

Langzeituntersuchungen an Sandwich-  
elementen mit Metaldeckschichten  
und Kunststoffschäumen

**T 2170**

T 2170

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

**Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine**

**Amtliche Materialprüfungsanstalt**

der

**Universität Karlsruhe (TH)**

Abschlußbericht

zum

Forschungsvorhaben des Instituts für Bautechnik, Berlin

Langzeituntersuchungen an Sandwichelementen  
mit Metalldeckschichten und Kunststoffschäumen

von

Prof. Dr.-Ing. U. Schulz

Dipl.-Ing. S. Burkhardt

<u>0. Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Werkstoffe und Herstellung der Sandwichelemente	2
3. Bestimmung der Werkstoffkennwerte	3
3.1 Bestimmung der Schaumrohddichte und der Dichteverteilung über die Höhe	4
3.2 Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druckelastizitätsmoduls der Schaumstoffe	5
3.3 Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zugelastizitätsmoduls	6
3.4 Bestimmung des Schubmoduls und der Schubbruchspannung	6
4. Langzeitversuche	8
4.1 Biegeversuche an kurzen Balken bei Normaltemperatur	8
4.2 Kriechversuche bei 0°C und 40°C	9
4.3 Bauteilversuche	11
4.4 Temperaturversuch am Bauteil	11
5. Kriechkurven	12
5.1 Bestimmung der Kriechkurven aus den Biegeversuchen an kurzen Balken	13
5.2 Bestimmung der Kriechlinien aus Versuchen bei den Temperaturen von 0°C und 40°C	14
5.3 Bestimmung der Kriechkurven aus den Bauteilversuchen	15
5.4 Bestimmung der Rückverformung nach dem Entlasten der kurzen Balken	17
5.5 Rückverformung der Bauteile	18
6. Vergleich der Kriechlinien und Vorschläge für die Bemessung	19
6.1 Kriechen unter Belastung	19
6.2 Zurückgehen der Kriechverformung	22
7. Zusammenfassung	25
8. Literaturverzeichnis	29
9. Tabellen	31
10. Bilder	54

## 1. Einleitung

In den letzten zwanzig Jahren hat sich der Einsatz von Sandwichelementen, welche aus dünnen Metalldeckschichten und Kernen aus Polyurethanhartschaum bestehen, stark vermehrt. Die Gründe für die weite Verbreitung der Sandwichelemente sind der hohe Vorfestigungsgrad und die gute bauphysikalischen Eigenschaften.

Das Entstehen derartiger Elemente und deren steigendem Einsatz führte dazu, daß man sich auch auf dem Forschungs- und Entwicklungssektor mit Sandwichelementen beschäftigte. Erste Untersuchungen zum Tragverhalten derartiger Elemente stammen von Williams, Leggett und Hopkins (1) und Youth, Elann und De Bruyne (2). Darüber hinaus befaßten sich in neuerer Zeit Berner (3), Langlie (4) und Linke (5) mit dem Tragverhalten und der Spannungsberechnung von Sandwichelementen. Erste Lehrbücher stammen von Stamm, Witte (6) und Plantema (7). Allen gemeinsam ist jedoch, daß sie sich fast ausschließlich nur mit der Spannungs- und Schnittgrößenermittlung befassen.

Das jedem Kunststoff eigene Verhalten, sich unter einer Last in Abhängigkeit von der Zeit weiter zu verformen, wurde von Just (9) behandelt. Er untersucht eine Reihe von Sandwichelementen in Dauerstandsversuchen und gab für die zeitabhängigen Verformungen Kriechfunktionen an. Auch in Darmstadt haben sich verschiedene Forscher eingehend mit dem Kriechen von Sandwichelementen aus Polyurethanhartschaumkernen und Deckschichten aus Stahlblech befaßt. Zu nennen sind hier Basu (8), Berner (3) und Linke (5).

Im baupraktischen Bereich ist jedoch auch von Bedeutung zu wissen, wie sich derartige Elemente auch nach einer Entlastung verhalten, da der weitaus häufigste Fall der sein wird, daß Bauteile periodisch und nicht ständig belastet werden. Von den Kunststoffen ist bekannt, daß zumindest ein Teil der infolge längerer Zeit wirkenden Last entstandenen Kriechverformung reversibel ist.

Um nun beurteilen zu können, in welchem Maße Sandwichelemente unter Belastung zum Kriechen neigen und wie groß der reversible Anteil dieser Kriechverformung ist, sind im Rahmen dieses Forschungsvorhabens umfangreiche Untersuchungen angestellt worden. Ausgehend von den kurzzeitig bestimmten Festigkeitswerten der verschiedenen verwendeten Polyurethanhartschäume wurde das Langzeitverhalten bei Belastung und auch das Verhalten im entlasteten Zustand untersucht. Als Ergebnis sollte es möglich sein, Kriechfaktoren zu bestimmen, die es erlauben, einen Verformungsnachweis eines periodisch be- und entlasteten Sandwichelements zu führen.

Das hier vorliegende Forschungsvorhaben wurde vom Institut für Bautechnik, Berlin, finanziell gefördert - dafür danken wir. An seiner Bearbeitung waren viele Mitarbeiter der Versuchsanstalt beteiligt. Unser Dank gilt besonders den Herren Eisele, Dornauf, Müller und von Vietinghoff für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung, der Auswertung der Versuche und bei den graphischen Darstellungen.

Ferner wird den Herren der Betreuergruppe, Prof. Dr.-Ing. Berner, Darmstadt, Dr.-Ing. Froh, Doetmund, Dipl.-Ing. Stemmann, Hoesch Siegerlandwerke GmbH, Kreuztal Dank gesagt.

## 2. Werkstoffe und Herstellung der Sandwichelemente

Zur Herstellung der hier betrachteten Sandwichelemente mit dünnen Metalldeckschichten werden ausschließlich Polyurethan- (PUR)- und Polyisocyanurat- (PIR)-schäume verwendet. Sie gehören zur Gruppe der duroplastischen Kunststoffe, sind räumlich stark vernetzt und nicht schmelzbar. Der Unterschied zwischen den beiden Schaumstoffen besteht im wesentlichen im Mischungsverhältnis der Komponenten, Polyisocyanuratschaumstoff enthält bis zu drei Anteile Isocyanat pro Anteil Polyol. Die andere Struktur ergibt ein besseres Brandverhalten. Bei den vorliegenden experimentellen Untersuchungen sind ausschließlich PUR-Schäume verwendet worden.

Die Herstellung des PUR-Schaumes erfolgt für den hier angesprochenen Einsatzbereich vorwiegend nach dem Einstufenverfahren, bei dem wenige Sekunden nach Vermischen aller Rohstoffkomponenten der Schäumprozeß beginnt und das Reaktionsgemisch sich auf ein Vielfaches seines flüssigen Ausgangsvolumens ausdehnt. Bereits kurze Zeit später ist der PUR-Schaumstoff klebfrei erhärtet.

Für die Deckschichten von Sandwichelementen wird hauptsächlich verzinktes und kunststoffbeschichtetes Stahl-Feinblech, aber auch Aluminium oder Kupfer verwendet.

Die Produktion der Sandwichelemente erfolgt nahezu vollautomatisch auf kontinuierlichen oder, was seltener der Fall ist, auf diskontinuierlichen Bandanlagen. Nach dem Einspritzen des noch flüssigen Schaumstoffgemisches werden die beiden Deckschichten so lange in einem Abstand gehalten, bis das Erhärten dieses Gemisches erreicht ist. Danach können die nun fertigen Elemente gestapelt und transportiert werden.

### 3. Bestimmung der Werkstoffkennwerte

Exemplarisch für die große Zahl von verschiedenen Sandwichelementen und deren Hersteller wurden drei so ausgewählt, daß sie die gleiche Nenndicke besaßen und über die Breite der Versuchskörper möglichst wenig Sicken hatten. Damit sollte gewährleistet werden, daß die Ergebnisse miteinander vergleichbar sind und der Einfluß des Eigen-Biegemomentes der Deckschicht auf das Verformungsverhalten nicht allzu groß ist. Die Probenauswahl hat willkürlich stattgefunden. Die ganzen Elemente sind in Probekörpern mit den jeweils erforderlichen Abmessungen aufgeschnitten worden. Eine Kennzeichnung erfolgte nur dahingehend, daß die einzelnen Fabrikate unterschieden werden konnten. An den Sandwichelementen der 3 verschiedenen Hersteller sind vor Beginn der Langzeitversuche die wichtigsten Materialkennwerte bestimmt worden.

Es sind Sandwichelemente der folgenden drei Hersteller verwendet worden.

Sandwichtyp 1: Crawford Door AB  
Box 160  
S-42301 Torslande/Schweden

Sandwichtyp 2: ems-Isoliertüren Mickleit  
Postfach 49  
2409 Pansdorf Ostholstein

Sandwichtyp 3: Romakowski  
Hardweg 29 - 31  
8851 Thürheim

### 3.1 Bestimmung der Schaumrohrdichte und der Dichteverteilung über die Höhe

Die Rohdichte des Schaumstoffes wurde an jeweils 10 Probekörpern der Abmessungen 100 x 100 x d mm bestimmt. Diese sind aus den verschiedenen Sandwichelementen ausgearbeitet worden. Vor der Gewichtsbestimmung wurden die Deckschichten abgetrennt. Danach sind die Probekörper sorgfältig ausgemessen und gewogen worden. Es ergaben sich für die Rohdichten die nachfolgend aufgeführten Maximal-, Minimal- und Mittelwerte sowie die zugehörigen 5%-Fraktilwerte. Die statistische Auswertung erfolgte gemäß der "vorläufigen Richtlinie für die statistische Auswertung von Prüfergebnissen bei Zulassungs- und Überwachungsprüfungen von Baustäben und Bauarten von Kunststoff" vom Institut für Bautechnik, Ausgabe August 1982.

Sandwichtyp 1:  $\rho_{\max} = 37,6 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{\min} = 36,5 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_m = 37,2 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{5\%} = 36,6 \text{ kg/m}^3$

Sandwichtyp 2:  $\rho_{\max} = 42,5 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{\min} = 41,0 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_m = 41,6 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{5\%} = 40,7 \text{ kg/m}^3$

Sandwichtyp 3:  $\rho_{\max} = 46,6 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{\min} = 43,8 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_m = 44,9 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{5\%} = 42,5 \text{ kg/m}^3$

Es lag eine relativ gleichmäßige Rohdichte vor. Die Streuung innerhalb eines Sandwichtyps war sehr gering.

Von den Probekörpern, an denen die Rohdichte bestimmt worden war, sind jeweils fünf Körper in horizontaler Richtung in etwa 5 mm dicke Scheiben aufgeschnitten worden. Durch Gewichts- und Volumenbestimmung der Scheiben ist die Dichte und

Damit die Dichteverteilung über die Höhe ermittelt worden. Dabei zeigte sich, daß die Schaumdichte im mittleren Kernbereich kleiner wird und an den Rändern in Deckschichtnähe ansteigt. Die Rohdichteverteilung für die einzelnen Probekörper wird für die drei verschiedenen Sandwichtypen in Bild 4 dargestellt, wobei für jeden Probekörper ein eigenes Symbol verwendet wurde. Es wird ersichtlich, daß die Rohdichte in den einzelnen Schichten einer Lage innerhalb der 5 untersuchten Probekörper eine recht geringe Streuung aufweist.

### 3.2 Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druckelastizitätsmoduls der Schaumstoffe

Aus Elementen der drei verschiedenen Sandwichtypen, welche auch für die Bestimmung der Kriechverformung Verwendung fanden, sind jeweils 10 Probekörper der Abmessungen 50 x 50 x d mm herausgeschnitten worden. In Anlehnung an DIN 53 421 wurden diese Probekörper senkrecht zu ihren Deckschichten belastet. Die Lastverformungsgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Mit Hilfe eines Wegaufnehmers sind die Zusammendrückungen der Probekörper gemessen und mit Hilfe eines x-y-Schreibers die Lastverformungskurven aufgezeichnet worden. Als Maximalspannung wurde die Spannung, die bei einer Zusammendrückung des Körpers um 10 % seiner Ausgangshöhe vorhanden ist, definiert. Der Elastizitätsmodul ist durch Anlegen einer Geraden an die Lastverformungslinie im linearen Bereich ermittelt worden. In Tabelle 1 werden die Belastung bei 10 % Stauchung, die dafür ermittelte Spannung und der Elastizitätsmodul der einzelnen Versuchskörper aufgeführt.

Um auch die Druckfestigkeit und den Druckelastizitätsmodul des Schaumstoffes in Längsrichtung und Querrichtung der Sandwichelemente ermitteln zu können, sind ebenfalls Druckversuche, wie vor beschrieben, durchgeführt worden. Die Probekörper besaßen die Abmessungen 100 x 100 x d mm. Diese Abmessungen wurden so gewählt, daß die Druckfestigkeit einen Mittelwert über die ganze Höhe darstellt. Vor dem Versuch sind die Deckschichten entfernt worden. Auch hier betrug die Lastverformungsgeschwindigkeit 1 mm/min. Die ermittelten Lasten bei 10 % Stauchung sowie die zugehörigen Druckspannungen und Elastizitätsmoduli werden in den Tabellen 2 und 3 wiedergegeben.

### 3.3 Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zugelastizitätsmoduls

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zugelastizitätsmoduls senkrecht zu den Deckschichten sind aus den drei verschiedenen Sandwichtypen Probekörper mit den Abmessungen 50 x 50 x d mm ausgearbeitet worden. Auf die Deckschichten wurden mit einem Epoxidharzkleber Holzspanplatten der Größe 70 x 70 x 19 mm zentrisch geklebt. Mit Hilfe einer Vorrichtung konnte nach Erhärten des Klebers der Probekörper belastet werden. Während des Zugversuchs, der weggesteuert mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt wurde, ist die Lastverformungskurve mit geeigneten Meßgeräten aufgezeichnet worden. Das Versagen trat in allen Fällen durch einen Bruch des Schaumstoffes auf. Als Bruchspannung wurde die Versagenslast dividiert durch die Ausgangsquerschnittsfläche definiert. Durch Anlegen einer Geraden an die Lastverformungskurve im linearen Bereich ist der Elastizitätsmodul senkrecht zu den Deckschichten ermittelt worden. In Tabelle 4 werden Bruchlasten, Bruchspannungen und Zugelastizitätsmoduli der verschiedenen Probekörper aufgeführt.

### 3.4 Bestimmung des Schubmoduls und der Schubbruchspannung

Zur Bestimmung des Schubmoduls wurden Vierpunkt-Biegeversuche durchgeführt. Zu diesem Zweck sind aus den Sandwichelementen in Längsrichtung Probekörper von 1040 mm Länge und 150 mm Breite ausgeschnitten worden. Breite und Höhe wurden an mehreren Stellen gemessen und die sich daraus ergebenden Mittelwerte für die Auswertung verwendet. In der Prüfmaschine sind die Versuchskörper, als Biegebalken auf zwei Stützen mit einer Stützweite von  $l = 1,00$  m frei drehbar aufgelegt, in den Drittelpunkten über ein U-Profil als Lastverteiler und durch aufgesetzte biegesteife Platten (60 x 150 x 15 mm) belastet worden.

Durch in Stützweitenmitte an beiden Rändern angebrachte induktive Wegaufnehmer wurden die vertikalen Verformungen der Prüfkörper gemessen. Ihre Mittelwerte sind in Abhängigkeit von der aufgebrachten Belastung unter Berücksichtigung des Gewichts der Versuchseinrichtung in den Bildern 1 bis 3 dargestellt. Bei allen Versuchen erfolgte die Belastung gleichmäßig bis zum Bruch. Dieser trat zwischen einer Lasteinleitung und dem nächstliegenden Auflager, also im Bereich der maximalen Querkraft, ein.

Zur Bestimmung des Schubmoduls wurde zugrunde gelegt, daß sich die Gesamtverformung aus einer Biege- und einer Schubverformung zusammensetzt, wobei sich die Biegeverformung nach der bekannten Formel

$$f_B = \frac{23 P l^3}{648 E \cdot J} \quad (3.1)$$

mit

$$J = b \cdot t_1 \cdot \left( \frac{h + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}}{2} \right)^2 + b \cdot t_2 \cdot \left( \frac{h + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}}{2} \right)^2 + \frac{b \cdot t_1^3}{12} + \frac{b \cdot t_2^3}{12} \quad (3.2)$$

ermitteln läßt. Es sei bemerkt, daß bei dünnen Deckschichten die beiden letzten Glieder zur Bestimmung des Trägheitsmomentes vernachlässigbar klein sind. Ebenso läßt sich das Eigenträgheitsmoment des Schaums aufgrund des sehr großen Verhältnisses der Elastizitätsmoduli von Schaum und Deckschichtmaterial vernachlässigen.

Den Schubmodul erhält man dann zu

$$G = \frac{P \cdot l}{6 \cdot h \cdot b (f - f_B)} \quad (3.3)$$

Die Schubbruchspannung ergibt sich in diesem Fall aus der Auflagerkraft  $Q$  dividiert durch die Querschnittsfläche des Schaumstoffes

$$\tau_{Br} = \frac{Q}{b \cdot h} \quad (3.4)$$

An Probekörpern aus Elementen von drei verschiedenen Sandwichherstellern sind jeweils fünf Versuche durchgeführt worden. Die Abmessungen der Probekörper sowie die Schubmoduli und die Schubbruchspannungen werden in Tabelle 5 wiedergegeben.

Die Mittelwerte der Schubbruchspannungen wurden für die Belastungen der langfristig beanspruchten Probekörper zugrunde gelegt.

#### 4. Langzeitversuche

Für den Anwender der Sandwichelemente ist die Kenntnis des Langzeitverhaltens manchmal von großem Interesse. Langzeitige Lasteinwirkung führt aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des PUR-Schaumes zu einer mit der Zeit zunehmenden Verformung. Dieses üblicherweise mit Kriechen bezeichnete zeitabhängige Verhalten unterscheidet sich nicht grundsätzlich von dem anderer Hochpolymere. Um nun diese zeitabhängigen Verformungen unter Belastung und auch das Verhalten der Probekörper nach dem Entfernen einer längere Zeit eingewirkten Last zu erfassen, sind umfangreiche Versuche in Karlsruhe und Darmstadt durchgeführt worden.

##### 4.1 Biegeversuche an kurzen Balken bei Normaltemperatur

Entsprechend dem Anwendungsbereich der hier behandelten Sandwichelemente wurde die Belastung senkrecht zur Deckschicht aufgebracht. Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, sind langzeitige Vierpunktbiegeversuche mit einer Lasteinleitung in den Drittelpunkten durchgeführt worden. Die Stützweite betrug  $l = 1,0$  m, die Probenbreite etwa  $b = 150$  mm. An den Auflagern waren die Versuchskörper frei drehbar aufgelagert. Mit Hilfe von Meßuhren (mit einer Meßgenauigkeit von  $1/100$  mm) wurde in Stützweitenmitte die Verformung zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Der Versuchsaufbau der so durchgeführten Kriechversuche ist in Bild 5 dargestellt.

Die Belastung bei den untersuchten Sandwichtypen ist für die verschiedenen Versuchskörper variiert worden. Dabei wurde die Belastung so gewählt, daß sie eine Schubspannung in den Probekörpern erzeugte, die einem bestimmten Anteil der zugehörigen kurzzeitigen Schubbruchspannung entsprach. Ebenfalls variiert wurden die Belastungszeiten. Die Abmessungen der langfristig belasteten Probekörper, die Belastungen und die zugehörige, auf die kurzzeitige Schubbruchspannung bezogene, im Langzeitversuch vorhandene Schubbeanspruchung werden in den Tabellen 6 bis 8 aufgeführt.

Die Versuche wurden alle unter normalklimatischen Bedingungen durchgeführt, so daß ein Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit auf die verschiedenen Schaumsysteme ausgeschlossen werden kann. Um Vergleiche zwischen den drei verschiedenen Sandwichtypen herstellen zu können, sind stets für jeden

Typ die gleichen Belastungszeiten und Belastungsverhältnisse gewählt worden. Diese betragen etwa 150 h, 500 h, 2000 h und mehr als 15 000 h - die Belastungsverhältnisse wurden zwischen 10 % und 30 % der zu einem Schaumtyp gehörenden Kurzzeitschubbeanspruchung variiert.

Zu den Versuchen, die das viskoelastische Verhalten der Kunststoffe bei ruhender Beanspruchung charakterisieren, gehört auch der Rückfederungs- oder Erholversuch. Dieser Versuch ist, streng genommen, nur eine Variante des Zeitstandsversuchs. Es verläuft von einer Zeit  $t = 0$  bis zu einer Zeit  $t = t_1$  unter einer Belastung und von einer Zeit  $t = t_1$  bis zu einer Zeit  $t = t_2$  ohne diese, wobei das Intervall von  $t_1$  bis  $t_2$  der Rückfederung zugeordnet wird. Die unter Belastung untersuchten Probekörper wurden daher auch in Zeiten der Entlastung beobachtet.

Es ist stets von praktischem Interesse zu wissen, ob und wie stark zu bestimmten, durchaus unterschiedlichen Zeitpunkten, wiederkehrende Lasten die Kriechverformungen eines Bauteils beeinflussen. Es wurden daher Versuchskörper periodisch be- und entlastet, wobei die Be- und Entlastungszeiten möglichst gleich, für unterschiedliche Probekörper aber auch unterschiedlich lang waren.

In den Tabellen 9 bis 12 werden alle zu einem Probekörper gehörenden Belastungs- und Entlastungszeiten sowie Belastungsverhältnisse aufgeführt. Während des Versuchs sind auch regelmäßig in bestimmten Abständen die Verformungen eines jeden Probekörpers gemessen worden, unabhängig davon, ob dieser nun gerade be- oder entlastet war. Alle die sich ergebenden Verformungslinien werden in Abhängigkeit von der Zeit in den Bildern 6 bis 55 dargestellt.

#### 4.2 Kriechversuche bei 0°C und 40°C

Parallel zu den Karlsruher Kriechversuchen bei Normaltemperatur wurden in der Klimakammer der Universität Darmstadt durch Prof. Berner Versuche bei tieferen und höheren Temperaturen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, das Langzeitverhalten unter Temperatureinfluß zu untersuchen.

Aufgrund maßgebender Klimawerte und des wärmetechnischen Verhaltens der Sandwichbauteile ist bekannt, daß Temperaturen an den Deckblechen im Sommer bis  $80^{\circ}\text{C}$ , im Winter bis  $-30^{\circ}\text{C}$  und bei Schnee  $0^{\circ}\text{C}$  auftreten können. Diese relativ großen Temperaturänderungen sind deshalb bei der Bemessung und damit auch bei der Beurteilung des Kriechverhaltens der Kernschicht zu berücksichtigen.

An Proben von zwei Herstellern, die aus den gleichen Sandwichelementen wie die Proben der Normalklima-Versuche ausgearbeitet worden sind, wurden bei zwei Belastungsstufen (10 % und 30 % der Kurzzeit-Versagenslast) in Darmstadt Kriech- und Rückkriechversuche bei Temperaturen von  $0^{\circ}\text{C}$  und  $40^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Die Temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  wurde gewählt, weil bei realistischer Schneebelastung sich am äußeren Deckblech diese Temperatur einstellt. Temperaturen von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $-30^{\circ}\text{C}$  werden nur ohne die isolierende Schneeschicht auftreten, so daß für diesen Fall i.d.R. außer dem Eigengewicht keine kriecherzeugende Beanspruchung vorhanden ist.

Für die Temperaturen im Sommer (außen max  $+80^{\circ}\text{C}$ , innen  $25^{\circ}\text{C}$ ), die für die Rückkriechperiode von Bedeutung sind, wurde ein repräsentativer Wert von  $40^{\circ}\text{C}$  gewählt, der auch maximal im Klimaraum der Universität Darmstadt realisierbar ist.

Der Klimaraum in Darmstadt stand nur rund 6 Monate zur Verfügung. Es wurden daher jeweils 4 Probekörper eines Herstellers mit 10 % bzw. 30 % der Kurzzeitbruchlast etwa 3 Monate bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  belastet. Nach Ablauf dieser Zeit ist die Hälfte der Versuchskörper entlastet worden um das Rückkriechen zu beobachten. Gleichzeitig wurde innerhalb eines Tages die Temperatur in der Klimakammer von  $0^{\circ}\text{C}$  auf  $40^{\circ}\text{C}$  erhöht. Bei den restlichen noch belasteten Probekörpern sollte nun der Einfluß einer erhöhten Temperatur auf das Kriechverhalten untersucht werden.

Mit diesem Versuchsprogramm sollte erreicht werden, daß für den realistischen Belastungsfall bei Schnee und  $0^{\circ}\text{C}$  die Kriechkurven und für den realistischen Sommerlastfall (Eigengewicht,  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) die Rückkriechkurven ermittelt werden können. Zusätzlich wurden in der 2. Hälfte der Beanspruchungszeit das Kriechverhalten unter Belastung bei  $T = 40^{\circ}\text{C}$  - allerdings nach dem Winterlastfall - untersucht. Dieser Lastfall ist zwar nicht realistisch, soll jedoch prinzipiell Aufschluß über das verstärkte Kriechen unter erhöhter Temperatur geben.

Der Versuchsaufbau der Darmstädter Kriechversuche entsprach dem unter Normaltemperatur in der hiesigen Versuchsanstalt. Die Abmessungen der Probekörper, die Belastungen und die zugehörige, auf die kurzzeitige Schubbruchspannung bezogene Schubbeanspruchung wurden aus Tabelle 5 entnommen und in den Tabellen 7 und 8 aufgeführt.

In Tabelle 13 werden ferner die zu den Probekörpern gehörenden Belastungs- und Entlastungszeiten aufgeführt. Die während des Versuches in regelmäßigen Abständen bestimmten Verformungen der Probekörper sind, um einen Vergleich mit den Karlsruher Versuchen herstellen zu können, in den Bildern 56 bis 73 wiedergegeben.

#### 4.3 Bauteilversuche

Um auch die unter ständiger Belastung bei einem Bauteil auftretenden zeitabhängigen Verformungen erfassen zu können, sind exemplarisch einige Bauteile geprüft worden. Die Elemente wurden auf 60 mm breite Auflager frei drehbar aufgelegt und mit Stahlschrot oder Gewichtssteinen gleichmäßig über die Fläche verteilt belastet. Die Stützweite richtete sich nach der Geometrie des Bauteils. Dadurch sollte eine Schneebelastung während eines Winters simuliert werden. In Feldmitte ist auf beiden Seiten mittels Meßbuhren die Verformung in Abhängigkeit von der Zeit beobachtet worden. Nach Ablauf einer bestimmten Zeitspanne wurden die Bauteile wieder entlastet und das Zurückgehen der Verformung beobachtet. In Tabelle 14 werden die Bauteiltypen, die Belastungen und die Be- und Entlastungszeiten aufgeführt. Bild 74 stellt die geprüften Bauteile dar. Die Bilder 75 bis 87 geben die Verformungslinien unter Belastung und nach der Entlastung in Abhängigkeit von der Zeit wieder.

#### 4.4 Temperaturversuch am Bauteil

Um den Einfluß der im Sommer vorhandenen erhöhten Temperatur erfassen zu können, sind auch zwei Versuche an Bauteilen mit simulierter Sonnenstrahlung durchgeführt worden. Die Bauteile waren zuerst mehr als 1000 Stunden belastet. Nach dem Entlasten wurde über einen längeren Zeitraum die Rückverformung ohne zusätzliche Temperaturerhöhung beobachtet. Danach sind über den Elementen Temperaturstrahler so angebracht worden, daß eine Erhöhung der Oberflächentemperatur erzeugt werden konnte. Anschließend ist an mehreren Tagen etwa 9 Stunden lang die Oberseite dieser Elemente bestrahlt worden. Die Temperatur der äußeren Deckschicht lag zwischen 70 und 80°C direkt unter den

Wärmequellen und bei etwa 40 bis 65°C in den übrigen Bereichen (Bild 77 und 78). Sie war rund 30 bis 40 Minuten nach dem Einschalten der Strahler erreicht und blieb dann bis zum Ausschalten etwa konstant. Während der Abend- und Nachtzeit kühlte das Element wieder auf die Umgebungstemperatur des Raumes ab. In den Bildern 77 und 78 werden die Verformungslinien der Bauteile in Abhängigkeit von der Zeit wiedergegeben. Es zeigte sich, daß an den ersten Tagen der Temperaturbelastung das Zurückgehen der der noch vorhandenen Kriechverformung deutlich schneller abläuft als bei der Raumtemperatur. Während der Bestrahlung wölbt sich das Element nach oben, so daß eine negative Verformung entsteht. Nach dem Abkühlen geht diese Verformung wieder zurück. Bereits wenige Tage nach der ersten Temperaturbeanspruchung geht die Kriechverformung nicht mehr wesentlich schneller als vor der Temperaturbeanspruchung zurück. Wie bereits bei den Darmstädter Temperaturversuchen festgestellt, geht ein großer Teil der noch verbleibenden Kriechverformung bereits während der ersten Temperaturbelastung wieder zurück. Dabei ist zu beachten, daß bei der noch vorhandenen geringen Kriechverformung der Einfluß des Eigengewichts nicht vernachlässigt werden darf.

### 5. Kriechkurven

Zur Ermittlung der zeitabhängigen Nachgiebigkeit eines Bauteiles aus Kunststoff wird ein Zeitstands- oder Kriechversuch durchgeführt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird der Probekörper einer Spannung  $\sigma$  unterworfen, dabei verformt er sich ruckartig. Die Verformung  $\varepsilon$  steigt mit  $t = 0$  steil an und nimmt anschließend für  $t > 0$  aufgrund von Retardationsprozessen monoton mit der Zeit  $t$  zu. Die  $\varepsilon(t)$ -Kurve für  $t > 0$  bezeichnet man allgemein als Zeitverzerrungslinie. Die Änderung von  $\varepsilon(t)$  setzt sich im allgemeinen zusammen aus einem mechanisch reversiblen Kriechen und einem diesem überlagerten irreversiblen Fließen, das nach Aufheben der Spannung zu einer bleibenden Verformung führt. Der Quotient aus der zeitabhängigen Dehnung  $\varepsilon(t)$  und der konstant gehaltenen Spannung  $\sigma$  hat die Dimension einer Nachgiebigkeit und wird allgemein mit  $c(t)$  bezeichnet.

$$c(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad \left| \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right| \quad (5.1)$$

Die Gesamtverformung  $\varepsilon(t)$  zu einem beliebigen Zeitpunkt zerfällt in drei charakteristische Anteile, die erste ruckartige Anfangsdeformation  $\varepsilon_1$ , die mechanisch reversible Rückfederung  $\varepsilon_2$  und die bleibende, mechanisch nicht reversible Verformung  $\varepsilon_3$ , die eine Folge des Fließens ist.

Entlastet man zum Zeitpunkt  $t = t_1$  die Probekörper, so wird die erste elastische Anfangsdeformation  $\varepsilon_1$  sofort wieder zurückgehen. Die reversible Rückfederung  $\varepsilon_2$  erfolgt mit zunehmender Zeit  $t > t_1$ .

### 5.1 Bestimmung der Kriechkurven aus den Biegeversuchen an kurzen Balken

Im Stahlbetonbau ist es üblich, einen dimensionslosen Parameter für die Kriechverformungen einzuführen. Just (9) greift diesen Gedanken auf und wendet dieses Verfahren für Sandwichelemente mit PUR-Schaumkernen an. Er geht davon aus, daß der Schubverformungsanteil eines PUR-Stützkerns als zeitabhängig zu betrachten ist. Die Verformung eines längere Zeit biegebeanspruchten Bauteils setzt sich dann zusammen aus einem Biegeanteil und einem zeitabhängigen Schubanteil

$$f_t = f_B + f_{Q,t} \quad (5.2)$$

Er führt Kriechversuche durch und bezieht die ermittelten Kriechverformungen auf die elastische Anfangs-Schubverformung. Damit erhält man die dimensionslose Kriechzahl  $\varphi_t$

$$\varphi_t = \frac{\Delta f_t}{f_{Q,0}} \quad (5.3)$$

Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten und in Abschnitt 4.1 beschriebenen Kriechversuch ergibt sich die Biegeverformung  $f_B$  nach Gleichung 3.1 und die elastische Anfangsschubverformung aus Gleichung 3.3. Mit den Gleichungen

$$f_0 = f_B + f_Q \quad (5.4)$$

und

$$\Delta f_t = f_t - f_0 \quad (5.5)$$

erhält man den Kriechparameter

$$\varphi_t = \frac{f_t - f_0}{f_{Q,0}} \quad (5.6)$$

als Quotient der Änderung der Schubverformung zum Zeitpunkt  $t = t$  gegenüber der elastischen Anfangsschubverformung. Da die hier untersuchten Versuchskörper ebene oder nahezu ebene Deckschichten besaßen, läßt sich die Schub-

verformung direkt aus den Kriechkurven bestimmen, wobei unter Kriechkurven an dieser Stelle die direkt im Versuch gemessene zeitlich veränderliche Verformung verstanden wird. Der Biegeanteil bleibt stets gleich, da die Eigenbiegesteifigkeit der Deckschichten klein ist und eine Spannungsumlagerung somit nicht stattfindet.

Für alle nach Abschnitt 4.1 untersuchten Probekörper werden die Kriechkurven für die verschiedenen Belastungszyklen nach Gleichung 5.5 ausgewertet und in den Bildern 88 bis 121 für die einzelnen Probekörper in doppeltlogarithmischer Darstellung aufgetragen. Dabei wurden die Kriechlinien (aus der Kriechkurve bestimmt) der Probekörper mit gleicher Belastung und gleicher Belastungszeit für jeweils einen Belastungszyklus auf einem Bild zusammengefaßt. Ebenfalls in dieses Bild wird dann die Mittelwertfunktion (Regressionsgerade Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate) der jeweils dargestellten Kriechlinien eingetragen.

Es zeigt sich, daß in doppeltlogarithmischer Darstellung die einzelnen Kriechlinien relativ gut durch Geraden approximiert werden können. Das Kriechverhalten der untersuchten Probekörper gehorcht somit in guter Näherung einer Potenzfunktion der allgemeinen Form

$$\varphi_t = m \cdot t^n \quad (5.7)$$

Durch Logarithmieren der Gleichung 5.7 zur Basis 10 erhält man

$$\log \varphi_t = \log m + n \cdot \log t \quad (5.8)$$

Die Parameter  $m$  und  $n$  lassen sich nun aufgrund der gewählten Darstellung sehr einfach bestimmen. Mit Hilfe der Regressionsrechnung unter Benutzung des Prinzips der kleinsten Fehlerquadrate wird für jeden Probekörper und für jeden Belastungszyklus die Gleichung der Kriechlinie als Potenzfunktion bestimmt - die einzelnen Parameter sind in den Tabellen 15 bis 19 angegeben. Nach dem gleichen Prinzip werden für die in den Bildern 88 bis 121 zusammengefaßten Kriechversuche die jeweils zugehörigen Mittelwertkurven ermittelt - die entsprechenden Parameter sind in den Tabellen 15 bis 19 aufgeführt.

## 5.2 Bestimmung der Kriechlinien aus Versuchen bei den Temperaturen von 0°C u. 40°C

Nach dem gleichen Verfahren, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, sind die Kriechkurven auch für die Darmstädter Versuche ermittelt worden, welche bei einer Temperatur von 0°C durchgeführt wurden. In den Bildern 122 bis 125 werden

die Kriechlinien der einzelnen Probekörper dargestellt, wobei die Kriechlinien für jeweils gleiche Lastverhältnisse zusammen gefaßt werden. Auch hier wurden die einzelnen Kriechkurven ermittelt und in Tabelle 20 zusammen mit der jeweiligen Mittelwertkurve angegeben. Diese ist in die zugehörigen Bilder eingetragen worden. Es ergibt sich, daß die Kriechlinien der Probekörper welche etwa 2000 Stunden bei 0°C und anschließend bei 40°C belastet waren, einen deutlichen Sprung und eine Neigungsänderung aufweisen.

### 5.3 Bestimmung der Kriechkurven aus den Bauteilversuchen

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der Kriechlinie bei den Bauteilversuchen, da die Deckschichten zumeist eine nicht vernachlässigbare Eigenbiegesteifigkeit besitzen. Durch das Kriechen des Kerns unter Biegebeanspruchung nimmt die Verformung auch hier stetig monoton zu. Durch die Verformungszunahme wird jedoch eine Spannungserhöhung in den Deckschichten, die mit einer fiktiven Zunahme der Belastung erklärt werden kann, hervorgerufen. Die Belastungsanteile lagern sich um und der Kern wird weniger stark beansprucht. Die Spannungserhöhung in den Deckschichten verlangsamt also die Gesamtverformung des Bauteils, da sie der Belastung entgegenwirkt, was zu einer Entlastung des schubbeanspruchten Kerns führt. Es wird somit deutlich, daß praktisch zu jedem Zeitpunkt  $t$  andere Beanspruchungszustände vorliegen. Eine Bestimmung der Kriechlinie ist ohne großen numerischen Aufwand, wenn überhaupt, nur möglich, wenn davon ausgegangen wird, daß die Kriechneigung des PUR-Schaumes im üblichen Beanspruchungsbereich und in einer dimensionslosen Darstellung nicht lastabhängig ist (die vorliegenden Versuche bestätigen diese Annahme). Es soll hier kurz auf ein von Wölfel (15) beschriebenes Verfahren eingegangen werden, welches es erlaubt die  $\varphi_t$ -Werte in Abhängigkeit von der Zeit bestimmen zu können. Er gibt an, daß  $\varphi_t$  mit einer der beiden Gleichungen

$$\varphi_t = \frac{1}{\alpha_1} [\ln(1-\alpha) - \ln(1-\alpha \cdot C_D)] \quad (5.9)$$

oder

$$\varphi_t = \frac{\alpha(C_D - 1)}{\alpha_1 [(1-\alpha) - \alpha \cdot \rho \cdot (C_D - 1)]} \quad (5.10)$$

bestimmt werden kann und stellt fest, daß für  $\rho = 0,5$  die beiden Werte nahezu übereinstimmen. Da bei den hier betrachteten Sandwichelementen

nur der Kern kriechen kann, wird  $\alpha$  als Verhältnis der Steifigkeit des nicht kriechfähigen Querschnittsteils zum Gesamtquerschnittsteil angegeben.

$$\alpha = \frac{J_1 + J_2}{J_1 + J_2 + \gamma \cdot (A_1 \cdot e_1^2 + A_2 \cdot e_2^2)} = \frac{J_D}{J_W} \quad (5.11)$$

Das Trägheitsmoment des gesamten Querschnitts wird nach dem im Holzbau üblichen Verfahren ermittelt

$$\gamma = \frac{1}{1+k} \quad (5.12)$$

$$k = \frac{\pi^2}{l^2} \frac{E_1 \cdot A_1}{\left(\frac{A_1}{A_2} + 1\right) \cdot S_0} \quad (5.13)$$

$$S_0 = \frac{b}{e_1 + e_2} \cdot G \quad (5.14)$$

Darin sind  $e_1, e_2$  die Abstände der Schwerlinien der einzelnen Deckschichten zur Nulllinie,  $A_1, A_2, J_1, J_2$  die Flächen bzw. Eigenträgheitsmomente der Deckschichten,  $G$  der Schubmodul des Kernwerkstoffes und  $l$  die Stützweite des Versuchskörpers.

Der Wert für  $\alpha_1$  wird nach folgender Gleichung ermittelt

$$\alpha_1 = \frac{k \cdot \alpha}{1+k} \quad (5.15)$$

Im elastischen Bereich verhalten sich die Durchbiegungen im gleichen Verhältnis wie die Momente der Deckschichten

$$\frac{f_t}{f_0} = \frac{M_{Dt}}{M_{D0}} = C_D \quad (5.16)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 5.9 bis 5.16 lassen sich nun zu jedem Zeitpunkt  $t$  die  $\varphi_t$ -Werte nach Gleichung 5.9 oder 5.10 ermitteln.

Nahezu zu den gleichen Kriechfunktionen gelangt man, wenn man mit Hilfe der allgemeinen Sandwichtheorie aus der zeitabhängigen Verformungslinie den

jeweils aktuellen Schubmodul bestimmt und sich daraus den zugehörigen  $\varphi_t$ -Wert ermittelt (Hierzu siehe den Vergleich in Bild 132). Dieses Verfahren ist genauer aber wesentlich aufwendiger. Es wurde hier verwendet. In den Bildern 126 bis 131 werden die Kriechlinien für die durchgeführten Bauteilversuche dargestellt. Die zugehörigen Kriechfunktionen werden in Tabelle 21 wiedergegeben.

#### 5.4 Bestimmung der Rückverformung nach dem Entlasten der kurzen Balken

Wie bei den Belastungsversuchen wurden auch bei den Entlastungsversuchen die Verformungen in Feldmitte eines Probekörpers gemessen, so daß die allgemeine Deformationsbeziehung für  $t > t_1$  in der Form

$$f_t = f_{t1} - f_B - f_{Q,0} - f_{t-t1} \quad (5.17)$$

dargestellt werden kann, worin  $f_{t1}$  die zum Zeitpunkt  $t_1$  vorhandene Gesamtverformung und  $f_B$  und  $f_{Q,0}$  die elastischen Biege- und Schubverformungsanteile angeben. Der Wert  $f_{t-t1}$  gibt den Anteil der viskoelastischen Verformung wieder, um den diese zum Zeitpunkt  $t > t_1$  bereits wieder zurückgegangen ist. Zum Zeitpunkt  $t = t_1$  liegen unmittelbar nach der Entlastung die viskoelastischen und plastischen Anteile der Kriechverformung vor.

$$\Delta f_{tR} = f_{t1} - f_B - f_{Q,0} \quad (5.18)$$

Zu jedem Zeitpunkt  $t > t_1$  verringert sich  $\Delta f_{tR}$  um den Anteil der viskoelastischen Verformung, um den sich der Probekörper bis dahin bereits wieder erholt hat. Wie die Belastungsverformung läßt sich auch die Erholverformung in dimensionsloser Form wie folgt darstellen

$$\varphi_{tR} = \frac{\Delta f_{tR} - f_{t-t1}}{\Delta f_{tR}} \quad (5.19)$$

wobei  $\varphi_{tR}$  von 0 bis 1 laufen kann. Der Wert 1 ist erreicht sobald die Kriechverformung vollständig zurückgegangen ist. Die Zeitdehnlänge der Entlastung wird keinem Endwert zustreben der kleiner als 1 ist.

././.

Auch bei den vorliegenden Rückkriechversuchen lassen sich die Zeitdehnlinien in der Form

$$\varphi_{tR} = m_2 \cdot t_2^{n_2} \quad (5.20)$$

für  $t_2 = t - t_1$  darstellen.

Für jeden unter normalen Umgebungsbedingungen belasteten Probekörper wurde nach dem oben angegebenen Verfahren die Kriechlinie bestimmt. Diese sind in den Bildern 133 bis 163 in doppeltlogarithmischer Darstellung wiedergegeben. Dabei wurden die Kriechlinien der Probekörper wie bei den Belastungsphasen zusammengefaßt. Mit Hilfe der Regressionsrechnung ist für jeden Versuchskörper und für jede Entlastungsphase die Kriechfunktion bestimmt und in den Tabellen 22 bis 24 wiedergegeben worden. Auch hier wurde die Mittelwertkurve für die Probekörper mit gleicher Beanspruchung und gleicher Belastungszeit berechnet, in die Bilder eingetragen und in den Tabellen angegeben.

Für die Darmstädter Versuche, welche bei einer Temperatur von 0°C belastet und bei 40°C entlastet worden waren, sind ebenfalls die Kriechlinien bestimmt worden. Sie sind in den Bildern 164 und 165 dargestellt worden. Es zeigt sich daß bereits nach wenigen Stunden der erhöhten Temperatur nahezu die gesamte unter Belastung entstandene Kriechverformung wieder zurückgegangen ist.

#### 5.5 Rückverformung der Bauteile

Durch die langzeitige Belastung eines Bauteils mit profilierten Deckschichten findet, wie oben bereits erwähnt, im Lauf der Zeit infolge des Kriechens des PUR-Schaumes eine Spannungsumlagerung statt. Die Druckspannung in der belasteten oberen Deckschicht nimmt monoton wachsend in Abhängigkeit von der Durchbiegungszunahme zu. In Abschnitt 5.3 wurde gezeigt, wie die Verformungszunahme in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden kann, wenn die Belastung konstant ist.

Entlastet man nun ein Bauteil zum Zeitpunkt  $t = t_1$ , so stellt sich die elastische Verformung unmittelbar danach zurück. Die durch das Kriechen entstandene viskoelastische Verformung benötigt jedoch eine längere Zeit als zum Entstehen unter Belastung. Die durch die Spannungs-

umlagerung infolge Kriechens in der Deckschicht entstandene Zwängungs-  
spannung wirkt in der Entlastungsphase als fiktive Belastung. Diese Bean-  
spruchung ist jedoch nicht konstant, sondern nimmt stetig ab.

Es wird demnach das Rückkriechen durch die Spannungsumlagerung während der  
Belastungsphase beeinflußt. Aus dieser Spannungsumlagerung resultiert bei  
der Entlastung eine fiktive Belastung des rückkriechenden Sandwichelements.  
Diese fiktive Belastung ist allerdings verformungsabhängig - sie nimmt mit  
kleiner werdender Verformung ab. Eine Trennung der Rückverformungsanteile aus  
"inneren" und "äußeren" Beanspruchungen ist nur möglich, wenn die Kriechlinien  
aus "innerer" Beanspruchung bekannt sind. Aus den Kriechversuchen selbst  
lassen sich diese jedoch nicht ermitteln.

Zur Bestimmung der Rückverformung eines Bauteils muß man demzufolge eine  
Kriechlinie (für den inneren Beanspruchungszustand) und damit verbunden ein  
 $\varphi_{tR}$  annehmen. Dieses  $\varphi_{tR}$  entspricht den an ebenen Elementen (Kleinproben oder  
Bauteil) gefundenen Kriechlinien. Durch die zusätzlich wirkende Rückstell-  
kraft aus der Spannungsumlagerung in der profilierten Deckschicht während  
der Belastung wird das Ende des Rückkriechens daher zu einem früheren Zeit-  
punkt erreicht sein als bei Elementen mit ebenen Deckschichten.

## 6. Vergleich der Kriechlinien

### 6.1 Kriechen unter Belastung

Im folgenden Kapitel sollen die im einzelnen ermittelten Kriechlinien mit-  
einander verglichen werden. Dabei sind alle Versuchsergebnisse gleich behan-  
delt worden. Es wurde also keine differenzierte Betrachtung im Hinblick auf  
die Verwendbarkeit von Kriechmodellen angestellt. Dies könnte einem weiteren  
Forschungsvorhaben vorbehalten bleiben.

In Abschnitt 5.1 wurde beschrieben, wie die Kriechlinien für die einzelnen  
langzeitig belasteten Probekörper ermittelt wurden. Stellt man nun alle diese  
Kriechfunktionen für die erste Belastung, die auch in den Tabellen 15 bis 19  
aufgeführt werden, in dimensionsloser Form graphisch dar, so erhält man das  
in Bild 166 dargestellte Streuband. Es enthält alle für das erste Belastungs-  
intervall ermittelten Langzeitversuche an kurzen Balken. Dabei ist es uner-  
heblich ob die Belastung nun 10 % oder 30 % der Schubbruchspannung als Bean-  
spruchung hervorgerufen hat.

Es lassen sich für die Grenzen des Streubandes einfache Funktionen der Form finden:

$$\varphi_{t_0} = 0,26 t^{0,36} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.1)$$

$$\varphi_{t_u} = 0,07 g^{0,37} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.2)$$

Die Mittelwertfunktion wurde durch eine Regressionsrechnung nach dem Prinzip vom Minium der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Sie genügt der Gleichung

$$\varphi_t = 0,15 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.3)$$

Diese Funktion ist ebenfalls in Bild 166 eingetragen. Gleichzeitig wurde noch ein Vergleich angestellt, der die Kriechverformung unter den verschiedenen Belastungshöhen miteinander vergleichen soll. In den Bildern 119 b, 120 b und 121 b wurden die 3 unterschiedlichen Belastungshöhen der drei verschiedenen Elementhersteller miteinander verglichen.

Dabei zeigte sich, daß wie schon erwähnt, kein Unterschied zwischen den Lasthöhen und zwischen den unterschiedlichen Schäumen besteht. In Bild 166 werden die Mittelwertfunktionen dieser drei Vergleiche zusätzlich eingetragen.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind einige Probekörper zyklischen Belastungen unterworfen worden. Auch für die zweiten und folgenden Belastungen wurden die Kriechlinien ermittelt. Stellt man nun die jeweils minimalen und maximalen Kriechlinien graphisch dar, so erhält man wiederum ein Streuband, innerhalb dessen sich alle Kriechlinien befinden. Es zeigt sich nun, legt man die für die Belastungszyklen 2 bis 8 ermittelten Streubänder übereinander, daß es unerheblich ist, ob ein Probekörper zweimal oder mehrere Male belastet wurde. Die Kriechrate ändert sich dadurch nicht wesentlich. In Bild 167 werden jeweils die Grenzlinien der Streubereiche für die einzelnen Belastungszyklen dargestellt. Gleichzeitig werden in diesem Bild noch die sich ergebende Mittelwertfunktion und die obere und untere Hüllkurve des gesamten Streubandes.

$$\varphi_{tn} = 0,10 t^{0,31} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.4)$$

$$\varphi_{tno} = 0,21 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.5)$$

$$\varphi_{tnu} = 0,05 t^{0,32} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.6)$$

eingetragen.

Festzustellen ist, daß der erste Belastungszyklus eine höhere Kriechrate liefert als die diesem folgenden. Das liegt wohl darin begründet, daß die nach dem Schäumen im Schaumkern herrschenden inneren Spannungszustände durch die erste Belastung abgebaut werden und dadurch die Kriechrate erhöhen.

Für die Darmstädter Kriechversuche, welche bei einer Temperatur von 0°C durchgeführt wurden, erhält man ebenfalls ein Streuband, innerhalb dessen alle Kriechlinien liegen. Die obere und untere Hüllkurve dieses Streubandes läßt sich durch die Gleichung

$$\varphi_{t0^\circ\text{Co}} = 0,38 t^{0,25} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.7)$$

$$\varphi_{t0^\circ\text{Cu}} = 0,10 t^{0,32} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.8)$$

$$\varphi_{t0^\circ\text{C}} = 0,23 t^{0,26} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.9)$$

beschreiben.

Die Kriechlinien der Bauteilversuche werden ebenfalls als Streuband in Bild 169 dargestellt. Die obere und untere Hüllkurve wird durch die Gleichung

$$\varphi_{tBo} = 0,20 t^{0,36} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie bzw.} \quad (6.10)$$

$$\varphi_{tBu} = 0,04 t^{0,37} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.11)$$

beschrieben, die Mittelwertfunktion aller Bauteilkriechlinien gehorcht der Gleichung

$$\varphi_{tB} = 0,13 t^{0,35} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.12)$$

Bei drei Bauteilversuchen lag ein Beanspruchungsverhältnis vor, das größer als 50 % der Kurzzeitschubbruchlast war. Wertet man die Bauteilversuche ohne diese drei Prüfkörper aus, so erhält man für die Mittelwertkurve die Gleichung

$$\varphi_{tB} = 0,12 t^{0,35} \quad (6.13)$$

die als strichpunktierte Linie in Bild 169 eingetragen ist. Ebenfalls nach unten verschoben wird dadurch die obere Hüllkurve, die dann der Gleichung

$$\varphi_{tBo} = 0,20 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.14)$$

genügt. Sie ist ebenfalls strichpunktiert in Bild 169 eingetragen.

Betrachtet man die Streubänder der Versuche an den Biegebalken des ersten Belastungszyklus und der Bauteile, so stellt man fest, daß die Mittelwertfunktion aus dem Streuband der ersten Belastung nur geringfügig über der der Bauteilversuche liegt. In Bild 169 werden die verschiedenen Kriechlinien zur Anschaulichkeit nochmals dargestellt.

## 6.2 Zurückgehen der Kriechverformung

In Abschnitt 5.4 wurde beschrieben, wie die Kriechlinien für die einzelnen langfristig belasteten Probekörper nach deren Entlastung ermittelt wurden. Sie beschreiben das Zurückgehen der Kriechverformung im linear-viskoelastischen Bereich und sind in den Tabellen 22 bis 24 wiedergegeben. Trägt man die Rückkriechlinien für die Probekörper, welche periodisch etwa 150 Stunden (eine Woche) belastet und dann entlastet waren vergleichend in ein Diagramm ein, so stellt man fest, daß das Streuband der einzelnen Belastungsperioden nahezu zusammenfällt (Bild 170). Es ist für diesen kurzen Zeitraum offensichtlich unerheblich, ob der Probekörper nur einmal oder mehrere Male belastet

war. Betrachtet man die Versuchsergebnisse jedoch etwas genauer, so stellt man fest, daß das Streuband des ersten Entlastungszyklus in seiner Gesamtheit etwas tiefer liegt als die Streubänder der folgenden. Es ist somit dieselbe Tendenz vorhanden wie für die Belastungszyklen nur in umgekehrter Form. Zu erwähnen sei hier, daß zwei Versuche etwas aus dem Rahmen dieses Bildes fallen, es sind dies die untere Grenzlinie der dritten Entlastung und die obere Grenzlinie der vierten. Hierfür können mögliche Fehlmessungen bei der Versuchsdurchführung die Ursache sein.

Da die Streubänder der verschiedenen Entlastungszyklen dicht beieinander liegen, wurden an dieser Stelle nur eine obere und untere Grenzlinie des gesamten Streubereiches angegeben. Die gehorchen unter der Voraussetzung der oben getroffenen Annahmen den Funktionen

$$\varphi_{tRo150} = 0,48 t^{0,30} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.15)$$

$$\varphi_{tRu150} = 0,07 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.16)$$

Als Mittelwertfunktion des Gesamtbereiches ergibt sich

$$\varphi_{tR150} = 0,21 t^{0,30} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.17)$$

Dabei werden die beiden bereits erwähnten Grenzlinien der 3. bzw. 4. Entlastungsperiode nicht berücksichtigt.

Die Rückkriechlinien der Probekörper, die über einen Zeitraum von etwa 500 Stunden (3 Wochen) be- und entlastet waren, werden in Bild 171 dargestellt. In ihm ist die Tendenz, daß die dem ersten Zyklus folgenden Kriechlinien höher liegen als die ersten, bereits deutlicher zu sehen. Das Streuband der Kriechlinien für den ersten Entlastungszyklus liegt an der unteren Grenze des Streubereiches aller Kriechlinien. Für dieses Streuband lassen sich die oberen und unteren Grenzlinien sowie die Mittelwertkurve wie folgt angeben.

$$\varphi_{tRo500} = 0,143 t^{0,29} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.18)$$

$$\varphi_{tRu500} = 0,05 t^{0,32} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.19)$$

$$\varphi_{tR500} = 0,10 t^{0,30} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.20)$$

Die Streubänder der folgenden Entlastungszyklen fallen, wie bei der Belastungsphase zusammen und lassen sich durch eine obere und untere Grenzlinie beschreiben.

$$\varphi_{tRo500/2} = 0,37 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.21)$$

$$\varphi_{tRu500/2} = 0,07 t^{0,28} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.22)$$

Betrachtet man Bild 172 in dem die Streubereiche der Entlastungszyklen der Probekörper die etwa 2000 Stunden (12 Wochen) be- und entlastet waren dargestellt sind, so wird sehr deutlich, daß die Kriechgeschwindigkeit der zweiten Entlastungsperiode schneller abläuft als die der ersten. Hier lassen sich die folgenden Gleichungen angeben, die die jeweiligen Streubereiche begrenzen.

$$\varphi_{tRo2000} = 0,04 t^{0,30} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.23)$$

erste Entlastung

$$\varphi_{tRu2000} = 0,12 t^{0,25} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.24)$$

erste Entlastung

$$\varphi_{tRo2000/2} = 0,22 t^{0,25} \quad - \quad \text{für die obere Grenzlinie} \quad (6.25)$$

zweite Entlastung

$$\varphi_{tRu2000/2} = 0,05 t^{0,33} \quad - \quad \text{für die untere Grenzlinie} \quad (6.26)$$

zweite Entlastung

Ebenfalls angegeben werden die Mittelwertfunktionen, die den Gleichungen

$$\varphi_{tR2000} = 0,06 t^{0,27} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.27)$$

erste Entlastung

$$\varphi_{tR2000/2} = 0,11 t^{0,28} \quad - \quad \text{für die Mittelwertfunktion} \quad (6.28)$$

zweite Entlastung

genügen.

Festzustellen ist bei allen Rückkriechversuchen, daß das Zurückgehen der Verformung innerhalb der ersten Stunde schneller abläuft als in der darauffolgenden Zeit. Dies ergibt sich aus den Bildern 133 bis 163 sehr deutlich. Nach etwa einer Stunde pendelt sich dann die Rückkriechgeschwindigkeit auf ein für alle Entlastungszyklen gleiches Niveau ein.

Einige Versuchskörper der Darmstädter Versuche, welche bei einer Temperatur von 0°C belastet waren, wurden entlastet und die Rückverformung bei einer Temperatur von 40°C beobachtet. Diese Temperatur war nach der Entlastung innerhalb eines Tages in der Klimakammer, in welcher die Probekörper lagen, erzeugt worden. In den Bildern 164 und 165 sind die Kriechlinien dieser Versuchskörper dargestellt. Man erkennt, daß bereits kurze Zeit nach der Temperaturerhöhung die Kriechverformung fast vollständig wieder zurückgegangen ist. Gleichungen für das Streuband werden hier nicht angegeben. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse werden die Grenzlinien des Streubandes in Bild 172 eingetragen.

Bereits in Abschnitt 5.4 wird die Aussage gemacht, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, die Rückkriechlinie eines Sandwichelementes mit profilierten Deckschichten zu bestimmen. Die wenigen durchgeführten Versuche zeigen jedoch, daß auch hier die Kriechverformung wieder zurückgeht (Bilder 75 bis 78, 84 und 85).

## 7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über Untersuchungen zum Kriechverhalten von Sandwichelementen mit Metalldeckschichten und Stützkernen aus Polyurethanhartschaum berichtet. Es sind eine Vielzahl von Versuchen zur Bestimmung der Kriechverformung durchgeführt worden. Dabei wurde das Schaumsystem, die Belastungsdauer und die Belastungshöhe variiert. Nach Ablauf einer bestimmten Zeit sind die langfristig belasteten Probekörper entlastet worden um auch das Verformungsverhalten nach der Entlastung beobachten zu können.

In einem kurzen Abschnitt wird zuerst auf die Herstellung von Sandwichelementen eingegangen und darauf hingewiesen, daß das Herstellungsverfahren, das Raumgewicht und die Zellstruktur die PUR-Schaumeigenschaften beeinflussen können. Üblicherweise erfolgt die Herstellung von Sandwichelementen kontinuierlich oder diskontinuierlich in beiden Fällen jedoch nahezu vollautomatisch. Als Deckschichten werden in der Regel dünne Stahlbleche, seltener Aluminiumbleche oder Kupferbleche verwendet. Diese besitzen je nach Einsatzbereich, Herstellungsverfahren oder architektonischen Gründen mehr oder weniger stark ausgeprägte Profilierungen.

An den aus der Vielzahl von Sandwichelementen exemplarisch ausgewählten wurden zuerst die Werkstoffkennwerte des Schaumkerns bestimmt. Dazu gehören in erster

Linie die Rohdichte und der das Kriechen beeinflussende Schubmodul. Jedoch sind auch die übrigen Werkstoffkennwerte wie Zug- und Druckfestigkeit, Zug- und Druckelastizitätsmodul und die Schubbruchspannung bestimmt worden.

Ein darauf folgendes Kapitel beschreibt die Durchführung der Kriechversuche. Diese wurden in erster Linie an kurzen Biegebalken unter Normaltemperatur durchgeführt. Dazu sind die Probekörper in den Drittelpunkten belastet und die zeitlich veränderliche Verformung gemessen worden. Die Belastungszeit war unterschiedlich hoch und betrug etwa 150 Stunden (1 Woche), 500 Stunden (3 Wochen), 2000 Stunden (3 Monate) und mehr als 17000 Stunden (2 Jahre).

Die Probekörper, welche zwischen einer Woche und 3 Monaten belastet gewesen waren, wurden nach dieser Zeit entlastet und die Rückverformung beobachtet. Die Entlastungsphase dauerte in der Regel genauso lange wie die Belastungsphase. Einige Probekörper wurden mehreren Be- und Entlastungszyklen unterworfen.

Um auch den Einfluß einer tieferen Temperatur erfassen zu können, sind Langzeitkriechversuche in einer Klimakammer bei 0°C durchgeführt worden. Diese Untersuchungen wurden an der Universität Darmstadt vorgenommen - sie sind in einem Forschungsbericht /19/ beschrieben. Teilweise waren die Probekörper nach 3 Monaten wieder entlastet worden. Es wurde dann die Temperatur in der Klimakammer auf 40°C erhöht und die Rückverformung bei dieser Temperatur beobachtet.

Bei allen Versuchen war die Belastung so gewählt worden, daß sie eine Beanspruchung hervorrief, die zwischen 10 % und 30 % der Kurzzeitschubbruchspannung lag. Höhere Beanspruchungen sind im normalen Einsatzbereich derartiger Sandwichelemente auch nicht zu erwarten.

Exemplarisch sind auch einige ganze Bauteile geprüft worden. Diese Versuche sollten dazu dienen, die am kurzen Balken ermittelte Kriechverformung mit der der Bauteile vergleichen zu können. Auch hier wurde bei einigen Elementen die Rückverformung nach dem Entlasten beobachtet.

In einem weiteren Kapitel wurde auf die Ermittlung der Kriechfunktionen eingegangen. Es ist beschrieben worden, wie für die kurzen Balken die dimensionslosen Kriechparameter bestimmt werden konnten. Nach Auftragen dieser Parameter

in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem sind die Einzelpunkte durch Geraden approximiert worden. Diese Geraden sind durch eine einfache Potenzfunktion beschrieben worden. Für alle Versuche an kurzen Balken sind die Parameter dieser Potenzfunktion ermittelt und in Tabellen angegeben worden.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Ermittlung der Funktionen für die Bauteilversuche. Da diese in der Regel profilierte Deckschichten besitzen findet eine Spannungsumlagerung in den Deckschichten statt.

Nach dem Näherungsverfahren von Möhler oder der exakten Sandwichtheorie sowie nach dem Verfahren von Wölfel sind die Kriechfaktoren punktförmig ermittelt und durch Funktionen approximiert worden.

In einem weiteren Abschnitt dieses Kapitels wird auf die Kriechlinien für die Entlastungszeit eingegangen. In der Entlastungsphase gehen die viskoelastischen Verformungen aus der Belastungsphase wieder weitgehend zurück. Auch hier wurden für alle an kurzen Balken durchgeführten Untersuchungen die Rückkriechfunktionen ermittelt. Die Ermittlung erfolgte in gleicher Weise wie für die Belastung.

In Kapitel 6 wurden dann die ermittelten Kriechlinien für die verschiedenen Versuche miteinander verglichen. Es ist festgestellt worden, daß die Kriechlinien der Versuche am kurzen Balken recht gut mit denen aus den Bauteilversuchen übereinstimmen. Festgestellt wurde auch, daß die während der Winterzeit unter Schneelast entstandene Kriechverformung während der lastfreien wärmeren Jahreszeit wieder fast vollständig zurückgeht.

Es wurde keine differenzierte Betrachtung im Hinblick auf die Verwendbarkeit von Kriechmodellen angestellt. Dies könnte einem weiteren Forschungsvorhaben vorbehalten bleiben.

Zum vorliegenden Abschlußbericht existiert noch ein Ergänzungsband mit allen Einzeldaten. Er liegt beim Institut für Bautechnik und in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine vor.

Abschließend sei für die freundliche Zurverfügungstellung des umfangreichen Versuchsmaterials folgenden Firmen Dank gesagt:

Ems Isoliertüren Mickleit, Pansdorf  
Crawford door, Torlanda, Schweden  
Romakowski Thürheim

Karlsruhe, den 26. April 1989

## 8. Literaturverzeichnis

- /1/ Williams, D., Leggett, D.M.A., Hopkins, H.G.: Flat Sandwich Panels under Compressive End Loads. Reports and Memoranda No. 1987, June 1941, Aeronautical Research Council, UK
- /2/ Youth, G.S., Elam, C.F. and De Bruyne, N.D.: The Stabilisation of a Thin Sheet by a Continuous Supporting Medium. J. Royal Aero-Soc. January 1940, pp. 12-43
- /3/ Berner, K.: Stahl/Polyurethan-Sandwichtragwerke unter Temperatur- und Brandbeanspruchung. Dissertation TH Darmstadt (1978)
- /4/ Langlie, C.: Tragfähigkeitsprobleme ausgeschäumter GFK-Hohlprofile bei Kurzzeitbelastung. Dissertation TH Berlin (1971)
- /5/ Linke, K.-P.: Zum Tragverhalten von Profilsandwichplatten mit Stahldeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaumkern bei kurz- und langzeitiger Belastung. Dissertation TH Darmstadt (1978)
- /6/ Stamm, K., Witte, H.: Sandwichkonstruktionen, Springer-Verlag Wien, New York (1974)
- /7/ Plantema, F.J.: Sandwich Construction. The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells. John Wiley and Sons Inc., New York (1966)
- /8/ Basu, A.K.: Zur Herstellung und zum Werkstoffverhalten von Sandwichtragwerken des Werkstoffverbundsystems Stahlblech-Polyurethan-Hartschaum. Dissertation TH Darmstadt (1976)
- /9/ Just, M.: Zum Langzeitverhalten von Stützelementen mit einem Stützkern aus freongetriebenem Polyurethan-Hartschaumstoff. IfL-Mitt.-, Dresden 12 (1973) 11, S. 397-410
- /10/ Just, M.: Der Einfluß der Temperatur auf das mechanische Kurzzeit- und Langzeitverhalten von Stützelementen mit einem Stützkern aus Polyurethan-Hartschaumstoff. IfL-Mitt., Dresden 15 (1976) 10, S. 344-354

- /11/ Dundrová , Kovarik, Slapák: Biegungstheorie der Sandwichplatten. Academia-Verlag Prag, Springer-Verlag Wien New York (1970)
- /12/ Just, M.: Untersuchungen der Zuverlässigkeit des Haftverbundes zwischen epoxidharzbeschichteten metallischen Deckschichten und Stützkernen aus Polyurethan-Hartschaumstoff. IfL-Mitt., Dresden 20 (1981) 3, S.92-96
- /13/ Just, M.: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Langzeitverhalten von PUR-Hartschaumstoff-Stützkernbauteilen und Schlußfolgerungen für die Anwendung. IfL-Mitt., Dresden 22 (1983) 3, S. 95-104
- /14/ N.N.: Richtlinie zum Nachweis der Standfestigkeit von Sandwichkonstruktionen mit Metalldeckschichten im Zulassungsverfahren. Institut für Bautechnik, Berlin (Juni 1987, nicht veröffentlicht).
- /15/ Wölfel, E.: Zeitabhängige Verformungen und Spannungsumlagerungen bei Sandwichelementen. Institut für Bautechnik, November 1982 (nicht veröffentlicht)
- /16/ Wölfel, E.: Diskussionsvorschlag für den Sachverständigenausschuß Duromere, Langzeitverhalten von Sandwichelementen. Institut für Bautechnik, März 1983 (nicht veröffentlicht)
- /17/ Wölfel, E.: Nachgiebiger Verbund, eine Näherungslösung und deren Anwendungsmöglichkeiten. Stahlbau 6/87 S. 173-180
- /18/ Jungbluth, O.: Verbund- und Sandwichtragwerke, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986
- /19/ Jungbluth, O., Berner, K.: Langzeituntersuchungen unter Temperatureinfluß an Sandwichelementen mit Metalldeckschichten und Kunststoffschäumen. Forschungsbericht TH Darmstadt 1987 (nicht veröffentlicht)
- /20/ Möhler, K.: Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetztem Querschnitt und nachgiebigen Verbindungsmitteln. Habilitation TH Karlsruhe (1956)

Tabelle 1 : Druckspannung und Druckelastizitätsmodul senkrecht zu den Deckschichten

Sandwichelement 1					Sandwichelement 2					Sandwichelement 3				
Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul	
	$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>
512,5	0,206		6,67		306,5	0,128		3,29		439,5	0,173		4,68	
492,5	0,200		6,70		308,8	0,128		3,16		495,0	0,196		4,35	
451,3	0,178		5,06		310,0	0,129		3,05		481,5	0,195		4,22	
497,5	0,203		6,33		320,5	0,133		3,55		477,5	0,189		4,92	
455,0	0,183		5,55		321,0	0,140		3,91		448,0	0,179		5,53	
473,8	0,177		5,06		317,5	0,129		3,52		446,0	0,184		4,52	
447,5	0,182		5,50		338,0	0,137		3,72		468,5	0,184		4,67	
442,5	0,186		5,72		357,0	0,149		4,19		452,5	0,177		4,68	
487,5	0,194		6,88		333,5	0,142		4,19		457,5	0,184		4,91	
470,0	0,191	0,190	6,55	6,00	322,5	0,134	0,135	4,31	3,69	418,0	0,164	0,183	5,23	4,77

Tabelle 2 : Druckspannung und Druckelastizitätsmodul in Längsrichtung

Sandwichelement 1					Sandwichelement 2					Sandwichelement 3				
Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul	
	$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>
2400	0,249		8,62		3385	0,356		14,1		3465	0,365		20,2	
2420	0,259		8,96		3255	0,343		14,7		3160	0,330		17,2	
2510	0,261		8,34		3040	0,324		14,1		2990	0,312		16,3	
2720	0,268		8,94		3055	0,322		13,6		3315	0,342		17,2	
2415	0,250		7,69		3125	0,328		13,0		3305	0,348		17,8	
2295	0,234	0,254	7,23	8,30	3010	0,325		12,9		3290	0,342		17,4	
					3230	0,343	0,337	15,2	13,9	3185	0,339	0,340	15,2	17,3

Tabelle 3 : Druckspannung und Druckelastizitätsmodul in Querrichtung

Sandwichelement 1					Sandwichelement 2					Sandwichelement 3				
Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul		Belastung $P_{10}$ N	Spannung		E-Modul	
	$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_D$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>
1144	0,118		3,16		1185	0,127		3,24		1610	0,170		4,03	
1195	0,123		3,20		1250	0,131		3,28		1885	0,197		4,44	
1330	0,137		3,38		1262	0,133		2,89		1787	0,185		3,62	
1190	0,121		3,02		1152	0,126		3,22		1713	0,179		3,52	
1190	0,122		3,11		1246	0,131		2,91		1713	0,178		3,69	
1214	0,125	0,124	2,86	3,12	1100	0,120		2,63		1837	0,191		3,97	
					1260	0,134	0,129	3,35	3,07	1808	0,189	0,184	3,86	3,88

Tabelle 4 : Zugfestigkeit und Zugelastizitätsmodul senkrecht zu den Deckschichten

Sandwichelement 1					Sandwichelement 2					Sandwichelement 3				
Bruchlast $P_{Br}$ N	Spannung		E-Modul		Bruchlast $P_{Br}$ N	Spannung		E-Modul		Bruchlast $P_{Br}$ N	Spannung		E-Modul	
	$\sigma_{Br}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_Z$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{Br}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_Z$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{Br}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	$E_Z$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ N/mm <sup>2</sup>
302,5	0,126		6,13		-	-				210,0	0,090		3,58	
502,5	0,210		6,21		-	-				157,5	0,063		3,46	
290,0	0,113		4,68		465,0	0,190		3,04		187,5	0,076		3,30	
442,5	0,175		6,35		510,0	0,210		3,18		275,0	0,108		3,96	
418,8	0,165		6,94		437,5	0,184		3,12		365,0	0,150		4,47	
370,0	0,138		5,47		475,0	0,190		3,30		277,5	0,112		4,50	
315,0	0,123		6,84		212,5	0,088		2,76		214,0	0,087		3,88	
-	-		-		-	-		-		315,0	0,130		4,62	
367,5	0,143		6,47		470,0	0,190		3,47		157,5	0,065		3,98	
427,5	0,177	0,152	6,81	6,21	522,5	0,206	0,180	3,19	3,16	-	-	0,098	-	3,97

Tabelle 5 : Abmessungen der Probekörper zur Bestimmung des Kurzzeitschubmoduls und der Kurzzeitschubbruchspannung

Breite b mm	Höhe d mm	Blechdicke		Bruchlast $P_{Br}$ kN	Schubmodul G N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert	Bruchspannung $\tau_{Br}$ N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert
		$t_1$ mm	$t_2$					
151,5	105,8	0,33	0,33	3,54	3,64	3,35	0,111	0,104
151,6	105,7			3,33	3,24		0,104	
151,4	105,8			3,56	3,15		0,111	
151,2	105,4			2,95	3,44		0,093	
150,7	105,8			3,18	3,28		0,100	
150,2	99,7	0,54	0,54	3,50	2,83	2,66	0,117	0,113
149,5	99,6			3,28	2,48		0,111	
150,3	99,7			3,35	2,74		0,112	
149,6	100,4			3,42	2,56		0,114	
149,8	100,3			3,35	2,69		0,112	
149,6	103,5	0,54	0,54	3,99	3,26	3,24	0,130	0,123
149,6	102,8			3,80	3,38		0,124	
149,8	103,2			3,68	3,19		0,120	
149,6	103,5			3,74	3,09		0,121	
149,6	103,8			3,64	3,29		0,118	

Tabelle 6 : Abmessungen und Belastung der langfristig belasteten Probekörper, Sandwichtyp 1

Versuch Nr.	Breite b mm	Höhe d mm	Belastung P N	Belastungs- Verhältnis $\tau/\tau_{Br}$ %
44	152,0	105,5	332,6	10
46	150,5	106,0	330,9	10
62	152,0	105,5	665,2	20
64	151,5	106,0	666,2	20
68	151,5	105,0	989,8	30
70	151,0	105,5	991,2	30
49	151,0	104,5	327,3	10
51	152,0	106,0	334,2	10
61	151,5	104,3	983,2	30
63	152,0	104,5	988,3	30
53	101,5	103,4	324,8	10
55	150,5	104,0	324,5	10
71	152,0	105,5	997,5	30
83	151,5	105,0	989,5	30
54	151,5	106,0	333,0	10
56	151,5	103,3	324,5	10
72	151,0	104,3	979,7	30
74	152,0	103,5	978,6	30

Tabelle 7 : Abmessungen und Belastung der langfristig belasteten Probekörper, Sandwichtyp 2

Versuch Nr.	Breite b mm	Höhe d mm	Belastung P N	Belastungs- Verhältnis $\tau/\tau_{Br}$ %
86	150,0	105,0	354,3	10
88	149,5	100,5	337,9	10
100	150,0	101,2	682,7	20
102	149,5	101,5	682,5	20
107	149,5	101,2	1020,7	30
109	149,5	101,8	1026,8	30
92	149,5	101,3	340,6	10
94	148,5	101,0	337,3	10
106	149,5	101,0	1018,7	30
108	149,0	101,0	1015,3	30
96	149,5	99,5	334,4	10
98	149,0	99,4	332,9	10
110	149,0	101,0	1014,9	30
112	150,0	101,0	1021,7	30
91	148,0	100,0	332,7	10
104	148,0	99,8	332,0	10
90	149,0	99,5	999,7	30
105	148,0	99,8	996,0	30
99	147,5	101,0	334,8	10
111 <sup>+</sup>	148,0	101,2	336,8	10
113 <sup>+</sup>	150,6	101,0	342,1	10
114 <sup>+</sup>	150,2	101,3	341,8	10
115 <sup>+</sup>	148,1	101,1	1014,4	30
116 <sup>+</sup>	149,0	101,2	1016,5	30
118 <sup>+</sup>	149,3	100,9	1016,4	30
119 <sup>+</sup>	149,2	100,8	1014,3	30
120 <sup>+</sup>	150,2	101,3	1025,8	30

+ Darmstädter Versuche

Tabelle 8 : Abmessungen und Belastung der langfristig belasteten Probekörper, Sandwichtyp 3

Versuch Nr.	Breite b mm	Höhe d mm	Belastung P N	Belastungs- Verhältnis $\tau/\tau_{Br}$ %
128	150,5	104,0	383,2	10
130	150,0	103,5	380,1	10
142	151,0	103,0	761,5	20
144	149,0	103,5	755,1	20
149	150,0	105,0	1156,8	30
151	149,0	104,0	1138,1	30
134	150,0	103,5	380,0	10
136	150,5	103,5	381,3	10
141	151,0	103,5	1147,8	30
143	148,5	103,5	1128,8	30
138	149,0	104,0	379,2	10
140	150,0	104,2	382,5	10
145	148,5	101,0	1101,0	30
147	149,0	100,5	1099,2	30
133	150,0	104,3	382,9	10
146	149,0	100,3	365,7	10
132	149,0	104,5	1143,2	30
148	149,0	100,6	1100,3	30
139	150,6	104,3	384,5	10
152 <sup>+</sup>	149,6	104,0	381,0	10
153 <sup>+</sup>	148,8	106,0	378,9	10
154 <sup>+</sup>	148,5	104,1	378,5	10
156 <sup>+</sup>	148,8	104,1	1137,1	30
157 <sup>+</sup>	149,5	98,0	1075,3	30
163 <sup>+</sup>	149,1	101,2	1107,9	30
164 <sup>+</sup>	149,4	101,2	1110,7	30
167 <sup>+</sup>	149,7	100,9	1108,1	30

+ Darmstädter Versuche

**Tabelle 9: Zusammenstellung der Be- und Entlastungszeiten der langfristig untersuchten Probekörper**

Probekörper Nr.	Belastungsverhältnis $\tau/\tau_{Br}$ (%)	Dauer der Be- und Entlastungszeiten (Stunden)							
		1. Belastung Entlastung	2. Belastung Entlastung	3. Belastung Entlastung	4. Belastung Entlastung	5. Belastung Entlastung	6. Belastung Entlastung	7. Belastung Entlastung	8. Belastung Entlastung
54	10	- 143,0 = 167,8	191,4 142,8	169,3 166,4	166,1 166,8	166,7 167,8	166,8 166,5	166,7 1513,0	168,1 3166,0
56	10	143,4 161,8	191,4 142,7	169,4 166,3	166,2 166,6	166,8 167,7	166,9 166,5	166,8 1513,0	168,2 3166,0
72	30	143,7 167,7	191,5 142,6	169,5 166,2	166,2 166,5	166,9 167,7	167,0 166,4	167,1 1513,0	168,3 3166,0
74	30	140,7 167,5	191,7 142,9	169,2 166,2	166,5 166,4	167,0 167,6	167,1 166,9	167,2 1513,0	167,9 3168,0
133	10	144,4 167,4	190,5 143,3	168,9 166,0	165,8 166,3	166,3 167,5	167,3 167,2	167,4 1513,0	168,4 3168,0
146	10	144,6 167,4	190,5 143,3	168,9 166,0	165,9 166,2	166,4 167,4	167,3 167,2	167,5 1513,0	168,4 3168,0
132	30	140,2 168,0	191,6 143,0	169,0 166,1	166,4 166,4	166,9 167,6	167,1 166,9	167,1 1513,0	167,9 3168,0
148	30	139,6 168,0	191,3 142,8	169,2 166,4	166,0 166,8	166,7 167,8	166,8 166,6	166,6 1513,0	168,0 3166,0

- Belastungszeit

= Entlastungszeit

**Tabelle 10:** Zusammenstellung der Be- und Entlastungszeiten der langfristig untersuchten Probekörper

Probekörper Nr.	Belastungs- verhältnis $\tau/\tau_{Br}$ (%)	Dauer der Be- und Entlastungszeiten (Stunden)							
		1. Belastung Entlastung	2. Belastung Entlastung	3. Belastung Entlastung	4. Belastung Entlastung	5. Belastung Entlastung	6. Belastung Entlastung	7. Belastung Entlastung	8. Belastung Entlastung
53	10	- 478,8 = 483,1	498,8 503,6	501,4 501,2	502,5 500,5	504,1 503,6	503,6 6339,0	-	-
55	10	478,8 483,2	498,8 503,7	501,3 501,2	502,4 500,5	504,0 503,6	503,7 6339,0	-	-
71	30	524,3 504,1	498,3 502,6	503,2 503,7	501,2 502,2	503,2 2664,0	-	-	-
83	30	523,6 504,3	498,4 503,0	503,0 503,5	501,8 502,3	503,1 2665,0	-	-	-
96	10	479,1 482,3	498,9 503,8	501,3 501,3	502,4 500,6	503,9 503,7	503,8 6722,0	-	-
98	10	479,3 483,3	500,3 503,8	501,2 501,2	502,0 500,6	503,9 503,8	503,9 6722,0	-	-
110	30	524,0 504,2	500,5 502,9	503,0 503,4	501,9 502,3	503,5 2664,0	-	-	-
112	30	524,5 504,0	498,5 502,5	503,2 503,7	501,3 502,1	503,2 2664,0	-	-	-
138	10	479,5 483,0	499,1 503,9	501,2 501,3	502,0 500,7	503,7 503,8	503,9 6841,0	-	-
140	10	479,7 483,0	499,1 503,9	501,1 501,4	501,9 500,8	503,7 503,8	504,0 6841,0	-	-
145	30	524,7 504,0	500,3 502,5	503,3 503,6	501,5 502,0	503,3 2664,0	-	-	-
147	30	525,0 504,0	500,4 502,4	503,4 503,6	501,7 502,0	503,4 2664,0	-	-	-

- Belastungszeit

= Entlastungszeit

Tabelle 11: Zusammenstellung der Be- und Entlastungszeiten der langfristig untersuchten Probekörper

Probekörper Nr.	Belastungsverhältnis $\tau/\tau_{Br}$ (%)	Dauer der Be- und Entlastungszeiten (Stunden)							
		1. Belastung Entlastung	2. Belastung Entlastung	3. Belastung Entlastung	4. Belastung Entlastung	5. Belastung Entlastung	6. Belastung Entlastung	7. Belastung Entlastung	8. Belastung Entlastung
49	10	- 2014 = 2858	2014 5882	-	-	-	-	-	-
51	10	2013 2857	2012 5882	-	-	-	-	-	-
61	30	1987 2690	2012 5882	-	-	-	-	-	-
63	30	1986 2690	2012 5882	-	-	-	-	-	-
92	10	2013 2857	2012 5882	-	-	-	-	-	-
94	10	2014 2858	2014 5882	-	-	-	-	-	-
106	30	1986 2690	2012 5882	-	-	-	-	-	-
108	30	1986 2691	2011 5882	-	-	-	-	-	-
134	10	2013 2858	2014 5884	-	-	-	-	-	-
136	10	2013 2857	2012 5882	-	-	-	-	-	-
141	30	1986 2691	2011 5882	-	-	-	-	-	-
143	30	1987 2690	2012 5882	-	-	-	-	-	-

- Belastungszeit  
= Entlastungszeit

Tabelle 12: Zusammenstellung der Be- und Entlastungszeiten der langfristig untersuchten Probekörper

Probekörper Nr.	Belastungs- verhältnis $\tau/\tau_{Br}(\%)$	Dauer der Be- und Entlastungszeiten (Stunden)							
		1. Belastung Entlastung	2. Belastung Entlastung	3. Belastung Entlastung	4. Belastung Entlastung	5. Belastung Entlastung	6. Belastung Entlastung	7. Belastung Entlastung	8. Belastung Entlastung
44	10	- 17445	-	-	-	-	-	-	-
46	10	17445	-	-	-	-	-	-	-
62	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
64	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
68	30	17661	-	-	-	-	-	-	-
70	30	17661	-	-	-	-	-	-	-
86	10	17445	-	-	-	-	-	-	-
88	10	17445	-	-	-	-	-	-	-
100	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
102	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
107	30	17661	-	-	-	-	-	-	-
109	30	17661	-	-	-	-	-	-	-
128	10	17445	-	-	-	-	-	-	-
130	10	17445	-	-	-	-	-	-	-
142	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
144	20	17445	-	-	-	-	-	-	-
149	30	17661	-	-	-	-	-	-	-
151	30	17661	-	-	-	-	-	-	-

- Belastungszeit

Tabelle 13 Zusammenstellung der Be- und Entlastungszeiten der langfristig untersuchten Probekörper.  
Darmstädter Versuche

Probekörper Nr.	Belastungs- verhältnis $\tau/\tau_{Br}$ (%)	Belastung	Belastung	Entlastung
		0°C	40°C	40°C
111	10	2254	-	3117
113	10	2254	-	3117
119	30	2254	-	3117
120	30	2254	-	3117
152	10	2254	-	3116
153	10	2255	-	3117
163	30	2253	-	3117
167	30	2253	-	3117
99	10	2254	3096	-
114	10	2254	3096	-
115	30	2253	3096	-
116	30	2254	3096	-
118	30	2254	3096	-
139	10	2254	3096	-
154	10	2254	3096	-
156	30	2253	3096	-
157	30	2253	3096	-
164	30	2253	3096	-

Tabelle 14 : Geometrische Kennwerte, Belastungsverhältnis und Belastungs- bzw. Entlastungszeiten der Bauteilkriechversuche

Element	$J_0$ mm <sup>4</sup> /m	$J_u$ mm <sup>4</sup> /m	d mm	$G_0$ N/mm <sup>2</sup>	$\ell$ mm	$\tau/\tau_{Br}$	$t_B$ h	$t_E$ h
I.1.1	133	133	100	4,87	3200	13	2039	1854
I.1.2	133	133	100	4,39	3200	13	3839	4369
I.2.1	133	133	100	5,12	3200	13	2038	1854
II.1.1	181077	782	80	1,66	4000	18	1461	1877
II.2.1	181077	782	40	3,36	3000	27	2482	-
III.1.1	138923	3562	60	2,26	4000	35	1486	-
III.2.1	138923	3562	60	3,84	4000	62	1487	10514
IV. 1.1	146284	3042	30	2,96	3000	44	1080	-
IV. 2.1	146284	3042	80	3,70	4500	28	1078	-
V. 1.1	148822	622	60	2,27	3500	23	1482	8858
V. 2.1	148822	622	60	4,31	3500	49	1650	8689
VI.1.1	148822	766	50	3,25	3500	65	1223	-
VI.2.1	148822	766	30	2,66	3500	73	1225	-

Elementnummer, Versuchsnummer, erste oder zweite Belastung

Tabelle 15 : Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1. Belastung		2. Belastung		3. Belastung		4. Belastung		5. Belastung		6. Belastung		7. Belastung		8. Belastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
54	0,119	0,446	0,185	0,263	0,157	0,329	0,126	0,338	0,142	0,307	0,073	0,354	0,086	0,292	0,128	0,351
56	0,130	0,380	0,083	0,322	0,087	0,348	0,080	0,346	0,075	0,319	0,080	0,365	0,052	0,345	0,085	0,327
133	0,144	0,351	0,082	0,358	0,074	0,380	0,095	0,321	0,046	0,390	0,093	0,337	0,103	0,277	0,081	0,358
146	0,177	0,325	0,050	0,445	0,076	0,374	0,096	0,353	0,047	0,346	0,077	0,343	0,099	0,315	0,088	0,317
+	0,140	0,375	0,094	0,334	0,094	0,359	0,099	0,337	0,071	0,335	0,081	0,349	0,086	0,296	0,094	0,336
72	0,074	0,406	0,088	0,341	0,041	0,413	0,104	0,260	0,074	0,322	0,068	0,340	0,073	0,320	0,073	0,309
74	0,125	0,326	0,158	0,257	0,106	0,307	0,111	0,314	0,124	0,297	0,085	0,340	0,099	0,324	0,073	0,314
132	0,091	0,383	0,096	0,345	0,092	0,344	0,117	0,289	0,085	0,350	0,087	0,326	0,084	0,330	0,073	0,353
148	0,126	0,343	0,135	0,290	0,108	0,324	0,118	0,285	0,098	0,332	0,073	0,383	0,075	0,375	0,088	0,347
+	0,099	0,363	0,114	0,311	0,081	0,344	0,112	0,288	0,093	0,325	0,078	0,348	0,082	0,336	0,076	0,330

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 16: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1. Belastung		2. Belastung		3. Belastung		4. Belastung		5. Belastung		6. Belastung		7. Belastung		8. Belastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
53	0,099	0,395	0,095	0,288	0,070	0,396	0,091	0,306	0,077	0,291	0,054	0,296	-	-	-	-
55	0,100	0,396	0,076	0,363	0,240	0,260	0,188	0,315	0,223	0,200	0,055	0,261	-	-	-	-
96	0,156	0,388	0,156	0,294	0,171	0,279	0,129	0,368	0,121	0,277	0,112	0,262	-	-	-	-
98	0,219	0,332	0,167	0,280	0,137	0,277	0,136	0,290	0,087	0,297	0,099	0,299	-	-	-	-
138	0,174	0,302	0,210	0,259	0,081	0,345	0,113	0,299	0,064	0,344	0,142	0,257	-	-	-	-
140	0,210	0,302	0,145	0,287	0,087	0,347	0,081	0,364	0,045	0,416	0,104	0,256	-	-	-	-
+	0,157	0,350	0,136	0,293	0,123	0,306	0,120	0,322	0,090	0,303	0,092	0,265	-	-	-	-
71	0,103	0,347	0,070	0,346	0,070	0,324	0,073	0,308	0,070	0,298	-	-	-	-	-	-
83	0,092	0,356	0,086	0,327	0,068	0,335	0,091	0,320	0,062	0,317	-	-	-	-	-	-
110	0,123	0,362	0,101	0,336	0,096	0,334	0,086	0,338	0,091	0,310	-	-	-	-	-	-
112	0,126	0,366	0,112	0,327	0,117	0,301	0,080	0,330	0,118	0,264	-	-	-	-	-	-
145	0,136	0,358	0,115	0,394	0,113	0,305	0,083	0,325	0,135	0,269	-	-	-	-	-	-
147	0,134	0,350	0,138	0,304	0,105	0,333	0,094	0,325	0,101	0,294	-	-	-	-	-	-
+	0,118	0,355	0,102	0,333	0,094	0,318	0,085	0,323	0,095	0,288	-	-	-	-	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 17: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1. Belastung		2. Belastung		3. Belastung		4. Belastung		5. Belastung		6. Belastung		7. Belastung		8. Belastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
49	0,195	0,281	0,082	0,261	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0,087	0,369	0,073	0,352	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	0,117	0,356	0,068	0,291	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	0,214	0,291	0,083	0,297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
134	0,202	0,307	0,117	0,289	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
136	0,180	0,303	0,115	0,249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,166	0,310	0,089	0,288	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	0,195	0,303	0,102	0,241	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0,177	0,276	0,101	0,249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	0,173	0,332	0,079	0,293	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
108	0,113	0,368	0,054	0,319	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
141	0,128	0,360	0,076	0,287	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
143	0,151	0,338	0,114	0,264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,153	0,331	0,090	0,267	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 18: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1. Belastung		2. Belastung		3. Belastung		4. Belastung		5. Belastung		6. Belastung		7. Belastung		8. Belastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
44	0,216	0,260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0,204	0,264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	0,170	0,298	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	0,148	0,319	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
128	0,131	0,343	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130	0,174	0,302	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,172	0,297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	0,223	0,265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0,098	0,347	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,190	0,307	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
102	0,206	0,299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
142	0,261	0,266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
144	0,159	0,318	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,186	0,297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 19: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1. Belastung		2. Belastung		3. Belastung		4. Belastung		5. Belastung		6. Belastung		7. Belastung		8. Belastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
68	0,179	0,290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,194	0,289	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
107	0,132	0,344	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
109	0,138	0,342	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
149	0,119	0,353	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
151	0,180	0,326	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,155	0,323	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 20: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$   
Darmstädter Versuche

Probekörper Nr.	Belastung bei 0°C		Belastung bei 40°C	
	m	n	m	n
99	0,351	0,200	2,958	0,023
114	0,209	0,232	2,190	0,030
139	0,385	0,225	1,216	0,153
154	0,323	0,255	1,298	0,127
+	0,309	0,227	1,823	0,081
115	0,136	0,301	1,180	0,142
116	0,171	0,271	0,831	0,209
118	0,335	0,213	1,421	0,158
156	0,123	0,326	0,456	0,242
157	0,241	0,256	0,535	0,229
164	0,203	0,277	0,535	0,232
+	0,177	0,285	0,734	0,200
111	0,096	0,342	-	-
113	0,273	0,283	-	-
152	0,244	0,271	-	-
153	0,396	0,235	-	-
+	0,203	0,273	-	-
119	0,192	0,259	-	-
120	0,203	0,250	-	-
163	0,159	0,305	-	-
167	0,139	0,346	-	-
+	0,179	0,278	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 21: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Element Nr.	Belastung	
	m	n
I. 1.1	0,073	0,388
I. 1.2	0,044	0,374
I. 1.1	0,078	0,396
+	0,042	0,460
II. 1.1	0,138	0,338
II. 2.1	0,163	0,336
+	0,147	0,345
III. 1.1	0,088	0,414
III. 2.1	0,166	0,385
+	0,121	0,396
IV. 1.1	0,109	0,321
IV. 2.1	0,110	0,322
+	0,110	0,322
V. 1.1	0,202	0,327
V. 2.1	0,185	0,340
+	0,193	0,334
VI. 1.1	0,173	0,343
VI. 2.1	0,175	0,348
+	0,174	0,346

Elementnummer, Versuchsnummer, erste oder zweite Belastung

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 22: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1.Entlastung		2.Entlastung		3.Entlastung		4.Entlastung		5.Entlastung		6.Entlastung		7.Entlastung		8.Entlastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
54	0,170	0,296	0,223	0,299	0,266	0,336	0,250	0,361	0,403	0,244	0,184	0,309	0,455	0,222	0,176	0,221
56	0,333	0,303	0,229	0,377	0,334	0,318	0,735	0,181	0,123	0,386	0,140	0,380	0,484	0,231	0,123	0,279
133	0,218	0,200	0,239	0,287	0,152	0,284	0,225	0,292	0,229	0,296	0,346	0,219	0,276	0,265	0,153	0,243
146	0,090	0,406	0,175	0,293	0,027	0,527	0,141	0,299	0,254	0,310	0,066	0,462	0,206	0,263	0,090	0,317
+	0,198	0,279	0,216	0,316	0,182	0,284	0,284	0,279	0,231	0,311	0,158	0,343	0,328	0,248	0,131	0,265
72	0,125	0,289	0,130	0,310	0,174	0,398	0,200	0,296	0,197	0,302	0,280	0,271	0,206	0,264	0,158	0,258
74	0,138	0,324	0,146	0,341	0,209	0,322	0,131	0,380	0,179	0,296	0,174	0,309	0,186	0,283	0,122	0,327
132	0,162	0,307	0,156	0,364	0,207	0,306	0,154	0,387	0,211	0,321	0,222	0,304	0,229	0,276	0,218	0,227
148	0,219	0,286	0,197	0,310	0,229	0,323	0,257	0,301	0,235	0,315	0,229	0,317	0,245	0,267	0,213	0,229
+	0,161	0,299	0,156	0,330	0,207	0,333	0,180	0,345	0,206	0,307	0,221	0,301	0,216	0,271	0,176	0,258

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

Tabelle 23: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

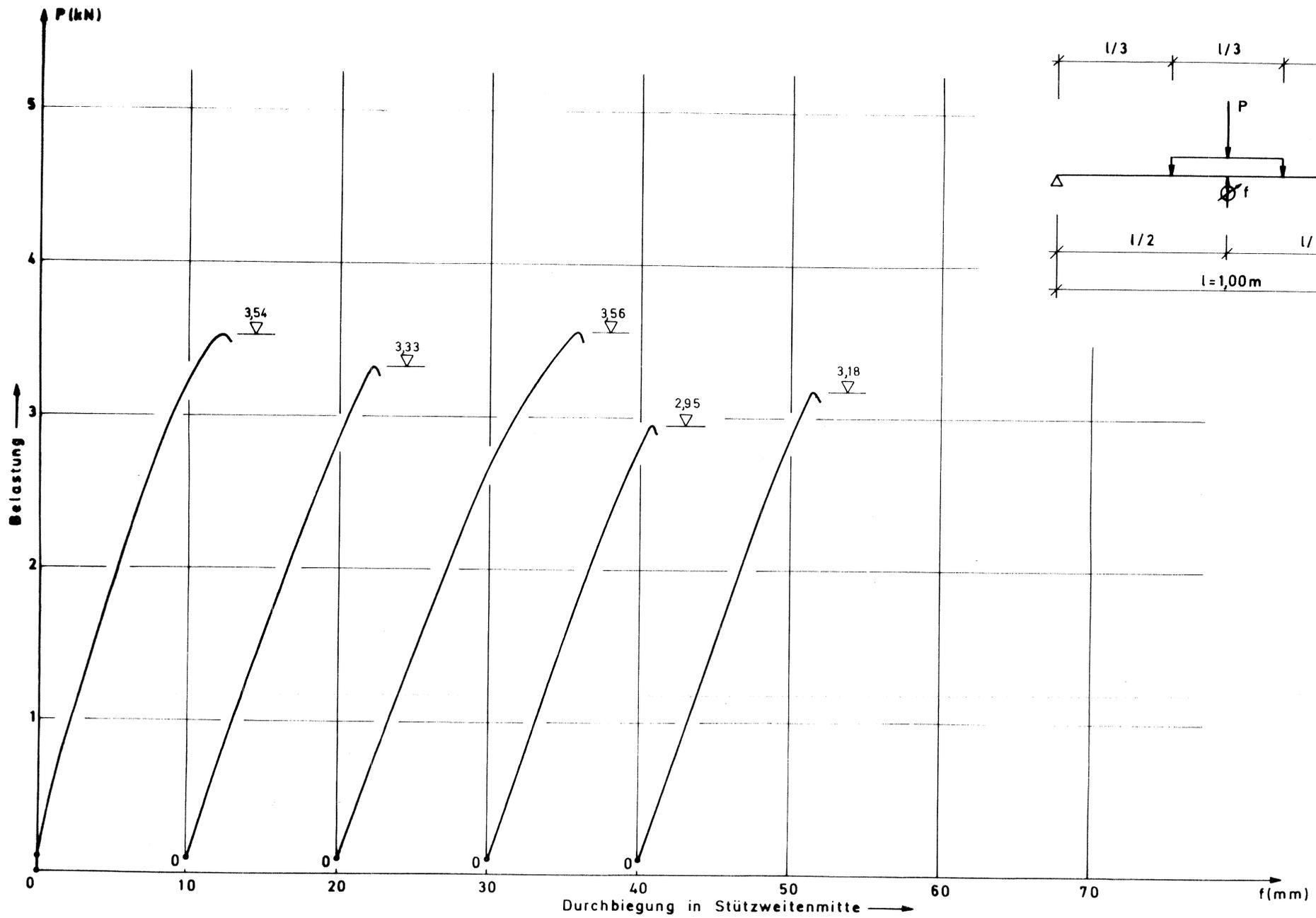
Probekörper Nr.	1.Entlastung		2.Entlastung		3.Entlastung		4.Entlastung		5.Entlastung		6.Entlastung		7.Entlastung		8.Entlastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
53	0,048	0,348	0,113	0,306	0,109	0,271	0,096	0,290	0,106	0,334	0,190	0,278	-	-	-	-
55	0,089	0,256	0,088	0,309	0,099	0,247	0,106	0,252	0,087	0,251	0,214	0,270	-	-	-	-
96	0,143	0,211	0,111	0,325	0,140	0,287	0,102	0,297	0,069	0,374	0,254	0,221	-	-	-	-
98	0,113	0,306	0,125	0,321	0,197	0,251	0,208	0,258	0,121	0,315	0,350	0,180	-	-	-	-
138	0,069	0,304	0,154	0,287	0,185	0,257	0,215	0,269	0,365	0,168	0,279	0,205	-	-	-	-
140	0,049	0,339	0,133	0,304	0,133	0,304	0,142	0,303	0,201	0,262	0,224	0,241	-	-	-	-
+	0,082	0,287	0,122	0,306	0,141	0,268	0,140	0,276	0,139	0,277	0,245	0,233	-	-	-	-
71	0,127	0,294	0,268	0,181	0,190	0,295	0,228	0,250	0,169	0,270	-	-	-	-	-	-
83	0,117	0,305	0,213	0,242	0,166	0,282	0,203	0,231	0,185	0,275	-	-	-	-	-	-
110	0,102	0,328	0,128	0,320	0,153	0,308	0,140	0,313	0,141	0,287	-	-	-	-	-	-
112	0,133	0,296	0,189	0,284	0,176	0,328	0,264	0,230	0,165	0,267	-	-	-	-	-	-
145	0,116	0,258	0,098	0,320	0,185	0,289	0,198	0,269	0,094	0,319	-	-	-	-	-	-
147	0,071	0,335	0,090	0,309	0,125	0,322	0,119	0,318	0,097	0,337	-	-	-	-	-	-
+	0,110	0,301	0,153	0,277	0,166	0,301	0,187	0,267	0,139	0,291	-	-	-	-	-	-

+ Mittelwerte der Regressionsrechnung

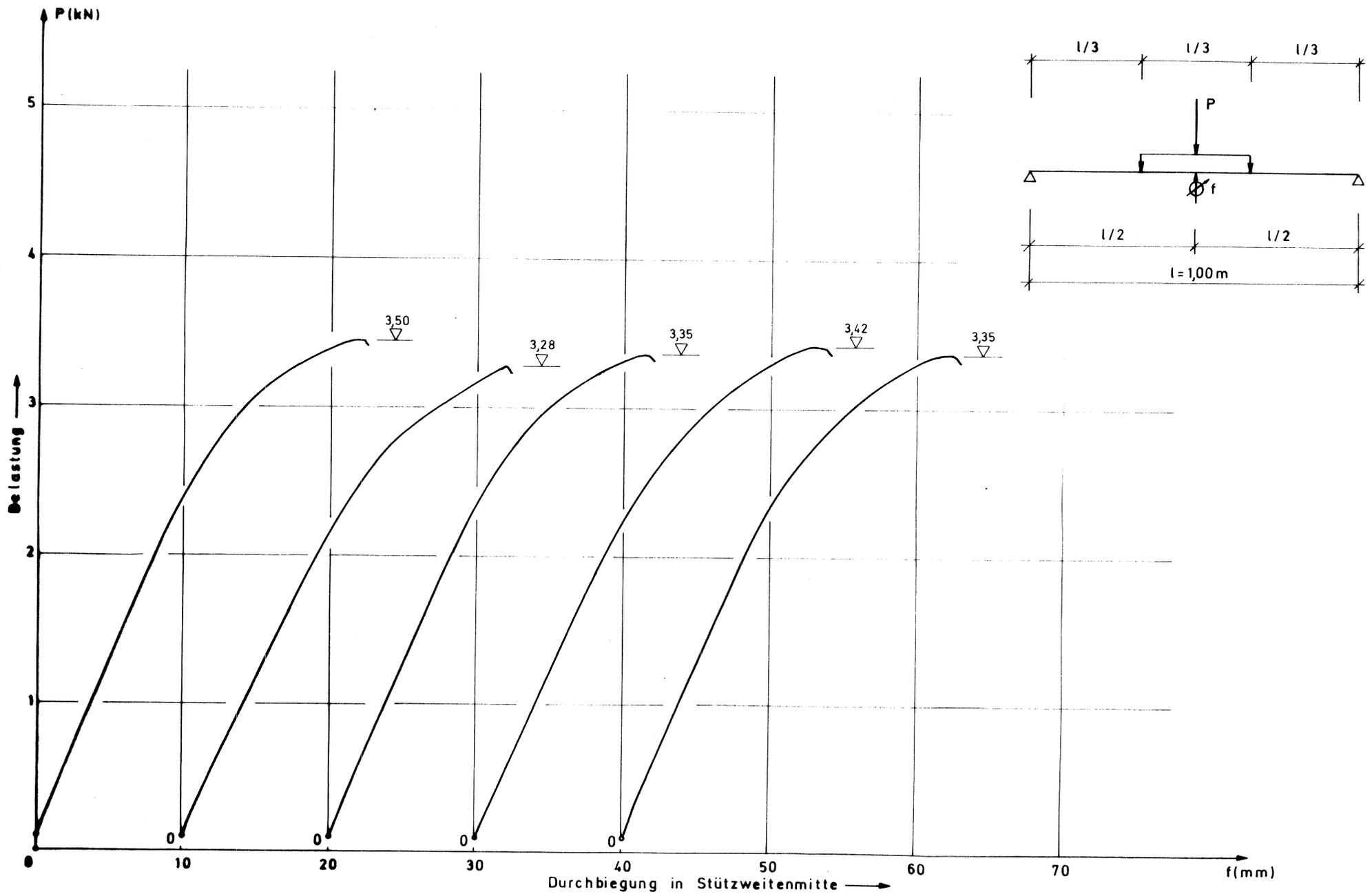
Tabelle 24: Zusammenstellung der Gleichungsparameter für die Kriechlinien der langfristig belasteten Probekörper  $\varphi_t = m \cdot t^n$

Probekörper Nr.	1.Entlastung		2.Entlastung		3.Entlastung		4.Entlastung		5.Entlastung		6.Entlastung		7.Entlastung		8.Entlastung	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
49	0,101	0,269	0,045	0,351	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0,038	0,338	0,155	0,196	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	0,062	0,270	0,115	0,297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	0,049	0,272	0,167	0,241	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
134	0,078	0,249	0,081	0,298	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
136	0,049	0,294	0,112	0,270	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,061	0,278	0,112	0,265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	0,057	0,255	0,217	0,208	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0,073	0,255	0,121	0,310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	0,075	0,257	0,102	0,301	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
108	0,067	0,259	0,064	0,345	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
141	0,117	0,224	0,086	0,310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
143	0,040	0,309	0,092	0,296	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	0,068	0,259	0,113	0,286	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

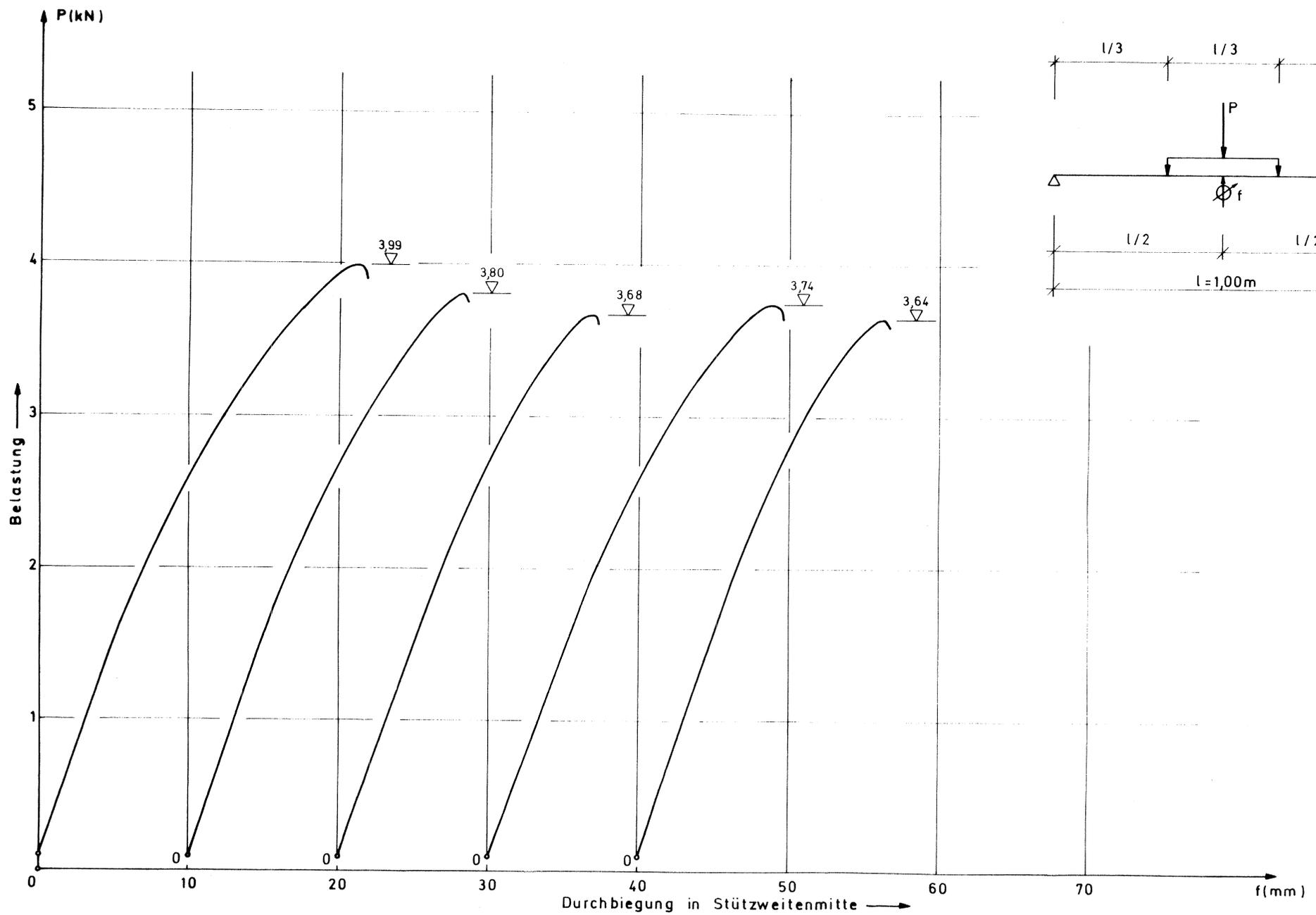
+ Mittelwerte der Regressionsrechnung



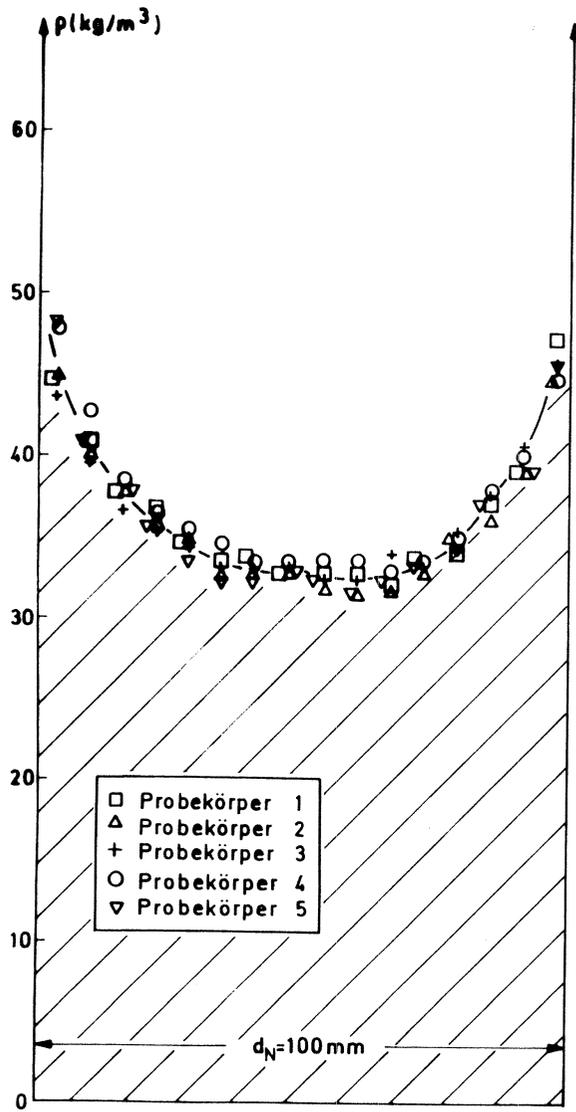
**Bild 1** : Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung, Biegeversuche zur Schubmodulbestimmung, Sandwichtyp 1



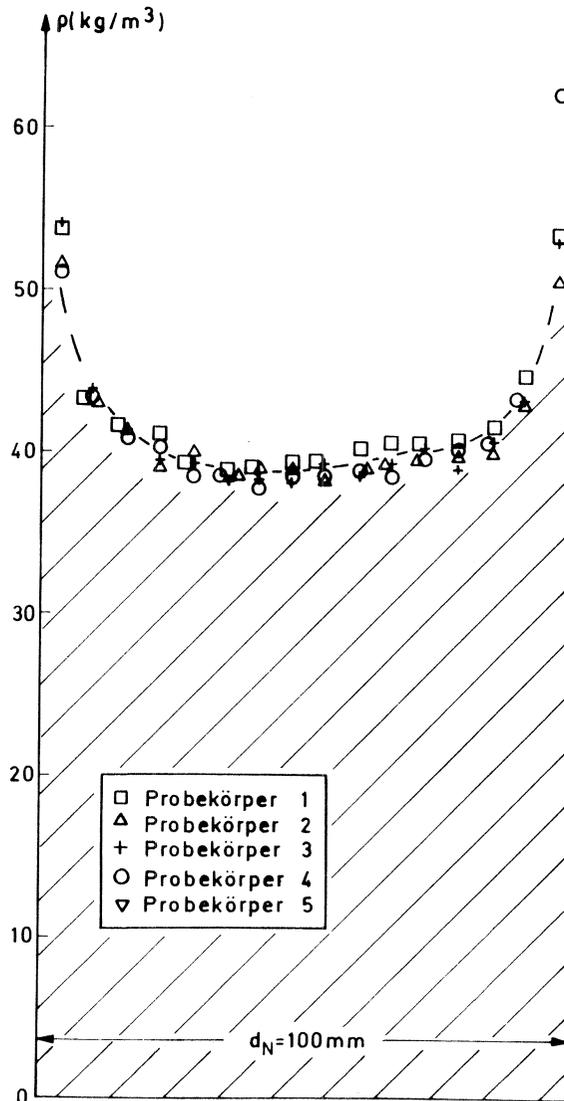
**Bild 2:** Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung, Biegeversuche zur Schubmodulbestimmung, Sandwichtyp 2



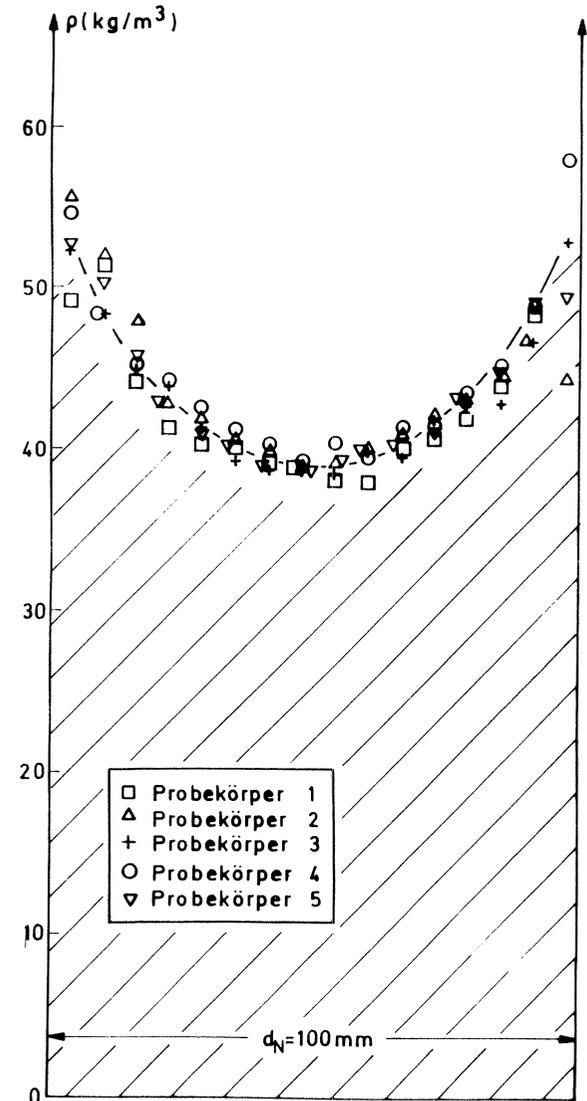
**Bild 3:** Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung, Biegeversuche zur Schubmodulbestimmung, Sandwichtyp 3



Sandwichtyp 1

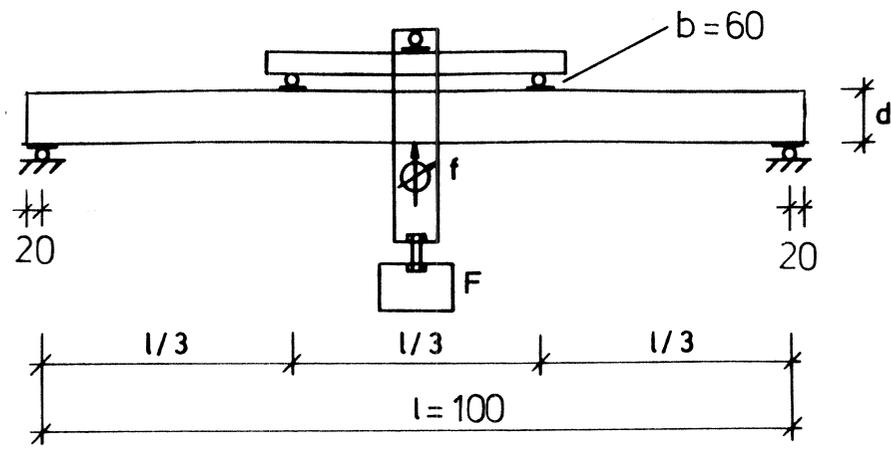


Sandwichtyp 2

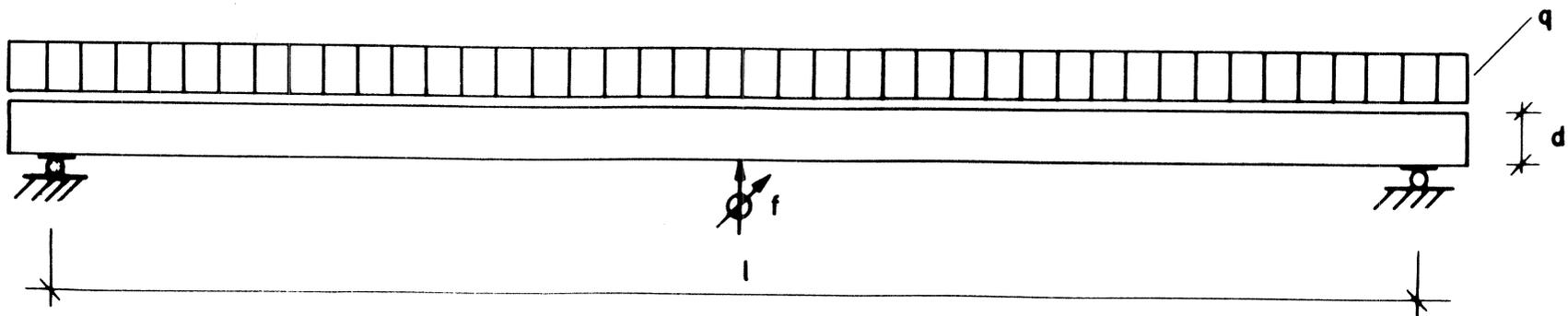


Sandwichtyp 3

Bild 4: Verteilung der Rohdichte über die Höhe

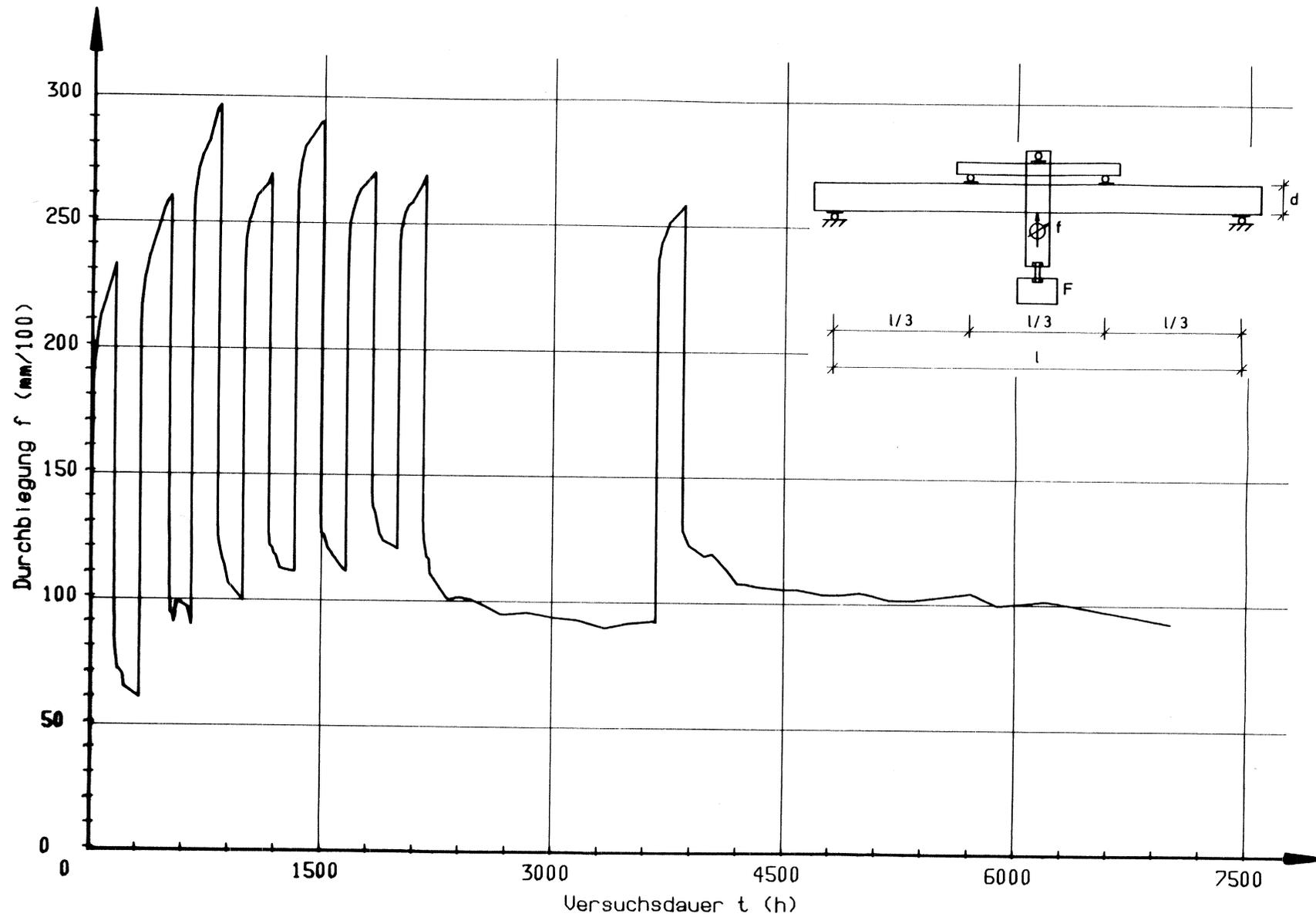


kurzer Balken

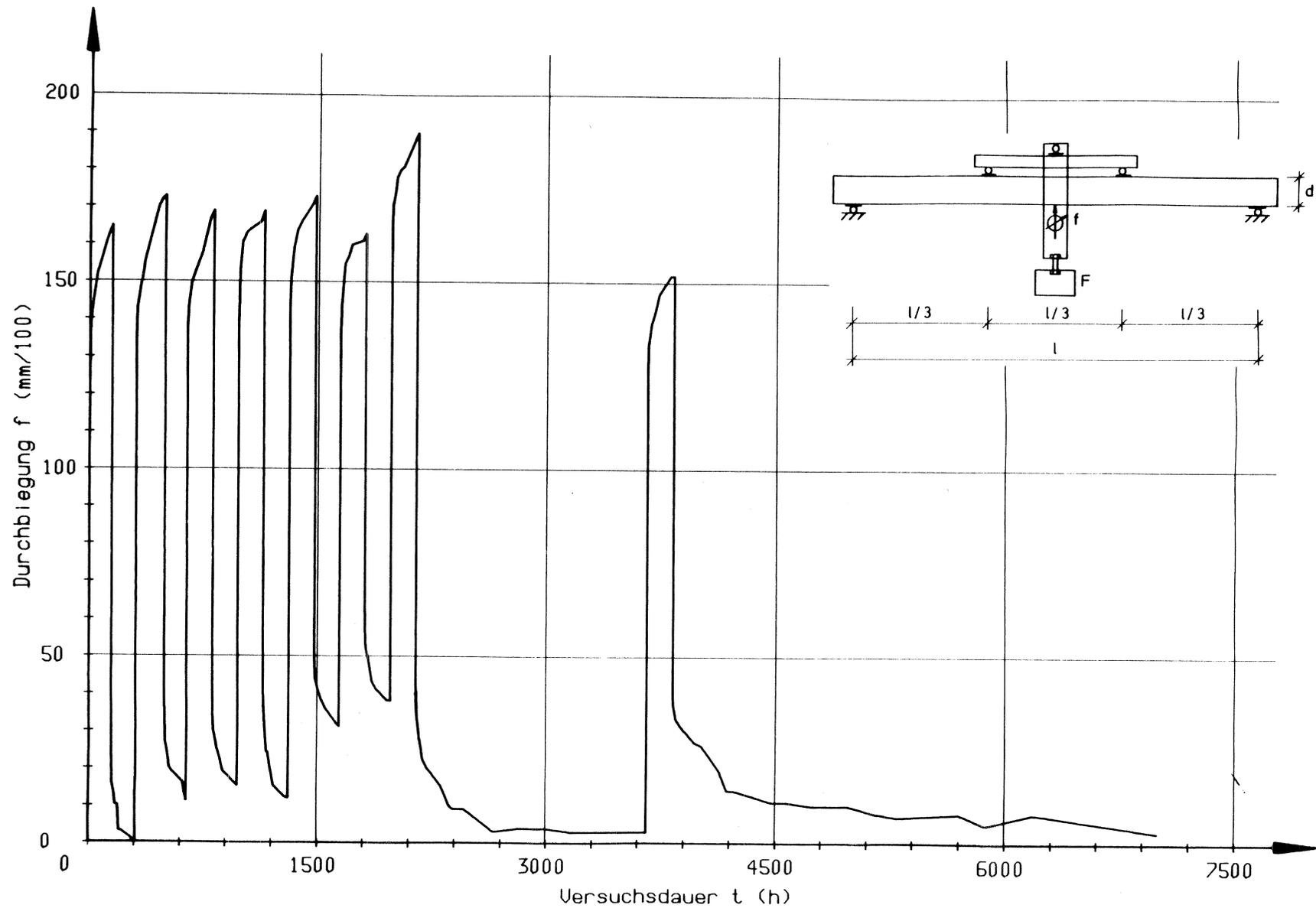


Bauteil

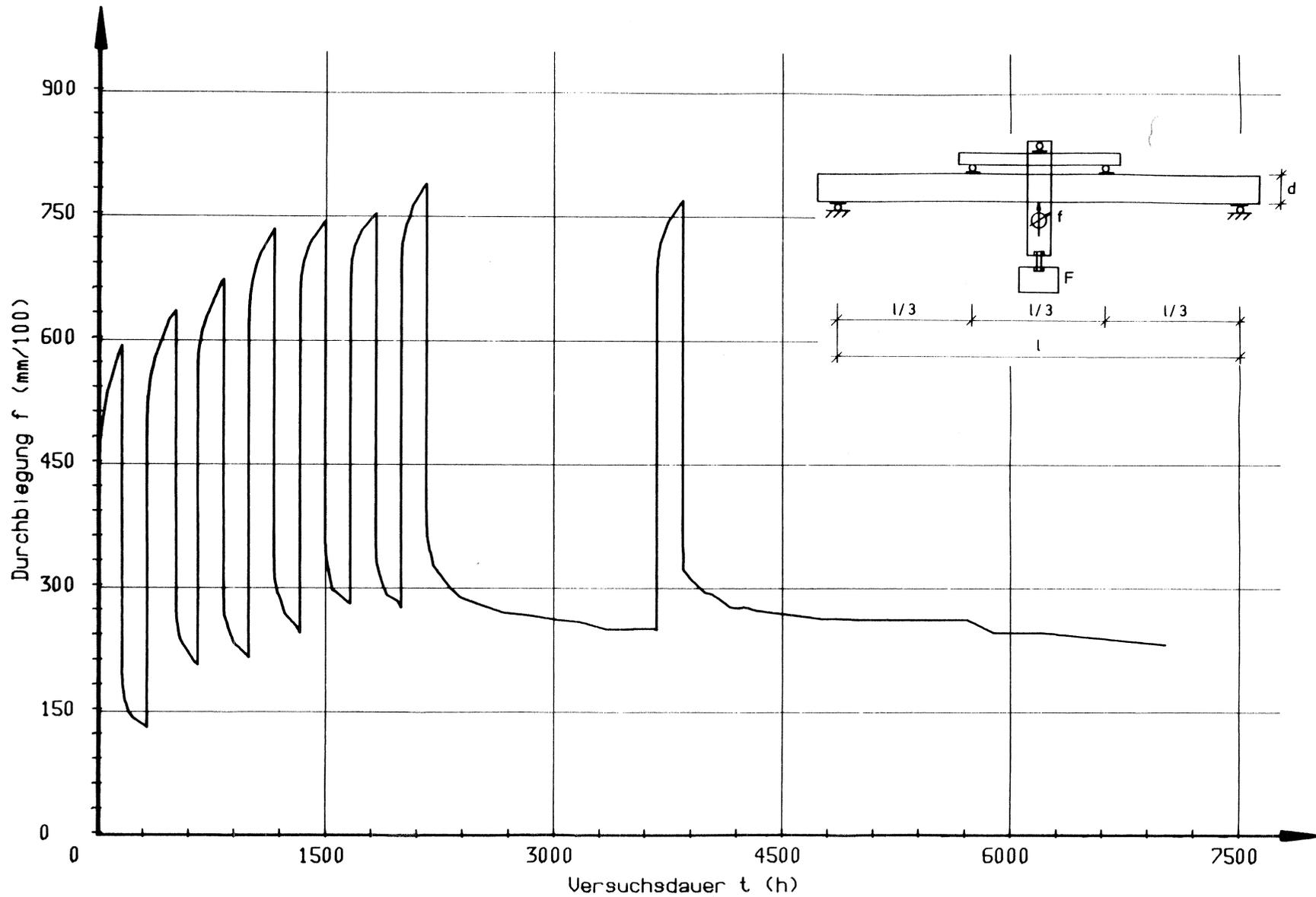
Bild 5: Versuchsaufbau der Kriechversuche



**Bild 6:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 54, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 7:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 56, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 8:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 72, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

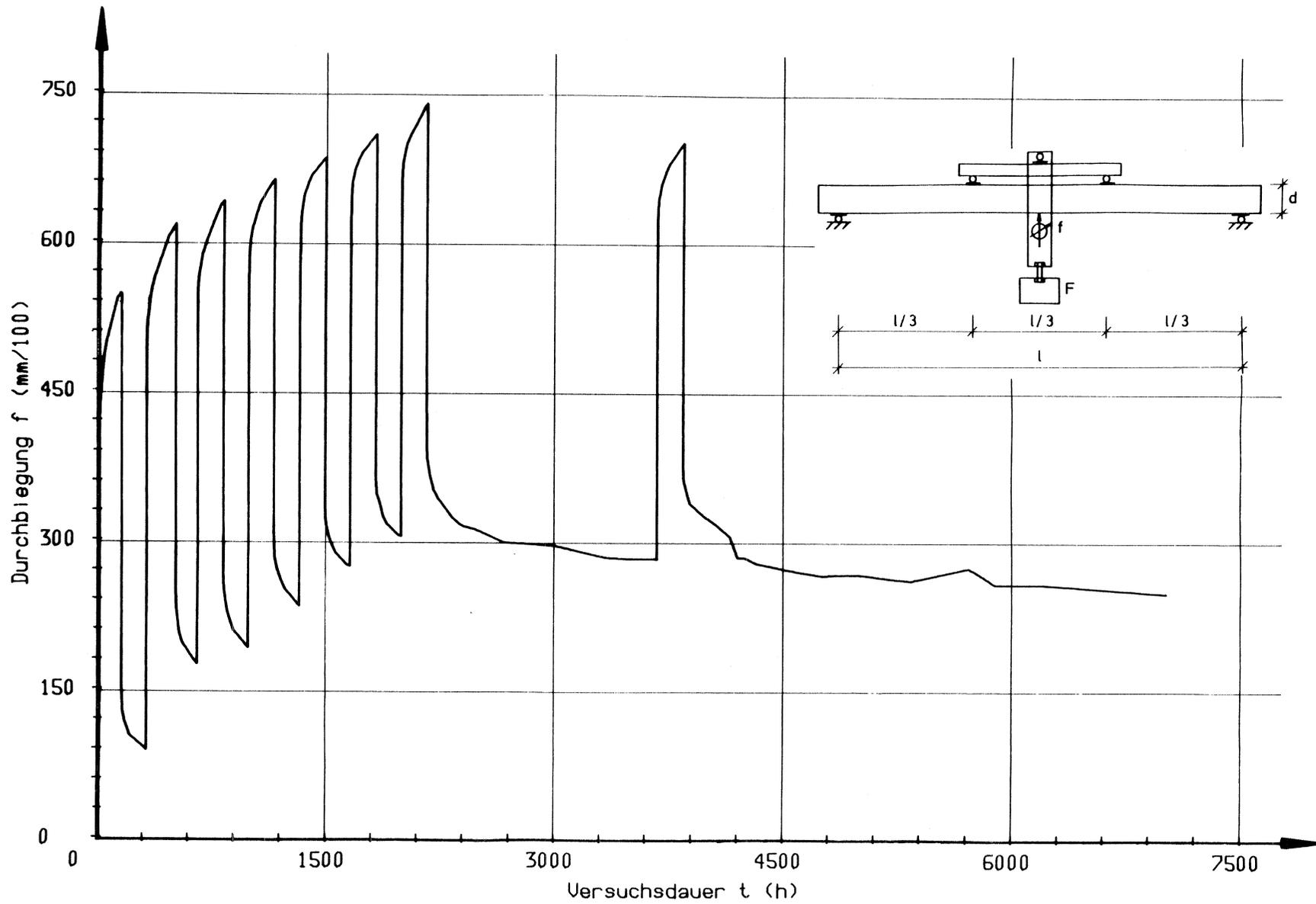
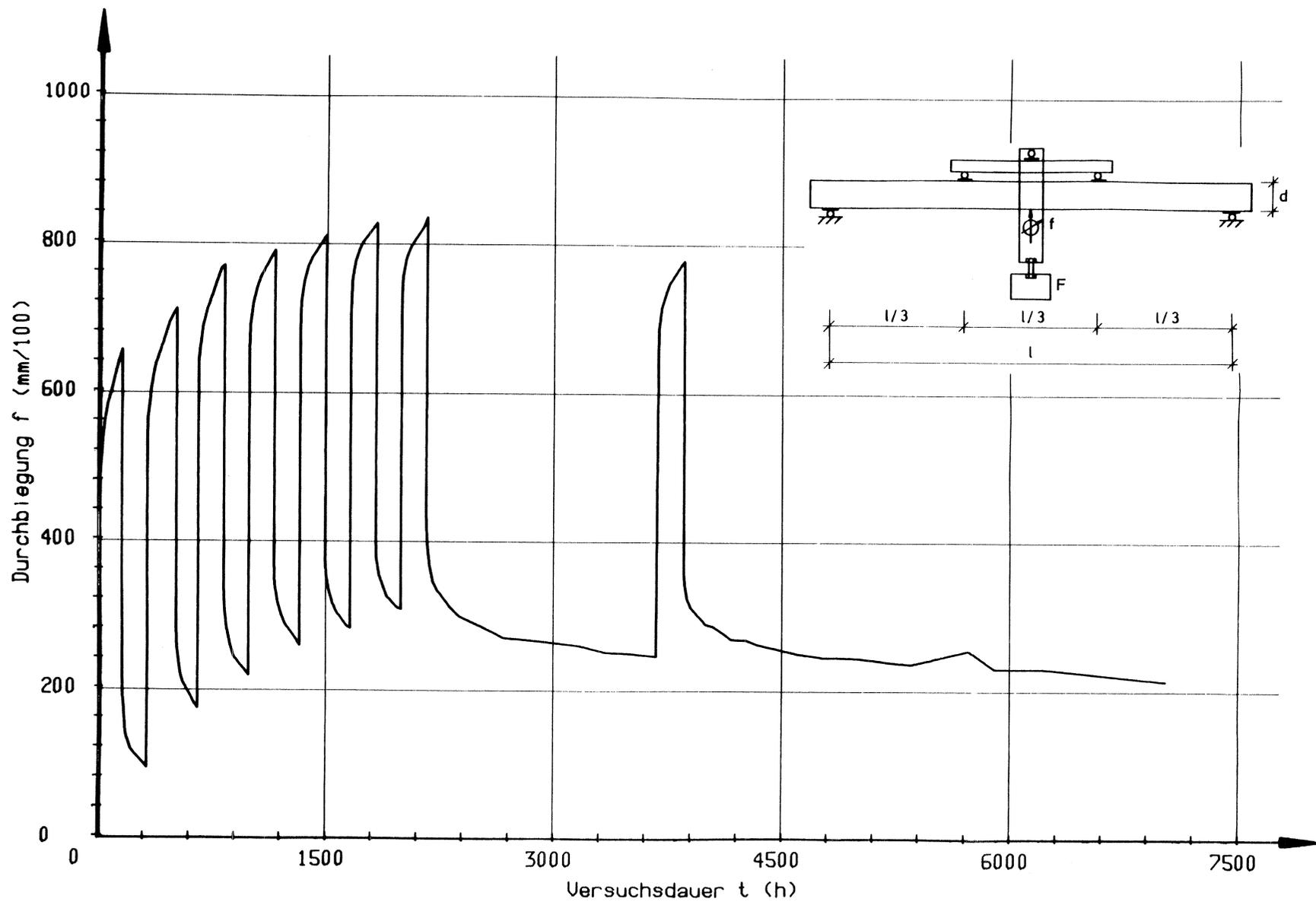


Bild 9: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 74, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 10:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 132, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

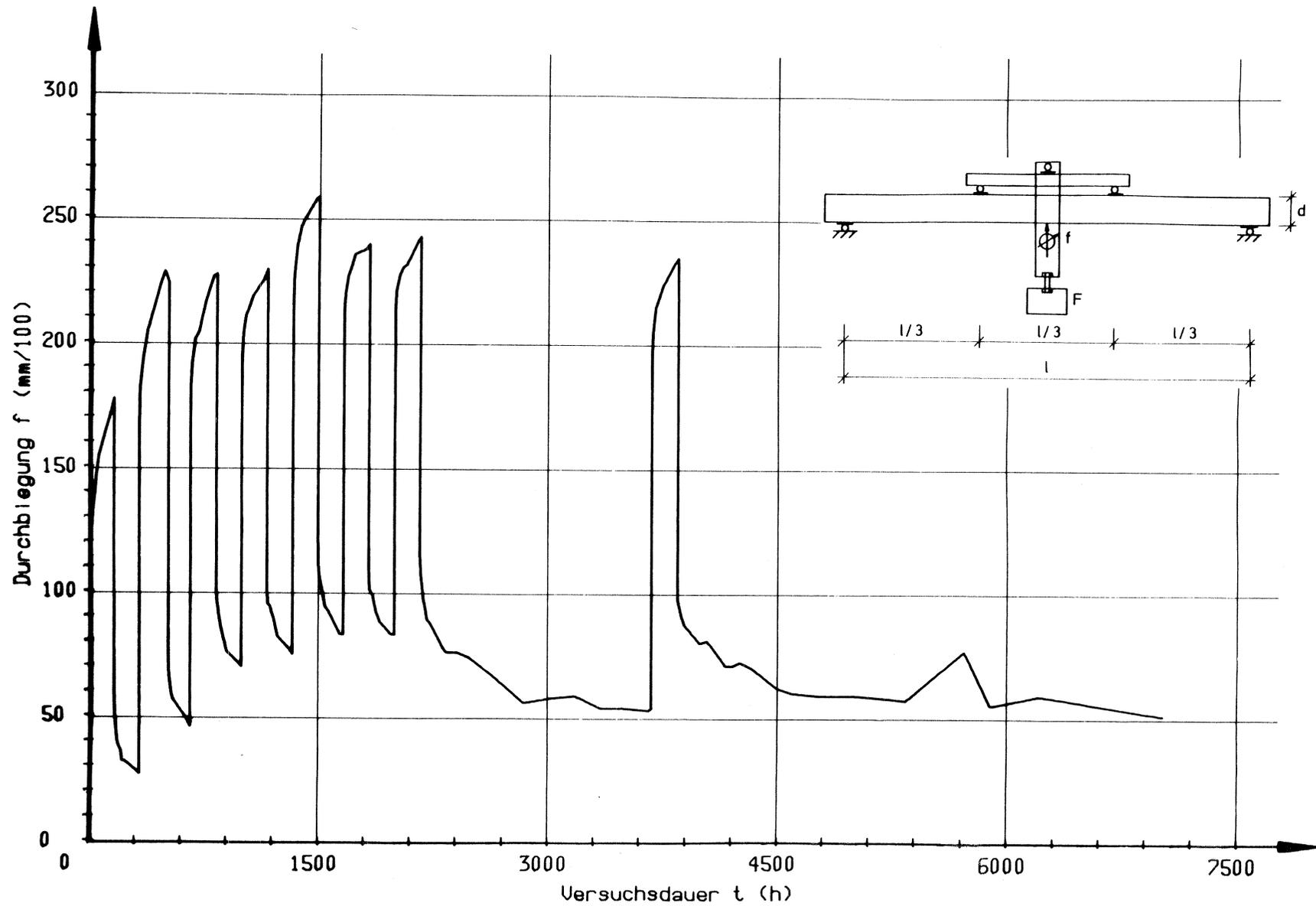
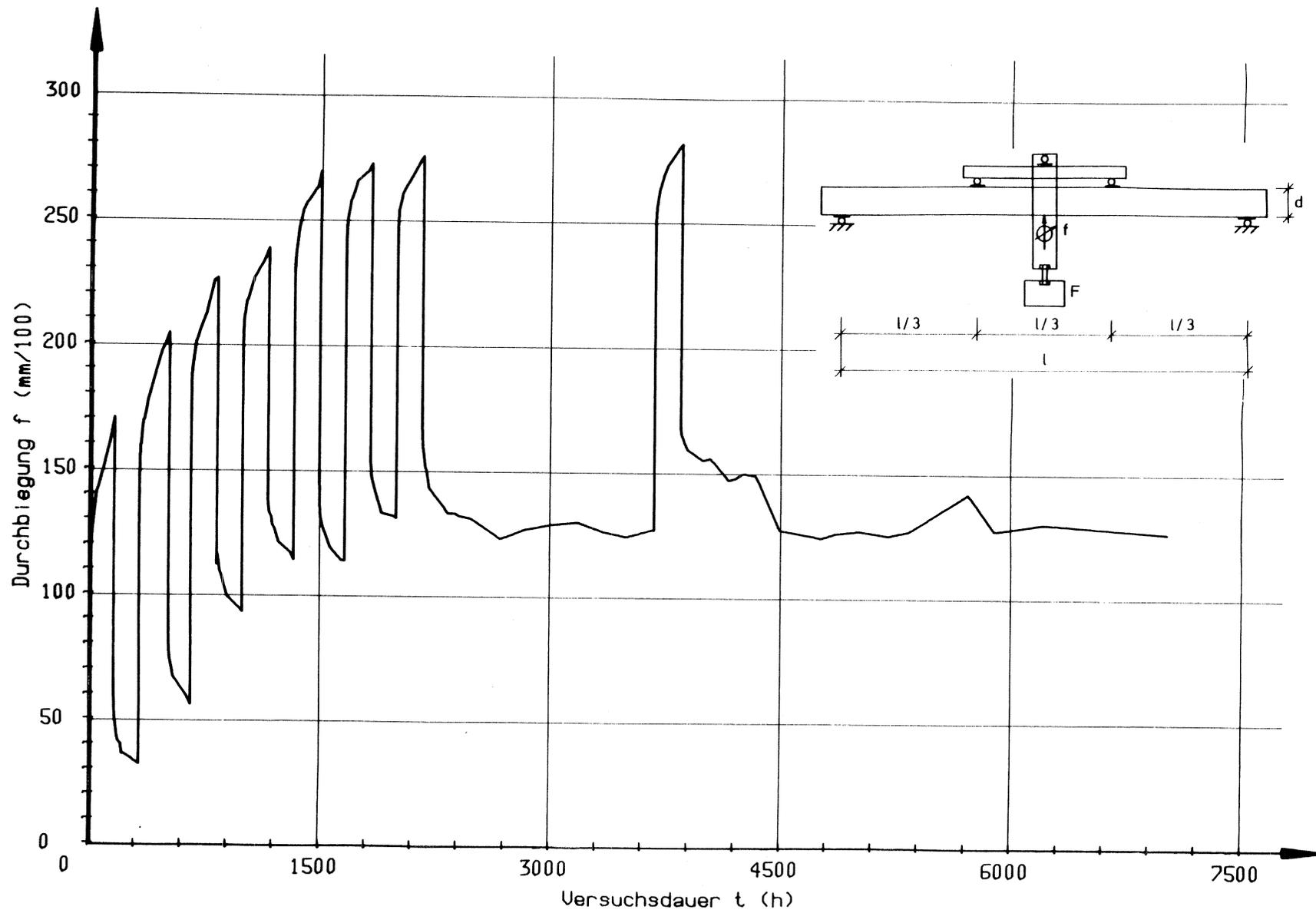
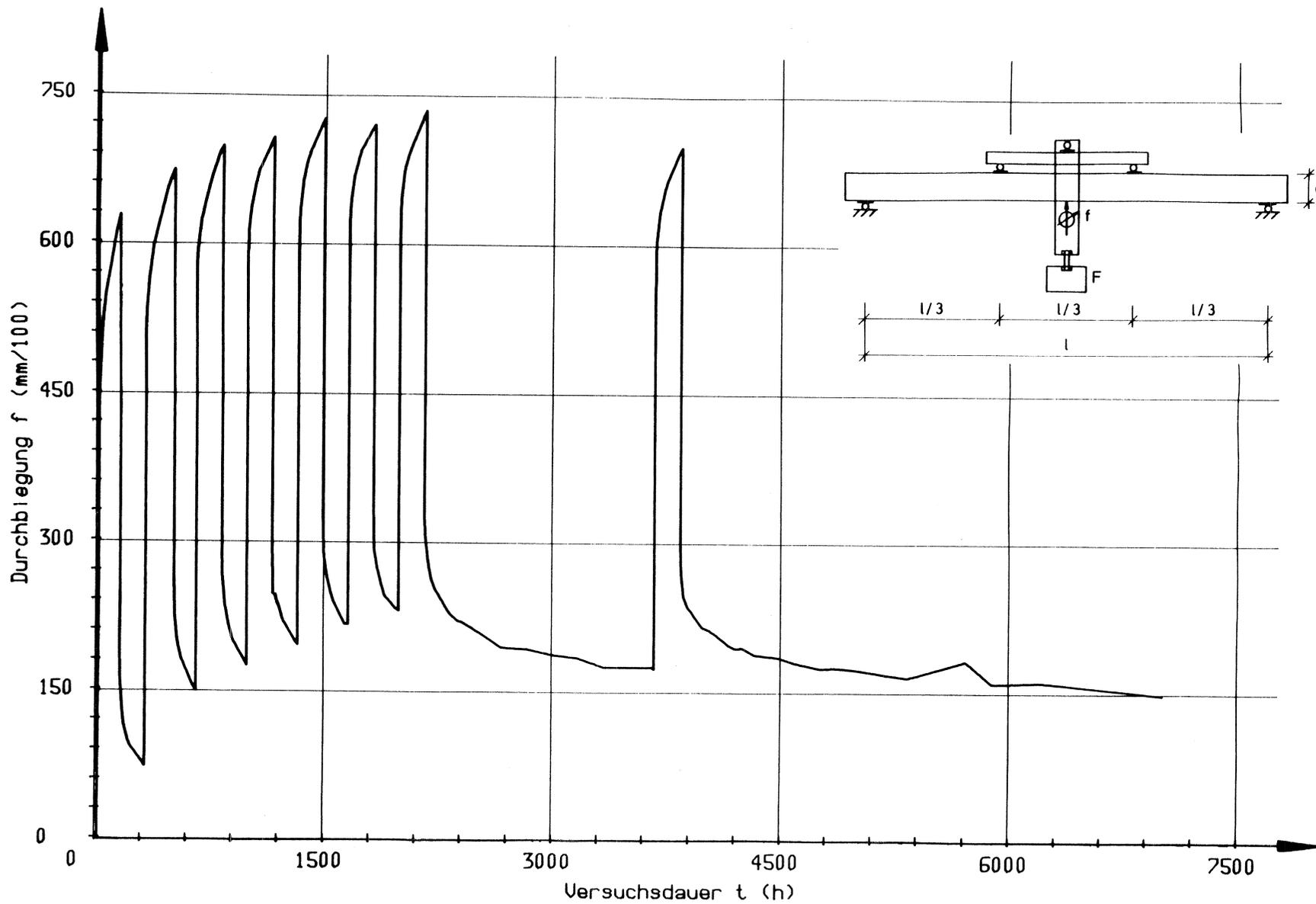


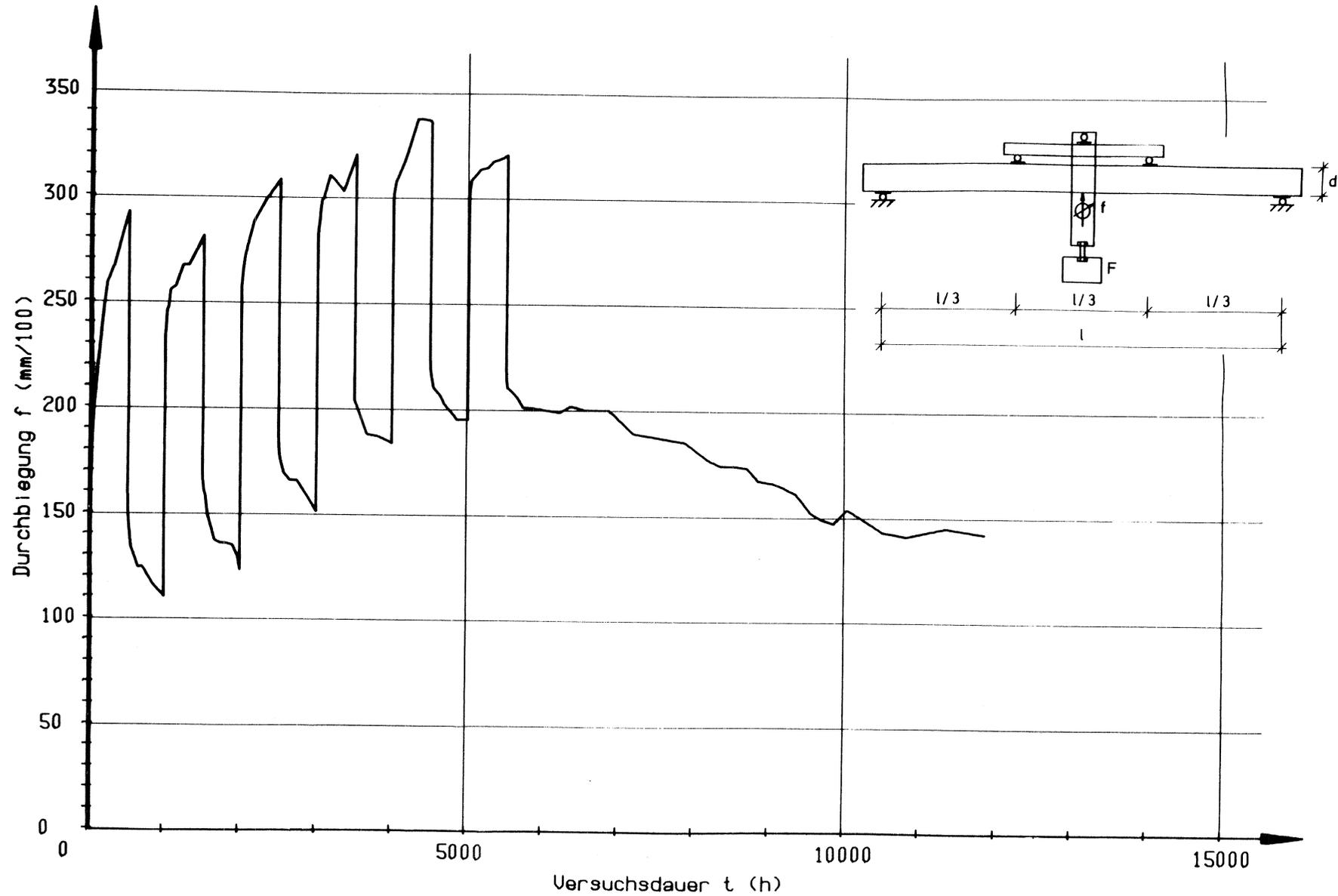
Bild 11: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 133, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 12:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 146, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 13:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 148, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 14:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 53, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

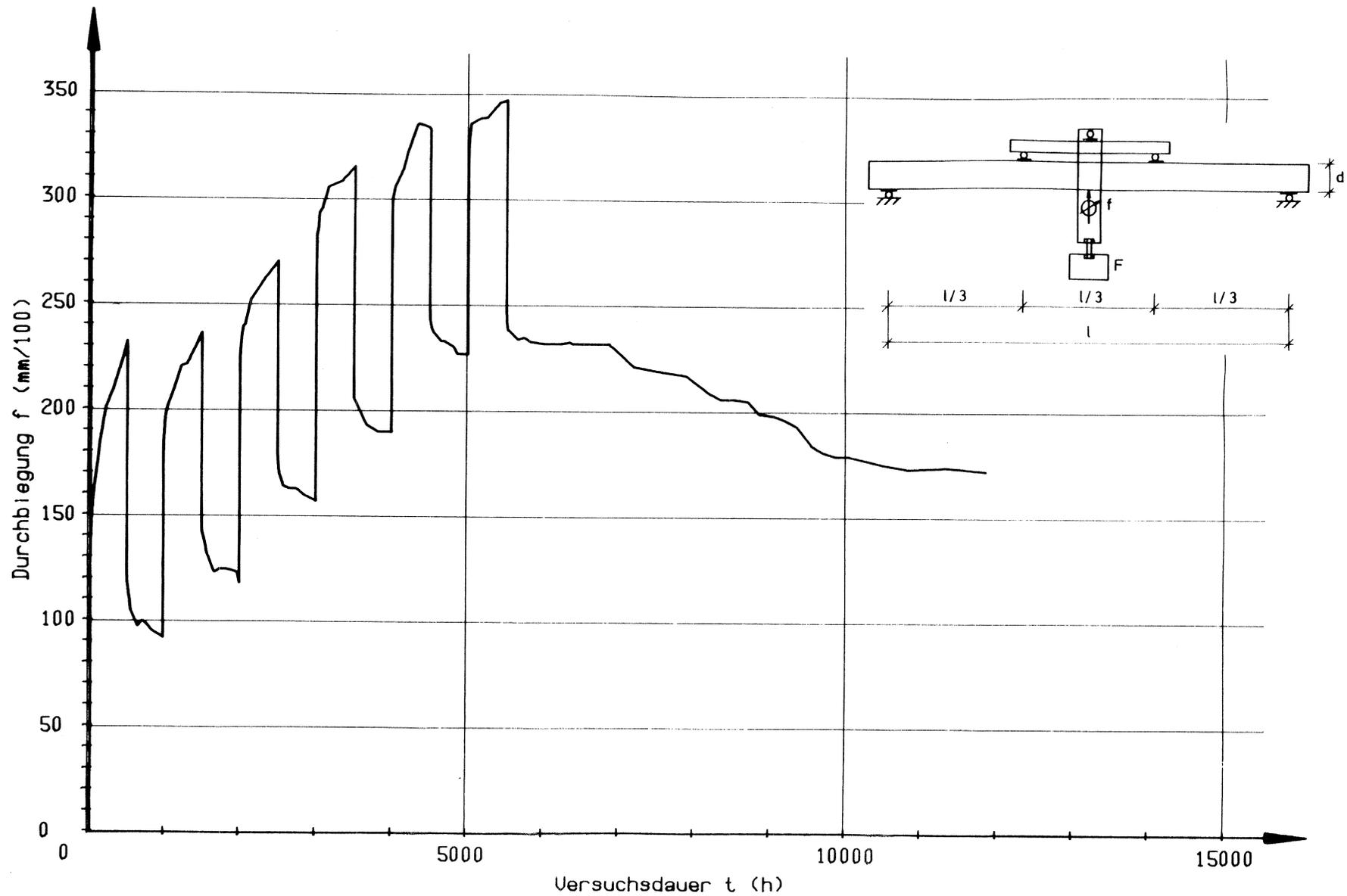
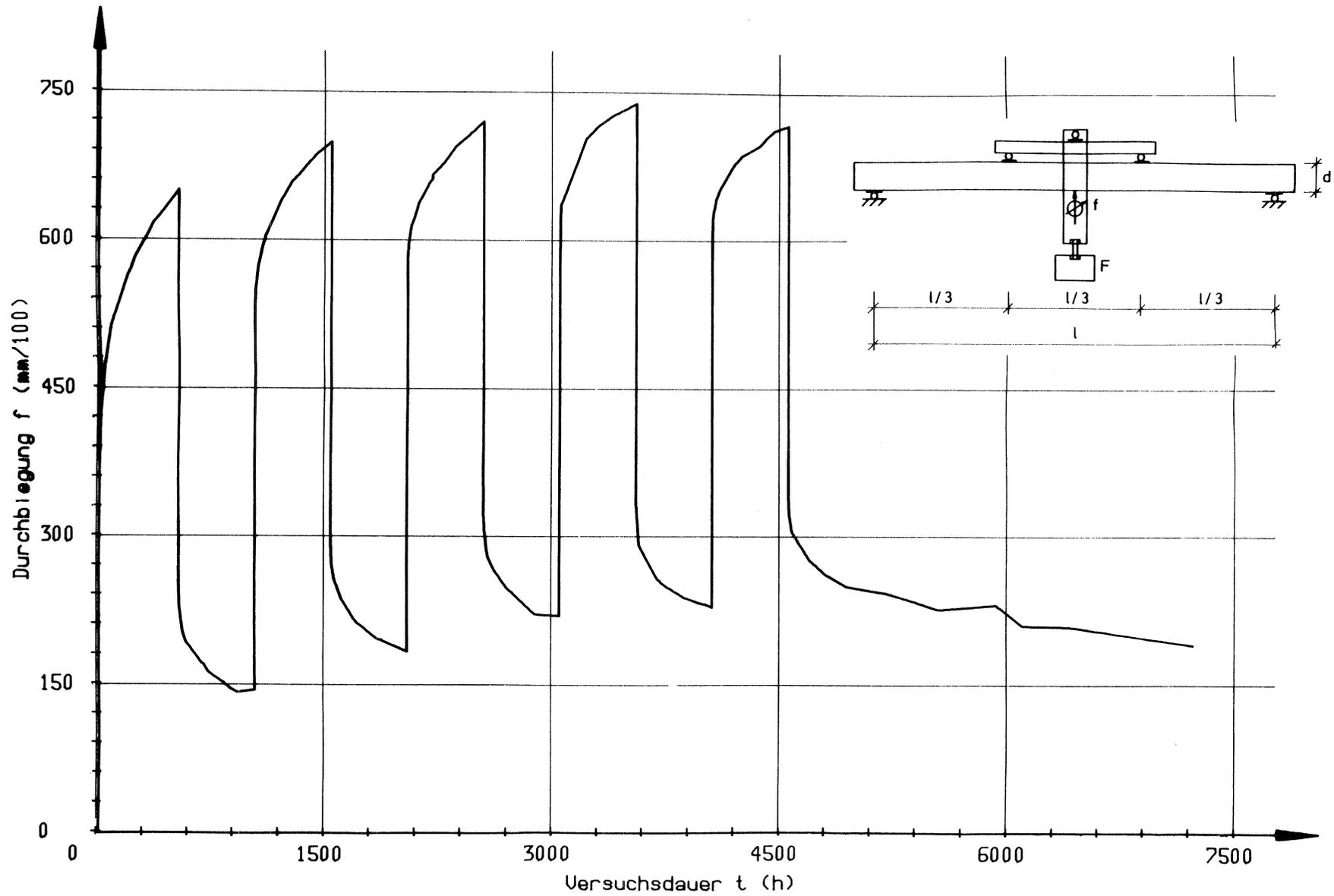


Bild 15: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 55, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 16:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 71, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

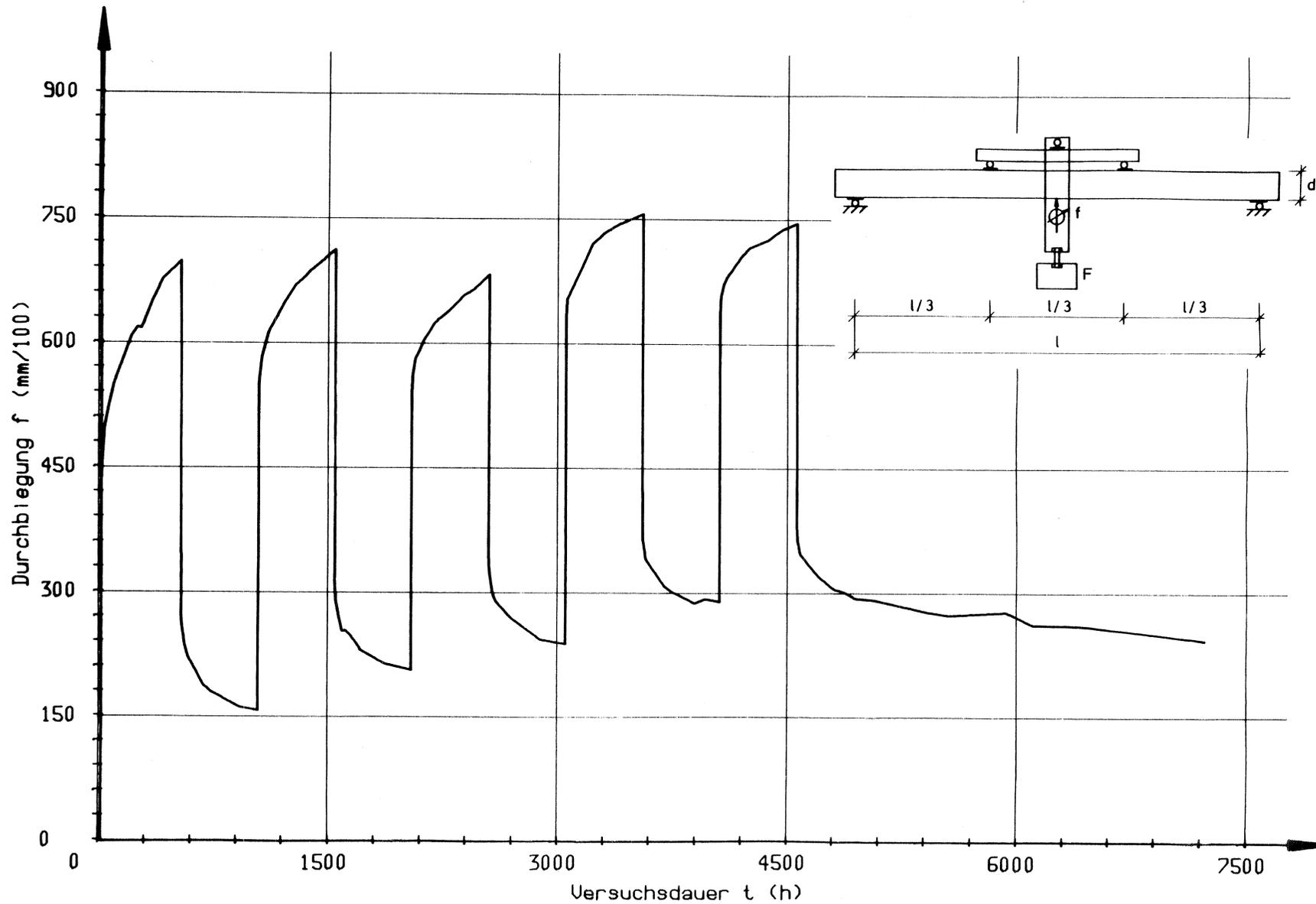


Bild 17: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 83, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

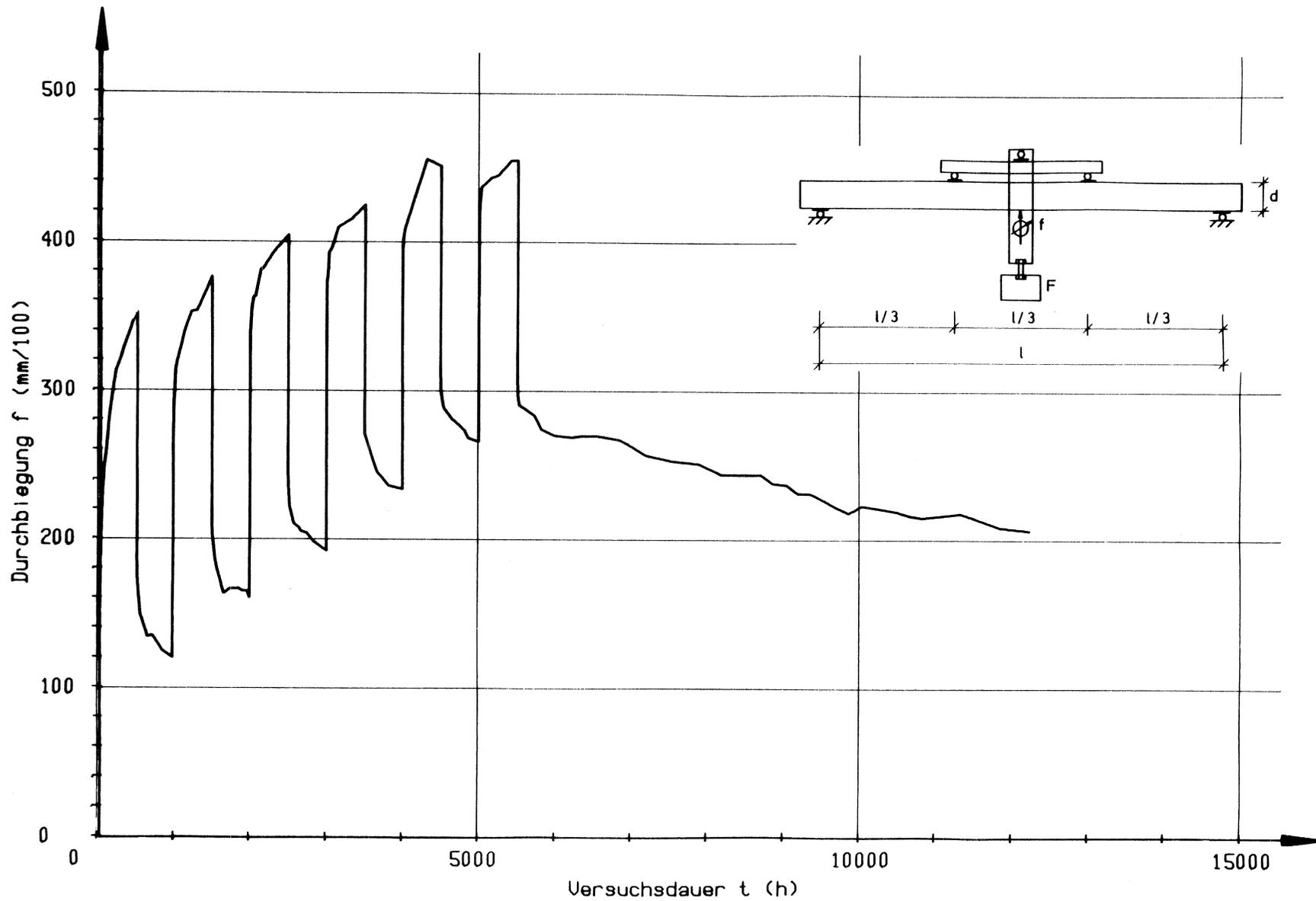
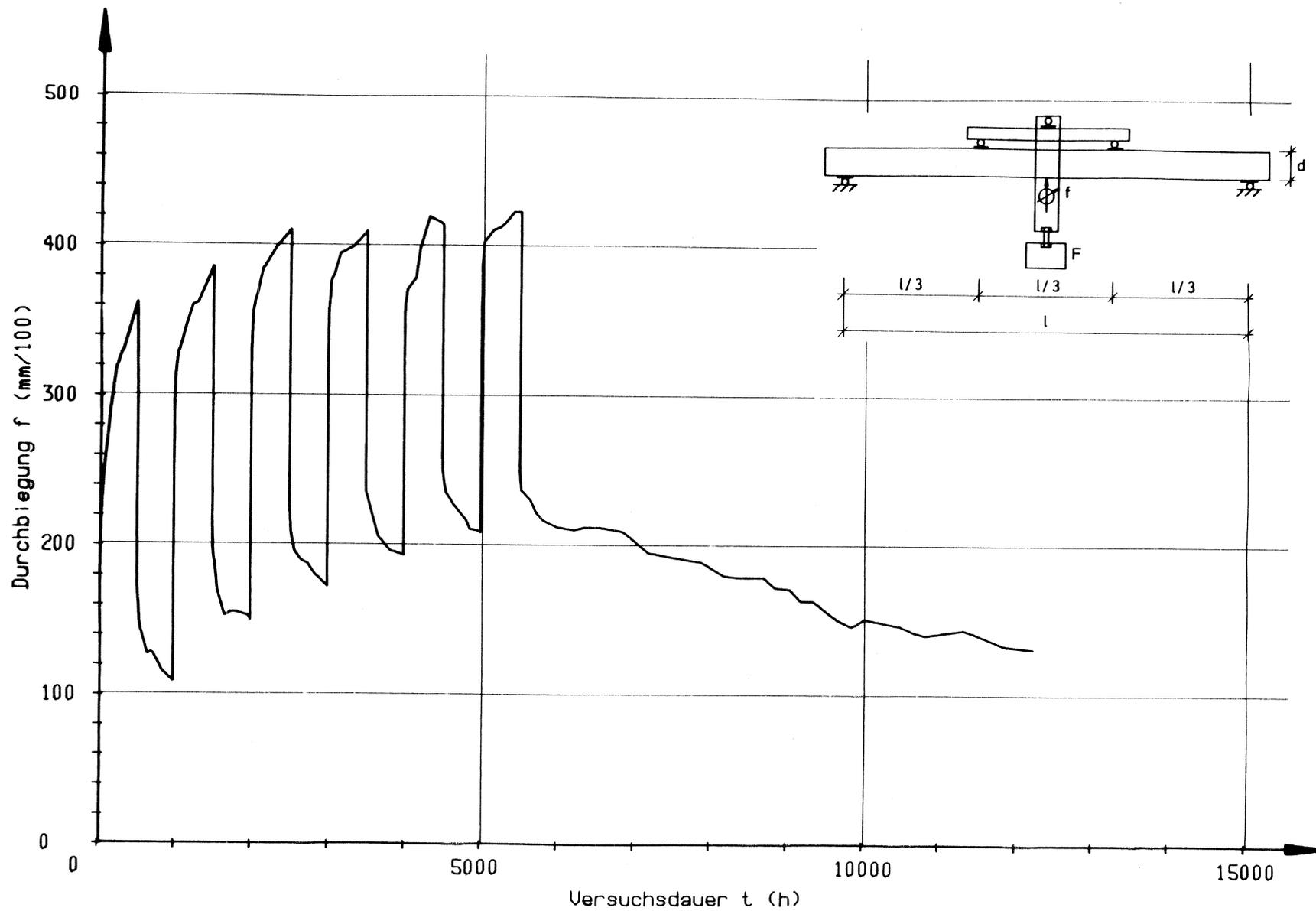
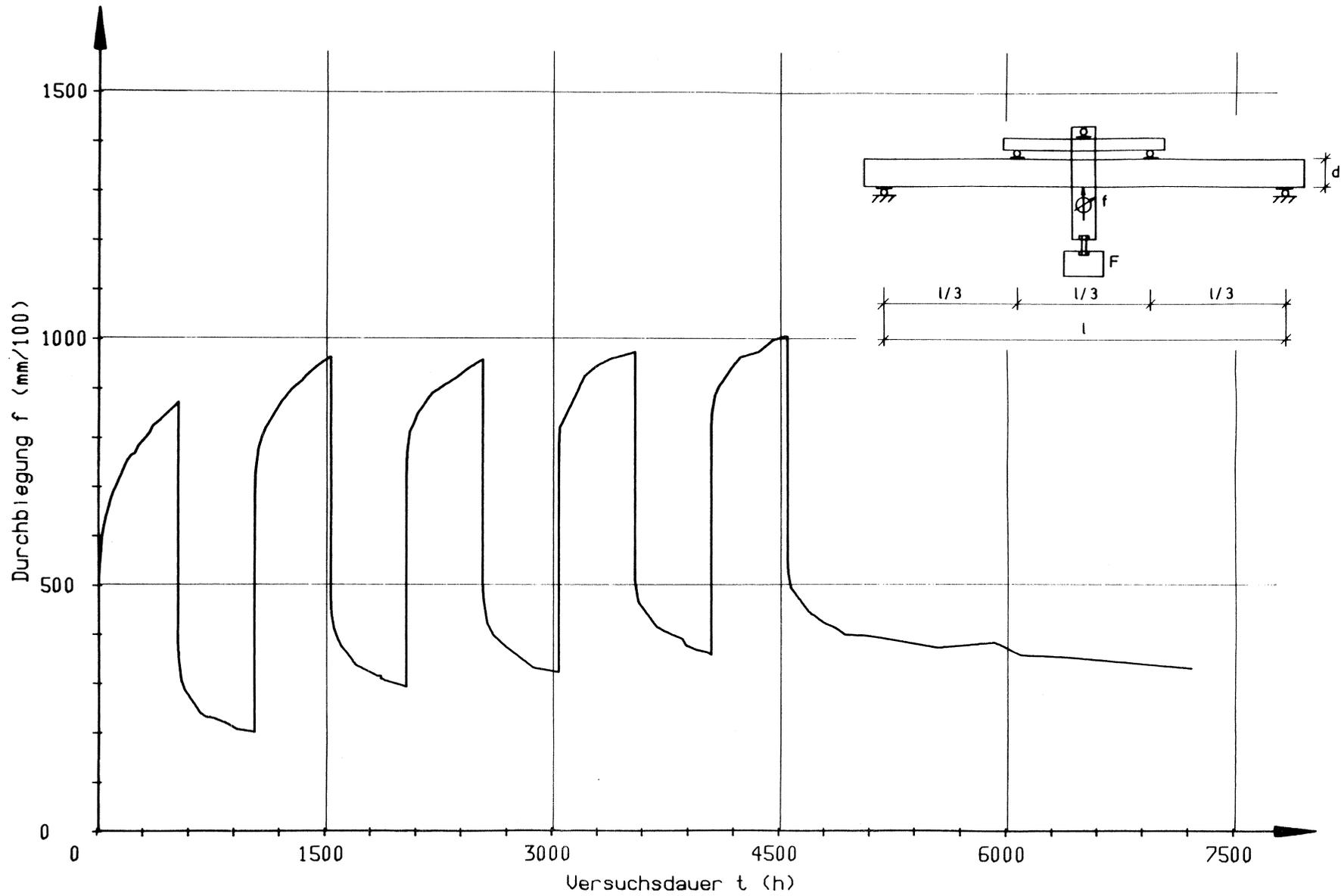


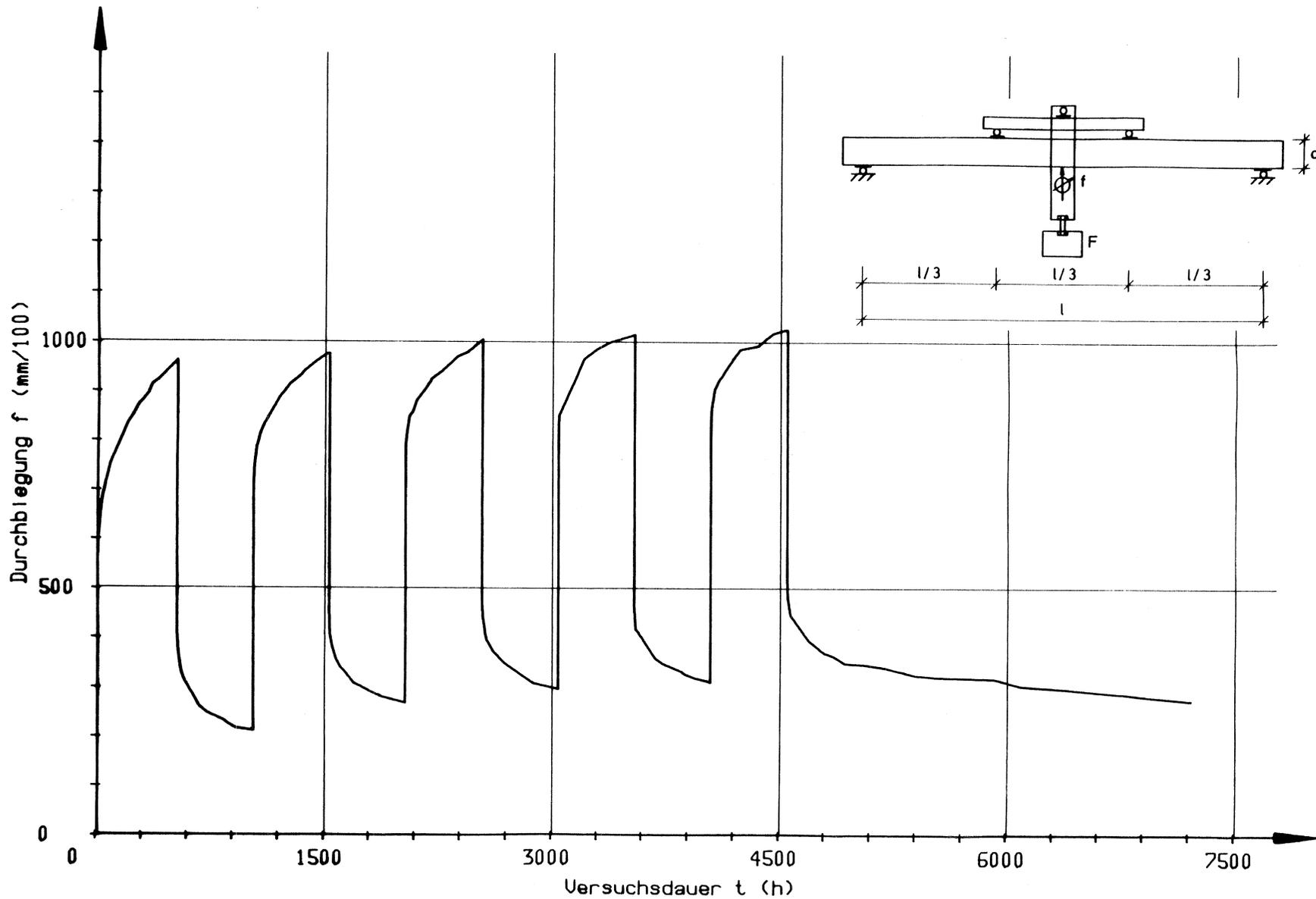
Bild 18: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 96, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 19:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 98, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 20:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 110, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 21:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 112, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

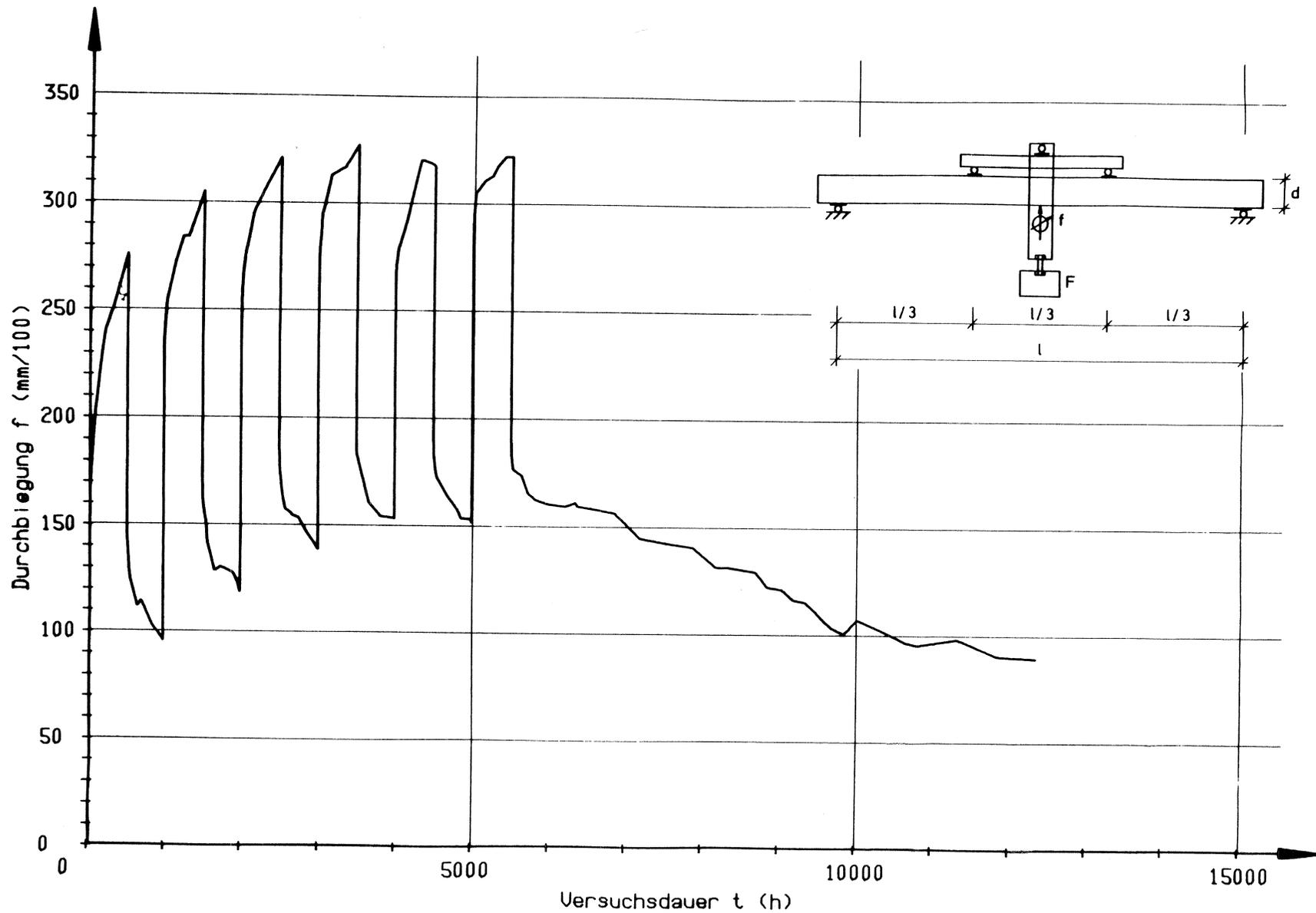
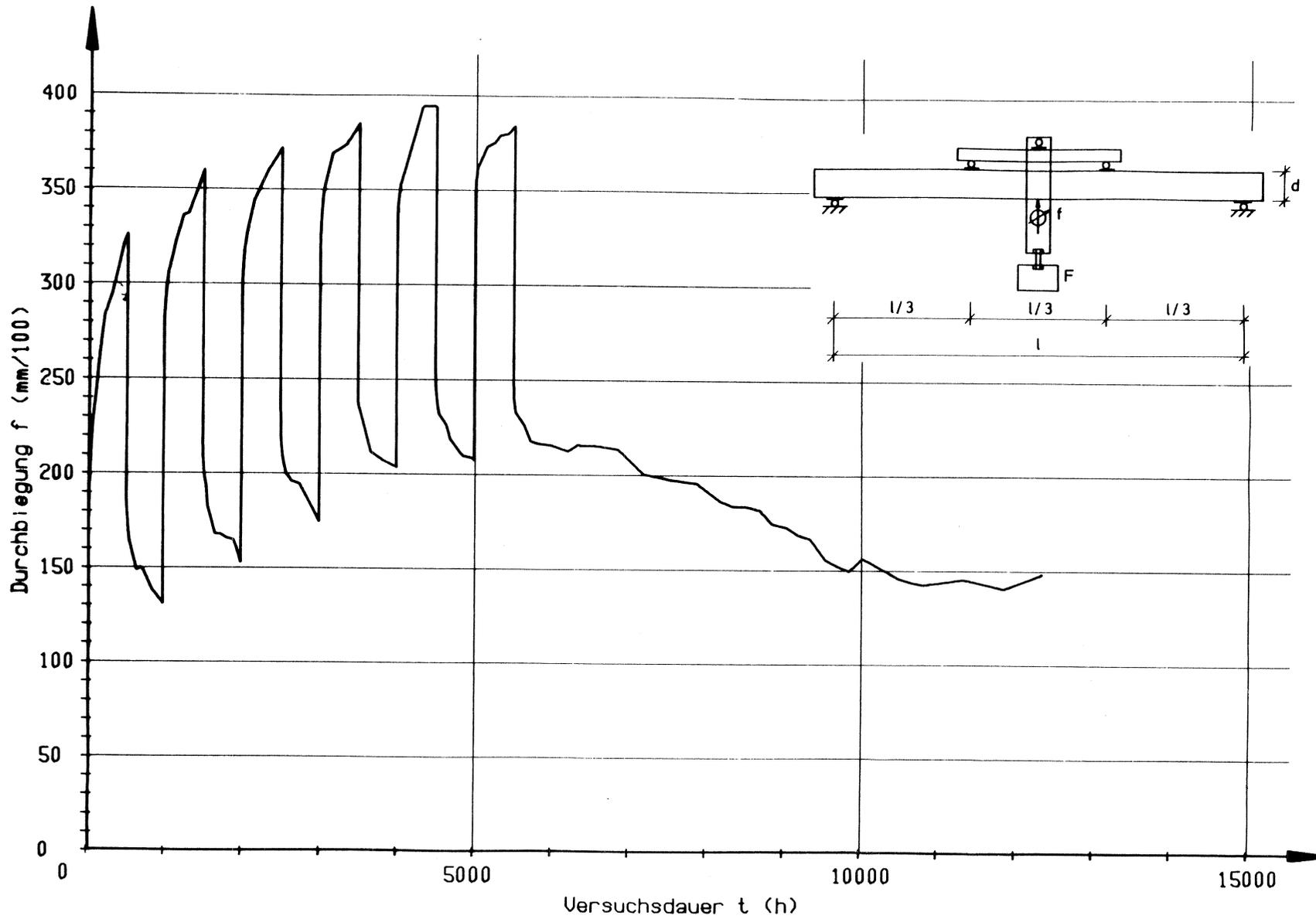
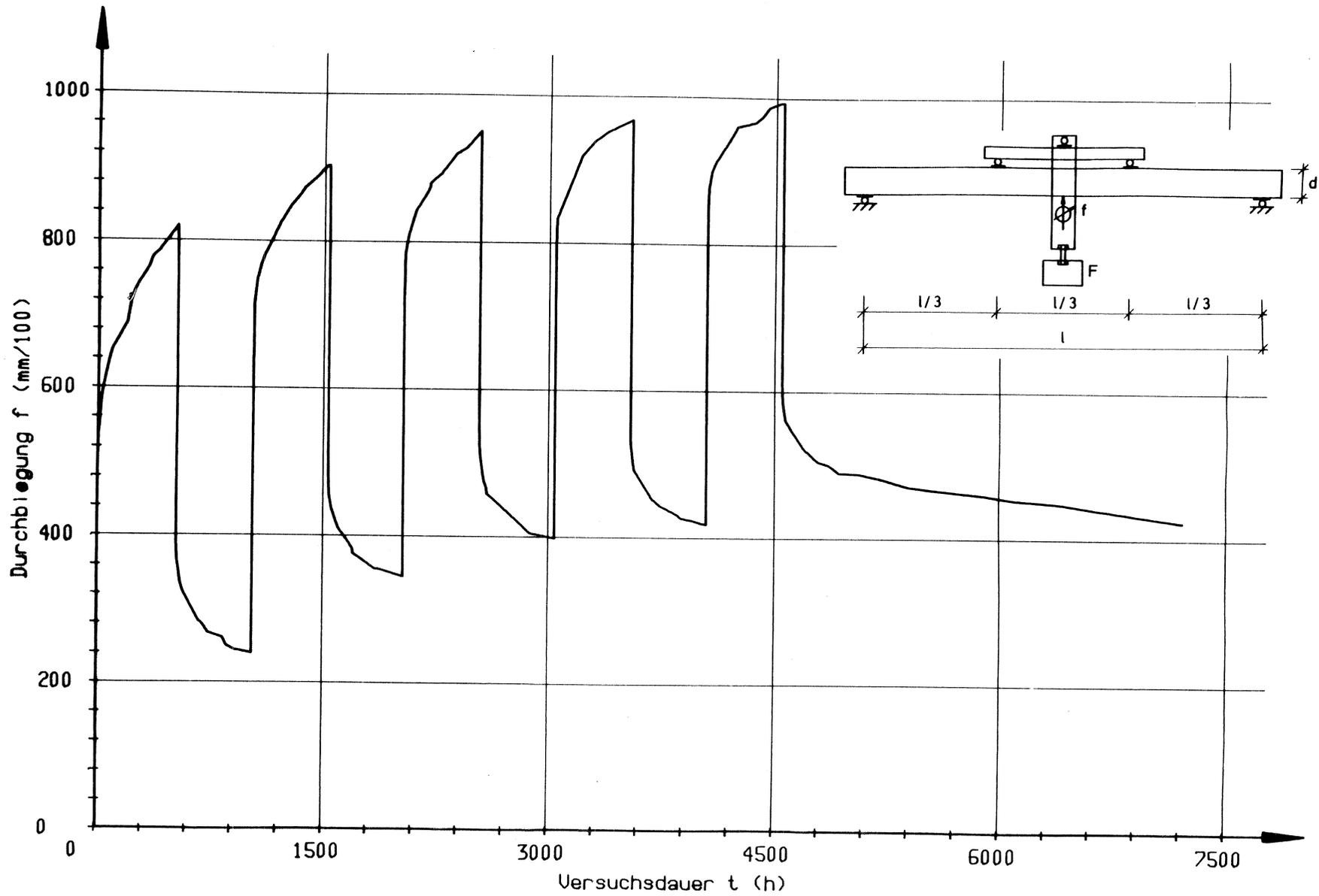


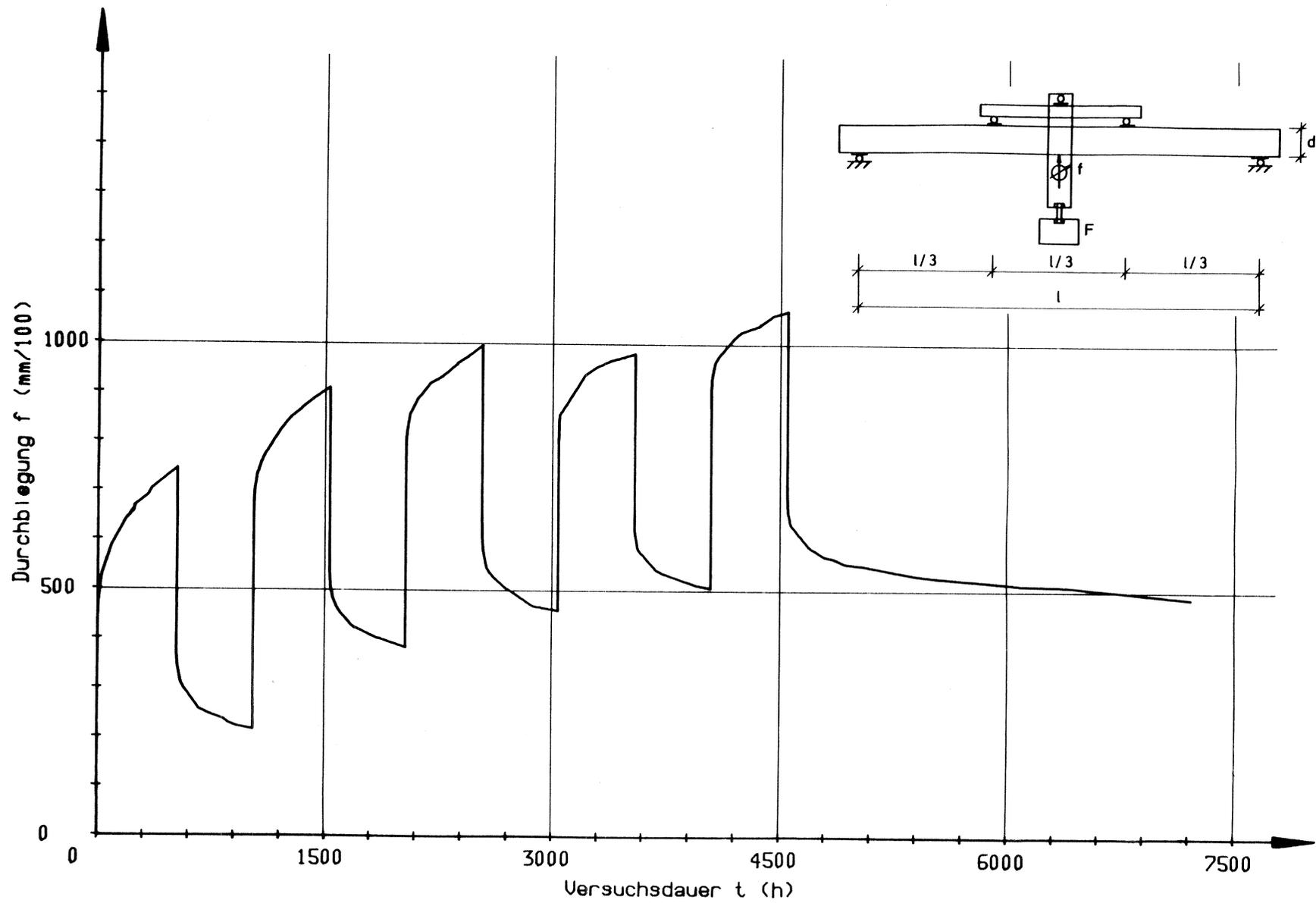
Bild 22: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 138, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



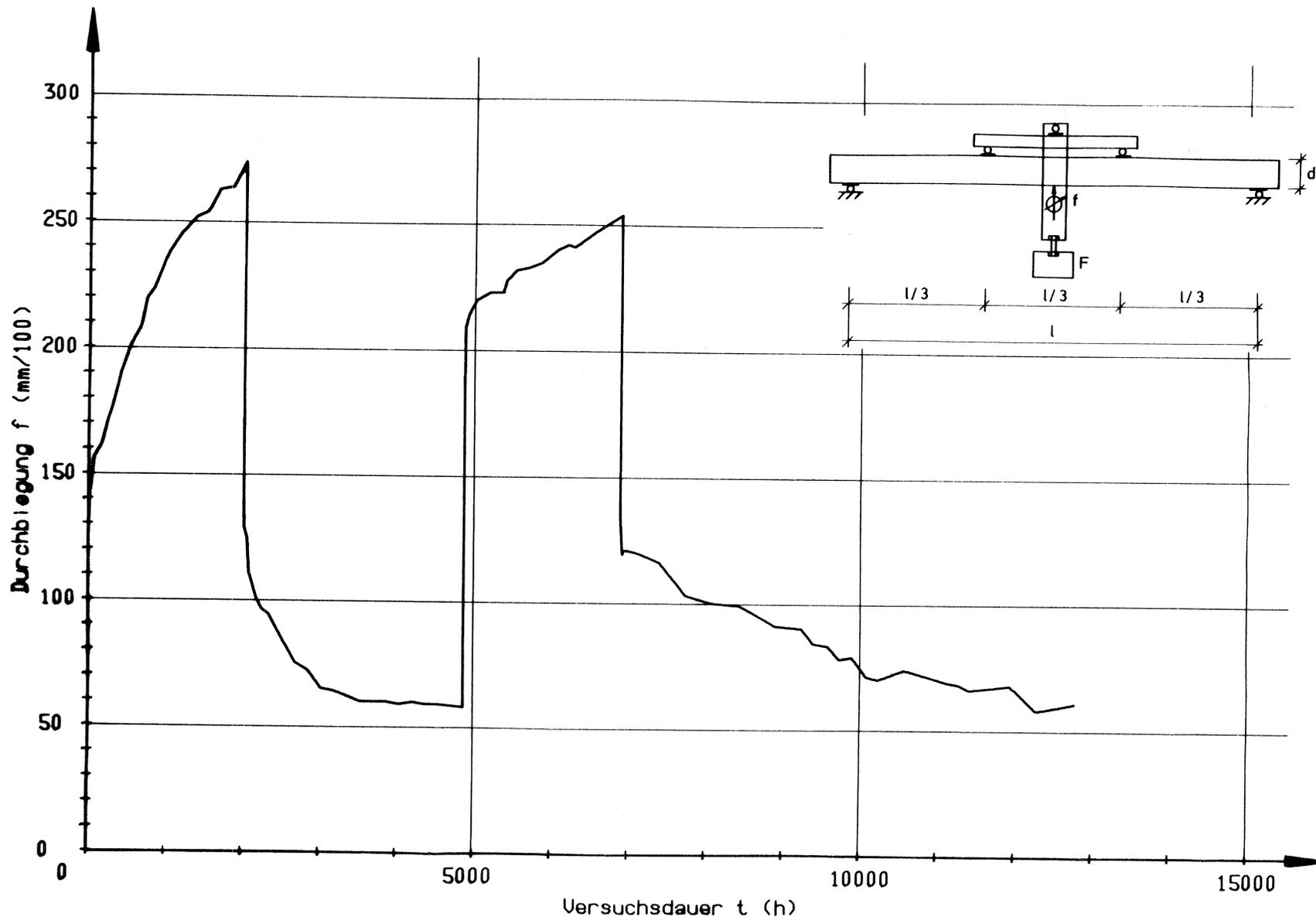
**Bild 23:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 140, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



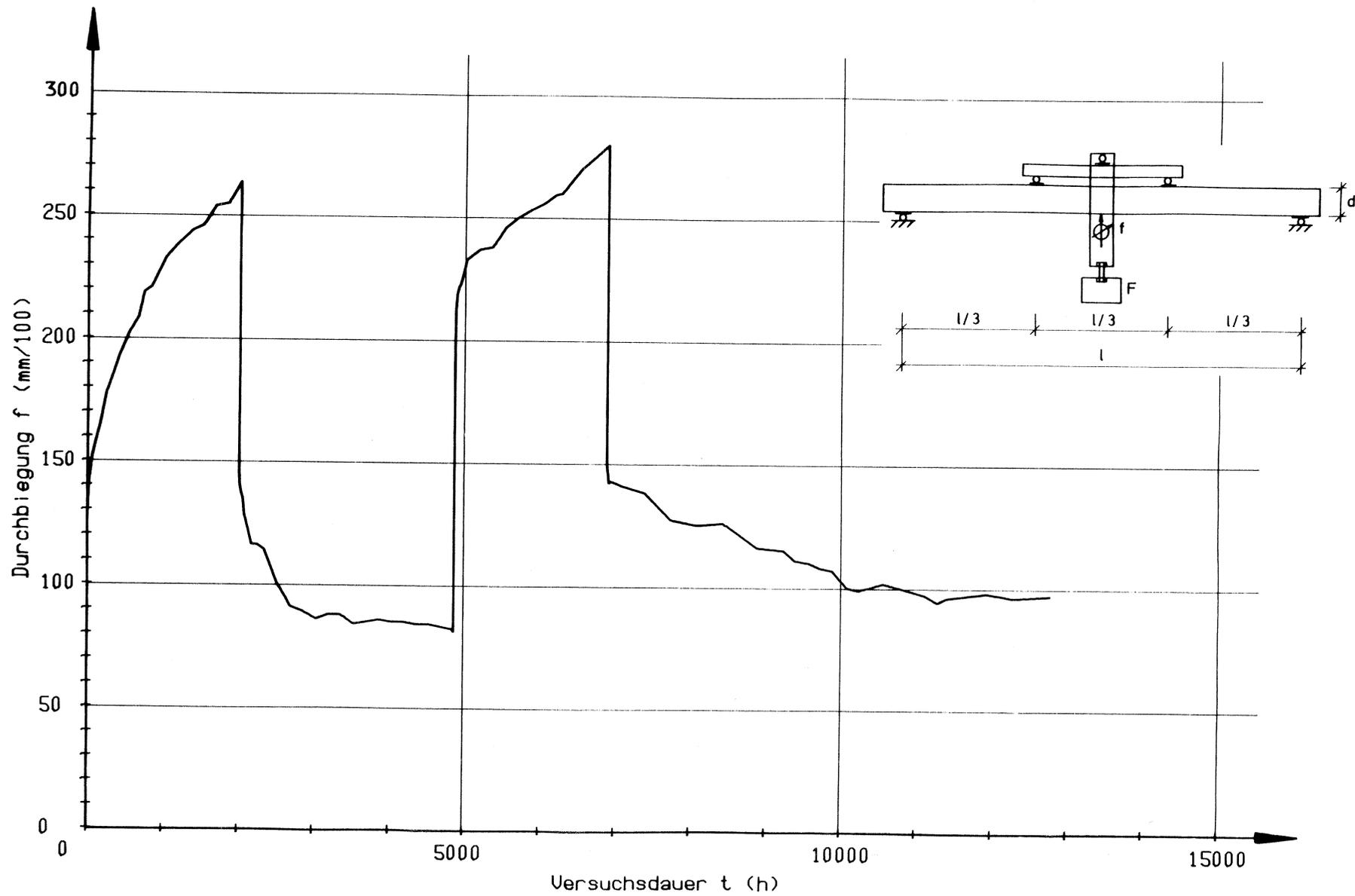
**Bild 24:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 145, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



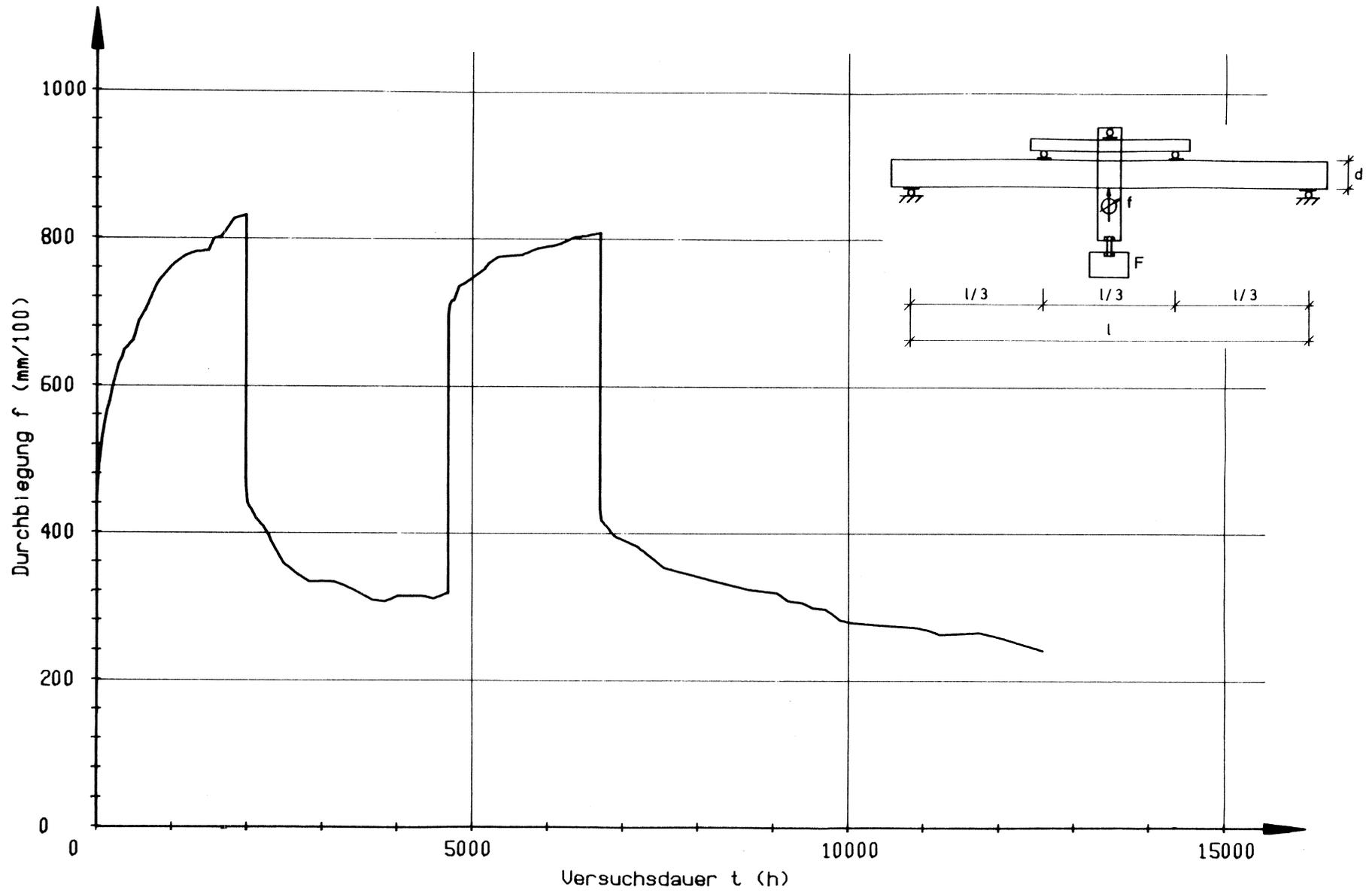
**Bild 25:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 147, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



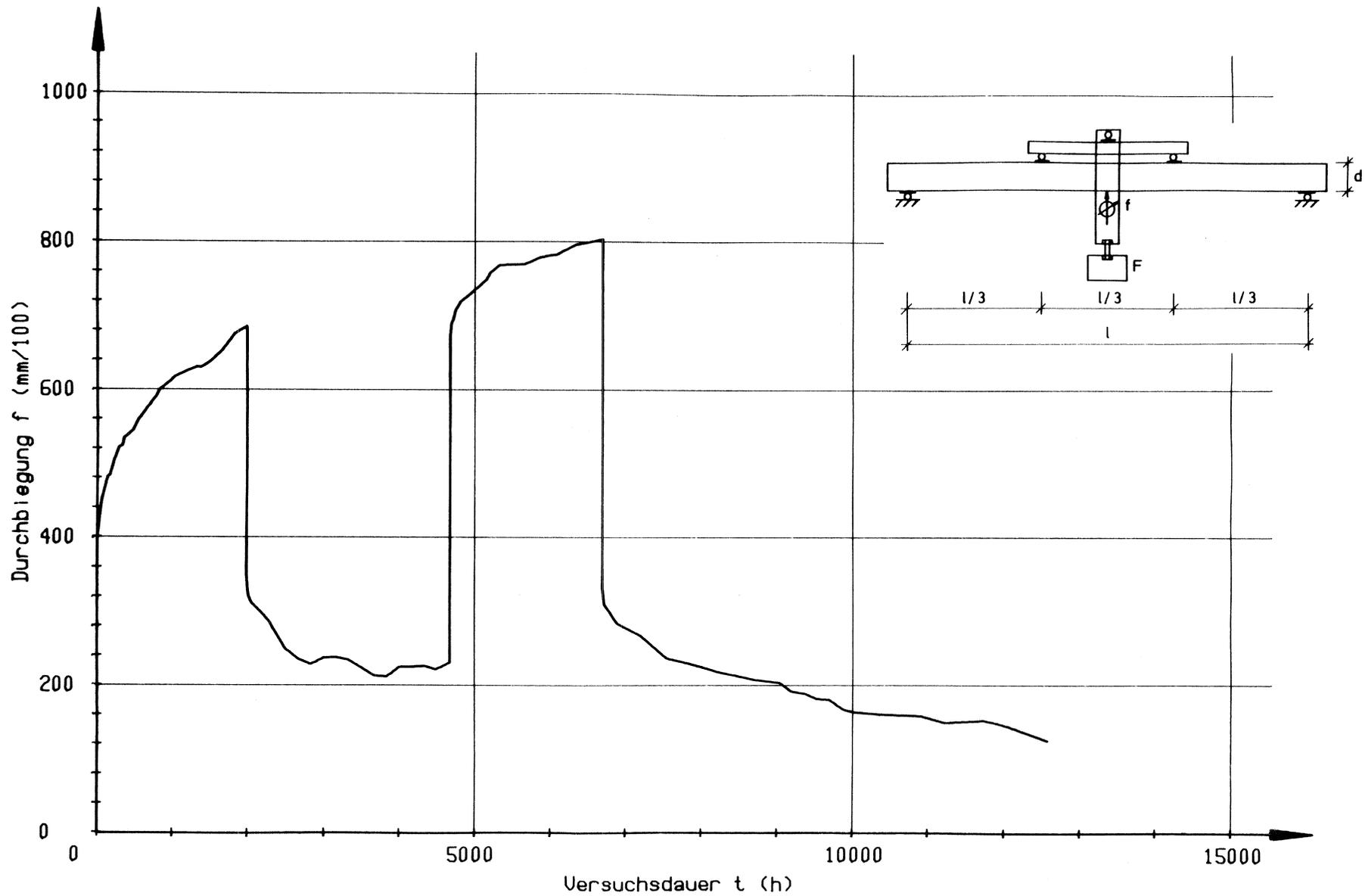
**Bild 26:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 49, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



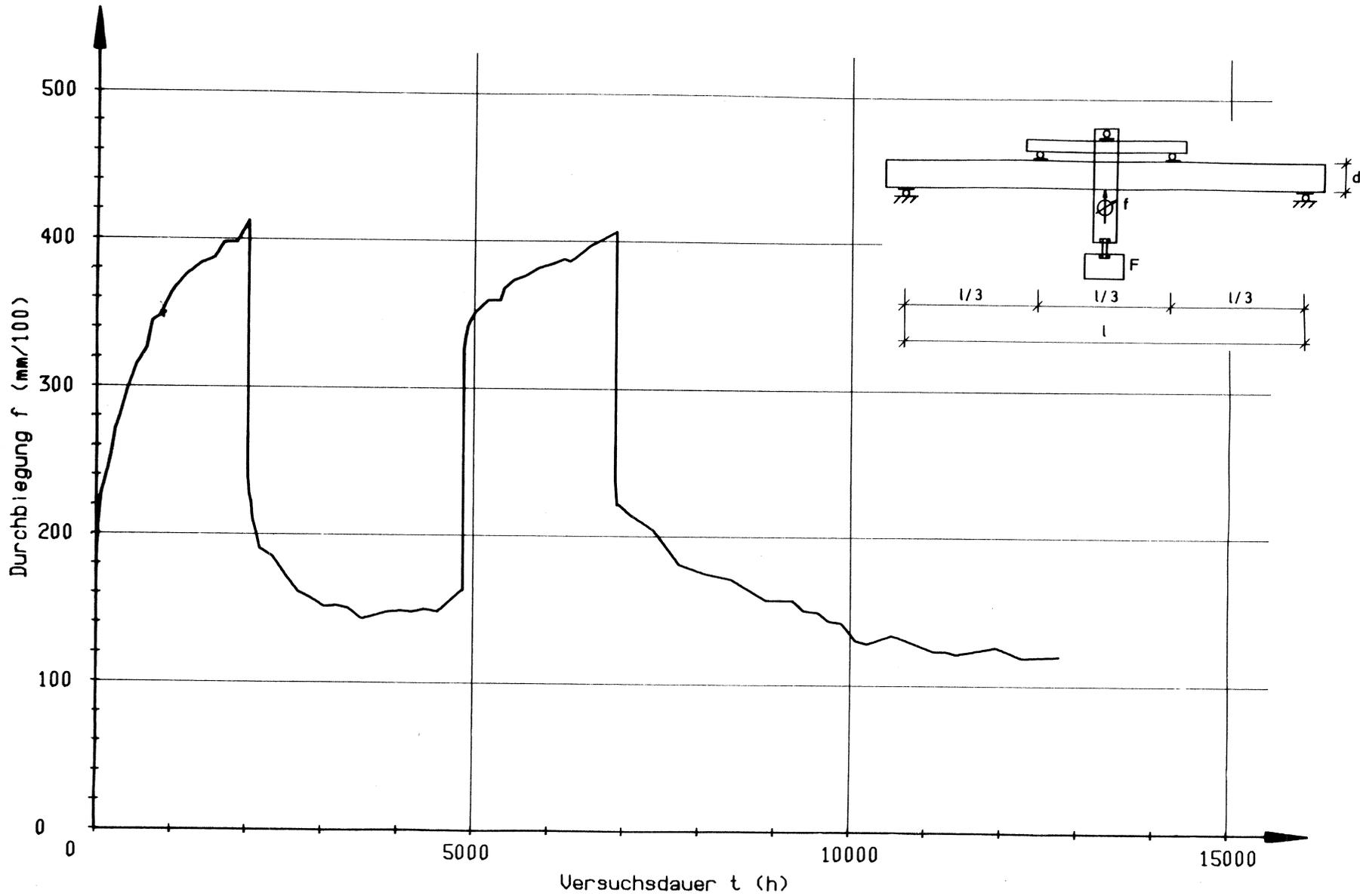
**Bild 27:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 51, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 28:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 61, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 29:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 63, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 30:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 92, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

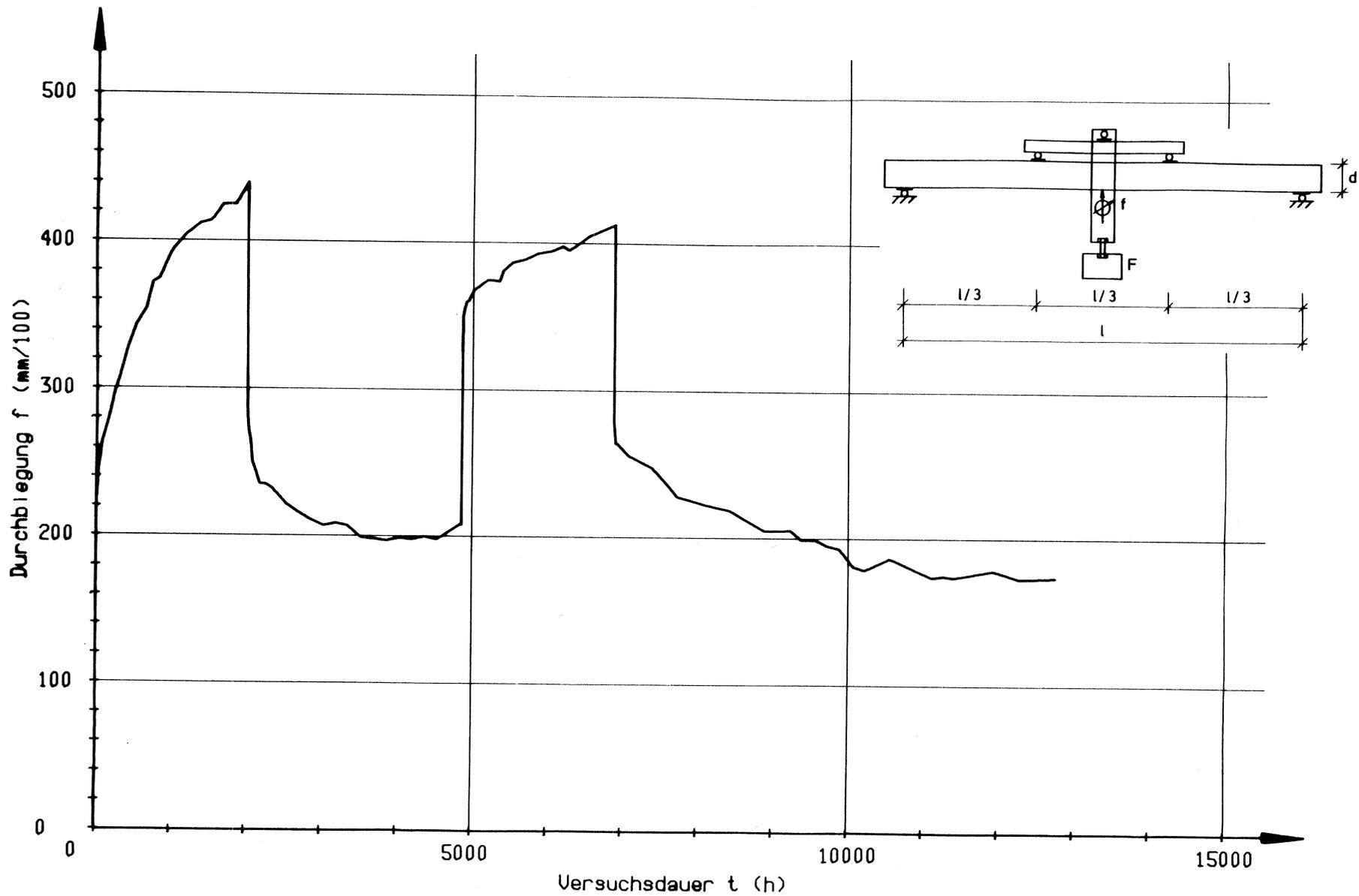


Bild 31: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 94, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

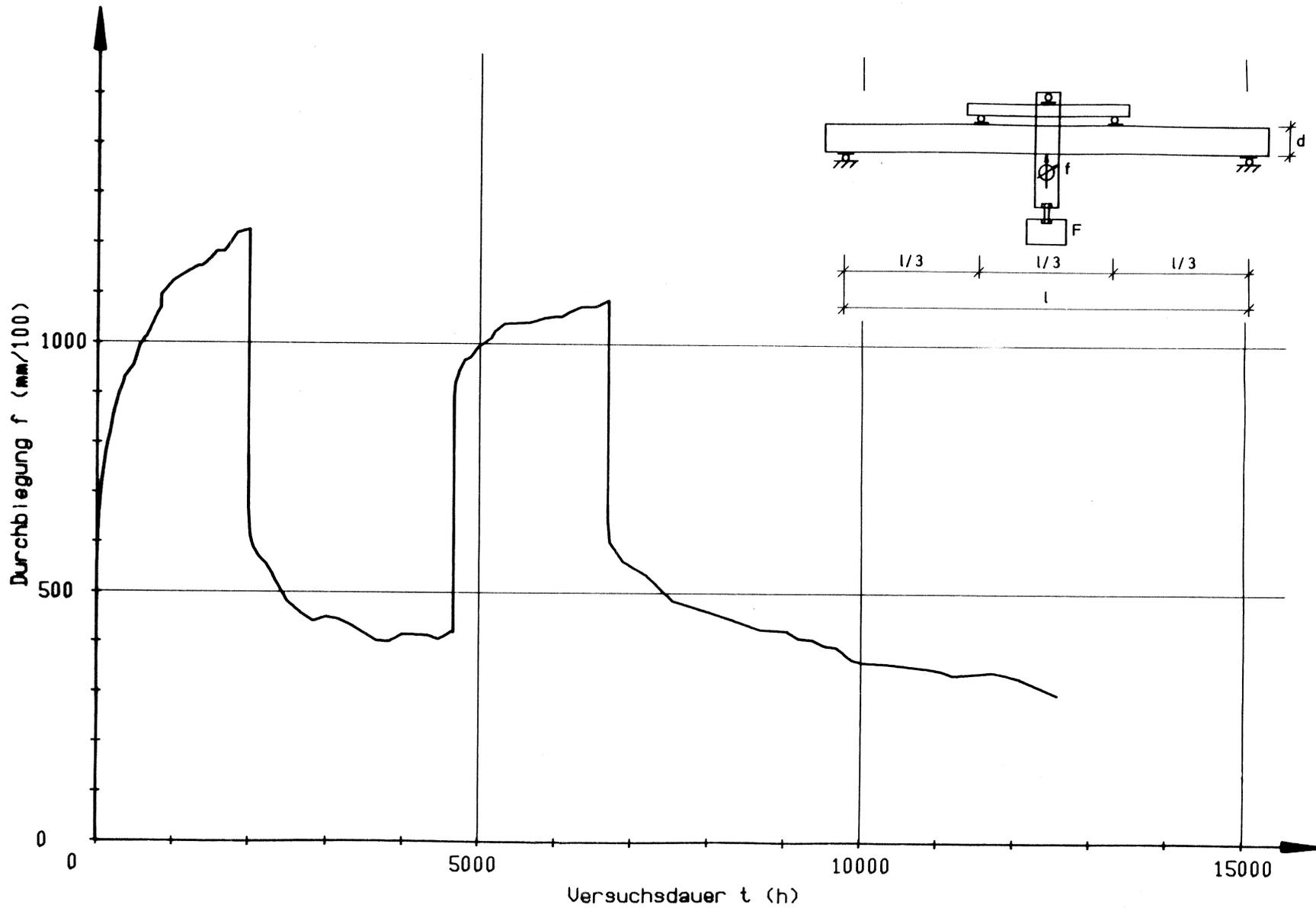
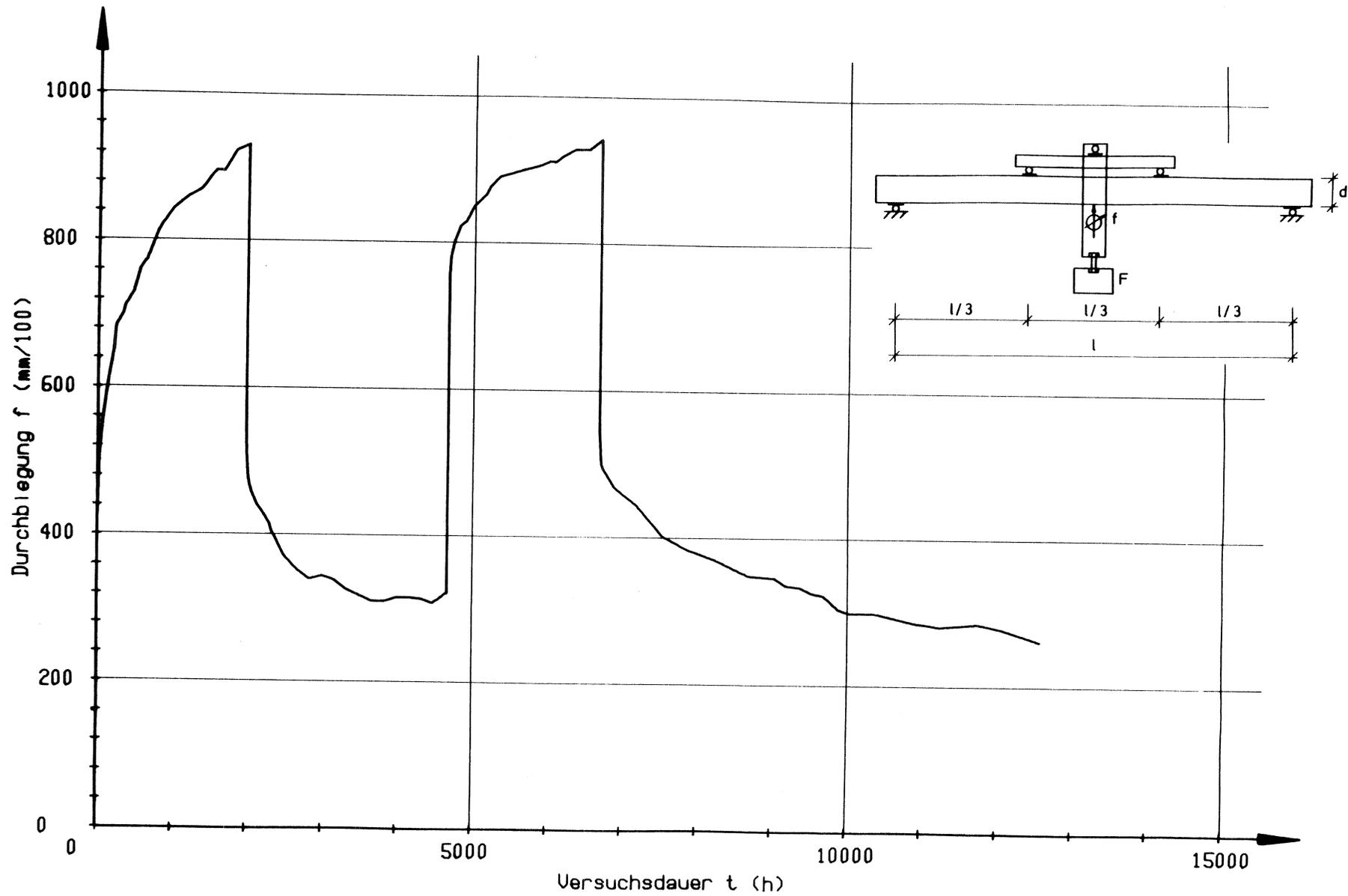


Bild 32: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 106, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 33:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 108, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

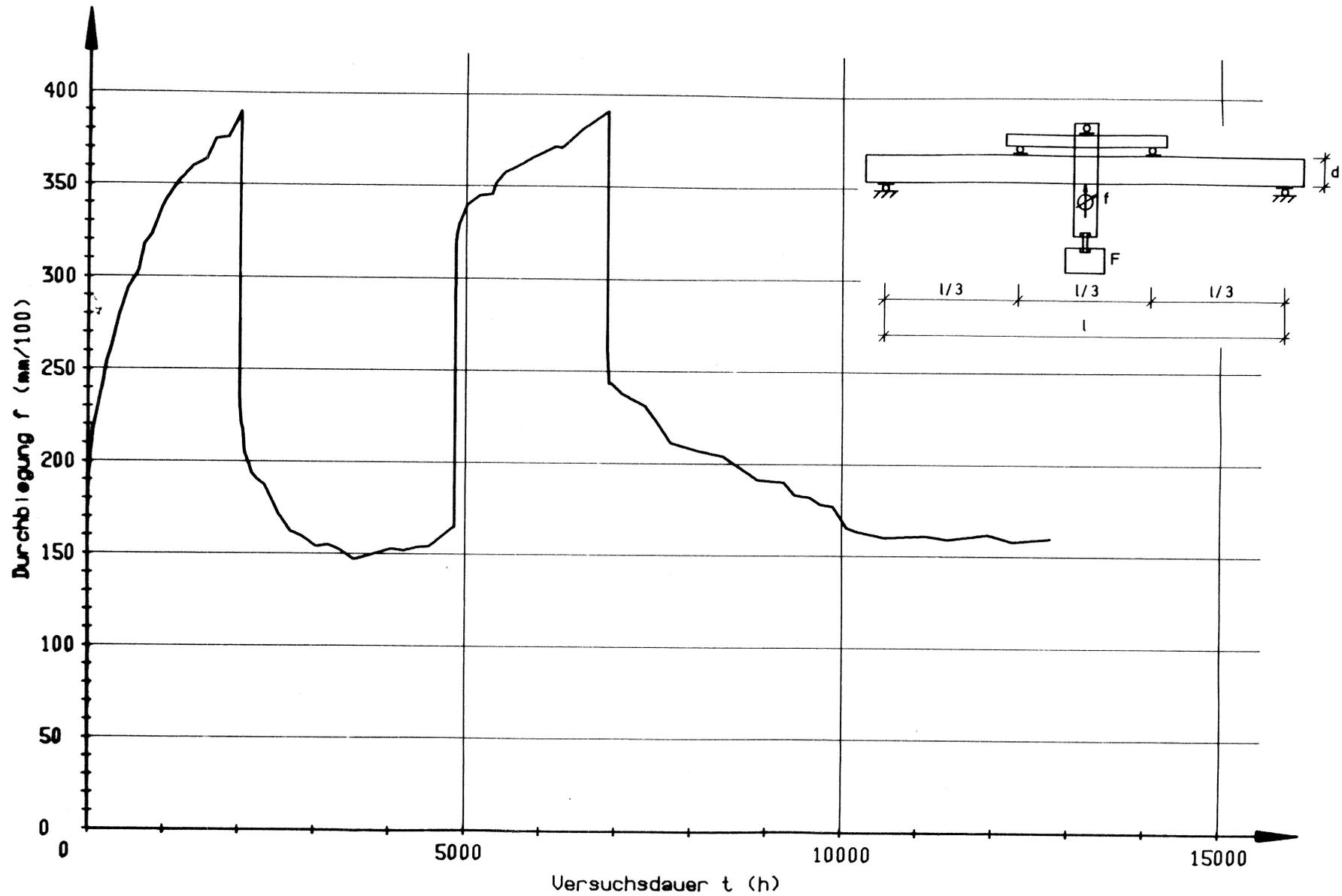


Bild 34: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 134, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

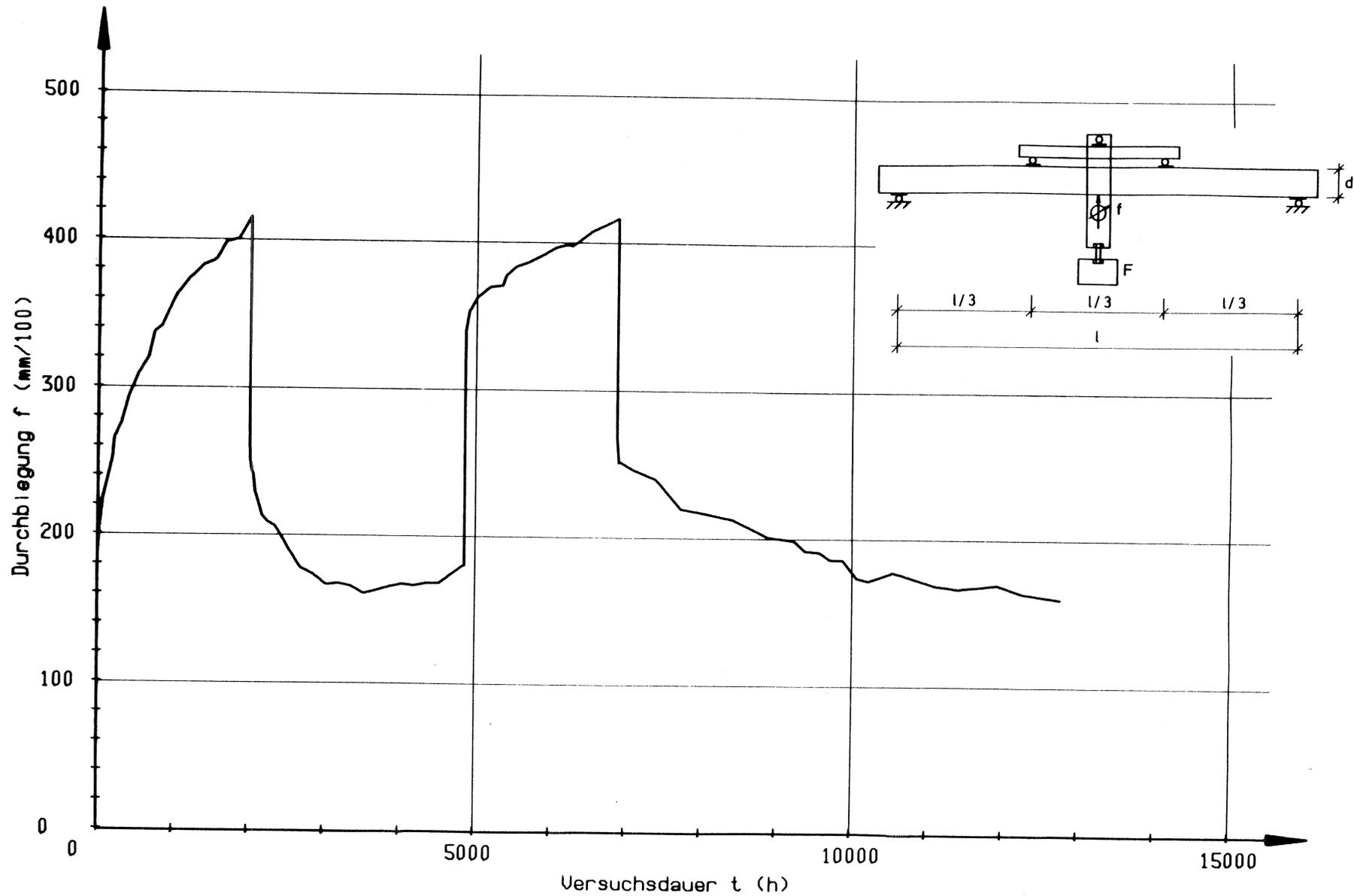
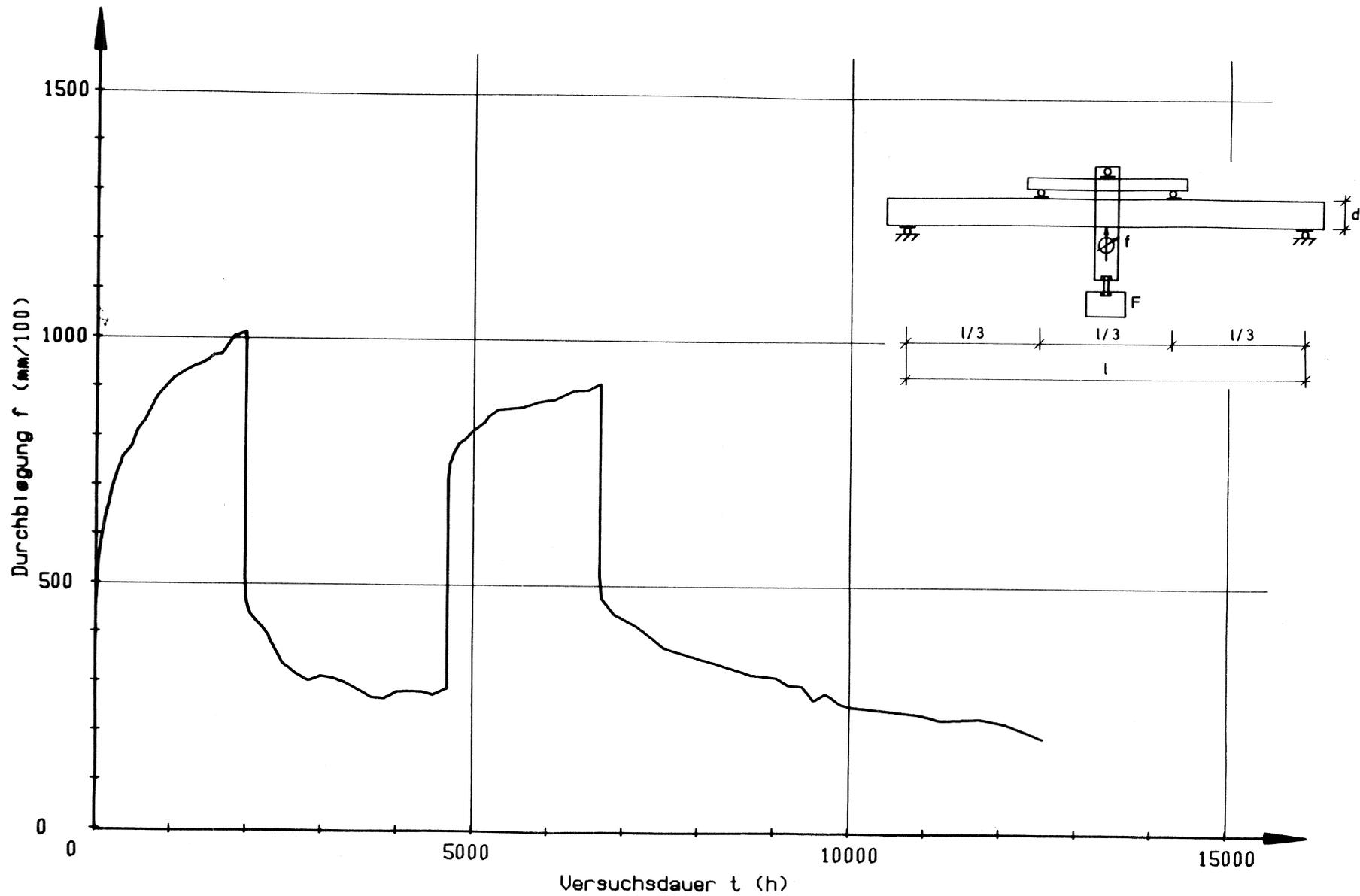
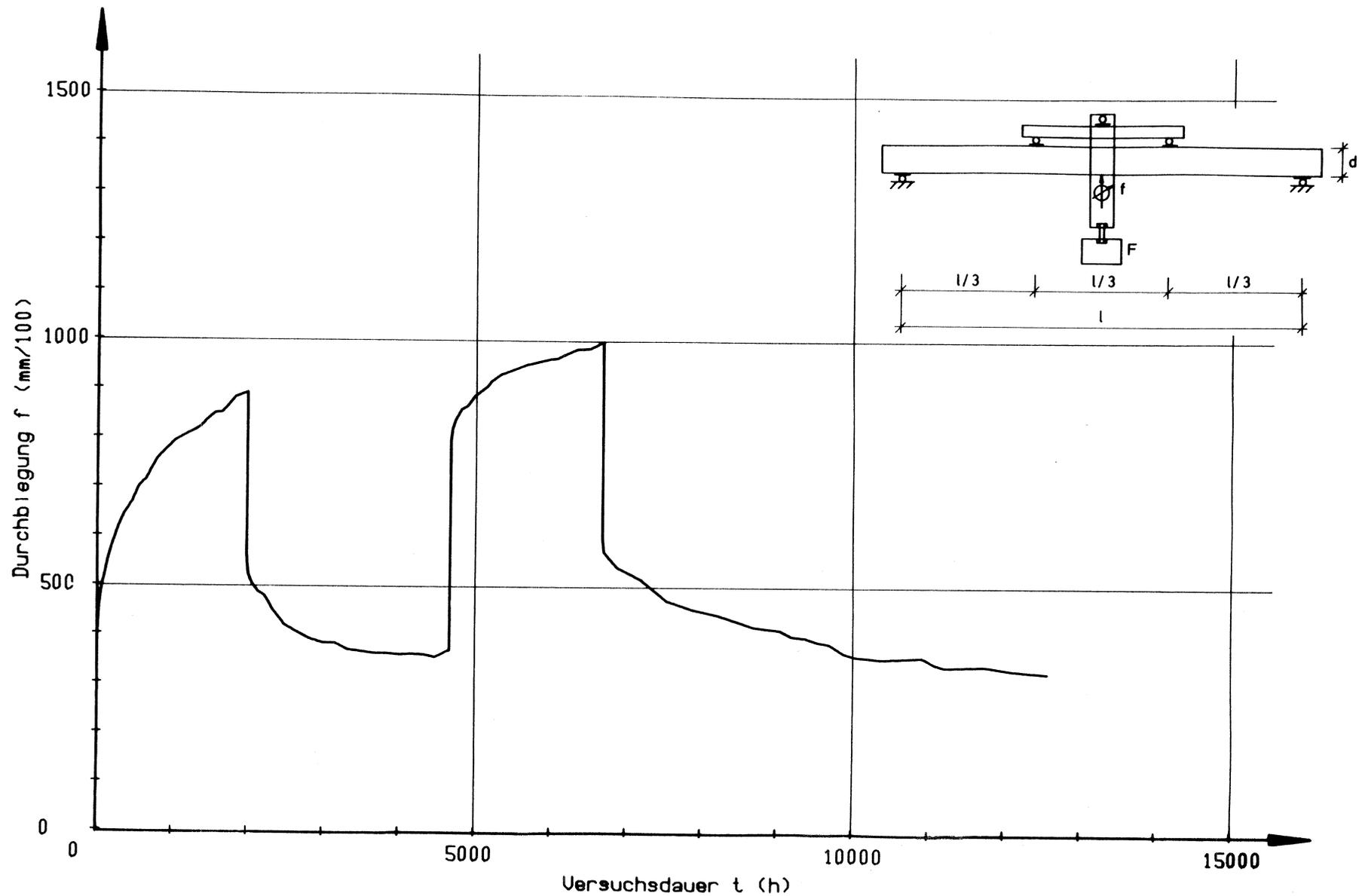


Bild 35: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 136, 10% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 36:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 141, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)



**Bild 37:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 143, 30% der Kurzzeitbruchlast (Be- und Entlastungszyklen)

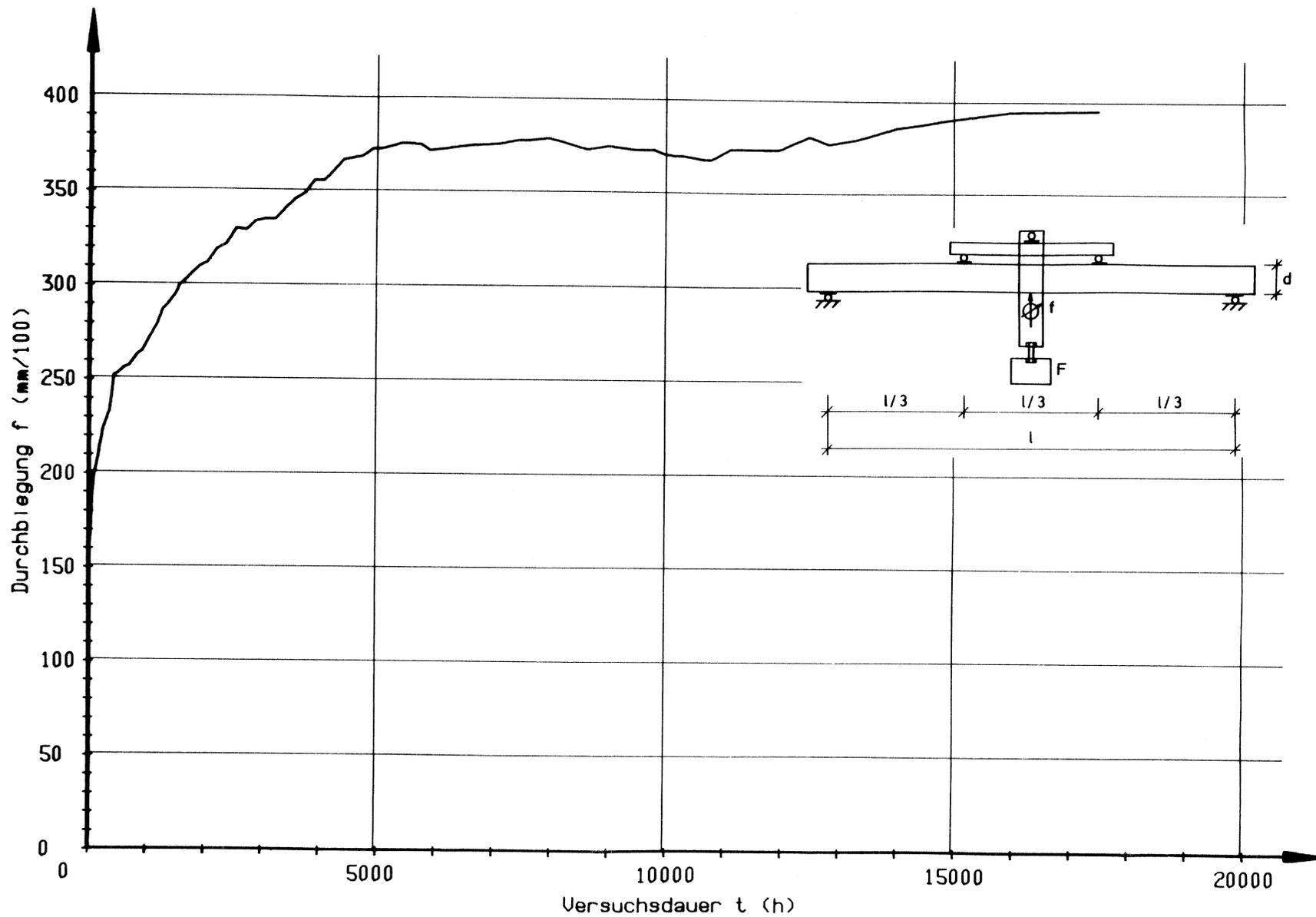
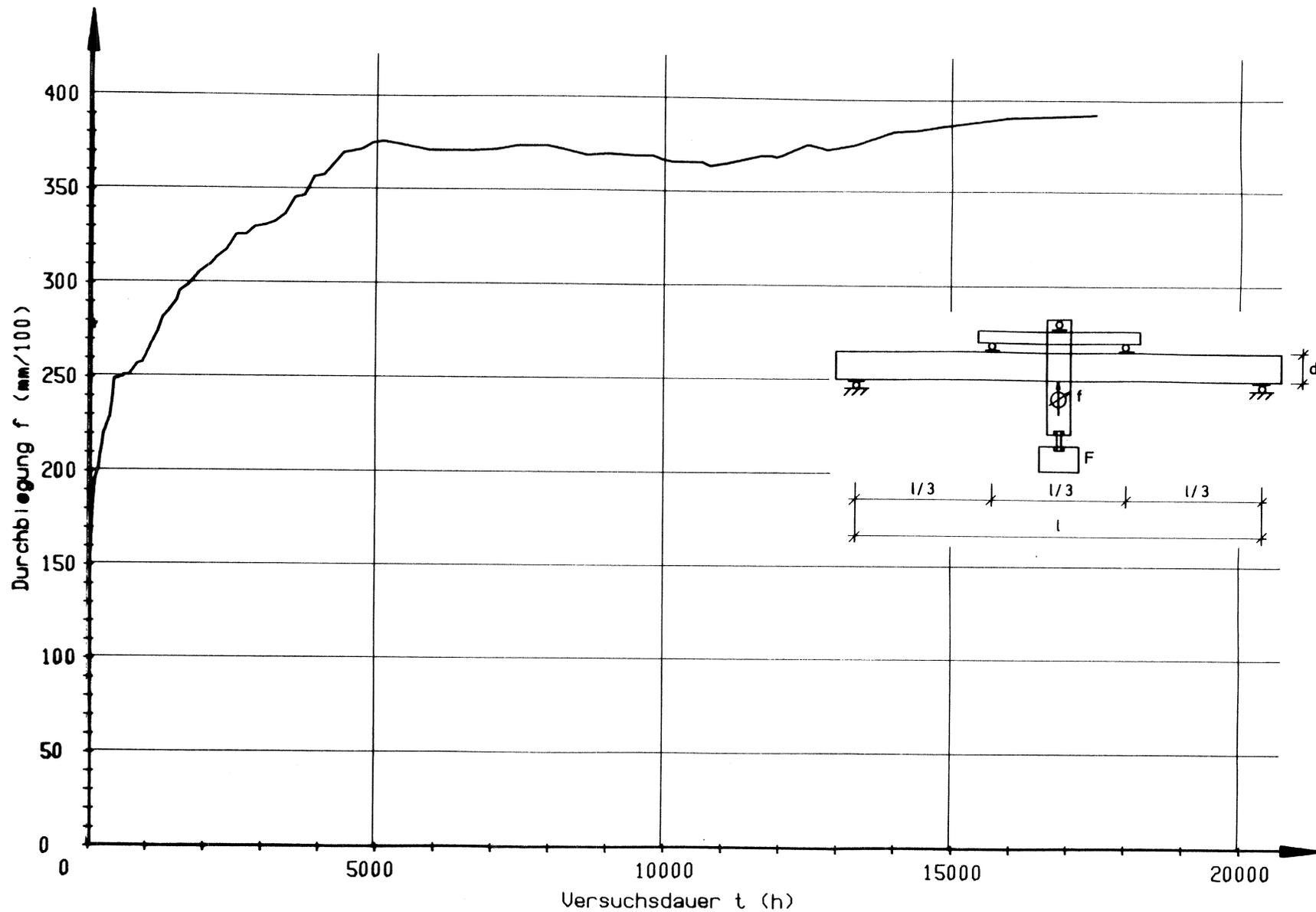
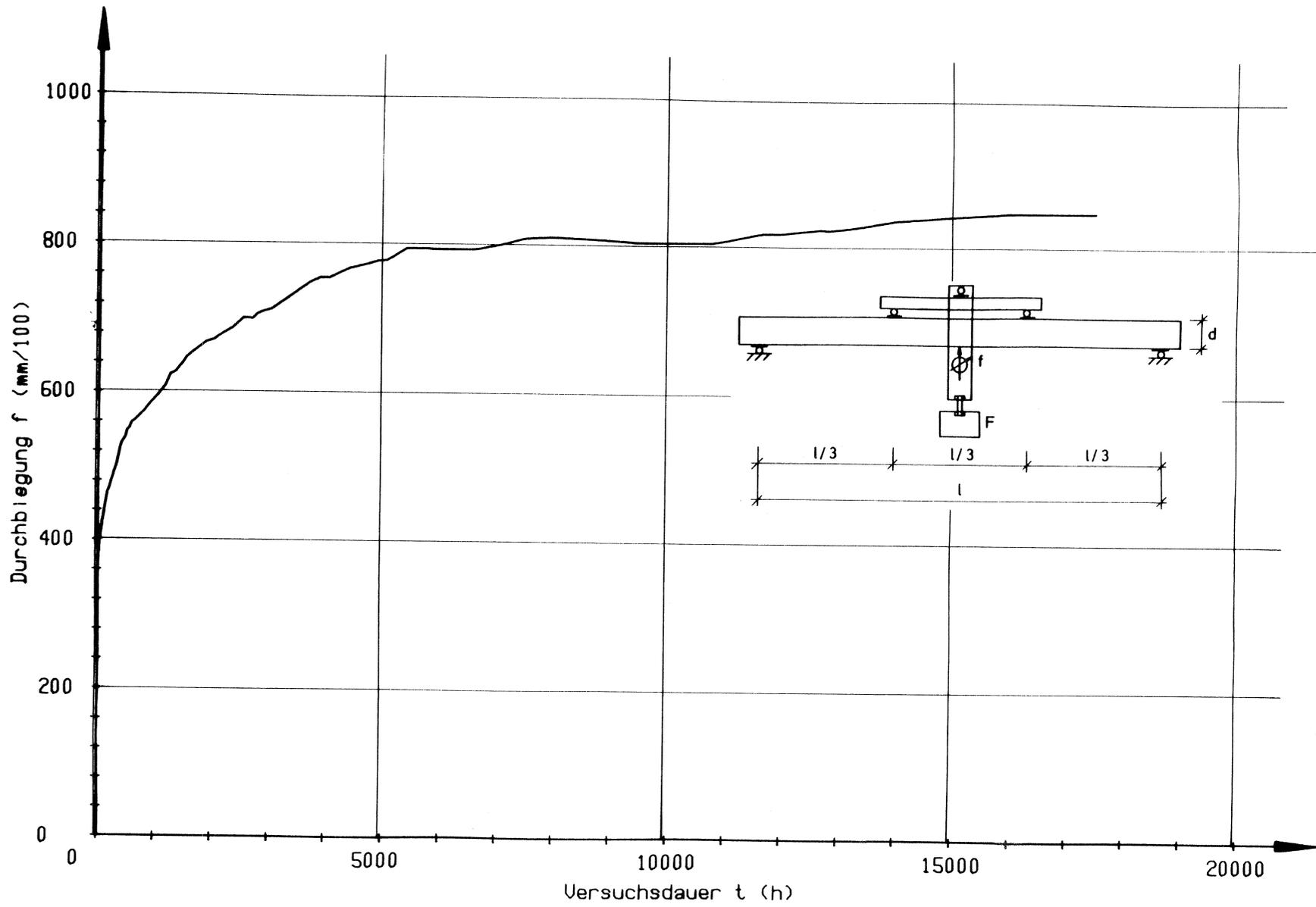


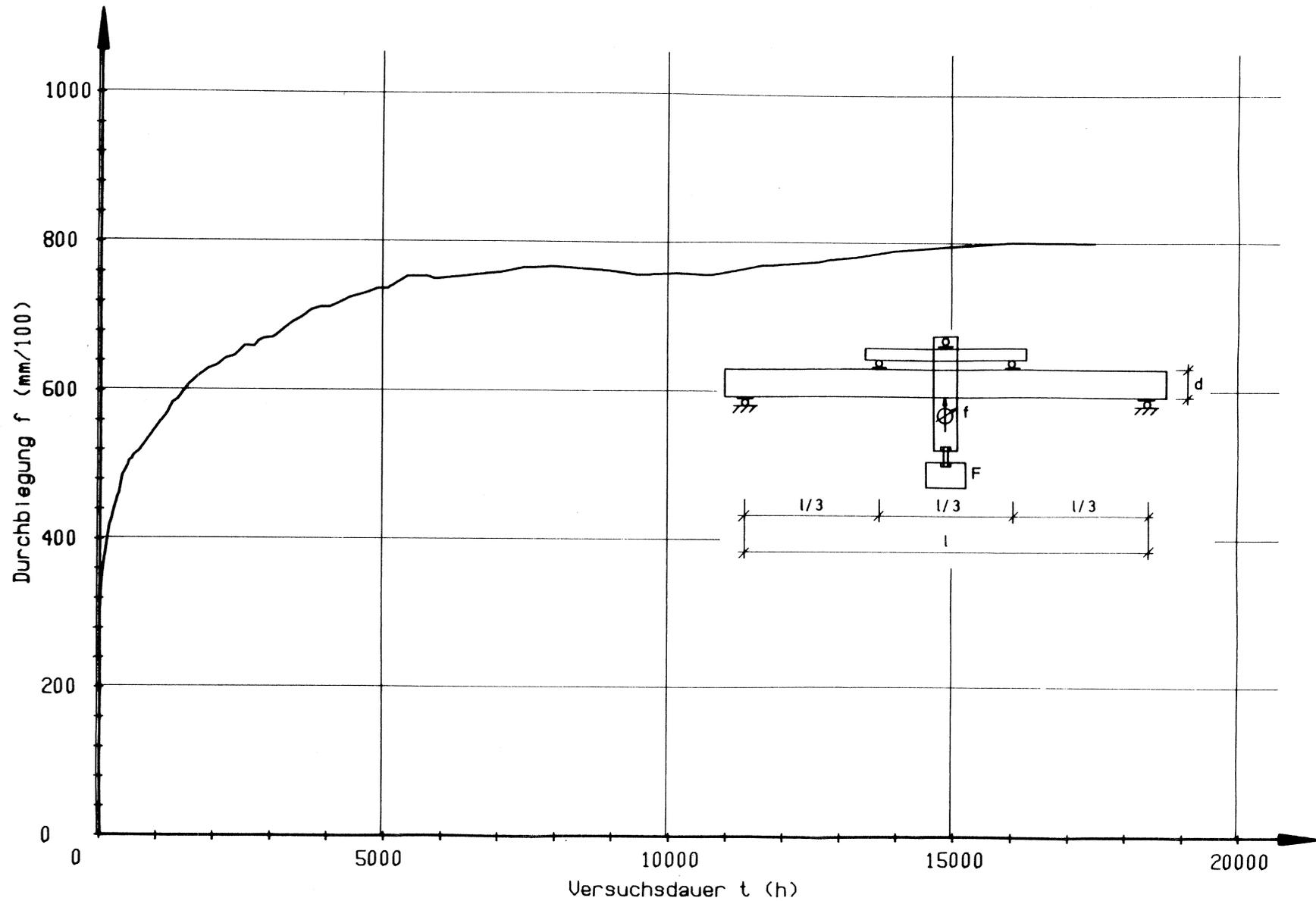
Bild 38: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 44, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 39:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 46, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 40:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 62, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 41:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 64, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

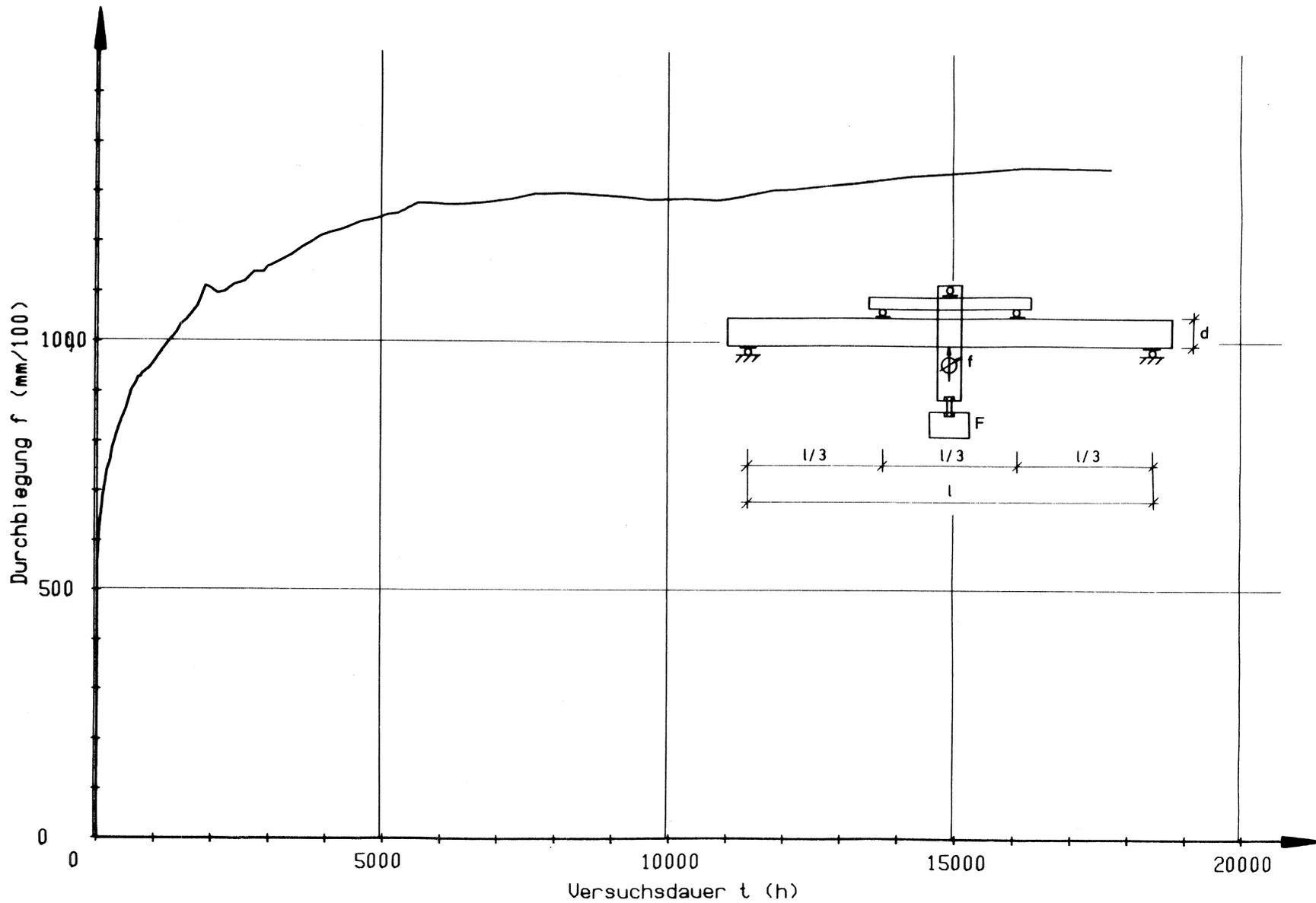
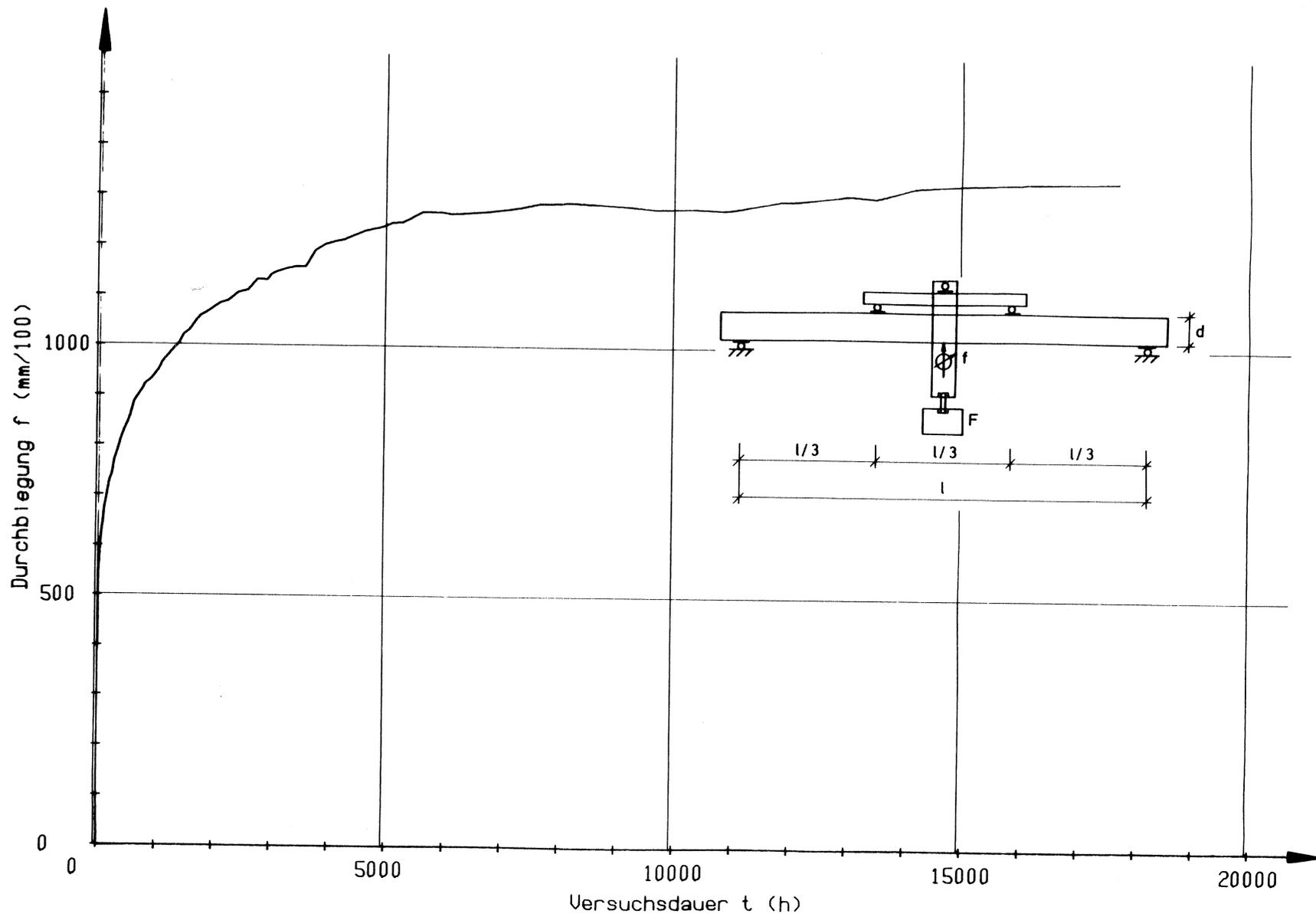


Bild 42: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 68, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 43:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 70, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

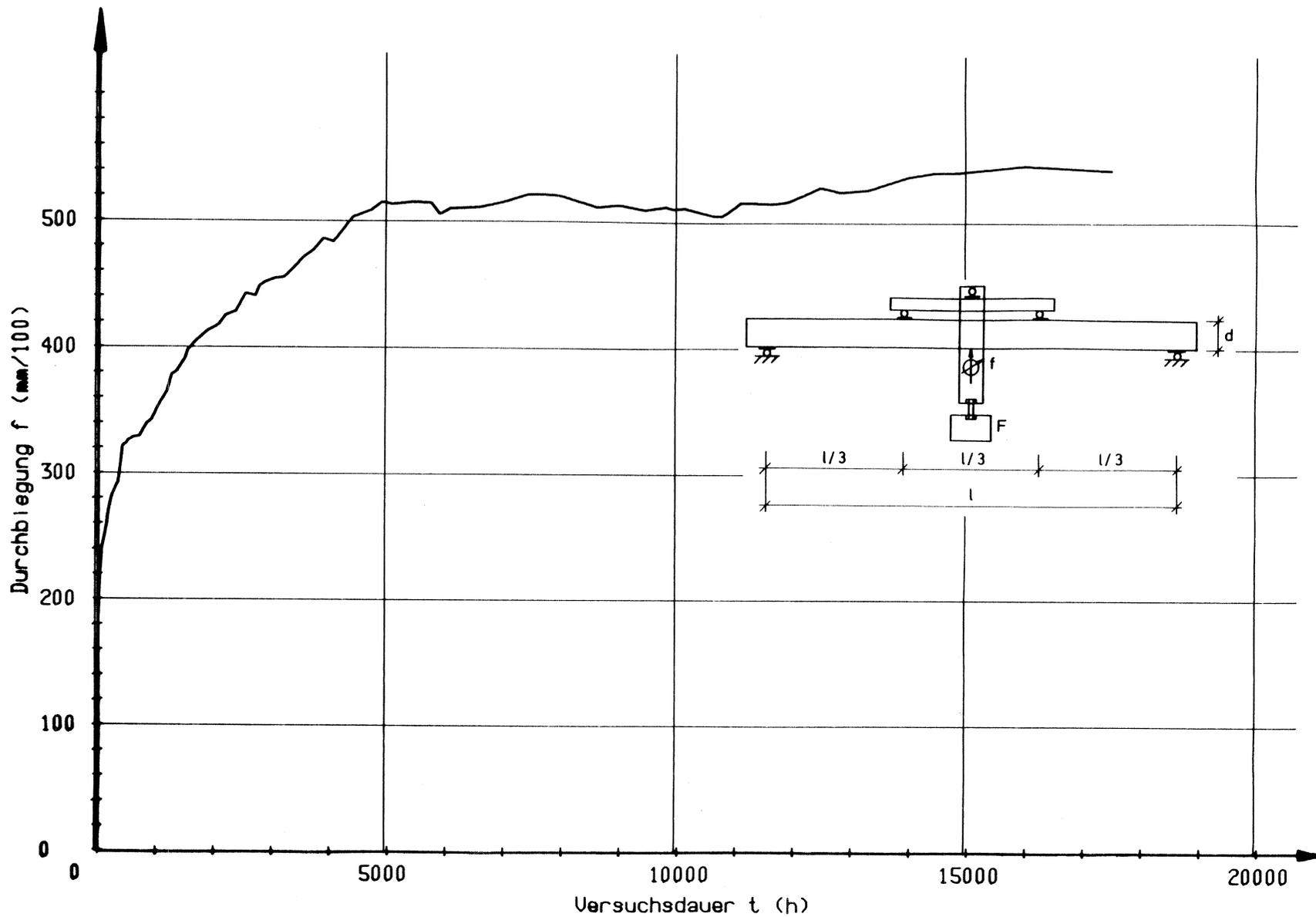


Bild 44: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 86, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

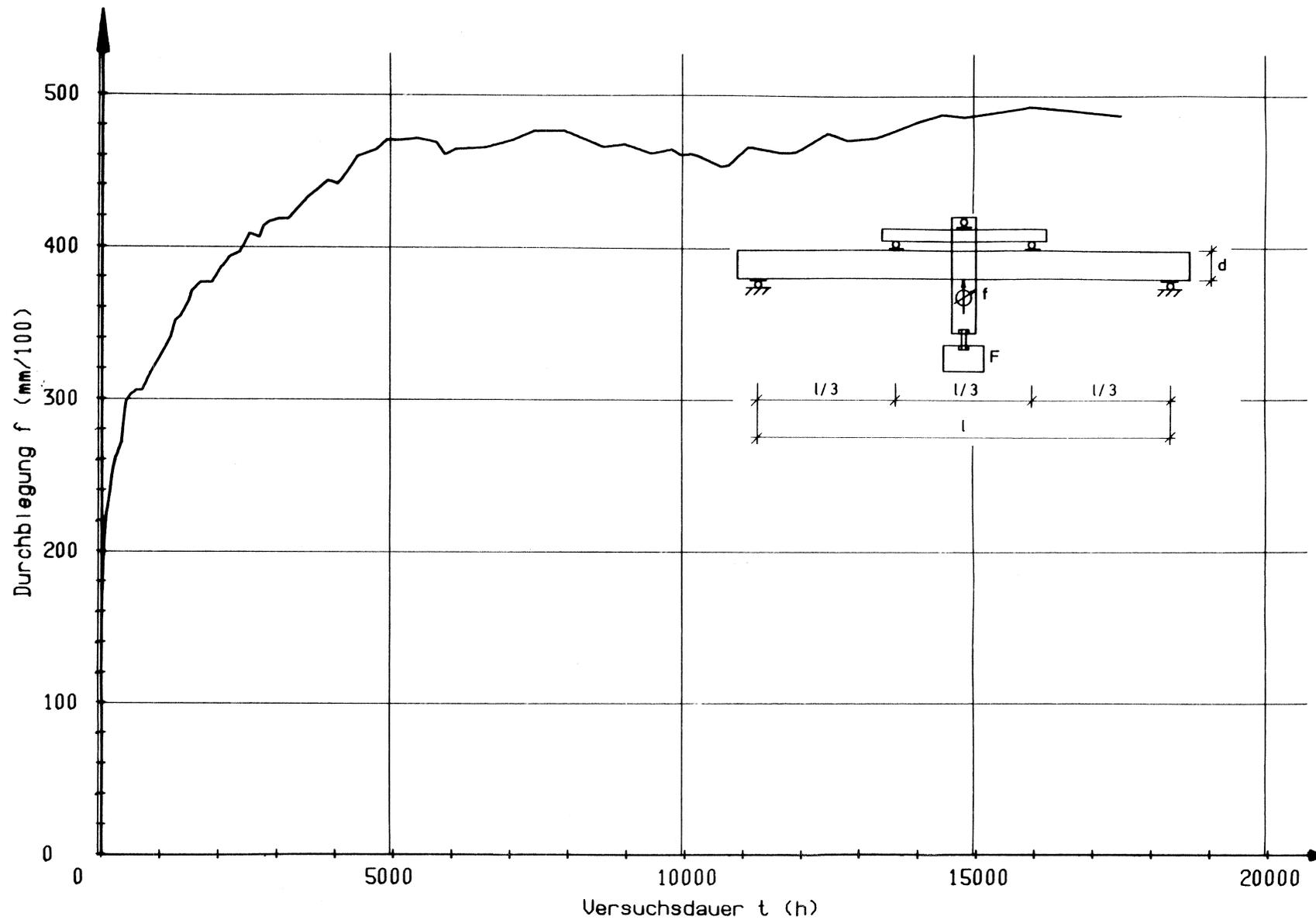


Bild 45: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 88, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

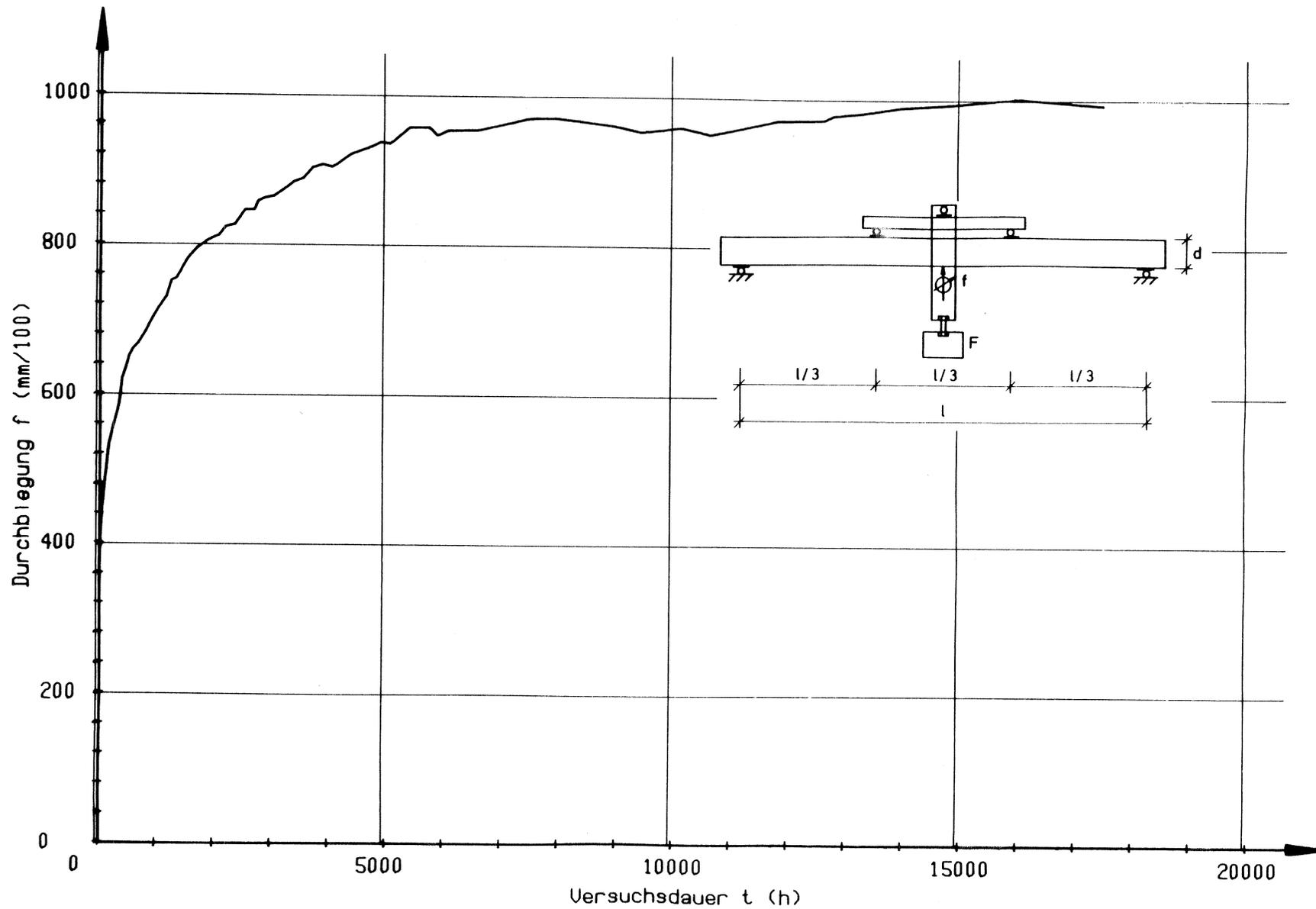
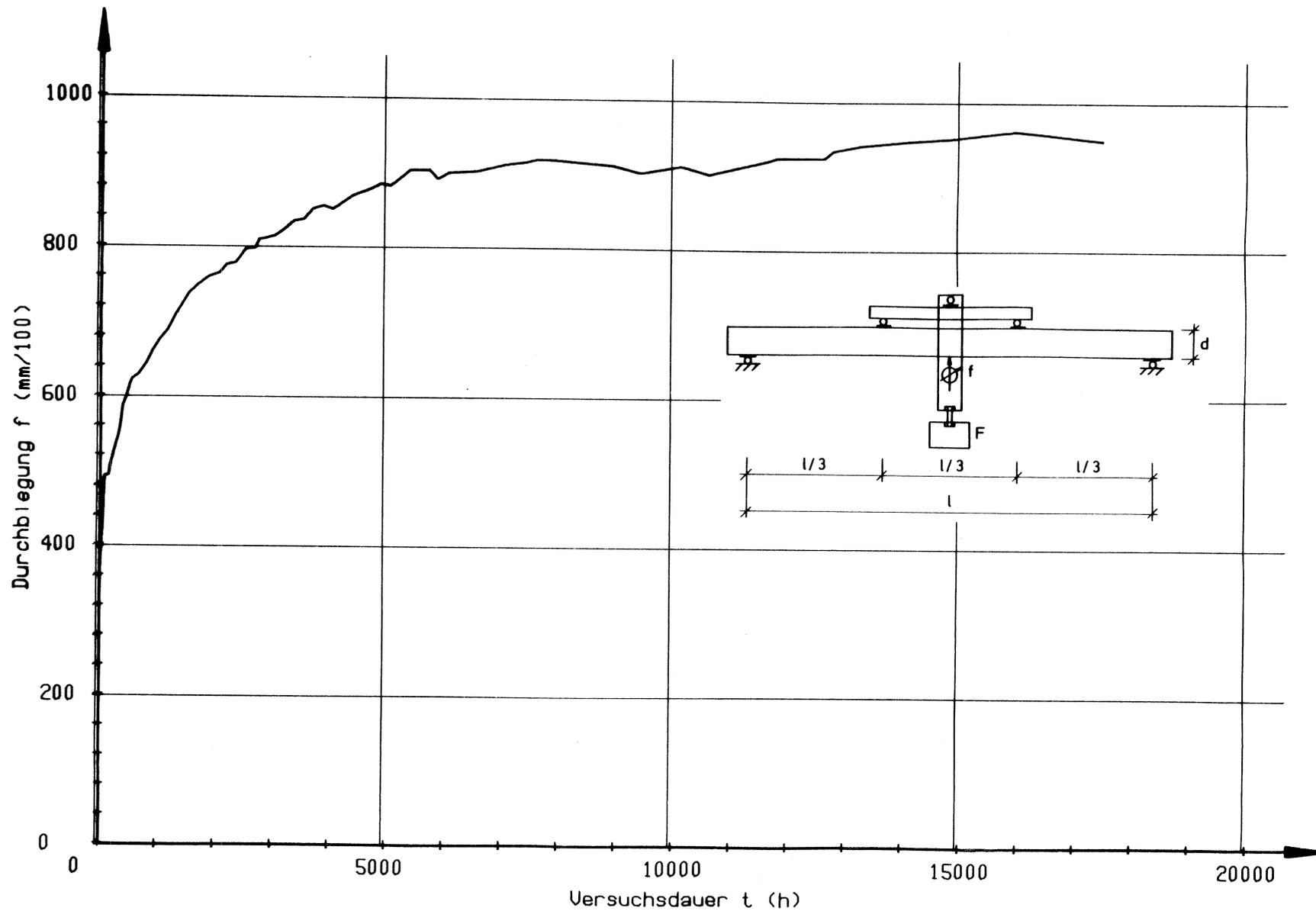


Bild 46: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 100, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 47:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 102, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

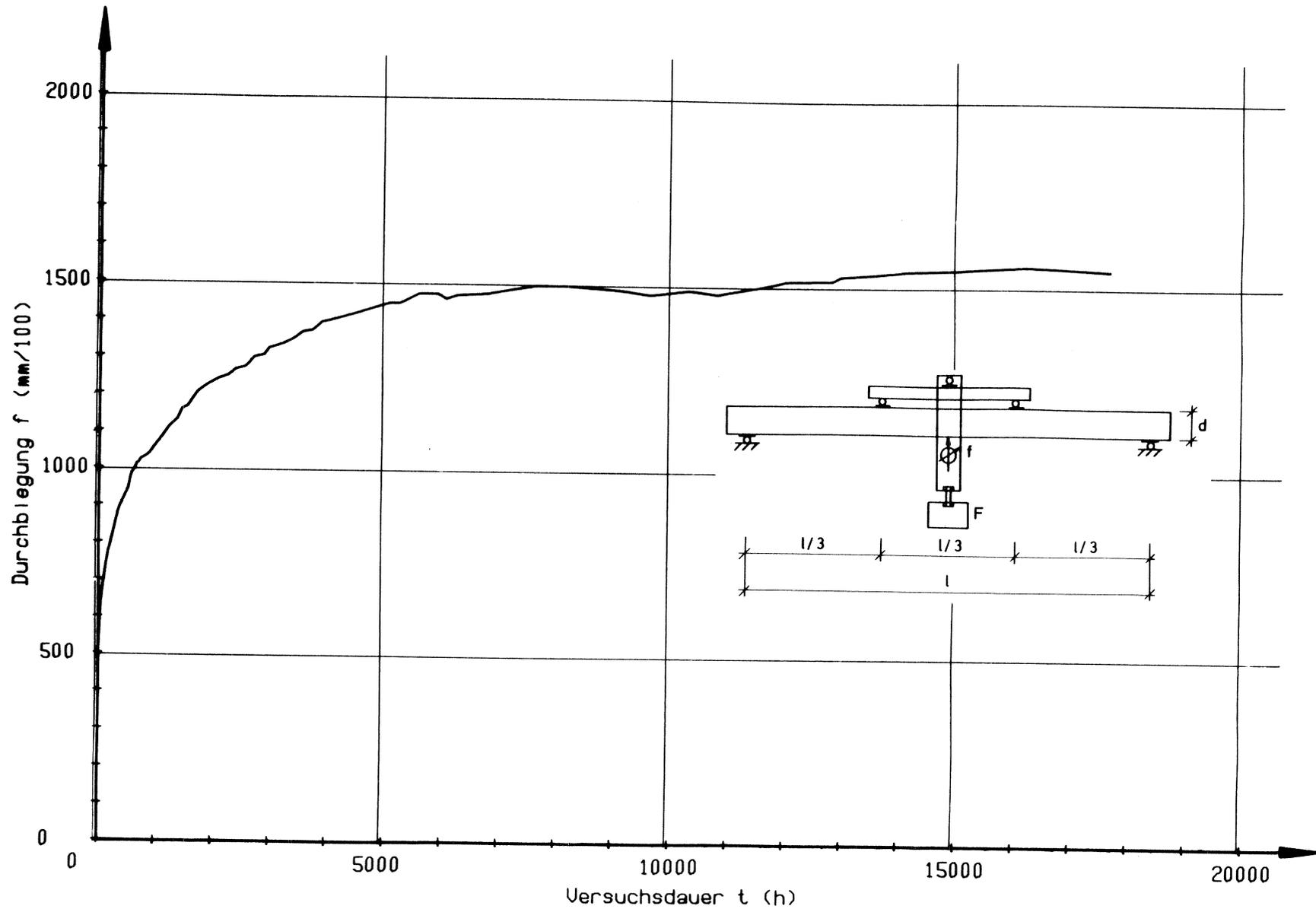
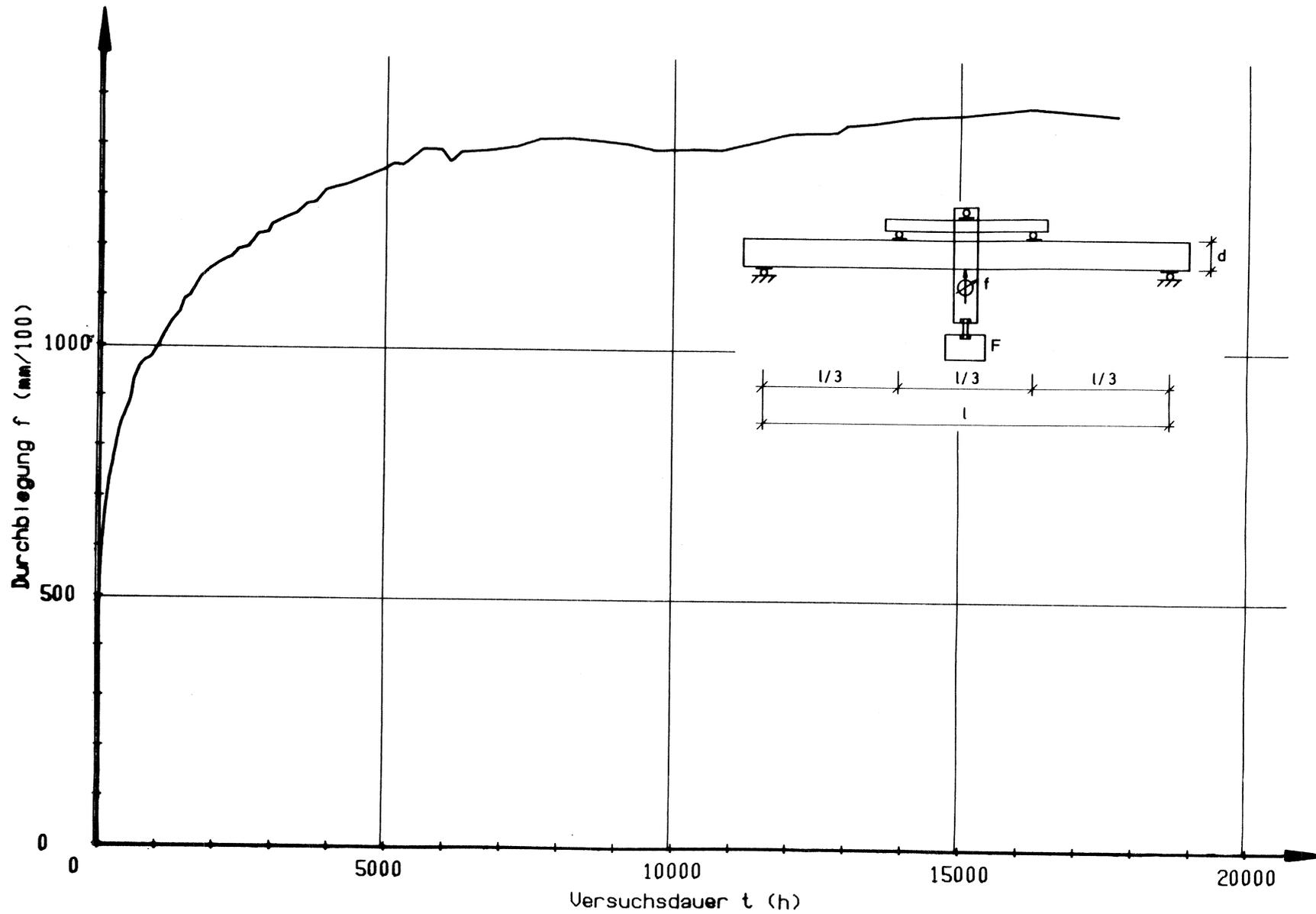


Bild 48: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 107, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 49:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 109, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

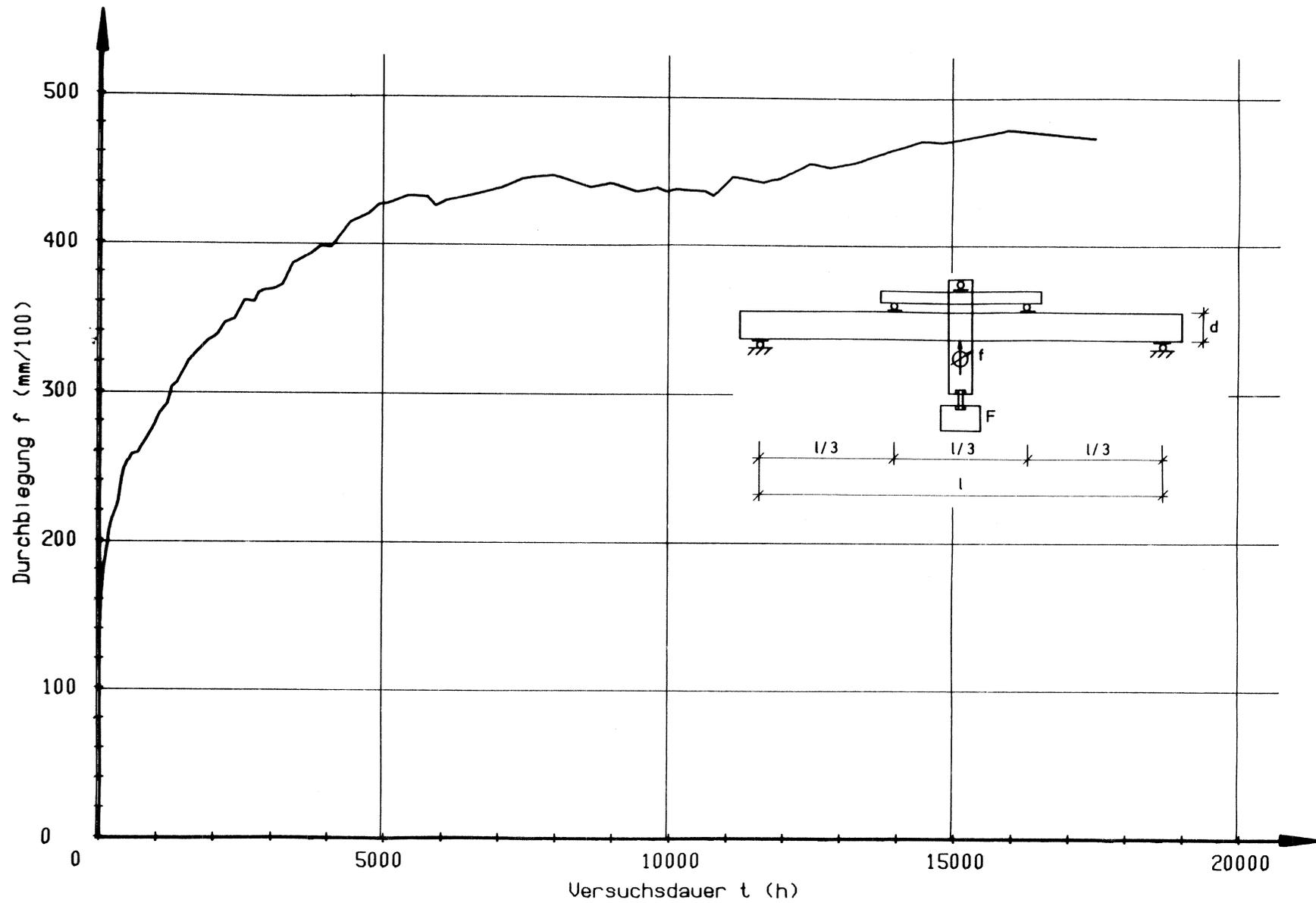
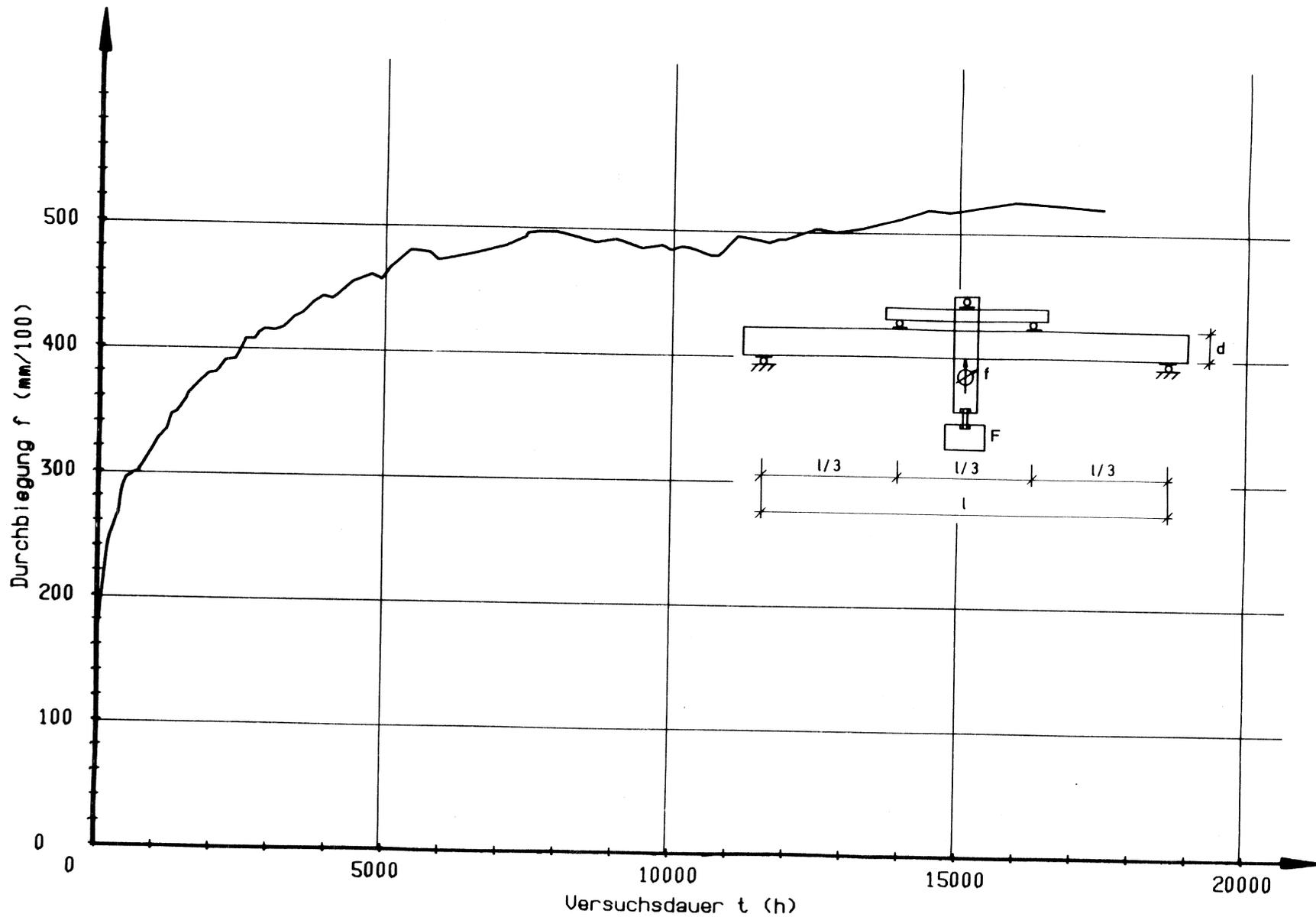


Bild 50: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 128, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



**Bild 51:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 130, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

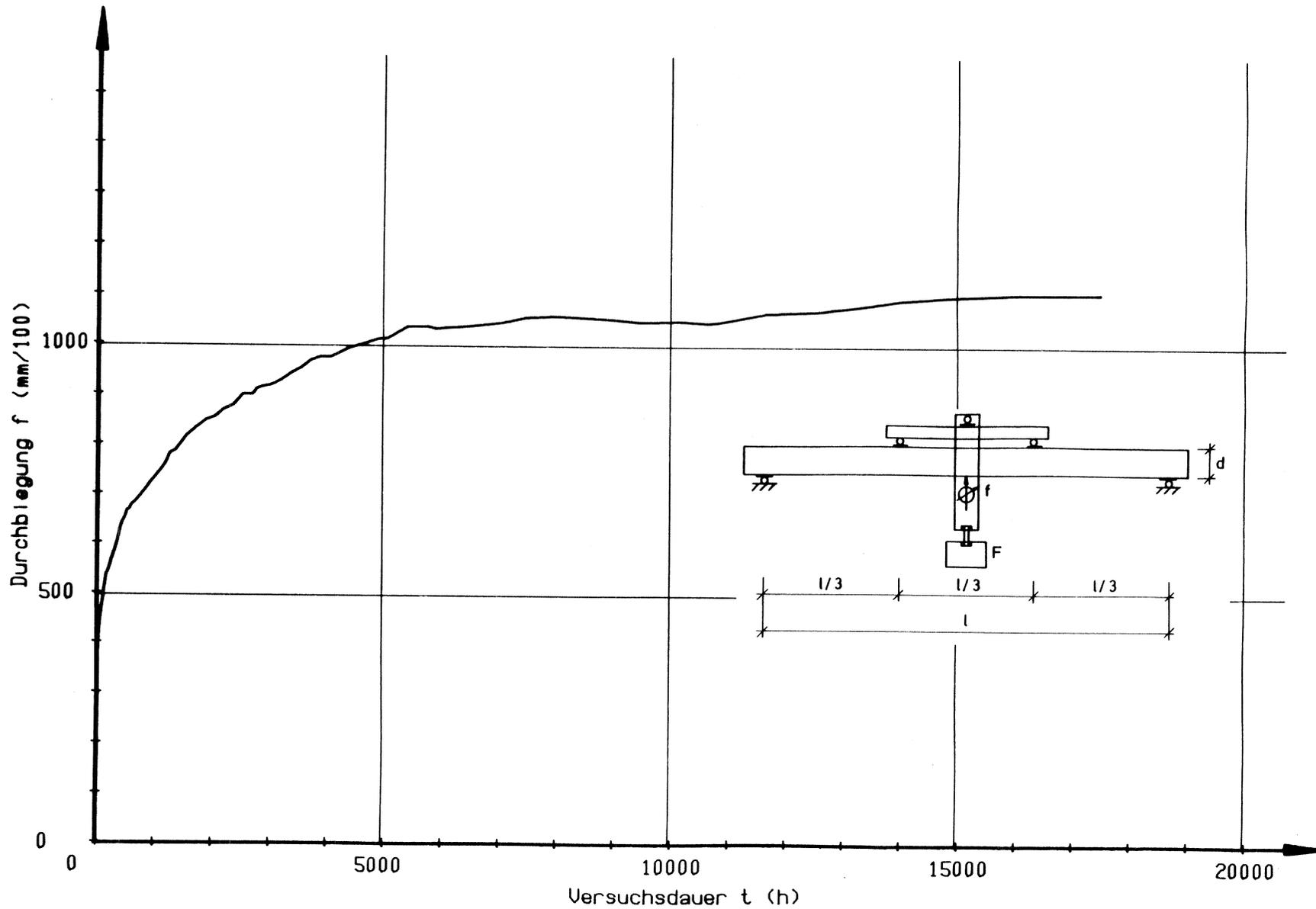


Bild 52: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 142, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)

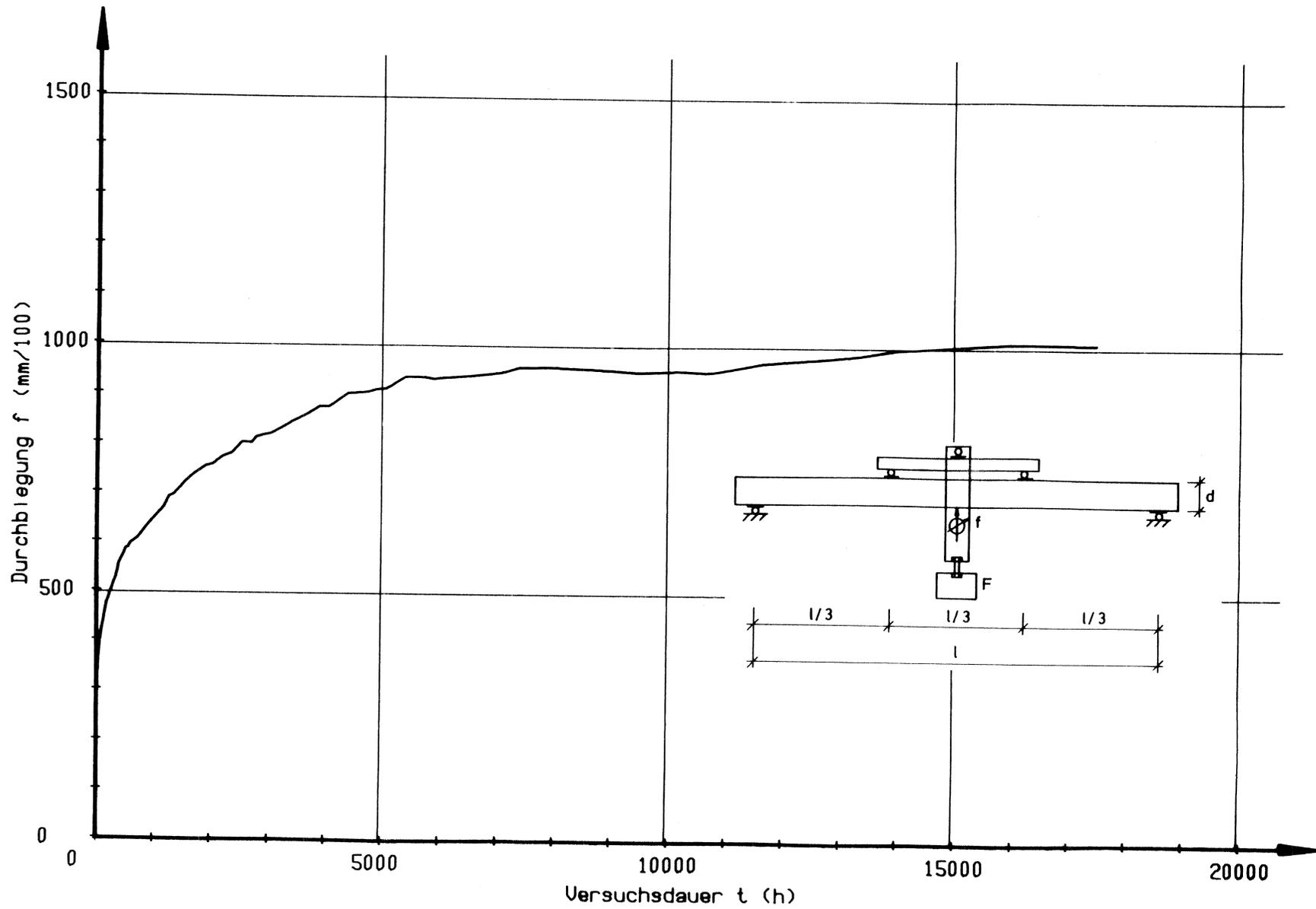
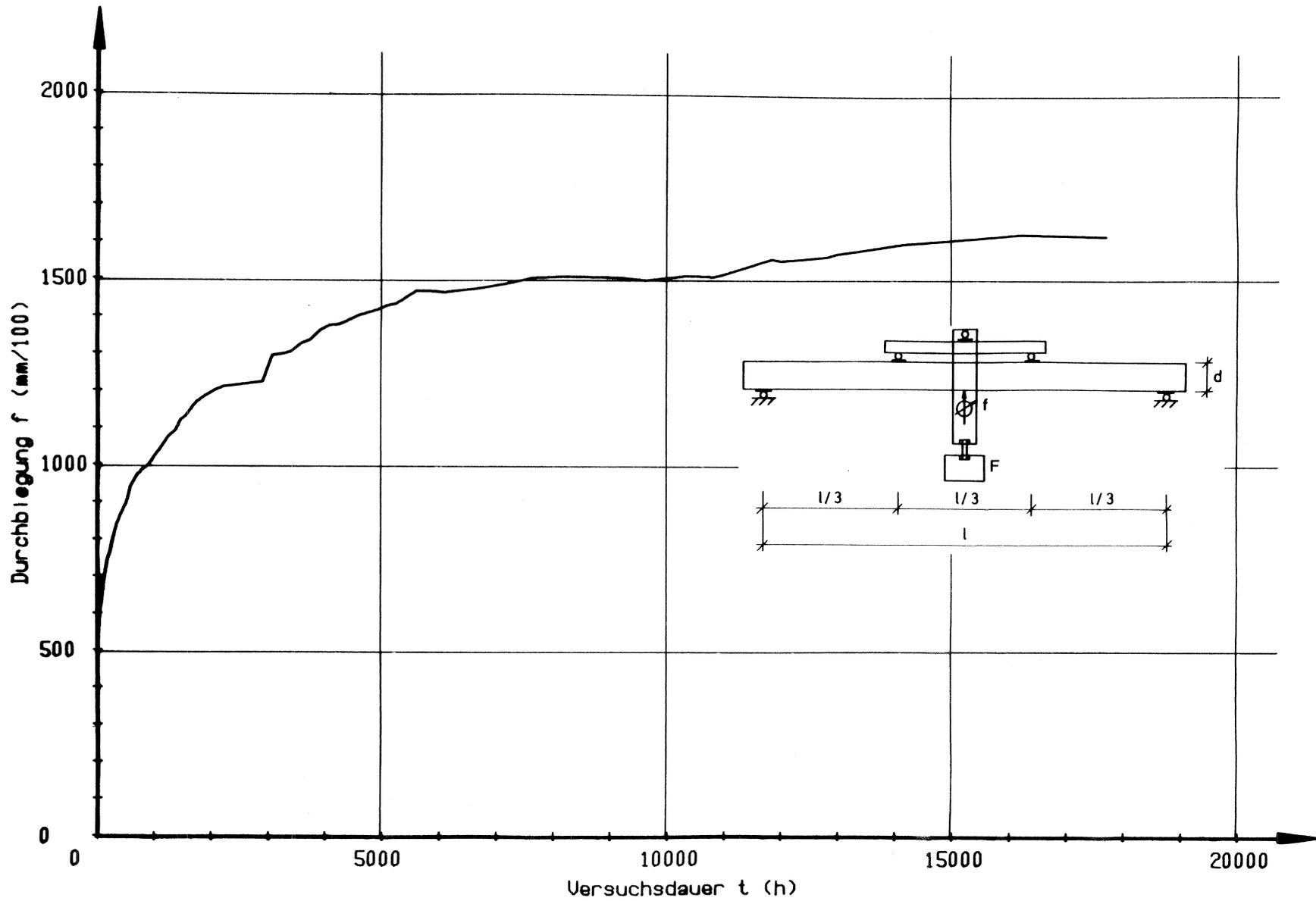
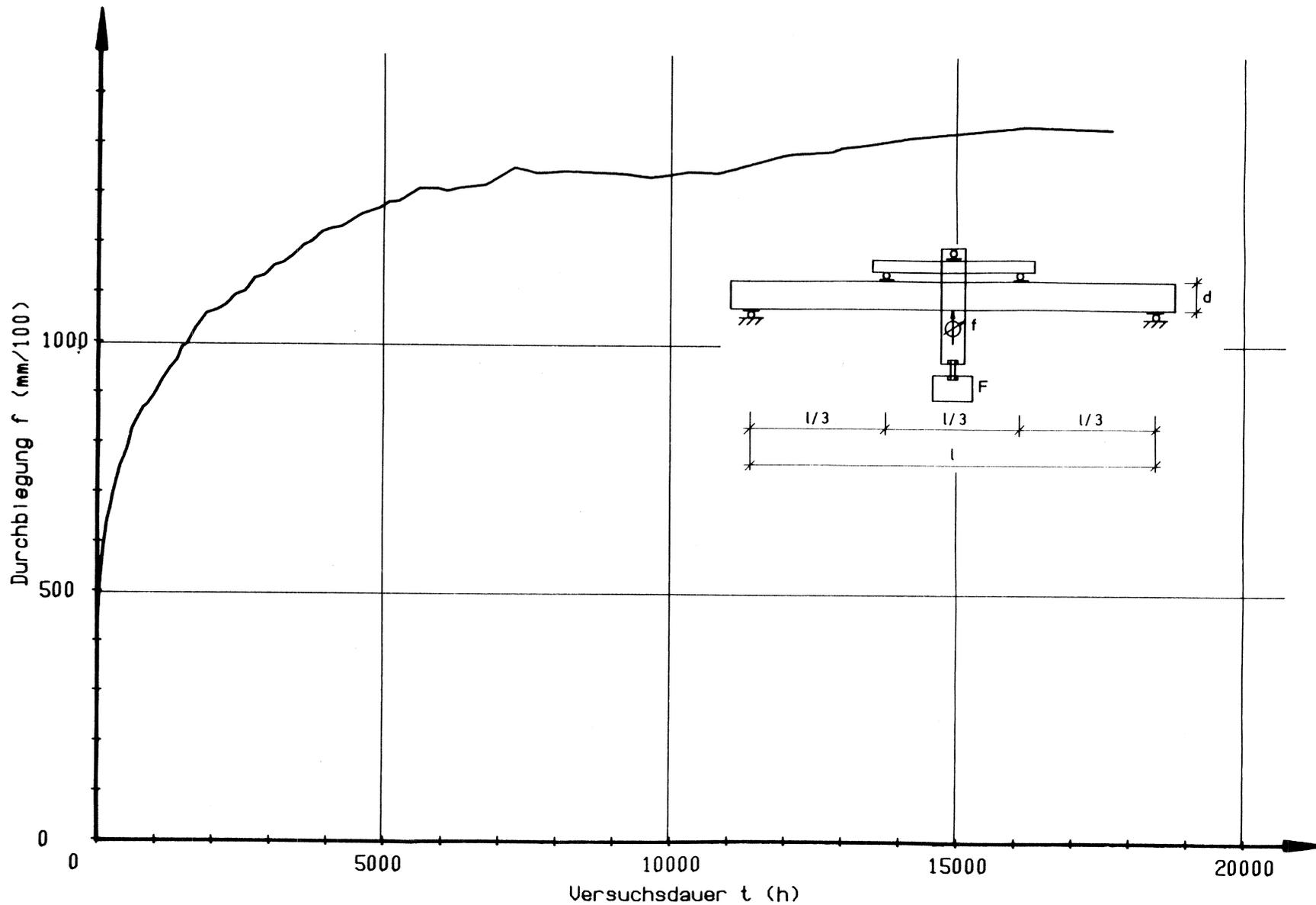


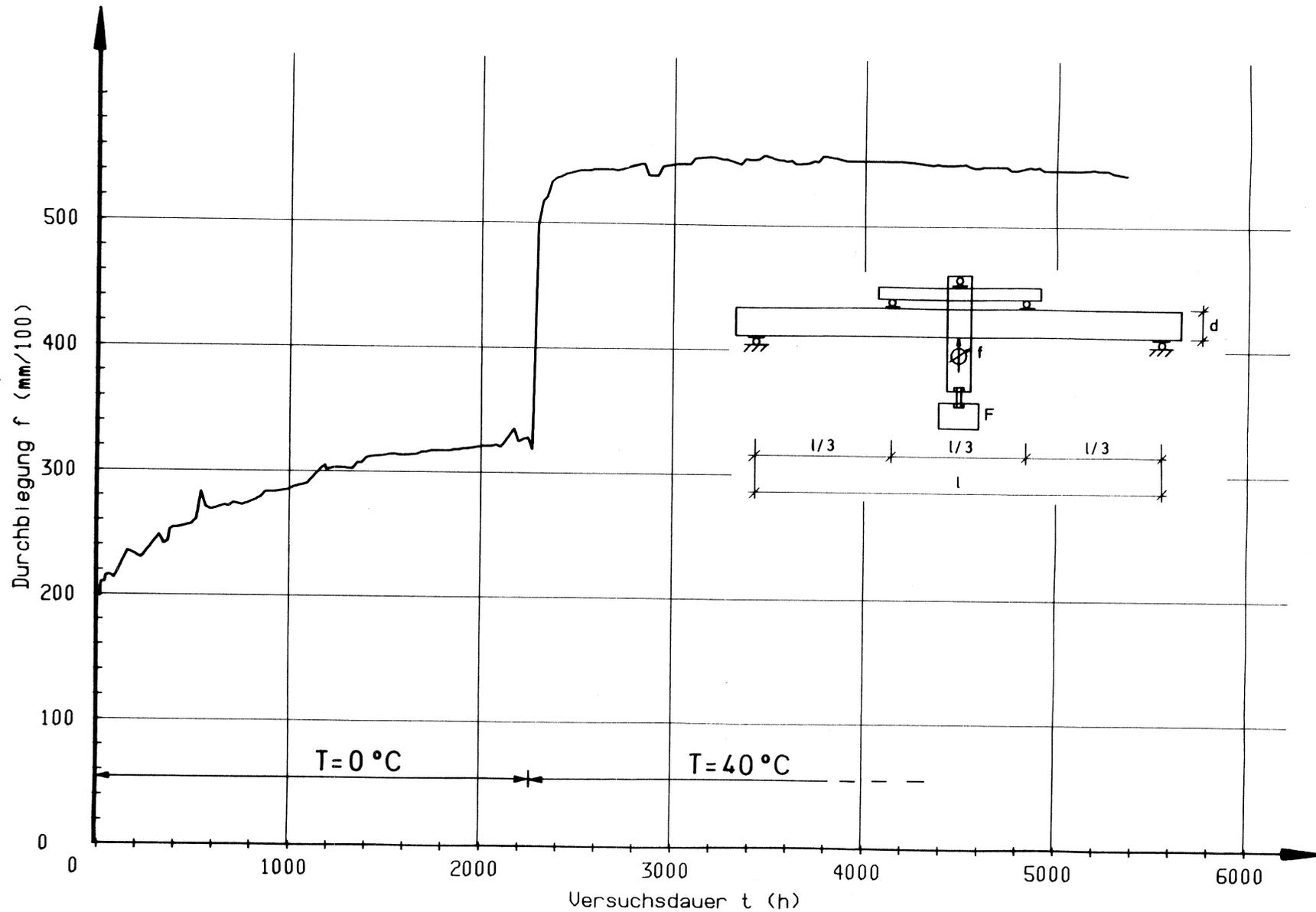
Bild 53: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 144, 20% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



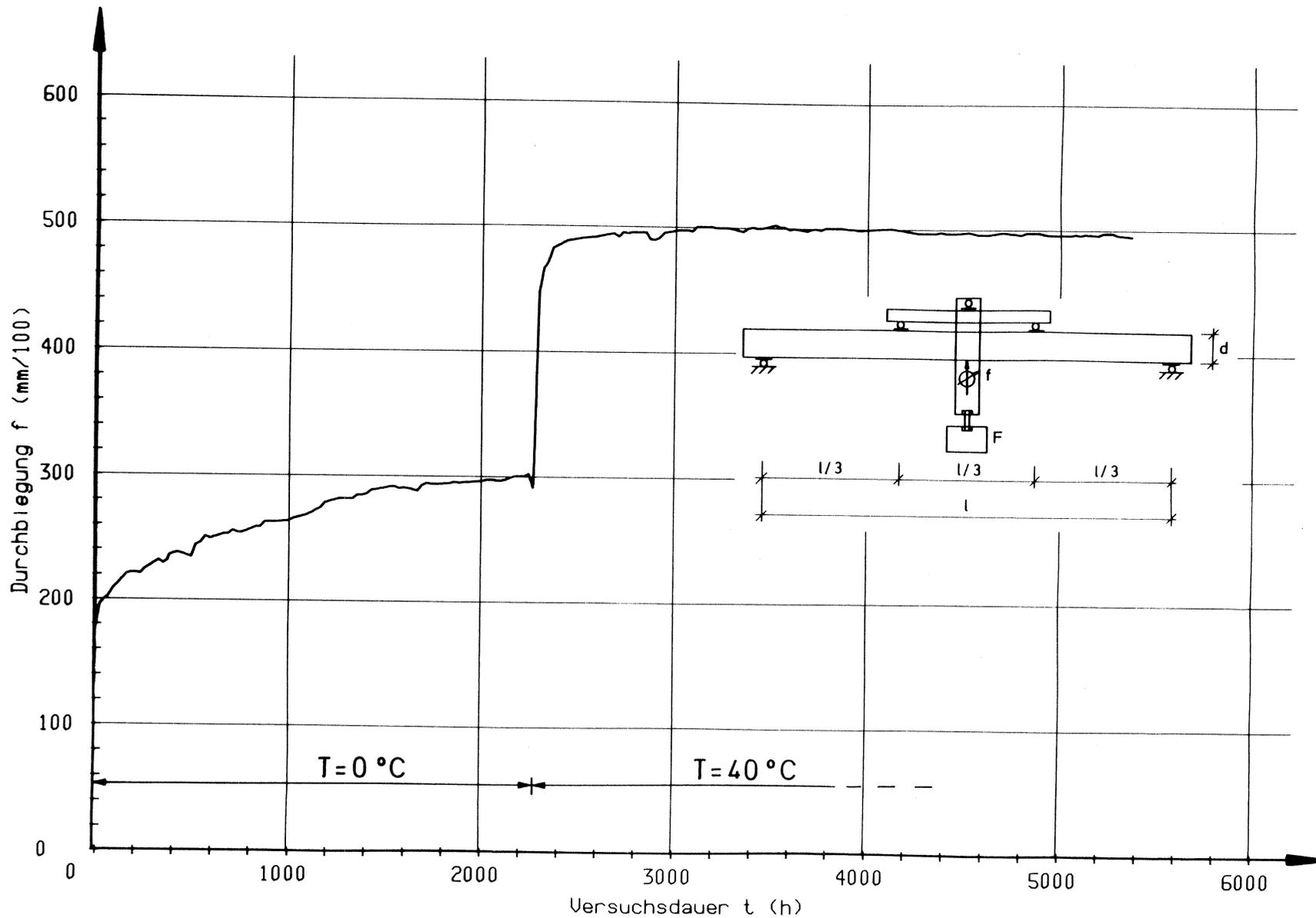
**Bild 54:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 149, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



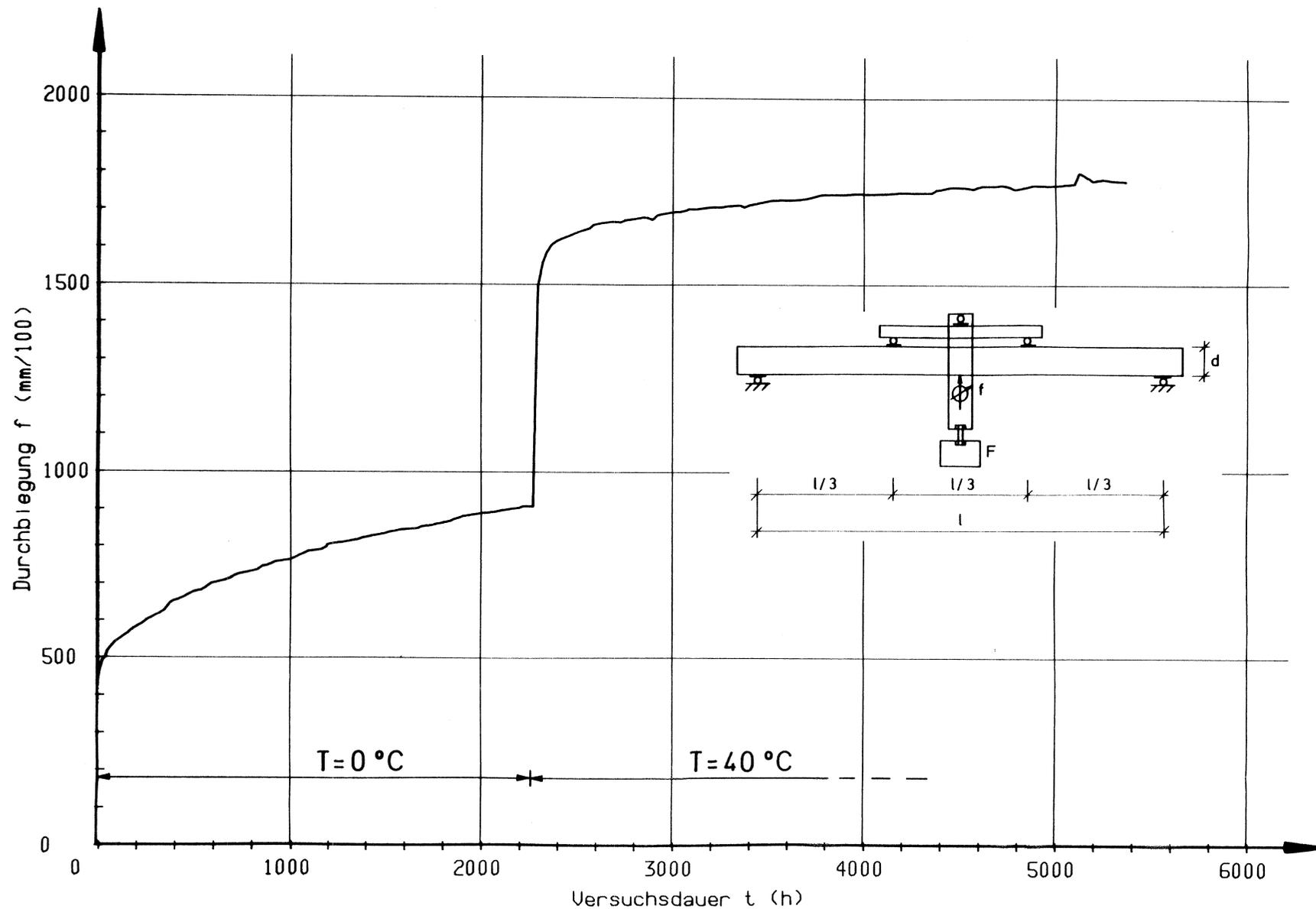
**Bild 55:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 151, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung)



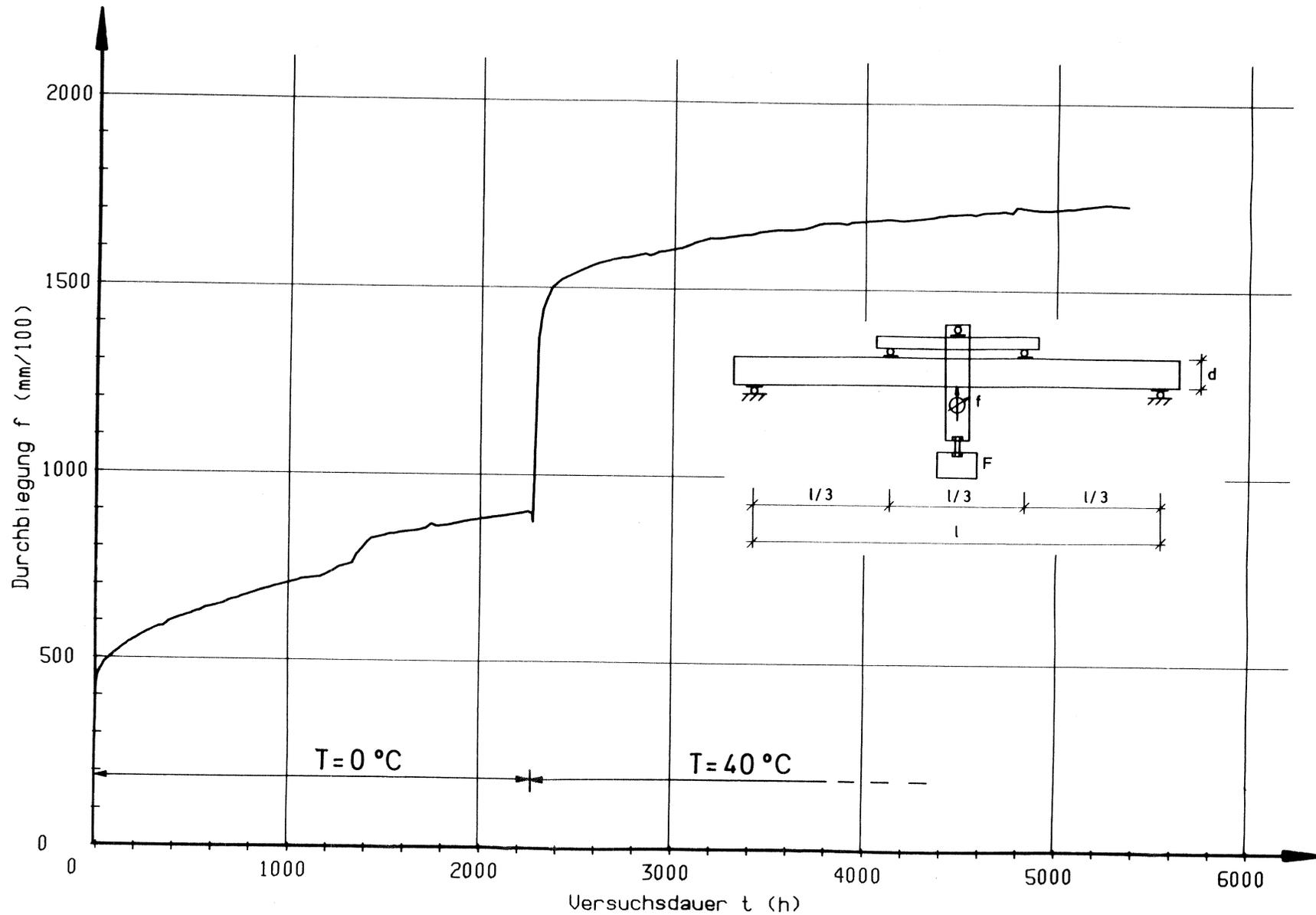
**Bild 56:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 99, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



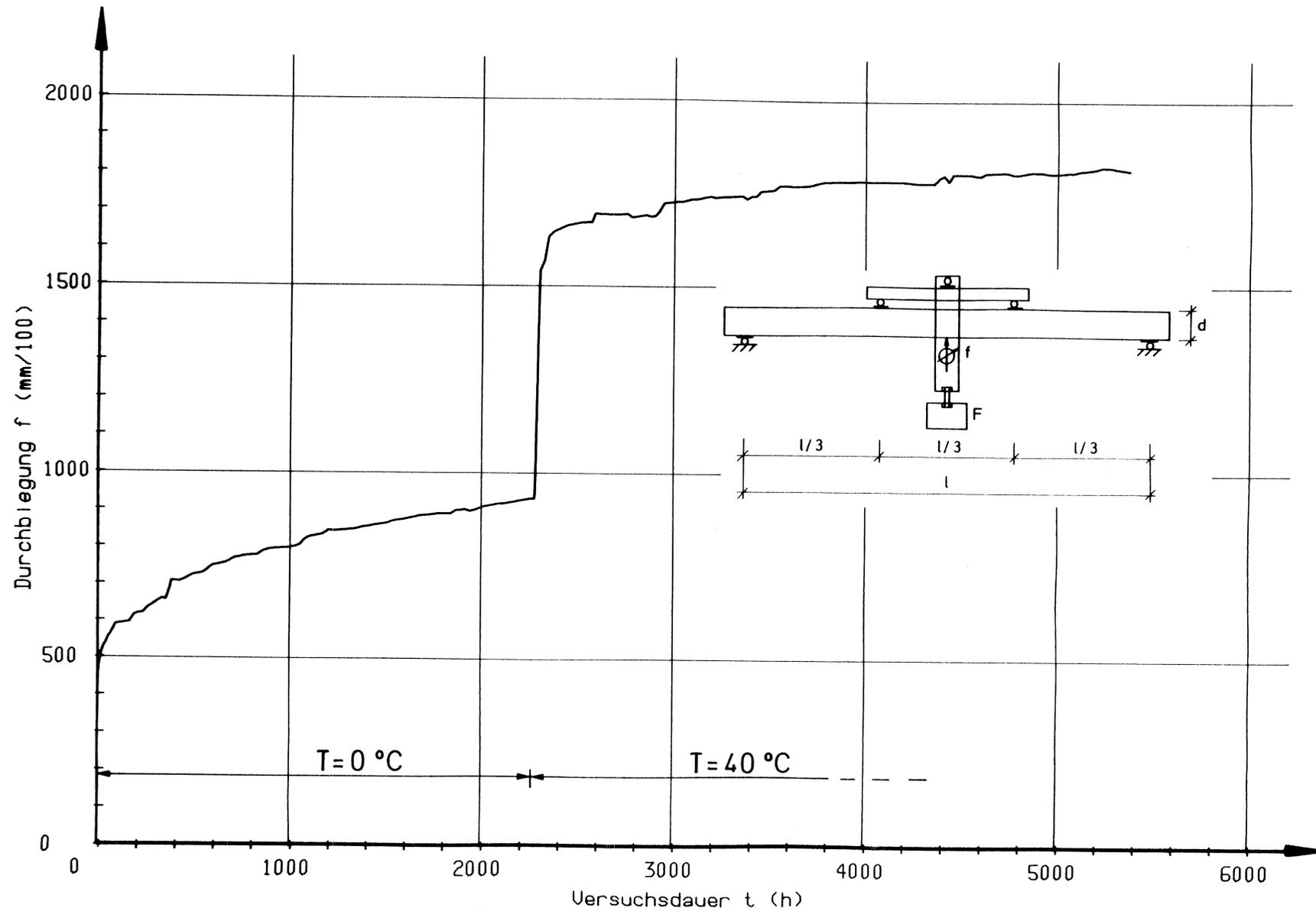
**Bild 57:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 114, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



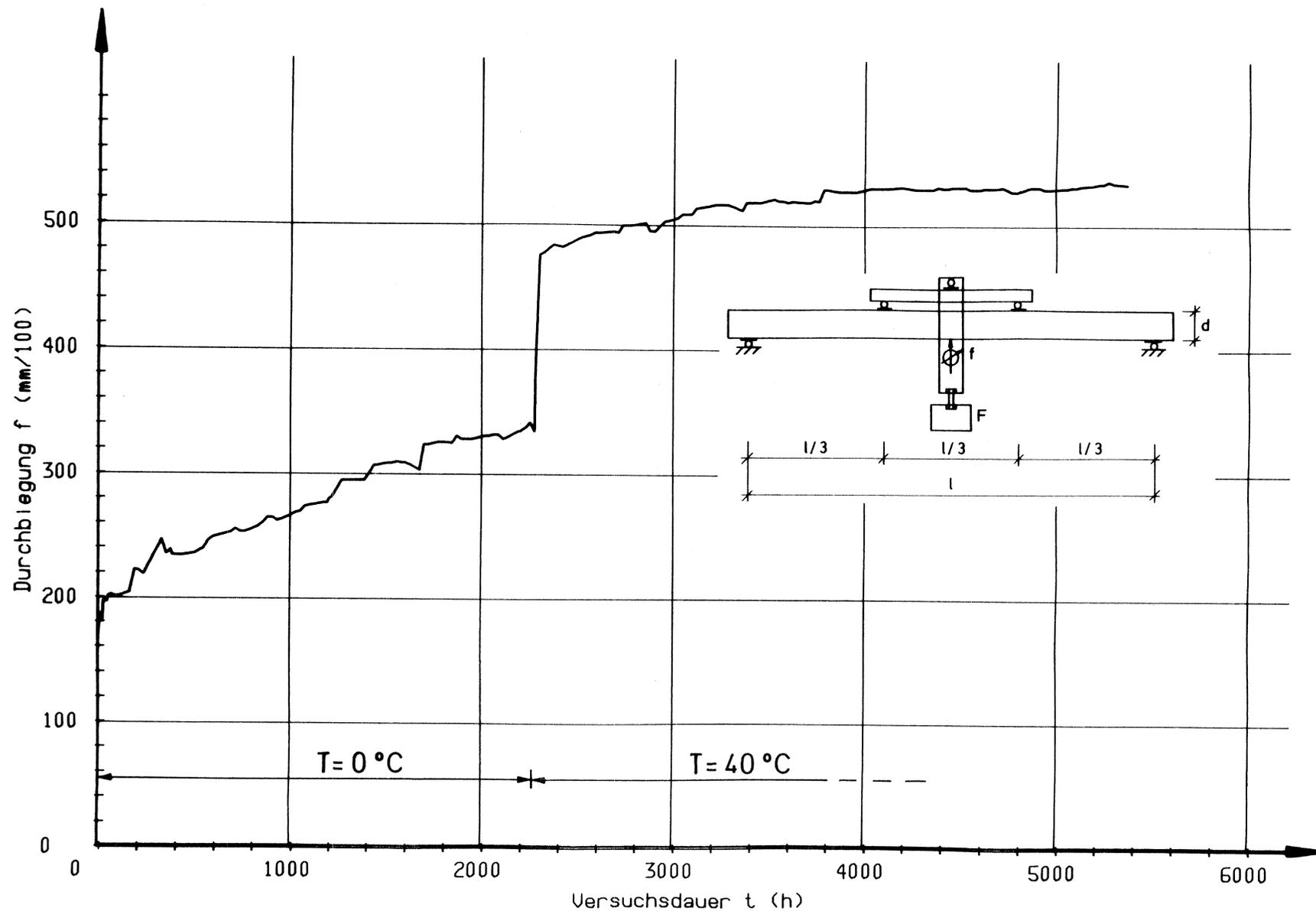
**Bild 58:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 115, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



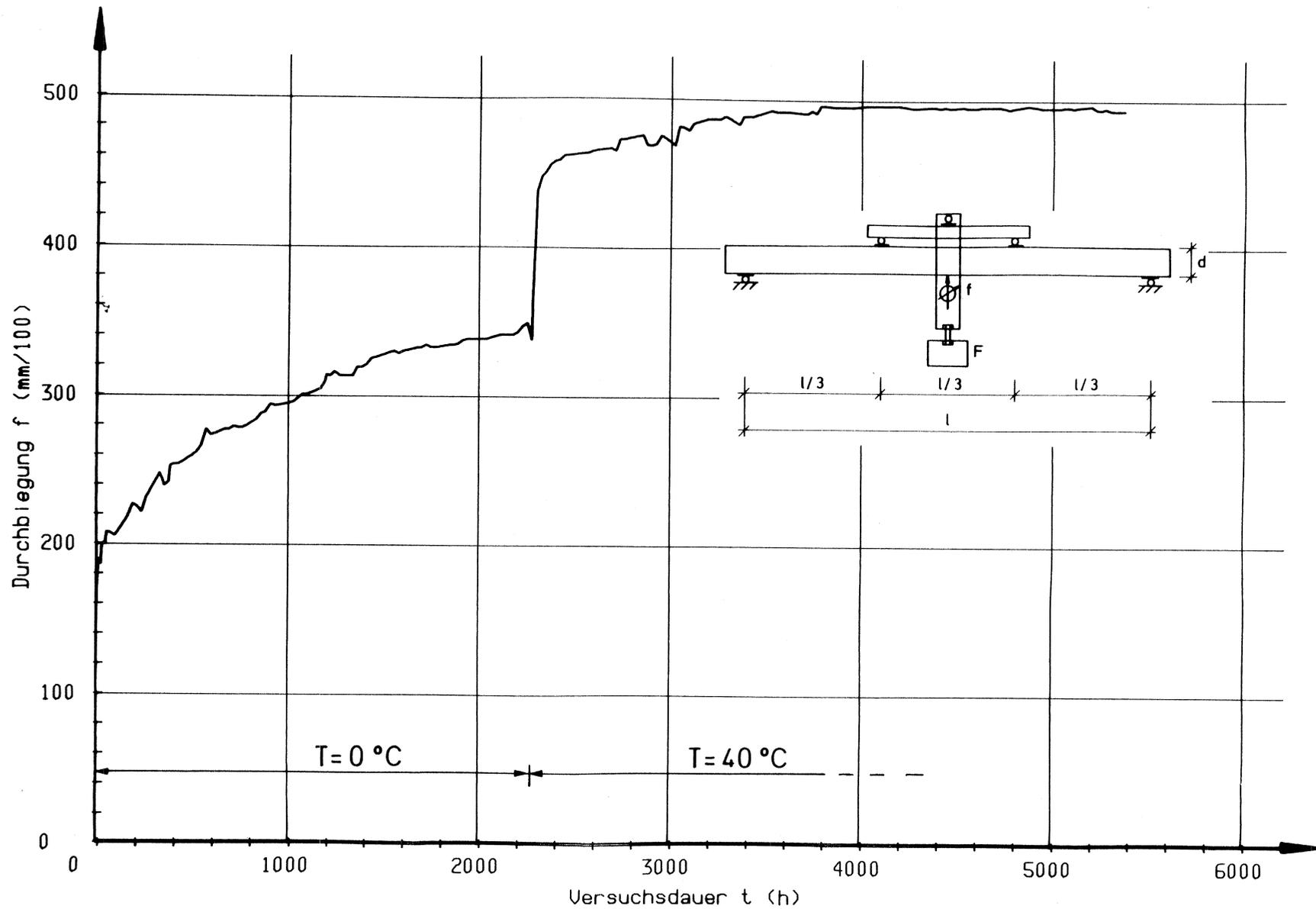
**Bild 59:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 116, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



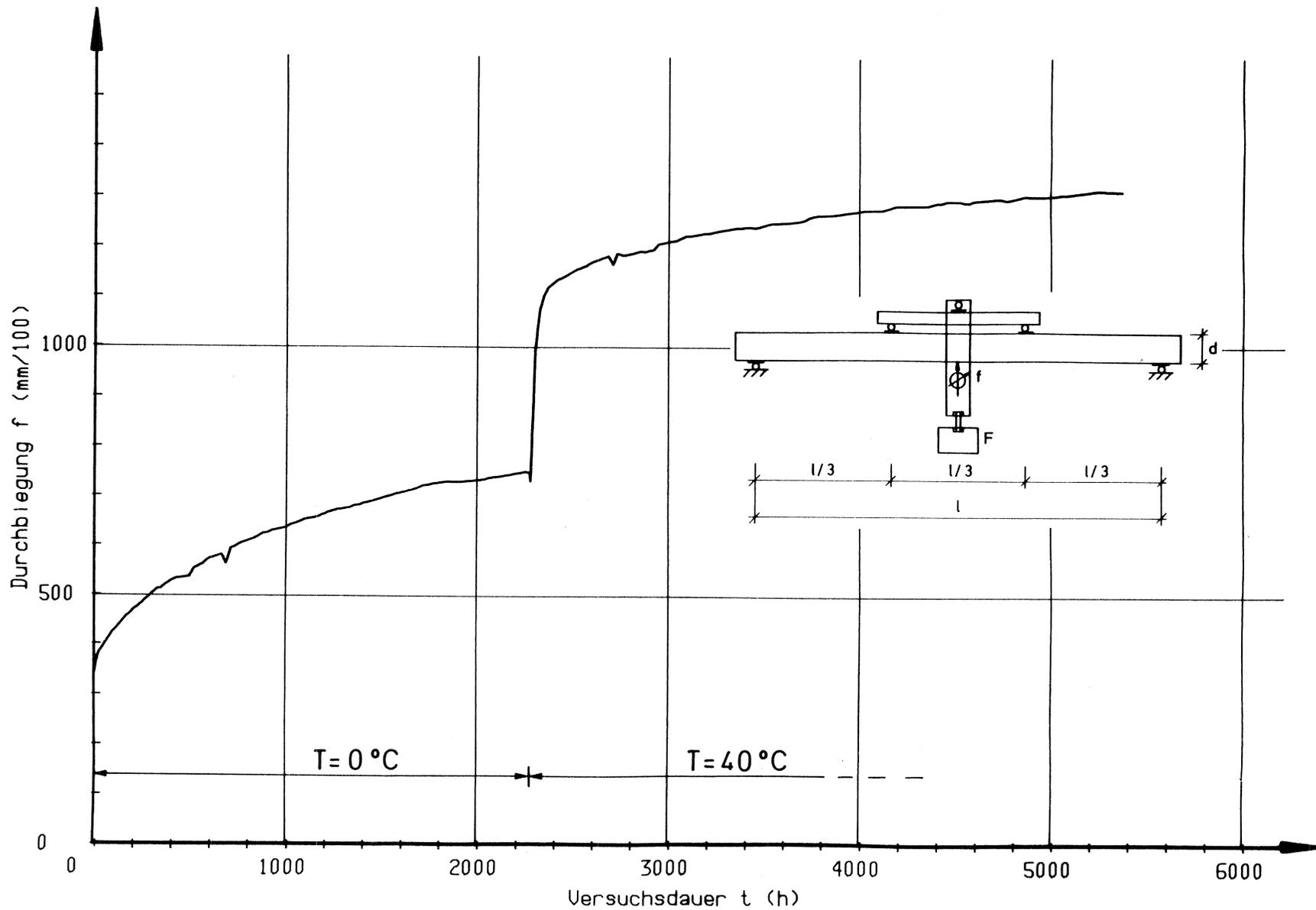
**Bild 60:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 118, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 61:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 139, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 62:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 154, 10% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 63:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 156, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche

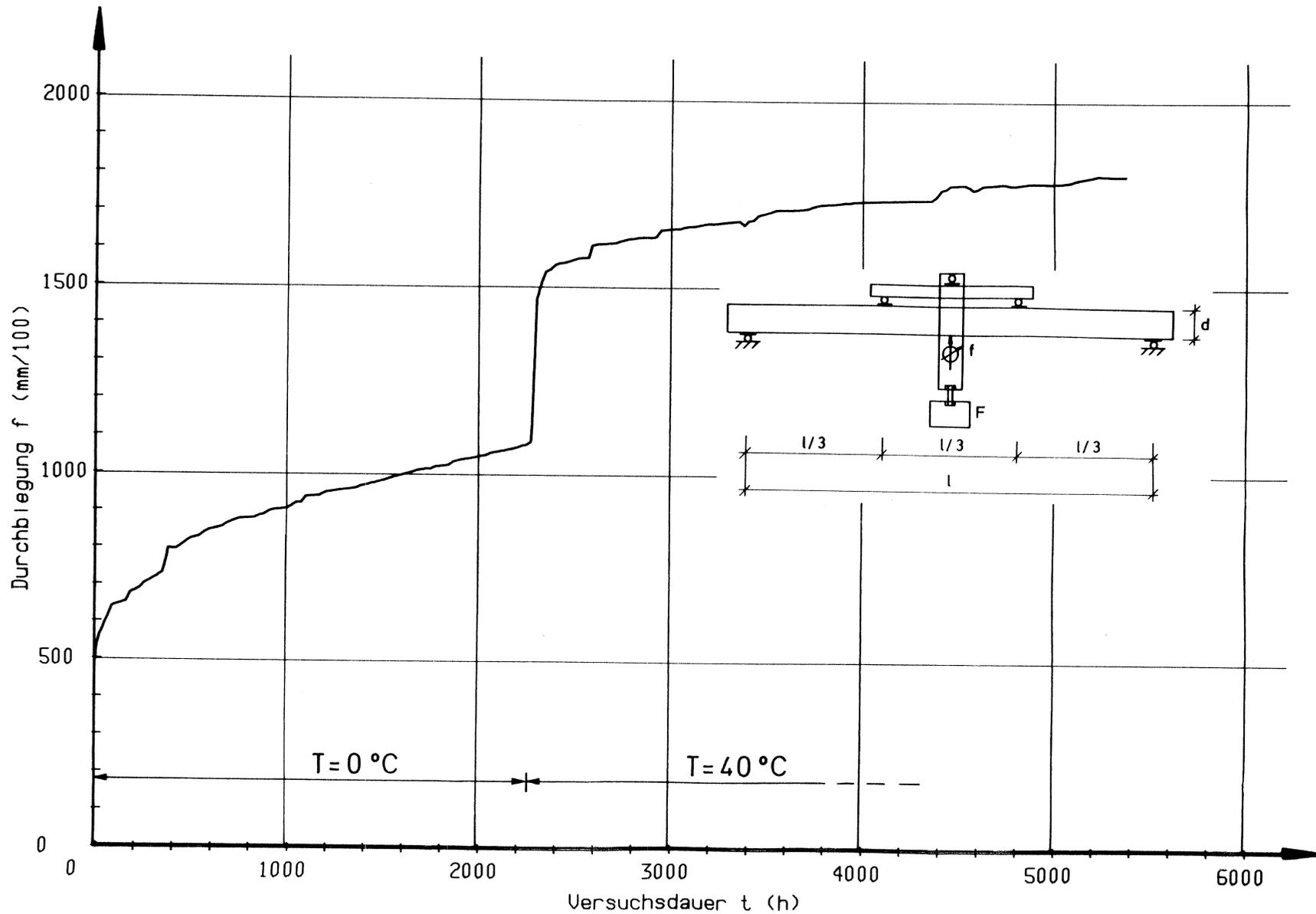
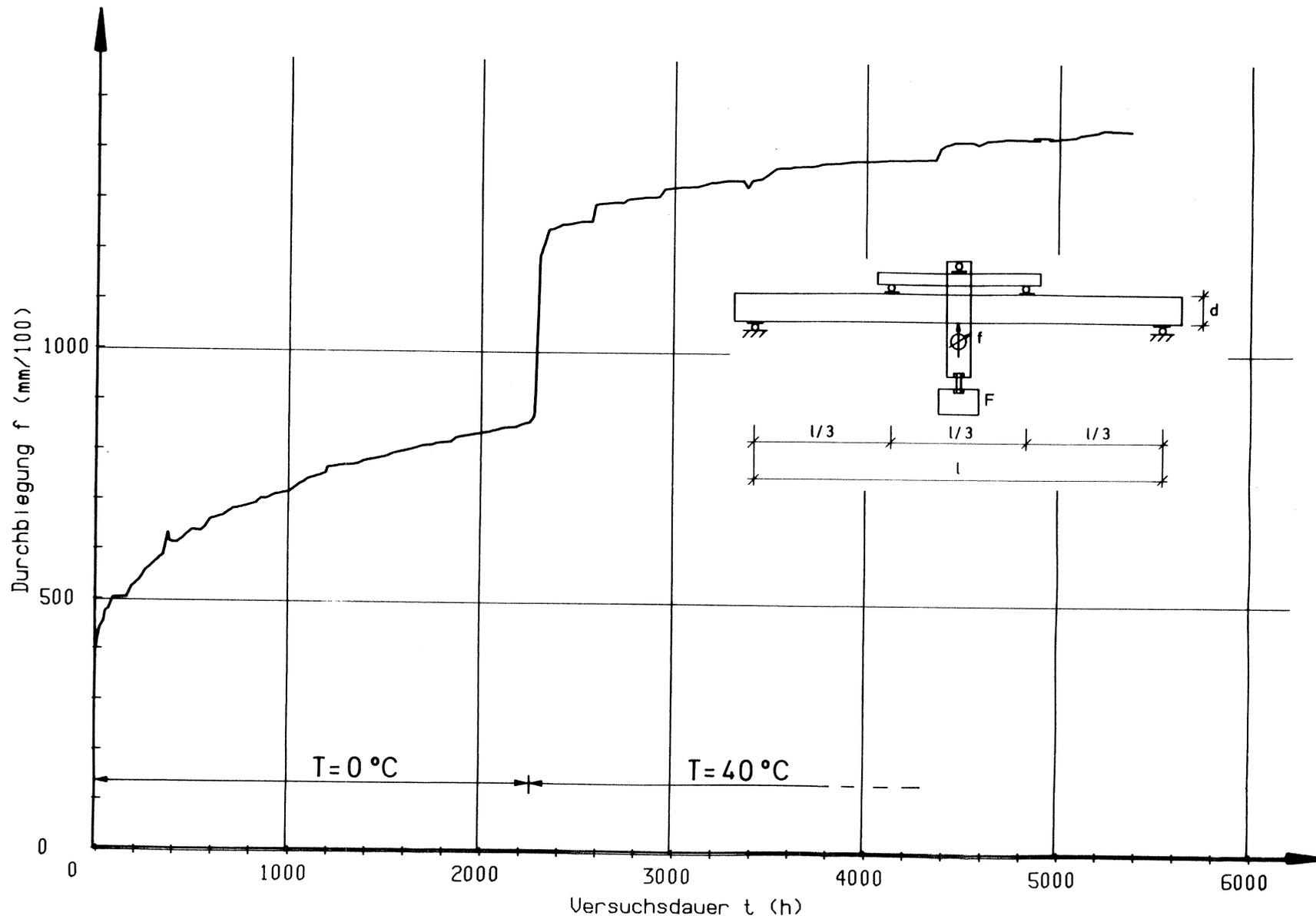
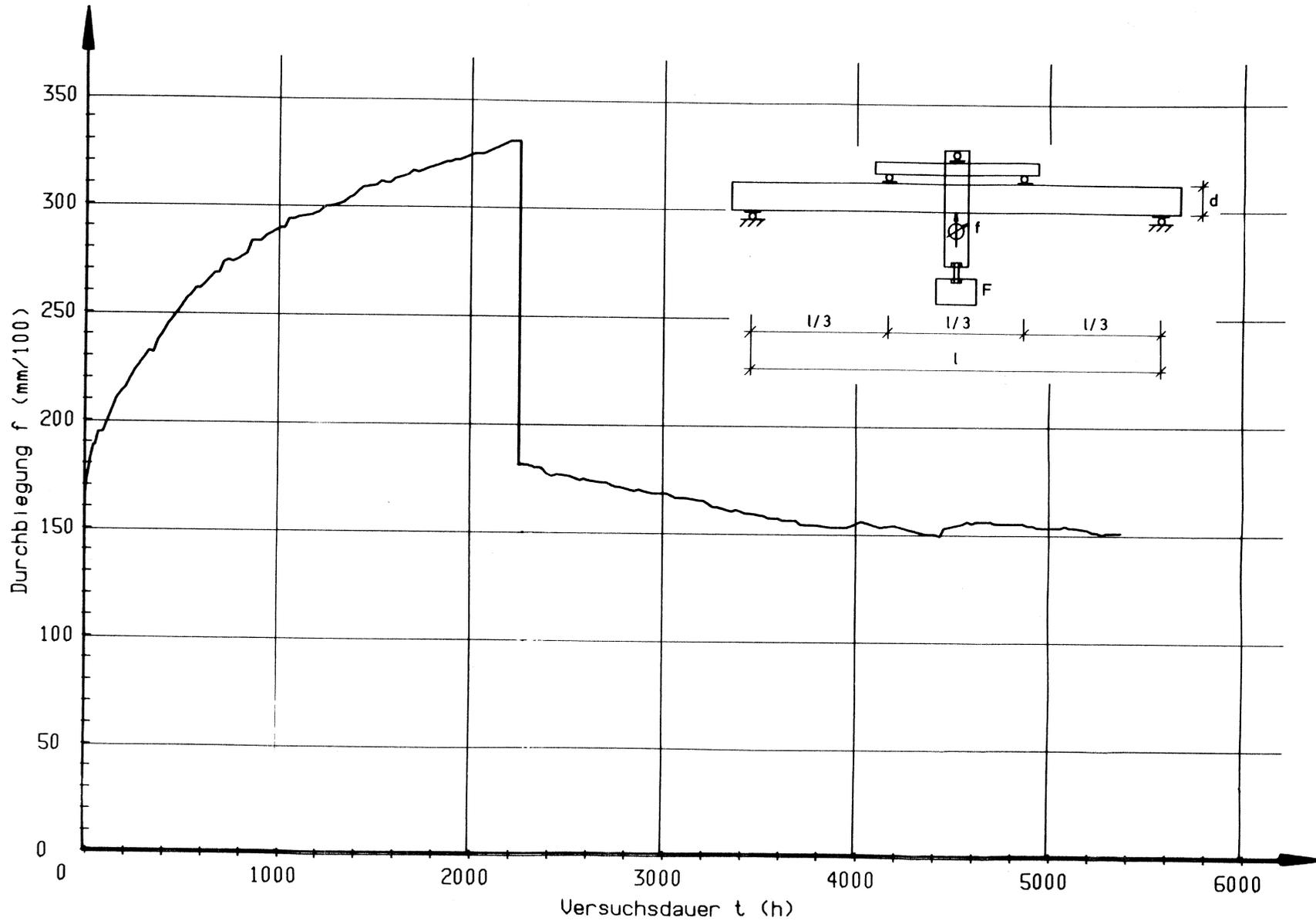


Bild 64: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 157, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 65:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 164, 30% der Kurzzeitbruchlast (Dauerbelastung, Temperatur  $0^\circ\text{C}$ , dann Erhöhung auf  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 66:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 111, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei 0°C, Entlastung bei 40°C)

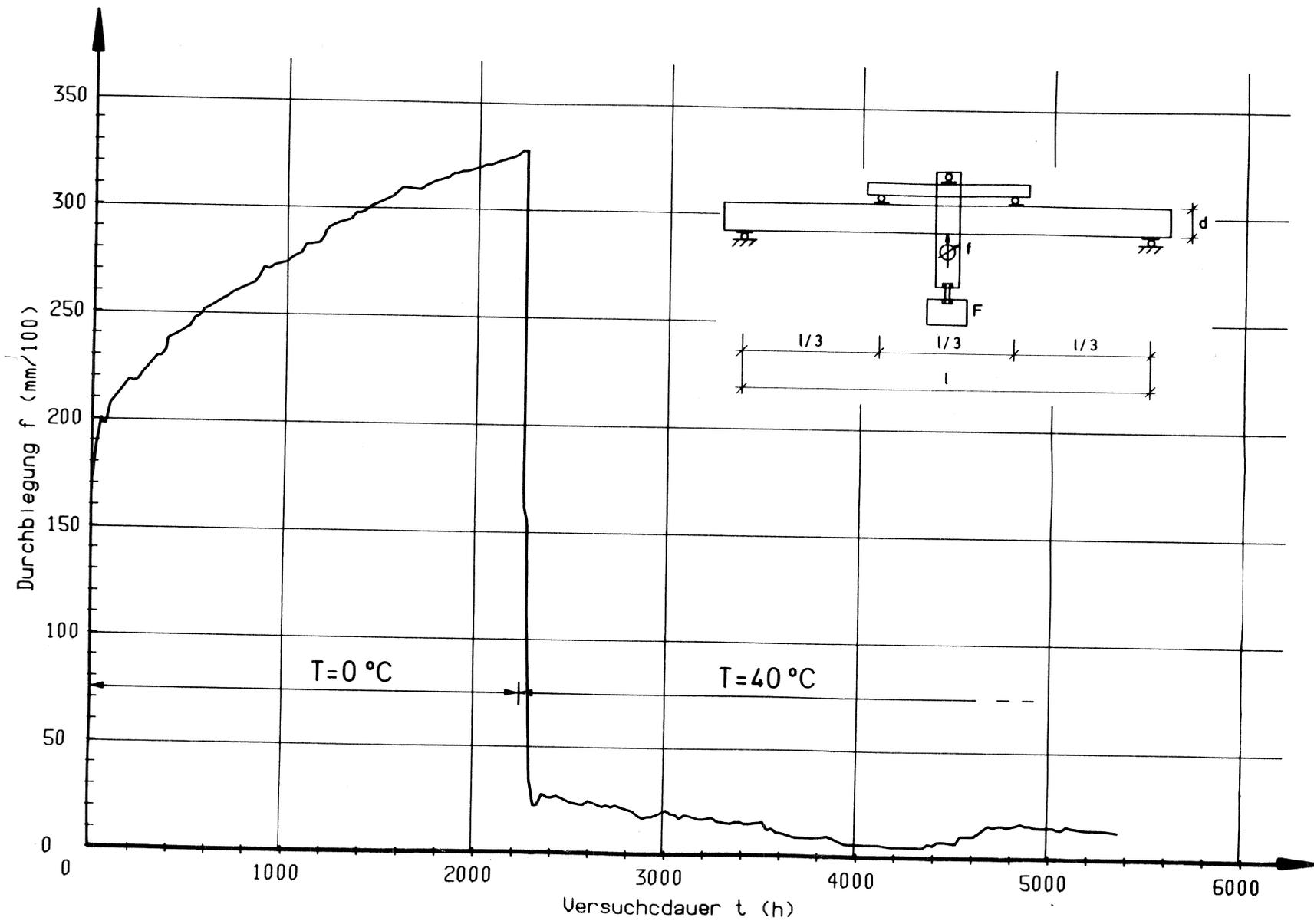


Bild 67: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 113, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )

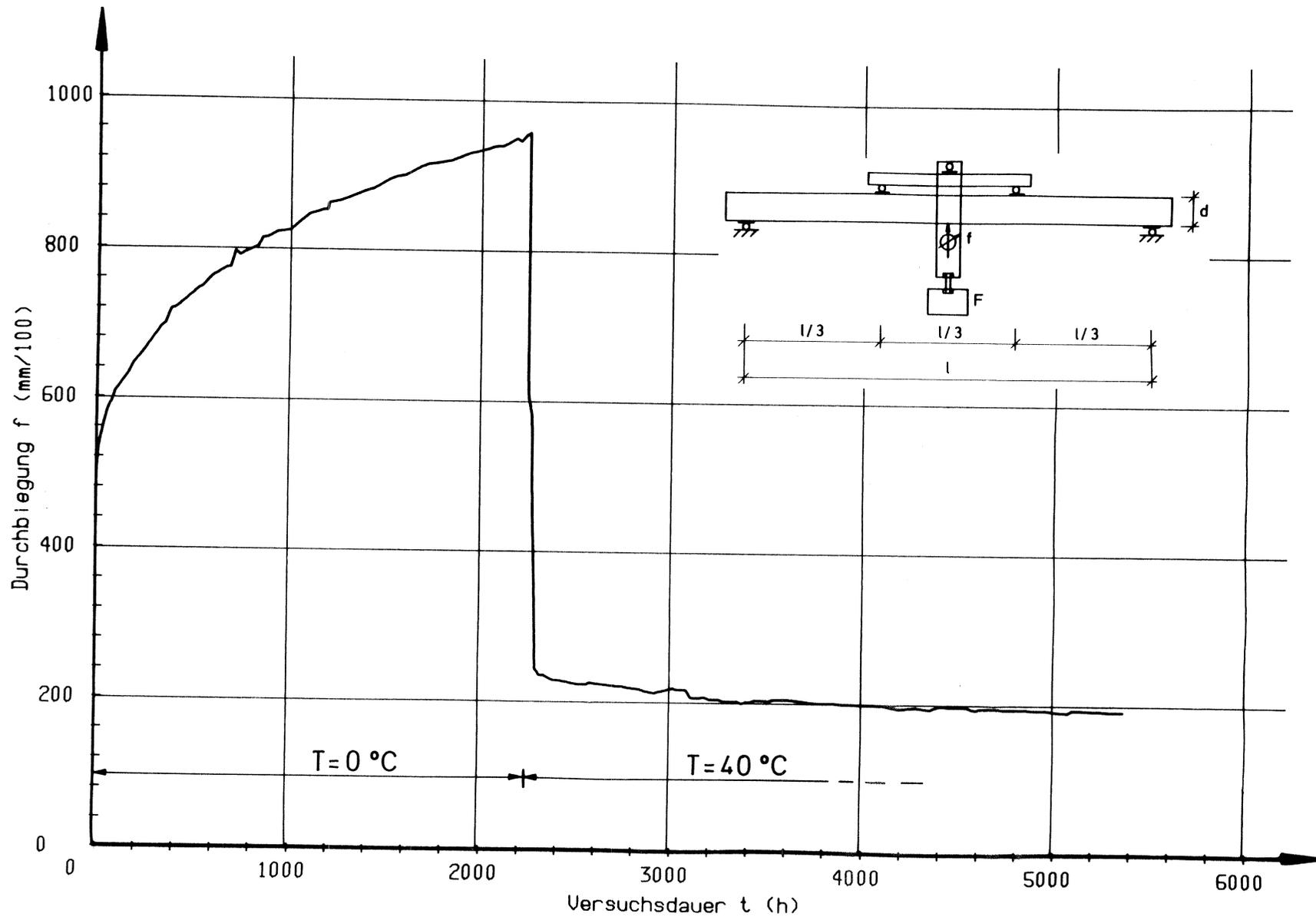


Bild 68: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 119, 30% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )

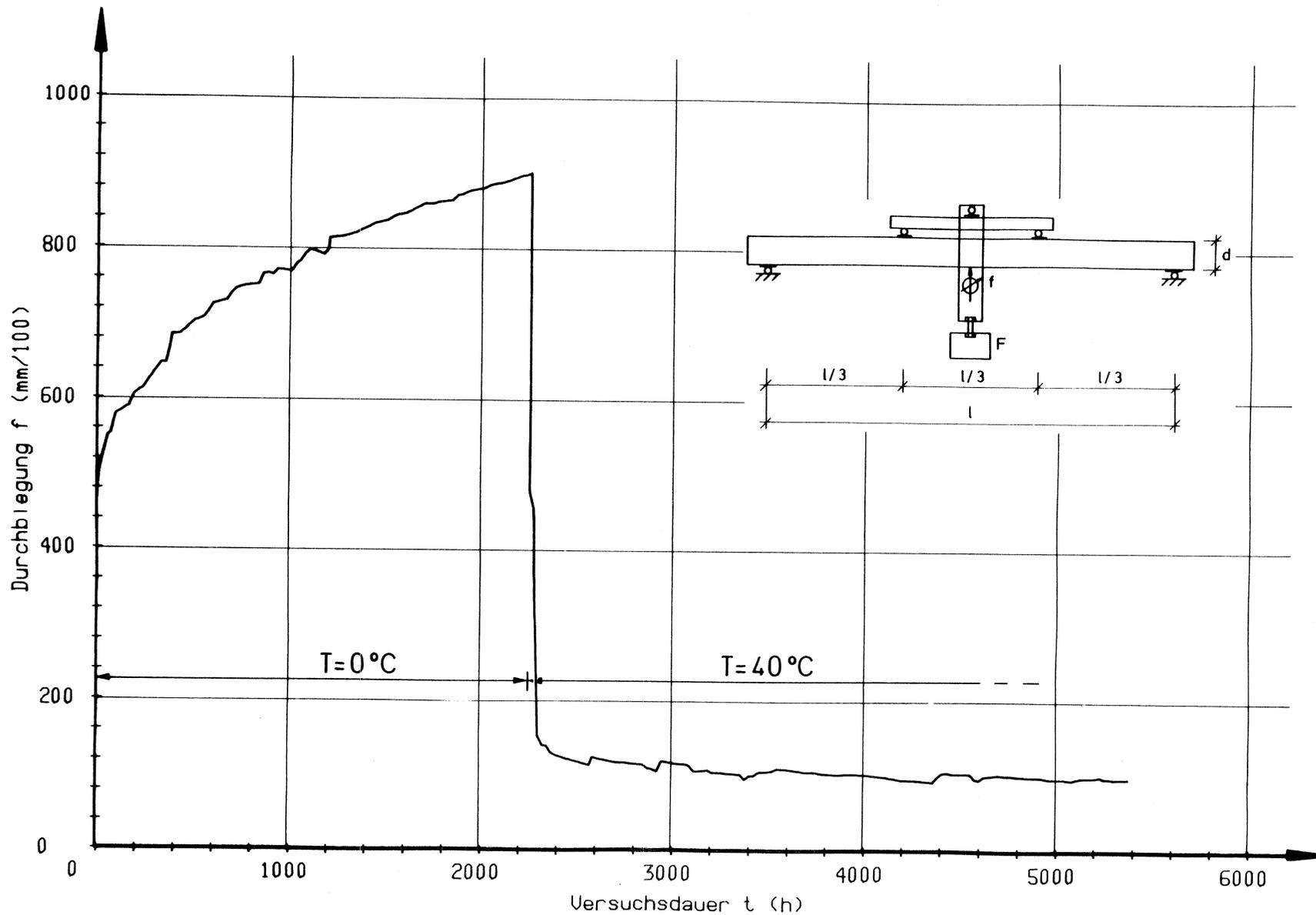
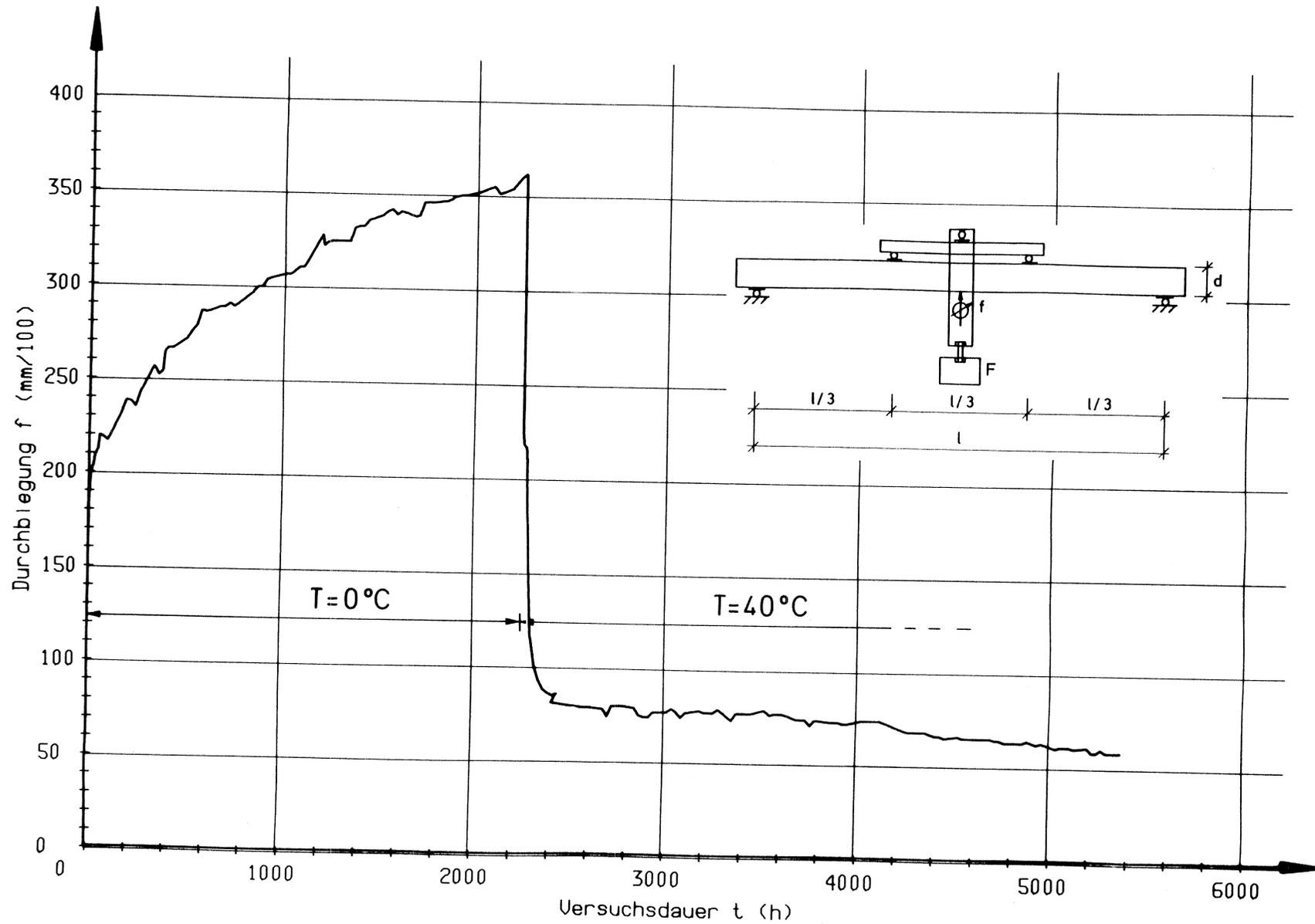


Bild 69: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 120, 30% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )



**Bild 70:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 152, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei 0°C, Entlastung bei 40°C)

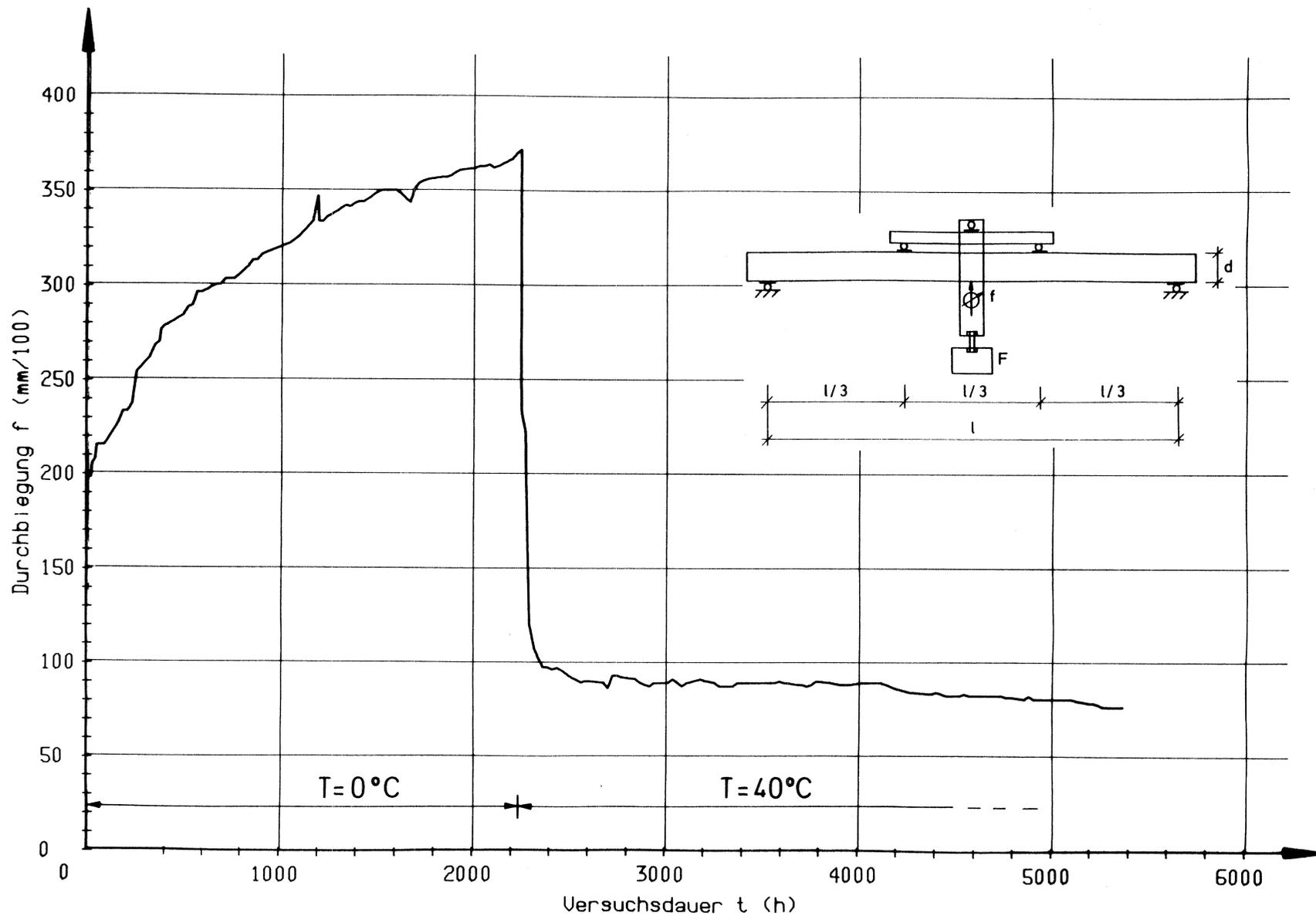
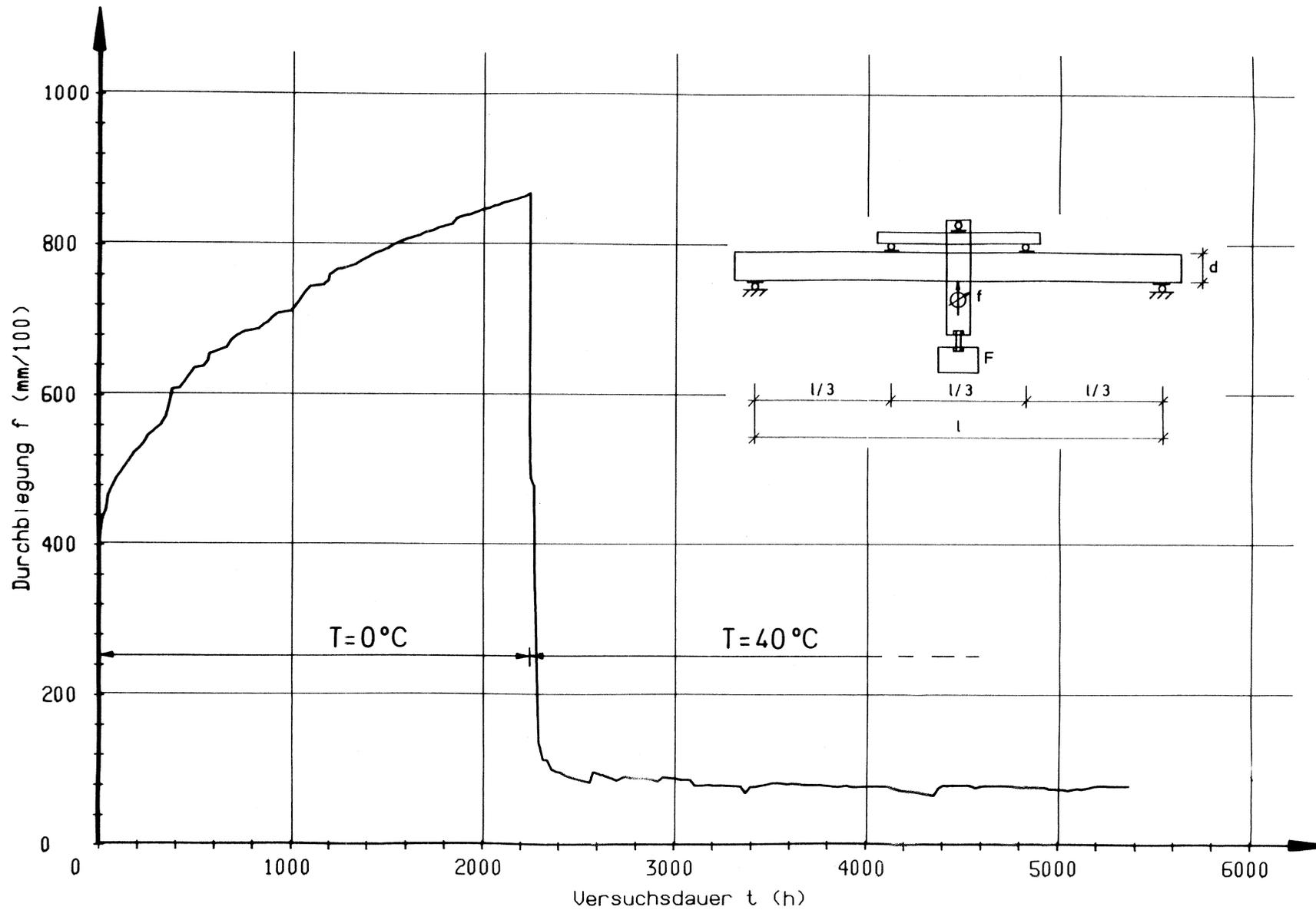
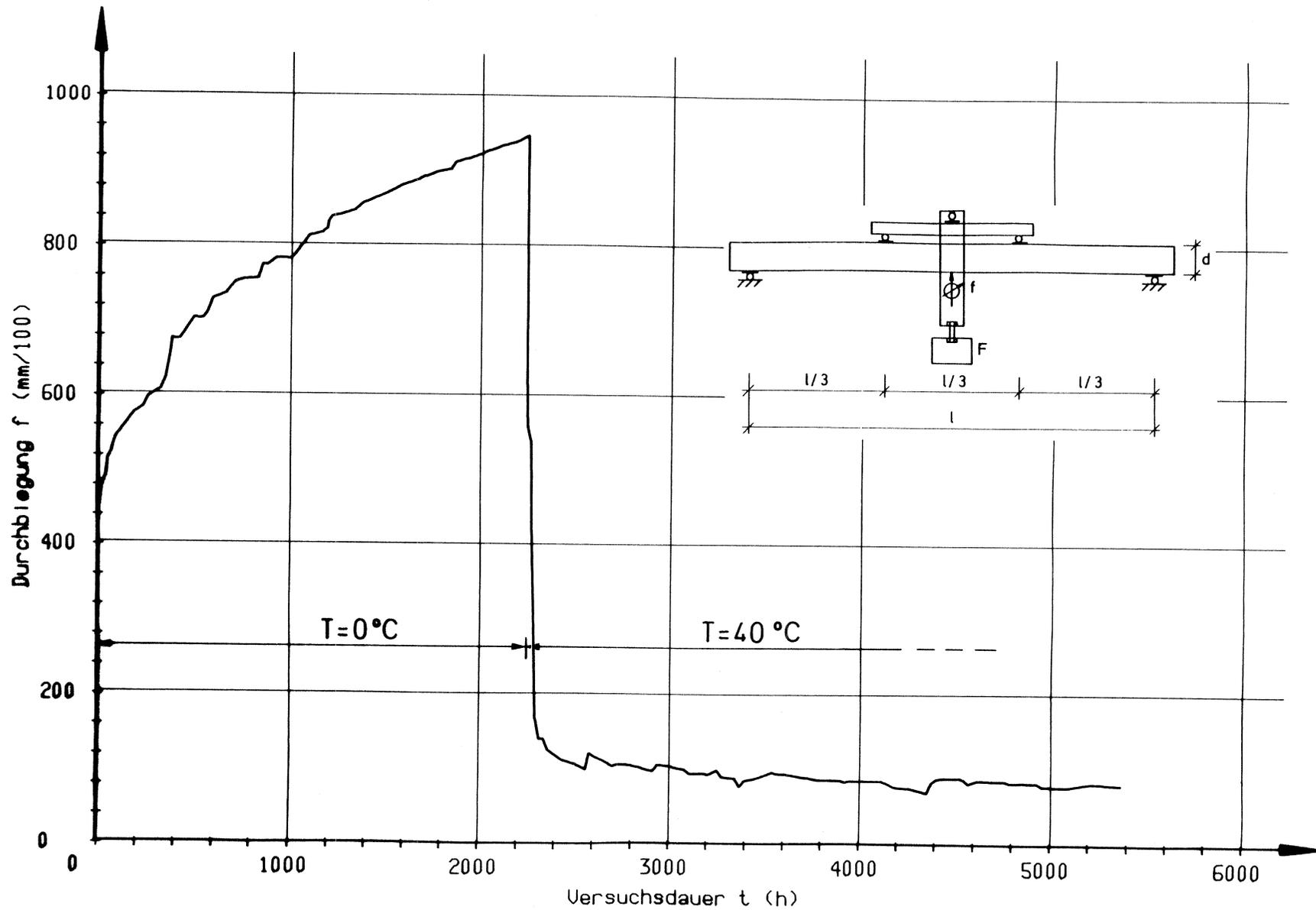


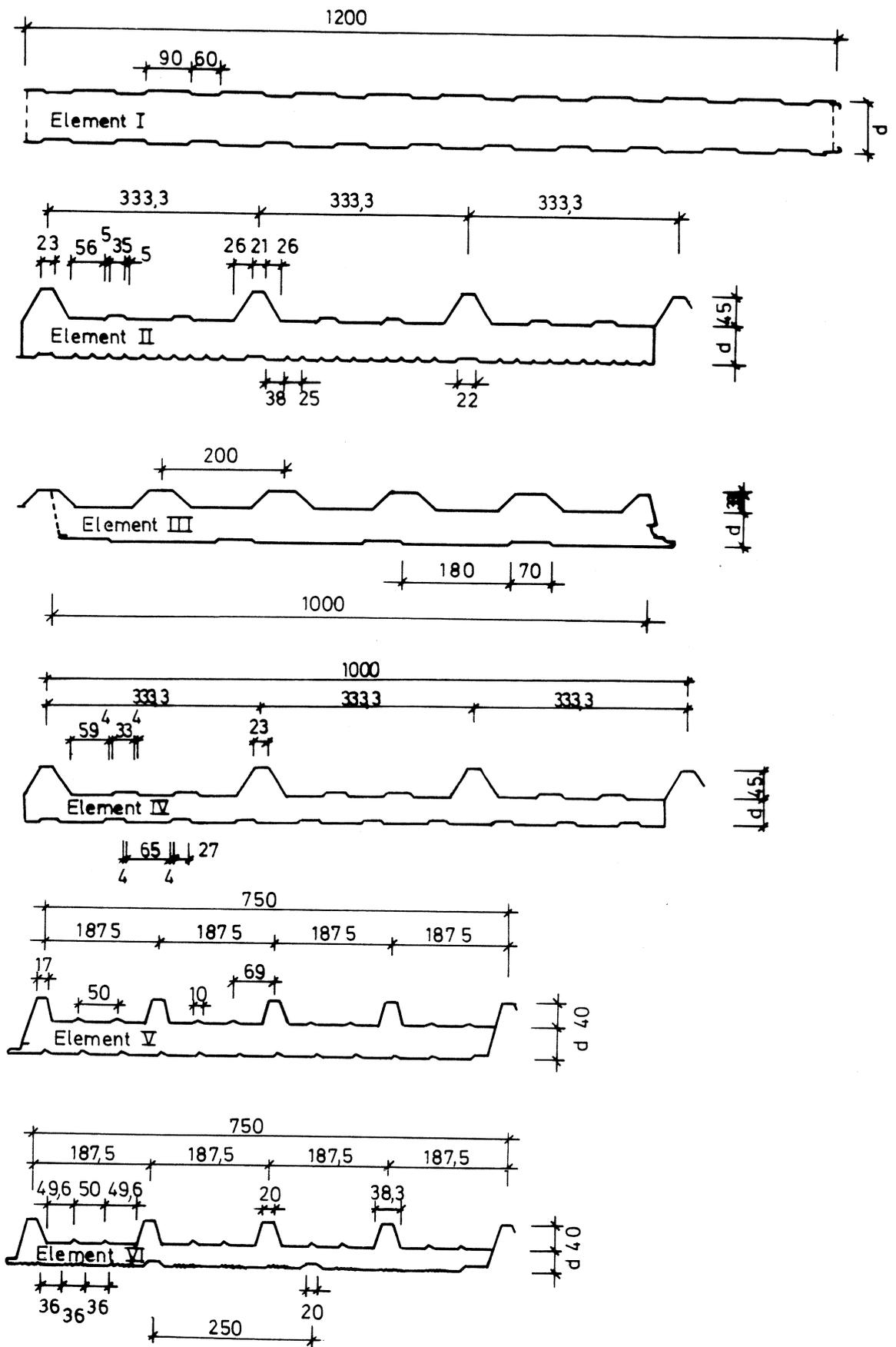
Bild 71: Kriechkurve für den Probekörper Nr. 153, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )



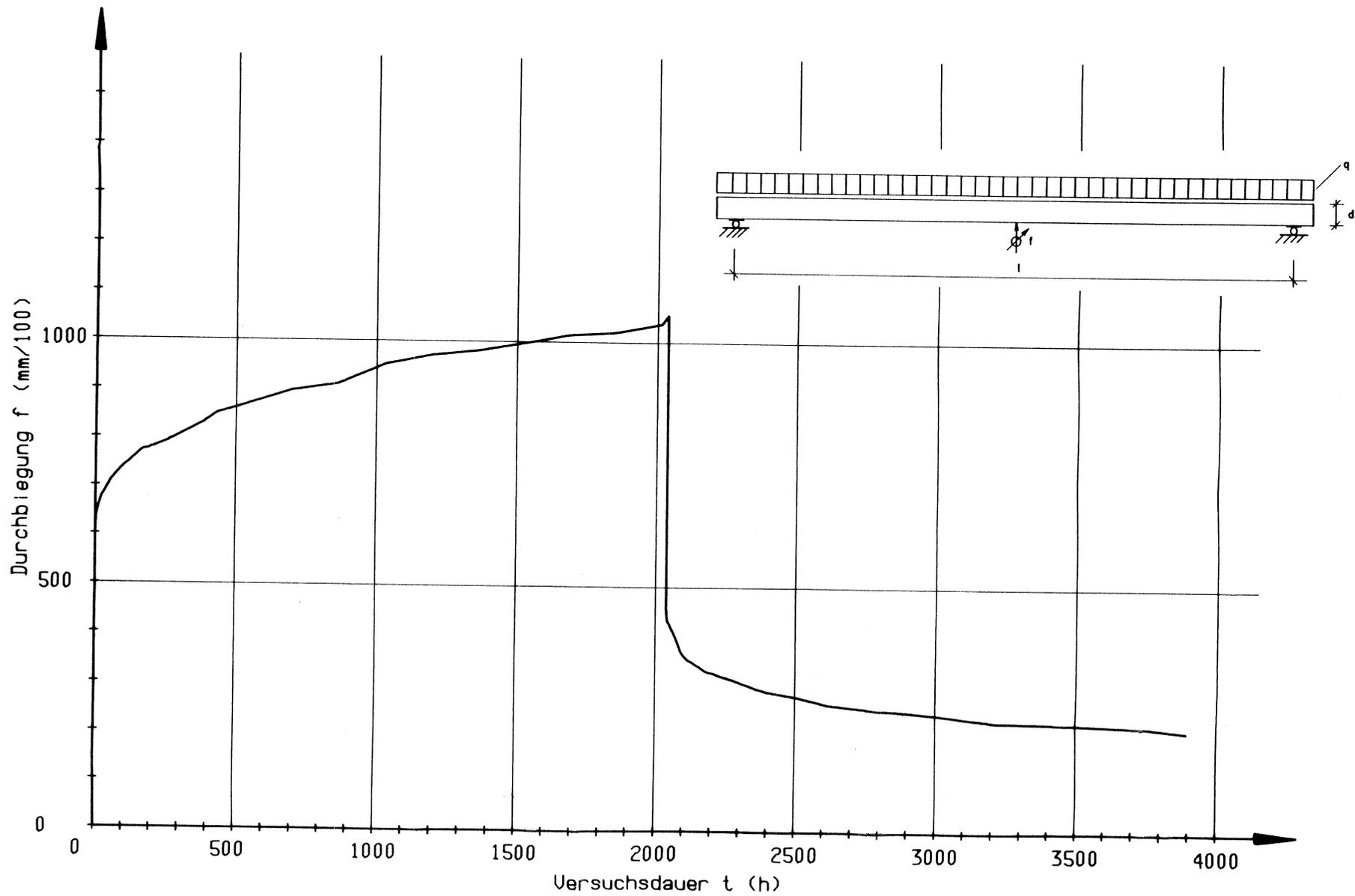
**Bild 72:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 163, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )



**Bild 73:** Kriechkurve für den Probekörper Nr. 167, 10% der Kurzzeitbruchlast (Belastung bei  $0^\circ\text{C}$ , Entlastung bei  $40^\circ\text{C}$ )



**Bild 74:** Abmessungen der langfristig belasteten Bauteile



**Bild 75:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. I.1.1, 13% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)

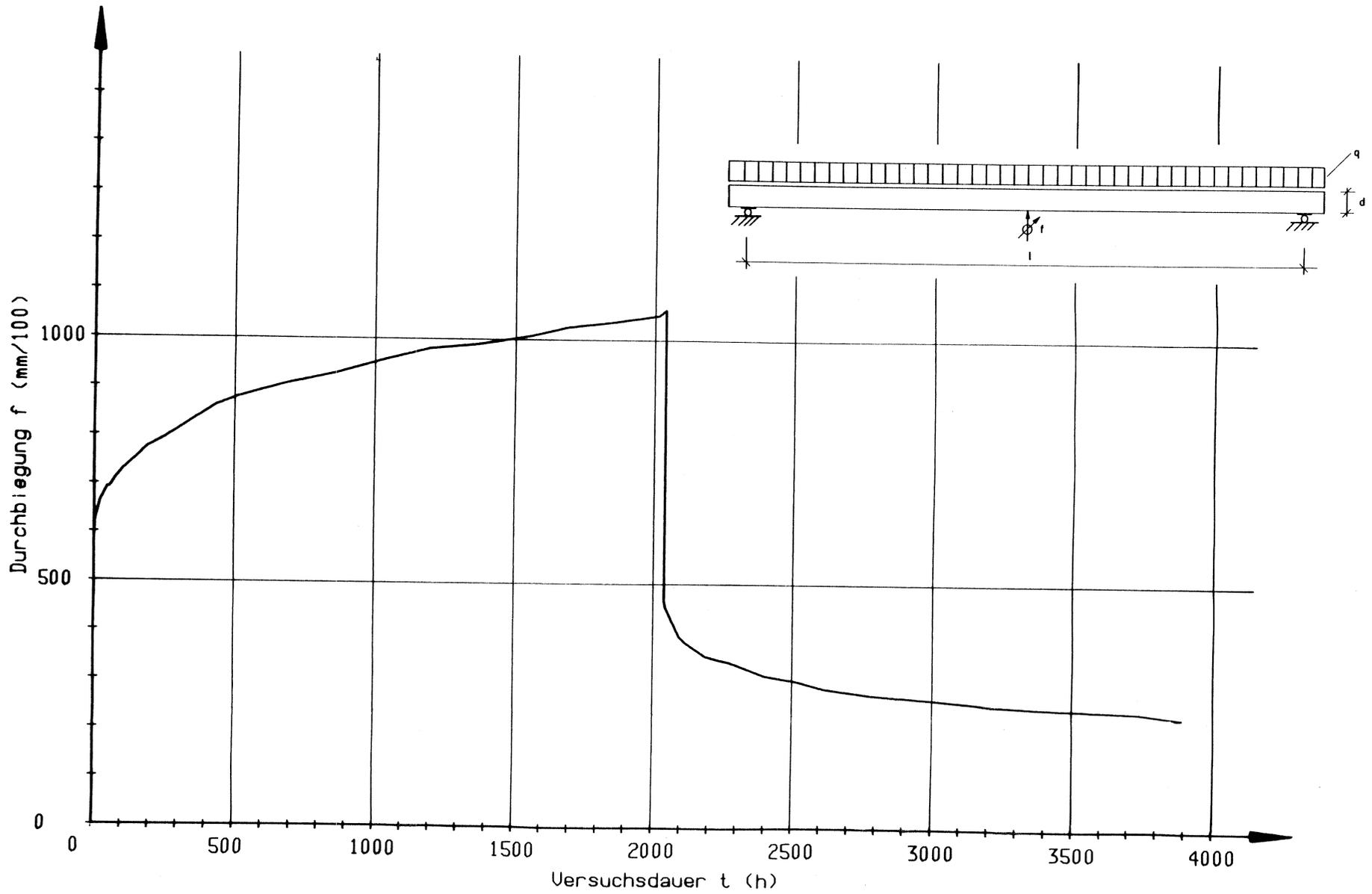


Bild 76: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. I.2, 13% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)

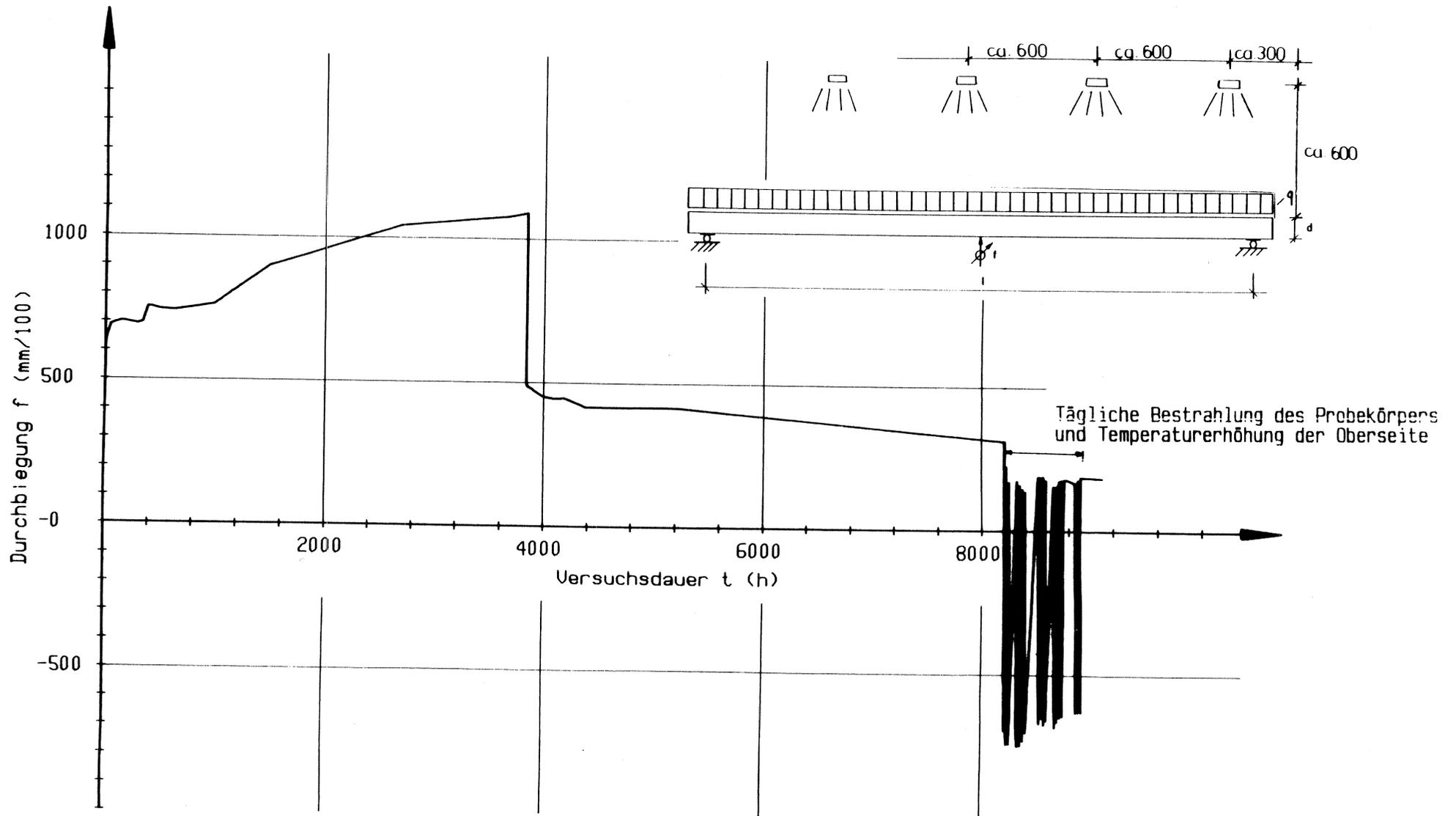
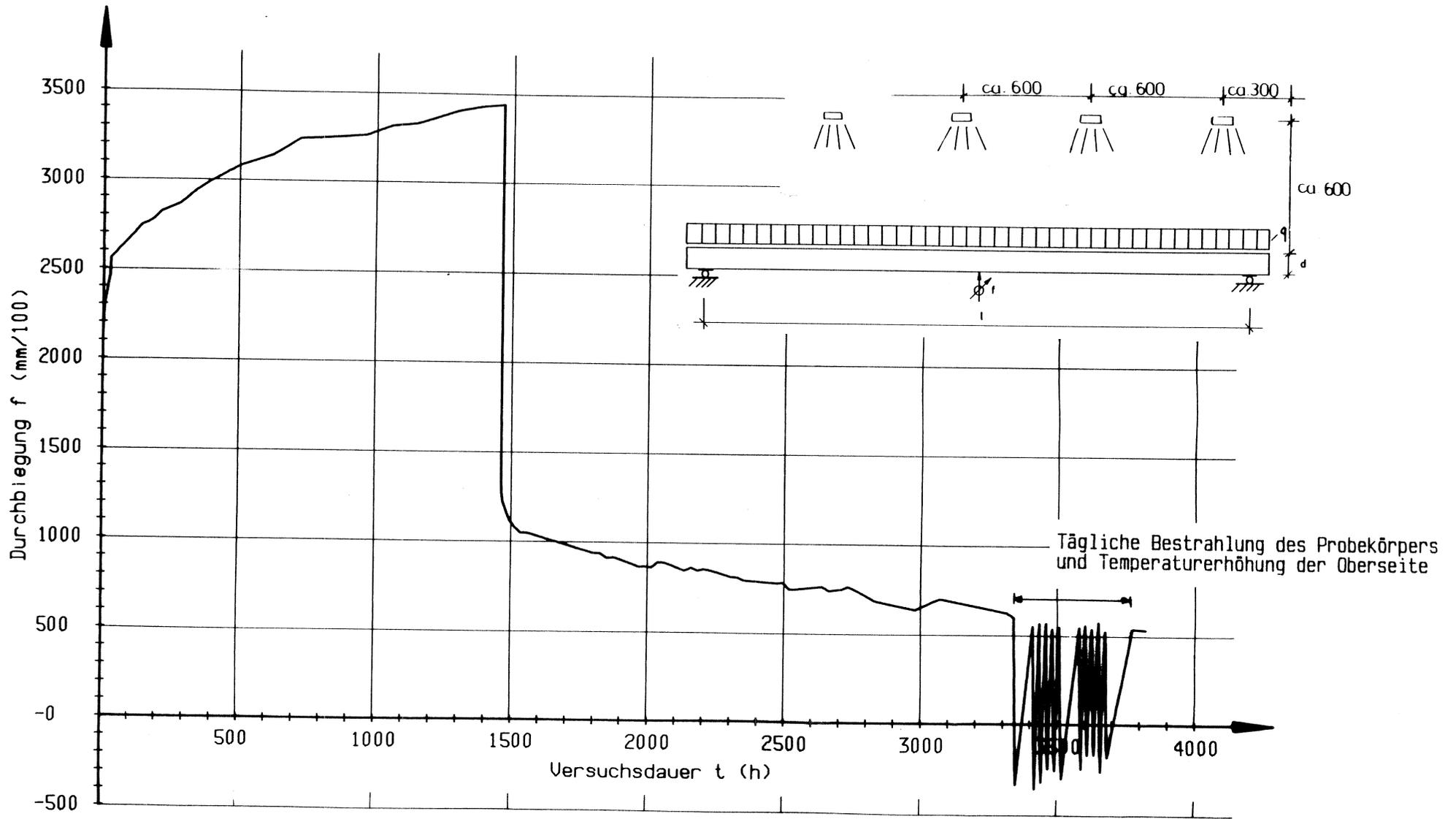


Bild 77: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. I.1.2, 13% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)



**Bild 78:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. II.1, 18% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)

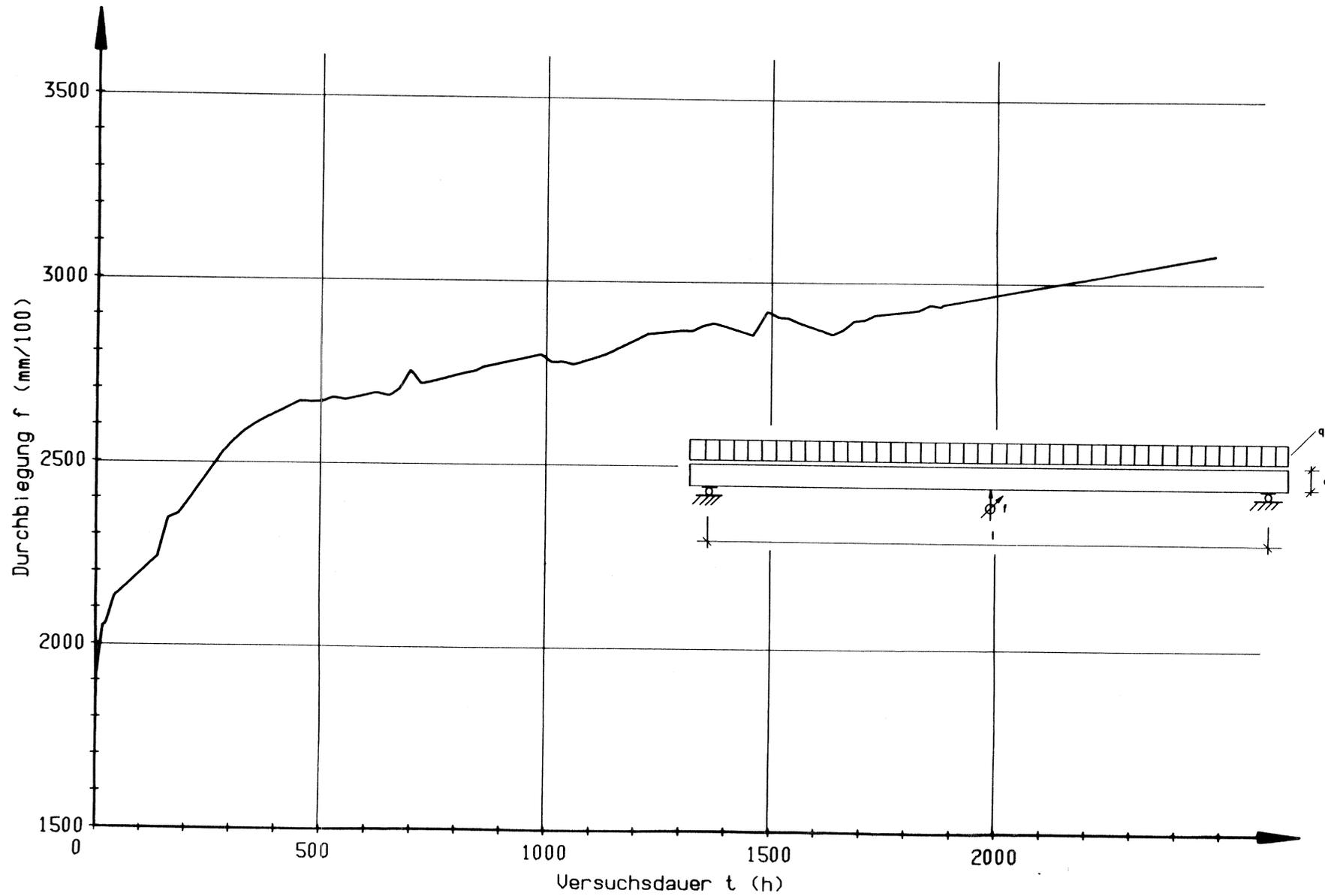


Bild 79: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. II.2, 27% der Kurzzeitschubbruchlast (Dauerbelastung)

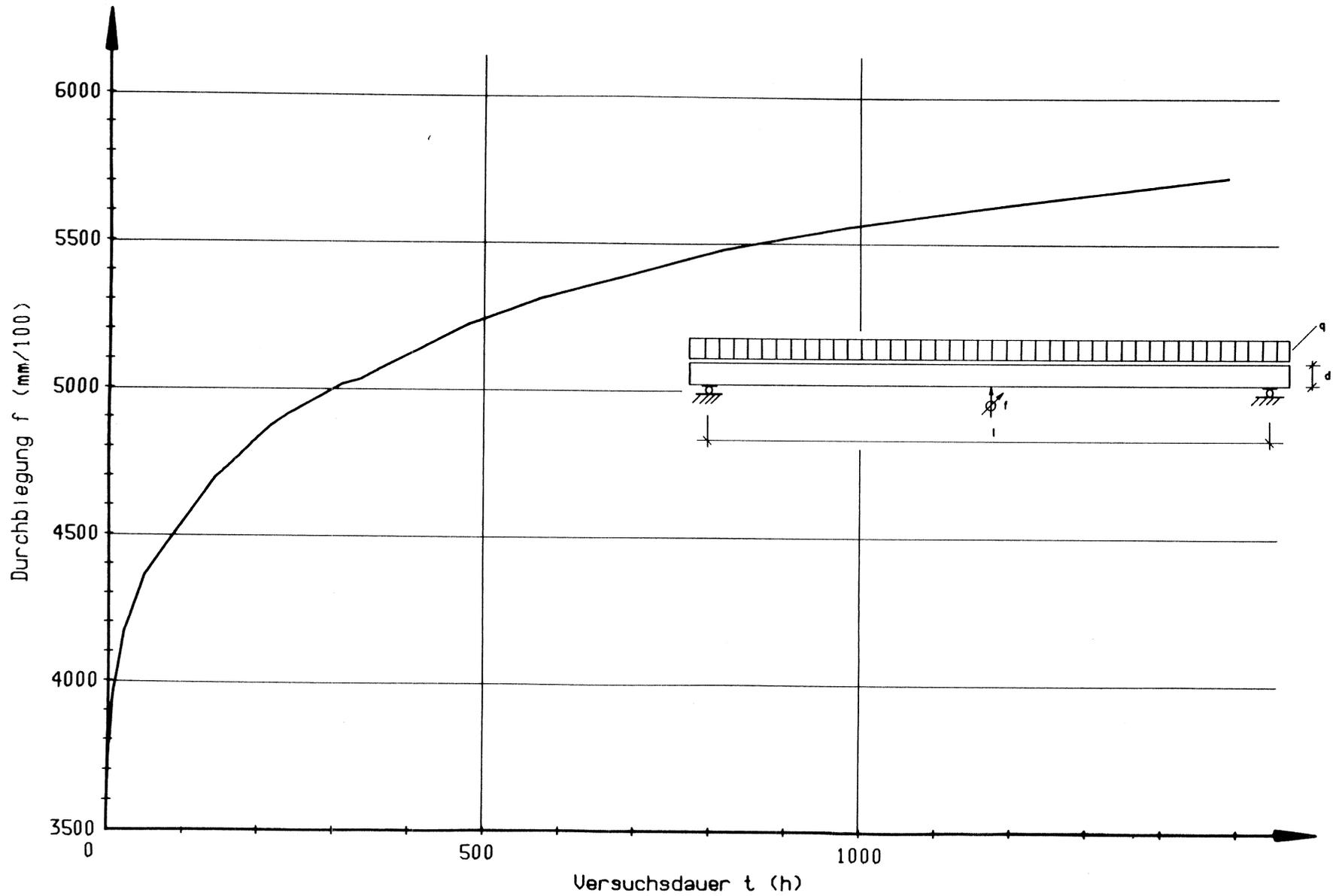


Bild 80: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. III.1, 35% der Kurzzeitschubbruchlast (Dauerbelastung)

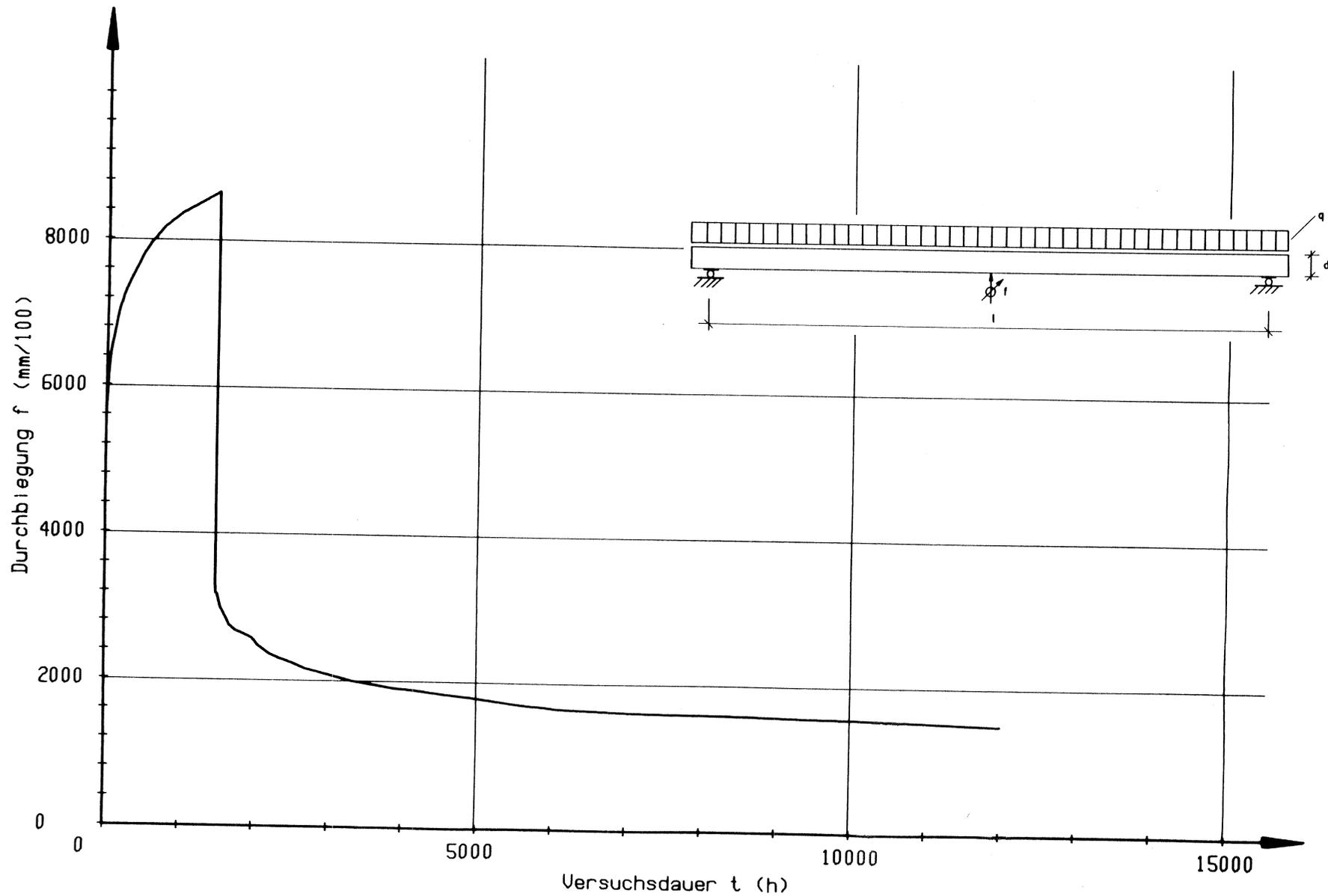


Bild 81: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. III.2, 62% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)

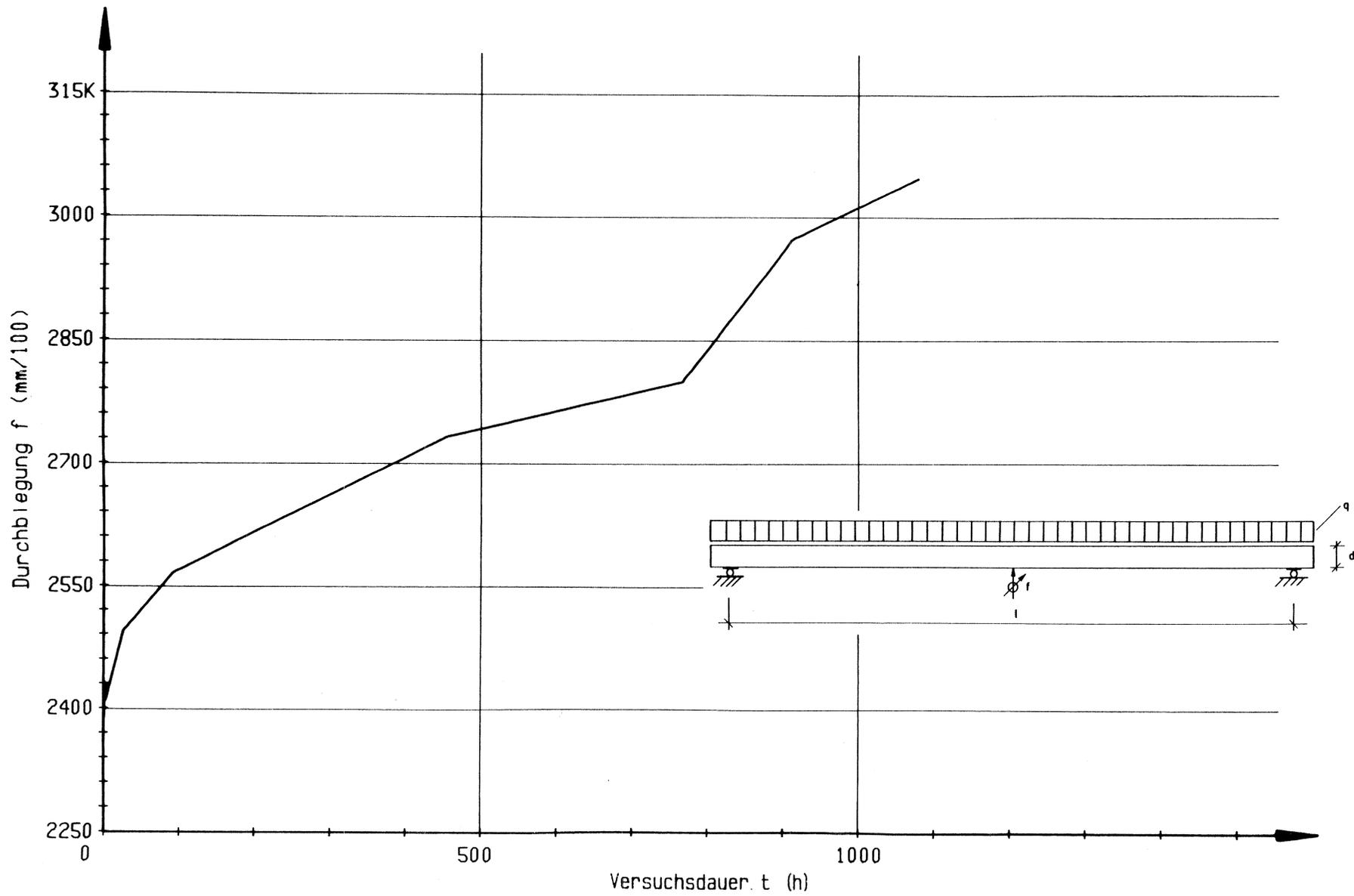
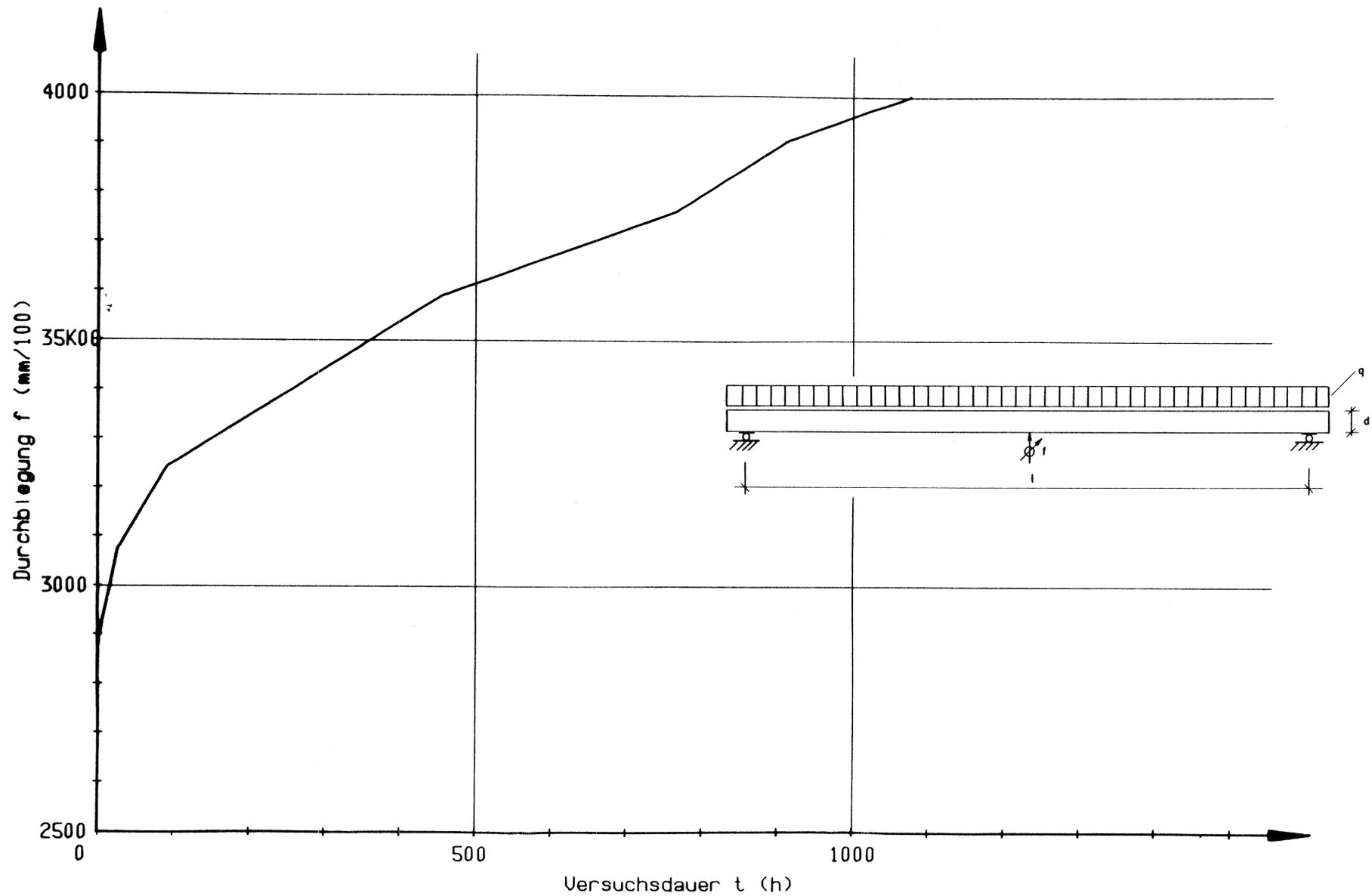


Bild 82: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. IV.1, 44% der Kurzzeitschubbruchlast (Belastung)



**Bild 83:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. IV.2, 28% der Kurzzeitschubbruchlast (Belastung)

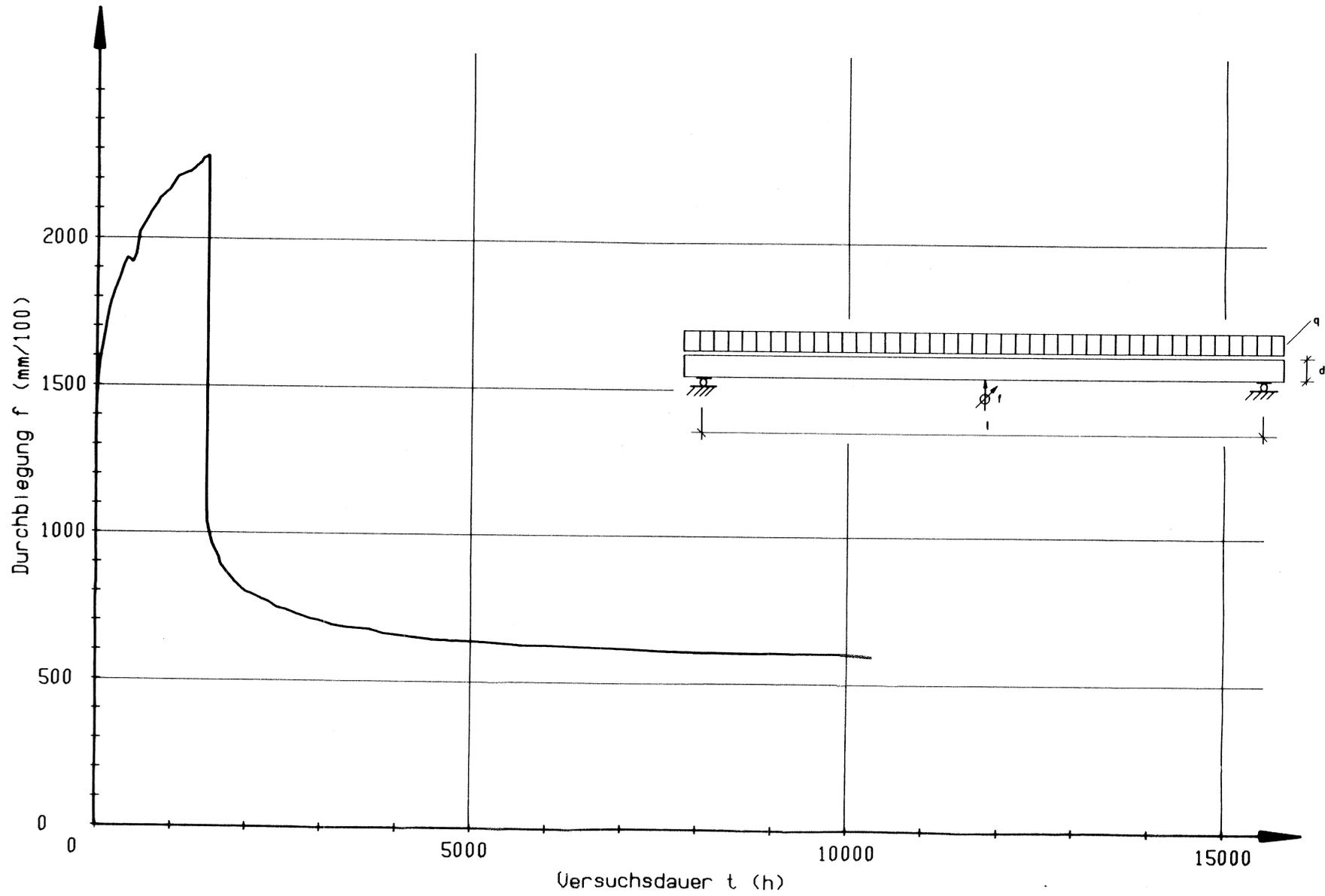
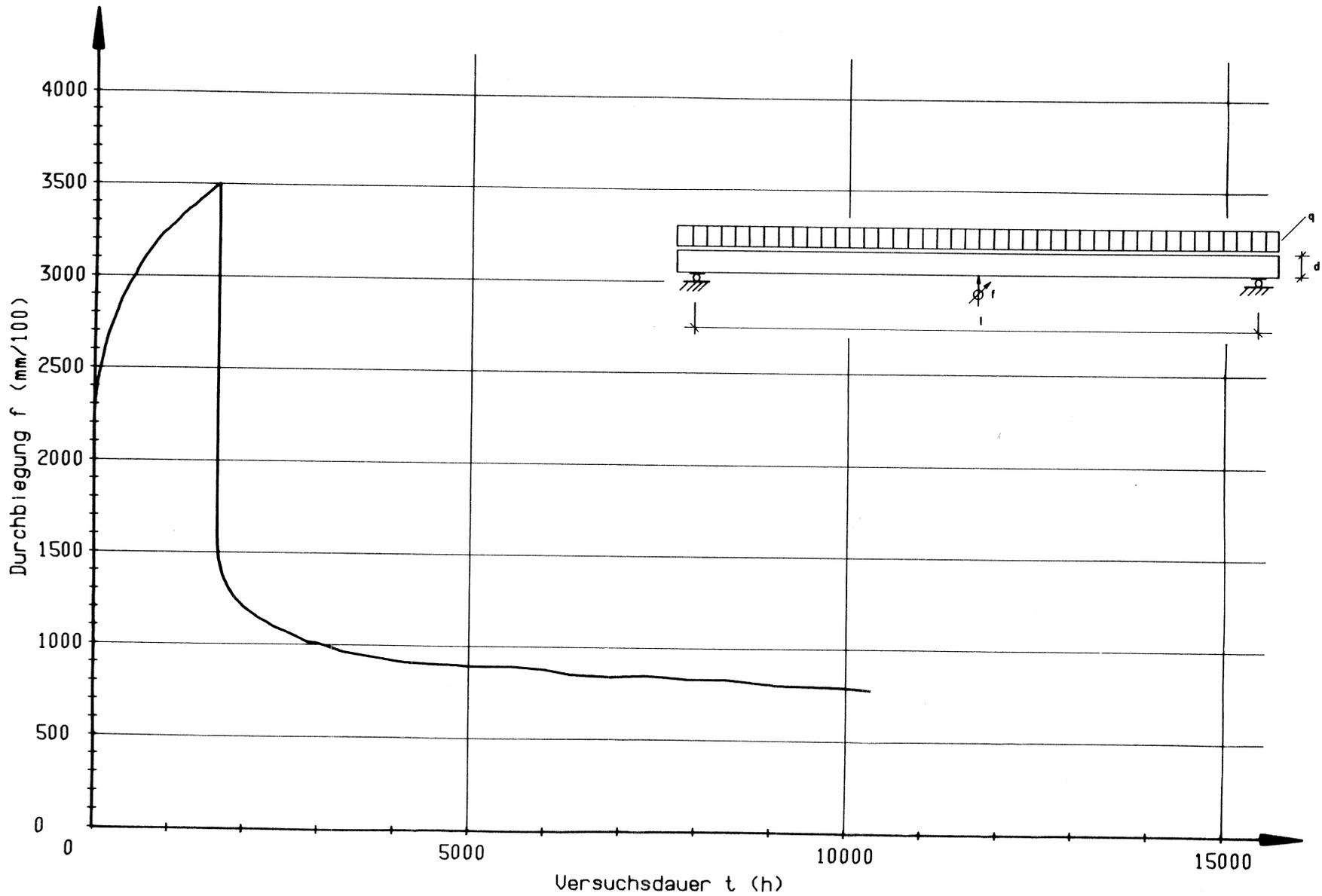
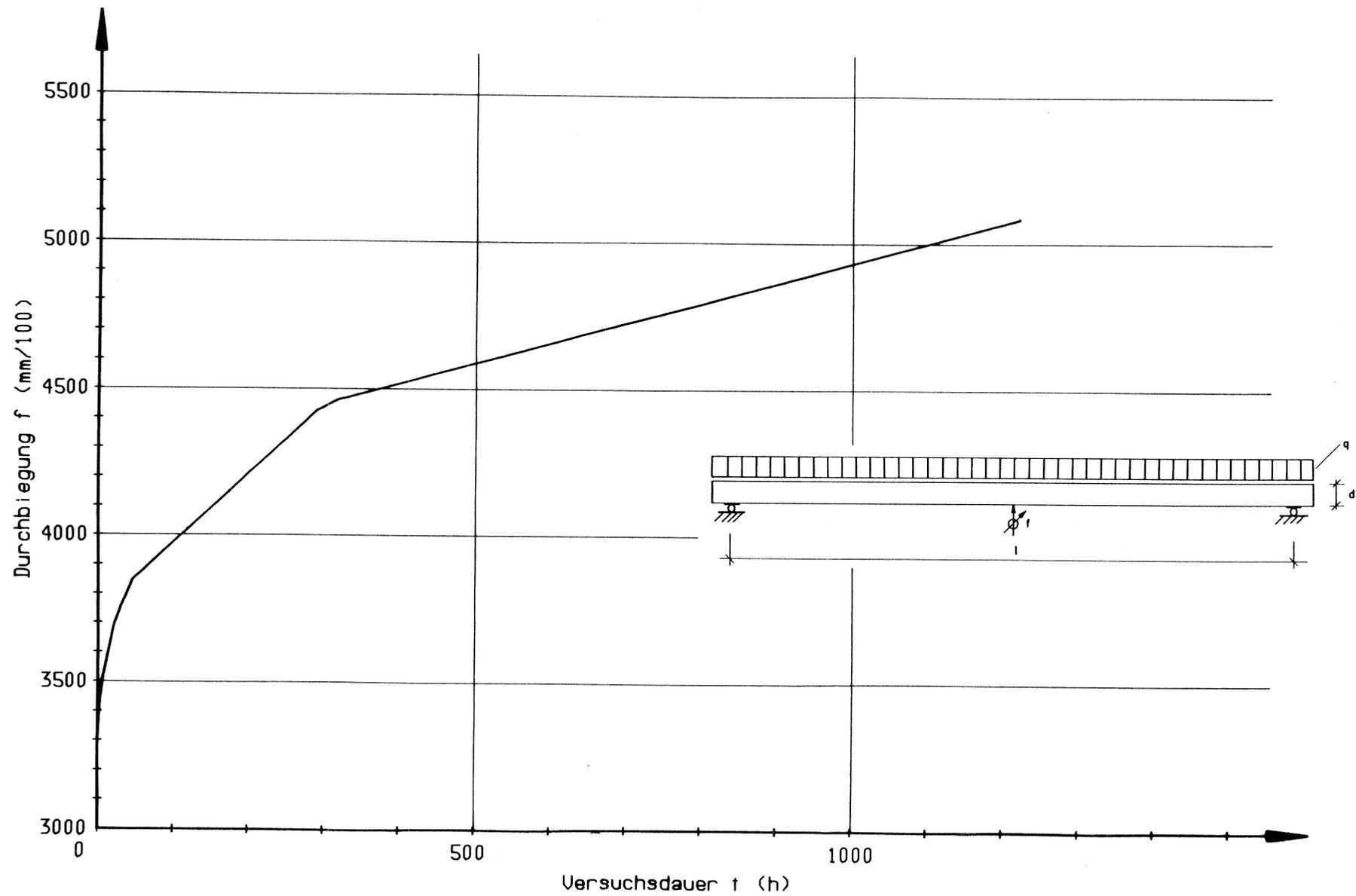


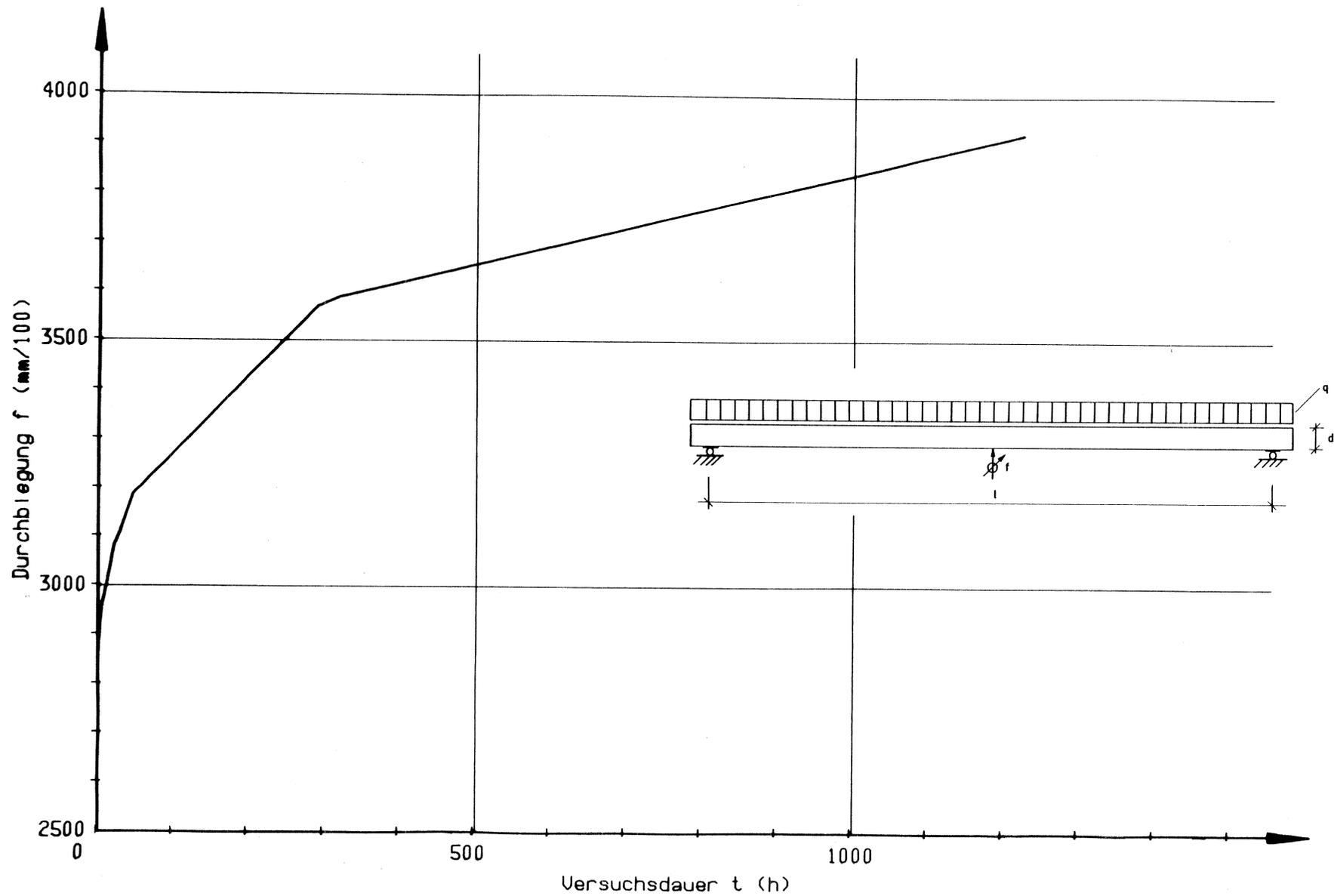
Bild 84: Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. V.1, 23% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)



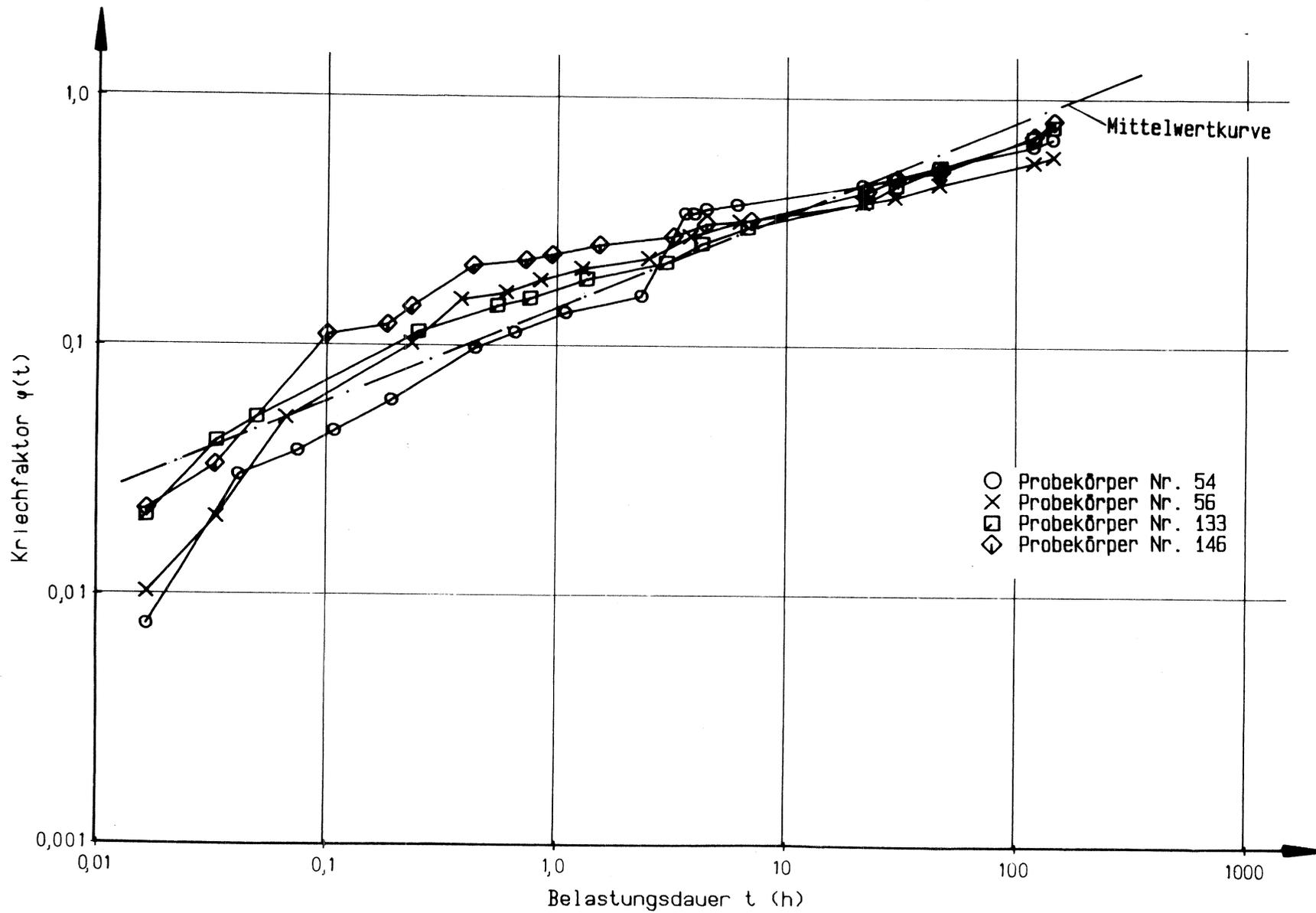
**Bild 85:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. V.2, 49% der Kurzzeitschubbruchlast (Be- und Entlastung)



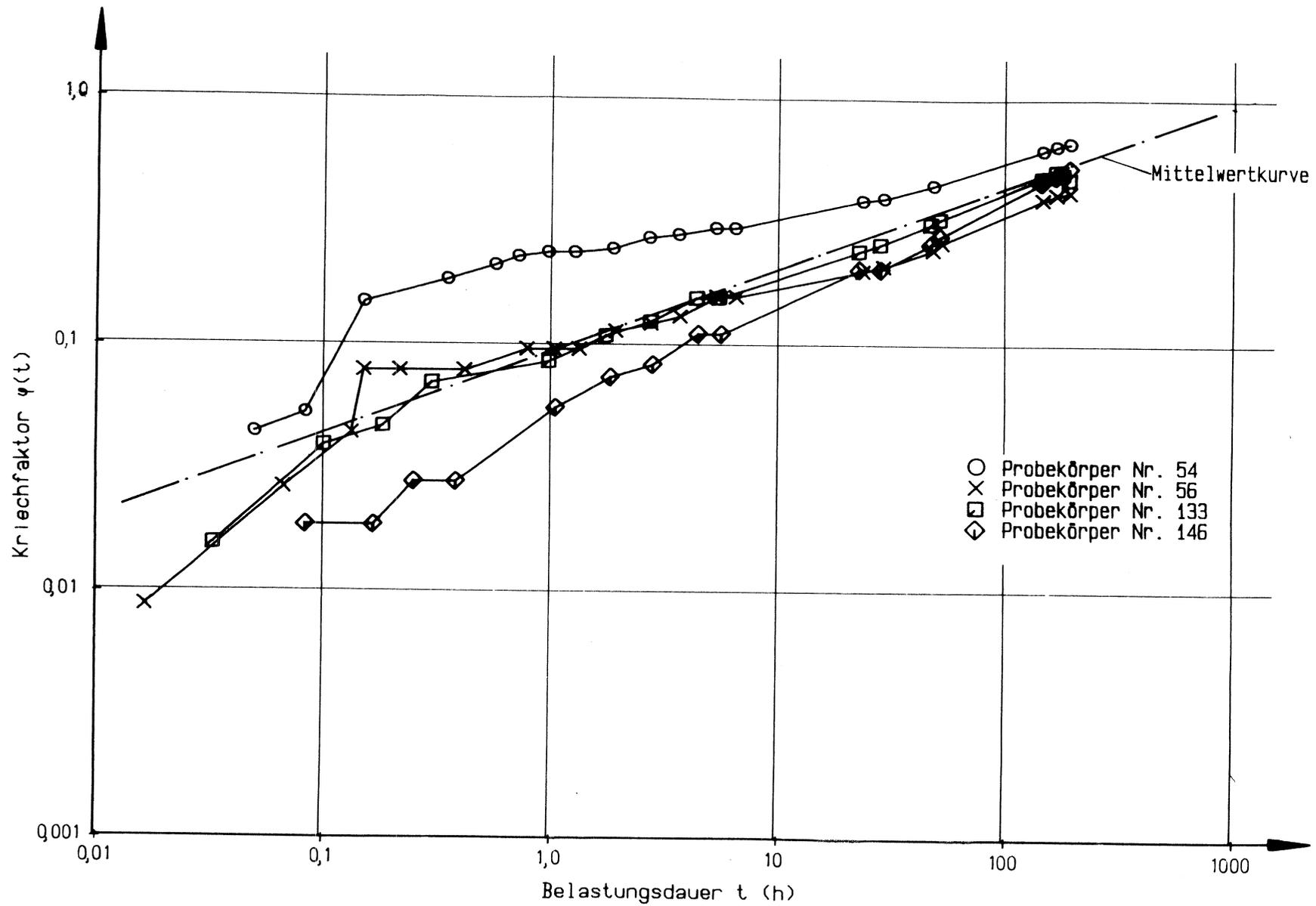
**Bild 86:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. VI.1, 65% der Kurzzeitschubbruchlast (Belastung)



**Bild 87:** Kriechkurve für den Bauteilversuch Nr. VI.2, 73% der Kurzzeitschubbruchlast (Belastung)



**Bild 88:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 89:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

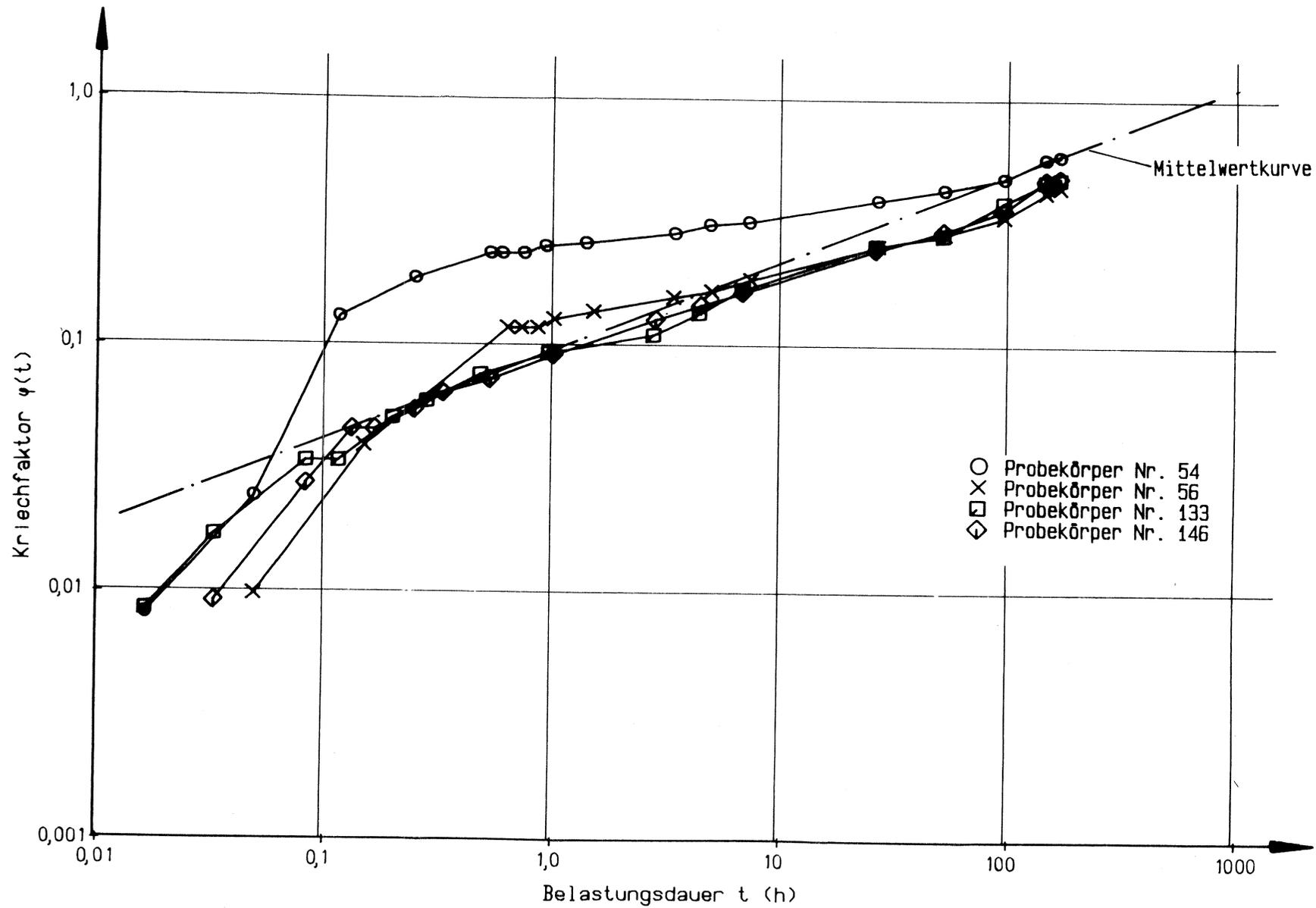


Bild 90 :  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

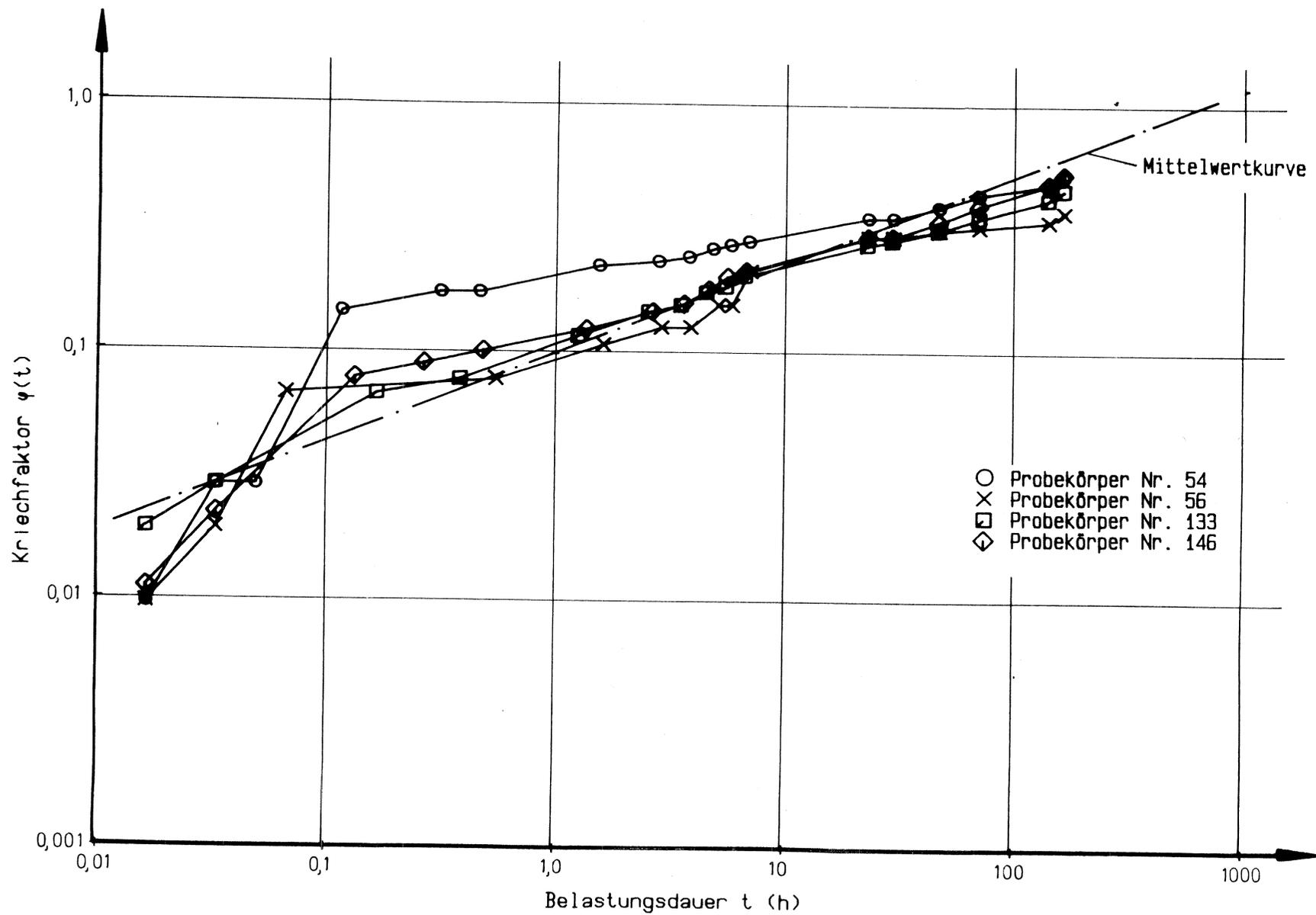
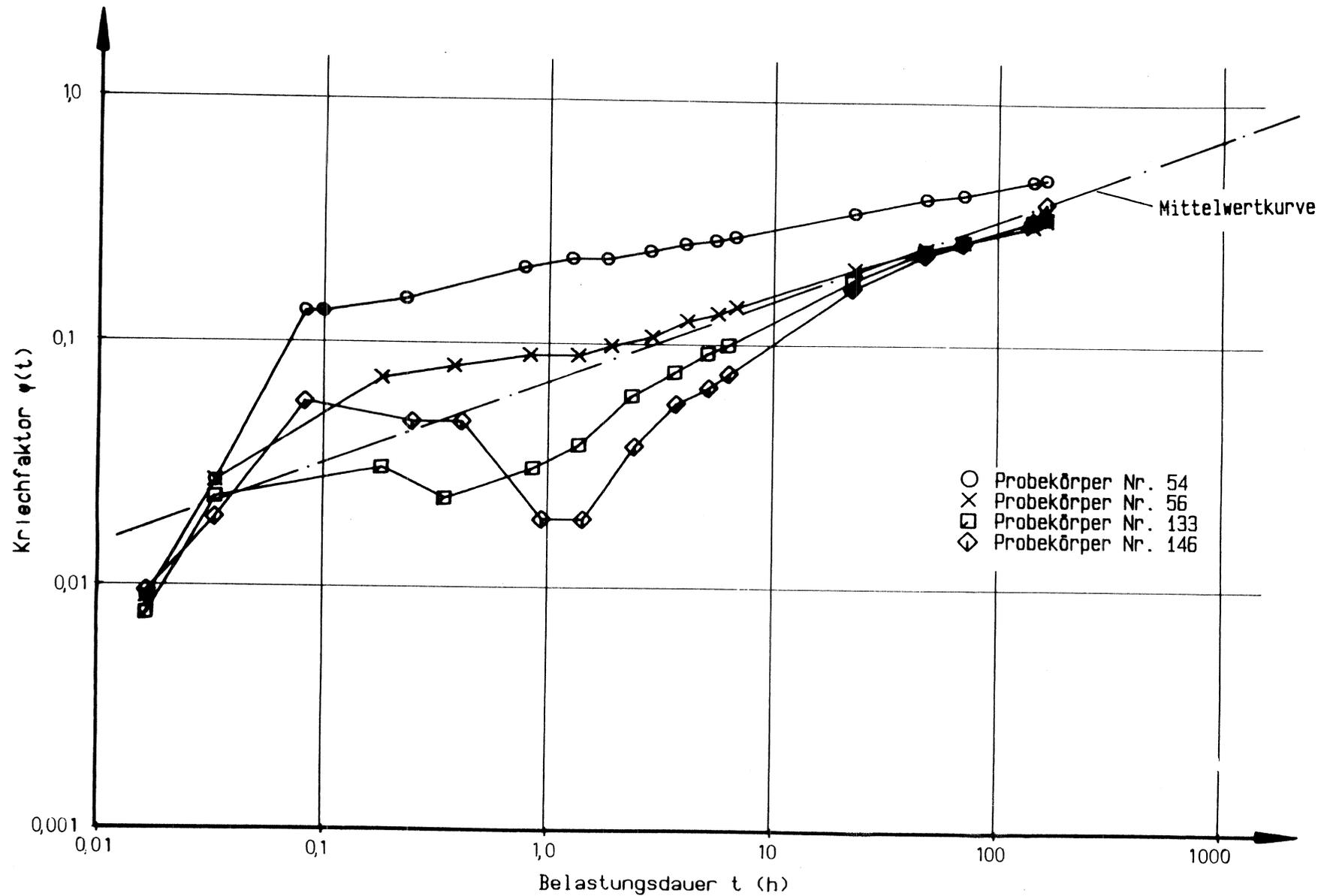


Bild 91:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 92:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

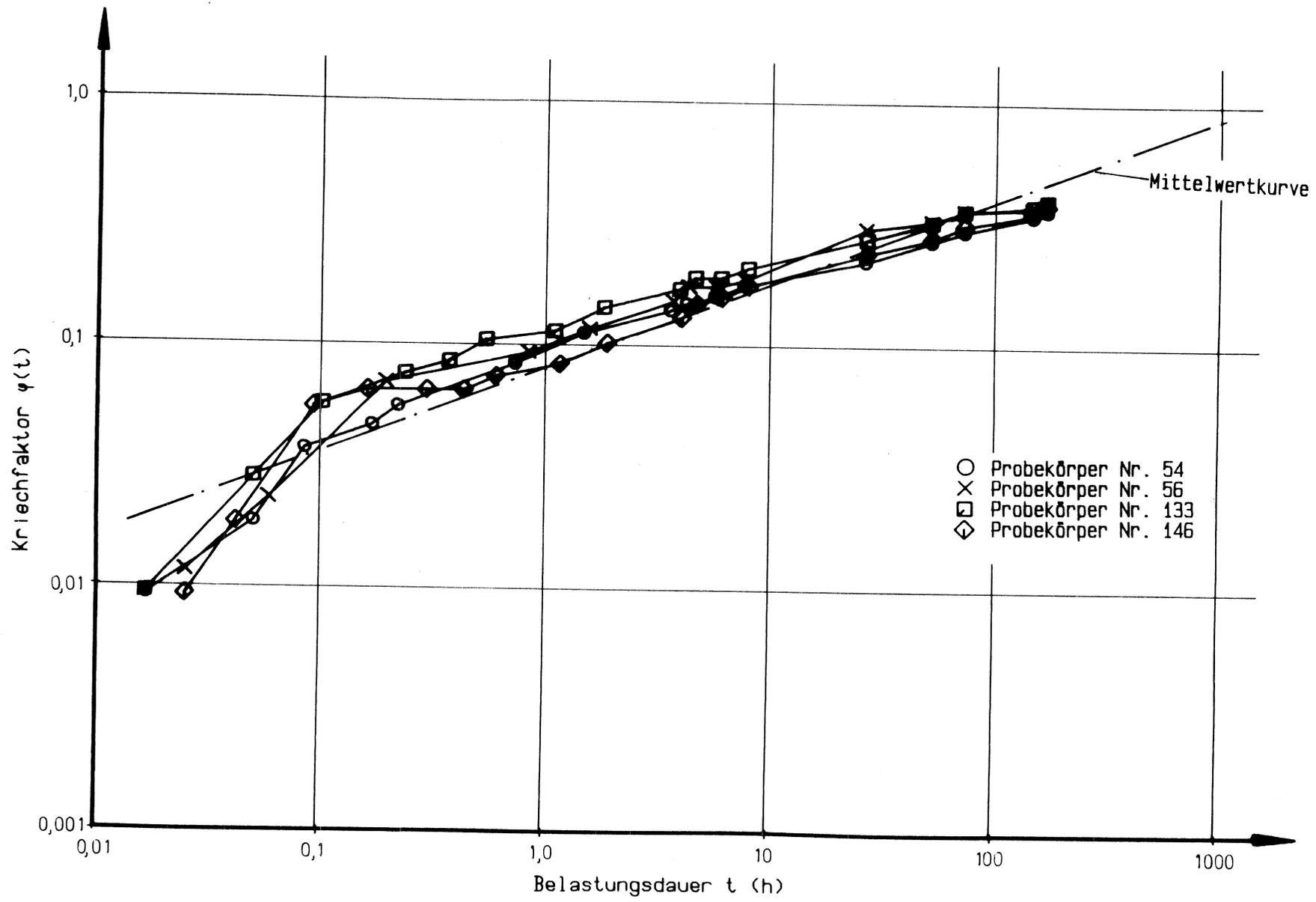


Bild 93:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

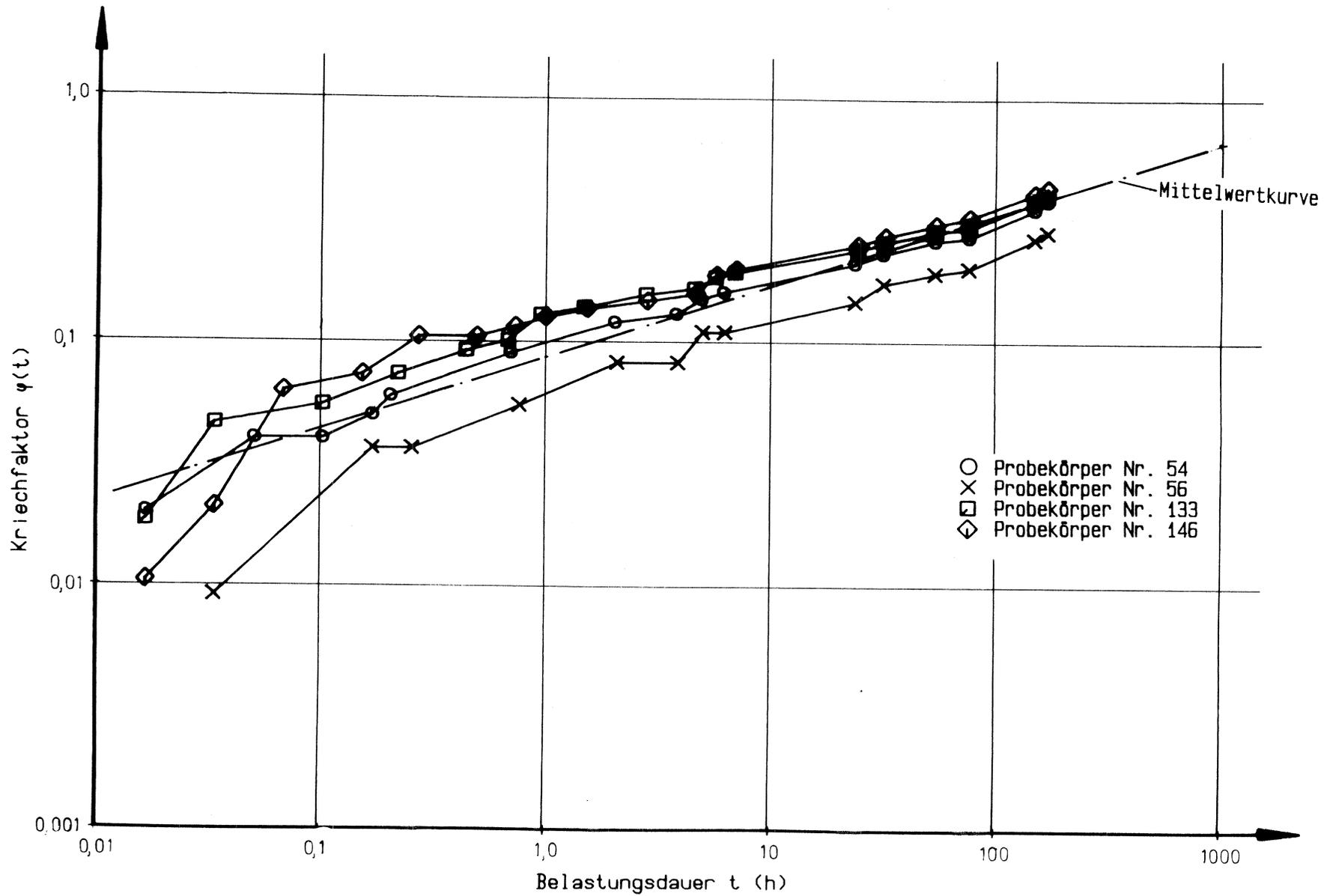
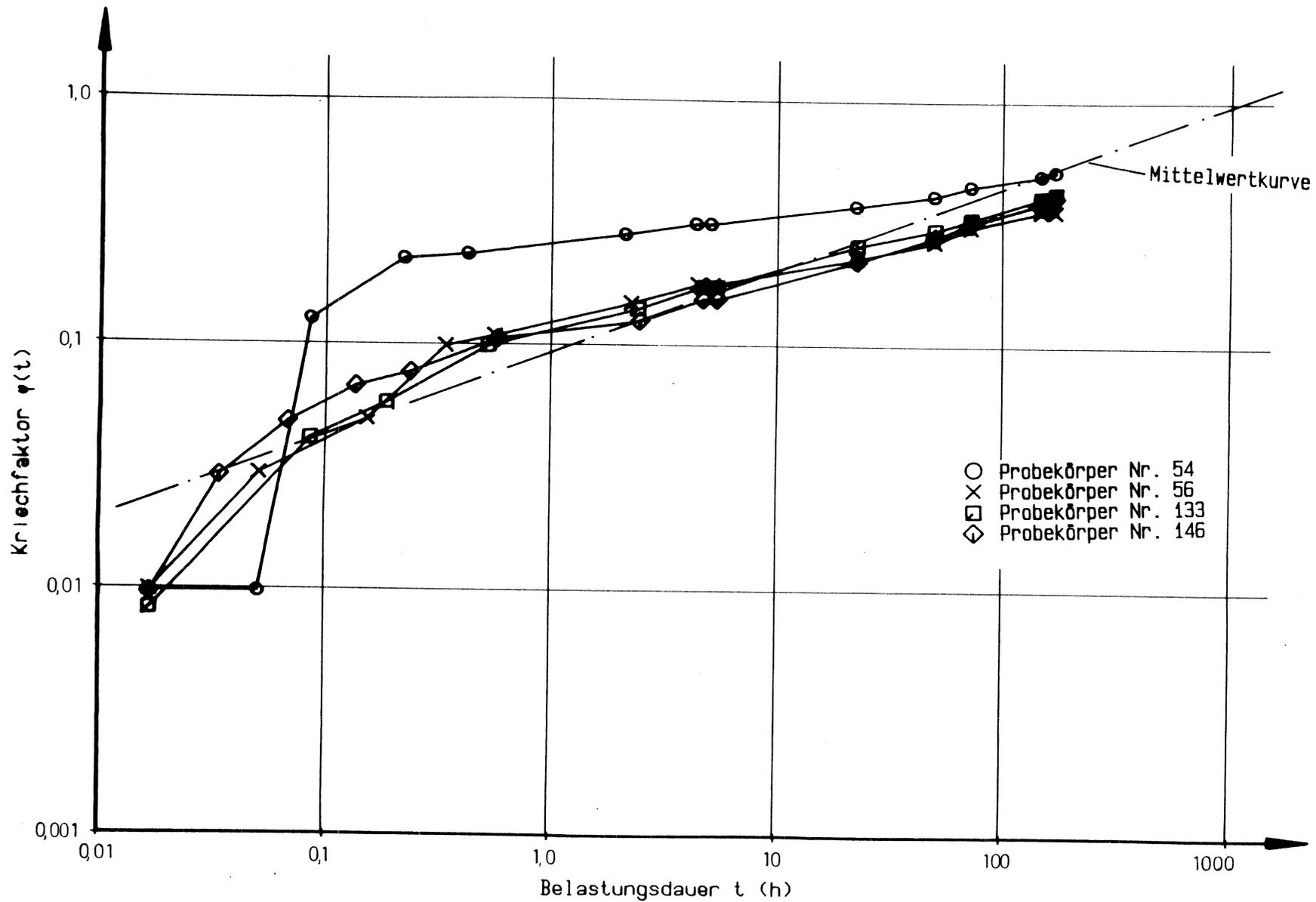
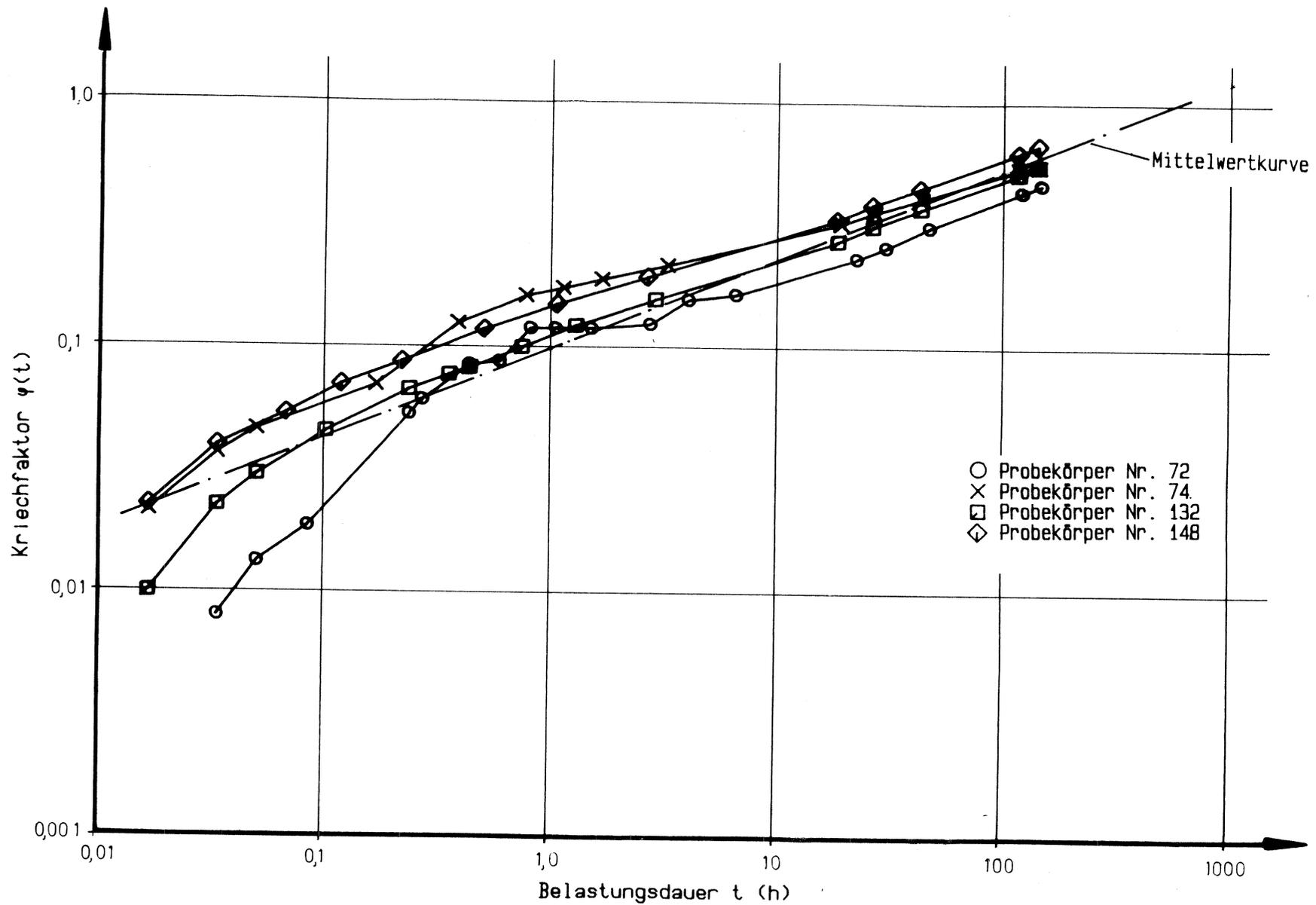


Bild 94:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 7. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 95:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 8. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 96** :  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast

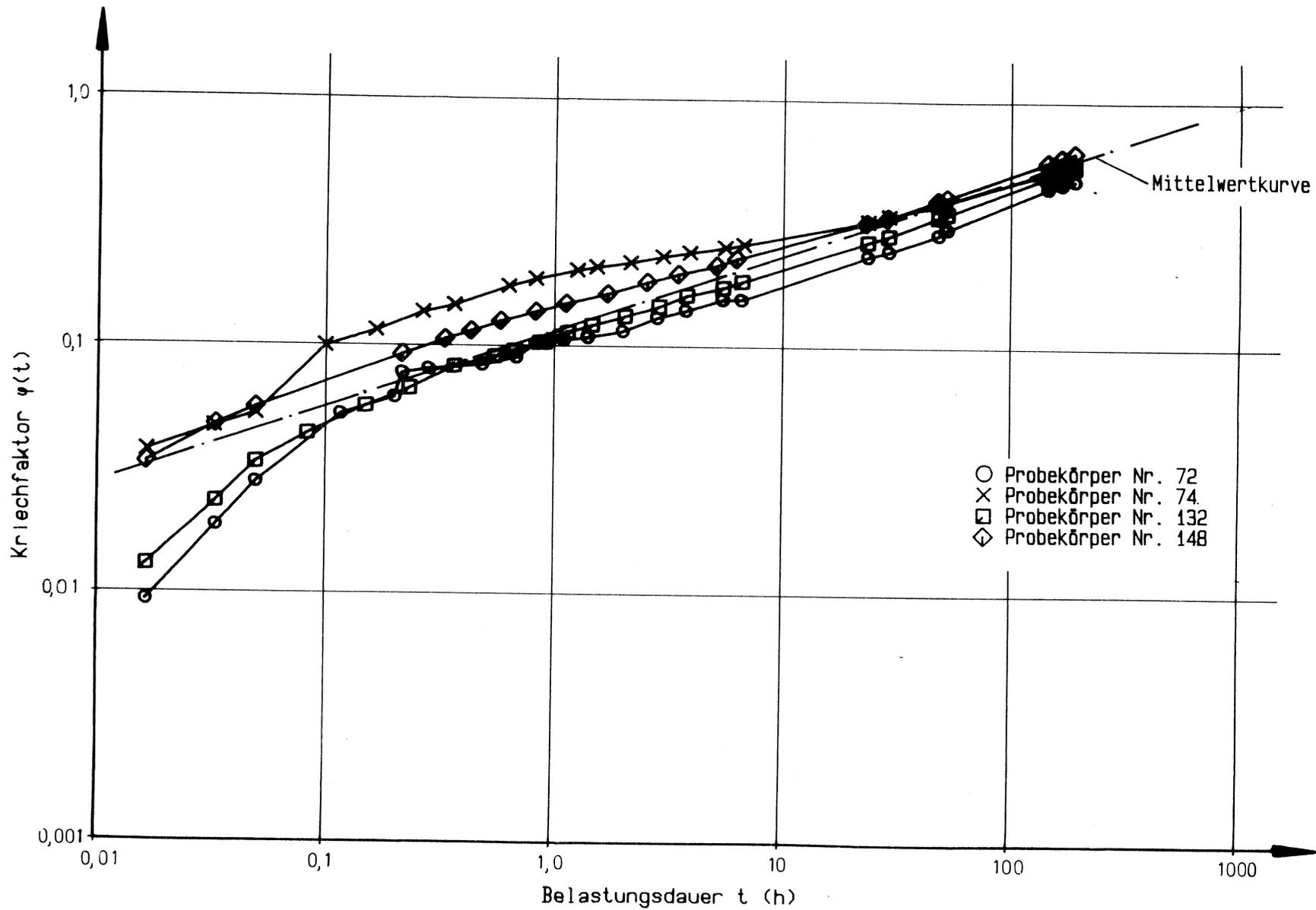
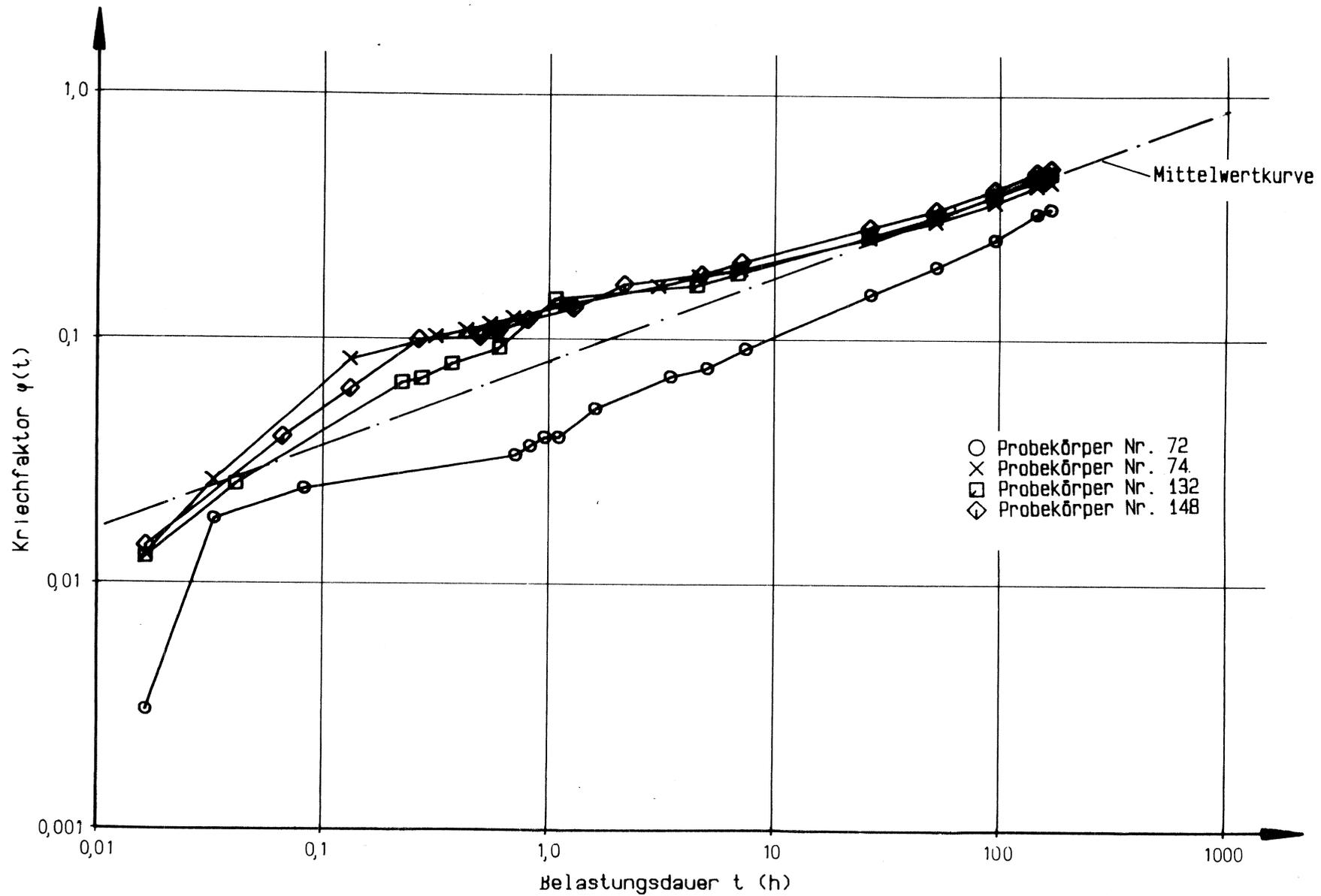
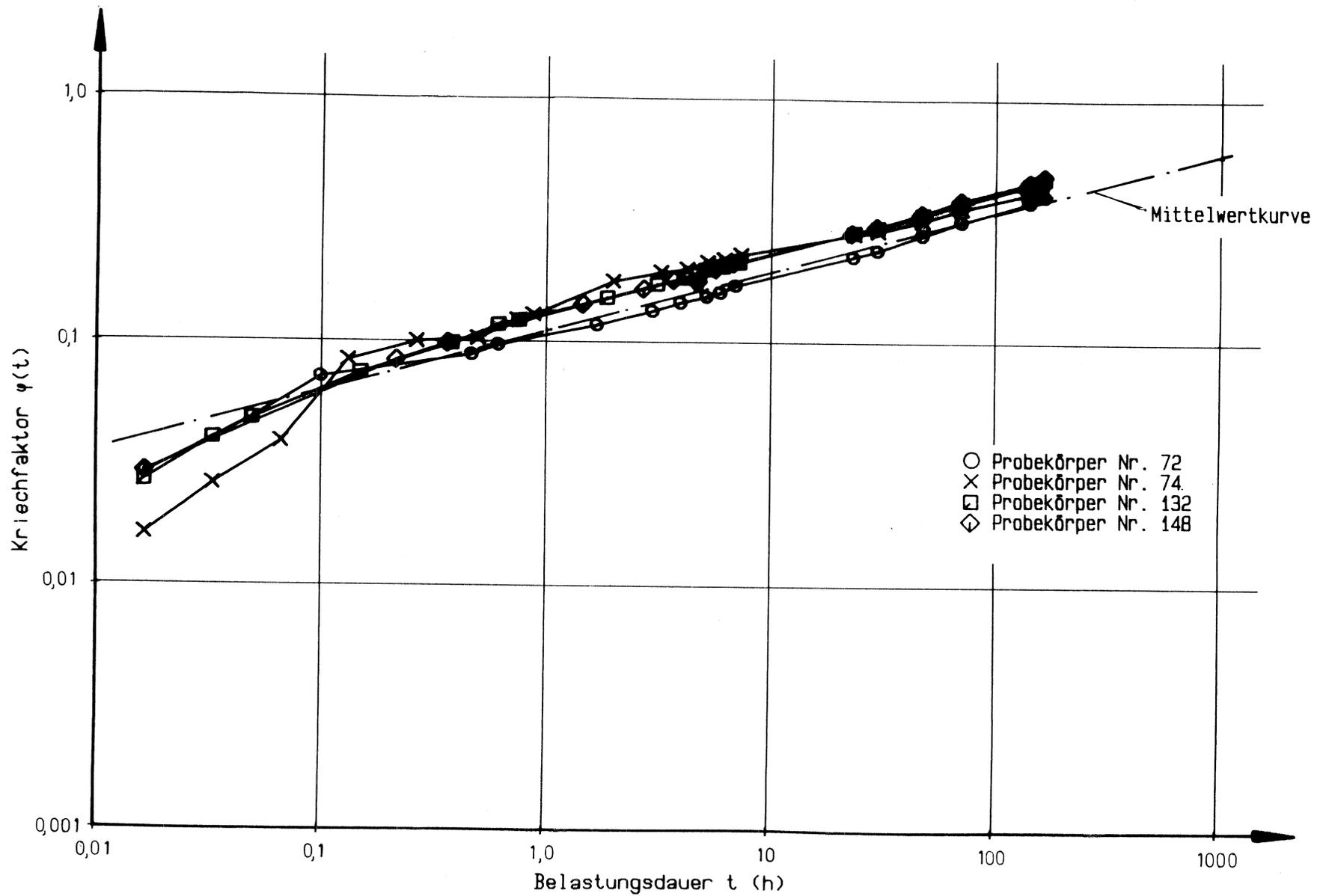


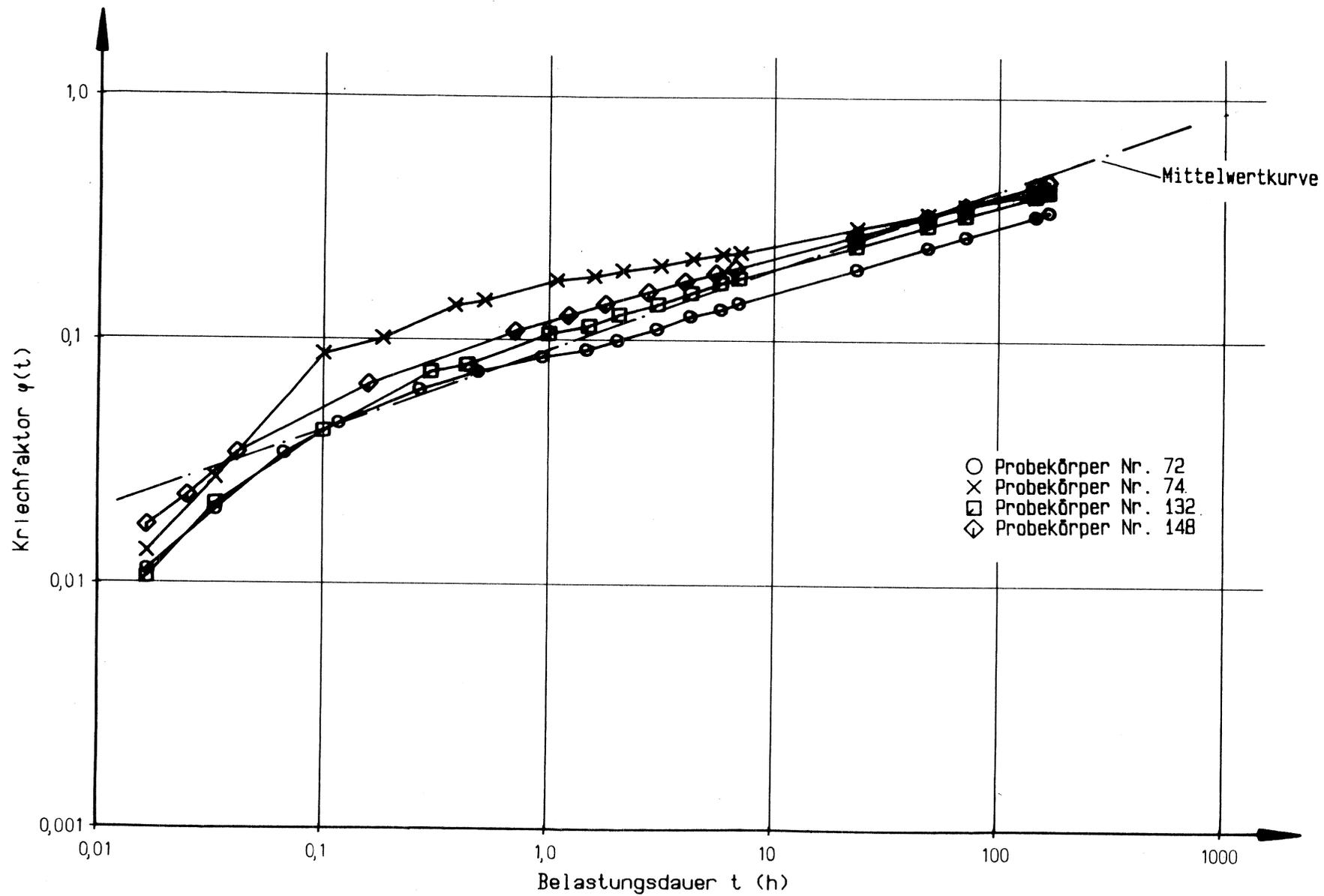
Bild 97:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



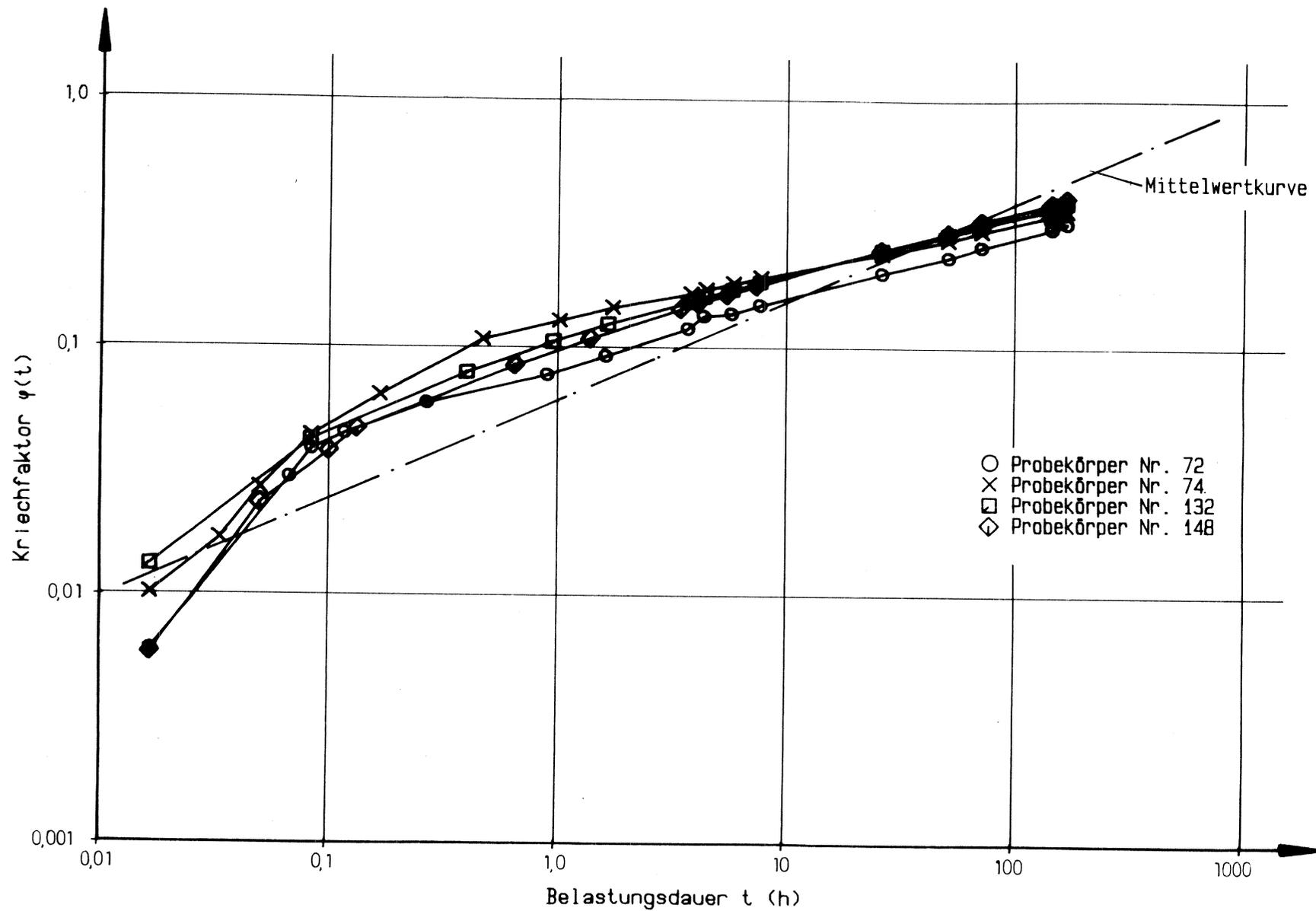
**Bild 98.**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



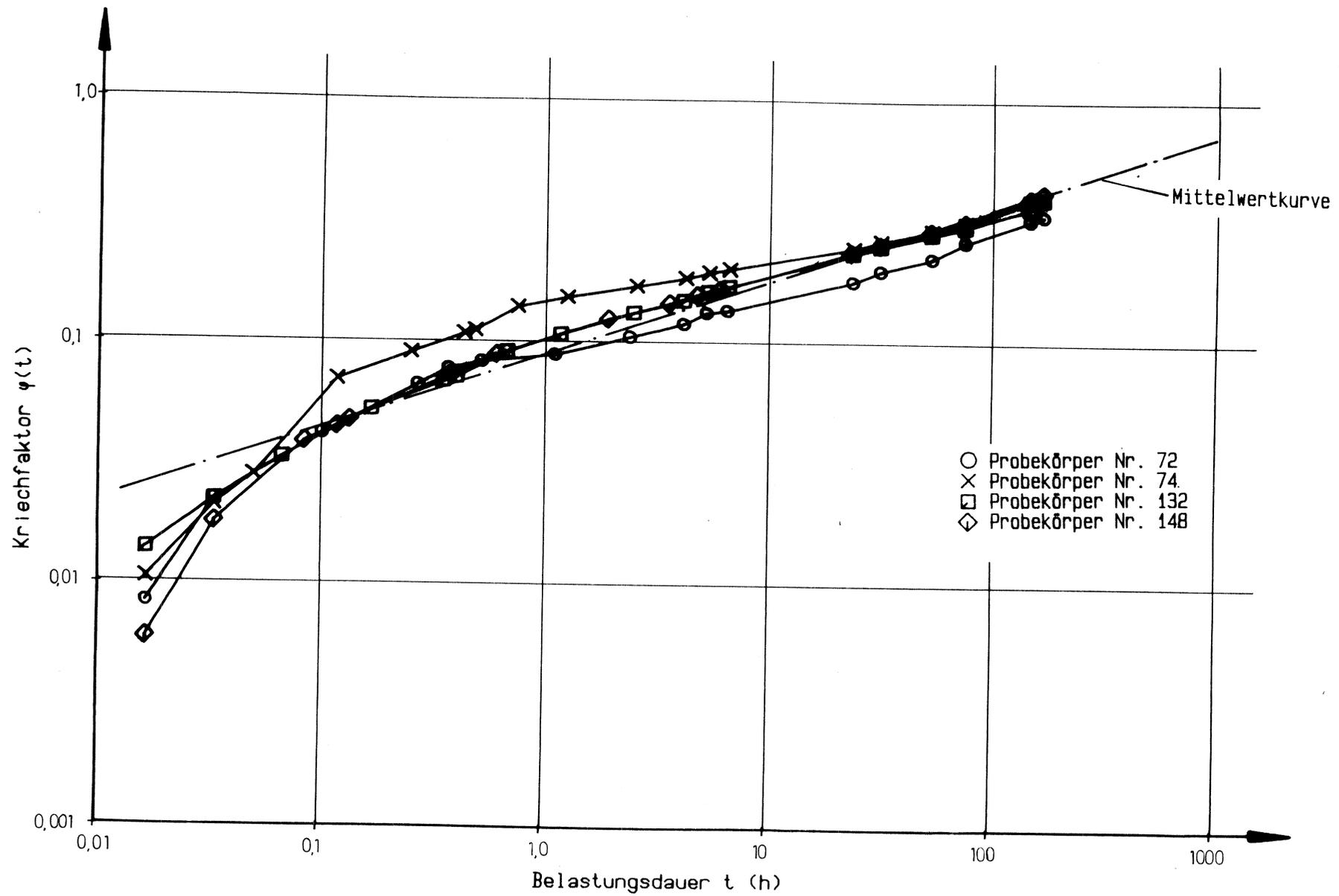
**Bild 99 :**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



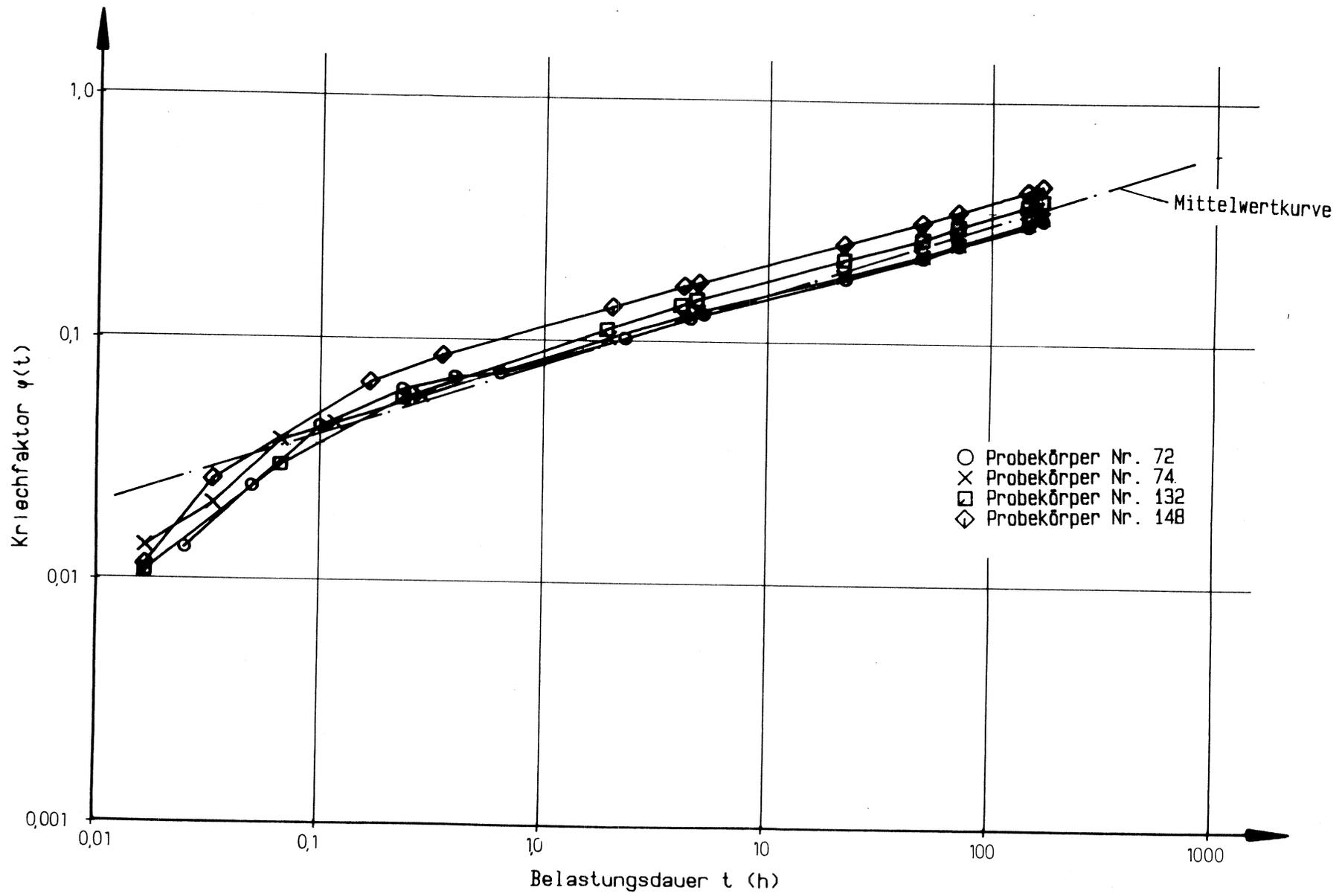
**Bild 100:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



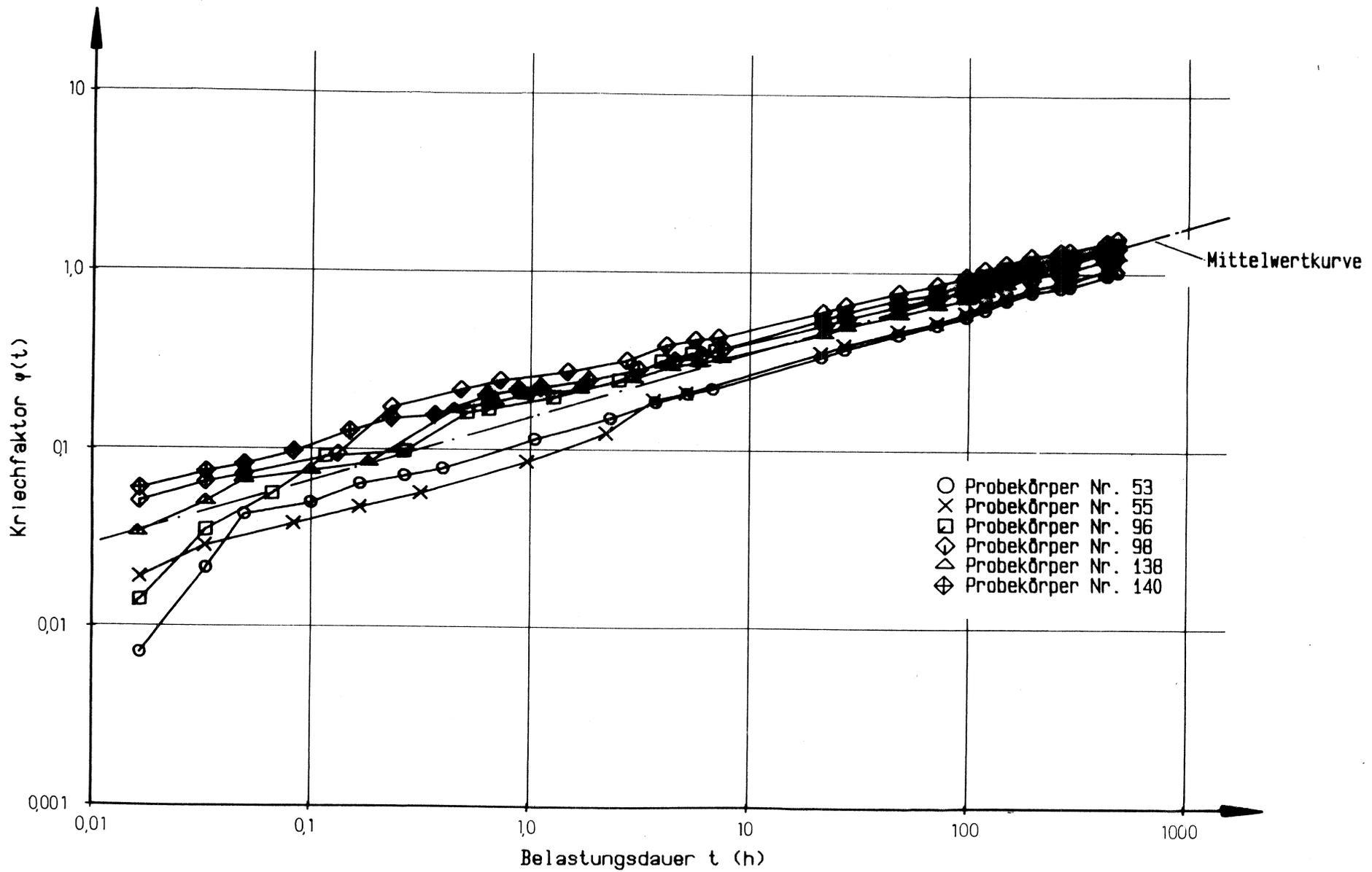
**Bild 101:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



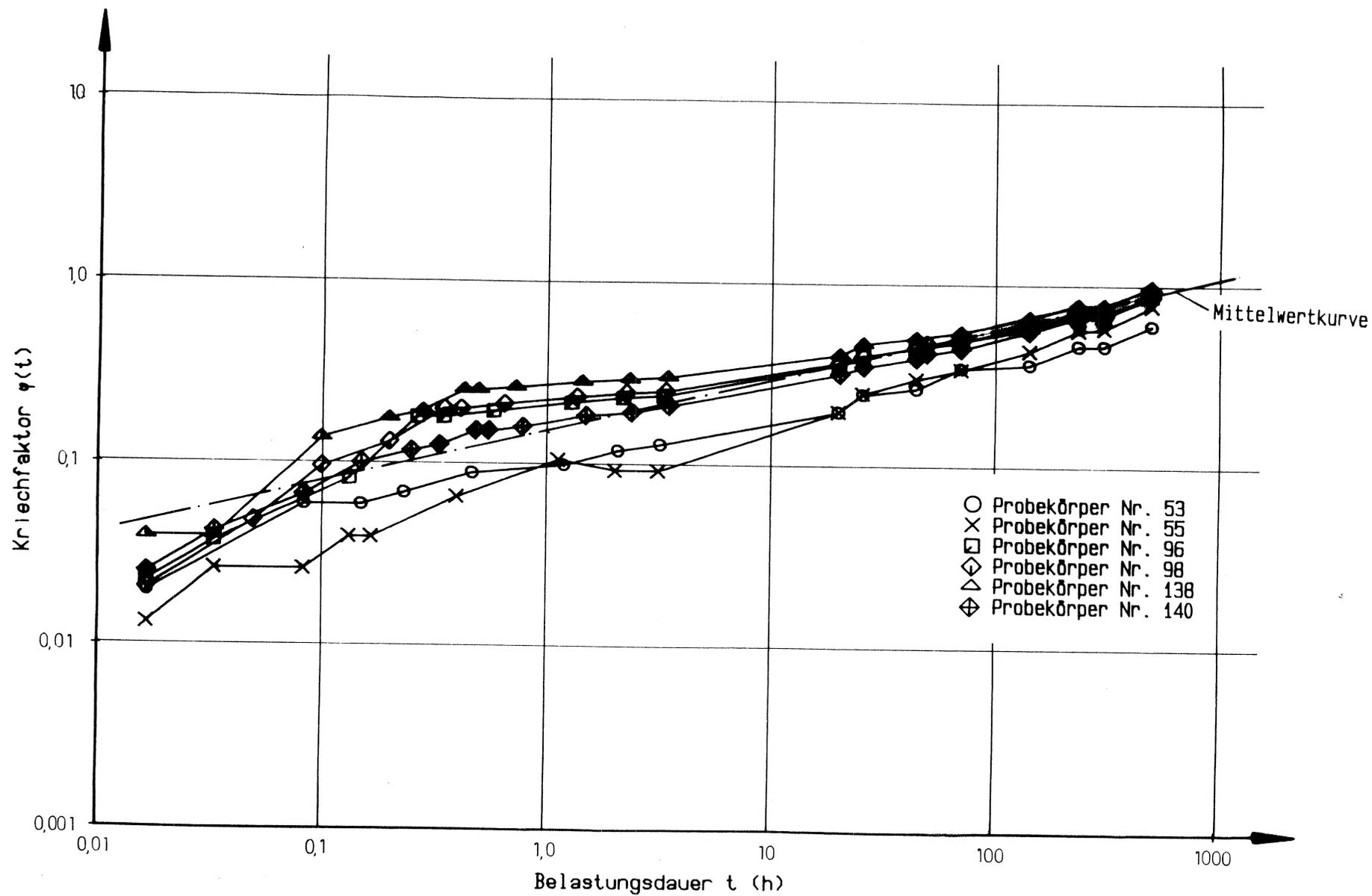
**Bild 102:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 7. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



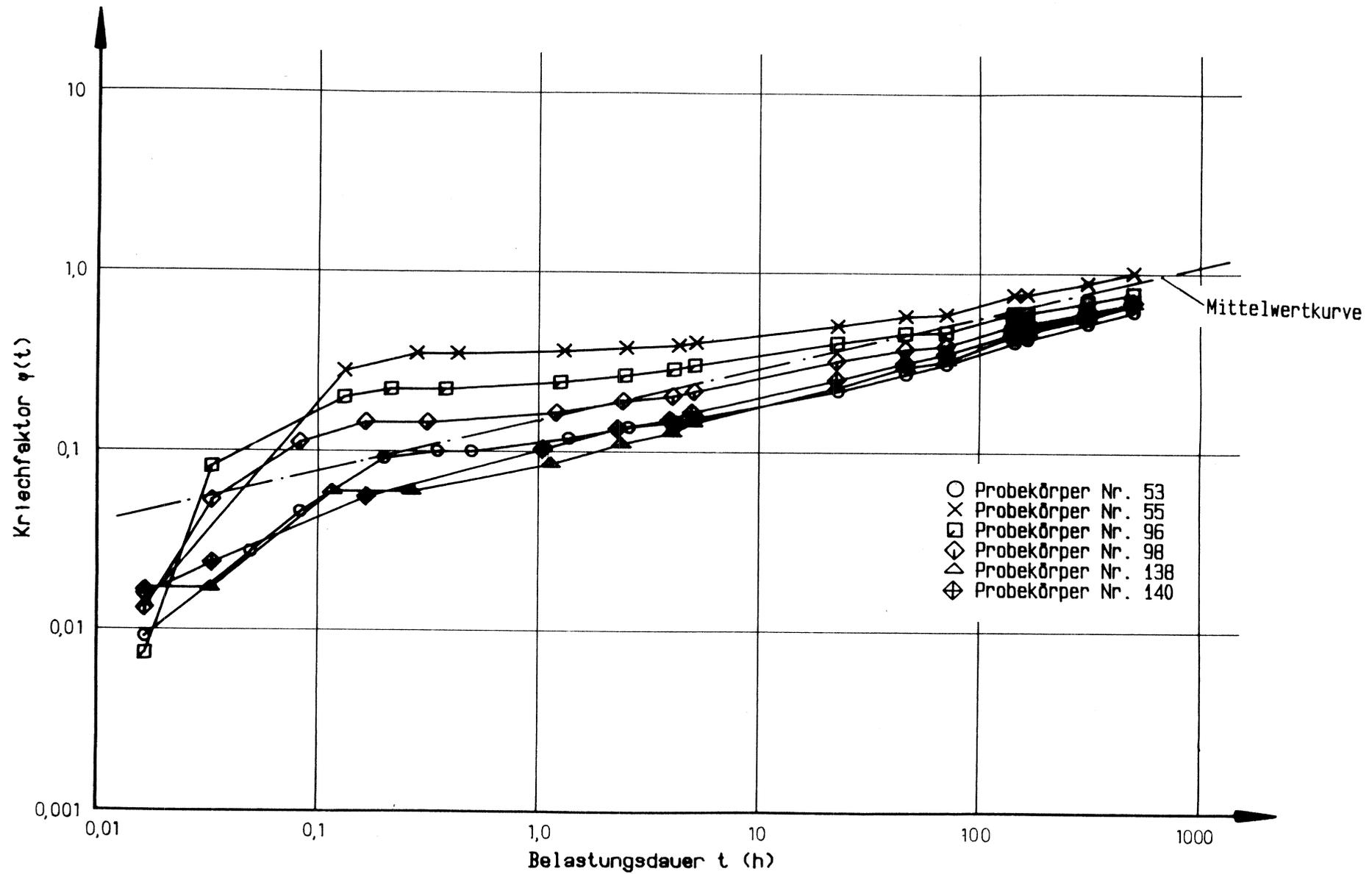
**Bild 103:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 8. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



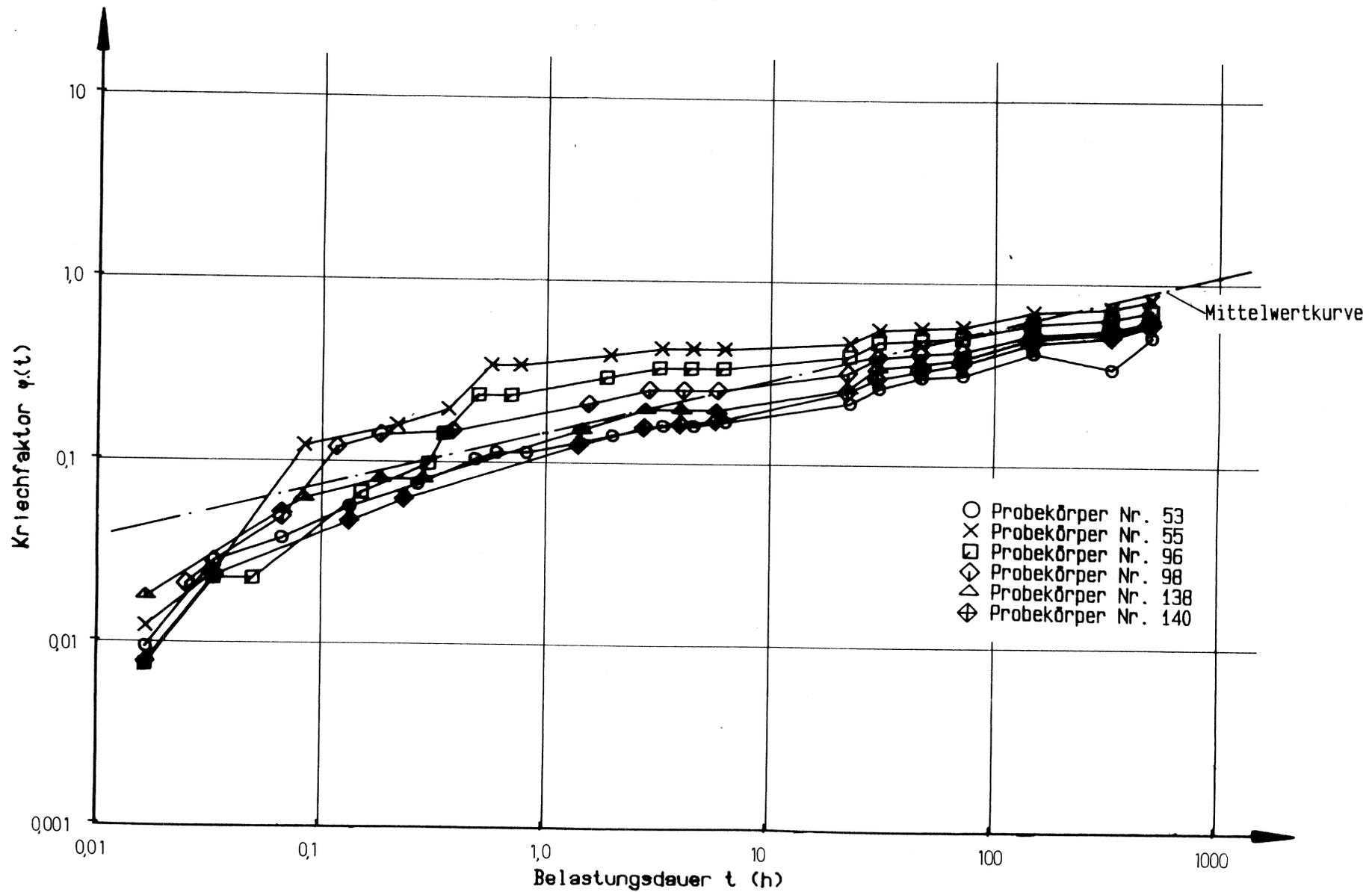
**Bild 104.**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



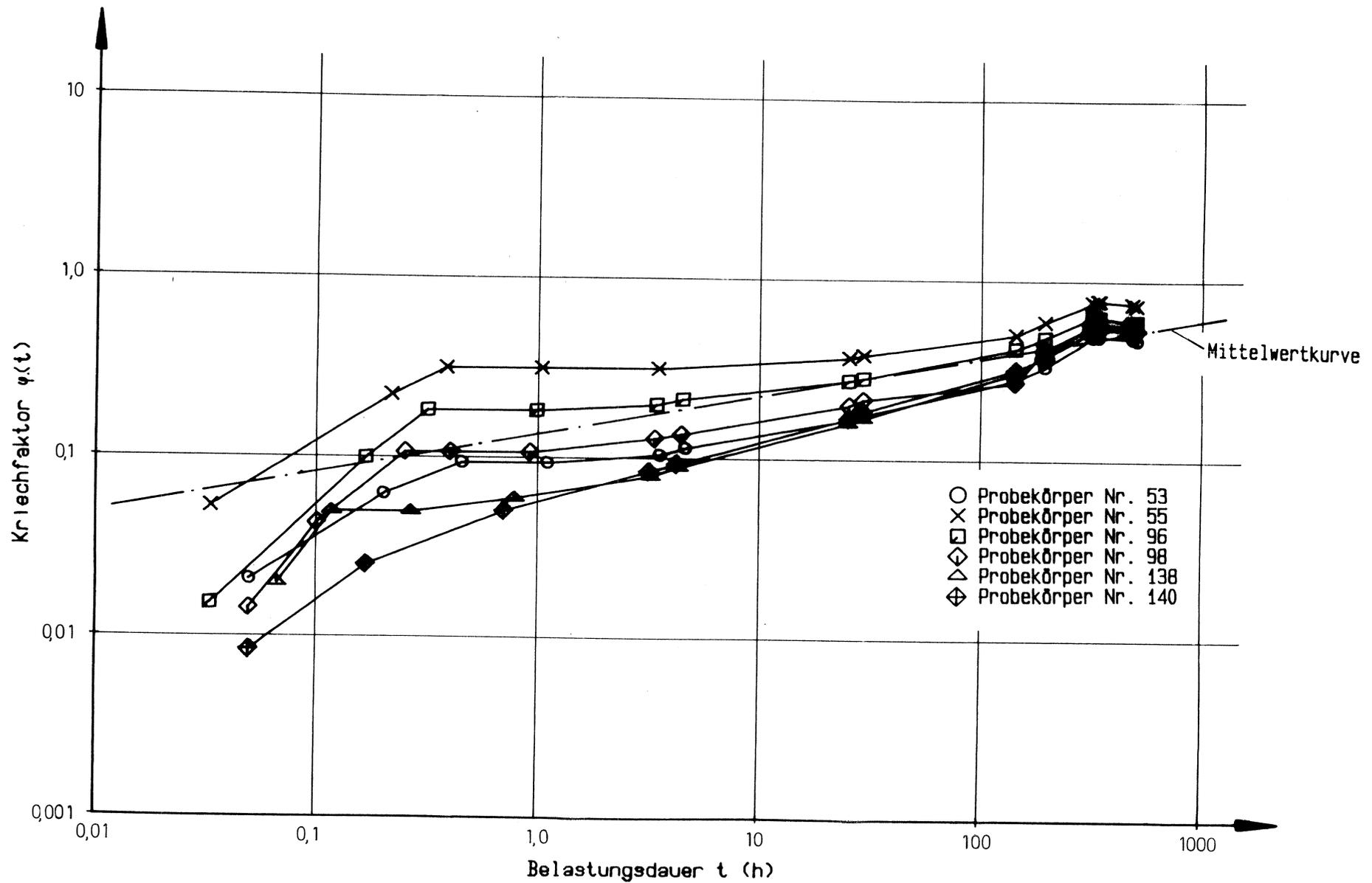
**Bild 105:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



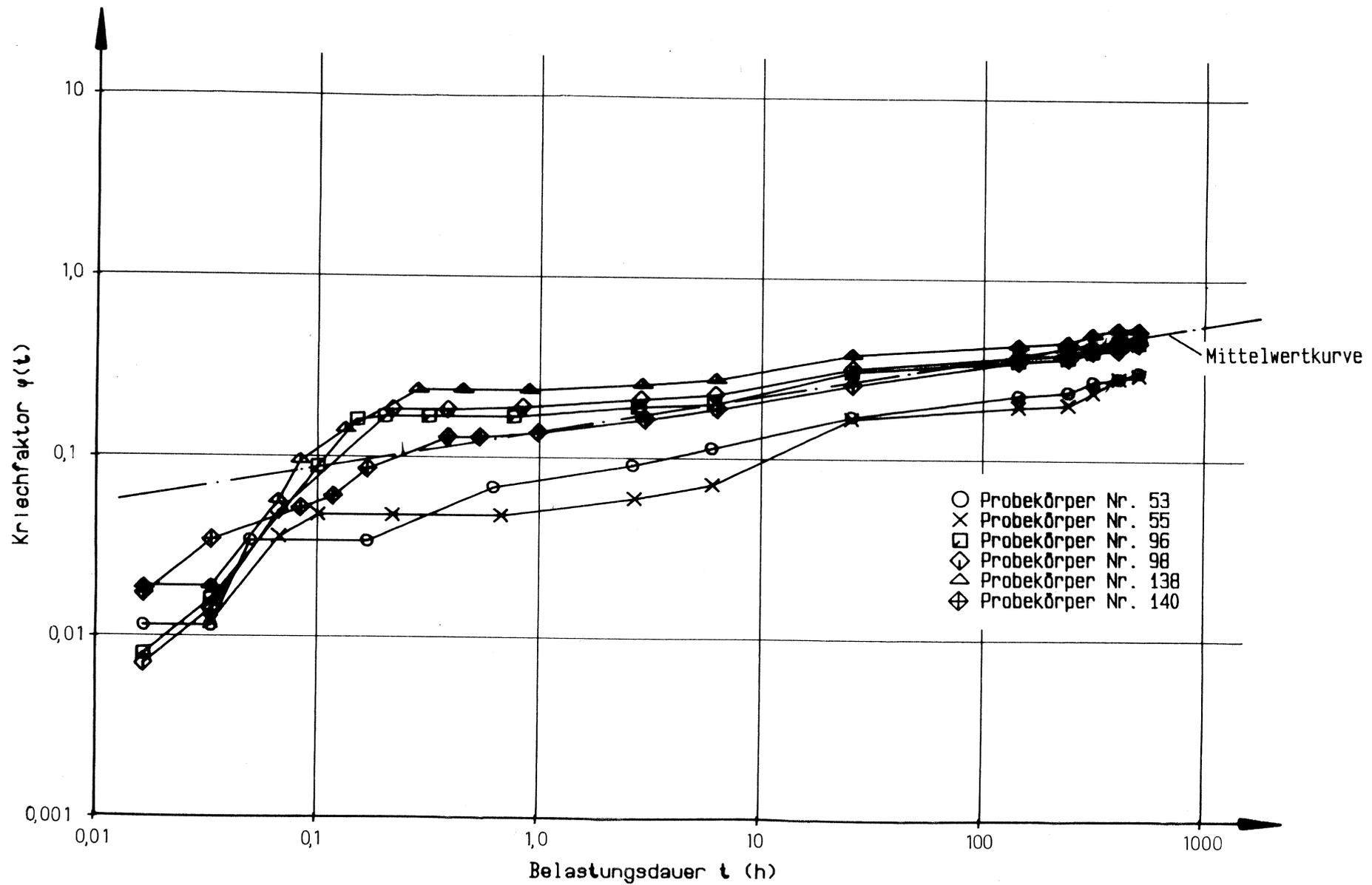
**Bild 106.**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



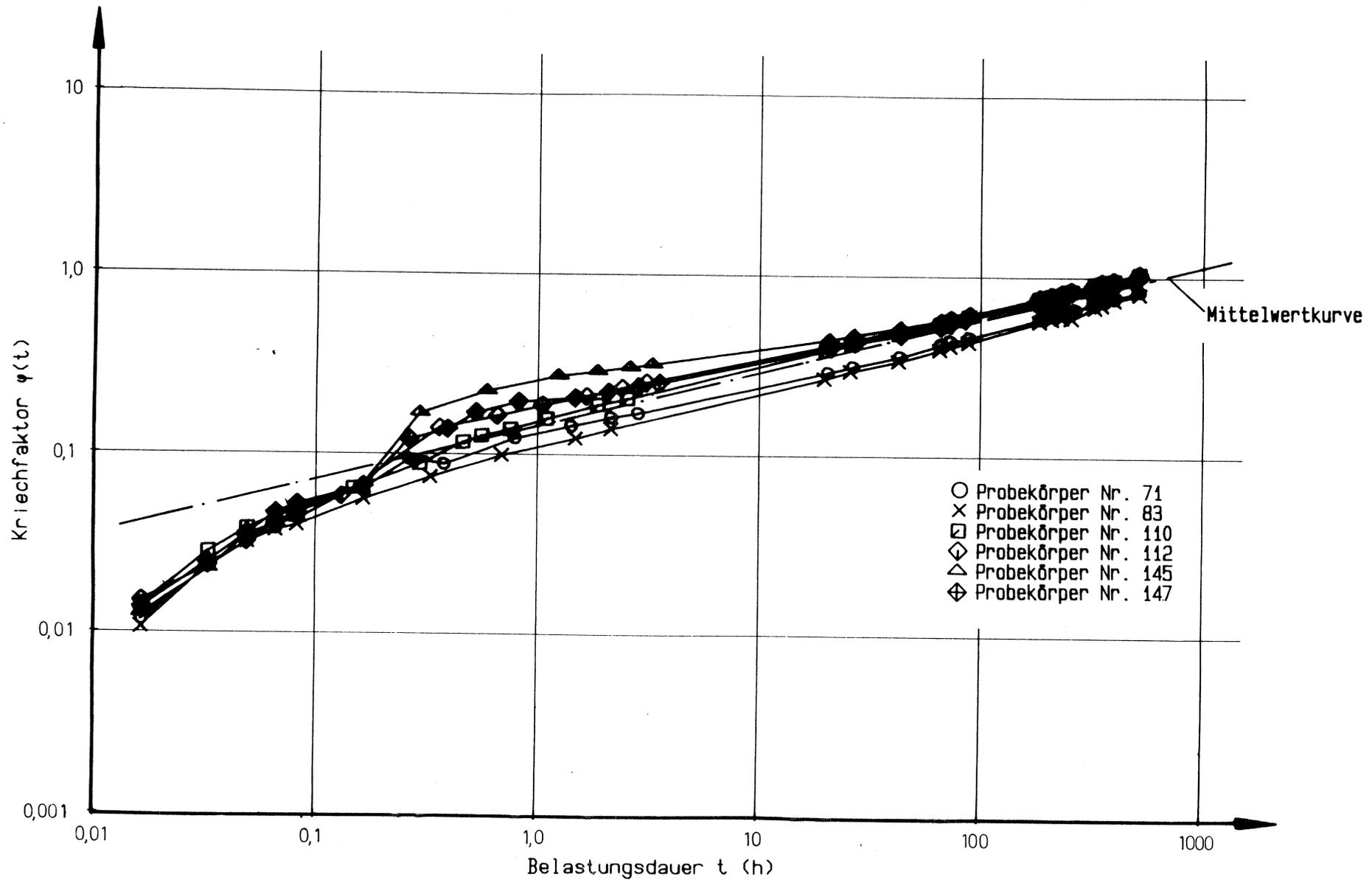
**Bild 107:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



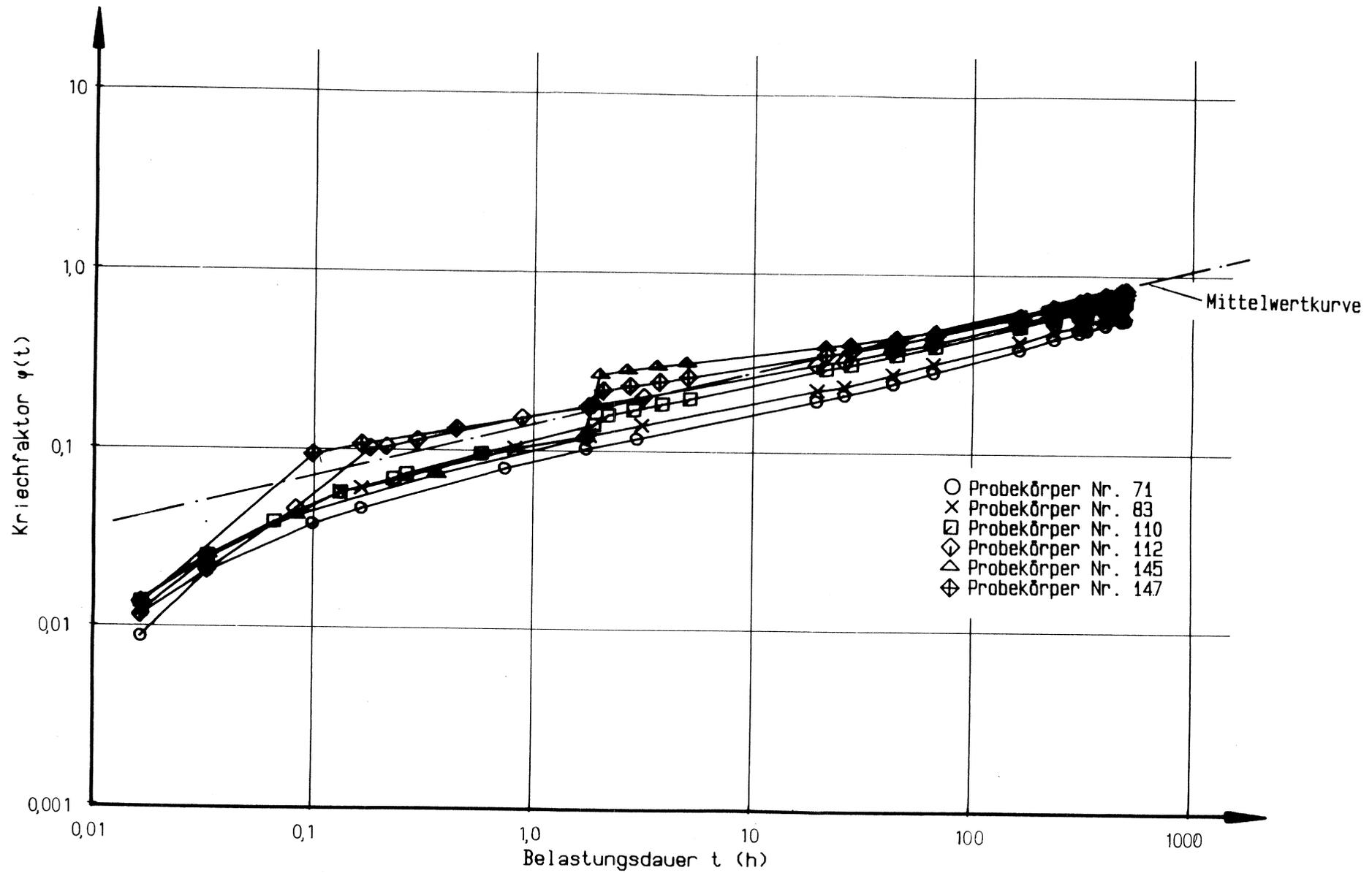
**Bild 108:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



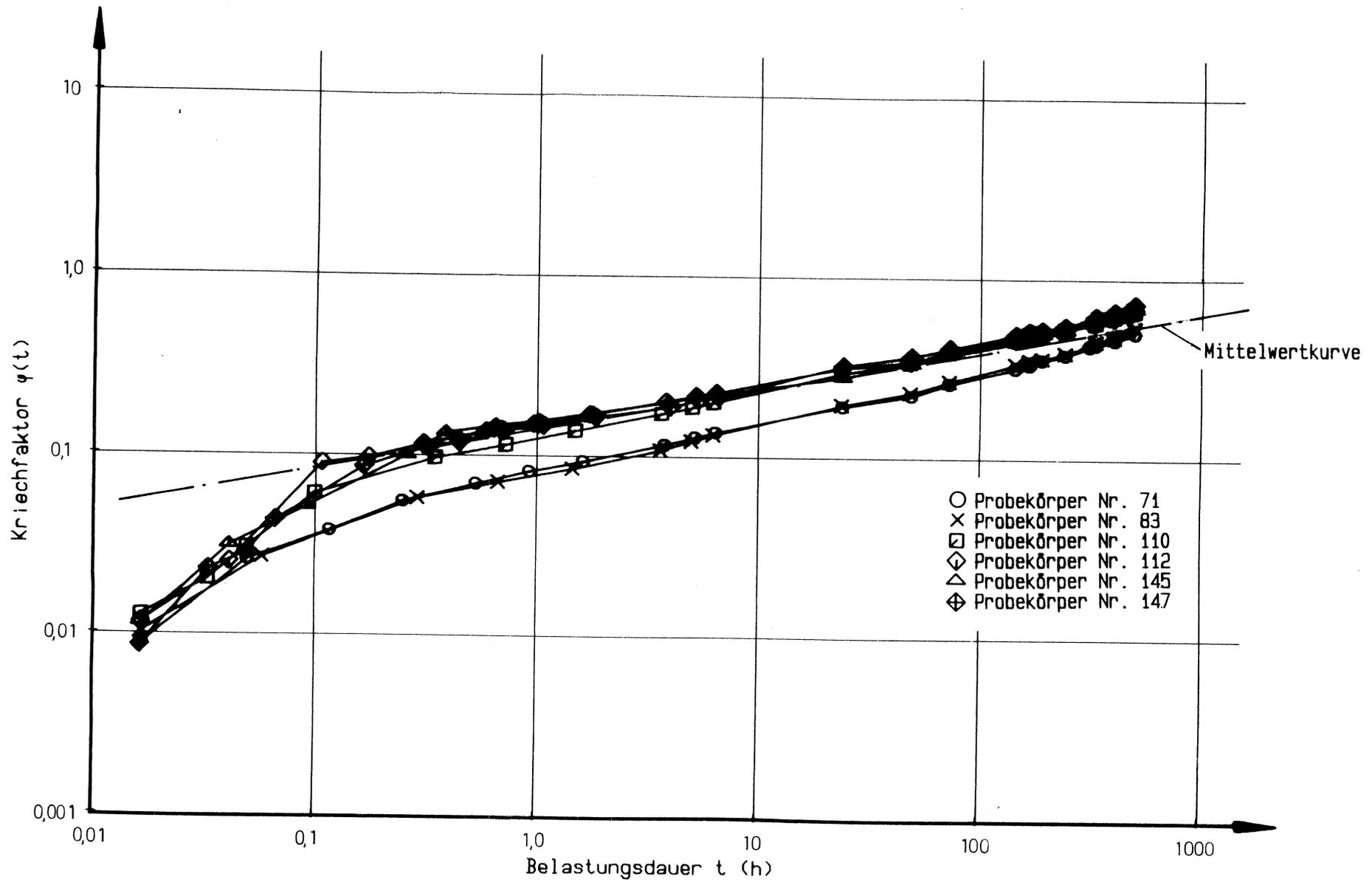
**Bild 109:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



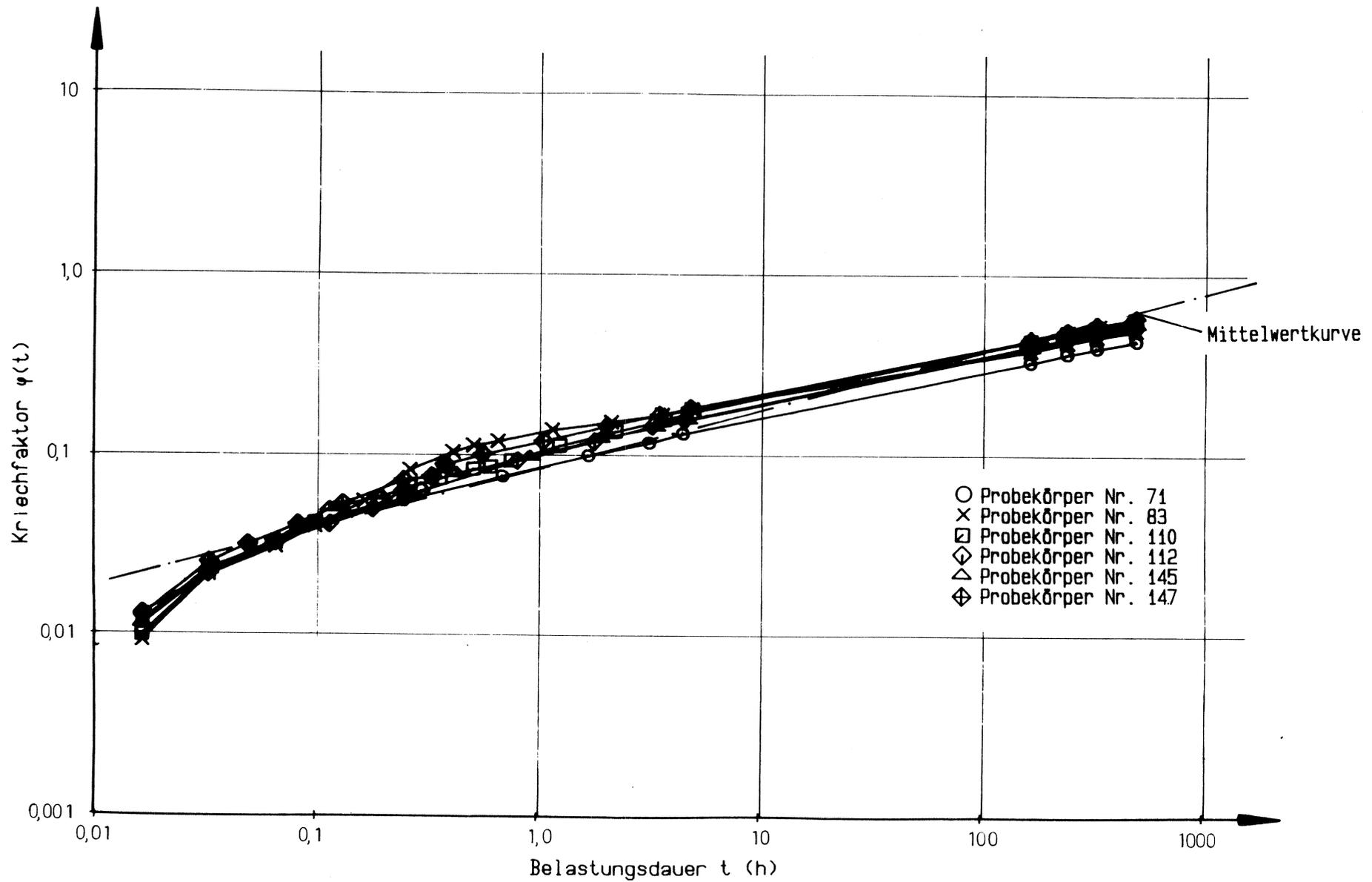
**Bild 110:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



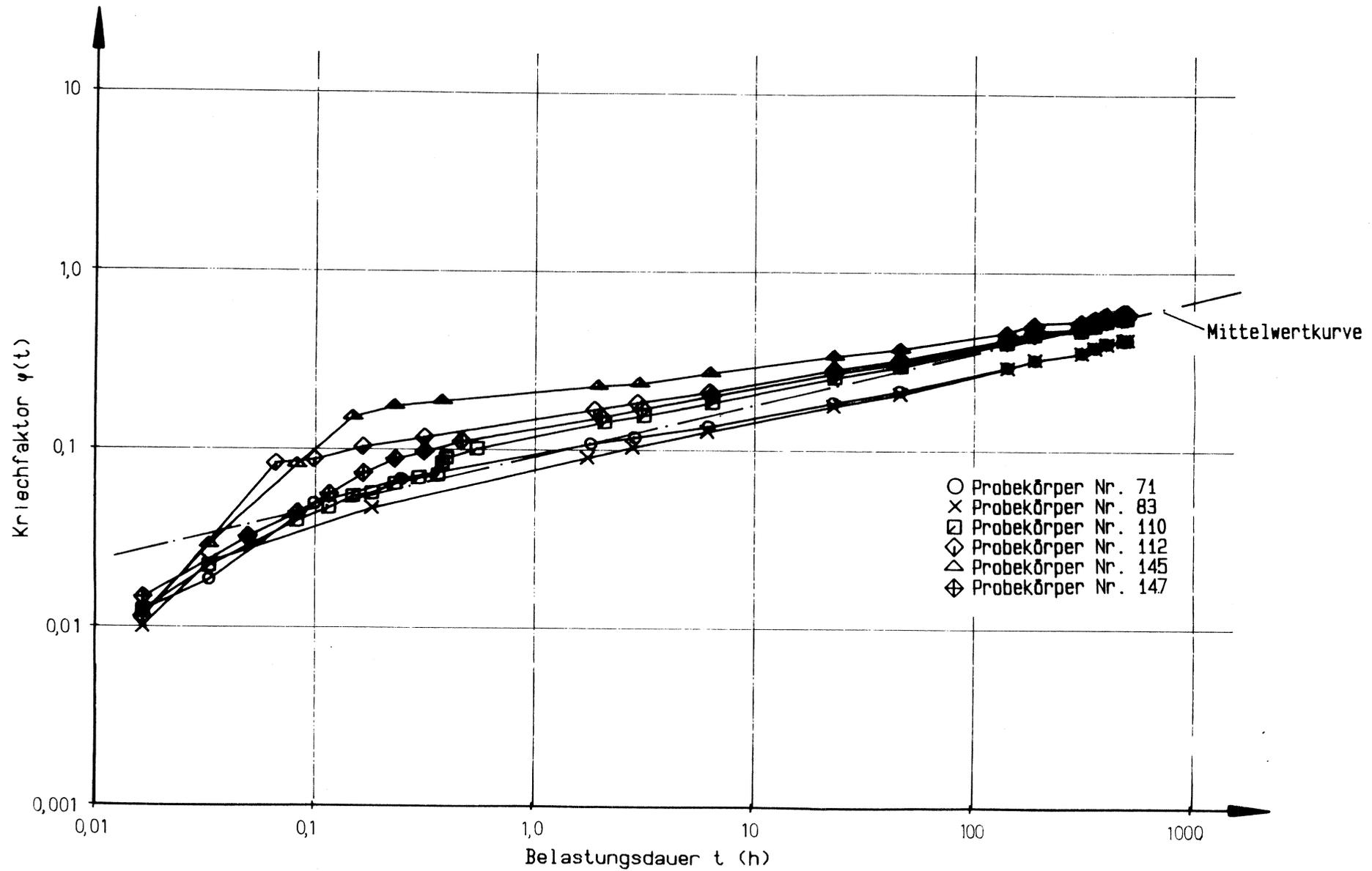
**Bild 111:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



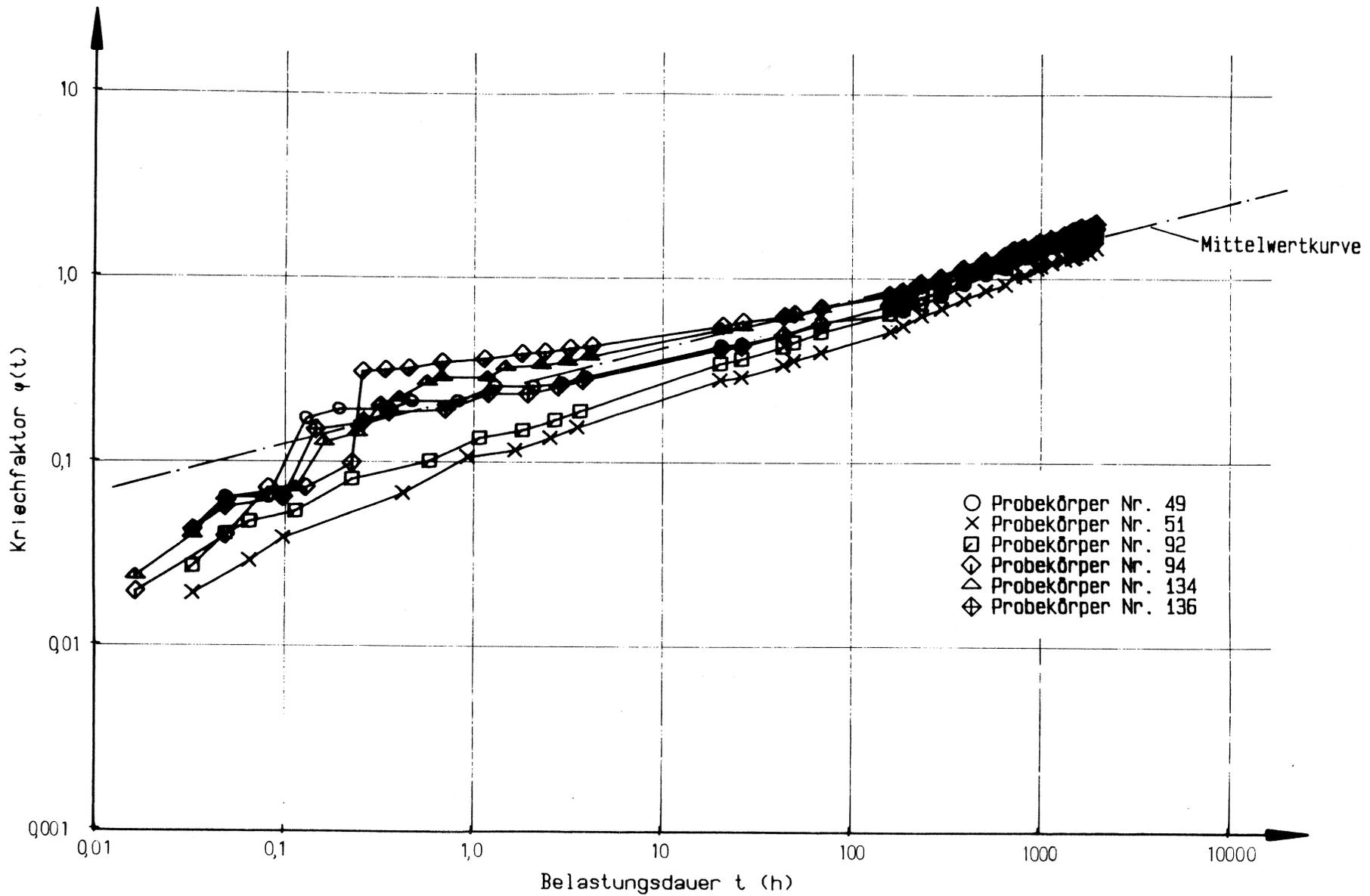
**Bild 112:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 113:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 114.**  $q(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 115:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 49, 51, 92, 94, 134, 136 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

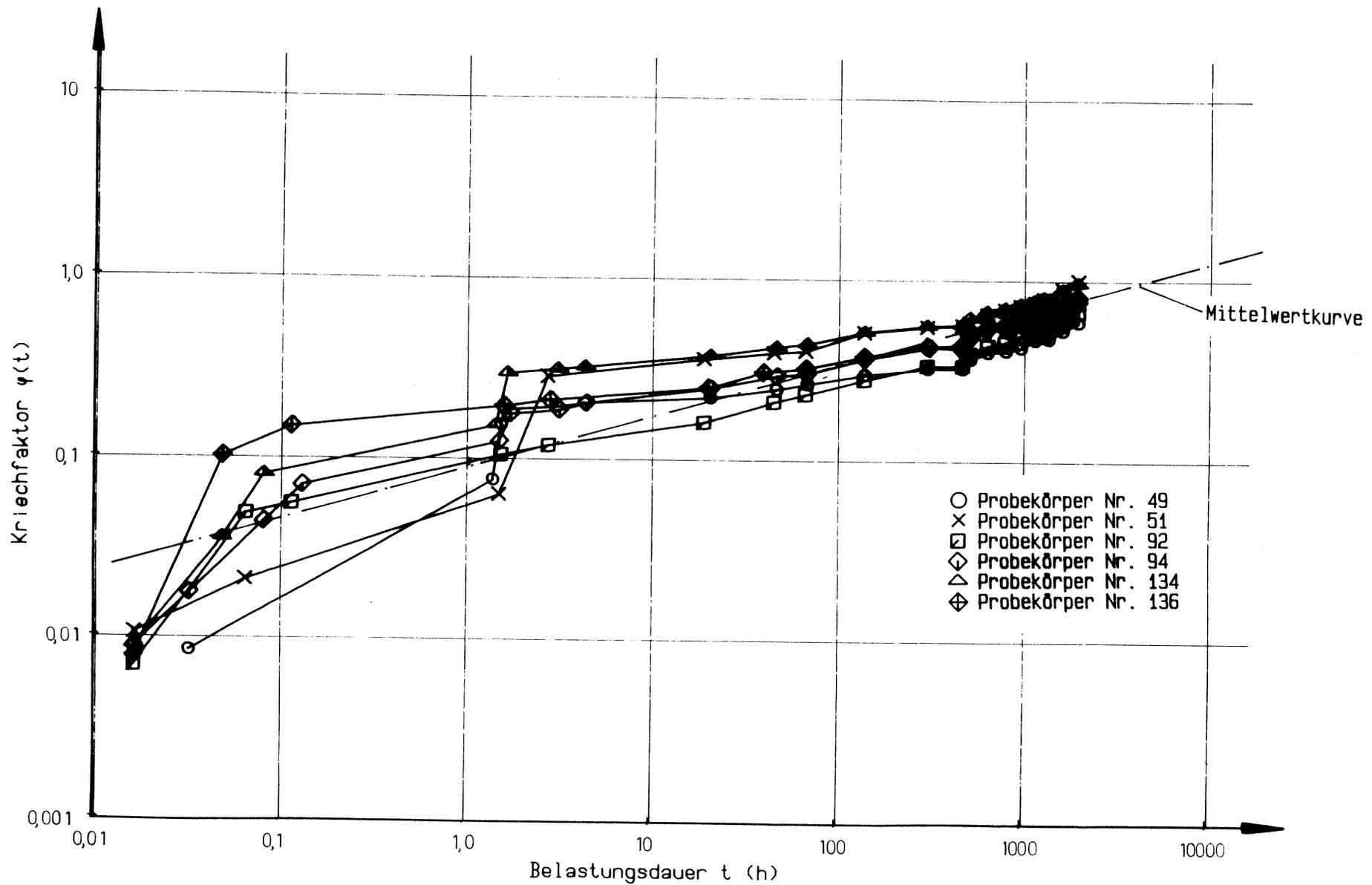
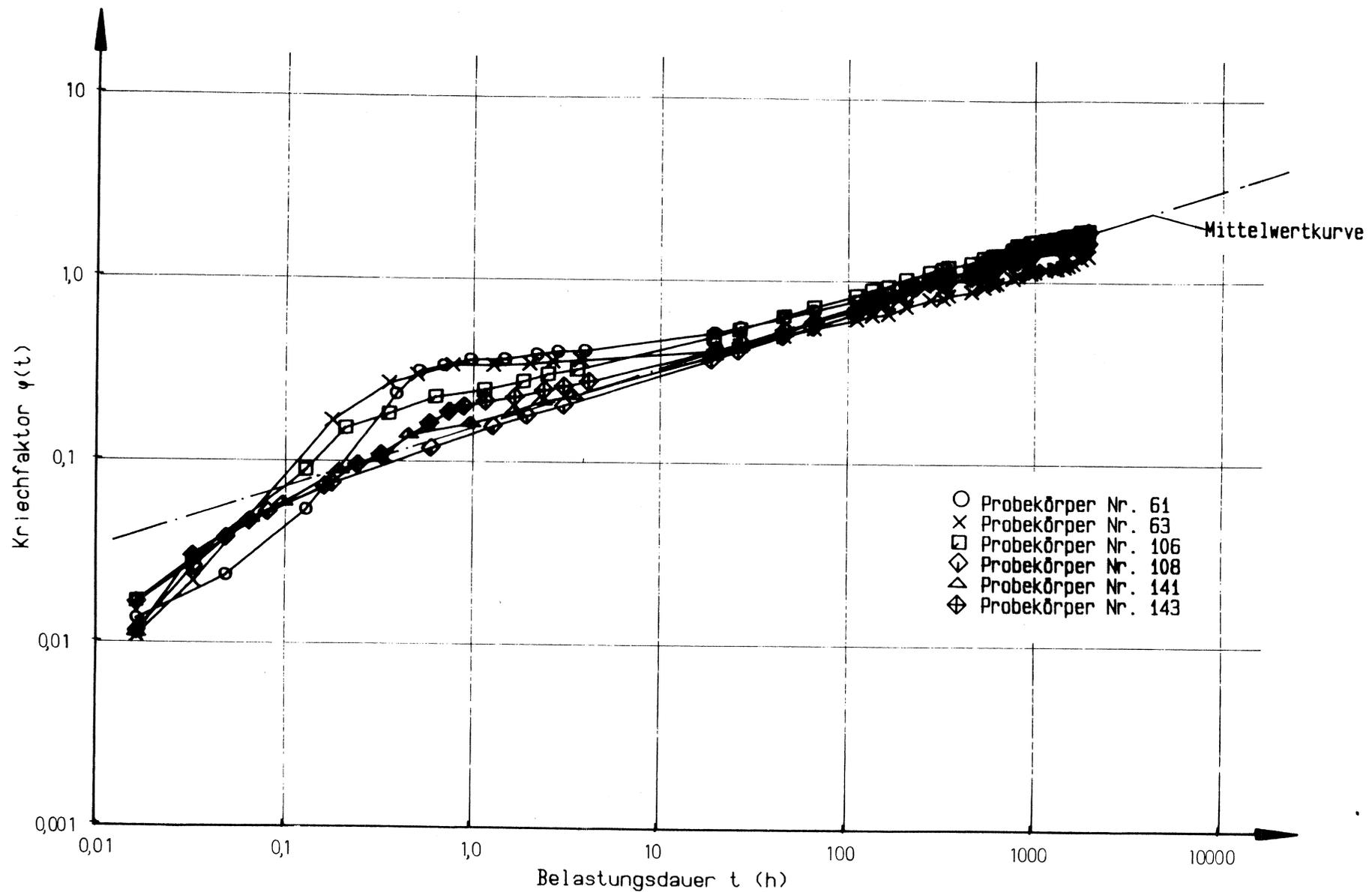
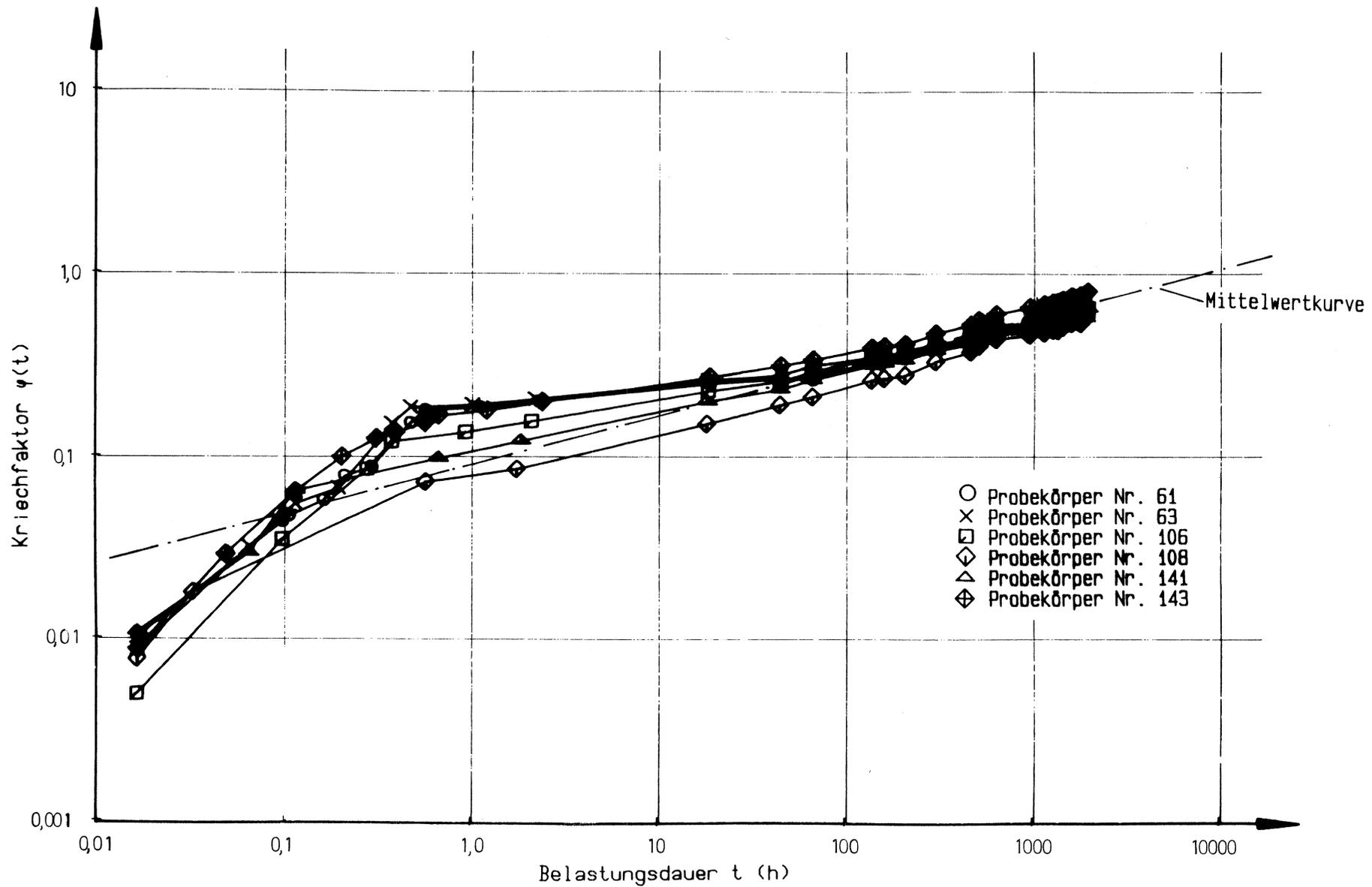


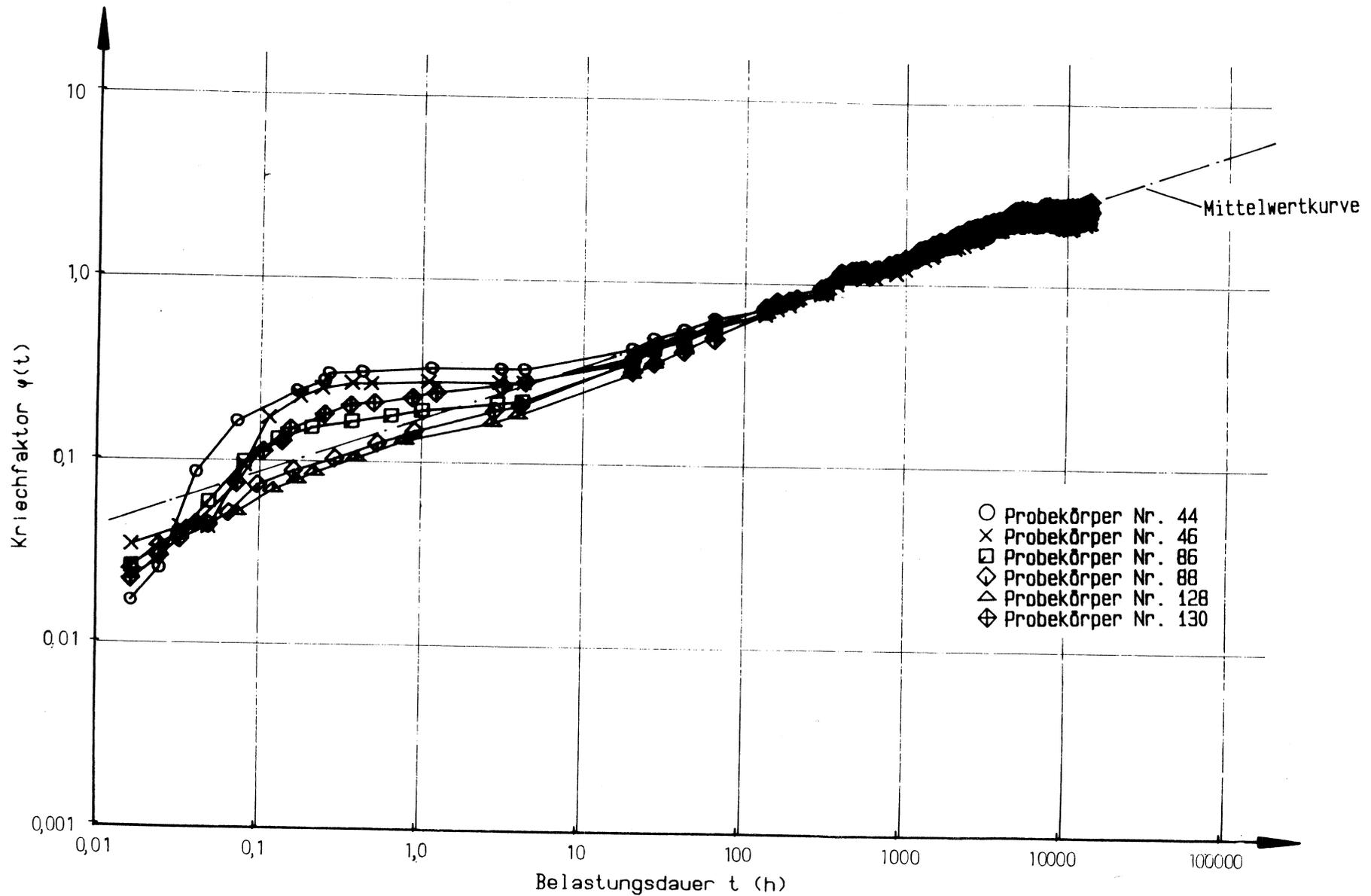
Bild 116:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 49, 51, 92, 94, 134, 136 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 117:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 61, 63, 106, 108, 141, 143 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 118.**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 61, 63, 106, 108, 141, 143 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 119:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 44, 46, 86, 88, 128, 130 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

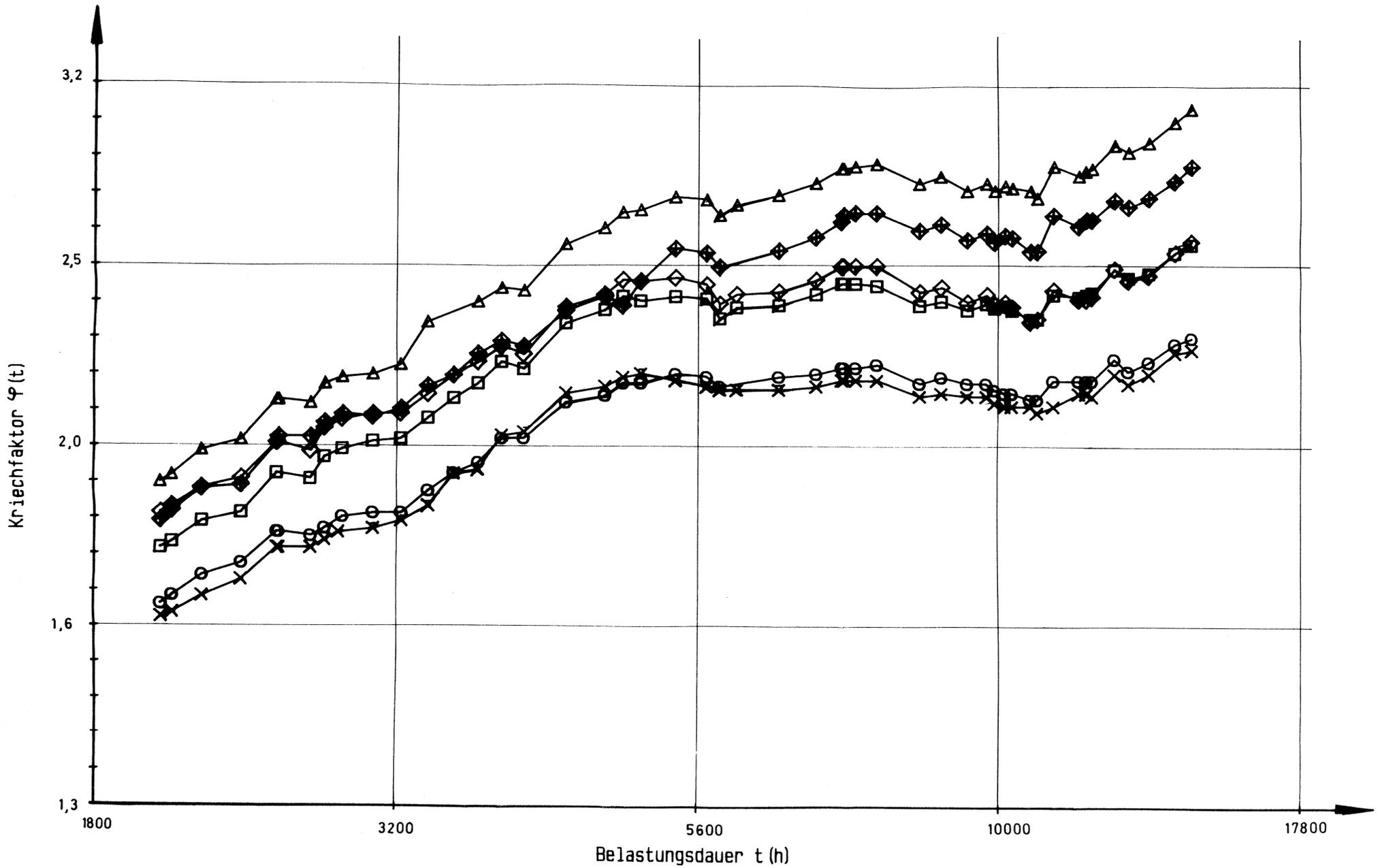


Bild 119a:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 44, 46, 86, 88, 128, 130  
 ab 2000 Stunden der 1. Belastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

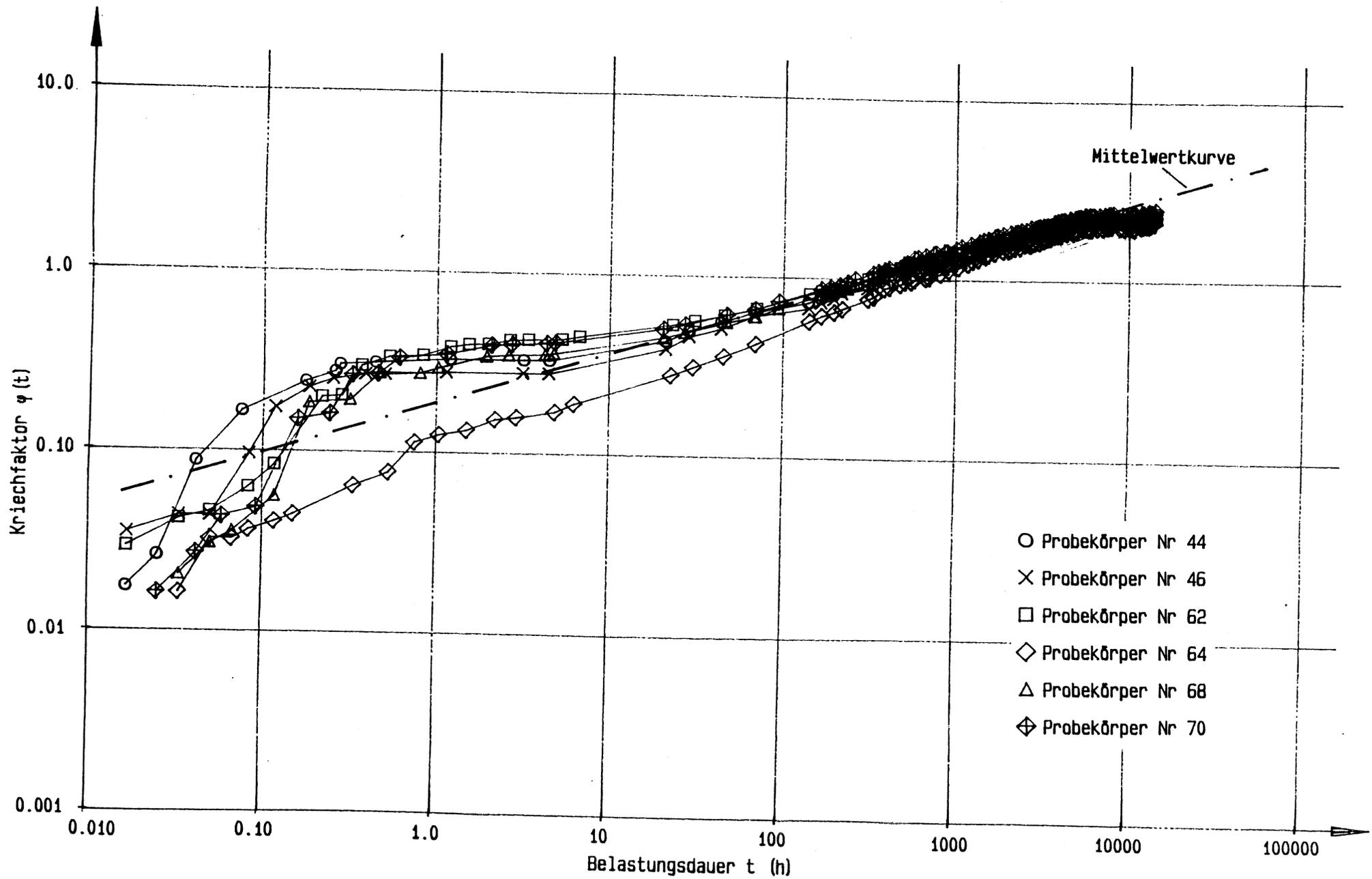
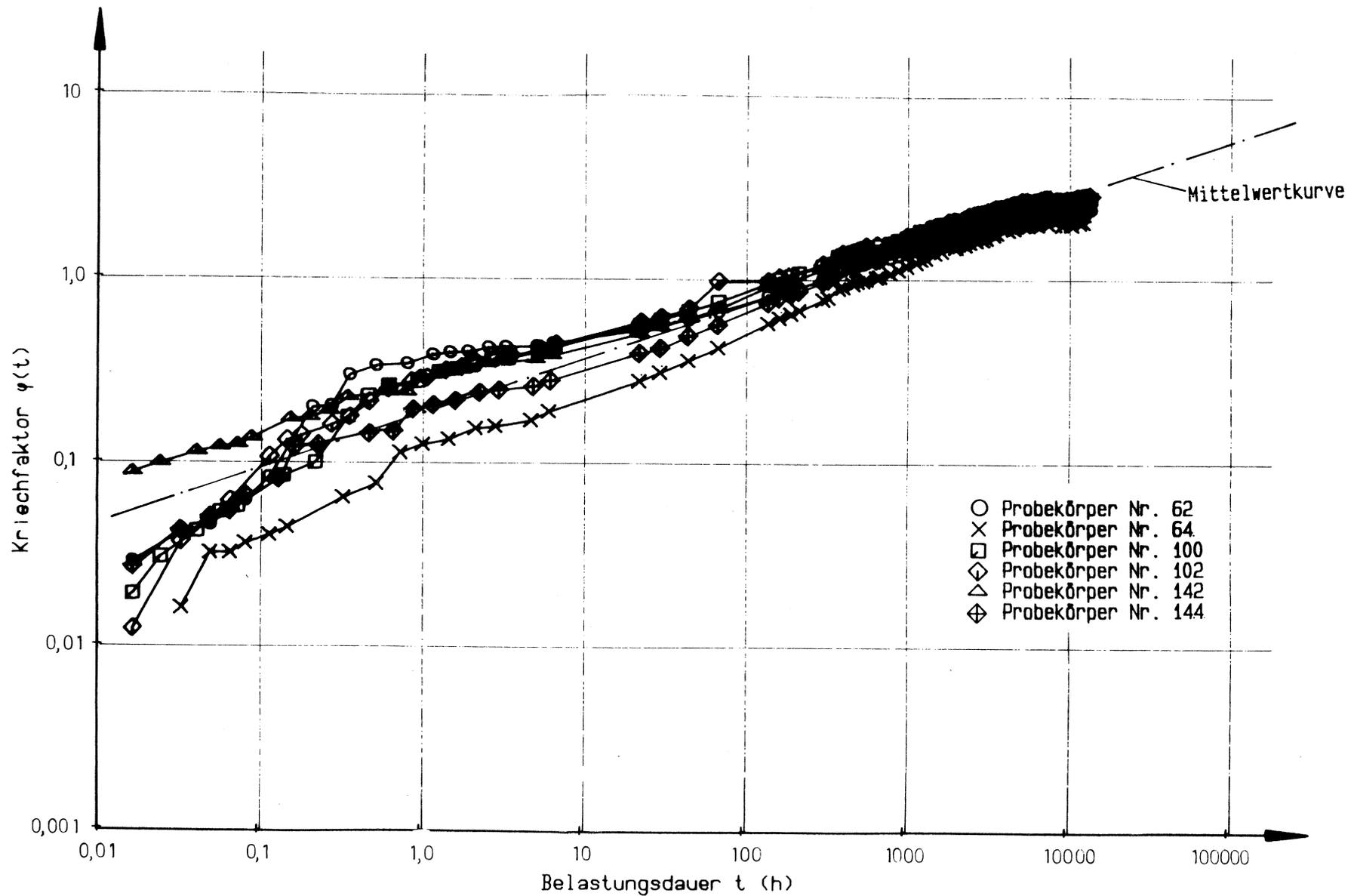


Bild 119 b :  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr 44, 46, 62, 64, 68, 70  
 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, Hersteller 1



**Bild 120:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 62, 64, 100, 102, 142, 144 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 20% der Kurzzeitbruchlast

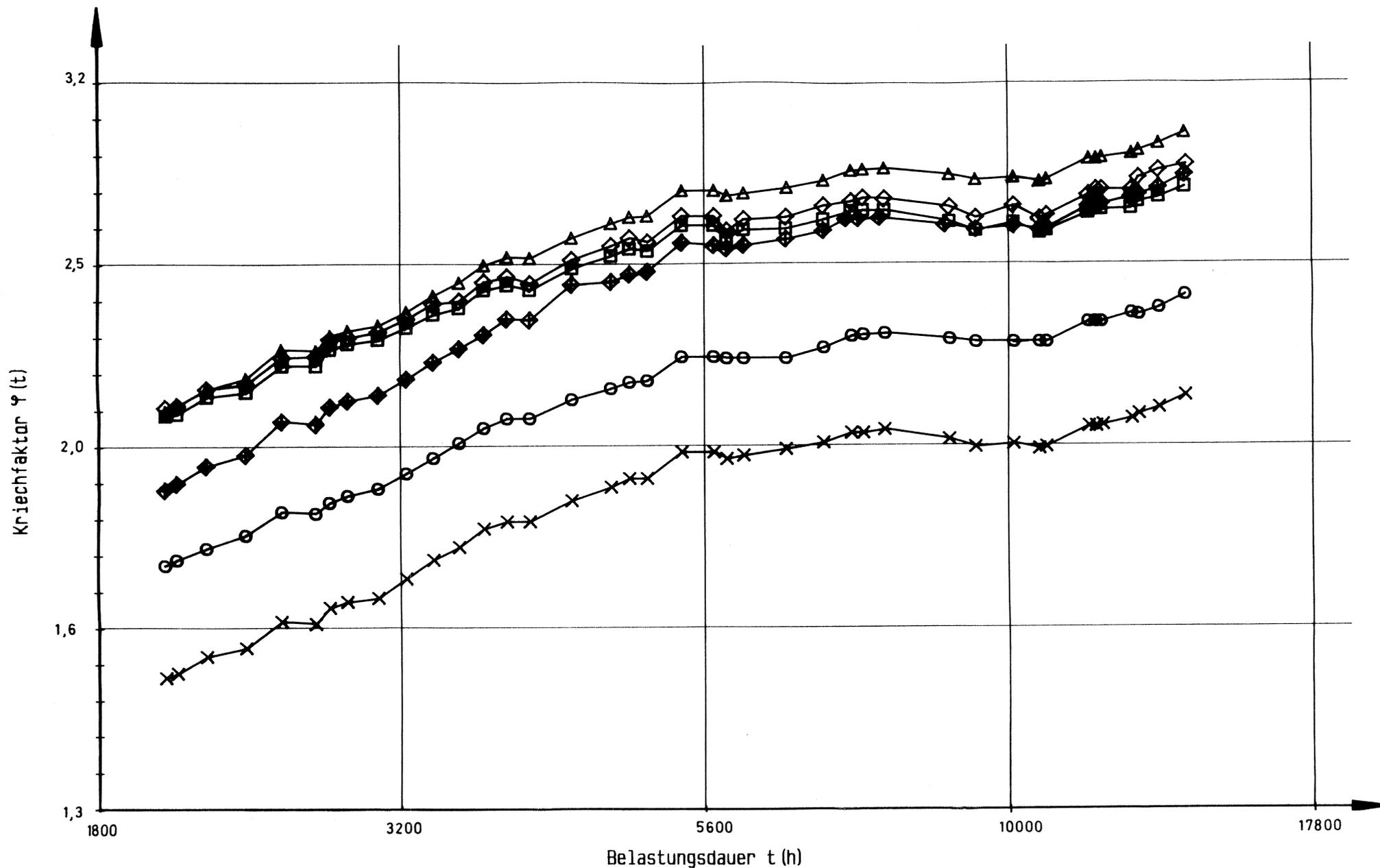


Bild 120 a:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 62, 64, 100, 102, 142, 144 ab 2000 Stunden der 1. Belastung, 20% der Kurzzeitbruchlast

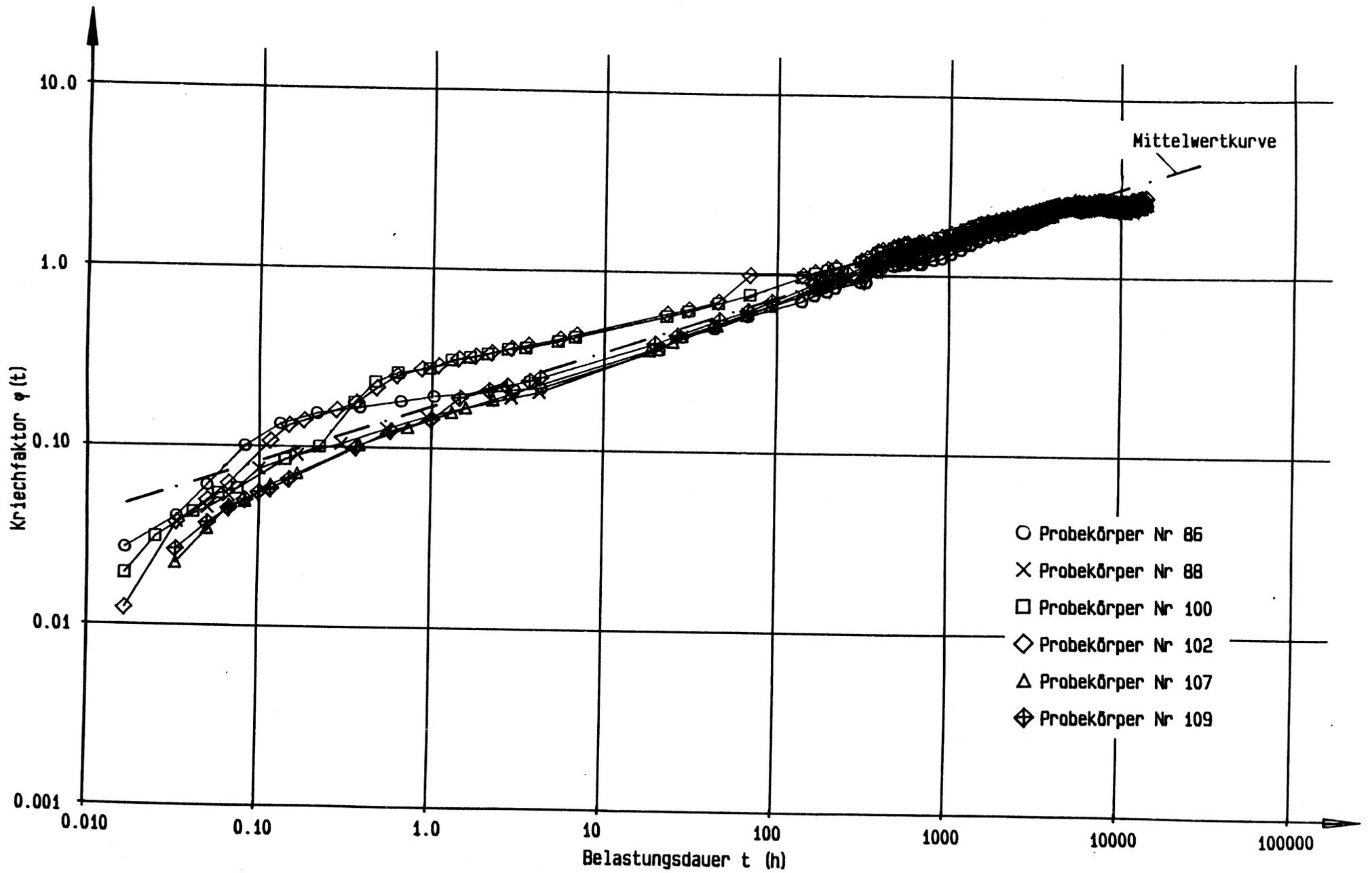
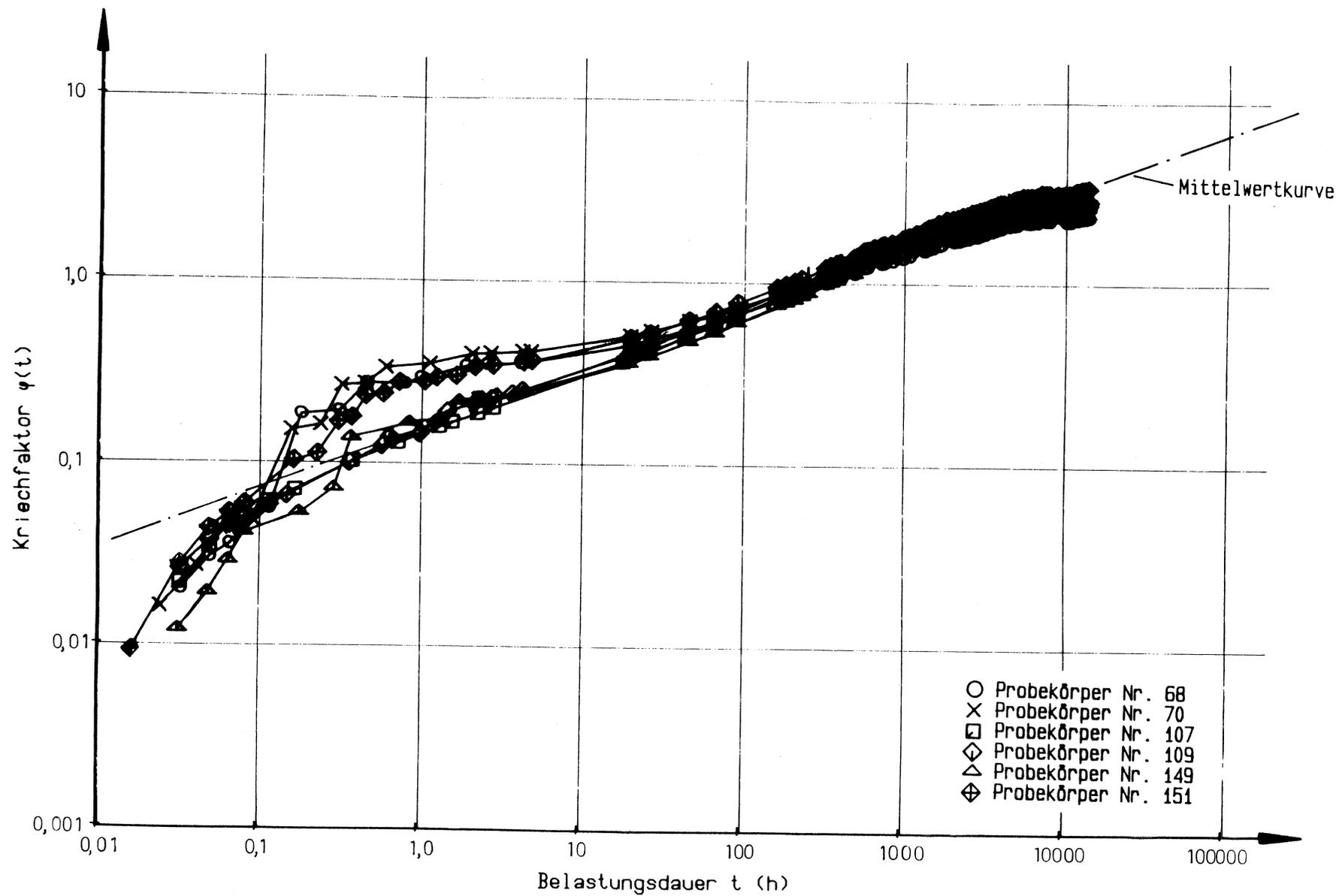


Bild 120 b :  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr 86, 88, 100, 102, 107, 109  
und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, Hersteller 2



**Bild 121.**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 68, 70, 107, 109, 149, 151 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast

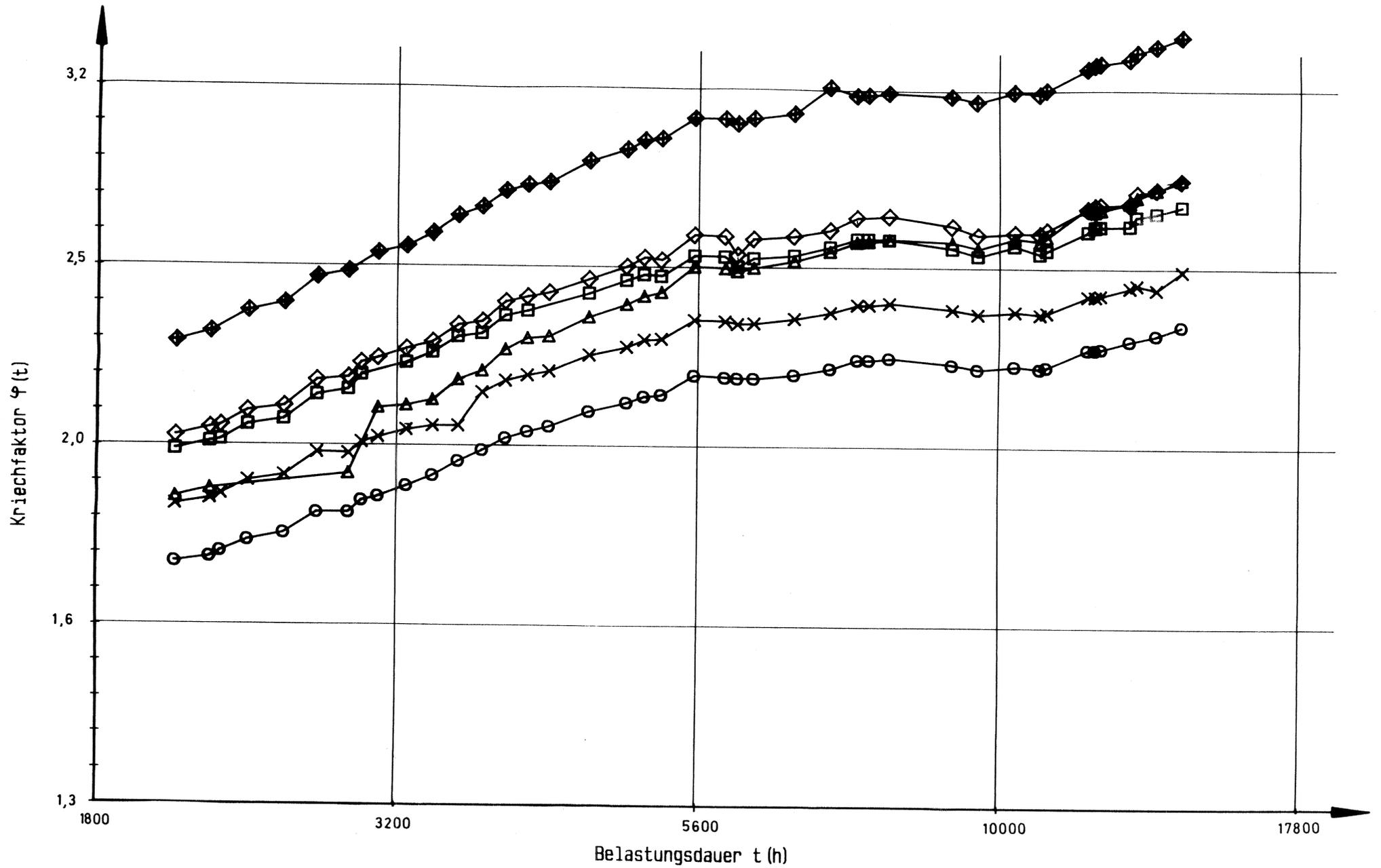


Bild 121 a:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 68, 70, 107, 109, 149, 151 ab 2000 Stunden der 1. Belastung, 30% der Kurzzeitbruchlast

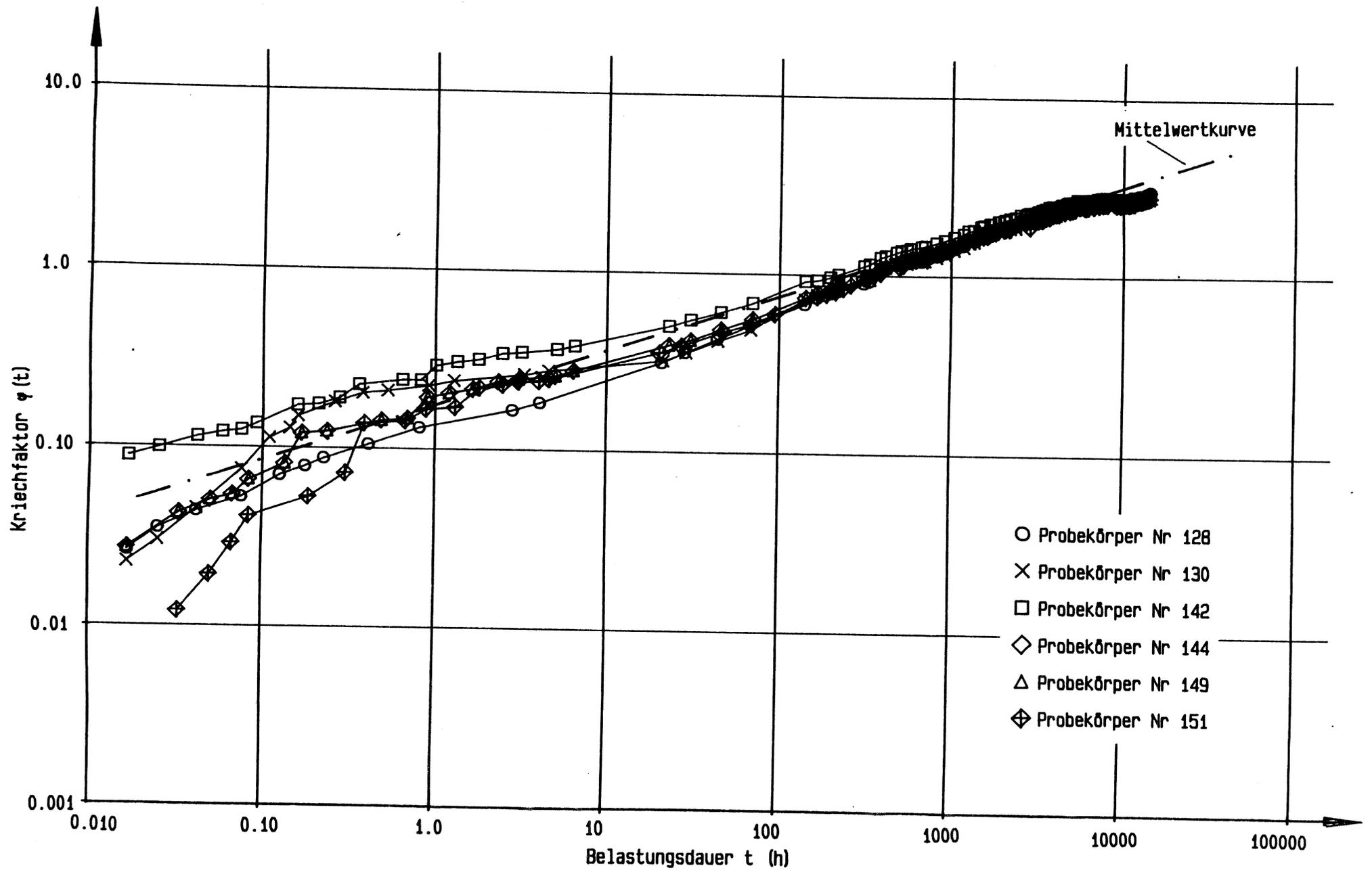
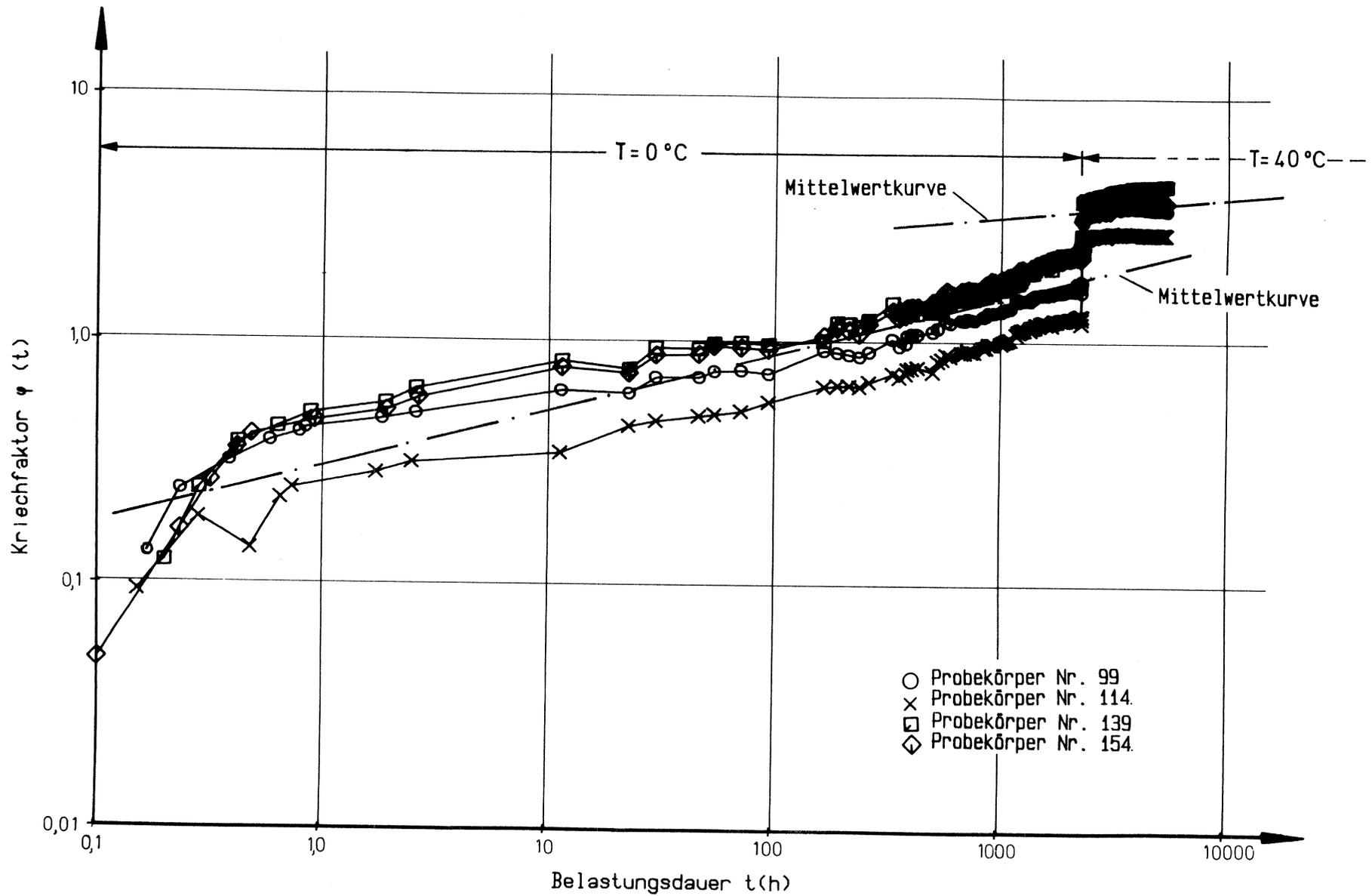
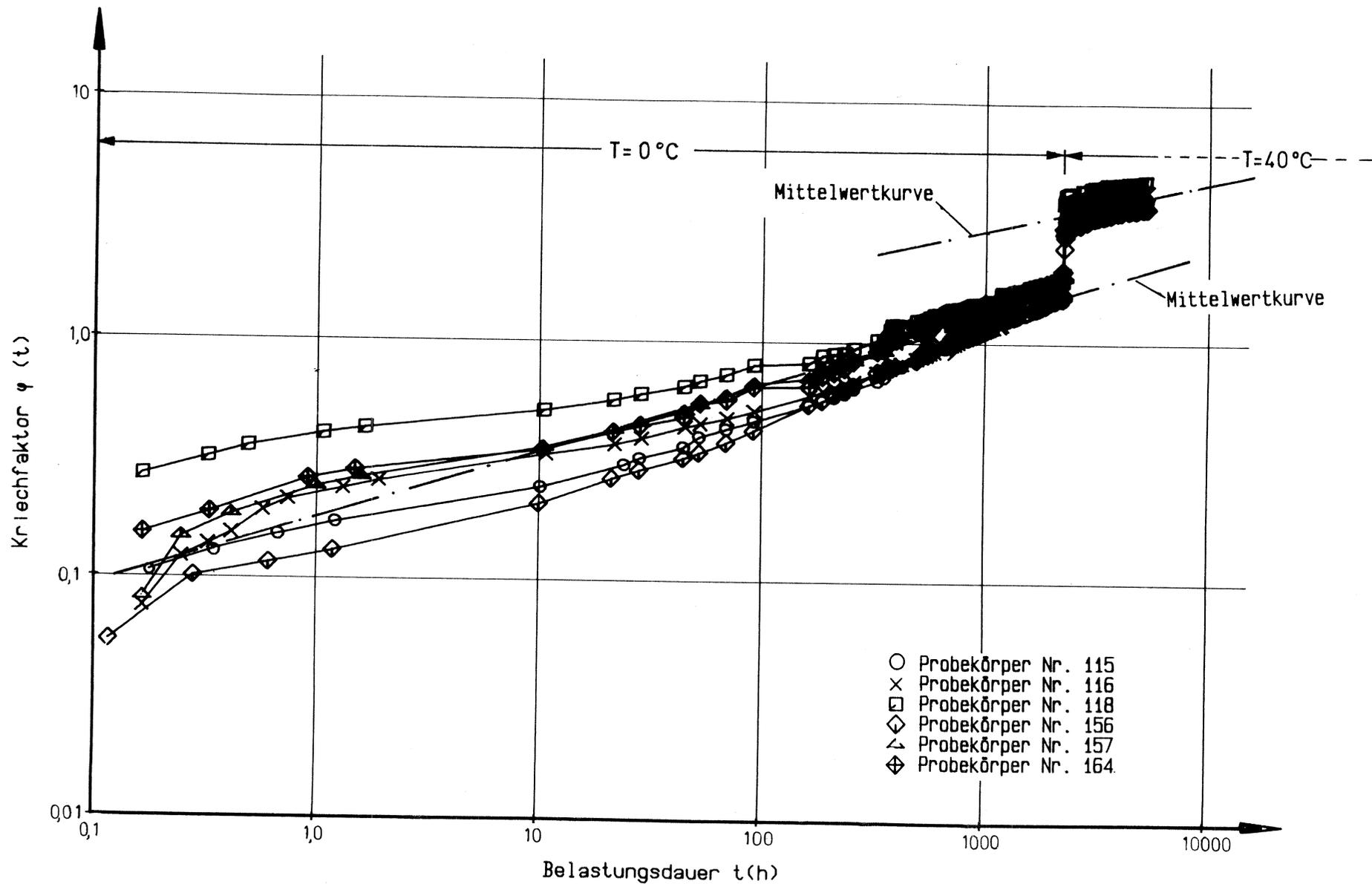


Bild 121 b :  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr 128, 130, 1142, 144, 149, 151  
und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung Hersteller 3



**Bild 122:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 99, 114, 139, 154; 10% der Kurzzeitbruchlast, Belastung in der Klimakammer ( $T = 0^\circ\text{C}$ ;  $40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



**Bild 123:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 115, 116, 118, 156, 157, 164; 30% der Kurzzeitbruchlast Belastung in der Klimakammer ( $T = 0^\circ\text{C}; 40^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche

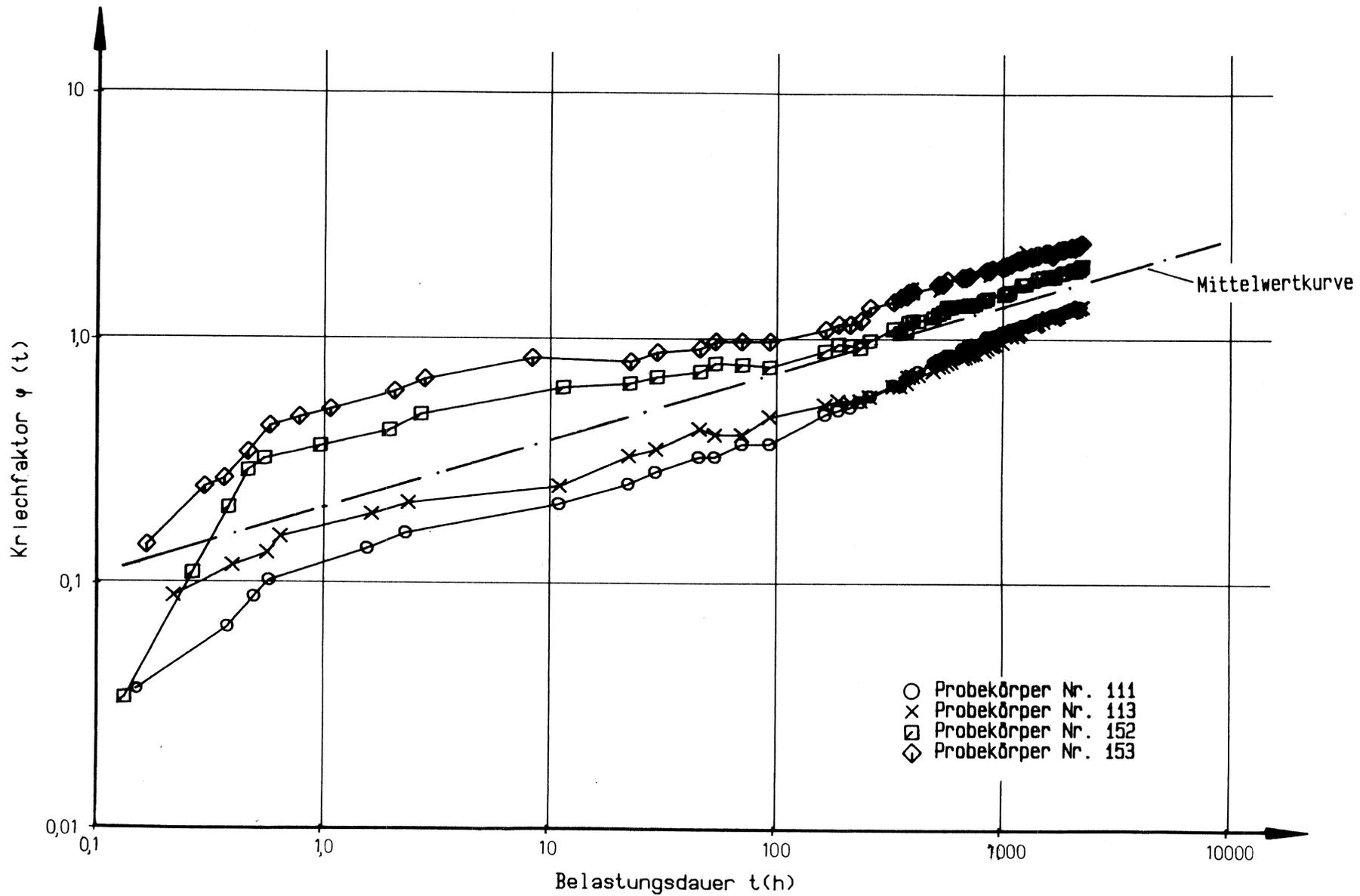


Bild 124:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 111, 113, 152, 153; 10% der Kurzzeitschubbruchlast Belastung in der Klimakammer ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche

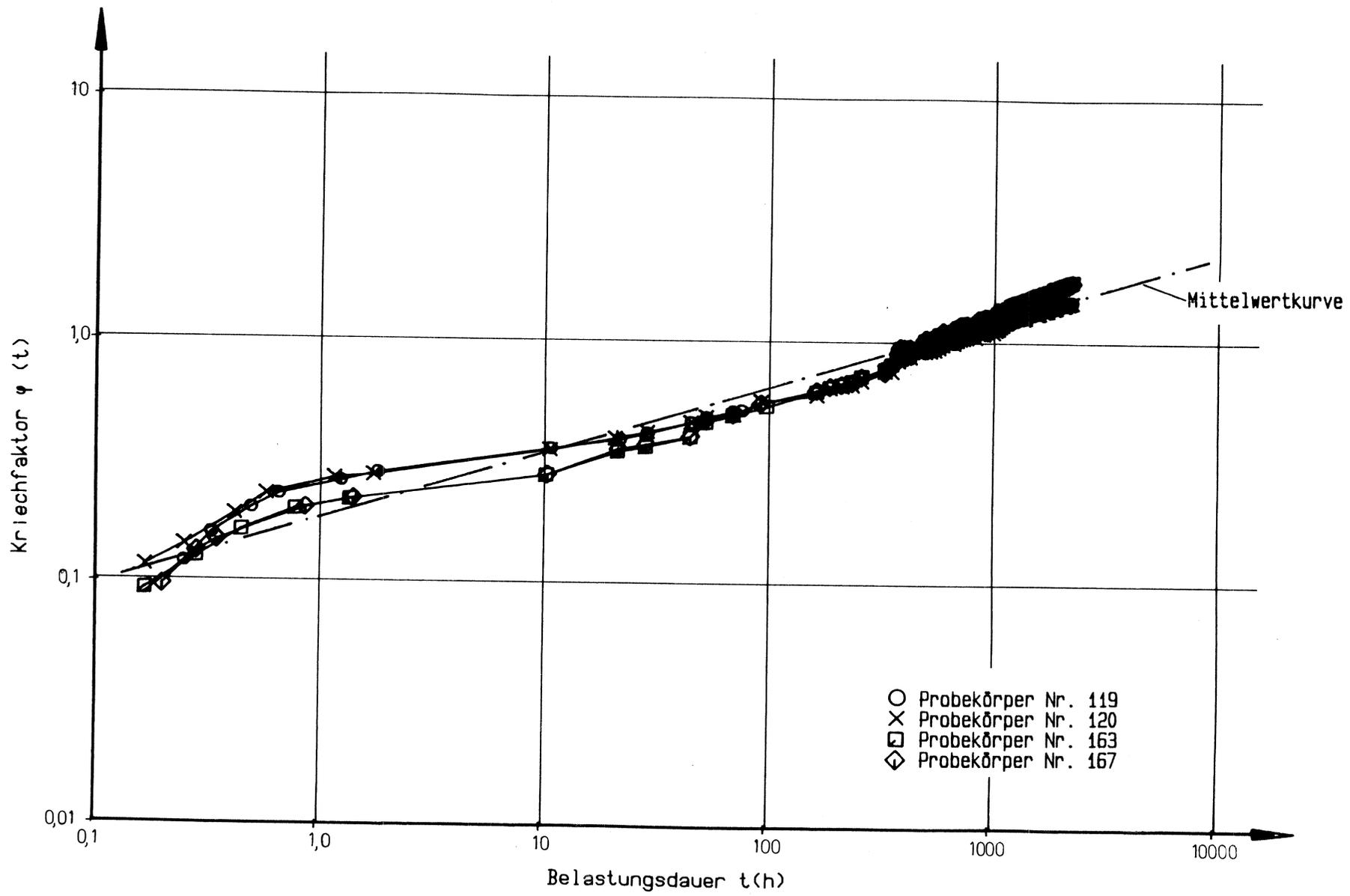
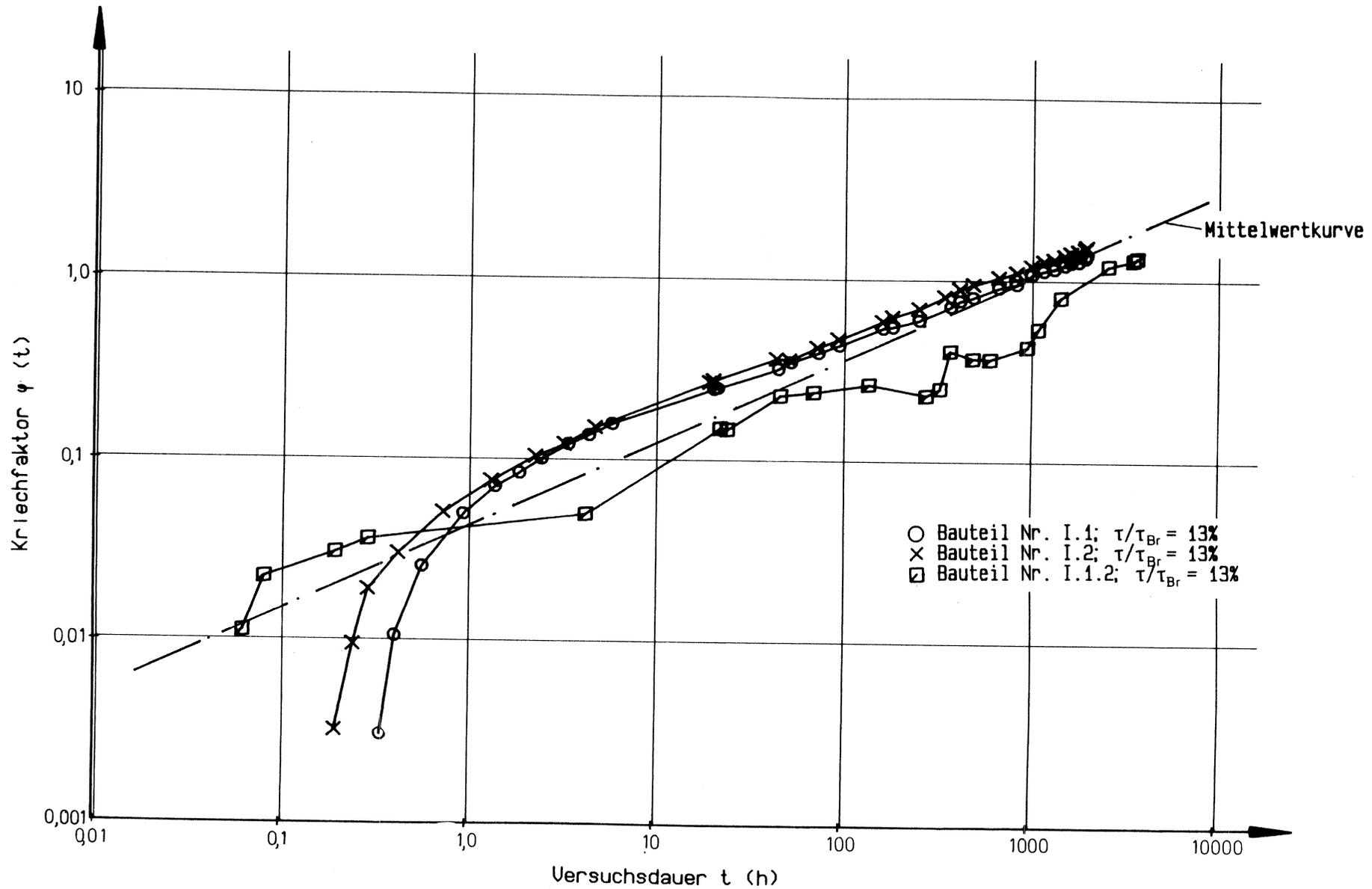
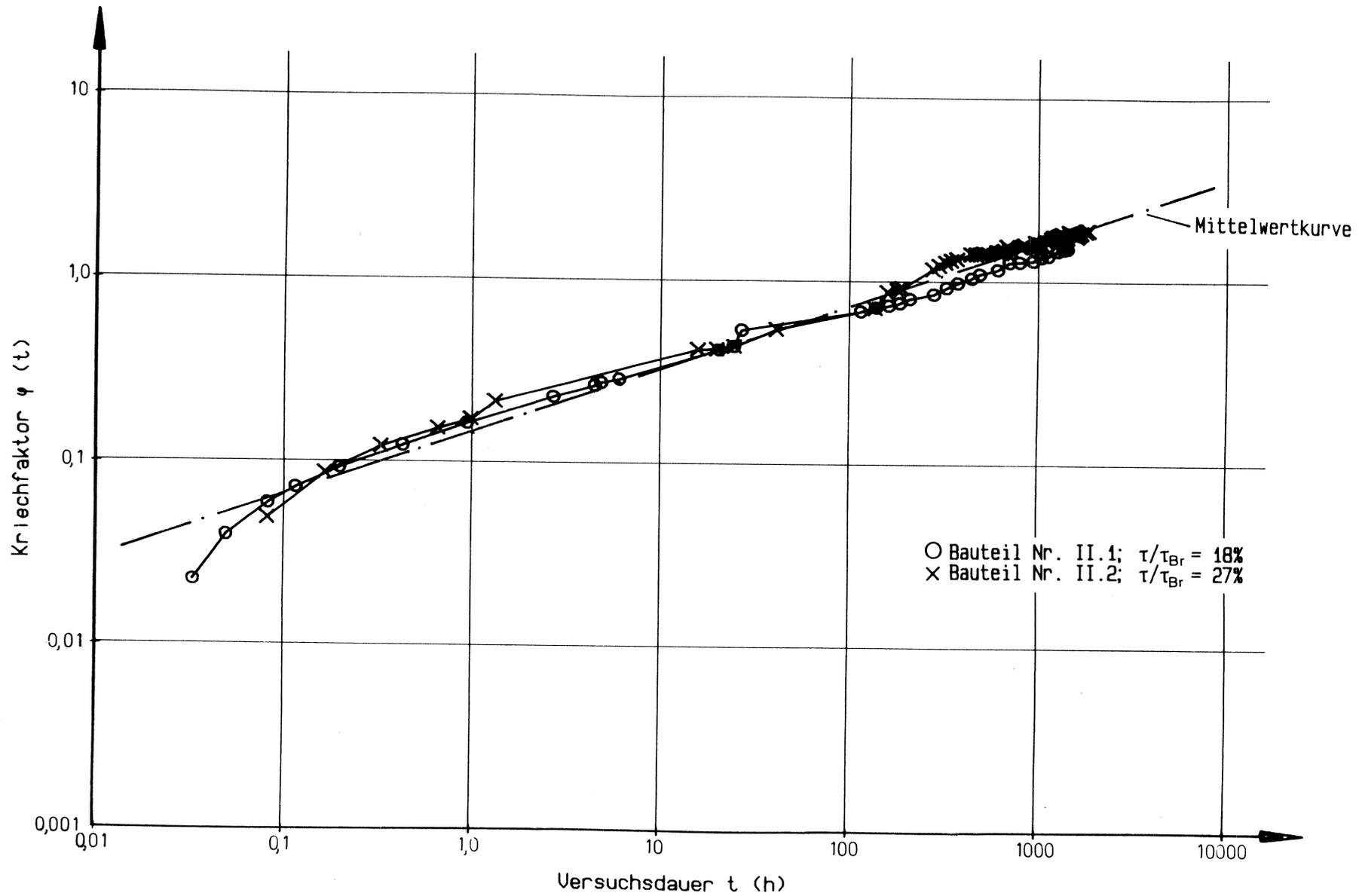


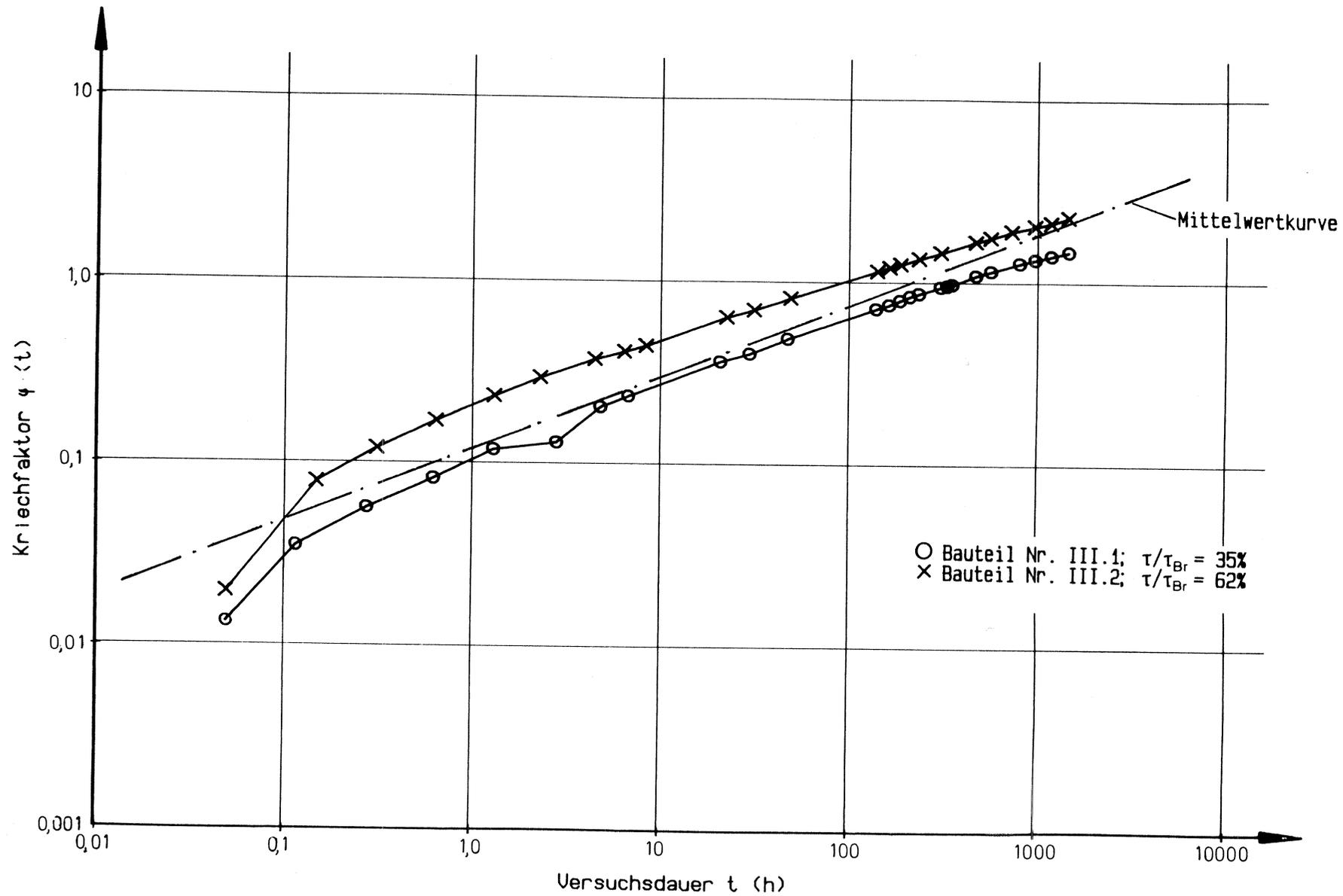
Bild 125:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 119, 120, 163, 167; 30% der Kurzzeitbruchlast Belastung in der Klimakammer ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) Darmstädter Versuche



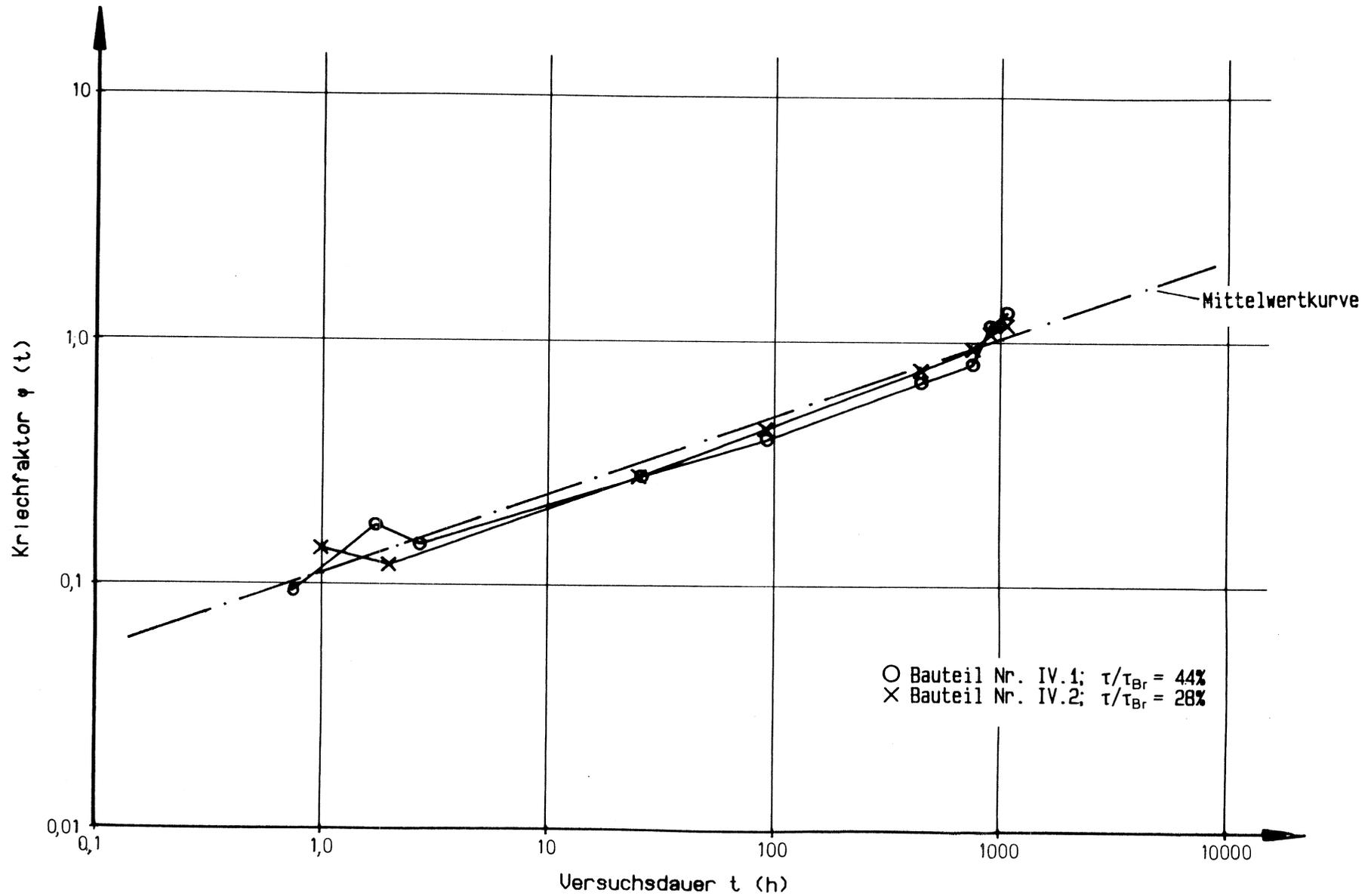
**Bild 126:**  $\psi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. I.1, I.2, I.1.2 und zugehörige Mittelwertfunktion.



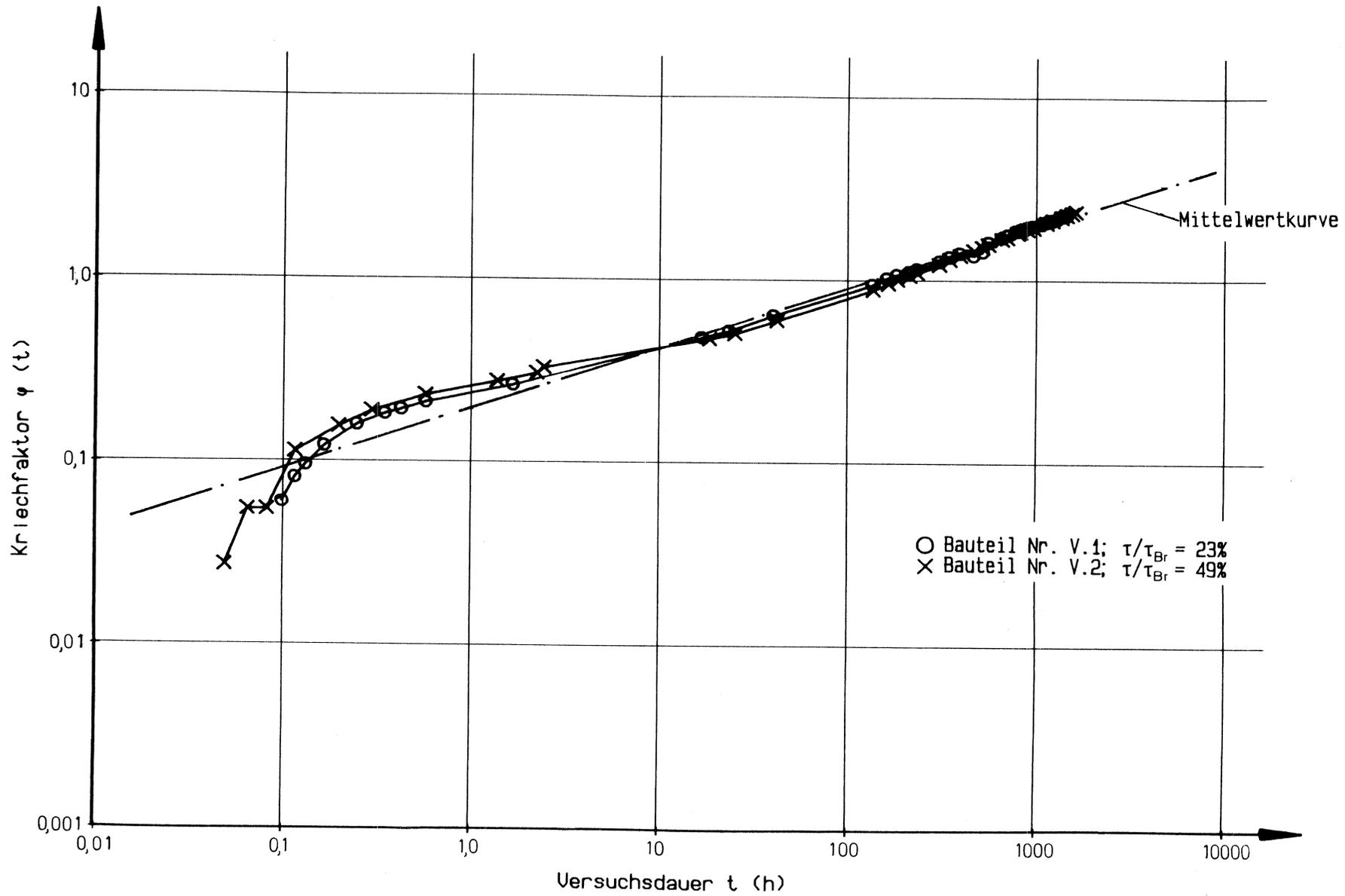
**Bild 127:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. II.1, II.2, I.1.2 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung



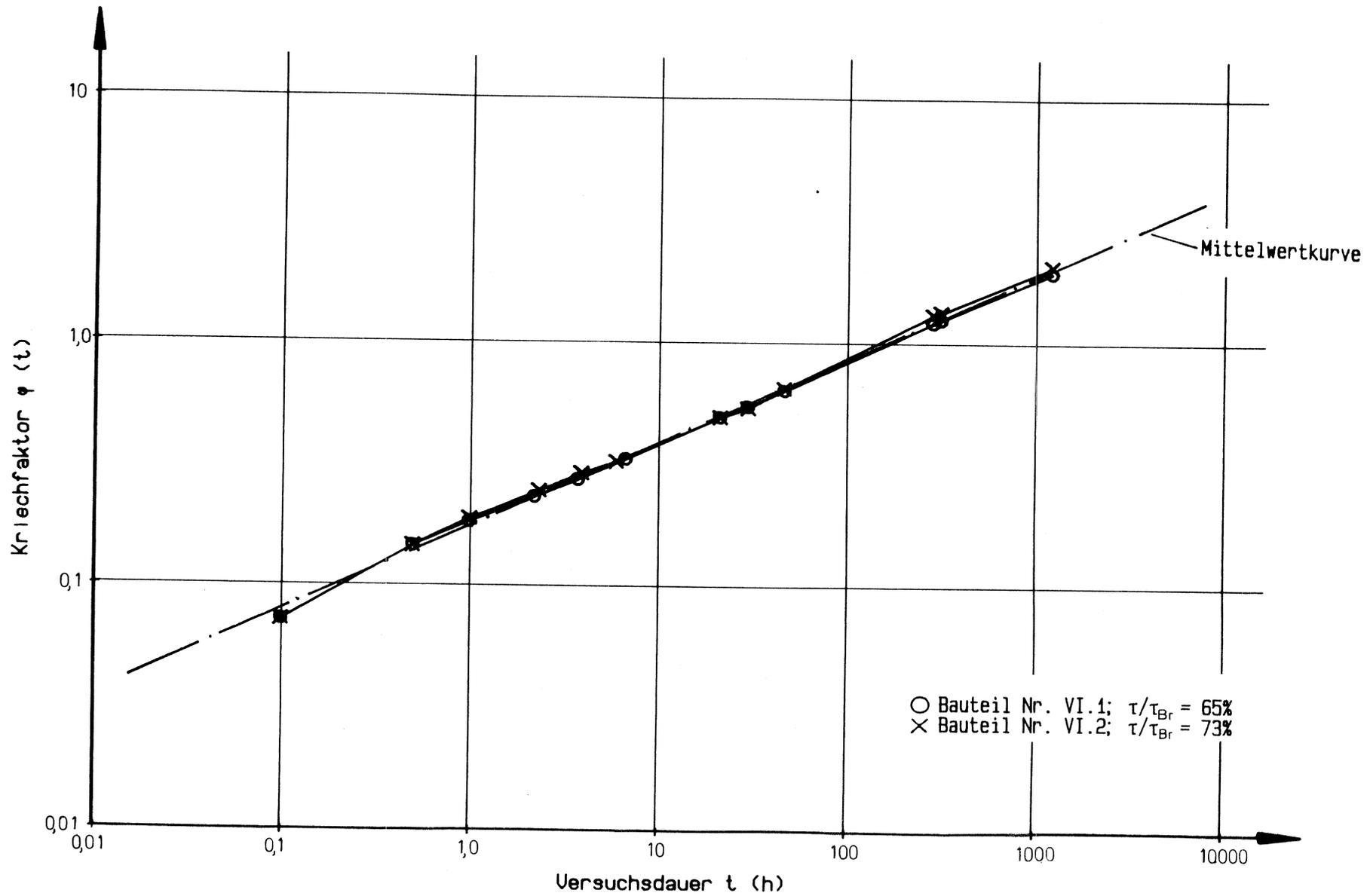
**Bild 128:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. III.1, III.2 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung,



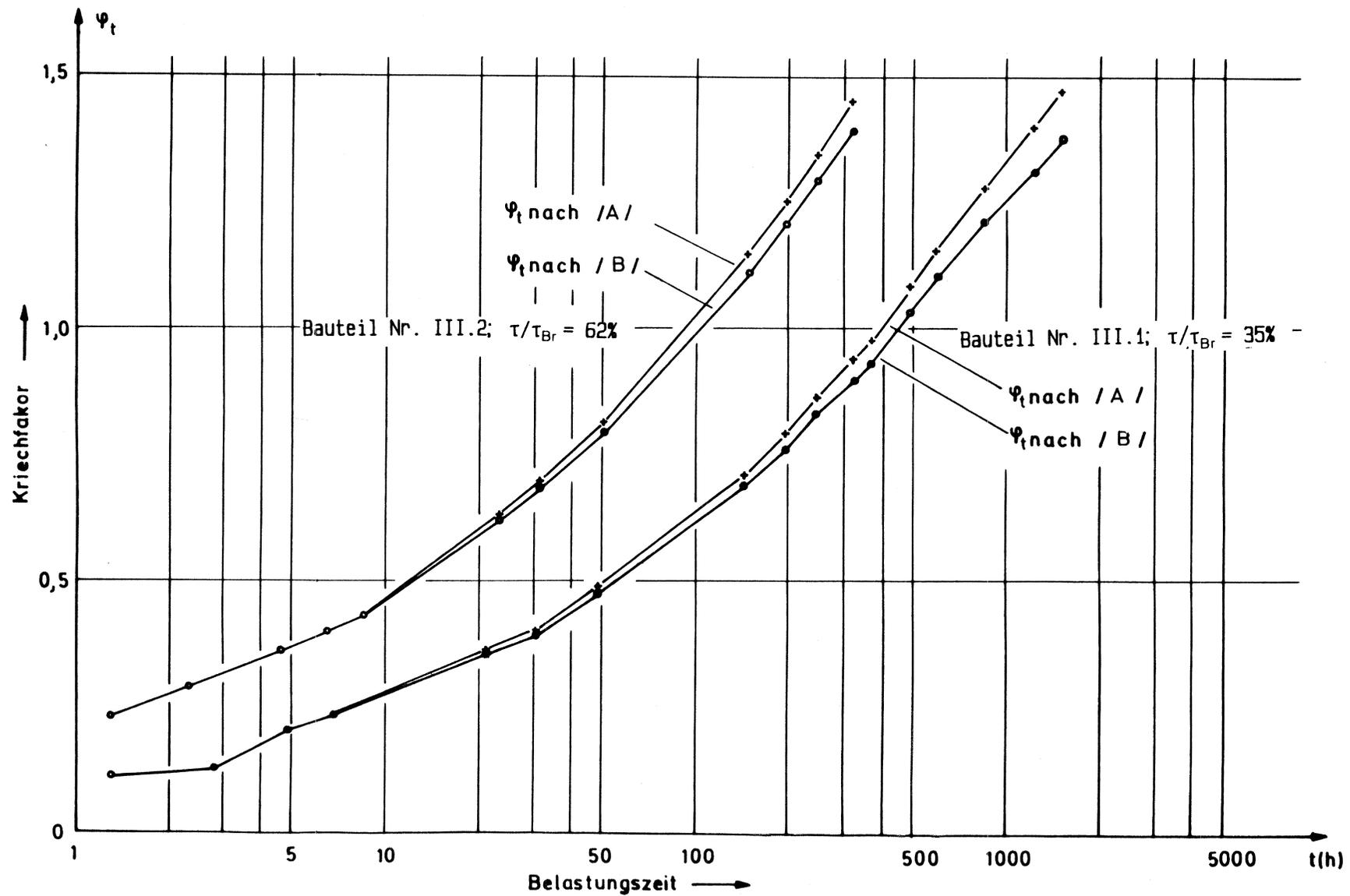
**Bild 129:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. IV.1, IV.2 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung



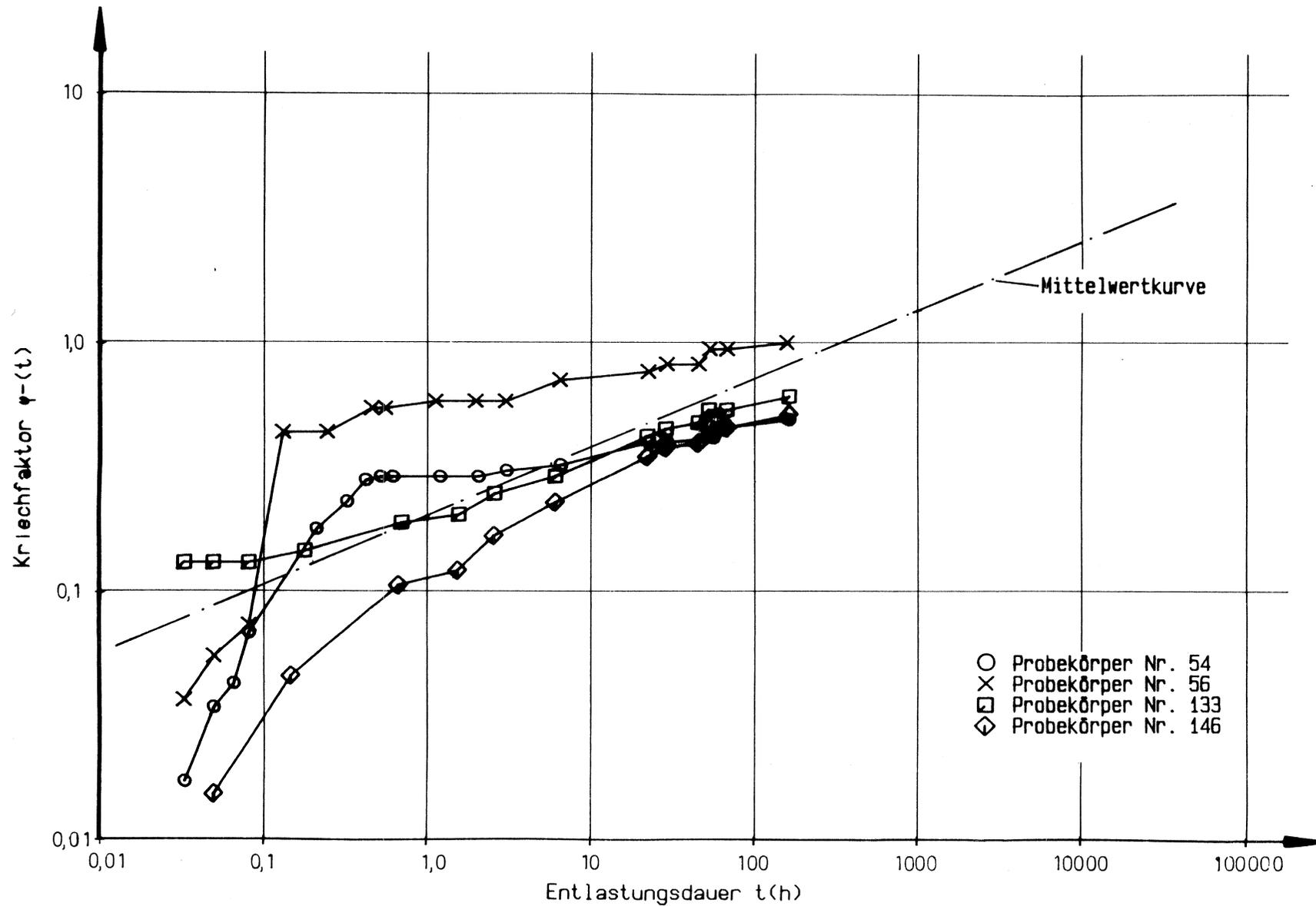
**Bild 130:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. V.1, V.2 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung



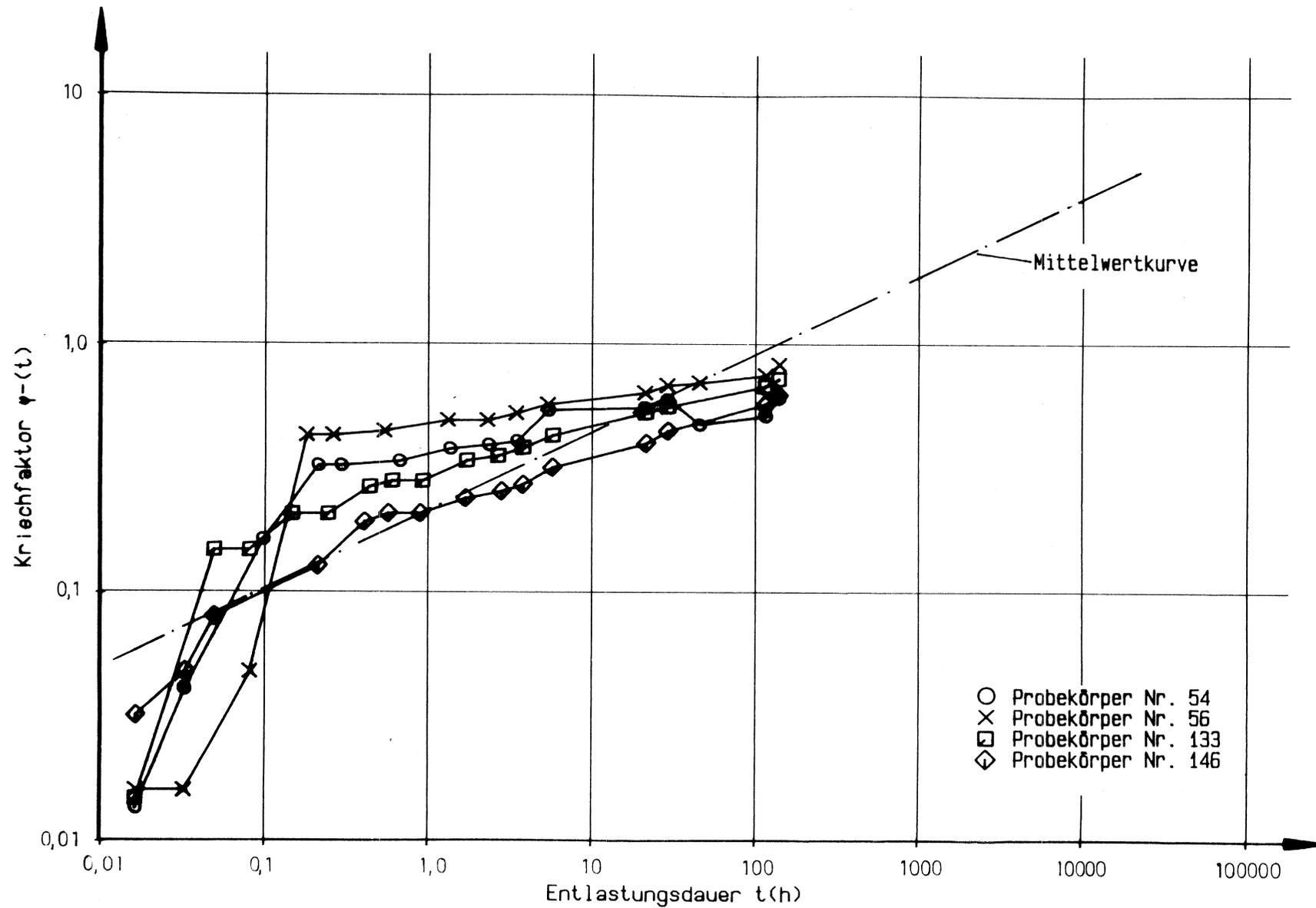
**Bild 131:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Bauteilversuche Nr. VI.1, VI.2 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Belastung



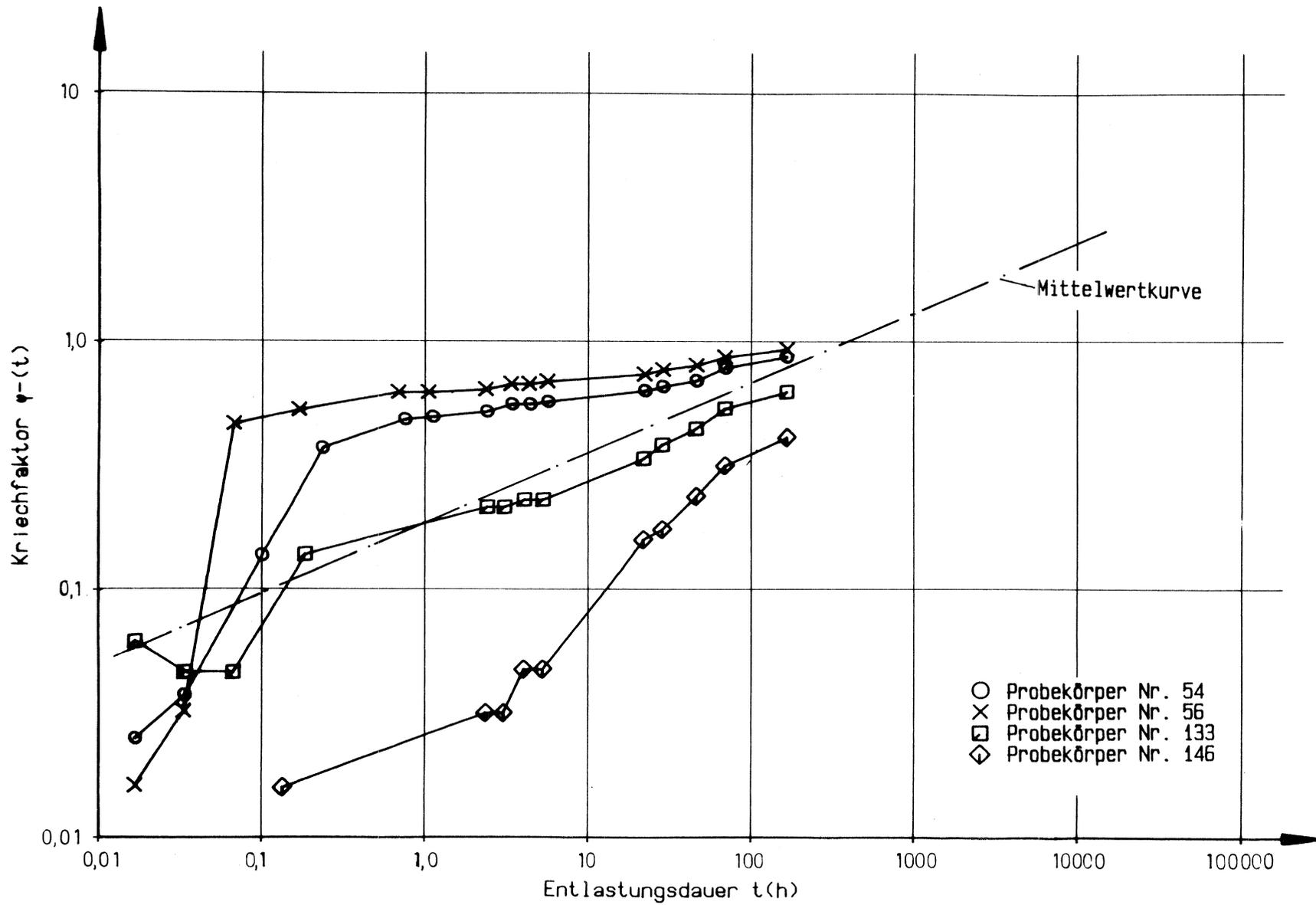
**Bild 132:** Vergleich von berechneten Kriechlinien für Bauteile mit stark profilierter Deckschicht  
 A berechnet nach der Sandwichtheorie (/6/)  
 B berechnet nach dem Verfahren von Wölfel (/15, 16/)



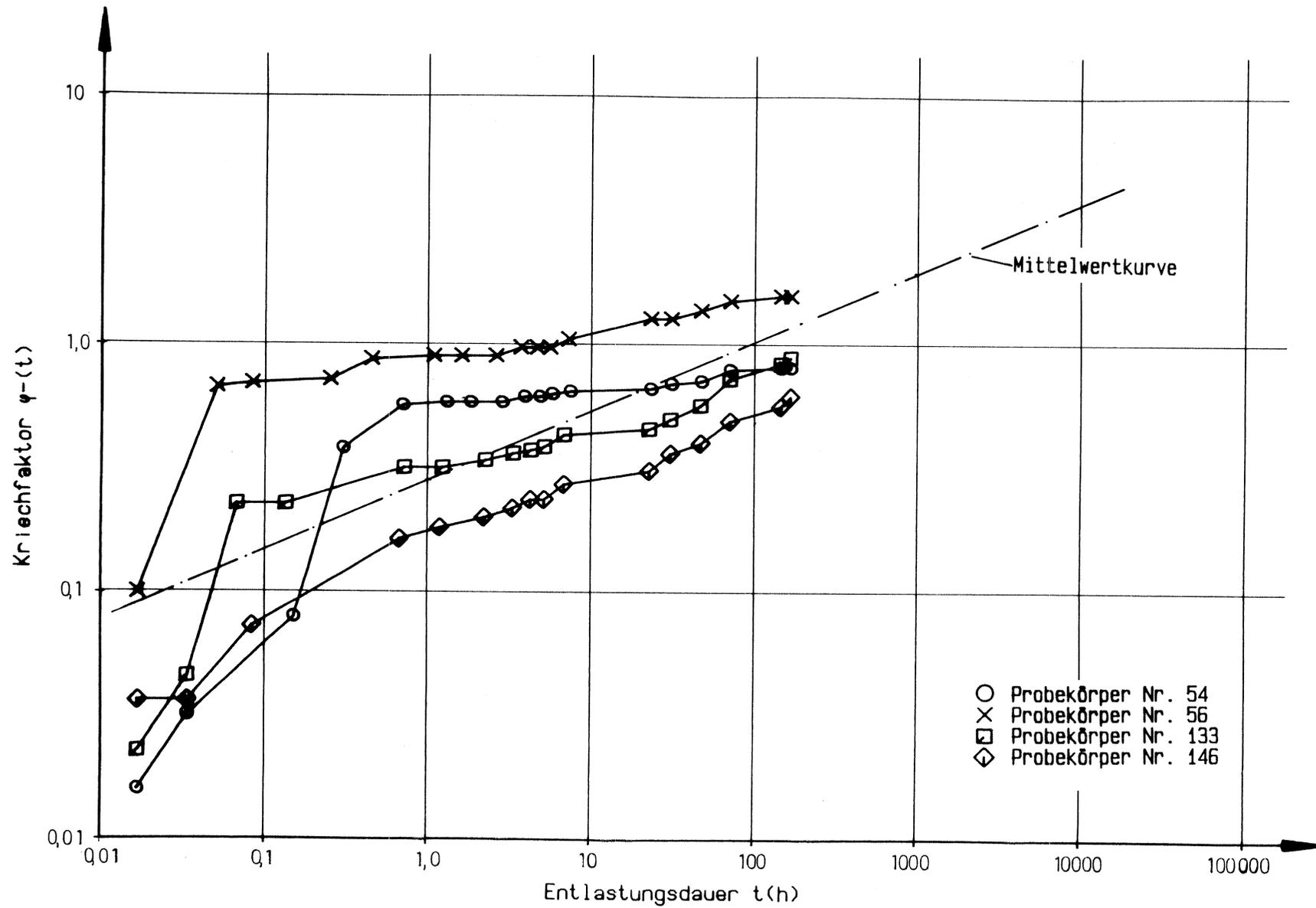
**Bild 133:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



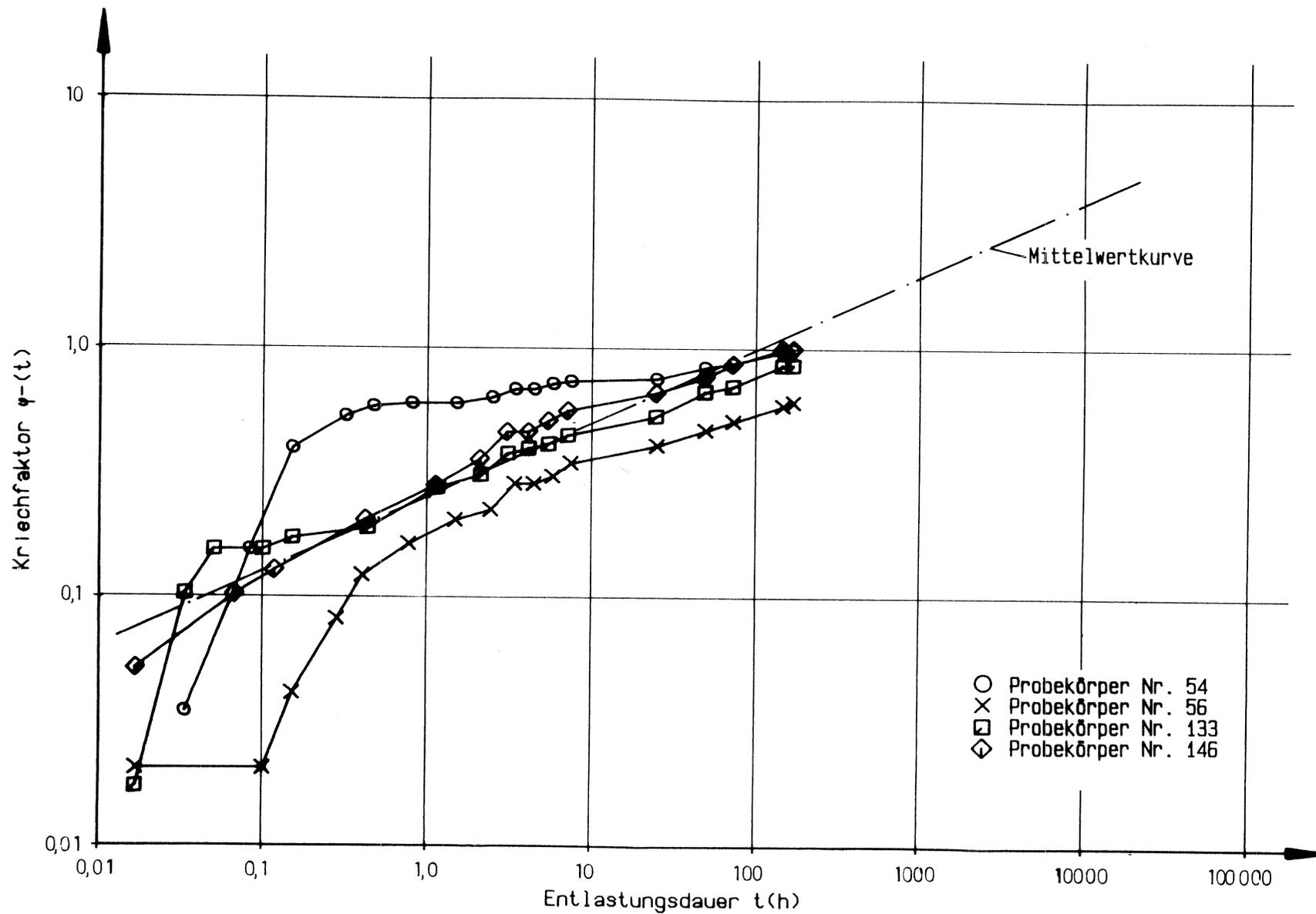
**Bild 134:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



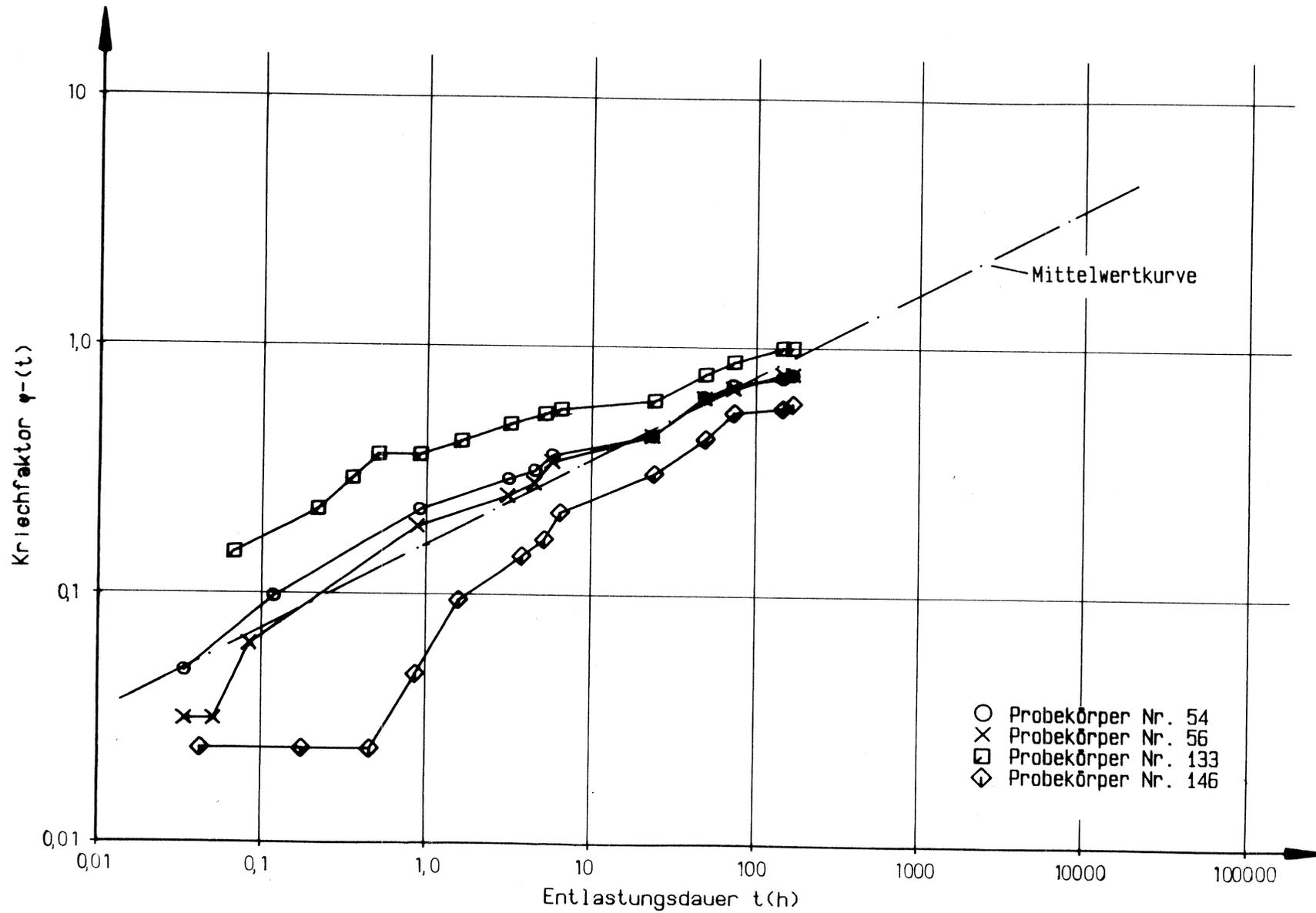
**Bild 135:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 136:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 137:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 138:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast

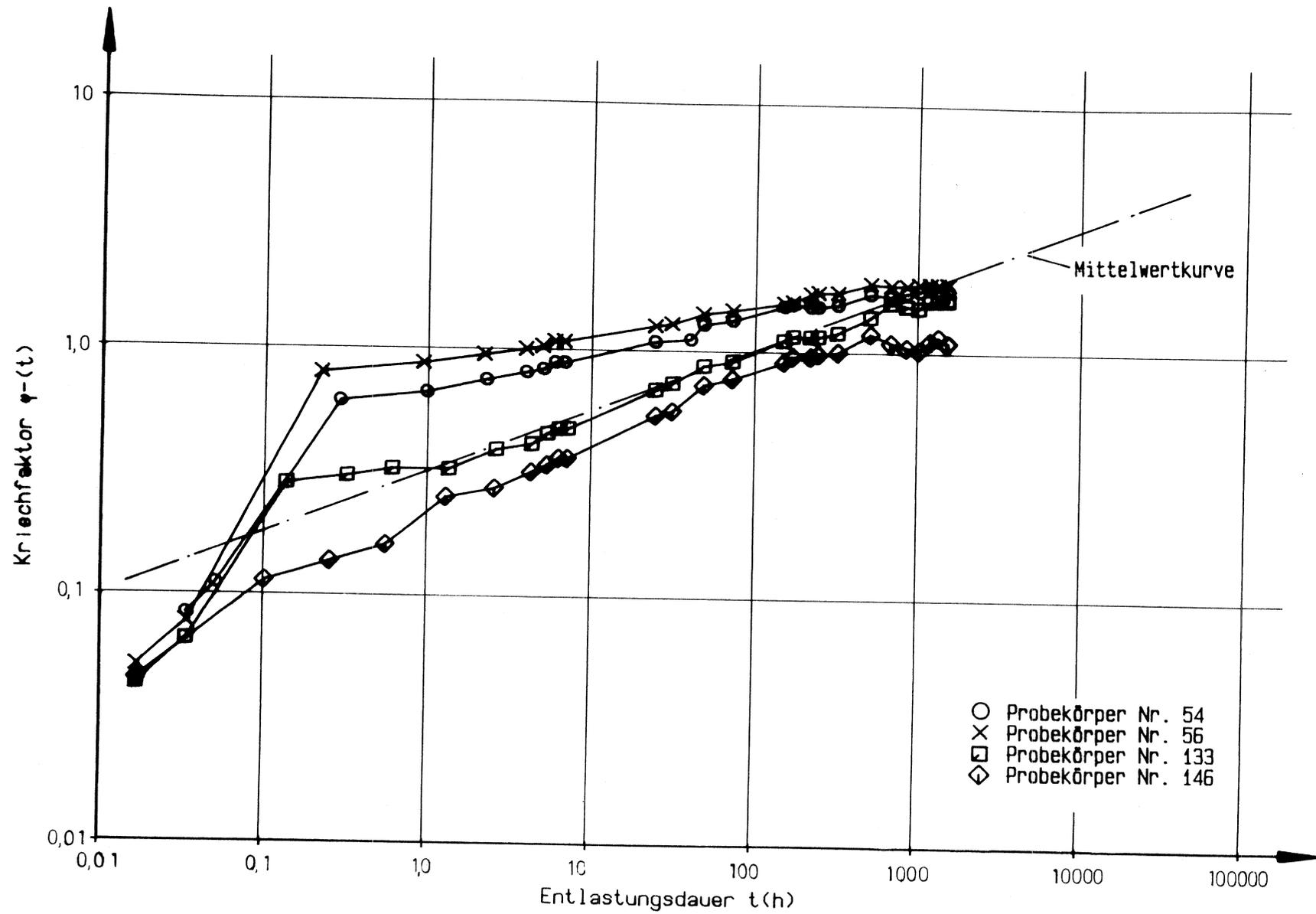
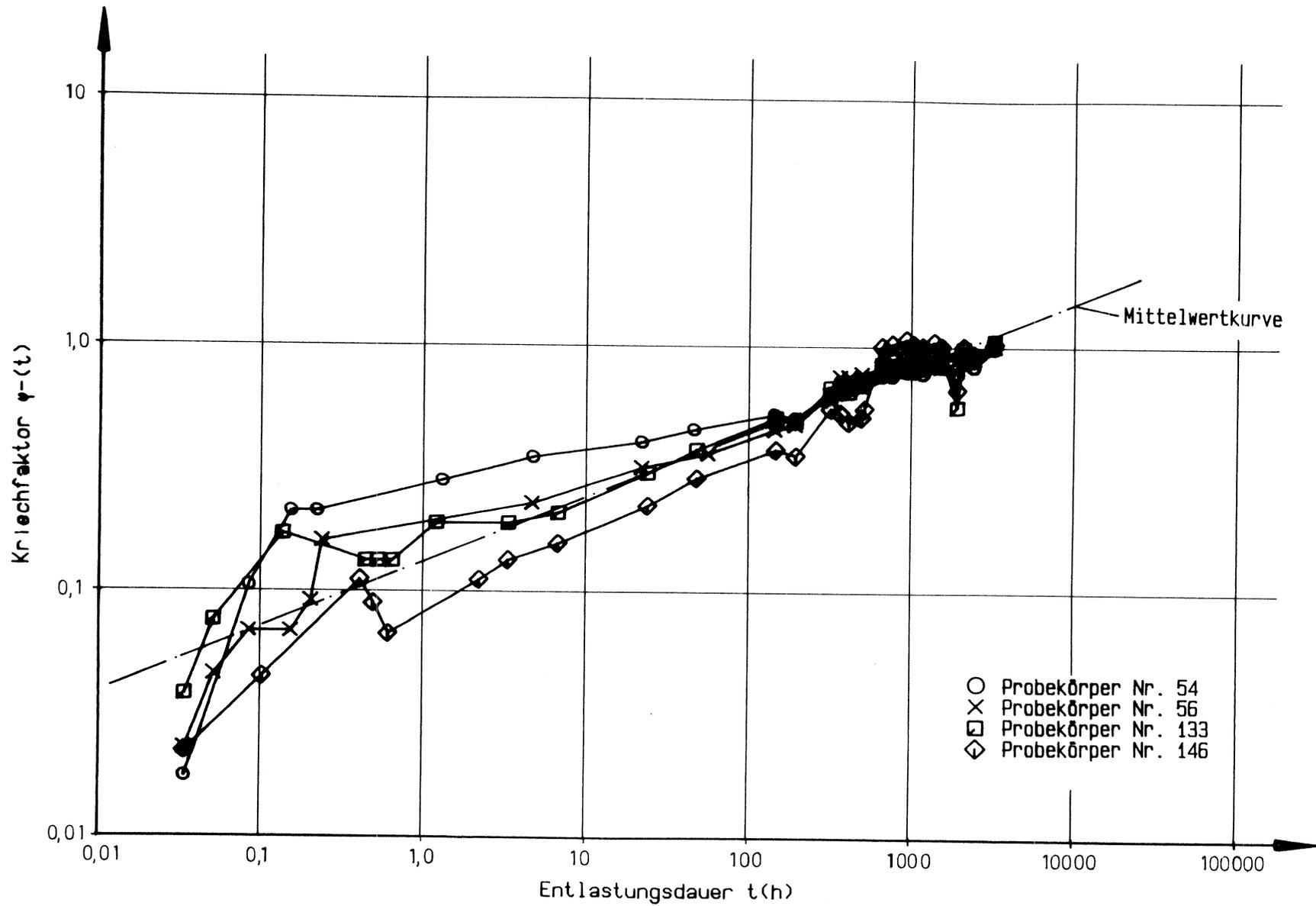
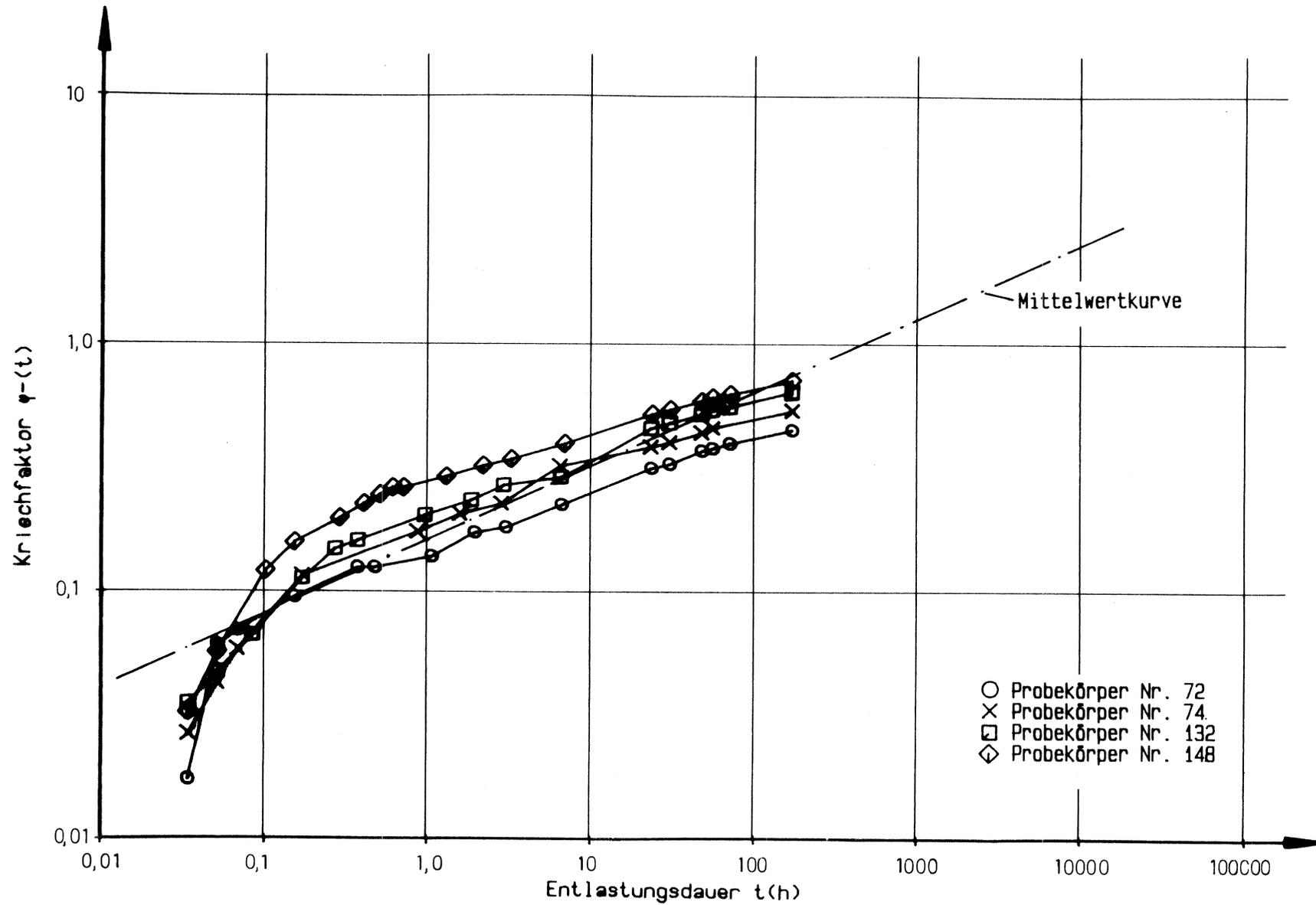


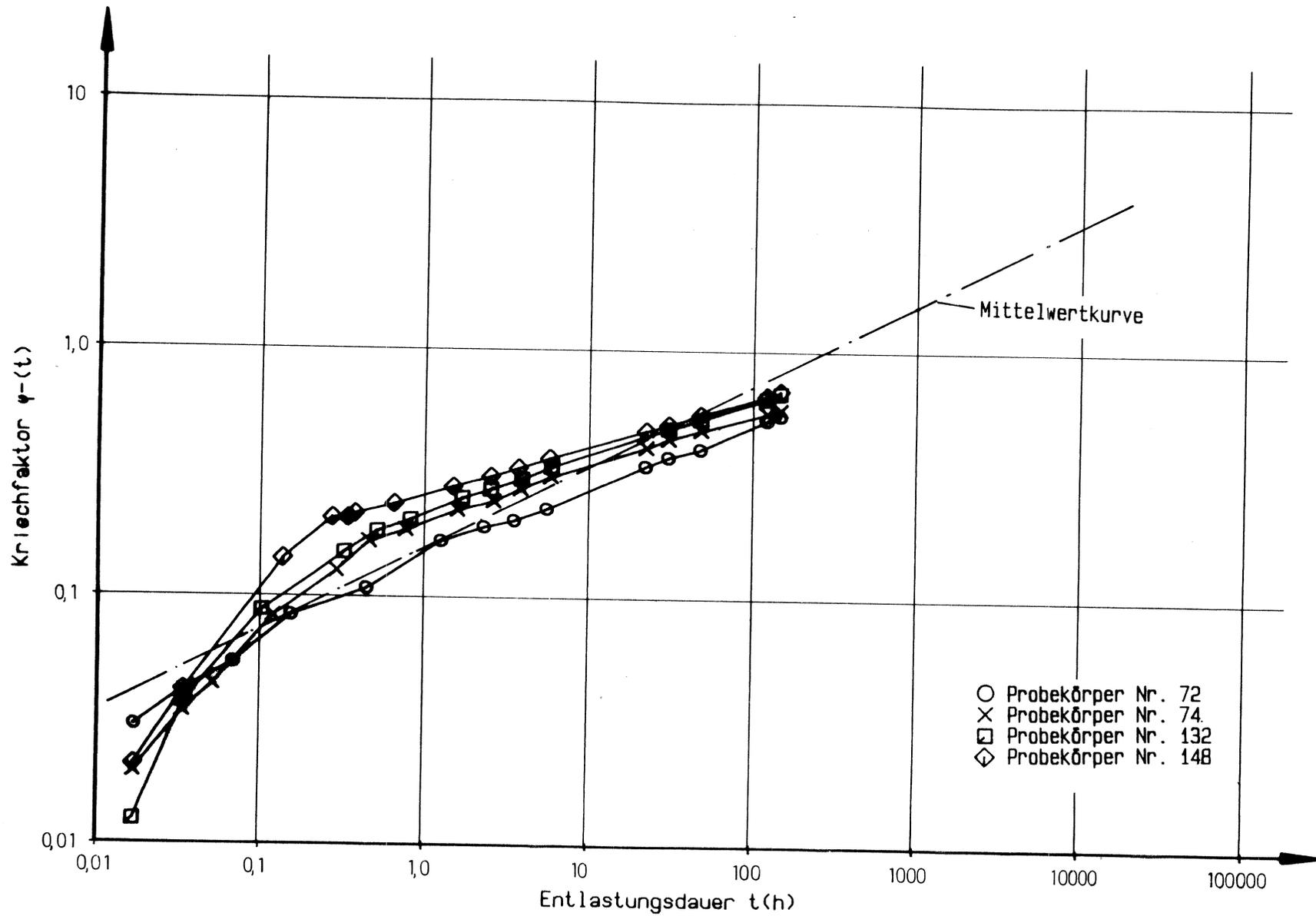
Bild 139:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 7. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



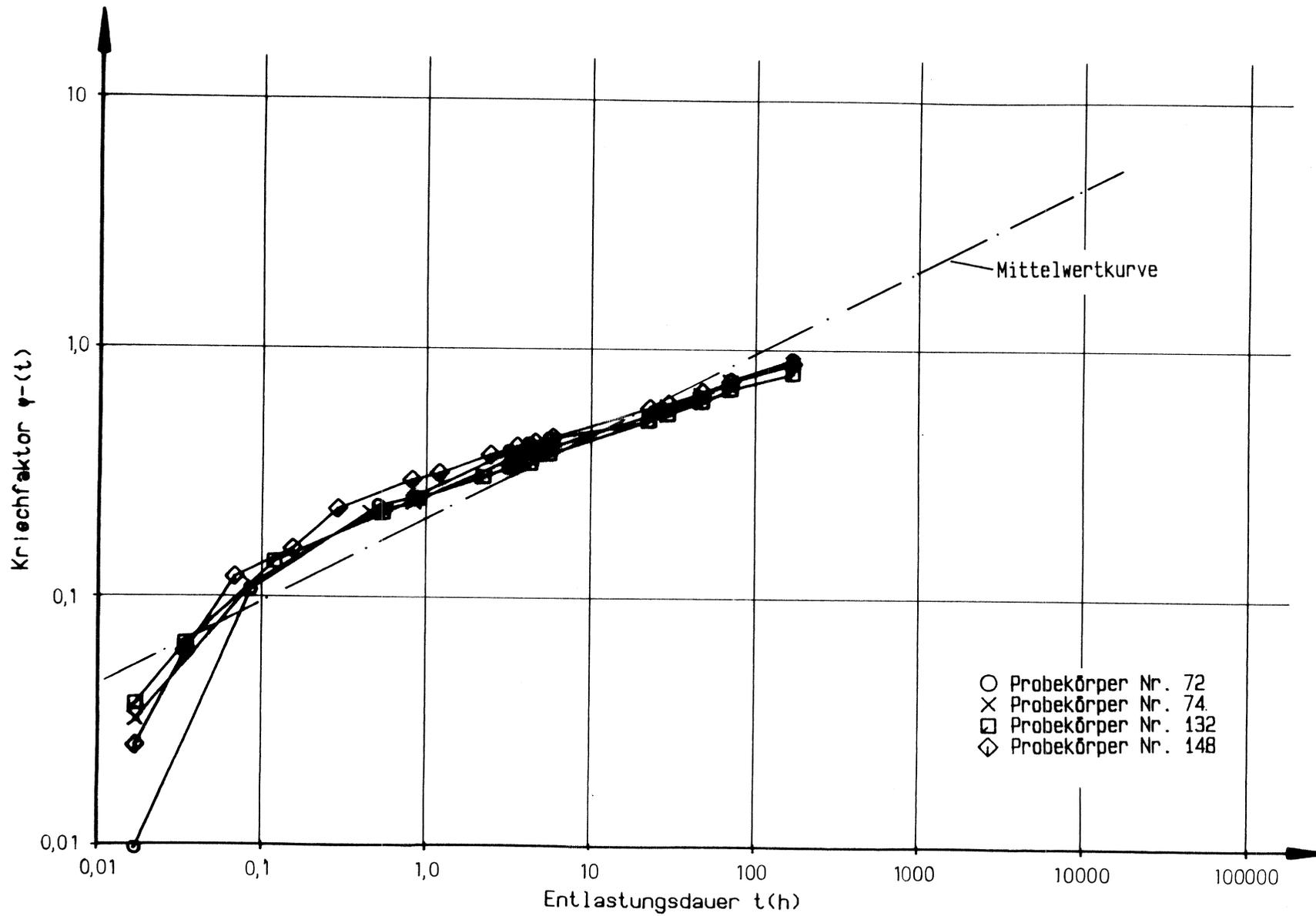
**Bild 140:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 54, 56, 133, 146 und zugehörige Mittelwertfunktion, 8. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



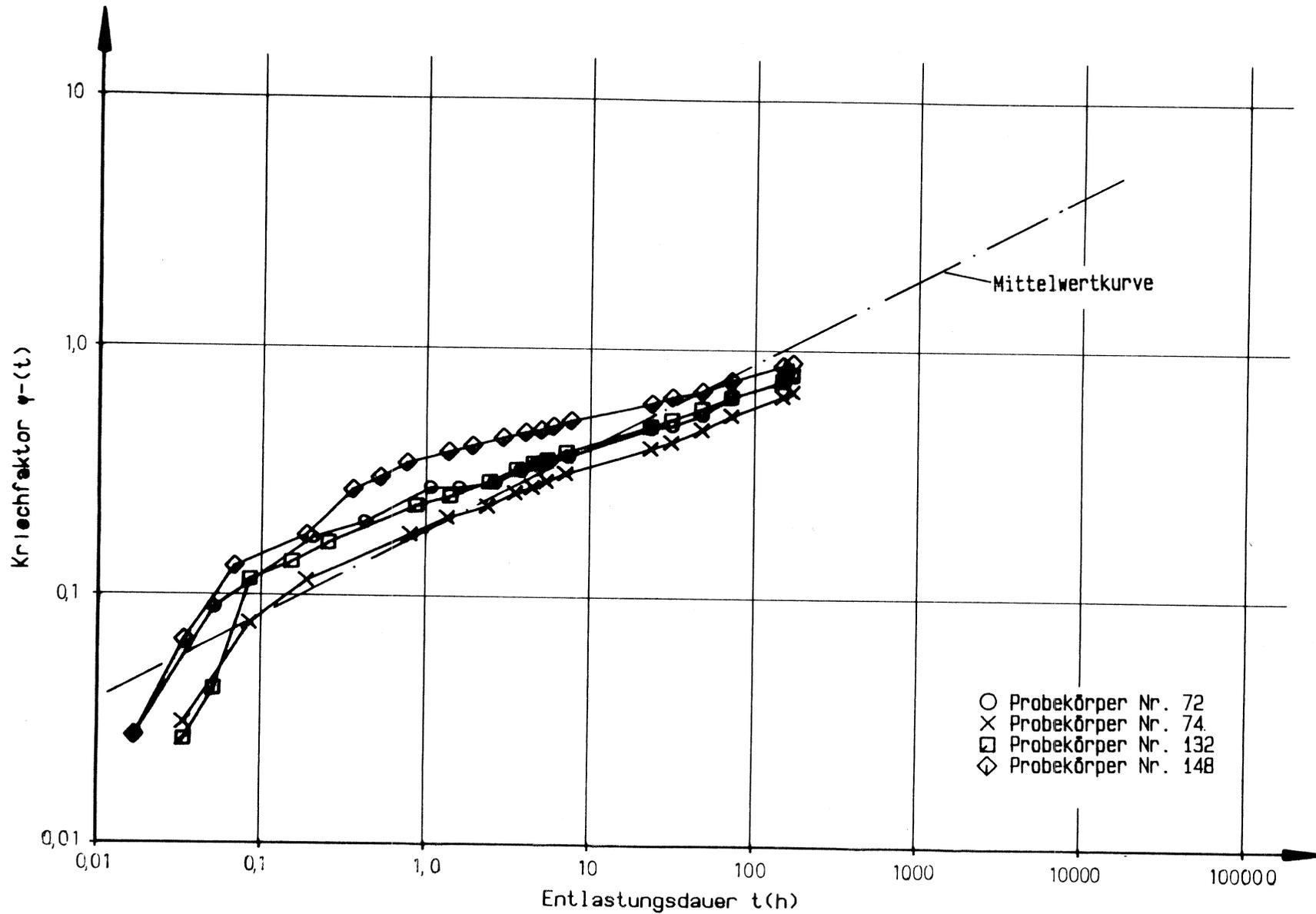
**Bild 141:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



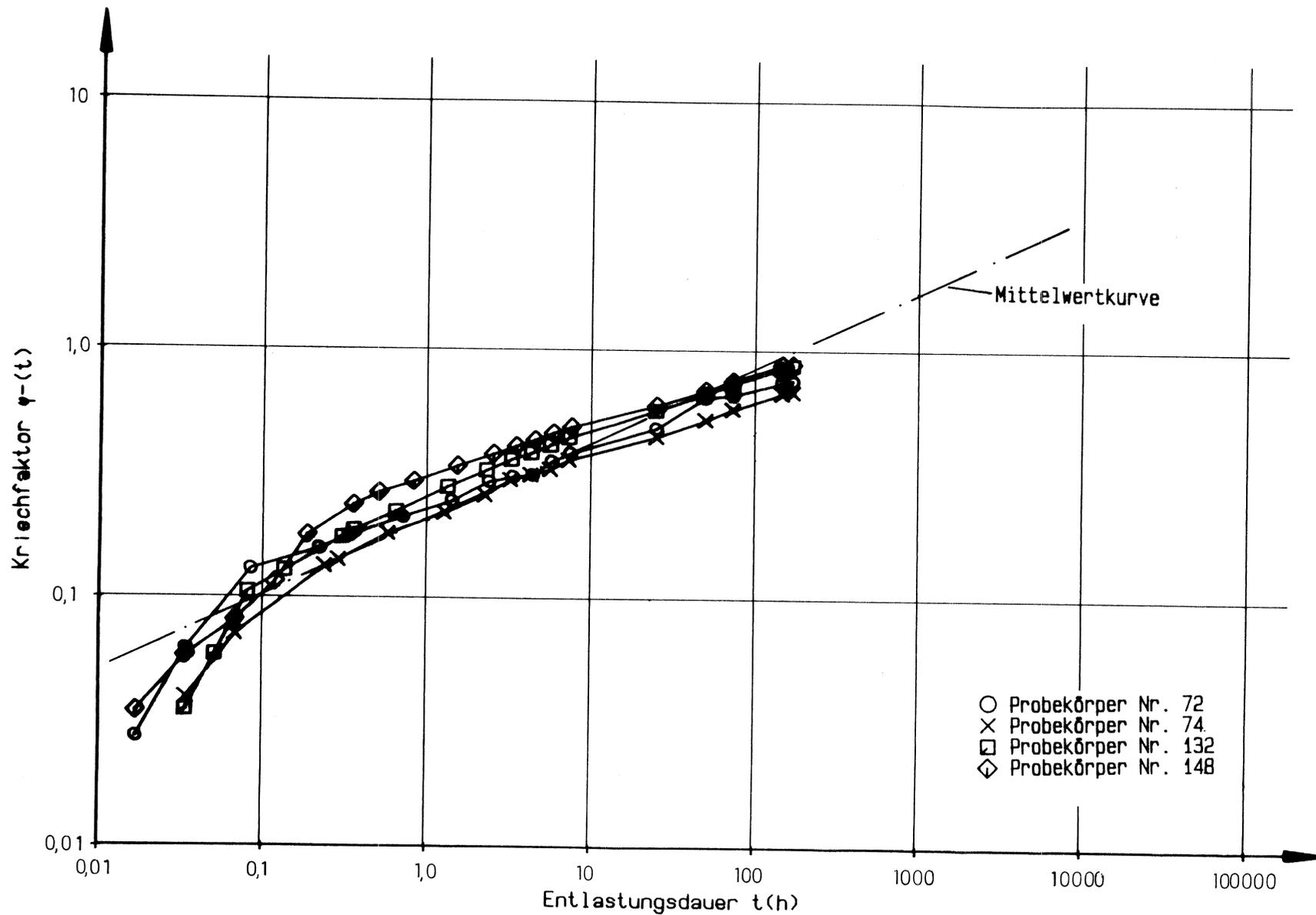
**Bild 142:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



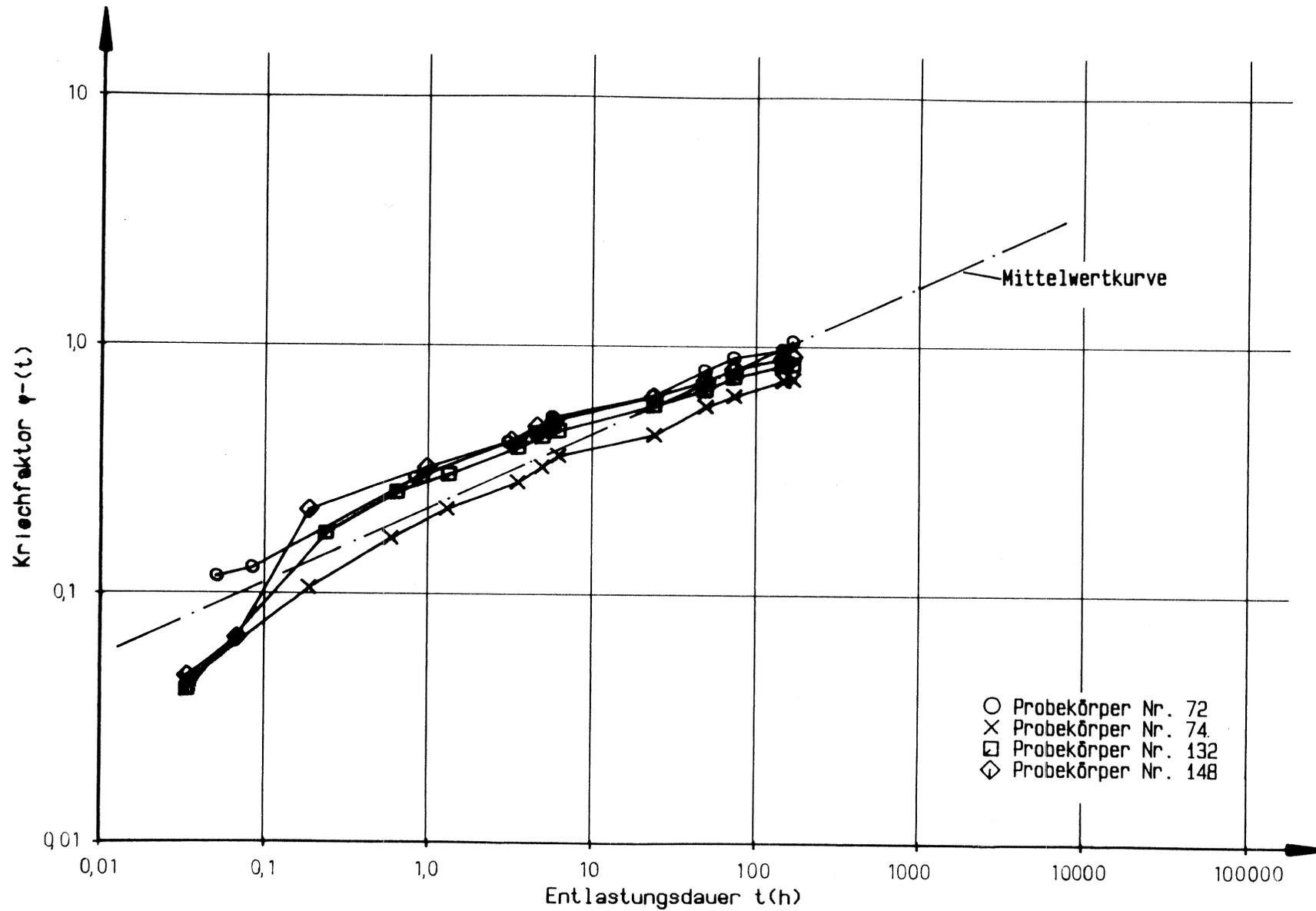
**Bild 143:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



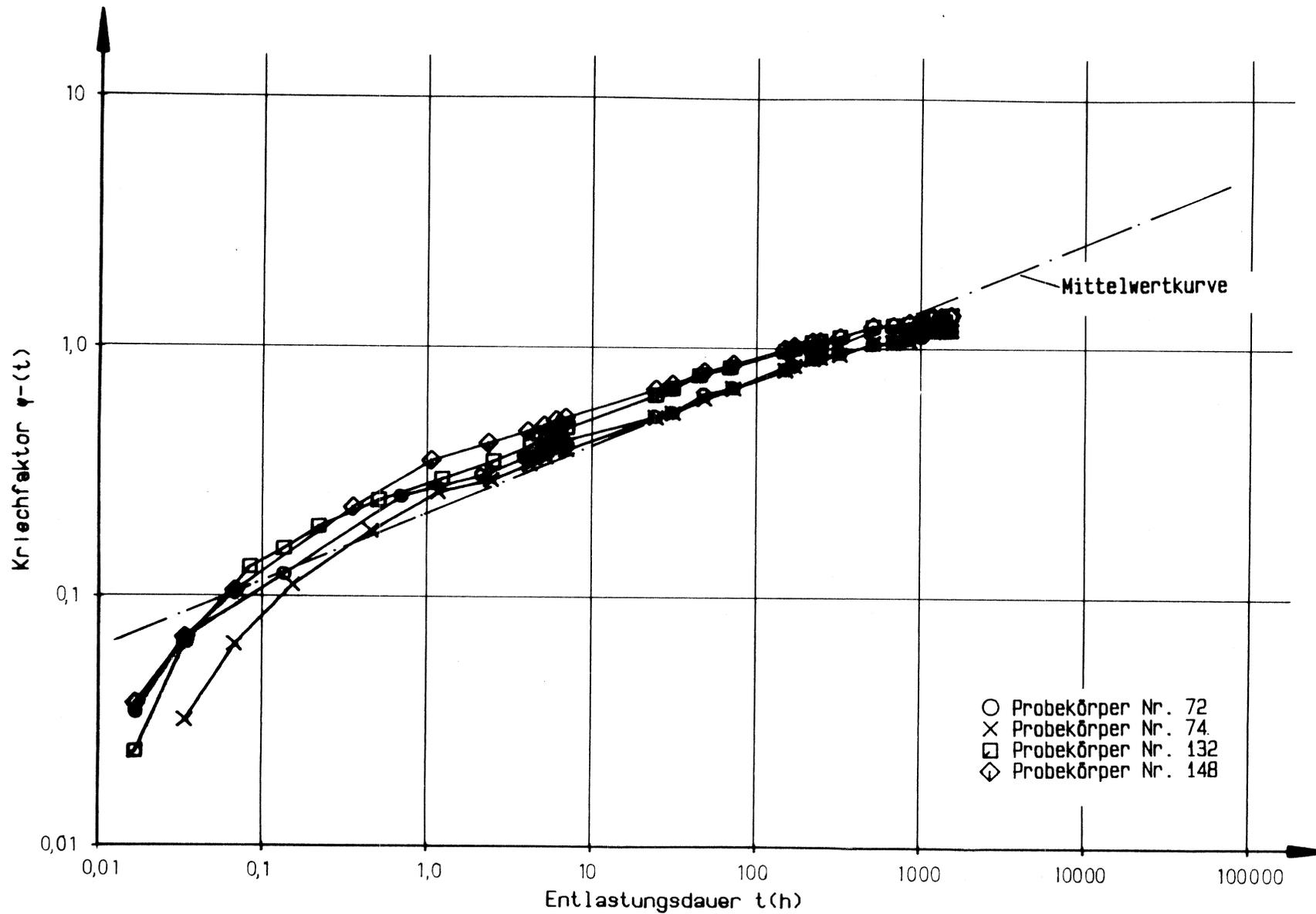
**Bild 144:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



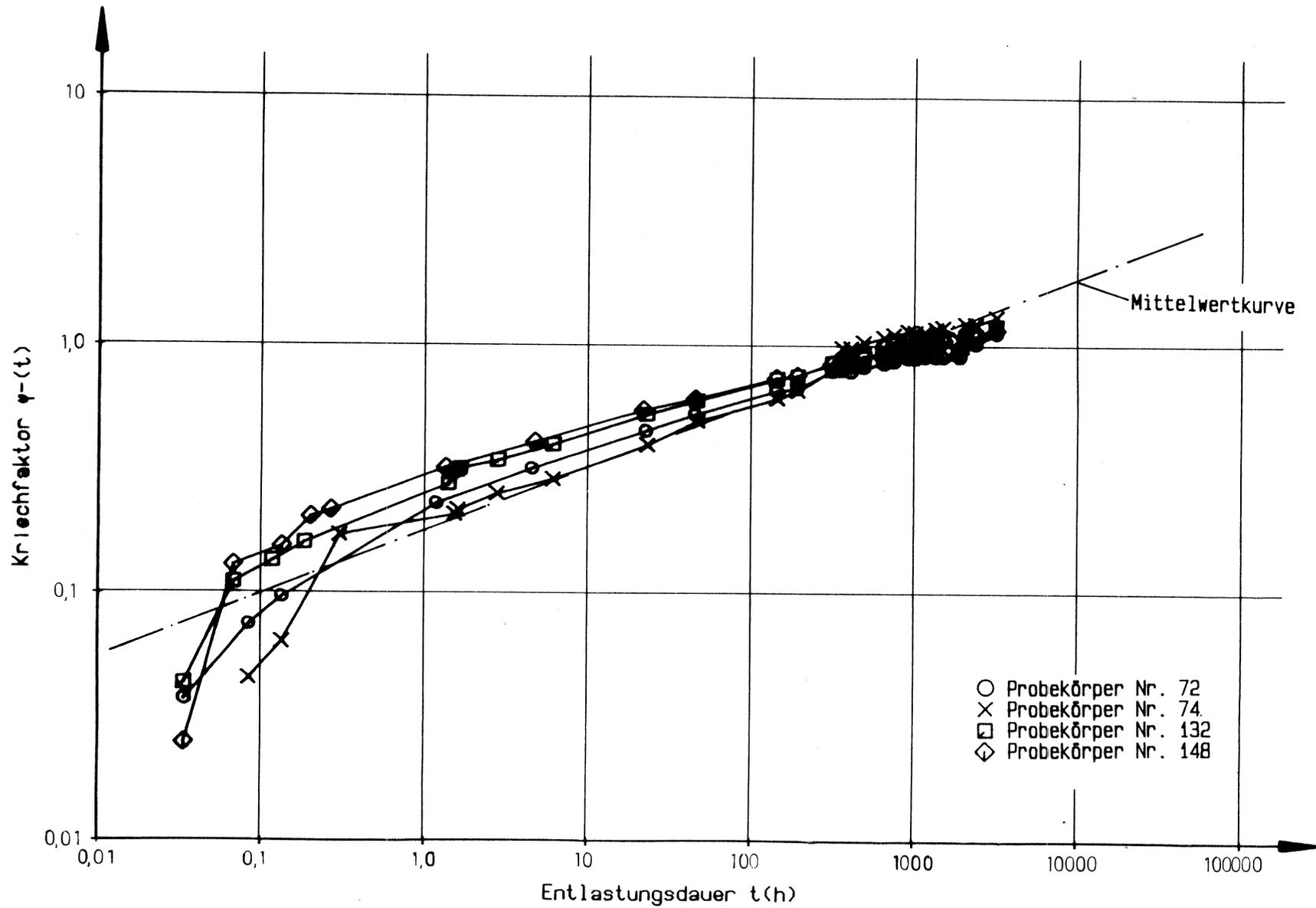
**Bild 145:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



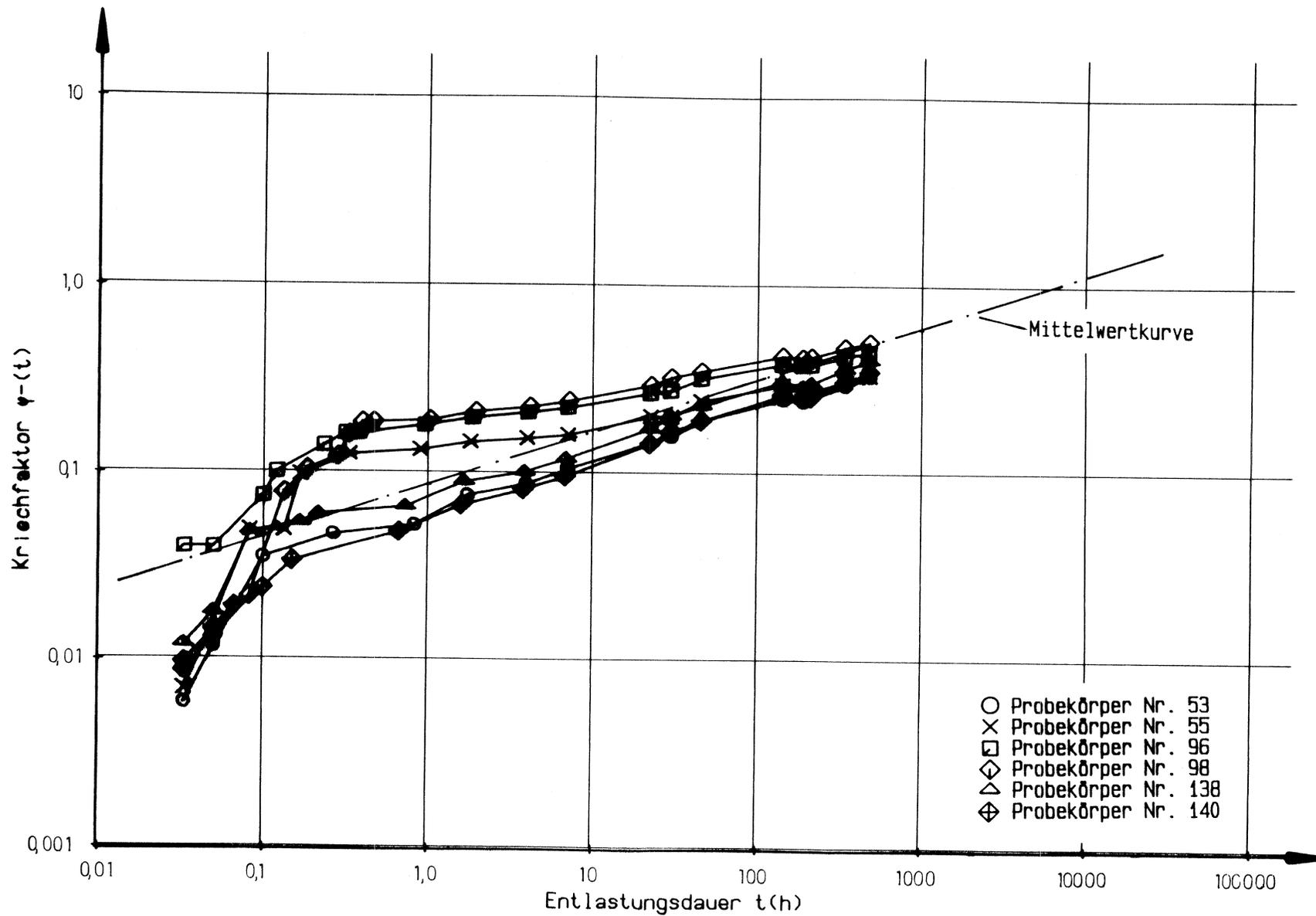
**Bild 146:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



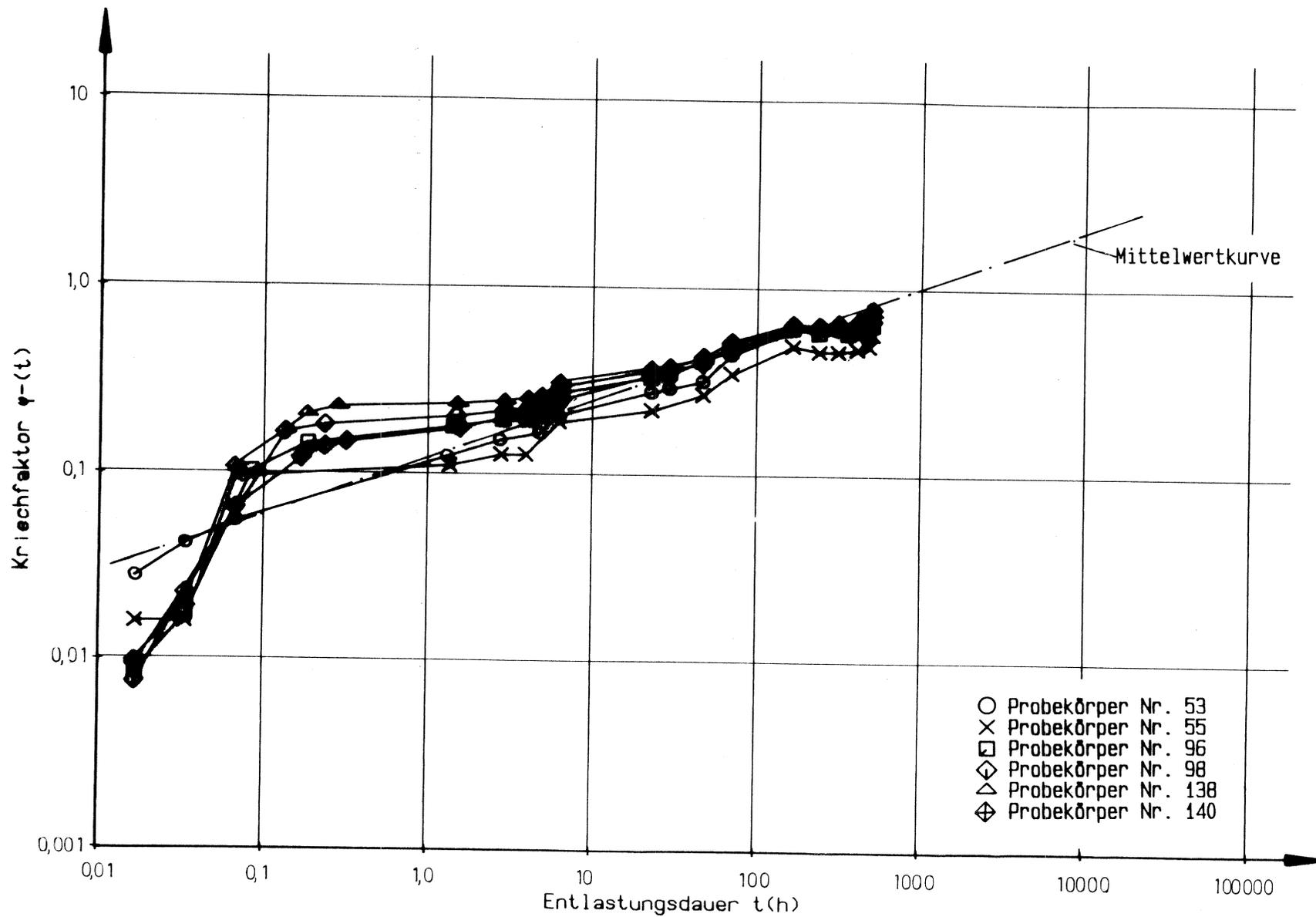
**Bild 147:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 7. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



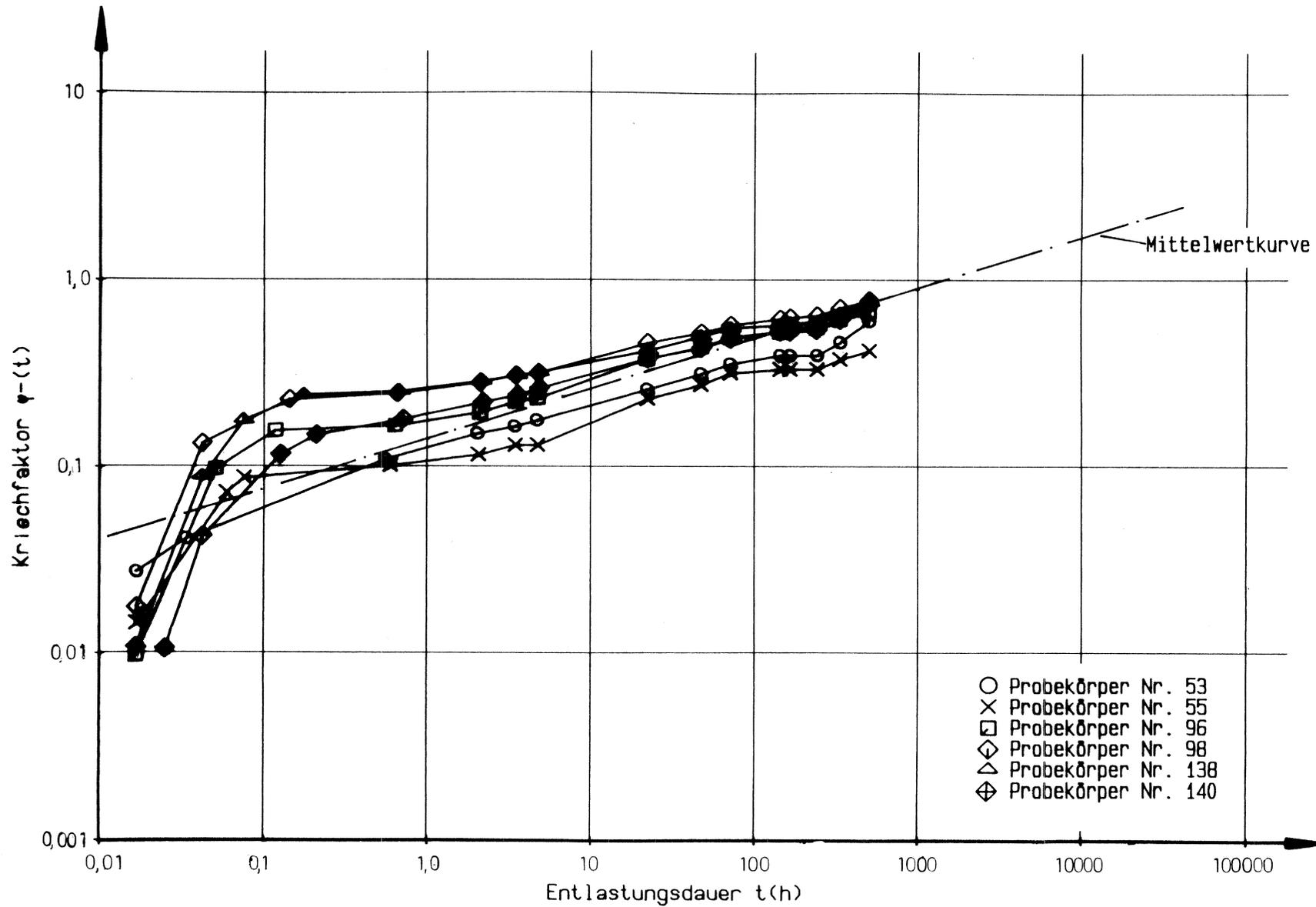
**Bild 148:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 72, 74, 132, 148 und zugehörige Mittelwertfunktion, 8. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



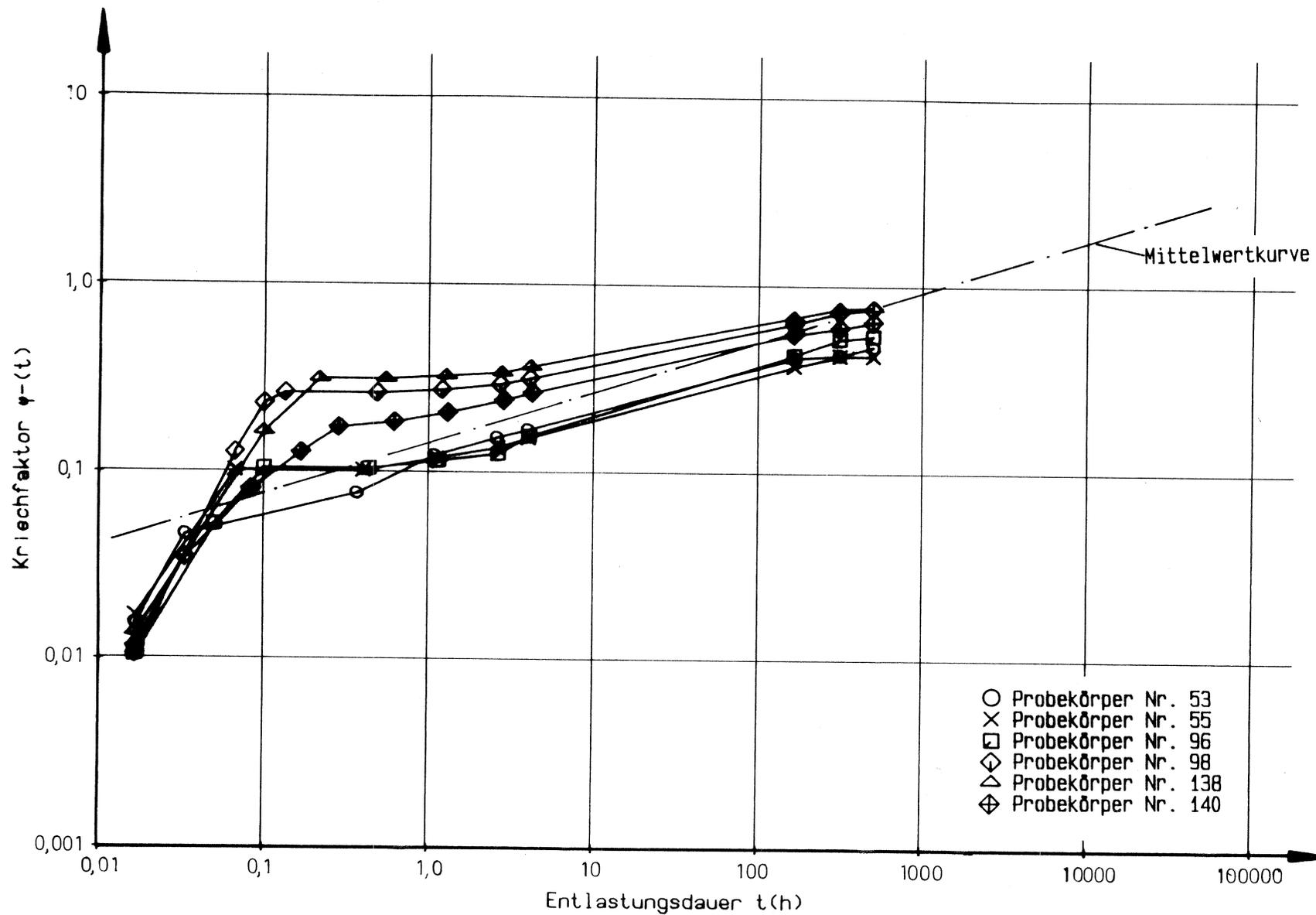
**Bild 149:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



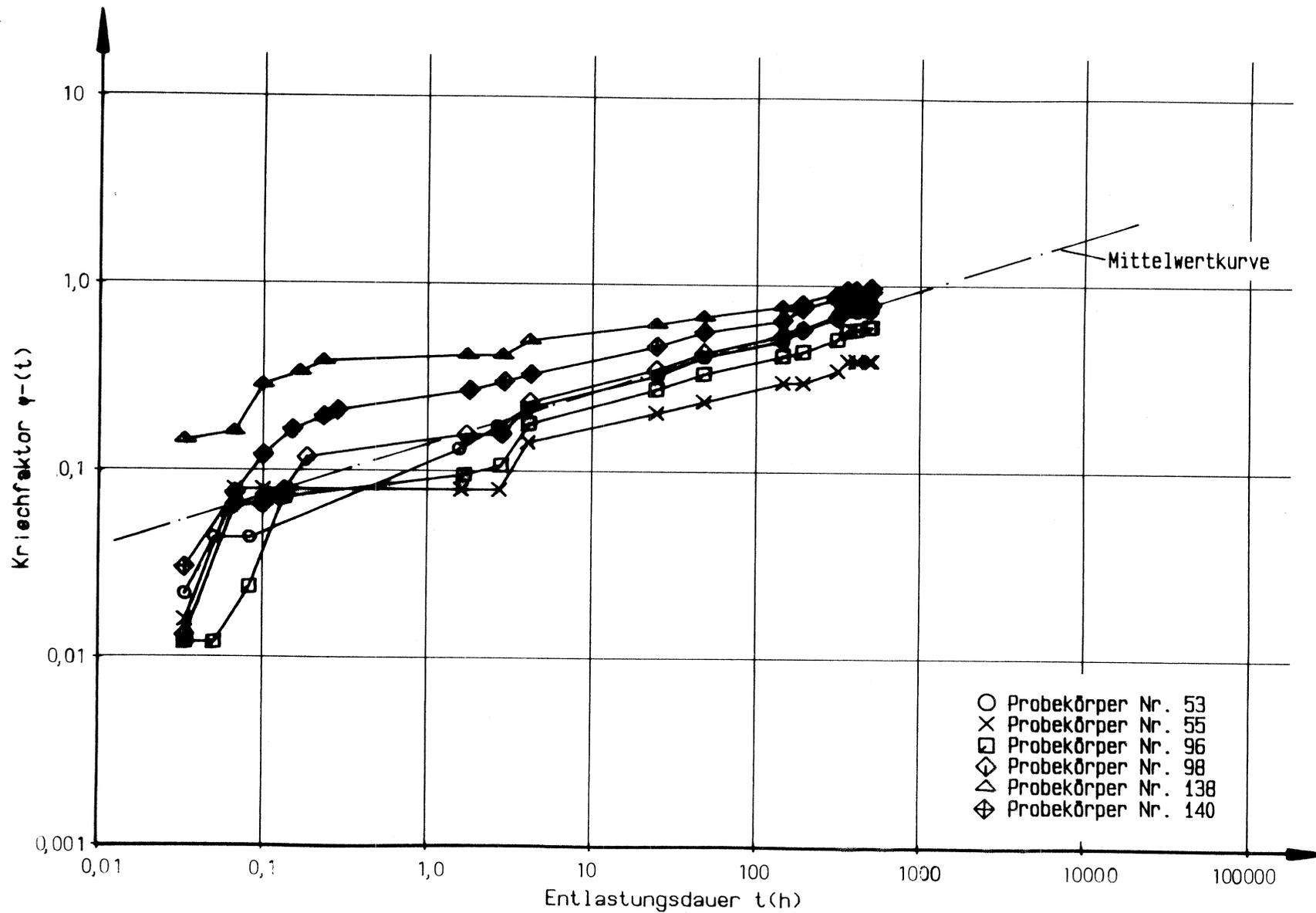
**Bild 150:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



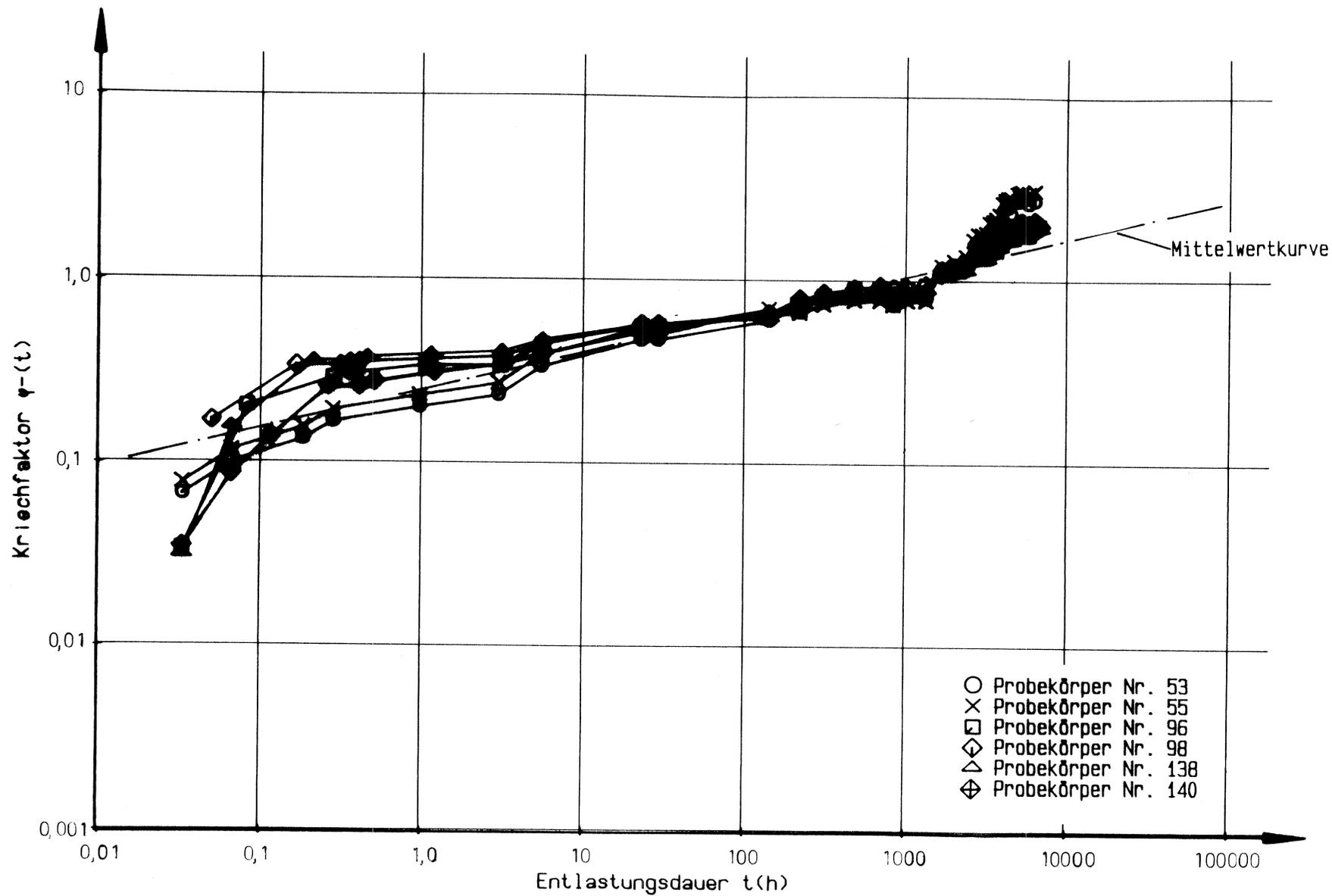
**Bild 151:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



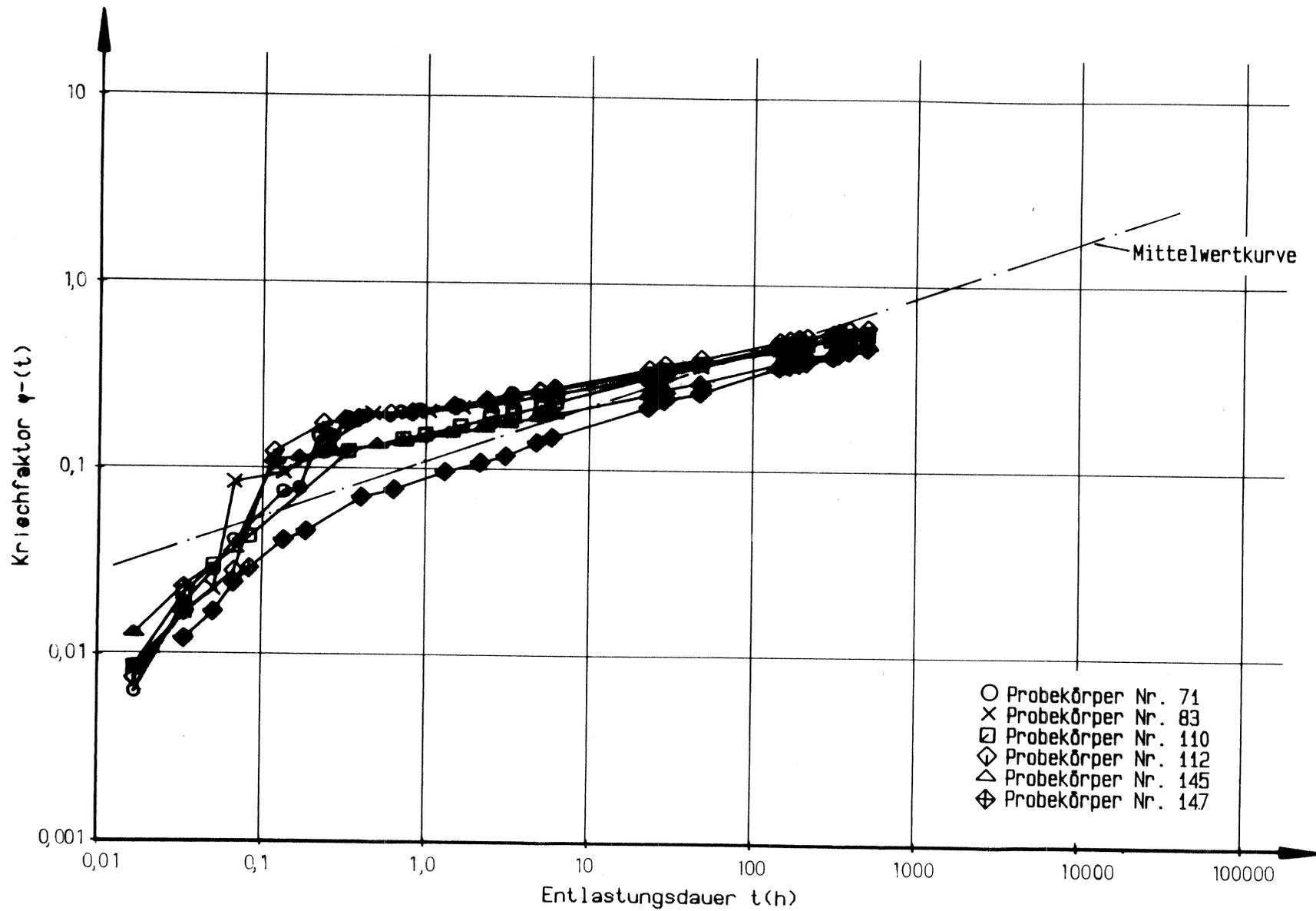
**Bild 152:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



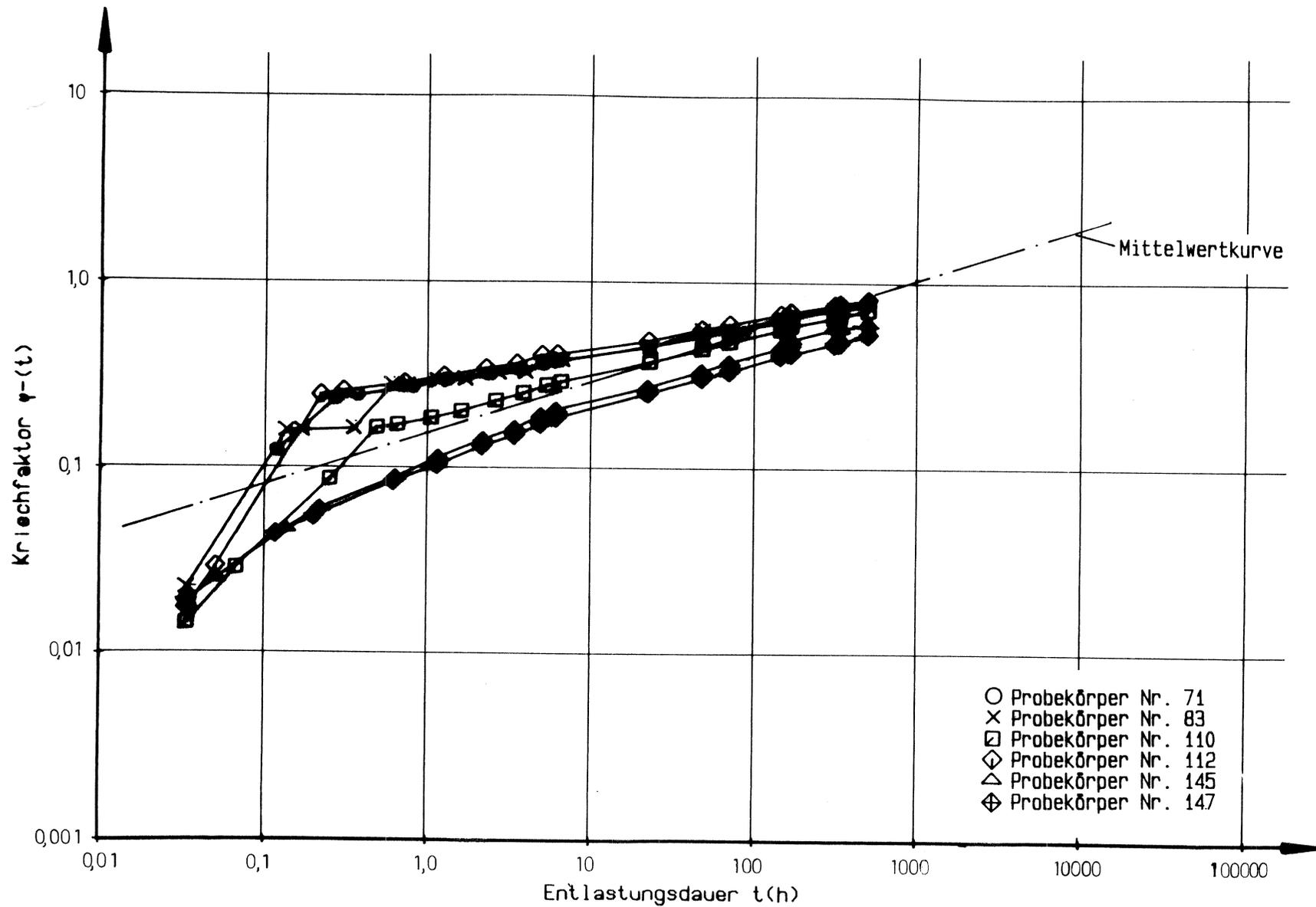
**Bild 153:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 154:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 53, 55, 96, 98, 138, 140 und zugehörige Mittelwertfunktion, 6. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 155:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



**Bild 156:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast

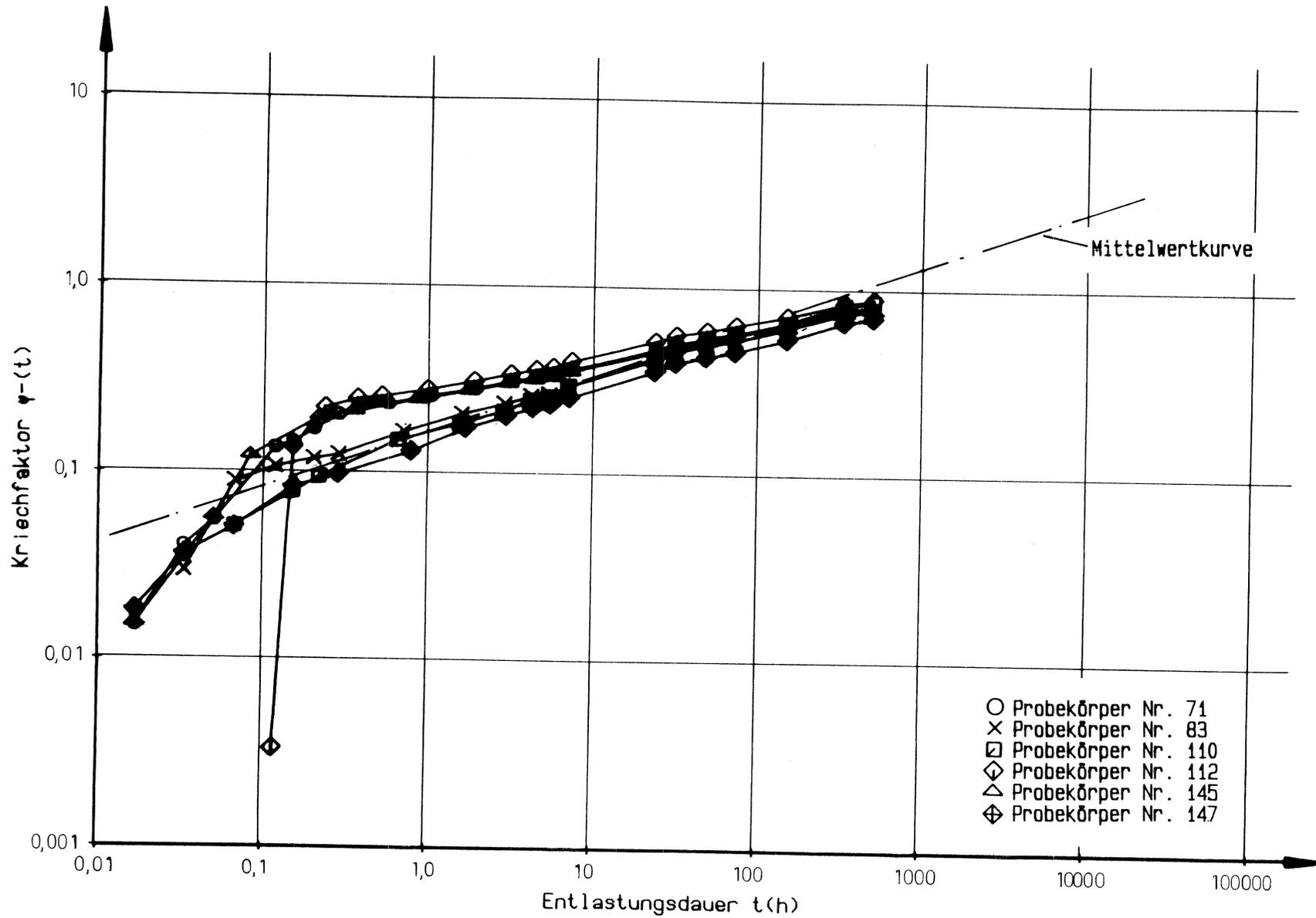
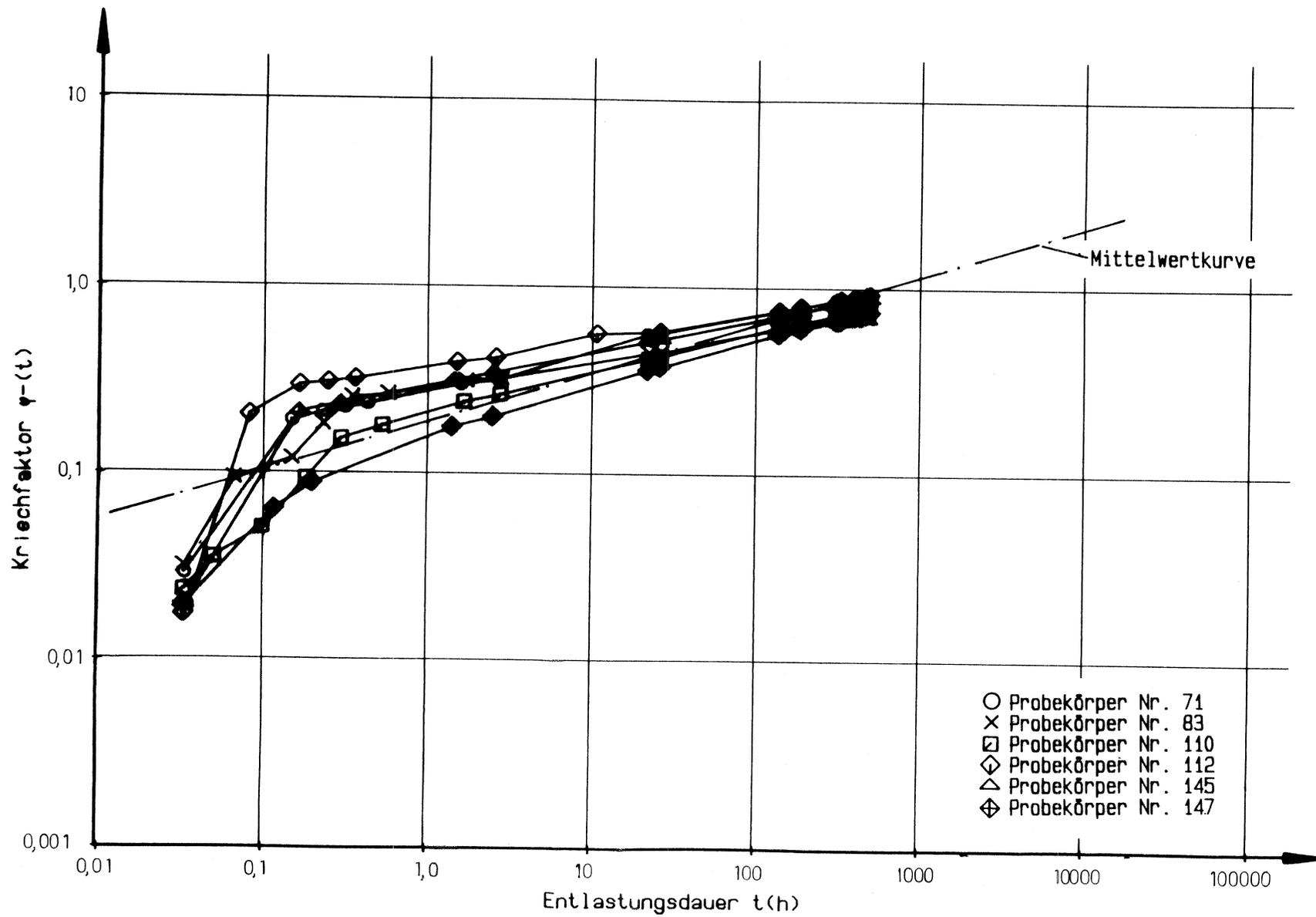
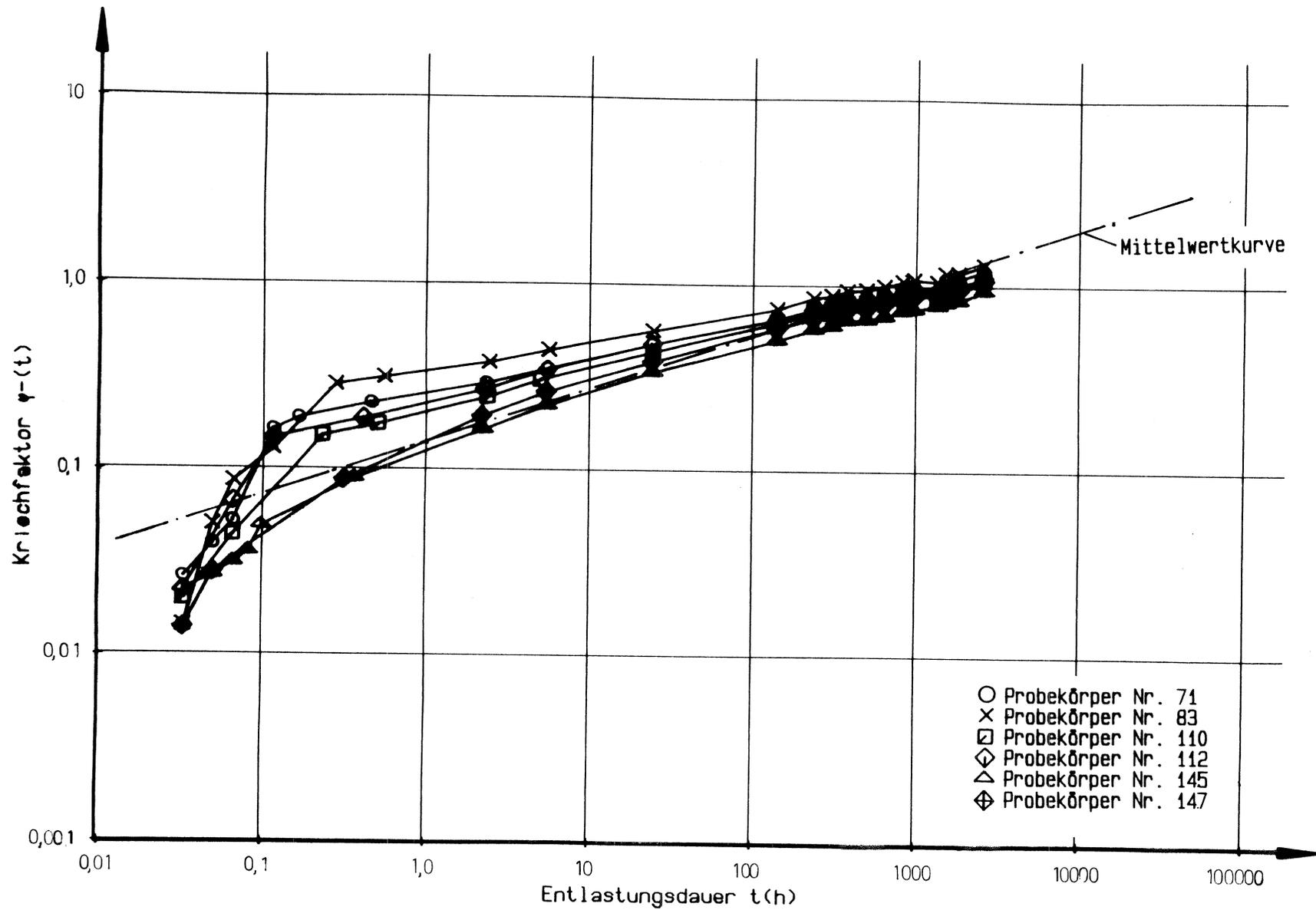


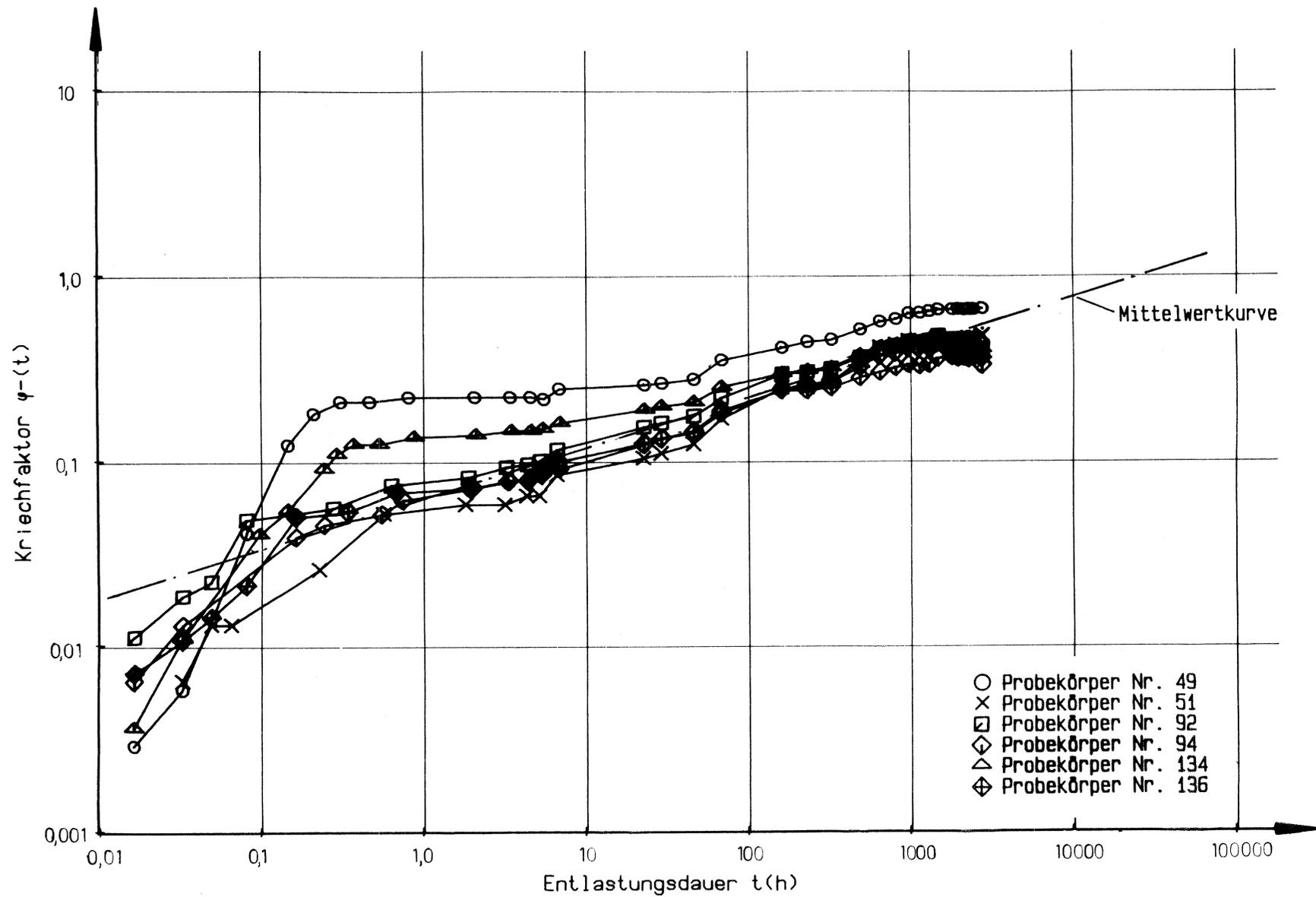
Bild 157:  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 3. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



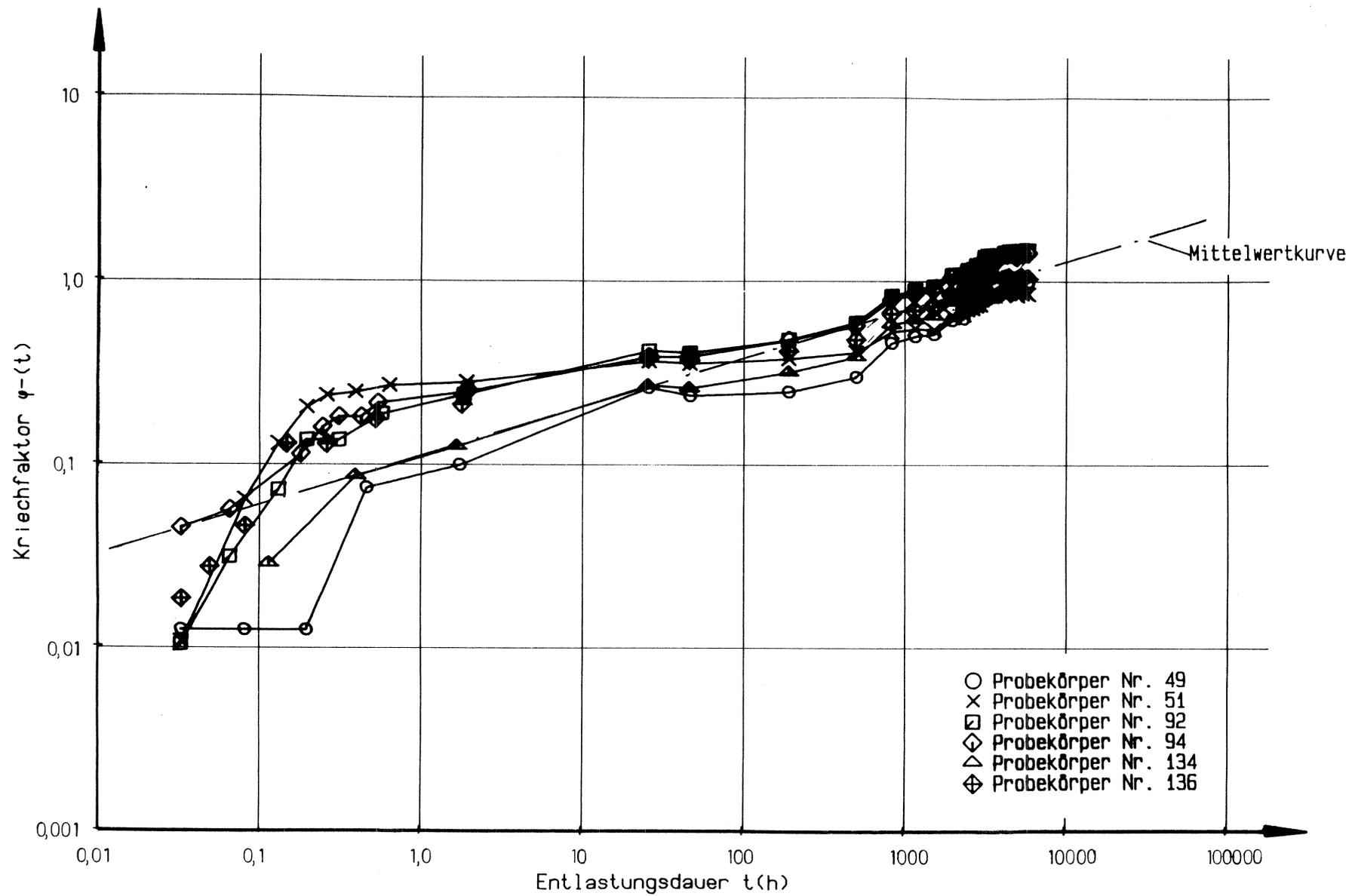
**Bild 158:**  $\psi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 4. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



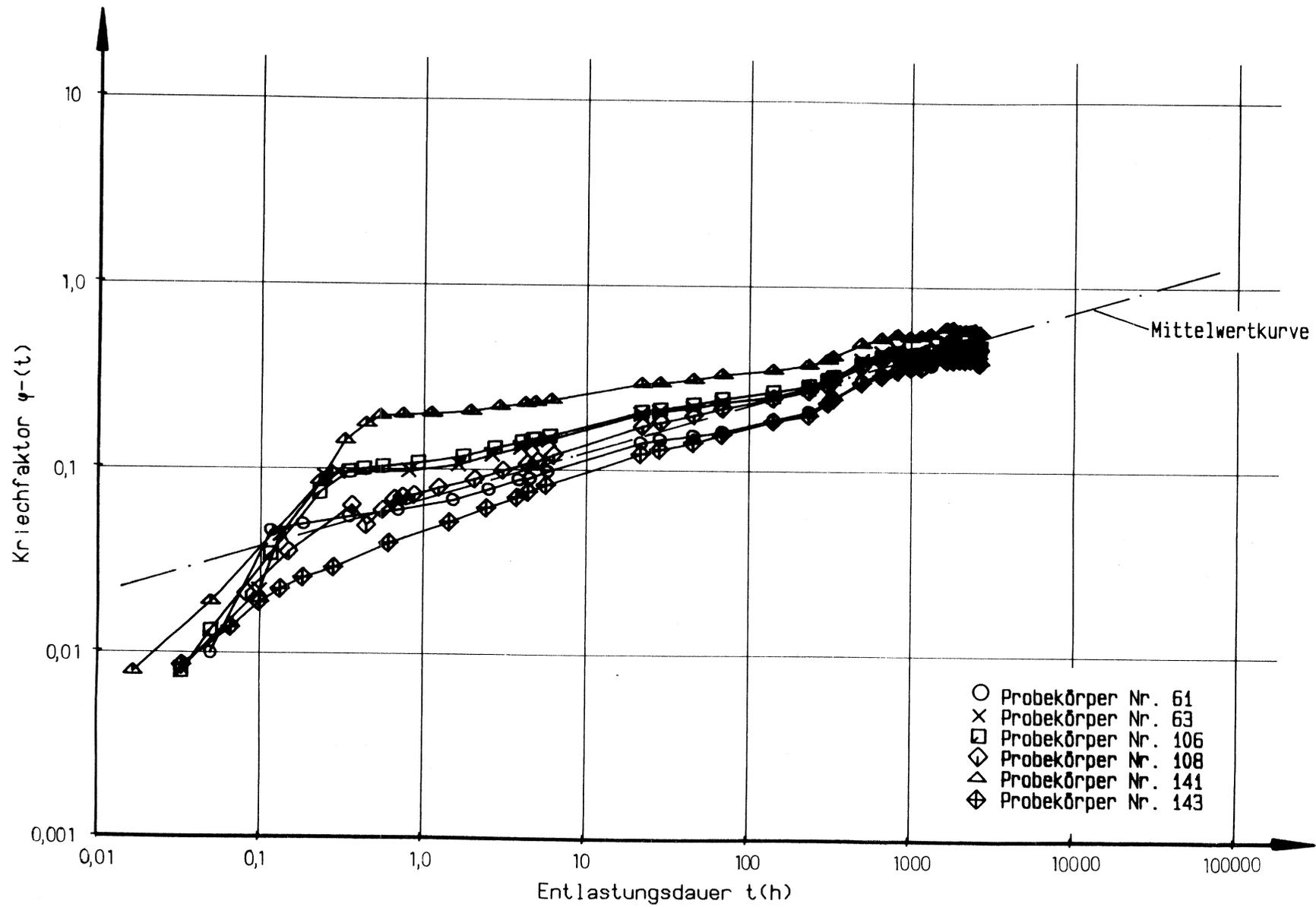
**Bild 159:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 71, 83, 110, 112, 145, 147 und zugehörige Mittelwertfunktion, 5. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



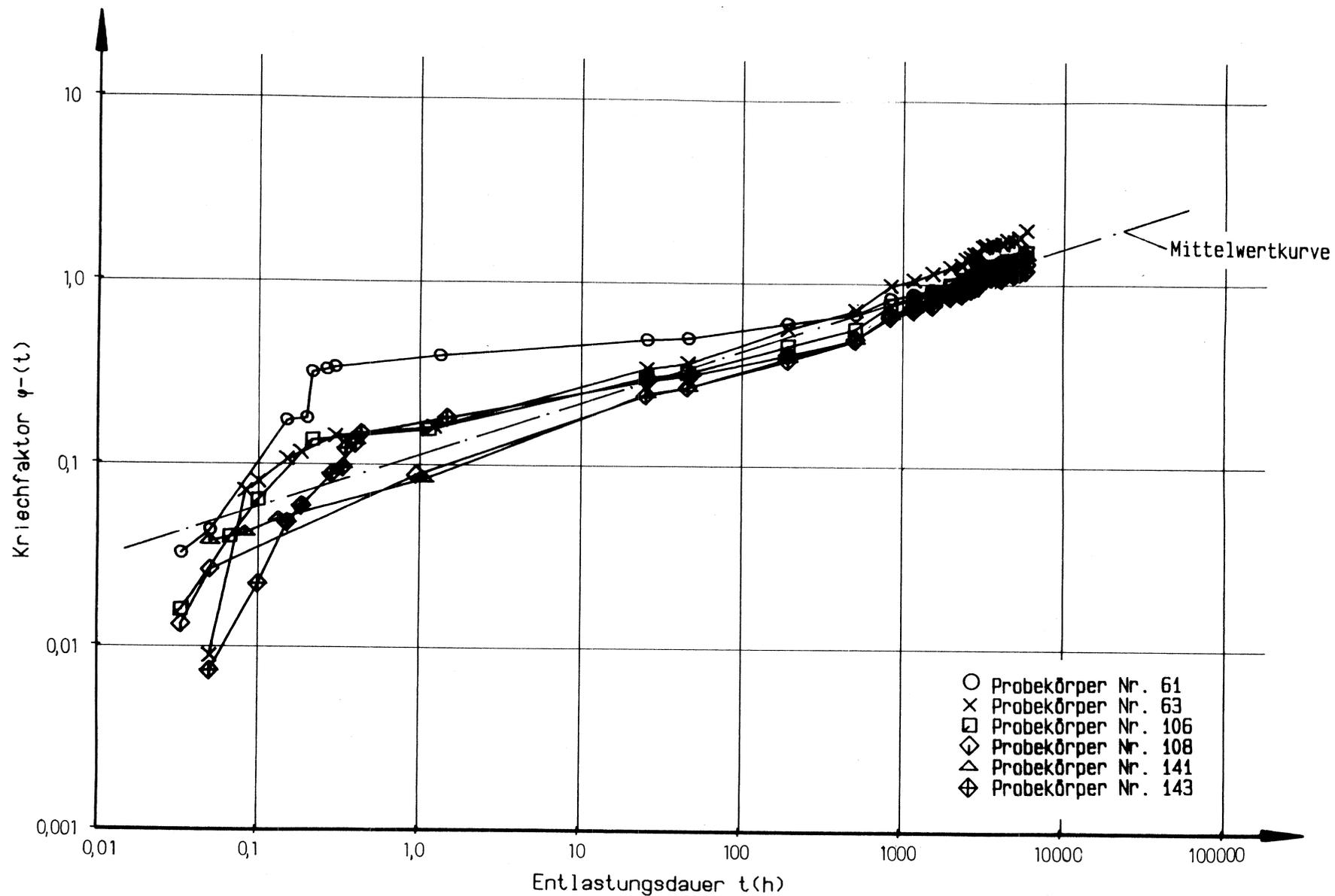
**Bild 160:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 49, 51, 92, 94, 134, 136 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



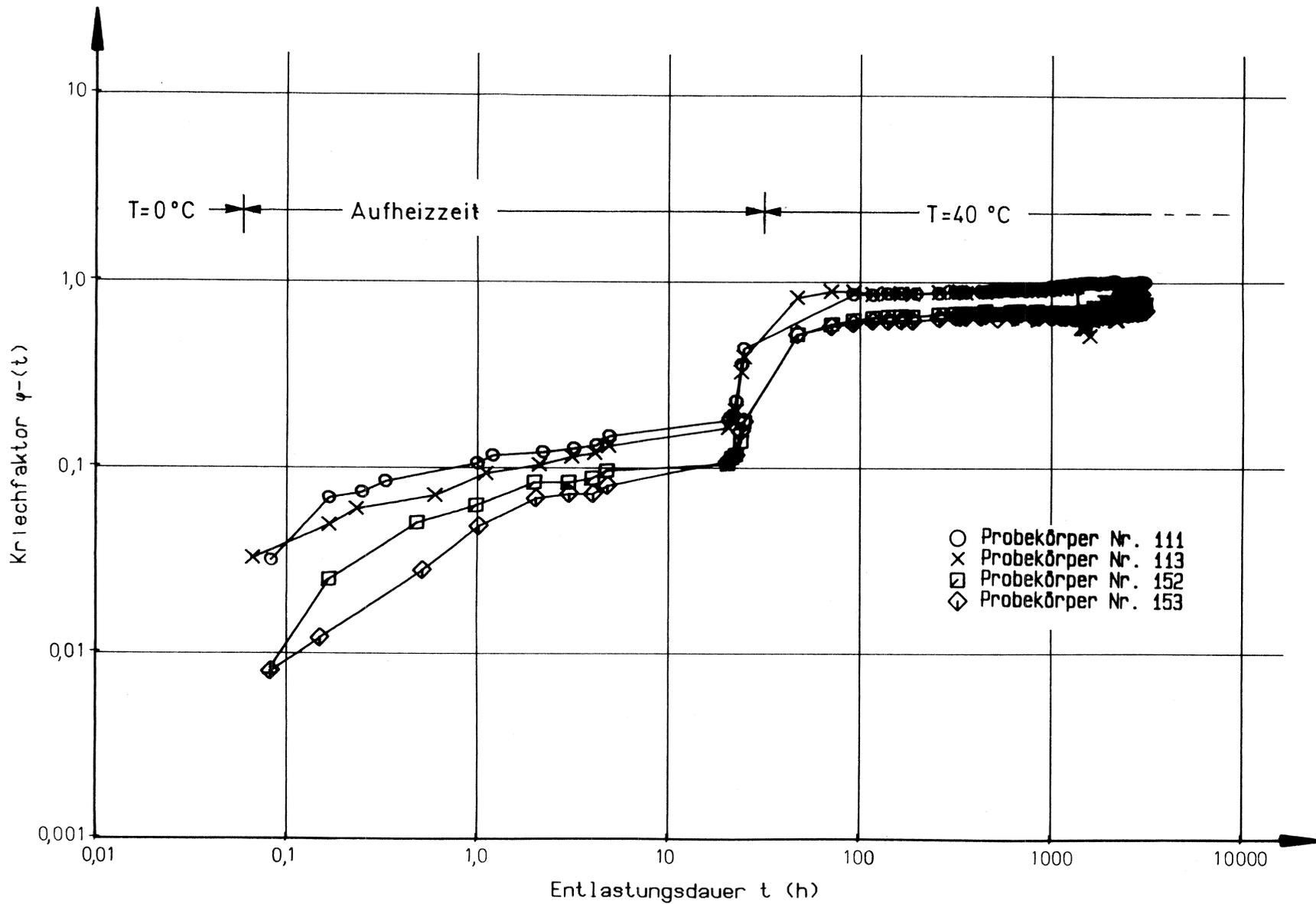
**Bild 161:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 49, 51, 92, 94, 134, 136 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



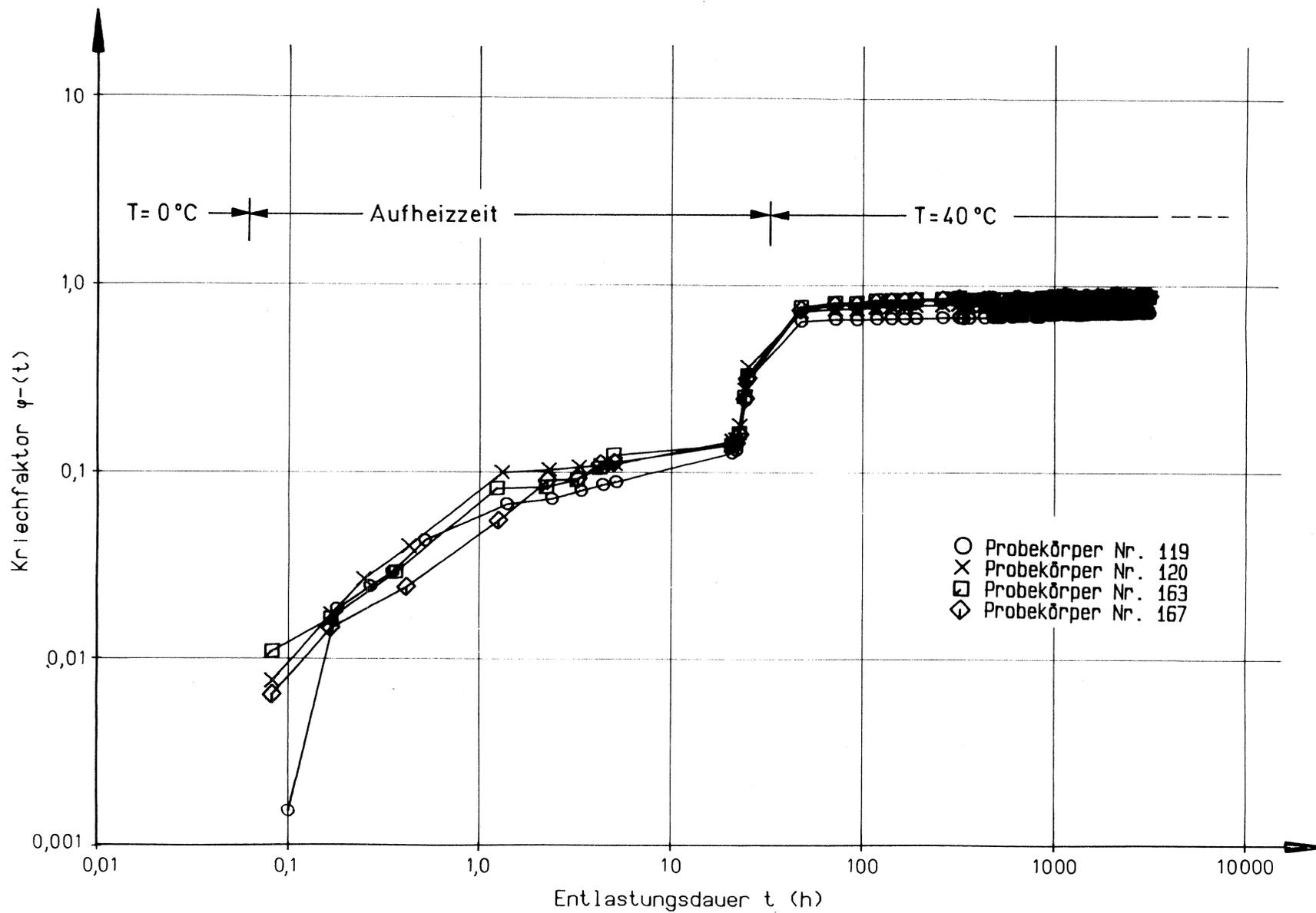
**Bild 162:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 61, 63, 106, 108, 141, 143 und zugehörige Mittelwertfunktion, 1. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



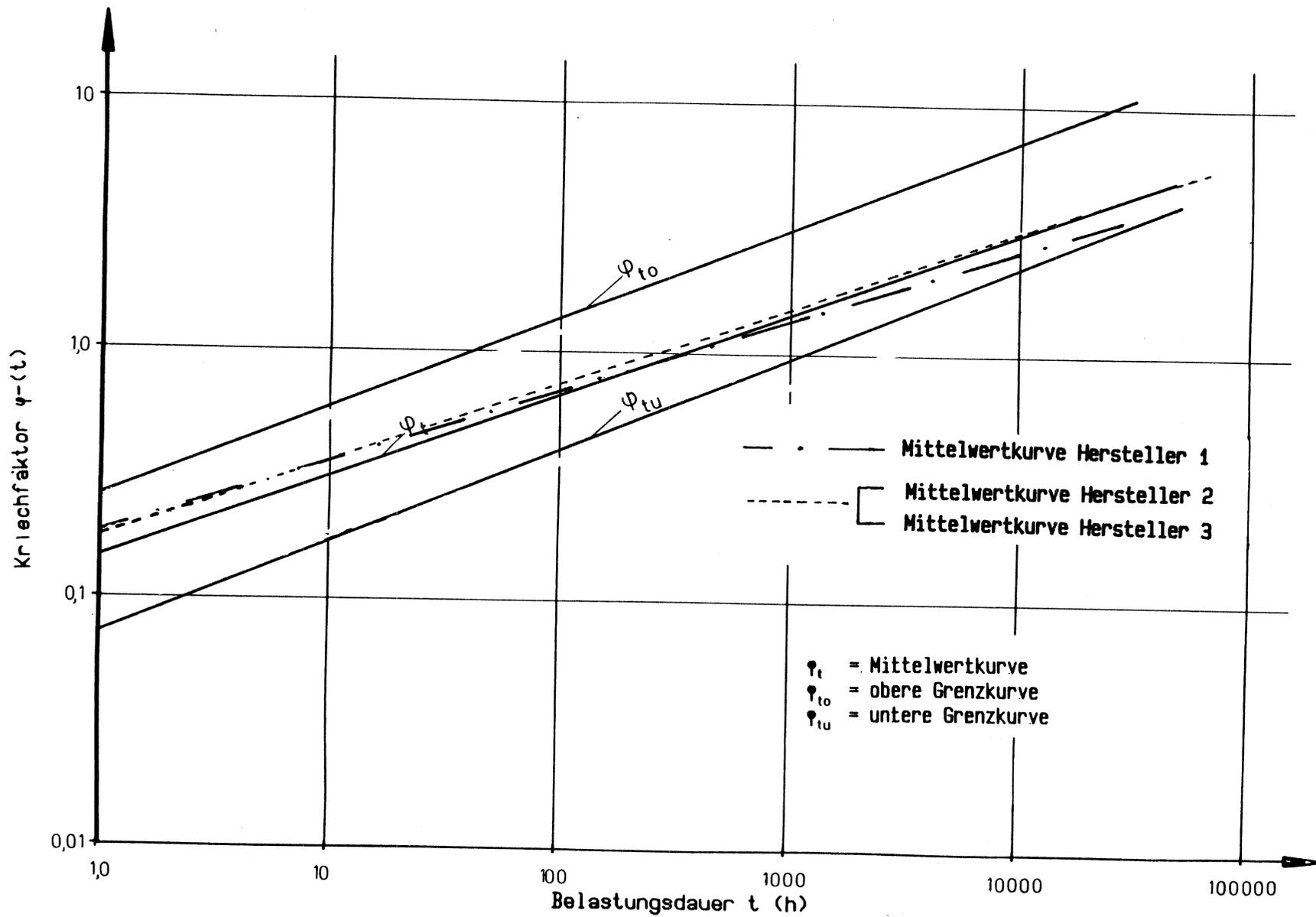
**Bild 163:**  $\varphi(t)$ -Kurven für Probekörper Nr. 61, 63, 106, 108, 141, 143 und zugehörige Mittelwertfunktion, 2. Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



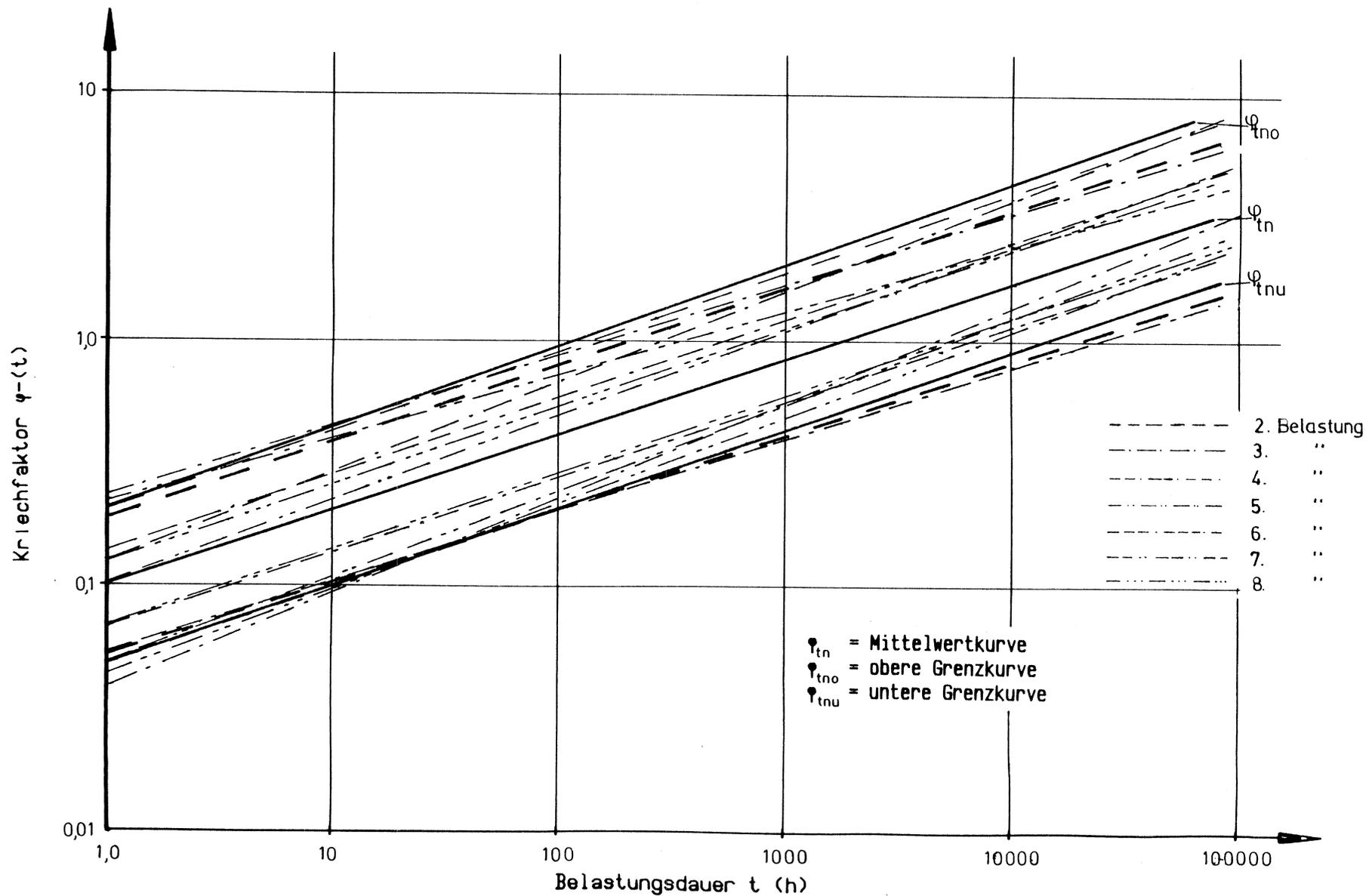
**Bild 164:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Probekörper Nr. 111, 113, 152, 153, Entlastung, 10% der Kurzzeitbruchlast



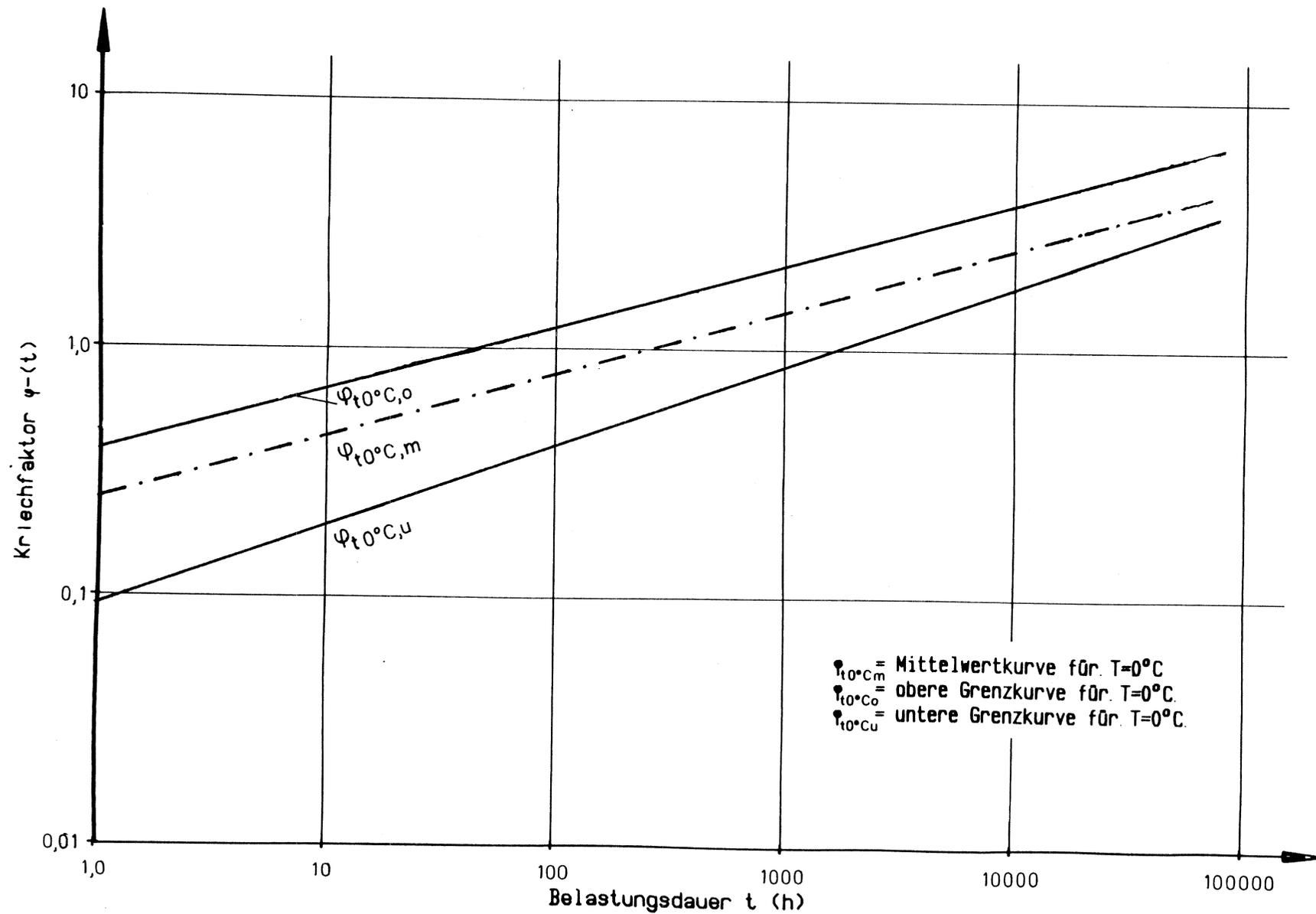
**Bild 165:**  $\varphi(t)$ -Kurven für die Probekörper Nr. 119, 120, 163, 167,  
Entlastung, 30% der Kurzzeitbruchlast



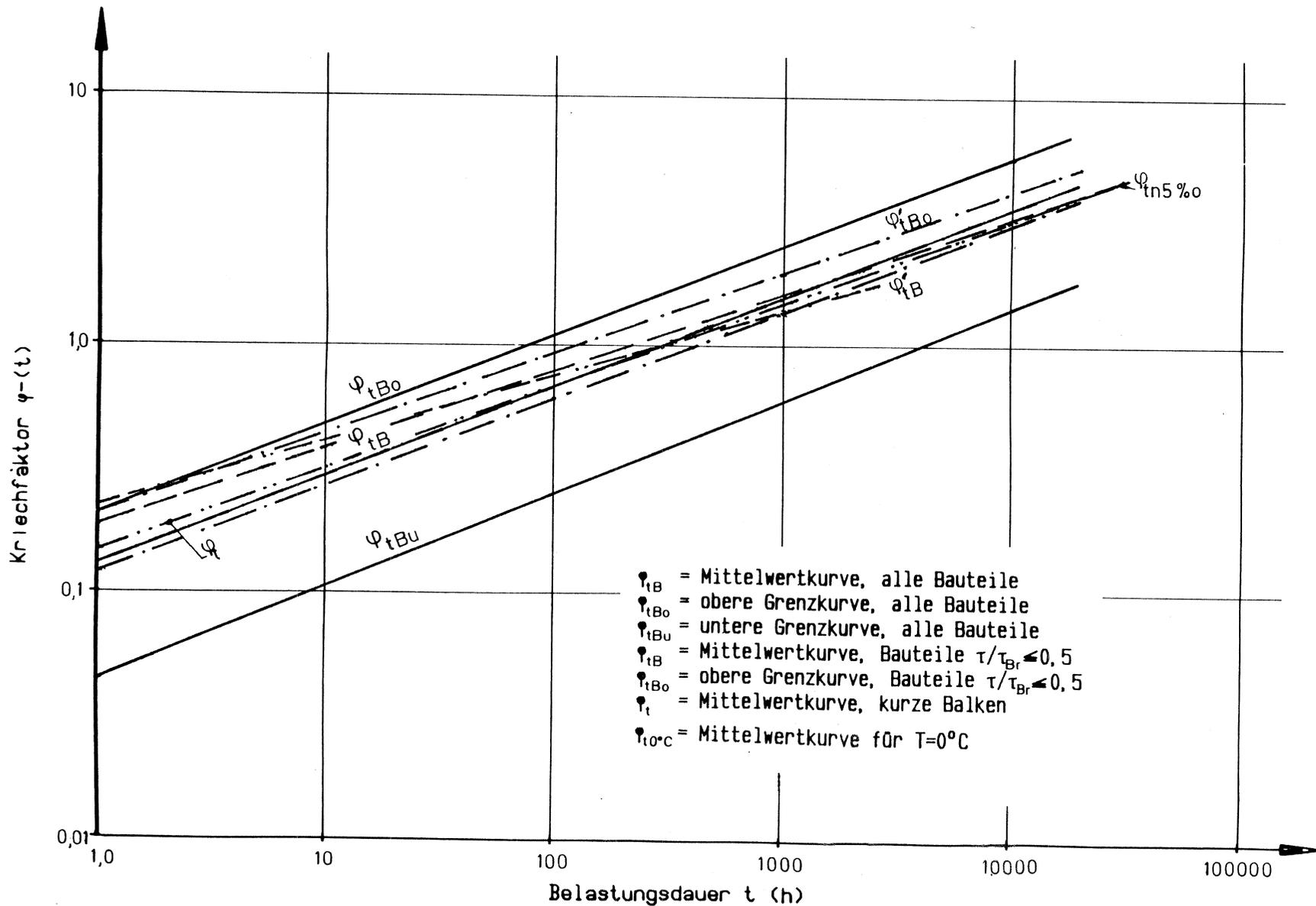
**Bild 166** : Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien für die erste Belastung



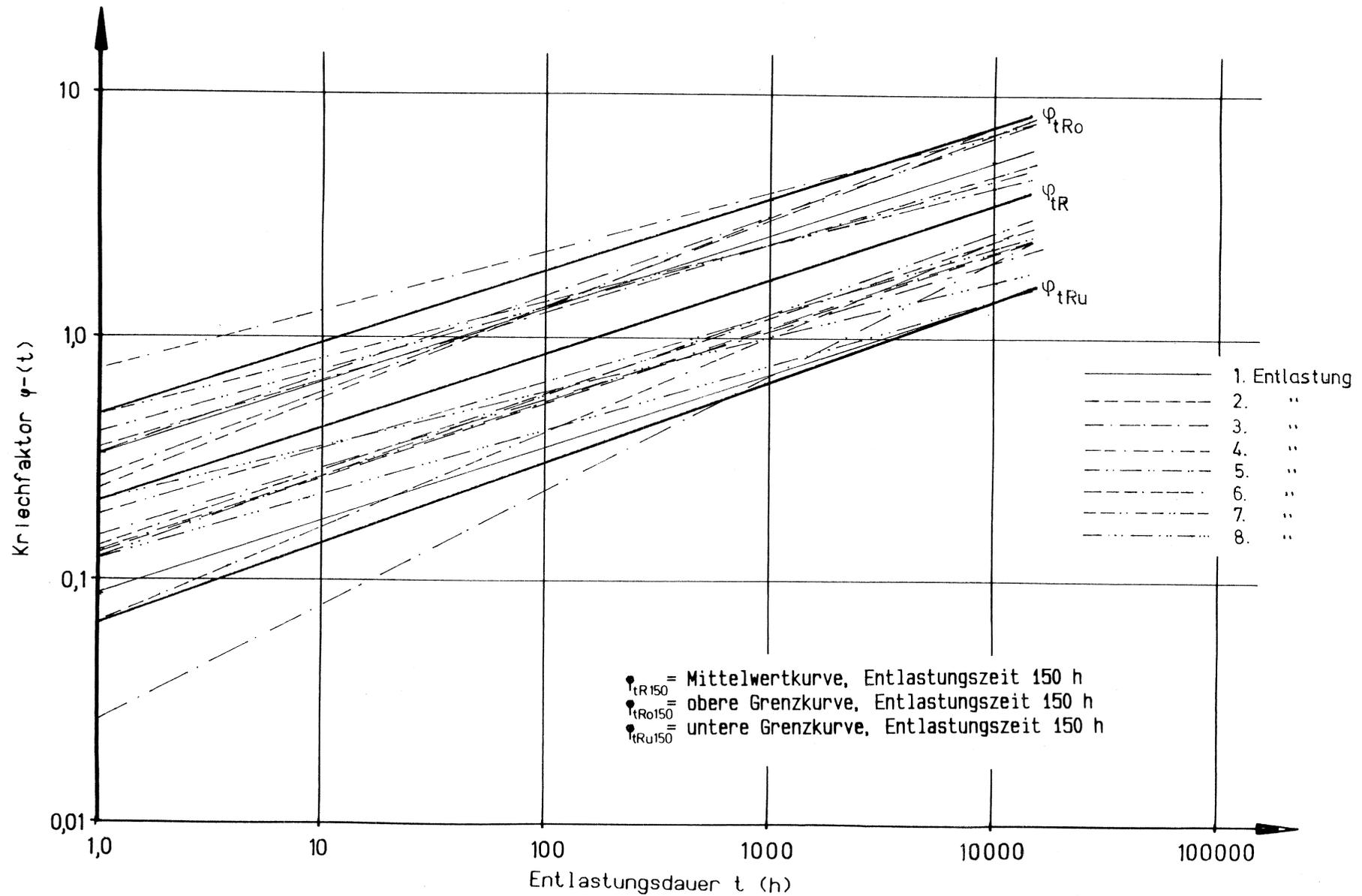
**Bild 167:** Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien für verschiedene Belastungszyklen



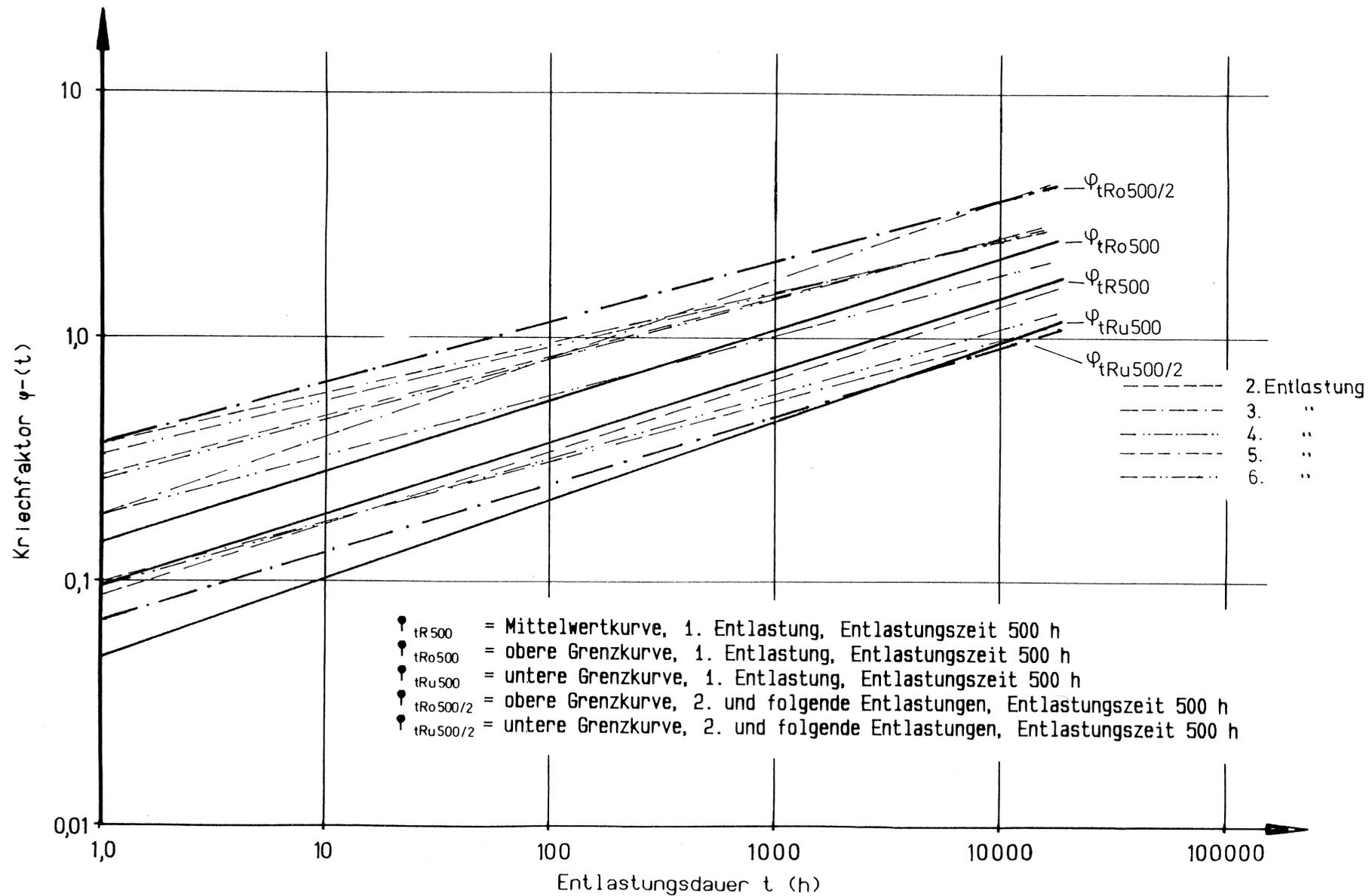
**Bild 168:** Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien für verschiedene Belastungszyklen bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  und von  $40^{\circ}\text{C}$  (Darmstädter Versuche)



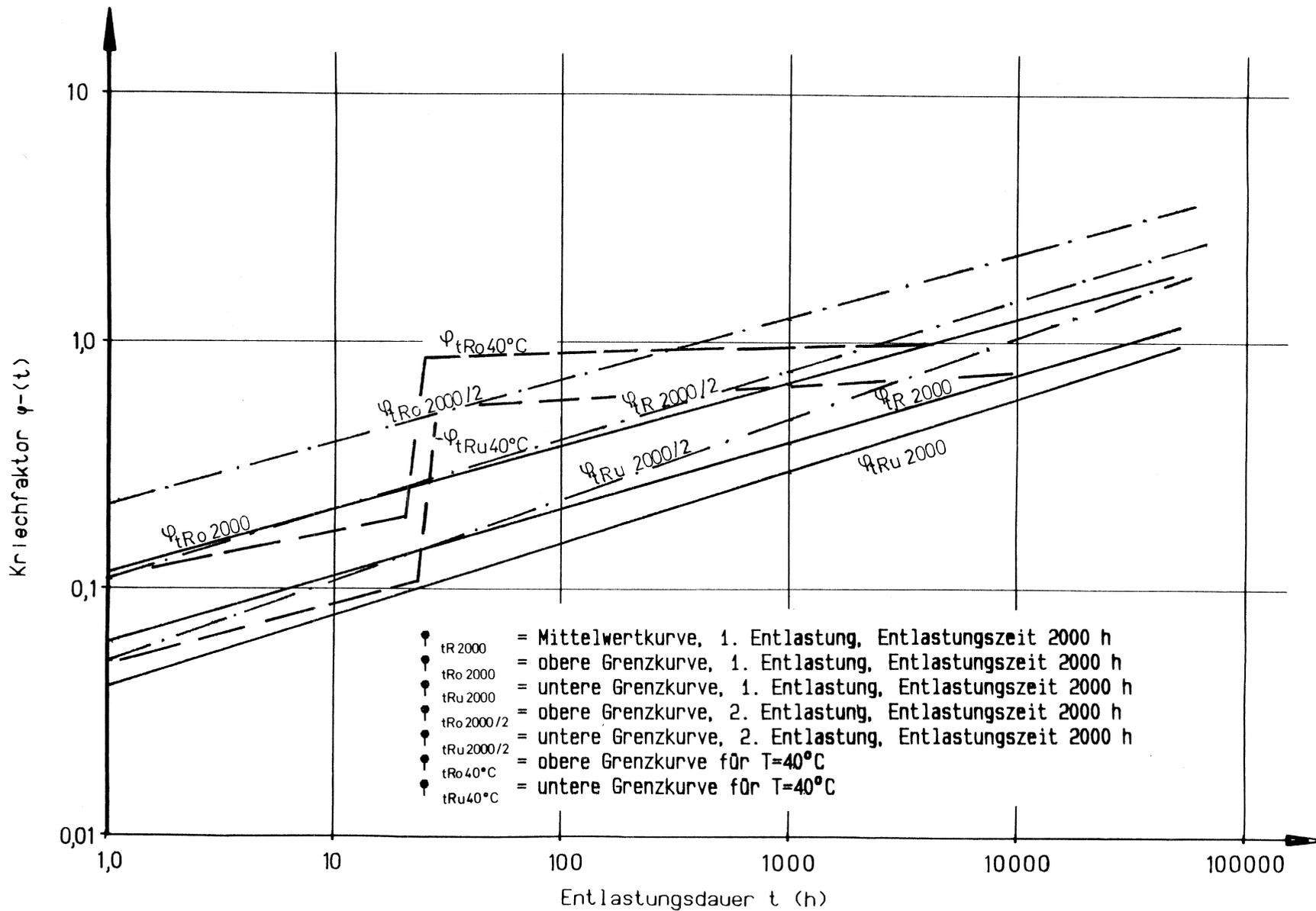
**Bild 169:** Streuband der für die Bauteilversuche unter Belastung ermittelten Kriechlinien



**Bild 170:** Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien nach der Entlastung, Be- und Entlastungszeit 150 Stunden



**Bild 171:** Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien nach der Entlastung, Be- und Entlastungszeit 500 Stunden



**Bild 172:** Streuband der für die Versuche an kurzen Balken ermittelten Kriechlinien nach der Entlastung, Be- und Entlastungszeit 2000 Stunden, sowie Darmstädter Versuche bei  $T=40^\circ C$

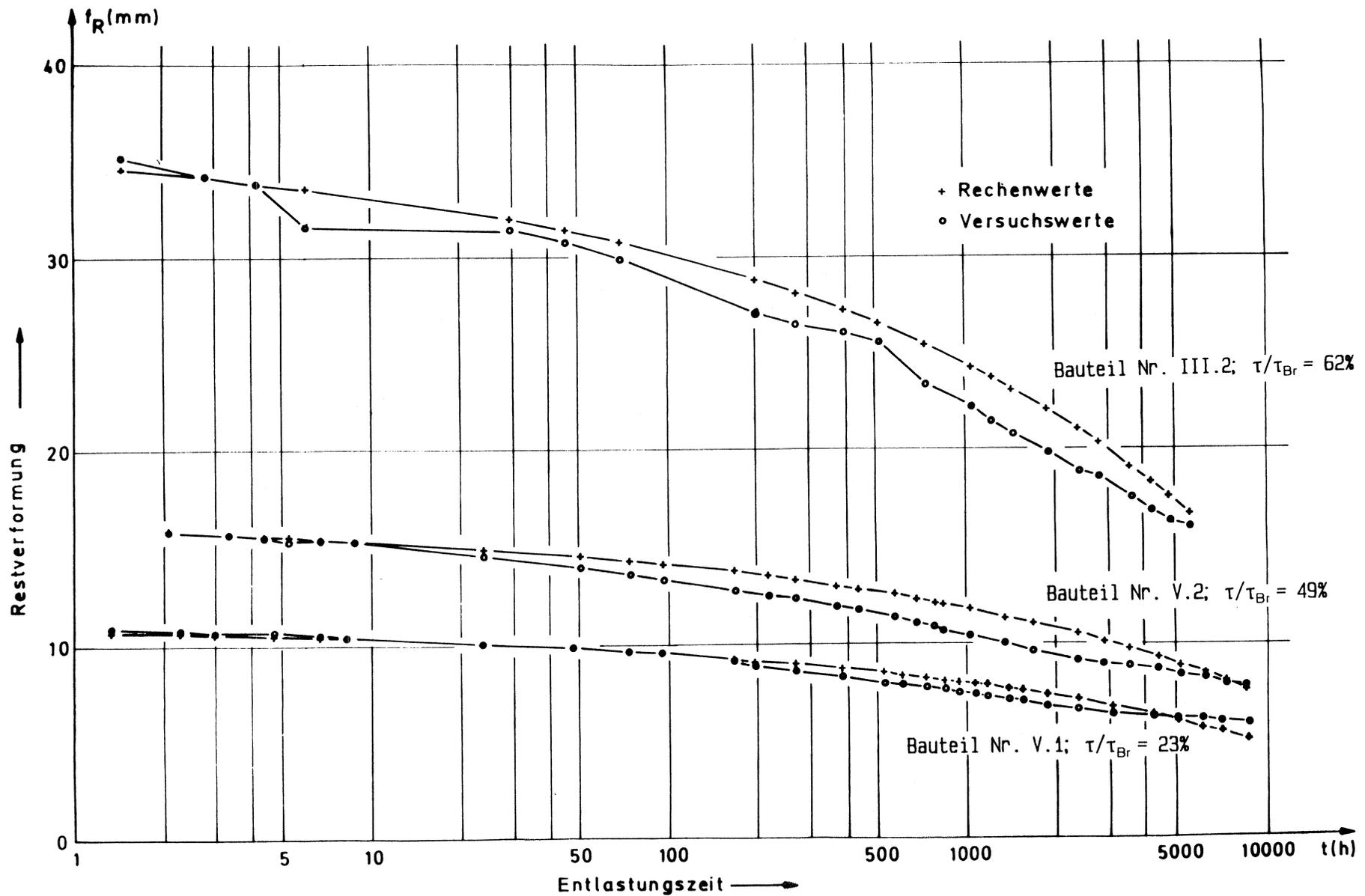


Bild 173: Vergleich der gemessenen und theoretisch ermittelten Rückverformung langfristig belasteter Bauteile nach der Entlastung