

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

Dezember 1969

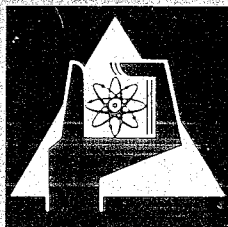
KFK 1152

Institut für Angewandte Reaktorphysik  
Projekt Schneller Brüter

Das in-pile Zeitstandverhalten einiger austenitischer Stähle  
und Nickellegierungen unter mehrachsiger Beanspruchung

- Ergebnisse der Mol 2-Versuche -

K. D. Closs, H. J. Laue



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Dezember 1969

KFK-1152

Institut für Angewandte Reaktorphysik

"Projekt Schneller Brüter"

Das in-pile Zeitstandverhalten einiger austenitischer  
Stähle und Nickellegierungen unter mehrachsiger Beanspruchung  
- Ergebnisse der Mol 2-Versuche -

K.D. Closs, H.J. Laue

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe



## Kurzfassung

Im belgischen Reaktor BR 2 wurden insgesamt 160 Röhrrchen mit den Abmessungen 7 mm  $\varnothing$  x 0,4 mm x 45 mm bei Temperaturen von 600°C, 650°C und 700°C bis zu Versuchszeiten von maximal 4757 h bestrahlt und das in-pile Zeitstandverhalten dieser Prüflinge bestimmt. Untersucht wurden folgende austenitische Stähle und Nickellegierungen: X8CrNiMoV Nb1613, X2CrNi 2025, Incoloy 800, Inconel 625, Hastelloy X, Inconel 718 und Inconel X 750.

Die Abnahme der Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung lag je nach Versuchsmaterial und Bestrahlungstemperatur zwischen 15 % und 55 %. Die Bruchdehnung der untersuchten Legierungen wurde vor allem durch die Hochtemperaturversprödung über (n,  $\alpha$ )-Reaktionen teilweise sehr stark auf Werte < 1 % reduziert. Nur bei Incoloy 800 und Hastelloy X traten noch Bruchdehnungen zwischen 2 % und 4 % bei allen Versuchstemperaturen auf.

## Abstract

160 small tubes with an outer diameter of 7 mm, a wall thickness of 0,4 mm and a length of 45 mm have been irradiated in the Belgian Reactor BR 2 at temperatures of 600°C, 650°C and 700°C to determine the stress-rupture-strength and the rupture-strain of these specimens. The maximum irradiation time was 4757 h. The following austenitic stainless steels and Ni-alloys have been examined: The German steels X8CrNiMoV Nb 1613 and X2CrNi 2025, Incoloy 800, Inconel 625, Hastelloy X, Inconel 718 and Inconel X 750.

The decrease of the stress-rupture-strength by the irradiation was between 15 % and 55 % depending on the irradiation temperature and the materials used. The rupture-strain of the tested alloys was drastically reduced by the irradiation which was attributed to the high temperature embrittlement by (n,  $\alpha$ )-reactions. All alloys except Incoloy 800 and Hastelloy X showed rupture-strains less than 1 % for at least one test temperature.



<u>Inhaltsangabe</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Bestrahlungseinrichtung	2
3. Versuchsprogramm und Versuchsbedingungen	4
3.1 Materialauswahl	4
3.2 Temperaturen	4
3.3 Belastungen	5
3.4 Neutronenfluß, -dosis	6
4. Versuchsauswertung	8
5. Versuchsergebnisse	10
5.1 X8CrNiMoV Nb 1613	10
5.2 X2CrNi 2025	12
5.3 Incoloy 800	13
5.4 Inconel 625	14
5.5 Hastelloy X	15
5.6 Inconel 718	17
5.7 Inconel X 750	18
6. Zusammenfassung	20
7. Literaturverzeichnis	24





## 1. Einleitung

Im Rahmen des Materialbestrahlungsprogramms des Projektes "Schneller Brüter" wurden im Reaktor BR 2 in Mol/Belgien seit Juni 1966 kleine Rohrproben unter Innendruck aus verschiedenen Materialien bei Temperaturen zwischen 600°C und 700°C bestrahlt. Bis Ende 1969 wurden unter der Bezeichnung Mol 2 insgesamt 20 Einsätze mit je 8 Prüflingen eingesetzt und die Zeitstandfestigkeit dieser Proben unter Bestrahlung bestimmt.

Diese Versuchsreihe wurde im Hinblick auf die Auslegung von Brennelementhüllrohren für Schnelle Brutreaktoren geplant und durchgeführt. Durchmesser und Wandstärke der Röhren entsprachen den Abmessungen der Brennelementhüllrohre. Durch den Innendruck sollte der Spaltgasdruck und unter vereinfachten Bedingungen der Schwelldruck des Brennstoffs simuliert werden. Es wurde jeweils die Zeit bestimmt, bis zu der die Röhren bei einem vorgegebenen Innendruck undicht wurden bzw. zu Bruch gingen.

Der vorliegende Bericht gibt eine Zusammenfassung der bisherigen Versuchsergebnisse. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits früher veröffentlicht (1, 2).

## 2. Bestrahlungseinrichtung

Die Bestrahlungseinrichtung wurde vom Institut für Reaktorentwicklung des Kernforschungszentrums Karlsruhe entwickelt und gebaut.

Die Einsätze werden im Innern eines 6-schaligen BR 2 - Brennelementes mit einem nutzbaren Durchmesser von 17,4 mm bestrahlt. Die Versorgungs- und Regelanlagen sind für den parallelen Betrieb zweier Einsätze mit je 8 Prüflingen ausgelegt, die im Bestrahlungseinsatz übereinander angeordnet sind.

Der Aufbau eines Prüflings geht aus Abb. 1 hervor. Die eigentliche Prüflingslänge beträgt 45 mm bei einem Außendurchmesser von 7 mm und einer Wandstärke von 0,4 mm. In späteren Einsätzen werden auch Hüllrohre mit den Abmessungen 6 mm  $\varnothing$  x 0,38 mm bestrahlt. Die Röhrchen sind an beiden Enden mit Endkappen verschlossen, durch die auf der einen Seite die Druckversorgungsleitung zur Beaufschlagung des Prüflings mit einem einstellbaren Helium-Innendruck bis zu maximal 500at geführt wird. Auf der anderen Seite wird der Heizleiter für die elektrische Innenheizung eingeführt. Über eine elektronische Regelanlage kann die Temperatur des Prüflings während der Bestrahlung auf  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  konstant gehalten werden. Die Versuchstemperatur läßt sich zwischen  $550^{\circ}\text{C}$  und  $800^{\circ}\text{C}$  stufenlos einstellen. Die Prüflingstemperatur wird mit jeweils drei stahlummantelten Chromel-Alumel-Thermoelementen gemessen. Nach umfangreichen Vorversuchen wurden die Meßstellen zur genauen Temperaturmessung direkt auf den Prüfling aufgeschweißt. Zwei Thermoelemente messen, jeweils um  $180^{\circ}\text{C}$  versetzt, die Temperatur in Prüflingsmitte, während das dritte Element im oberen bzw. unteren Prüflingsdrittel jeweils in Richtung des Flußmaximums angeordnet ist.

Die Versuchsergebnisse zeigten, daß eine Beeinflussung des Zeitstandverhaltens durch das Aufschweißen bei den untersuchten Legierungen nicht festzustellen war. Von den insgesamt 160

eingesetzten Prüflingen trat der Bruch nur bei 11 Prüflingen in unmittelbarer Nähe der Schweißstelle auf.

Die Proben befinden sich in Probenträgern aus AlMg 3, in denen auch die Versorgungs- und Meßleitungen zum Einsatzkopf geführt werden. Das über den Probenträger gezogene und gasdicht zugeschweißte Schutzrohr steht in direktem Kontakt mit dem Kühlwasser des Reaktors.

Nähere Einzelheiten über die Druck- und Temperaturregelanlage sowie über den Bestrahlungseinsatz können den Veröffentlichungen (3, 4, 5) entnommen werden.

### 3. Versuchsprogramm und Versuchsbedingungen

Bei den Mol 2 - Versuchen sollten ausgewählte Hüllwerkstoffe unter möglichst echten Betriebsbedingungen untersucht und aus den Ergebnissen direkte Folgerungen für die Auslegung der Brennelementhüllrohre für schnelle Brutreaktoren gezogen werden.

#### 3.1 Materialauswahl

Die Planung und Bestrahlung der ersten 20 Einsätze des Bestrahlungsprojektes Mol 2 war auf die Entwicklung sowohl des natrium- als auch des dampfgekühlten Brütters ausgerichtet. Es wurden deshalb austenitische Stähle und Nickellegierungen untersucht. In Tabelle 1 sind die eingesetzten Werkstoffe mit ihren Herstelleranalysen zusammengestellt. Die vier Nickellegierungen sowie Incoloy 800 wurden als potentielle Hüllwerkstoffe für den dampfgekühlten Brüter angesehen, während die anderen Materialien im Hinblick auf ihre Verwendung für den natriumgekühlten schnellen Brutreaktor untersucht wurden. Alle Rohre wurden im Anlieferungszustand eingesetzt.

#### 3.2 Temperaturen

Die maximalen nominellen Hüllrohrtemperaturen der Brennelemente schneller Brutreaktoren liegen im Bereich von 600 bis 650°C; dagegen sind an den Heißstellen Temperaturen bis zu 700°C möglich. Die Bestrahlungstemperaturen für die Mol 2 - Versuche wurden deshalb auf 600°C und 700°C, teilweise auch auf 650°C festgelegt. Da in diesem Temperaturbereich das Zeitstand- und Kriechverhalten der Werkstoffe sehr stark temperaturabhängig ist, ist eine hohe Temperaturkonstanz während der Versuche besonders wichtig. Mit Hilfe der Temperaturregelanlage und der elektrischen Innenheizung konnte die Temperatur während des Betriebes auf  $\pm 1^\circ\text{C}$  konstant gehalten werden.

Durch die Innenheizung und die Zentrierung der Prüflinge in den Probenträgern konnte über die Prüflingslänge kein einheit-

licher Temperaturverlauf erreicht werden. Je nach Solltemperatur sank die Temperatur an den Enden des Meßbereichs auf 320 bis 400°C. Ein charakteristisches in-pile Temperaturprofil ist in Abb. 2 wiedergegeben. Durch eine Verlängerung der Innenheizung und eine konstruktive Umgestaltung der Endkappen soll versucht werden, bei späteren Mol 2 - Bestrahlungen das Temperaturprofil etwas flacher zu gestalten.

Die out-of-pile-Parallelversuche wurden dagegen in normalen 3-Zonenöfen durchgeführt, d.h. die Temperatur war über die gesamte Prüflingslänge konstant. Zukünftige out-of-pile-Versuche, bei denen das in-pile Temperaturprofil nachgeahmt wird, sollen die Frage klären, ob bei den Bestrahlungsversuchen durch den axialen Temperaturgradienten eine Beeinflussung des Zeitstandverhaltens zu erwarten ist.

Eine weitere Vereinfachung bei den Mol 2 - Experimenten im Vergleich zu einem Brennelementhüllrohr besteht darin, daß bei den Druckröhrchen keine thermischen Spannungen infolge eines radialen Wärmeflusses auftreten. Während unter den Betriebsbedingungen eines mit Oxidbrennstoff betriebenen Brutreaktors ein Temperaturgradient von maximal 50°C in der Hüllrohrwand existiert, beträgt der Temperaturabfall in der Wand der Mol 2 - Druckröhrchen nur einige Grad Celsius. Wie in (2) gezeigt wurde, läßt sich jedoch mit Hilfe eines Rechenprogramms der Einfluß von thermischen Spannungen nachträglich untersuchen.

### 3.3 Belastungen

Der He-Innendruck kann von Hand stufenlos bis auf 500 at eingestellt werden und wird während der gesamten Versuchszeit konstant gehalten. Bei längeren Reaktorabschaltungen werden die Prüflinge druckentlastet. Für jedes einzelne Druckröhrchen wird über einen Druckschreiber die Standzeit bis zum Bersten des Prüflings bestimmt.

Die mechanische Belastung der Mol 2 - Prüflinge entspricht nicht vollständig der Beanspruchungsart eines Brennelementhüllrohres, da sich dort einem über die Betriebszeit nahezu konstanten Brennstoffdruck ein ansteigender Spaltgasdruck überlagert. Mit Hilfe eines Rechenprogramms (2) bzw. theoretischen Überlegungen (6) lassen sich aus den Mol 2 - Ergebnissen auch Aussagen über die Zeitstandfestigkeit der Hülle bei einem langsamen Druckanstieg gewinnen.

### 3.4 Neutronenfluß, -dosis

Die Bestrahlung der Mol 2 - Einsätze erfolgte in den Kanälen C 41 und C 319 des belgischen Reaktors BR 2. In Abb. 3 sind die mit Hilfe von eingebauten Detektoren gemessenen zeitlich gemittelten Neutronenflüsse über den Prüflingsbereich aufgetragen. Man erkennt daraus, daß der schnelle Fluß von ca.  $3,8 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> . s in Einsatzmitte bis auf ca.  $1,9 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> . s bei den äußeren Prüflingen abfällt.

Die vier mittleren Prüflingspositionen können in Bezug auf den Neutronenfluß als gleich angesehen werden. Hier beträgt der gemittelte Fluß schneller Neutronen ca.  $3,6 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> . s. Obwohl in den äußeren Positionen ein relativ starker Flußgradient zu verzeichnen ist, wurden die verbleibenden vier Positionen ebenfalls als gleichwertig definiert. Der gemittelte Neutronenfluß liegt bei diesen Prüflingen in der Größenordnung von  $2,7 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> . s. Um für die Auswertung vergleichbare Neutronenflüsse zu haben, wurden die einzelnen Legierungen daher entweder stets in der Innenposition oder in der Außenposition bestrahlt.

Nach (7) beträgt der maximale schnelle Neutronenfluß in einem natriumgekühlten Brutreaktor ca.  $8 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> . s. Der Neutronenfluß bei den Mol 2 - Bestrahlungen ist damit um den Faktor 20 - 30 zu niedrig.

Ähnlich ungünstig sind die Verhältnisse beim Vergleich der Neutronendosis. Während in Brutreaktoren einige Stellen der Brennelementhüllrohre einer Dosis schneller Neutronen  $> 10^{23}$  nvt ausgesetzt sind, konnte mit den Mol 2 - Prüflingen bei der maximalen Versuchszeit von 4757 h nur eine Dosis von ca.  $6,8 \times 10^{21}$  nvt erreicht werden. Das so wichtige Strukturmaterialschwellen bei hohen Neutronendosen konnte daher mit den hier beschriebenen Versuchen nicht untersucht werden.

#### 4. Versuchsauswertung

Die Standzeit der Prüflinge wurde an Hand der Druckschreiber-  
aufzeichnungen bestimmt. Im allgemeinen war das Ende der  
Standzeit mit einem schlagartigen Druckabfall verbunden. Nur  
bei wenigen Proben betrug die Druckabfallgeschwindigkeit  
< 20 at/h. In solchen Fällen konnte erst nach mehrmaligem  
Nachspeisen auf Solldruck mit Sicherheit auf ein Leck im Prüf-  
ling geschlossen werden. Nach der Bestrahlung wurden alle Rohr-  
proben in den Heißen Zellen einem Drucktest bei Raumtemperatur  
unterworfen.

Die in einigen Diagrammen angegebenen Tangentialspannungen  
wurden nach der Kesselformel berechnet:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot s}$$

Darin bedeuten:

- $\sigma_t$  = Tangentialspannung in der mittleren Wandfaser
- p = Innendruck
- $d_i$  = Innendurchmesser
- s = Wandstärke

Diese Formel gilt streng genommen nur für dünnwandige Rohre  
bis zu einem Verhältnis  $s/d_i = 0,05$ . Rohre mit Brüterabmes-  
sungen liegen etwas über diesem Wert. Der Fehler ist jedoch  
äußerst gering.

Die tangentielle Dehnung der Rohre wurde nach folgender Formel  
berechnet:

$$\delta = \frac{d_B - d_{UB}}{d_{UB}}$$

Darin bedeuten:

- $\delta$  = tangentielle Dehnung
- $d_B$  = Durchmesser des bestrahlten Prüflings
- $d_{UB}$  = Durchmesser des unbestrahlten Prüflings.



Vor dem Einbau der Prüflinge in den Bestrahlungseinsatz wurden die Durchmesser mit einer Mikrometerschraube bestimmt, während nach der Bestrahlung die Messung der Probendurchmesser in den heißen Zellen mit einer Meßuhr erfolgte. Die Ungenauigkeit der Meßuhr und die erschwerten Arbeitsbedingungen in den heißen Zellen führten dazu, daß die tangentialen Dehnungen der Rohre nur mit einer absoluten Genauigkeit von etwa  $\pm 0,15\%$  bestimmt werden konnten. Das führt dazu, daß die gemessenen tangentialen Dehnungen  $< 0,5\%$  mit einem Fehler von 30 - 50 % behaftet sein können. Bei größeren tangentialen Aufweitungen treten entsprechend geringere Fehler auf. Rohre mit einem Längsriss wurden zur Bestimmung der tangentialen Dehnung nicht verwendet.

Abb. 4 zeigt zwei typische bestrahlte Mol 2 - Prüflinge. Während die Messung der tangentialen Aufweitung beim oberen Prüfling auf Grund der geringen Dehnung sehr ungenau bleibt, läßt sich die relativ große Dehnung des unteren Prüflings bereits auf den ersten Blick erkennen.

Ergänzend sei erwähnt, daß in (2) versucht wurde, für einige Werkstoffe aus der tangentialen Bruchdehnung und der Standzeit eine minimale Kriechgeschwindigkeit und daraus die Norton'schen Kriechparameter zu berechnen. Anschließend wurde mit Hilfe eines Rechenprogramms der Einfluß von thermischen Spannungen, Spaltgasdruckaufbau und Korrosion auf das Zeitstandverhalten der untersuchten Legierungen bestimmt.

## 5. Versuchsergebnisse

### 5.1 X8CrNiMoV Nb 1613

Das Zeitstandverhalten von Rohren aus X8CrNiMoV Nb 1613 (Werkstoff Nr. 4988) ist in Abb. 5 dargestellt.

Man erkennt, daß bei 600°C die Zeitstandfestigkeit des bestrahlten Materials auf etwa 60 % der Werte des unbestrahlten Werkstoffs absinkt. Während die Bruchdehnung im unbestrahlten Zustand mit der Standzeit der Prüflinge und damit mit kleiner werdendem Innendruck eindeutig zunimmt, zeigen die bestrahlten Prüflinge eine nahezu konstante Bruchdehnung im Bereich von 0,45 bis 1,0 % unabhängig von der Standzeit und vom Innendruck.

Bei 700°C scheint die Grenze der Einsatzmöglichkeit dieses Stahls zu liegen. Bereits das unbestrahlte Material zeigt vor allem bei längeren Zeiten einen relativ steilen Abfall der Zeitstandfestigkeit, was wahrscheinlich auf Überalterungseffekte zurückzuführen ist. Noch deutlicher kommt dieser Abfall bei den bestrahlten Proben zum Ausdruck, wo der Überalterungseffekt wahrscheinlich durch eine Beschleunigung des Ausscheidungsverhaltens durch die Neutronenbestrahlung zu einem früheren Zeitpunkt einsetzt. Durch die Bestrahlung wird die Zeitstandfestigkeit auf 50 % bei kurzen Zeiten und ca. 45 % bei längeren Standzeiten im Vergleich zum unbestrahlten Werkstoff reduziert. So beträgt die Zeitstandfestigkeit der bestrahlten Proben nur noch  $\sigma_{B/1000} \approx 5 \text{ kp/mm}^2$ . Parallel mit der starken Abnahme der Festigkeit bei längeren Standzeiten ist ein Anstieg der Dehnung sowohl beim bestrahlten als auch unbestrahlten Material festzustellen. Während bei Standzeiten um 300 h durch die Bestrahlung eine Reduktion der Bruchdehnung etwa um den Faktor 6 zu beobachten ist, unterscheiden sich die Bruchdehnungen der bestrahlten und unbestrahlten Proben bei längeren Zeiten (um 900 h) nur noch unwesentlich.

Macht man für den Rückgang der Duktilität der bestrahlten Röhren vor allem die Hochtemperaturversprödung über  $(n, \alpha)$ -Reaktionen verantwortlich und setzt man ferner die Gültigkeit des Blasenmodells (8) zur Beschreibung des Mechanismus der Versprödung als gültig voraus, so kann man die Zunahme der Bruchdehnung mit zunehmender Standzeit bei  $700^{\circ}\text{C}$  erklären. Nach dem Blasen-Modell muß eine Heliumblase einen kritischen Radius erreicht haben, um weiterzuwachsen und schließlich zusammen mit anderen Blasen den Bruch des Materials herbeizuführen. Dieser kritische Blasenradius ist umgekehrt proportional der angelegten Spannung. Bei kurzen Standzeiten - entsprechend hohen Spannungen im Prüfling - wird sich der kritische Blasenradius leicht erreichen lassen, während unter Umständen bei langen Standzeiten die angelegten Spannungen zur Bildung des kritischen Blasenradius nicht mehr ausreichen, und die Dehnung sich immer mehr dem Wert ohne Bestrahlung nähert.

Der absolute Anstieg der Bruchdehnung mit der Standzeit bei den bestrahlten und unbestrahlten Proben ebenso wie der starke Abfall der Festigkeit bei  $700^{\circ}\text{C}$  ist wohl, wie bereits erwähnt, auf Überalterungseffekte zurückzuführen.

Als Beispiel für das Bruchverhalten sind in Abb. 22 metallographische Aufnahmen von zwei bestrahlten Prüflingen wiedergegeben. Bei dem Prüfling mit kürzerer Standzeit und entsprechend geringerer tangentialer Aufweitung ist im wesentlichen nur ein Riß zu erkennen, während bei dem Prüfling mit längerer Standzeit über den ganzen Querschnitt an den Korngrenzen feine interkristalline Anrisse auftreten. Aufgrund der schwierigen Identifizierung der genauen Bruchzone ist eine Beurteilung der Schliffbilder kaum möglich.

Aus den Druckaufzeichnungen während des Berstvorgangs kann jedoch geschlossen werden, daß bei den bei  $700^{\circ}\text{C}$  untersuchten Prüflingen zwei verschiedene Bruchmechanismen auftreten. Während bei kurzen Standzeiten der Druckabfall beim Bersten

relativ groß ist (teilweise  $> 300$  at/h), d.h. ein ausgeprägter Riß auftritt, zeigten die Prüflinge mit längeren Standzeiten nur einen langsamen Druckabfall (teilweise  $< 10$  at/h), was auf kleinere, interkristalline Anrisse hindeutet.

Bemerkenswert ist bei Prüfling 15 e in Abb. 22 ferner die stark ausgeprägte Reaktionszone am Innenradius. Das Problem wurde jedoch nicht näher untersucht.

In Abb. 6 ist für die unbestrahlten und bestrahlten Prüflinge die Hauptkurve nach Larson-Miller zur Extrapolation der Zeitstandergebnisse aufgetragen. Man erkennt, daß mit einer Larson-Miller-Konstante  $C = 15$  die Meßergebnisse gut den eingezeichneten Kurvenverläufen entsprechen. Hierbei muß jedoch betont werden, daß eine Extrapolation auf Temperaturen  $> 700^{\circ}\text{C}$  nicht zu empfehlen ist, da bereits bei  $700^{\circ}\text{C}$  Gefügeänderungen im Material auftreten, die eine Extrapolation auf höhere Temperaturen äußerst unsicher erscheinen lassen.

## 5.2 X2CrNi 2025

Das Zeitstandverhalten von Rohren aus X2CrNi 2025 geht aus Abb. 7 hervor.

Bei einer Temperatur von  $600^{\circ}\text{C}$  wird die Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung auf etwa 65 % der Werte des unbestrahlten Materials reduziert. Während die unbestrahlten Röhrchen eine starke Abnahme der Bruchdehnung bei den Langzeitversuchen zeigen, scheinen die bestrahlten Prüflinge Bruchdehnungen im Bereich von 0,6 bis 1,6 % zu zeigen. Leider liegen nur sehr wenige Versuchsergebnisse bei  $600^{\circ}\text{C}$  vor, so daß bezüglich der Dehnung keine endgültige Aussage gemacht werden kann. Die Bruchdehnung von 1,6 % bei einem der drei zu Bruch gegangenen Prüflinge kann u.U. auf die Versuchsdurchführung zurückzuführen sein. Dieser Prüfling zeigte zunächst einen extrem langsamen Druckabfall. Erst beim dritten Nachspeisen auf Solldruck trat ein schlagartiger Druckabfall auf. Auch bei den beiden anderen

Prüflingen sank der Druck beim Bersten relativ langsam.

Die Reduktion der Standzeit durch die Bestrahlung ist bei den Versuchen bei 700°C noch weniger stark ausgeprägt als bei den 600°C-Versuchen. Bei kurzen Zeiten sinkt die Zeitstandfestigkeit auf etwa 75 %, bei längeren Zeiten auf etwa 70 % der Werte des unbestrahlten Materials. Die Bruchdehnung der bestrahlten Röhren scheint unabhängig von der Standzeit zu sein und liegt zwischen 0,3 und 1,2 %. Bei längeren Standzeiten und entsprechend niedrigeren Innendrücker ist wohl auch hier, entsprechend dem Blasenmodell, die Hochtemperaturversprödung durch (n,α)-Reaktionen bei der Bruchdehnung von untergeordneter Bedeutung. Die Dehnungen liegen sowohl bei den unbestrahlten als auch bestrahlten Rohrproben bei Standzeiten größer 300 h unter 1 %.

Abb. 8 zeigt die Hauptkurve nach Larson-Miller für unbestrahlte und bestrahlte Rohre aus X2CrNi 2025. Auch hier liegen die Meßergebnisse bei Verwendung einer Larson-Miller-Konstanten  $C = 15$  gut auf einem Kurvenzug.

In Abb. 23 ist die Schlißbildaufnahme der Bruchzone eines bei 700°C bestrahlten Prüflings aus X2CrNi 2025 wiedergegeben. Bemerkenswert in dieser Aufnahme ist das relativ grobe Korn des Materials.

### 5.3 Incoloy 800

Abb. 9 zeigt das Zeitstandverhalten von Rohren aus Incoloy 800. Bei dem untersuchten Material handelt es sich um eine Charge mit nur sehr geringen Ti- und Al-Zusätzen. Gegenüber dem sonst allgemein benutzten Incoloy 800 (ca. 0,3 % Ti und 0,3 % Al) ergibt sich dadurch eine geringere Zeitstandfestigkeit und eine höhere Bruchdehnung.

Je nach Versuchsdauer tritt bei 600°C durch die Bestrahlung eine Reduktion der Zeitstandfestigkeit auf 80 % bis 75 % der

Werte des unbestrahlten Materials auf. Einen sehr viel stärkeren Einfluß hat die Bestrahlung auf die Bruchdehnung: Während die unbestrahlten Prüflinge tangentielle Bruchdehnungen im Bereich von 16 bis 19 % aufweisen, betragen sie beim bestrahlten Material nur noch 2,8 bis 3 %, was jedoch im Vergleich zu den anderen untersuchten Werkstoffen immer noch sehr hoch ist.

Die bei 700°C untersuchten Prüflinge zeigen für alle Versuchszeiten eine Reduktion der Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung auf 70 % der Werte des unbestrahlten Materials und tangentielle Bruchdehnungen im Bereich von 2,5 bis 4,7 %. Diese relativ hohen Dehnungen sind nach Abb. 24 mit einer Aufweitung des Gefüges an den Korngrenzen verbunden. Sehr deutlich erkennt man außerdem in dieser Abbildung, daß es sich um ausgeprägte interkristalline Risse handelt bei einer sehr groben Kornstruktur.

Schließlich ist noch erwähnenswert, daß bei nahezu allen Prüflingen aus Incoloy 800 der Druckabfall beim Bersten sehr gering war.

Zur Extrapolation der vorhandenen Meßergebnisse auf andere Temperaturen bzw. längere Standzeiten wurde in Abb. 10 die Hauptkurve von unbestrahlten und bestrahlten Rohren aus Incoloy 800 nach Larson-Miller aufgetragen. Bis auf wenige Meßpunkte liegen die Ergebnisse bei Verwendung einer Konstanten  $C = 15$  gut auf zwei Kurven.

#### 5.4 Inconel 625

Das Zeitstandverhalten der mischkristallhärtenden Ni-Basislegierung Inconel 625 geht aus Abb. 11 hervor.

Bereits im unbestrahlten Zustand zeigt diese Legierung einen relativ steilen Abfall der Zeitstandfestigkeit. Bei 650°C wird die Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung auf etwa 60 % der Werte des unbestrahlten Materials reduziert. Die Zeitstand-

festigkeitskurve der bestrahlten Prüflinge fällt dabei fast mit der Kurve des unbestrahlten Materials bei 700°C zusammen. Sowohl im unbestrahlten als auch im bestrahlten Zustand ist ein leichter Anstieg der Bruchdehnung mit der Standzeit festzustellen. Während die bestrahlten Prüflinge bei kurzen Versuchszeiten Bruchdehnungen von ca. 1 % aufweisen, liegen diese Werte bei längerer Versuchsdauer bei etwa 2 %.

Bei 700°C wird die Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung auf etwa 55 % der Ausgangswerte reduziert. Bei den Bruchdehnungen läßt sich keine Gesetzmäßigkeit feststellen. Die unbestrahlten und bestrahlten Röhren zeigen bei dieser Temperatur Bruchdehnungen zwischen 1,5 und 6 %, wobei die bestrahlten Prüflinge im allgemeinen etwas geringere Dehnungen aufweisen als die unbestrahlten. Aus den Schlifffildaufnahmen in Abb. 25 erkennt man, daß auch bei diesem Material viele kleine interkristalline Anrisse an den Korngrenzen auftreten. -

Bei allen Rohren aus Inconel 625 lag der Druckabfall beim Bersten bei etwa 100 at/h.

In Abb. 12 ist die Hauptkurve nach Larson-Miller für unbestrahlte und bestrahlte Rohre aus Inconel 625 wiedergegeben. Bei einer Larson-Miller-Konstanten von  $C = 13$  liegen die Meßergebnisse gut auf den eingezeichneten Kurven.

### 5.5 Hastelloy X

Die Ergebnisse der Zeitstanduntersuchungen an unbestrahlten und bestrahlten Rohren aus der mischkristallhärtenden Ni-Basislegierung Hastelloy X sind in Abb. 13 zusammengefaßt. Aus den Zeitstandfestigkeitskurven erkennt man, daß von allen untersuchten Legierungen der Einfluß der Bestrahlung bei diesem Werkstoff am geringsten ist.

Durch die Bestrahlung wird bei 650°C die Zeitstandfestigkeit bei kurzen Versuchszeiten (ca. 200 h) auf 85 % und bei langen Versuchszeiten (ca. 1000 h) auf 75 % der Werte aus den Parallel-

untersuchungen reduziert. Bedeutend größer jedoch ist der Einfluß der Neutronenbestrahlung auf die gemessenen Bruchdehnungen. Während beim unbestrahlten Material Bruchdehnungen zwischen 15 und 8 % auftreten, wurden nach der Bestrahlung nur noch tangentielle Aufweitungen zwischen 3,3 und 2 % gemessen. Die Versuchsergebnisse deuten an, daß bei längeren Standzeiten und geringeren Versuchsdrücken die Bruchdehnung u.U. noch weiter absinkt. Bemerkenswert ist ferner, daß bei dieser Temperatur fast alle bestrahlten Prüflinge aus Hastelloy X einen schlagartigen Druckabfall beim Bersten zeigten, und daß, im Gegensatz zu anderen Legierungen, größere Risse - teilweise über die ganze Prüflingslänge - festgestellt wurden. In Abb. 26 ist an Hand einer Schlifffildaufnahme ein derartiger in interkristalliner Bruch zu erkennen.

Bei einer Temperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  wird die Zeitstandfestigkeit durch die Bestrahlung um die gleiche Größenordnung reduziert wie bei  $650^{\circ}\text{C}$ . Die dabei gemessenen Bruchdehnungen liegen im Bereich von 7,6 bis 2,5 % und nehmen ebenfalls mit steigender Standzeit und kleiner werdendem Innendruck ab.

Aufgrund der starken Aufweitung der Proben vor allem nach sehr kurzen Versuchszeiten und den damit verbundenen hohen Drücken sind möglicherweise die gemessenen Dehnungen und damit der Abfall der Dehnung mit steigender Versuchszeit nicht realistisch.

In Abb. 14 wurden ebenfalls für Extrapolationszwecke die Hauptkurven nach Larson-Miller für unbestrahlte und bestrahlte Röhrrchen eingezeichnet. Bis auf einige Versuchsergebnisse an unbestrahlten Proben bei  $750^{\circ}\text{C}$  liegen die Meßergebnisse bei Verwendung einer Larson-Miller-Konstanten  $C = 13$  gut auf den angegebenen Kurven.



## 5.6 Inconel 718

Das Zeitstandverhalten von unbestrahlten und bestrahlten Rohren aus der mischkristallhärtenden und aushärtbaren Ni-Basislegierung Inconel 718 geht aus Abb. 15 hervor. Auf den ersten Blick fällt der steile Abfall der Zeitstandfestigkeit mit zunehmender Versuchszeit bereits bei den unbestrahlten Prüflingen auf.

Darüber hinaus wird durch die Bestrahlung die Zeitstandfestigkeit bei 650°C auf 50 % der Ausgangswerte reduziert. Auch der Rückgang der Bruchdehnung ist bei diesem Werkstoff bemerkenswert. Während die unbestrahlten Prüflinge noch Bruchdehnungen von 4 bis 8 % aufweisen, wurden bei den bestrahlten Röhren je nach Standzeit nur Bruchdehnungen zwischen 0,2 und 1,4 % gemessen. Die Versuchsergebnisse deuten an, daß bei längeren Versuchszeiten und entsprechend geringeren Innendrücker die Bruchdehnung leicht zunimmt.

Bei 700°C macht sich der Bestrahlungseinfluß nicht mehr ganz so stark bemerkbar. Die Zeitstandfestigkeit wird auf 55 % der Werte des unbestrahlten Materials reduziert. Ferner treten noch erstaunlich hohe Bruchdehnungen zwischen 2,7 und 5,8 % auf, wobei mit längeren Versuchszeiten die Bruchdehnung noch weiter anzusteigen scheint.

Im Gegensatz zum Hastelloy X sind hier die hohen Bruchdehnungen nicht mit einem ausgeprägten Aufreißen der Proben verbunden. Im allgemeinen waren bei Inconel 718 nur sehr langsame Druckabfälle beim Bersten zu verzeichnen, was auf sehr kleine Risse hinweist. Abb. 27 zeigt die Schlifffilmbildaufnahme eines geborstenen Prüflings. Das Leck war dabei so klein, daß es bei der Aufnahme nicht eindeutig identifiziert werden konnte. Zu beachten ist ferner das sehr feine Korn und die am Innen- und Außenradius auftretenden kleinen Risse.

Der steile Abfall der Zeitstandfestigkeitskurven kommt auch in den Hauptkurven nach Larson-Miller in Abb. 16 klar zum Ausdruck. Während die unbestrahlten Werte bei Verwendung einer Larson-Miller-Konstanten  $C = 13$  gut auf einer Kurve liegen, streuen die Ergebnisse der bestrahlten Prüflinge mehr oder weniger stark.

### 5.7 Inconel X 750

Bei Inconel X 750 handelt es sich um eine rein aushärtbare Ni-Basislegierung. Die Ergebnisse des Zeitstandverhaltens sind in Abb. 17 zusammengefaßt. Während das unbestrahlte Material bei  $600^{\circ}\text{C}$  noch einen relativ flachen Verlauf der Zeitstandfestigkeitskurve zeigt, ist bei  $700^{\circ}\text{C}$  eine sehr starke Abnahme der Festigkeit zu verzeichnen.

Die Bestrahlung macht sich bei beiden Temperaturen sehr stark bemerkbar und scheint bei längeren Versuchszeiten noch stärker an Einfluß zu gewinnen. Bei  $600^{\circ}\text{C}$  und einer Standzeit von 250 h wird die Zeitstandfestigkeit auf 80 %, bei Versuchszeiten von 600 h bereits auf 65 % der Werte des unbestrahlten Materials reduziert. Eine Beeinflussung der Bruchdehnung scheint dagegen nicht vorzuliegen. Sowohl unbestrahlte als auch bestrahlte Prüflinge zeigen Bruchdehnungen unter 0,5 %.

Bei  $700^{\circ}\text{C}$  wird die Zeitstandfestigkeit noch stärker reduziert. Bei Versuchszeiten von 60 h sinkt sie bereits auf 60 %, bei Standzeiten um 300 h sogar auf 50 % der Ausgangswerte. Die Bruchdehnungen des bestrahlten Materials dagegen scheinen sogar etwas über den Werten der unbestrahlten Prüflinge zu liegen. Sie betragen etwa 1 %.

Auch bei Inconel X 750 zeigen die Hauptkurven nach Larson-Miller in Abb. 18 mehr oder weniger starke Streuungen. Die Verwendung einer anderen Larson-Miller-Konstanten als  $C = 13$  bringt jedoch keine wesentliche Besserung.

In Abb. 28 ist die Schlifffbildaufnahme eines bei 700°C bestrahlten Prüflings aus Inconel X 750 zu sehen. Man erkennt einen ausgeprägten interkristallinen Riß ohne wesentliche Beeinflussung der näheren Umgebung der Bruchzone. Der Druckabfall beim Bersten war im allgemeinen relativ niedrig und betrug im Mittel etwa 30 at/h.

## 6. Zusammenfassung

Es wurde der Einfluß der Neutronenbestrahlung auf das Zeitstandverhalten einiger austenitischer Stähle und Ni-Legierungen unter mehraxialer Belastung untersucht. Die maximale Versuchszeit betrug 4757 h, was einer Dosis schneller Neutronen ( $> 0,1$  MeV) von etwa  $6,8 \times 10^{21}$  nvt entspricht.

Die Abnahme der Zeitstandfestigkeit lag je nach Versuchsmaterial und Bestrahlungstemperatur zwischen 15 und 55 %.

In Abb. 19 sind die Zeitstandfestigkeitskurven der bestrahlten austenitischen Stähle einander gegenübergestellt. Man erkennt die relativ hohe Festigkeit des X8CrNiMoV Nb 1613 ( $\sigma_{B/1000} = 16$  kp/mm<sup>2</sup>) bei 600°C im Vergleich zu den Stählen X2CrNi 2025 und Incoloy 800 ( $\sigma_{B/1000} = 10,5$  kp/mm<sup>2</sup>). Bei 700°C und Standzeiten bis 500 h zeigt der Stahl X8CrNiMoV Nb 1613 ebenfalls eine hohe Festigkeit. Bei längeren Versuchszeiten kommt es, wohl bedingt durch Überalterungseffekte, zu einer starken Abnahme der Standzeit. Bei 1000 h schließlich unterscheiden sich die Zeitstandfestigkeiten dieser drei Stähle nur noch unwesentlich ( $\sigma_{B/1000} = 5,0$  bzw.  $4,5$  kp/mm<sup>2</sup>).

In Abb. 20 werden die Zeitstandfestigkeiten der drei bei 650°C bestrahlten Ni-Legierungen miteinander verglichen. Man erkennt den starken Abfall der Zeitstandfestigkeit bei der Legierung Inconel 718. Beim Vergleich der drei Legierungen kann man drei Standzeitbereiche unterscheiden. Bis ca. 300 h Standzeit zeigen die Legierungen Inconel 718 und Inconel 625 höhere Zeitstandfestigkeiten ( $\sigma_{B/100} = 26$  kp/mm<sup>2</sup>) gegenüber Hastelloy X ( $\sigma_{B/100} = 22,5$  kp/mm<sup>2</sup>). Zwischen 300 und 1000 h Standzeit sind die Festigkeiten von Inconel 625 und Hastelloy X vergleichbar, während Inconel 718 stark abfällt. Dieser Abfall wird oberhalb 1000 h noch deutlicher, während nun Hastelloy X die höchste Zeitstandfestigkeit aufweist (Hastelloy X :  $\sigma_{B/1000} = 14$  kp/mm<sup>2</sup>; Inconel 625:  $\sigma_{B/1000} = 13,5$  kp/mm<sup>2</sup>; Inconel 718:  $\sigma_{B/1000} = 11,5$  kp/mm<sup>2</sup>). Bei noch längeren Standzeiten scheint Hastelloy X den anderen Legierungen eindeutig überlegen zu sein.

Noch deutlicher treten nach Abb. 21 die guten Festigkeits-eigenschaften von Hastelloy X unter Bestrahlung bei 700°C in Erscheinung. Bereits bei relativ kurzen Versuchszeiten übertrifft Hastelloy X eindeutig Inconel 625. Bei Standzeiten von 1000 h beträgt die Zeitstandfestigkeit von Hastelloy X

$\sigma_{B/1000} = 9,5 \text{ kp/mm}^2$ , dagegen die von Inconel 625 und Inconel 718 nur noch  $\sigma_{B/1000} = 7,3$  bzw.  $6,8 \text{ kp/mm}^2$ . Das schlechteste Verhalten von allen Legierungen zeigt Inconel X 750, das bereits bei 300 h nur noch eine Zeitstandfestigkeit von  $\sigma_{B/300} = 6,4 \text{ kp/mm}^2$  aufweist.

Der Einfluß der Bestrahlung auf die Bruchdehnung der untersuchten Materialien ist sehr unterschiedlich. Während bei vielen Legierungen vor allem durch die Hochtemperaturversprödung über  $(n, \alpha)$ -Reaktionen eine sehr starke Abnahme der Bruchdehnung auf Werte  $< 1 \%$  festzustellen ist, tritt bei Incoloy 800 und Hastelloy X zwar auch eine Abnahme der Dehnung auf, jedoch erreichen die gemessenen Werte für alle Temperaturen noch 2 bis 4 %. Bei Incoloy 800 scheint die Bruchdehnung unabhängig von der Standzeit zu sein. Bei Hastelloy X hingegen ist nicht eindeutig klar, ob die Abnahme der Bruchdehnung ein echter Effekt oder nur versuchstechnisch bedingt ist.

Bei den Stählen X8CrNiMoV Nb 1613 und X2CrNi 2025 scheint bei 700°C und niedrigen Innendrücken die Bruchdehnung unbeeinflusst von der Hochtemperaturversprödung zu sein. Bei beiden Werkstoffen erreichen die nach der Bestrahlung gemessenen Bruchdehnungen aus Langzeitversuchen die Werte des unbestrahlten Materials. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Annahmen zum sog. Blasenmodell.

Aus den Hauptkurven nach Larson-Miller ist zu entnehmen, daß die Konstanten  $C = 15$  für austenitische Stähle und  $C = 13$  für Ni-Legierungen gut geeignet sind, die Zeitstandfestigkeit der unbestrahlten und bestrahlten Röhren zu beschreiben.

Für die Auslegung der Brennelementhüllrohre für schnelle Brutreaktoren sind aus den Mol 2 - Ergebnissen folgende Konsequenzen zu ziehen:

- 1) Für Brennelemente des dampfgekühlten Brütters nach dem Prinzip des sog. collapsed can ist u.U. Incoloy 800 geeignet, da es von den untersuchten Legierungen die höchste Duktilität aufweist.
- 2) Für Brennelemente des dampfgekühlten Brütters nach dem Prinzip des sog. strong can ist Hastelloy X aufgrund seiner höheren Zeitstandfestigkeit bei langen Versuchszeiten besser geeignet als Inconel 625. Die aushärtbaren Legierungen Inconel 718 und Inconel X 750 zeigten bei den Ni-Legierungen sowohl die schlechtesten Zeitstandfestigkeiten als auch die geringsten Bruchdehnungen bei 600 bzw. 650°C.
- 3) Für die Brennelementhüllrohre des natriumgekühlten schnellen Brutreaktors ist der austenitische Stahl X8CrNiMoV Nb 1613 in der untersuchten Zusammensetzung und ohne spezielle Vorbehandlung kaum geeignet. Eine Verwendung ist nur dann möglich, wenn entweder durch eine Modifizierung der Zusammensetzung oder eine geeignete Vorbehandlung der starke Festigkeitsabfall bei Standzeiten oberhalb 500 h vermieden werden kann, bzw. die Maximaltemperatur der Brennelementhüllen von bisher 700°C entsprechend vermindert wird.

Das für die Brennelemententwicklung so wichtige Problem des Schwellens durch Ausbildung von stabilen Bestrahlungsporen konnte bei den erreichten maximalen Neutronendosen von  $6,8 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  und den verwendeten Untersuchungsmethoden nicht behandelt werden. Nach den bisherigen Kenntnissen ist bei den aufgetretenen Neutronendosen ein Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften nicht zu erwarten. Die möglichen Volumenzunahmen gerade bei den untersuchten Nickellegierungen lassen sich dagegen nur durch elektronenmikroskopische Untersuchungen ermitteln.

Die Autoren danken folgenden Mitarbeitern des Kernforschungszentrums Karlsruhe, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Den Herren Kramer, L. Schmidt und Will aus dem Institut für Reaktorentwicklung für die Konstruktion und Montage der Bestrahlungseinsätze,

den Herren Kaupa und Polifka aus dem Institut für Material- und Festkörperforschung für die Durchführung und Auswertung der Parallelversuche

und den Herren Enderlein und Schreibmaier für die Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen.





Literaturverzeichnis

- (1) H.J. Laue, H. Böhm, H. Hauck: "Multiaxial In-Reactor Stress-Rupture Strength of Stainless Steels and a Nickel Alloy."  
KFK 814, August 1968
- (2) H.J. Laue, K.D. Closs, M. Guyette: "Irradiation-Induced Biaxial Creep Behaviour of Fuel Element Claddings for Fast Reactors: Experimental and Theoretical Results".  
KFK 1017, Juli 1969
- (3) K. Gast, W. Kramer: "Sicherheitsbericht für BR 2 - Material-Bestrahlungsversuche, Projekt Mol 2. Untersuchung des Kriechverhaltens von Can-Materialien unter Bestrahlung".  
KFK 396, Oktober 1965
- (4) W. Kramer, L. Schmidt, H. Will: "Bestrahlungseinrichtung zur Hüllmaterialuntersuchung für schnelle Brutreaktoren".  
Kerntechnik, Isotopentechnik und -Chemie, 9. Jg. 1967, Heft 11, S. 499 - 502
- (5) W. Kramer, H. Will: "Brüter-Versuchshüllrohre für Bestrahlungsexperimente; meß- und fertigungstechnische Probleme".  
Kerntechnik, Isotopentechnik und -Chemie, 9. Jg. 1967, Heft 7, S. 285 - 288
- (6) G.H. Rowe, H.R. Meck: "Stress-Rupture of Metals Under Increasing Stress".  
Journal of Basic Engineering, Trans ASME, Vol 87, 1965, pp. 875 - 878
- (7) K. Gast, E.G. Schlechtendahl: "Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2".  
KFK 660, Oktober 1967
- (8) H. Böhm, W. Dienst, H. Hauck: "Hochtemperaturversprödung von austenitischen Stählen und Nickellegierungen durch (n,  $\alpha$ )-Reaktionen".  
KFK 445, Mai 1966



Legierung	Hersteller	Charge	Herstellereanalyse (Gew. %)													
			C	Cr	Ni	Fe	Nb/ Ta	Mo	W	Ti	Al	Si	Mn	Cu	Co	V
X8CrNiMoV Nb 1613 (W-Nr. 4488)	Mannesmann	SL 733	0,07	17,1	13,6	Rest	0,85	1,3	-	-	-	0,40	1,22	-	-	0,70
X2CrNi 2025	Mannesmann	SL1918	0,017	19,9	24,6	Rest	0,01	-	-	0,01	0,01	0,67	0,71	-	0,015	-
Incoloy 800	Mannesmann	972554	0,014	21,05	31,78	Rest	-	-	-	0,05	0,007	0,68	1,37	0,03	0,02	-
Inconel 625	Superior Tube	NX832AV	0,03	21,82	62,04	2,94	3,64	8,70	-	0,21	0,15	0,26	0,10	0,08	0,06	-
Hastelloy X	Superior Tube	X4-4493	0,10	21,92	47,0	18,29	-	9,0	0,63	-	-	0,86	0,56	-	1,60	-
Inconel 718	Superior Tube	7310-E	0,05	18,90	51,74	18,98	5,07	3,15	-	0,95	0,56	0,32	0,14	0,03	0,08	-
Inconel X 750	Superior Tube	HT-4362 X	0,04	14,84	73,50	6,78	0,89	-	-	2,44	0,64	0,26	0,50	0,08	-	-

Tabelle 1 Analyse der untersuchten Werkstoffe

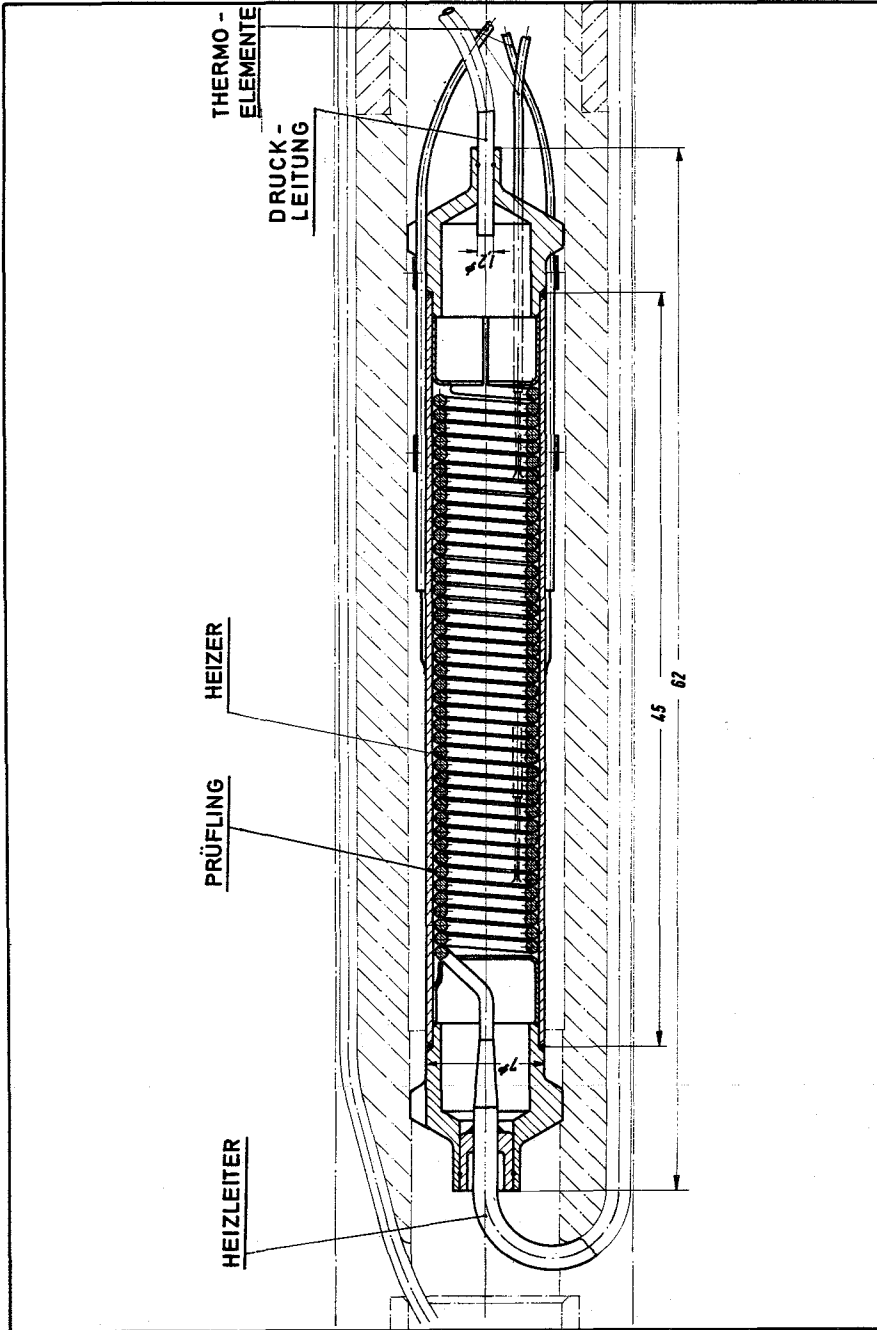
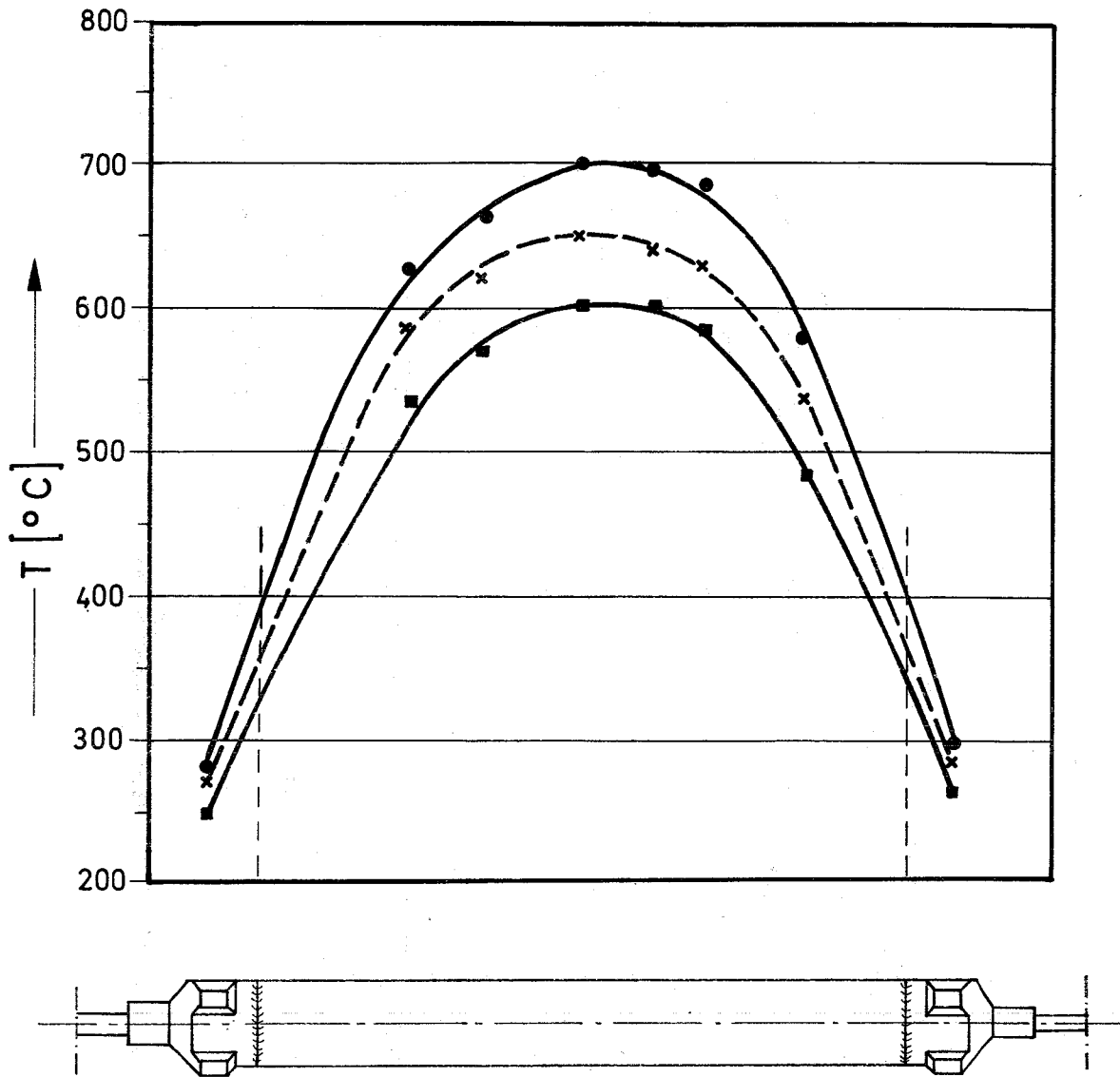
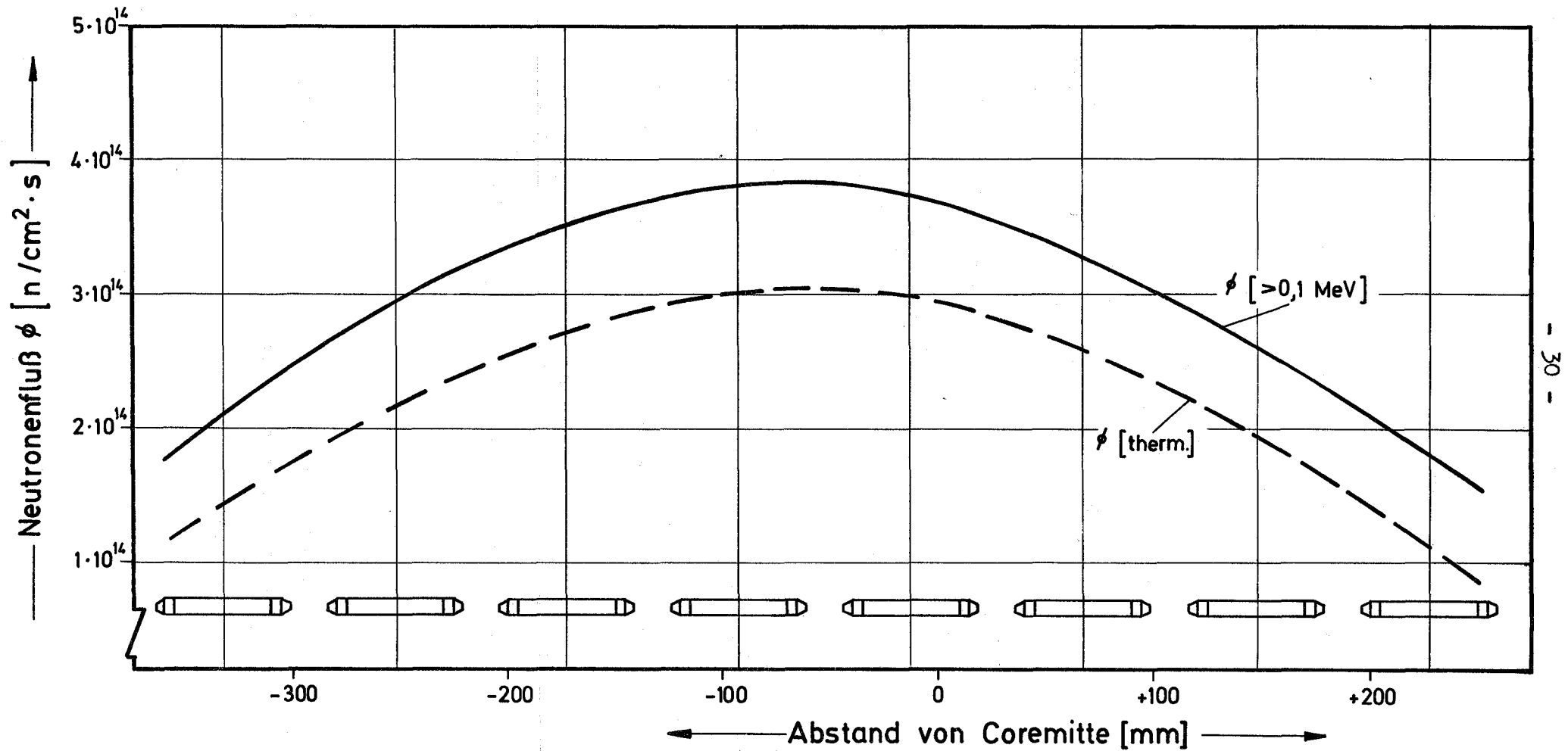


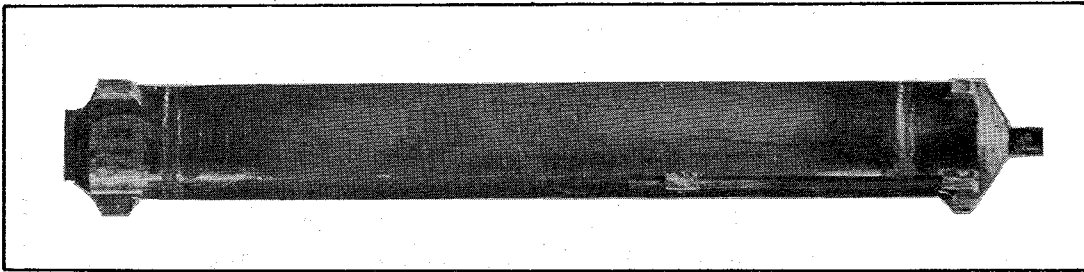
Abb. 1 Mol 2 - Prüfling



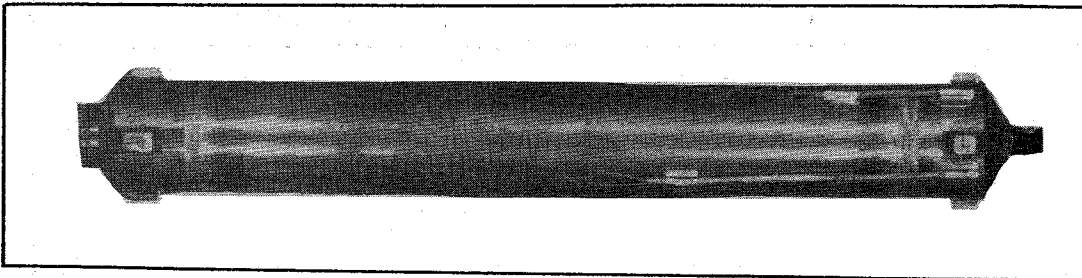
**Abb. 2** Charakteristisches in - pile Temperaturprofil der Mol 2 - Prüflinge



**Abb. 3** Mittlerer gemessener Neutronenfluß in den Kanälen C41 und C39

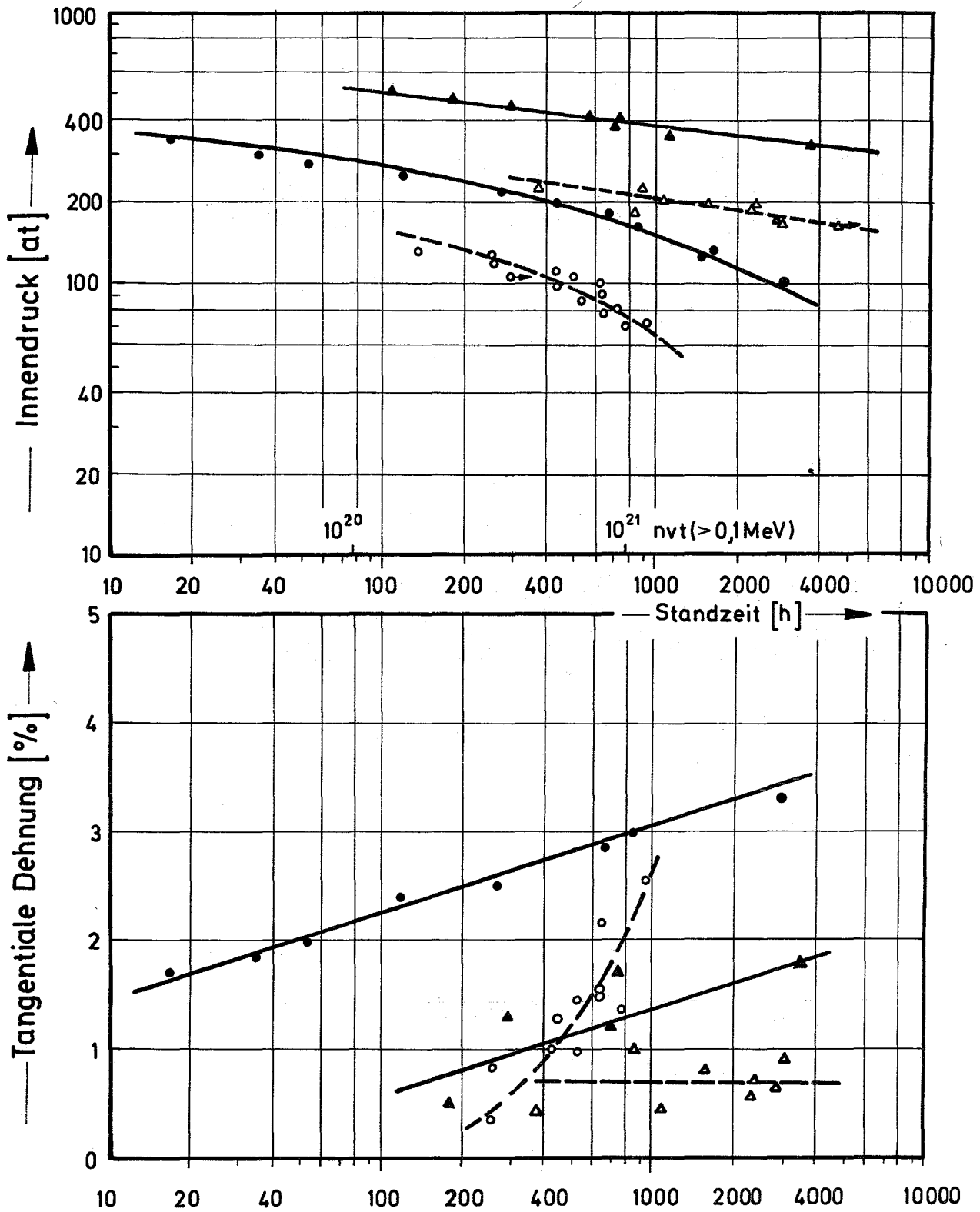


Prüfling 9d: X8 Cr Ni Mo VNb 1613, 600°C  
224at, 374h, 0.45 %



Prüfling 16d: Hastelloy X, 700°C  
135at, 344h, 5.4%

Abb. 4 Bestrahlte Mol 2 Prüflinge

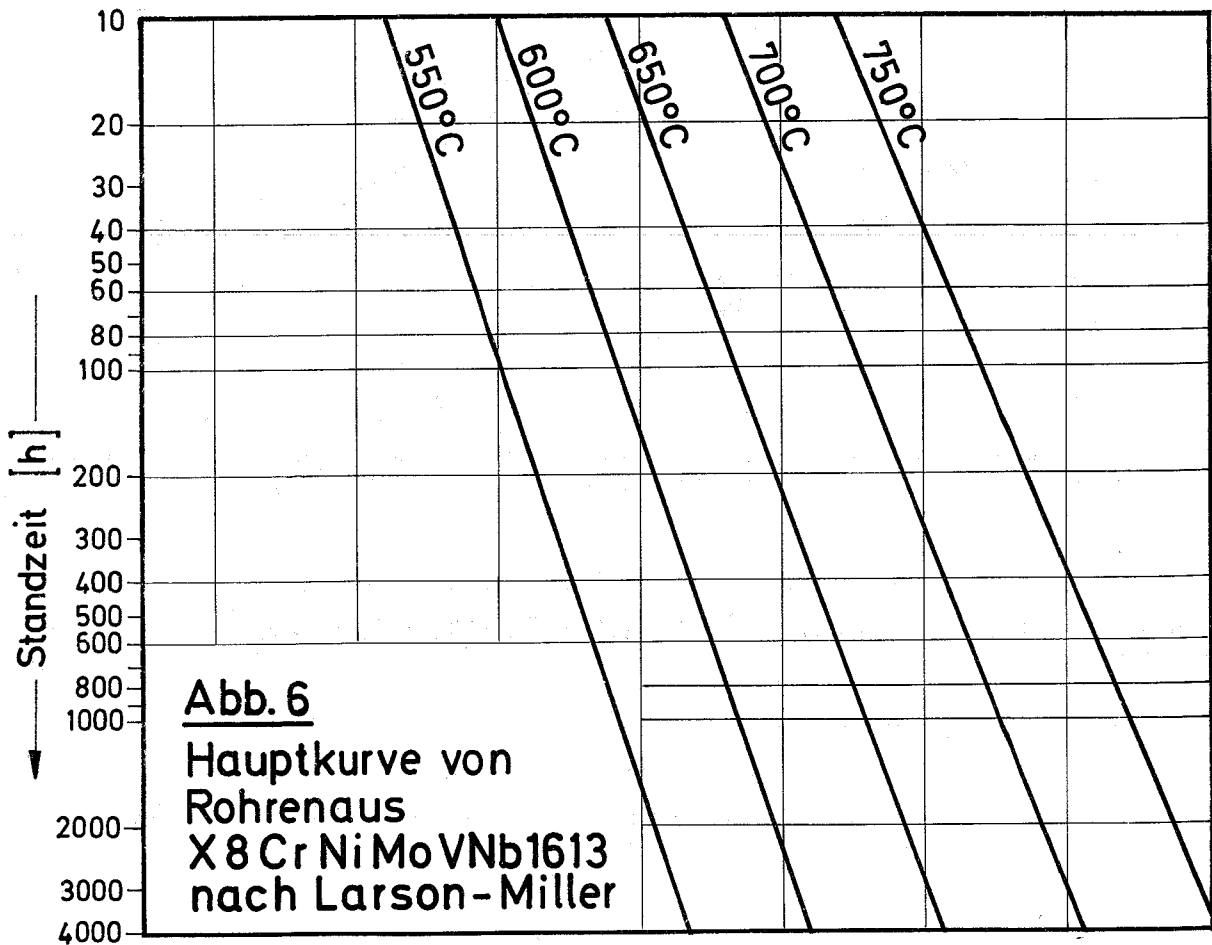
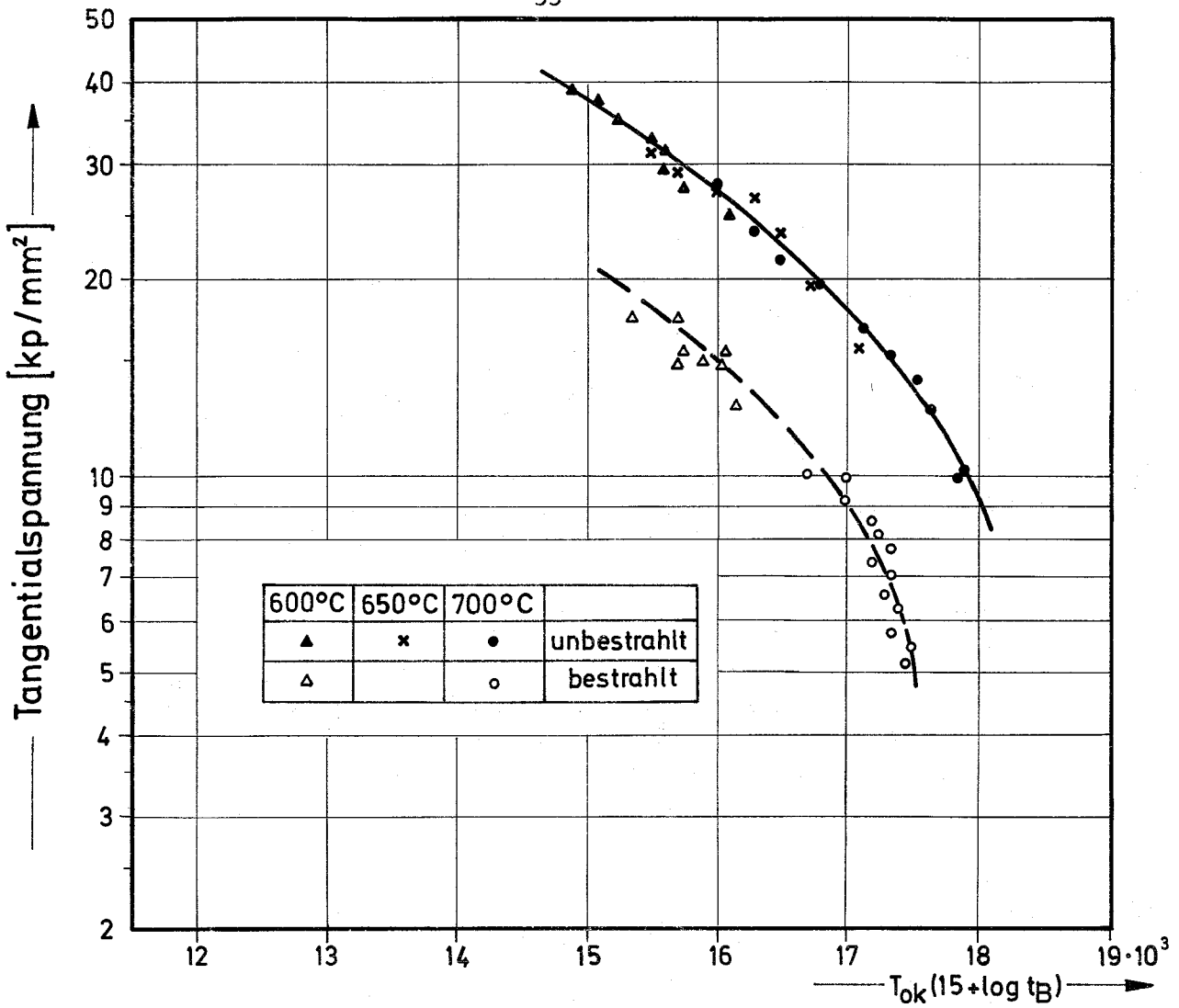


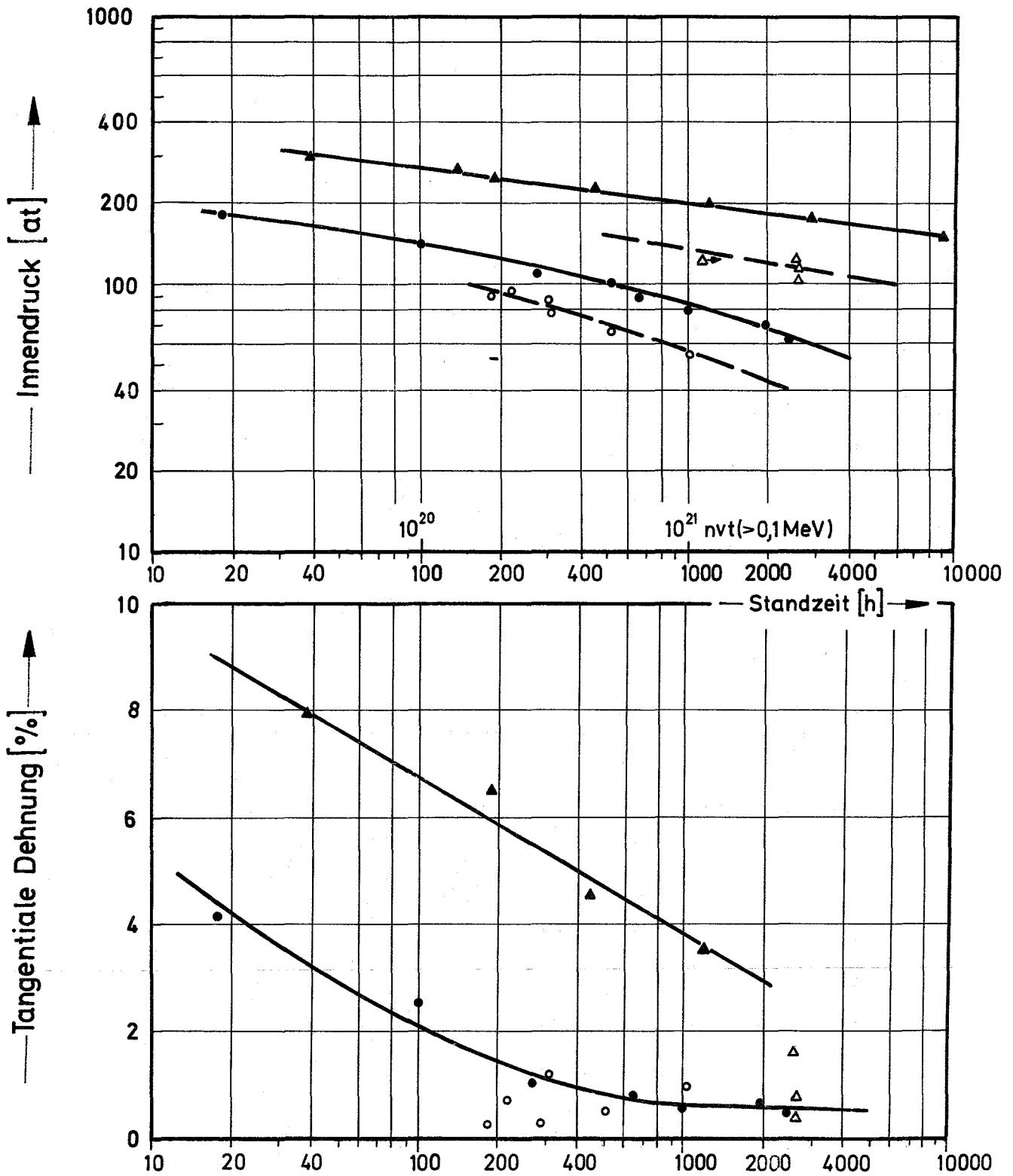
**Abb.5** Zeitstandverhalten von Rohren aus X8CrNiMoVNb1613

600°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
Wandstärke = 0,4mm



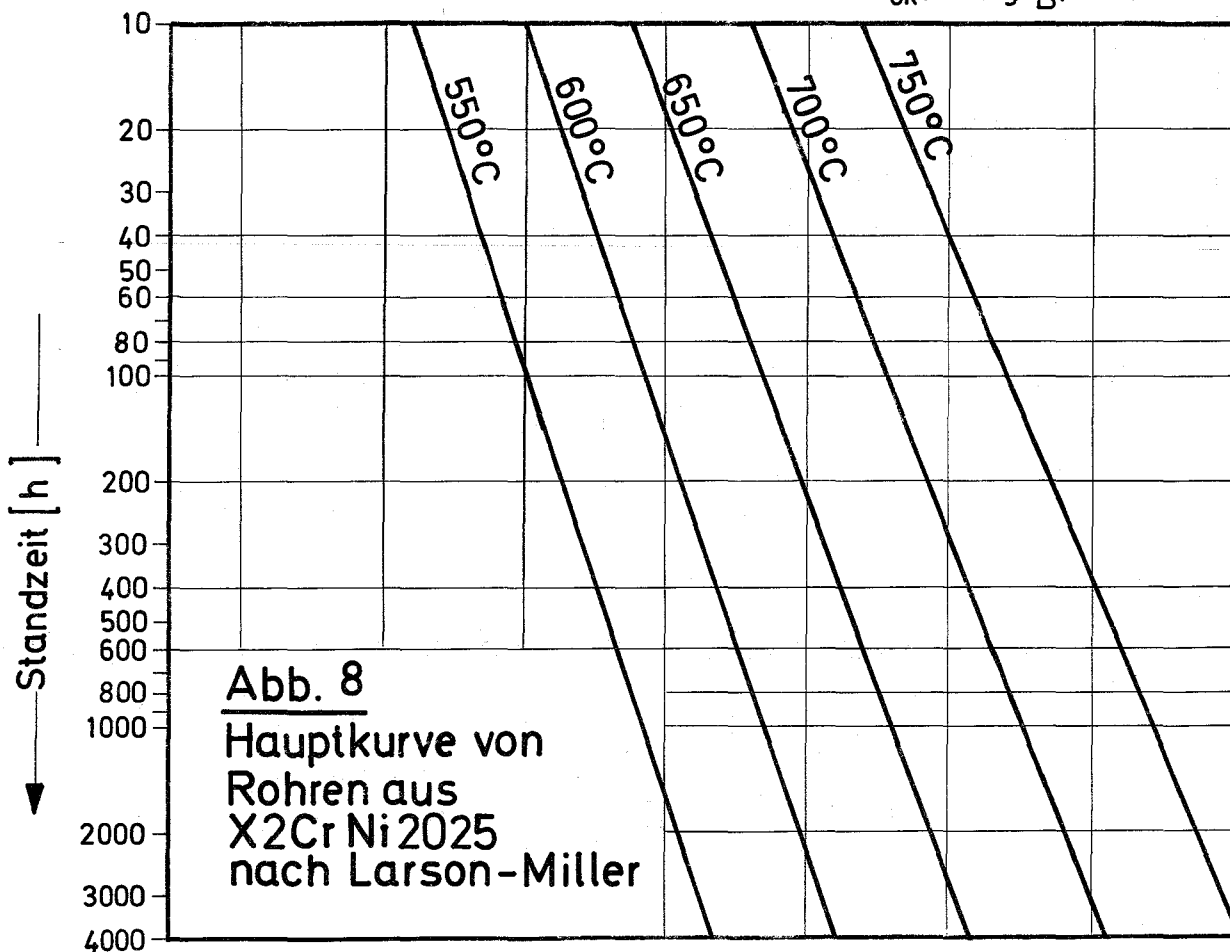
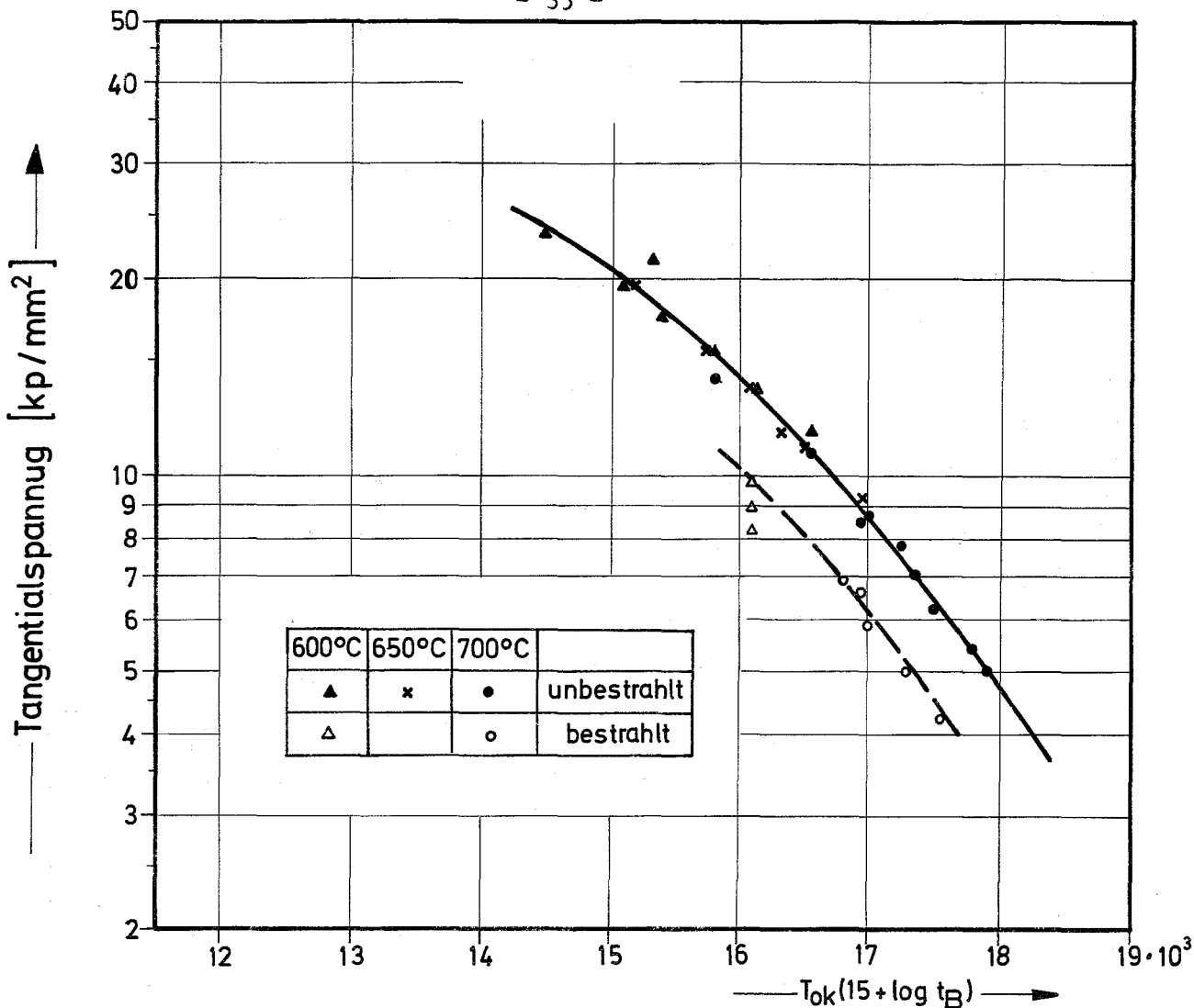


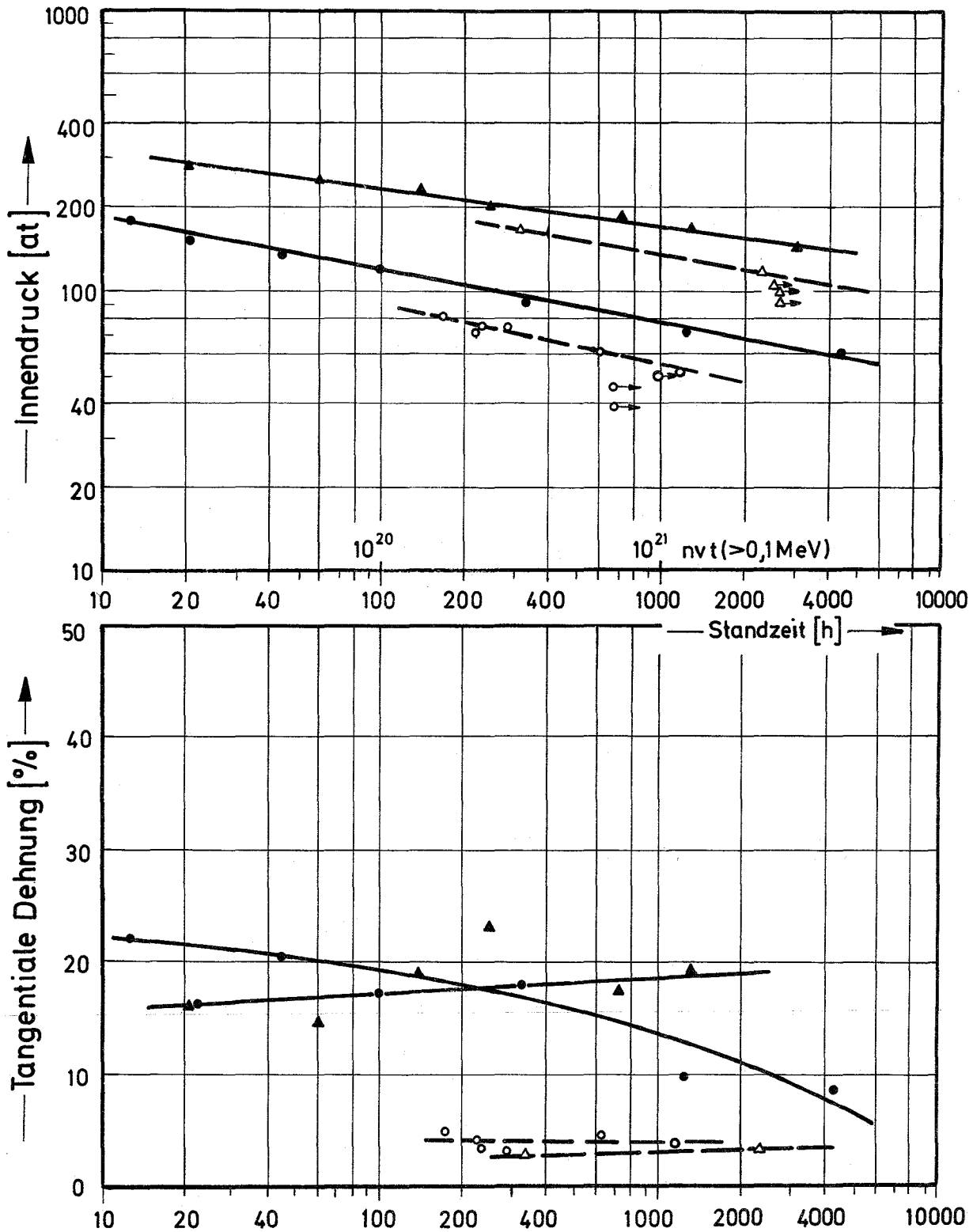


**Abb.7** Zeitstandverhalten von Rohren aus X2CrNi2025

600°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
Wandstärke = 0,4mm



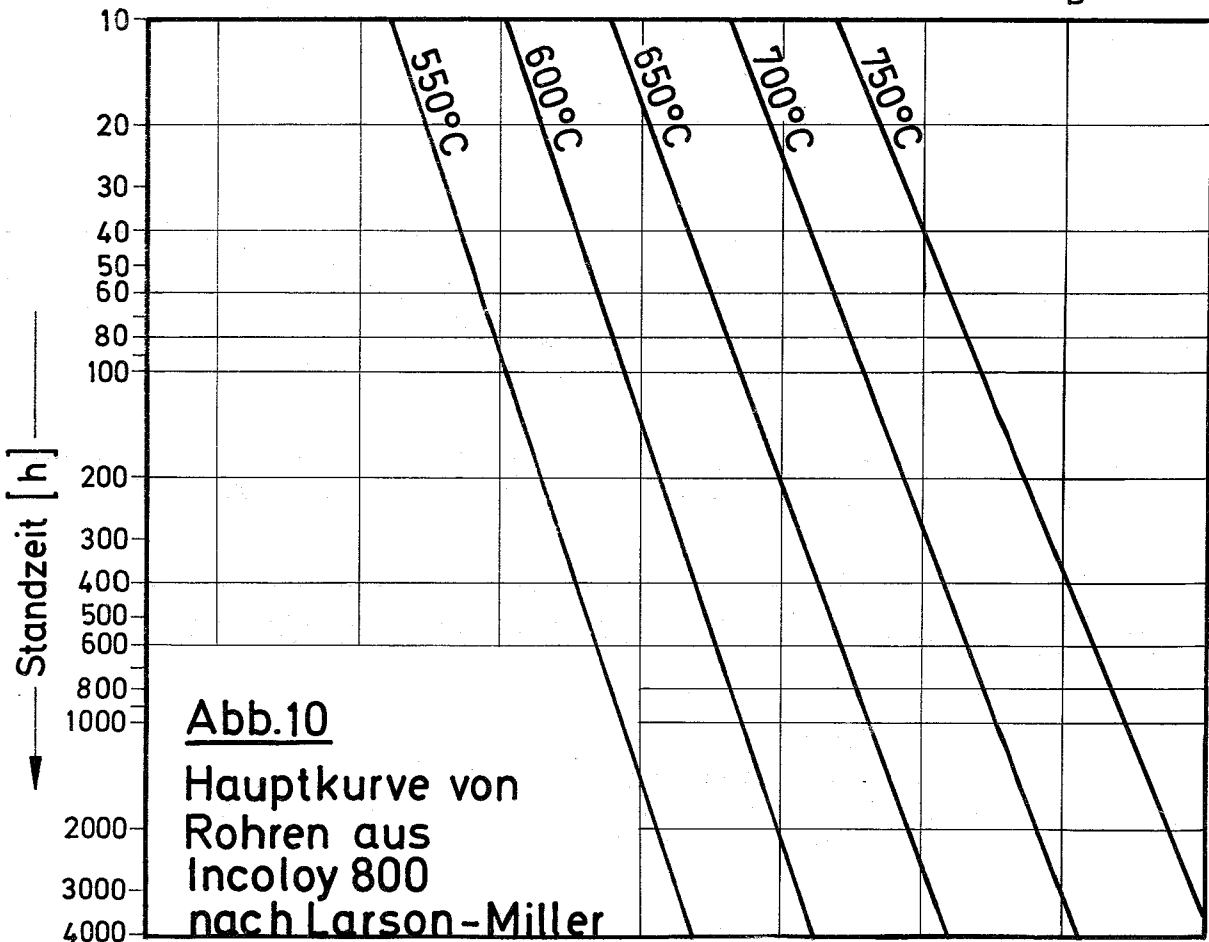
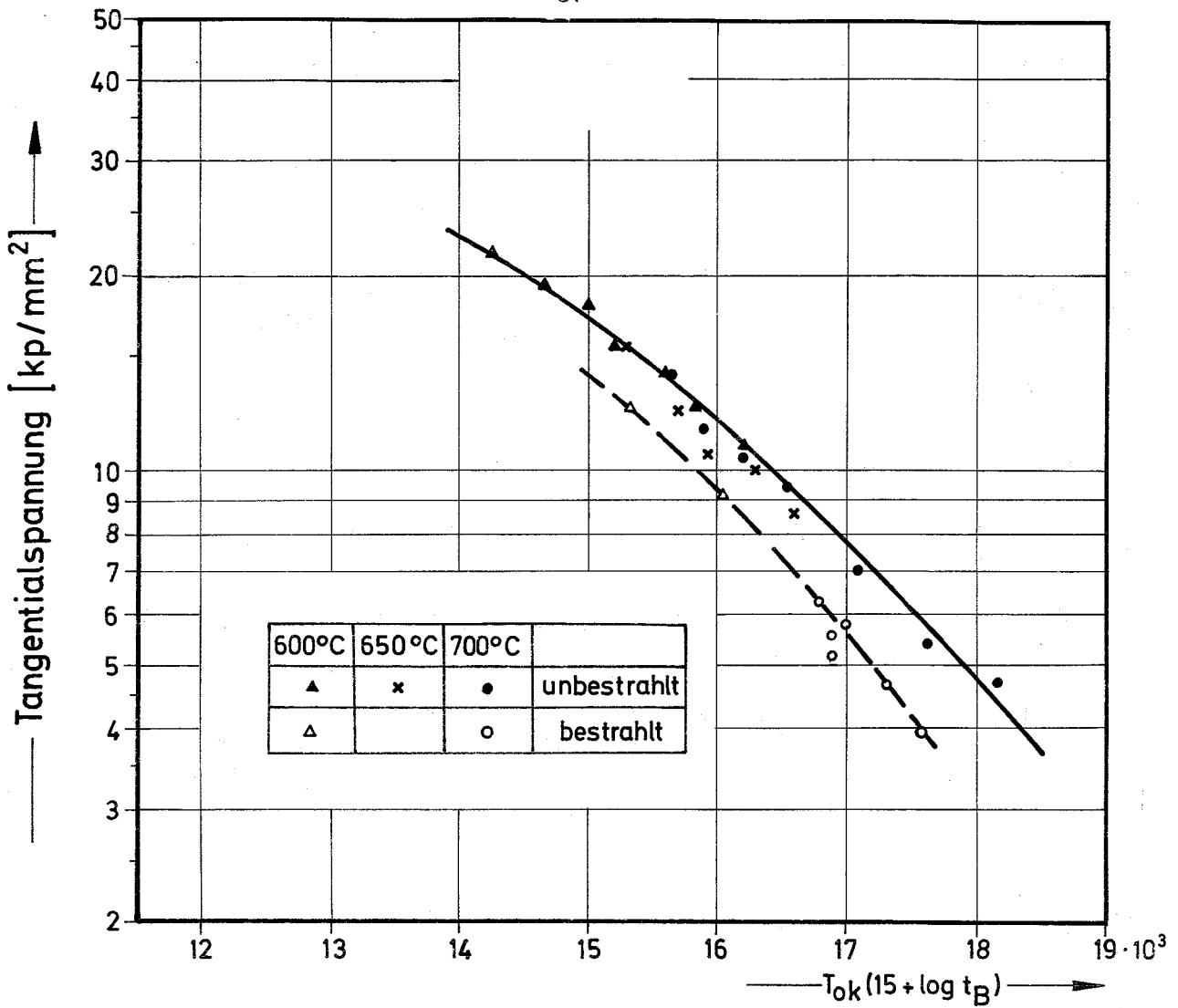


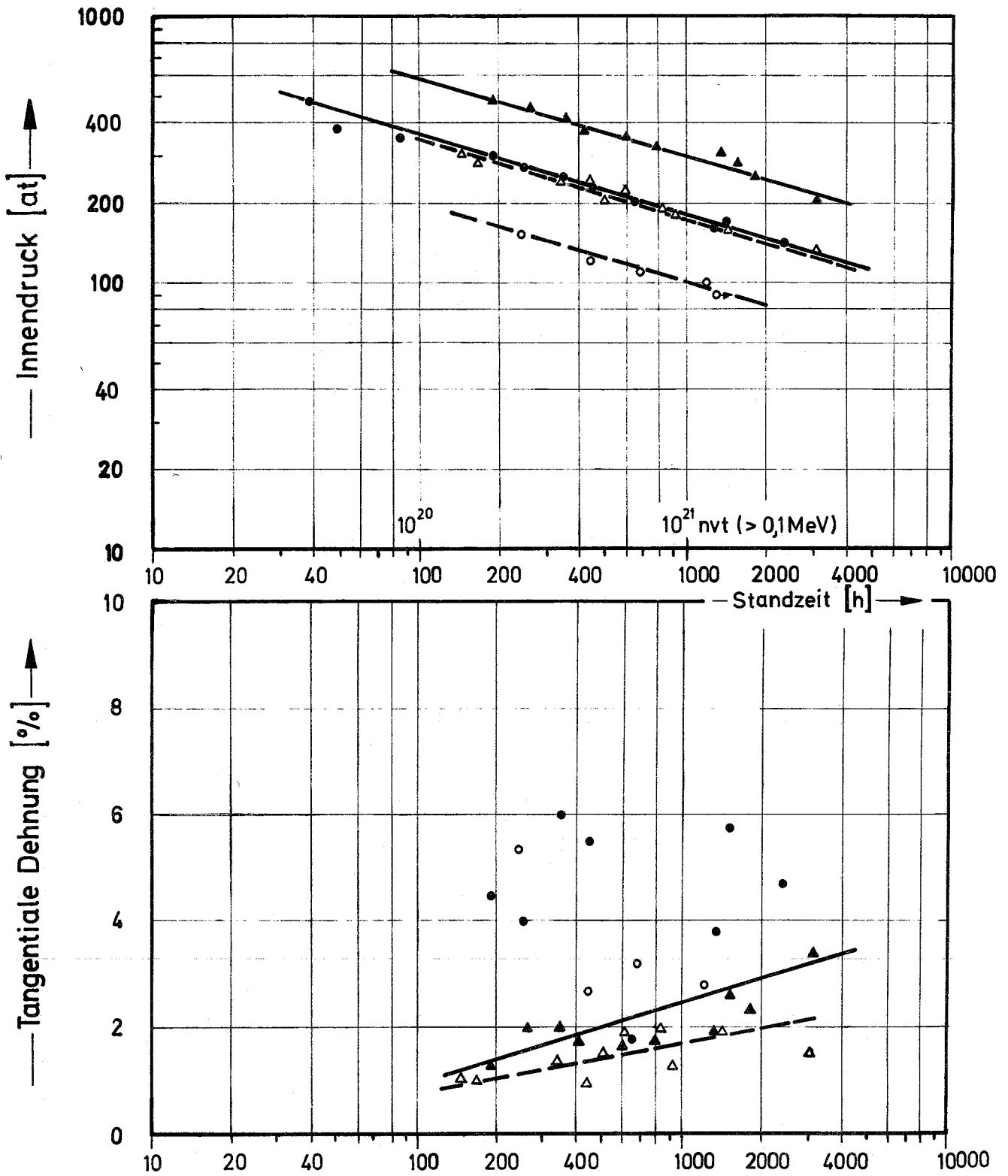
**Abb.9** Zeitstandverhalten von Rohren aus Incoloy 800

600°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm

Wandstärke = 0,4mm

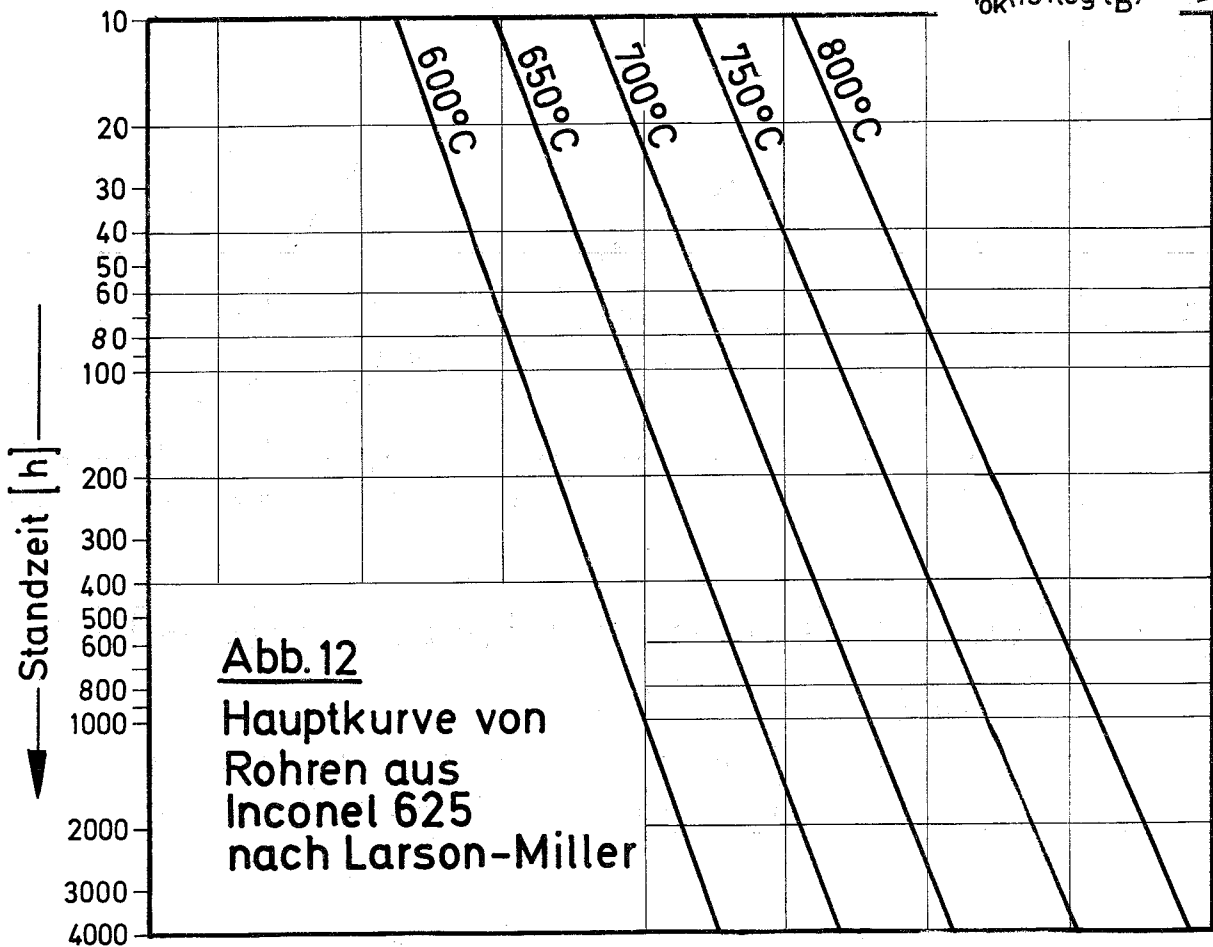
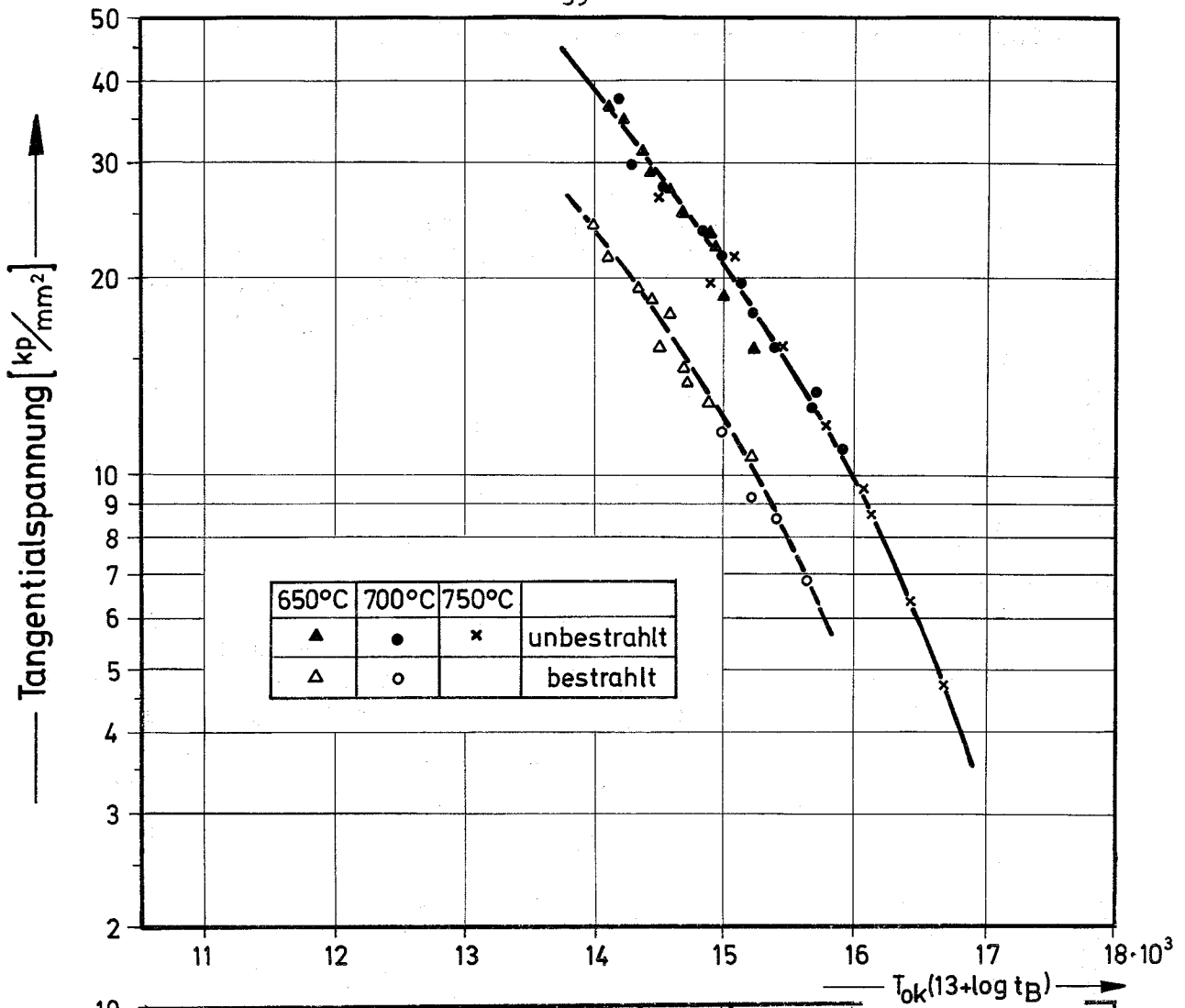




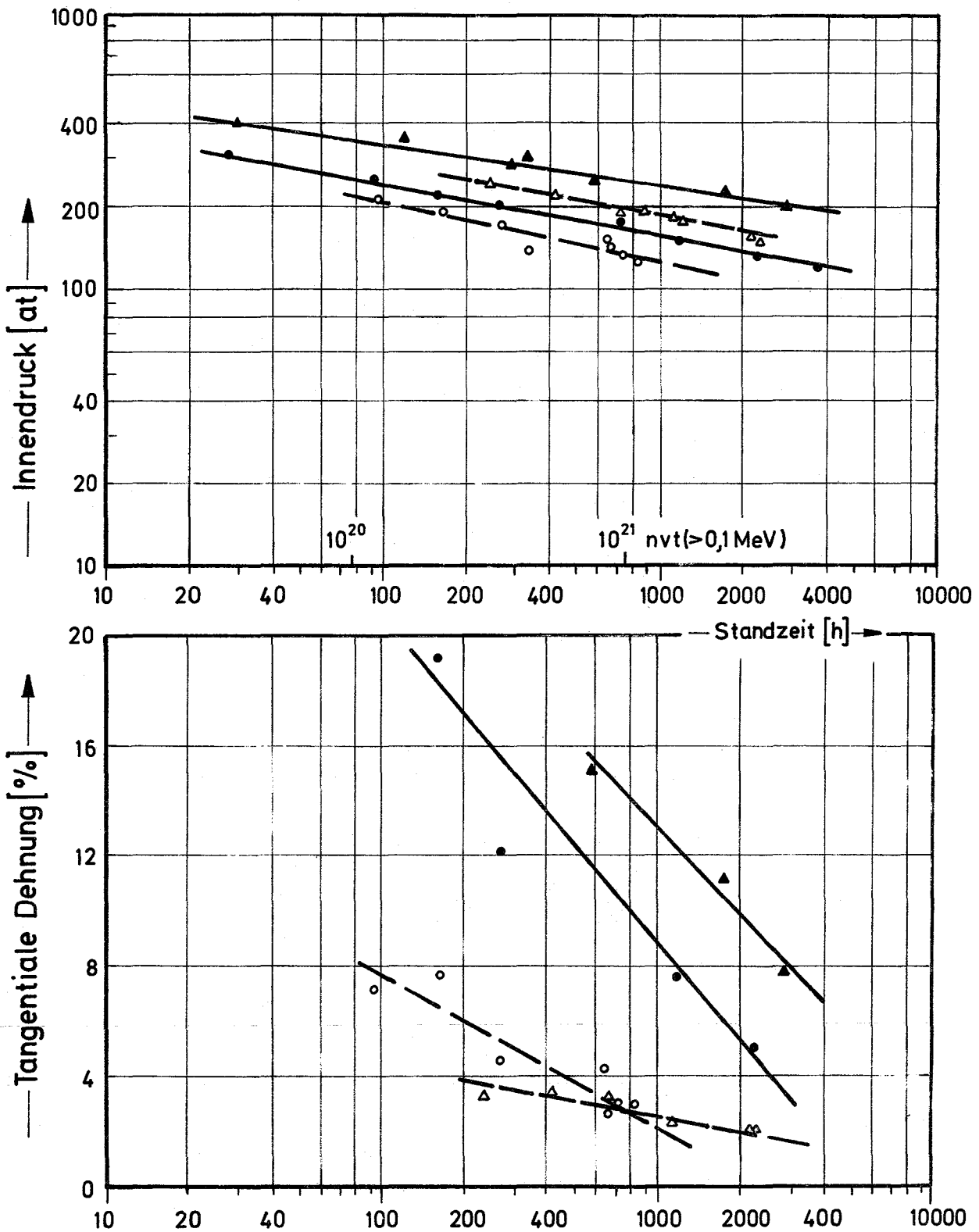
**Abb.11** Zeitstandverhalten von Rohren aus Inconel 625

650°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
Wandstärke = 0,4mm



**Abb. 12**  
 Hauptkurve von  
 Rohren aus  
 Inconel 625  
 nach Larson-Miller

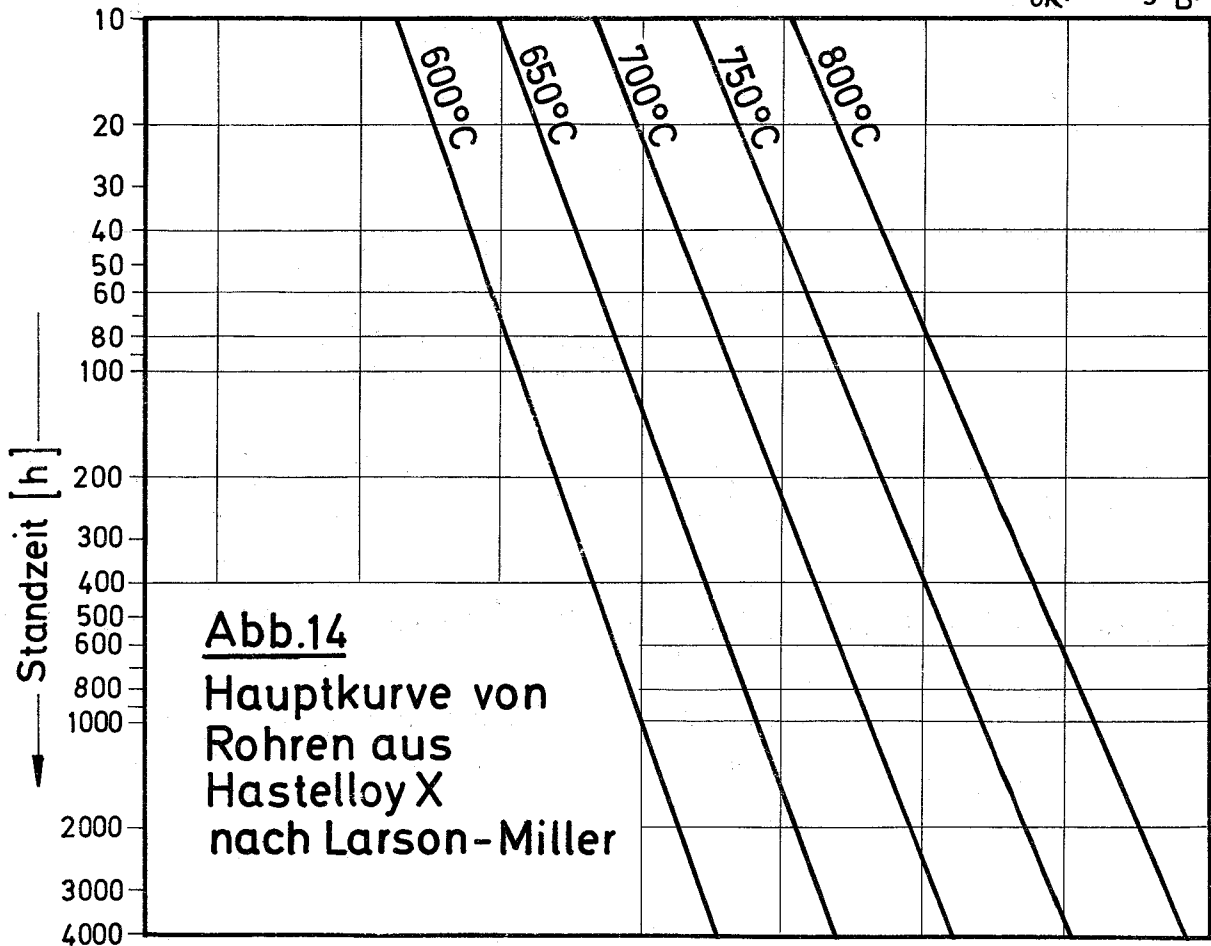
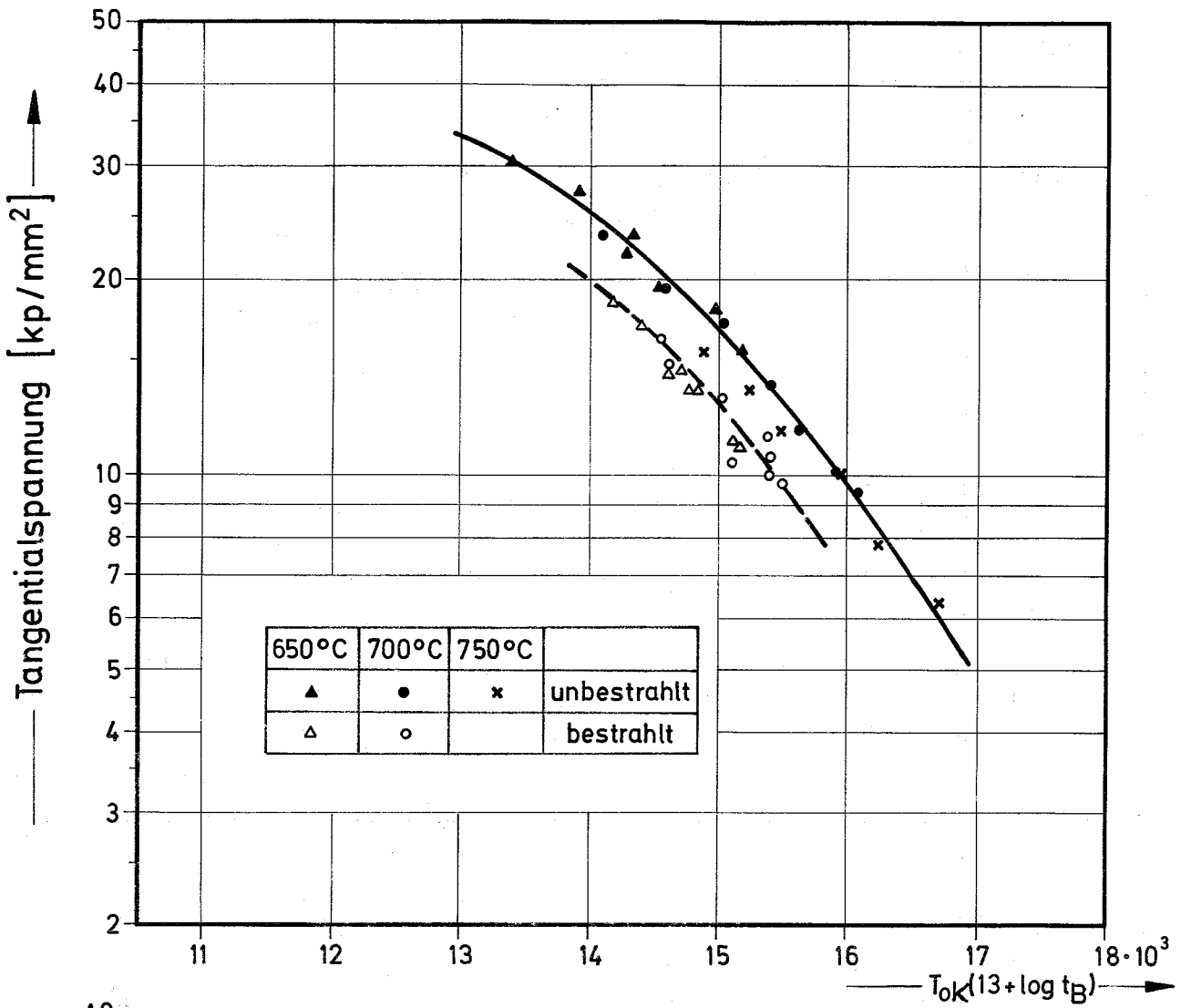


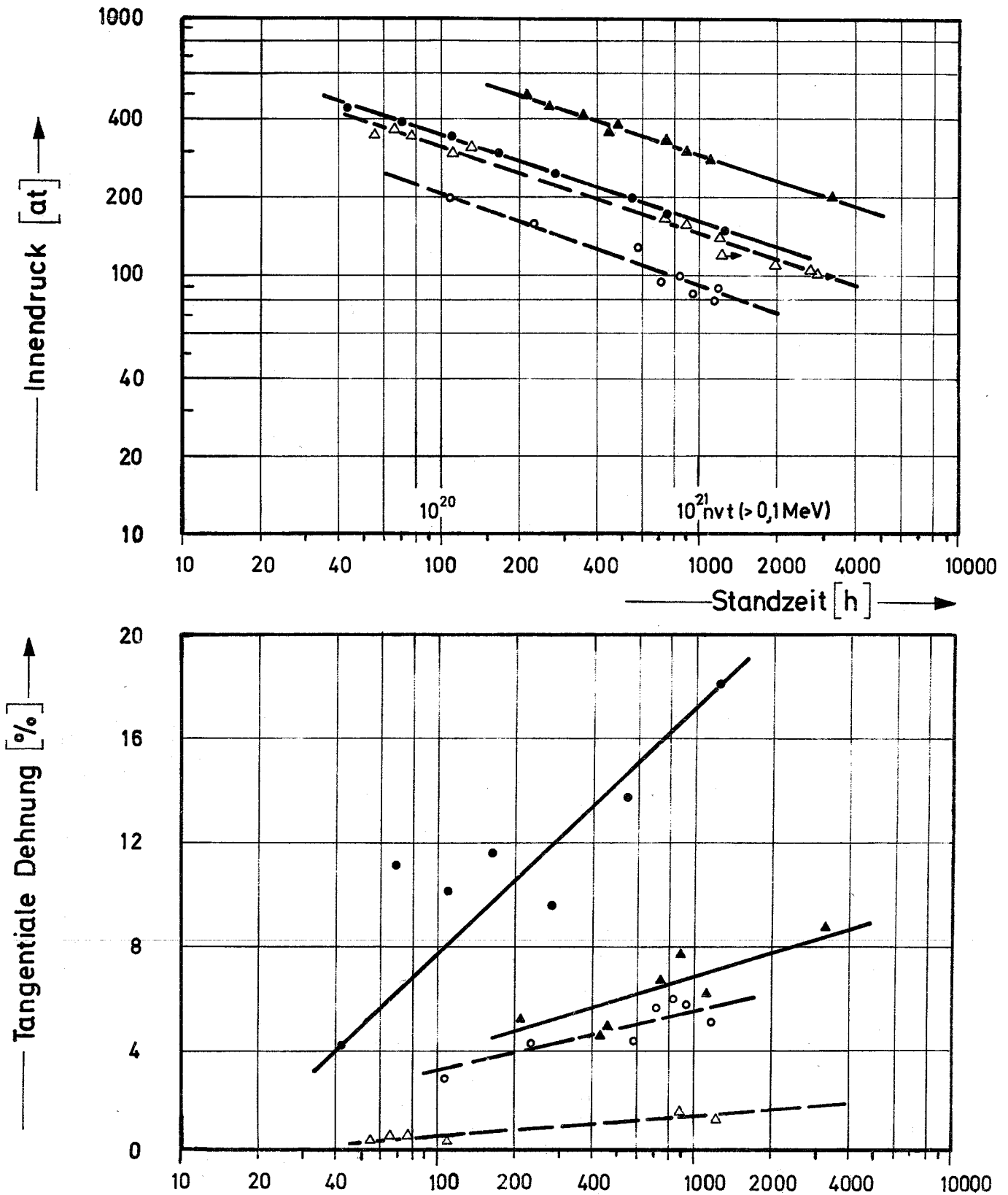
**Abb.13** Zeitstandverhalten von Rohren aus Hastelloy X

650°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
Wandstärke = 0,4 mm



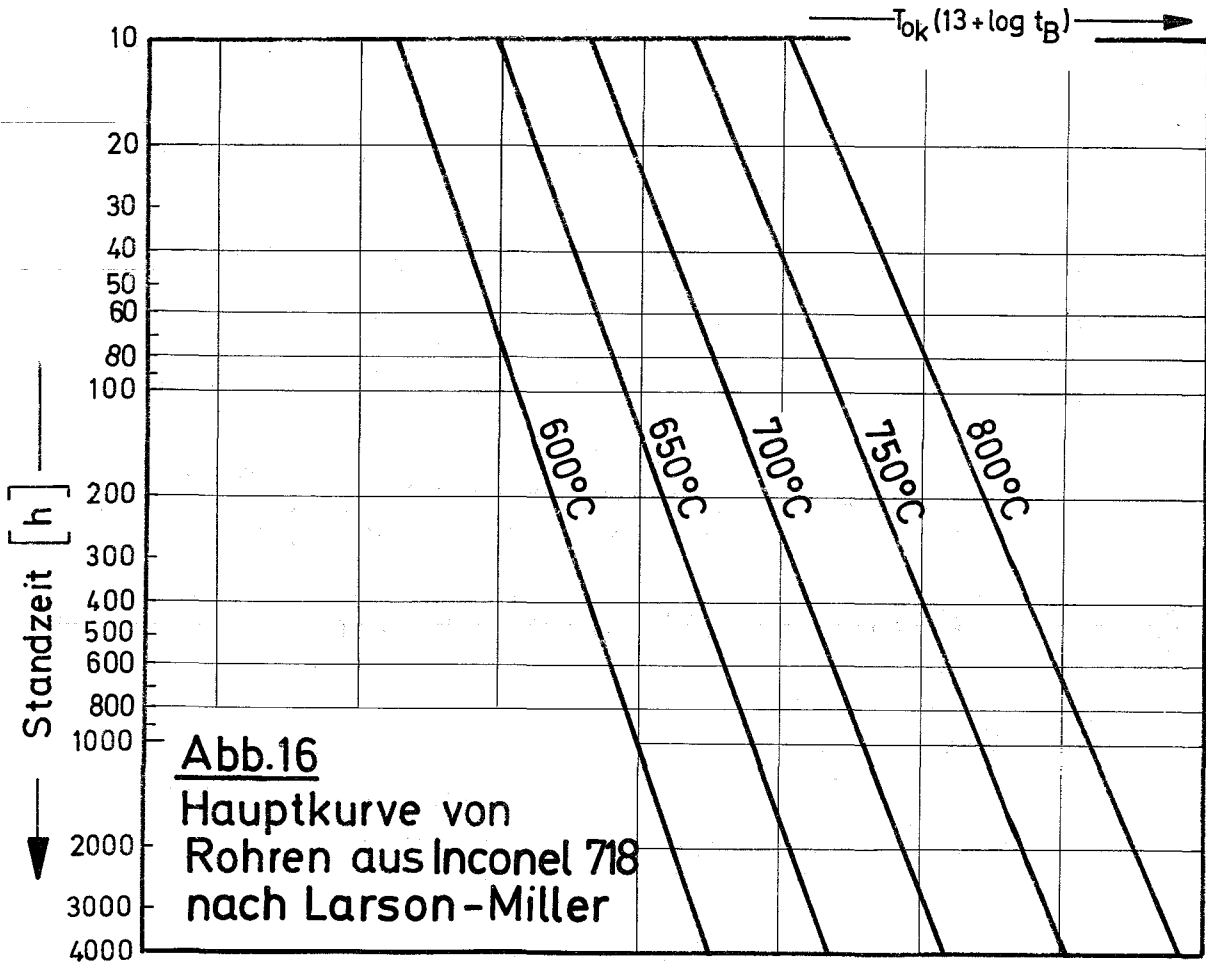
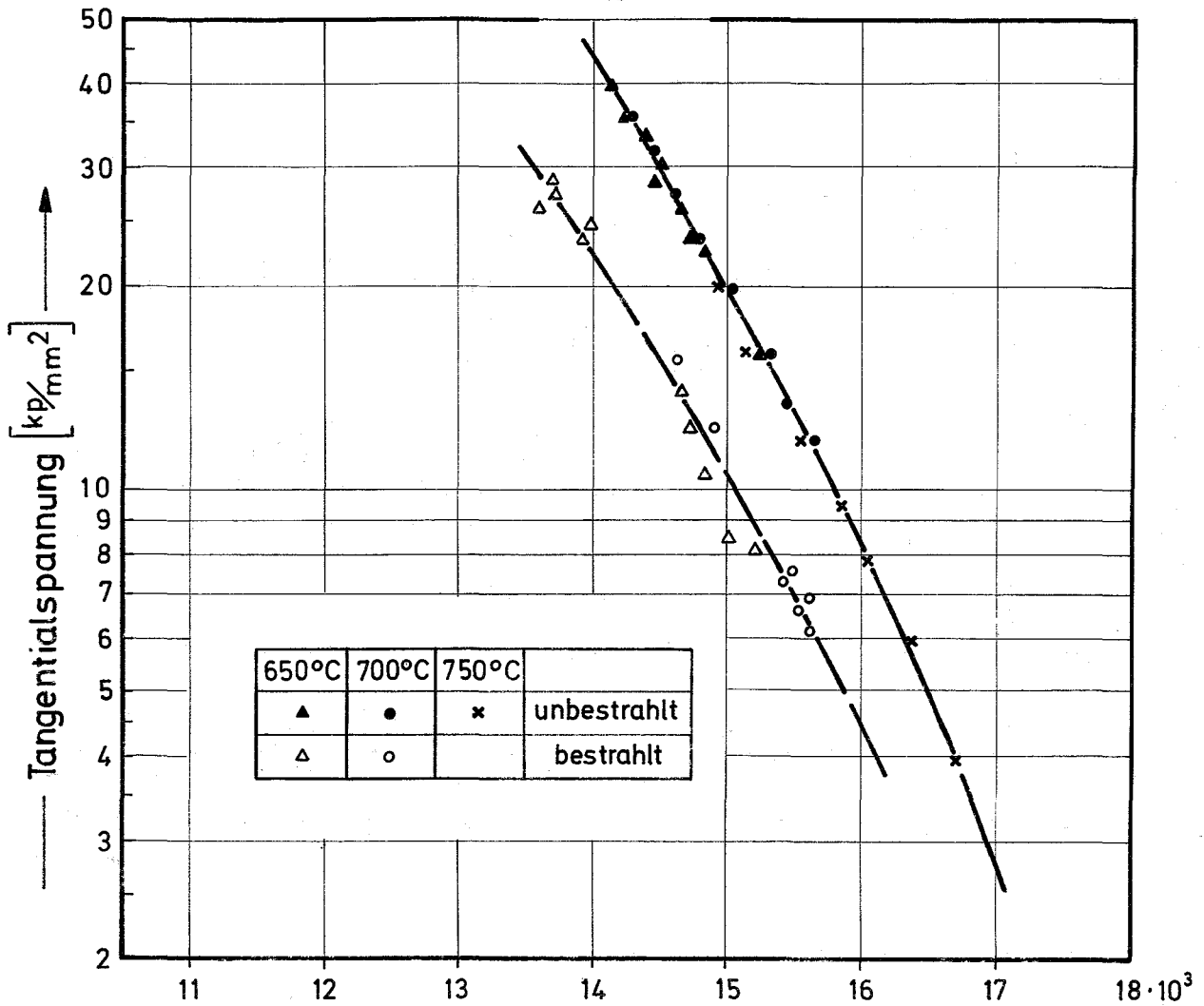


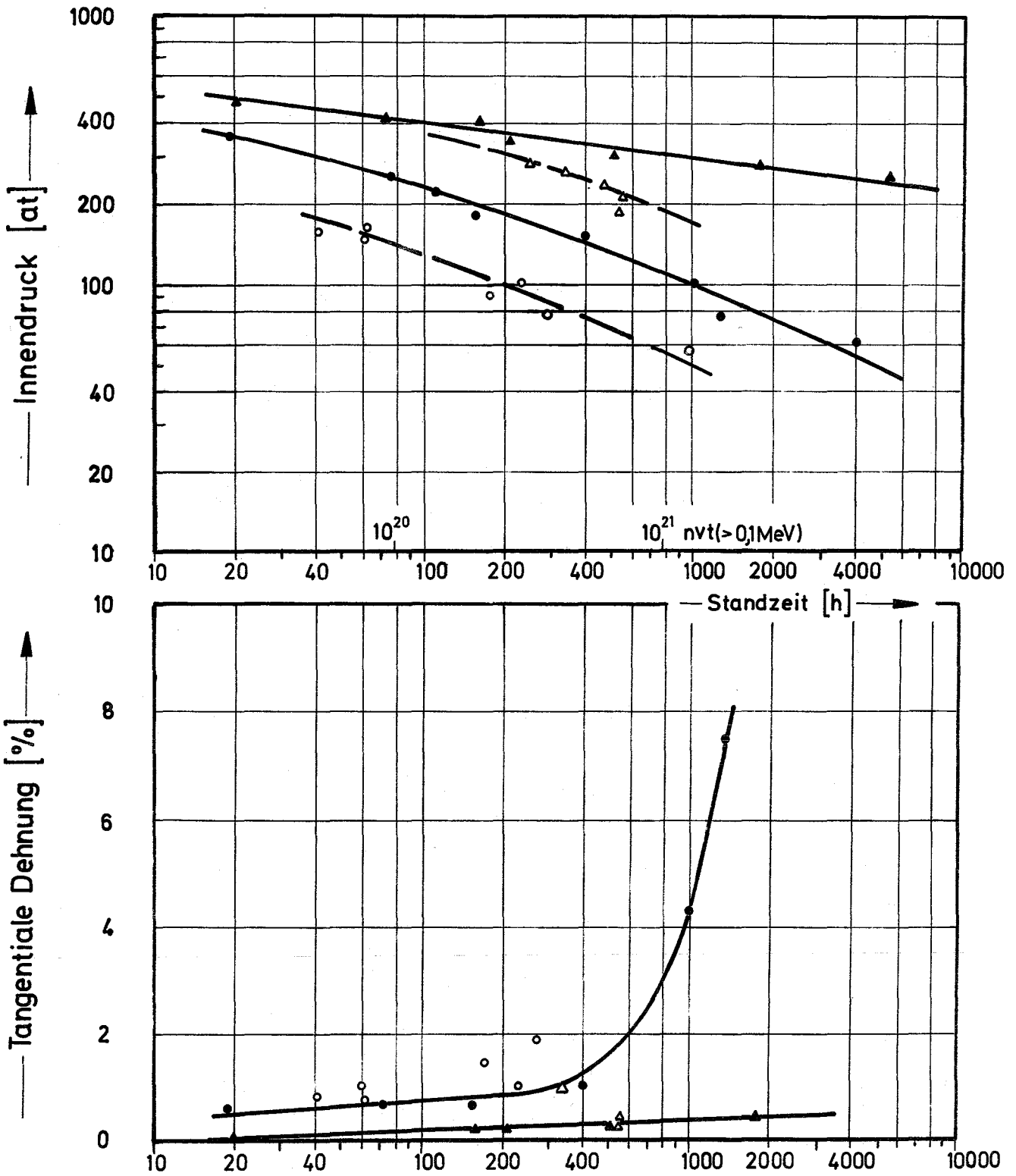


**Abb.15** Zeitstandverhalten von Rohren aus Inconel 718

650°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
 Wandstärke = 0,4 mm

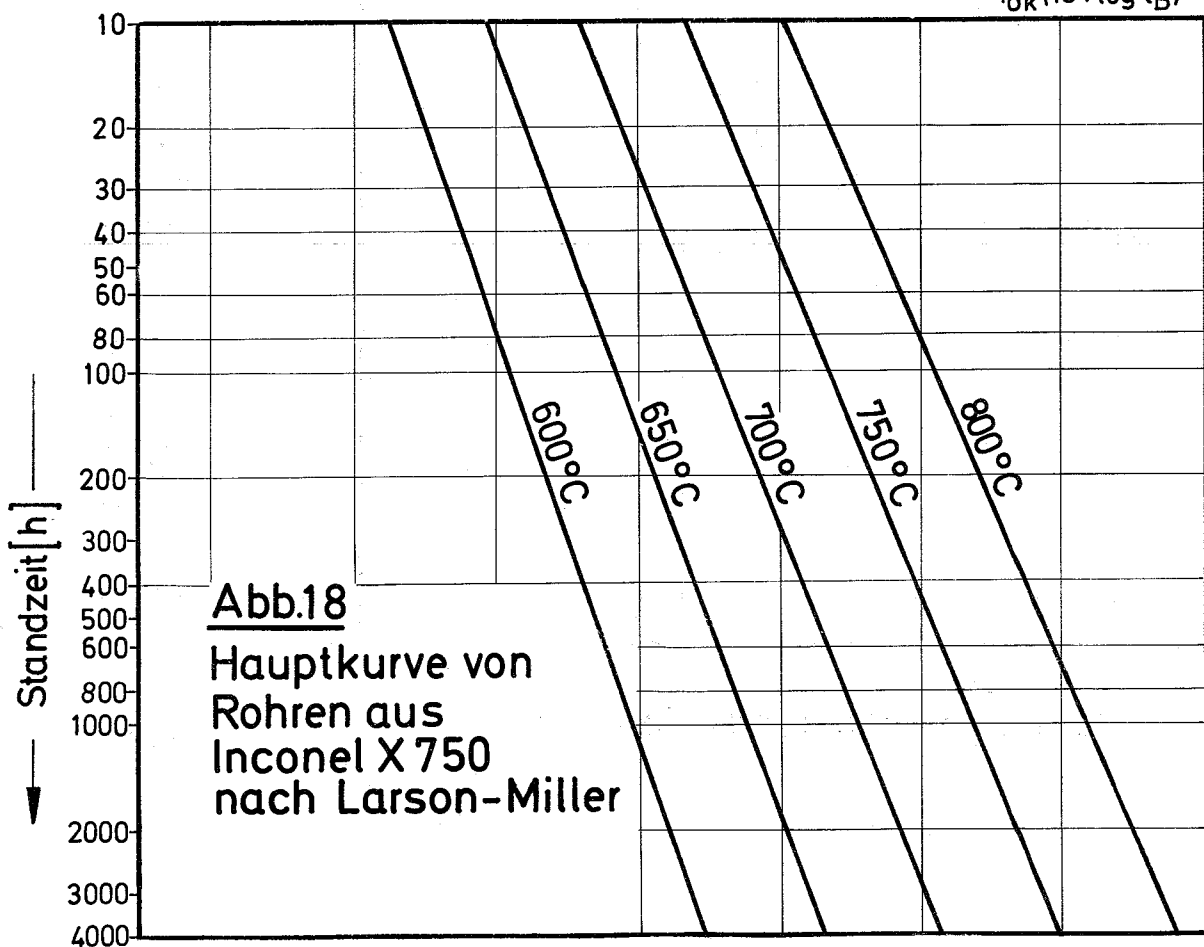
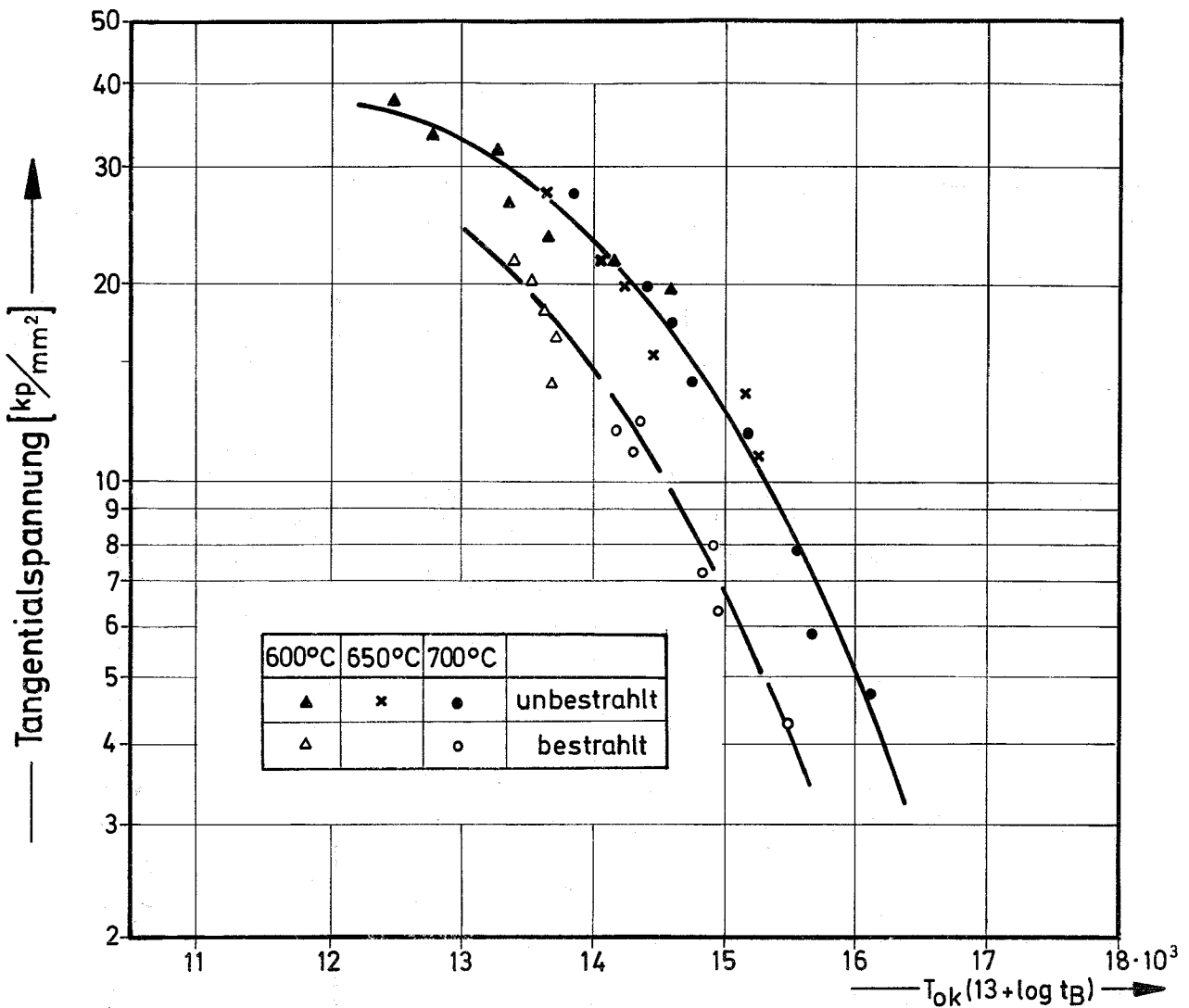


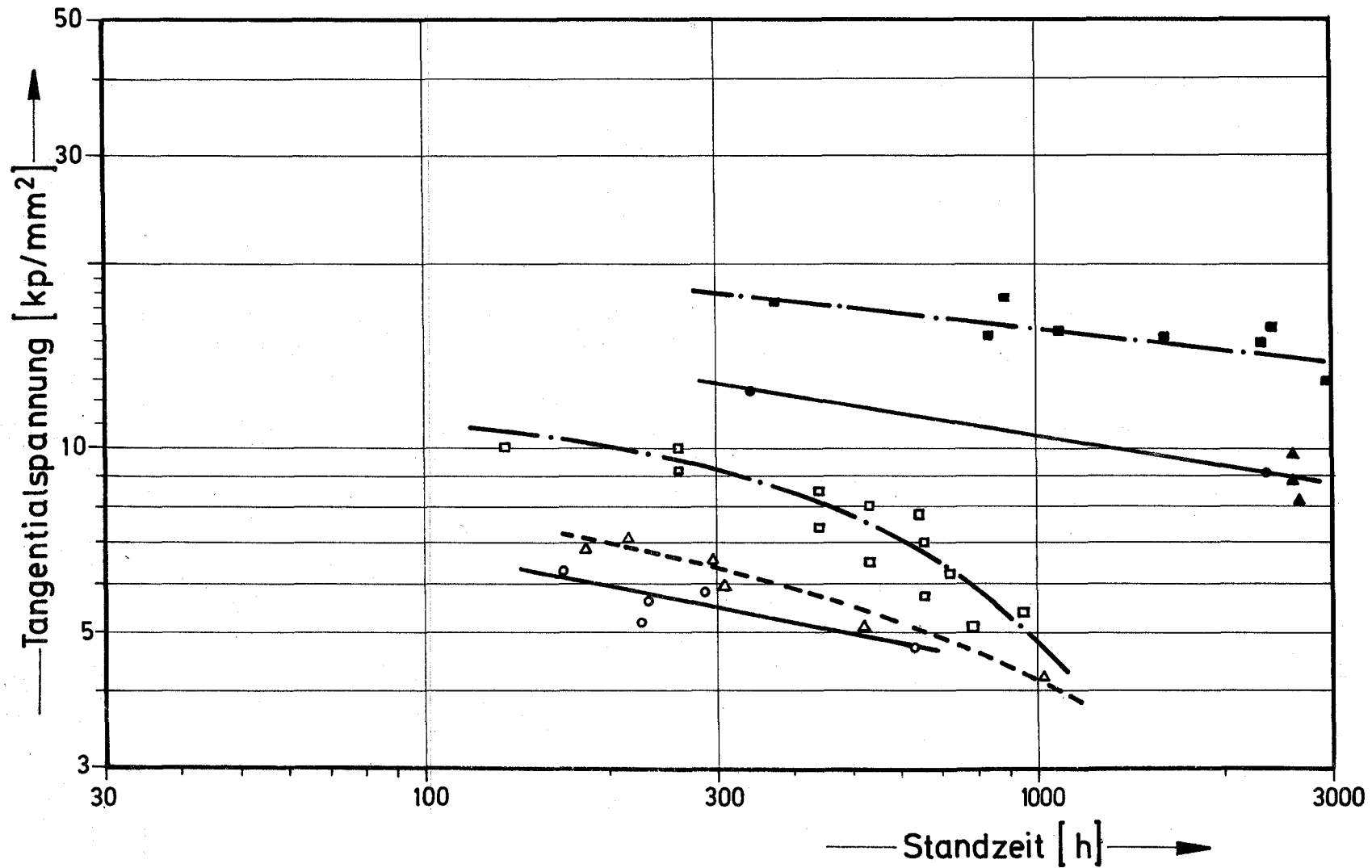


**Abb.17** Zeitstandverhalten von Rohren aus Inconel X750

600°C	700°C	
▲	●	unbestrahlt
△	○	bestrahlt

Außendurchmesser = 7mm  
 Wandstärke = 0,4mm





**Abb.19** Vergleich der Standzeiten von bestrahlten austenitischen Stählen bei 600°C und 700°C

600°C	700°C	
■	□	X8CrNiMoVNb1613
●	○	Incoloy 800
▲	△	X2CrNi2025

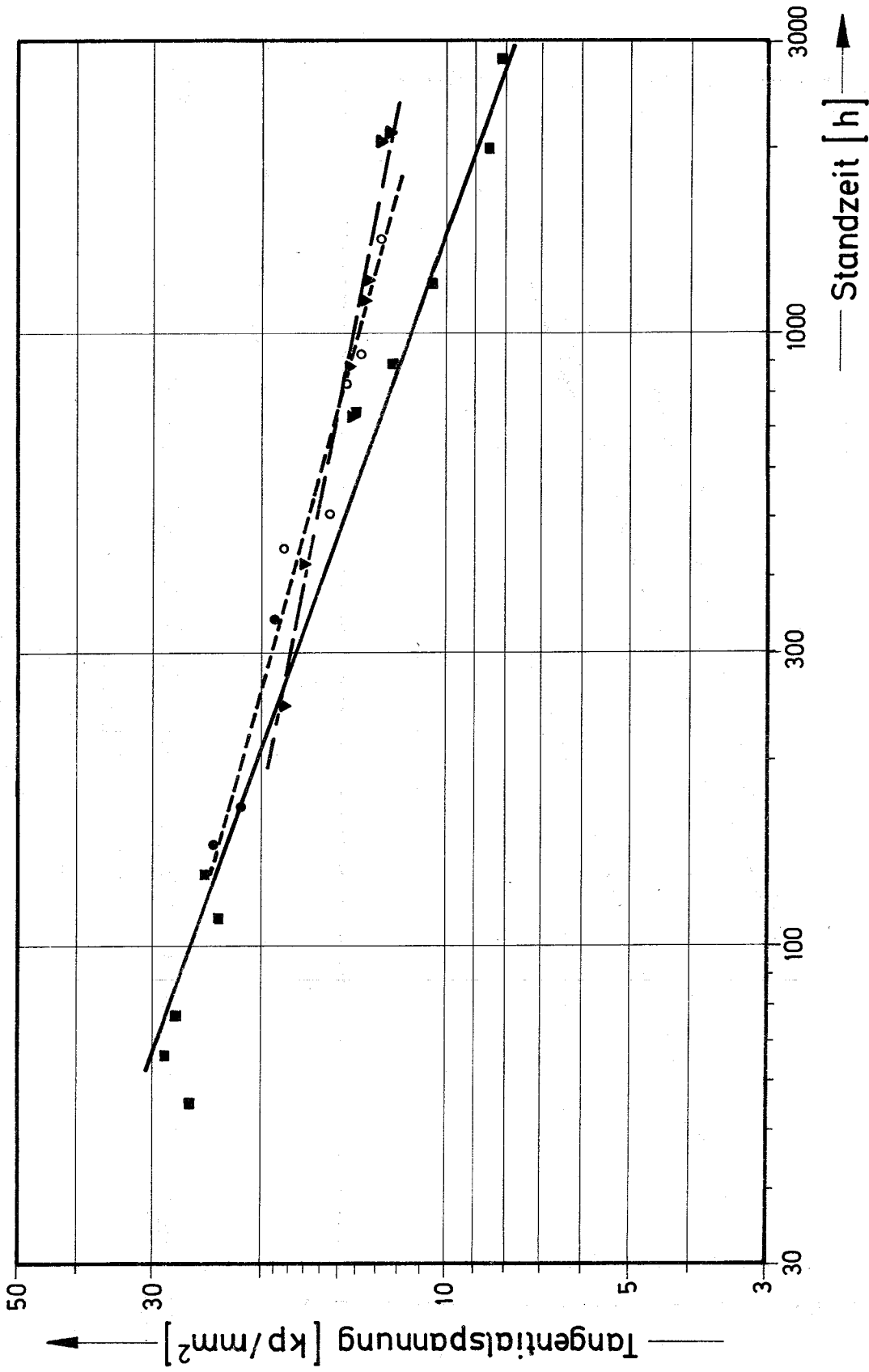


Abb.20 Vergleich der Standzeiten von bestrahlten Ni-Legierungen bei 650°C

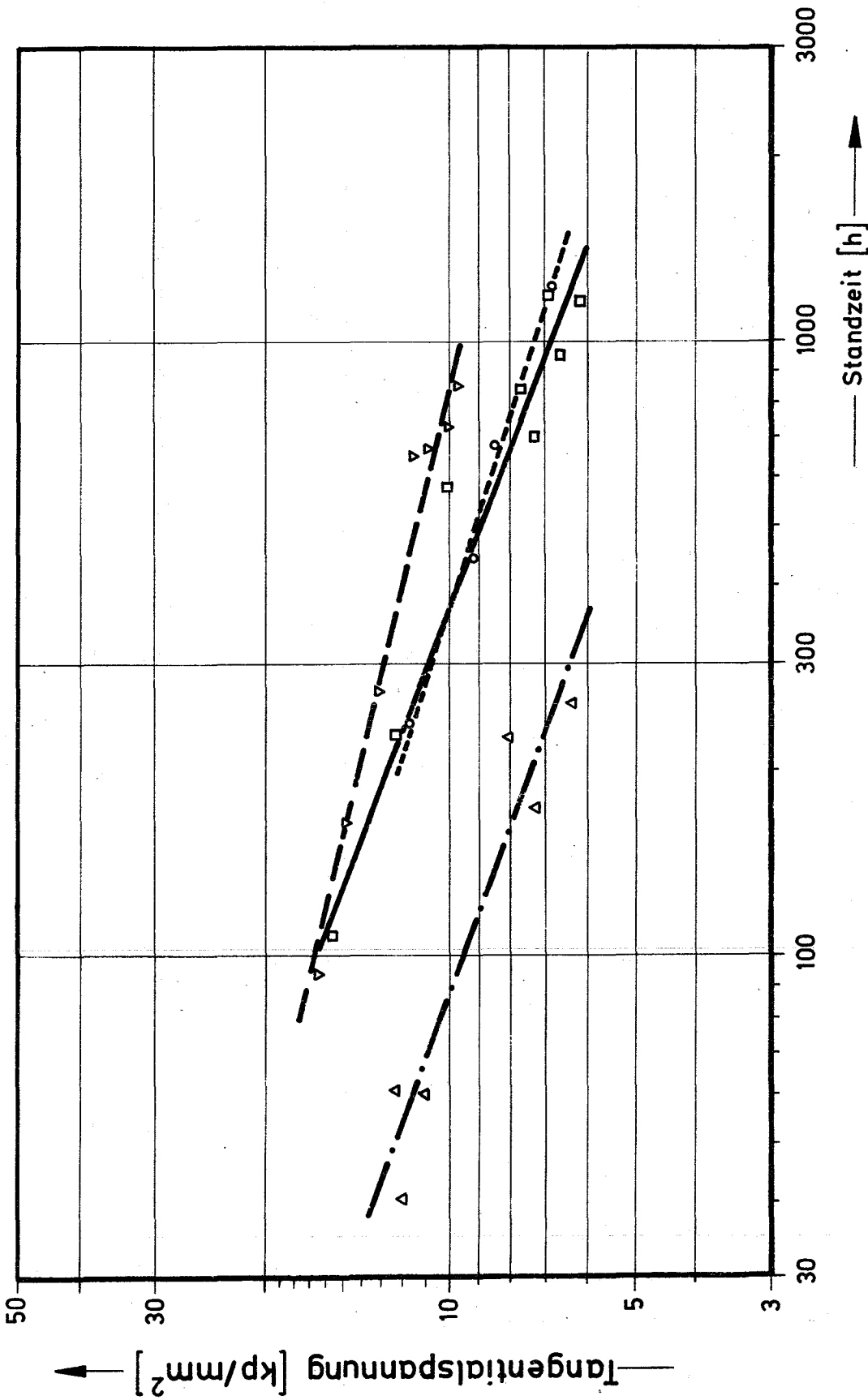
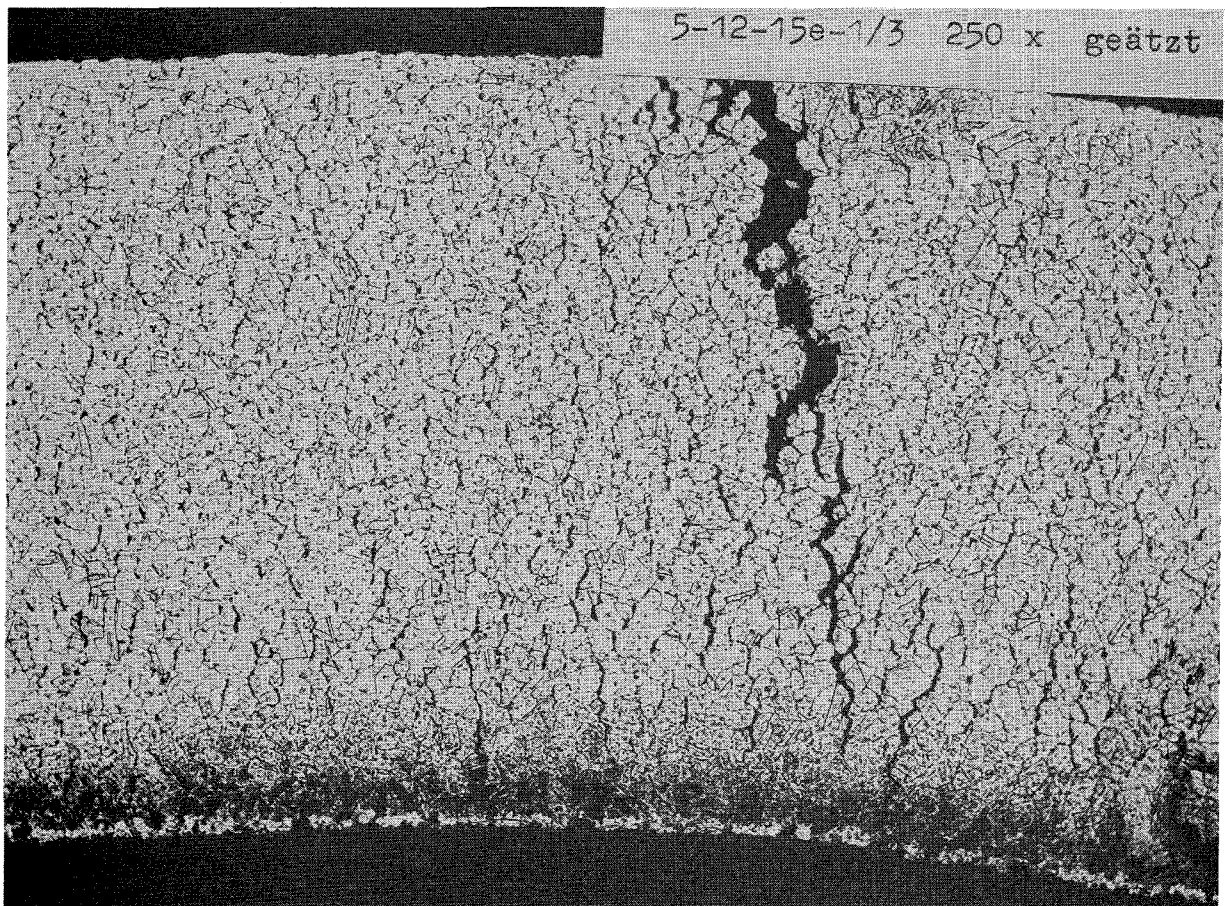
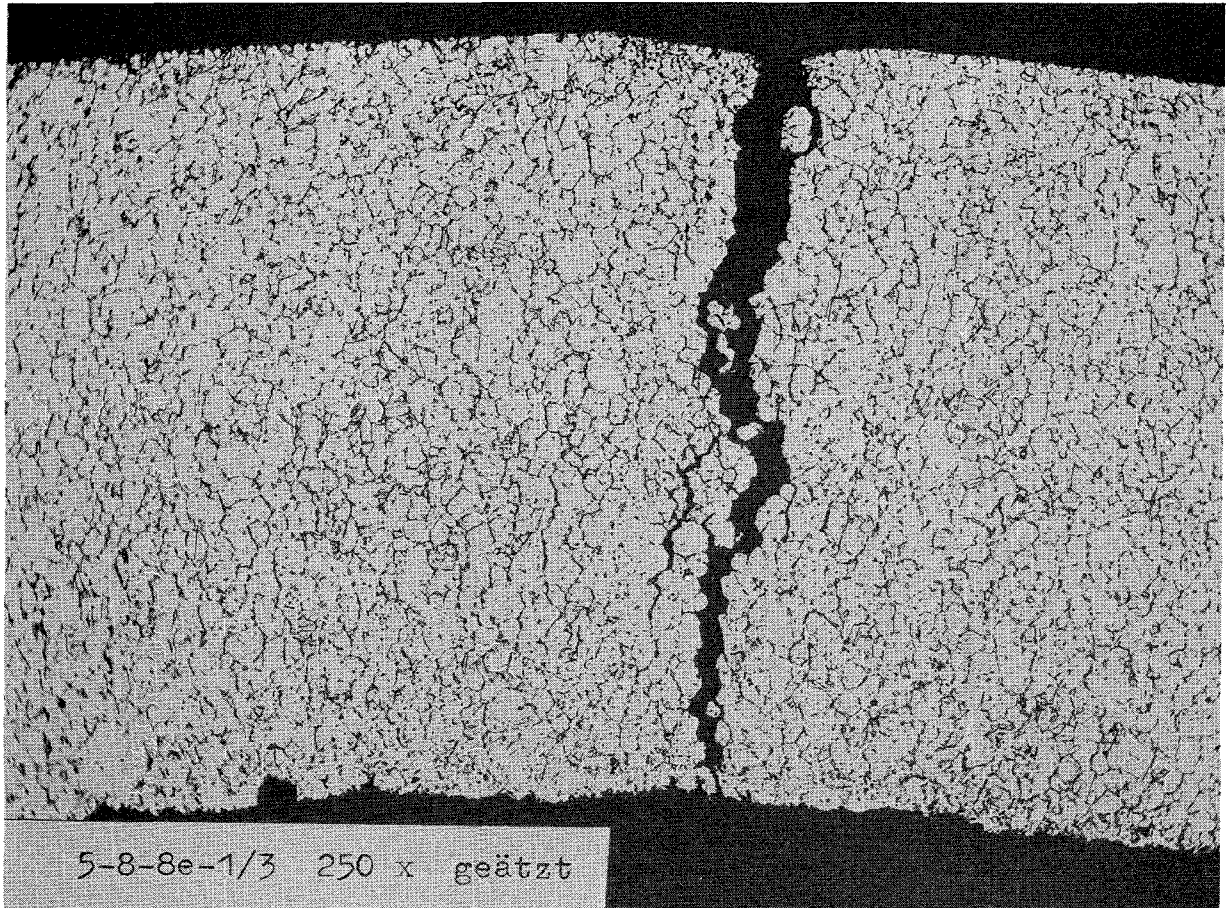


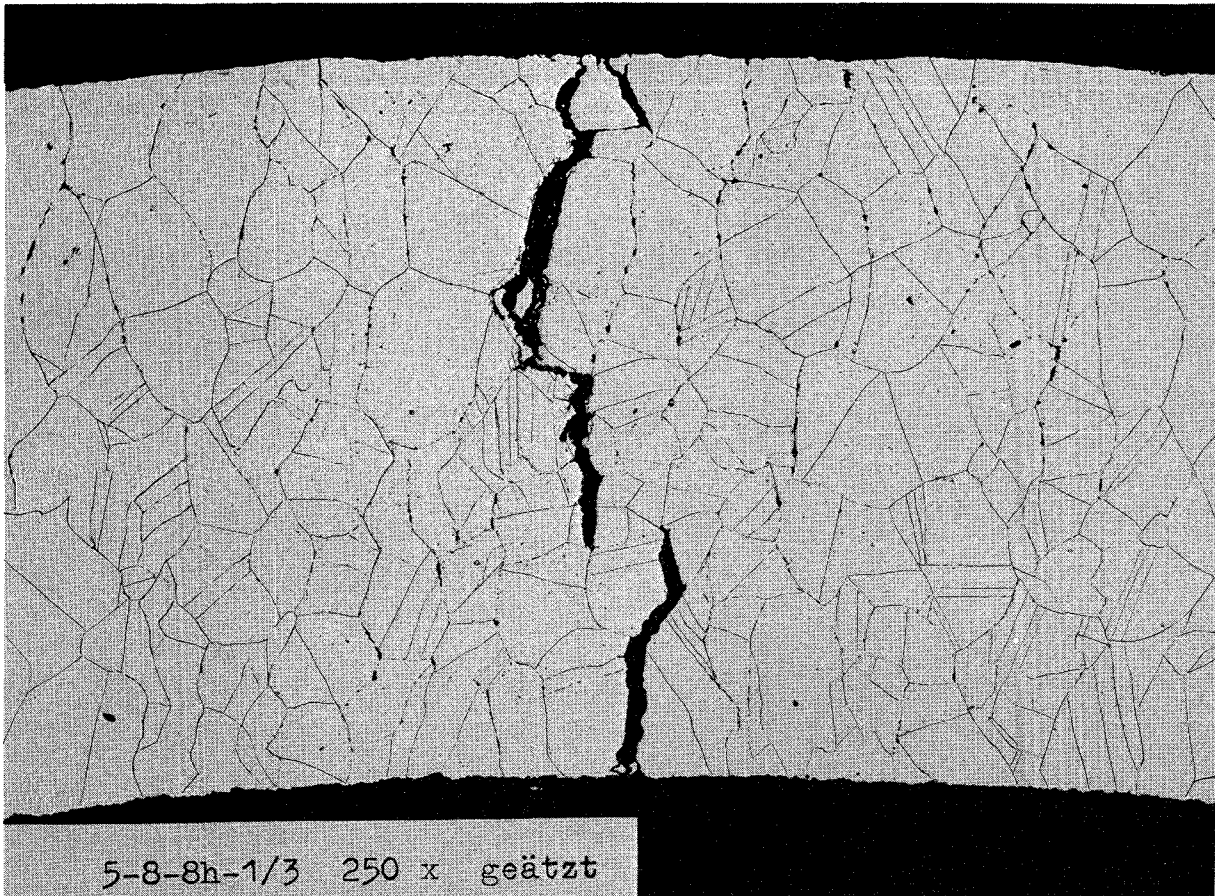
Abb.21 Vergleich der Standzeiten von bestrahlten Ni-Legierungen bei 700°C

▽	Hastelloy X
□	Inconel 718
○	Inconel 625
△	Inconel X 750

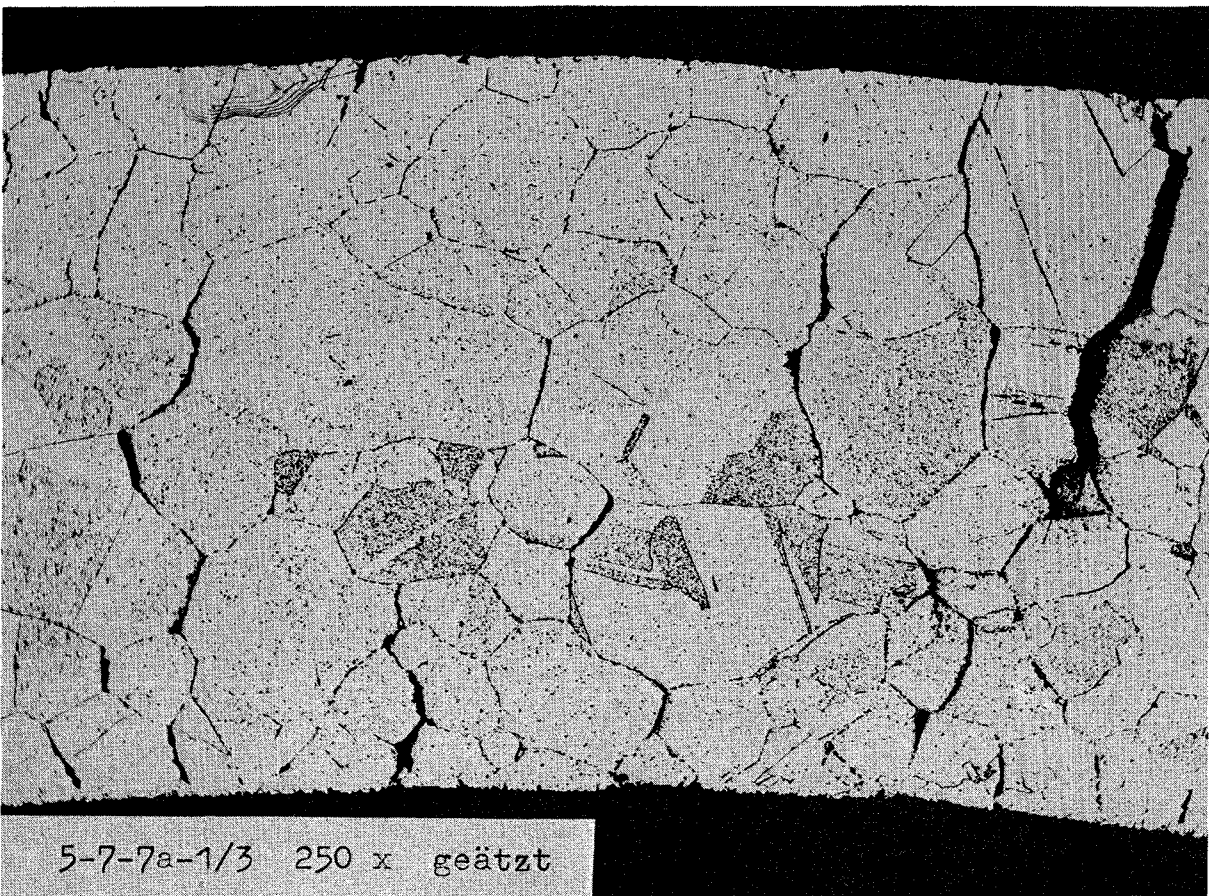




**Abb. 22** oben: X8CrNiMoVNb 1613; 700°C; 85 at; 535 h; 1,43 %  
unten: X8CrNiMoV Nb 1613; 700°C; 72 at; 942 h; 2,56%



**Abb. 23** X2CrNi 2025; 700 °C; 66 at; 539 h; 0,47%



**Abb. 24** Incoloy 800; 700 °C; 60 at; 630 h; 4,4%



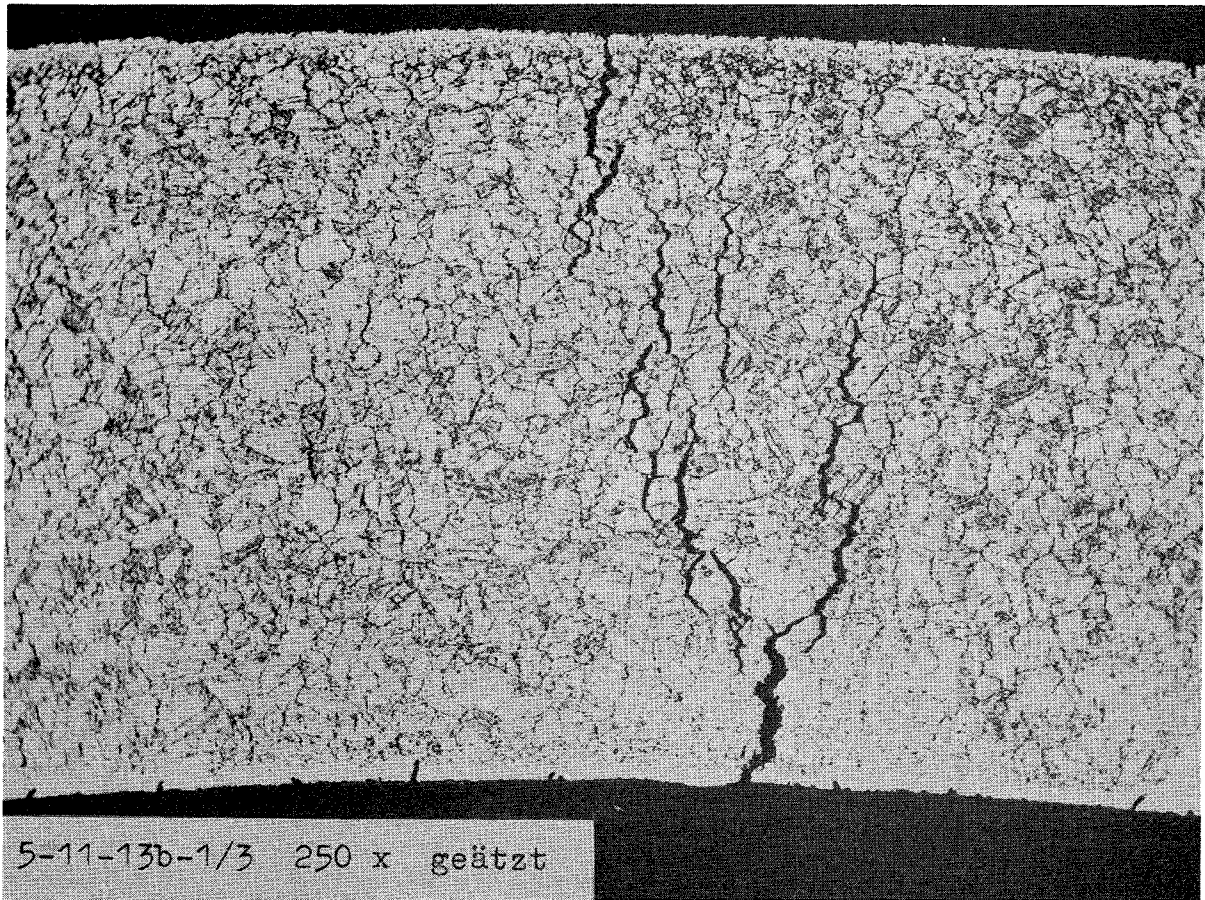


Abb. 25 Inconel 625; 650°C; 188 at; 833 h; 2,08 %

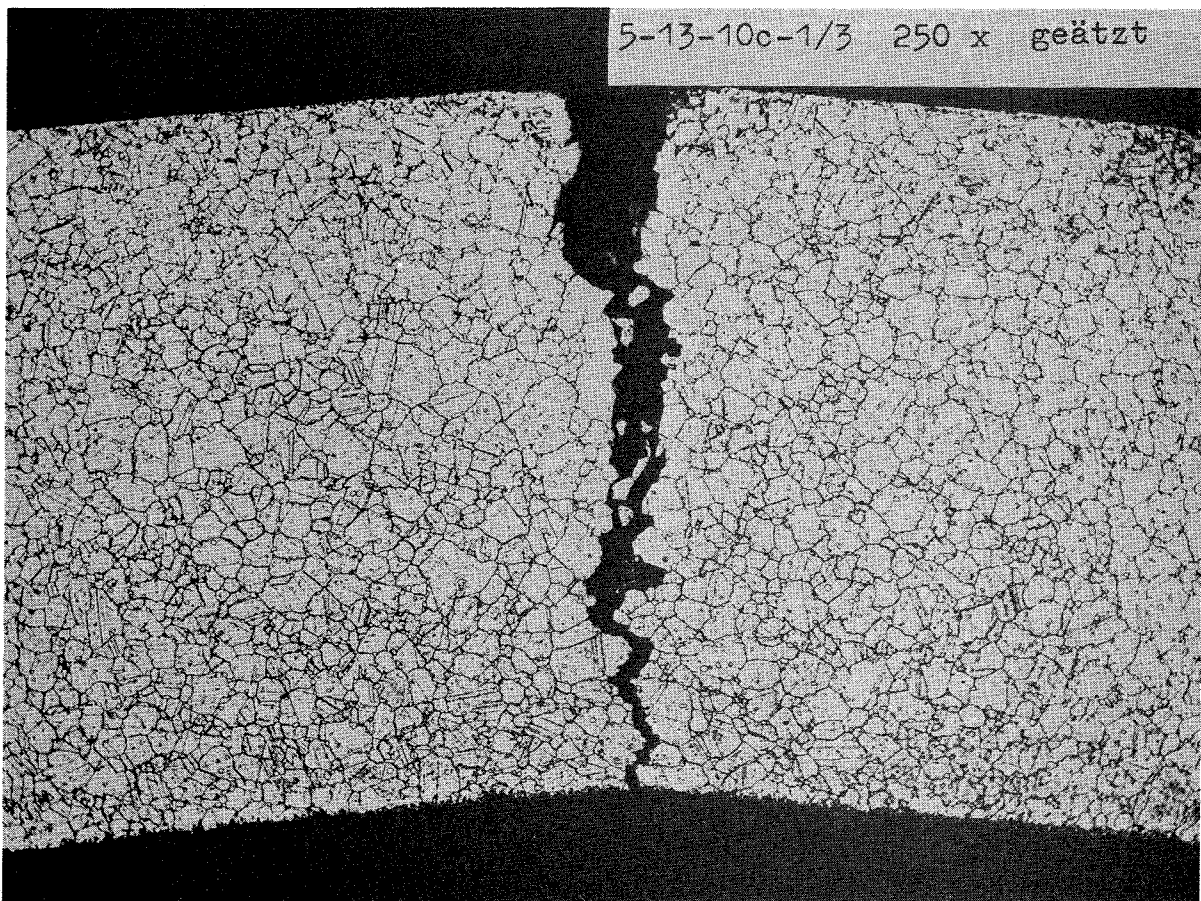


Abb. 26 Hastelloy X; 650°C; 240 at; 244 h; 3,20 %

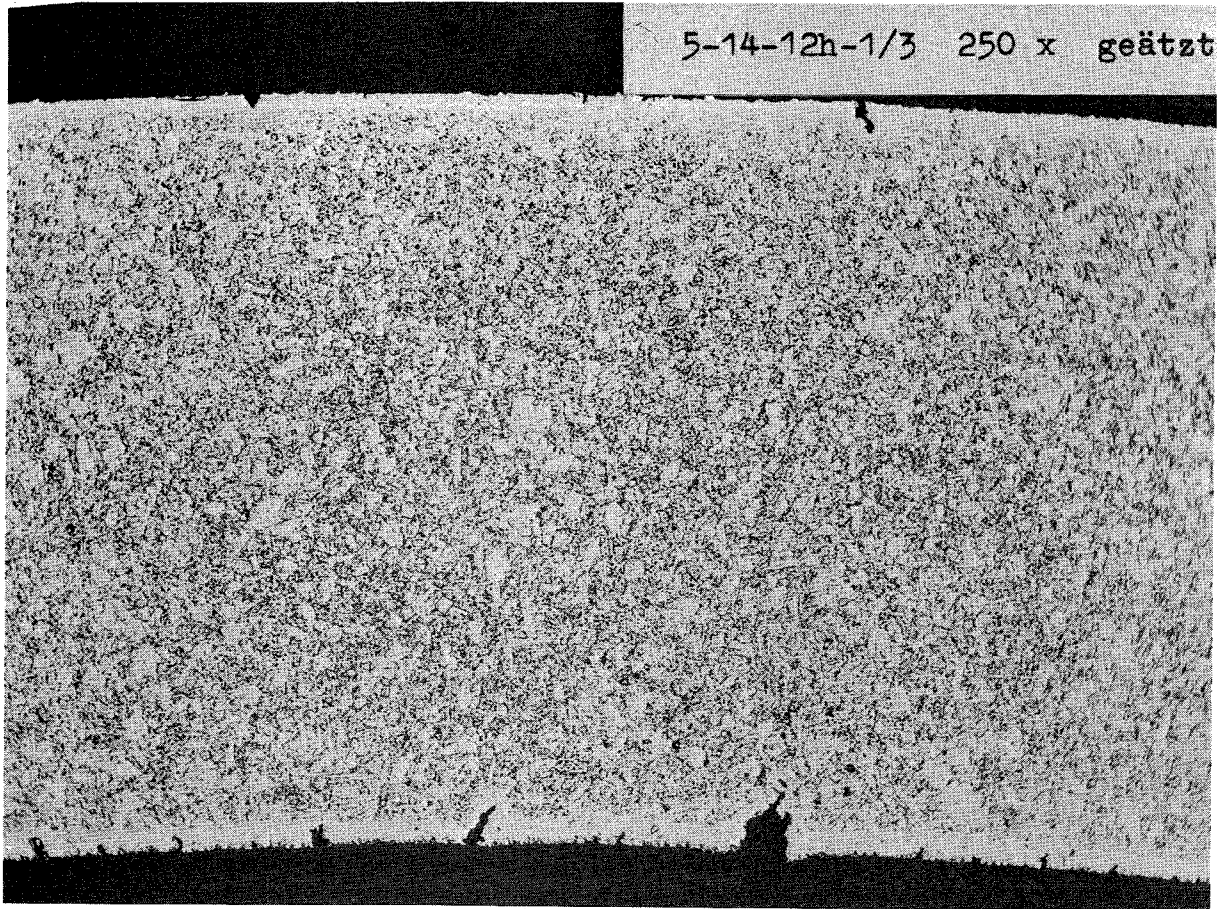


Abb. 27 Inconel 718; 700 °C; 100 at; 837 h; 5,80 %

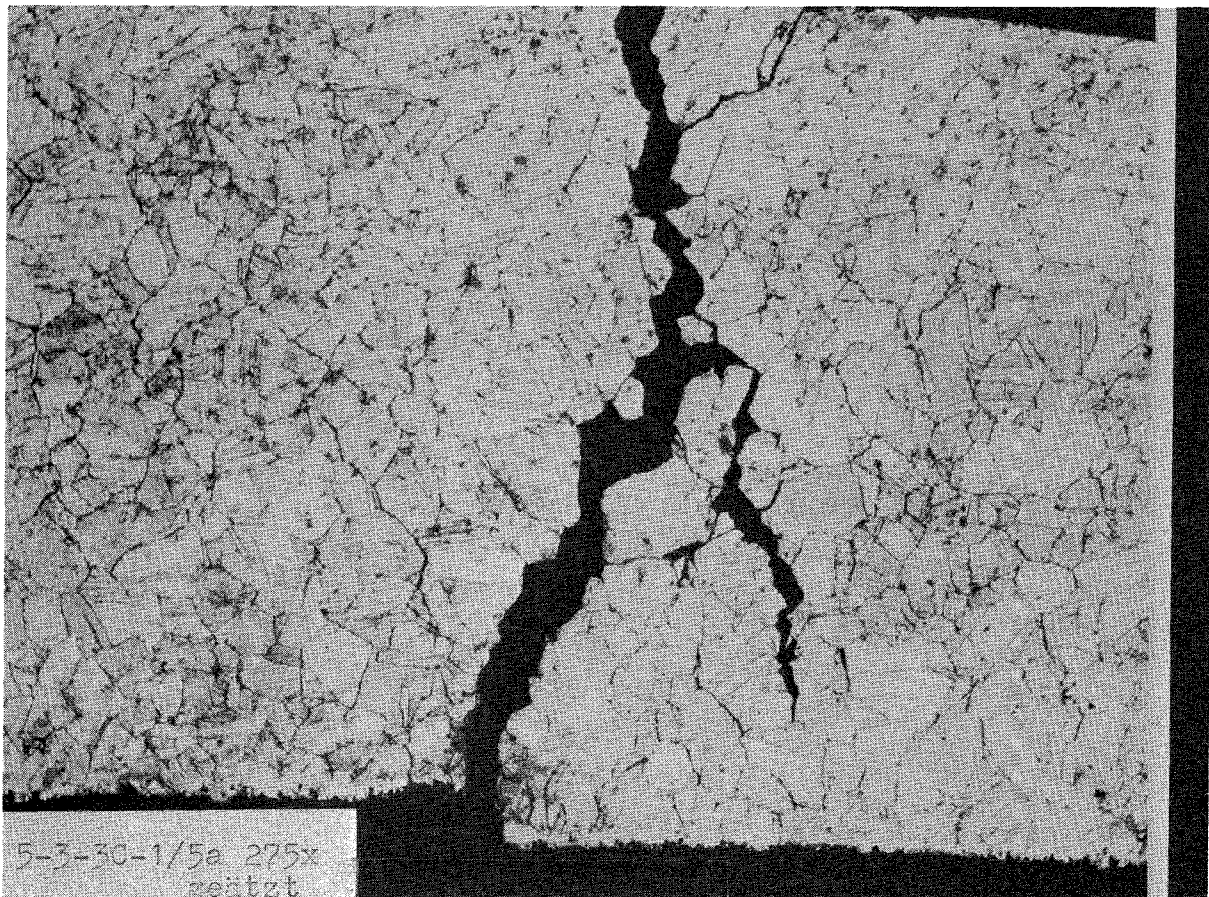


Abb. 28 Inconel X750; 700 °C; 160 at; 61 h; 0,70 %