0.91	2.48	*)	1.02	1.27	2.08	1.11 (7)	1.18
7 – 9	0.86	2.33	*)	0.96	1.27	1.90	1.04 (6)	1.15

\*) keine Nullstellen

TLI = Lufttemperatur im Hohlkasten

TLA = Lufttemperatur außen

TBI = Betontemperatur im Hohlkasten (Mittel aus UK Deckplatte und OK Bodenplatte)

Tab. 17: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Überbautemperatur Rheinbrücke Köln-Deutz

Zeitgruppe	DTR1 (I)			DTR2 (I)		
	$S_{I=0}$	$S_{min}$ (I)	$S_{I=20}$	$S_{I=0}$	$S_{min}$ (I)	$S_{I=20}$
3 – 7	5.11	0.83 (10)	5.44	2.29	0.63 (10)	2.47
5 – 9	5.02	0.86 (10)	5.53	2.38	0.61 (10)	2.43
7 – 11	4.96	0.87 (10)	5.56	2.23	0.61 (10)	2.26
3 – 5	5.17	0.82 (10)	5.39	2.18	0.64 (10)	2.45
5 – 7	5.05	0.85 (10)	5.50	2.41	0.62 (10)	2.50
7 – 9	4.97	0.88 (10)	5.57	2.42	0.61 (10)	2.39

Tab. 18: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturdifferenz Deckplatte – Bodenplatte Rheinbrücke Köln-Deutz

mit einer Bestimmungsgenauigkeit von

$$s_{DTR2} < 0.7 \text{ °C.}$$

Die Einbeziehung der Luftaußentemperatur im 2. Ansatz wirkt sich dämpfend auf den aus Betoninnenflächentemperaturen oben und unten abgeleiteten Temperaturunterschied aus, da ihre Einwirkung auf Deck- und Bodenplatte vom Ansatz her gleich bewertet wird, ohne daß sie (hier bei  $l = 10$ ) selbst in den Ansatz einfließt. Das ist zunächst plausibel, sollte aber wegen der Unsicherheit der Annahme einer gleichwertigen Einwirkung auf die Deckplatte und auf die Bodenplatte nicht überbewertet werden.

Ohne Berücksichtigung der Luftaußentemperatur ergibt sich nach Ansatz 1

$$DTR1 = T_{B_{oben}} - T_{B_{unten}}$$

mit einer Bestimmungsgenauigkeit von

$$s_{DTR1} \leq 0.9 \text{ °C.}$$

## 2.5 Brohltalbrücke

Zum Vergleich mit den bisher beschriebenen Ergebnissen (besonders am Hohlkasten Rheinbrücke Köln-Deutz) wird nachfolgend auf eine umfangreiche Datensammlung aus den „Messungen von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken“, die im Rahmen des „Programms Brohltalbrücke“ (FE Nr. 15.136 B 84 G) in den Jahren 1984 bis 1987 erfolgten, zurückgegriffen. Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der Messungen hinsichtlich der oben zitierten Aufgabenstellung sind in zwei Berichten [5] und [6] abschließend beschrieben worden. Der folgenden Auswertung bezüglich der Repräsentativwerte für Querschnittstemperaturen und Temperaturdifferenzen wird ein kurzer Abriss über das Bauwerk und die Messungen vorangestellt.

### 2.5.1 Bauwerksbeschreibung

Die Brohltalbrücke führt die Autobahn A 61 in Nord-Süd-Richtung über das Brohltal. Die Gesamtlänge der Brücke von 600 m ist unterteilt in 12 Felder mit Stützweiten zwischen 33,55 m und 70,00 m. Die größte Pfeilerhöhe beträgt etwa 55 m. Das Bauwerk besteht aus zwei getrennten Überbauten (durchlaufende Hohlkästen) auf unabhängig gegründeten Pfeilern. Die Bauwerksachse verläuft in einem Kreisbogen mit  $R = 2\,200$  m. Alle Messungen wurden am Überbau Ost, d. h. an der Richtungsfahrbahn Koblenz – Gelsdorf durchgeführt (vergl. Anlagen 45 bis 47).

### 2.5.2 Meßstellenanordnung

Zur Bestimmung der mittleren Überbautemperaturen sowie der Bauteiltemperaturen für Deck-, Bodenplatte und Stege wurden 36 Temperaturmeßstellen mit Thermoelementen Chromel- Alumel (NiCr-Ni) eingerichtet. Die Meßstellen verteilen sich, einschließlich je einer weiteren Meßstelle für die Luftinnentemperaturen im Hohlkasten, auf zwei Meßprofile, deren Lage und deren Meßstellenbestückung aus den Anlagen 45 bis 47 hervorgeht. Mit einer zusätzlichen Meßstelle wurden die Luftaußentemperaturen im Schatten des Überbaus erfaßt.

### 2.5.3 Messung und Auswertung

Die Messungen erstreckten sich über den Zeitraum vom November 1984 bis März 1987. Die Meßwertabfrage erfolgte in 2-Stunden-Intervallen. Über 716 volle Meßtage wurden 8592 Meßreihen mit je 39 Temperaturmeßstellen erfaßt.

### 2.5.4 Ergebnisse

#### 2.5.4.1 Vergleichstemperaturen

Die Vergleichswerte für die nachfolgend beschriebenen repräsentativen Überbautemperaturen wur-

den aus allen Meßwerten flächenanteilig für beide Meßquerschnitte berechnet (vergl. auch Ansätze in [2]). Die repräsentativen Temperaturunterschiede zwischen Deck- und Bodenplatte wurden aus den ebenfalls flächenanteilig ermittelten entsprechenden Bauteiltemperaturen errechnet.

#### 2.5.4.2 Repräsentative Überbautemperaturen

Für die längsdehnungswirksame mittlere Überbautemperatur wurden aus den Ansätzen

$$TR1(l) = (TLI * l + TLA) / (l + 1)$$

und

$$TR2(l) = (TBI * l + TLA) / (l + 1)$$

Repräsentativwerte für  $l = 1 \dots 20$  ermittelt. Es bedeuten:

TLI = Mittel aus Luftinnentemperaturen in Profil 1 und 2

TLA = Luftaußentemperatur (Schatten)

TBI = Mittel aus Betoninnentemperaturen Profil 1 und 2 (Betonoberflächentemperaturen im Hohlkasten).

Die Gegenüberstellung mit den Vergleichswerten aus 2.6.4.1 erfolgt in den folgenden Zeitgruppen (MEZ):

24-Std-Gruppe :	0 Uhr bis 22 Uhr
4-Std-Gruppe 1:	4 Uhr bis 8 Uhr
4-Std-Gruppe 2:	6 Uhr bis 10 Uhr
4-Std-Gruppe 3:	8 Uhr bis 12 Uhr.

Die folgende Tabelle 19 zeigt die Standardabweichungen für die optimalen Gewichtungen (vergl. auch Anlagen 48 und 49).

Als günstigste Kombination erweist sich diejenige aus Betoninnen- und Luftaußentemperatur nach dem Ansatz

$$TR = (8 * TBI + TLA) / 9.$$

Hierfür gilt eine Standardabweichung von

$$s_{TR} = 0.3 \text{ °C}$$

bei Einschränkung des Meßzeitraums auf die Morgenstunden. Es zeigt sich, daß diese Einschränkung eine Verdoppelung der Bestimmungsgenauigkeit gegenüber dem auf 24 Stunden erweiterten Erfassungszeitraum bewirkt.

In [6] wird durch eine Regressionsanalyse der enge Zusammenhang zwischen Luftinnen- und mittlerer Überbautemperatur beschrieben. Als Standardabweichung für die Schätzwerte der Überbautemperatur wird dort

$$s_{TÜ} = 0.79 \text{ °C}$$

angegeben (vergl. Anlage 52). Dieser Wert wird in der obigen Tabelle unter TR1 für den Erfassungszeitraum über 24 Stunden mit

$$s_{TR} = 0.74 \text{ °C}$$

bei  $l = 20$  (also mit 20fachem Gewicht für die Luftinnentemperatur) bestätigt. Er kann für diesen Erfassungszeitraum durch den gewichteten Einsatz der Betoninnentemperatur (statt Luftinnentemperatur) noch geringfügig verbessert werden ( $s_{TR} = 0.63 \text{ °C}$ ).

#### 2.5.4.3 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Zur Ermittlung von Repräsentativwerten für die Temperaturdifferenzen zwischen Deck- und Bodenplatte wurden folgende Ansätze für  $l = 0 \dots 20$  geprüft:

$$DTR1(l) = TBI_{\text{oben}} * (0.8 + l/50) - TBI_{\text{unten}} * (1.2 - l/50)$$

$$DTR2(l) = \frac{TLA * l/20 + TBI_{\text{oben}}}{1 + l/20} - \frac{TLA * (1 - l/20) + TBI_{\text{unten}}}{2 - l/20}$$

Hierin bedeuten:

$TBI_{\text{oben}}$  = Betoninnentemperatur oben (UK Deckplatte)

$TBI_{\text{unten}}$  = Betoninnentemperatur unten (OK Bodenplatte)

TLA: = Luftaußentemperatur im Schatten.

Zeitgruppe	TR1 = (TLI * l + TLA) / (l + 1)			TR2 = (TBI * l + TLA) / (l + 1)		
	$s_{l=1}$	$s_{\text{min}}(l)$	$s_{l=20}$	$s_{l=1}$	$s_{\text{min}}(l)$	$s_{l=20}$
0–24	1.54	0.73 (10)	0.74	1.49	0.63 (10)	0.65
4–8	1.73	0.45 (08)	0.54	1.73	0.28 (09)	0.38
6–10	1.51	0.46 (08)	0.53	1.48	0.27 (08)	0.37
8–12	1.26	0.49 (08)	0.52	1.18	0.33 (07)	0.41

Tab. 19: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die mittlere Querschnittstemperatur Brohltalbrücke

Zeitgruppe	DTR1 (l)			DTR2 (l)		
	$S_{l=0}$	$S_{min}$ (l)	$S_{l=20}$	$S_{l=0}$	$S_{min}$ (l)	$S_{l=20}$
0 – 24	4.93	0.44 (10)	4.63	1.63	0.68 (09)	1.76
4 – 8	4.38	0.25 (10)	4.64	1.91	0.28 (10)	1.98
6 – 10	4.32	0.23 (10)	4.46	1.64	0.29 (10)	1.67
8 – 12	4.48	0.34 (10)	4.27	1.36	0.42 (10)	1.32

Tab. 20: Bestimmungsgenauigkeit der Repräsentativwerte für die Temperaturdifferenz Deckplatte – Bodenplatte Brohltalbrücke

Die Standardabweichungen als Bestimmungsgenauigkeiten für die repräsentativen Temperaturdifferenzen aus den optimalen Gewichtungen sind in der folgenden Tabelle 20 zusammengestellt (vergl. auch die Anlagen 50 und 51).

Für den Erfassungszeitraum 4 Uhr bis 10 Uhr ergeben sich für beide Ansätze aus den günstigsten Kombinationen bei  $l = 10$  statistisch gleichwertige Bestimmungsgenauigkeiten von

$$s_{DT} = 0.3 \text{ °C}$$

obwohl sich die danach ermittelten Repräsentativwerte im Verhältnis 2:3 unterscheiden:

$$DTR1 = TBI_{\text{oben}} - TBI_{\text{unten}}$$

$$DTR2 = (TBI_{\text{oben}} - TBI_{\text{unten}})/1.5.$$

Wegen der auch unter 2.4.3.3 beschriebenen Unsicherheit bei der Einbeziehung der Luftaußentemperaturen in den Rechenansatz sollte in diesem Falle die Lösung aus Ansatz 1 bevorzugt werden.

## 2.6 Pfeiler 19 der Ahrtalbrücke

Für eine weitere vergleichende Betrachtung werden nachfolgend die Ergebnisse einer Untersuchung an einem Pfeiler der Ahrtalbrücke bei Bad Neuenahr zitiert [9].

### 2.6.1 Bauwerk und Messung

Der Pfeiler 19 West der Ahrtalbrücke mit einer Höhe von 47 m ist als einzelliger Hohl Pfeiler mit 50 cm dicken Stahlbetonwänden ausgebildet. Der Pfeiler wurde mit 100 Temperaturmeßstellen ausgerüstet. Die hieraus ermittelten Vergleichswerte für die mittlere Pfeilertemperatur und für die Temperaturdifferenzen gegenüberliegender Pfeilerwände sind für die weiterführende Auswertung als fehlerfrei angenommen worden. Die Erfassung der Bauwerkstemperaturen ist in [7] und [8] erläutert. Eine Übersicht über das Bauwerk und die Meßeinrichtungen geben die Anlagen 53 bis 55.

### 2.6.2 Ergebnisse

Ohne auf die Messungen und deren Auswertung näher einzugehen, sollen an dieser Stelle einige Ergebnisse aufgeführt werden, die einen Vergleich mit den oben beschriebenen Ergebnissen an Hohlkästen (Deutz und Brohltal) zulassen. Der Pfeiler wird hierbei als senkrecht stehender Hohlkasten betrachtet, wobei die Südseite des Pfeilers der Oberseite des Hohlkastens entsprechen soll.

#### 2.6.2.1 Repräsentative Pfeilertemperatur

Als Repräsentativwert für die mittlere Pfeilertemperatur ergibt sich nach [9] für den Erfassungszeitraum 0 Uhr bis 24 Uhr

$$TR1 = (4 * TBI + TLA)/5$$

mit

$$s_{TR1} = 0.5 \text{ °C}$$

und für den eingeschränkten Erfassungszeitraum von 5 Uhr bis 9 Uhr

$$TR2 = (15 * TLI + TLA)/16$$

mit

$$s_{TR2} = 0.32 \text{ °C}.$$

Es bedeuten:

TBI = Mittel der Betoninnentemperaturen an den vier Pfeilerwänden

TLI = Lufttemperatur innerhalb des Hohl Pfeilers

TLA = Lufttemperatur außen (Schatten).

Alle Temperaturen wurden im zugänglichen Bereich am Pfeilerfuß gemessen.

Übereinstimmend mit den Ergebnissen Deutz und Brohltal erweist sich bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Morgenstunden auch hier die Lufttemperatur innerhalb des Hohlkörpers (gemessen etwa 1,5 m über OK Pfeilerfundament) als vorrangiges und ausreichend genaues Bestimmungselement für die Ermittlung der längsdehnungswirksamen mittleren Bauwerks- bzw. Bauteiltemperatur.

### 2.6.2.2 Repräsentative Temperaturdifferenzen

Aus [9] ergibt sich weiterhin die repräsentative Temperaturdifferenz zwischen Süd- und Nordwand des Pfeilers für den Erfassungszeitraum 0 Uhr bis 24 Uhr zu

$$DTR1 = (4 \cdot TBI_{Süd} + TBA_{Süd})/5 - (4 \cdot TBI_{Nord} + TBA_{Nord})/5$$

mit

$$s_{DTR1} = 0.6 \text{ °C.}$$

und für den Erfassungszeitraum 5 Uhr bis 9 Uhr zu

$$DTR2 = (5 \cdot TBI_{Süd} + TBA_{Süd})/6 - (5 \cdot TBI_{Nord} + TBA_{Nord})/6$$

mit

$$s_{DTR1} = 0.44 \text{ °C.}$$

TBI = Betontemperatur Innenfläche der jeweiligen Pfeilerwand

TBA = Betontemperatur Außenfläche der jeweiligen Pfeilerwand.

Im Gegensatz zu den Beispielen „Hohlkasten“ konnten hier ohne großen Aufwand die Betonaußentemperaturen direkt gemessen werden. Wegen des hohen Gewichtes der Betoninnentemperaturen ergibt sich jedoch auch hierbei weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen an Hohlkästen, nämlich die Bestimmung der Temperaturdifferenz gegenüberliegender Pfeilerwände bzw. Deck- und

Bodenplatte an Hohlkästen vorwiegend aus den Betoninnentemperaturen mit akzeptabler Genauigkeit besonders bei Einschränkung des Erfassungszeitraums auf die Morgenstunden.

## 2.7 Ergebnisübersicht

In der nachfolgenden Tabelle 21 sind die Ergebnisse der vorstehend beschriebenen Vergleichsrechnungen zusammengestellt. Für unterschiedliche Querschnittstypen werden diejenigen Meßwerte markiert, aus denen die Repräsentativwerte für die mittleren Bauteiltemperaturen bzw. für die Temperaturdifferenzen ermittelt werden können. Bei der Auswahl der Kombinationen oder Ersatzwerte wurden geringe Genauigkeitseinbußen zugunsten einfacherer Ansätze toleriert.

Die Tabelle enthält außerdem die in den behandelten Beispielen erreichten Genauigkeiten (Standardabweichungen s). Die Genauigkeitsangaben für die Temperaturdifferenzen werden ergänzt um die Größe s' als Schätzwert für die Genauigkeit bei Verwendung gemessener Asphaltoberflächentemperaturen anstelle der mittleren Asphalttemperaturen (TAS) (vergl. auch 2.3.4.4).

Alle Angaben gelten ausnahmslos für den auf die Morgenstunden eingeschränkten Erfassungszeitraum. Eine Erweiterung des Erfassungszeitraums hätte zum Teil erhebliche Genauigkeitsverluste zur Folge.

Typ	Mittl. Temperat.				Temperatur-Differenz						s	s'
	TPU	TBS	TLI	s	TPU	TUD	TOB	TLA	TAS	s		
Platte 25 cm	X			0.4				X	X	0.9	1.3	
Platte 30 cm	X			0.9	X				X	0.8	1.3	
Platte 50 cm	X			0.6	X				X	1.0	1.4	
Platte 70 cm	X			1.0	X				X	1.2	1.6	
Balken 130 cm		X		1.2				X	X	1.0	1.4	
Plattenbalken		X		1.0								
Hohlkasten Deutz			X	1.0		X	X			0.7		
Hohlkasten Brohl			X	0.8		X	X			0.3		
Pfeiler Ahrtal			X	0.4		(X)	(X)			0.5		

Bezeichnung der Meßstellen:

TPU = Temperatur UK Platte

TBS = Temperatur Seitenfläche Balken in mittlerer Höhe (Schatten)

TLI = Lufttemperatur im Hohlkasten in mittlerer Höhe

TLA = Lufttemperatur außen (Schatten)

TUD = Temperatur UK Deckplatte (Pfeiler: Südwand innen)

TOB = Temperatur OK Bodenplatte (Pfeiler: Nordwand innen)

TAM = Temperatur Mitte Asphalt

TAO = Temperatur OK Asphalt

Genauigkeiten:

s = Standardabweichung bei Verwendung von TAM

s' = Standardabweichung bei Verwendung von TAO

Tab. 21: Zusammenstellung der Kombinationen und ihrer Genauigkeiten

Es zeigen sich gute Möglichkeiten, längsdehnungswirksame Überbau- oder Bauteiltemperaturen mit einfachen Meßmitteln, d. h. durch die Messung von Betonoberflächen- oder Lufttemperaturen, bei akzeptablen Genauigkeiten an allen beschriebenen Querschnittstypen erfassen zu können. Biegungswirksame Temperaturdifferenzen an Hohlkästen oder auch Hohlpfelern, an Bauwerksteilen also, die innen zu begehen sind, können ebenfalls einfach und ausreichend genau bestimmt werden. Die Differenzmessung an massiven Platten hingegen läßt keine zufriedenstellenden Ergebnisse erwarten, da die Wirkung des Fahrbahnbelages auf die Temperaturverteilung in der Platte ohne zusätzliche (zerstörende) Messungen nur ungenau abzuschätzen ist.

Die Ableitung von Temperaturdifferenzen aus der gemessenen Globalstrahlung verspricht keine für den Einzelfall ausreichende relative Bestimmungsgenauigkeit.

## 3 Temperaturgrenzwerte

### 3.0 Einleitung

Als Beitrag zur Diskussion über die Bemessung von Brückenlagern im Rahmen der Entwicklung einer Europäischen Lager-Norm wurde dem CEN/TC 167 „Structural Bearings“ eine Ausarbeitung über Temperaturgrenzwerte zugeleitet. Dieser Ausarbeitung liegt ein großer Teil der in diesem Bericht bereits erläuterten und genutzten Meßdaten zugrunde. Auf der Grundlage dieser Daten wurde eine Extremwertprognose für Bauteile „Betonplatten/Betonbalken“ erarbeitet. Grundlagen und Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

### 3.1 Erfasste Bauwerke, Stichworte zur Vorgehensweise

#### 3.1.1 Bauwerk Eifeltor

Von den Temperaturmessungen an der Verbundbrücke Eifeltor wurden in diesem Zusammenhang

nur die an der 25 cm dicken Betonplatte erhobenen Temperaturdaten ausgewertet. Verarbeitet wurden die Mittelwerte aus zwei Meßorten. Die größte Abweichung zwischen zwei entsprechenden Meßwerten betrug 2 K. Die Messungen erstreckten sich über 162 komplette Meßtage in der Zeit vom 6. 2. 87 bis 28. 7. 87.

#### 3.1.2 Bauwerk Dürener Straße

Der Überbau ist als Plattenbalken ausgebildet. Die Platte ist 30 cm dick, die Balken 130 cm hoch. Die in der Auswertung zu den Repräsentativtemperaturen unter 2.2 angeführten „mittleren Querschnittstemperaturen“ stellen das flächenanteilige Mittel aus Platten- und Balkentemperatur dar. Die größte Abweichung zwischen diesem Gesamtmittel und den Platten- bzw. Balkentemperaturen beträgt 2 K. Verarbeitet wurden die Mittelwerte aus zwei Meßorten. Die Meßdaten wurden an 93 kompletten Meßtagen innerhalb der Zeit vom 14. 6. 1986 bis 23. 9. 1986 und vom 23. 12. 1986 bis 4. 2. 1987 erfaßt.

#### 3.1.3 Bauwerke Kreuztal

Hier wurde an zwei Plattenbrücken gemessen. Die Plattendicke am Bauwerk 18 beträgt 70 cm, am Bauwerk 19 50 cm. An jedem Bauwerk sind zwei Meßorte angeordnet. Die Ergebnisse aus beiden Bauwerken wurden für die weitere Auswertung gemittelt. Die verarbeiteten Temperaturwerte sind also Mittelwerte aus insgesamt 4 Meßorten. Die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert beträgt maximal 2 K. Die Datenerfassung erfolgte an 325 kompletten Meßtagen in der Zeit vom 2. 12. 1987 bis 28. 5. 1989.

## 3.2 Messungen

Der zeitliche Ablauf der Messungen und einige Angaben über die Datenmengen sind in der folgenden Tabelle 22 zusammengestellt.

Durch Geräteausfälle ist die Folge der Meßtage zeitweise lückenhaft.

Bauwerk	Meßzeitraum	Meßtage	Meßreihen	Meßwerte
Dürener Straße	14.06.86 – 13.09.86 23.12.86 – 04.02.87	59	708	14 160
		34	408	8 568
	93	1 116	22 728	
Eifeltor	06.02.87 – 28.07.87	162	1 944	33 048
Kreuztal	02.12.87 – 28.05.89	325	3 900	78 300

Tab. 22: Messungen für Extremwertprognose

### 3.3 Meßergebnisse

Die Tagesmaxima und Tagesminima der Betontemperaturen in verschiedenen Höhen, der mittleren Beton- bzw. Querschnittstemperaturen und der Lufttemperaturen werden, zunächst für die drei Bauwerke getrennt, anhand von Häufigkeitsdiagrammen in den Anlagen 56 bis 61 erläutert.

In der folgenden Tabelle 23 sind die Extremwerte der längsdehnungswirksamen mittleren Querschnittstemperaturen und der Lufttemperaturen über den gesamten Meßzeitraum aufgeführt:

Bauwerk	Mittl. Bauteiltemp.		Mittl. Lufttemp.	
	$T_{\max}$ °C	$T_{\min}$ °C	$T_{\max}$ °C	$T_{\min}$ °C
Dürener Straße	+ 32	- 12	+ 34	- 13
Eifeltor	+ 34	- 6	+ 32	- 8
Kreuztal	+ 33	- 8	+ 32	- 12

Tab. 23: Extremwerte aus den Messungen

Für die mittlere Überbautemperatur wie auch für die Lufttemperatur ergibt sich somit ein direkt gemessener Temperaturbereich von

$$T_{\text{Luft}} = T_{\text{Beton}} = + 11 \text{ °C} \pm 23 \text{ K.}$$

### 3.4 Statistische Kenngrößen aus den Meßwertverteilungen

Die zusammengefaßten Verteilungen der Tagesmaxima und -minima der mittleren Betontemperaturen und der Lufttemperaturen aus allen Messungen (Anlage 62) weisen Lücken im Bereich mittlerer Temperaturen auf, die durch die Unterbelegung der Herbstmonate bei der Meßwerterfassung zu erklären sind. Für eine Abschätzung der Grenzwerte wird Normalverteilung angenommen. Die Grenzwerte werden aus der linken (unteren) Hälfte der Minimalwert-Verteilungskurve und der rechten (oberen) Hälfte der Maximalwert-Verteilungskurve ermittelt. Die Anlagen 63 und 64 zeigen die Verteilungen für die mittleren Betontemperaturen (Überbautemperaturen) und die Lufttemperaturen.

Es ergeben sich folgende statistische Sicherheiten für die mittlere Betontemperatur:

( $\alpha$ : Irrtumswahrscheinlichkeit)

$$95 \text{ \%} = - 7 \text{ °C} \dots 29 \text{ °C} (\alpha = \pm 2.5 \text{ \%})$$

$$99 \text{ \%} = - 12 \text{ °C} \dots 35 \text{ °C} (\alpha = \pm 0.5 \text{ \%})$$

$$99.9 \text{ \%} = - 17 \text{ °C} \dots 41 \text{ °C} (\alpha = \pm 0.05 \text{ \%}),$$

und für die Lufttemperatur

$$95 \text{ \%} = - 7 \text{ °C} \dots 28 \text{ °C} (\alpha = \pm 2.5 \text{ \%})$$

$$99 \text{ \%} = - 12 \text{ °C} \dots 33 \text{ °C} (\alpha = \pm 0.5 \text{ \%})$$

$$99.9 \text{ \%} = - 17 \text{ °C} \dots 39 \text{ °C} (\alpha = \pm 0.05 \text{ \%}).$$

Der Vergleich zeigt hier eine leichte Erhöhung der Maxima der mittleren Betontemperaturen um etwa 2 K gegenüber der Lufttemperatur, vermutlich infolge der Sonnenstrahlung. Die Minimalwerte stimmen überein. Die Ergebnisse der direkt gemessenen Extremwerte aus 3.3 lassen sich etwa in den 99 %-Bereich einordnen.

### 3.5 Extremwertprognose

Den vorstehend beschriebenen Werten liegen Messungen an Bauwerken im Rheinischen Raum zugrunde. Die Ergebnisse beschreiben Temperaturverläufe über den Erfassungszeitraum von etwa 3 Jahren (Mitte 1986 bis Mitte 1989).

Für die Abschätzung langfristig zu erwartender Extremwerte wurde auf die Spannweiten der Lufttemperaturen der Jahre 1945 bis 1990 zurückgegriffen. Die Meßdaten sind den Meteorologischen Jahrbüchern des Deutschen Wetterdienstes für die Besatzungszonen und später für die Bundesrepublik Deutschland entnommen worden [10]. Um regionale Streuungen einzubinden, wurden 4 geographische Schwerpunkte gewählt (West, Süd, Ost und Nord). Die Ergebnisse dieser Recherche sind in den Anlagen 65 bis 68 dargestellt.

Über den Zeitraum von 46 Jahren ergeben sich daraus folgende Spannweiten:

Ort	$T_{\min}$	$T_{\max}$	Spannweite	zentr. Spannweite
Bonn	- 23 °C	+ 38 °C	61 K	7.5 °C ± 30.5 K
Hamburg	- 19 °C	+ 35 °C	54 K	8 °C ± 27 K
München	- 28 °C	+ 36 °C	64 K	4 °C ± 32 K
Berlin	- 22 °C	+ 37 °C	59 K	7.5 °C ± 29.5 K
Gesamt	- 28 °C	+ 38 °C	66 K	5 °C ± 33 K

Aus dem unter 3.4 beschriebenen Verhältnis zwischen mittlerer Betontemperatur und Lufttemperatur und aus den vorstehenden langfristigen Spannweiten der Lufttemperaturen in verschiedenen geographischen Regionen ergeben sich für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland folgende Schätzwerte für die Extremwerte mittlerer Betonplattentemperaturen:

$$- 28 \text{ °C} < \text{mittlere Betontemperatur} < + 40 \text{ °C}$$

### 3.6 Vergleichswerte

Abschließend werden einige Vergleichswerte aus den in diesem Bericht zitierten Temperaturmessungen an Betonhohlkästen bzw. einem Betonhohl Pfeiler angeführt. Alle Beispiele zeigen geringere Extremwerte wegen der verzögernden Wirkung der im Hohlkörper eingeschlossenen Luftsäule.

Am Hohlkasten der Brohltalbrücke wurden in [6] über einen Meßzeitraum von 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren eine maximale Spannweite für die mittlere Überbautemperatur von

$$T_{\bar{U}} = -13\text{ °C bis }30\text{ °C}$$

nachgewiesen. Die Extremwerte der Lufttemperatur betragen hierbei

$$T_L = -18\text{ °C und }33\text{ °C.}$$

Die Extremwerte am Hohlkasten der Rheinbrücke Köln-Deutz wurden über einen Meßzeitraum von ebenfalls 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren ermittelt. Nach [1] betrug hier die maximale Spannweite der mittleren Überbautemperatur

$$T_{\bar{U}} = -5\text{ °C bis }28\text{ °C}$$

bei Lufttemperaturen zwischen

$$T_L = -13\text{ °C und }30\text{ °C.}$$

Am Pfeiler 19 der Ahrtalbrücke, einem einzelligen Betonhohl Pfeiler, ergaben sich nach [7] aus Stichproben über den Gesamtmeßzeitraum von etwa 3 Jahren Schätzwerte für die Spannweiten der mittleren Pfeilertemperaturen und der Lufttemperaturen von

$$T_{Pf} = T_L = -5\text{ °C bis }32\text{ °C.}$$

## 4 Zusammenfassung

Mit dem vorstehenden Schlußbericht wird eine Untersuchungsreihe abgeschlossen, die das Schwerpunktthema „Wärmewirkungen an Betonbrücken“ zum Inhalt hat. Neben dem hier behandelten Projekt „Messungen von Temperaturunterschieden an Betonbrücken“, zu dem 4 Zwischenberichte über Wärmebelastungen unter klimatischen Einflüssen und beim Einbau von bituminösen Fahrbahnbelägen vorlegt worden sind, wurden weitere Detailaufgaben im Rahmen der Projekte „Untersuchungen über das Temperatur- und Verformungsverhalten hoher Brückenpfeiler“ und „Messung von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken“ bearbeitet.

Basierend auf den Meßdatensammlungen zu allen genannten Projekten werden im Schlußbericht zwei Themen behandelt:

- Ermittlung repräsentativer Temperaturen und Temperaturdifferenzen an Brückenbauwerken zur vereinfachten Erfassung verformungswirksamer Bauwerks- bzw. Bauteiltemperaturen zur Anwendung bei Brückenprüfungen
- Ermittlung statistisch abgesicherter Temperaturgrenzwerte an Brückenbauwerken als Beitrag zur Diskussion über die Bemessung von Brückenlagern.

Im ersten Teil des Berichtes werden – am Beispiel von sieben Bauwerken unterschiedlicher Konstruktion – Kriterien für die Auswahl von Ersatzmeßstellen bzw. Meßstellenkombinationen zur Bestimmung repräsentativer Temperaturdaten ermittelt und in tlw. gewichteten Ansätzen zusammengestellt. Dies gilt gleichermaßen für die längsdehnungswirksamen mittleren Bauteiltemperaturen wie auch für die biegungswirksamen Temperaturdifferenzen an Bauwerken bzw. an Bauwerksteilen.

In einer statistischen Auswertung werden die möglichen Ersatzwerte den aus allen Meßwerten im Querschnitt ermittelten Referenzwerten gegenübergestellt. Dieser Vergleich führt zu einer verlässlichen Beurteilung der Bestimmungsgenauigkeit dieser die Referenzwerte je nach Eignung mehr oder weniger gut repräsentierenden Ersatzwerte.

Nach einer Genauigkeitsoptimierung werden daraus für unterschiedliche Querschnittstypen geeignete Ersatzmeßstellen oder Meßstellenkombinationen zusammengestellt.

Es ergeben sich gute Möglichkeiten, längsdehnungswirksame Überbau- oder Bauteiltemperaturen an Platten, Balken und Hohlkästen durch die Messung von Betonoberflächen- oder Lufttemperaturen an geeigneten Meßorten und in geeigneten Meßzeiträumen mit Genauigkeiten um  $s = 1\text{ °C}$  (Standardabweichung) – bei sehr dünnen Platten erheblich genauer – zu erfassen. Gleiches gilt für die Erfassung von Temperaturdifferenzen an Hohlkörpern, Bauteilen also, die von innen zu begehbar sind. Die Messung von Temperaturdifferenzen an massiven Platten hingegen läßt wegen der Wirkung des Fahrbahnbelages auf die Temperaturverteilung in den Platten bei der Anwendung lediglich zerstörungsfreier Meßmethoden keine zufriedenstellenden Genauigkeiten erwarten.

Ein Vergleich der Referenzwerte für die Temperaturdifferenzen mit der zeitweise gemessenen Globalstrahlung weist zwar eine deutliche Korrelation aus, schließt aber die Globalstrahlung als alleiniges Bestimmungselement für Temperaturdifferenzen wegen großer zu erwartender relativer Restfehler aus.

Den statistischen Auswertungen zum zweiten Berichtsteil liegt ein großer Teil der hier bereits erläuterten und genutzten Meßdaten zugrunde. Aus den Meßergebnissen an drei Brückenbauwerken mit massiven Überbauten (Platten/Plattenbalken) werden Maximalwert- und Minimalwertverteilungen abgeleitet, woraus sich die Grenzwerte für die untersuchten Objekte im jeweiligen Erfassungszeitraum ergeben.

Zur Abschätzung langfristig zu erwartender Extremwerte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wird zusätzlich auf Meßdaten des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen, die den Meteorologischen Jahrbüchern der Jahre 1946 bis 1992 für die Regionen Bonn, München, Berlin und Hamburg entnommen wurden. Die Extremwertbestimmung ergibt die folgende hiernach zu erwartende Spannweite von

– 28 °C < mittlere Betontemperatur < 40 °C.

## 5 Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.085 B 79 G Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken. 1. Zwischenbericht: Überbautemperaturen und -biegungen an der Rheinbrücke Köln-Deutz (Band 1: Text, Band 2: Anlagen) Bergisch Gladbach, Oktober 1983
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.085 B 79 G Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken. 2. Zwischenbericht: Wärmedehnungen des Überbaus der Rheinbrücke Köln-Deutz, Bergisch Gladbach, Januar 1985
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.085 B 79 G Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken. 3. Zwischenbericht: Temperaturmessungen bei Gußasphalteinbau auf Schweißbahnen, Bergisch Gladbach, August 1987
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.085 B 79 G Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken. 4. Zwischenbericht: Temperaturmessungen bei Einbau von Asphaltbeton auf Schweißbahnen, Bergisch Gladbach, Dezember 1989
- [5] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.136 B 84 G Messung von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken. 1. Zwischenbericht: Meßsysteme, Voruntersuchungen, Bergisch Gladbach, Januar 1986
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.136 B 84 G Messung von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken. 2. Zwischenbericht: Meßergebnisse, Bergisch Gladbach, November 1987
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.019 B 74 G Untersuchungen über das Temperatur- und Verformungsverhalten hoher Brückenpfeiler. 1. Zwischenbericht: Meßbericht, Köln, Mai 1979
- [8] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.019 B 74 G Untersuchungen über das Temperatur- und Verformungsverhalten hoher Brückenpfeiler. 2. Zwischenbericht: Verformungen unter Überbaueinwirkung Köln, August 1982
- [9] Bundesanstalt für Straßenwesen. FA 15.019 B 74 G Untersuchungen über das Temperatur- und Verformungsverhalten hoher Brückenpfeiler. 3. Zwischenbericht: Repräsentativtemperaturen eines Pfeilers der Ahrtalbrücke bei Bad Neuenahr, Bergisch Gladbach, April 1986
- [10] Deutscher Wetterdienst. Meteorologische Jahrbücher für die Besatzungszonen und für die Bundesrepublik Deutschland 1946 bis 1991.

## 6 Anlagen

### Repräsentativtemperaturen

#### Bauwerk Eifeltor:

- 1 bis 3 Bauwerksübersicht (aus [3])
- 3 Meßstellenanordnung (aus [3])
- Verlaufskurven der Standardabweichungen:
- 4 Plattentemperatur TR1
- 5 Plattentemperatur TR2
- 6 Temperaturdifferenz Platte DT1
- 7 Temperaturdifferenz Platte DT2

#### Bauwerk Dürener Straße

- 8 bis 10 Bauwerksübersicht (aus [3])
- 10 Meßstellenanordnung (aus [3])
- Verlaufskurven der Standardabweichungen:
- 11 Plattentemperatur TR1
- 12 Plattentemperatur TR2
- 13 Balkentemperatur TR3
- 14 Balkentemperatur TR4
- 15 Querschnittstemperatur TR1
- 16 Querschnittstemperatur TR2
- 17 Querschnittstemperatur TR3
- 18 Querschnittstemperatur TR4
- 19 Temperaturdifferenz Platte DT1
- 20 Temperaturdifferenz Platte DT2
- 21 Temperaturdifferenz Balken DT1
- 22 Temperaturdifferenz Balken DT2

#### Bauwerke 18 und 19 Kreuztal

- 23 bis 28 Bauwerksübersichten (aus [3])
- 25 und 28 Anordnung der Meßorte (aus [3])
- Verlaufskurven der Standardabweichungen BW 18:
- 29 Plattentemperatur TR1
- 30 Plattentemperatur TR2
- 31 Temperaturdifferenz Platte DT1
- 32 Temperaturdifferenz Platte DT2
- 33 Regression Globalstrahlung / DT Platte
- Verlaufskurven der Standardabweichungen BW 18:
- 34 Plattentemperatur TR1
- 35 Plattentemperatur TR2
- 36 Temperaturdifferenz Platte DT1
- 37 Temperaturdifferenz Platte DT2
- 38 Regression Globalstrahlung / DT Platte

#### Rheinbrücke Köln-Deutz

- 39 und 40 Bauwerks- und Meßstellenübersichten (aus [1])
- Verlaufskurven der Standardabweichungen
- 41 Überbautemperatur TR1

- 42 Überbautemperatur TR2
- 43 Temperaturdifferenzen Deck-/Bodenplatte DTR1
- 44 Temperaturdifferenzen Deck-/Bodenplatte DTR2

#### Brohltalbrücke

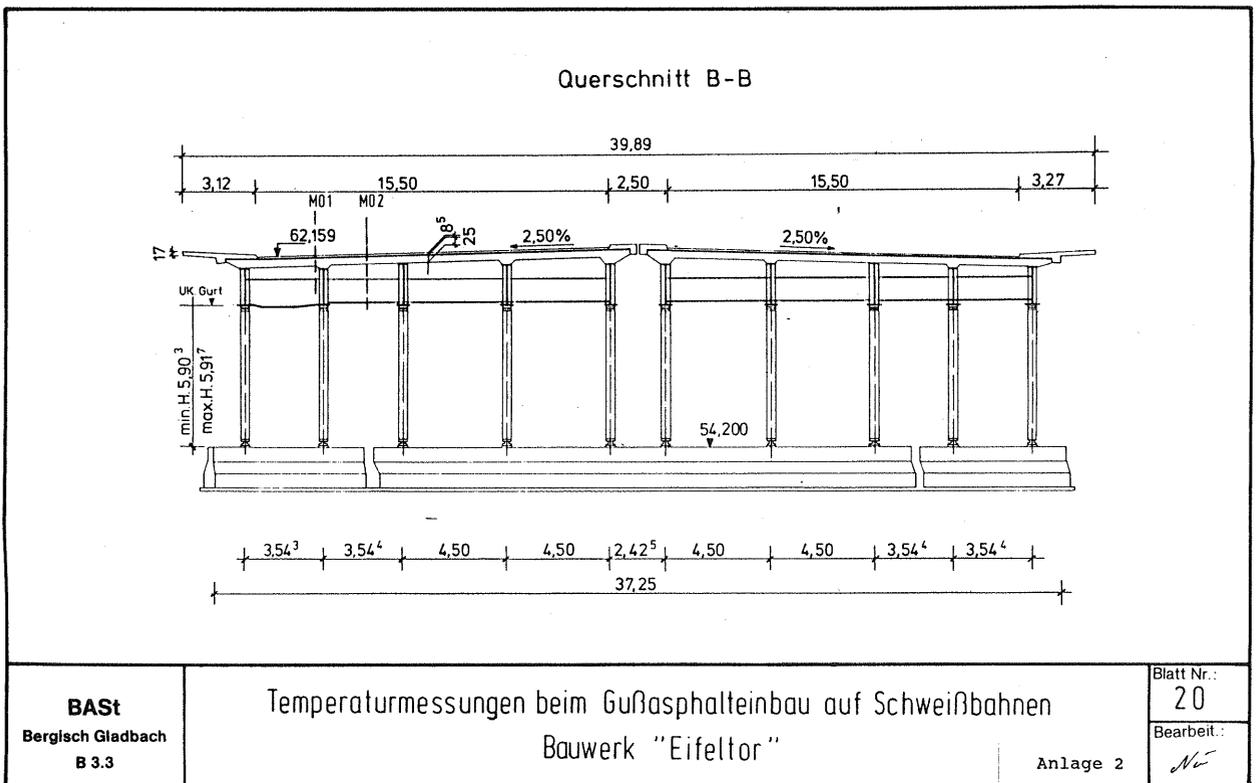
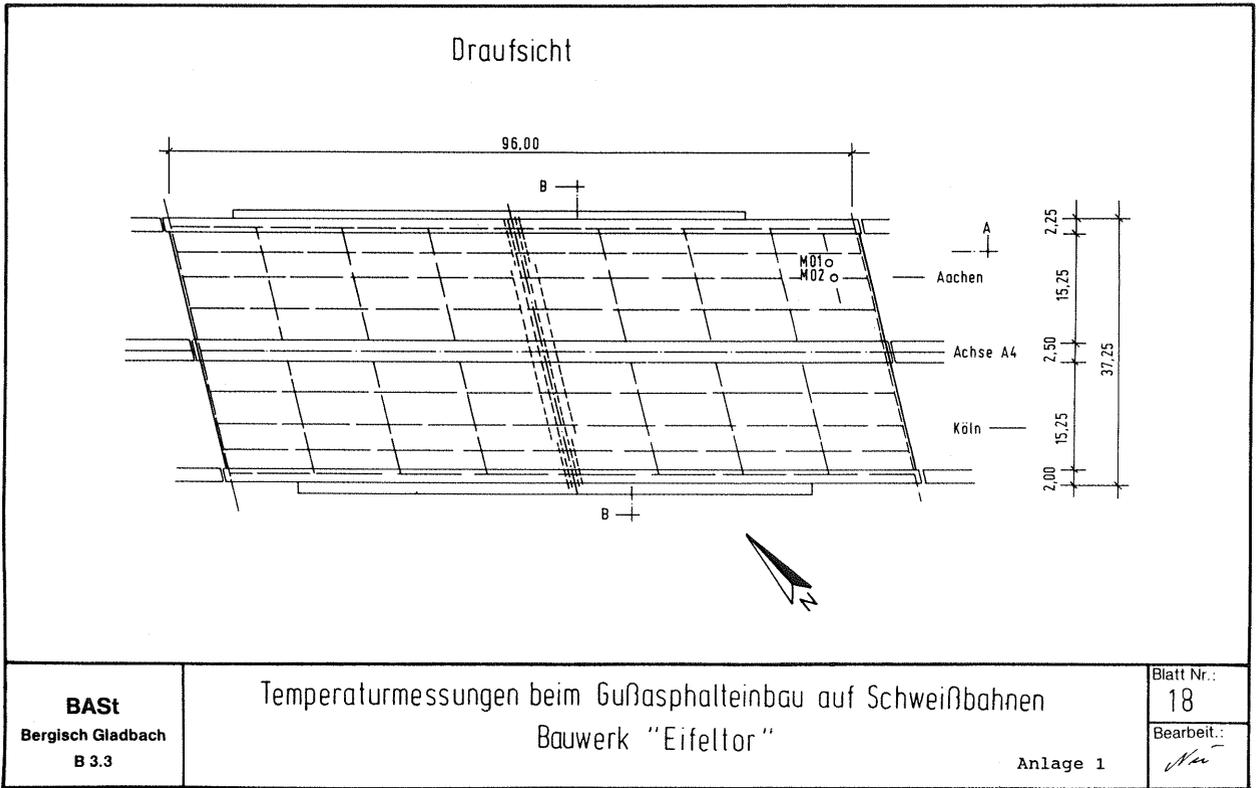
- 45 bis 47 Bauwerk- und Meßstellenübersichten (aus [5])
- Verlaufskurven der Standardabweichungen
- 48 Überbautemperatur TR1
- 49 Überbautemperatur TR2
- 50 Temperaturdifferenzen Deck-/Bodenplatte DTR1
- 51 Temperaturdifferenzen Deck-/Bodenplatte DTR2
- 52 Korrelation zwischen Luftinnen- und Überbautemperatur (aus [6])

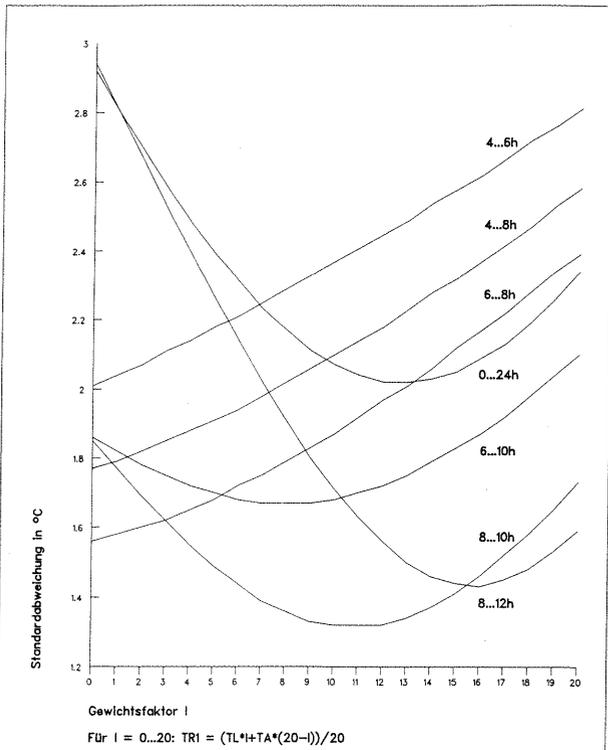
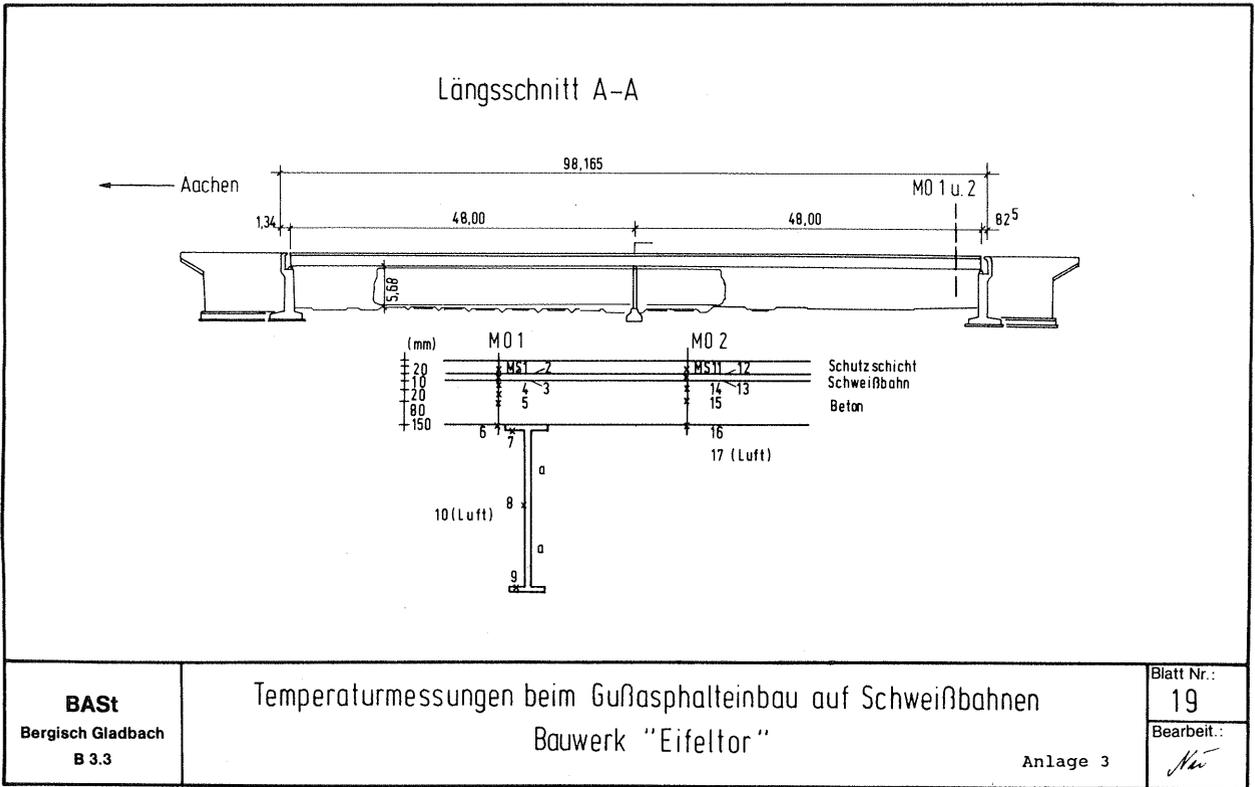
#### Ahrtalbrücke

- 53 bis 55 Bauwerk- und Meßstellenübersichten (aus [5])

### Grenztemperaturen

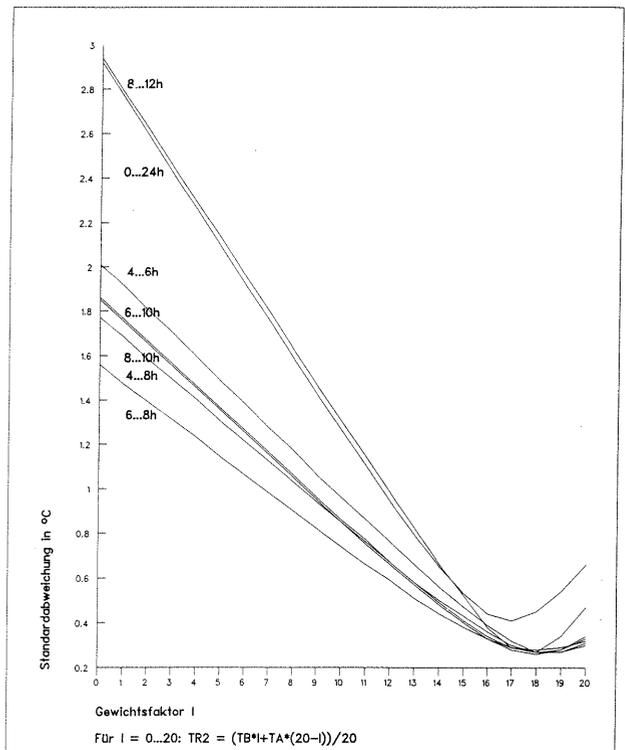
- 56 bis 61 Klassierungsergebnisse der Tagesextrema
- 62 Gesamtverteilung der Tagesextrema
- 63 Statistische Sicherheiten der Betontemperaturen
- 64 Statistische Sicherheiten der Lufttemperaturen
- 65 bis 68 Jahrestremwerte der Lufttemperaturen in: Bonn, München, Berlin und Hamburg





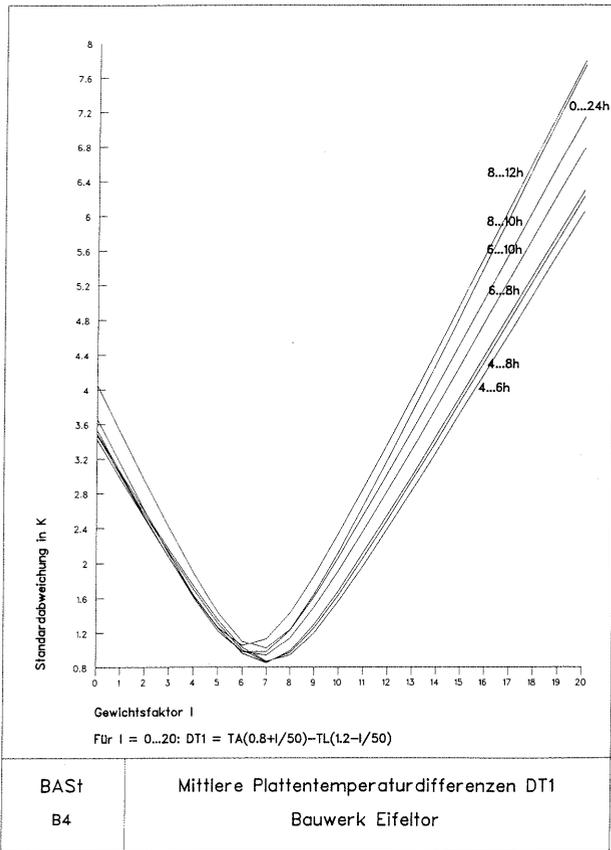
BAST	Mittlere Plattentemperatur TR1
B4	Bauwerk Eifeltor

Anlage 4

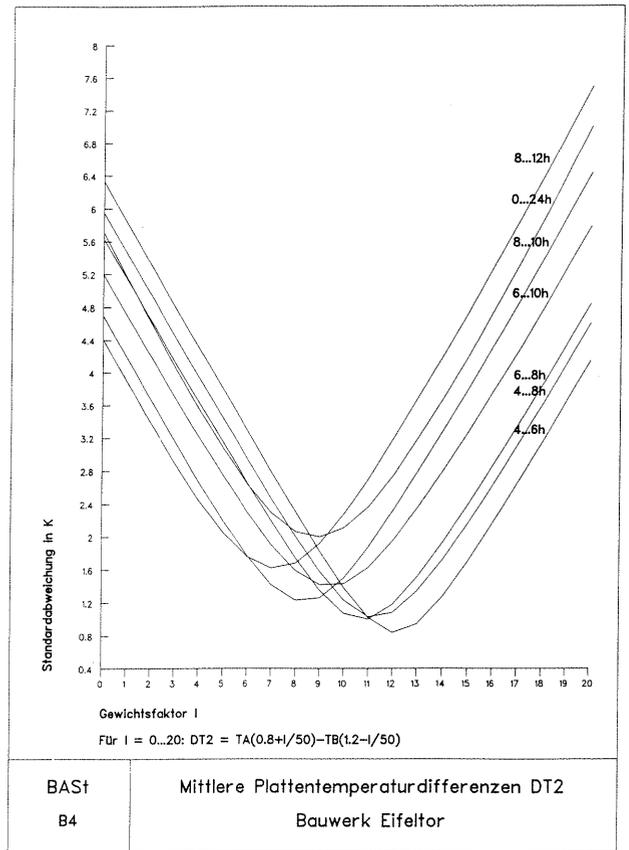


BAST	Mittlere Plattentemperatur TR2
B4	Bauwerk Eifeltor

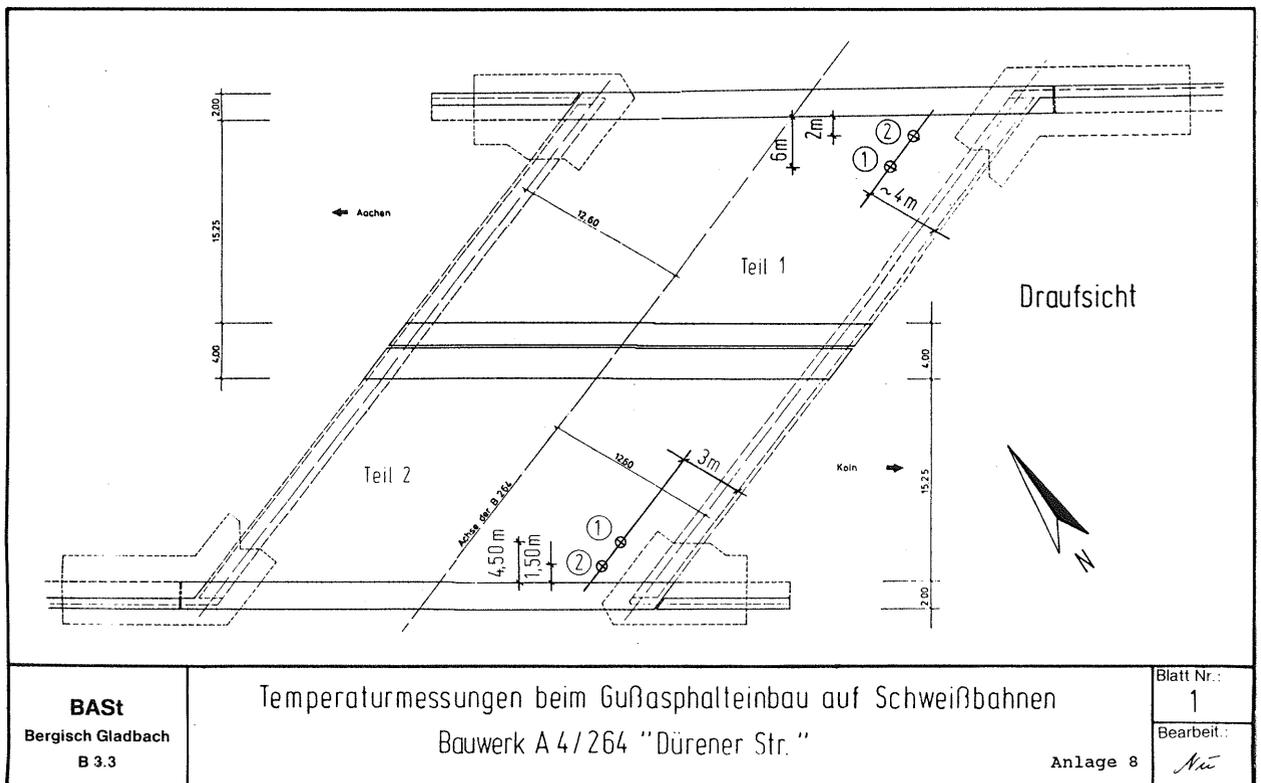
Anlage 5

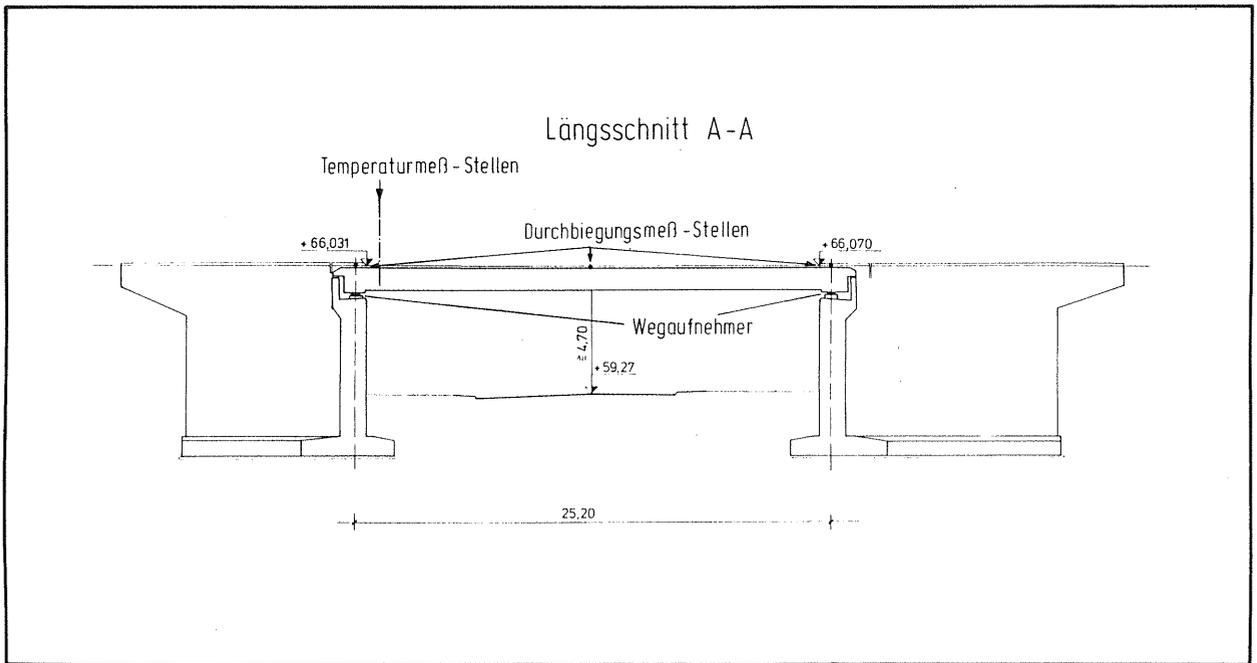


Anlage 6

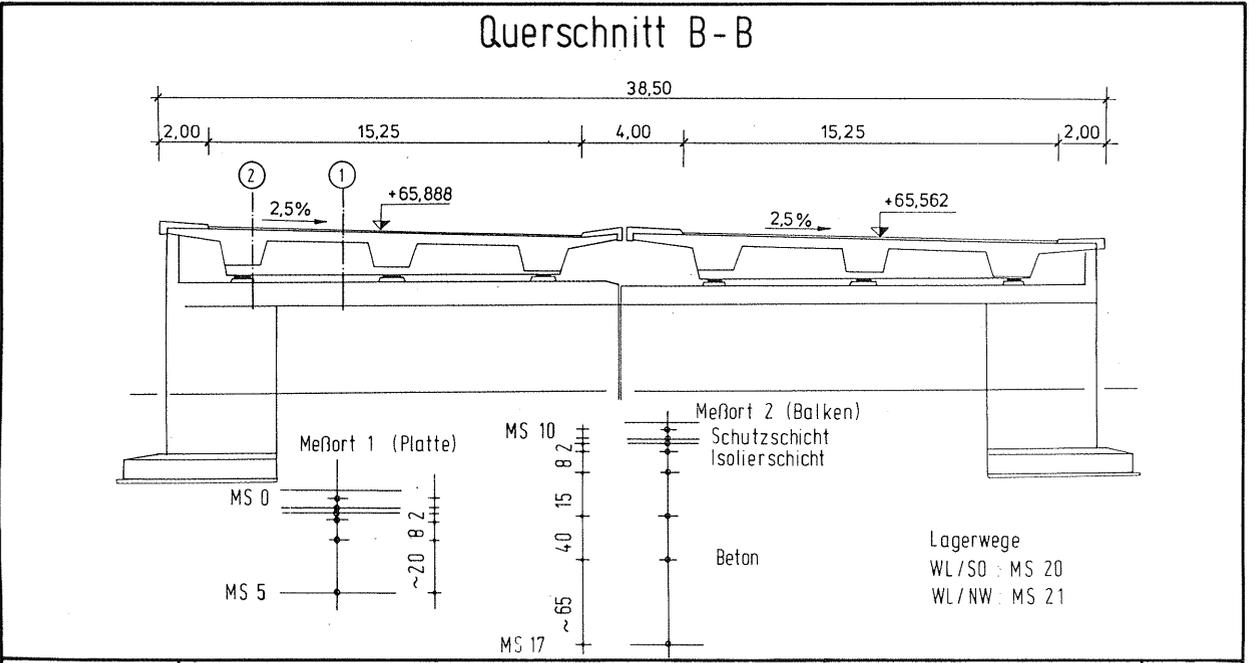


Anlage 7

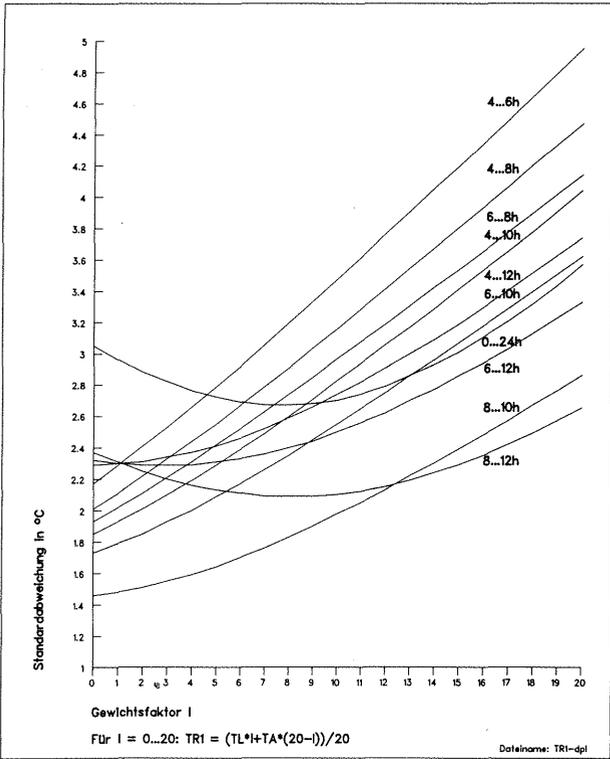




<b>BAST</b> Bergisch Gladbach B 3.3	Temperaturmessungen beim Gußasphalteinbau auf Schweißbahnen Bauwerk A 4/264 "Dürener Str."	Blatt Nr.: 2
		Bearbeit.: <i>Mu</i>



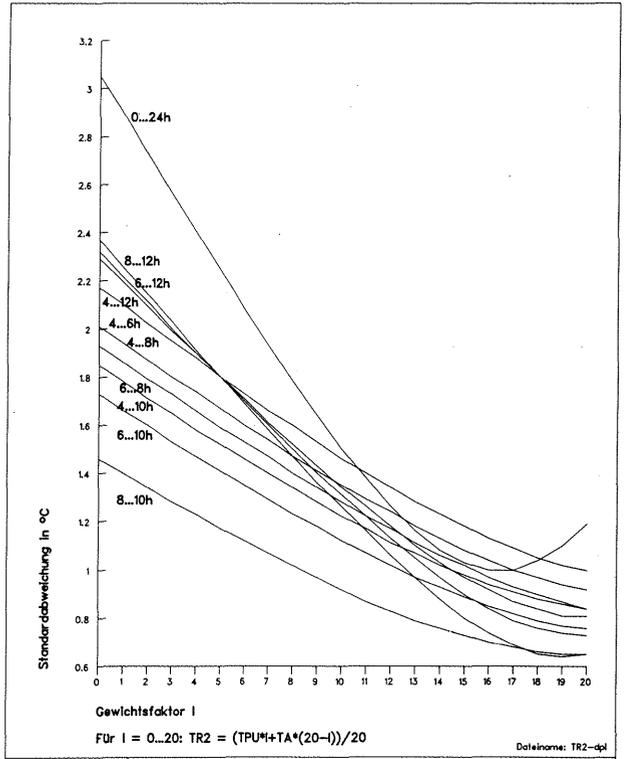
<b>BAST</b> Bergisch Gladbach B 3.3	Temperaturmessungen beim Gußasphalteinbau auf Schweißbahnen Bauwerk A 4/264 "Dürener Str."	Blatt Nr.: 3
		Bearbeit.: <i>Mu</i>



BAST  
B4

Mittlere Plattentemperatur TR1  
Bauwerk Duerener Strasse

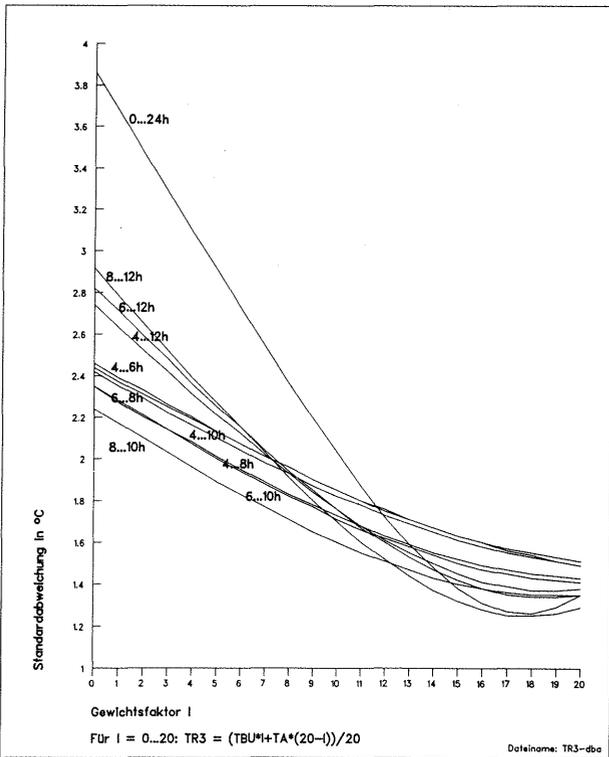
Anlage 11



BAST  
B4

Mittlere Plattentemperatur TR2  
Bauwerk Duerener Strasse

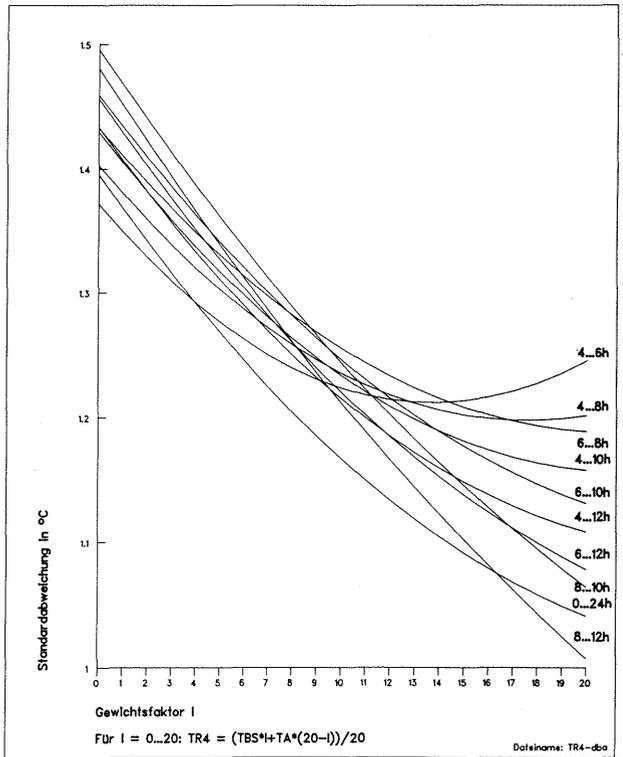
Anlage 12



BAST  
B4

Mittlere Balkentemperatur TR3  
Bauwerk Duerener Strasse

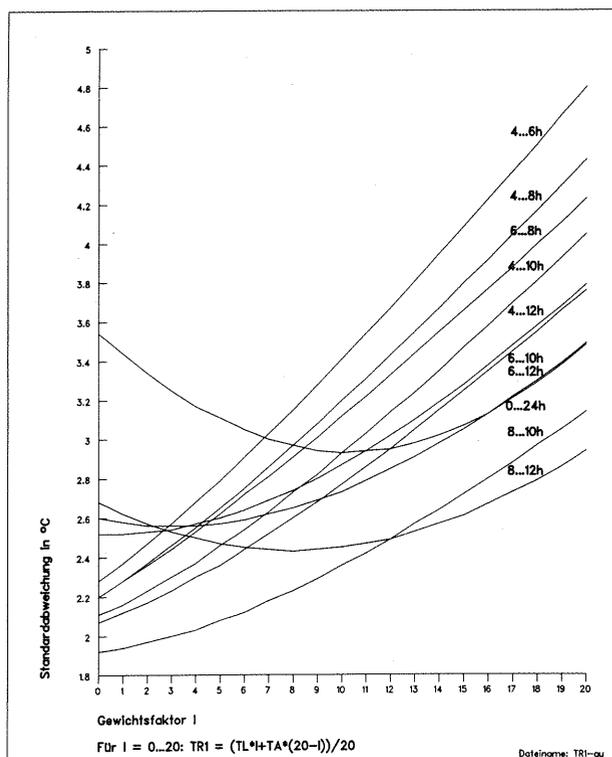
Anlage 13



BAST  
B4

Mittlere Balkentemperatur TR4  
Bauwerk Duerener Strasse

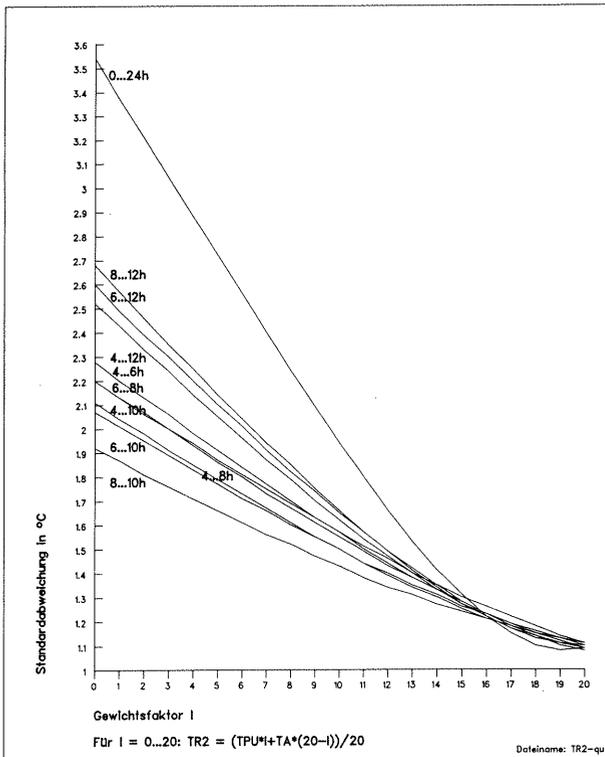
Anlage 14



BASf  
B4

Mittlere Querschnittstemperatur TR1  
Bauwerk Duerener Strasse

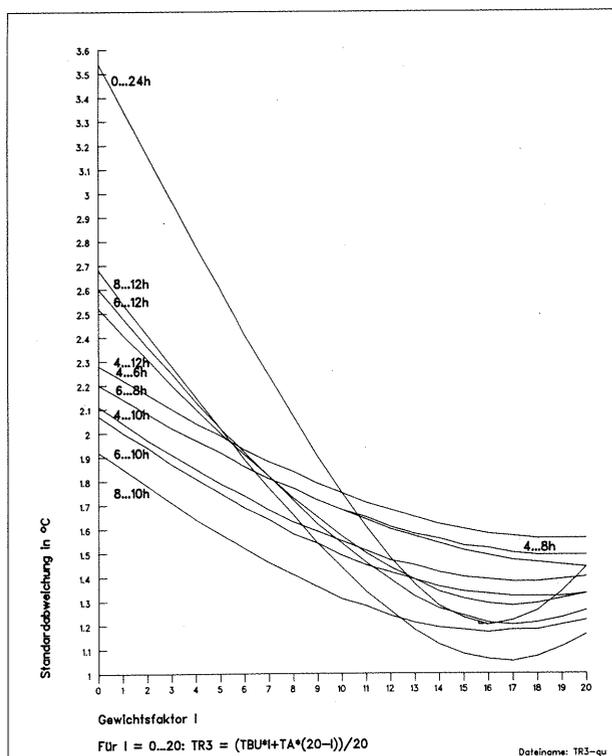
Anlage 15



BASf  
B4

Mittlere Querschnittstemperatur TR2  
Bauwerk Duerener Strasse

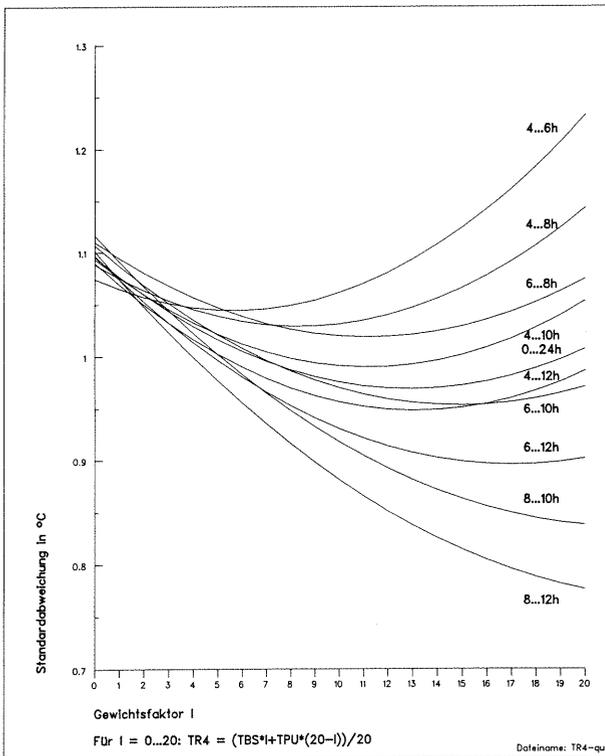
Anlage 16



BASf  
B4

Mittlere Querschnittstemperatur TR3  
Bauwerk Duerener Strasse

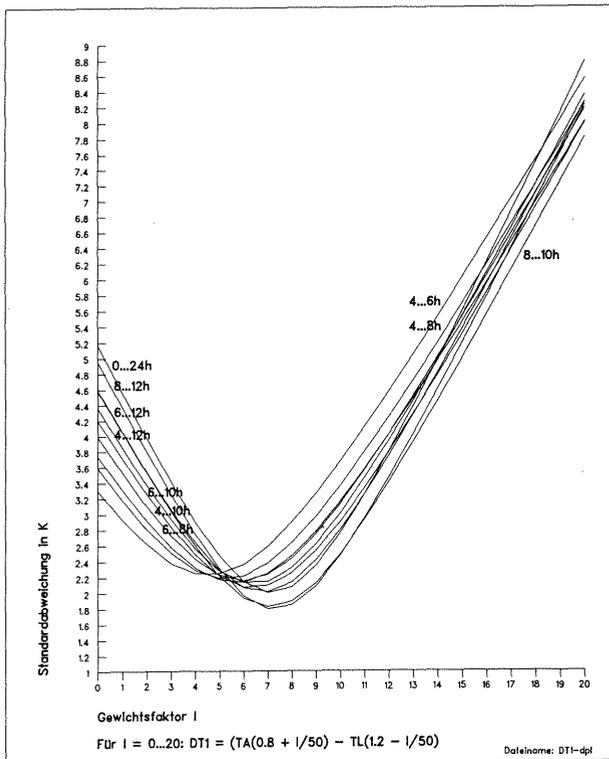
Anlage 17



BASf  
B4

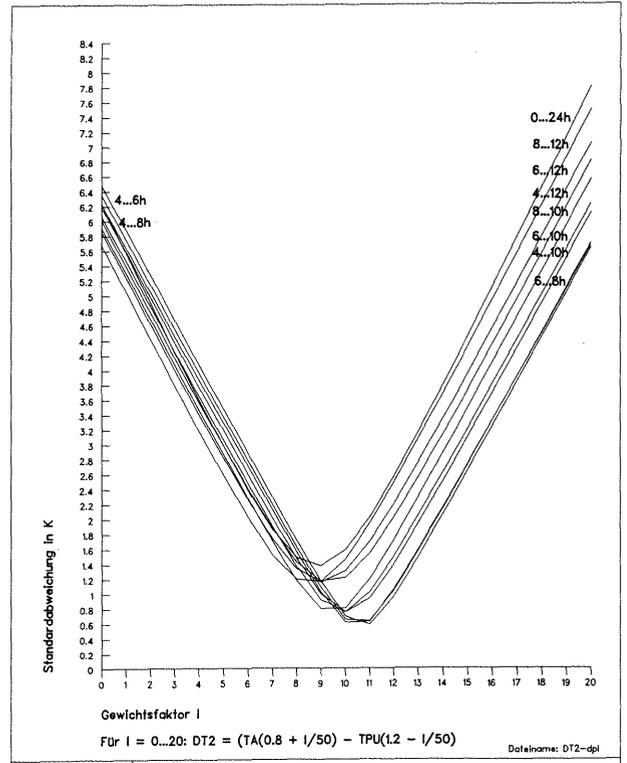
Mittlere Querschnittstemperatur TR4  
Bauwerk Duerener Strasse

Anlage 18



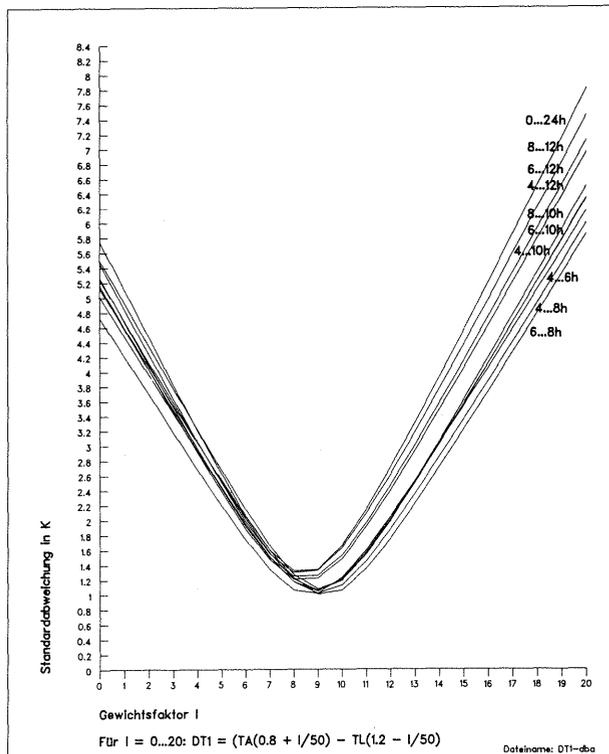
BAST	Repräsentative Temperaturdifferenzen DT1
B4	Betonplatte Bauwerk Duerener Strasse

Anlage 19



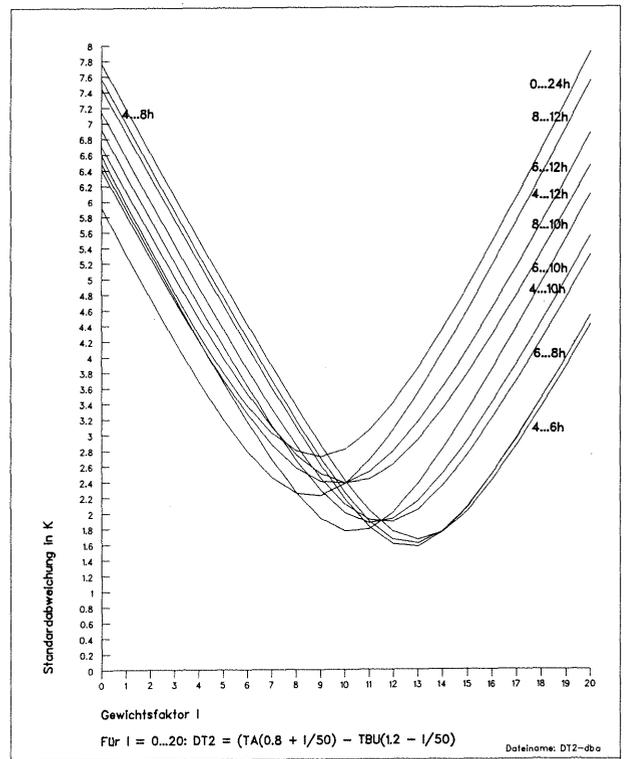
BAST	Repräsentative Temperaturdifferenzen DT2
B4	Betonplatte Bauwerk Duerener Strasse

Anlage 20



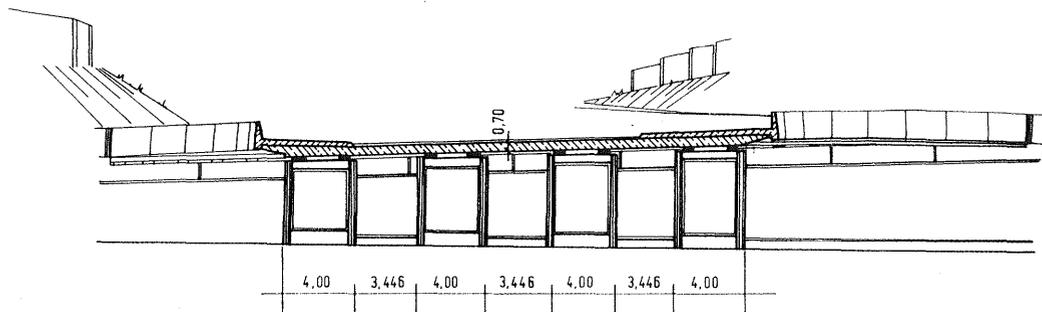
BAST	Repräsentative Temperaturdifferenzen DT1
B4	Betonbalken Bauwerk Duerener Strasse

Anlage 21



BAST	Repräsentative Temperaturdifferenzen DT2
B4	Betonbalken Bauwerk Duerener Strasse

Anlage 22



Querschnitt Schnitt A-A  
Bauwerk 18 Kreuztal

M 1:250

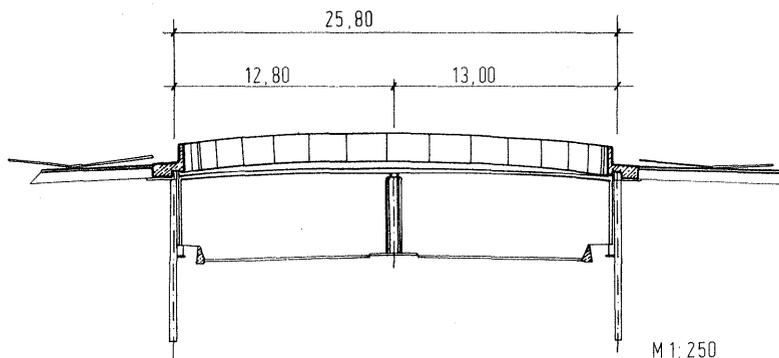
**BAST**  
Bergisch Gladbach  
B 3.3

Temperaturmessungen beim Gußasphalteinbau auf Schweißbahnen  
Bauwerk BW 18 "Kreuztal"

Anlage 23

Blatt Nr.:  
50

Bearbeit.:  
*[Signature]*



Ansicht von Norden  
Bauwerk 18 Kreuztal

M 1:250

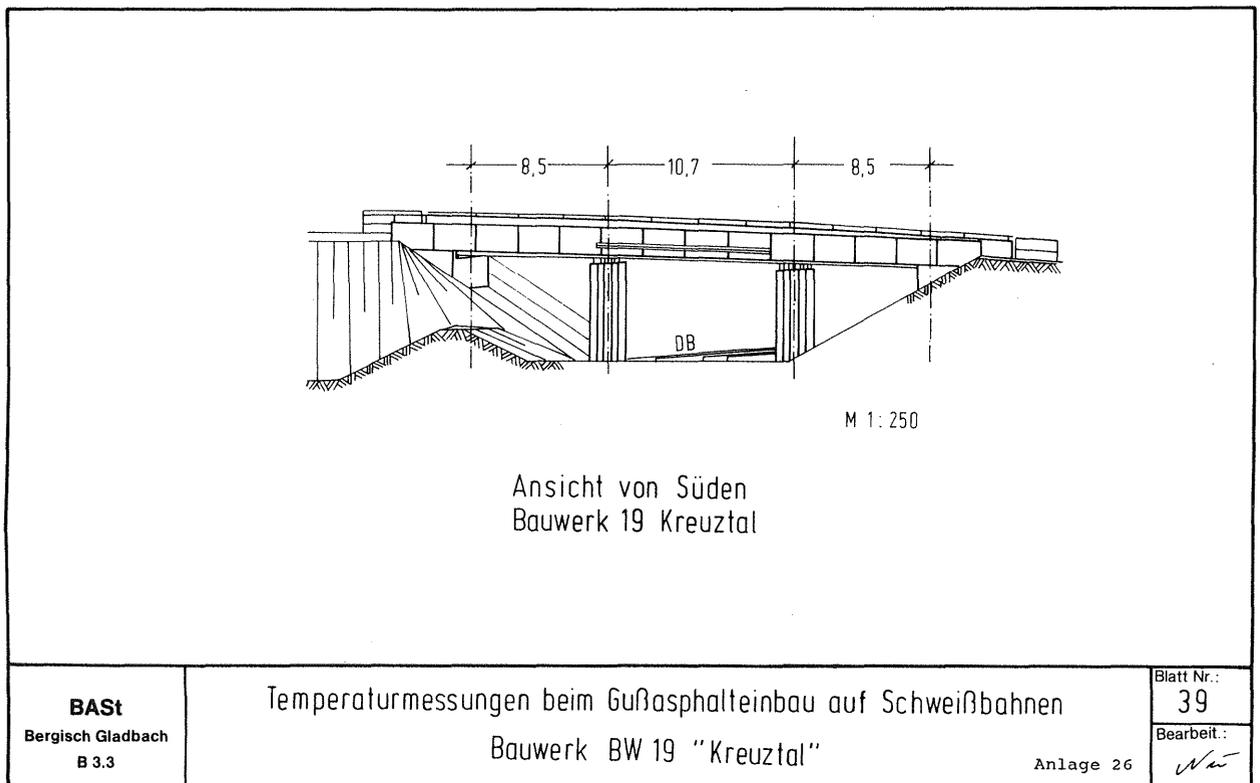
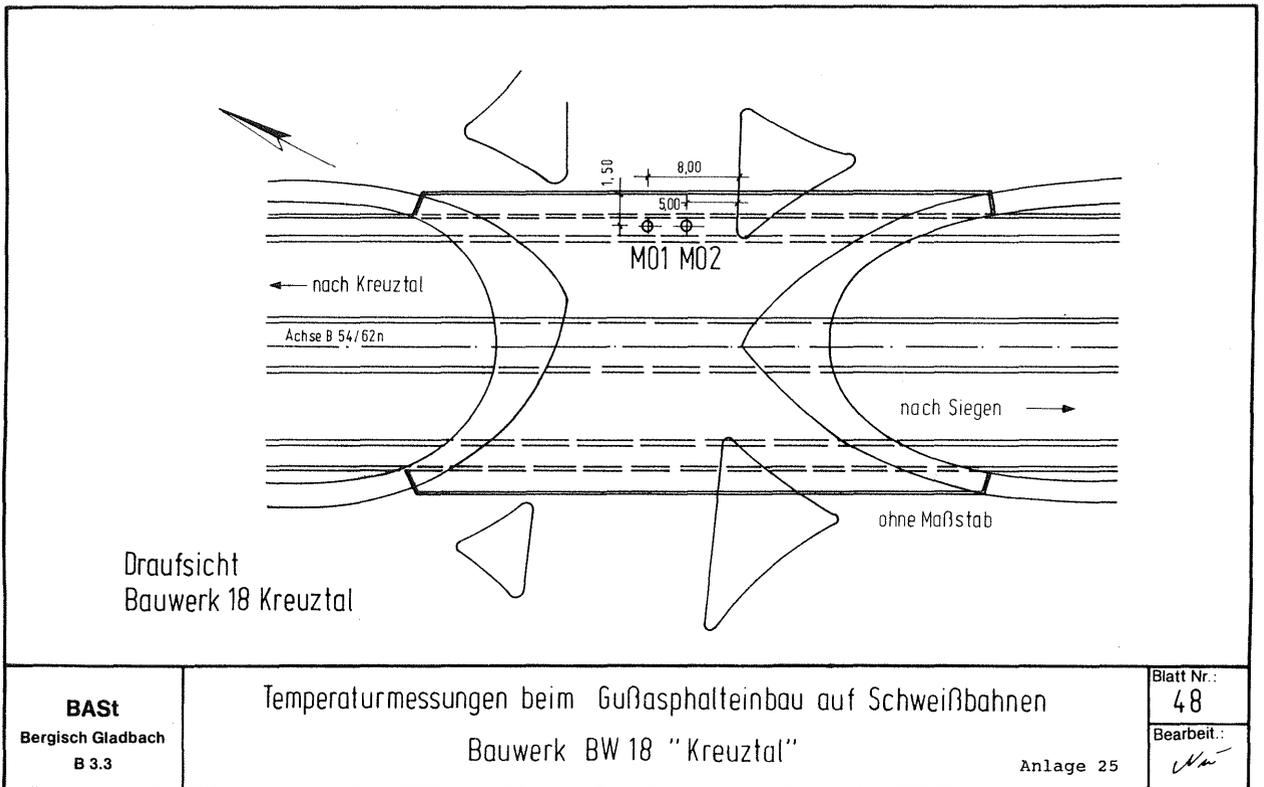
**BAST**  
Bergisch Gladbach  
B 3.3

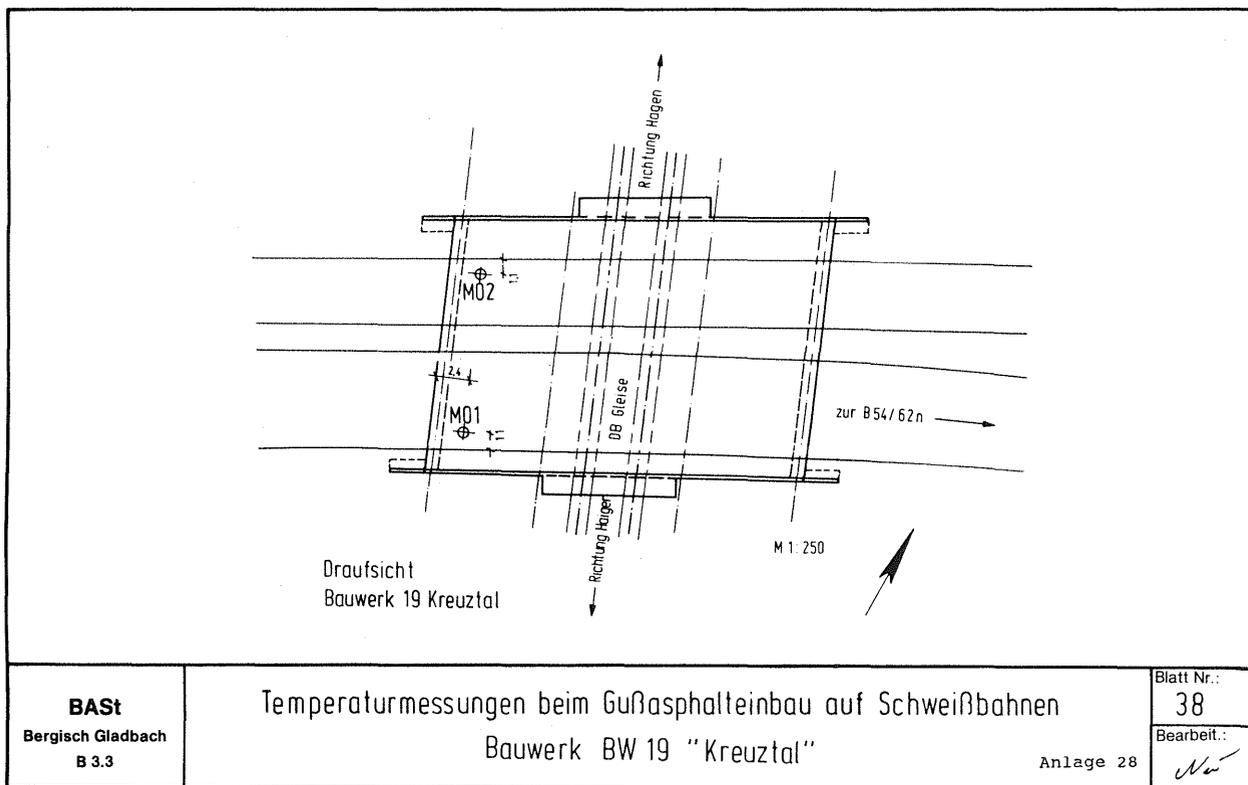
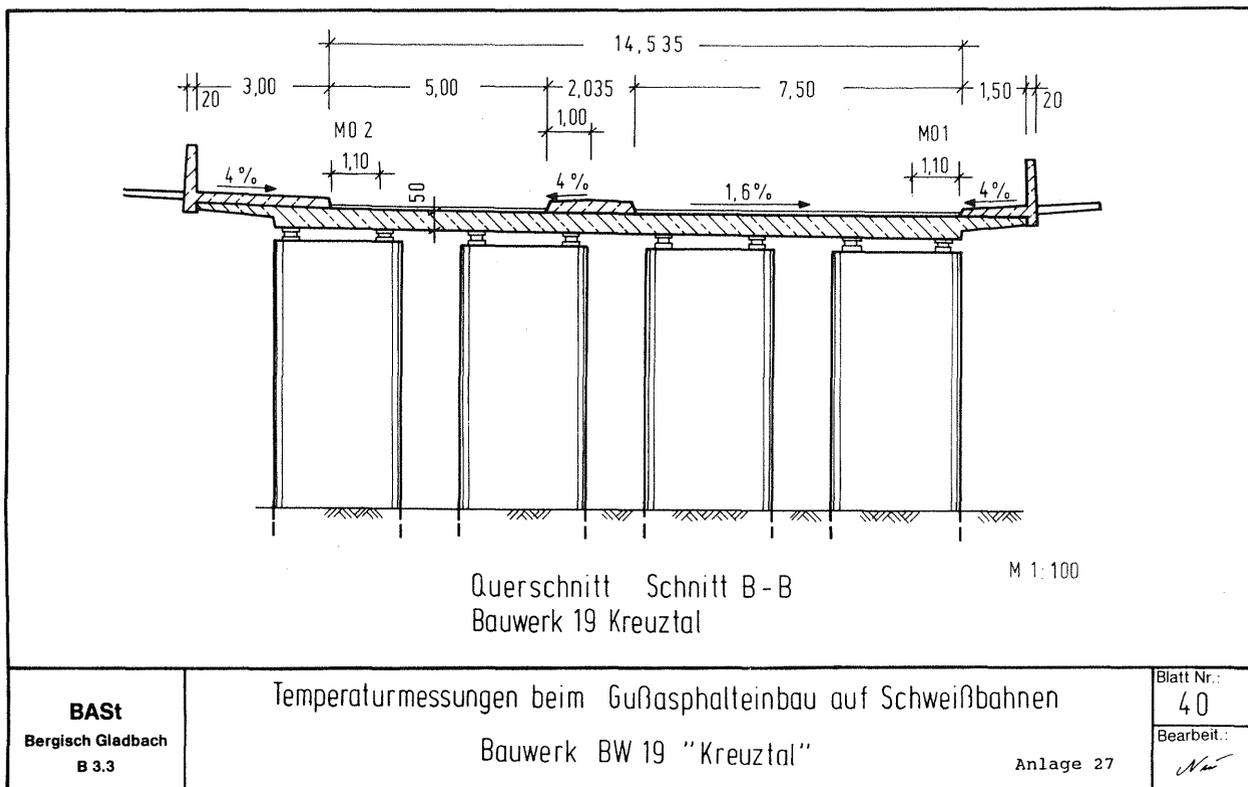
Temperaturmessungen beim Gußasphalteinbau auf Schweißbahnen  
Bauwerk BW 18 "Kreuztal"

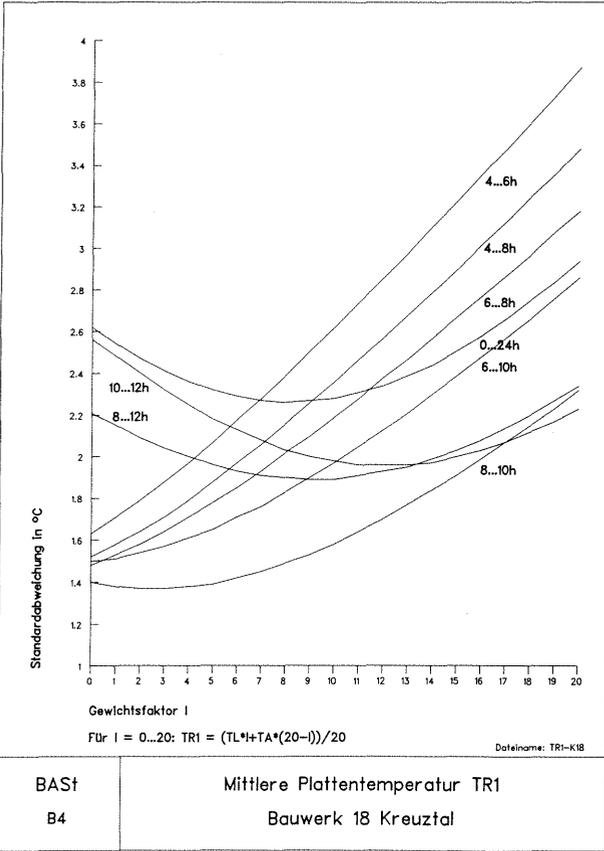
Anlage 24

Blatt Nr.:  
49

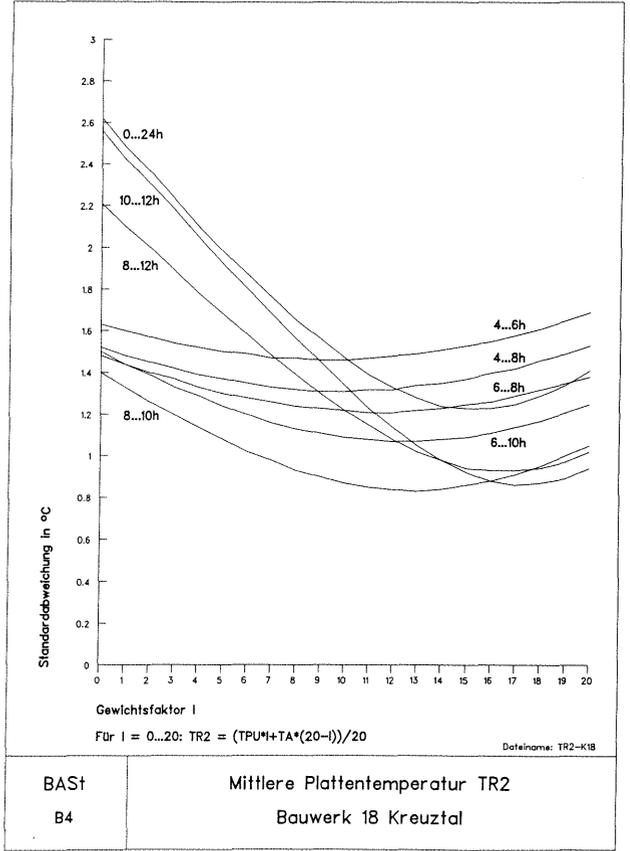
Bearbeit.:  
*[Signature]*



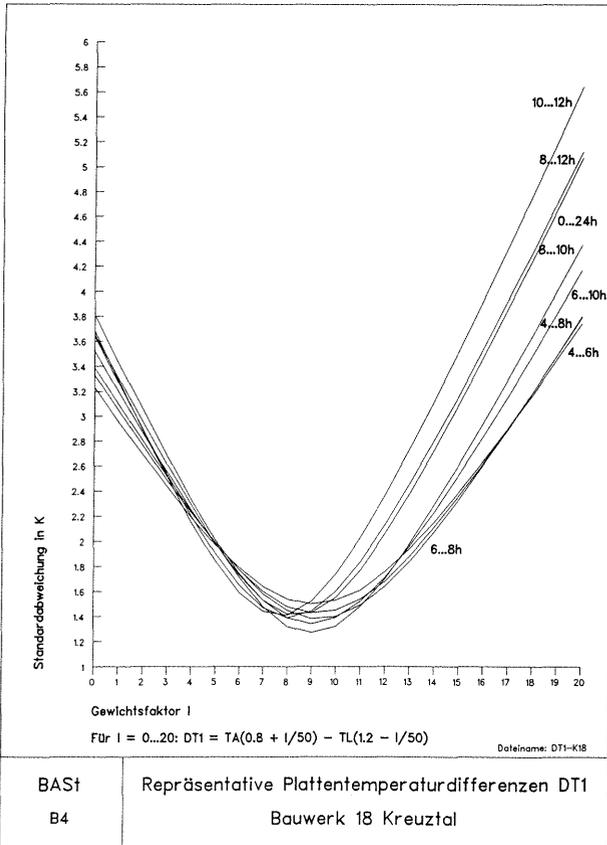




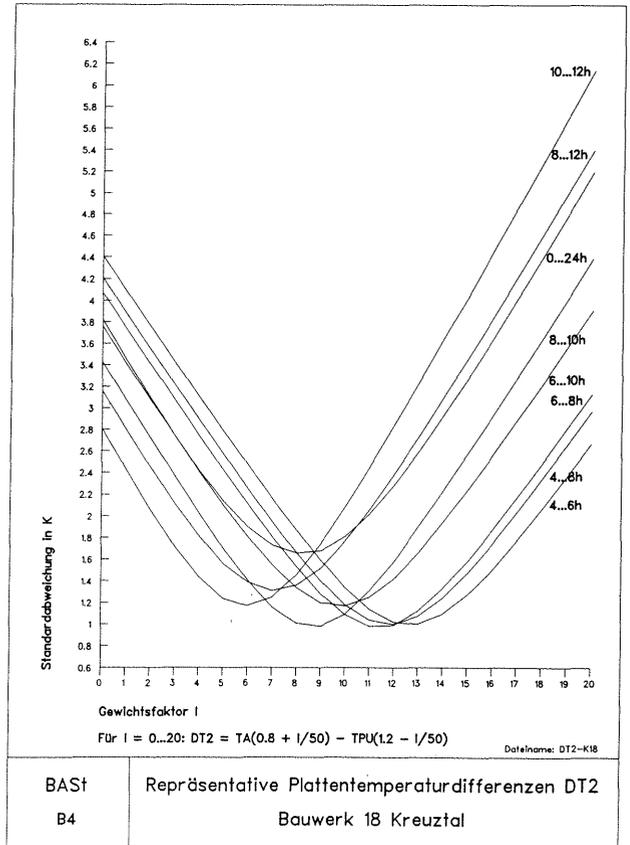
Anlage 29



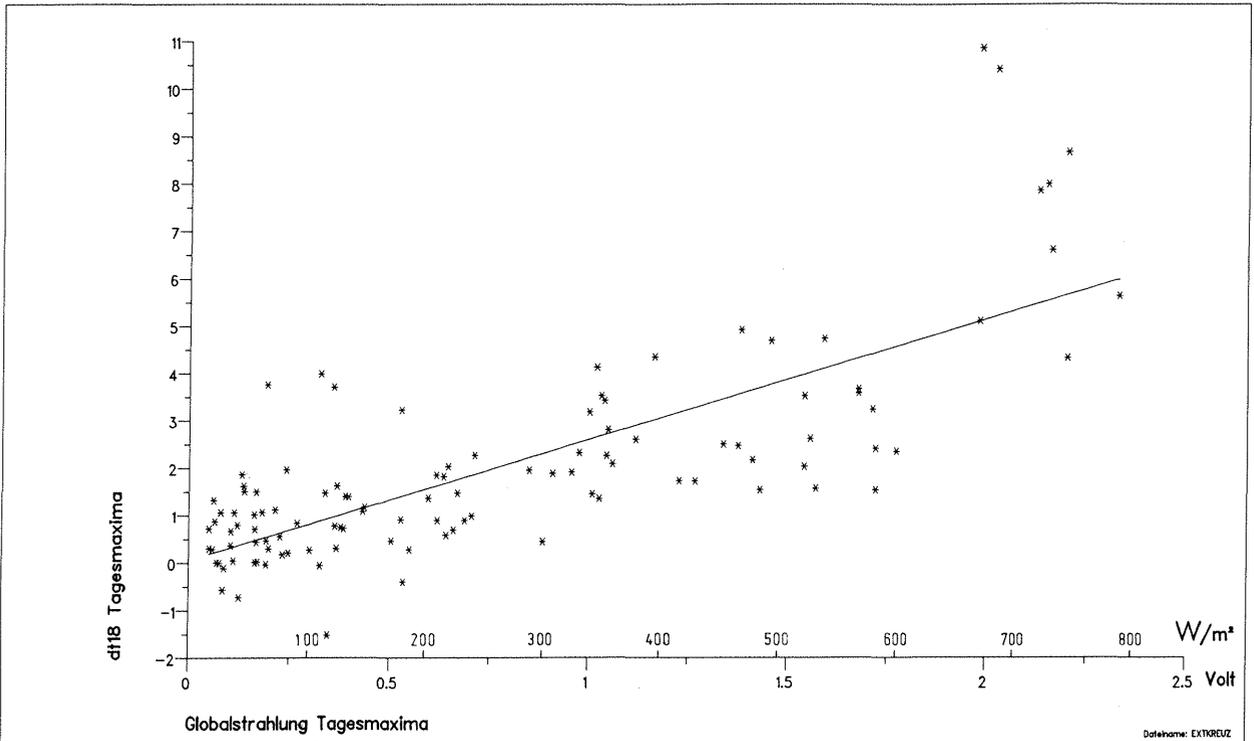
Anlage 30



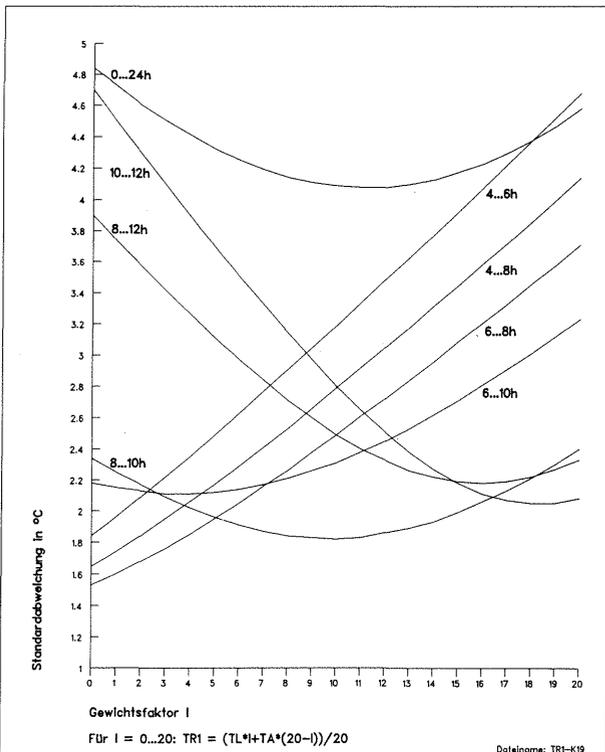
Anlage 31



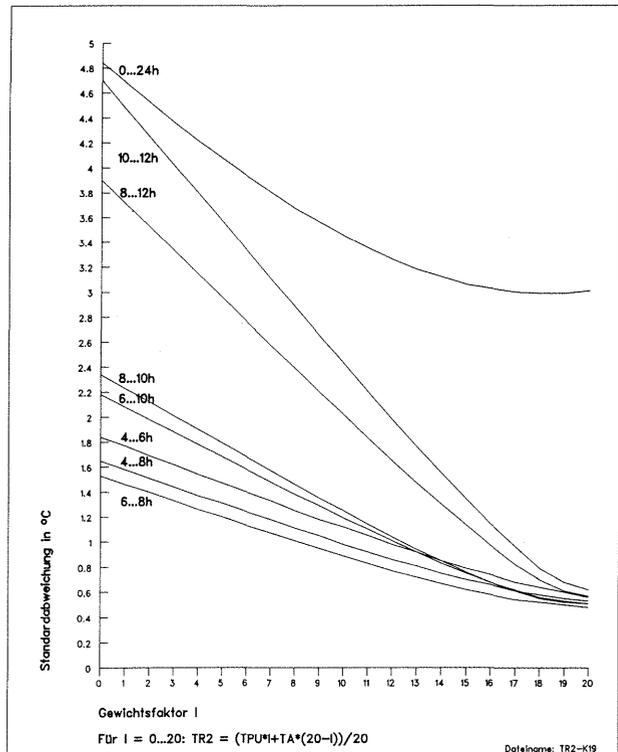
Anlage 32



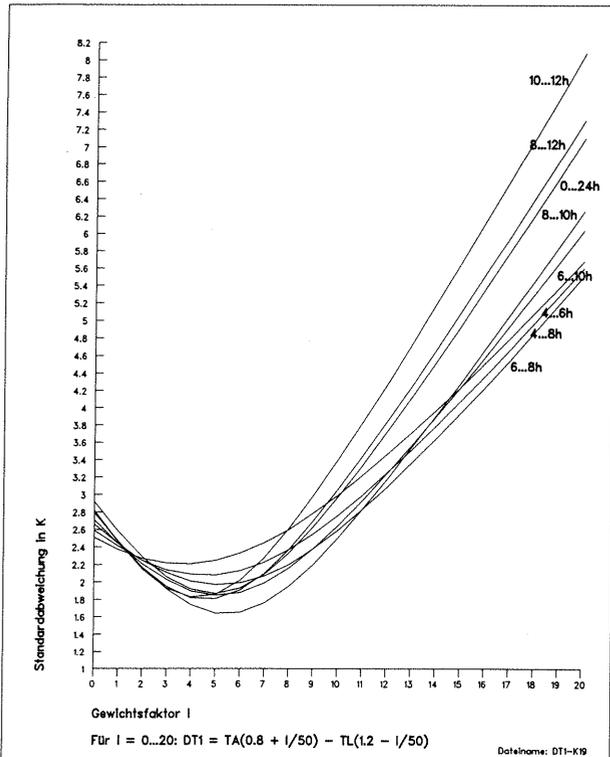
<b>BAS†</b> B4	<b>Regression Globalstrahlung/dt Betonplatte          Kreuztal BW 18</b>	Anlage 33
-------------------	--	-----------



<b>BAS†</b> B4	<b>Mittlere Plattentemperatur TR1          Bauwerk 19 Kreuztal</b>
-------------------	--



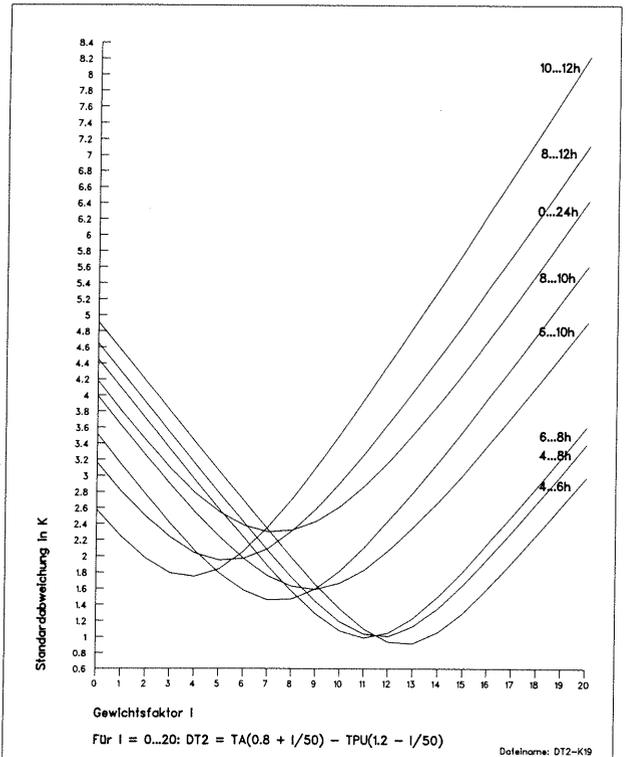
<b>BAS†</b> B4	<b>Mittlere Plattentemperatur TR2          Bauwerk 19 Kreuztal</b>
-------------------	--



BAST  
B4

Repräsentative Plattentemperaturdifferenzen DT1  
Bauwerk 19 Kreuztal

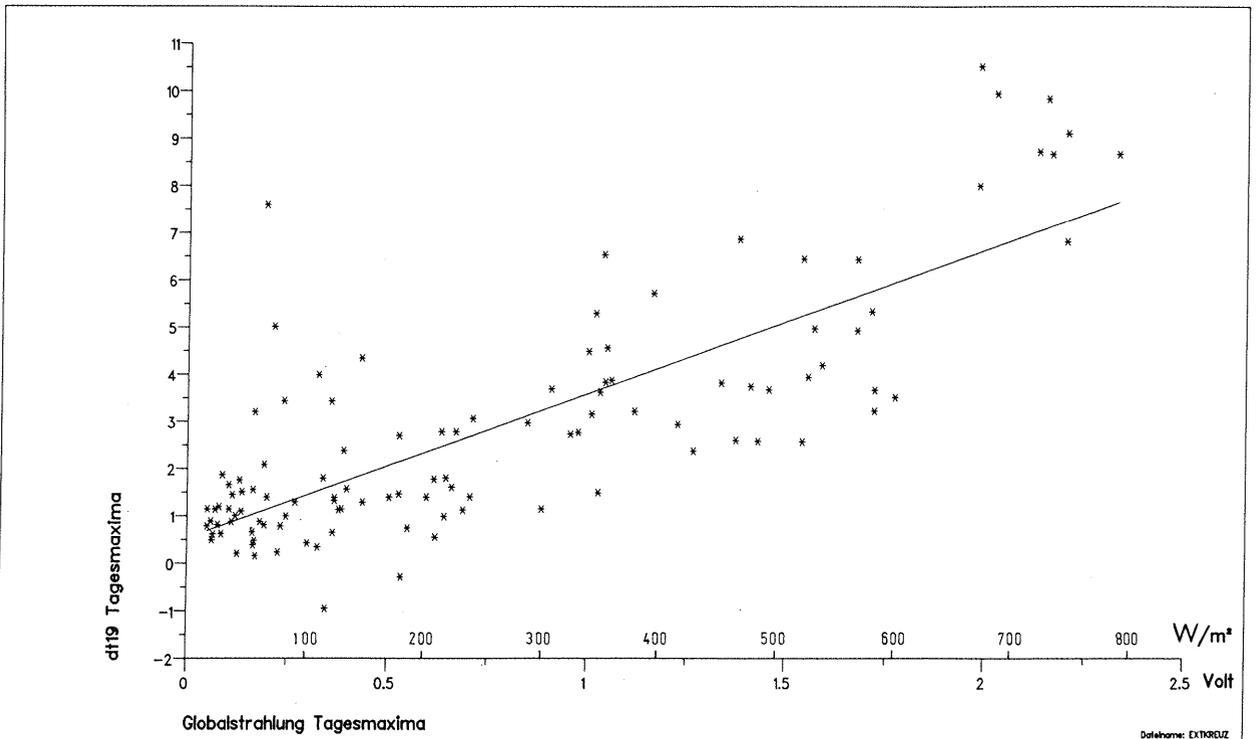
Anlage 36



BAST  
B4

Repräsentative Plattentemperaturdifferenzen DT2  
Bauwerk 19 Kreuztal

Anlage 37

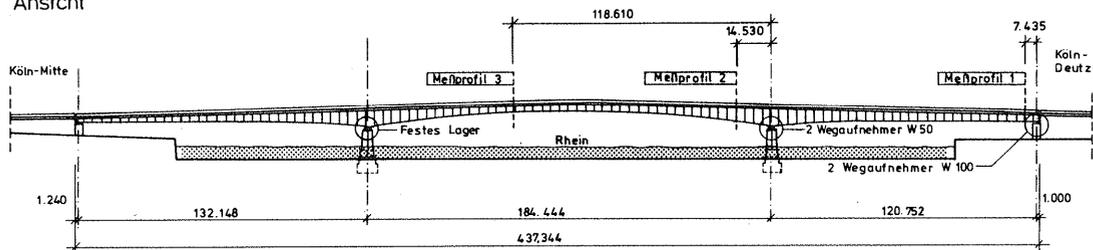


BAST  
B4

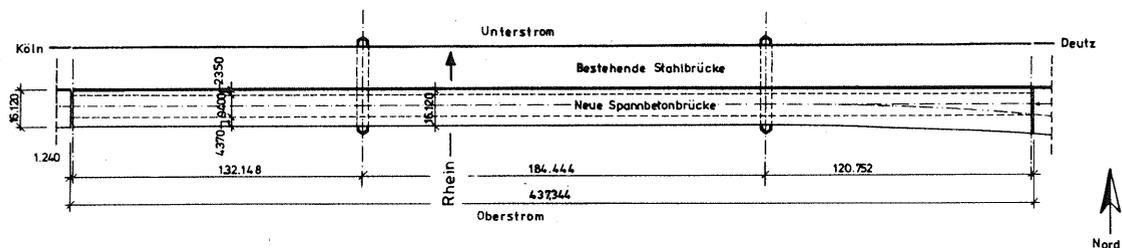
Regression Globalstrahlung/dt Betonplatte  
Kreuztal BW 19

Anlage 38

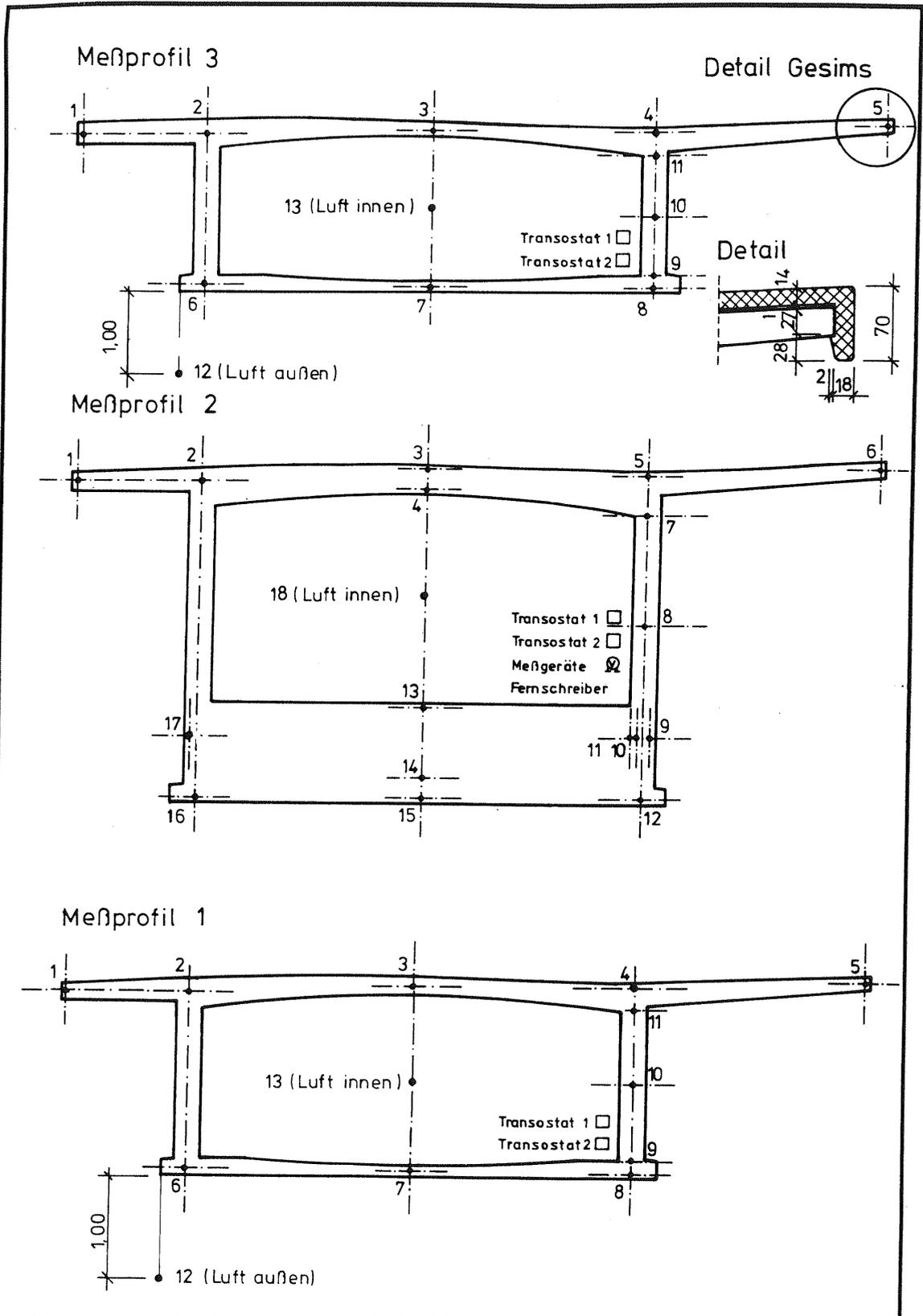
Ansicht



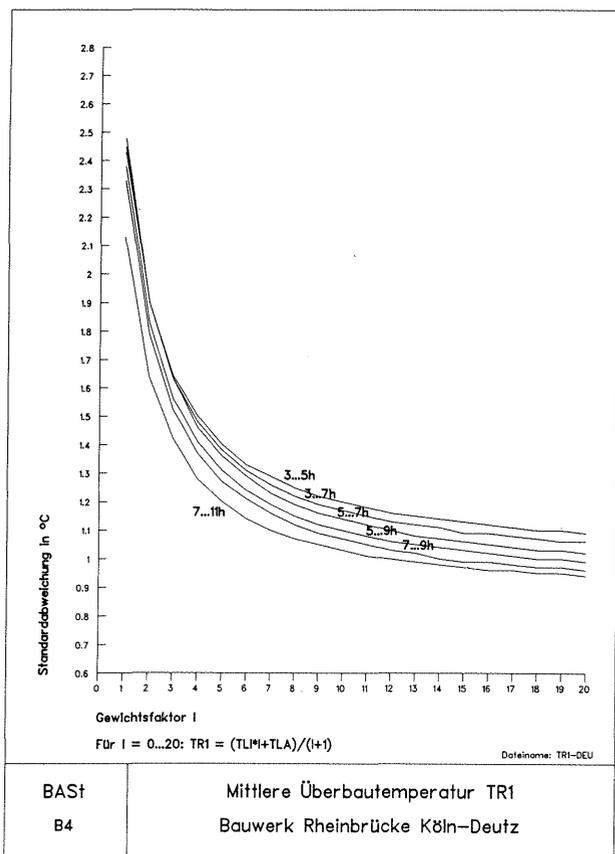
Draufsicht



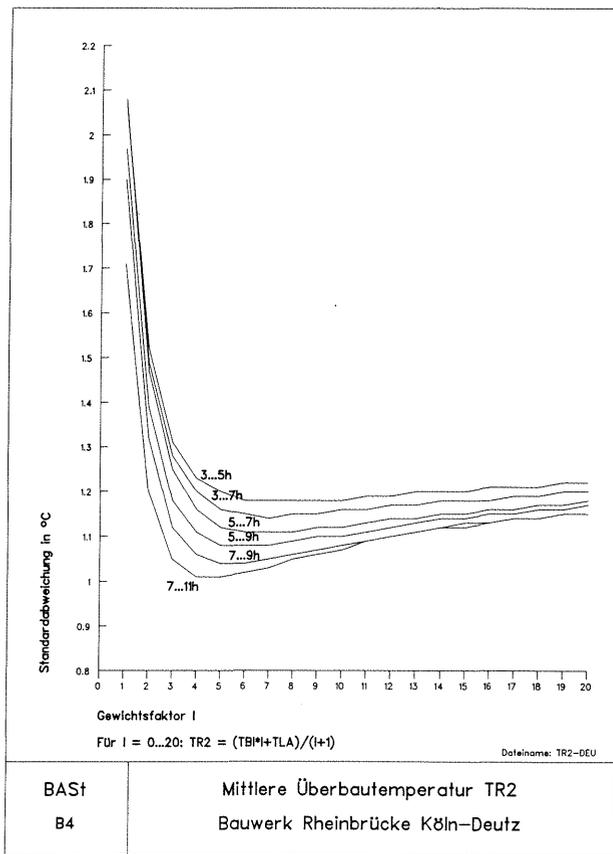
Auftrag/Vorgang : Temperatur- und Verformungsmessungen an der Rheinbrücke Köln-Deutz		Bezeichnung : Anordnung der Temperaturmeßprofile und der Wegaufnehmer Anlage 39	
BAST, Bergisch-Gladbach B 3.3	F.A.-Nr./Arbeits-Nr. : FA.15.085 B 79 G	Maßstab : 1:2000	Blatt 2 von
		Zeichnung-Nr. :	gez. : <i>NW</i> gepr. :



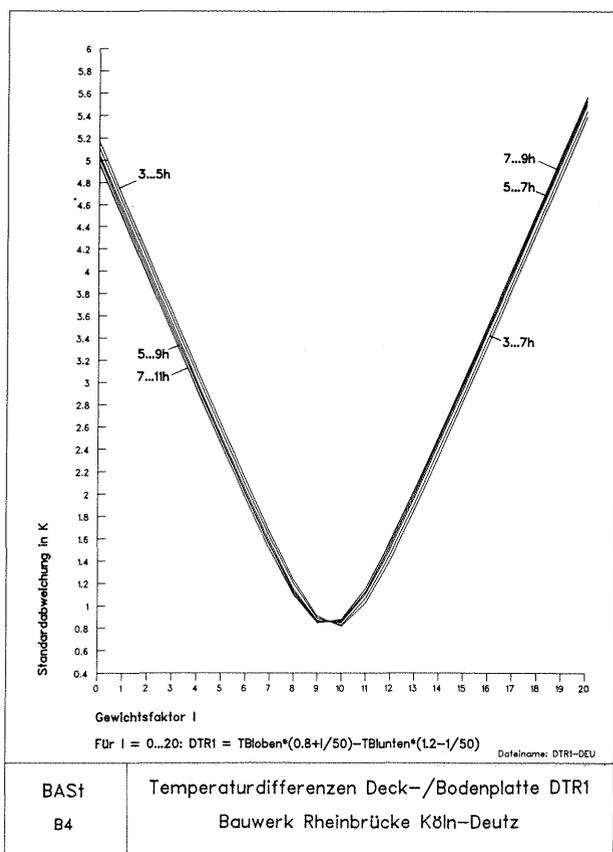
<b>Auftrag / Vorgang :</b> Temperatur- und Verformungsmessungen an der Rheinbrücke Köln-Deutz		<b>Bezeichnung :</b> Anordnung der Meßstellen in den Meßprofilen	
		Anlage 40	
BAST, Bergisch-Gladbach B 3.3	<b>F.A.-Nr./Arbeits-Nr. :</b> F.A. 15.085 B 79 G	<b>Maßstab :</b> 1:100	<b>Blatt 3 von</b>
		<b>Zeichnung-Nr. :</b>	<b>gez. : gepr. :</b>



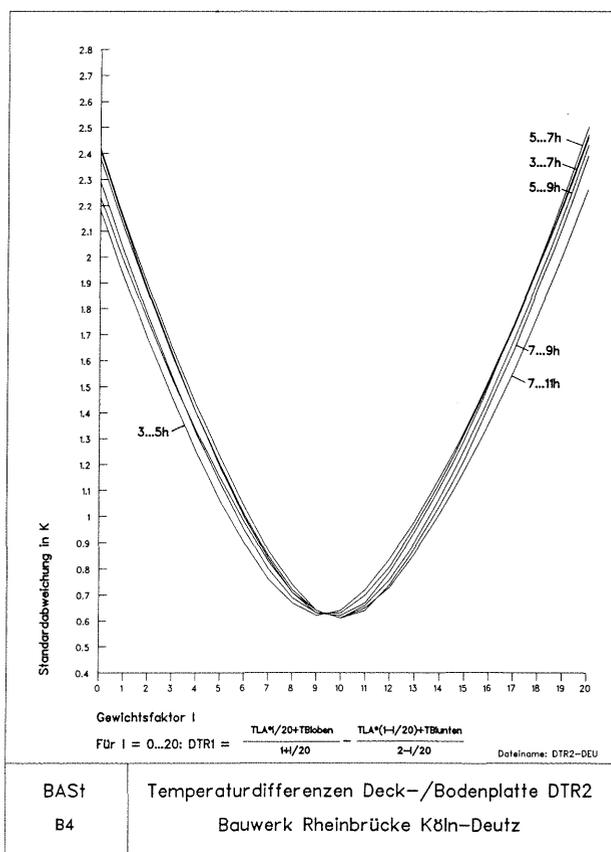
Anlage 41



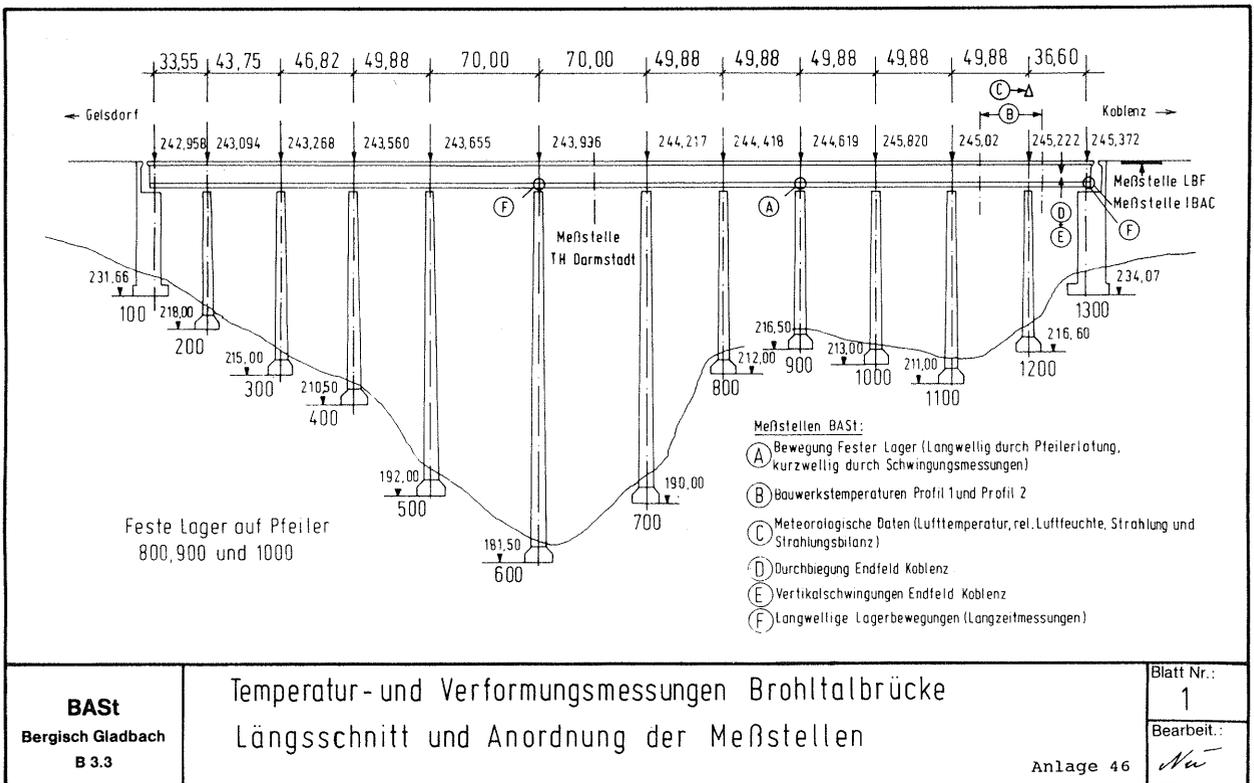
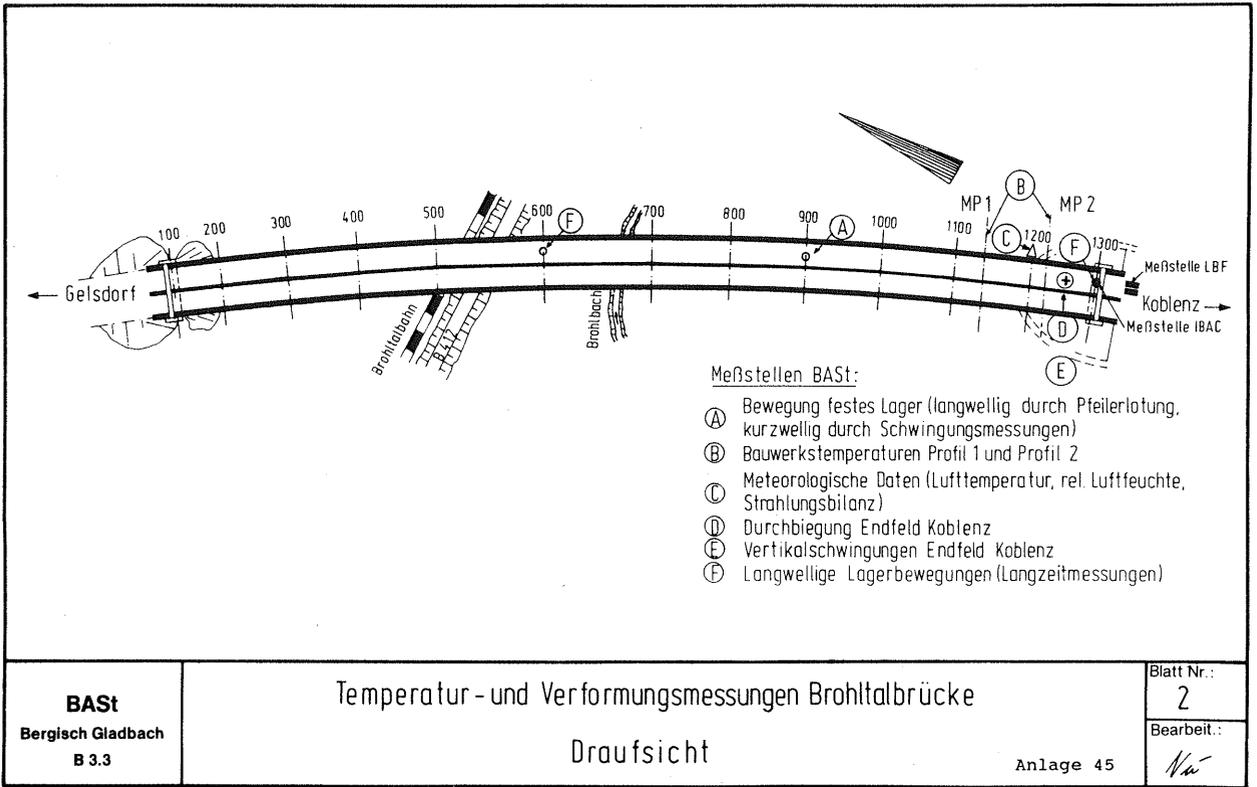
Anlage 42

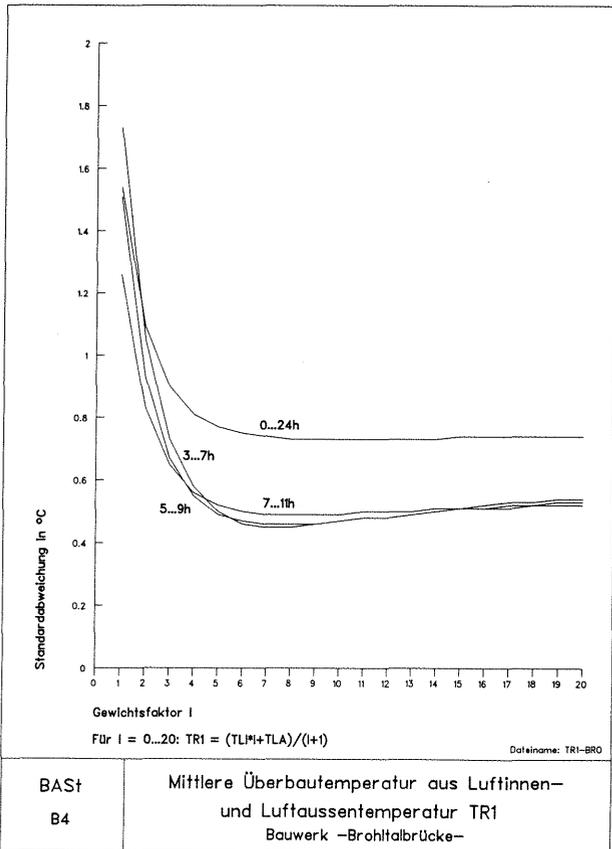
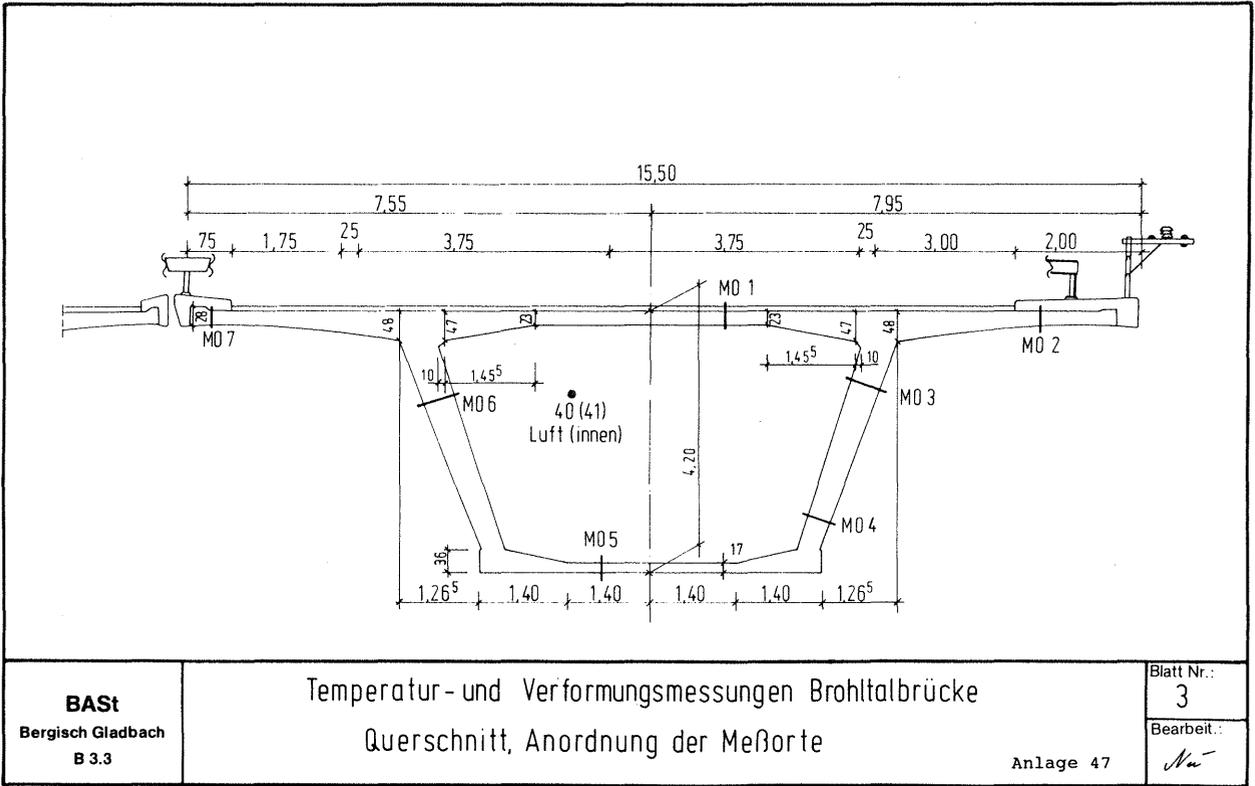


Anlage 43

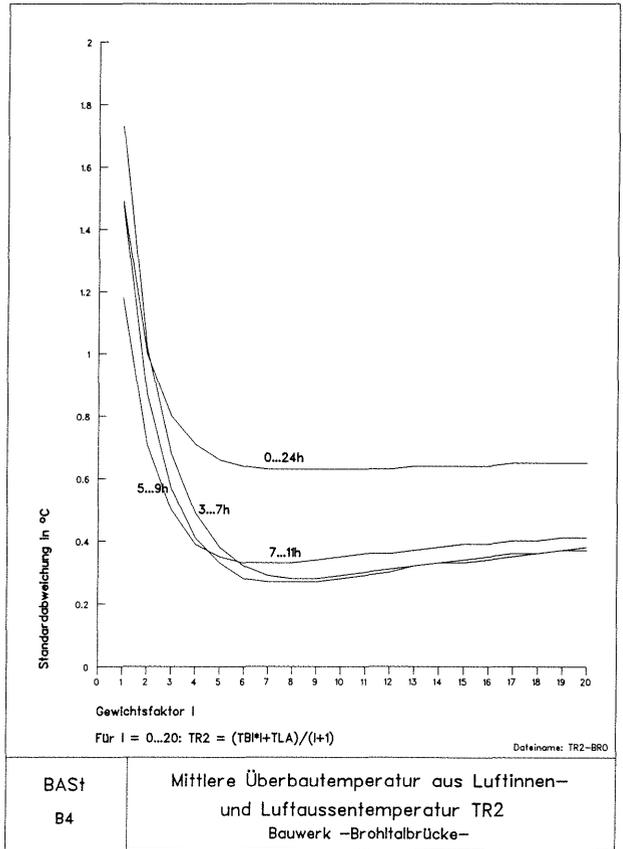


Anlage 44

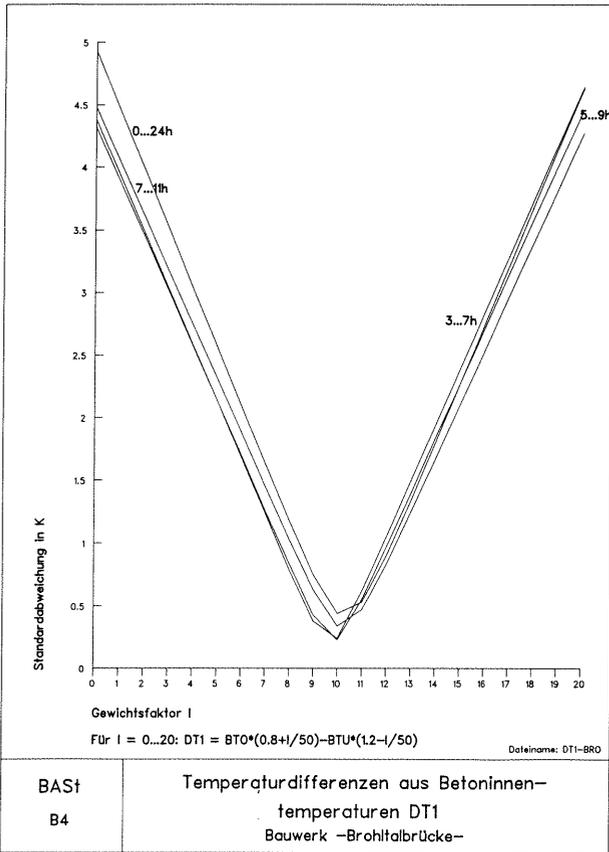




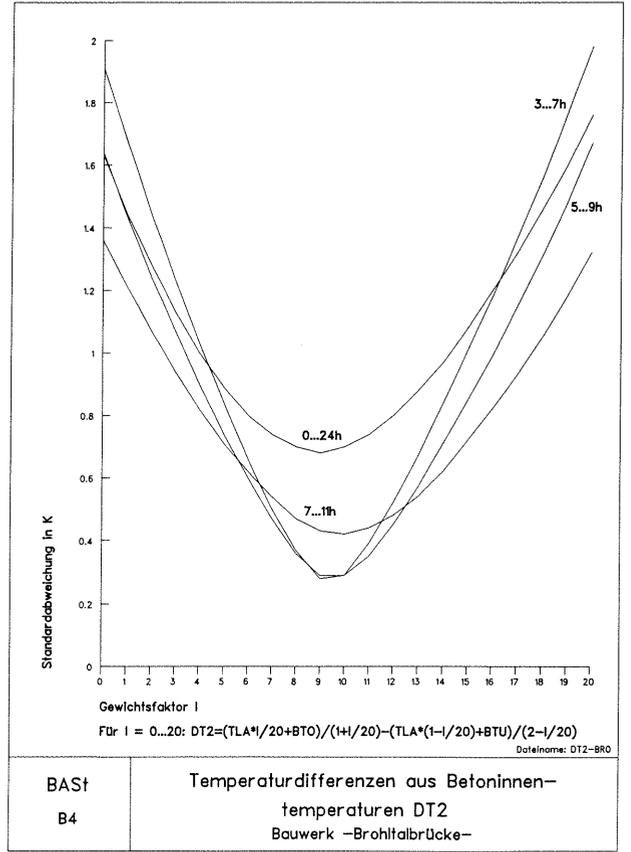
Anlage 48



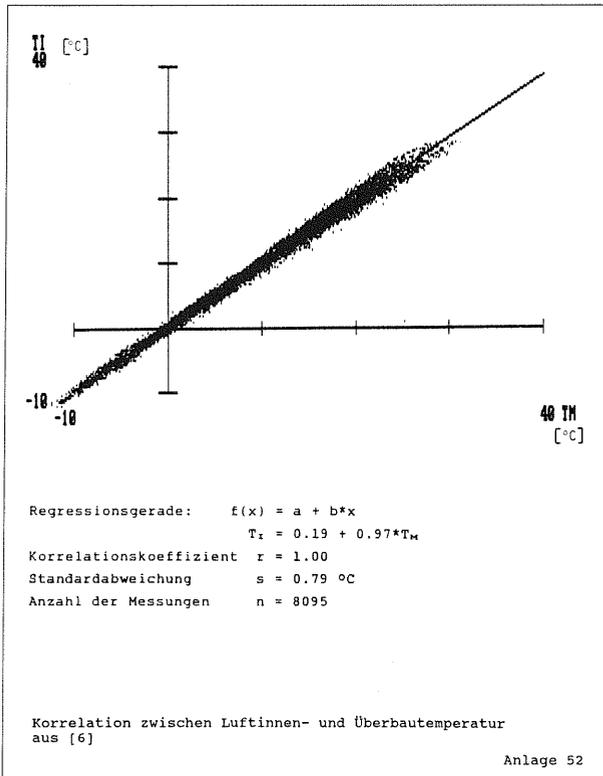
Anlage 49



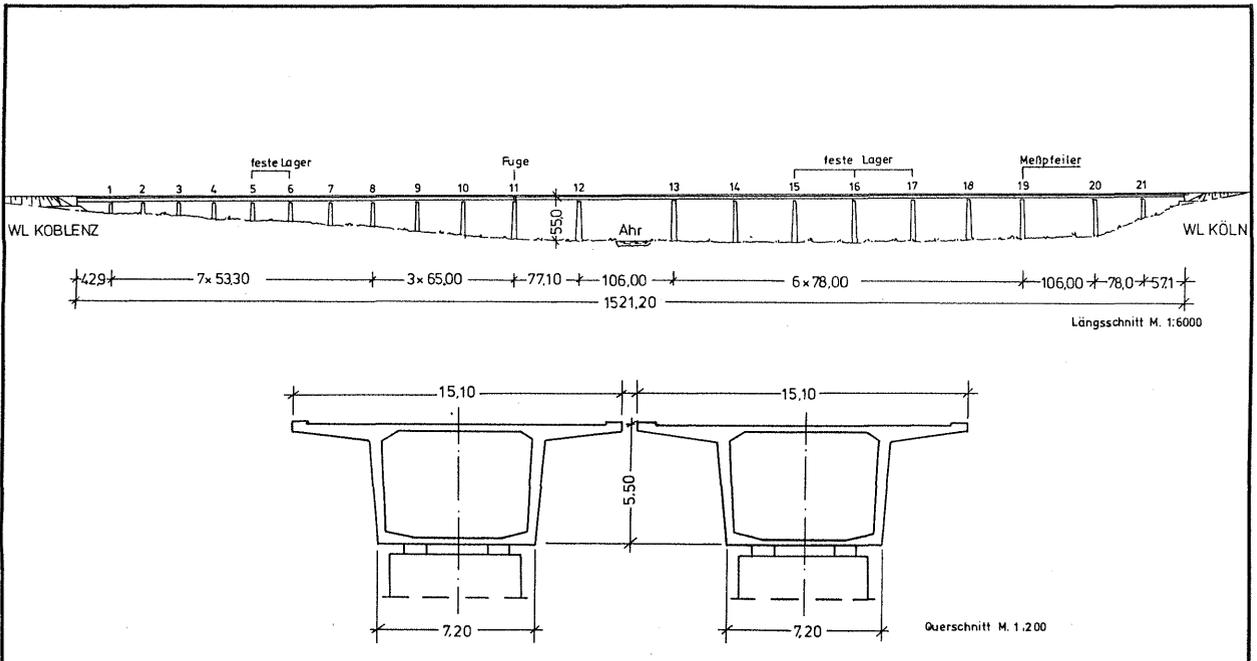
Anlage 50



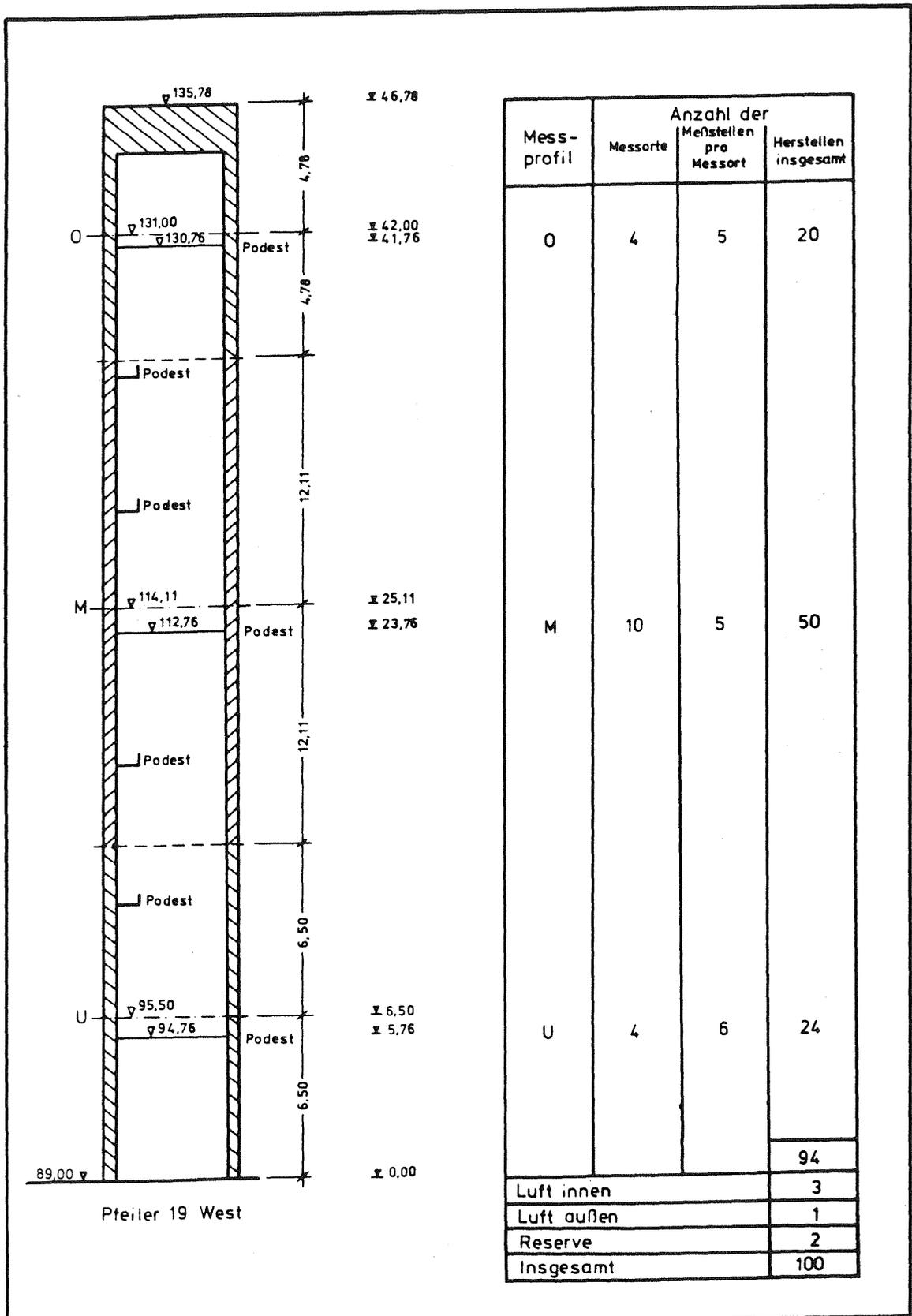
Anlage 51



Anlage 52

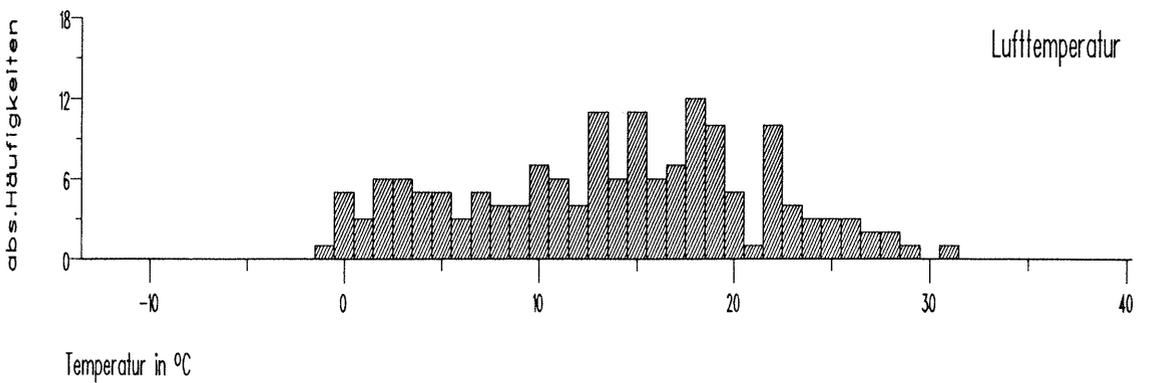
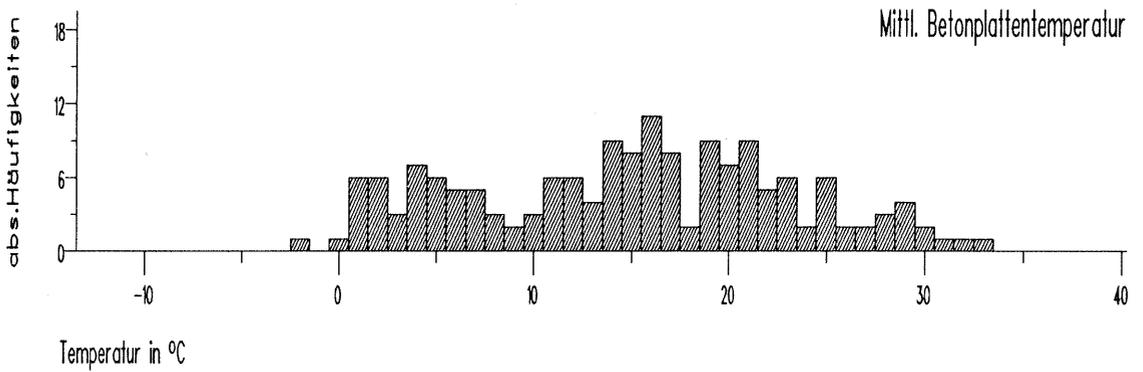
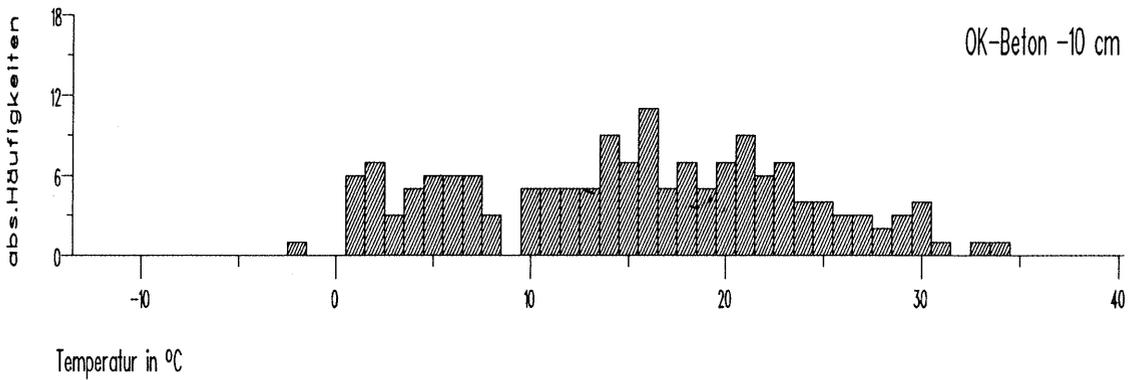
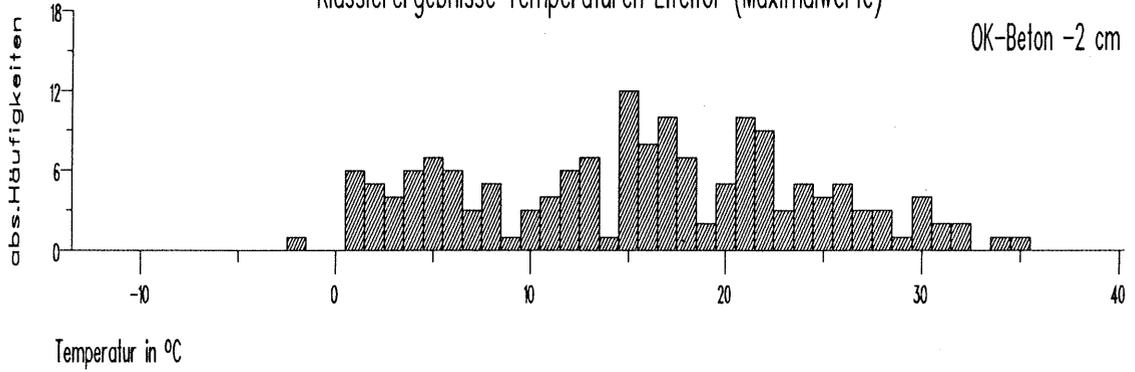


<b>Auftrag / Vorgang :</b> Temperatur- und Verformungsmessungen am Pfeiler 19 der Ahrtalbrücke Bad Neuenahr		<b>Bezeichnung :</b> Übersichten Ahrtalbrücke		Anlage 53	
<b>BAST, Köln</b> B 3.3		F.A.-Nr./Arbeits-Nr. : 15.019/B3.3-018-12-1/4		Maßstab : 1 : 6000 / 1:200	
		Zeichnung-Nr. : 017-07-77		Blatt 2 von 61 gez. : Now. gepr. :	



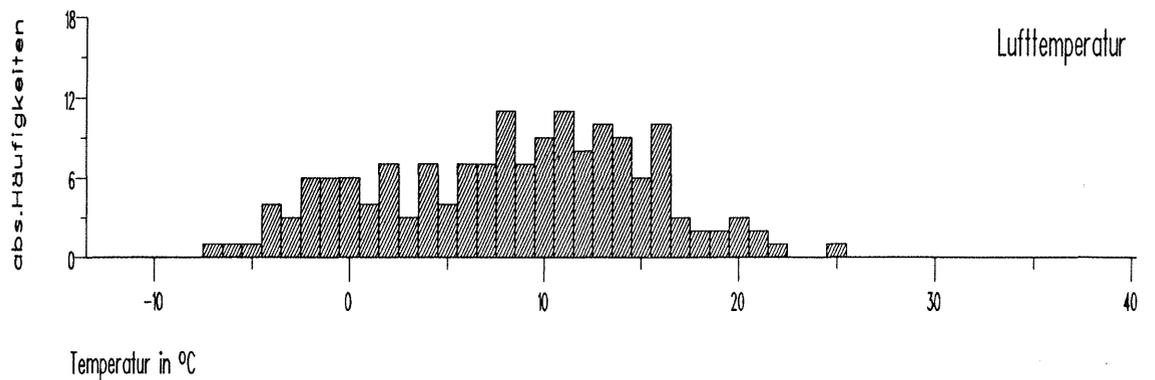
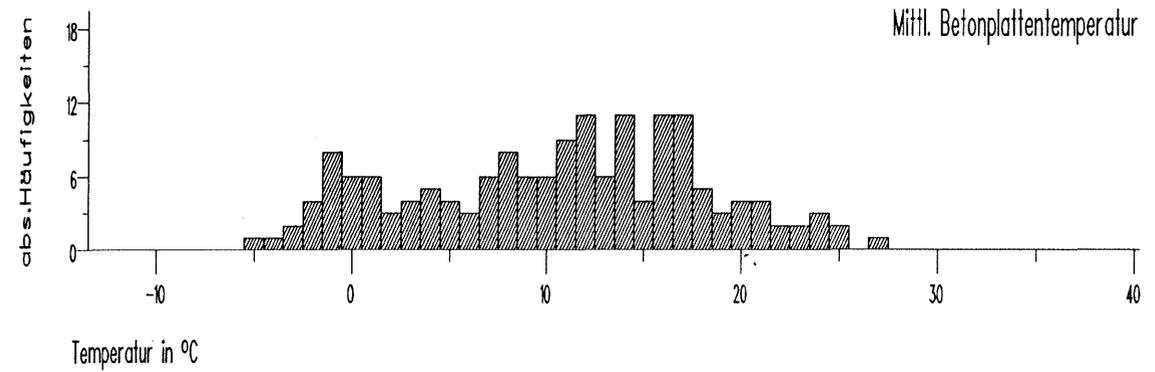
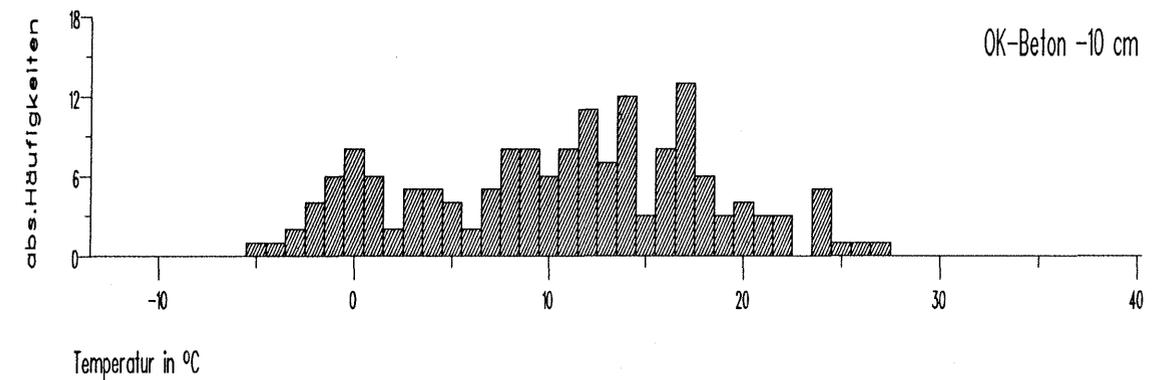
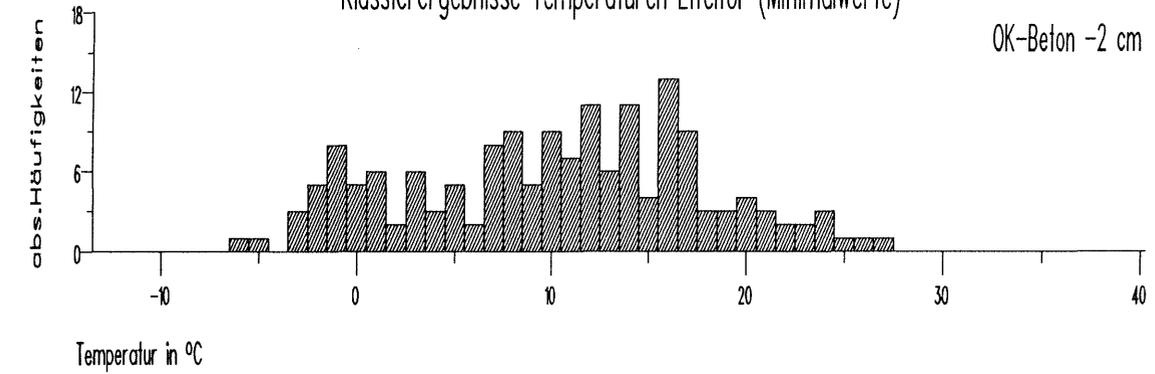


Klassiergebnisse Temperaturen Eifeltor (Maximalwerte)



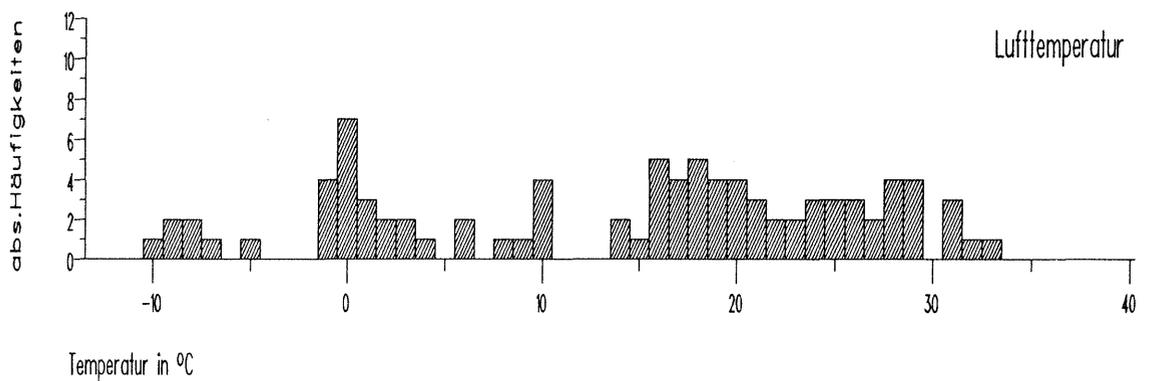
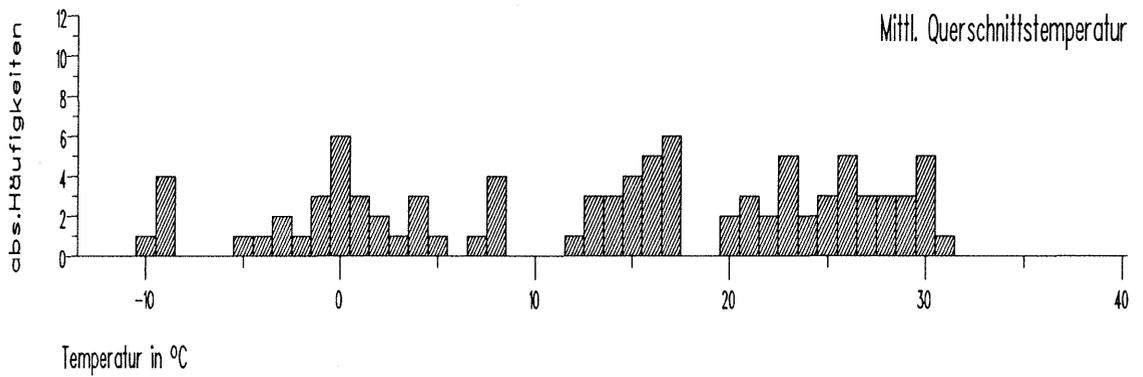
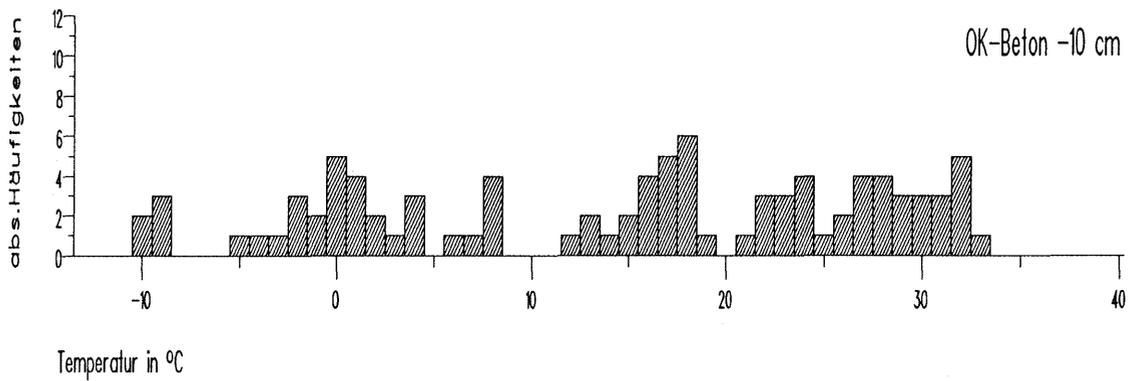
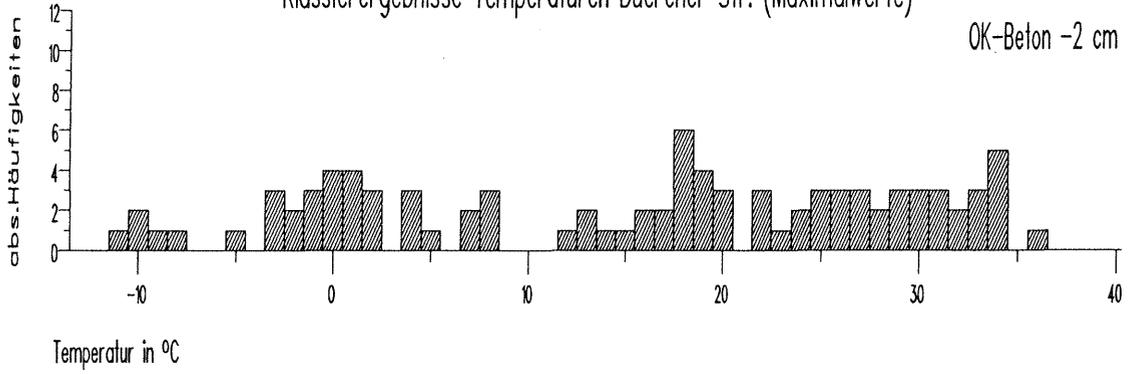
Anzahl der Messreihen: 1944 Anzahl der Einzelmesswerte: 33048

## Klassierergebnisse Temperaturen Eifeltor (Minimalwerte)



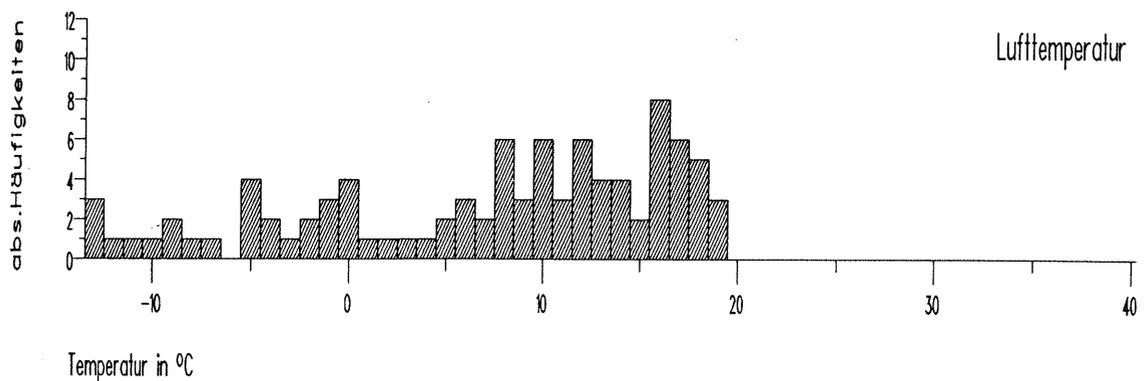
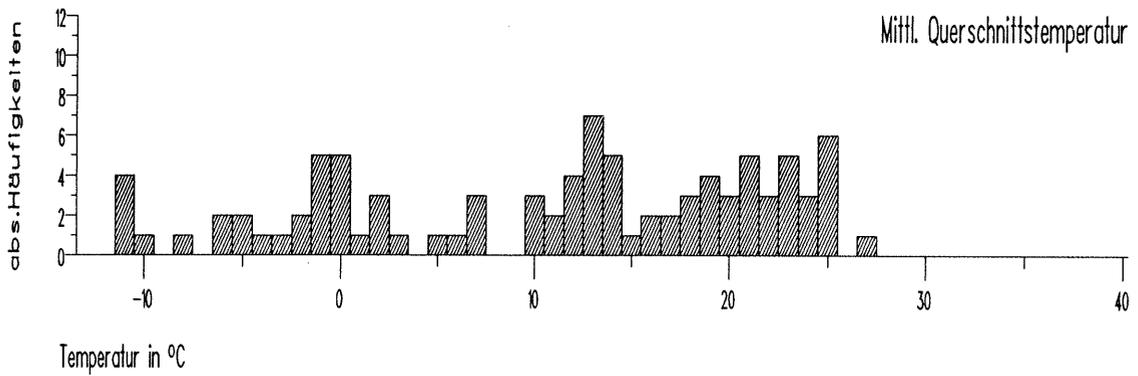
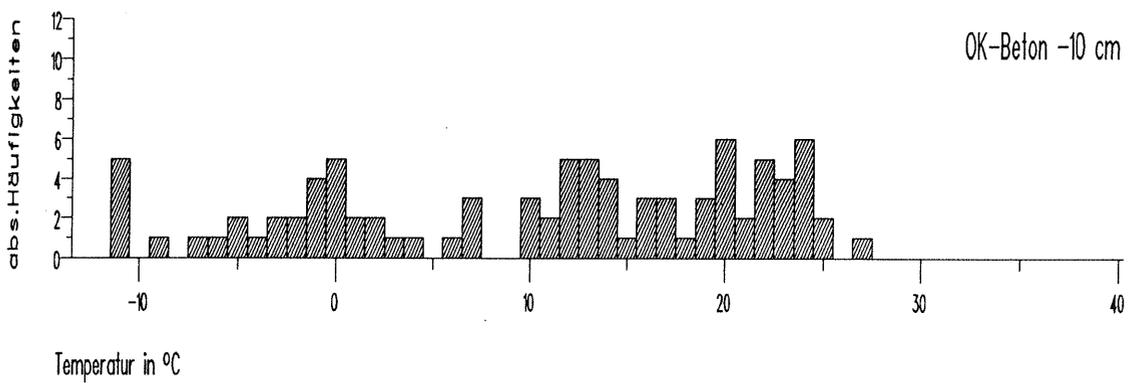
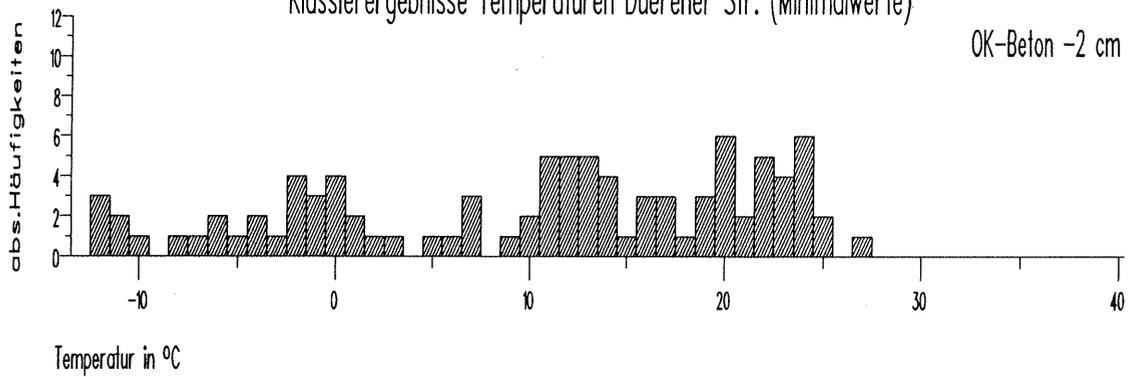
Anzahl der Messreihen: 1944 Anzahl der Einzelmesswerte: 33048

Klassiergebnisse Temperaturen Duerener Str. (Maximalwerte)



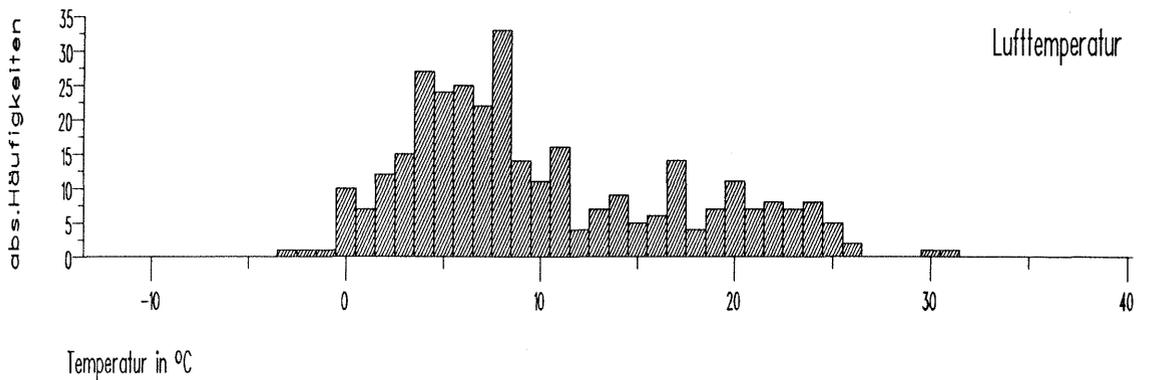
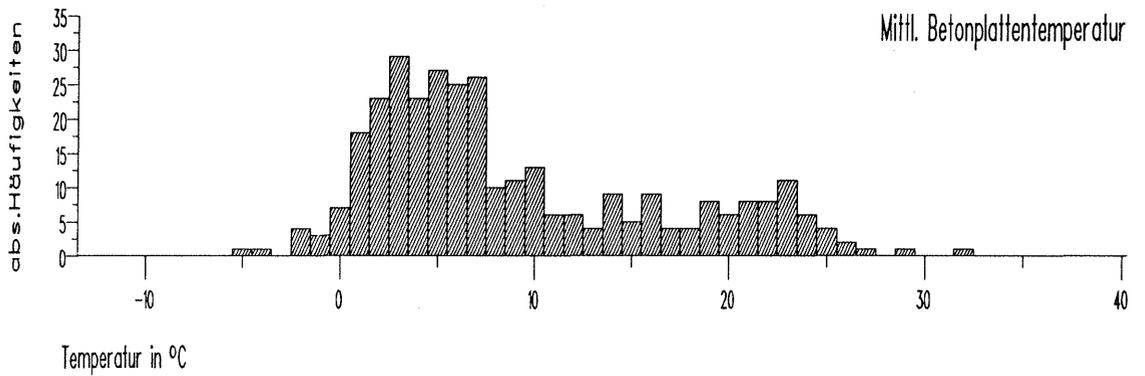
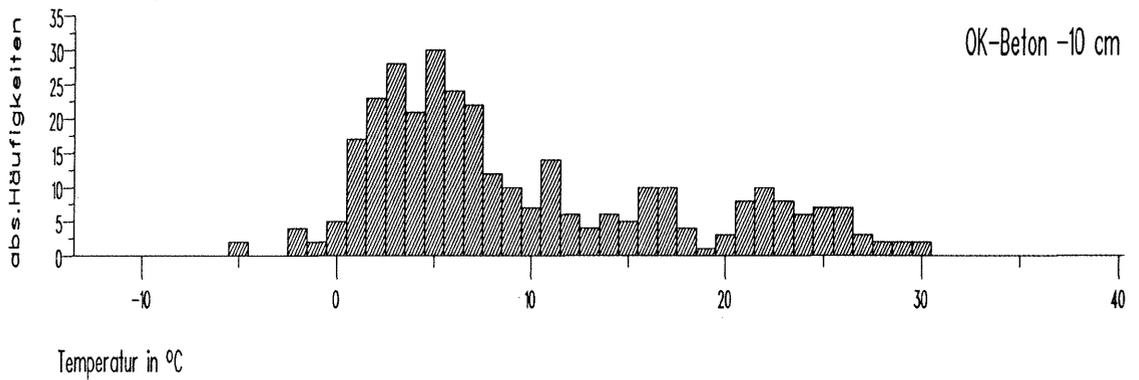
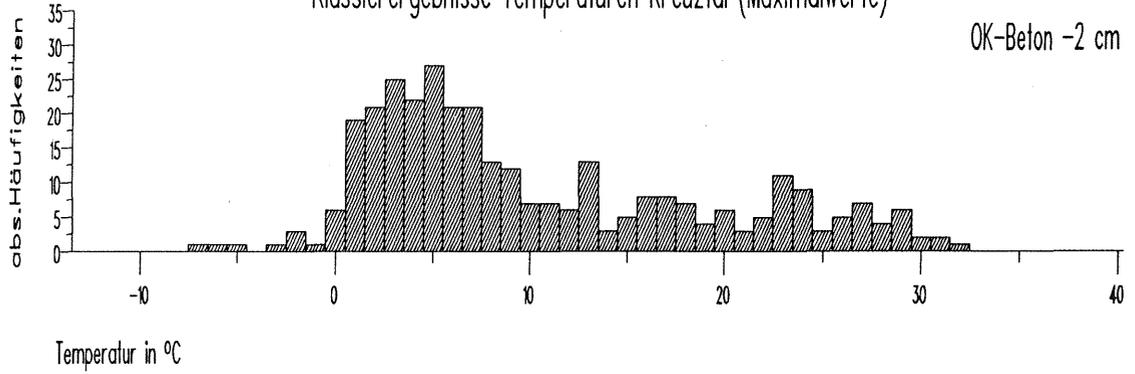
Anzahl der Messreihen: 1116 Anzahl der Einzelmesswerte: 22728

## Klassierungsergebnisse Temperaturen Dauerener Str. (Minimalwerte)



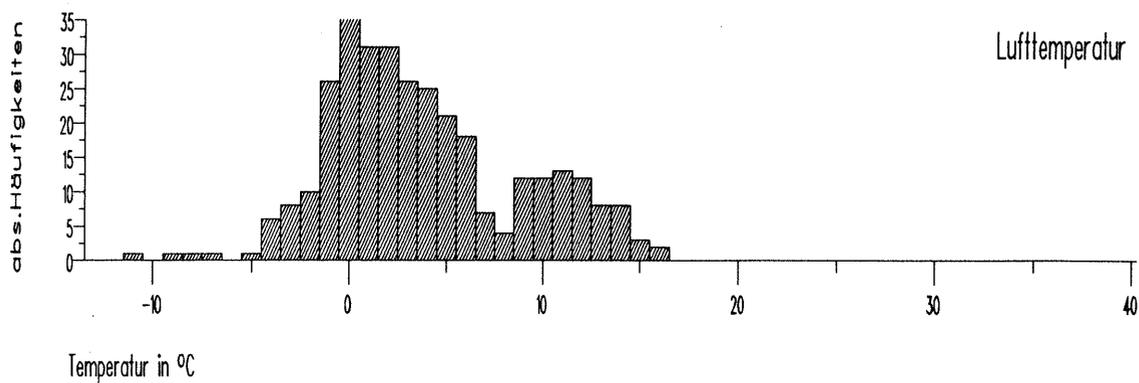
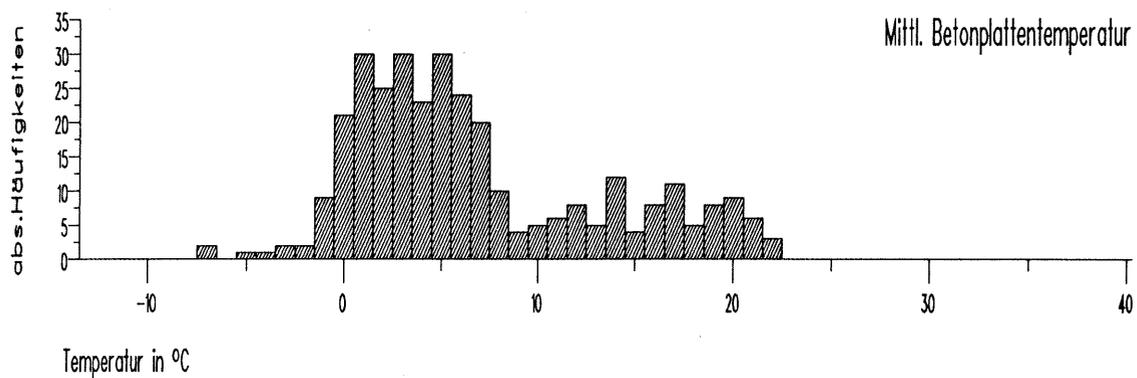
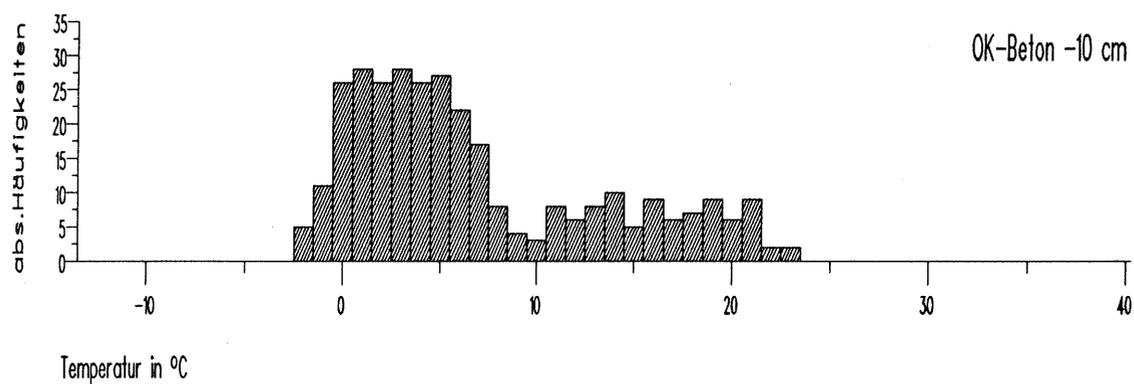
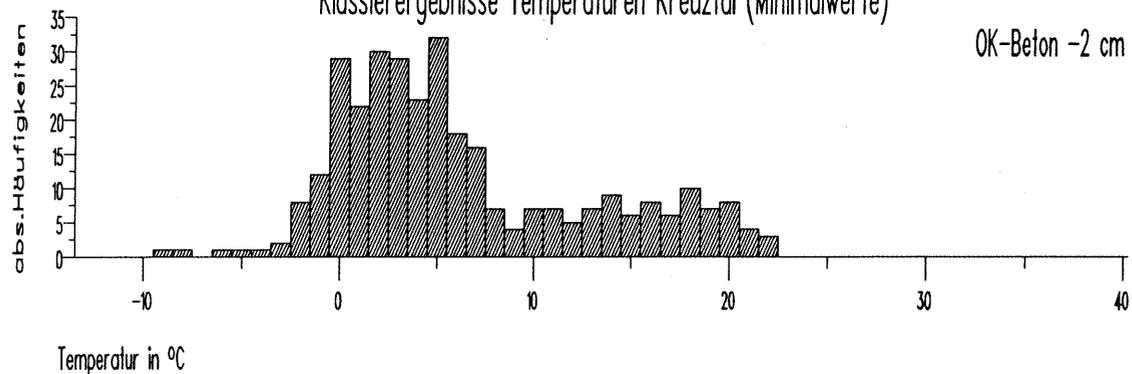
Anzahl der Messreihen: 1116 Anzahl der Einzelmesswerte: 22728

Klassierungsergebnisse Temperaturen Kreuztal (Maximalwerte)

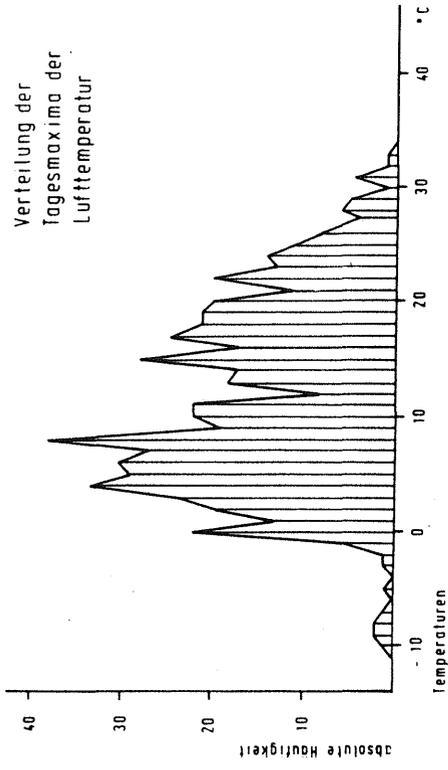
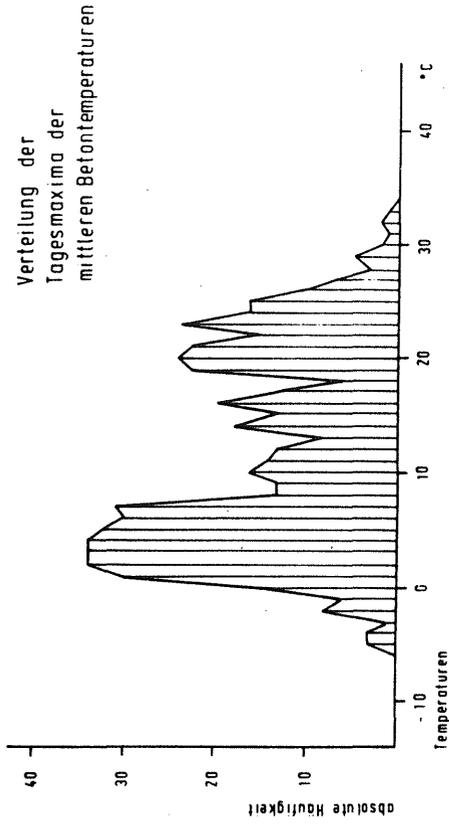
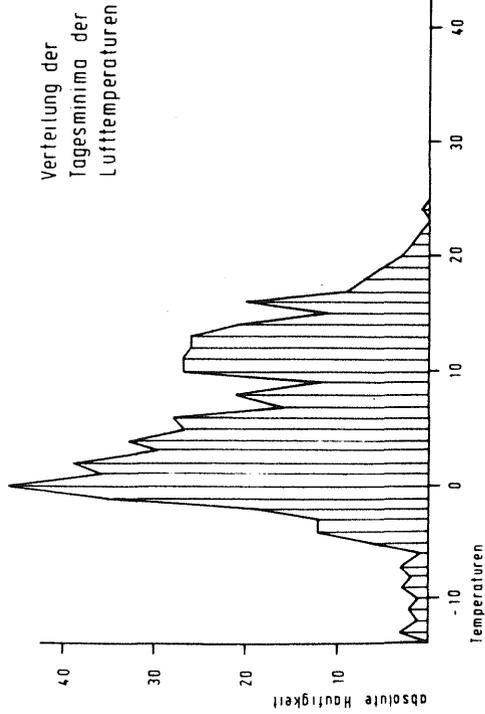
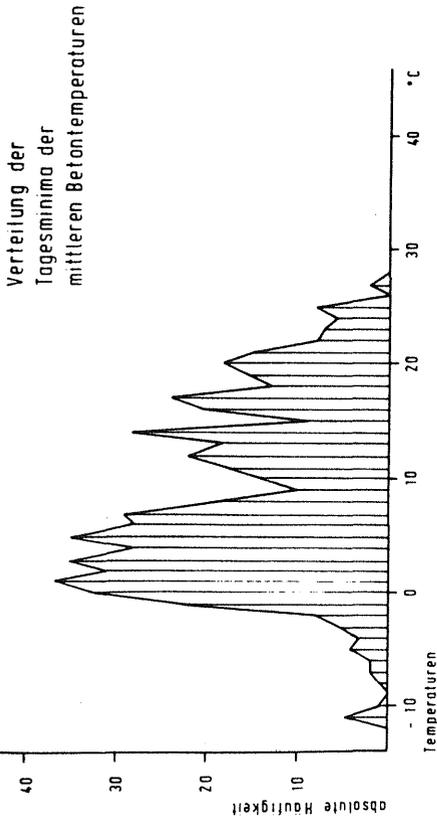


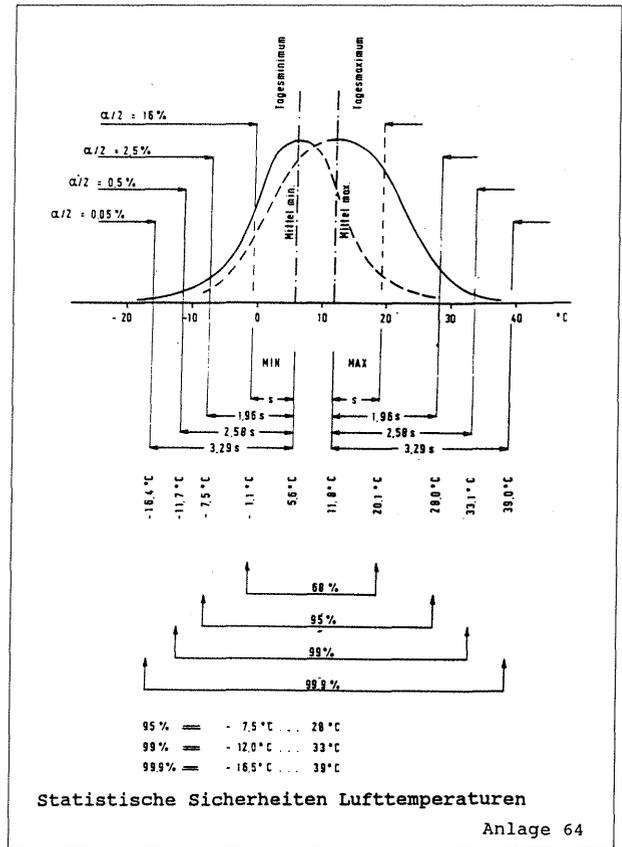
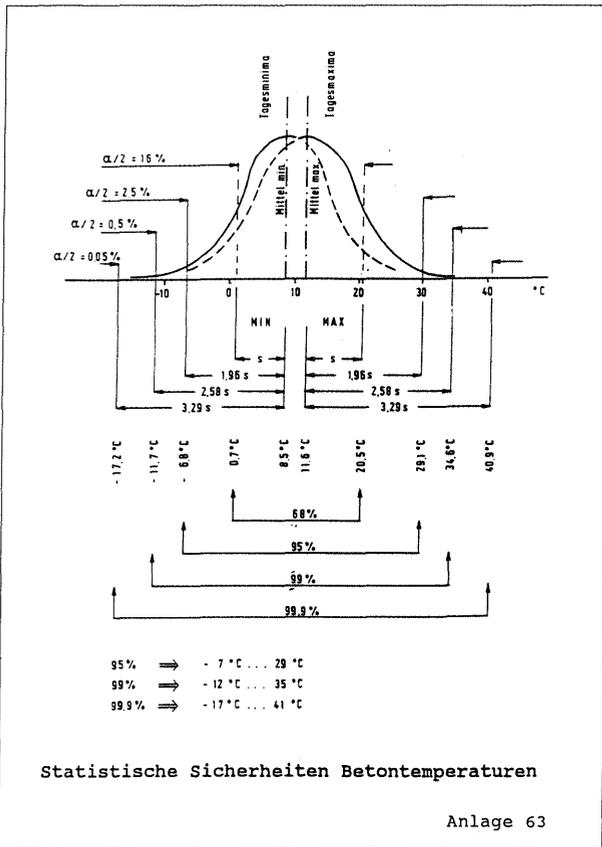
Anzahl der Messreihen: 3900 Anzahl der Einzelmesswerte: 78300

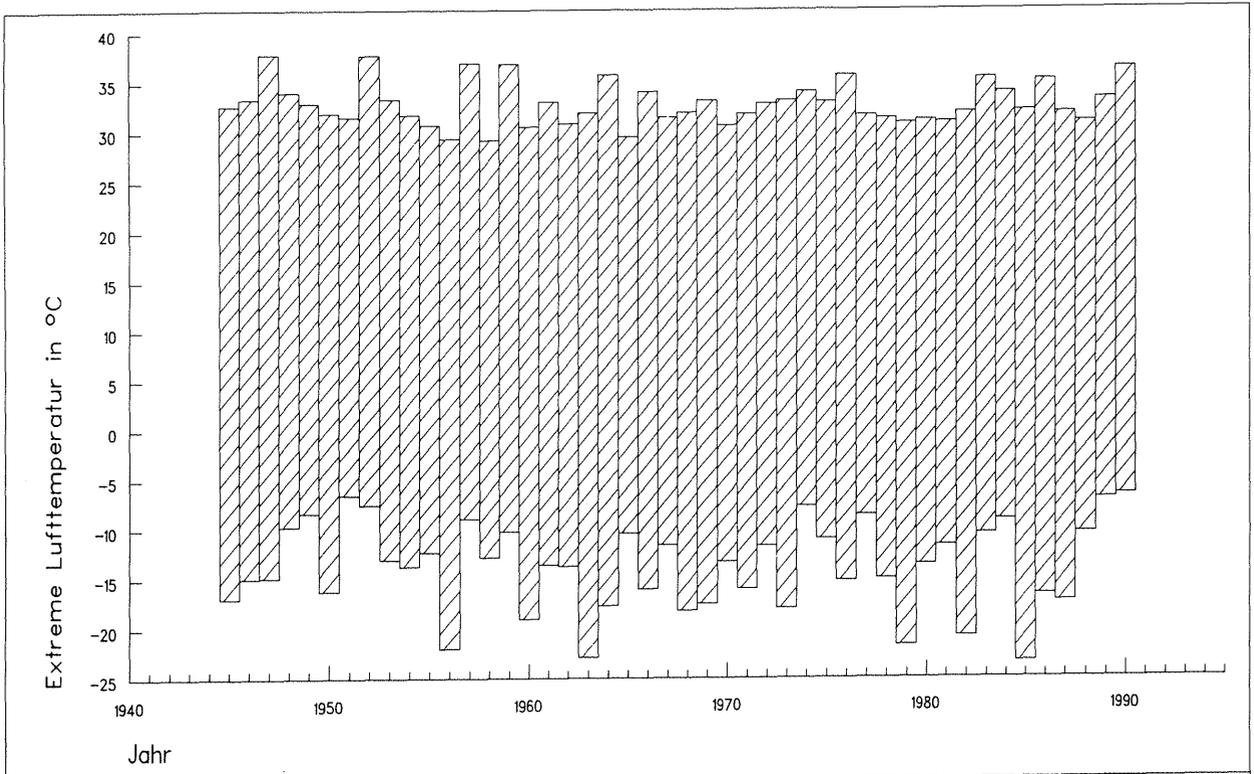
## Klassierungsergebnisse Temperaturen Kreuztal (Minimalwerte)



Anzahl der Messreihen: 3900 Anzahl der Einzelmesswerte: 78300



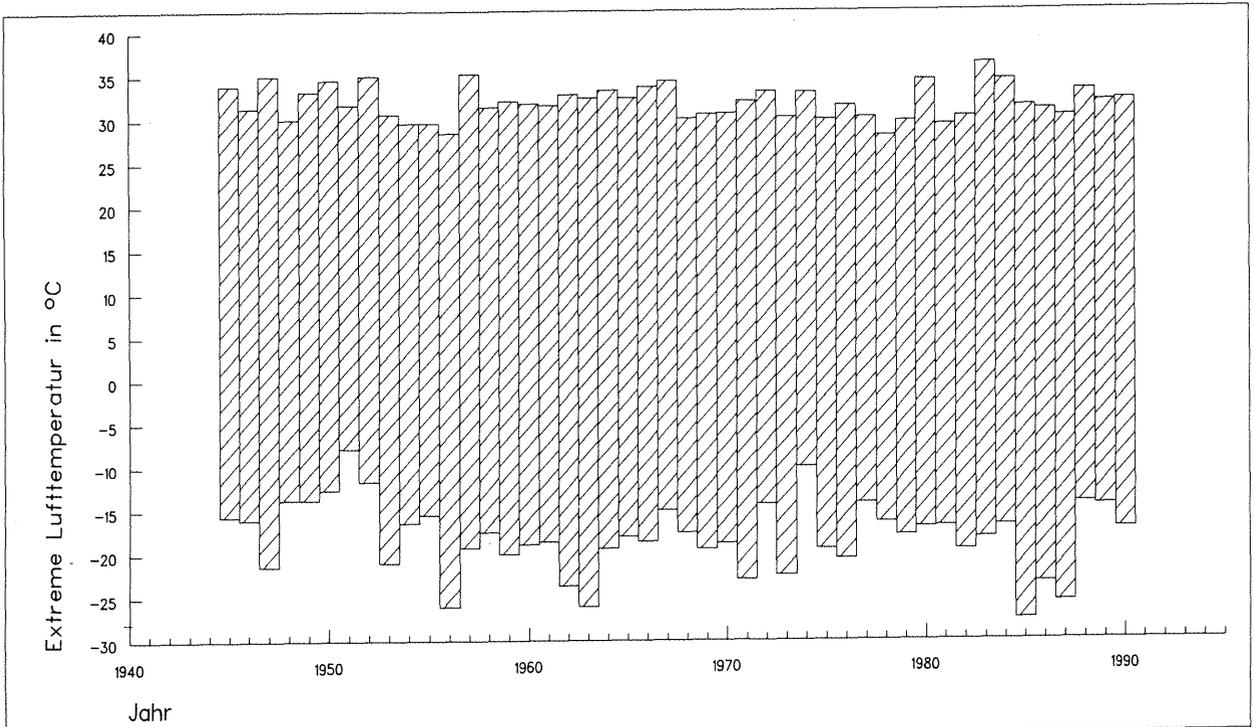




BAST  
B4

Jahresextremwerte der Lufttemperatur im Raum Köln-Bonn

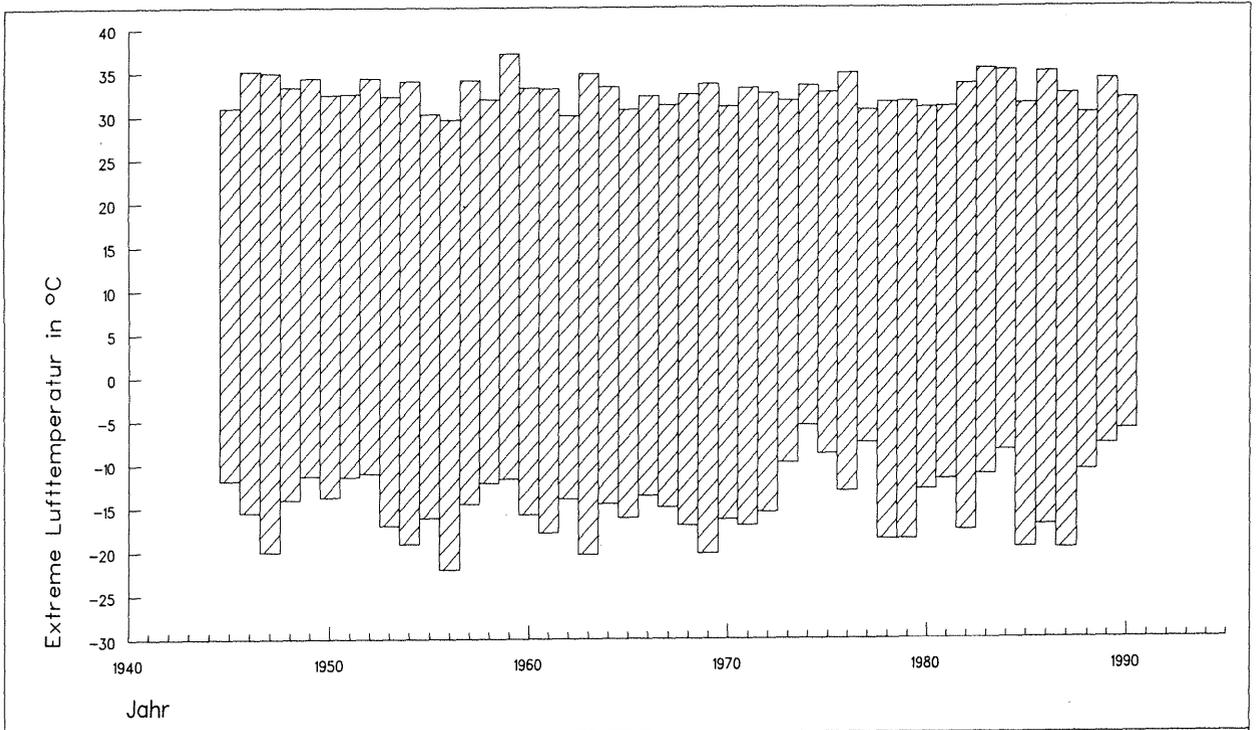
Anlage 65



BAST  
B4

Jahresextremwerte der Lufttemperatur im Raum München

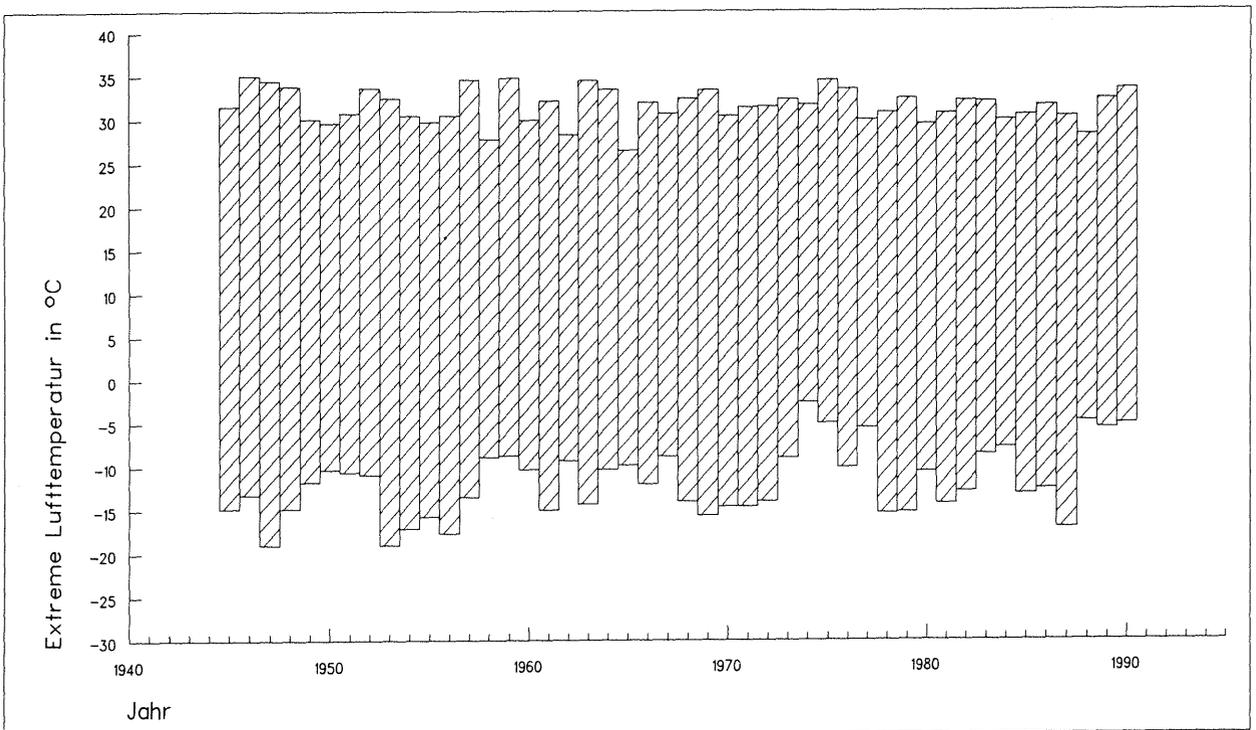
Anlage 66



BAST  
B4

Jahresextremwerte der Lufttemperatur im Raum Berlin

Anlage 67



BAST  
B4

Jahresextremwerte der Lufttemperatur im Raum Hamburg

Anlage 68

