

Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile

T 2659

T 2659

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

LEHRSTUHL für Stahl- und Leichtmetallbau

Universität Karlsruhe (TH) Fridericiana

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal

76128 Karlsruhe, Kaiserstr. 12, Tel.: 0721/6082215, Fax: 0721/608 4078

Schl u ß b e r i c h t

Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile

VA Bericht Nr. 92 1570

vom DIBt - Berlin finanziert

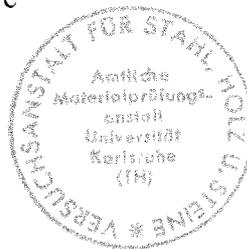
Vorhaben Az.: IV 1 - 5 - 669/92



Univ.-Prof. tekn. dr, Hon Dsc Rolf Baehre



Dipl.-Ing. G. Steidl



Karlsruhe, den 01. August 1994

Inhaltsverzeichnis:

Seite

| | |
|---|---|
| 1. Kuzfassung | 1 |
| 2. Zusammenfassung | 2 |
| 3. Gegenüberstellung der bisherigen Regelung DAST Ri 009 (mit Aufschweißbiegeversuch) mit DIN EN V 1993 (4.93), EC 3 | 5 |
| 4. Herstellung der Probekörper | 6 |
| 5. Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung | 7 |
| 6. Literatur Sprödbruch | 9 |

| | |
|-------------------|---|
| Anlage 1: | Technische Regeln für die Auswahl der Stahlgüte für geschweißte Stahlbauten |
| Anlage 2 bis 3: | Rechenbeispiele mit PC - Programm |
| Anlage 4 bis 9: | Gegenüberstellung der Ergebnisse DIN V ENV 1993 und DAST Ri 009 |
| Anlage 10: | Versuchsaufbau und Probekörperabmessungen |
| Anlage 11 bis 16: | Eigenschaften der Versuchslamellen |
| Anlage 17 bis 18: | Schweißparameter WPS EN 288 |
| Anlage 19: | Makroschliff mit Härteverlauf aus der Prüflamelle (Bereich versenkte Auftragsschweißung), Versuch 0 |
| Anlage 20: | Bruchkritische Stelle der Versuchslamelle |
| Anlage 21 bis 23: | Fotos: Versuchsaufbau |
| Anlage 24: | Abkühlkurve eines Trägers |
| Anlage 25 bis 28: | Kraft - Verformungs - Diagramme |
| Anlage 29 bis 33: | Fotos der Probekörper nach dem Versuch |

1. Kurzfassung

Forschungsvorhaben: „Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile“
vom DIBt-Berlin finanziert
AZ.: IV 1 - 5 669/92
VA Bericht Nr. 92 1570

Geschweißte Probekörper aus St 52 mit 80 mm Wanddicke wurden bei - 30°C verformt. Die Probekörper wurden unter praxisüblichen Bedingungen hergestellt. Die gewählten Randbedingungen entsprachen den ungünstigsten obersten Grenzwerten der derzeit in der BRD bauaufsichtlich eingeführten Regelung. Die Ergebnisse weisen für den untersuchten Fall ausreichende Spröbruchsicherheit aus.

1. Abridged version

Research project: „Brittle fracture behaviour of welded structural members“
sponsored by the German Institute of Structural Engineering
(DIBt) in Berlin
Reference: IV 1 - 5 - 669/92
VA report no. 92 1570

Welded test specimens made of St 52 with a wall thickness of 80 mm have been deformed at - 30° C. The test specimens have been produced under practical conditions. The selected boundary conditions corresponded to the most unfavourable upper limiting values of the regulation presently introduced by the building supervision in Germany. For the case investigated, the results show sufficient safety against brittle fracture.

1. Version Courte

Projet de recherche: „Comportement de la rupture fragile des échantillons soudés“
financé par l' Institut de la technique des constructions
(DIBt) à Berlin
Référence: IV 1 - 5 - 669/92
VA rapport no. 92 1570

Des échantillons soudés en acier St 52 avec un épaisseur de paroi de 80 mm étaient déformés à - 30° C. Les échantillons étaient fabriqués sous conditions similaires de la pratique. Les conditions marginales correspondaient aux plus défavorables valeurs limites supérieures du règlement qui était introduit présentement en Allemagne par la surveillance des travaux. Pour le cas examiné, les résultats prouvent une sécurité suffisante contre rupture fragile.

2. Zusammenfassung und Empfehlungen für die Normung

Die Stahlgütegruppe der bei geschweißten Bauteilen eingesetzten Stähle bestimmt die Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit der daraus hergestellten Bauwerke vor allem bei Beanspruchungen bei niedrigen Temperaturen.

Ab ca. 1936 wurden in allen Industrienationen geschweißte Bauteile mit wesentlich größeren Wanddicken hergestellt als dies bei den bis zu diesem Zeitpunkt üblicherweise genieteten Konstruktionen gebräuchlich war. Katastrophale Schäden an den ersten geschweißten Bauteilen durch Sprödbbrüche bei niederen Einsatztemperaturen führten danach zu zahlreichen Untersuchungen des Sprödbbruchverhaltens geschweißter Bauteile. Die in der BRD gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse dieser Forschungsaktivitäten sind im wesentlichen in der DAST Ri 009 (4.73) enthalten. Durch die bauaufsichtliche Einführung dieser Richtlinie in Verbindung mit entsprechenden Anwendungsnormen wurde der Gefahr von Sprödbbrüchen bisher genügend sicher vorgebeugt. Schadensfälle an Bauteilen, deren Stähle nach dieser Richtlinie ausgewählt wurden, sind in den letzten Jahrzehnten nicht bekannt geworden.

Im Zuge der Harmonisierung der Regelwerke in der EG wurden mit EN 10025 (01.91) neue Stahlgütegruppen definiert, die nicht vollständig in die Stahlgütegruppen umzuschlüsseln sind, wie sie in DIN 17 100 (01.80) enthalten waren. Die Stahlgütegruppen dieser Norm stellen die Grundlage für die Stahlgüteausswahl der DAST Richtlinie 009 dar. Eine Anpassung dieser Richtlinie an die derzeitig bauaufsichtlich relevante technische Lieferbedingung EN 10 025 wurde durch den DAST noch nicht vorgenommen. Da im Zuge der Einführung der Stahlbaunorm DIN 18 800 Teil 1 Handlungsbedarf bestand, wurde in der Anpassungsrichtlinie zu DIN 18 800 Teil 1, veröffentlicht in den DIBt-Mitteilungen 2/1992, eine Anpassung in Form einer aktualisierten Bemessungstabelle veröffentlicht. Die technischen Regelwerke (Eggert Stahlbauhandbuch Bd. 1) für diese Fragestellung sind in Anlage 1 zusammengestellt. Diese Regelung sieht als oberste Wanddicke 75 mm vor. Die bisherige oberste Wanddicke der DAST Richtlinie betrug 50 mm. Diese Erweiterung erschien im Hinblick auf die Anwendung einer nach EN 10025 möglichen, bisher in DIN 17 100 nicht enthaltenen, besonders zähen Stahlsorte vertretbar. Die Anhebung der obersten Wanddicke auf 75 mm stellt allerdings einen bisher noch nicht über einen längeren Zeitraum bewährten Anwendungsfall dar.

Um einen nach dieser Regelung möglichen, kritischen Anwendungsfall mit der obersten Wanddicke von 75 mm versuchstechnisch nachzuvollziehen, wurden drei Versuche (+ 1 Vorversuch) an praxisnahen Probekörpern konzipiert und durchgeführt.

Alle geprüften Probekörper zeigten unter kritischen Randbedingungen ein zähes, verformungsfähiges Tragverhalten beim Aufbringen der Fließlast.

Als kritische Randbedingungen im Sinne der DASt Ri 009 bzw. der Sprödbruchauslösung wurden gewählt:

| | |
|---------------------|--|
| Wanddicke: | 80 mm |
| Prüftemperatur: | -30° C |
| Schweißspannungen: | sehr hoch |
| Schweißbedingungen: | kritische, keine Vorwärmung |
| konstruktive Form: | Steifigkeitssprung an bruchkritischer Stelle |
| Belastung: | kraftgesteuert |

Die Werkstoffe für die Versuche (mit Ausnahme des Vorversuches) wurden über den Stahlhandel als Fe 510 DD nach EN 10 025 beschafft. Es wurden allerdings bewußt Werkstoffe verschiedener Hersteller aus unterschiedlichen Ländern (BRD, Schweden und Brasilien) verwendet. Die von den Herstellern angegebenen Werte dieser Stähle liegen bezüglich der Sprödbruchgefährdung nicht an der jeweils noch zulässigen kritischsten Grenze der technischen Lieferbedingung EN 10 025. Der denkbar kritischste Werkstoffzustand wurde daher nicht erfaßt. Trotzdem ist durch den Umstand, daß die drei Stahllieferungen über den Stahlhandel auf dem Weltmarkt ohne besondere Auswahl beschafft wurden, davon auszugehen, daß die verwendeten Werkstoffe für die Werkstoffgruppe Fe 510 DD bezüglich Sprödbruchverhaltens repräsentativ sind.

Wertet man die gefundenen Versuchsergebnisse im Hinblick auf die derzeitige bauaufsichtlich eingeführte Regelung, ist damit der exemplarische Nachweis erbracht, daß für den untersuchten Fall ausreichende Sprödbruchsicherheit besteht.

Durch die in der Anpassungsrichtlinie vorgenommene Erweiterung der obersten Wanddicke von 50 mm (DASt Ri „alt“) auf 75 mm (DASt Ri „neu“) werden die bisherigen Sicherheitsmargen gegen Sprödbruch geschweißter Stahlbauteile nicht verringert.

Parall zu der zuvor geschilderten Entwicklung wurde im Zuge der Schaffung von EG-einheitlichen Bemessungs- und Konstruktionsregeln von Stahlbauten (EC 3) in DIN V EN V 1993 April 1993 in einem informativen Anhang C ein Leitfaden zur Vermeidung von Sprödbruch (Wahl der Stahlgüte) erarbeitet. Die in diesem Leitfaden dargestellte Berechnungsmethode basiert im wesentlichen auf den in den letzten Jahrzehnten entwickelten Modellen bzw. Theorien der Bruchmechanik.

Durch die systematische Darstellung des Problems und die konsequente Aufschlüsselung in Einflußparameter wird das Sprödbruchproblem von Stahlbauteilen hier detaillierter beschrieben als dies in der DAST Ri 009 geschieht. Außerdem ist es vorteilhaft, daß durch den Anhang C der DIN V EN V 1993 klar dargelegt wird, daß die Stahlauswahl bereits im Zuge der Bemessung und Konstruktion erfolgen muß. Damit sind die im Rahmen der industriellen Stahlbaufertigung notwendigen Entscheidungen bezüglich der Werkstoffauswahl frühzeitig genug, nämlich vor der Ausführung, zu treffen.

Allerdings zeigt ein Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen nach Anhang C der DIN V EN V 1993 und den derzeit bauaufsichtlich eingeführten Regelungen (DAST Ri „neu“) eine starke Diskrepanz der maximal zulässigen Wanddicke bei der für Stahlbauteile üblichen niedrigsten Bemessungstemperatur von -30°C auf. Eine Anpassung des Berechnungsmodelles des Anhanges C an die bisher bewährten Verhältnisse scheint unbedingt erforderlich. Bei einigen Wahlkriterien der Regelungen des Anhanges C der DIN V EN V 1993 werden zulässige Wanddicken möglich, die weit oberhalb der jetzt festgelegten obersten Wanddicke von 75 mm liegen. Damit wird der durch zahlreiche praktisch ausgeführte und erprobte Bauwerke abgesicherte Bereich für geschweißte Bauteile weit überschritten. Um das bisherige Sicherheitsniveau geschweißter Bauteile gegen Sprödbruch beizubehalten, darf eine derartige Extrapolation auf der Grundlage theoretischer Erkenntnisse der Bruchmechanik ohne praxisnahe, versuchstechnische Absicherung nicht erfolgen.

Die gefundenen Versuchsergebnisse bestätigen für den gewählten Bemessungsfall die nach Anhang C zu erwartende Sprödbruchfestigkeit. Damit sind aber noch keineswegs alle nach dieser Regelung abgedeckten Fälle genügend abgesichert.

3. Gegenüberstellung der bisherigen Regelung DAST Ri 009 (mit Aufschweißbiegeversuch) mit DIN V EN V 1993 (4.1993), EC 3

In der Anlage 1 sind die Regelungen aufgeführt, wie sie im Sinne "der allgemein anerkannten Regeln der Technik" derzeit in der BRD für Stahlbauten gelten. Wesentlicher Inhalt dieser Regelung ist, daß in Tabelle 2 der DAST Ri 009 unter Berücksichtigung der verwendeten "Werkstoffgüte", der zu erwartende niedrigste Einsatztemperatur, der Schadenserwartung und dem Eigenspannungszustand bzw. der konstruktiven Form, eine maximal zulässige Wanddicke empfohlen wird. Zusätzlich ist für Stahlbauten nach DIN 18 800 Teil 1 ab einer Wanddicke von 30 mm durch einen Aufschweißbiegeversuch an jeder Lieferung ausreichende Sprödbruchsicherheit der verwendeten Stähle nachzuweisen. Im Zuge der bauaufsichtlichen Einführung von DIN 18 800 Teil 1 wurde die DAST Ri 009 an die in DIN EN 10 025 (1.91) enthaltenen Stähle angepaßt.

Die in DIN V EN V 1993 (4.93) Anhang C vorgesehene Regelung enthält ein Rechenverfahren, mit dem die jeweils niedrigste Einsatztemperatur für ein Stahlbauteil bestimmt werden kann. Dabei werden als Einflußparameter die Festigkeit des Stahles, die Werkstoffdicke, die Belastungsgeschwindigkeit, die Werkstoffzähigkeit und die Schadenserwartung bzw. die Tragwerksausbildung berücksichtigt. Das Verfahren ist vor allem im Hinblick auf eine Anwendung im Rahmen von PC-üblichen Rechenprogrammen gut geeignet, die Auswirkungen der einzelnen Parameter aufzuzeigen. In Anlage 2 und 3 sind zwei typische Fälle durch ein Tabellenkalkulationsprogramm behandelt. Die in den getönten Feldern dieser Anlagen enthaltenen Größen sind innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Anhangs C frei wählbar. Als Ergebnis der Berechnungen wird die zulässige niedrigste Bauteiltemperatur in Abhängigkeit von der Bauteildicke im unteren rechten Teil der Anlagen 2 und 3 dargestellt. Mit Hilfe dieses Rechenverfahrens wurden für verschiedene Werkstoffe (St 37, St 52) und unterschiedliche Randbedingungen die bei -30°C noch zulässigen Wanddicken ermittelt und mit den entsprechenden Wanddicken, wie sie nach der in den DIBt-Mitteilungen vom 2.4.92 Seite 65 veröffentlichten Tabelle (entspricht in ihrem Aufbau der DAST Ri 009) zulässig sind, verglichen. In den Anlagen 4 bis 9 sind die Ergebnisse in graphischer bzw. tabellarischer Form gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, daß je nach der Wahl der Randbedingungen die nach DIN V EN V 1993 (4.93) vorgesehene Regelung zu größeren oder kleineren Wanddicken gegenüber der DAST Ri 009 führt. Die Vergleiche führen bei einigen Randbedingungen, vor allem beim Spannungszustand "niedrig (S1)", zu sehr unterschiedlichen

Ergebnissen. Das ist auch in der unterschiedlichen Definition für die Spannungszustände begründet. Der Vergleich zeigt vor allem für den bei Schweißkonstruktionen häufigen und kritischen Fall hoher Eigenspannungen so starke Differenzen auf, daß eine Anpassung des Rechenverfahrens an die bewährte DASt-Ri 009 ratsam erscheint. In der Gegenüberstellung der Anlagen 4 bis 9 ist jeweils auch eine Spalte aufgenommen, die mit ENV 1993* gekennzeichnet ist. In diese Spalte können nach Vorliegen eines entsprechend angepaßten Rechenverfahrens die dann zu ermittelnden Werte eingetragen werden.

4. Herstellung der Probekörper

Die konstruktive Ausbildung der Probekörper ist in der Anlage 10 dargestellt. Der Werkstoff für die Versuchslamellen wurde über den Stahlhandel beschafft. Die Werkstoffdaten für diese Werkstoffe sind in den Anlagen 11 und 12 enthalten. In den Anlagen 13 bis 16 sind die Kerbschlagarbeit-Temperaturkurven der 4 untersuchten Lamellen dargestellt. Zum Vergleich wurden in diese Diagramme auch die Kurven der Stähle eingetragen, an welchen Sprödbruchuntersuchungen durchgeführt wurden, die zur Absicherung der bisherigen Regelungen (DASt Ri 009 „alt“) herangezogen werden können (siehe /15/ und /22/).

Das Schweißen der Probekörper erfolgte in einem Stahlbaubetrieb, der für derartige Schweißarbeiten einen entsprechenden Eignungsnachweis zum Schweißen besitzt und in der Durchführung solcher Schweißarbeiten erfahren ist. Die Schweißbedingungen bei der Herstellung der Schweißnähte der Versuchslamellen sind in einer Verfahrensanweisung des Herstellers nach EN 288 Teil 2 enthalten (siehe Anlage 17 und 18). Bei der Herstellung aller Probekörper wurde bewußt auf eine Vorwärmung verzichtet. Daher ist sowohl der Eigenspannungszustand als auch die Aufhärtung in der Wärmeeinflußzone ungünstiger als dies im praktischen Anwendungsfall wäre, wo nach den derzeitigen schweißtechnischen Ausführungsregeln vorgewärmt würde. In Anlage 19 ist der Härteverlauf quer zu der versenkten Auftragsschweißung des Trägers bzw. Versuches 0 dargestellt. Diese Darstellung soll die Verhältnisse dieser Naht exemplarisch darstellen. Die in Einzelfällen zu erwartenden Aufhärtungen können z.B. nach der in /34/ beschriebenen Methode genügend genau ermittelt werden.

Die Schweißfolge wurde so gewählt, daß die bruchkritische Stelle unter möglichst hohen Zugspannungen stand. Um das zu erreichen, wurde erst nach der Ausführung aller Schweißnähte an dem Belastungsträger die Versuchslamelle aufgeschweißt, danach die Ausfugung vorgenommen und die versenkte Auftragsschweißung ausgeführt und zuletzt die Zusatzlamellen (mit Spalt) aufgeschweißt. Die Zusatzlamellen waren nur bei den Trägern bzw. Versuchen 1 bis 3 angeordnet. Die Entscheidung, diese Verschärfung der Versuchsbedingungen vorzunehmen, wurde getroffen, nachdem durch den Vorversuch Ergebnisse festgestellt wurden, die erwarten ließen, daß auch trotz dieser kritischen Bedingungen Verformungen erwartet werden durften. Das Bild der Anlage 20 zeigt die bruchkritische Stelle.

5. Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung

Der Versuchsaufbau sowie die Form bzw. konstruktive Ausbildung der Probekörper sind in Anlage 10 dargestellt. Um die bei der Planung der Versuche getroffenen Vorkehrungen und Abläufe zu erproben, erfolgte ein Vorversuch, der als Träger bzw. Versuch 0 bezeichnet ist. Die Kühlflüssigkeit, von der die Versuchskörper umgeben waren, bestand aus einem Gemisch aus Wasser und Ethylenglykol ($C_2H_6O_2$). Die Abkühlung dieser Flüssigkeit erfolgte mit Trockeneis. Zur Kontrolle der Temperatur der Probekörper wurden mit Thermoelementen die Oberflächentemperatur der Versuchslamelle ca. 300 mm von der bruchkritischen Stelle auf der Außen- und Innenseite der Versuchslamelle (Spalt zwischen Versuchsträger und Versuchslamelle) gemessen. Die Anlagen 21 bis 23 zeigen Bilder des Versuchsaufbaues während der Versuche. Anlage 24 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf während des Abkühlvorganges bis zur Versuchsdurchführung beim Versuch 2. Unabhängig von dieser Temperaturmessung erfolgte eine regelmäßige Kontrolle der Kühlflüssigkeit mit einem geeichten Flüssigkeitsthermometer. Unter Berücksichtigung aller Fehlermöglichkeiten ist für alle Versuche eine Probekörpertemperatur von $-30^\circ C \pm 1^\circ C$ bei Versuchsbeginn anzunehmen. Nach einer Haltedauer von jeweils ca. 60 min bei $-30^\circ C$ erfolgte die Belastung des Probekörpers kraftgesteuert so, daß pro Sekunde ein Kraftanstieg von 28,7 kN erfolgte. Während des Versuchsablaufes wurden mit einer Datenerfassungsanlage die mit den Thermoelementen gemessenen Thermospannungen, die augenblicklich wirkende Kraft und der zugehörige Kolbenweg aufgezeichnet. Die Anlagen 25 bis 28 enthalten die Last-Verformungs-Diagramme der Versuche 0 bis 3. Die Versuche 0 bis 2 wurden jeweils abgebrochen, nachdem die Durchbie-

gung ca. 90 mm betrug. Bei Versuch 3 wurde die Belastung nach einer Gesamtdurchbiegung von ca. 60 mm unterbrochen. Nach einer Entlastung auf ca. 1000 kN (Entlastungsdauer 3,9 min) und einer Haltedauer von 5,75 min erfolgte ein erneuter Belastungsversuch. Dieser Belastungszyklus ist in dem Last-Verformungs-Diagramm der Anlage 28 wiedergegeben. An diesem Probekörper trat nach erneuter Belastung und deutlich weiterer Plastizierung ein Bruch ein, der auf den Bildern der Anlage 29 bis 31 dargestellt ist.

An allen Probekörpern trat nach dem Erreichen der Fließlast eine Plastizierung ein. Dies ist aus den Last-Verformungs-Diagrammen zu erkennen und an der bleibenden Durchbiegung der Probekörper (siehe die Bilder der Anlage 32 und 33) zu sehen.

Damit ist der exemplarische Nachweis erbracht, daß unter den gewählten kritischen Randbedingungen Sprödbrüche im Sinne von Niederspannungsbrücken nicht zu befürchten sind. Für die gewählten Randbedingungen wird sowohl nach der DAST-Ri 009 als auch nach dem Anhang C der DIN V EN V 1993 ausreichende Sprödbruchsicherheit prognostiziert.

Literatur Spröbruch

(nach Veröffentlichungsdatum geordnet)

- /1/ Kommerell, O.
Die neuen Lieferbedingungen für St 52 als Folge neuerer Versuche und Erfahrungen
Der Stahlbau 1938/78
- /2/ Klöppel, K.
Das Verhalten längsbeanspruchter Schweißnähte und die Frage der Zusammenwirkung
von Betriebs- und Schrumpfspannungen
Der Stahlbau 1938/14/15
- /3/ Kommerell, O.
Augenblicklicher Stand des Schweißens von Stahlbauwerken in Deutschland
Die Bautechnik 1939/12
- /4/ Houdremont, E. u. A.
Der Aufschweißbiegeversuch und seine Eignung zur Prüfung von Baustählen
Stahl und Eisen 1939/46
- /5/ Klöppel, K.
Werkstoffmechanik und Sicherheit geschweißter Stahlkonstruktionen
Schweißen und Schneiden (Sonderheft) 1951
- /6/ Rühl, K.
Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper in Bautechnik und Maschinenbau
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1952
- /7/ Klöppel, K.
Sicherheit und Güteanforderung bei verschiedenen Arten geschweißter Konstruktionen
Schweißen und Schneiden (Sonderheft) 1954
- /8/ Klöppel, K.
Sicherheit und Güteanforderungen bei geschweißten Konstruktionen
Ein Handbuch für Studium und Praxis, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1957/2

- /9/ Rühl, K.
Die Sprödbruchsicherheit von Stahlkonstruktionen
Werner Verlag Düsseldorf 1959
- /10/ Bierett, G.
Güteauswahl der Stähle für geschweißte Konstruktionen mit Hilfe eines einfachen
Klassifizierungsverfahrens
Der Bauingenieur 1959/6
- /11/ Rühl, K.
Werkstofffragen des Metallbaues
Der Bauingenieur 1959/6
- /12/ Bierett, G.
Werkstofffrage und Werkstoffwahl bei geschweißten Stahlkonstruktionen
Handbuch für Studium und Praxis, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1961/9
- /13/ Rühl, K.
Neue ausländische Entwicklungen auf dem Gebiet des Sprödbruches
Schweißen und Schneiden 1961/13
- /14/ Rühl, K., Schönherr, Struck
Wege und Versuche zur Beurteilung der Sprödbruchgefahr geschweißter Bauteile
Schweißen und Schneiden, 1964/16
- /15/ Steinhardt, O.
Druckrohrleitungen für Wasserkraftanlagen
Berichte der Versuchsanstalt Uni Karlsruhe, 3. Folge - Heft 2, 1985
- /16/ Rühl, K.
Möglichkeiten und Gesichtspunkte für die Auswertung von Zähigkeitsprüfungen zur
Beurteilung der Sprödbruchsicherheit
Materialprüfung 1966/8
- /17/ Hall, W.J., Kihara, W, Soete, AA., Wells
Brittle Fracture of Welded Plates
Prentice-Hall, Inc./Englewood Cliffs, N.J. 1967

/18/ Kazuo Ikeda, Yoshio Akita, Hiroshi Kihara

The Deep Notch Test and Brittle Fracture Initiation

Welding Journal Research Supplement 1967

/19/ Struck W., Nehring, E.

Bruchversuch an bauteilähnlichen Proben im Rahmen von Untersuchungen über die Wirkung der Einflußfaktoren beim Spröbruch im Stahl

Fachbuchreihe „Schweißtechnik“ 1968/53/1

/20/ Kochedörfer, A., Schreiner, H.-J.

Versuche über den Einfluß der Korngröße und des Spannungszustandes auf die Übergangstemperaturen von Stahl und Vergleich der Ergebnisse mit denen der Versetzungstheorie des Spröbruchs

Stahl und Eisen 1969/87

/21/ Radaj, D.

Zur Didaktik und Geschichte der Bruchmechanik

Materialprüfung 1970/12

/22/ Struck, W.

Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St37-2N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

BAM-Bericht No. 18, Berlin 1973

/23/ Schönherr, W.

Folgerungen für die Bauteilsicherheit an Schadensfallauswertungen

Schweißen und Schneiden 1979/11

/24/ Helms, R., Kühn, H.-J., Ziebs, J. Aurich, D.

Die Zähigkeit im Kerbschlagversuch

Werkstoffprüfung 1986, Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin, 1986

/25/ Hayaschi, K., Takano, K., Sasaki, S., Horikawa, K.

On the Deformation Capacity and Fracture Toughness of Structural Steels Subjected to Prestrain.

J. Soc. Materials Science Japan, 1987/36

- /26/ Aurich, D., Kühn, H.-J., Thiemich, K.-D., Wobst, K.
Abschätzung von Rißwiderstandskurven aufgrund der Kerbschlagarbeit-Hochlage
Werkstoffprüfung 1988, Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin 1988
- /27/ Aurich, D.
Bewertung des Rißwiderstandsverhaltens anhand der Kerbschlagarbeit
Technischer Bericht, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 1988
- /28/ Aurich, D., Sommer, E.
The effect of constraint on elastic-plastic fracture
Steel Research 1988/59
- /29/ Sahmel, P., Veit, H.J.
Grundlagen der gestaltungsgeschweißten Stahlkonstruktionen
Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1989
- /30/ Clausmeyer, H., Kußmaul, K., Roos, E.
Der Einfluß des Spannungszustandes auf den Versagensablauf angerissener Bauteile aus
Stahl
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 1989/20
- /31/ Schönherr, W.
Auswahl der Stahlgüte für geschweißte Stahlbauten - Vergleich der Regelung nach DAST -
Richtlinie 009 und Eurocode 3
Stahlbau 1992/7
- /32/ Sedlacek, G., Stötzel, G.
Bericht zur Darstellung der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Anfangsrißgrößen
zur Abdeckung von Erfahrungen bei der Wahl der Stahlgütegruppen im Neuentwurf des
EC 3, Annex
Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Hochschule Aachen, 1992/11

/33/ Aurich D. u. a.

Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte

BAM-Forschungsbericht 1992, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
1993

/34/ Schiffsunfälle, Untergang der Titanic

Der Spiegel, Hamburg, 1993/39

/35/ Thier, H.

Optimierung von Schweißparametern zum Schweißen höherfester Stähle

DVS Bericht Band Nr. 160, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1994

A.

BRD

* DIN 18 800 Teil 1, Stahlbauten, Abschnitt 4 Element 403 Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin

* DASt Ri 009

Empfehlungen zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten Stahlbau-Verlag GmbH, Ebertplatz 1, 50668 Köln

* Anpassungsrichtlinie zu DIN 18 800 - Stahlbauten - Teil 1 bis 4 Mitteilungen Institut für Bautechnik Berlin, 2/1992, Seite 61 und 65

* Stahl-Eisen-Prüfblatt (SEP) 1390

Aufschweißbiegeversuch

Verlag Stahleisen mbH, Postfach 1051643, 40042 Düsseldorf

B.

EG

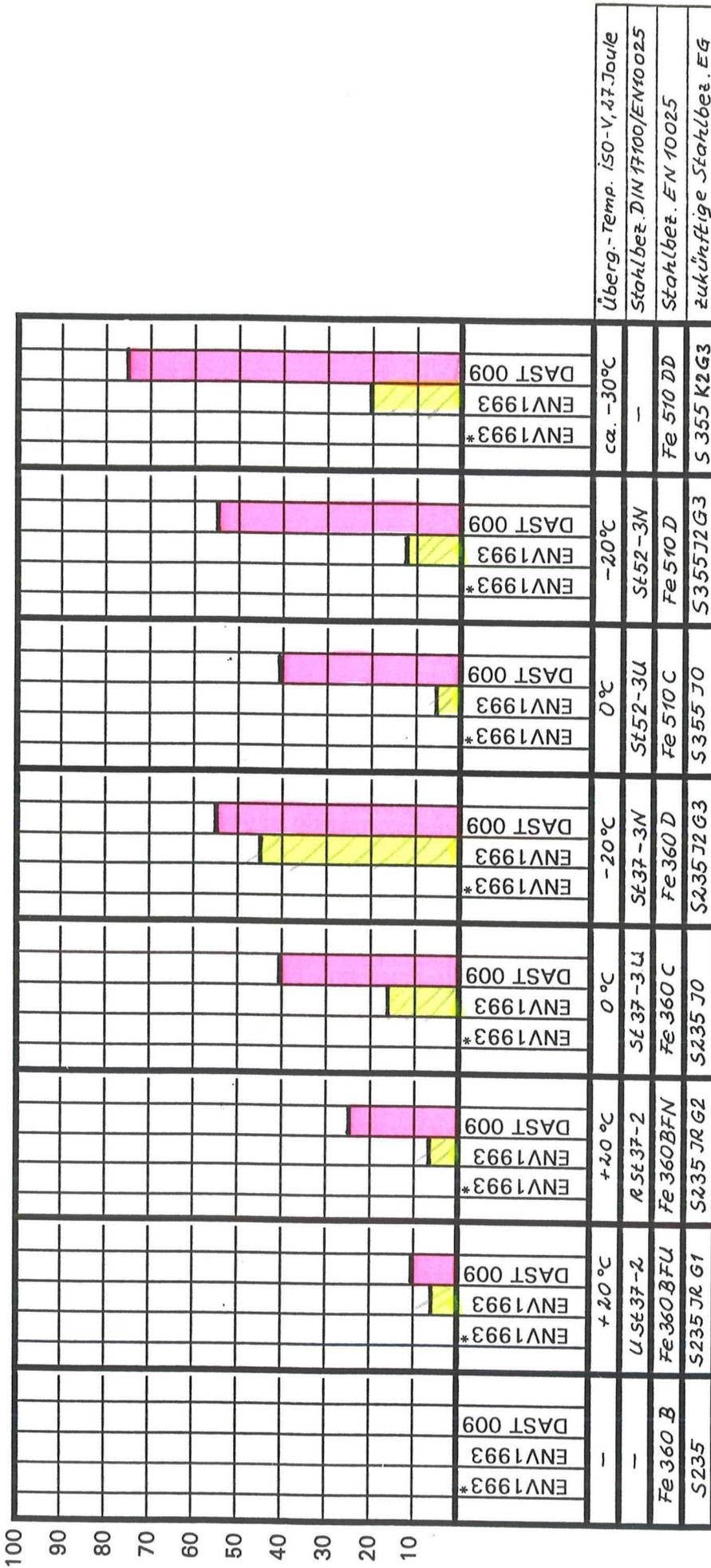
* DIN V EN V 1993 4/93, Anhang C (informativ)

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin



Maximal zulässige Wanddicke bei -30°C "Statische Beanspruchung" (R1)



Spannungszustand:

hoch (S3)
mittel (S2)
niedrig (S1)

Schadenfolgen:

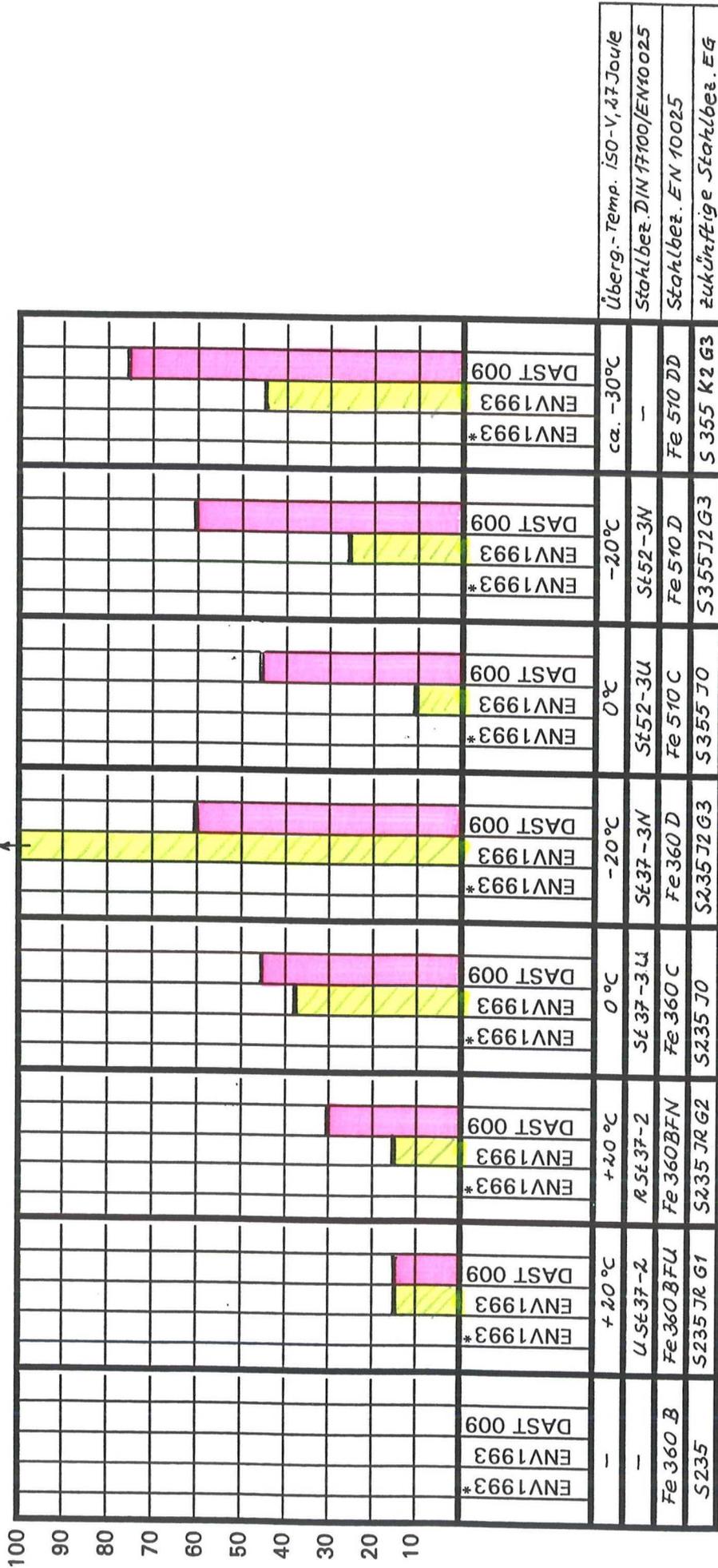
hoch, Gesamtversagen (C2)
gering, Teilversagen (C1)

DAST 009: Klasse - stufe I



Überg.-Temp. ISO-V, 27 Joule
Stahlbez. DIN 17100/EN 10025
Stahlbez. EN 10025
zukünftige Stahlbez. EG

Maximal zulässige Wanddicke bei -30°C "Statische Beanspruchung" (R1)



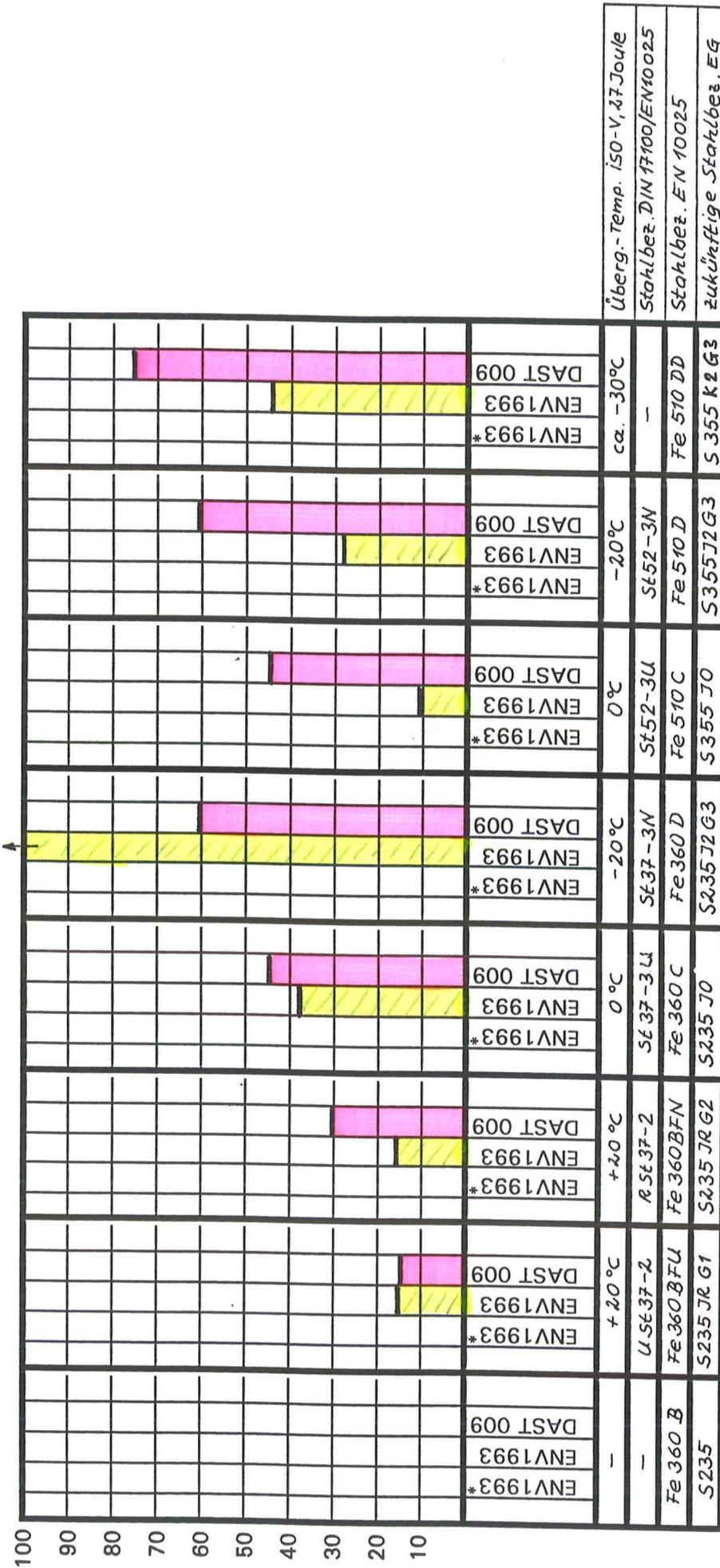
DAST 009 : Klass. - stufe II

Schadensfolgen: hoch, Gesamtversagen (Cz)
gering, Teilversagen (C1)

Spannungszustand: hoch(S3)
mittel(S2)
niedrig(S1)



Maximal zulässige Wanddicke bei -30°C "Statische Beanspruchung" (R1)



DAST 009 : Klasse - Stufe II

hoch, Gesamtversagen (c2)
gering, Teilversagen (c1)

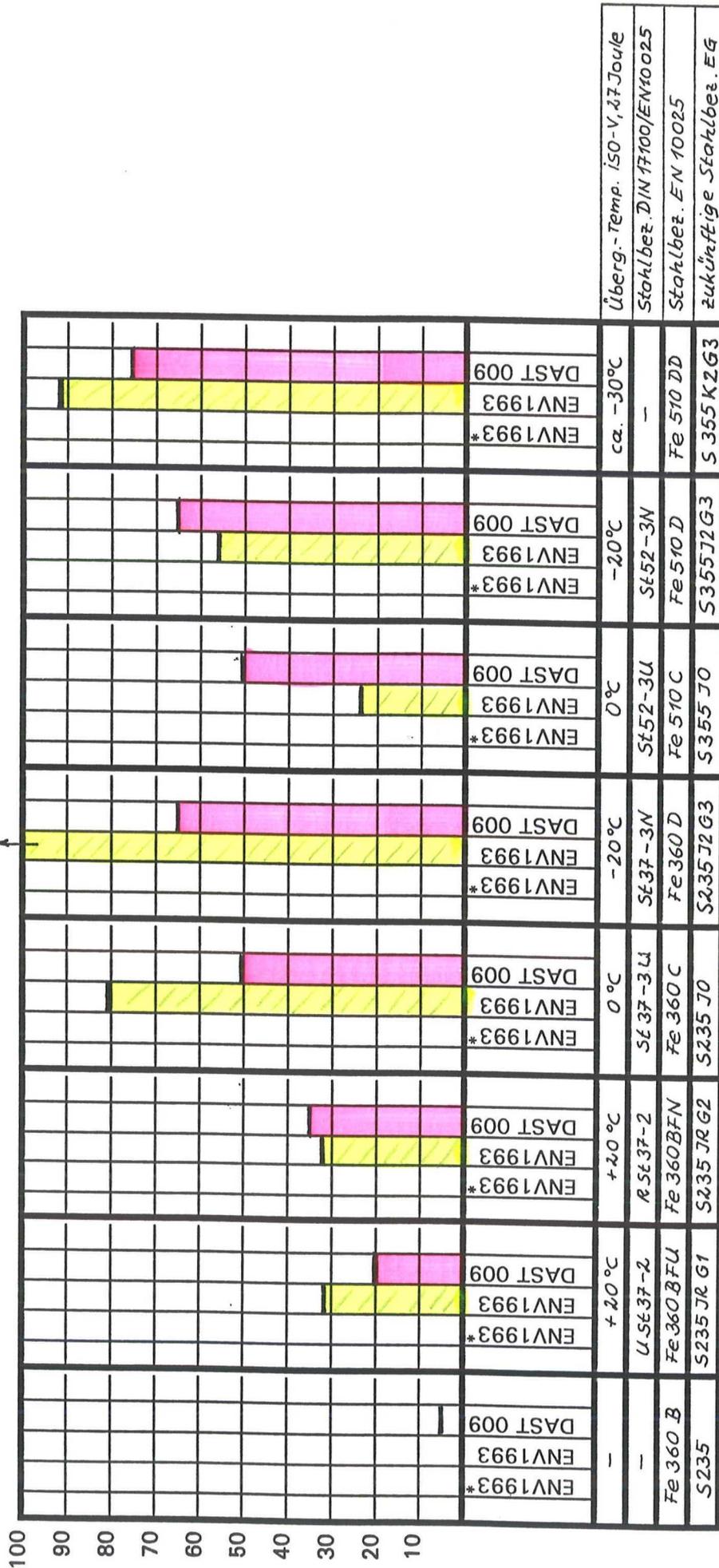
Schadensfolgen:

hoch(S3)
mittel(S2)
niedrig(S1)

Spannungszustand:



Maximal zulässige Wanddicke bei -30°C "Statische Beanspruchung" (R1)



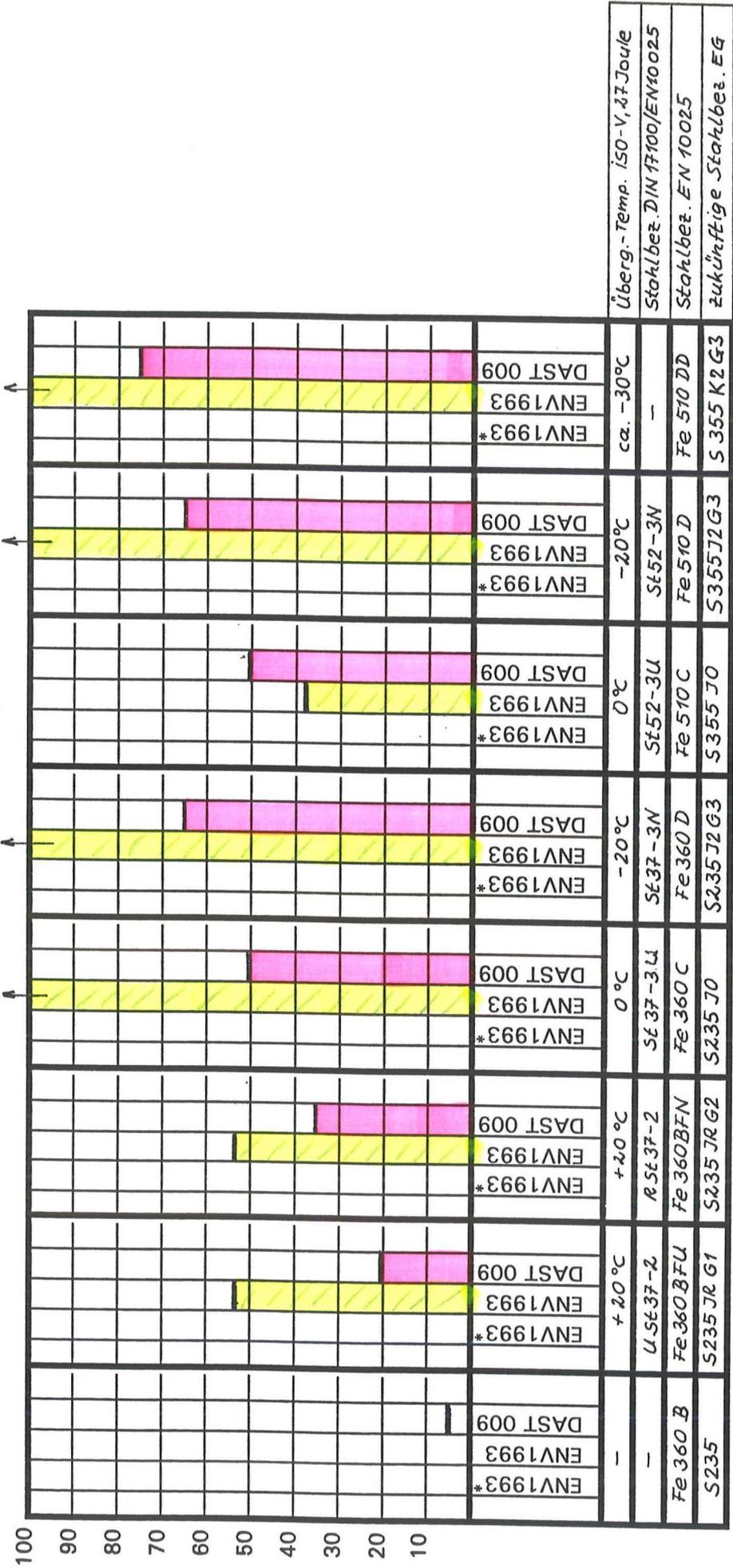
Spannungszustand: hoch(S3)
 mittel(S2)
 niedrig(S1)

Schadensfolgen: hoch, Gesamtversagen (C2)
 gering, Teilversagen (C1)

Überg.-Temp. ISO-V, 37 Joule
 Stahlbez. DIN 17100/EN 10025
 Stahlbez. EN 10025
 zukünftige Stahlbez. EG



Maximal zulässige Wanddicke bei -30°C "Statische Beanspruchung" (R1)



Spannungszustand:

hoch(S3)
mittel(S2)
niedrig(S1)

Schadensfolgen:

hoch, Gesamtversagen (C2)
gering, Teilversagen (C1)

DAST 009: Klasse - stufe III



| | | |
|------------------------------|-------------|-----------------------------|
| Überg.-Temp. ISO-V, 27 Joule | ca. -30°C | Stahlbez. DIN 17100/EN10025 |
| Stahlbez. EN 10025 | — | Fe 510 DD |
| zukünftige Stahlbez. EG | S 355 K2 G3 | |

| Träger bzw Versuch Nr. | Werkstoffbez des Herstellers | Zugfestigkeit N/mm ² | Streckgrenze N/mm ² | Bruchdehng. % | Schlagarbeit Joule bei -20 grad C |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|---|
| 0 | StE460TM | 582 | 456 | 25,2 | > 250 >250 |
| 1 | St52-3N | 531 | 373 | 30,0 | 169 144 |
| 2 | St52-3N | 520 | 365 | 34,0 | 164 139 |
| 3 | St52-3 | 554 | 373 | 26,0 | 172 158 |

Werkstoffeigenschaften der Versuchslamellen
nach den Angaben der Hersteller
Werte in Kursivschrift an der Versuchslamelle ermittelt



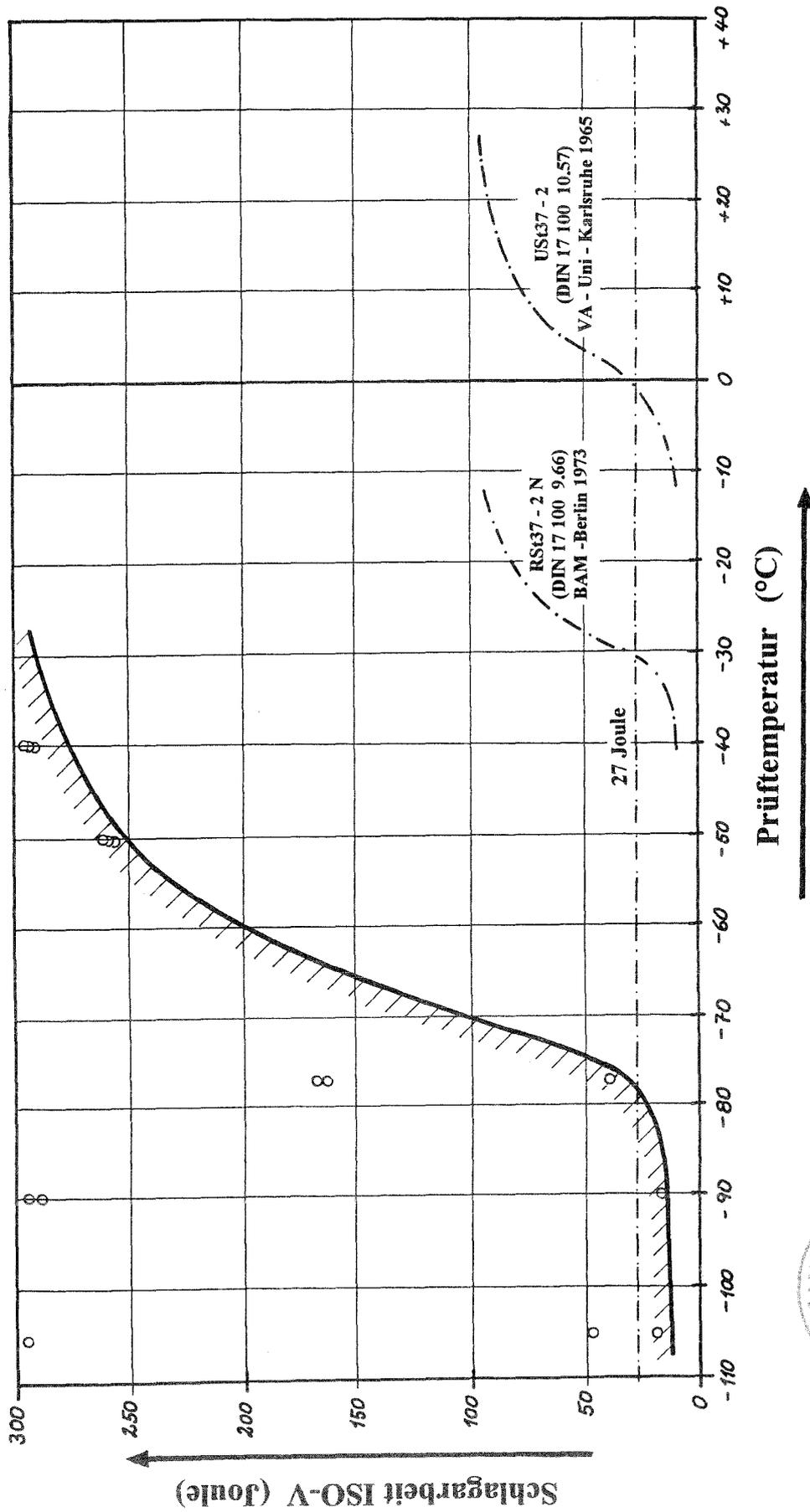
| Träger bzw Versuch Nr. | C | Si | Mn | P | S | Al | Ti | Nb |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 0,090 <i>0,090</i> | 0,28 <i>0,259</i> | 1,53 <i>1,44</i> | 0,005 <i>0,007</i> | 0,001 <i>0,000</i> | 0,036 <i>0,039</i> | - <i>0,003</i> | 0,025 <i>0,026</i> |
| 1 | 0,16 <i>0,149</i> | 0,43 <i>0,388</i> | 1,39 <i>1,37</i> | 0,021 <i>0,011</i> | 0,004 <i>0,002</i> | 0,035 <i>0,036</i> | 0,009 <i>0,007</i> | 0,046 <i>0,002</i> |
| 2 | 0,13 <i>0,173</i> | 0,43 <i>0,368</i> | 1,46 <i>1,43</i> | 0,012 <i>0,019</i> | 0,004 <i>0,004</i> | 0,038 <i>0,035</i> | 0,011 <i>0,011</i> | - <i>0,045</i> |
| 3 | 0,20 <i>0,175</i> | 0,42 <i>0,395</i> | 1,35 <i>1,43</i> | 0,017 <i>0,013</i> | 0,008 <i>0,002</i> | 0,035 <i>0,034</i> | - <i>0,000</i> | 0,007 <i>0,001</i> |

Chemische Zusammensetzung der Versuchslamellen
 in Gew. %

nach den Angaben der Hersteller

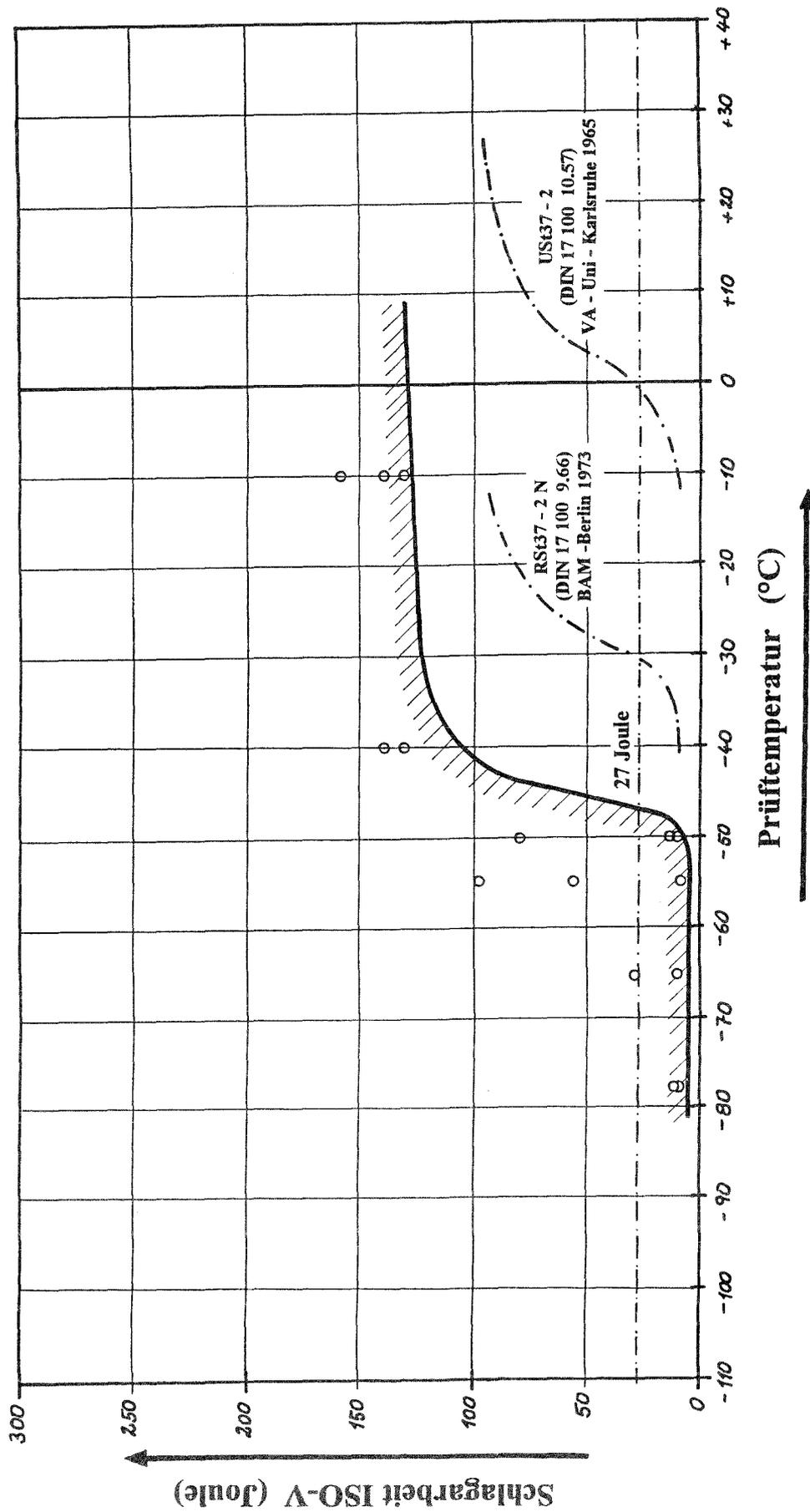
Werte in Kursivschrift an der Versuchslamelle ermittelt





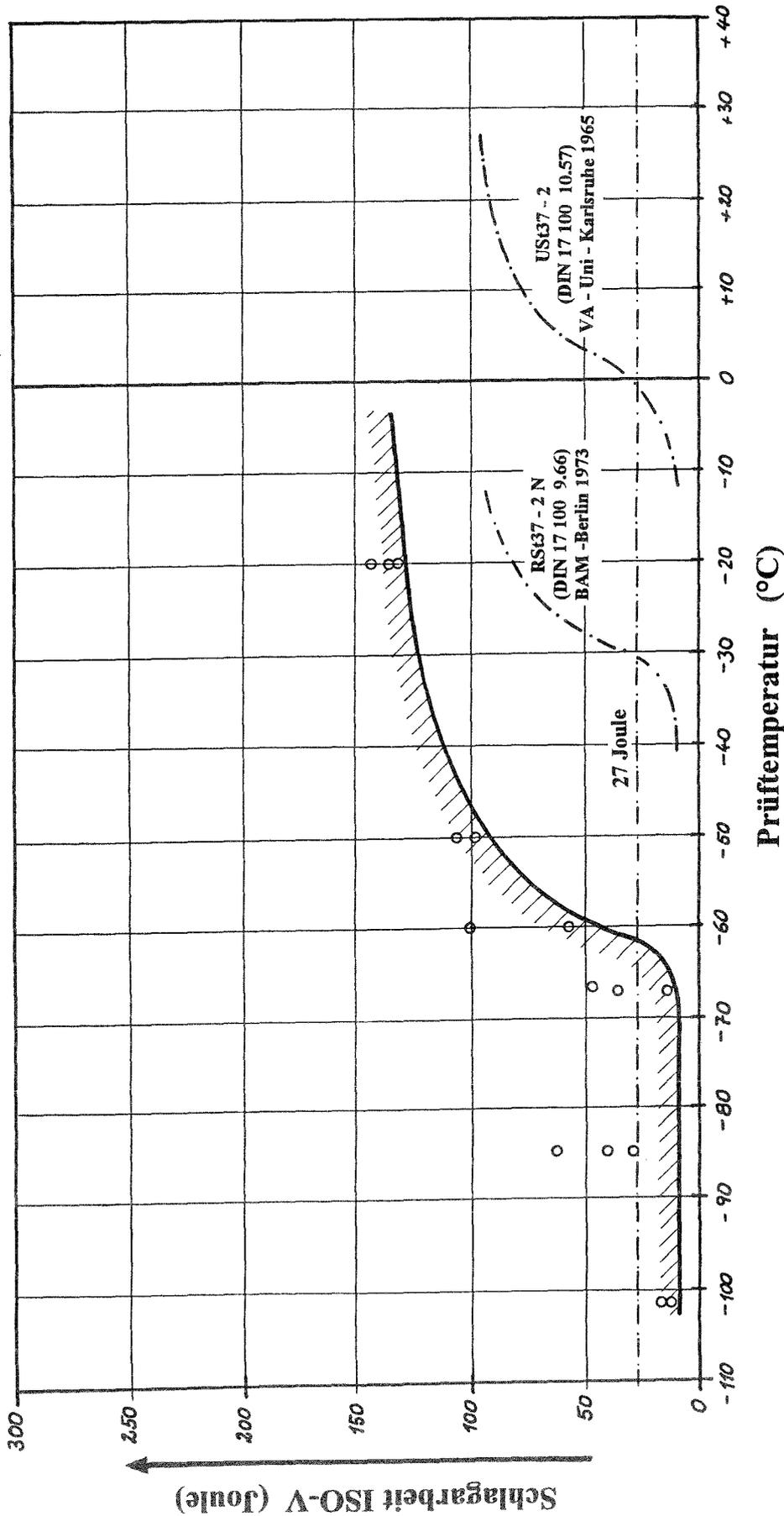
Kerbschlagarbeit - Temp. - Kurve Versuch 0





Kerbschlagarbeit - Temp. - Kurve Versuch 1



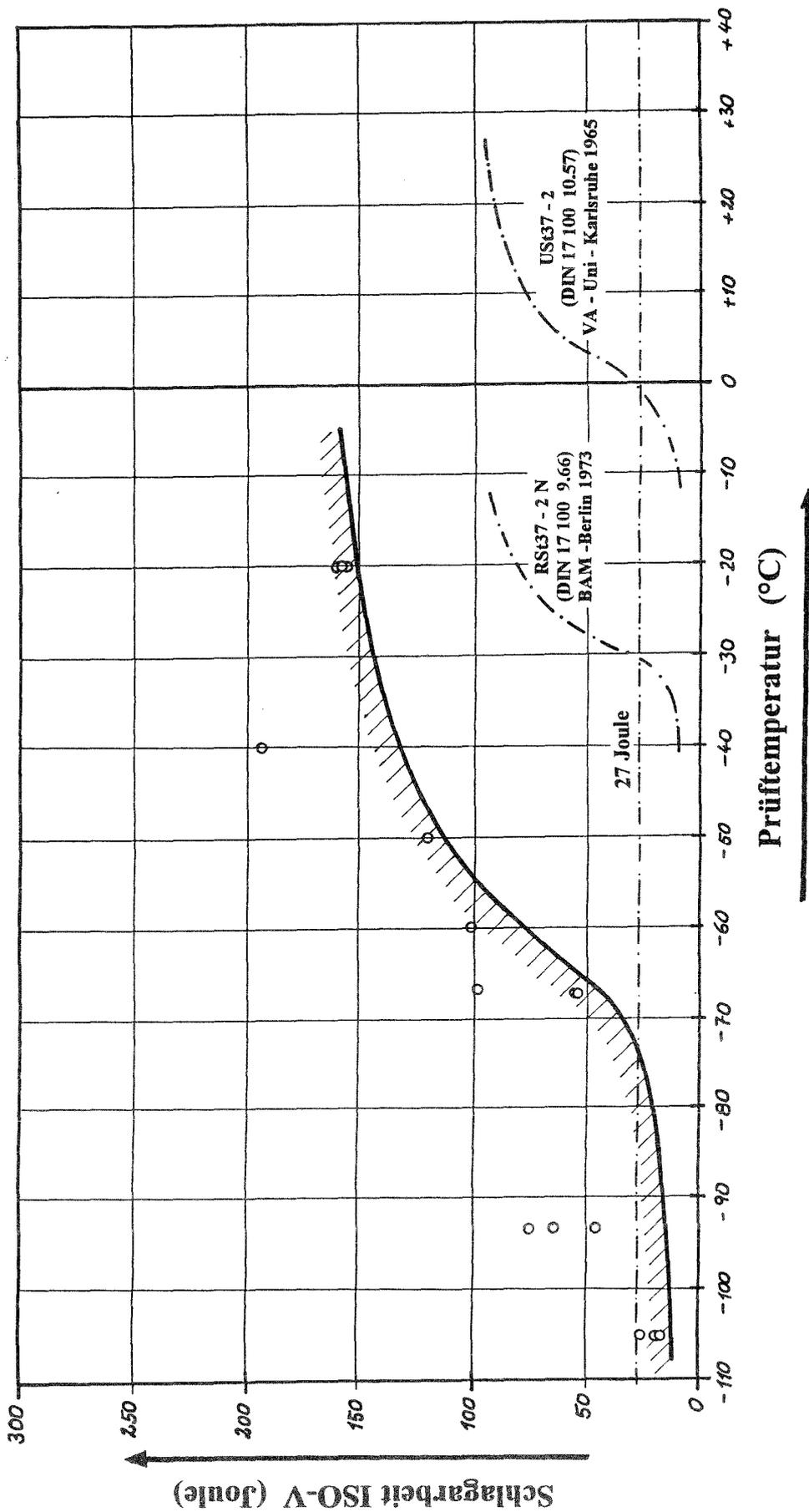


Prüftemperatur (°C)



Kerbschlagarbeit - Temp. - Kurve Versuch 2





Kerbschlagarbeit - Temp. - Kurve Versuch 3



Schweißanweisung des Herstellers (WPS)

(siehe EN 288-2)

Anlage 17

Ber. Nr. 921570

vom 1.08.94

Ort: Karlsruhe

Prüfer oder Prüfstelle: VA Uni. KA

Schweißverfahren des Herstellers:

Art der Vorbereitung und Reinigung: geschliffen

Beleg-Nr.:

Spezifikation des Grundwerkstoffs:

WPAR-Nr.:

Hersteller: Fa. Vollack, Karlsruhe

Name des Schweißers: Bernhard Herbert

Schweißprozeß: MAG M / E-Hand

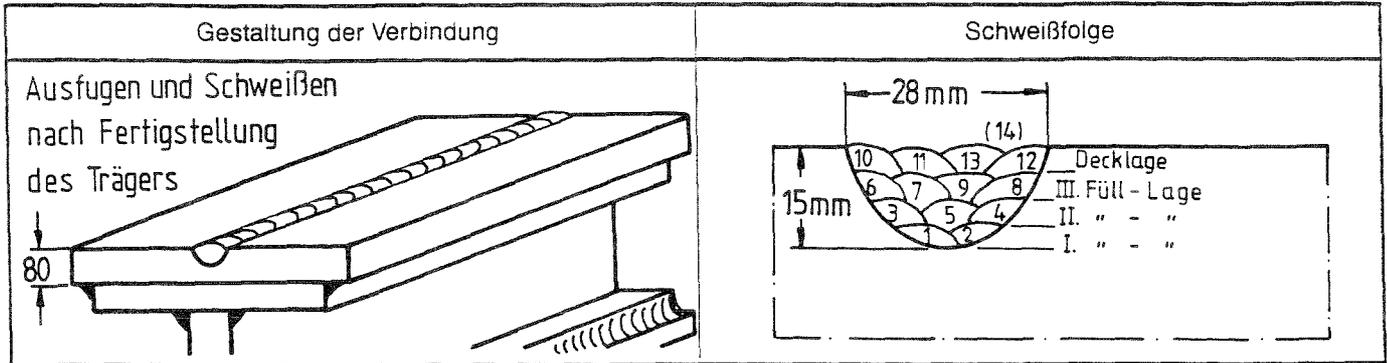
Nahtart: Auftropfschweißung versenkt

Werkstückdicke (mm): 80

Einzelheiten der Fugenvorbereitung
(Zeichnung *): thermisch, verschliffen

Außendurchmesser (mm):

Schweißposition: "w" PA



Einzelheiten für das Schweißen

| Schweißraupe | Prozeß | Durchmesser des Zusatzwerkstoffes | Stromstärke A | Spannung V | Stromart/ Polung | Drahtvorschub | Vorschubgeschwindigkeit *) | Wärmeeinbringung *) |
|--------------|--------|-----------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------|----------------------------|---------------------|
| 1-9 | MAG M | 1,0 mm | 220 | 27 | = | 7m/min. | 24,8cm/min. | ~14kJ/cm |
| 10-13(14) | E-Hand | 4,0 mm | 160 | 25 | = | - | 22cm/min. | ~10kJ/cm |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Zusatzwerkstoff SG 3 / EY 4664 MoB DIN 8529

- Einteilung und Markenname:

Sondervorschriften für Trocknung: nach Herstellerang.

Schutzgas/ Schweißpulver

- Schutzgas: 82118

- Wurzelschutz:

Gasdurchflußmenge

- Schutzgas:

- Wurzelschutz:

Wolframelektrodenart/ Durchmesser:

Einzelheiten über Ausfugen/ Schweißbadsicherung:

Vorwärmtemperatur: keine

Zwischenlagentemperatur: ~ 50°C

Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten: keine

Zeit, Temperatur, Verfahren:

Erwärmungs- und Abkühlungsrate*):

Hersteller

Weitere Informationen *):

z. B.: Pendeln (maximale Raupenbreite):

Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:

Einzelheiten für das Pulsschweißen:

Kontaktdüsenabstand:

Einzelheiten für das Plasmaschweißen:

Brenneranstellwinkel:



Prüfer oder Prüfstelle

Name, Datum und Unterschrift

Name, Datum und Unterschrift

*) Falls gefordert

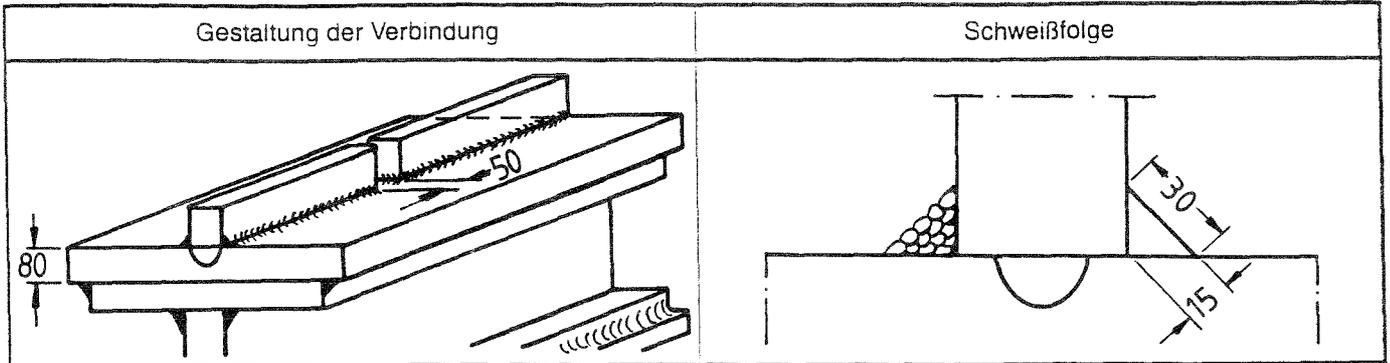
Schweißanweisung des Herstellers (WPS)

(siehe EN 288-2)

Anlage 18
Ber. Nr. 921570
vom 1.08.94

Ort: Karlsruhe
Schweißverfahren des Herstellers: _____
Beleg-Nr.: _____
WPAR-Nr.: _____
Hersteller: Fa. Vollack, Karlsruhe
Name des Schweißers: Bernhard Herbert
Schweißprozeß: MAG M
Nahtart: Kehlnaht
Einzelheiten der Fugenvorbereitung
(Zeichnung *): _____

Prüfer oder Prüfstelle: VA Uni. KA
Art der Vorbereitung und Reinigung: Geschliffen
Spezifikation des Grundwerkstoffs: _____
Werkstückdicke (mm): _____
Außendurchmesser (mm): _____
Schweißposition: _____



Einzelheiten für das Schweißen

| Schweißraupe | Prozeß | Durchmesser des Zusatzwerkstoffes | Stromstärke A | Spannung V | Stromart/Polung | Drahtvorschub | Vorschubgeschwindigkeit *) | Wärmeeinbringung *) |
|--------------|--------|-----------------------------------|---------------|------------|-----------------|---------------|----------------------------|---------------------|
| 13 (14) | MAG M | 1,0 mm | 220 | 27 | = | 7,0 m/min | 25 cm/min | ~14 kJ/cm |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Zusatzwerkstoff
- Einteilung und Markenname: SG 3
Sondervorschriften für Trocknung: _____
Schutzgas/ Schweißpulver
- Schutzgas: 82/18
- Wurzelschutz: _____
Gasdurchflußmenge
- Schutzgas: _____
- Wurzelschutz: _____
Wolframelektrodenart/Durchmesser: _____
Einzelheiten über Ausfugen/Schweißbadsicherung: _____
Vorwärmtemperatur: keine
Zwischenlagentemperatur: ~ 50°C
Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten: keine
Zeit, Temperatur, Verfahren: _____
Erwärmungs- und Abkühlungsrate*): _____

Weitere Informationen *): _____
z. B.: Pendeln (maximale Raupenbreite): _____
Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit: _____
Einzelheiten für das Pulsschweißen: _____
Kontaktdüsenabstand: _____
Einzelheiten für das Plasmaschweißen: _____
Brenneranstellwinkel: _____

Hersteller

Prüfer oder Prüfstelle



Name, Datum und Unterschrift

Name, Datum und Unterschrift

*) Falls gefordert

Härte Vickers HV10

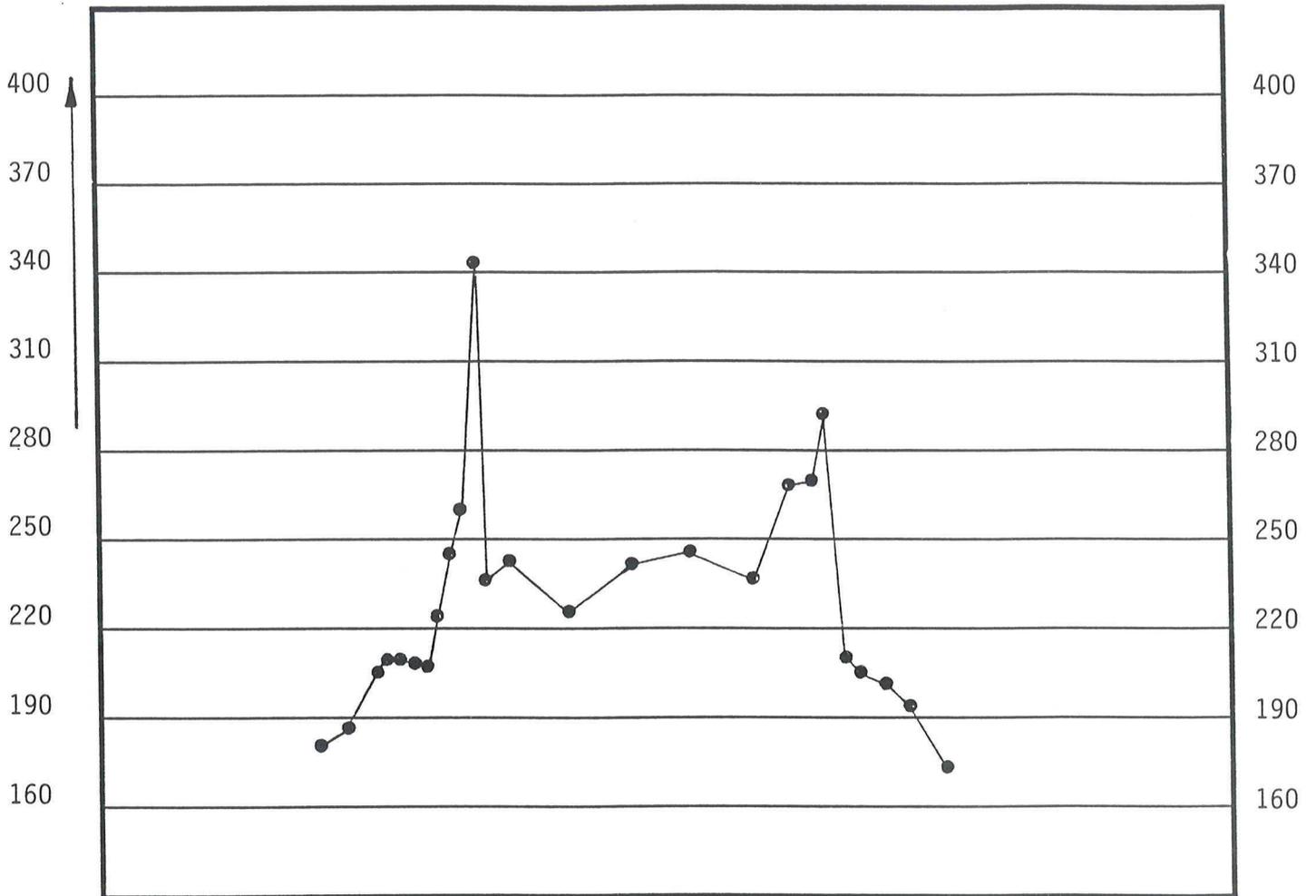
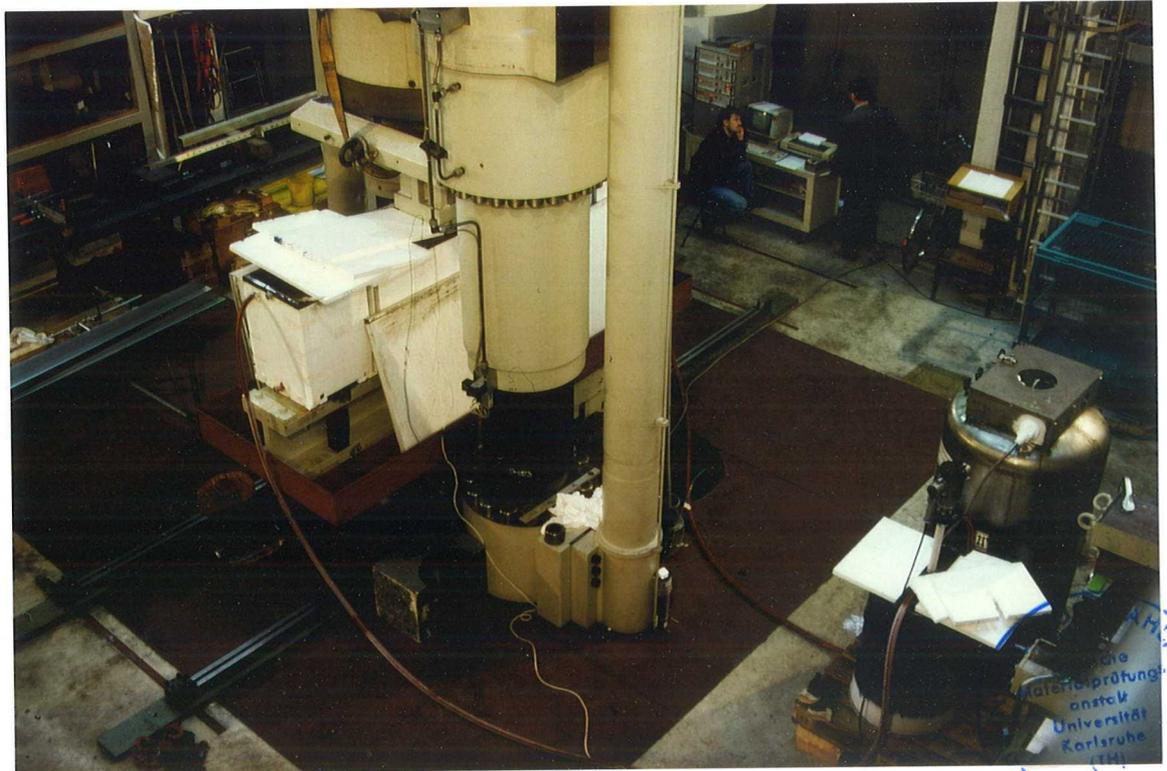


Bild 1: Makroschliff mit Härteverlauf aus der Prüflamelle, Versuch 0



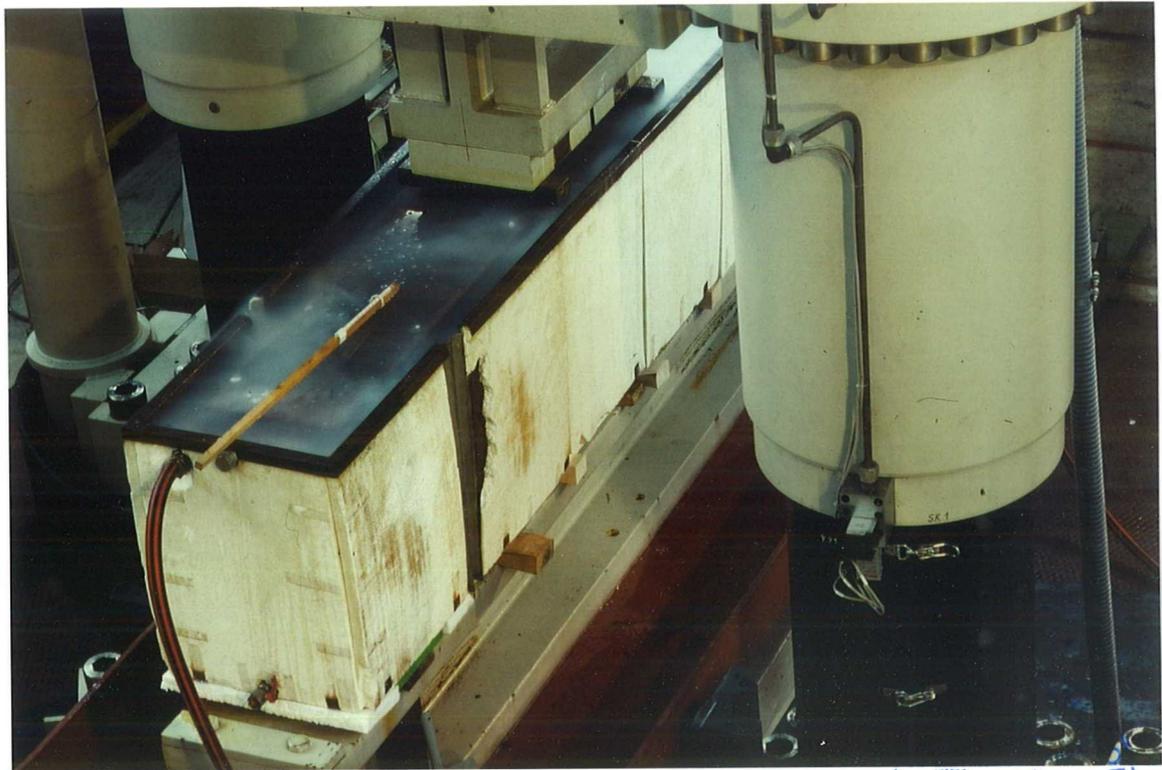
Bruchkritische Stelle der Versuchslamelle





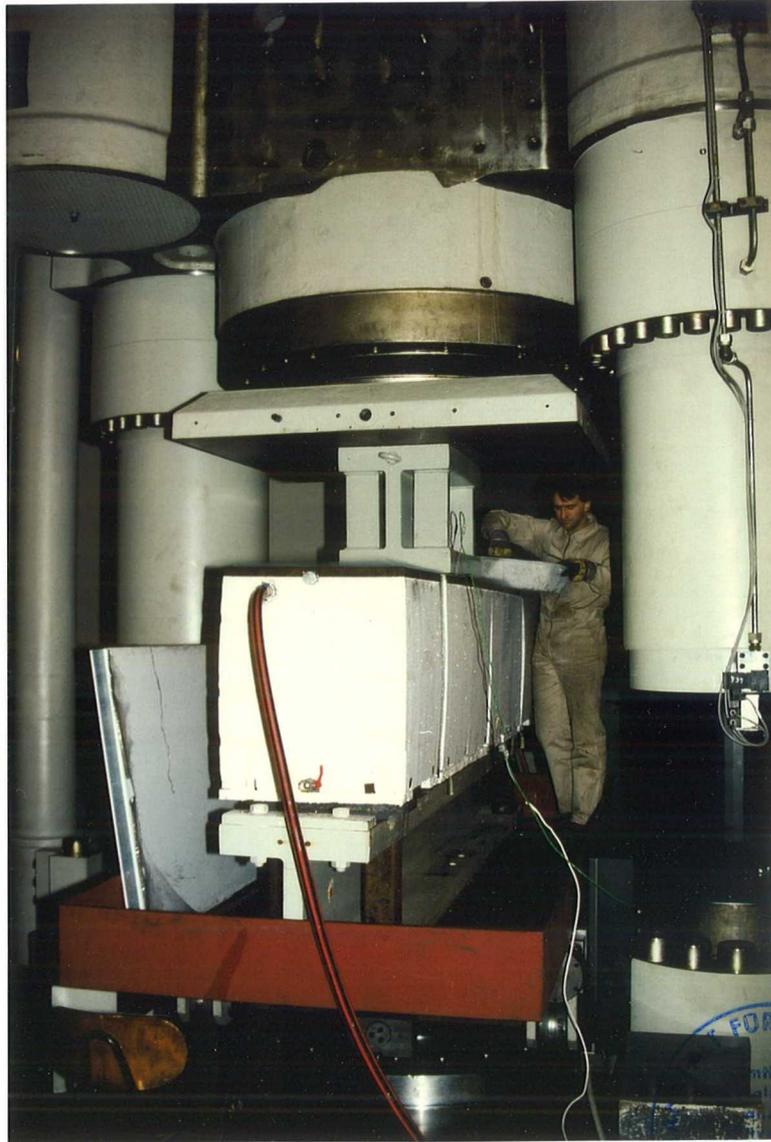
Versuchsaufbau Gesamtansicht mit Prüfmaschine, Kühlbehälter, Kaltvergaser (fl. N₂),
Datenerfassungsanlage





Kühlbehälter bis zum oberen Rand mit Kühlflüssigkeit gefüllt
(Blick von oben)

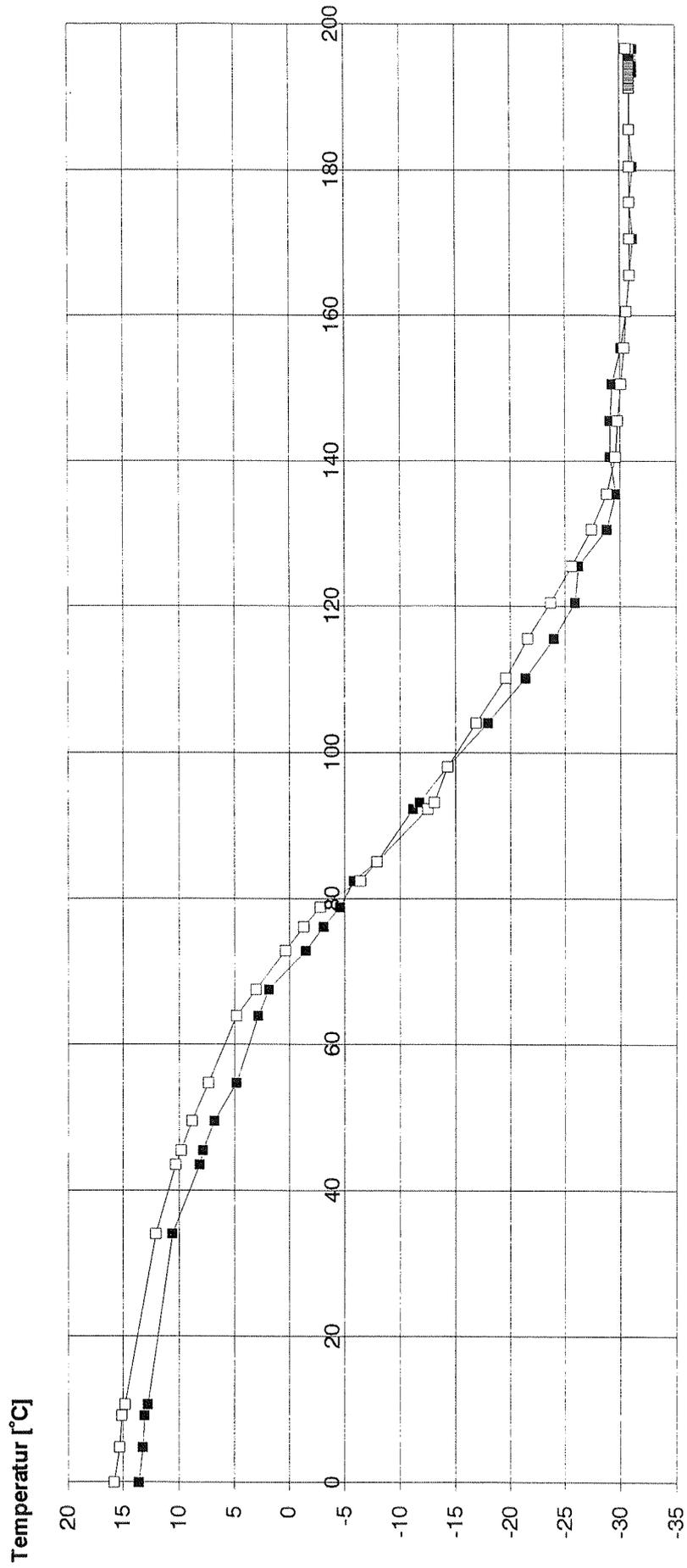




Kühlbehälter (Stirnansicht)



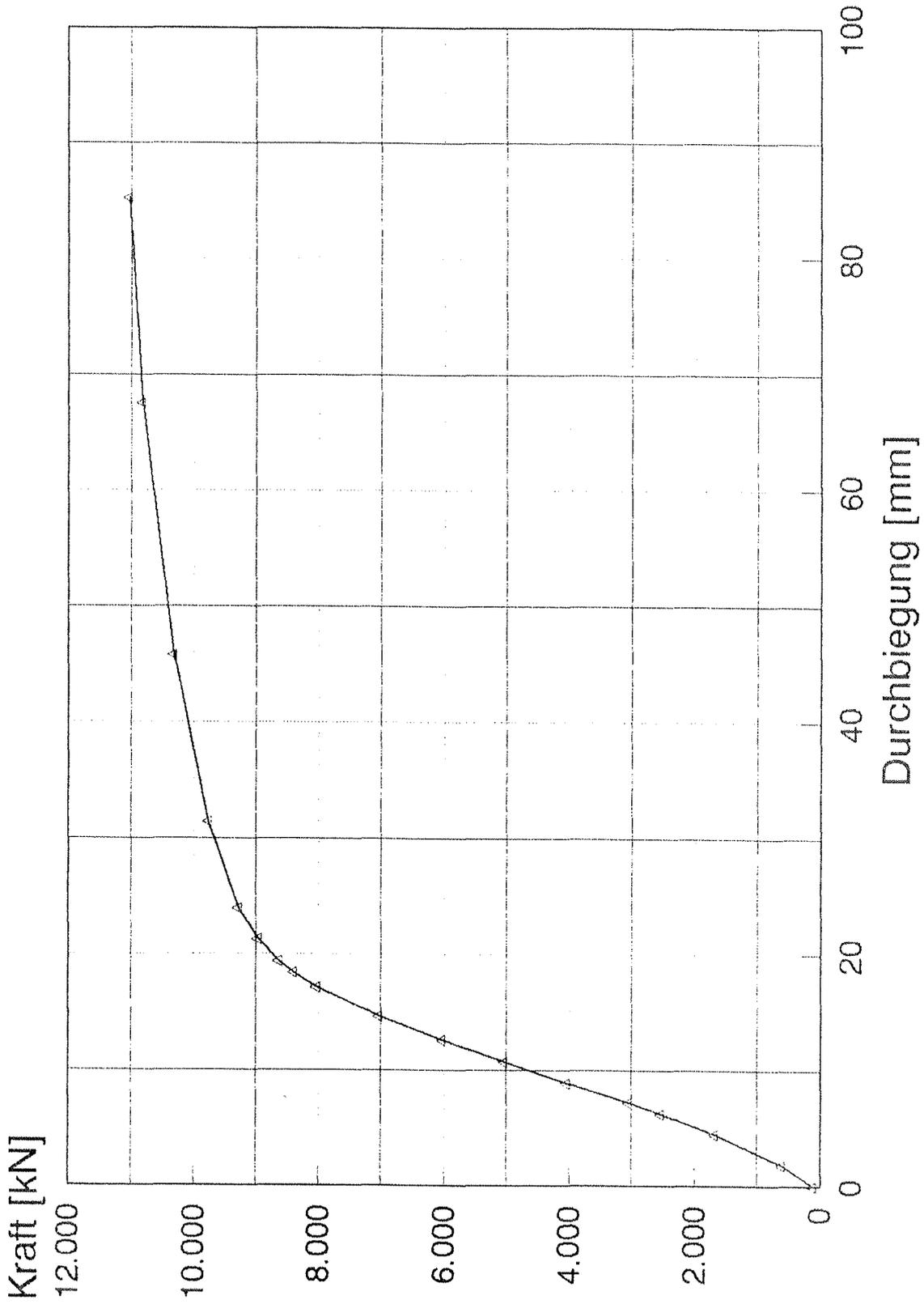
Temperaturverlauf



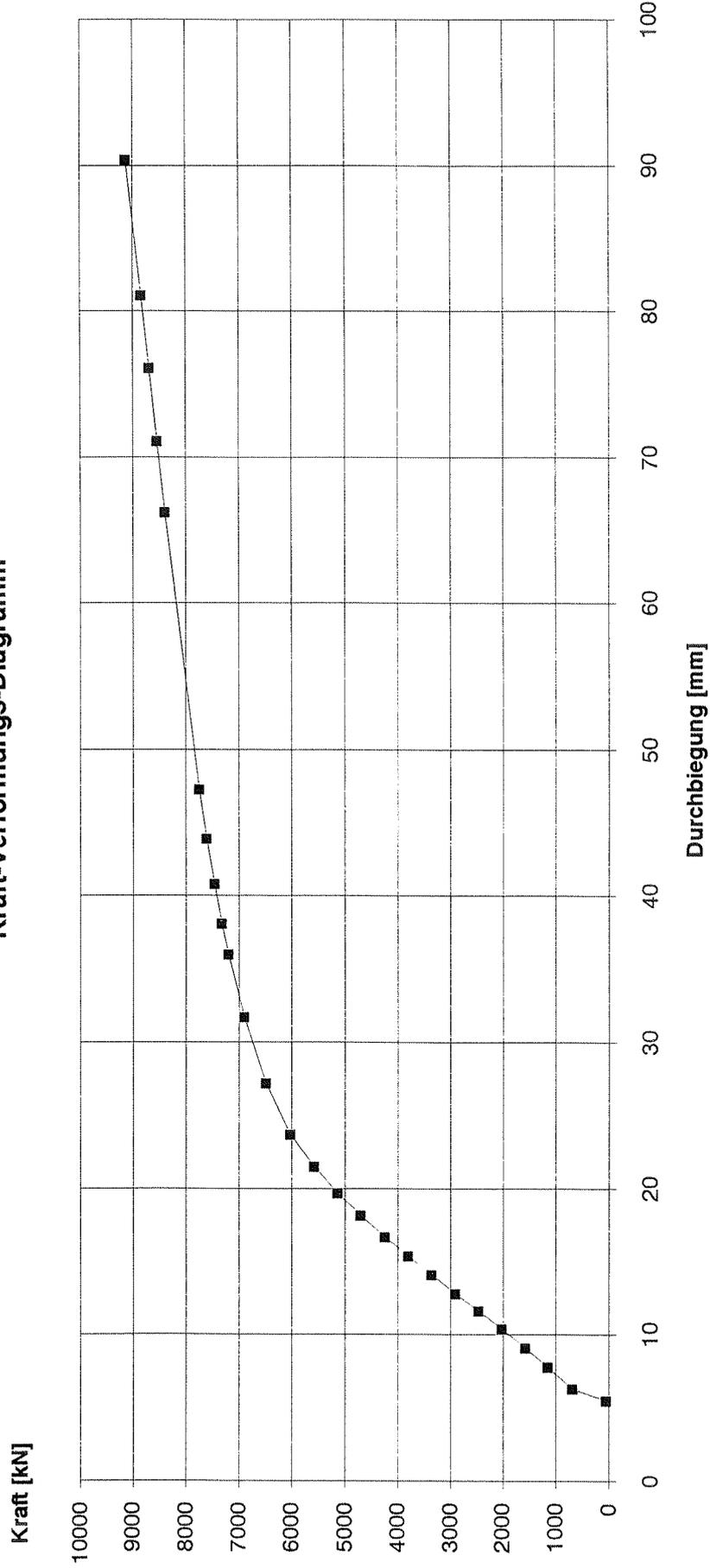
Zeit [min]

Träger 2

Kraft-Verformungs-Diagramm

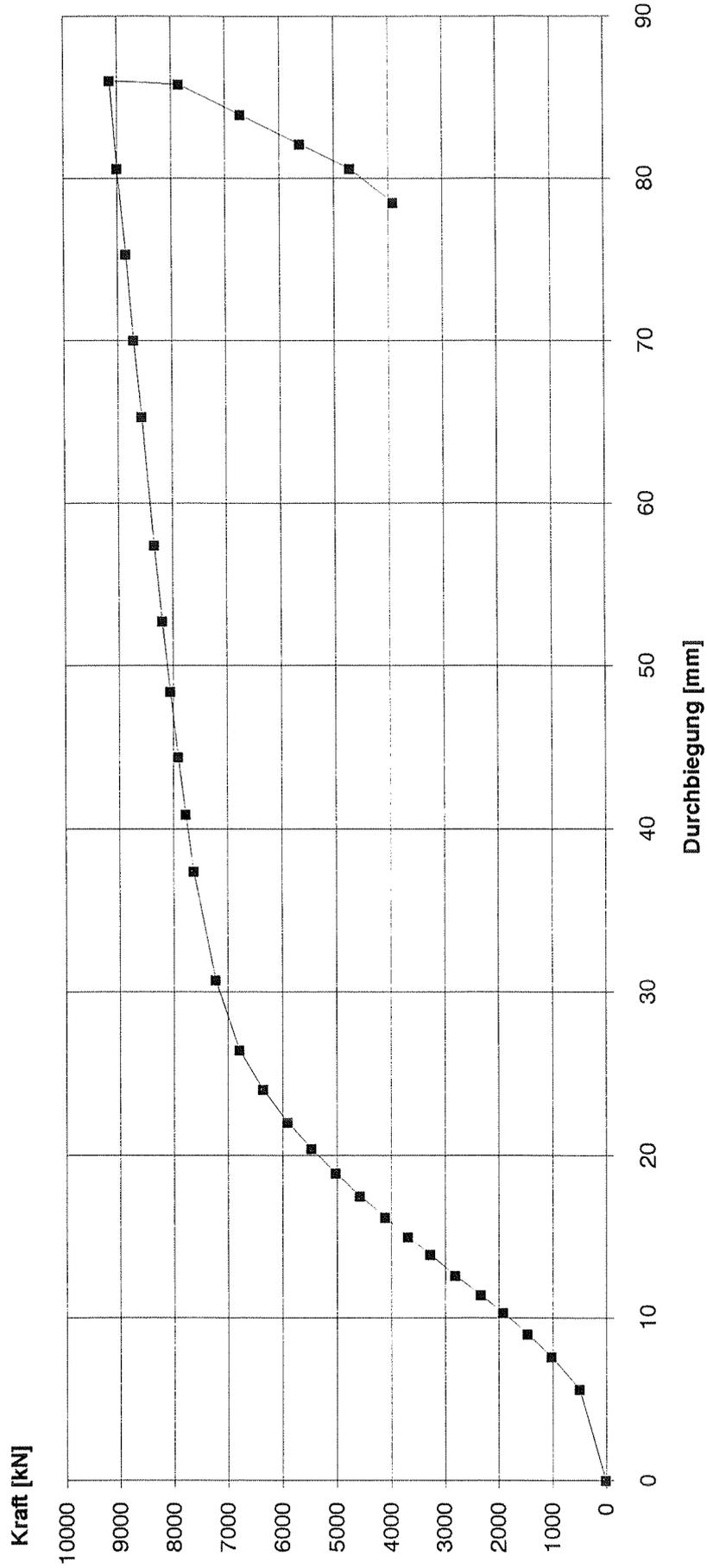


Kraft-Verformungs-Diagramm

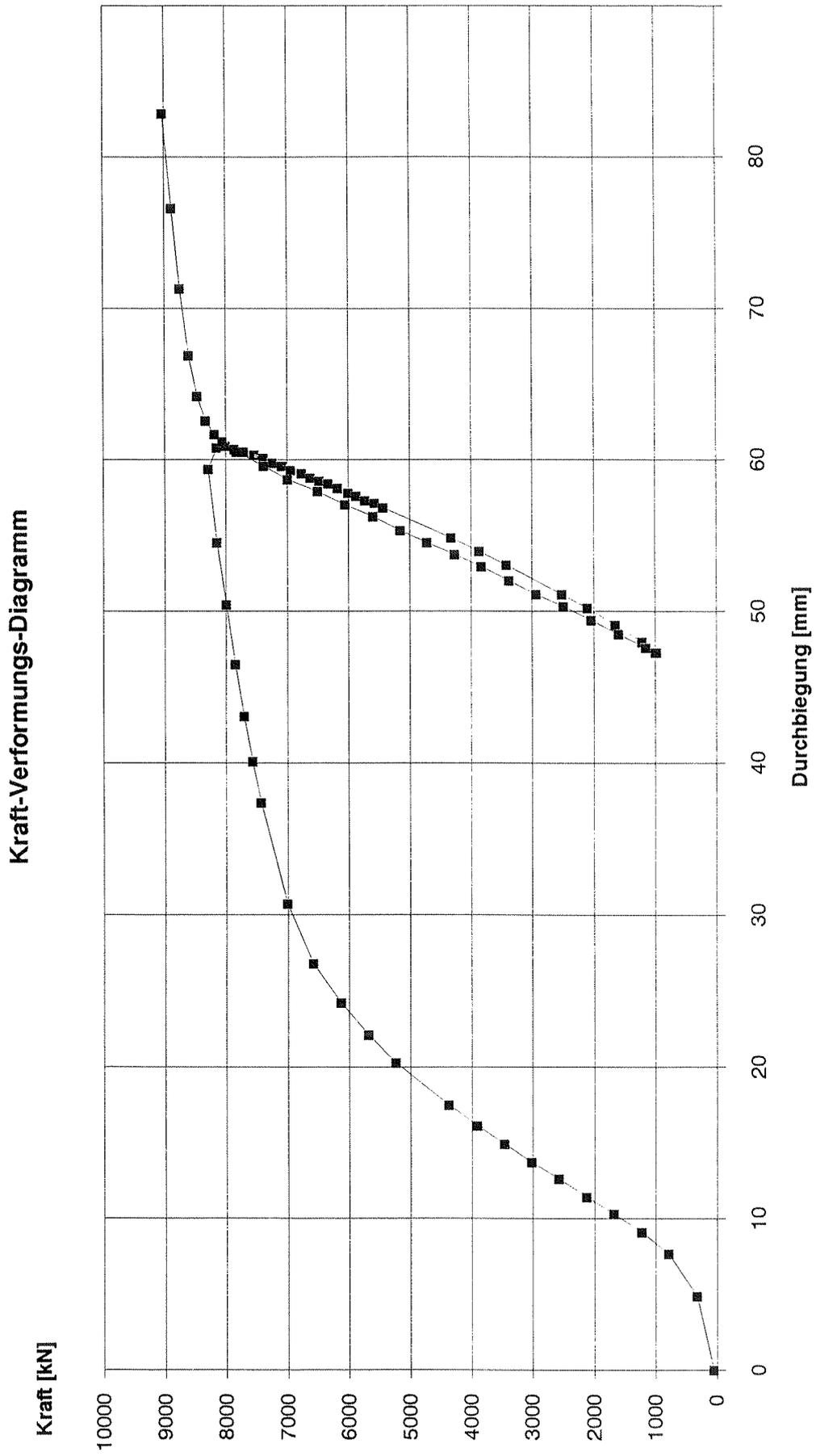


Träger 1

Kraft-Verformungs-Diagramm



Träger 2



Träger 3



Ansicht des Trägers Nr. 3 (links)
und 2 (rechts) nach dem Versuch



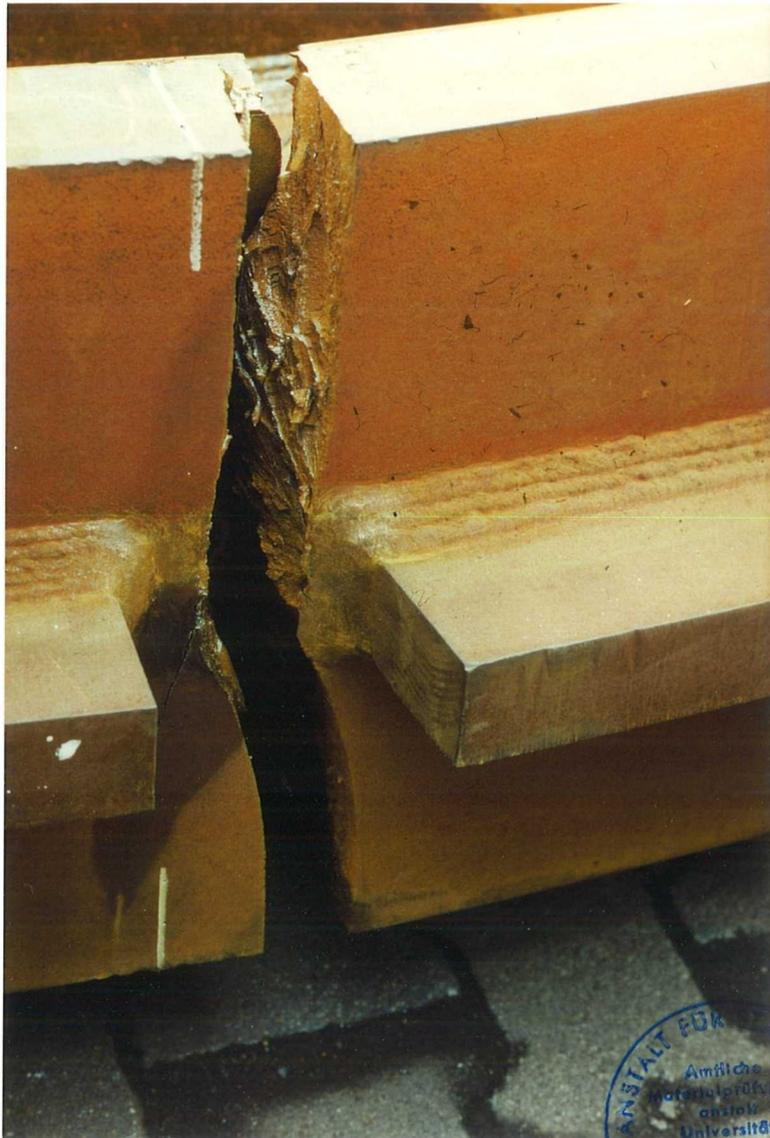
Anlage 30
Ber. Nr. 921570
vom 1.08.94



Bruch des Trägers Nr. 3



Anlage 31
Ber. Nr. 921570
vom 1.08.94



Bruch des Trägers Nr. 3



Anlage 32
Ber. Nr. 921570
vom 1.08.94



Gesamtansicht aller geprüften Träger Nr. 0 bis 3
(von oben nach unten)



Ansicht der Träger Nr. 1 (links) und 0 (rechts)
nach dem Versuch