

Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 12

bast

Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke

von

Walter Goebel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 12

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse 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, Bgm.-Smidt-Str. 74–76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44-0, 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 9.1205:
Erprobung von Verfahren zur Messung der Verformung bei Montage- und Umbauzuständen an der Rodenkirchener Brücke

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (0 22 04) 43-0
Telefax (0 22 04) 43-6 74

Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44-0
Telefax (04 71) 9 45 44 77

ISSN 0943-9293

ISBN 3-89429-768-9

Bergisch Gladbach, September 1996

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke

Die Fahrbahnbreite der Rodenkirchener Rheinbrücke (Hängebrücke) wurde durch Hinzufügen einer dritten Tragseilebene verdoppelt. Diese Baumaßnahme bot die Gelegenheit, meßtechnische Kontrollen durchzuführen und insbesondere die Bauteiltemperaturen zu erfassen.

Der Bauablauf umfaßte mehrere Besonderheiten: So war die Gradiente des neuen Bauwerkteiles an die vorhandene anzupassen, die abgängige Betonfahrbahnplatte wurde durch eine Stahlleichtfahrbahn ersetzt, womit gleichzeitig Gewicht gespart wurde, durch Ablassen und Anspannen des neuen Tragkabels wurden Lasten umgelagert. Diese Leistungen setzten erhöhte Genauigkeitsanforderungen bei der Prüfung der Bauwerksgeometrie voraus.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat während der Bauarbeiten mit einer am Bauwerk installierten Meßanlage kontinuierlich die Temperaturen der Hauptbauteile registriert. In der vorliegenden Auswertung werden die Temperaturverläufe, die sich bei charakteristischen Witterungskonstellationen in den Bauteilen ergaben, dargestellt. Die während des Meßzeitraumes festgestellten Extremwerte der Bauteiltemperaturen werden angegeben und die Auswirkungen von Temperaturänderungen auf die Bauwerksverformung exemplarisch aufgezeigt. Damit werden Anhaltspunkte und Empfehlungen für ähnliche Bauvorhaben gegeben.

Temperature Measurements obtained in the course of the Widening of the Rodenkirchener Bridge

The total width of the carriageways on the Rodenkirchener Suspension Bridge over the Rhine has been doubled by the addition of a third main cable. This constructional measure offered the opportunity to carry out metrological tests and in particular to measure the temperatures of different components.

The constructional project included a number of special features. Thus, for example, the gradient of the new construction had to be matched to that of the existing one, the old concrete pavement was replaced with a lightweight steel one

so that weight was saved, and loads were relocated by the lowering and tensioning of the new main cable. All this work required increased levels of accuracy in the determination of the structural geometry.

During the constructional work, the Federal Highway Research Institute carried out continuous measurements of the temperature of the principal structural components with the aid of measuring devices installed on the bridge. In this evaluation the variations of the temperatures, which arose in the course of different characteristic types of weather, are presented. The extreme values of the temperatures of the structures recorded during the measurement period and the effects of changes in temperature on the deformation of the structure are shown with a number of examples. In this way hints and recommendations are given for similar projects in the future.

Mesures de la température lors de l'élargissement du pont autoroutier de Rodenkirchen

Le pont autoroutier sur le Rhin à Rodenkirchen, qui est un pont suspendu, a été doublé de largeur par l'addition d'une troisième nappe de suspentes. Ce réaménagement ouvrit la possibilité de procéder à des mesures, et notamment à des mesures de la température des éléments de construction.

Le processus de construction était marqué par plusieurs particularités: le gradient de la nouvelle partie de l'ouvrage devait être adapté à celui des éléments existants; le tablier en béton dégradé a été remplacé par un tablier léger en acier, afin de réduire le poids; les charges ont été redistribuées en relâchant et tendant à nouveau le nouveau câble porteur. Ces mesures ont exigé une précision élevée pour la détermination de la géométrie de l'ouvrage.

Pendant les travaux, l'Institut fédéral de recherches routières (BASt) a continuellement enregistré, à l'aide d'un dispositif de mesure installé sur l'ouvrage, la température des principaux éléments de construction. Les profils de température observés au cours des conditions météorologiques caractéristiques figurent dans ce rapport, de même que les valeurs extrêmes en-

registrées durant la période de mesure. Les effets des changements thermiques sur la déformation de l'ouvrage sont décrits à titre d'exemple. Ainsi sont donnés des points de repère et des recommandations pour d'autres projets de construction similaires.

During the construction work, the following process points were noted and measured: the temperature of the concrete at the different structural components with the aid of measuring devices installed on the building; the evaluation the variation of the temperature, which varies in the course of different structural types of weather exposure; the extreme values of the temperature; the structural records showing the measurement period and the effects of changes in temperature on the deformation of the structure; the show with a number of examples, in the form of charts and diagrams, the results of the project in the future.

Messung der im Temperaturbereich der Temperaturmessung an den verschiedenen Bauteilen über den Bauprozess hinweg. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden.

Le processus de construction étant marqué par plusieurs particularités, il a été décidé de la partie de l'ouvrage avant être exécuté, les éléments existants, le respect de l'état de l'ouvrage a été complété par un relevé de l'état de l'ouvrage. Les mesures de la température de l'ouvrage ont été effectuées.

Parallèlement à l'exécution, l'état de l'ouvrage a été relevé à l'aide de dispositifs de mesure installés sur l'ouvrage, les températures des différents éléments de construction, les effets de ces variations de température sur la déformation de l'ouvrage ont été relevés et les résultats ont été présentés sous forme de diagrammes et de tableaux.

Kurzfassung - Abstract

Temperaturmessungen bei der Verklebung der Bodenbinder

Die Temperaturmessungen der Bodenbinder während der Verklebung wurden durch festgelegte Messpunkte durchgeführt. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden.

Der Bauprozess wurde in mehreren Bauphasen unterteilt. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden.

Die Bodenbinder sind im Rahmen der Bauprozesse mit einer bestimmten Menge an Klebstoff verklebt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden. Die Temperaturmessungen sind im Rahmen der Bauprozesse durchgeführt worden.

Temperature Measurements Observed in the Course of the Widening of the Roadbed

The total width of the roadbed was increased by the widening of the roadbed. The temperature measurements were carried out in the course of the widening of the roadbed. The temperature measurements were carried out in the course of the widening of the roadbed.

The construction project included a number of special features. Thus, for example, the widening of the roadbed had to be carried out in such a way that the existing and the new concrete were joined together.

Inhalt

1	Vorbemerkungen	7	5	Beispiele für die Verwendung der Meßergebnisse bei besonderen Bau- und Montagezuständen	17
2	Kurzbeschreibung des Bauwerks und der Baumaßnahme	7	5.1	Vorbemerkungen	17
3	Beschreibung der Meßeinrichtung	12	5.2	Temperatureinflüsse beim Freivorbau des neuen Tragwerkteiles	18
4	Darstellung ausgewählter Meßergebnisse	13	5.3	Betrachtungen zu Temperatureinflüssen beim Anspannen des neuen Tragkabels nach dem Umbau des alten Tragwerkteiles	19
4.1	Charakteristische Temperaturverläufe	13	6	Schlußfolgerungen und Empfehlungen	20
4.1.1	Trockenes Frühlingwetter mit sonnigen Tagen und kühlen Nächten in der Zeit vom 13. bis 15. Mai 1992	14	7	Zusammenfassung	21
4.1.1.1	Pylonstiel, Meßprofil 20 m über der Fahrbahn	14	8	Literatur	23
4.1.1.2	Pylonstiel, Meßprofil 7 m über der Fahrbahn	14		Anlagen	25
4.1.1.3	Tragkabel in der Mitte der Stromöffnung	14			
4.1.1.4	Tragkabel in der rechtsrheinischen Seitenöffnung	14			
4.1.1.5	Hänger in den Achsen B und C auf der rechtsrheinischen Seite	14			
4.1.1.6	Längsträger in der Achse C	15			
4.1.1.7	Längsträger in der Achse B	15			
4.1.2	Klares, frostkaltes und trockenes Winterwetter in der Zeit vom 02. bis 04. März 1993	15			
4.1.3	Heißes, sonniges und trockenes Sommerwetter in der Zeit vom 02. bis 04. August 1994	15			
4.1.4	Trübes Sommerwetter mit bedecktem Himmel und gelegentlichen Regenfällen in der Zeit vom 26. bis 28. Juli 1993	15			
4.1.5	Naßkaltes Winterwetter mit Temperaturen um den Gefrierpunkt oder kurz darüber und mit gelegentlichen Schnee- oder Schneeregenfällen in der Zeit vom 26. bis 28. Dezember 1993	16			
4.2	Extremwerte	16			

1 Vorbemerkungen

Bei komplizierten Bau- oder Umbaumaßnahmen ist es unumgänglich, das errechnete Trag- und Verformungsverhalten des Bauwerks während der Bauausführung ständig meßtechnisch zu überprüfen. Bei den praktisch tätigen Ingenieuren setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, daß dabei neben den Verformungen aus Eigengewicht und Lasten auch die Verformungen infolge der Temperatur des Bauwerkes bzw. der maßgebenden Bauteile verfolgt werden müssen, und daß dazu die Bauteil-Temperaturen zu erfassen sind. Hierbei genügt es allerdings nicht, nur die Lufttemperatur zu messen, sondern es müssen die Temperaturen am oder im Bauteil gemessen werden. Infolge des Tag-Nacht-Wechsels und besonders infolge der Sonneneinstrahlung finden in den Bauteilen ständig Erwärmungs- und Abkühlungsprozesse statt. Dadurch sind die Temperaturen über den Querschnitt eines Bauteils nicht gleichmäßig verteilt, und sie laufen der Lufttemperatur zeitlich hinterher und manchmal, je nach Witterung, eilen sie ihr sogar voraus.

Es sollte das Ziel des Projektes sein, über das hier berichtet wird, diese obengenannten zeit- und witterungsabhängigen Prozesse an einem hierfür geeigneten Objekt über einen längeren Zeitraum zu erfassen und in ihrem Verlauf sowie

auch möglichst in ihren Auswirkungen auf dieses Bauwerk darzustellen. Mit diesen Darstellungen sollen dem praktisch tätigen Ingenieur Anhaltspunkte geliefert werden, die ihm im konkreten Fall die Abschätzung der zu erwartenden Einwirkungen auf das Bauwerk und die Auswahl der zu treffenden Maßnahmen erleichtern können.

2 Kurzbeschreibung des Bauwerks und der Baumaßnahme

Eine Gelegenheit, Temperaturverläufe und ihre Auswirkungen an einem spektakulären und wirklich komplizierten Beispiel zu zeigen und die zugehörige Meßtechnik zu erproben, bot sich anlässlich der Verbreiterung und des Umbaus der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen.

Bei diesem Bauwerk handelt es sich um eine echte (d.h. erdverankerte) Hängebrücke mit einer Spannweite des Mittelfeldes von 378 m (Abb. 1). Sie war in den Jahren 1938 bis 1941 errichtet und nach der Zerstörung im Krieg von 1951 bis 1954 unter Weiterverwendung nur der Pylone und der Unterbauten wieder aufgebaut worden [4]. Die Rodenkirchener Brücke überführt die Autobahn A 4 (Olpe-Köln-Aachen) über den Rhein und war allmählich zu einem Nadelöhr im stark befahrenen und inzwischen weitgehend sechsstreifig ausgebauten Kölner Autobahnring geworden. Eine Verbreiterung dieses Rheinüber-

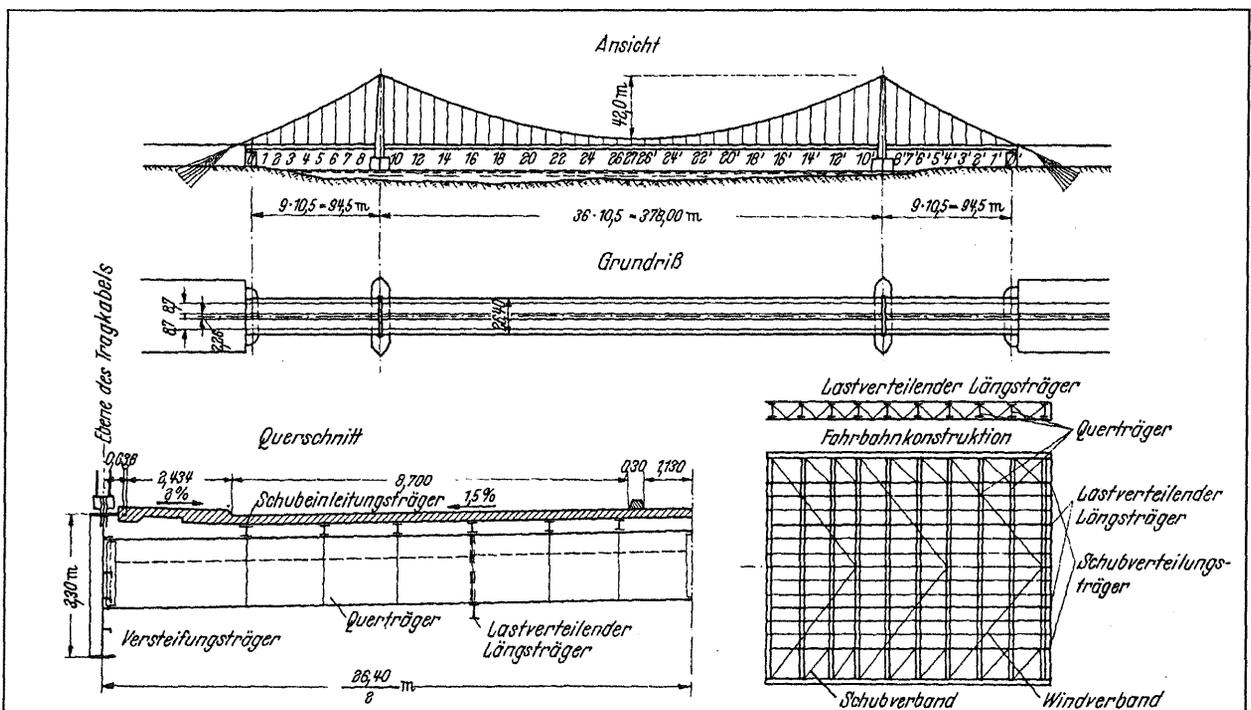


Abb. 1: Übersicht des ursprünglichen Bauwerkes (entnommen aus [4])

ganges war deshalb unumgänglich geworden. Ein weiteres Problem hatte schon vorher die Fahrbahnkonstruktion dargestellt. Bei ihr wirkt eine kreuzweise vorgespannte Beton-Fahrbahnplatte über einen Schubverband im elastischen Verbund mit dem aus Versteifungsträgern, Querträgern und Fachwerk-Längsträgern bestehenden Trägerrost zusammen. Die ursprünglich ohne Abdichtung direkt befahrene Betonplatte war durch Streusalzangriffe stark geschädigt. Die dringend erforderliche Erneuerung wäre jedoch nur mit Verkehrseinschränkungen möglich gewesen und konnte deswegen nicht in Angriff genommen werden. Zur Lösungsfindung waren daher zahlreiche Voruntersuchungen durchgeführt worden.

Die Lösung dieser beiden Probleme wurde mit der nun durchgeführten Baumaßnahme erreicht. Weltweit erstmalig wurde hier eine echte Hängebücke durch Hinzufügen einer dritten Tragebene (d.h. durch ein drittes Tragkabel mit den zugehörigen Konstruktionselementen, wie Pylonstiel, Hänger und Versteifungsträger) verbreitert. Dabei wurde ständig eine vierstreifige Verkehrsführung aufrecht erhalten. Möglich gemacht wurde das u.a. durch folgende Gegebenheiten bzw. durchgeführte Montagemaßnahmen:

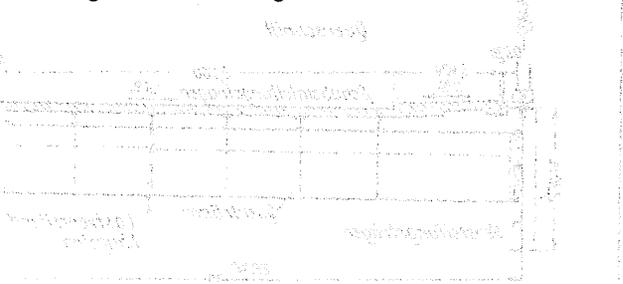
- Beim vorhandenen Bauwerk konnten Tragfähigkeitsreserven ausgenutzt werden.
- Um zusätzliche Belastungen und Zwängungen des vorhandenen Tragwerks möglichst gering zu halten, wurden die in der Achse der vorhandenen Querträger eingebauten neuen Querträger an den vorhandenen, nun mittig liegenden Versteifungsträgern zunächst gelenkig angeschlossen. Nach Abschluß der Montage wurde an dieser Stelle ein biegesteifer Anschluß hergestellt, so daß sich die Lasten gleichmäßig auf die drei Tragkabel verteilen können.
- Nachdem der neue Tragwerksteil fertig war und als Fahrbahn eine orthotrope Platte erhalten hatte, wurde diese mit dem vorhandenen (mittleren) Versteifungsträger verschweißt, so daß das neue Deckblech als Obergurt mit dem alten Versteifungsträger zusammenwirkt.
- Danach wurde der Schubverband zwischen dem alten Trägerrost und der Betonfahrbahnplatte gelöst (wobei die dem System eingepprägten Vorspannkräfte freigesetzt

wurden, soweit sie im Verlauf von vierzig Jahren nicht durch Schwinden und Kriechen abgebaut waren), die Betonfahrbahnplatte schrittweise ausgebaut und durch eine Stahleichtfahrbahn (orthotrope Platte) ersetzt, welche wieder mit den Versteifungsträgern schubfest verbunden wurde. Dadurch wurden die Eigengewichtslasten des alten Tragsystems erheblich reduziert. Während der Umbauarbeiten wurde der Verkehr bereits über den neuen Bauwerksteil geführt.

- Die Sattellager des neuen Tragkabels auf den Pylonen waren verschieblich ausgeführt worden, und die Verankerungen in den Widerlagern hatten Vorrichtungen, um das neue Tragkabel anzuspinnen. Nachdem die biegesteifen Anschlüsse der Querträger im Bereich des mittleren Versteifungsträgers hergestellt worden waren, wurden durch Nachspannen des neuen Tragkabels Lasten auf die außen liegenden Tragkabel verlagert und die mittlere Seilebene damit entlastet.

Die Konstruktion und die Baugeschichte des ursprünglichen Bauwerks sowie die Gegebenheiten und Überlegungen, die zu der Entscheidung für diese außergewöhnliche Baumaßnahme geführt haben, sind in [1], [5] und [8] ausführlich beschrieben. In [2], [5] und [7] sind die statischen und konstruktiven Einzelheiten der verschiedenen Bau- und Montagezustände dargestellt. Die Abbildungen 2 bis 4 illustrieren die verschiedenen Bau- und Umbauphasen. Abbildung 5 zeigt einen Querschnitt des fertigen, erweiterten Bauwerks.

Aus [3] ist zu entnehmen, daß für die Tacoma Narrows Bridge im Staate Washington der USA eine ähnliche Lösung für eine Erweiterung zumindest in Erwägung gezogen wird. Es ist also damit zu rechnen, daß die Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke als erstes gelungenes Beispiel zu weiteren Baumaßnahmen dieser Art anregen und ermutigen wird.



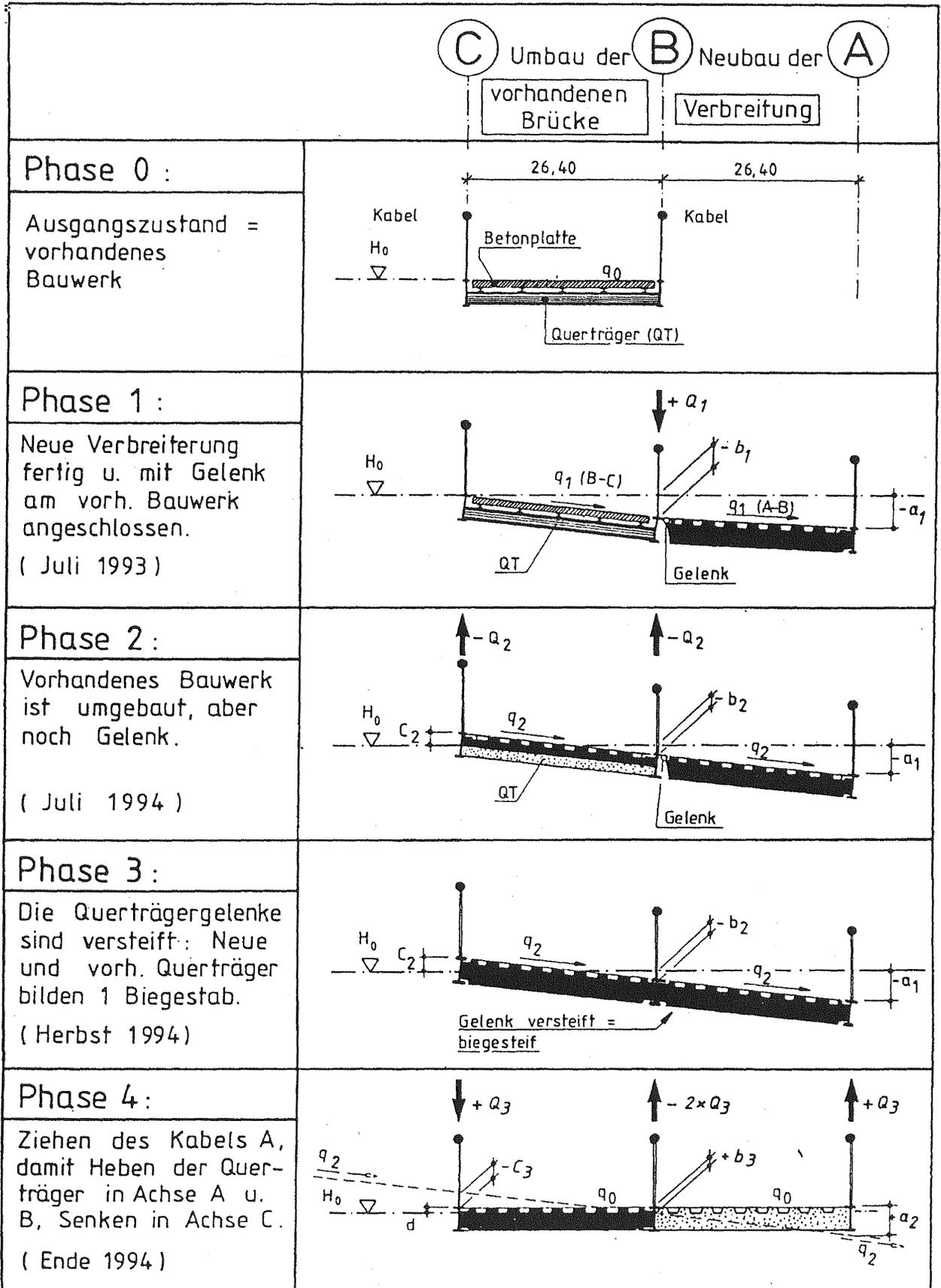


Abb. 2: Bau- und Umbauphasen (entnommen aus [5])

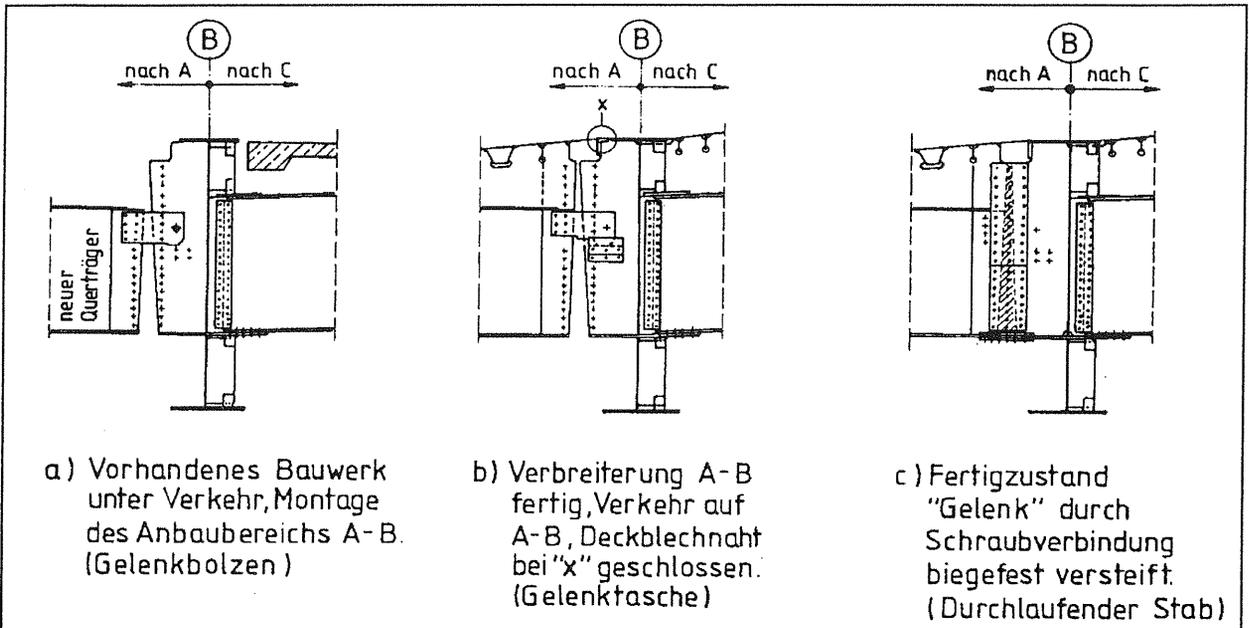


Abb. 3: Anschluß der Verbreiterung an das vorhandene Bauwerk (entnommen aus [5])

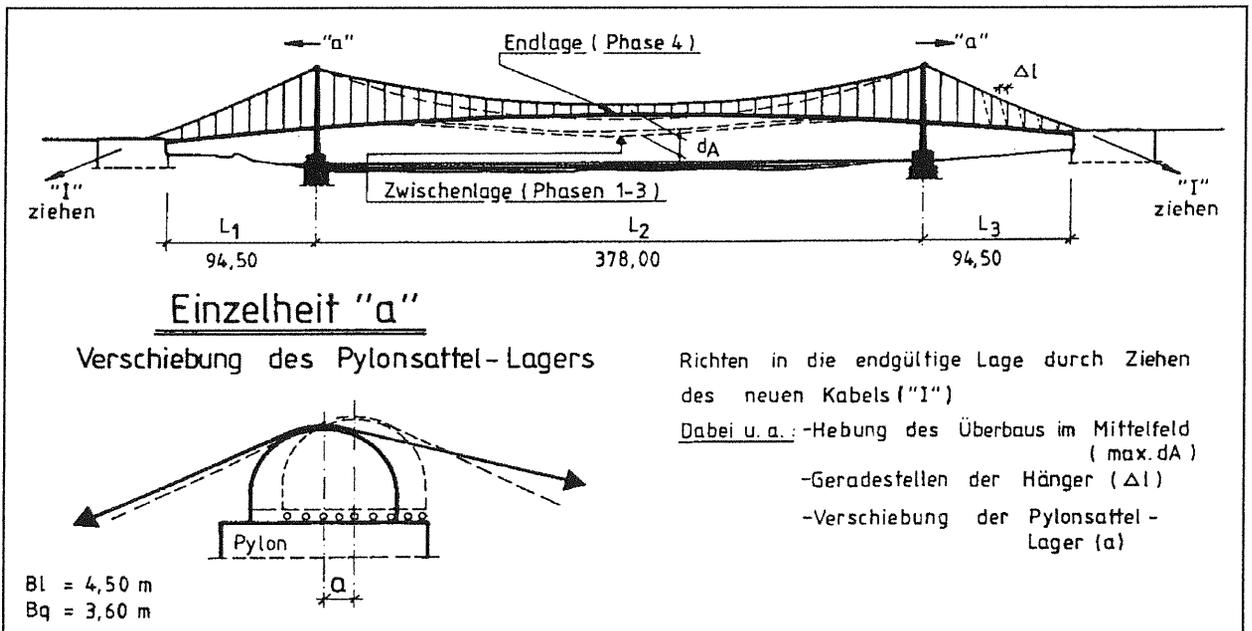


Abb. 4: Herstellen der Endlage durch Nachspannen des neuen Tragkabels (entnommen aus [5])

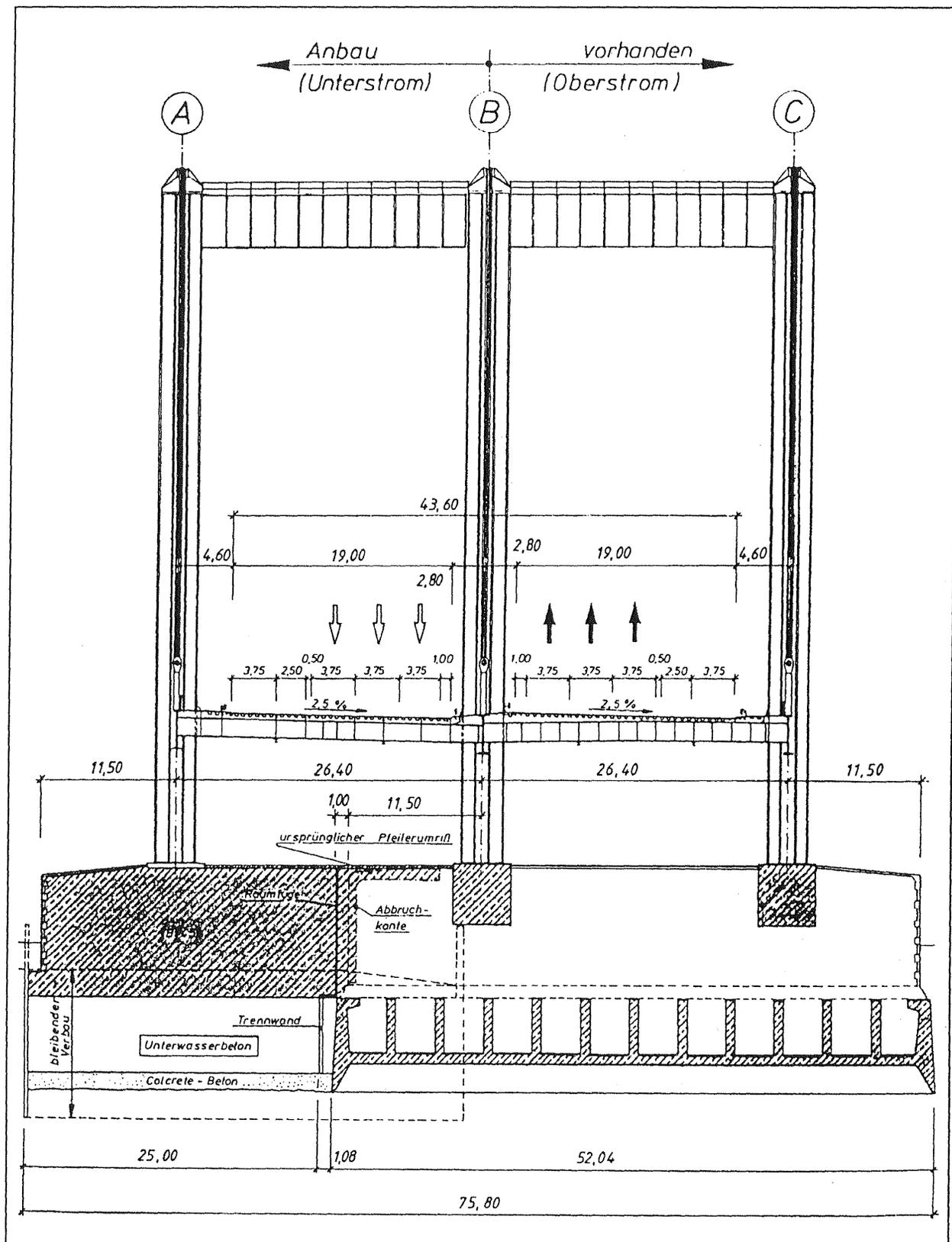


Abb. 5: Querschnitt des erweiterten Bauwerks (entnommen aus [1])

3 Beschreibung der Meßeinrichtung

Die vorgenannten Bau- und Montagezustände mit den dazu gehörenden Last- und System-Umlagerungen bedurften u. a. einer präzisen, meßtechnischen Kontrolle, um die geplante Bauwerksgeometrie herzustellen und die errechnete Tragwirkung zu gewährleisten. In diese Kontrollen waren auch die temperaturbedingten Verformungen der wichtigsten Bauteile einzu-beziehen. Bei den ersten Messungen, bei denen nur die Lufttemperatur gemessen worden war, hatten sich Diskrepanzen zwischen gemessenen und errechneten geometrischen Werten gezeigt.

Nach technischer Abklärung mit dem Rheinischen Autobahnamt Köln beim Landschaftsverband Rheinland (LVR) installierte die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) eine Temperaturmeßanlage am Bauwerk, die aus einer zentralen Meßdatenerfassungsanlage (Philipps Data-logger und Fernschreiber mit Lochstreifenstanzer) und zunächst 42, später 48 mittels Ausgleichsleitungen daran angeschlossenen Temperaturfühlern (Mantelthermoelemente Nickel-Chrom-Nickel) bestand. Der Lochstreifen hat sich schon bei früheren ähnlichen Meßaufgaben unter den Bedingungen des Baubetriebes als robustes Speichermedium bewährt. Die Erfassungsanlage wurde witterungsgeschützt in einer Kammer des rechtsrheinischen Widerlagers eingebaut. Die Meßfühler wurden auf alle zum damaligen Zeitpunkt wichtig erscheinenden Bauteile verteilt, wie auch aus der Meßstellenanordnung, Anlagen 1.1 und 1.2 zu entnehmen ist. Bei den Lageangaben ist zu beachten, daß die Bauwerksachse von Südwest nach Nordost verläuft, und daß daher Oberstrom gleichbedeutend ist mit Südost und Unterstrom Nordwest entspricht. Es wurden folgende Meßprofile eingerichtet:

- an zwei Stellen des oberstromigen alten Tragkabels in Achse C (über der Mittelöffnung, d.h. über Wasser und über der rechtsrheinischen Seitenöffnung, d.h. über Land) mit je 4 Meßfühlern (oben, unten und auf der nordwestlichen und südöstlichen Seite); diese Meßfühler mußten später wegen Korrosionsschutzarbeiten an diesem Tragkabel auf das unterstromige (nördliche) der alten Tragkabel in Achse B verlegt werden,
- über der rechtsrheinischen Seitenöffnung (d.h. über Land) an einem oberstromigen und

an einem unterstromigen Hänger je 4 Meßfühler (in den 4 Himmelsrichtungen parallel und senkrecht zur Bauwerksachse,

- im rechtsrheinischen oberstromigen alten Pylonstiel in zwei Ebenen (in 7 m und in 20 m Höhe) je 6 Meßfühler (je einer an der Innenseite der vier Außenwände und 2 an den Innenwänden),
- am oberstromigen und am unterstromigen Versteifungsträger über der Stromöffnung und über der rechtsrheinischen Seitenöffnung (d.h. an 4 Stellen je 3 Meßfühler (am Oberflansch, am Unterflansch und am Steg),
- je 1 Meßfühler in der Stromöffnung und in der Seitenöffnung 0,5 m unter dem oberstromigen Versteifungsträger frei hängend zur Messung der Lufttemperatur.
- Nach der Montage des neuen Tragkabels "A" wurden auch hier an einer Stelle über der Seitenöffnung wie beim alten Tragkabel vier Meßfühler an den Außenseiten angebracht. Zusätzlich sollten noch zwei Fühler im Zentrum des Kabels angeordnet werden. Bei der bauausführenden Firma, die den Einbau der Fühler übernommen hatte, ist es jedoch versäumt worden, dies zu tun, während das Tragkabel aus 37 Einzelseilen zusammengebaut wurde. So konnten die Fühler nur noch nachträglich in den Zwickel unter der äußersten Seillage eingeschoben werden, nachdem diese durch Keile aufgespreizt worden war. Die Leitungen von dieser Meßstelle zur Erfassungsanlage sind zudem offensichtlich durch Vandalismus beschädigt (durchgeschnitten) worden. Dies geschah an einer Stelle, wo die Leitungen das Geländer des während der Umbauarbeiten unterhaltenen Geh- und Radweges kreuzten. Die zerschnittenen Leitungen konnten zwar wieder miteinander verbunden werden, aber die Zuordnung zwischen Meßpunkt und Meßkanal des Erfassungsgerätes war verlorengegangen und konnte nur mühsam durch Testmessungen bei dazu geeigneter Witterung und mit gewissen Unsicherheiten wieder hergestellt werden.

Wie aus den Anlagen 1.1 und 1.2 ersichtlich, wurden den Meßpunkten fortlaufende Nummern gegeben, welche in der Darstellung der Messungen wieder verwendet wurden.

Es fällt vielleicht auf, daß mehrfach Meßpunkte an verschiedenen Stellen mit ähnlichem Tragverhalten bzw. ähnlichen Temperaturbeanspruchungen angeordnet wurden. Solche Redundanzen haben sich jedoch als hilfreich beim gelegentlichen Ausfall einzelner Meßfühler erwiesen.

Die Meßanlage wurde durchlaufend betrieben und zeichnete automatisch alle zwei Stunden die Werte aller angeschlossenen Thermoelemente auf. Dieser Zweistundentakt hat sich als ausreichend erwiesen, um den Tagesverlauf der Temperaturen zu erfassen. Bei aktuellem Bedarf konnten auch Zwischenmessungen gestartet werden. Die Anlage 1.3 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt des Fernschreiberprotokolls, welches gleichzeitig mit dem Lochstreifen erstellt wurde und eine sofortige Verwendung bzw. Überprüfung der Meßwerte ermöglichte.

Es hat beim Betrieb der Meßanlage sehr viele Ausfälle und Unterbrechungen gegeben. Sie wurden verursacht durch

- Ausfall des Dataloggers,
- Einzelne Fühler, die sich von der Unterlage gelöst hatten,
- Leitungs- oder Kontaktstörungen verschiedenster Art,
- Beschädigung durch Unachtsamkeiten bei den Bau- und Montagearbeiten,
- Die planmäßigen Umbauarbeiten am vorhandenen Bauwerk, wobei auch Meßfühler bzw. deren Leitungen demontiert werden mußten,
- Vandalismus (s.o.).

Die Temperaturen der Meßstellen 30 (Steg des Längsträgers B in der Seitenöffnung) und 41 (Lufttemperatur in der Stromöffnung) konnten wegen systematischer Defekte, die teilweise erst nach Abschluß der Messungen entdeckt wurden, bei der Auswertung nicht verwendet werden. Auch der zweite Lufttemperaturfühler (Meßstelle 42 in der Seitenöffnung) lieferte häufig unplausible Meßwerte. Das kann zumindest teilweise damit erklärt werden, daß die frei unter der Brücke hängenden Lufttemperaturfühler den auch für die Umbauarbeiten eingesetzten Brückenbesichtigungswagen störten, wenn er diese Stelle passieren mußte. Dann wurden die Fühler von den Bauarbeitern auf den nächsten

Trägerflansch gelegt - und häufig dort vergessen.

Die Ausfallzeiten bzw. die verbliebenen Meßzeiten sind in den Diagrammen, Anlage 2 dargestellt. Danach war die Meßanlage vom März 1992 bis August 1994 (mit einer längeren Unterbrechung in 1994 infolge der Umbauarbeiten im alten Tragwerksteil) in Betrieb. Für das Nachspannen des neuen Tragkabels zur Lastumlagerung nach Beendigung der Umbauarbeiten im Oktober 1994 wurde die Meßanlage noch einmal kurzfristig in Betrieb genommen. Dabei wurde sie jedoch nur bedarfsweise kurzzeitig eingeschaltet, ohne fortlaufende Aufzeichnung von Meßwerten.

4 Darstellung ausgewählter Meßergebnisse

4.1 Charakteristische Temperaturverläufe

Alle erfaßten Meßwerte wurden zunächst als Monatsganglinien für alle Meßpunkte und für alle Monate graphisch dargestellt, wobei die Temperaturen von räumlich zusammengehörenden Meßpunkten zusammen mit der Lufttemperatur als Ordinatenwerte über der in den Tagen des Monats eingeteilten Zeitachse aufgetragen wurden.

Es wird hier jedoch bewußt darauf verzichtet, alle diese Monatsganglinien in diesen Bericht aufzunehmen. Vielmehr sollen vorrangig die Temperaturverläufe aufgezeigt werden, die sich bei bestimmten charakteristischen Wettersituationen in den Bauteilen ausbilden. Dazu wurden unter Verwendung von Wetterdaten, welche in Form von Klimatabellen vom Deutschen Wetterdienst [6] hierfür zur Verfügung gestellt worden waren, einzelne Tage aus diesen Monatsganglinien ausgewählt und die Temperaturganglinien dieser Tage vergrößert dargestellt. (Interessierten Lesern, welche für bestimmte Aufgaben die vollständig erfaßten Meßwerte benötigen, können diese auf Anforderung zur Verfügung gestellt werden.)

Folgende Witterungskonstellationen wurden ausgewählt und werden nachfolgend näher betrachtet:

4.1.1 Trockenes Frühlingswetter mit sonnigen Tagen und kühlen Nächten in der Zeit vom 13. bis 15. Mai 1992

4.1.1.1 Pylonstiel, Meßprofil 20 m über der Fahrbahn

Die Temperaturverläufe an den Außenseiten des Pylons (Anlage 3) zeigen große Schwankungen zwischen Tag und Nacht, die erheblich größer sind als die Schwankungen der Lufttemperatur. Die Temperaturerhöhung der sonnenbeschienenen Seiten eilt der Lufttemperatur voraus, und es läßt sich auch erkennen, wie lange die einzelnen Seiten des Pylonstieles von der Sonne beschienen wurden, danach knicken die Linien deutlich ab. Selbst in der Nacht sind die Bauteile infolge ihres Speichervermögens noch wärmer als die Luft. Allerdings haben sich dann die Temperaturlinien der vier Seitenflächen weitgehend aneinander angeglichen und verlaufen flacher, woraus man u.a. ableiten kann, daß die zweite Nachthälfte bzw. die frühen Morgenstunden vor Sonnenaufgang die günstigste Zeit sind, um meßtechnische Kontrollen an einem Bauwerk durchzuführen (was bei der Rodenkirchener Brücke auch so gemacht wurde).

Es ist aber zu beachten, daß auch in diesen Morgenstunden noch ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Luft- und Bauteiltemperatur bestehen bleibt.

Die Temperaturen der Meßpunkte an zentraler Stelle der inneren Zellenwände (Anlage 4) zeigen erheblich geringere Schwankungen. Sie laufen der Lufttemperatur nach und lassen das größere Beharrungsvermögen infolge Wärmespeicherung im gesamten Baukörper erkennen. Hier sei auch auf die Temperaturdifferenz zwischen den inneren und den äußeren Bauteilen hingewiesen, die in den frühen Morgenstunden noch mit 4 bis 5°C abgegriffen werden kann.

4.1.1.2 Pylonstiel, Meßprofil 7 m über der Fahrbahn

(Anlagen 5 und 6)

Die Temperaturlinien haben qualitativ den selben Verlauf wie bei dem Meßprofil in 20 m Höhe.

4.1.1.3 Tragkabel in der Mitte der Stromöffnung

(Anlage 7)

Hier zeigt sich im Prinzip zwar die gleiche Tendenz; während der Aufheizphase am Tage eilen die Temperaturen der sonnenbeschienenen Flächen der Lufttemperatur voraus; in der Nacht kühlt die Luft aber erheblich schneller ab als das Bauteil, so daß dann bei diesem Beispiel Temperaturunterschiede von ca. 6°C abgegriffen werden können. Zum Kastenquerschnitt des Pylonstieles besteht nämlich ein grundsätzlicher Unterschied: beim Tragkabel ist die von der Sonne angestrahlte Fläche erheblich kleiner im Verhältnis zur aufzuheizenden Masse als bei den Blechaußenseiten des Pylons. Das hat ein langsames Aufheizen und Abkühlen des Bauteils (mit anderen Worten ein größeres thermisches Beharrungsvermögen) zur Folge. Der obengenannte Unterschied von 6°C zwischen Luft- und mittlerer Bauteiltemperatur stellt sich bei diesem Beispiel nun gerade in den sonst für vermessungstechnische Kontrollen gut geeigneten Nachtstunden ein. Das beweist, daß man sich bei einem für die Bauwerksgeometrie so wichtigen Bauteil wie bei dem Tragkabel einer Hängebrücke nicht auf die Lufttemperatur verlassen darf, sondern die Bauteiltemperatur messen muß (Als Beispiel: Bei der Rodenkirchener Brücke wurde nach Angabe des Prüfindingenieurs bei den Kontrollrechnungen durch die präzise Erfassung aller Montagelasten und der Bauteiltemperaturen - insbesondere des Tragkabels, unter Verwendung der Temperaturmessungen der BAST - eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den rechnerisch ermittelten und den am Bauwerk gemessenen Geometriewerten erreicht).

4.1.1.4 Tragkabel in der rechtsrheinischen Seitenöffnung

(Anlage 8)

Während das Tragkabel im Bereich des Meßprofils in Strommitte nahezu waagrecht verläuft, liegt das Kabel hier im Gefälle zwischen Pylonspitze und Verankerung im Widerlager. Das hat andere Zeiten, während denen die einzelnen Seiten des Kabels von der Sonne angestrahlt werden, zur Folge und damit ein geringfügig geändertes Aufheizverhalten. Sonst gilt das für das Tragkabel in der Mitte der Stromöffnung gesagte auch hier.

4.1.1.5 Hänger in den Achsen B und C auf der rechtsrheinischen Seite

(Anlagen 9 und 10)

Infolge der sehr viel geringeren Masse der Hänger (im Vergleich mit dem Tragkabel) sind die Temperaturunterschiede zwischen Sonnen- und Schattenseite nicht sehr groß. Nach dem steilen Temperaturanstieg am Tag erfolgt ein ebenso schnelles Abkühlen in der Nacht, wo die Temperaturen fast die der Luft annehmen.

4.1.1.6 Längsträger in der Achse C

(Anlagen 11 und 12)

Der oberstromige Längsträger in der Achse C konnte ziemlich ungehindert von der Sonne seitlich angestrahlt werden. Beim Meßpunkt am Stegblech in 1,30 m Höhe wird dieses direkt erwärmt, bei den Meßpunkten an den Flanschen (die immer auf der Innenseite angebracht sind) erfolgt die Erwärmung durch Wärmeleitung in Querrichtung bzw. auch durch Wärmeübertragung von anderen Bauteilen (Fahrbahnplatte).

Das Stegblech hat zudem eine große Fläche, welche Strahlung absorbieren kann und eine (im Vergleich mit anderen Bauteilen) geringe Masse. Dementsprechend erfolgt dort am Tage eine schnelle Erwärmung und ebenso eine schnelle Abkühlung, schon wenn die Sonne weiter gewandert ist. In der Nacht nimmt das Stegblech die Temperatur der Luft an. Im Vergleich dazu haben die Flansche mehr Masse und weniger Abstrahlfläche, so daß sie mehr thermisches Beharrungsvermögen zeigen. Das beschriebene Verhalten ist bei beiden Meßprofilen am Längsträger C (in der Stromöffnung und in der Seitenöffnung) nahezu gleich.

4.1.1.7 Längsträger in der Achse B

(Anlagen 13 und 14)

Der Längsträger in der Achse B unterscheidet sich von der Achse C dadurch, daß er im Schatten der alten Fahrbahnplatte liegt und erst am späten Nachmittag Sonnenschein bekommt, soweit das Deckblech zwischen den Achsen A und B noch nicht aufgelegt ist. Dies war zu diesem Zeitpunkt beim Meßprofil in der Stromöffnung (Anlage 13) noch nicht der Fall, wie aus den Temperaturlinien besonders beim Stegblech gut zu erkennen ist.

Beim Meßprofil in der Seitenöffnung (Anlage 14) konnten die Stegtemperaturen nicht ausgewertet werden (s. o.). Außerdem waren hier die Verbreiterungsbauarbeiten schon so weit fortgeschritten, daß durch die neue Fahrbahnplatte

eine zusätzliche Schattenwirkung entstanden war.

4.1.2 Klares, frostkaltes und trockenes Winterwetter in der Zeit vom 02. bis 04. März 1993

(Anlagen 15 bis 26)

Im Vergleich mit dem sonnigen Frühlingwetter erkennt man, daß auch hier (hauptsächlich in den Stunden der Tagesmitte) ein Erwärmen der sonnenbeschienenen Bauteile bzw. Bauteilseiten stattfindet. Die dabei erreichten Temperaturerhöhungen sind naturgemäß wesentlich geringer. Sonst überwiegt die Abkühlung der Bauteile in der Nacht, wobei keine sehr großen Differenzen zwischen Luft- und Bauteiltemperatur entstehen. Ein interessantes Detail ist am Tragkabel zu beobachten. Dort ist die Temperatur der Oberseite wesentlich niedriger als die der Luft und der anderen Seiten. Das ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Wirkung vom Reif, der sich auf den waagerechten Flächen niedergeschlagen hat.

4.1.3 Heißes, sonniges und trockenes Sommerwetter in der Zeit vom 02. bis 04. August 1994

(Anlagen 27 bis 39)

Die Temperaturverläufe ähneln denen des "trockenen sonnigen Frühlingwetters". Lediglich im frühen Nachmittag des 02. August 1994 ist die Aufheizphase durch Bewölkung unterbrochen worden. Die Temperaturen haben zwar ein höheres allgemeines Niveau als im Frühling, doch die Differenzen zwischen Bauteil- und Lufttemperatur erreichen die Werte des Frühlingsbeispiels weder in der Aufheiz- noch in der Abkühlphase.

4.1.4 Trübes Sommerwetter mit bedecktem Himmel und gelegentlichen Regenfällen in der Zeit vom 26. bis 28. Juli 1993

(Anlagen 40 bis 51)

Die Temperaturverläufe in allen untersuchten Bauteilen zeigen keine großen und besonders keine schnellen Erwärmungs- oder Abkühlvorgänge. Die Bauteiltemperaturen liegen nahe bei der Lufttemperatur. Lediglich am 26.07.93 scheint noch (zeitweise) Sonnenschein gewesen zu sein, und am frühen Nachmittag des 27.07.93 scheint ein Regenschauer für eine

plötzliche Abkühlung gesorgt zu haben. In der übrigen Zeit ist dieses für Bauarbeiten eher "schlechte" Wetter ideal für meßtechnische Kontrollen, weil nur verhältnismäßig geringe temperaturbedingte Verformungen stattfinden.

4.1.5 Naßkaltes Winterwetter mit Temperaturen um den Gefrierpunkt oder kurz darüber und mit gelegentlichen Schnee- oder Schneeregenfällen in der Zeit vom 26. bis 28. Dezember 1993

(Anlagen 52 bis 62)

Beim Vergleich mit dem "trüben Sommerwetter" erkennt man, daß die Temperaturverläufe (und die Temperaturunterschiede) ähnlich sind, allerdings auf einem niedrigeren Niveau.

4.2 Extremwerte

Wie später noch gezeigt werden wird, haben die Temperaturen im Tragkabel den größten Einfluß auf die Geometrie und auf das Tragverhalten des Bauwerkes. Für die Berechnung einer Längänderung des Tragkabels ist die mittlere Temperatur im Kabel anzusetzen. Da die Temperatur im Innern des Kabels nicht gemessen werden konnte, kann die mittlere Temperatur hier nur näherungsweise durch Mitteln der 4 am Umfang gemessenen Temperaturen errechnet werden. Der Fehler dürfte jedoch verhältnismäßig gering sein.

Um Anhaltspunkte für andere ähnliche Bauvorhaben zu geben, wurden für den ganzen Meßzeitraum die mittleren Tragkabeltemperaturen errechnet und daraus der höchste und der niedrigste Wert herausgesucht:

37,4°C, gemessen am 03.7.94 16⁰⁰ Uhr

-5,7°C, gemessen am 25.2.93 8⁰⁰ Uhr.

Außerdem wurde die Differenz der mittleren Tragkabeltemperaturen zur Lufttemperatur errechnet und daraus ebenfalls der höchste und der niedrigste Wert herausgesucht (hierbei wurden allerdings solche Werte ausgesondert, bei denen die Lufttemperatur kurzzeitige, starke Schwankungen gezeigt hatte, die im Vergleich mit den Daten des Deutschen Wetterdienstes nicht nachvollziehbar und wo daher Meßfehler nicht auszuschließen waren):

Die mittlere Tragkabeltemperatur war höher als die Lufttemperatur um

7,8°C, gemessen am 31.8.94 10⁰⁰ Uhr

und niedriger als die Lufttemperatur um

5,8°C, gemessen am 8.12.93 20⁰⁰ Uhr.

In Abschnitt 4.1.1.1 war über die Temperaturverläufe am und im Pylonstiel berichtet und auf die Temperaturdifferenz zwischen äußeren und inneren Bauteilen hingewiesen worden. Als Ergänzung dazu wurden für den ganzen Meßzeitraum die höchste und die niedrigste der an den Pylonaußenflächen gemessenen Temperatur herausgesucht:

43,0°C, gemessen am 15.5.92 16⁰⁰ Uhr

-5,2°C, gemessen am 25.2.93 8⁰⁰ Uhr.

Außerdem wurden für jeden Meßzeitpunkt der Mittelwert der an den Außenflächen gemessenen Temperaturen, der Mittelwert der Temperaturen der inneren Bauteile und die Differenz dieser beiden Mittelwerte errechnet und daraus ebenfalls der höchste und der niedrigste Wert herausgesucht:

Die mittlere Pylonaußenflächentemperatur war höher als die Temperatur der Innenbauteile um

7,4°C, gemessen am 18.3.92 14⁰⁰ Uhr

und niedriger als die Temperatur der Innenbauteile um

6,1°C, gemessen am 17.5.92 2⁰⁰ Uhr.

Als Ergänzung zum Abschnitt 4.1.1.6 (Längsträger in der Achse C) wurden auch für den Längsträger die höchsten und die niedrigsten Temperaturwerte herausgesucht, und zwar jeweils für den Steg und für den oberen Flansch (der ja von den beiden Flanschen die größeren Temperaturveränderungen gezeigt hatte):

Steg:46,6°C, gemessen am 9.8.92 10^o Uhr-6,7°C, gemessen am 23.11.93 6^o UhrFlansch:48,5°C, gemessen am 28.6.94 16^o Uhr-6,5°C, gemessen am 25.2.93 8^o Uhr

Den vorstehend angegebenen Extremwerten der Bauteiltemperaturen sollen noch die Extremwerte der Lufttemperaturen gegenübergestellt werden. Da bei der Erfassung der Lufttemperaturen an der Rodenkirchener Brücke Meßfehler nicht ausgeschlossen werden können, wurden diese Extremwerte den Klimatabellen des Deutschen Wetterdienstes [6] entnommen, allerdings der Vergleichbarkeit wegen nur für Zeiten, in denen die Meßanlage an der Rodenkirchener Brücke auch in Betrieb war:

35,9°C, gemessen am 4.8.94

-9,7°C, gemessen am 25.2.93.

Bei allen diesen Extremwerten ist zu bedenken, daß sie einem relativ kurzen Meßzeitraum von ungefähr zwei Jahren entstammen, in denen es keinen sehr strengen Winter gegeben hat. (Strenge Winter sind in der klimatisch milden Region des Rheinlandes ohnehin selten). Insofern sind diese Meßwerte nur bedingt repräsentativ, was bei ihrer Verwendung für andere Bauvorhaben in anderen Klimaregionen zu bedenken ist. In [10] wurden ähnliche Überlegungen zu Extremwertprognosen angestellt. Dort wurden ebenfalls Meßdaten des Deutschen Wetterdienstes aufbereitet, allerdings wurden diese für einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten den Meteorologischen Jahrbüchern entnommen. Beim Vergleich mit den in [10] angegebenen Bauteiltemperaturen ist aber zu beachten, daß es sich dort um Betonbauwerke handelt, welche wegen ihrer größeren Masse ein erheblich größeres thermisches Beharrungsvermögen besitzen. Dagegen ist bei Stahlbauwerken damit zu rechnen, daß sich deutlich größere Temperaturunterschiede besonders im Tag-Nacht-Zyklus einstellen und daß sich die Bauteile bei Sonneneinstrahlung am Tage erheblich höher als die Lufttemperatur aufheizen.

5 Beispiele für die Verwendung der Meßergebnisse bei besonderen Bau- und Montagezuständen

5.1 Vorbemerkungen

Beim Bau der alten Rodenkirchener Brücke und bei ihrem Wiederaufbau nach dem Krieg war es notwendig gewesen, die Tragwirkung und die geplante Bauwerksgeometrie mit modellstatischen Methoden zu prüfen. Dabei mußten größere, für das Tragwerk aber unschädliche Differenzen zwischen der theoretisch ermittelten und der am Bauwerk gemessenen Geometrie in Kauf genommen werden.

Bei der nun durchgeführten Verbreiterung waren die Genauigkeitsanforderungen schon allein wegen der Anpassung des neuen Tragwerksteiles an den vorhandenen wesentlich höher. Andererseits hat die inzwischen erheblich verbesserte Rechentechnik es ermöglicht, diese Aufgabe ohne modellstatische Untersuchungen und mit größerer Genauigkeit zu lösen.

Um in allen Stadien der Bau- und Umbaumaßnahmen eine Kontrolle darüber zu haben, ob sich die Bauwerksgeometrie (und damit auch die Tragwirkung) wie geplant einstellt, und um mögliche Abweichungen durch Bautoleranzen rechtzeitig zu erkennen, hat der Prüflingenieur - das Ingenieurbüro HRA in Bochum - im Auftrag des LVR eine baubegleitende, statische Berechnung aufgestellt. Darin wurden für ausgewählte Zeitpunkte im Bau- und Montageablauf alle auf das Bauwerk einwirkenden Lasten (außer den Eigengewichten auch alle Geräte, Gerüste, Baumaterialien und dergleichen) und die Bauteiltemperaturen erfaßt und daraus die sich einstellende Bauwerksgeometrie rechnerisch ermittelt. Diese Geometriewerte wurden dann mit den gleichzeitig am Bauwerk gemessenen verglichen.

Es hat sich nach Angabe des Ingenieurbüros HRA gezeigt (was auch qualitativ nachvollziehbar ist), daß Temperaturänderungen des Tragkabels den größten Anteil an den Bauwerksverformungen liefern. Demgegenüber treten die Auswirkungen der Temperaturen in den Pylonen und in den Hängern (wegen deren kleinerer Länge) deutlich zurück. Temperaturunterschiede zwischen Sonnen- und Schattenseite der Pylone bewirken eine Verbiegung der Pylone und damit näherungsweise nur eine Horizontalverschiebung

der Pylonköpfe und der an den Tragkabeln hängenden Fahrbahnkonstruktion. Da der Versteifungsträger zusammen mit der Fahrbahnplatte ein sehr biegeweiches Tragsystem darstellt, haben Temperaturdifferenzen im Versteifungsträger keinen nennenswerten Einfluß auf die Bauwerksgeometrie. Lediglich zu dem Zeitpunkt, als beim Umbau des alten Bauwerksteiles für die Demontage der Beton-Fahrbahnplatte deren elastischer Verbund mit dem Trägerrost gelöst werden mußte, waren die Temperaturen im Versteifungsträger von Bedeutung.

Bei den Tragsystemen, die der baubegleitenden, statischen Berechnung zugrunde zu legen waren, hat es sich um statische Systeme höherer Ordnung gehandelt, welche sich geometrisch nicht linear verhalten und bei denen daher die aus einzelnen Lastfällen herrührenden Verformungen nicht einfach additiv überlagert werden können.

5.2 Temperatureinflüsse beim Freivorbau des neuen Tragwerkteiles

Es war ursprünglich geplant, die baubegleitende statische Berechnung dazu heranzuziehen, die Temperatureinflüsse an diesem Bauwerk exemplarisch aufzuzeigen. Wegen des nichtlinearen Verhaltens des Systems und weil die Bauteiltemperaturen immer nur zusammen mit den anderen Lasten in die baubegleitende statische Berechnung eingingen, war der Anteil der Bauteiltemperaturen an der Gesamtverformung aus dieser Berechnung leider nicht zu entnehmen.

Daher mußte hierfür eine eigene Berechnung aufgestellt werden. Im Auftrag der BASt hat ein ehemaliger Mitarbeiter des Ingenieurbüros HRA, der seinerzeit auch die baubegleitende statische Berechnung aufgestellt hatte, mit freundlicher Genehmigung seitens HRA und unter Benutzung der Einrichtungen des Ingenieurbüros (insbesondere Rechner und FE-Rechenprogramm), für einen ausgewählten Montagezustand die Temperaturbeanspruchungen gesondert untersucht [9]. Diese Untersuchung wurde auf einen einzigen Montagezeitpunkt beschränkt, um den Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, und weil es zur Erläuterung der Temperaturmessungen auch ausreichend erscheint. Dabei handelt es sich um den Freivorbau des Versteifungsträgers in der neuen Seilebene zum Zeitpunkt vor dem Einbau des Schlußstückes in Brückenmitte, d.h. der Freivorbau ist von beiden Seiten bis zum Hänger 26 bzw. 26' fortgeschritten.

Diese Bauphase kommt (auch ohne komplizierte Verbreiterungsmaßnahme) bei allen ähnlichen Bauwerken vor und hat daher eine gewisse Allgemeingültigkeit. Die Angaben zum Tragsystem (Abmessungen, Querschnittswerte, Materialkonstanten, Systemdiskretisierung für die FE-Berechnung) und die zu diesem Zeitpunkt einwirkenden Bau- und Montagelasten wurden von der baubegleitenden statischen Berechnung übernommen. Als Temperaturbeanspruchung wurden jedoch nicht die zu diesem Zeitpunkt gemessenen Temperaturen eingesetzt, sondern wegen der exemplarischen Bedeutung wurde diese Berechnung für drei verschiedene Temperaturen durchgeführt, und zwar für die rechnerisch vorgegebene Aufstelltemperatur von 10°C und für die beiden in Abschnitt 4.2 angegebenen Extremwerte der mittleren Tragkabeltemperatur (37,4°C und -5,7°C). Dabei wurden vereinfachend für die anderen Bauteile (insbesondere für die Hänger) dieselben Temperaturwerte eingesetzt. Der dadurch verursachte Fehler bei den resultierenden Bauwerksverformungen ist vernachlässigbar.

Bei den zusammengefaßten Ergebnissen der Berechnung handelt es sich um die an den einzelnen Hängerfußpunkten (HP) auftretenden Vertikalverformungen des Längsträgers. Sie sind in der folgenden Tabelle, in der Anlage 63 als Graphik mit den absoluten Höhen und in der Anlage 64 als Graphik der Höhendifferenzen relativ zur Aufstelltemperatur von 10°C dargestellt.

Aus den vorgenannten Unterlagen und aus der Berechnung selber wurde folgendes entnommen:

Das Tragkabel mit einer Gesamtlänge von 675,20 m verlängerte sich bei einer Erwärmung auf 37,4°C gegenüber der Aufstelltemperatur von 10°C um 222 mm und verkürzte sich bei einer Abkühlung auf -5,7°C um 127 mm. Ebenfalls bezogen auf den Zustand bei der rechnerischen Aufstelltemperatur von 10°C senkte sich der Versteifungsträger beim Hänger 26 (d.h. fast in Brückenmitte) bei der Erwärmung auf 37,4°C um 474 mm, und er hob sich bei der Abkühlung auf -5,7°C um 273 mm. Das entspricht einer Senkung bzw. Hebung des Tragwerkes in der Mitte um ca. 17 mm je 1°C Erwärmung bzw. Abkühlung des Tragkabels. Angesichts des nichtlinearen Systems stellt dieser Durchschnittswert nur eine Näherung dar. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß dieses offene System (der Versteifungsträger fehlte noch

zwischen den Hängerpunkten 26 und 26') verformungsweicher war als das spätere System mit durchlaufendem Versteifungsträger und fertiger, mitwirkender Fahrbahnplatte.

5.3 Betrachtungen zu Temperatureinflüssen beim Anspannen des neuen Tragkabels nach dem Umbau des alten Tragwerkteiles

Nach Montage des neuen und Umbau des alten Tragwerkteiles wurde der bis dahin gelenkige Anschluß der neuen Querträger an den alten Hauptträger biegefest ausgeführt. Anschließend wurde das neue Tragkabel angespannt, um die geplante Bauwerksgeometrie (Gradiente) herzustellen und um Lasten auf das neue Tragkabel

zu verlagern und damit das mittlere der alten Kabel zu entlasten.

Dieses Anheben der Fahrbahnkonstruktion durch Anspannen des Tragkabels erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde noch im gelenkigen Zustand das neue Tragsystem ein wenig angehoben, um es relativ zum alten auszurichten und damit in die geplante Querschnittsform zu bringen. Dann wurde die biegesteife Verbindung hergestellt und danach konnte der eigentliche Anhebe- und Lastumlagerungsvorgang stattfinden. In beiden Schritten erfolgte das Anheben in zwei Stufen: In der ersten Stufe wurde ein größerer Teil des gesamten Anhebeweges ausgeführt, die zweite Stufe ermöglichte nach der Zwischenkontrolle eine "Feineinstellung".

Die nachfolgenden Anspannwege (jeweils an

Längsträgerverformungen infolge Temperatureinfluß:

(aus [9] entnommen):

HP	Brücken- längsachse	Temperatur -5,7° C	Höhen- unter- schied	Aufstelltemperatur 10° C	Höhen- unter- schied	Temperatur 37,4° C	
	[m]	H. ü. NN [m]	[mm]	H. ü. NN [m]	[mm]	H. ü. NN [m]	
HP 0:	-283,50	58,9420	0	58,9420	0	58,9420	Widerlager
HP 1:	-273,00	58,9971	2	58,9954	-3	58,9927	
HP 2:	-262,50	59,0385	3	59,0356	-5	59,0307	
HP 3:	-252,00	59,1206	3	59,1172	-6	59,1113	
HP 4:	-241,50	59,1587	3	59,1556	-5	59,1502	
HP 5:	-231,00	59,2203	2	59,2184	-3	59,2150	
HP 6:	-220,50	59,2570	0	59,2570	0	59,2570	Hilfsstütze
HP 7:	-210,00	59,2959	-2	59,2982	4	59,3021	
HP 8:	-199,50	59,3463	-3	59,3493	5	59,3543	
	-189,00	59,4279	0	59,4277	0	59,4274	Pylonrahmen
HP 10:	-178,50	59,5577	8	59,5496	-14	59,5356	
HP 11:	-168,00	59,7231	21	59,7024	-36	59,6668	
HP 12:	-157,50	59,9026	37	59,8658	-63	59,8025	
HP 13:	-147,00	60,0876	55	60,0325	-95	59,9375	
HP 14:	-136,50	60,2646	75	60,1897	-129	60,0607	
HP 15:	-126,00	60,4267	95	60,3315	-164	60,1673	
HP 16:	-115,50	60,5590	115	60,4435	-200	60,2440	
HP 17:	-105,00	60,6678	136	60,5322	-234	60,2981	
HP 18:	-94,50	60,7477	155	60,5928	-268	60,3252	
HP 19:	-84,00	60,7935	173	60,6202	-300	60,3205	
HP 20:	-73,50	60,8097	191	60,6189	-330	60,2889	
HP 21:	-63,00	60,8055	207	60,5985	-358	60,2401	
HP 22:	-52,50	60,7864	222	60,5642	-385	60,1794	
HP 23:	-42,00	60,7592	236	60,5229	-409	60,1135	
HP 24:	-31,50	60,7288	249	60,4795	-432	60,0474	
HP 25:	-21,00	60,6988	261	60,4373	-454	59,9837	
HP 26:	-10,50	60,6735	273	60,4002	-474	59,9260	
HP 27:	0,00						Brückenmitte

beiden Enden) und die gemessenen Höhen des Hauptträgers in Brückenmitte sind einer Aufstellung entnommen worden, welche freundlicherweise vom Ingenieurbüro HRA hierfür zur Verfügung gestellt wurde. Bei den als Höhendifferenz gemessenen Anhebemaßen wurden die zwischen den Meßterminen aufgetretenen Temperaturdifferenzen mit einem Näherungswert berücksichtigt: 1°C Temperaturerhöhung bzw. -erniedrigung im Tragkabel bewirkt eine Absenkung bzw. Anhebung in Brückenmitte von 15 mm. Dieser Näherungswert wird anschließend noch einer besonderen Betrachtung unterzogen. Das 675,20 m lange Tragkabel erfährt bei einer Temperaturerniedrigung um 1°C eine Verkürzung von

$$675200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} = 8,1 \text{ mm.}$$

Diese Verkürzung könnte als ein Anspannen des Tragkabels von 4,05 mm an jedem Ende angesehen und damit versucht werden, eine Beziehung zwischen Temperaturänderungen im Tragkabel und Höhenänderungen des Brückendecks herzustellen:

$$\frac{\Delta h}{1^\circ\text{C}} = \frac{\Delta H}{\Delta Z} \times 4,05$$

Aus den Ergebniswerten (letzte Zeile der Tabelle) läßt sich folgendes erkennen:

Der Wert von 14,8 mm in der ersten Stufe des ersten Schrittes trifft sehr gut den o.g. Näherungswert von 15 mm Verformung je 1°C Temperaturänderung.

Der Wert von 17,1 mm in der zweiten Stufe des ersten Schrittes erläutert die geometrische Nichtlinearität des Systems, d.h. durch das Anspannen in der ersten Stufe hat sich die Geometrie des Systems verändert.

Im ersten Schritt, wo die neuen Querträger noch gelenkig am alten Tragwerk angeschlossen sind, wirkt nur ein zweidimensionales statisches System in der Ebene des neuen Tragkabels. Im zweiten Schritt, wo inzwischen der biegesteife Anschluß hergestellt worden ist, wirkt ein räumliches statisches System, und es finden Lastumlagerungen zwischen den drei Tragkabeln statt. Das neue Tragkabel hat zusätzliche Lasten übernommen und sich deshalb zusätzlich gedehnt. Deshalb ist die Ableitung einer (auch nur näherungsweise) Temperatur-Verformungsbe-

ziehung aus den Verformungen des zweiten Schrittes falsch und die dort ermittelten Werte der nachfolgenden Tabelle sind nicht verwendbar.

6 Schlußfolgerungen und Empfehlungen

Wie aus den Abschnitten 4 und 5 zu entnehmen ist, stellen die Verformungen einzelner Bauteile infolge Temperaturänderungen je nach der Art des Tragsystems eine nicht zu vernachlässigende Einflußgröße auf Bauwerksgeometrie und Tragwirkung dar. Ob es sich im konkreten Fall um ein solches, für diese Beanspruchungen empfindliches Tragsystem handelt und welche Bauteile dabei von Bedeutung sind, sollte durch eine statische Vorberechnung mit Parameterstudien geklärt werden. Damit läßt sich dann auch der erforderliche Umfang der Messungen eingrenzen. Der wegen der grundsätzlichen Bedeutung dieser Messungen und im Bemühen um eine vollständige Darstellung des Problems von der BAST an der Rodenkirchener Brücke getriebene Meßaufwand ist möglicherweise in diesem Umfang nicht in jedem Einzelfall erforderlich.

Da für die Beurteilung des Bauwerksverhaltens nicht nur einzelne Temperaturen, sondern auch Temperaturverläufe von Bedeutung sind, wird davon abgeraten, mit Handgeräten Einzelmessungen vorzunehmen. Statt dessen sollten Meßfühler installiert und deren Werte über einen längeren Zeitraum (ca. 48 Stunden vor einem kritischen Montageschritt) in regelmäßigen Zeitabschnitten aufgezeichnet werden. Dann läßt sich der Temperaturverlauf leicht ablesen und eventuell auch vorausschätzen, Meßfehler und die Auswirkungen kritischer Wettersituationen können besser erkannt werden, und es besteht eine Kontrollmöglichkeit für Auftraggeber und Prüfenieur.

Daß eine solche Meßanlage vor Diebstahl und Vandalismus geschützt werden muß, erscheint schon fast selbstverständlich. Aber es genügt nicht, die zentralen Erfassungsgeräte in einem verschließbaren Raum unterzubringen; es ist offensichtlich auch erforderlich, für die Anbringung von Meßfühlern am Bauwerk allgemein zugängliche Stellen zu meiden und Meßkabel in der Nähe von öffentlichen Wegen in Schutzrohren zu verlegen.

Die Meßtätigkeit der BAST an der Rodenkirchener Brücke wurde von den bauausführenden

	1. Schritt		2. Schritt	
	Querträger gelenkig		Querträger biegesteif	
	1. Stufe	2. Stufe	1. Stufe	2. Stufe
Anspannweg (ΔZ) [mm]	125	40	724	70
Höhe in Brückenmitte [m ü. NN]				
vorher	58,376	58,773	58,722	60,244
nachher	58,773	58,912	60,907	60,492
Differenz [mm]	397	139	2185	248
Temperatur im Kabel [°C]				
vorher	11	15	13	11
nachher	15	17	12	9
ΔT	4	2	-1	-2
Näherungswert Korrektur Δh_T [mm]	+60	+30	-15	-30
korrigierte Höhendifferenz ΔH [mm]	457	169	2170	218
$\Delta H / \Delta Z$	3,66	4,23	3,00	3,11
$\Delta h / 1^\circ\text{C}$ [mm]	14,8	17,1	12,1	12,6

Firmen zwar wohlwollend geduldet (was bis zu gelegentlichen Hilfsleistungen ging), aber sie blieb immer ein Fremdkörper im Bauablauf. Meßfühler wurden aus Unkenntnis beschädigt oder mußten kurz nach ihrer Installation wieder demontiert werden, weil der Ablauf der Bauarbeiten dies erforderte. Solche Schwierigkeiten der Koordinierung von Bau- und Meßtätigkeit ließen sich zumindest reduzieren, wenn beide Tätigkeiten in einer Hand wären. Daraus folgt die Empfehlung, bei entsprechenden komplexen Bauvorhaben, welche solche Temperaturmessungen erfordern, diese in den Vertrag mit der bauausführenden Firma einzuschließen, natürlich mit der Maßgabe, daß die Meßergebnisse dem Auftraggeber und dem Prüfenieur jederzeit zur Verfügung stehen.

7 Zusammenfassung

Bei der Ausführung von komplizierten Bau- oder Umbaumaßnahmen kann es erforderlich werden,

das Trag- und Verformungsverhalten des Bauwerkes ständig meßtechnisch zu überwachen. Bei dafür empfindlichen Tragwerkssystemen müssen auch die Verformungen (und eventuell Zwängungen) infolge Temperaturbeanspruchungen beachtet werden. Dabei sind vorrangig die Temperaturen an oder in den hierfür maßgebenden Bauteilen und weniger die Lufttemperaturen zu erfassen.

Eine Gelegenheit, diese Zusammenhänge exemplarisch aufzuzeigen, bot sich bei Verbreiterung und Umbau der Rodenkirchener Brücke. Hier wurde weltweit erstmalig eine echte (d.h. erdverankerte) Hängebrücke unter ständiger Aufrechterhaltung eines vierstreifigen Verkehrs nur durch Hinzufügen eines dritten Tragkabels (mit den zugehörigen Bauteilen wie Pylon, Versteifungsträger und Stahl-Fahrbahn) auf die doppelte Breite gebracht. Nach der Montage des neuen Tragwerksteiles wurde der Verkehr auf diesen umgelegt, die streusalzgeschädigte Betonfahrbahnplatte des alten Bauwerksteiles ausgebaut

und (auch zur Gewichtsersparnis) durch eine Stahl-Leichtfahrbahn ersetzt. Danach wurde der zunächst nur gelenkig angeschlossene neue Fahrbahn-Trägerrost mit dem alten biegesteif verbunden und das vorher abgesenkte neue Tragkabel durch Anspannen gehoben, wobei es zusätzliche Lasten übernahm und damit das mittlere der alten Tragkabel entlastete und wobei dann auch die geplante Bauwerksgeometrie (Gradiente) endgültig eingestellt wurde. Dieser Bauablauf setzte erhöhte Genauigkeitsanforderungen im Hinblick auf die Erfassung und Prüfung der sich einstellenden Bauwerksgeometrie voraus, und deshalb war hier eine baubegleitende statische Berechnung, in welcher neben den Eigengewichten und allen Bau- und Montagelasten auch die Bauteiltemperaturen erfaßt wurden, unumgänglich.

Die BAST hat an diesem Bauwerk eine Temperaturmeßanlage installiert. An allen Hauptbauteilen (Tragkabel, Hänger, Pylon und Hauptträger) wurden Thermoelemente angebracht, die mittels Ausgleichsleitungen an eine zentrale Erfassungsanlage angeschlossen waren. Diese hat im Rhythmus von zwei Stunden die Temperaturen abgerufen und gespeichert. Diese Meßanlage war - mit Unterbrechungen - von März 1992 bis August 1994 in Betrieb.

Die Meßergebnisse wurden in der BAST in der Form von Temperaturganglinien graphisch ausgewertet. Aus diesen Temperaturganglinien wurden in diesem Bericht exemplarisch einzelne Tage mit charakteristischen Witterungskonstellationen ausgewählt und die sich dabei einstellenden Temperaturverläufe aufgezeigt. Daraus kann man erkennen, daß sich die Bauteile unter der Sonnenbestrahlung stark (und meist höher als die Lufttemperatur) aufheizen, und es konnte daraus abgeleitet werden, daß sogenanntes "schönes" Wetter (Tage mit Sonnenschein und womöglich noch mit kühlen Nächten) wegen der sich dabei einstellenden großen Temperaturdifferenzen bzw. -veränderungen denkbar ungeeignet für meßtechnische Kontrollen ist. Besser geeignet ist trübes Wetter ohne Sonne. Außerdem sollte man meßtechnische Kontrollen möglichst in der Nacht oder in den frühen Morgenstunden vornehmen, weil dann die Bauteiltemperaturen weitgehend ausgeglichen sind. Außer den ausgewählten Temperaturverläufen wurden auch die innerhalb des Meßzeitraumes festgestellten Extremwerte angegeben. So betrug die höchste an einem Bauteil gemessene Temperatur 48,5°C, die niedrigste -6,7°C.

Welches Bauteil mit seinen Temperaturänderungen den größten und maßgebenden Einfluß auf die gesamte Bauwerksgeometrie hat, ist im konkreten Fall durch eine statische Vorberechnung mit Parameterstudie zu klären. Bei der Rodenkirchener Brücke haben die Meßergebnisse der BAST auch dem LVR und dem von ihm beauftragten Prüfenieur für die rechnerischen und meßtechnischen Kontrollen direkt zur Verfügung gestanden. Dabei hat sich gezeigt (und das gilt damit bei allen Hängebrücken), daß Temperaturänderungen im Tragkabel den größten Anteil an den Bauwerksverformungen liefern. Nach Angabe des Prüfenieurs bewirkt eine Temperaturerhöhung bzw. -erniedrigung des Tragkabels um 1°C eine Absenkung bzw. Anhebung in Brückenmitte um 15 mm. Dieser Wert ist aber nur als eine grobe Näherung anzusehen. Bei diesem Tragwerk handelt es sich um ein System höherer Ordnung, welches sich geometrisch nicht linear verhält, so daß die aus mehreren Lastfällen herrührenden Verformungen nicht einfach additiv überlagert werden können. Das gilt schon bei der Betrachtung eines Tragseiles (im Bauzustand "gelenkiger Anschluß"), vermehrt aber noch beim "Dreiseilsystem" im Endzustand. Um aber genauere Werte der temperaturbedingten Verformungen angeben zu können, wurden in einer extern angefertigten statischen Berechnung für einen ausgewählten Bauzustand (Freivorbau des neuen Hauptträgers kurz vor Einbau des Schlußstückes) die Verformungen infolge Temperaturänderungen unabhängig von anderen Lasten errechnet. Dazu wurden exemplarisch die höchste und die niedrigste im Tragkabel gemessene mittlere Temperatur angesetzt. Bezogen auf die rechnerische Aufstelltemperatur von 10°C ergab eine Erwärmung auf 37,4°C eine Absenkung am Vorbauende (fast in Brückenmitte) von 474 mm, eine Abkühlung auf -5,7°C ergab eine Anhebung um 273 mm.

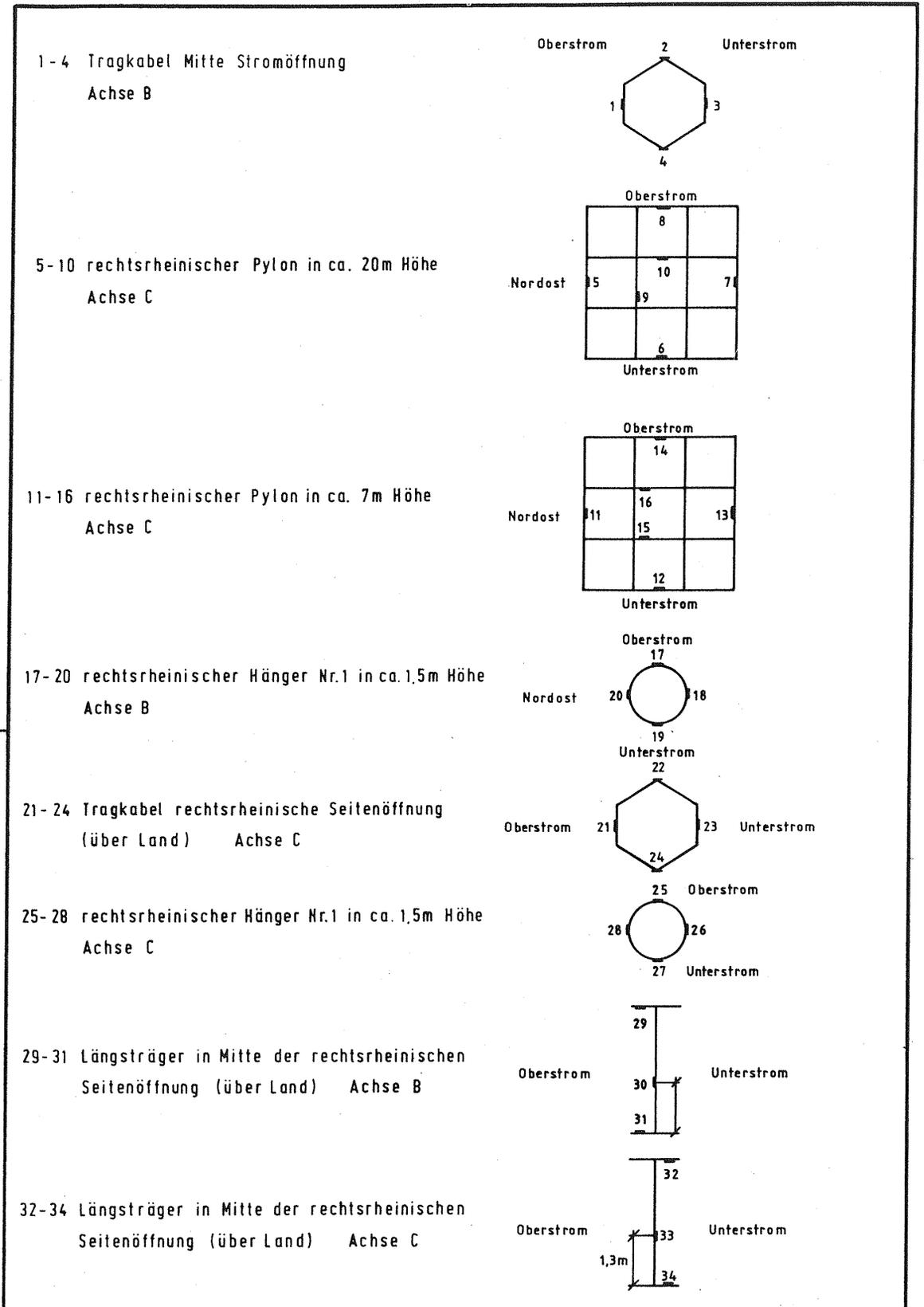
Abschließend wurden Empfehlungen gegeben für diejenigen, die vor einer ähnlichen Bauaufgabe stehen. Ganz bewußt wurden Probleme, Unzulänglichkeiten und die kleinen Widrigkeiten des Meßalltages nicht verschwiegen.

Den Mitarbeitern des Autobahnamtes Köln beim Landschaftsverband Rheinland, den (ehemaligen und noch dort angestellten) Mitarbeitern und der Leitung des Ingenieurbüros HRA in Bochum und dem Deutschen Wetterdienst, Wetteramt Essen, gebührt Dank für die tatkräftige Unterstützung dieser Untersuchung.

8 Literatur

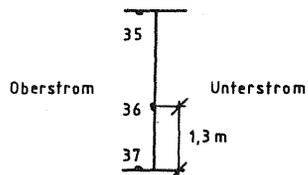
- [1] H. SCHAUTES, H. Runkel, P. Dünnebacke: Verbreiterung und Umbau der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen, Bauwerksgeschichte und Entwurf, Ausschreibung und Vergabe 1990. Bauingenieur 69 (1994), Seite 313 - 343.
- [2] W. ROOSEN, J. Haensel, W. Piel: Verbreiterung und Umbau der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen, Entwurfs- und Ausführungsplanung. Bauingenieur 69 (1994), Seite 447 - 456.
- [3] Erweiterung der Tacoma Narrows Bridge in Diskussion, Kurzbericht. Bauingenieur 69 (1994), Seite 446.
- [4] Der Bundesminister für Verkehr, Der Minister für Wirtschaft und Verkehr - Oberste Straßenbaubehörde des Landes Nordrhein-Westfalen, Der Direktor des Landschaftsverbandes Rheinland - Straßenbauabteilung: Denkschrift zur Verkehrsübergabe der wiederhergestellten Autobahnbrücke über den Rhein in Rodenkirchen bei Köln. Berlin, Springer 1954.
- [5] Der Bundesminister für Verkehr, Der Minister für Städtebau und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Der Direktor des Landschaftsverbandes Rheinland: Die Rheinbrücke Rodenkirchen, Dezember 1994.
- [6] Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Essen, Synoptische Klimatabellen, Station Köln-Wahn.
- [7] W. ROOSEN, J. Haensel, R. Hornby, W. Piel: Verbreiterung und Umbau der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen, Technische Bearbeitung für den Überbau. Bauingenieur 70 (1995), Seite 411 - 423.
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Brücken der Bundesfernstraßen 1995, Verkehrsblatt - Verlag Nr. B 5133 - Vers. 11/95, Seite 23 - 37.
- [9] W. PIEL: Neuberechnung eines ausgewählten Teiles der baubegleitenden statischen Berechnung zur Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen, Januar 1996, (unveröffentlicht).
- [10] H. KNABENSCHUH: Temperaturunterschiede an Betonbrücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 3, Dezember 1993.

Anlagen

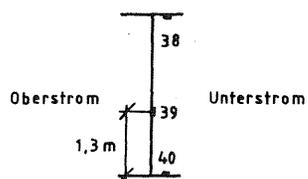


<p>BAST Bergisch Gladbach B 4</p>	<p>Rodenkirchener Brücke Meßstellenanordnung</p>	<p>Anlage : 1.1 Bearbeit.: <i>Be.</i></p>
--	--	---

35-37 Längsträger in Stromöffnung bei Hänger Nr. 15
Achse B



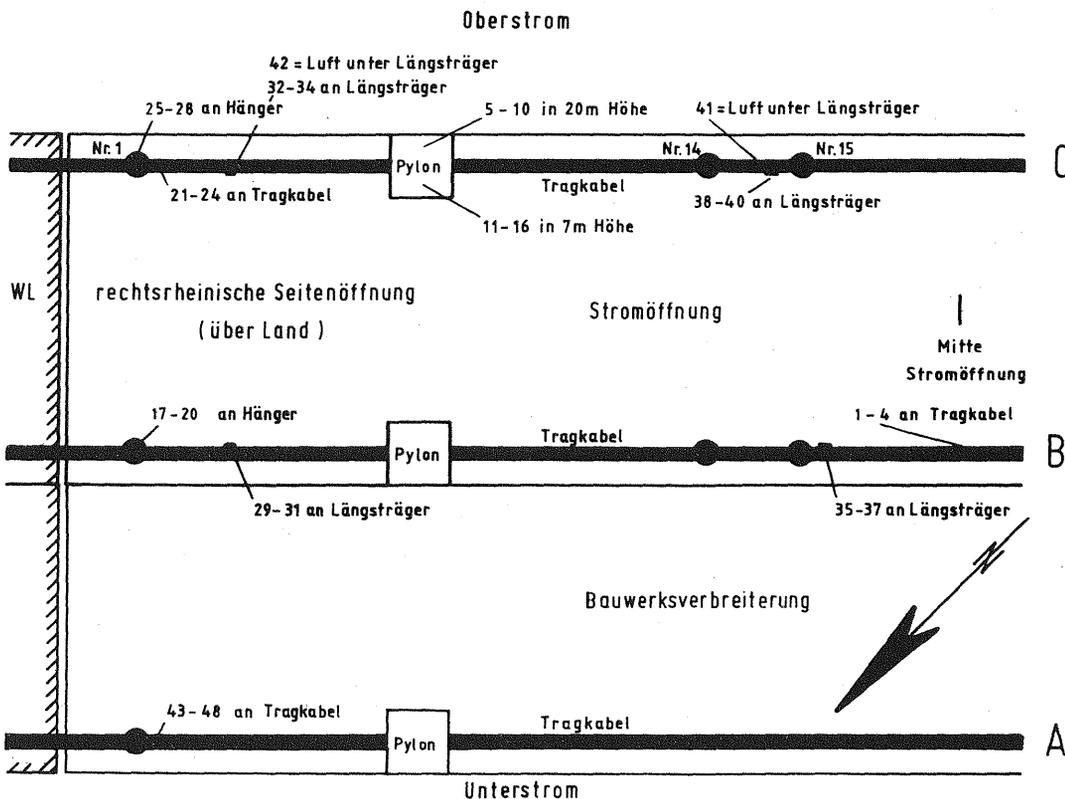
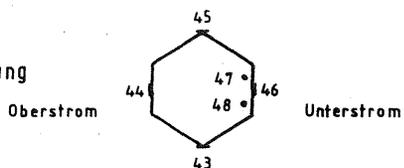
38-40 Längsträger in Stromöffnung bei Hänger Nr. 15
Achse C



41 Lufttemperatur ca. 0,5m unter UK Längsträger in Stromöffnung (über Wasser)

42 Lufttemperatur ca. 0,5m unter UK Längsträger in Seitenöffnung (über Land)

43-48 neues Tragkabel rechtsrheinische Seitenöffnung
(über Land) Achse A

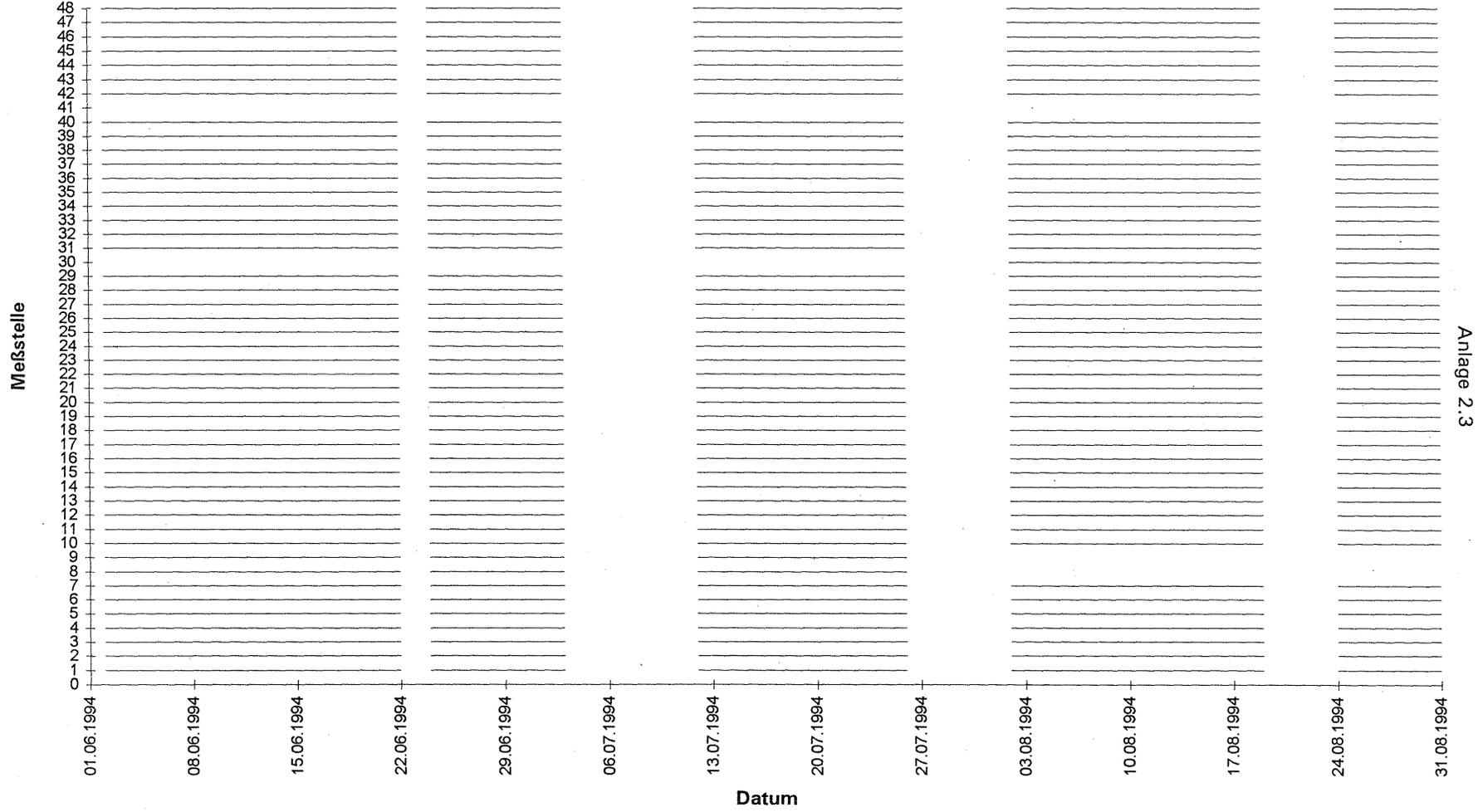


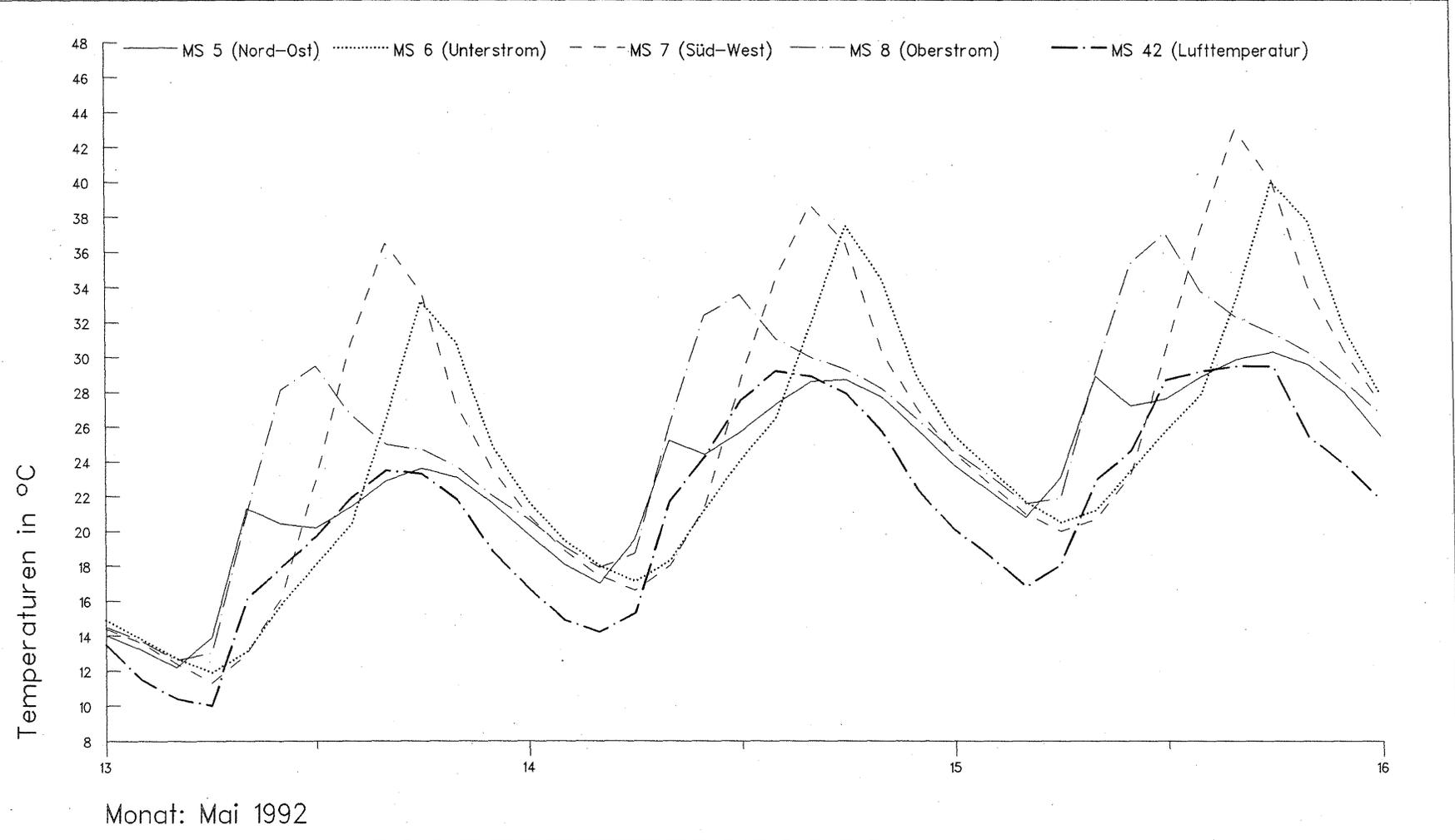
<p>BAST Bergisch Gladbach B 4</p>	<p>Rodenkirchener Brücke Meßstellenanordnung</p>	<p>Anlage : 1.2 Bearbeit.: <i>Be.</i></p>
--	--	---

Anlage 1.3

92-05-14 12.00.00							
CH001	28.2	C	CH002	32.1	C	CH003	24.7 C
CH004	26.0	C	CH005	25.7	C	CH006	24.1 C
CH007	28.6	C	CH008	33.6	C	CH009	22.2 C
CH010	23.1	C	CH011	25.4	C	CH012	24.8 C
CH013	28.7	C	CH014	34.5	C	CH015	21.0 C
CH016	22.2	C	CH017	33.5	C	CH018	33.9 C
CH019	32.9	C	CH020	32.8	C	CH021	31.2 C
CH022	31.5	C	CH023	24.3	C	CH024	25.6 C
CH025	29.7	C	CH026	30.3	C	CH027	29.9 C
CH028	29.9	C	CH029	25.7	C	CH030	34.1 C
CH031	22.3	C	CH032	37.1	C	CH033	39.2 C
CH034	32.3	C	CH035	30.5	C	CH036	25.7 C
CH037	24.3	C	CH038	35.6	C	CH039	36.6 C
CH040	27.8	C	CH041	26.2	C	CH042	27.5 C
↑							
92-05-14 14.00.00							
CH001	29.0	C	CH002	33.1	C	CH003	27.0 C
CH004	28.2	C	CH005	27.3	C	CH006	26.5 C
CH007	34.4	C	CH008	31.1	C	CH009	23.9 C
CH010	24.8	C	CH011	26.8	C	CH012	27.4 C
CH013	33.8	C	CH014	30.9	C	CH015	22.5 C
CH016	23.6	C	CH017	34.8	C	CH018	35.0 C
CH019	34.8	C	CH020	34.5	C	CH021	30.3 C
CH022	33.4	C	CH023	27.6	C	CH024	28.5 C
CH025	30.5	C	CH026	30.5	C	CH027	30.5 C
CH028	30.4	C	CH029	29.0	C	CH030	37.2 C
CH031	25.6	C	CH032	35.9	C	CH033	30.9 C
CH034	34.0	C	CH035	32.6	C	CH036	28.0 C
CH037	26.8	C	CH038	35.3	C	CH039	29.2 C
CH040	29.7	C	CH041	26.0	C	CH042	29.2 C
↑							
92-05-14 16.00.00							
CH001	29.9	C	CH002	34.1	C	CH003	29.5 C
CH004	29.2	C	CH005	28.6	C	CH006	31.9 C
CH007	38.7	C	CH008	30.0	C	CH009	25.7 C
CH010	26.2	C	CH011	28.1	C	CH012	33.0 C
CH013	36.8	C	CH014	29.2	C	CH015	24.2 C
CH016	25.1	C	CH017	37.1	C	CH018	38.8 C
CH019	38.7	C	CH020	37.0	C	CH021	30.0 C
CH022	33.4	C	CH023	32.9	C	CH024	29.9 C
CH025	33.0	C	CH026	34.1	C	CH027	34.1 C
CH028	32.9	C	CH029	30.9	C	CH030	42.3 C
CH031	27.8	C	CH032	33.6	C	CH033	29.6 C
CH034	31.4	C	CH035	36.2	C	CH036	34.6 C
CH037	29.3	C	CH038	32.8	C	CH039	28.6 C
CH040	29.0	C	CH041	28.7	C	CH042	28.9 C
↑							
92-05-14 18.00.00							
CH001	30.0	C	CH002	31.9	C	CH003	29.6 C
CH004	29.2	C	CH005	28.7	C	CH006	37.5 C
CH007	36.5	C	CH008	29.3	C	CH009	27.6 C
CH010	27.5	C	CH011	27.9	C	CH012	37.6 C
CH013	33.0	C	CH014	28.3	C	CH015	26.0 C
CH016	26.1	C	CH017	33.2	C	CH018	33.2 C
CH019	34.7	C	CH020	33.5	C	CH021	29.7 C
CH022	32.4	C	CH023	36.2	C	CH024	30.6 C
CH025	31.6	C	CH026	31.7	C	CH027	32.1 C
CH028	31.7	C	CH029	30.9	C	CH030	40.1 C
CH031	28.6	C	CH032	30.6	C	CH033	28.3 C
CH034	29.3	C	CH035	35.3	C	CH036	38.1 C
CH037	30.4	C	CH038	30.9	C	CH039	29.2 C
CH040	28.9	C	CH041	28.4	C	CH042	27.9 C

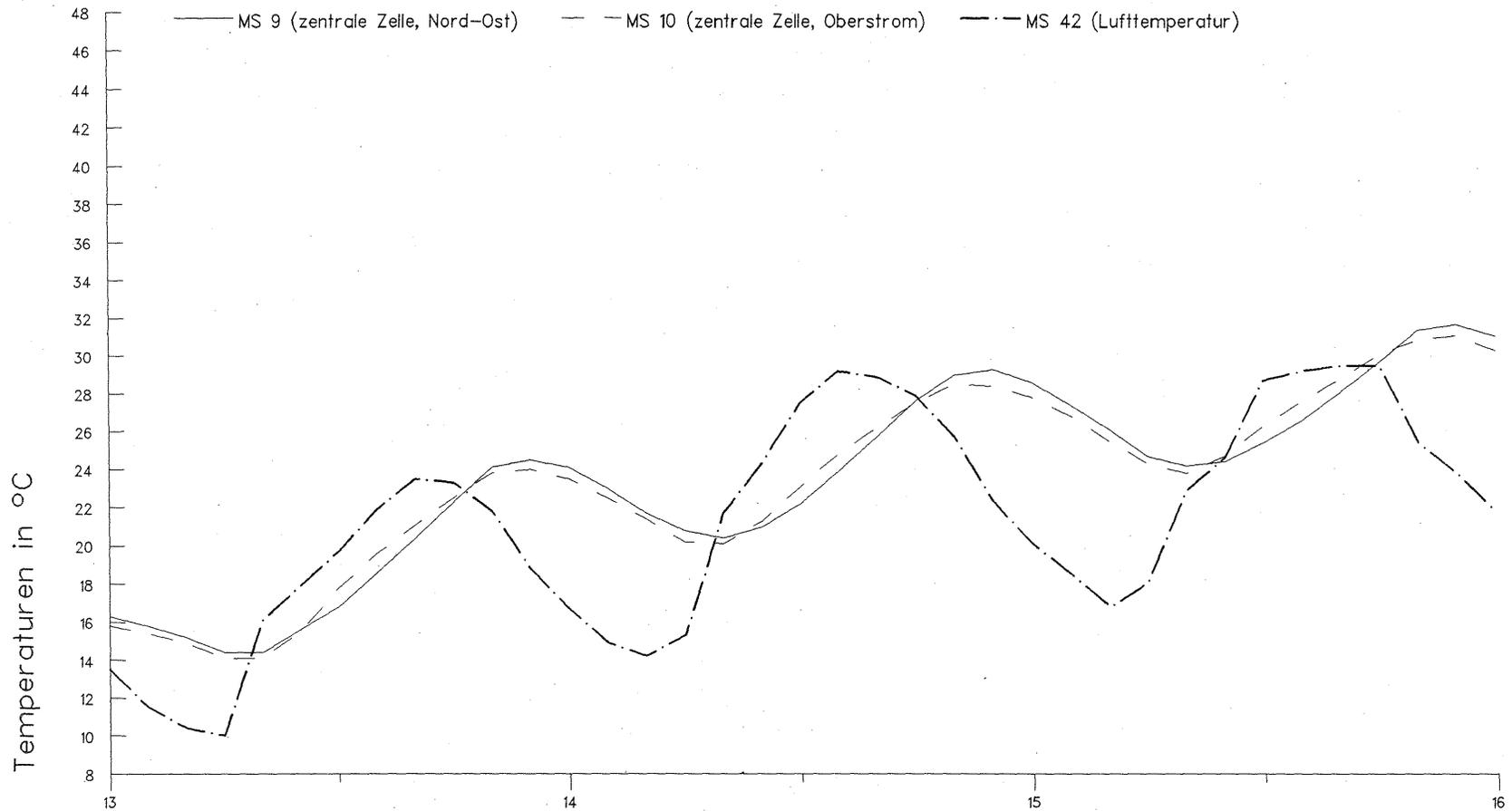
Messungen Rodenkirchen 1994





Anlage 3

Bast B4	Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m Dateiname: 9205R
------------	--



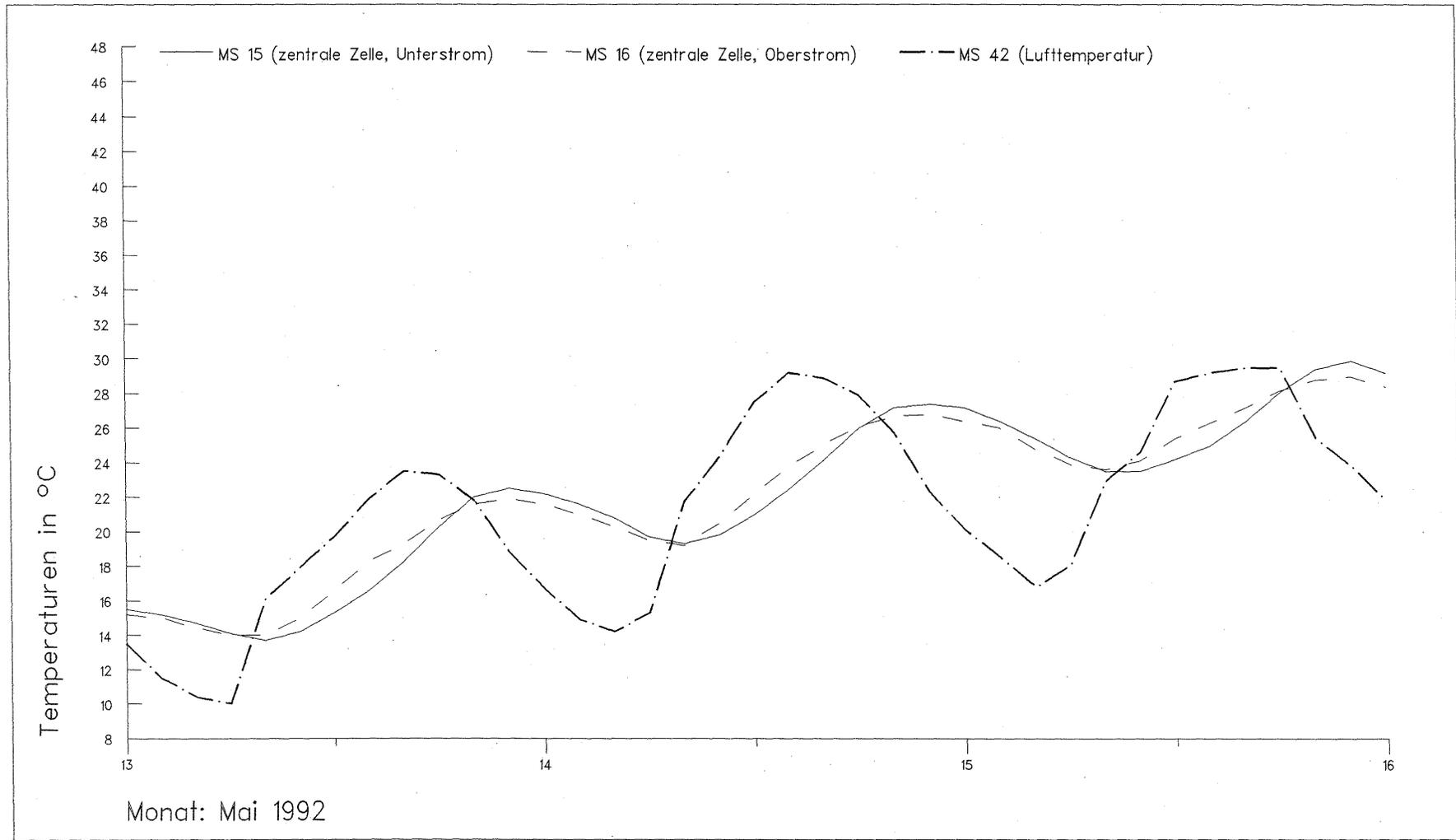
Monat: Mai 1992

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9205R

Anlage 4

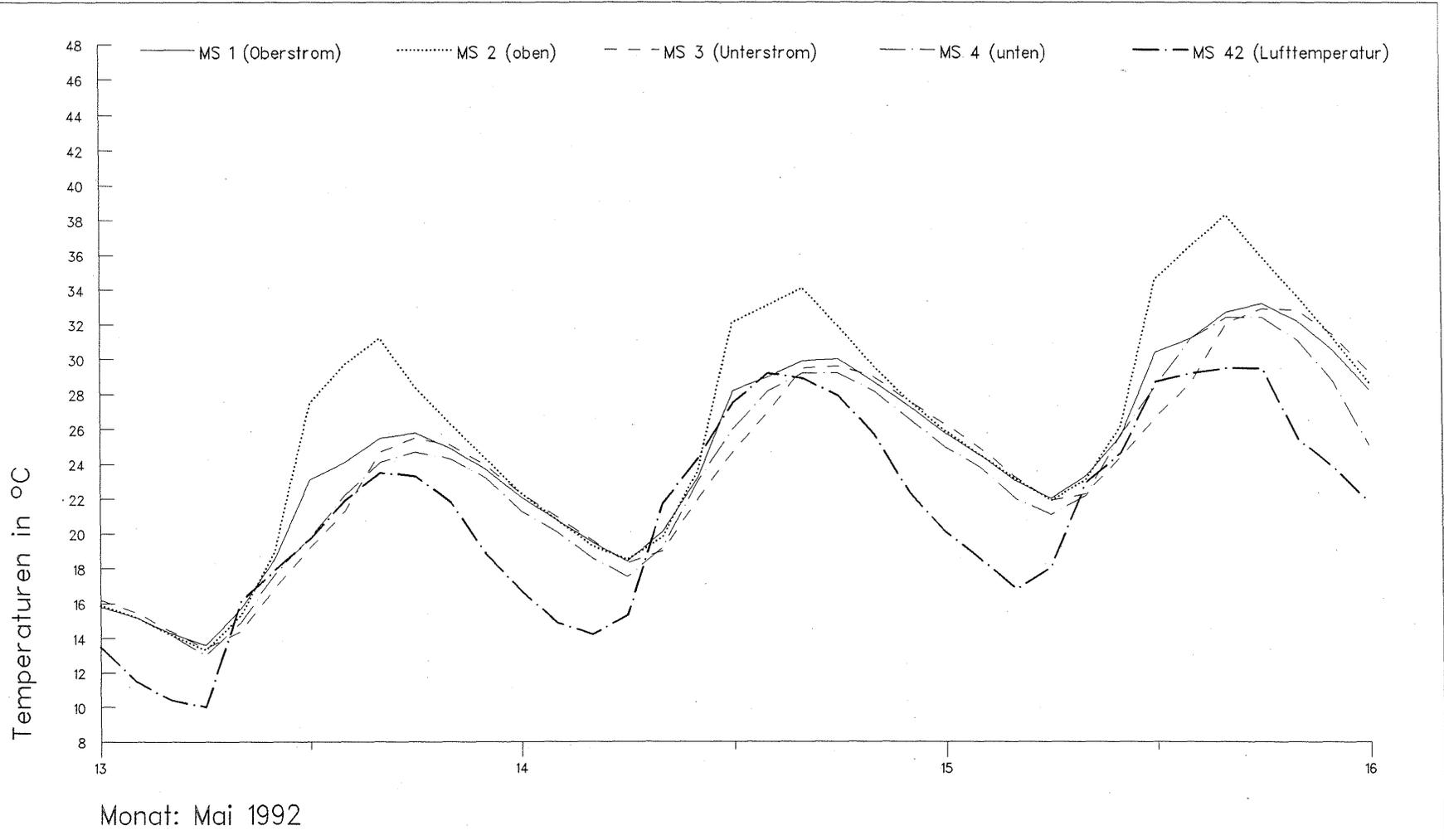


Anlage 6

Bast
B4

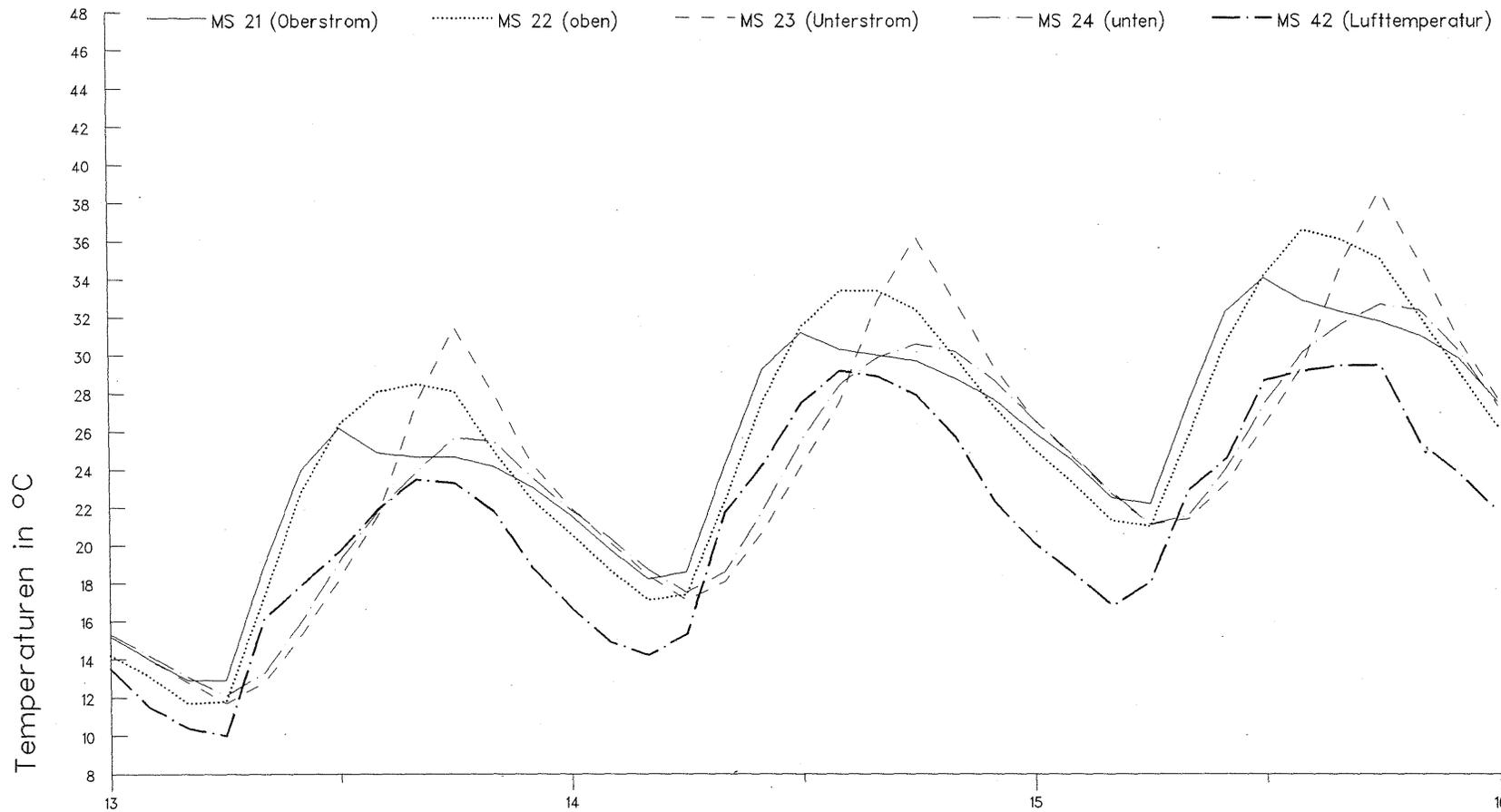
Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9205R



Anlage 7

Bast B4	Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke Tragkabel, Achse B (in Mitte der Stromöffnung)	Dateiname: 9205R
------------	---	------------------



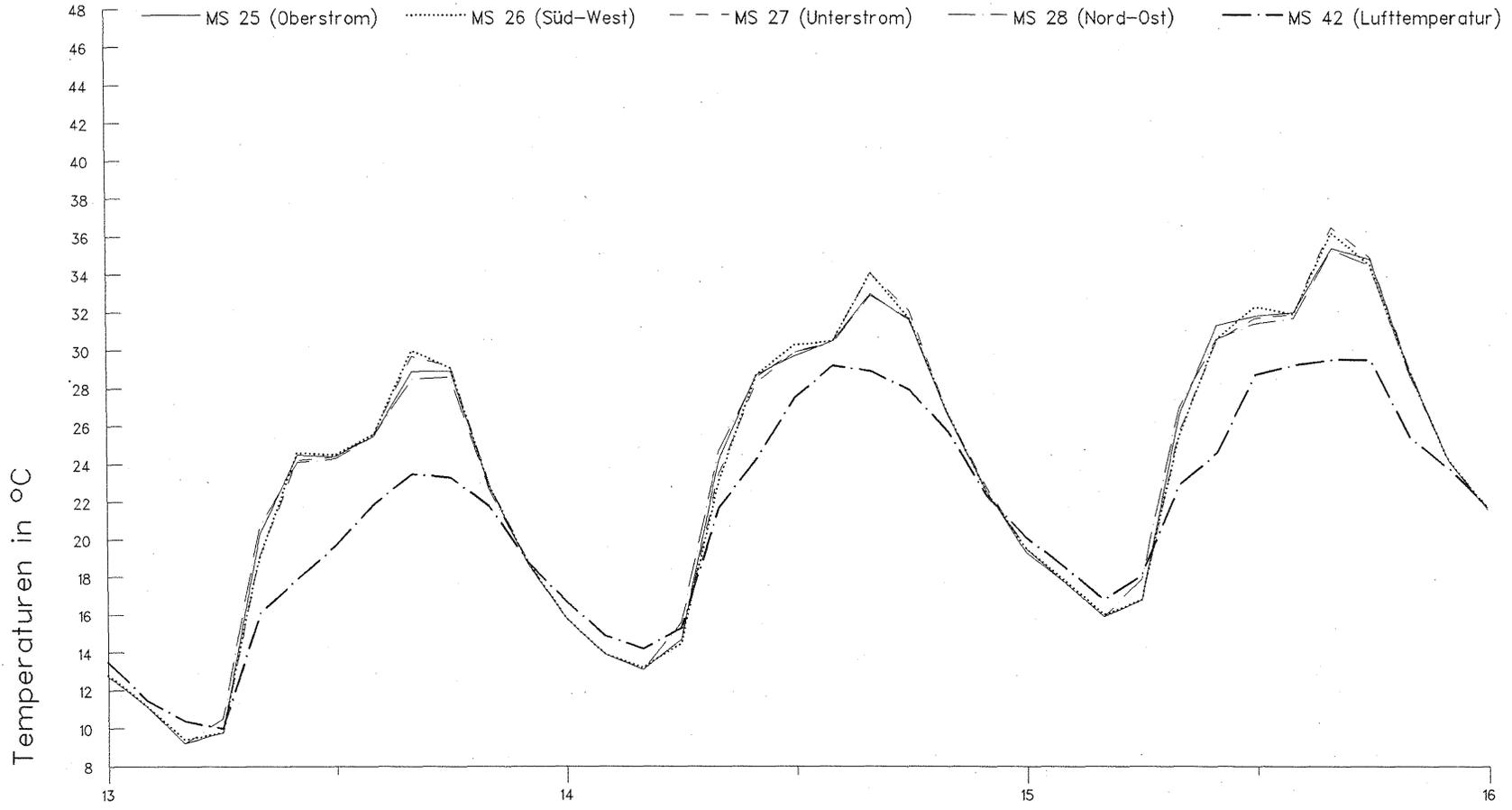
Monat: Mai 1992

Anlage 8

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse C (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9205R



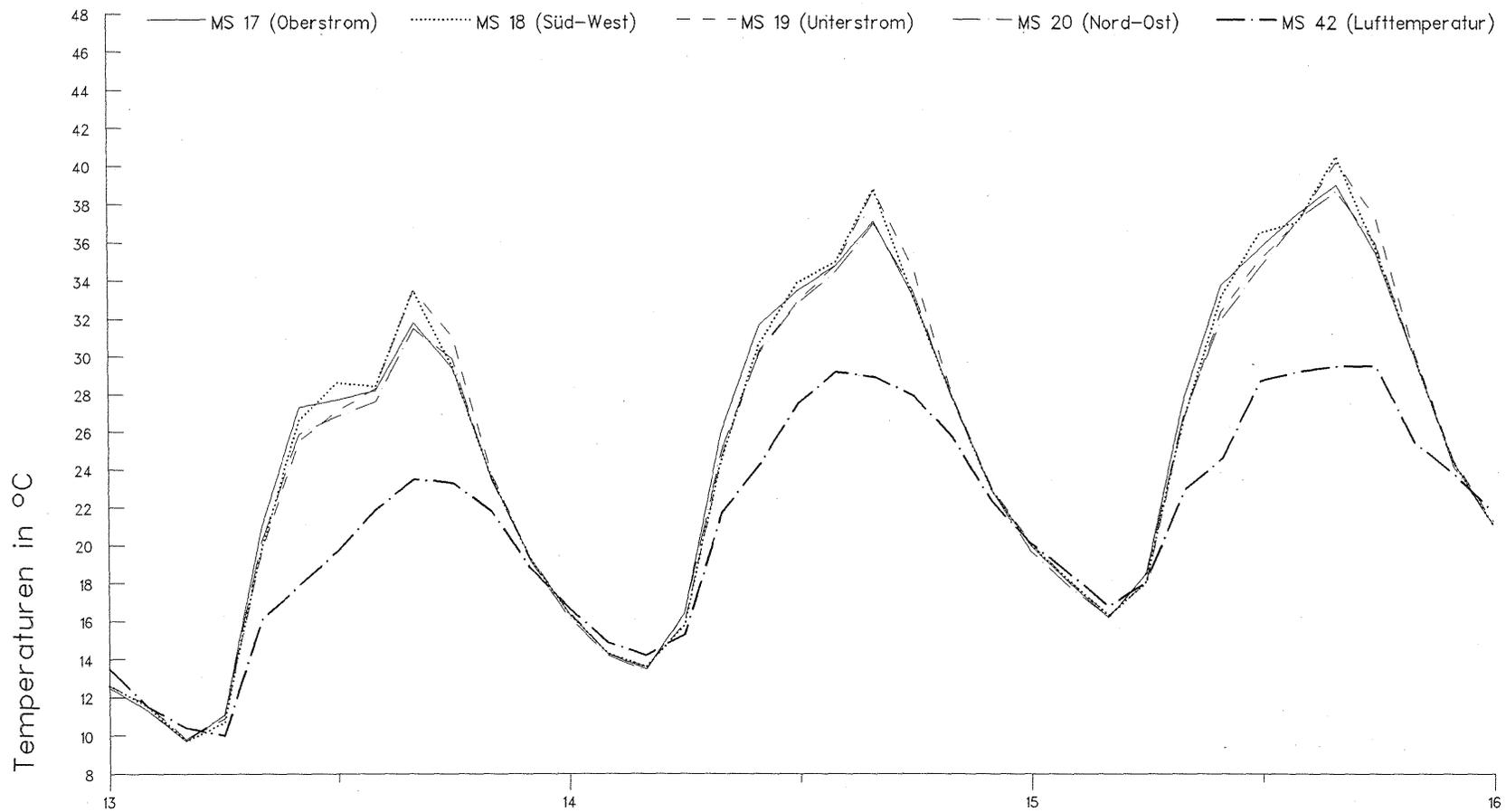
Monat: Mai 1992

Anlage 9

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse C (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9205R



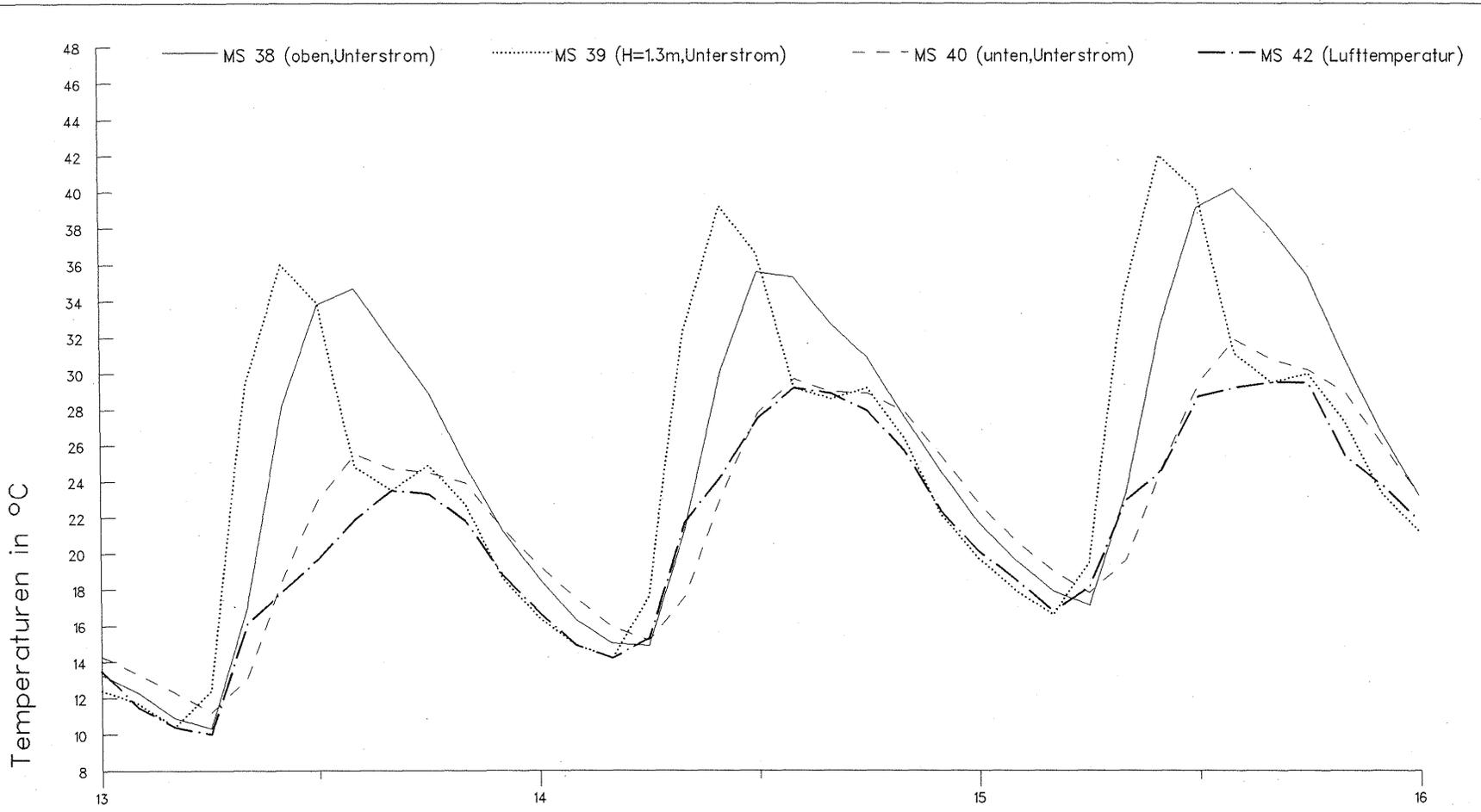
Monat: Mai 1992

Anlage 10

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse B (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9205R



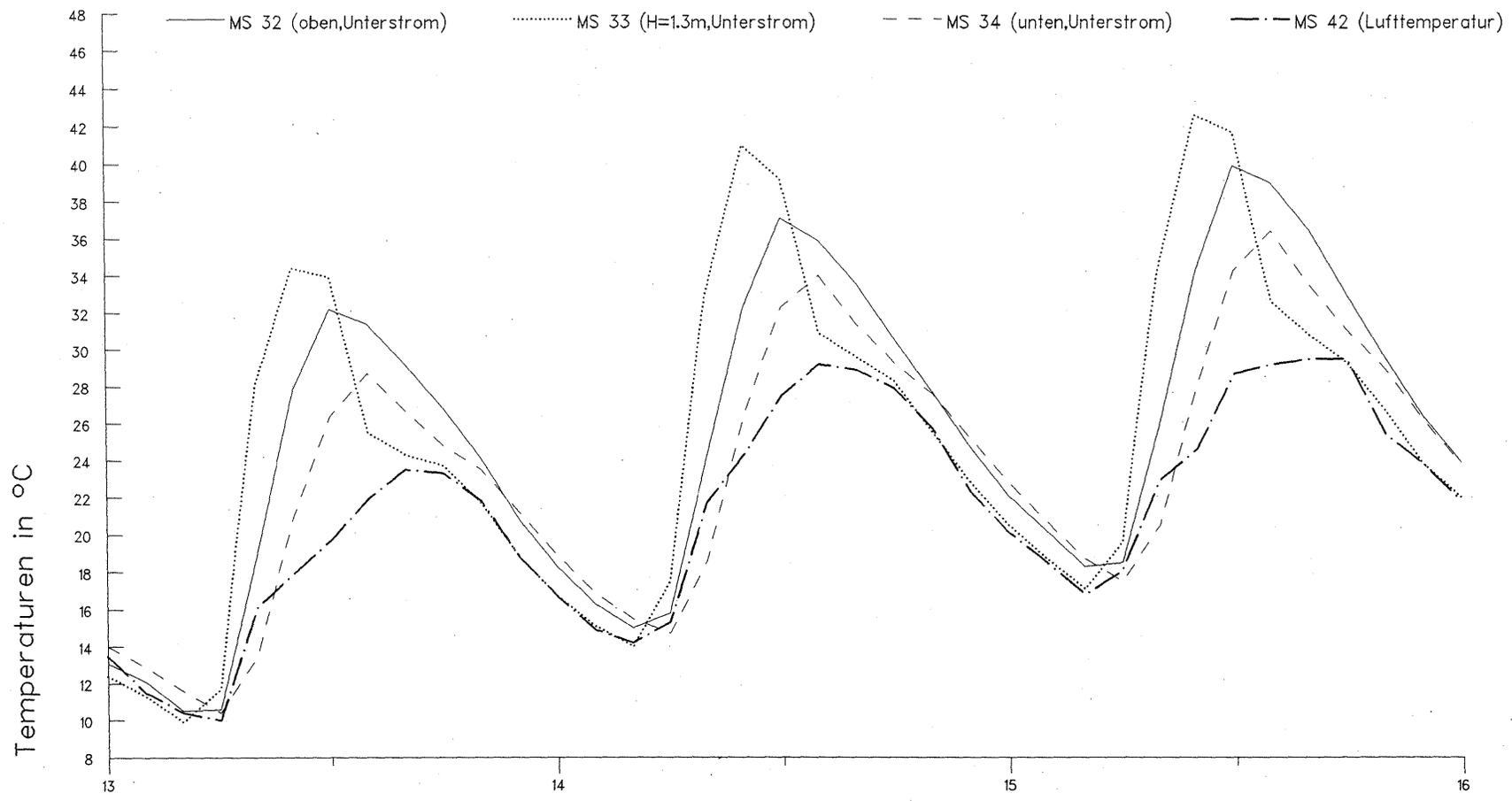
Monat: Mai 1992

Anlage 11

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9205R



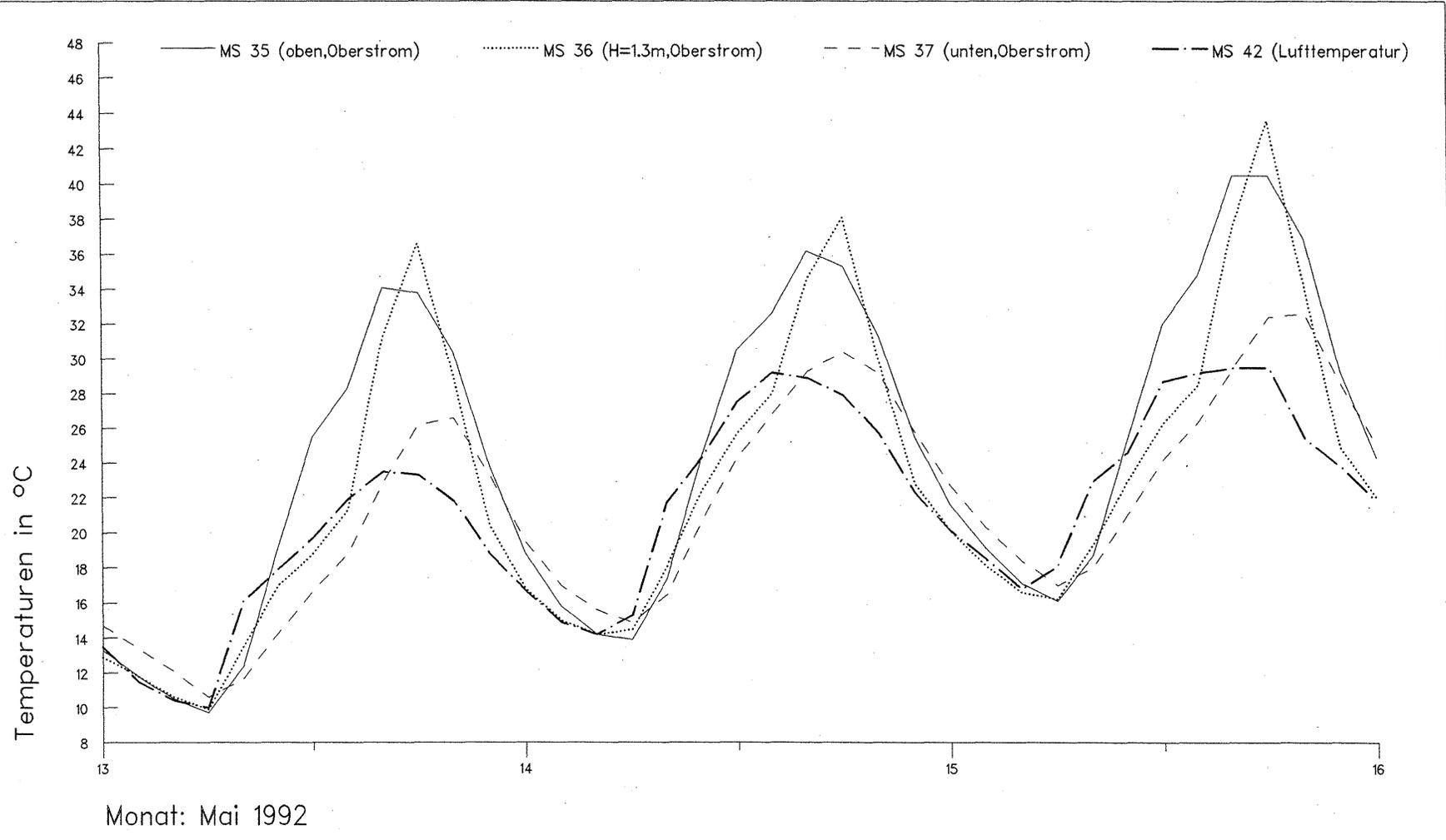
Monat: Mai 1992

Anlage 12

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9205R

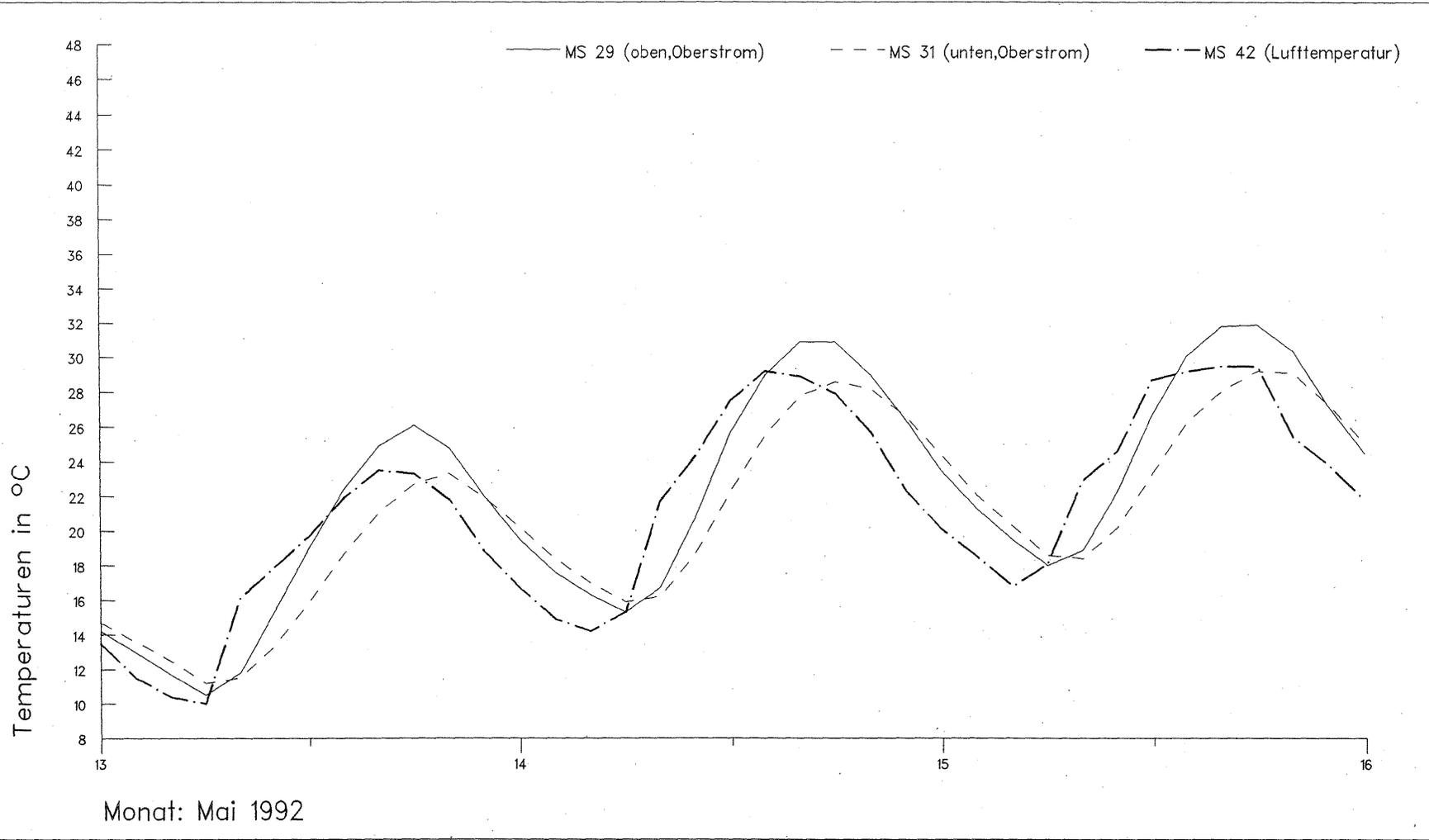


Anlage 13

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9205R

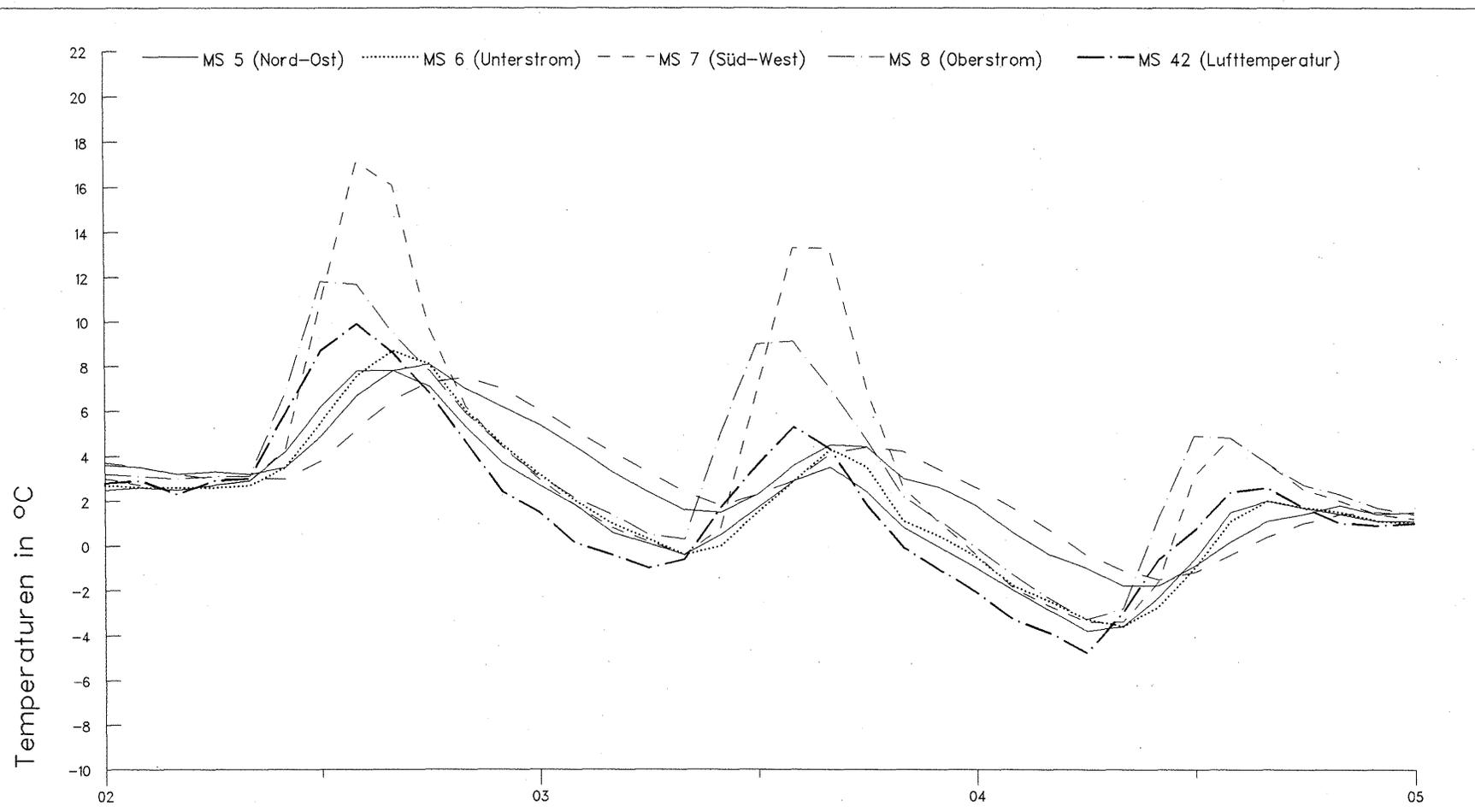


Anlage 14

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9205R



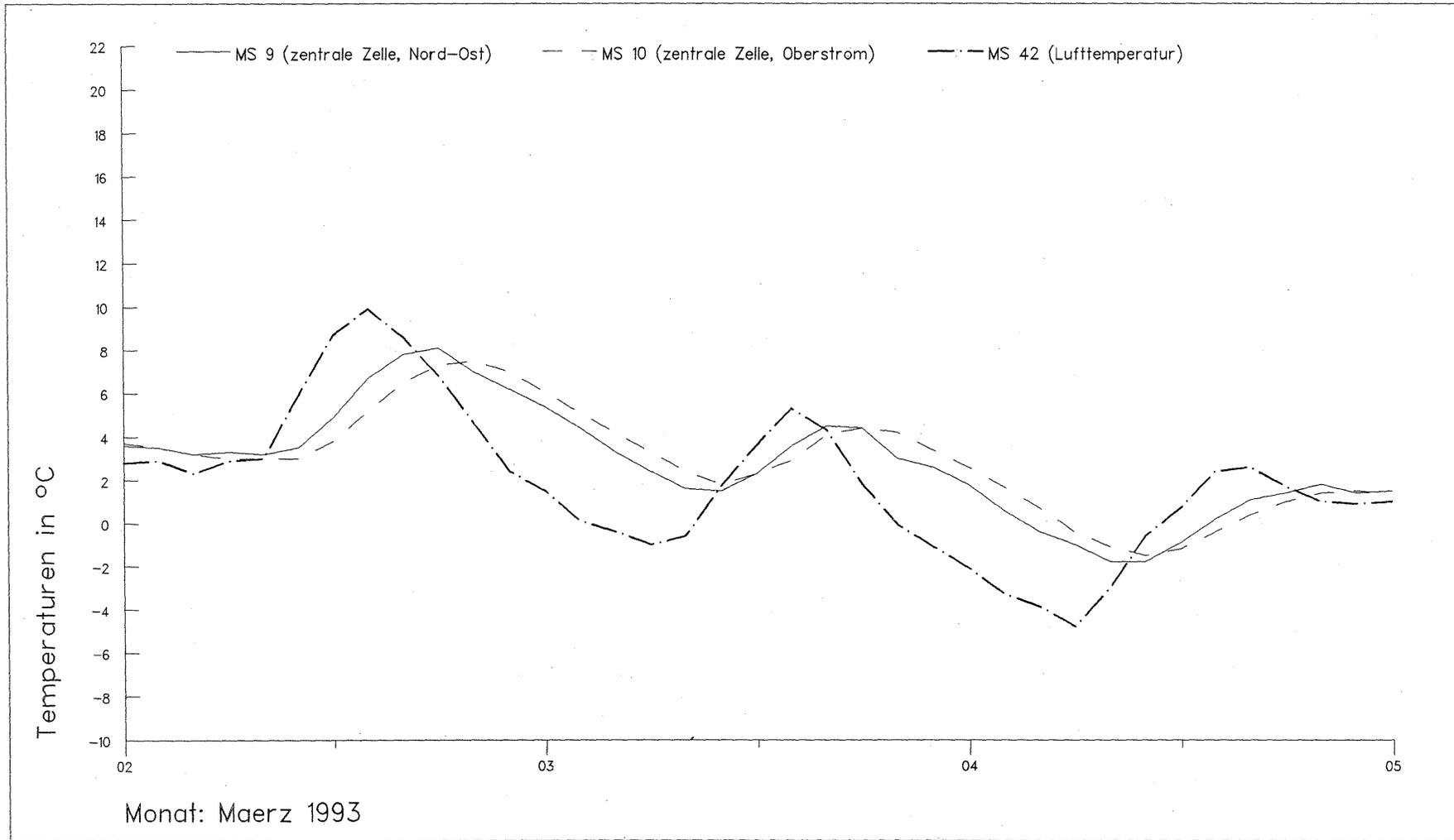
Monat: Maerz 1993

Anlage 15

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9303R

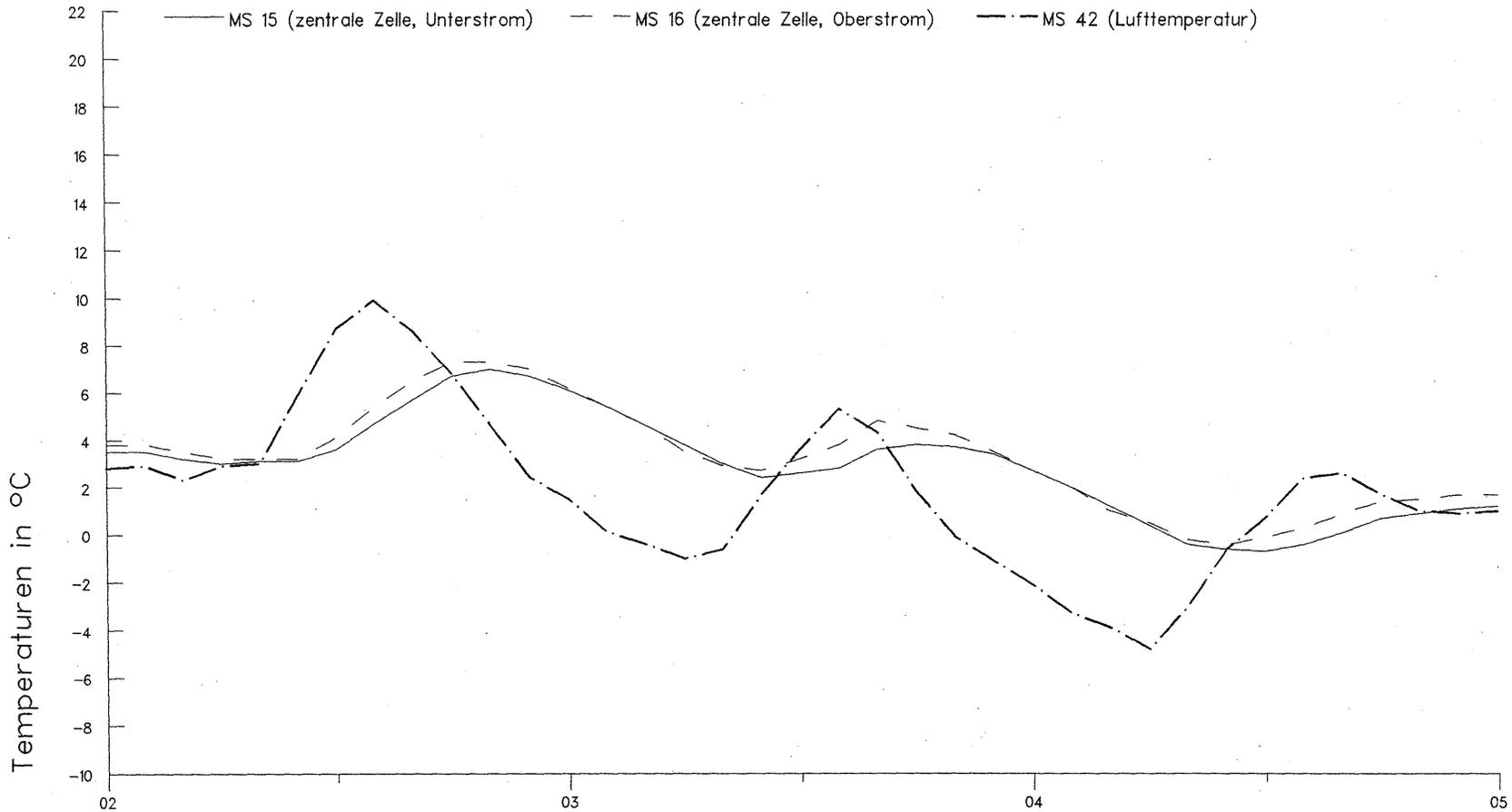


Anlage 16

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9303R



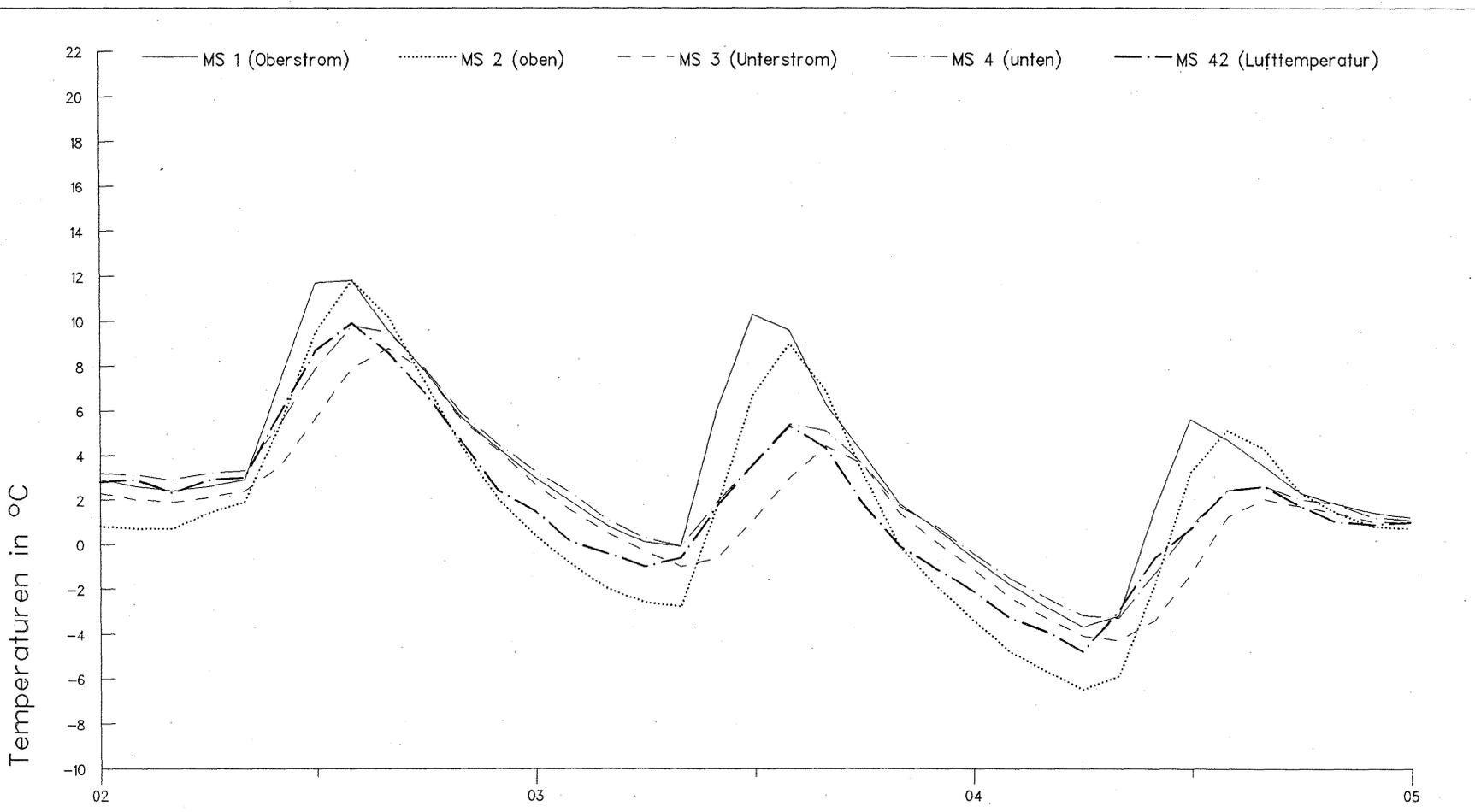
Monat: Maerz 1993

Anlage 18

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9303R



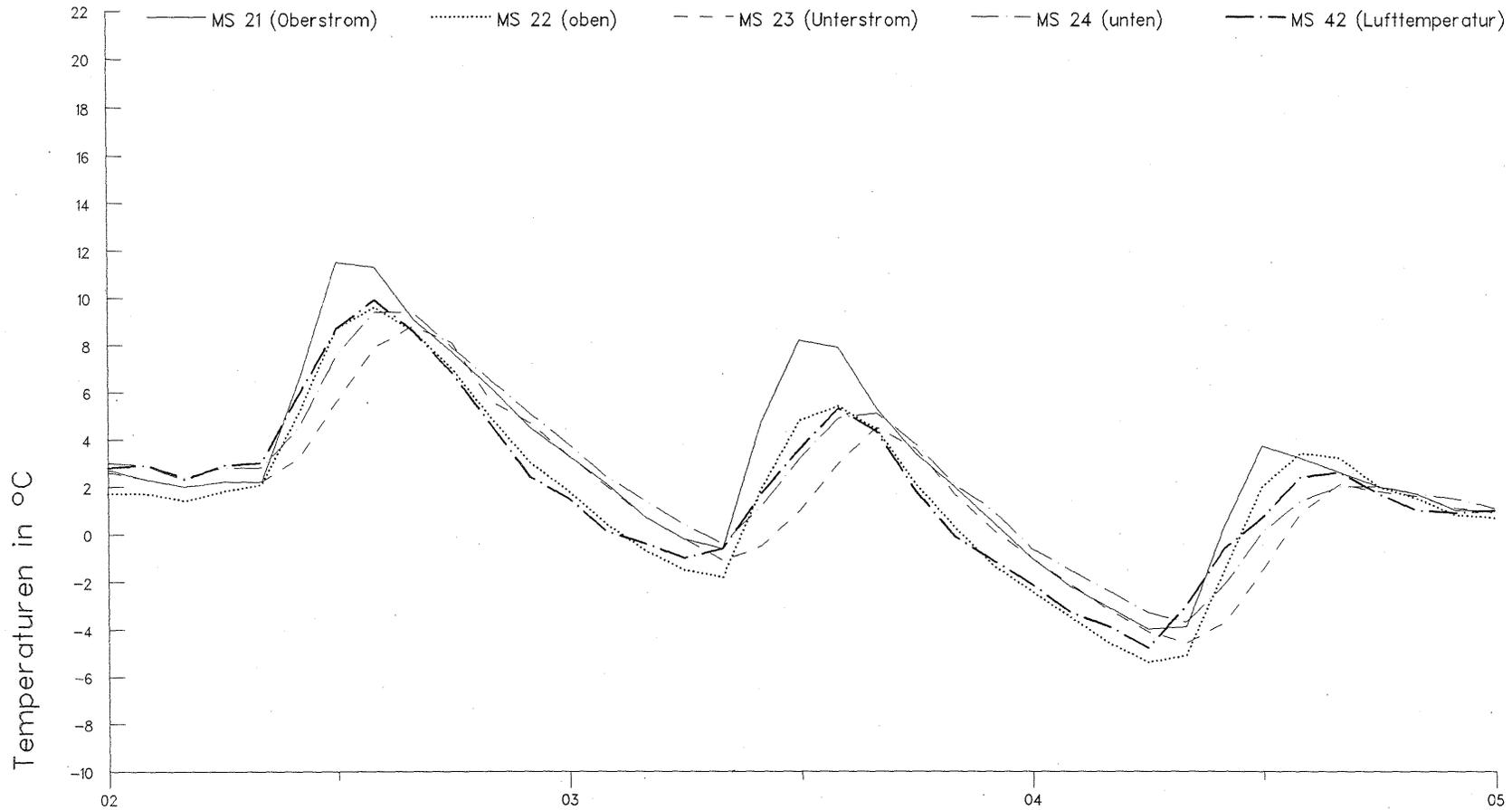
Monat: Maerz 1993

Anlage 19

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse B (in Mitte der Stromöffnung)

Dateiname: 9303R



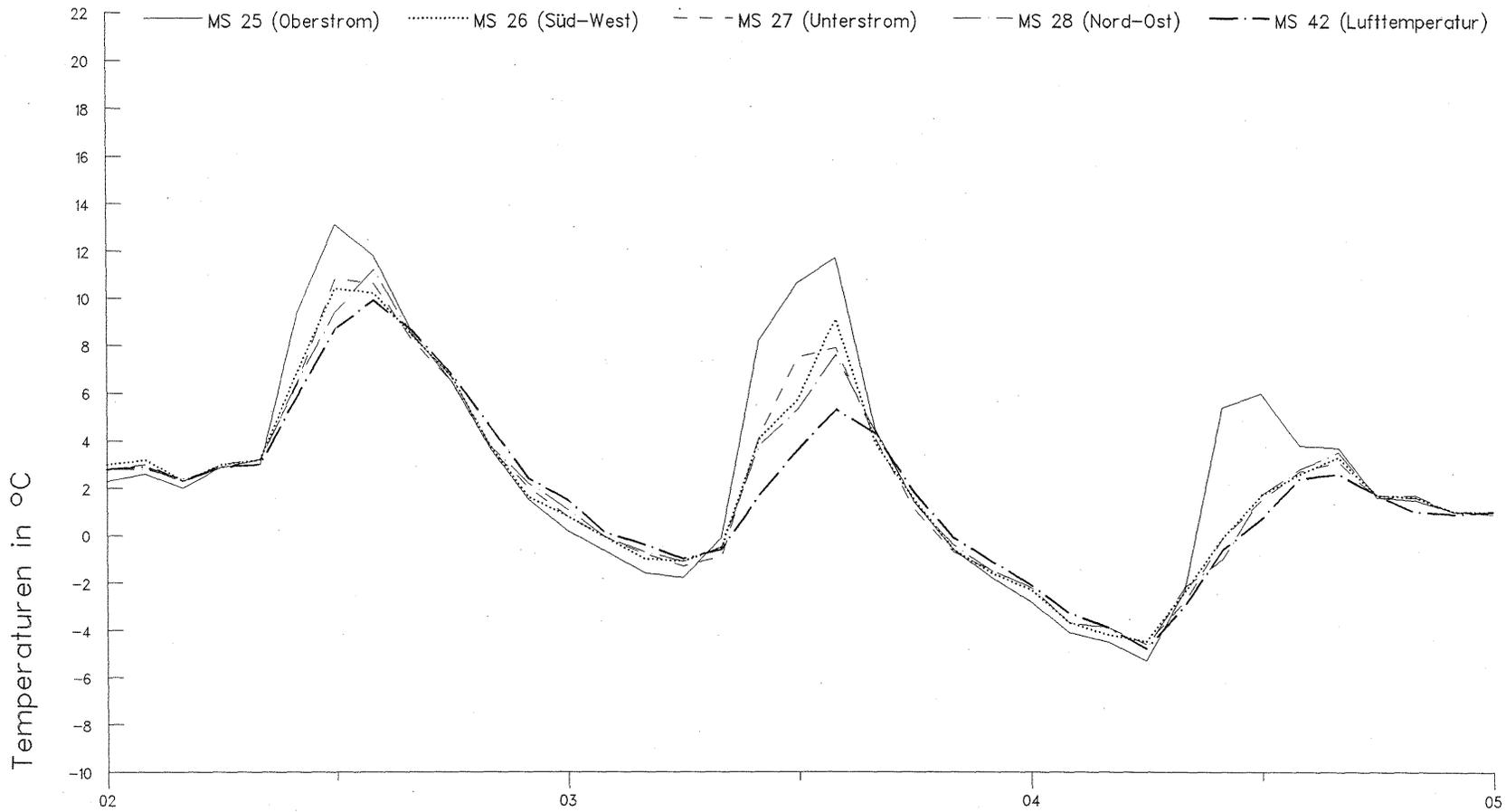
Monat: Maerz 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse C (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9303R

Anlage 20



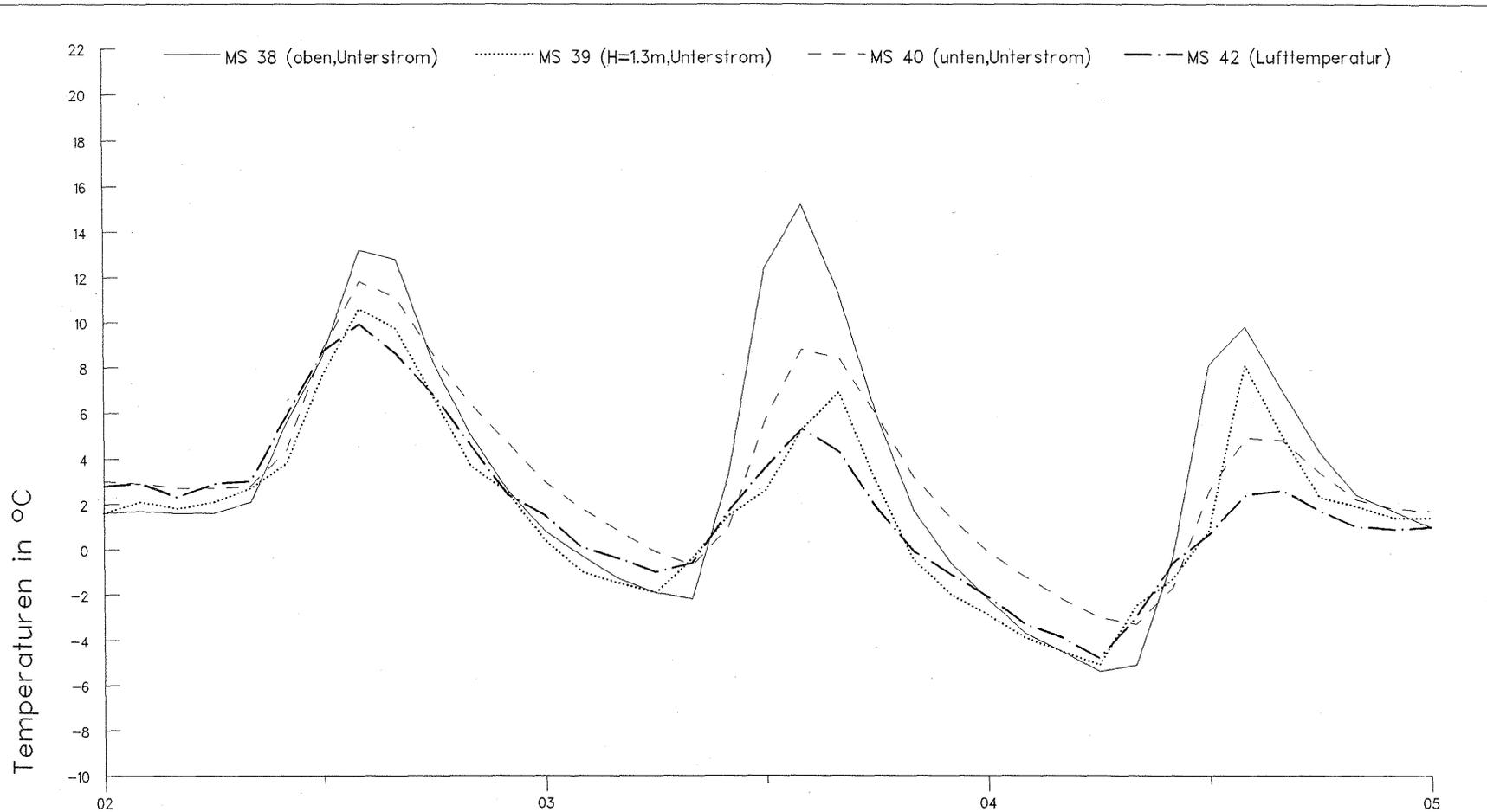
Monat: Maerz 1993

Anlage 22

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse C (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9303R



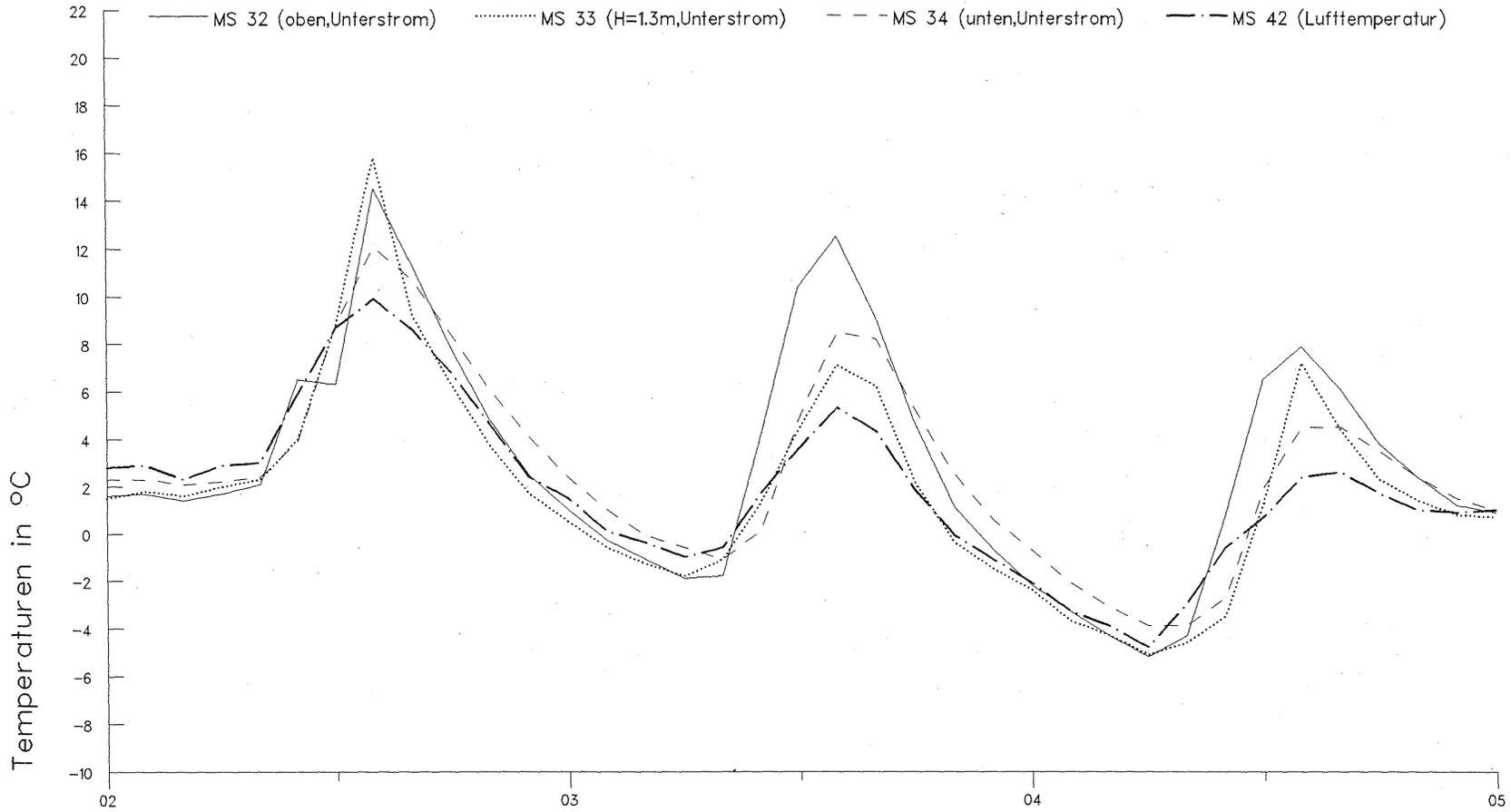
Monat: Maerz 1993

Anlage 23

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9303R



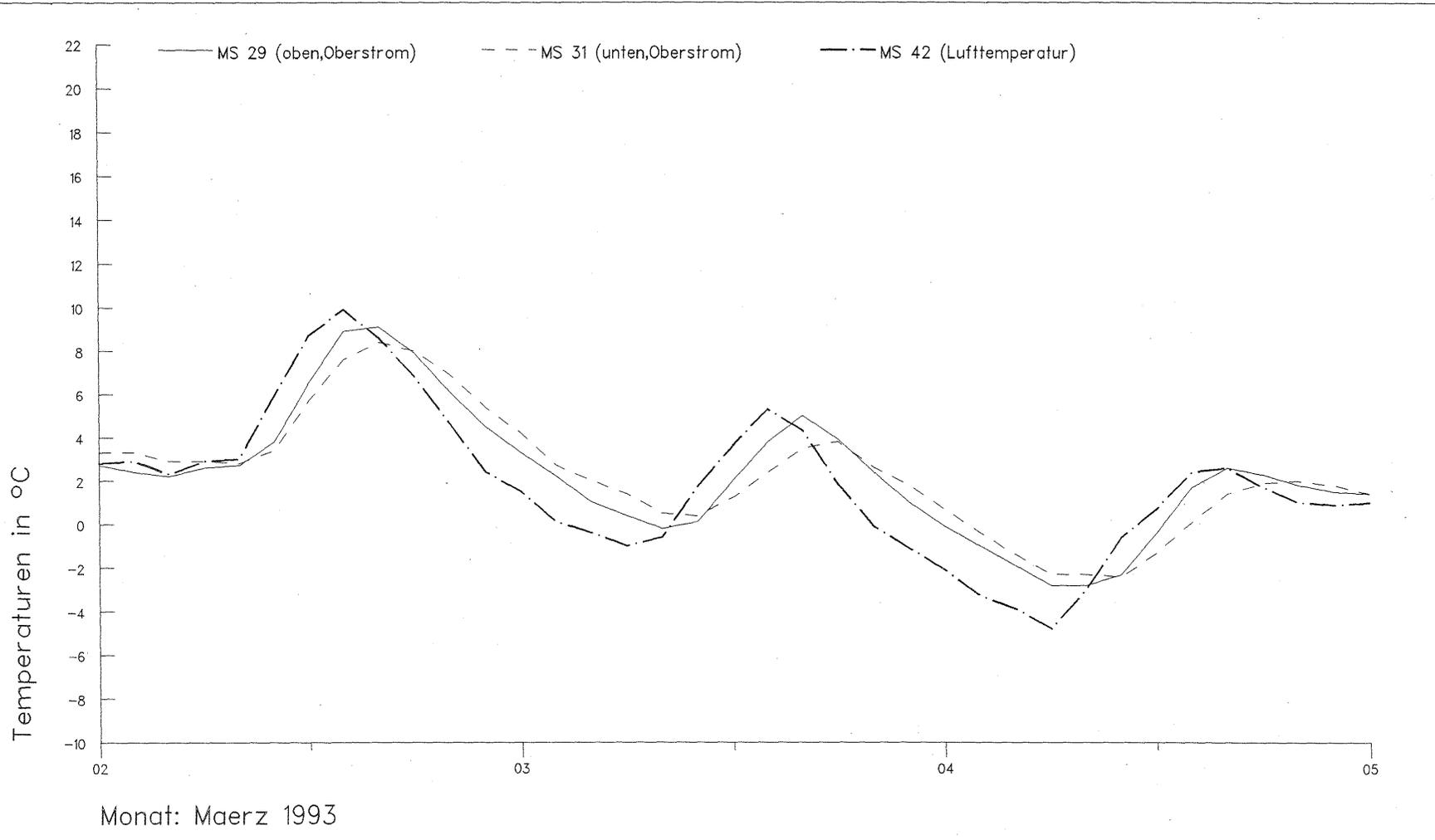
Monat: Maerz 1993

Anlage 24

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9303R

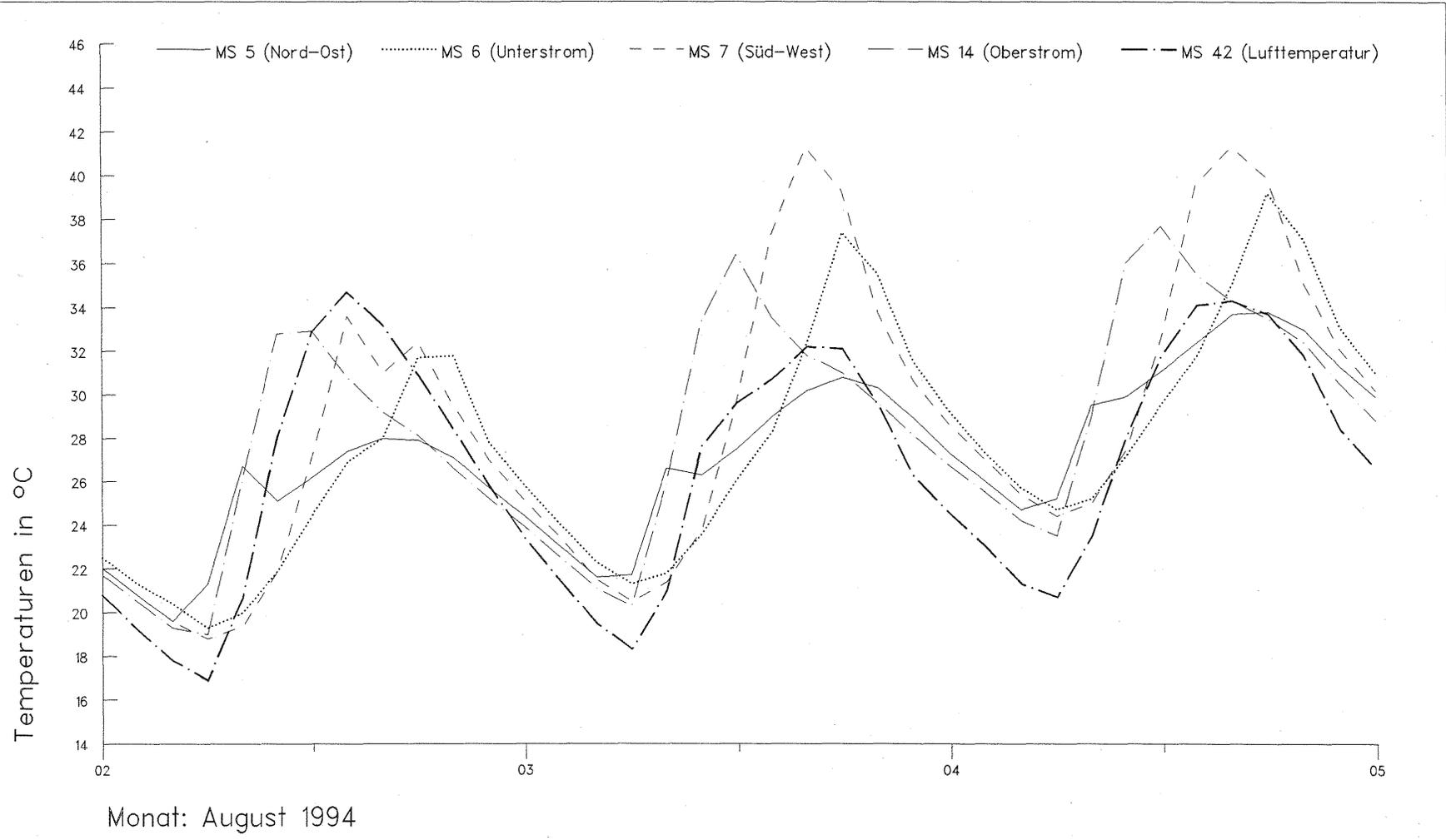


Anlage 26

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9303R

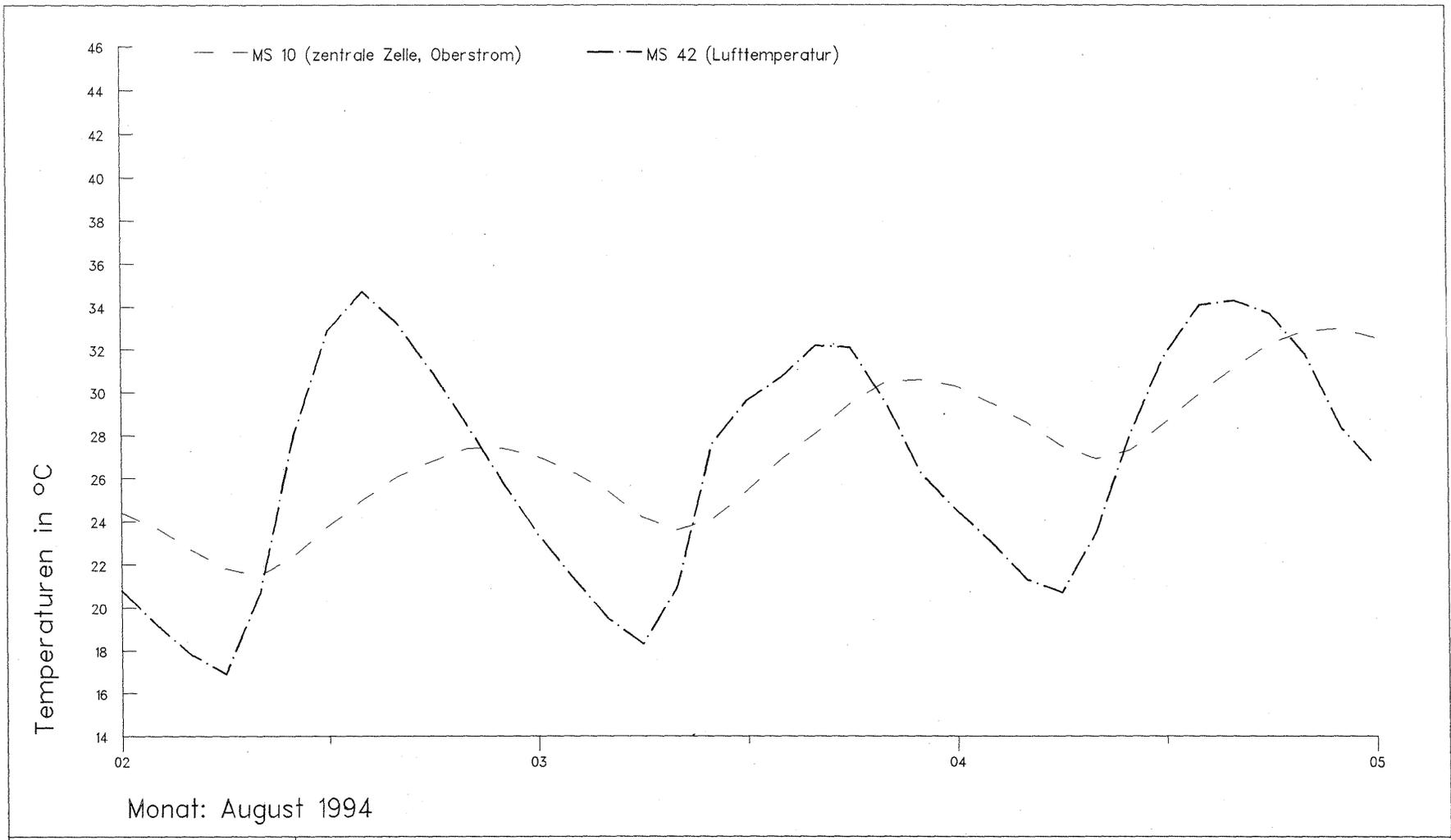


Anlage 27

Bast
B4

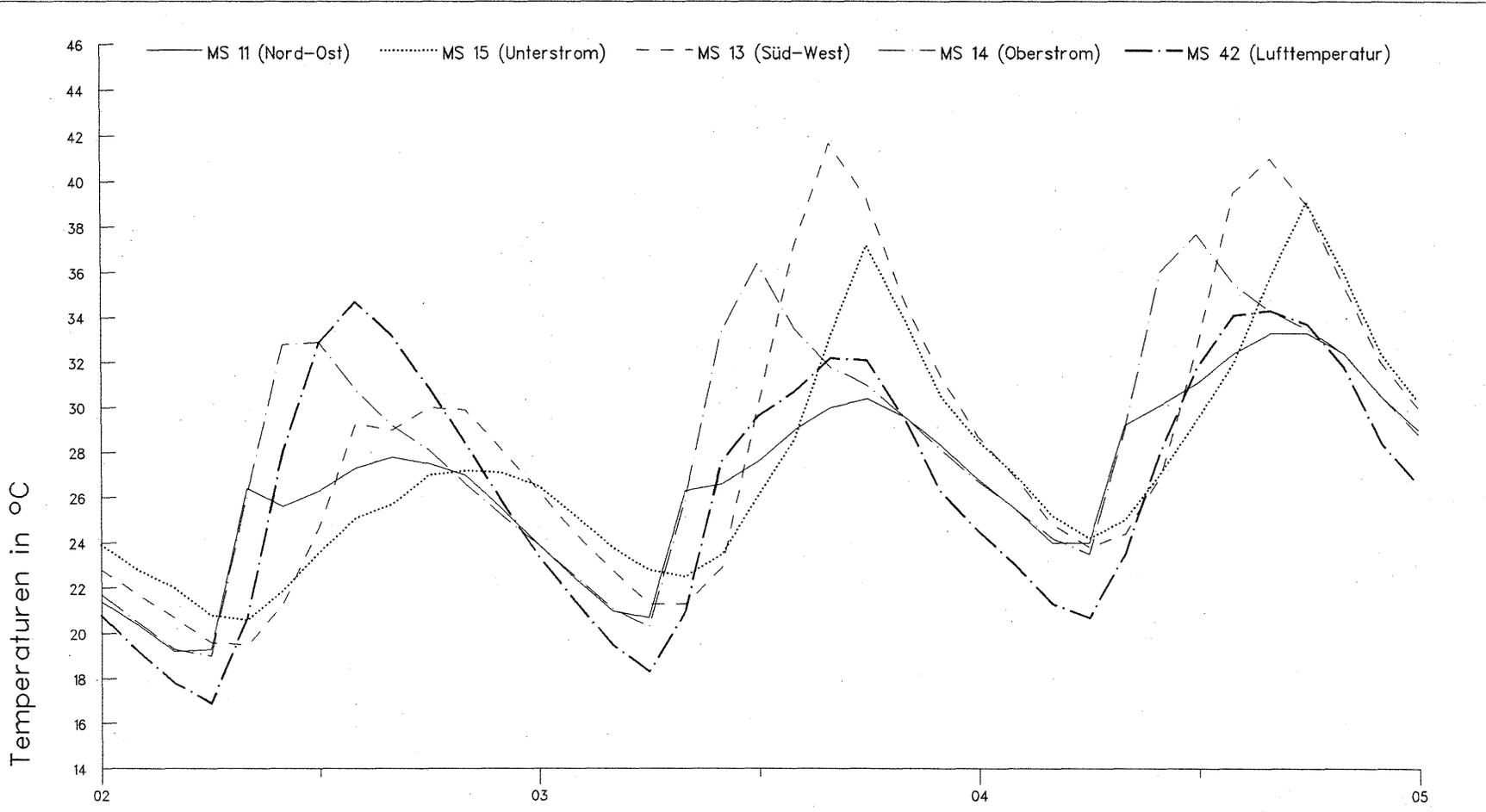
Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9408R



Anlage 28

<p>Bast B4</p>	<p>Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m</p> <p>Dateiname: 9408R</p>
--------------------	--



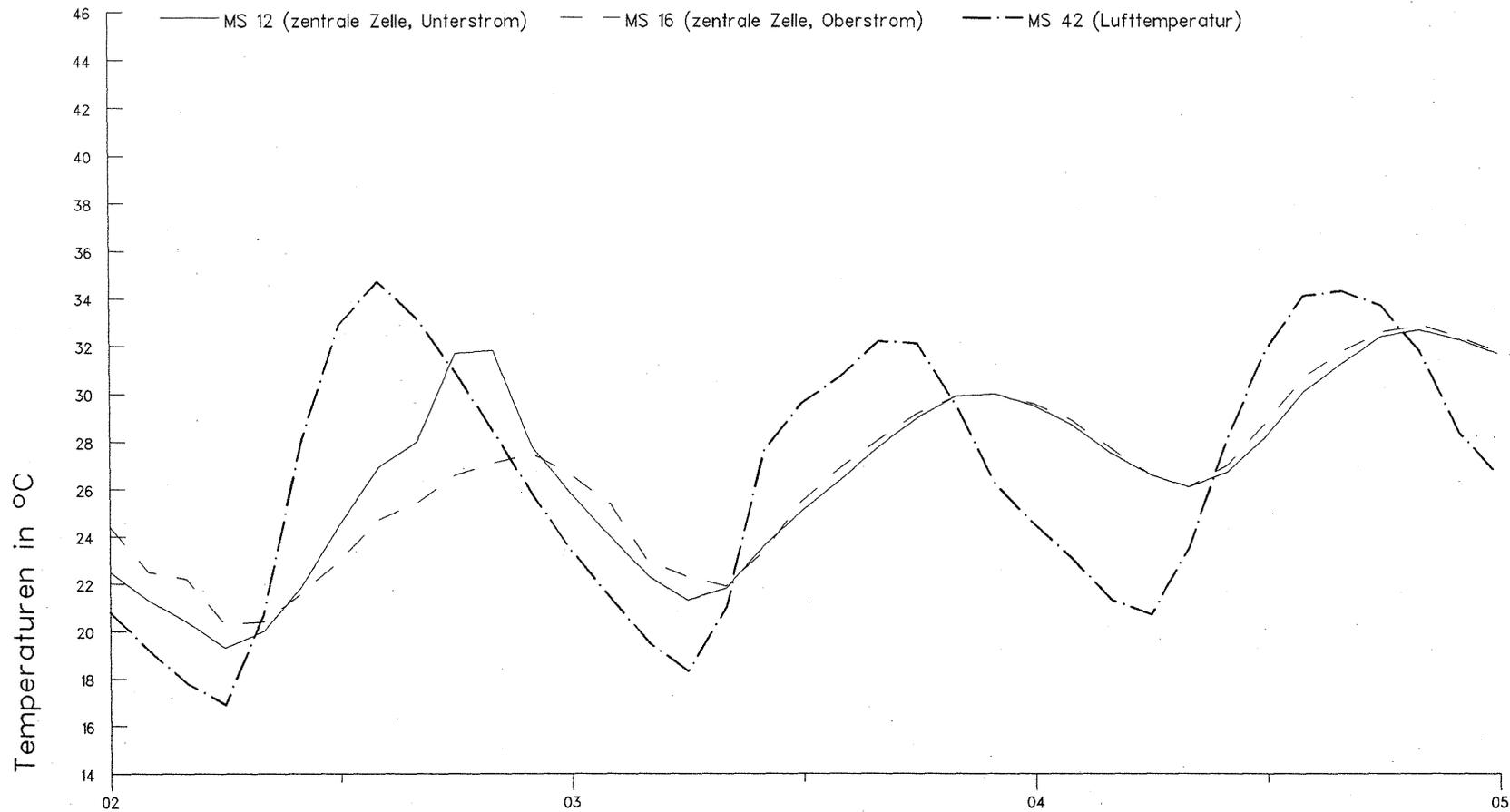
Monat: August 1994

Anlage 29

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9408R



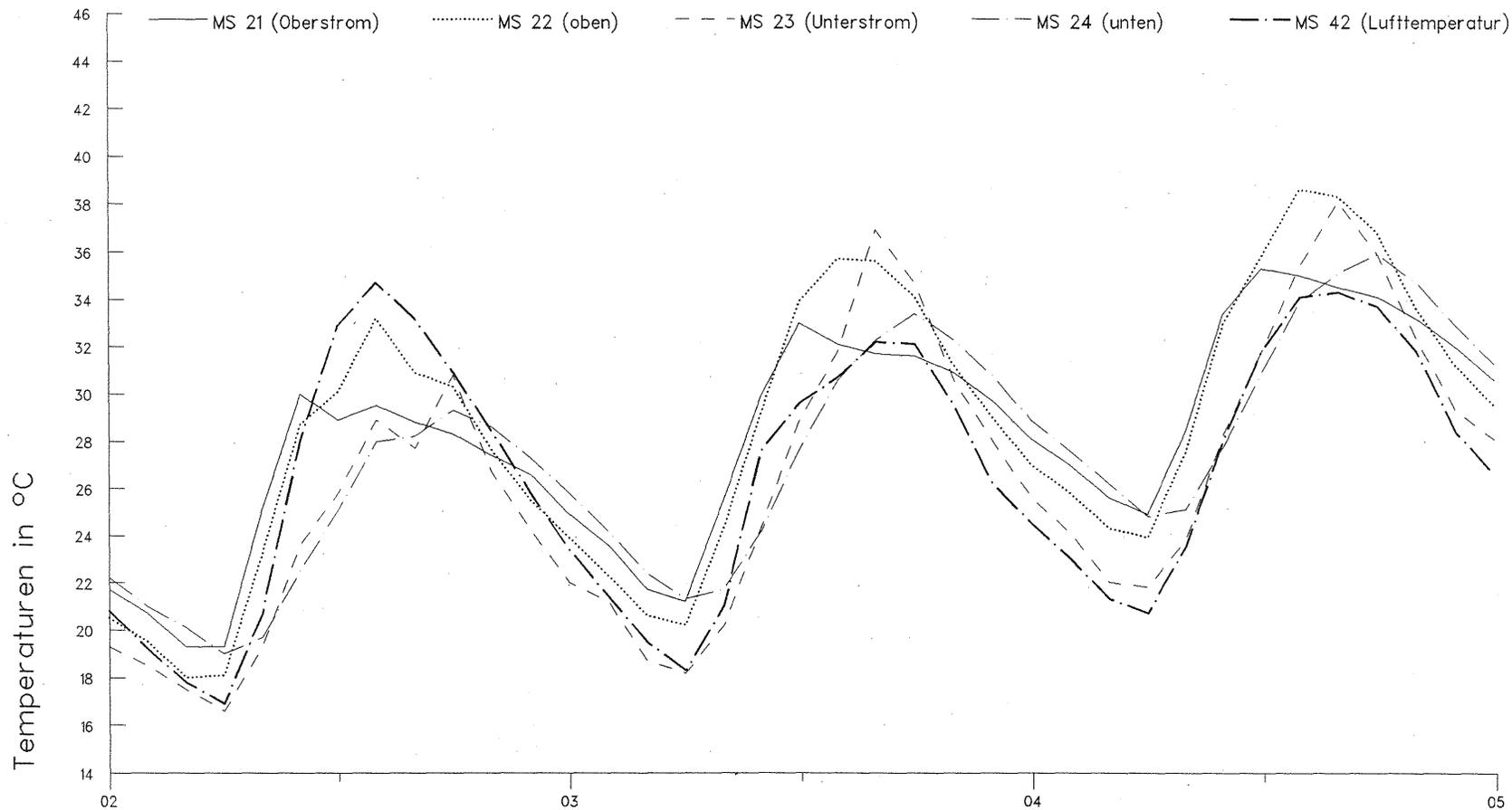
Monat: August 1994

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9408R

Anlage 30



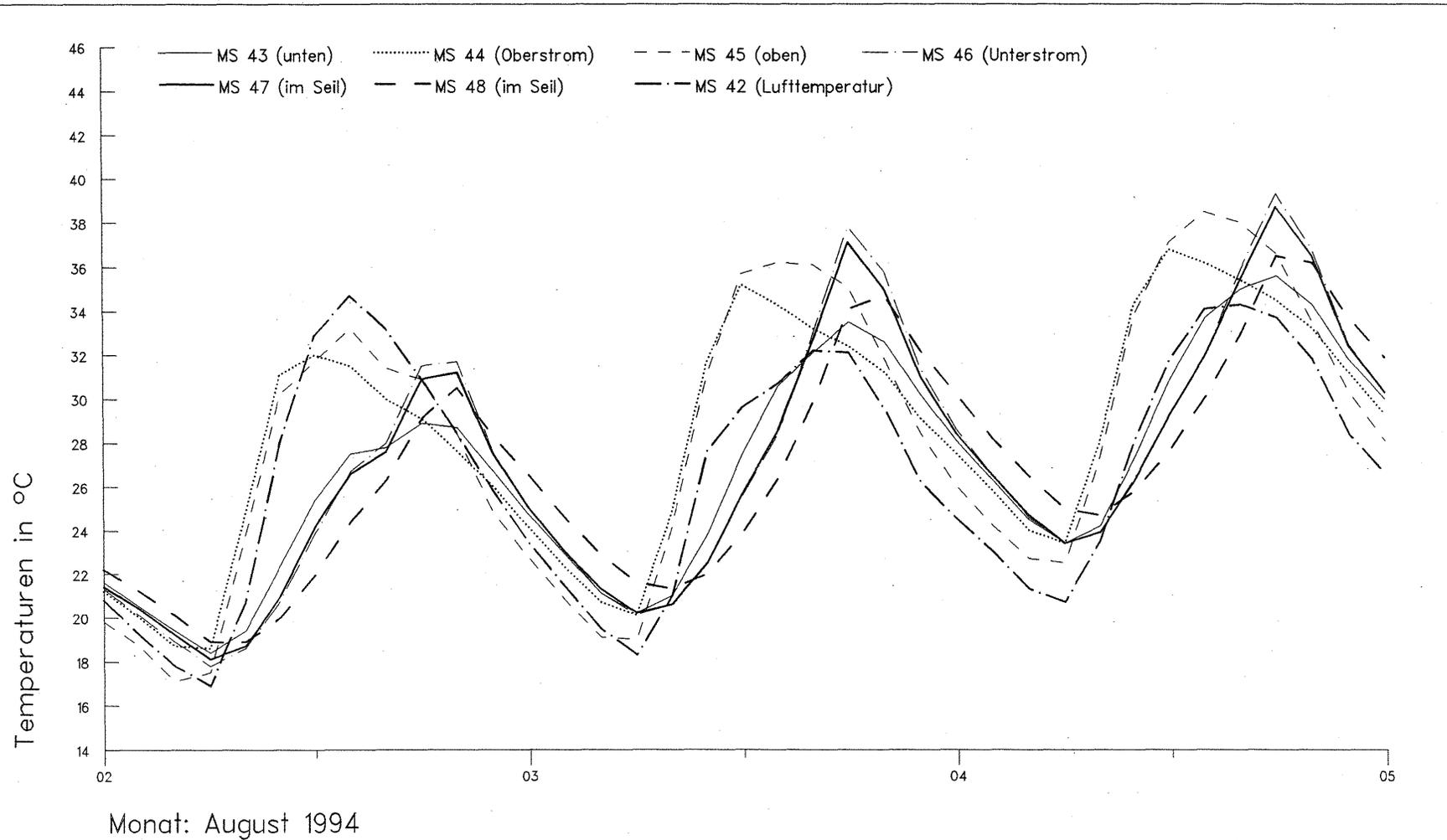
Monat: August 1994

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse C (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9408R

Anlage 32

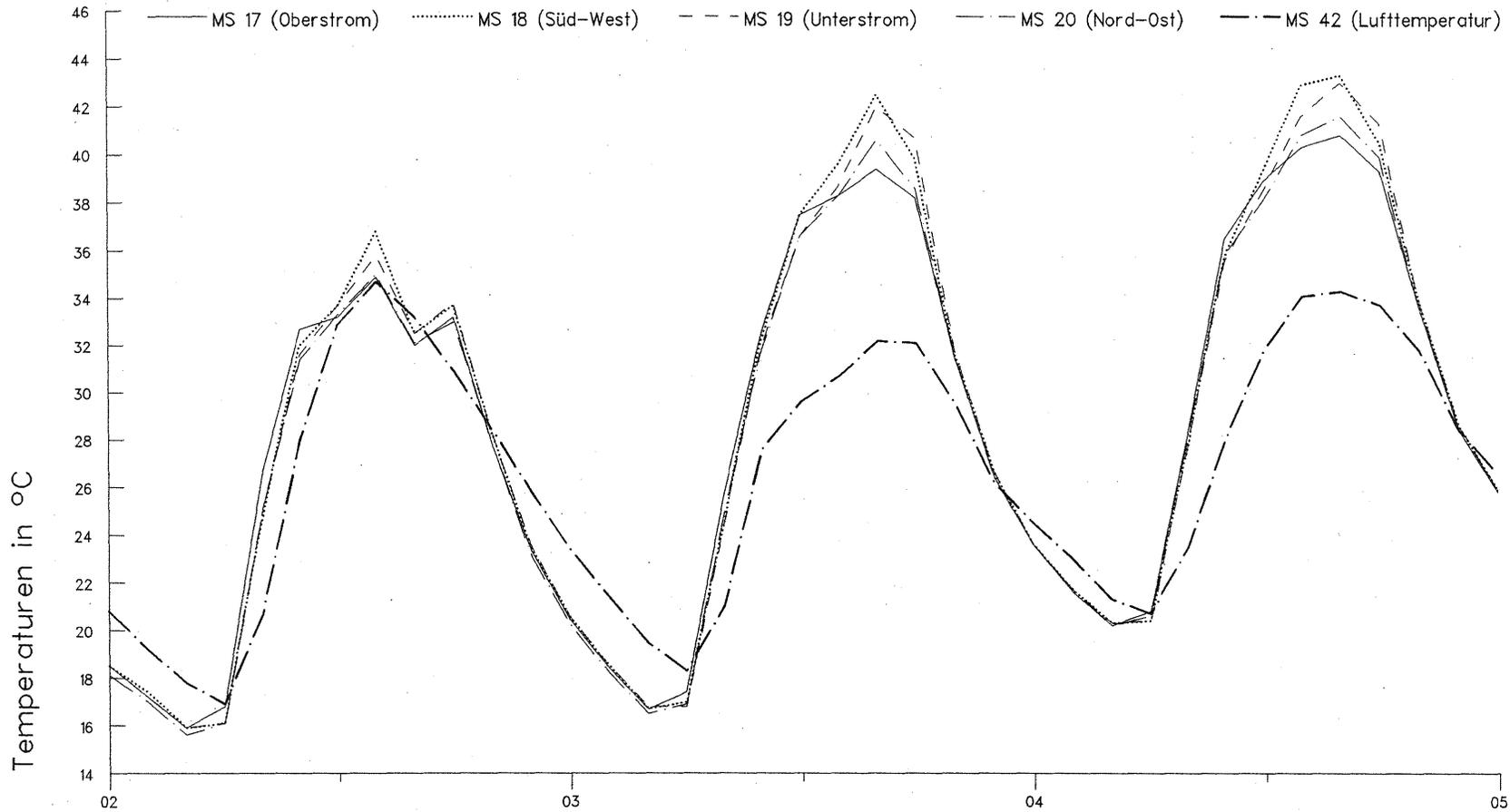


Anlage 33

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse A (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9408R



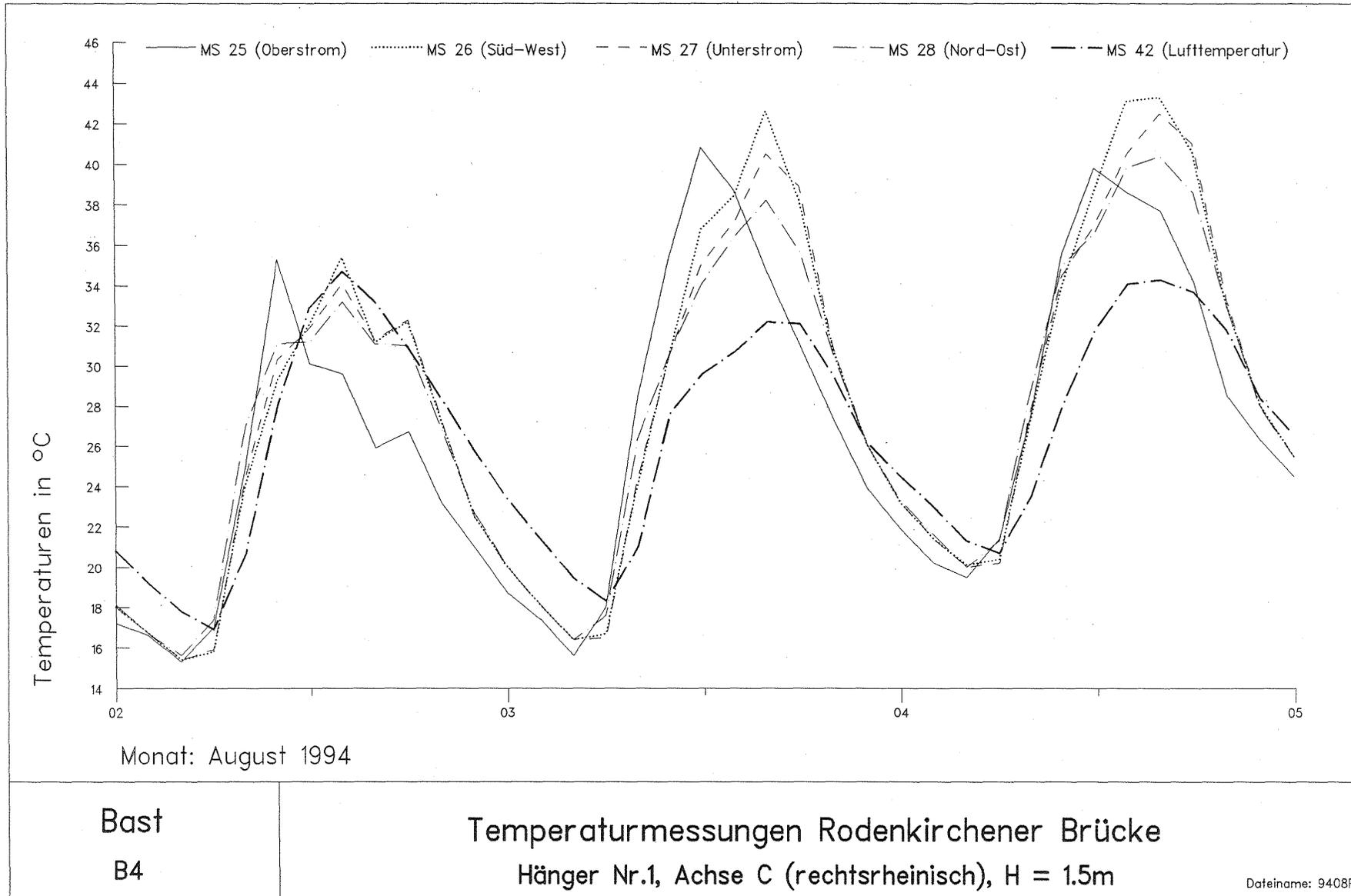
Monat: August 1994

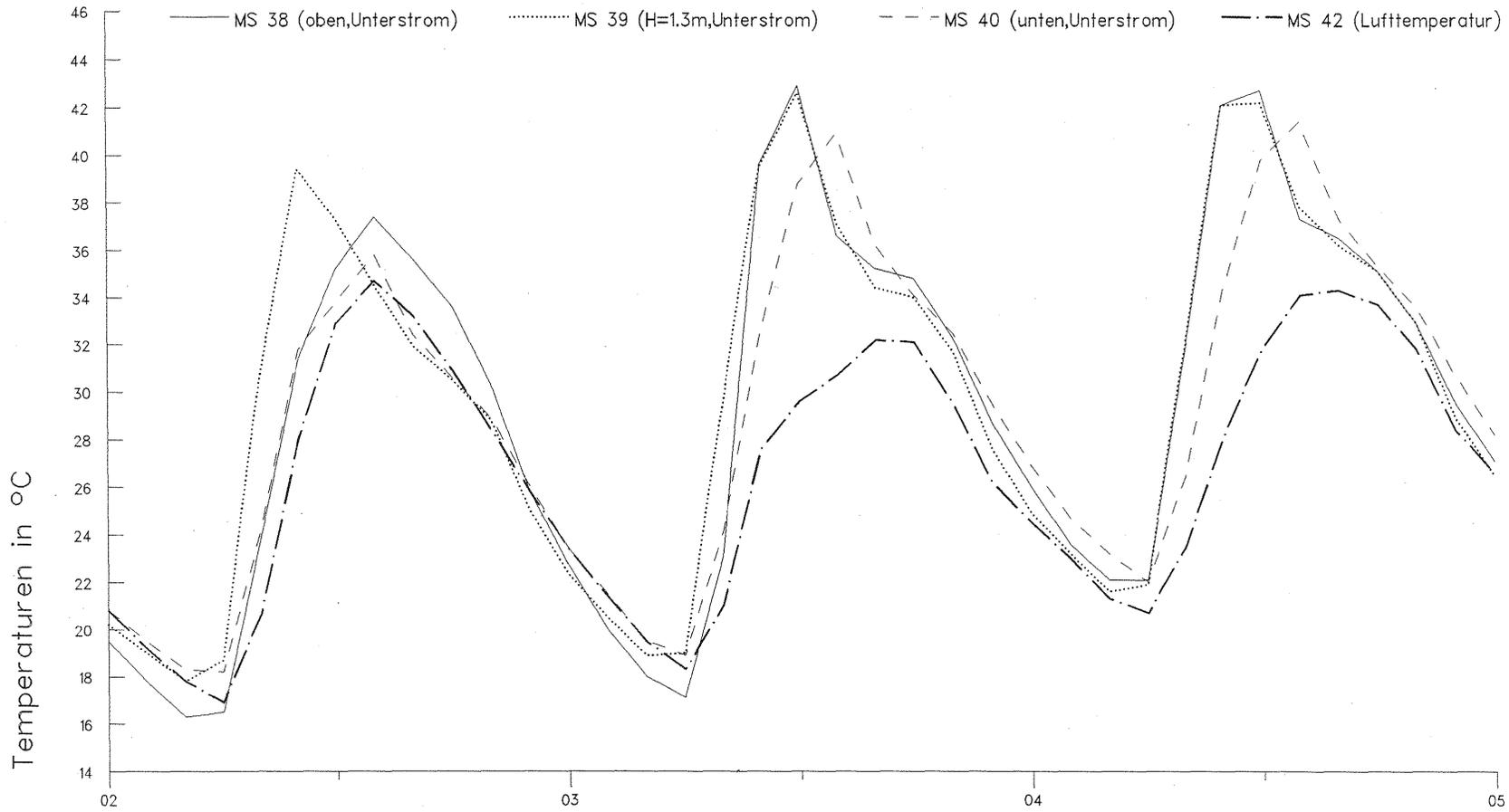
Anlage 34

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse B (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9408R





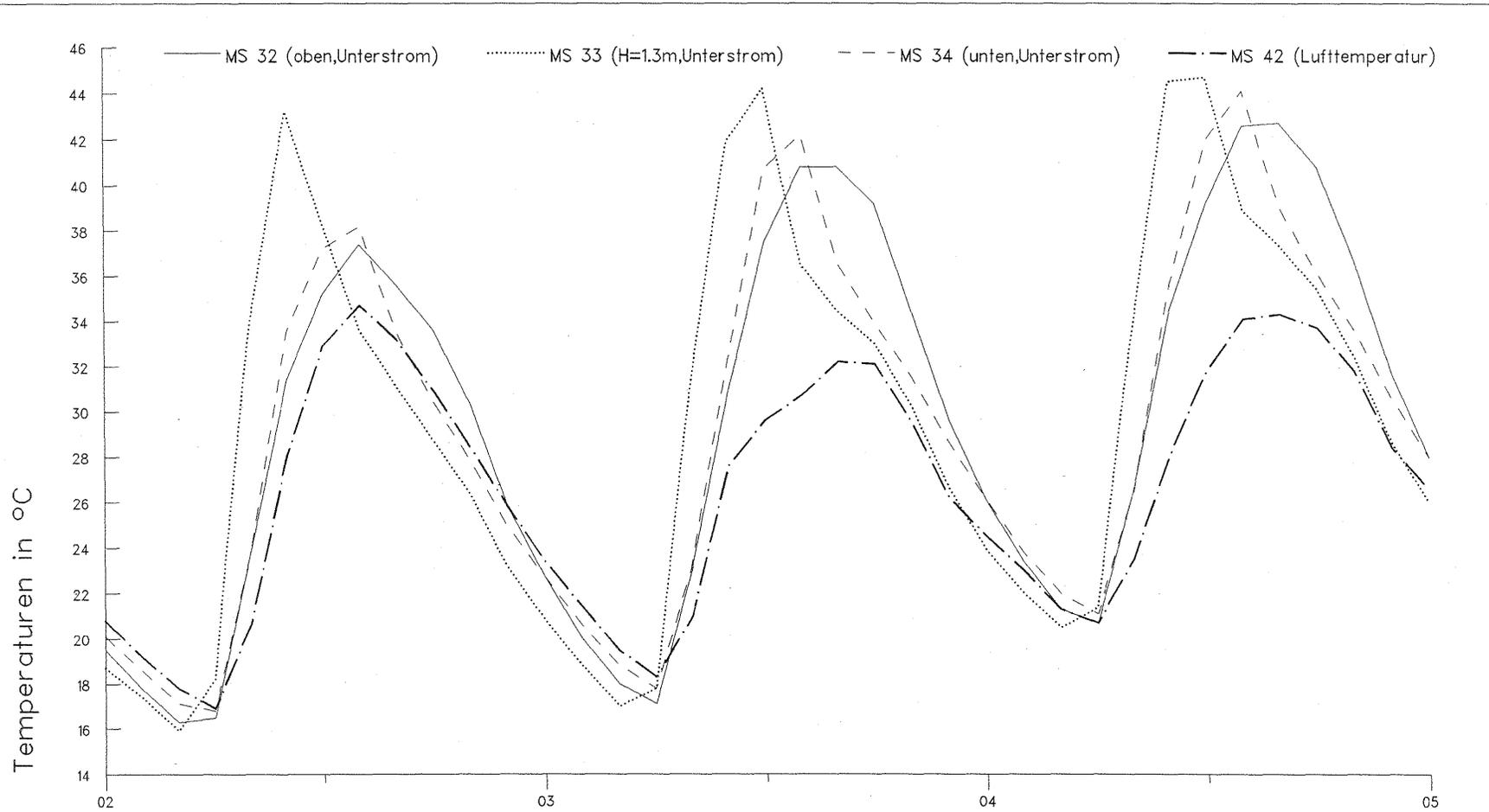
Monat: August 1994

Anlage 36

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9408R



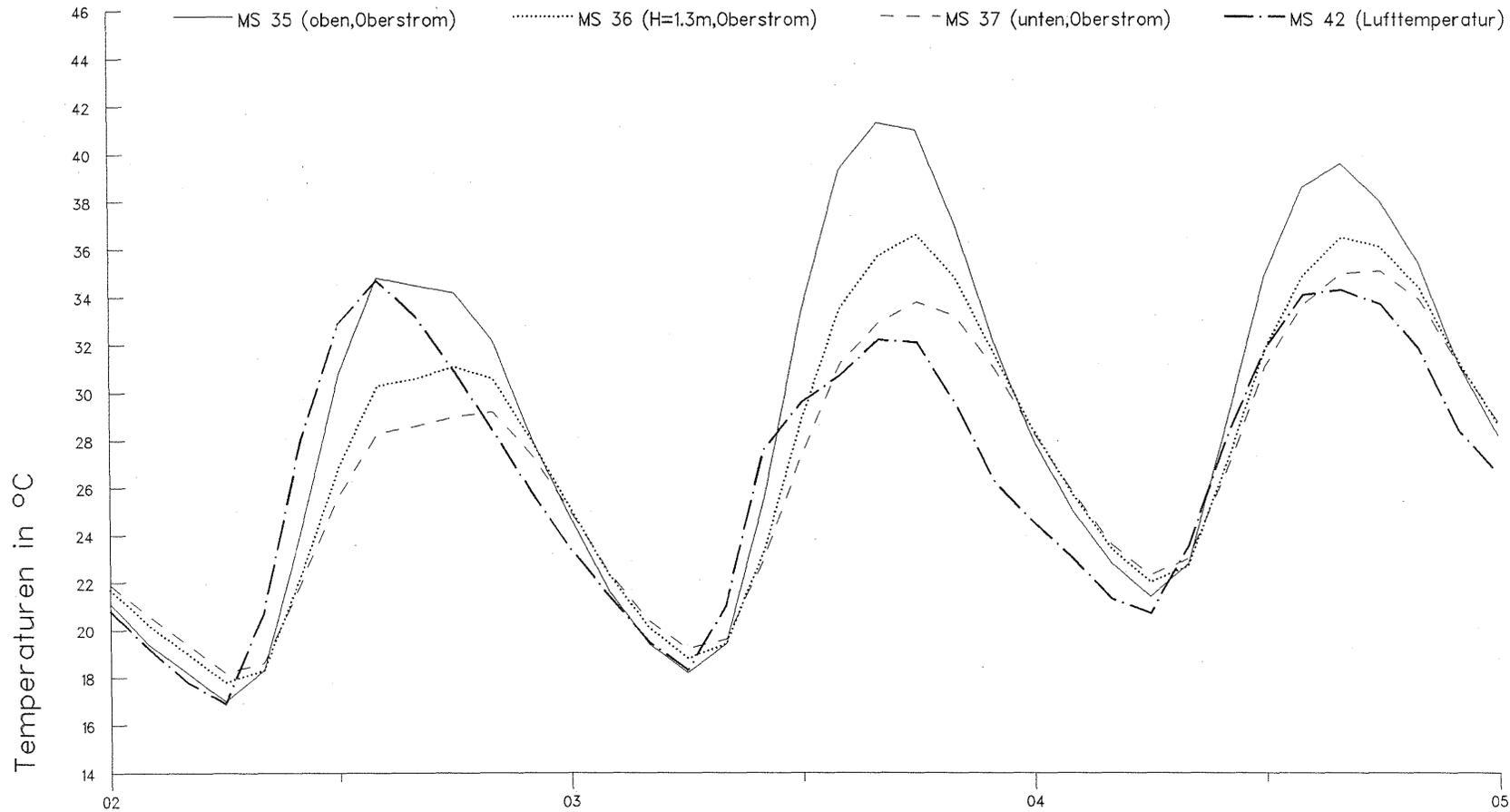
Monat: August 1994

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9408R

Anlage 37



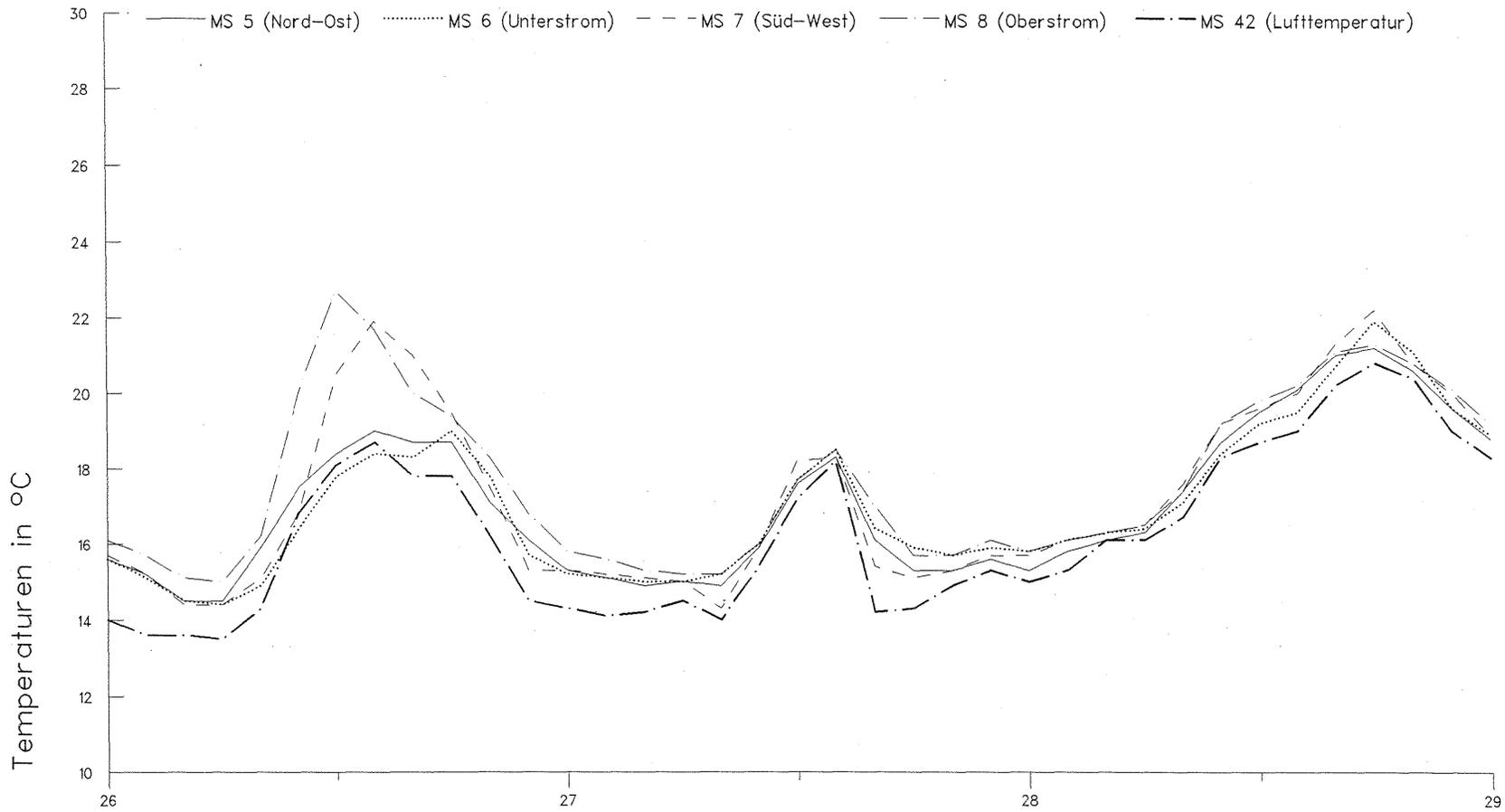
Monat: August 1994

Anlage 38

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9408R



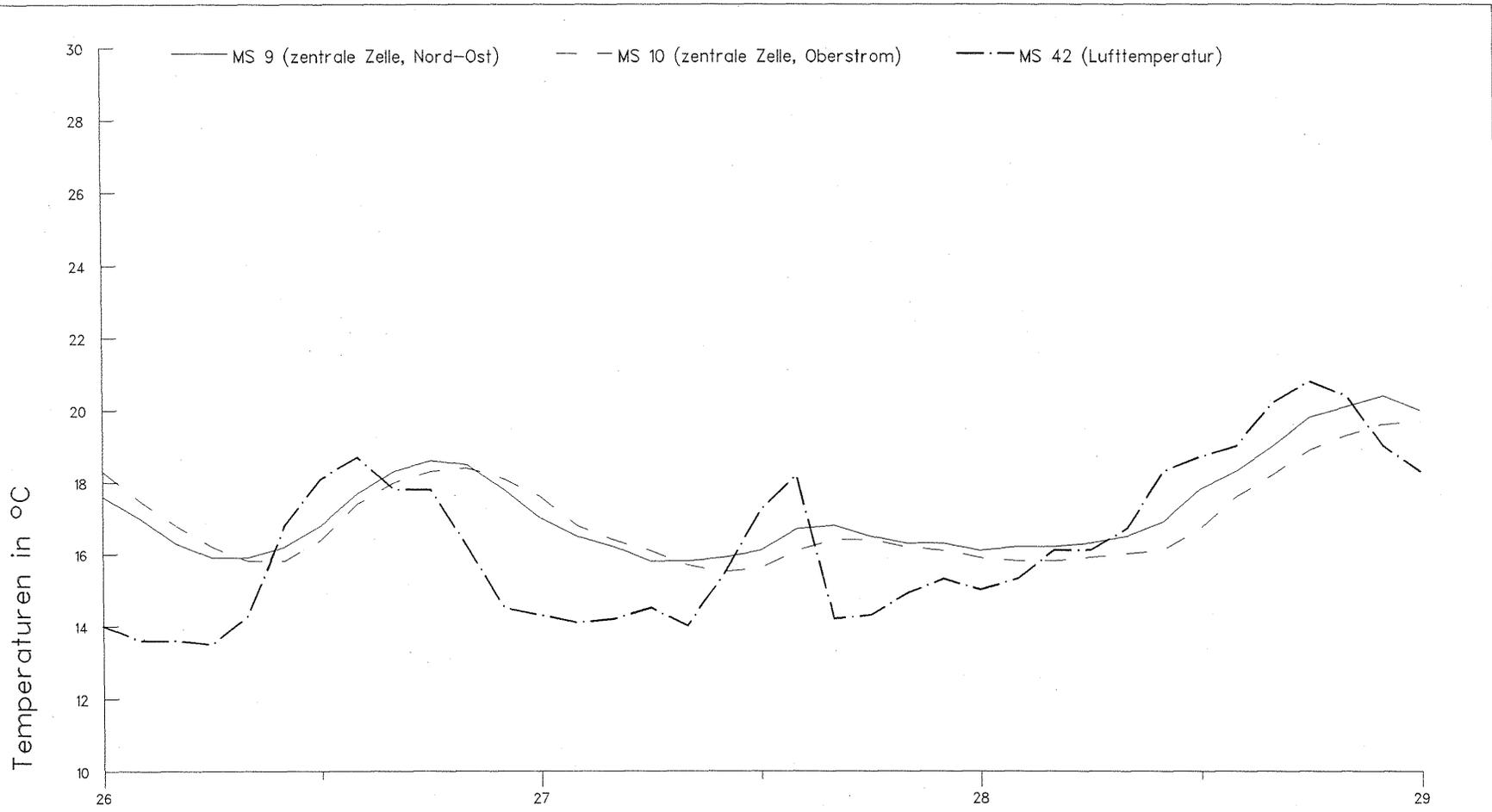
Monat: Juli 1993

Anlage 40

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9307R



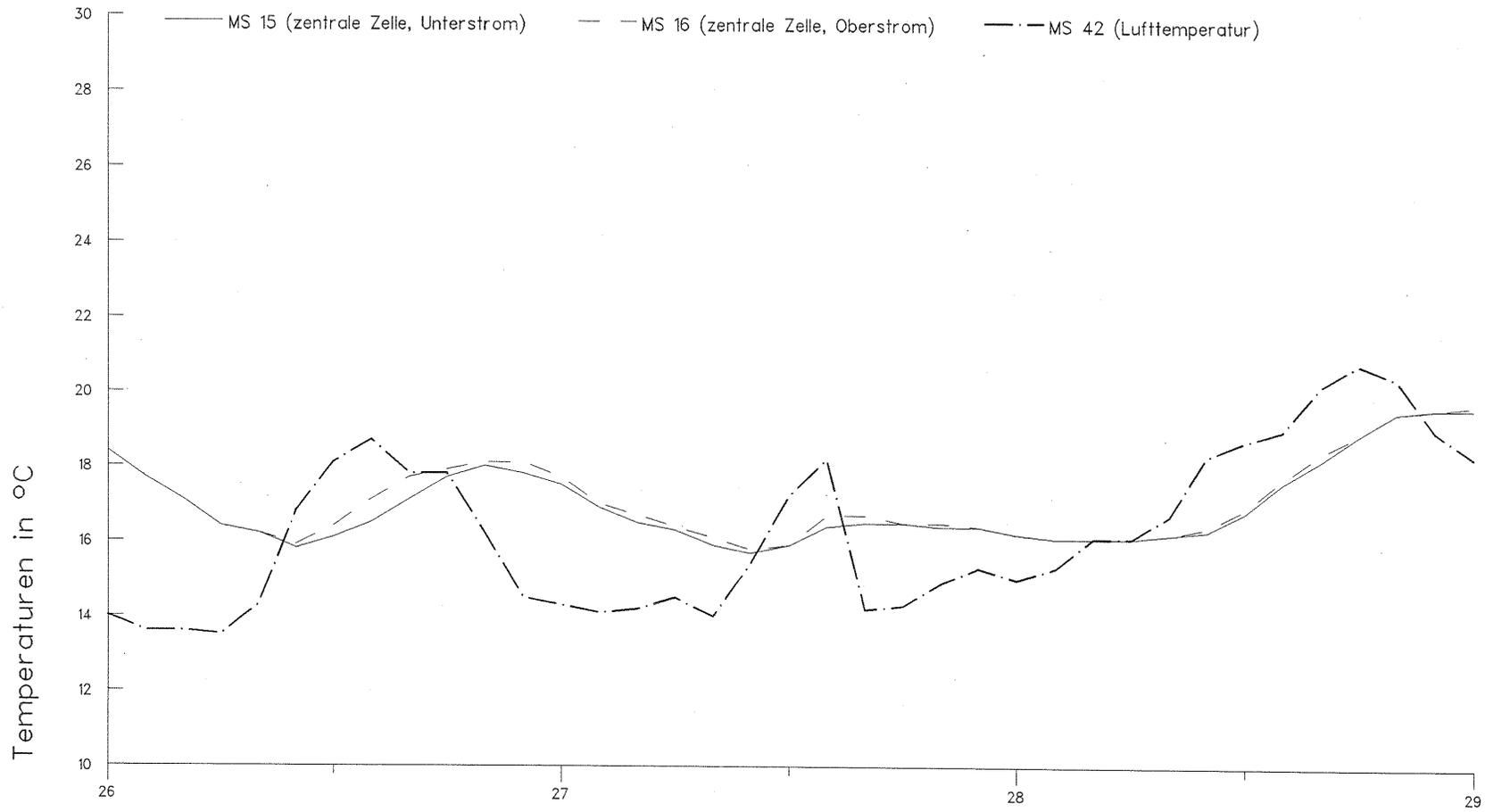
Monat: Juli 1993

Anlage 41

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9307R



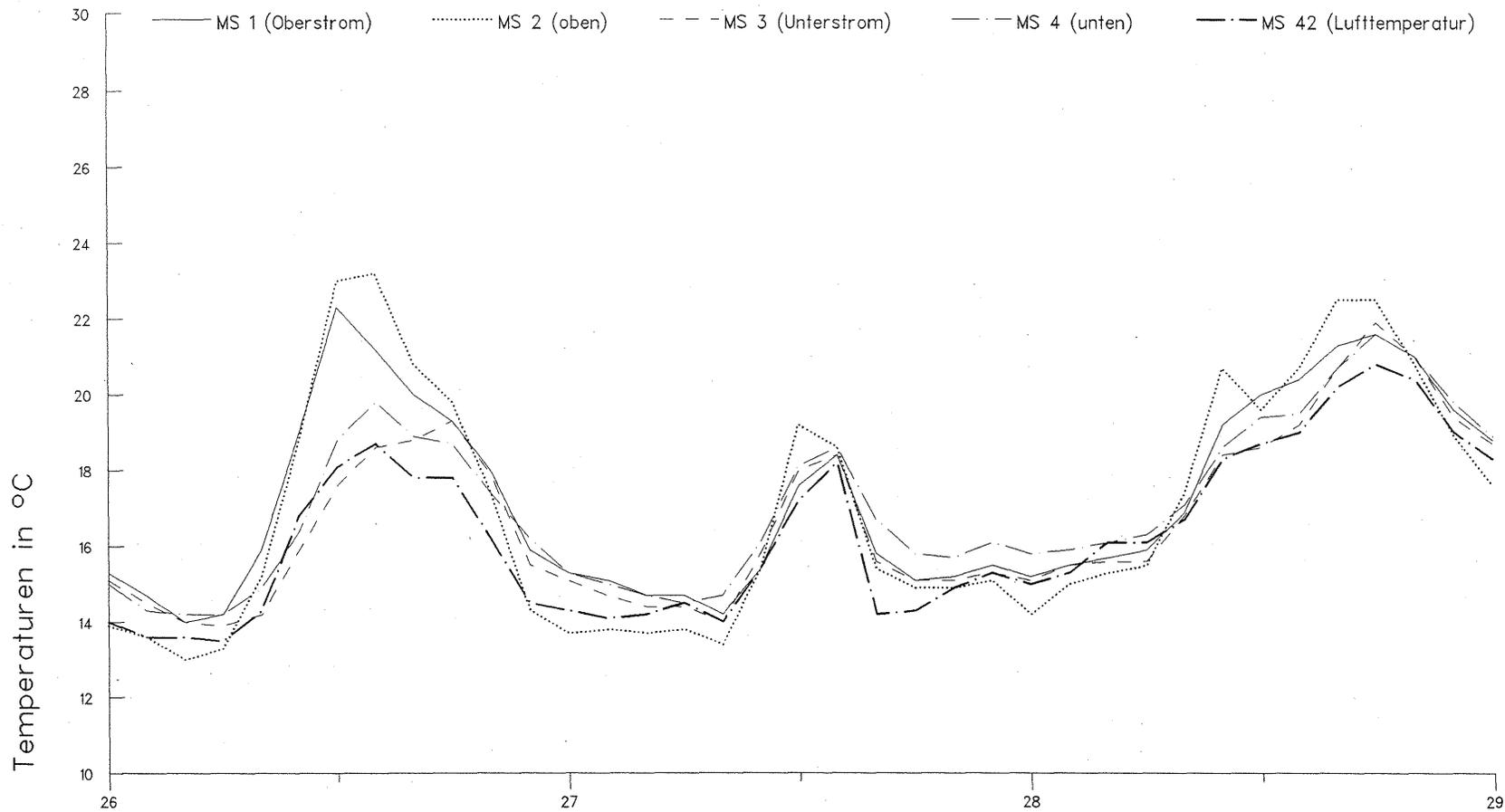
Monat: Juli 1993

Anlage 43

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9307R



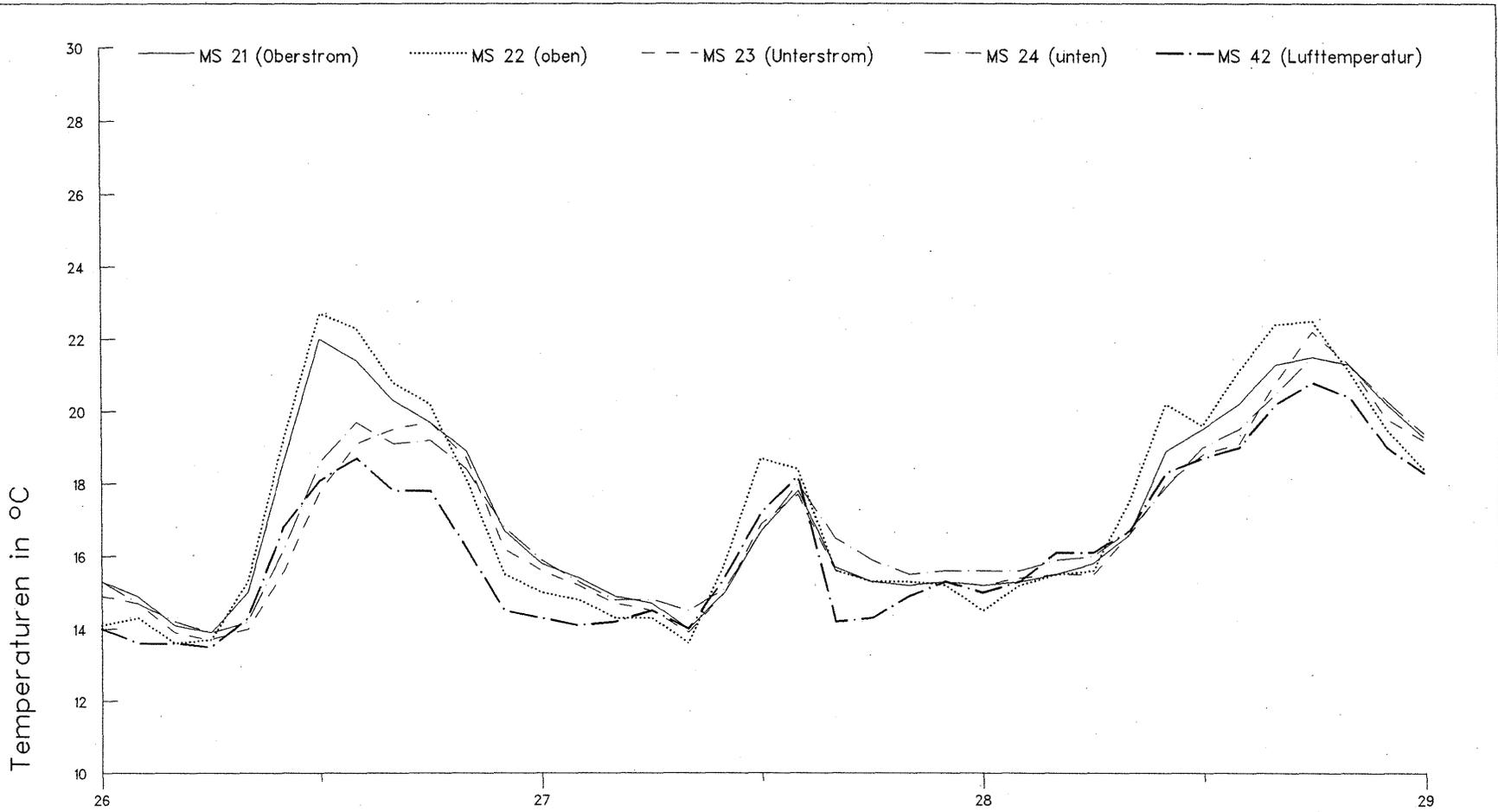
Monat: Juli 1993

Anlage 44

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse B (in Mitte der Stromöffnung)

Dateiname: 9307R



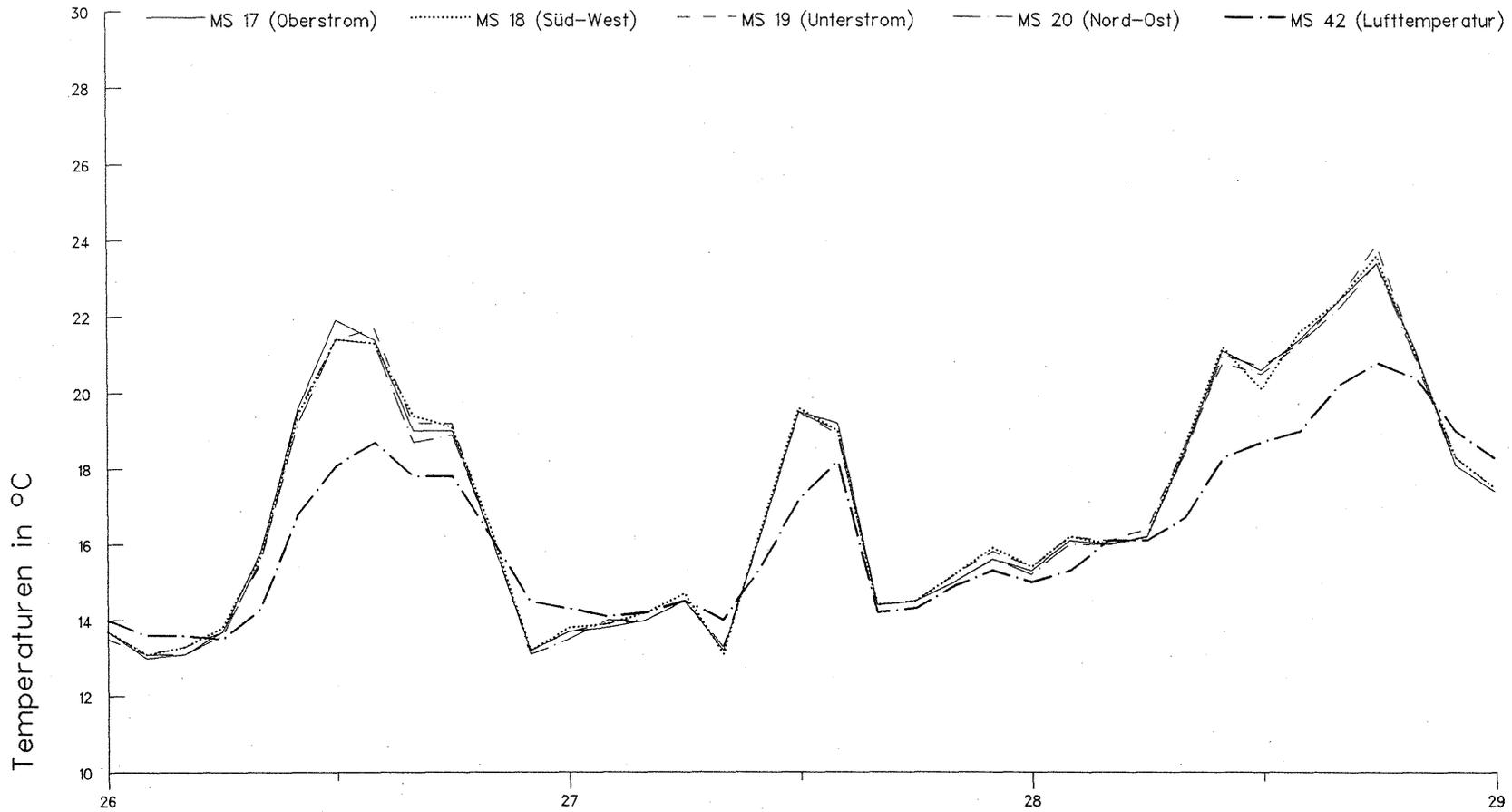
Monat: Juli 1993

Anlage 45

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse C (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9307R



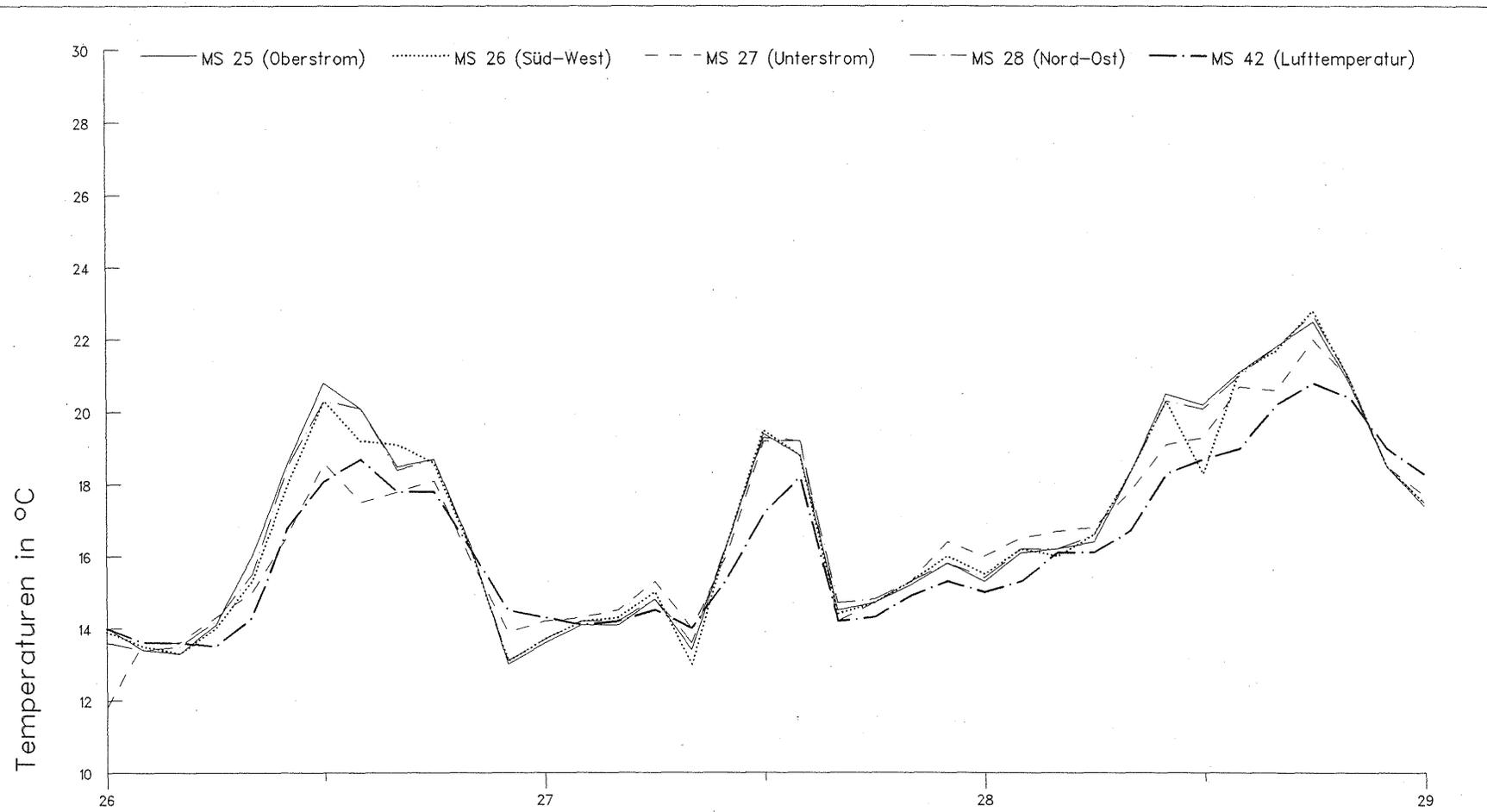
Monat: Juli 1993

Anlage 46

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse B (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9307R



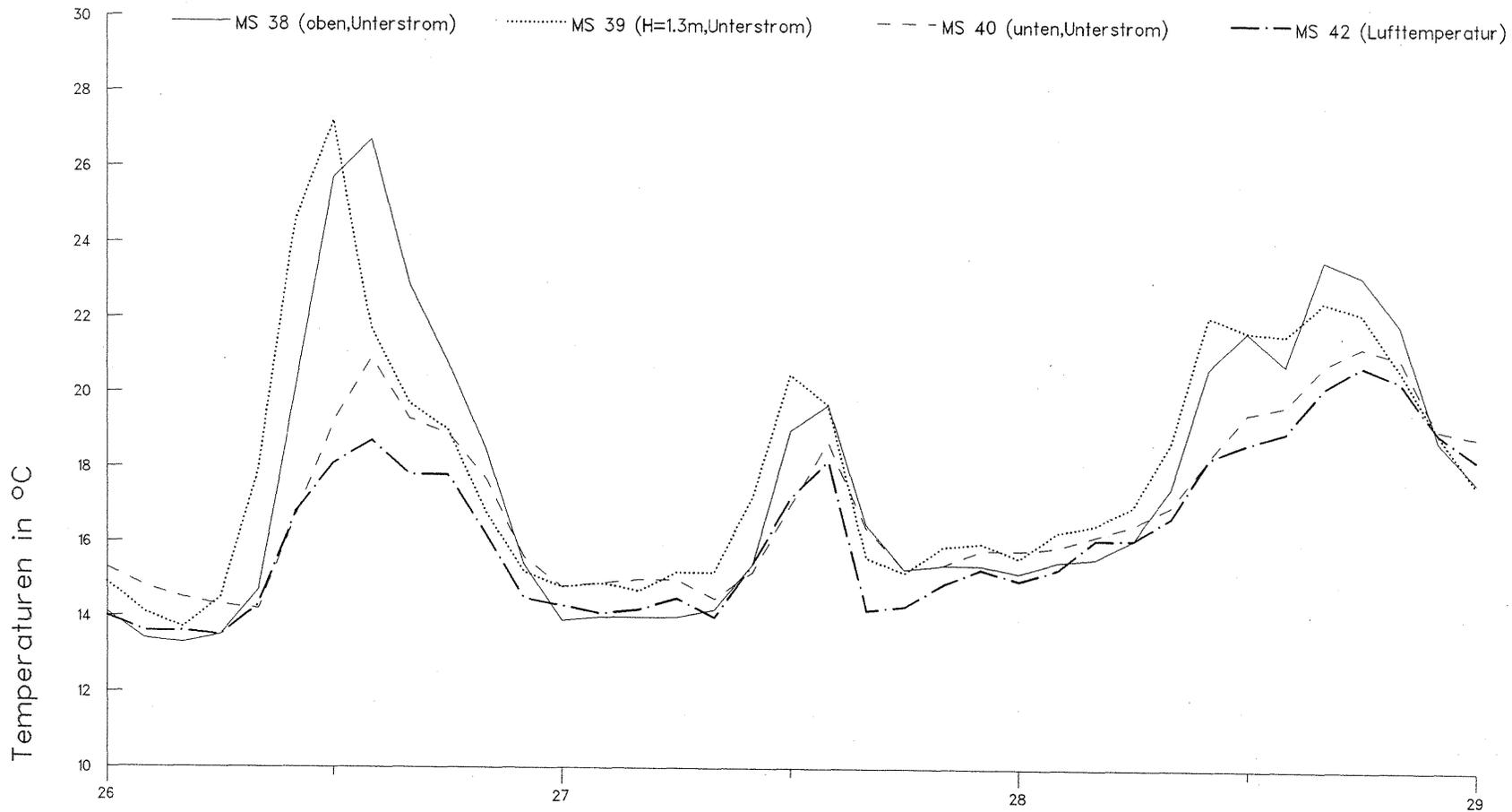
Monat: Juli 1993

Anlage 47

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse C (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9307R



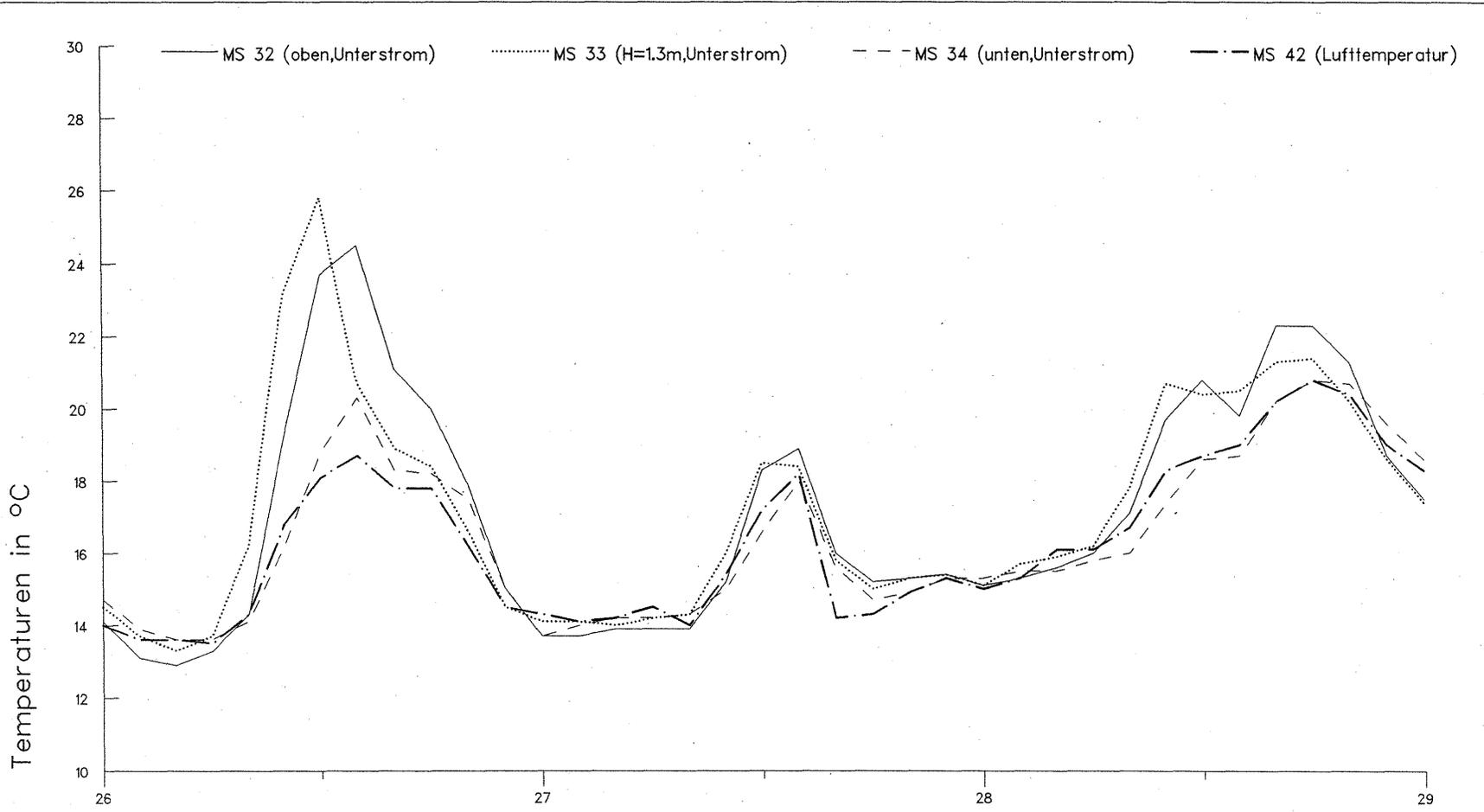
Monat: Juli 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9307R

Anlage 48



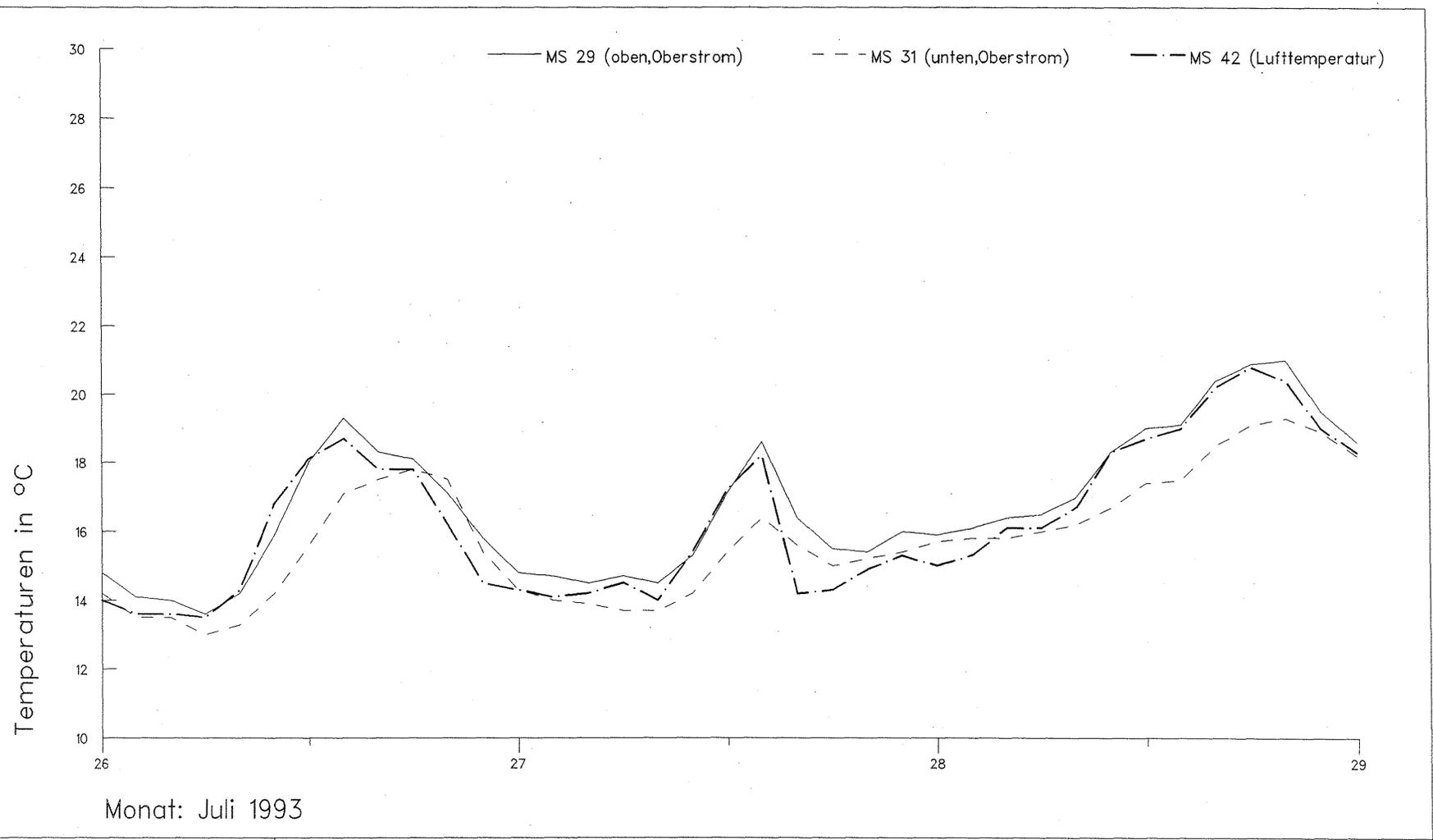
Monat: Juli 1993

Anlage 49

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9307R

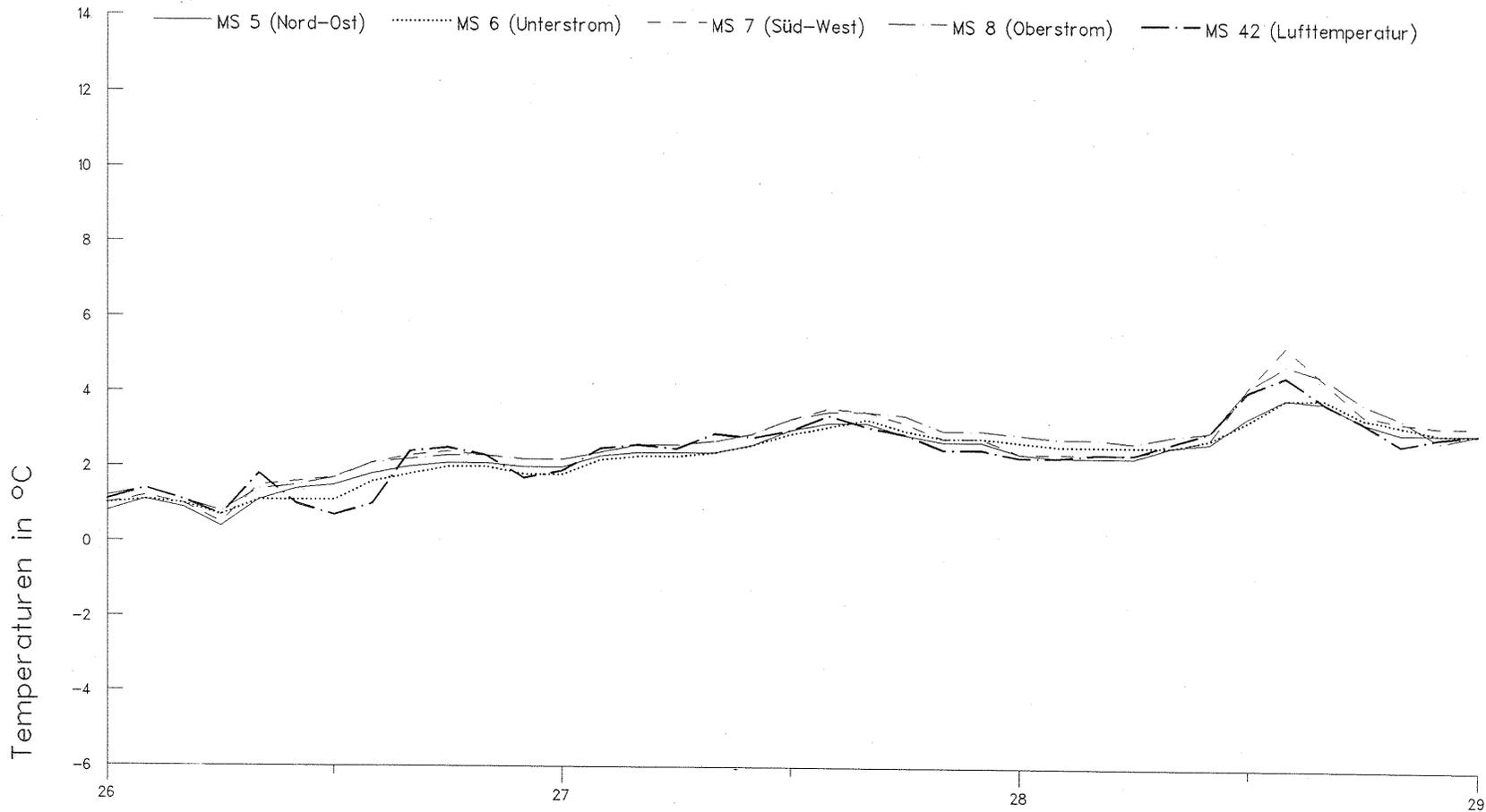


Anlage 51

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9307R



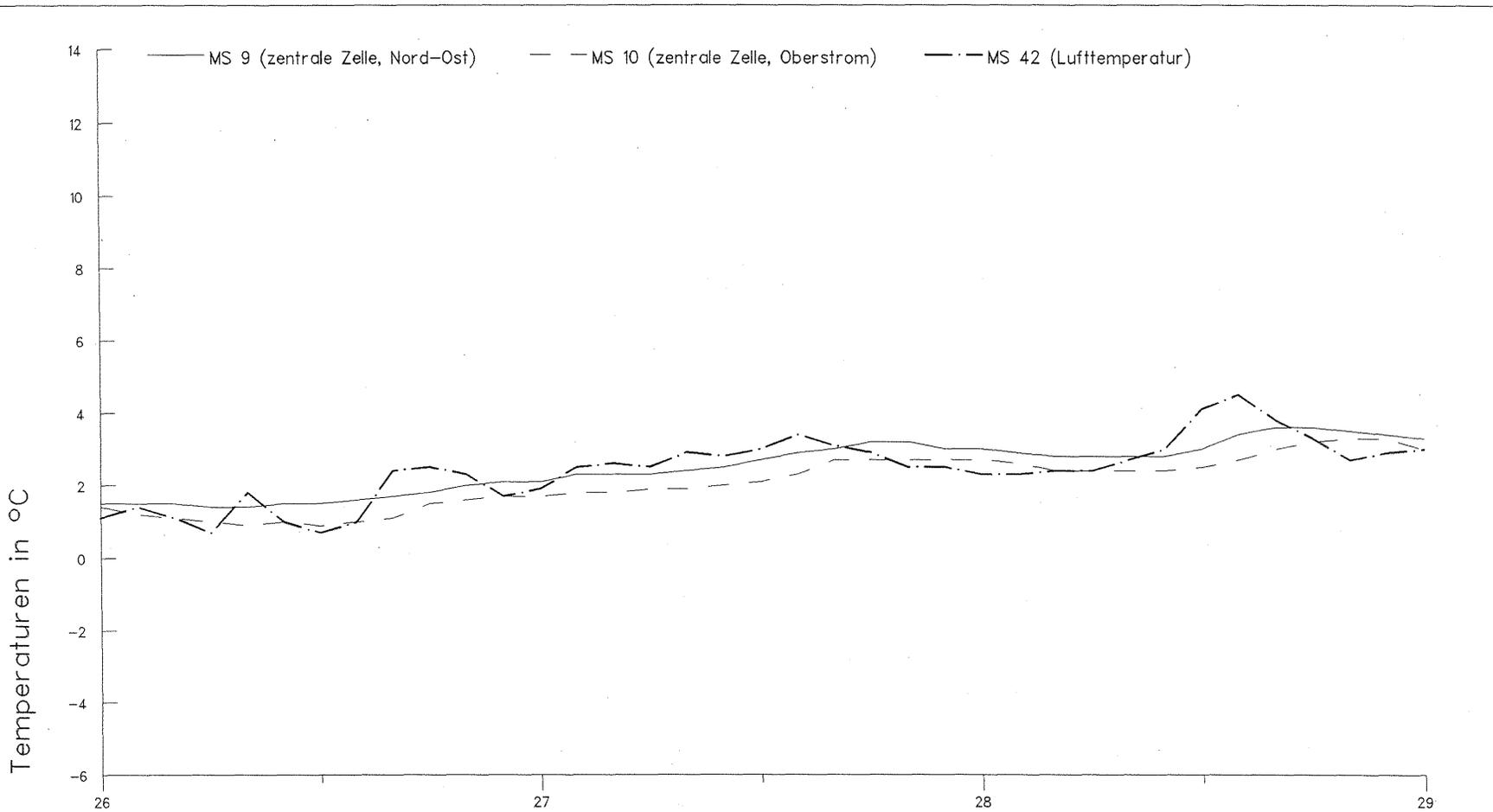
Monat: Dezember 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9312R

Anlage 52



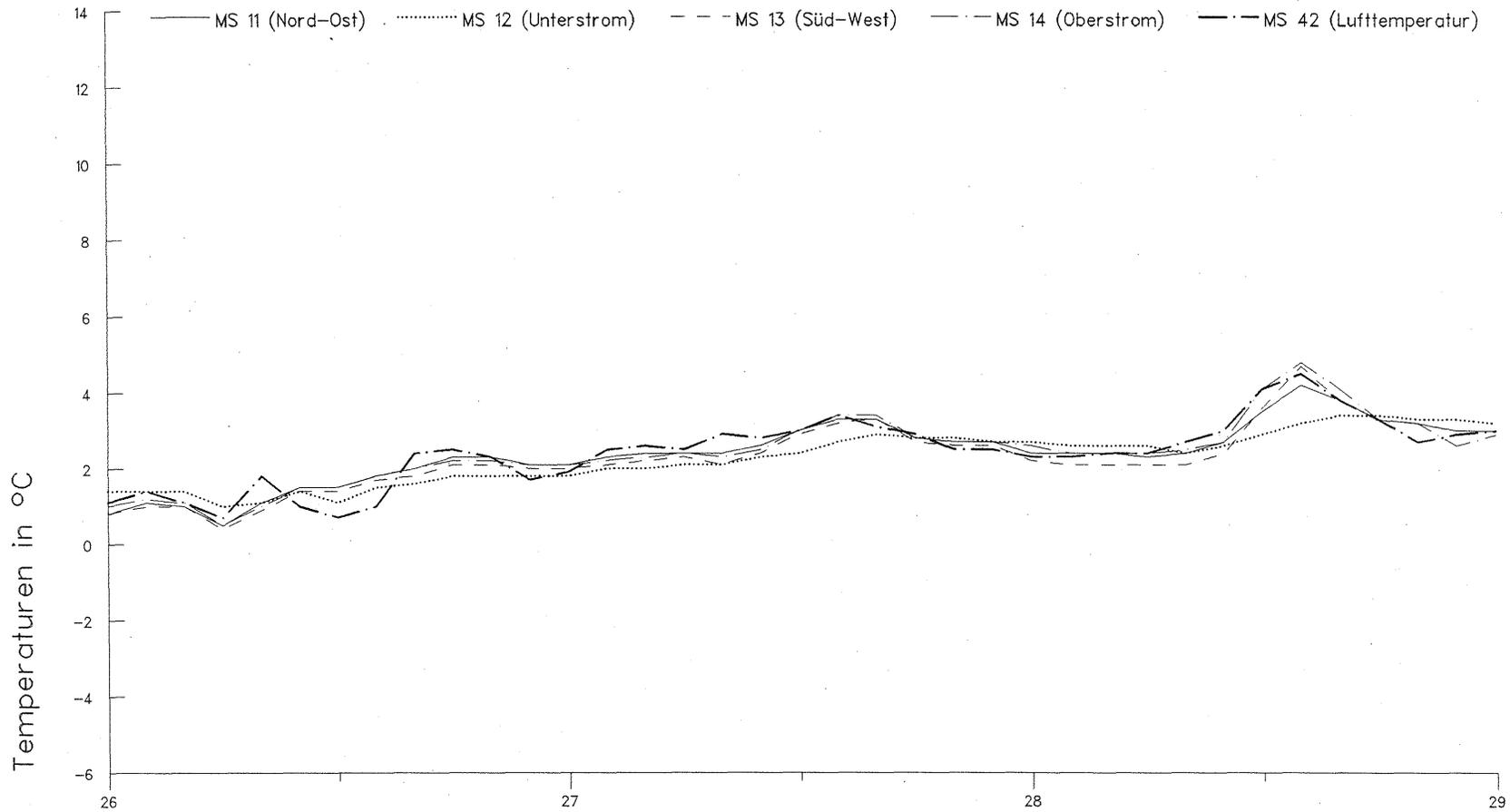
Monat: Dezember 1993

Anlage 53

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 20m

Dateiname: 9312R



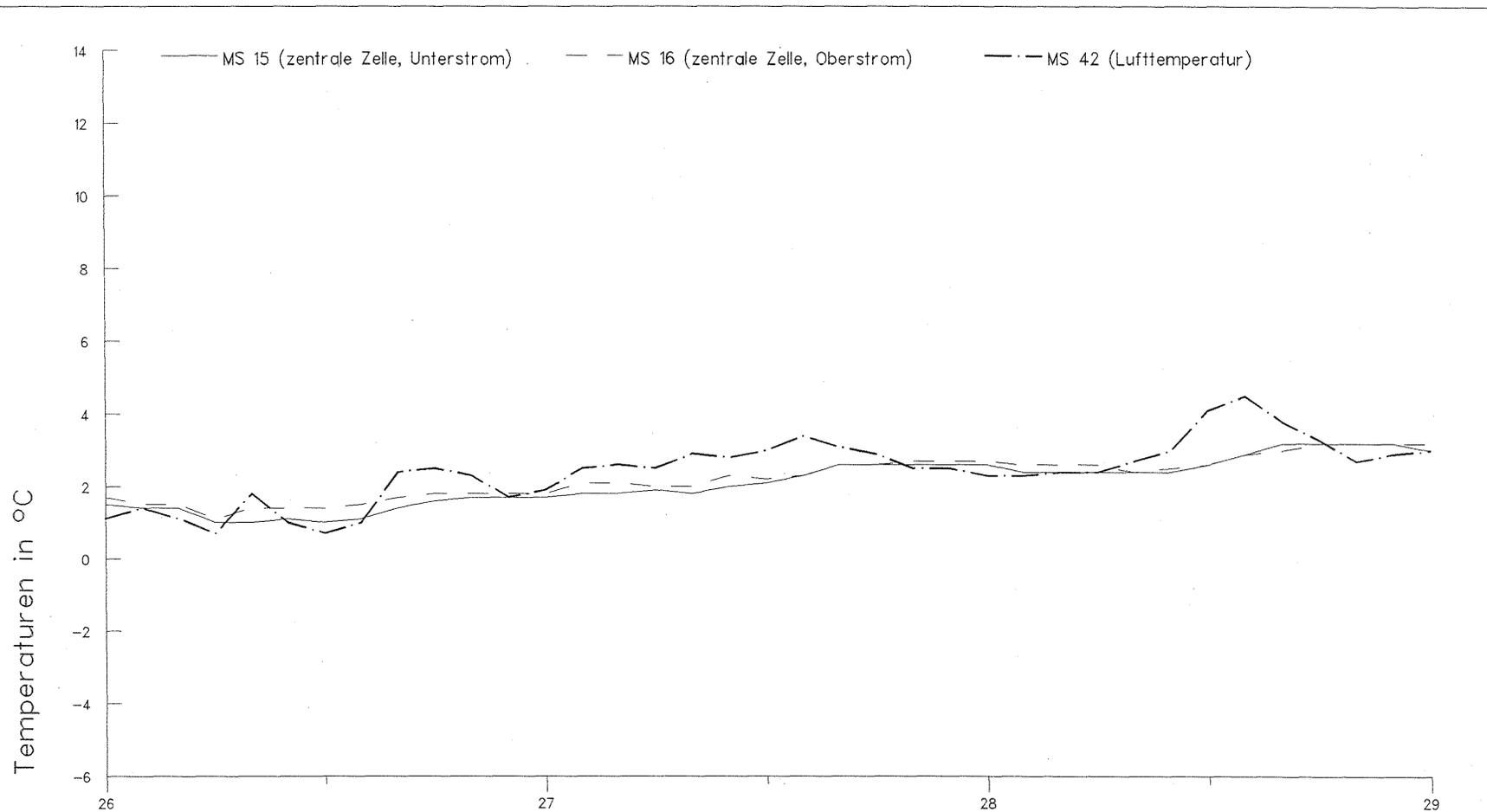
Monat: Dezember 1993

Anlage 54

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9312R



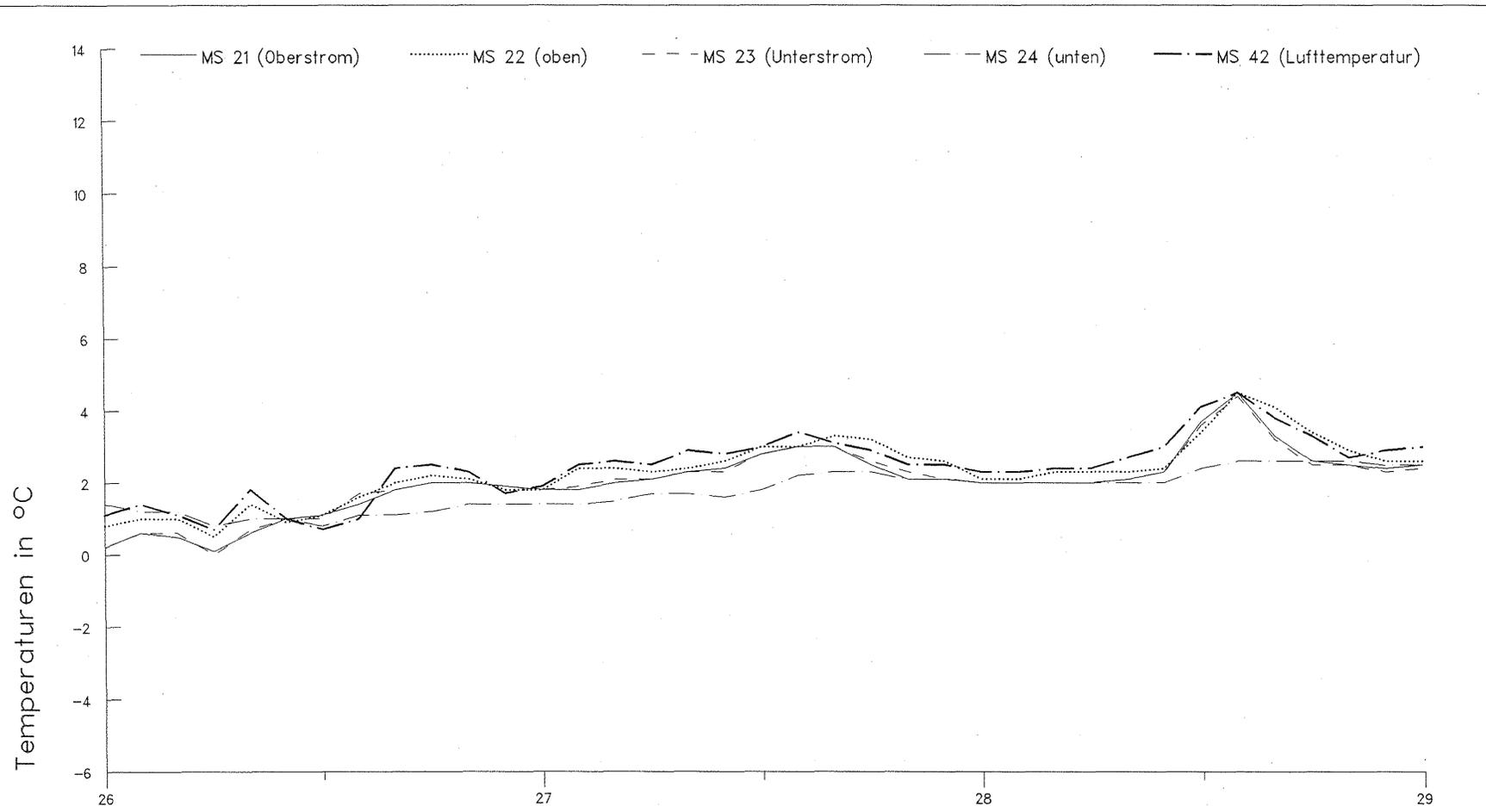
Monat: Dezember 1993

Anlage 55

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Pylon-Stiel, Achse C (rechtsrheinisch), H = 7m

Dateiname: 9312R



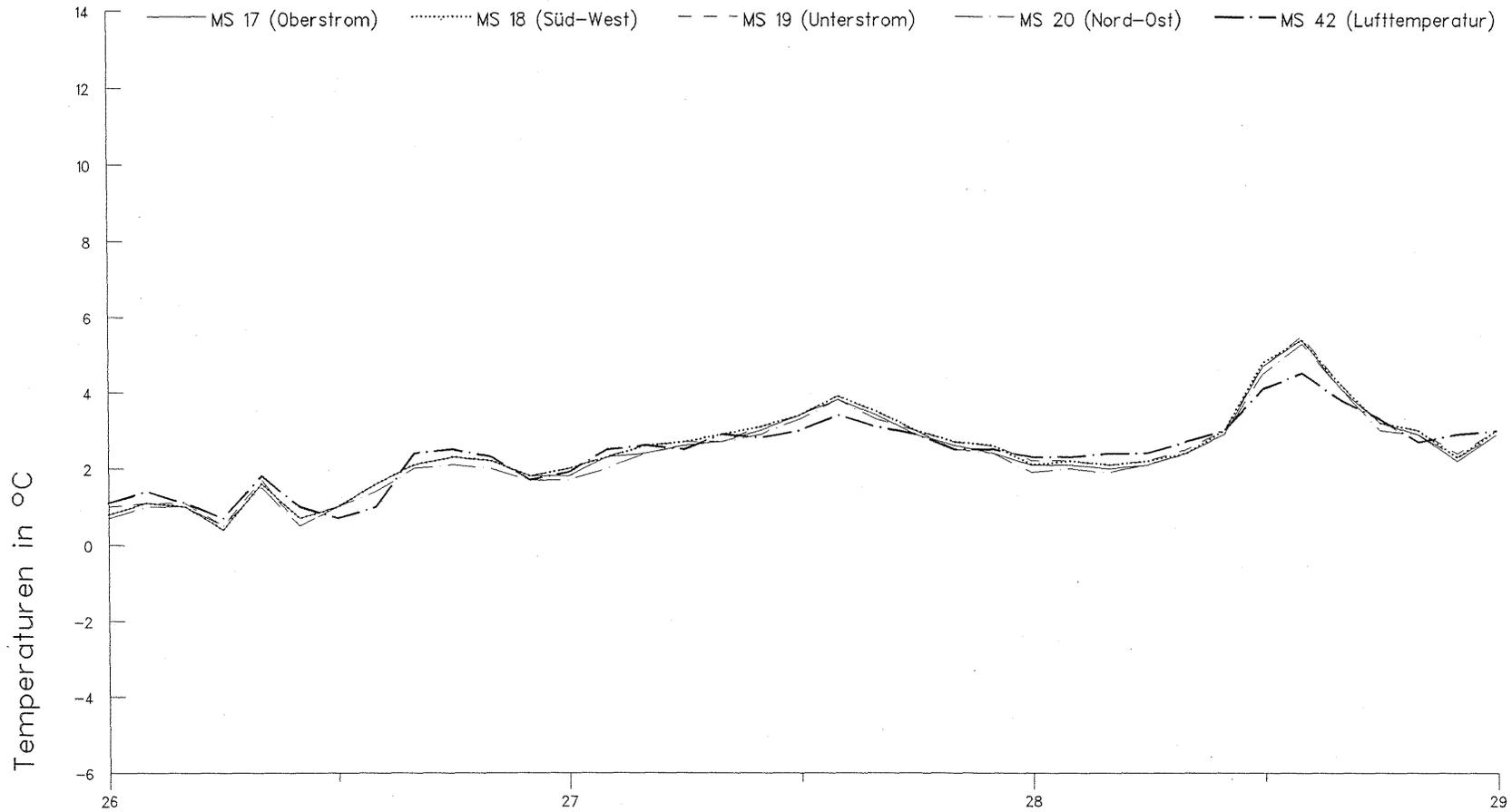
Monat: Dezember 1993

Anlage 57

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Tragkabel, Achse C (rechtsrheinisch)

Dateiname: 9312R



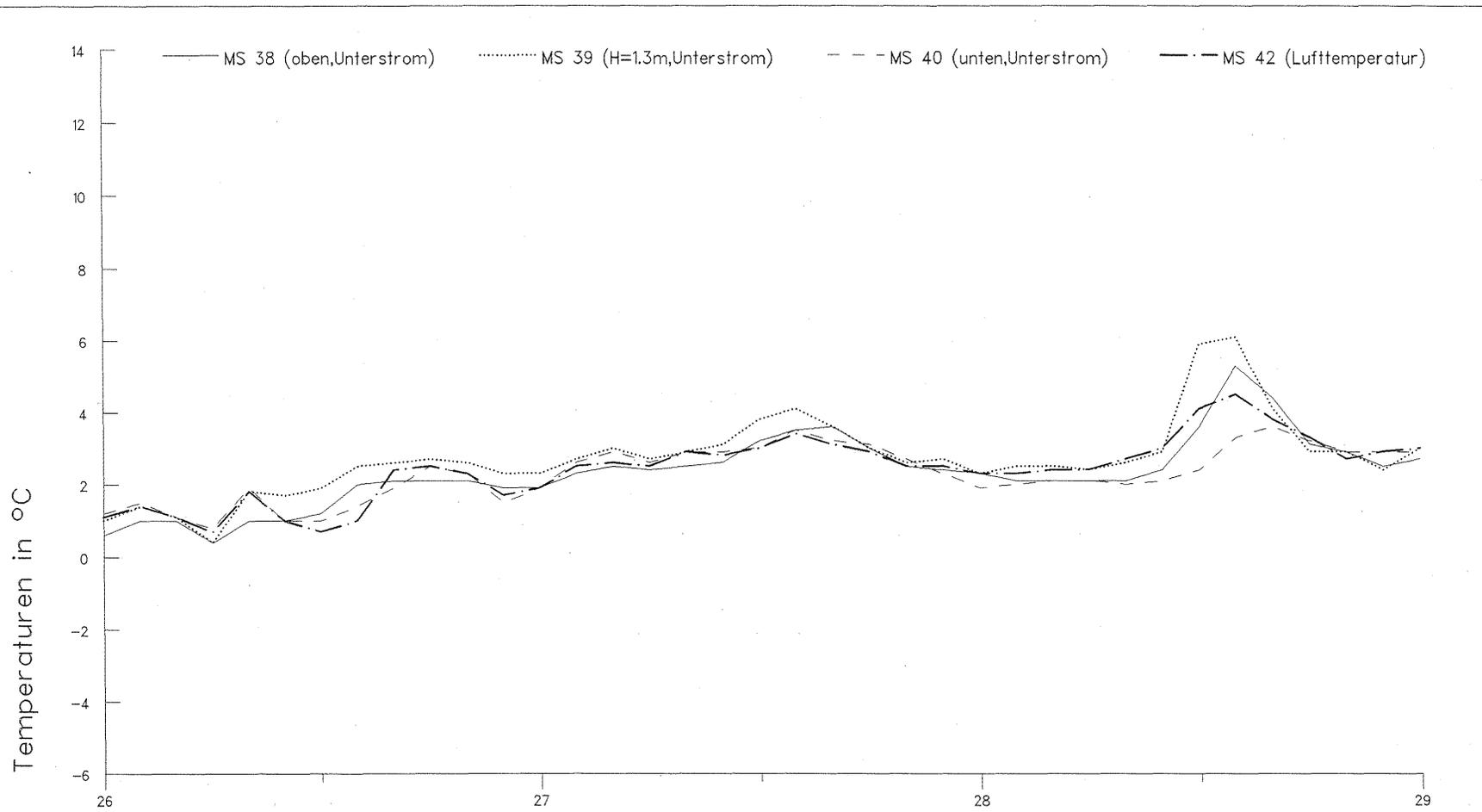
Monat: Dezember 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Hänger Nr.1, Achse B (rechtsrheinisch), H = 1.5m

Dateiname: 9312R

Anlage 58



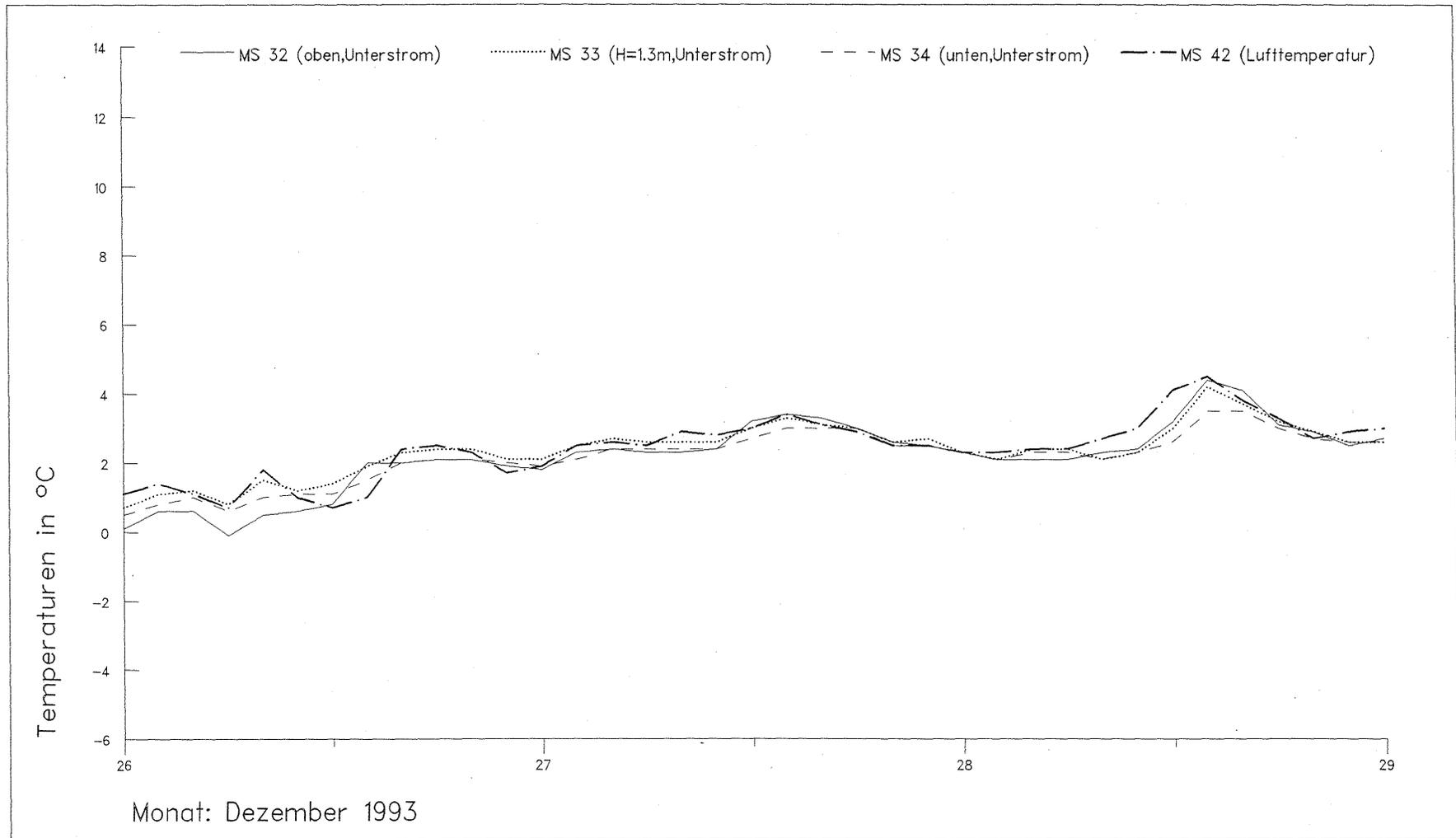
Monat: Dezember 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9312R

Anlage 59

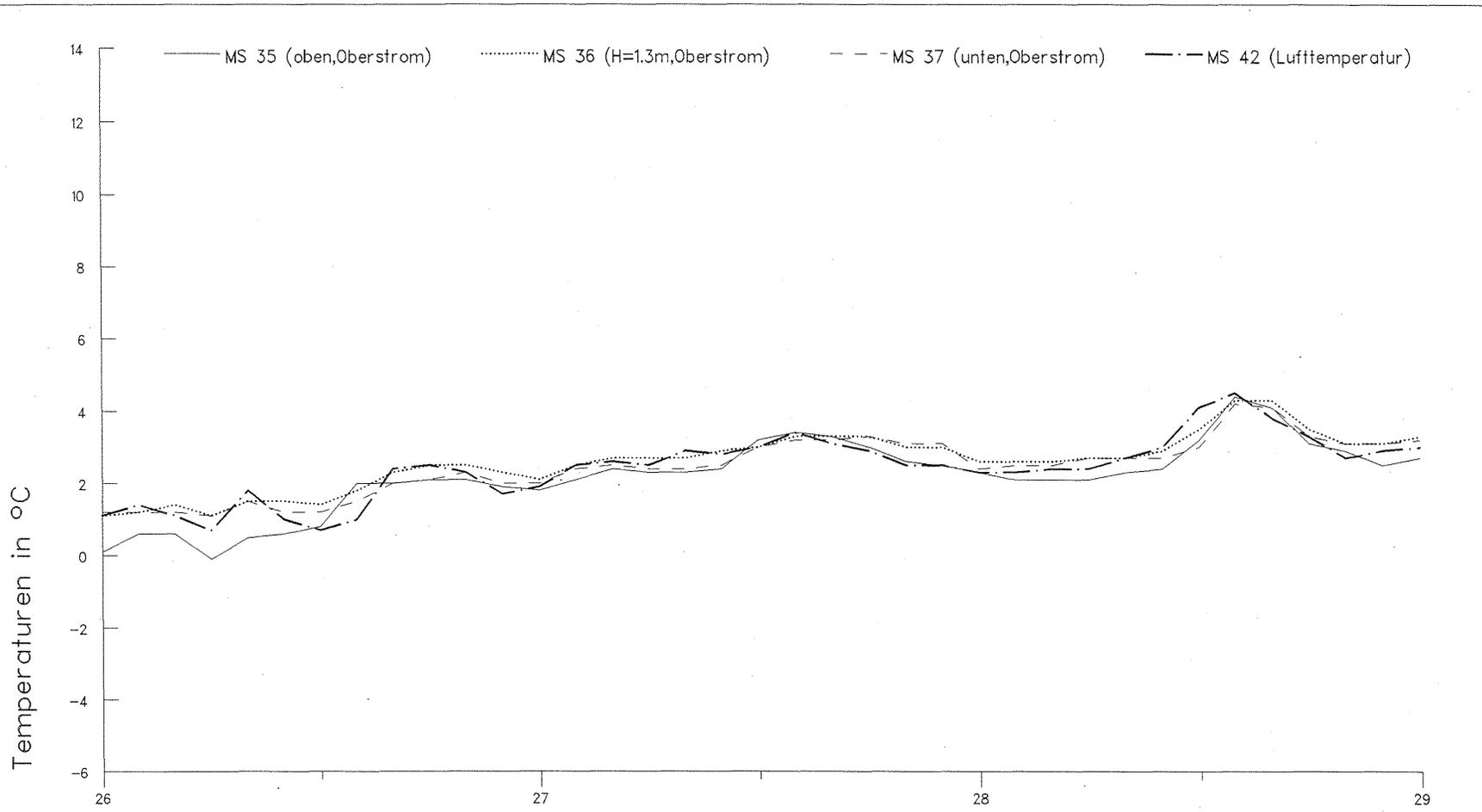


Anlage 60

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse C (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9312R



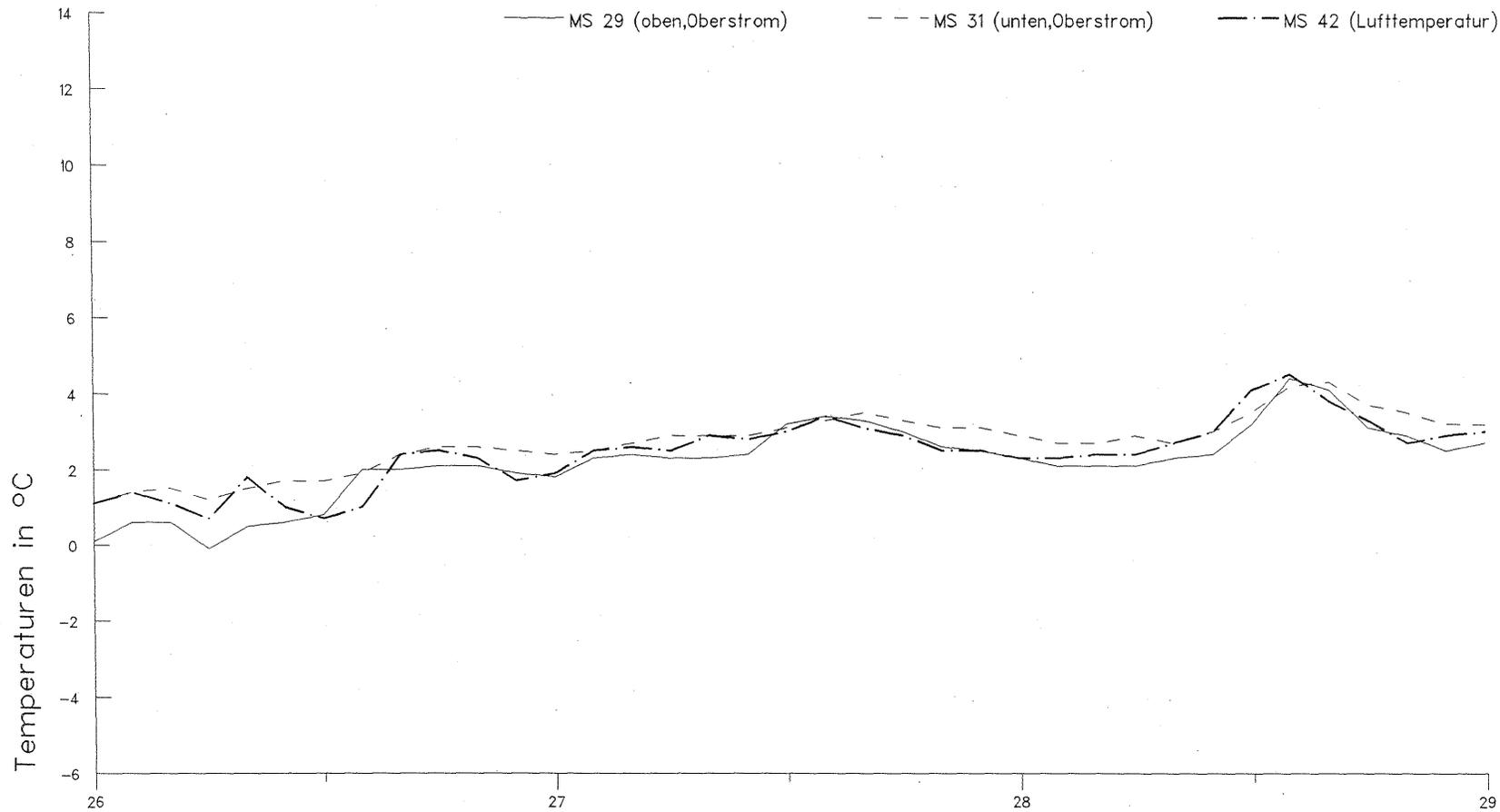
Monat: Dezember 1993

Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Stromöffnung bei Hänger Nr.15)

Dateiname: 9312R

Anlage 61



Monat: Dezember 1993

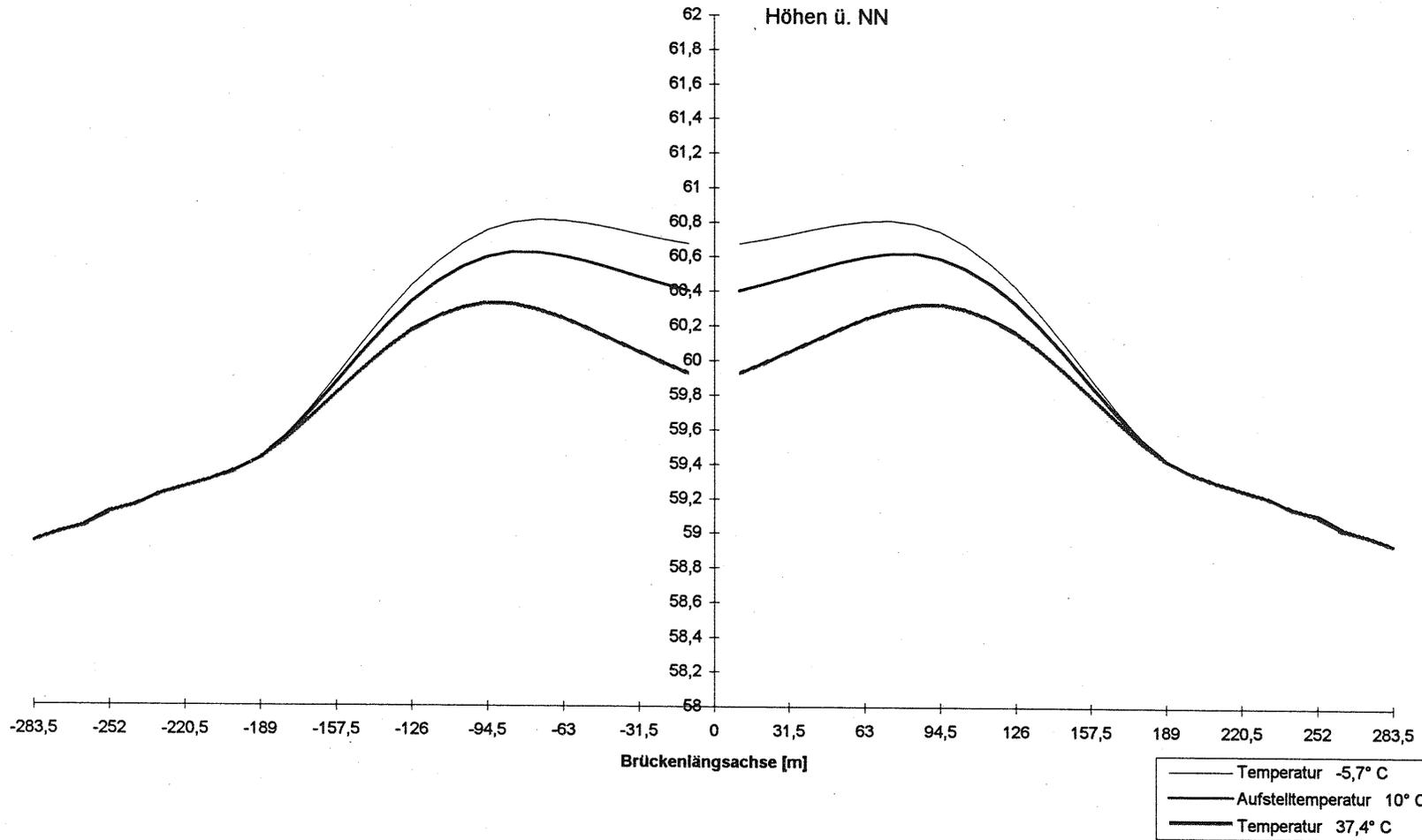
Bast
B4

Temperaturmessungen Rodenkirchener Brücke
Längsträger, Achse B (in Mitte der rechtsrh.Seitenöffnung)

Dateiname: 9312R

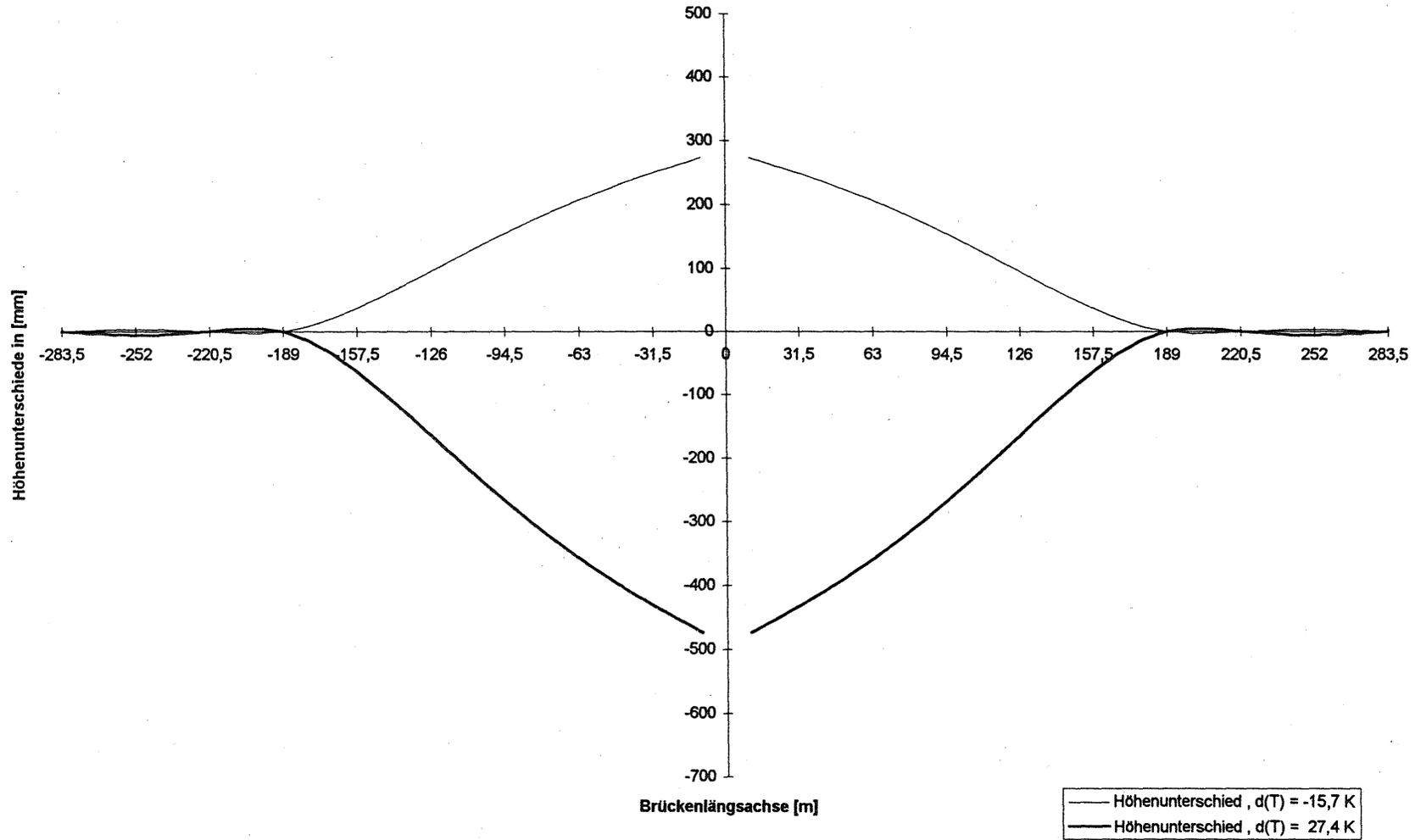
Anlage 62

Längsträgerverformungen infolge Temperatureinfluß (aus [9] entnommen)



Anlage 63

Höhenunterschied infolge Temperatureinfluß bezogen auf eine Aufstelltemperatur von 10° C
(aus [9] entnommen)



Anlage 64

höhe_unt.xls (Diagramm)

