

Dauerstandverhalten hochbelasteter unbewehrter Elastomerlager in Stützenstößen des Betonfertigteilbaues

T 2179

T 2179

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

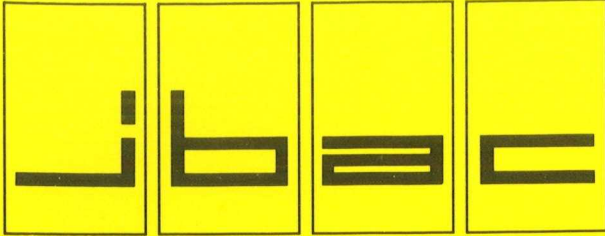
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

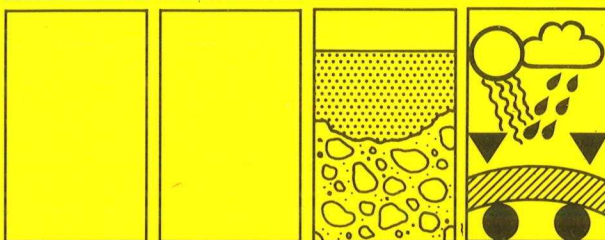
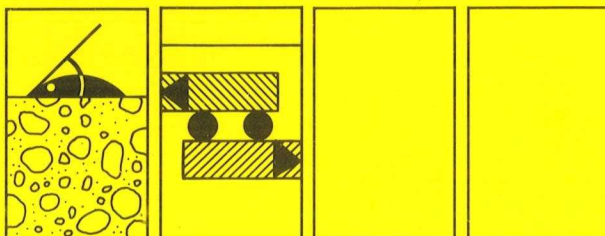
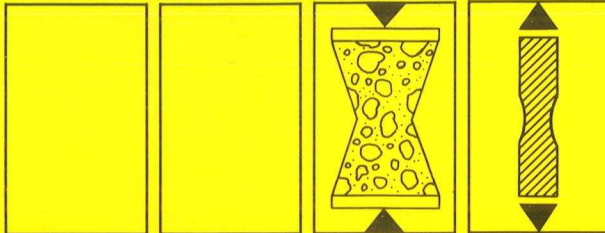
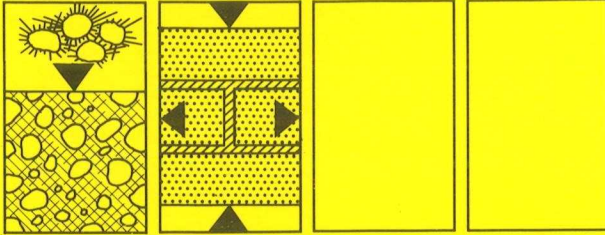
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

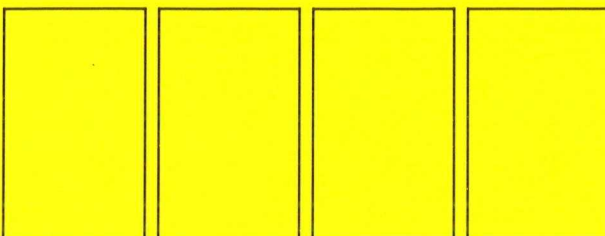


Institut für Bauforschung Aachen
 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



Baustoff · Bauteil · Bauwerk

**Forschung · Entwicklung
 Überwachung
 Prüfung · Beratung**

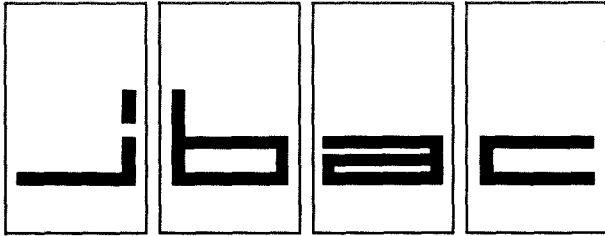


Schinkelstraße 3 · D-5100 Aachen
 Tel. (02 41) 80-5100 · Telex 8 32 704 THAC D
 Telefax (02 41) 80-5120

DAUERSTANDVERHALTEN HOCHBELASTETER
 UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER IN
 STÜTZENSTÖSSEN DES BETONFERTIGTEIL-
 BAUES

ABSCHLUSSBERICHT

F 1 7 9



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Schinkelstraße 3, D-5100 Aachen

Telefon (02 41) 80-5100 · Telex 832704 thac d · Telefax (02 41) 80-5120

THEMA

DAUERSTANDVERHALTEN HOCHBELASTETER
UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER IN
STÜTZENSTÖSSEN DES BETONFERTIGTEIL-
BAUES

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 1 7 9

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. H. R. Sasse

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. M. Breitbach

Auftraggeber/
Förderer

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftragsdatum
Aktenzeichen

23.06.1982

IV/1-5-346/82

Dieser Bericht umfaßt 102 Seiten, davon 76 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
0	BEGRIFFE.....	III
0.1	Definitionen und Erläuterungen.....	III
0.2	Abkürzungen (Formelzeichen).....	V
1	PROBLEMSTELLUNG.....	1
2	FORSCHUNGSZIEL UND VORGEHENSWEISE.....	3
3	KENNTNISSTAND.....	3
4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	8
4.1	Umfang der Untersuchungen.....	8
4.2	Versuchsaufbau.....	11
4.3	Belastungsvorgang.....	15
4.4	Meßwerterfassung und Versuchsdauer.....	15
5	VERSUCHSERGEBNISSE.....	17
5.1	Kriechkurven.....	17
5.2	Endkriechmaße.....	26
5.3	Kriechverformungen und Verlauf der Kriechkurven.....	30
5.3.1	Einfluß der Elastomerqualitäten.....	31
5.3.2	Einfluß der Lagerdicken.....	32
5.3.3	Einfluß der mittleren Pressung.....	35
5.3.4	Einfluß der exzentrischen Lasteinleitung.....	39
5.3.5	Einfluß der mittleren Pressung und der Lagerdicke....	40
5.4	Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades.....	43

	Seite	
6	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SCHÄDIGUNGSGRAD, ENDKRIECHMABEN, MAXIMALEN SCHUBSPANNUNGEN IM LAGER UND VERLAUF DER KRIECKURVEN.....	49
6.1	Schädigungsgrad und Zeitpunkt des Kriechanstieges....	49
6.2	Schädigungsgrad und maximale Schubspannungen im Lager	51
6.2.1	Rechnerischer Spannungszustand.....	51
6.2.2	Zulässige Randschubspannungen an normgerechten Regel-lagern.....	54
6.2.3	Einfluß der Elastomerqualitäten.....	57
6.2.4	Einfluß der Lagerdicken.....	58
6.3	Schädigungsgrad und Endkriechmaße.....	59
6.3.1	Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$	59
6.3.2	Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$	61
6.3.2.1	Einfluß der Elastomerqualitäten.....	61
6.3.2.2	Einfluß der Lagerdicken.....	62
6.3.2.3	Einfluß der mittleren Pressungen.....	63
7	DISKUSSION.....	65
8	BAUPRAKTISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	71
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR WEITERE FORSCHUNGEN.....	72
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	75
	ANHANG: Vergleich der Kriechkurven mit gleicher Para-meter-Kombination (Bilder A1 bis A32)	

0 BEGRIFFE

Für die in diesem Forschungsbericht zu untersuchenden Zusammenhänge gelten die nachfolgend aufgeführten Definitionen, Erläuterungen und Abkürzungen (Formelzeichen).

0.1 Definitionen und Erläuterungen

Dauerstandverhalten

Alle nach einer Belastungsdauer von 5 Minuten auftretenden geometrischen und chemorheologischen Veränderungen am Elastomerlager, d. h. elastische und verzögert-elastische Verformungen, Fließen, Kriechen sowie chemische oder physikalische Strukturänderungen.

Deckschicht

Randschicht des Elastomers unmittelbar an den Kontaktflächen, die infolge des Reibungsschlusses in den Kontaktflächen weitestgehend keiner Gefügezerstörung unterliegt.

Elastomere

Elastomere sind bis zu ihrer Zersetzungstemperatur vernetzte (vulkanisierte) Polymerwerkstoffe, die bei niedrigen Temperaturen glasartig hart sind und selbst bei hohen Temperaturen nicht viskos fließen, sondern sich insbesondere bei Raumtemperatur bis zur Zersetzungstemperatur gummielastisch verhalten.

Gummielastisches Verhalten ist gekennzeichnet durch einen relativ niedrigen Schubmodul mit vergleichsweise geringer Temperaturabhängigkeit.

Endkriechmaß $\phi_{j\infty}$

Rechnerisch extrapoliertes Verhältnis (nach Ross /23/) zwischen der Kriechdehnung nach einem bestimmten Belastungsintervall und elastischer Dehnung nach einer Belastungsdauer von 5 Minuten.

Fließen

Lagerverformung, die sich aus der lokalen Überwindung des Reibungsschlusses in den Kontaktflächen bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes ergibt.

Formfaktor S

Verhältnis von gedrückter zur freien Oberfläche; für Rechtecklager gilt

$$S = \frac{a \cdot b}{2t (a + b)}$$

Kriechkurve

zeitlicher Verlauf der Kriechdehnung

Kriechgeschwindigkeit

Steigung der Kriechkurve im logarithmischen Zeitmaßstab

konstante Kriechgeschwindigkeit

gleichbleibende Steigung der Kriechkurve im logarithmischen Zeitmaßstab

Kriechanstieg (progressiver, überproportionaler)

progressive Zunahme der Kriechgeschwindigkeit im logarithmischen Zeitmaßstab

Kriechzahl ϕ_T

Verhältnis von Kriechdehnung ϵ_k zur elastischen Dehnung ϵ_e

stick-slip

alternierende Kriech- und Fließverformungen

0.2 Abkürzungen (Formelzeichen)

A	Grundfläche des Lagers im unbelasteten Zustand
a	Seitenabmessung des Lagers im unbelasteten Zustand bei Lagern mit rechteckigem Grundriß. a ist die kleinere Seite bzw. die Seite rechtwinklig zur Drehwinkelachse
α	Drehwinkel
b	Seitenabmessung des Lagers im unbelasteten Zustand (vgl. a)
CR	Chloropren-Kautschuk
d	Tag
EPDM	Ethylen-Propylen-Terpolymere
$\epsilon(\epsilon_k)$	Kriechdehnung (Kriechverformung) bezogen auf die Anfangseinfederung ϵ_0 in mm/m
ϵ_0	Anfangseinfederung (Dehnung) nach dem Belastungsintervall T_1 (5 min nach der Lastaufbringung)
ϵ_{el}	elastische Dehnung
η	Einflußfaktor zur Berücksichtigung des Geometrieinflusses bei der Ermittlung der maximalen rechnerischen Schubspannungen im Lager nach /4/
F_z	Summe aller Lasten normal zur Lagerebene
G	Schubverformungsmodul (Rechengröße)
γ	Schubverformungswinkel des Lagers
h	Stunde
min	Minute
μ	Querdehnzahl
ϕ_T	Kriechzahl, $\phi_t = \frac{\epsilon_k}{\epsilon_{el}}$
ϕ_∞	aus einem bestimmten Belastungsintervall extrapoliertes Endkriechmaß nach Ross
$\phi_{1\infty}$	Endkriechmaß extrapoliert aus dem Belastungsintervall $T_1 \leq T \leq T_2$ (vgl. Bild 3)

$\phi_{2\infty}$	Endkriechmaß extrapoliert aus dem Belastungsintervall $T_3 \leq T \leq T_4$ bzw. $T_3 \leq T \leq T_5$ (vgl. Bild 3)
S	Formfaktor
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
σ_m	mittlere Lagerpressung bezogen auf die Grundfläche des Lagers im unbelasteten Zustand
T	Belastungsintervall (obere Grenze)
T_1	Belastungsintervall bis 5 min nach der Lastaufbringung
T_2	Belastungsintervall zwischen 5 min nach der Lastaufbringung und 1 d
T_3	Belastungsintervall zwischen 1 d und dem Zeitpunkt des ersten progressiven Kriechanstieges
T_4	Belastungsintervall zwischen dem Zeitpunkt des ersten progressiven Kriechanstieges und dem zweiten progressiven Kriechanstieg
T_5	Belastungsintervall zwischen dem Zeitpunkt des ersten progressiven Kriechanstieges und dem Versuchsende
t	Dicke des Lagers im unbelasteten Zustand
τ_{max}	maximale rechnerische Schubspannung im Lager nach /4/

1 PROBLEMSTELLUNG

Durch die elastische Verformbarkeit (zusammengesetzt aus spontan-elastischer und elastisch-verzögerter Verformung) unbewehrter Elastomerlager werden innerhalb bestimmter Grenzen Abweichungen von der Ebenheit und Planparallelität zugehöriger Bauteildruckflächen ohne kritische örtliche Spannungsspitzen ausgeglichen. Die Standardanwendungen unbewehrter Elastomerlager regelt DIN E 4141 Teil 15 /1/. Zugehörige Lagerungen werden in DIN 4141 Teil 3 /2/ behandelt.

Untersuchungen an elastomergelagerten zentrisch und exzentrisch beanspruchten Stützenstößen /3/ haben gezeigt, daß die Betonfertigteile bei zweckmäßiger Bewehrungsführung auch bei durchaus "normalen" Spaltzugbewehrungen wesentlich höhere Spalt- und Querszugkräfte aufnehmen können als die zulässigen Lagerbeanspruchungen (nach DIN E 4141 Teil 15 /1/) hervorrufen. Auf der Grundlage dreiaxialer Verformungsmessungen an geometrisch unterschiedlichen Stützenköpfen und -füßen im Bereich der Gebrauchslast sowie durch Bruchversuche konnte ein einfaches Bemessungsverfahren entwickelt werden /3/. Dieses gilt für maximale mittlere Lagerpressungen bis 20 N/mm^2 .

Für stark bewehrte Stützenköpfe können Elastomerstöße wegen der Begrenzung der mittleren Pressung bisher nicht angewendet werden. Einerseits fehlt der Nachweis, daß das vorhandene Bemessungsverfahren auch bei höheren Spannungen anwendbar ist - was wegen der nichtlinearen Verformungen in diesem Bereich nicht ohne weiteres zu erwarten ist, andererseits liegen die angestrebten Elastomerbeanspruchungen bis etwa 35 N/mm^2 außerhalb des bisherigen Erfahrungsbereiches. Das schädigungsfreie Dauerstandverhalten ist für die bisher im bauaufsichtlichen Bereich zugelassenen Elastomerqualitäten auf der Basis von Chloropren-Kautschuk (CR) nur bis zu mittleren Druckspannungen von 20 N/mm^2 gesichert. Der Sonderfall der Stützenstöße wird für den Anwendungsbereich der DIN E 4141 Teil 15 - Lager im Bauwesen; Unbewehrte Elastomerlager /1/, ausgegrenzt.

Eine auf der Kontinuumsmechanik beruhende geschlossene Theorie des mechanischen Lagerverhaltens von Elastomeren /4/ erlaubt unter vereinfachenden Annahmen für die Werkstoffgesetze und für vollständigen Kraftschluß der Lagerflächen die Angabe eines Spannungszustandes. Über die Druckspannungsverteilung und die Verformungsvorgänge des Elastomerkissens in der Lagerfuge liegen experimentelle Ergebnisse vor /5/.

2 FORSCHUNGSZIEL UND VORGEHENSWEISE

Ziel des Forschungsvorhabens war die Klärung der Frage, ob unbewehrte Elastomerlager zwischen Stahlbetonbauteilen mittlere, ständige Pressungen zwischen 20 N/mm² und 35 N/mm² schadensfrei aufnehmen können.

Zu diesem Zweck sollten Dauerstandversuche an unbewehrten Elastomerlagern durchgeführt werden, deren Beanspruchungsparameter die Einsatzbedingungen bei hochbelasteten Stützenstößen simulieren. Es wurden die mittlere Pressung, die Exzentrizität der Lasteinleitung, die Größe der Lagerfläche und Lagerdicke variiert. Die Kriechverformung wurde über die Versuchsdauer kontinuierlich registriert. Nach Versuchsende wurden die Elastomerlager visuell auf eingetretene Veränderungen und Schädigungen bemustert. Als Werkstoff wurde zunächst aus Gründen der baupraktischen Bedeutung zugelassenes EPDM vorgesehen. Nach Vorliegen erster Versuchsergebnisse, die starke Strukturzerstörungen des Materials zeigten, wurde zusätzlich eine richtliniengemäße CR-Qualität /6/ in das Programm aufgenommen. Außerdem wurde vorgesehen, weitere zugelassene Werkstoffe in einem Ergänzungsvorhaben zu untersuchen.

3 KENNTNISSTAND

Erstmals wird der Einsatz von Elastomeren im Bauwesen 1890 zur gleichmäßigen Druckverteilung von Lagerplatten auf Mauerwerk erwähnt /7/. Eine Fülle von Untersuchungen an technischen Kunststoffen aller Art (z. B.

Polypropylen, glasfaserverstärktes Polypropylen, Elastomere) /8, 9, 10/ zeigt, daß die Relevanz des Kriechverhaltens bei Polymeren frühzeitig erkannt wurde. Trotz der vielfältigen Verwendung, insbesondere in den letzten Jahrzehnten, lassen sich in der Literatur jedoch kaum nennenswerte Angaben über das Dauerstandverhalten von Elastomeren finden.

Sasse und Schorn faßten 1971 eigene und fremde Ergebnisse zum Tragverhalten elastomerer Lager zusammen /11/. In Deutschland lag zu dieser Zeit nach anfänglichem Austesten unterschiedlicher Werkstoffe der Schwerpunkt bei der Verwendung von CR-Lagern. Für dieses Material wurden 1972 in vorläufigen Richtlinien des Instituts für Bautechnik, Berlin, Güteanforderungen aufgestellt, die bis heute im wesentlichen unverändert geblieben sind. Für das erheblich kostengünstigere Elastomer EPDM, das um 1980 wesentliche Marktbedeutung auf dem Lagersektor erlangte, wurden die gleichen Güteanforderungen wie für das Material CR in die bauaufsichtlichen Zulassungen übernommen. Beide Werkstoffe konnten in gleicher Weise verwendet werden /6/.

Sasse und Schorn erläutern die Reaktion eines unbewehrten Elastomerkeisens auf die Beanspruchung durch vertikale Lasten als eine Überlagerung von spontan-elastischen Zug-, Druck- und Schubverformungen mit Kriech- und Fließanteilen.

Unter Fließen wird dabei - im Gegensatz zur Terminologie bei Metallen, die unter Fließen eine plastische Werkstoffverformung versteht -, das Maß der geometriebedingten vertikalen Einfederung verstanden, das sich aus der lokalen Überwindung des Reibungsschlusses in den Kontaktflächen bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes ergibt.

Besonders wird angemerkt, daß

- die Lager auch bei starken Fließvorgängen im allgemeinen ihre Reißdehnungen nicht erreichen

- die Aufhebung des Reibungsschlusses schubweise erfolgen kann; dieser stick-slip-Vorgang wird mit der Überlagerung von Fließverformungen aus Vertikallasten und verformungsbedingten Horizontallasten erklärt.

Flohrer /12/ berichtet 1971 über Versuche an unbewehrten Elastomerlagern aus einer CR-Qualität höherer Härte (70 Shore A). Dieser Werkstoff zeichnet sich bei späteren Untersuchungen des ibac besonders durch seine relativ große Unempfindlichkeit gegenüber tiefer Temperatur aus, während seine hohe Steifigkeit bei Normaltemperatur zu gewissen Beschränkungen Anlaß gibt.

Bei Kriechversuchen mit einer mittleren Pressung von 10 N/mm^2 und einer Lagerfläche von rd. $200 \times 200 \text{ mm}^2$ sowie variierender Kontaktflächenrauheit (polierte Stahlplatten, stahlgeschalter Beton, Sandpapier) stellt Flohrer für die Kriechverformung nach einer Belastungsdauer von 38 d fest:

- weitgehende Unabhängigkeit von der Kontaktflächenrauheit
- weitgehende Unabhängigkeit vom Formfaktor
- Erreichen von $\geq 90 \%$ der Endverformung bereits 30 min nach Lastaufbringung.

Er definiert als Endkriechmaß die Kriechverformung zwischen dem Belastungsintervall $T_0 = 30 \text{ min}$ und $T_\infty = 38 \text{ d}$, dividiert durch die Summe der spontan-elastischen und verzögert-elastischen Einfederung innerhalb der ersten 30 min. Nach diesen Versuchen ist $0,05 \leq \phi_\infty \leq 0,12$ für Lagerdicken $10 \text{ mm} \leq t \leq 40 \text{ mm}$ (Formfaktoren $S = 5,0$ bis $1,25$). "Stick-slip-Effekte" wurden nicht festgestellt.

Flohrer berichtet über Zerstörungsversuche mit Elastomerlagern, die zwischen polierten Stahlplatten zügig bis zu einer Pressung von 125 N/mm^2 beaufschlagt wurden. Bei den Kurzzeitversuchen stellen sich bei einer Pressung von etwa $\sigma_m = 50 \text{ N/mm}^2$ deutlich Risse an den Seitenflächen ein, bei $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ registriert er rd. 1 mm tiefe "Aufrauungen" an den Oberflächen.

In /13/ wird der Versuch unternommen, von der Einfederung im Belastungsintervall von 6 s bis 6000 s ($\hat{=}$ 1,7 h) auf die Einfederung nach 19 Jahren zu schließen. Der Autor extrapoliert von einer Einfederung von 10 % der Lagerdicke nach 6000 s auf eine Einfederung von 27 % nach rd. 19 Jahren. Angaben über die zugrundeliegende mittlere Pressung sowie die Formfaktoren liegen nicht vor.

Mitte der 70er Jahre wurden an der TU Berlin Rechenansätze und -methoden zur Verifikation experimentell ermittelter ebener Verformungszustände entwickelt /14, 15/. Die nichtlineare Verformungstheorie geht jedoch von speziellen Randbedingungen wie Lagergeometrie (Formfaktor), Kriterien für die lokale Überwindung des Reibungsschlusses in den Kontaktflächen (Fließen) oder Materialkennwerten aus Zugversuchen aus. Eine Parameterstudie zur Eingrenzung baupraktischer Randbedingungen sowie eine Erweiterung auf dreidimensionale Probleme erfolgte nicht. Für bauübliche Lager und Lagerungsbedingungen wurde aus den theoretischen Arbeiten kein handhabbares Rechenverfahren abgeleitet. Langzeitverformungen (Kriechen) werden in den Rechenansätzen nicht berücksichtigt.

Über Dauerstandversuche der Firma Du Pont (USA) wird in /16/ berichtet. Die Autoren geben für Neopren-Lagerkissen nach einer Kriechdauer von rd. 10 Jahren eine Einfederung, bezogen auf die Anfangseinfederung, von 25 % bis 45 % bei Härtegraden von 50 bis 70 Shore A an. Angaben über den Versuchsergebnissen zugrundeliegenden Versuchsparametern (mittlere Pressungen, Formfaktoren) werden nicht gemacht.

Kordina und Osteroth berichten in /17/ über Versuche an bewehrten und unbewehrten Elastomerlagern. Für unbewehrte Elastomerlager geben sie u. a. für eine Belastungsdauer von 192 min unter einer mittleren Pressung $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ und einem Drehwinkel von $\text{tg } \alpha = 0,03$ Kriechmaße bezogen auf die 5 Minuten nach der Belastung erreichte Verformung an. Nach diesen Versuchen ist $0,04 \leq \phi_\infty \leq 0,16$ für Lagerdicken $10 \text{ mm} \leq t \leq 20 \text{ mm}$ und Formfaktoren $5,0 \geq S \geq 2,5$.

Wood /18/ unterscheidet ausgehend von der Kriechfunktion

$$\frac{\epsilon - \epsilon_1}{\epsilon_1} = A \log T + B (T - 1)$$

ϵ = Kriechdehnung

ϵ_1 = Kriechdehnung nach einem definierten Belastungsintervall nach der Lastaufbringung

A, B = zeitunabhängige Konstante

T = Belastungsintervall (obere Grenze)

physikalisches und chemisches Kriechen, deren Kriechverläufe er getrennt ermittelt; diese Darstellung der Kriechfunktion bezeichnet er mit "fractional creep".

Aufgrund eigener und fremder Versuche unterteilt er den Kriechverlauf über der logarithmischen Zeitachse in einen linear mit $\log T$, einen linear mit T und einen progressiv ansteigenden Bereich. Letzteren definiert er mit "pre rupture", da der Anstieg in der Kriechgeschwindigkeit den Versagensmechanismus einleitet. Wood findet den Beginn des progressiven Kriechanstieges bei einer Belastungsdauer von rd. 30 Tagen, berichtet aber auch über ähnliche Ergebnisse anderer Forscher nach 120 bis 240 Tagen.

Elastomere weisen infolge der dreidimensionalen strukturellen Fixierung durch Brückenbindungen zwischen den Molekülen kein plastisches Verhalten auf /19/. "Fließen" kann nur durch chemorheologische Effekte (chemische oder physikalische Änderung der Struktur), z. B. infolge Umlagerung oder Lösen von Vernetzungsstellen, Zersetzung oder Alterung, eintreten. Materialeigenschaften wie Zugfestigkeit, Volumen- und Strukturkonstanz infolge mechanischer Beanspruchung werden wesentlich von der Vernetzungsstruktur bestimmt, wobei nicht nur die Anzahl der Vernetzungspunkte, sondern insbesondere die Vernetzungsbrückenart, d. h. die chemische Struktur der Vernetzungsbrücke, von Relevanz sind. Die Vernetzungsstruk-

tur ist werkstoffspezifisch, wobei die Bindungsenergie u. a. von der Anzahl der Schwefelatome je Vernetzungsstelle abhängt.

In /20/ werden für die Ursachen von molekularen Versagensvorgängen in Elastomeren

- partielles Abgleiten von Molekülteilen
- Bruch von Polymerketten oder Vernetzungen
- Hohlrumbildung als Folge von Kettenbruch oder Gleiten
- Ablösen der Polymermatrix von den Füllstoffpartikeln

genannt.

Mikrohohlräume können als erste Stufe der RiBausbildung angesehen werden. Infolge von Kettenbrüchen und nachfolgender, zunächst submikroskopischer RiBausbildung,

- tritt eine Beschleunigung des Kriechens auf
- kommt es häufig zu irreversiblen Deformationen (anstelle der bei mäßig beanspruchten Elastomeren üblichen elastisch-verzögerten Verformungen)
- wird die Bruchspannung herabgesetzt.

Im Rahmen von Eignungsprüfungen führte das ibac in den Jahren 1977 bis 1981 Kriechversuche an bewehrten CR-Lagern sowie unbewehrten profilierten SBR-Lagern (Styrol-Butadien-Kautschuk), sowohl unter Normalbedingungen (zul σ , 23 °C) als auch unter erhöhten Pressungen und/oder erhöhten Temperaturen (+40 °C) durch /21, 22/. Als Kontaktflächen wurden polierte Stahlplatten verwendet. Die Pressungen reichten bis 15 N/mm² bei den unbewehrten Lagern und bis 22,5 N/mm² bei den bewehrten. Die Belastungsdauer belief sich auf max. 270 Tage. In diesem Zeitraum wurde in allen Fällen das Endmaß des vertikalen Einfederns ausgehend von $T_0 = 30$ Minuten /11/ schadensfrei erreicht.

Zusammenfassend ist zu den spärlichen Erfahrungen über das Dauerverhalten unbewehrter Elastomerlager unter Druckbeanspruchung festzustellen, daß

- die dabei angelegten Pressungen nicht das Niveau der bei Stützenstößen im Betonfertigteilbau anzuzielenden Werte erreichen (auch nicht bei bewehrten Lagern)
- weder den Kontaktflächen noch der Belastungsgeschwindigkeit ein deutlicher Einfluß auf das weitere zeitabhängige Einfedern oder den Eintritt von Werkstoffschäden zugewiesen wird
- ausgehend von $30 \text{ min} \leq T_0 \leq 1 \text{ d}$ der weitere Verlauf der Verformungs-Zeit-Kurven exponentiell beschrieben werden kann, solange kein strukturelles Versagen des Werkstoffes eintritt.

Zur Konzeption und Detailplanung des Forschungsvorhabens wurden alle maßgebenden Firmen und Fachverbände aus dem Bereich Synthese-/Naturkautschuk nach unveröffentlichten, einschlägigen Erfahrungen über diesen Problemkomplex gefragt. In keinem Fall konnten zusätzliche verwertbare Ergebnisse erlangt werden.

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 Umfang der Untersuchungen

Für die Dauerstandversuche wurde gemäß Richtlinien /6/ bzw. bauaufsichtlicher Zulassung güteüberwachtes EPDM- und CR-Material eines Herstellers verwendet. Bei dem durchgeführten Versuchsprogramm wurden die Versuchsparameter

- Formfaktor (Lagerfläche und -dicke)
- Exzentrizität der Lasteinleitung (Drehwinkel)
- mittlere Lagerpressung

in einem nicht vollständigen Faktorversuch bei den konstanten Einflußgrößen

- Art der Kontaktflächen
- Belastungsgeschwindigkeit

in folgenden Stufen variiert (Tabelle 1):

Tabelle 1: Übersicht über die Parametervariationen

Parameter	Variation		
Elastomerqualität (Elastomertyp)	Δ		•
	CR1		EPDM1
Lagerfläche A ¹⁾ (mm ²)	A1	A2	A3
	100x100	100x200	200x200
Lagerdicke t ²⁾ (mm)	t ₁		t ₂
	5		10
Drehwinkel α	α_1		α_2
	0		0,3 t/a
mittlere Pressung σ_m ³⁾ (N/mm ²)	σ_{m1}	σ_{m2}	σ_{m3}
	20	40	60

1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand

2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand

3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

In das Versuchsprogramm wurden die folgenden Kombinationen der obengenannten Beanspruchungsparameter aufgenommen:

Tabelle 2: Übersicht über den Versuchsumfang
(Kurzzeichen siehe Tabelle 1)

		σ_{m1}		σ_{m2}		σ_{m3}	
		α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2
A ₁	t ₁	$\Delta \bullet$	•	$\Delta \bullet$	$\Delta \bullet$	$\Delta \bullet$	-
	t ₂	$\Delta \bullet$	•	-	-	$\Delta \bullet$	-
A ₂	t ₁	-	-	-	-	$\Delta \bullet$	-
	t ₂	-	-	-	-	$\Delta \bullet$	-
A ₃	t ₁	•	•	$\Delta \bullet$	-	-	-
	t ₂	-	-	$\Delta \bullet$	-	-	-

Es ergaben sich insgesamt 24 Parameterkombinationen, wobei je Parameterkombination ein Versuch zugrundegelegt wurde (Tabelle 2). In Tabelle 3 sind für jeden Versuch die Versuchsparameter detailliert zusammengestellt.

Tabelle 3: Versuchsumfang und zugehörige Parameterkombination

Versuch Nr.	Elastomerqualität	Lagerfläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung
	-	A ¹⁾	t ²⁾	-	σ_m ³⁾
	-	mm ²	mm	mm	N/mm ²
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20

1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand

2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand

3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

4.2 Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Dauerstandversuche war im ibac die Konzeption und Herstellung von 6 Kriechständen mit einfach wirkenden Hydraulikzylindern erforderlich. Die für Untersuchungen an Beton, Mauerwerk und Kunststoffen üblichen Kriech- und Dauerstandseinrichtungen konnten vor allem wegen der geforderten besonderen Geometrie- und Belastungsverhältnisse (u. a. exzentrische Lasten) nicht verwendet werden. Der Aufbau und die Hauptmaße der Stände sind in Bild 1 skizziert, die hydraulische Ausstattung ist in Tabelle 4 angegeben.

Zusätzlich wurde eine Druckprüfmaschine, LOS 5 MN, Klasse 3, durch eine Vorrichtung zur Festlegung der oberen Kalotte sowie ein zusätzliches Absperrventil in der Druckleitung umgerüstet.

Tabelle 4: Hydraulische Ausstattung der Dauerstände

	Lastbereich		
	0.5 MN	1.0 MN	2.0 MN
Druckzylinder	Lukas	Eberspächer	
Typ	HP 50/50/0	ZE 688	ZE 690
max. Weg	50 mm		
Druckspeicher	Leduc, Stickstoff-Füllung 300 bar		
Volumen	0.5 l		
Druckanzeige	Manometer, Klasse 0.6		
Meßbereich	400 bar		
Druckversorgung	Motorpumpe/Stickstoffspeicher		
Steuerung	Dreiwegeventil		

Als Kontaktflächen dienten in Stahlrahmen einbetonierte, unbewehrte Feinbetonscheiben, die Zusammensetzung ist in Tabelle 5 angegeben.

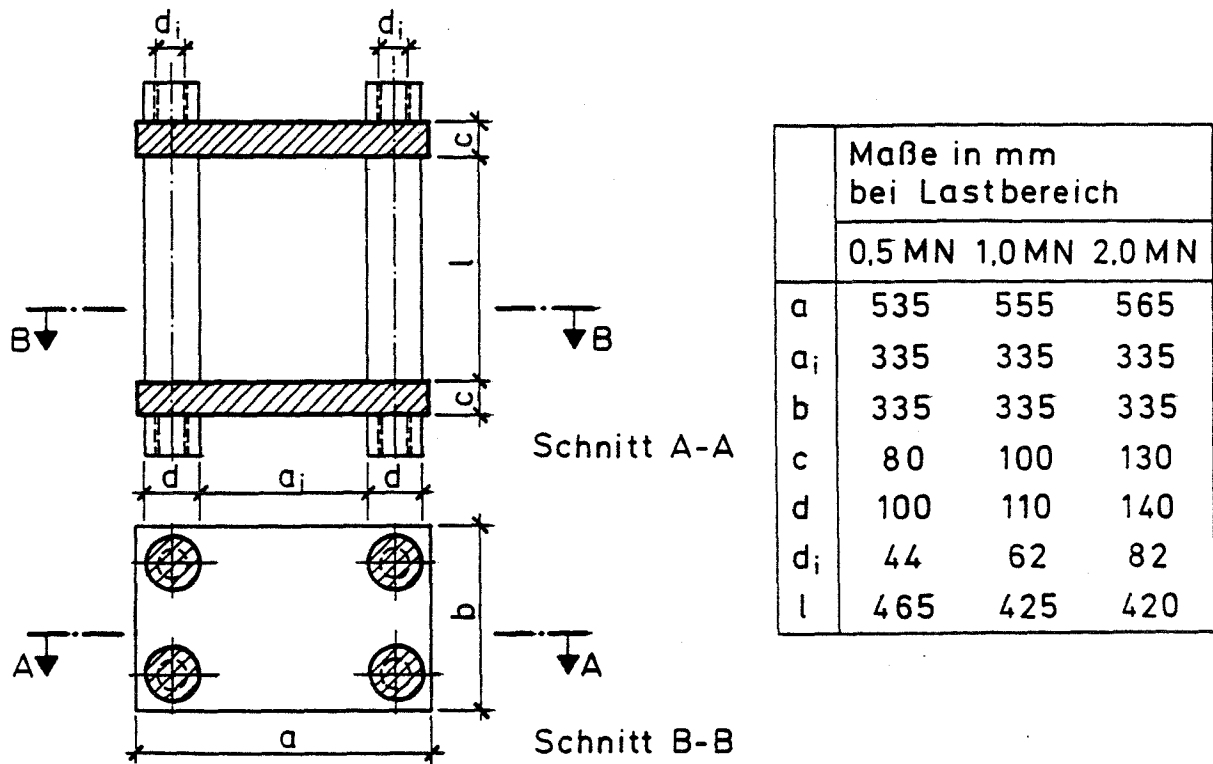


Bild 1: Prinzipieller Aufbau und Hauptmaße der Dauerstände

Nach Erreichen der 7 Tage-Festigkeit wurden die glatt geschalteten Kontaktflächen zur Entfernung von unerwünschten Oberflächenbelegungen (z. B. Schalölrückständen) /1/ hochdruckwassergestrahlt. Bei Versuchswiederholung wurden die Flächen ebenfalls durch Hochdruckwasserstrahlen von Elastomerrückständen gereinigt.

Tabelle 5: Zusammensetzung des Feinbetons für die Kontaktflächen

Komponente	kg/m ³
Zement PZ 45 F	350.0
Wasser	175.0
Fließmittel Melment L10	13.3
Zuschlag Rheinsand, Sieblinie B8	2600.0

Die Proben wurden je Dauerstand in zwei Ebenen zwischen den Feinbetonscheiben eingebaut, die Anordnung wird in Bild 2 skizziert. Bei exzentrischer Lasteinleitung wurden je Prüfebene 2 Proben zur Erzielung annähernd zentrischer Beanspruchung der Hydraulikkolben angeordnet.

Der Drehwinkel wurde durch Neigung der Feinbetonscheiben (Kontaktflächen um $\alpha = 0,3 \text{ t/a}$) erzeugt. Für die variierten Lagerflächen (A1, A3) ergeben sich die folgenden Höhendifferenzen der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerabmessung im unbelasteten Zustand (Tabelle 6, Bild 2):

**Tabelle 6: Drehwinkel
Höhendifferenz der Feinbetonscheiben bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand**

Lagerfläche A mm ²	Lagerdicke t mm	Höhendifferenz der Feinbetonscheibe bezogen auf die Lagerfläche im un- belasteten Zustand mm
100 x 100	5	2,1
	10	4,2
200 x 200	5	1,8

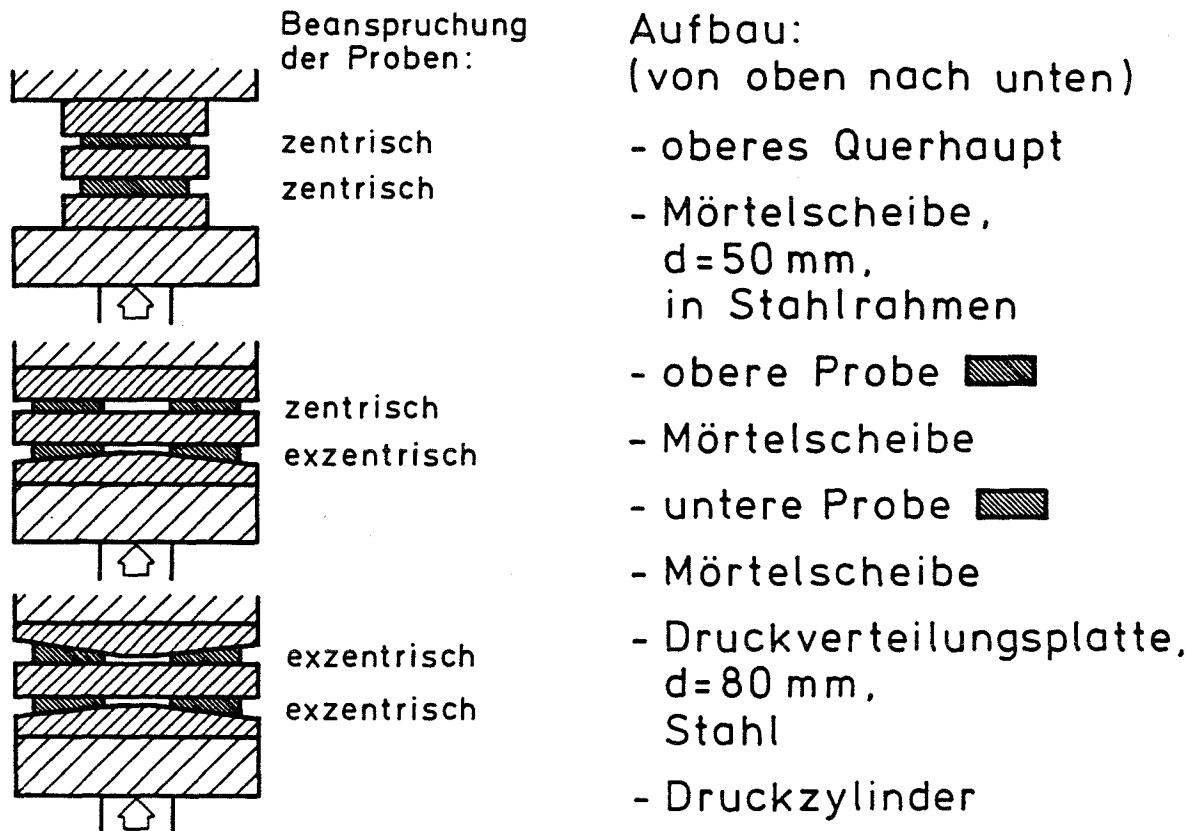


Bild 2: Anordnung der Lager-Proben in den Dauerständen

Die Einfederung der Lagerproben in jeder Prüfebene (Lagerebene) wurde jeweils mittels zweier diagonal angeordneter Meßuhren der Genauigkeit $\pm 0,01$ mm gemessen, aus den Meßwerten je Prüfebene wurde das arithmetische Mittel gebildet.

4.3 Belastungsvorgang

Vor Versuchsbeginn wurden die Druckmeßeinrichtungen der Kriechstände kalibriert und die entsprechenden Arbeitsdrücke festgelegt. Die zur Konstanthaltung der Lasten angeordneten Gasspeicher im Hydrauliksystem wurden mit einem Stickstoffpolster gefüllt. Zur Nullablesung der Meßuhren wurde zunächst eine Vorbelastung von 3 bar aufgebracht.

Anschließend wurde die kriecherzeugende Spannung handgeregelt und stoßfrei über eine Motorpumpe in rd. 2 Minuten angefahren. Der Gasdruckspeicher wurde daraufhin zugeschaltet. Wegen des relativ kleinen Druckspeichervolumens mußte infolge der raschen Anfangsverformung bis $T = 30$ Minuten dieser Vorgang einige Male wiederholt werden.

Die Lastaufbringung an der 500 t-Druckprüfmaschine erfolgte in vergleichbarer Weise, es wurde als Vorlast zur Nullablesung der Meßuhren 10 % der Sollast aufgebracht. Die maschinelle Ölförderung lief bis $T = 30$ Minuten, dann wurde die Druckleitung abgesperrt und der vorgesehene Arbeitsdruck wurde ebenfalls durch einen Gasdruckspeicher konstant gehalten.

4.4 Meßwerterfassung und Versuchsdauer

Im Verlauf der Langzeitversuche wurde der Druck regelmäßig kontrolliert und im Bedarfsfall wurde maschinell nachgepumpt.

Die Ablesungen der Meßuhren für die Lagerstauchungen erfolgten am 1. Belastungstag stündlich, in der 1. Belastungswoche täglich und dann in wöchentlichem Turnus.

Bei erkennbarer Gefügezerstörung des Probenmaterials durch visuelle Kontrollen im Lagerspalt und/oder durch starke Kriechgeschwindigkeitszunahme wurden die Versuche abgebrochen und die Kriechstände mit Proben ande-

rer Parameterkombinationen neu belegt (Tabelle 7). Die maximale Belastungsdauer bei den Proben, deren Kriechverhalten nicht auf Gefügeschäden hindeutete, betrug rd. 700 Tage ($\hat{=}$ 1,92 Jahre).

Tabelle 7: Parameterkombinationen und zugehörige Belastungsdauer

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Lager- fläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung	Belastungs- dauer
	-	A ¹⁾	t ²⁾	-	σ_m ³⁾	-
	-	mm ²	mm	mm	N/mm ²	d
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60	25
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60	25
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60	700
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60	700
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60	30
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60	30
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60	410
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60	410
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20	400
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20	400
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20	280
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20	280
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20	560
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20	560
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40	330
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40	330
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40	240
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40	240
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40	330
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40	330
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40	420
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40	420
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20	580
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20	580

1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand

2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand

3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

5 VERSUCHSERGEBNISSE

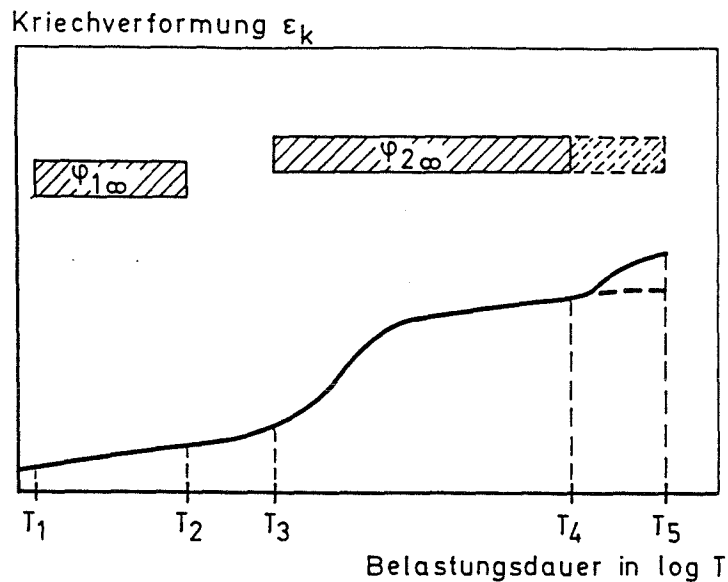
5.1 Kriechkurven

Eine im Bauwesen geläufige Beschreibung des Kriechverhaltens ist die Extrapolation nach Ross /23/. In /24/ wird der Nachweis erbracht, daß die Ross-Auswertung das Kriechverhalten von Beton in einem bestimmten Zeitraum zutreffend beschreibt. Das einfach zu handhabende Verfahren erscheint auch für Kunststoffe geeignet /25/.

Auch bei Polymer-Werkstoffen nehmen die Verformungen unter Last mit der Zeit (stetig, aber immer langsamer) zu; ein Ende des Kriechens kann nicht festgestellt werden. Unter hoher Belastung stellt sich nach bestimmter Belastungsdauer bei Elastomeren eine mehr oder weniger ausgeprägte Zunahme der Kriechgeschwindigkeit ein /18/, ähnlich wie dies bei anderen Werkstoffen in der Nähe der Zeitstandfestigkeiten auch beobachtet wird.

Eine qualitative Prinzipdarstellung der Kriechkurven zeigt Bild 3. Das Kriechen wird ab einem Belastungsintervall $T = 5 \text{ min}$ (T_1) nach der Lastaufbringung betrachtet. In einem kurzen Zeitintervall von $T = 1 \text{ d}$ (T_2) kann in der Regel Kriechen mit geringer, relativ konstanter Kriechgeschwindigkeit beobachtet werden. Aus diesem Zeitintervall wird das Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ extrapoliert (vgl. Bild 3).

Nach einem progressiv ansteigenden Bereich der Kriechkurve verläuft die Kriechfunktion in der Regel mit relativ konstanter, jedoch größerer Steigung als im Zeitintervall zur Extrapolation von $\phi_{1\infty}$. Vereinzelt kann nach längerer Belastungsdauer ein weiterer progressiver Kriechanstieg registriert werden. Aus dem Belastungsintervall, beginnend mit dem ersten progressiven Kriechanstieg (T_3), bis zum Versuchsende (T_4) bzw. nach einem weiteren Kriechanstieg (T_5) wird das Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$ extrapoliert (vgl. Bild 3). Die versuchsmäßig ermittelten Kriechkurven (gemäß dem Versuchsumfang Tabelle 1) sind in den Bildern 4 bis 17 dargestellt.




T_1 :	5 Minuten		Belastungsintervall zur Extrapolation des Kriechmaßes $\psi_{i\infty}$
T_2 :	1 Tag		
T_3 :	1. Kriechanstieg		
T_4 :	2. Kriechanstieg		
T_5 :	Versuchsende		

Bild 3: Prinzipdarstellung der Kriechkurven und der Belastungsintervalle zur Extrapolation eines Kriechmaßes

Die Kriechkurven werden als Verhältnis $\epsilon_k = \Delta t/t$ (mm/m) über der logarithmischen Zeitachse aufgetragen, wobei Δt auf die Anfangseinfederung 5 Minuten nach Belastungsbeginn bezogen wird. Eine Differenzierung zwischen elastisch-verzögerter Verformung und plastischer Kriechverformung konnte nicht erfolgen, da die Kontaktflächengeometrie und die Versuchseinrichtung die Bestimmung des "Rückkriechens" nicht ausreichend genau ermöglichen.

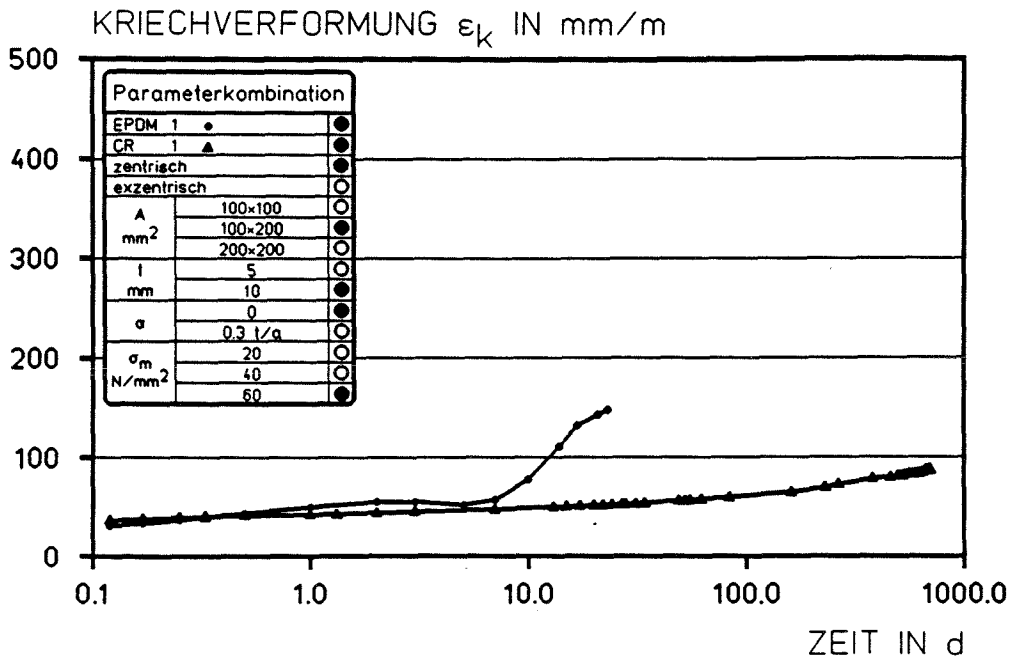


Bild 4: Kriechkurven-Versuch Nr. 1 und 3

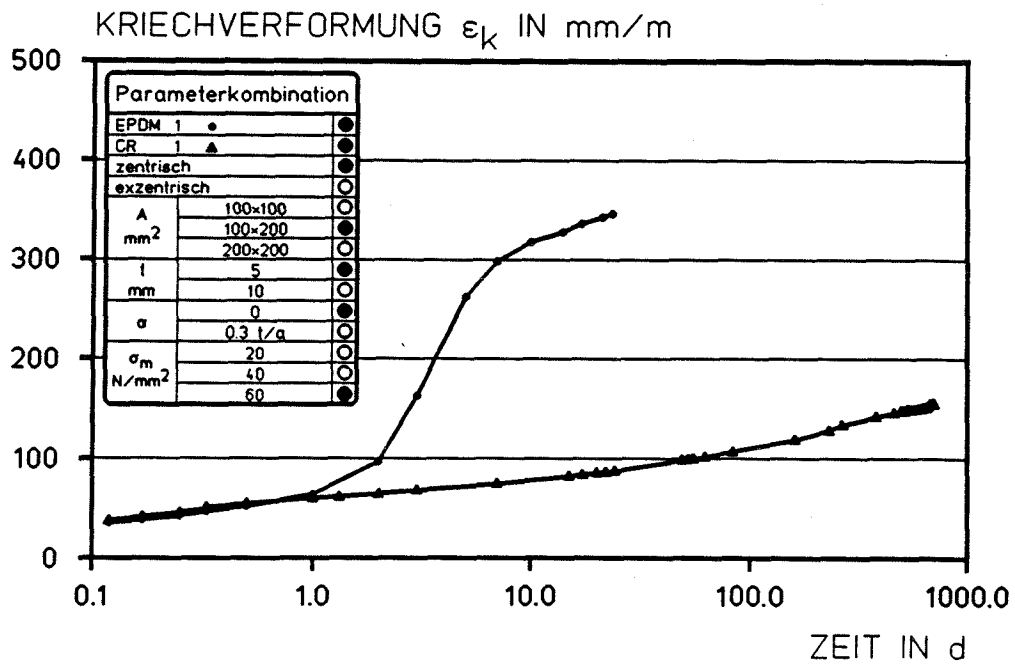


Bild 5: Kriechkurven-Versuch Nr. 2 und 4

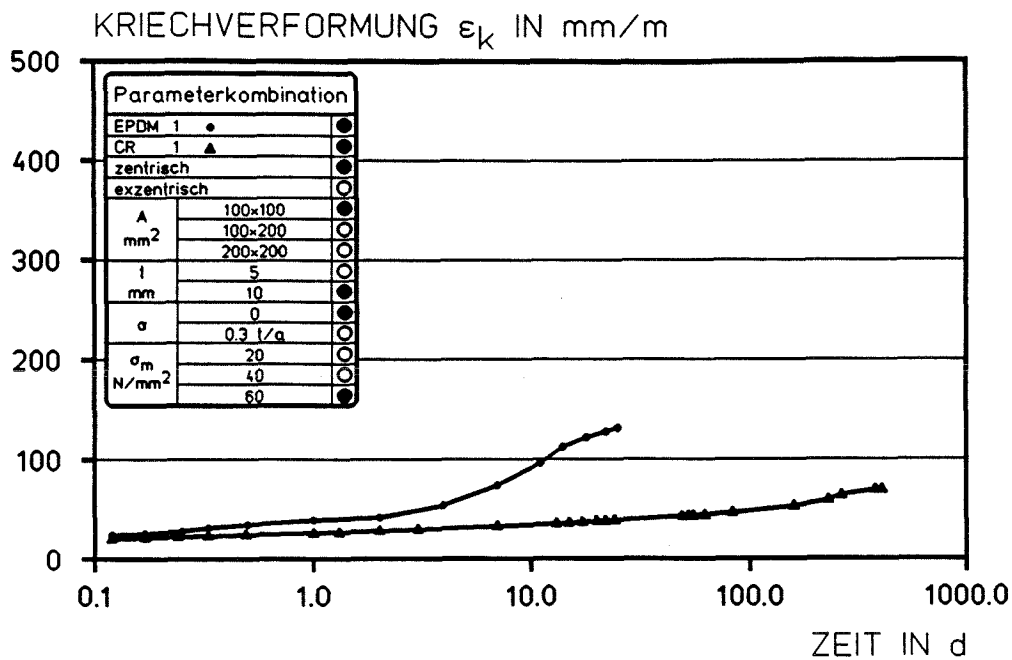


Bild 6: Kriechkurven-Versuch Nr. 5 und 7

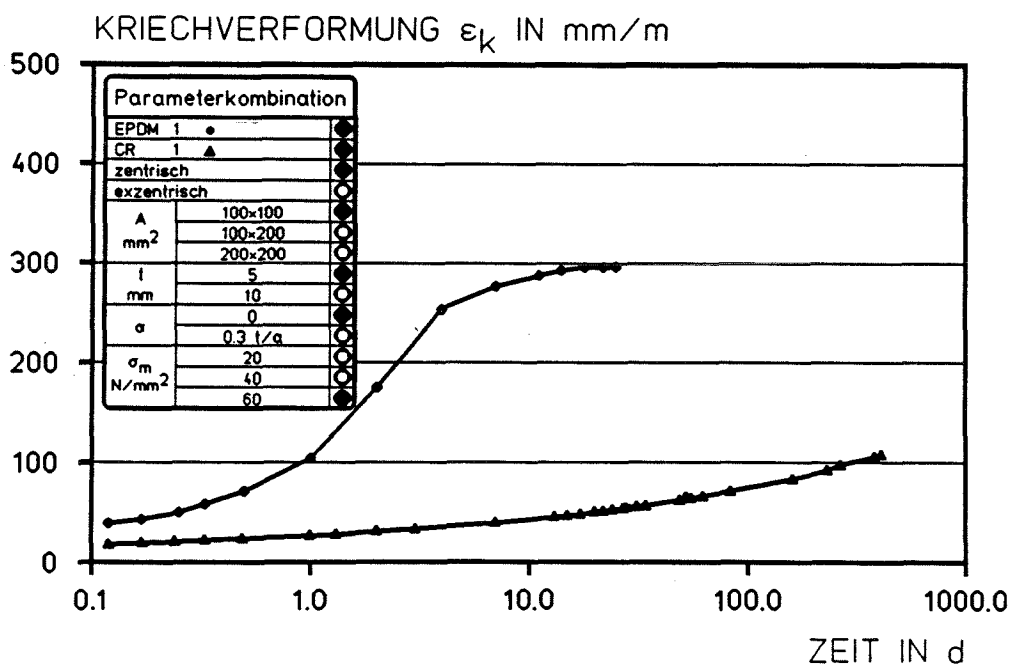


Bild 7: Kriechkurven-Versuch Nr. 6 und 8

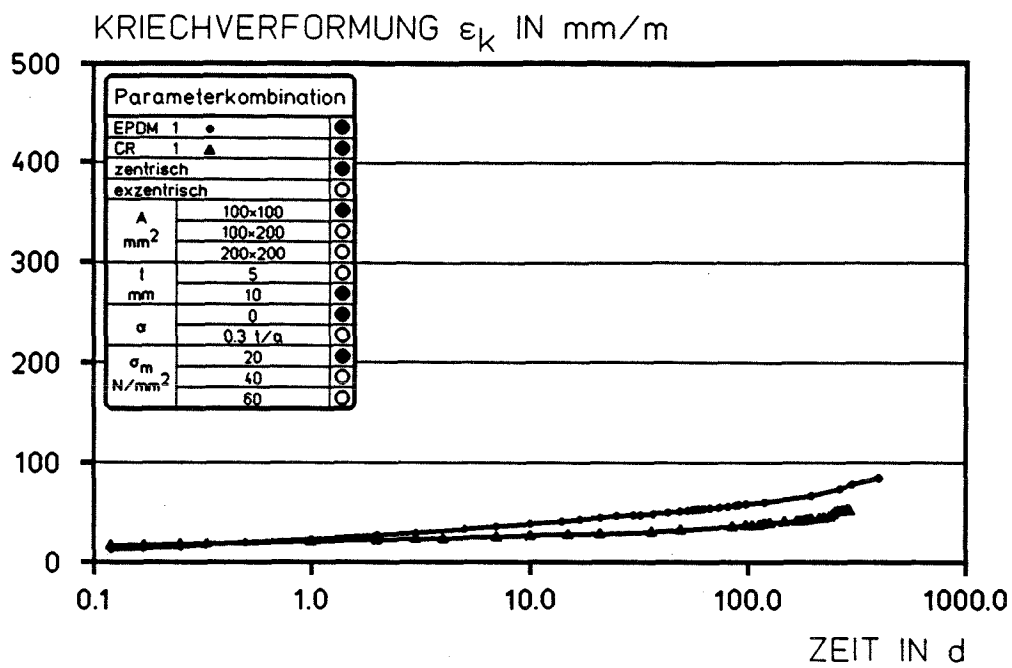


Bild 8: Kriechkurven-Versuch Nr. 9 und 11

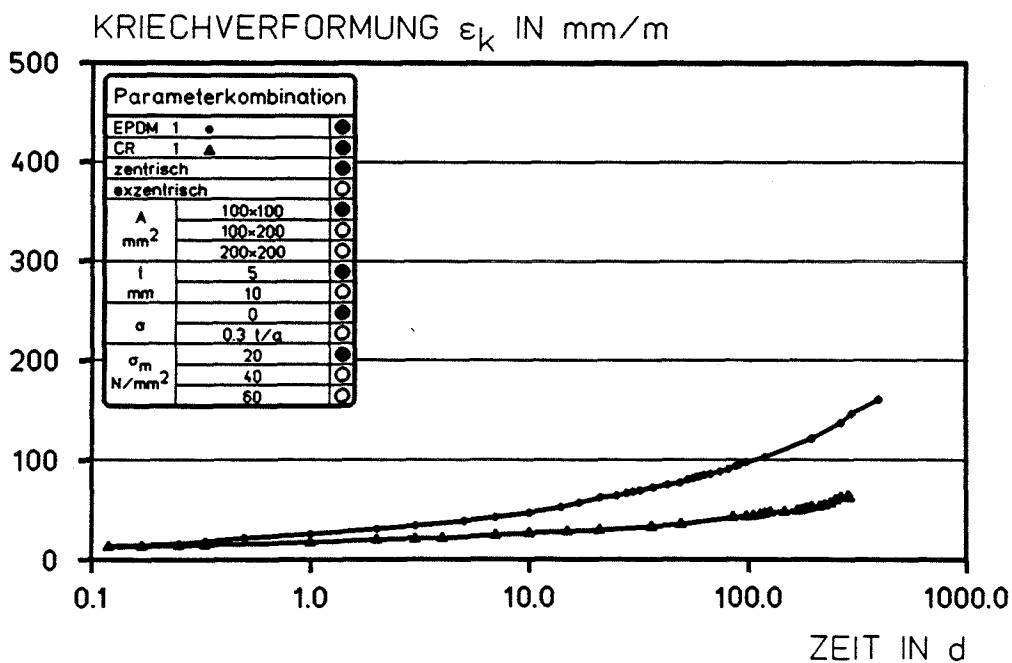


Bild 9: Kriechkurven-Versuch Nr. 10 und 12

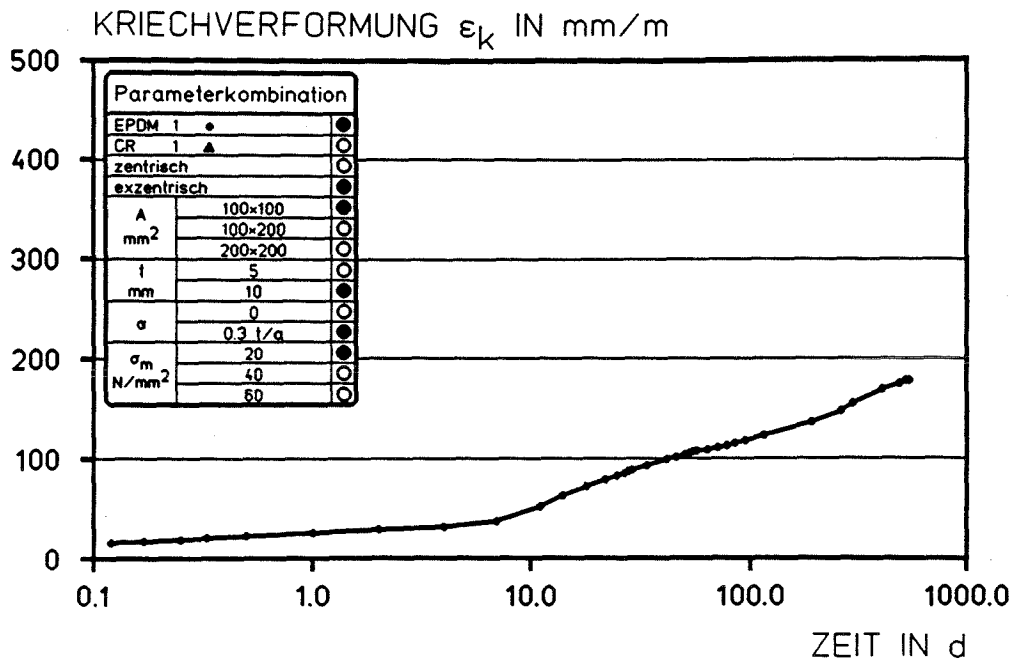


Bild 10: Kriechkurven-Versuch Nr. 13

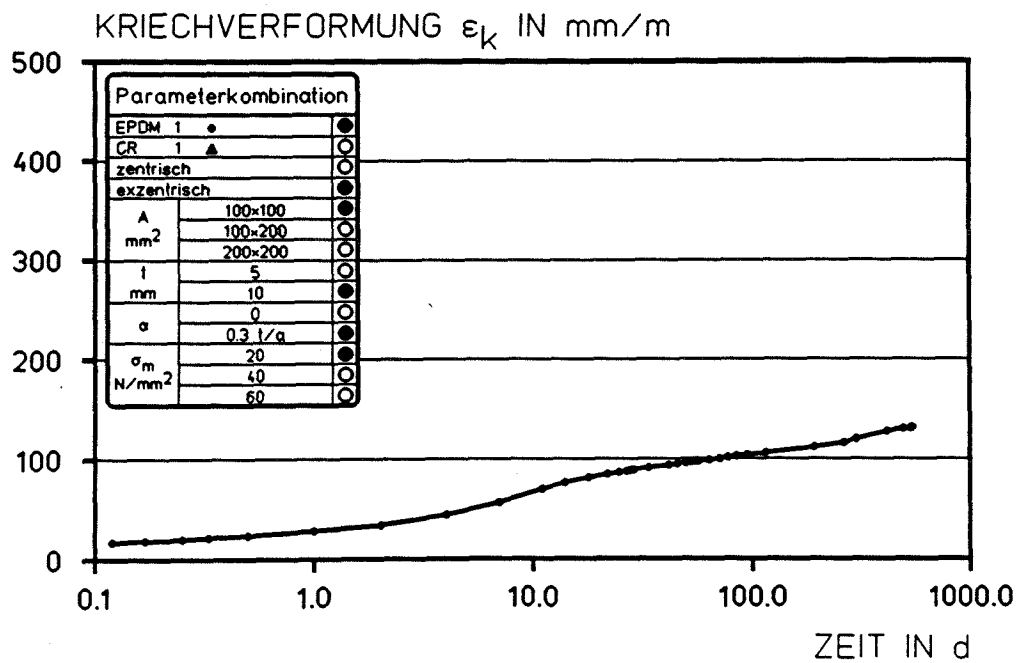


Bild 11: Kriechkurven-Versuch Nr. 14

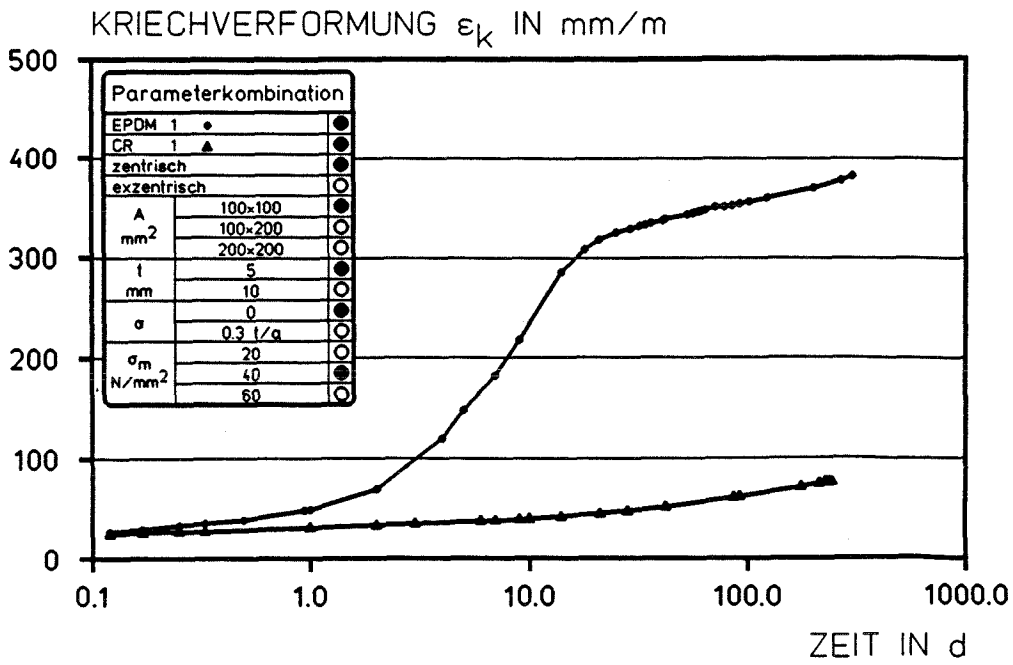


Bild 12: Kriechkurven-Versuch Nr. 15 und 17

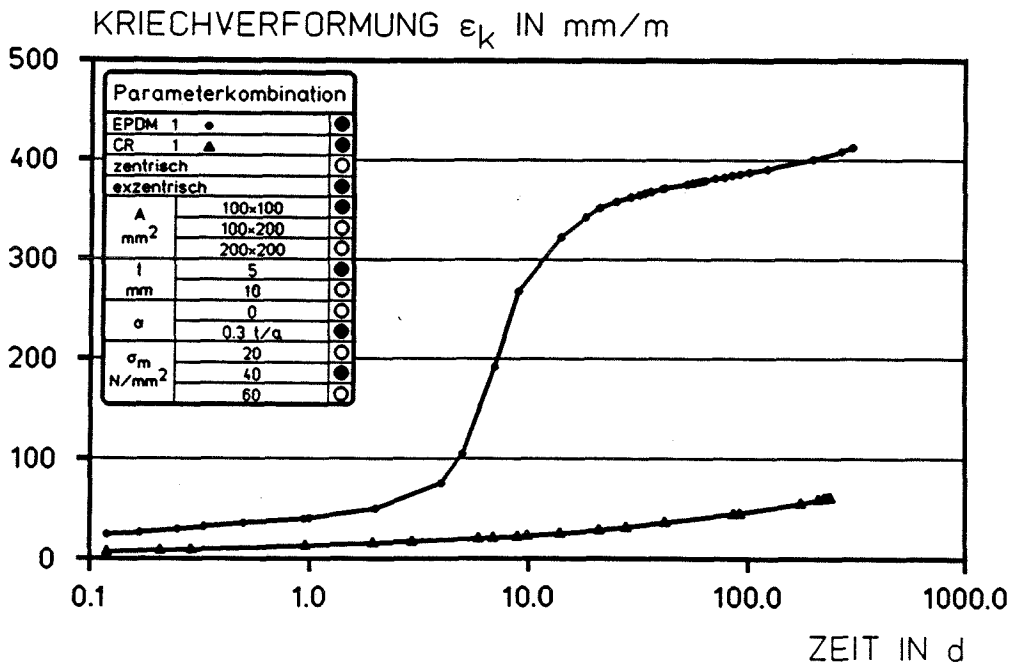


Bild 13: Kriechkurven-Versuch Nr. 16 und 18

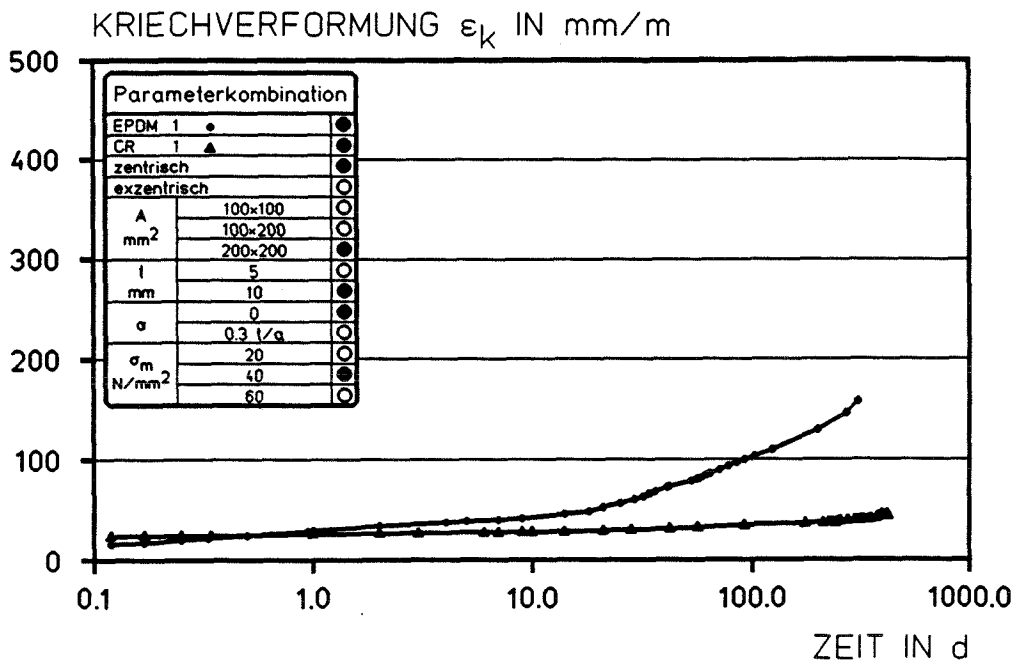


Bild 14: Kriechkurven-Versuch Nr. 19 und 21

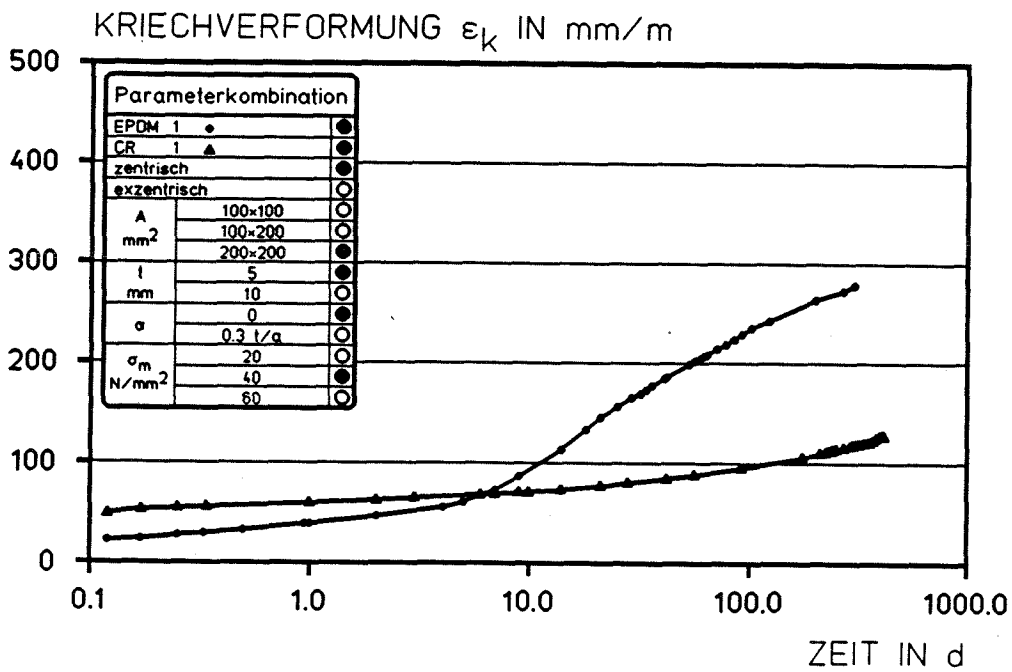


Bild 15: Kriechkurven-Versuch Nr. 20 und 22

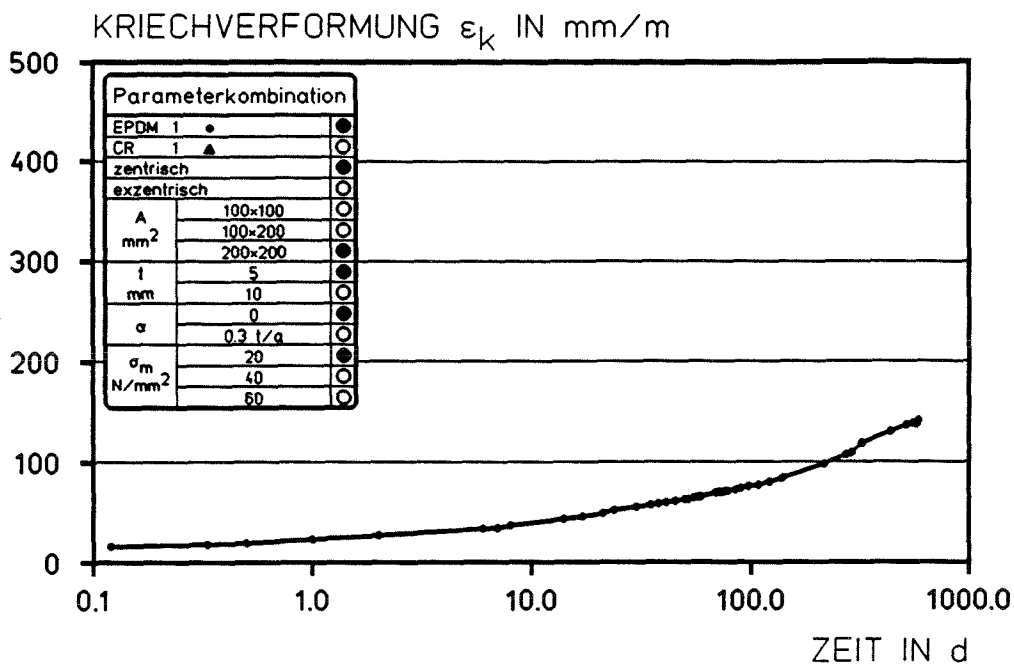


Bild 16: Kriechkurven-Versuch Nr. 23

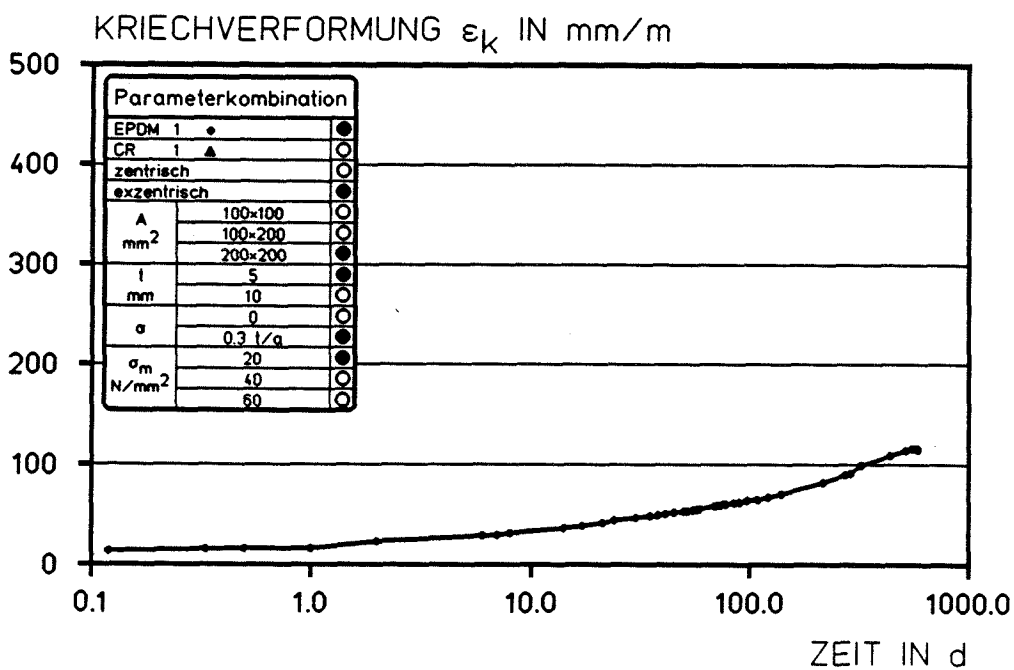


Bild 17: Kriechkurven-Versuch Nr. 24

5.2 Endkriechmaße

Das Extrapolationsverfahren nach Ross überführt eine hyperbolische Kriechfunktion im Bereich ihrer Asymptote durch numerische Umformung in eine Geradengleichung der Form $T/\phi_T = a + b \cdot T$. Die Steigung der Geraden $\text{tg } \alpha = b = 1/\phi_\infty$ liefert das Endkriechmaß ϕ_∞ ($T = \text{Zeitvariable}$, a und b belastungs- und werkstoffabhängige Konstanten).

Der Funktionswert T/ϕ_T wird nach folgendem Zusammenhang ermittelt:

$$\phi_T = \epsilon_K \cdot \frac{E}{\sigma_m} \quad T/\phi_T = T \cdot \frac{t}{\Delta t} \cdot \frac{\sigma_m}{E}$$

Molekulare Versagensvorgänge im Elastomer führen nach /19/ zu einer Beschleunigung des Kriechens. Zur quantitativen Beurteilung der Kriechneigung wurde daher ein "Endkriechmaß" nach Ross vor Eintritt erkennbarer Schädigungsmechanismen ($\phi_{1\infty}$), und für die Kriechfunktion ab dem ersten progressiven Anstieg bzw. bis zu einem zweiten progressiven Anstieg ($\phi_{2\infty}$), ermittelt. Die Belastungsintervalle zur Extrapolation des "Endkriechmaßes" nach Ross sind qualitativ in Bild 3 dargestellt. Bild 18 zeigt exemplarisch eine in eine Ross-Funktion übergeführte Kriechkurve.

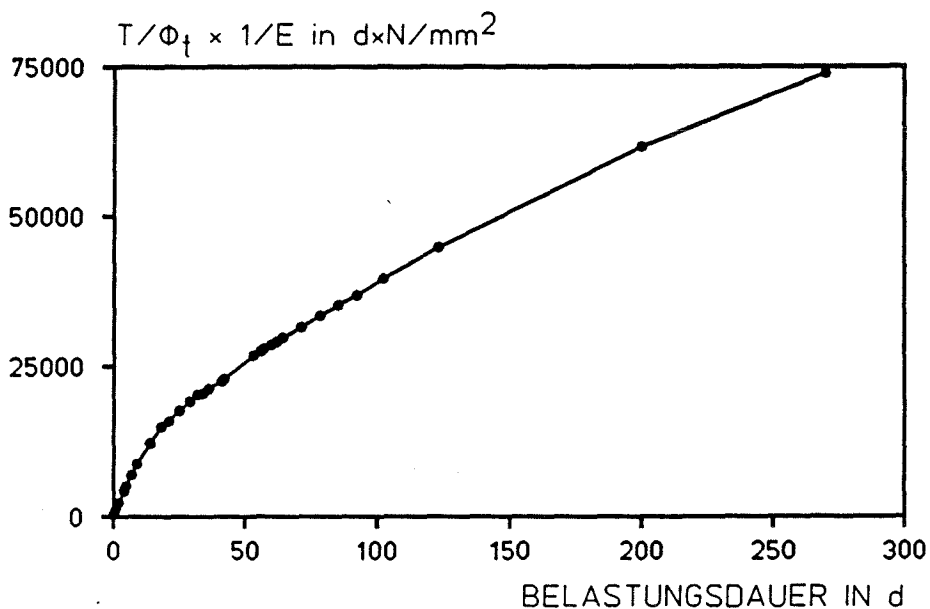


Bild 18: Kriechfunktion nach Ross /23/ zur Ermittlung des Endkriechmaßes

In /4/ wird ein von der Pressung unabhängiger Ansatz zur Ermittlung des E-Moduls gegeben. Aus der Literatur /26/ sind jedoch vielfältige Einflüsse auf den E-Modul von druckbeanspruchten Elastomeren bekannt, so daß eine eindeutige Angabe für die vorliegenden Geometrien und Belastungen nicht möglich ist.

Tabelle 8: "Elastische Verformung" und "Elastizitätsmodul"

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Lager- fläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung	"Elastische Verformung"	"Elastizitäts Modul"
						n.5 Minuten	5)
						ϵ_0	E
-	-	$A^{1)}$	$t^{2)}$	-	$\sigma_m^{3)}$	-	N/mm^2
-	-	mm^2	mm	mm	N/mm^2	-	N/mm^2
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60	0.29	207
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60	0.50	120
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60	0.38	159
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60	0.49	122
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60	0.37	162
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60	0.40	150
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60	0.41	148
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60	0.34	176
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20	0.32	62
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20	0.35	57
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20	0.37	56
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20	0.26	78
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20	0.51	39
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20	0.43	46
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40	0.25	159
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40	0.50	81
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40	0.20	198
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40	0.40	98
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40	0.22	179
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40	0.36	112
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40	0.32	127
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40	0.29	137
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20	0.29	68
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20	0.50	40

1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand

2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand

3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

5) Verhältnis von Druckspannung zur "elastischen Verformung" nach 5 Minuten

Für die Auswertung der hier vorliegenden Versuchsergebnisse wird als E-Modul das Verhältnis von aufgebrachtter Druckspannung zur Kriechdehnung nach 5 Minuten angesetzt (Tabelle 8). Obwohl dieser Wert einige nicht-elastische Reaktionen beinhaltet, wird das Endkriechmaß durch diese Vereinfachung nur unwesentlich verfälscht. Die relativen Unterschiede zwischen den Versuchen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen bleiben erhalten.

Als Kriterien für das unterschiedliche Werkstoffverhalten infolge der jeweiligen Parameterkombination werden die

- aus der ersten Belastungsphase $5 \text{ min} \leq T \leq 1 \text{ d}$ vor Einsetzen von Versagensvorgängen (s. Bild 3) und
- die für Zeiten ab Beginn des ersten Kriechanstieges (s. Bild 3) bis ggf. zum Beginn des zweiten Kriechanstieges (Tabelle 9)

nach Ross ermittelten "Endkriechmaße" gewählt.

Die "Endkriechmaße" $\phi_{1\infty}$ und $\phi_{2\infty}$ wurden jeweils als Steigungen der durch lineare Regression ermittelten Ausgleichsgeraden errechnet und sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 9: Belastungsdauer bis zum progressiven Kriechanstieg

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Lager- fläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung	Belastungsdauer bis zum	
						1. Kriech- anstieg	2. Kriech- anstieg
						ϕ_{100}	ϕ_{200}
-	A ¹⁾	t ²⁾	-	σ_m ³⁾	-	d	d
-	mm ²	mm	mm	N/mm ²	-	-	-
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60	7	-
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60	1	-
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60	35	-
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60	25	-
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60	3	-
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60	0.2	-
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60	15	-
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60	15	-
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20	12	100
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20	10	60
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20	50	-
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20	40	-
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20	7	90
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20	1	200
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40	1	200
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40	1	120
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40	10	-
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40	10	-
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40	15	-
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40	2	-
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40	60	-
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40	10	-
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20	9	-
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20	9	110

- 1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand
 2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand
 3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand
 4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

Tabelle 10: Endkriechmaße $\phi_{j\infty}$

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Lager- fläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung	Endkriechmaß	
						2)	3)
						$\phi_{1\infty}$	$\phi_{2\infty}$
-	A ¹⁾	t ²⁾	-	-	σ_m ³⁾	-	-
-	mm ²	mm	mm	mm	N/mm ²	-	-
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60	0.18	2.02 4)
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60	0.13	0.86
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60	0.11	0.24
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60	0.13	0.32
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60	0.11	0.52
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60	0.27	0.80
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60	0.06	0.16
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60	0.09	0.32
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20	0.07	0.19
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20	0.07	0.26
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20	0.05	0.15
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20	0.09	0.28
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20	0.05	0.27
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20	0.06	0.26
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40	0.16	0.86
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40	0.11	0.89
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40	0.16	0.34
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40	0.04	0.21
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40	0.14	0.75
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40	0.11	0.81
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40	0.09	0.14
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40	0.21	0.44
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20	0.08	0.51
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20	0.03	0.16

- 1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand
 2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand
 3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand
 4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die
 5) Lagerfläche im unbelasteten Zustand
 mit der ROSS-Extrapolation nicht bestimmbar

5.3 Kriechverformungen und Verlauf der Kriechkurven

Das Versuchsprogramm wurde als nicht vollständiger Faktorversuch betrachtet (Tabelle 2). Der Einfluß einzelner Versuchsparameter auf das Dauerstandverhalten kann daher jeweils nur anhand der Ergebnisse eines

begrenzten Versuchsumfanges aus gleichen Versuchsparametern untersucht werden. Zur Formulierung trendmäßiger Aussagen wurden daher von ausgewählten Versuchsergebnissen aus unterschiedlichen Parameterkombinationen rechnerisch Mittelwertkurven erzeugt. Die bei Versuchen mit unterschiedlicher Belastungsdauer auftretenden Sprungstellen in den Mittelwertkurven wurden zur übersichtlichen Darstellung rechnerisch eliminiert.

Die Versuchsergebnisse aus jeweils gleicher Parameterkombination (mittlere Pressung, Lagerfläche, Lagerdicke, Drehwinkel) sind als Anhang dem Bericht beigelegt nach den Kriterien: Lagerdicke (Bilder A1 bis A9), mittlere Pressung (Bilder A10 bis A15), mittlere Pressung und Lagerdicke (Bild A16), Drehwinkel (Bilder A17 bis A21), Drehwinkel und mittlere Pressung (Bilder A22 bis A24) sowie der Lagerfläche (Bilder A25 bis A32).

5.3.1 Einfluß der Elastomerqualitäten

Die Versuchsergebnisse aus allen Versuchen werden in Bild 19 getrennt nach der Elastomerqualität in Mittelwertkurven zusammengefaßt. Danach stellt sich für die EPDM 1-Qualität im Versuchsmittel bereits nach kurzer Belastungsdauer (rd. 0,5 Tag) ein progressiver Kriechanstieg ein, nach einer Belastungsdauer von rd. 25 Tagen flacht die Kriechkurve mit deutlich geringerer, relativ konstanter Steigung ab. Die Kriechkurve für die CR 1-Qualität verläuft mit relativ konstantem Kriechanstieg bis zu einer Belastungsdauer von rd. 100 Tagen, danach kann ein leichter Zuwachs in der Kriechgeschwindigkeit registriert werden. Nach einer Belastungsdauer von 1000 Tagen kann für EPDM 1 eine Kriechverformung, bezogen auf die Verformung 5 Minuten nach der Lastaufbringung, aus dem Mittelwert aller Versuche von rd. 25 %, für CR 1 eine Kriechverformung von rd. 10 % extrapoliert werden.

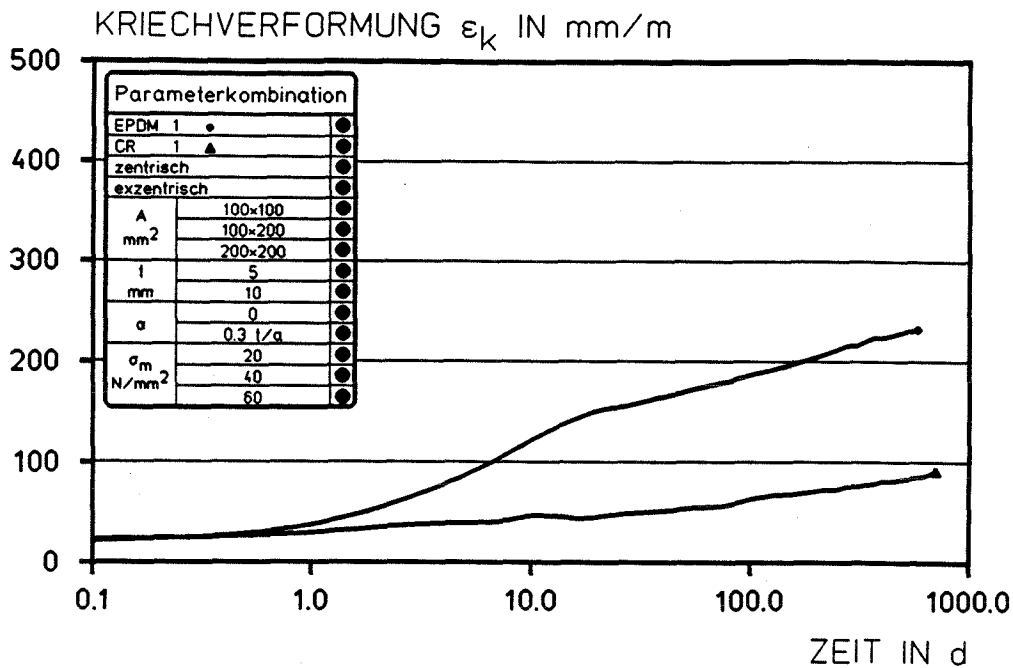


Bild 19: Mittelwert aus allen Versuchen mit EPDM 1 und CR 1
Einfluß unterschiedlicher Materialien

Bis zum 25. Belastungstag zeigt die Kriechkurve für EPDM 1 einen überproportionalen Kriechanstieg, der sich aus den Versuchsergebnissen mit Lagerproben der Dicke $t = 5 \text{ mm}$ bei hohen Pressungen $\sigma_m = 40/60 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Bilder 5, 7, 12, 13, 15) ergibt.

5.3.2 Einfluß der Lagerdicken

In den Bildern 20a und 20b ist die Mittelwertkurve aus allen Versuchen mit EPDM 1 nach der Lagerdicke 5 und 10 mm differenziert aufgetragen. Beide Kriechkurven zeigen unmittelbar nach Belastungsbeginn bis zum 25. Belastungstag einen progressiv ansteigenden Verlauf, danach einen Verlauf mit relativ konstanter Kriechgeschwindigkeit. Die Steigung der Mittelwertkurve für 5 mm dicke Lager ist über die gesamte Belastungsdauer größer als für 10 mm dicke Lager. Für eine Belastungsdauer von 1000 Tagen kann eine Kriechverformung von rd. 20 % für 10 mm dicke Lager, und von rd. 30 % für 5 mm dicke Lager extrapoliert werden.

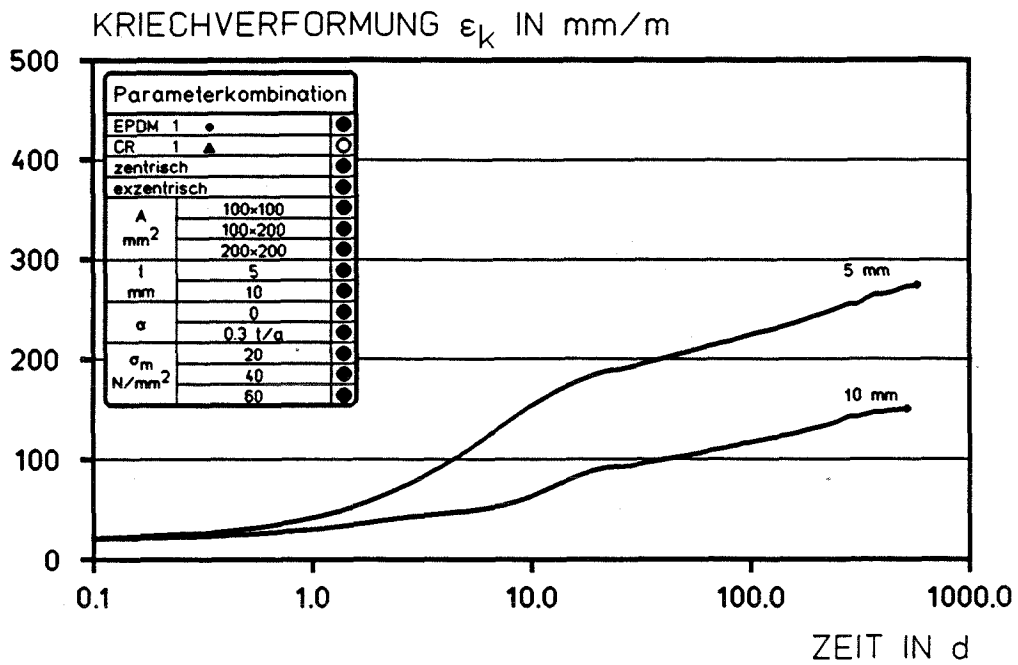


Bild 20a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen EPDM 1

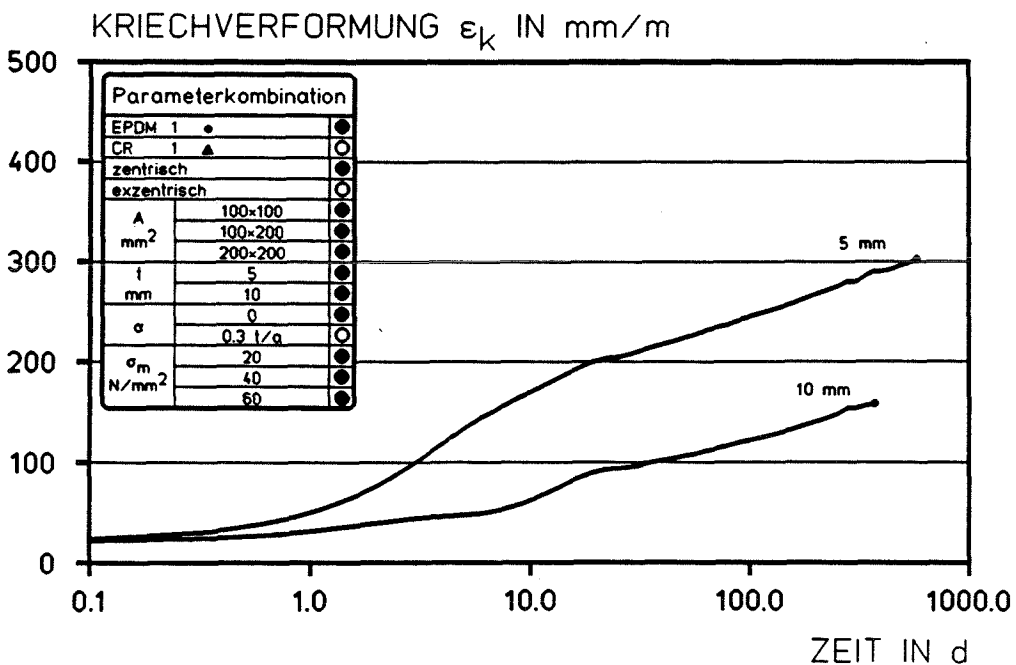


Bild 20b: Mittelwert aus allen zentrischen Versuchen EPDM 1

Der Einfluß der Lagerdicke auf das Dauerstandverhalten ist für die CR 1-Qualität deutlich geringer. Eine Differenzierung der Versuchsergebnisse nach der Lagerdicke zeigt hier zwar auch das günstigere Kriechverhalten der 10 mm dicken Lagerproben, jedoch ist die Steigungsdifferenz zwischen den Kriechkurven für 5 und 10 mm dicke Proben wesentlich kleiner (Bilder 21a und Bild 21b). Für 5 mm dicke Lager kann nach einer Belastungsdauer von 1000 Tagen eine Kriechverformung von rd. 12 % erwartet werden.

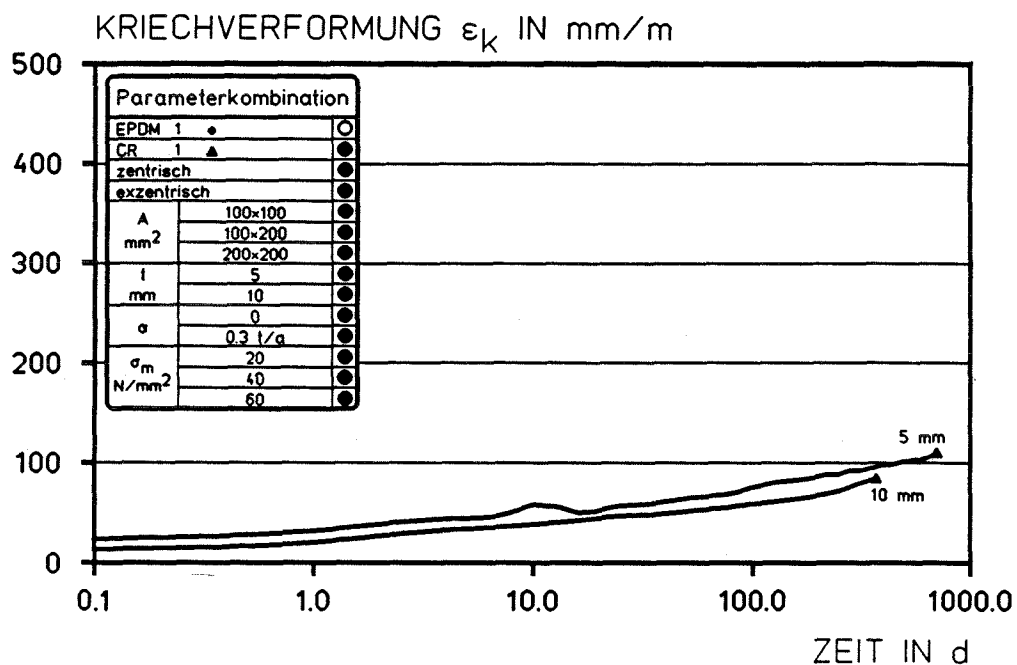


Bild 21a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen CR 1

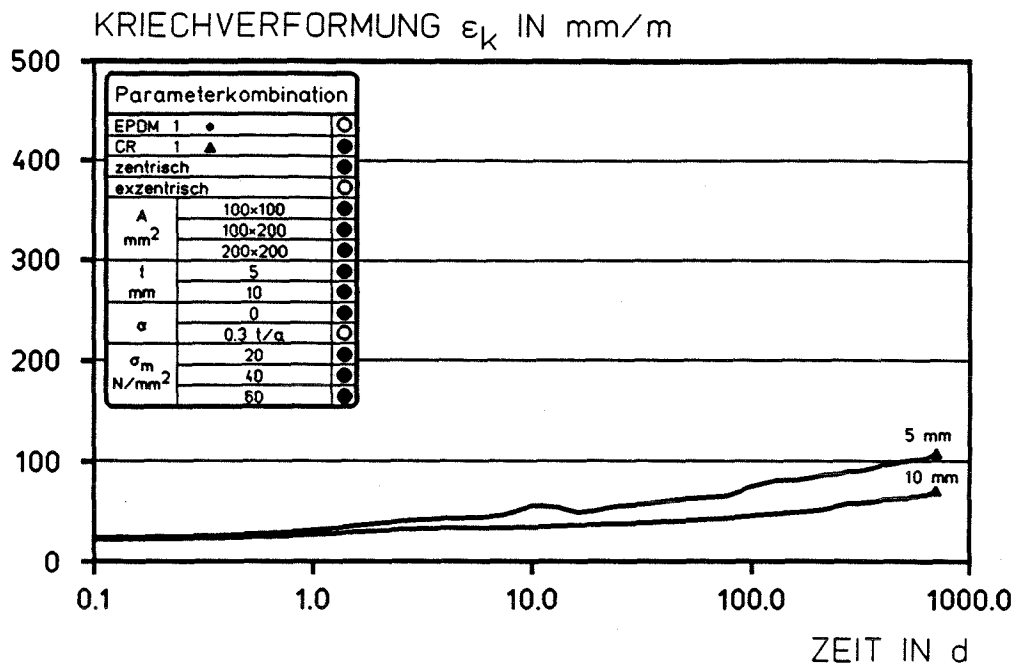


Bild 21b: Mittelwert aus allen zentrischen Versuchen
CR 1

5.3.3 Einfluß der mittleren Pressung

Wesentliche Versuchsergebnisse sind getrennt nach Elastomerqualität und mittlerer Pressung in den Bildern 22a bis 24b in Mittelwertkurven zusammengefaßt.

Die Mittelwertkurve aller Versuche (zentrisch und exzentrisch) mit CR 1 bei $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$ (Bild 23a) zeigt eine nur geringfügig stärkere Kriechverformung gegenüber der Kurve aus den Versuchen mit $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ (Bild 22a), jedoch keine signifikante Änderung des Kriechverhaltens gegenüber den Versuchsergebnissen mit $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ (Bild 24a).

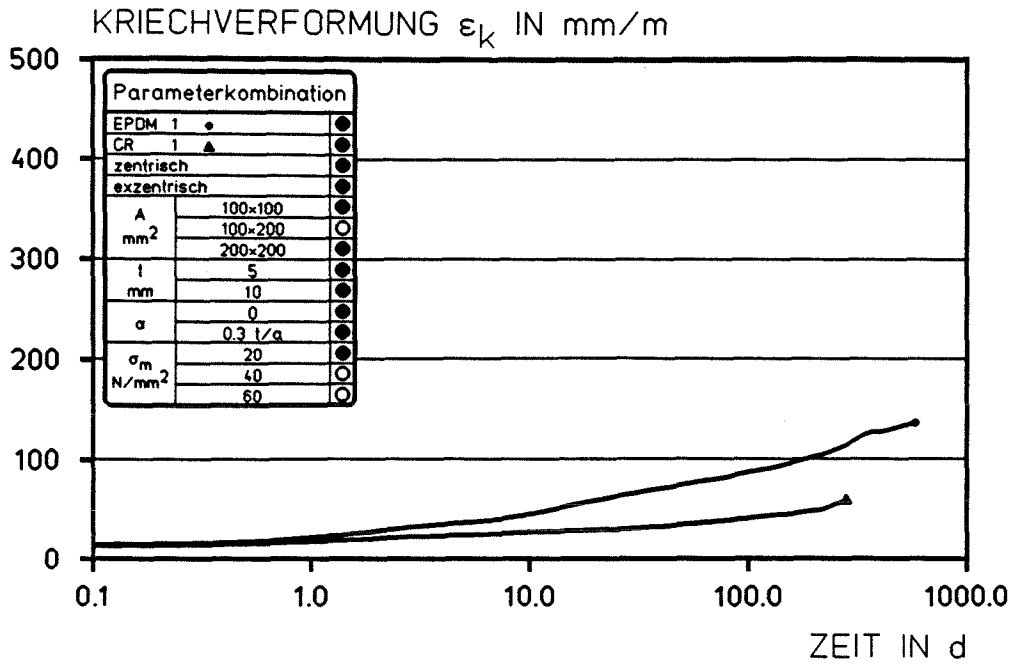


Bild 22a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$

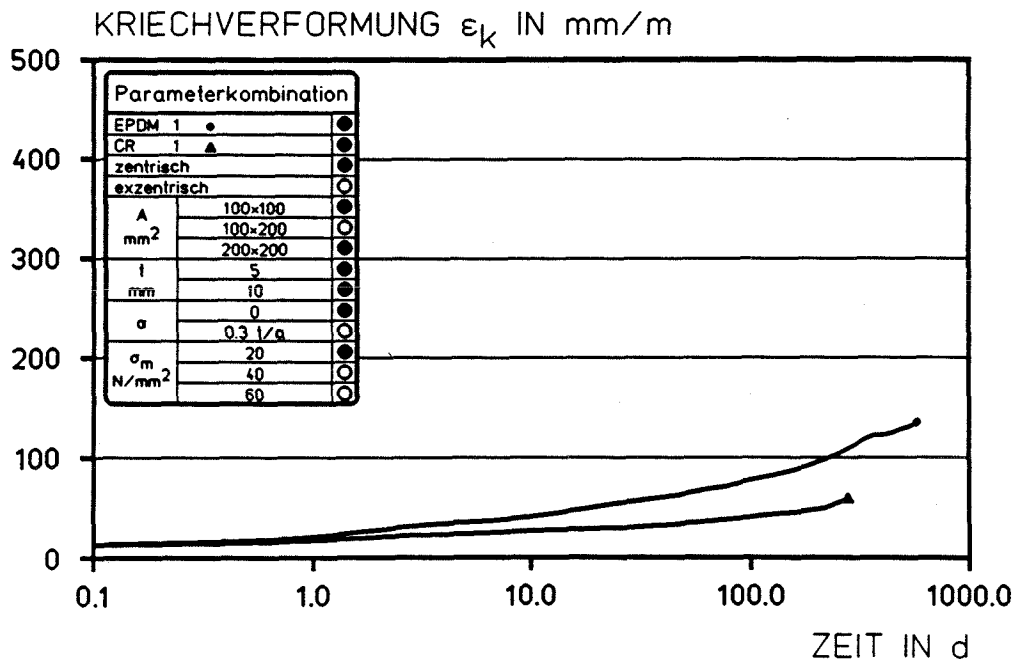


Bild 22b: Mittelwert aus allen zentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$

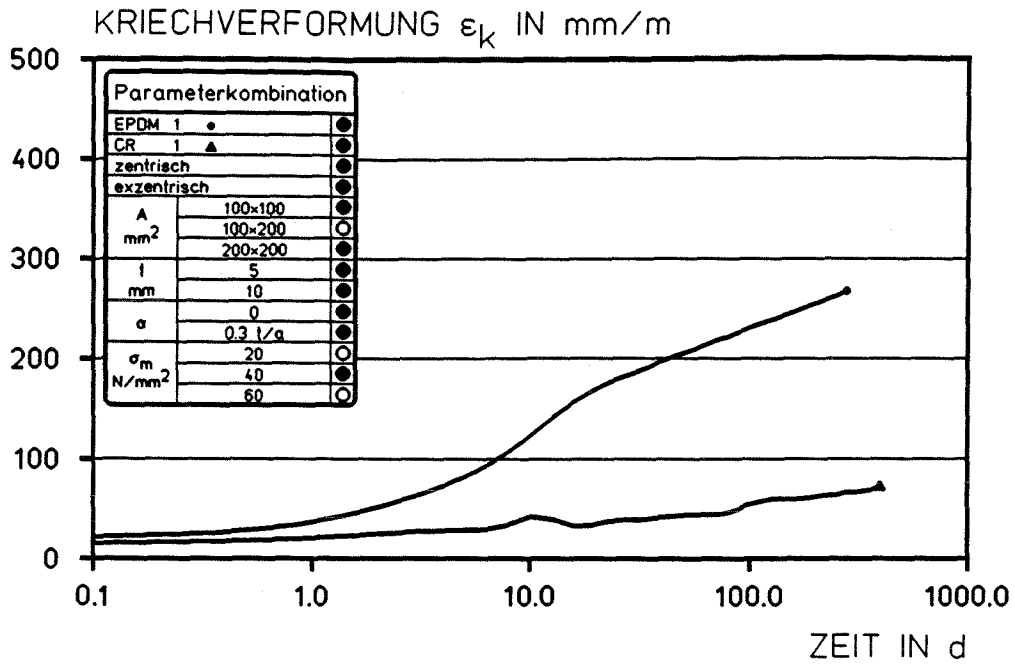


Bild 23a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$

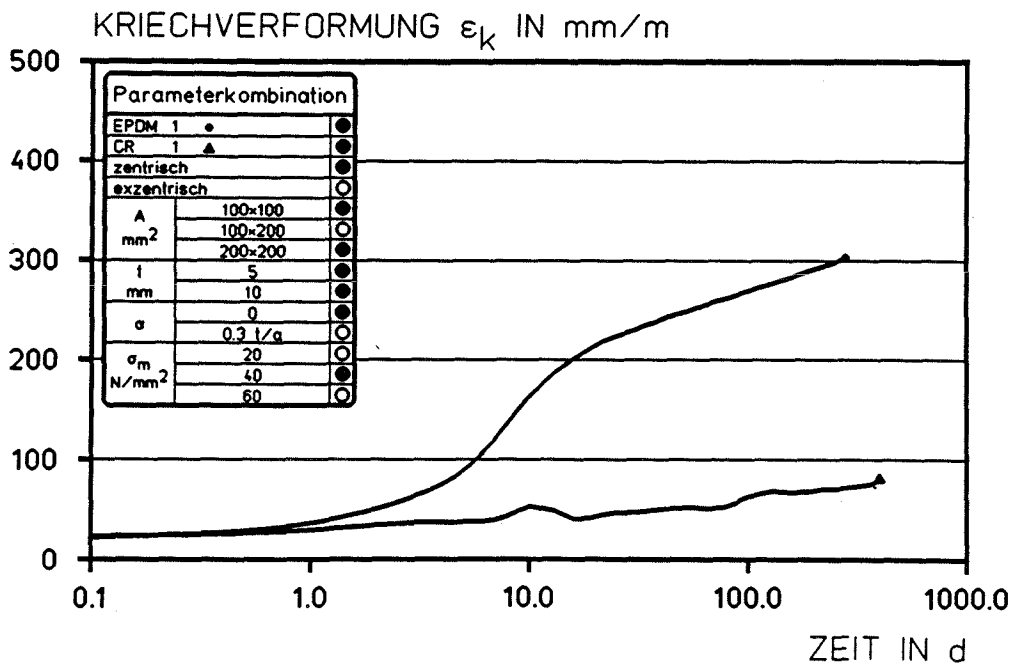


Bild 23b: Mittelwert aus allen zentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$

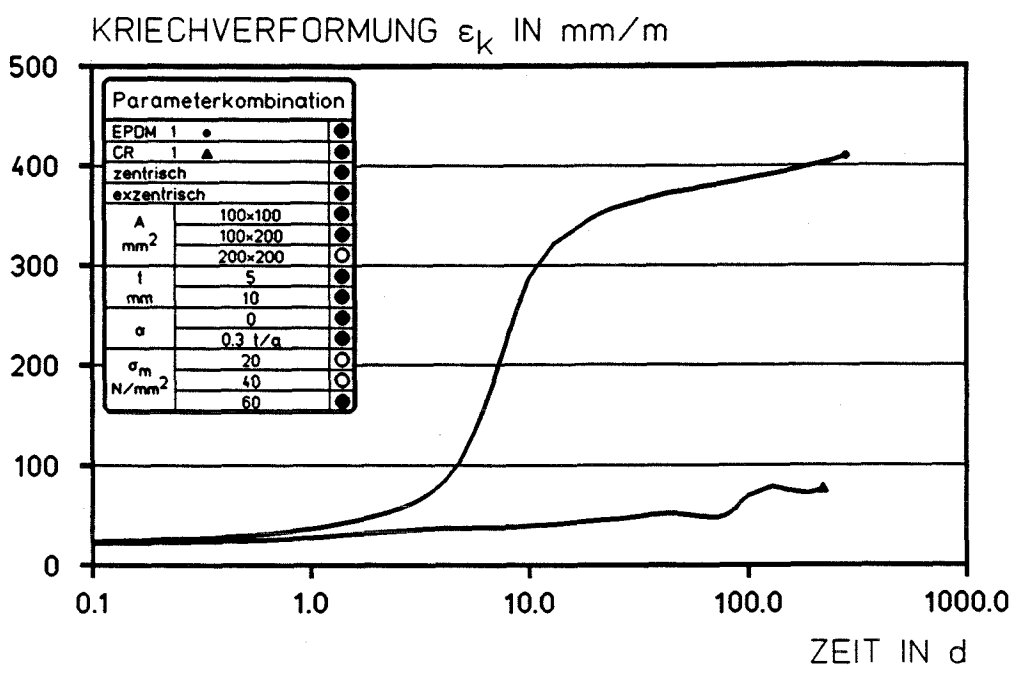


Bild 24a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$

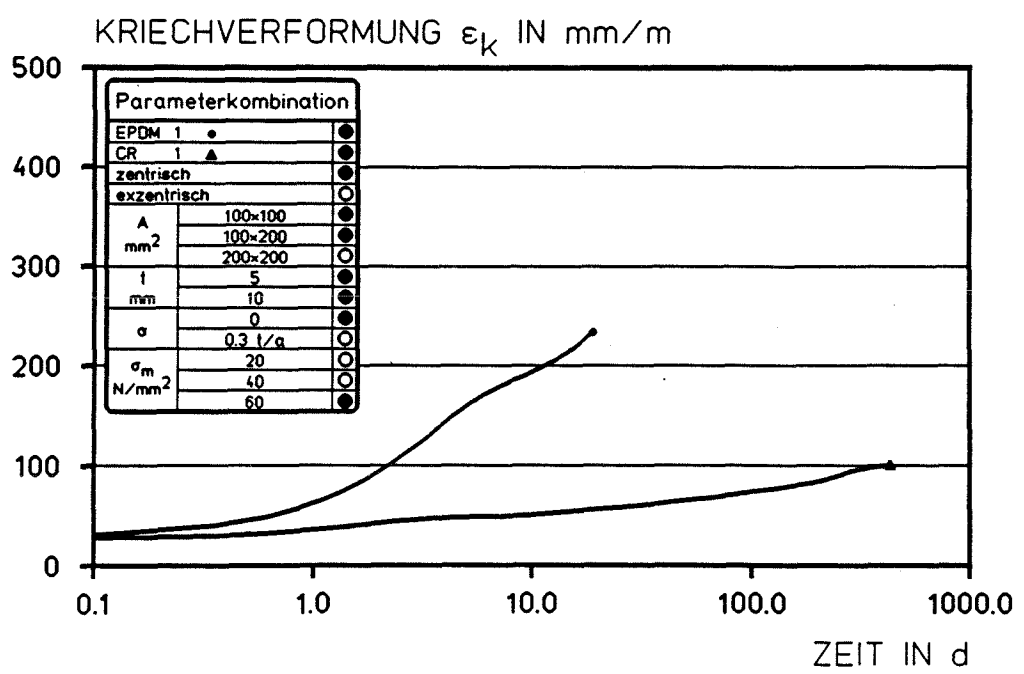


Bild 24b: Mittelwert aus allen zentrischen Versuchen
 $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$

Bei den Versuchen mit EPDM 1 nimmt die Kriechgeschwindigkeit mit hoher mittlerer Pressung progressiv zu. Der Beginn des überproportionalen Kriechanstieges setzt bei einer mittleren Pressung von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ nach rd. 10 Tagen, für $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$ nach rd. 1 Tag und für $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ nach rd. 0,5 Tagen ein. Die Steigung des progressiven Bereiches steigt bei höherer Pressung stark an, bei den Versuchen mit $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ dauert die Phase des progressiven Kriechanstieges rd. 8 Tage, danach ist das Elastomergefüge weitestgehend zerstört (Tabelle 9).

5.3.4 Einfluß der exzentrischen Lasteinleitung

Allgemeines:

Die exzentrische Lasteinleitung (Drehwinkel) wird durch die Neigung der Kontaktflächen erzeugt (vgl. Abschn. 4.2). Zur Erzielung zentrischer Verhältnisse im Druckzylinder werden je Lagerebene bei exzentrischen Versuchen zwei Proben angeordnet (Bild 2).

Um den Einfluß exzentrischer Lasteinleitung (Drehwinkel) aus den überlagerten Einflüssen, z. B. aus der mittleren Pressung und dem Formfaktor klar darzustellen, wird im folgenden der Übersichtlichkeit halber die Differenz, z. B. der Kriechverformung oder der Kriechgeschwindigkeit zwischen Versuchsergebnissen aus zentrischer Lasteinleitung (Drehwinkel $\alpha = 0$) und exzentrischer Lasteinleitung (Drehwinkel $\alpha: \pm 0,3 \text{ t/a}$) diskutiert.

Mittlere Pressung:

Die Mittelwertkurven aus allen zentrischen Versuchen sind in den Bildern 22a bis 24a, getrennt nach der jeweiligen mittleren Pressung sowie der Elastomerqualität, dargestellt und werden den entsprechenden Kurven aus dem Mittelwert aller zentrischen und exzentrischen Versuche gegenübergestellt.

Die Kurven aus den Versuchsergebnissen mit CR 1 lassen keinen signifikanten Einfluß der Lagerverdrehung in Abhängigkeit von der Pressung auf

das Dauerstandverhalten erkennen (Bilder 22b bis 24b). Dies gilt bei der EPDM 1-Qualität nur für eine mittlere Pressung von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ (Bilder 22a und 25b). Eine Pressung von 40 N/mm^2 führt nach einer Belastungsdauer von 500 Tagen zu einer Kriechverformung von rd. 30 %, der Einfluß der Lagerverdrehung auf die Kriechverformung beträgt hier rd. 3 % (Bilder 23a und 23b). Dagegen beträgt die Kriechverformung bei einer Pressung von 60 N/mm^2 bereits nach rd. 20 Tagen zwischen 25 % und 35 %, wobei die exzentrische Belastung eine Verformungszunahme von rd. 13 % hervorruft (Bilder 24a und 24b).

Lagerdicke:

In Bild 20b sind die aus zentrischen Versuchen resultierenden mittleren Kriechkurven von EPDM 1, differenziert nach der Lagerdicke, aufgetragen. Im Vergleich zu den entsprechenden Kurven aus zentrischer und exzentrischer Belastung (Bild 20a) nimmt die Kriechverformung infolge Lagerverdrehung nur unwesentlich zu. Bei 10 mm dicken Lagern beträgt die Zunahme der Kriechverformung nach 1000 Tagen rd. 1 %, bei 5 mm dicken Lagern rd. 3 %.

Der analoge Vergleich für die CR 1-Qualität (Bilder 21a und 21b) ergibt nach 1000-tägiger Belastungsdauer eine geringfügige Zunahme der Kriechverformung infolge der Lagerverdrehung von $< 1 \%$.

5.3.5 Einfluß der mittleren Pressung und der Lagerdicke

Die Versuche mit 10 mm dicken EPDM 1-Proben ergeben für eine mittlere Pressung von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ eine leichte Zunahme der Kriechgeschwindigkeit über die gesamte Belastungsdauer, die Kriechverformung beträgt nach 700 Tagen rd. 10 %. Bei höheren Pressungen ($\sigma_m = 40/60 \text{ N/mm}^2$) zeigt sich ein überproportionaler Kriechanstieg nach 10 bzw. 7 Tagen (Bild 25a).

Die Mittelwertkurve aus Versuchen mit 5 mm dicken EPDM 1-Lagern bei $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ verzeichnet eine starke Zunahme der Kriechgeschwindigkeit über die gesamte Versuchsdauer, die Kriechverformung beträgt nach 700

Tagen rd. 15 %. Bei mittleren Pressungen von $\sigma_m = 40/60 \text{ N/mm}^2$ werden nach 5 bis 10 Tagen Kriechverformungen von über 30 % registriert (Bild 25b).

Die Versuche mit CR 1-Qualität und einer Lagerdicke $t = 10 \text{ mm}$ zeigen für mittlere Pressungen von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$, 40 N/mm^2 und $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ bis zu einer Belastungsdauer von rd. 70 Tagen einen relativ konstanten Kriechverlauf, danach stellt sich eine leichte Zunahme in der Kriechgeschwindigkeit ein (Bild 26a). Bei einer mittleren Pressung von $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich eine mittlere Kriechverformung von rd. 8 % nach einer Belastungsdauer von rd. 700 Tagen.

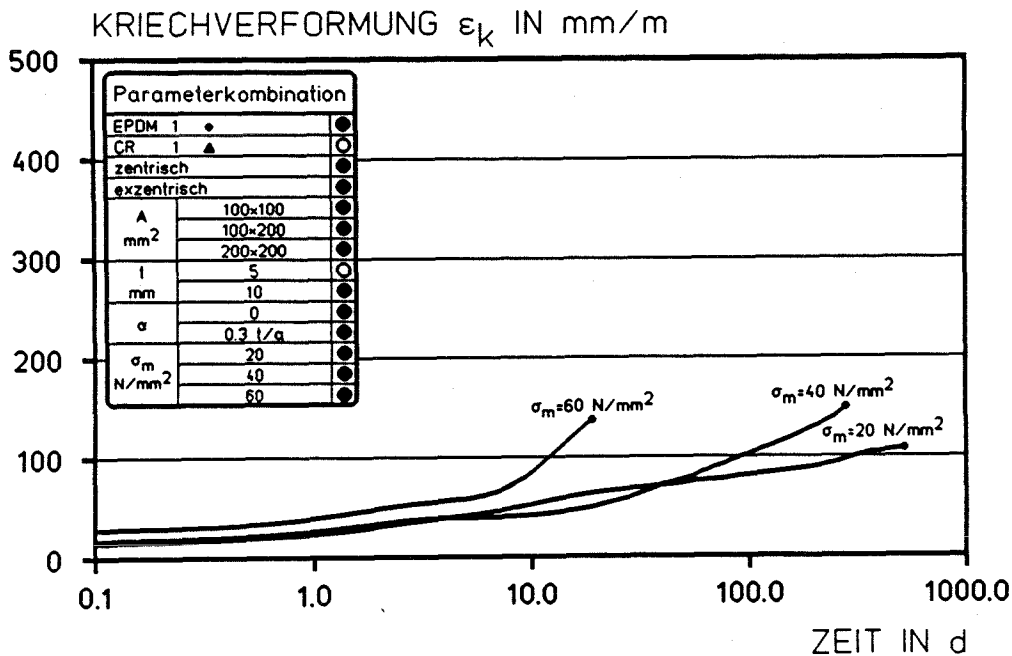


Bild 25a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen EPDM 1, $t = 10 \text{ mm}$

In Bild 26b sind die Mittelwertkurven für Versuche mit 5 mm dicken CR 1-Proben, differenziert nach der mittleren Pressung, dargestellt. Berücksichtigt man die unterschiedliche Anfangseinfederung nach rd. 5 Minuten, so ist der Einfluß der Pressung auf die Kriechneigung gering. Mit zunehmender Pressung steigt die Kriechgeschwindigkeit leicht an, nach einer Belastungsdauer von rd. 500 Tagen beträgt die Kriechverformung bei $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ rd. 4 %, bei $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$ rd. 6 % und bei $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$ rd. 8 %.

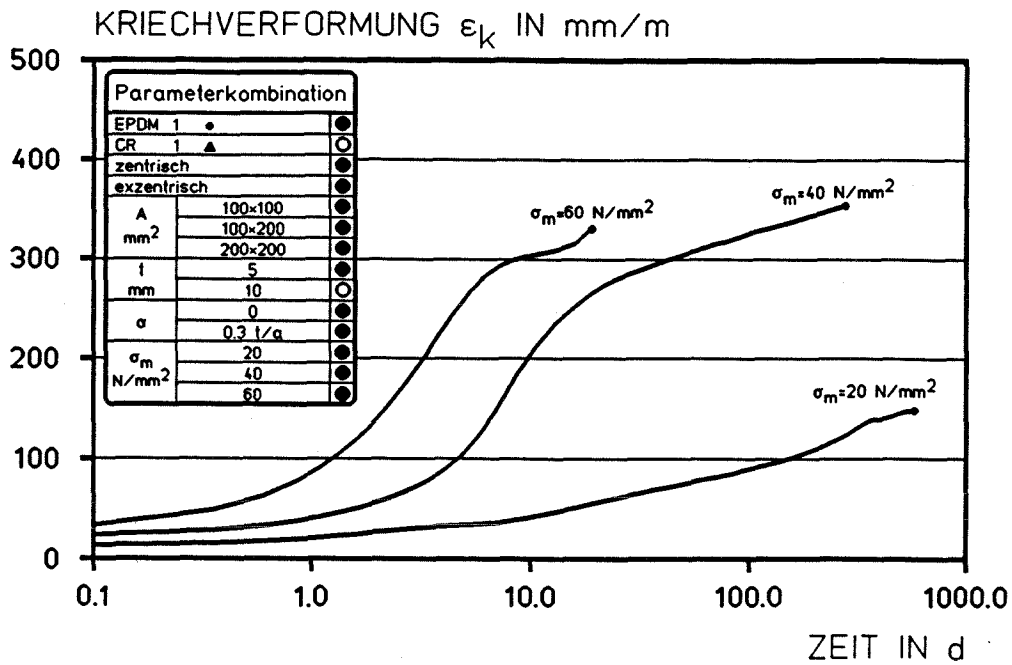


Bild 25b: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen EPDM 1, t = 5 mm

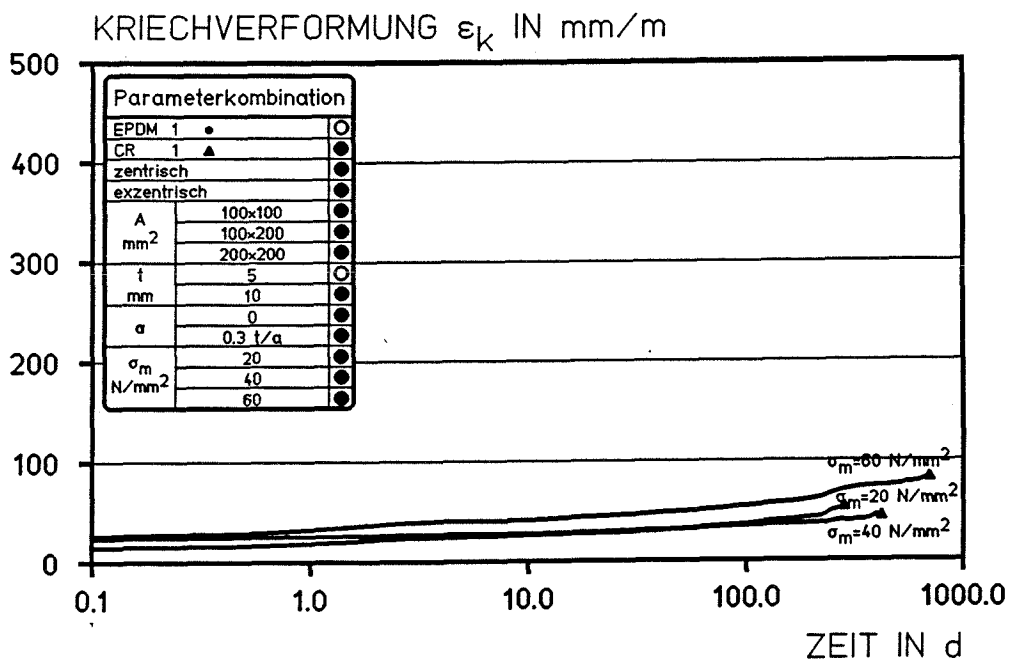


Bild 26a: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen CR 1, t = 10 mm

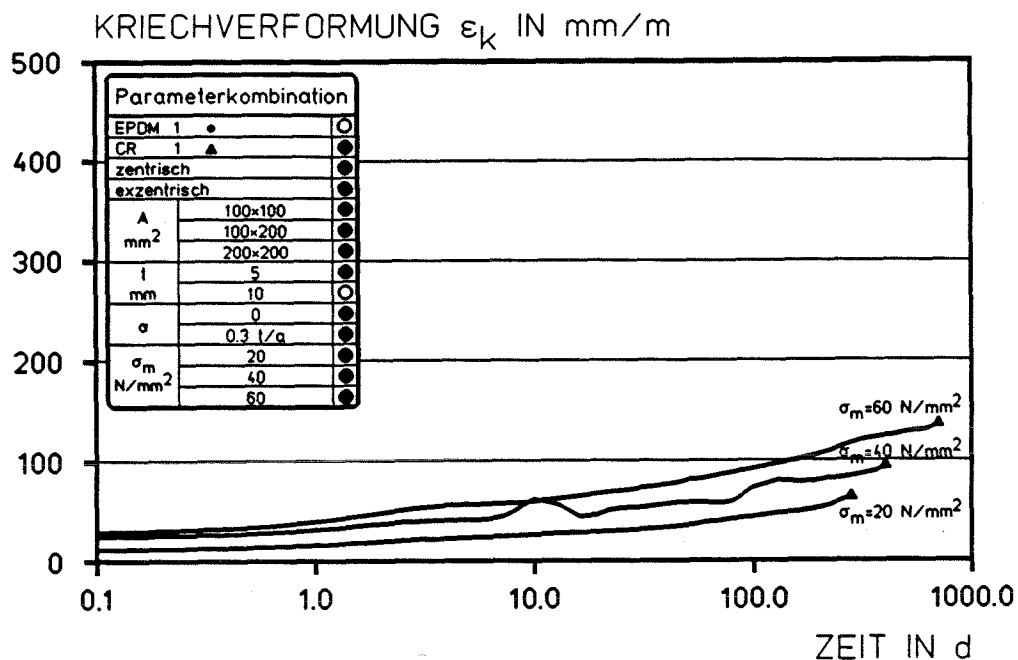


Bild 26b: Mittelwert aus allen zentrischen und exzentrischen Versuchen
CR 1, t = 5 mm

5.4 Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades

Zur Beurteilung der eingetretenen Veränderungen an den Probekörpern wurden die Proben nach dem Ausbau aus den Versuchsständen visuell bemustert und die prozentuale Beschädigung der Grundrißflächen, der freien Längs- und Querkanten sowie des "Elastomergefüges" registriert. Für die Beurteilung des Schädigungsgrades wurden folgende Kriterien herangezogen:

a) Oberflächentextur der Grundrißflächen

Die Grundrißflächen wiesen infolge der Rauheit der Mörtelscheiben sowie der Querdehnungsbehinderung eine flachmuldige Textur auf, die in den Randbereichen zunehmend schuppigen Oberflächencharakter annahm (Bild 27). Der prozentuale Flächenanteil der schuppigen Textur wurde für Grund- und Deckfläche geschätzt und arithmetisch gemittelt.

b) Oberflächenzustand der freien Seitenflächen

Die Behinderung der Querkontraktion infolge des Reibungsschlusses sowie extreme Auswölbungen der seitlichen Flächen führten zu Gratbildungen und Aufreißen, die in sichelförmige Risse übergingen (Bild 28). Das Elastomer wölbte sich im freien Lagerspalt nach außen und es stellte sich eine treppenförmig geschichtete, bisweilen porige Textur ein (Bild 29).

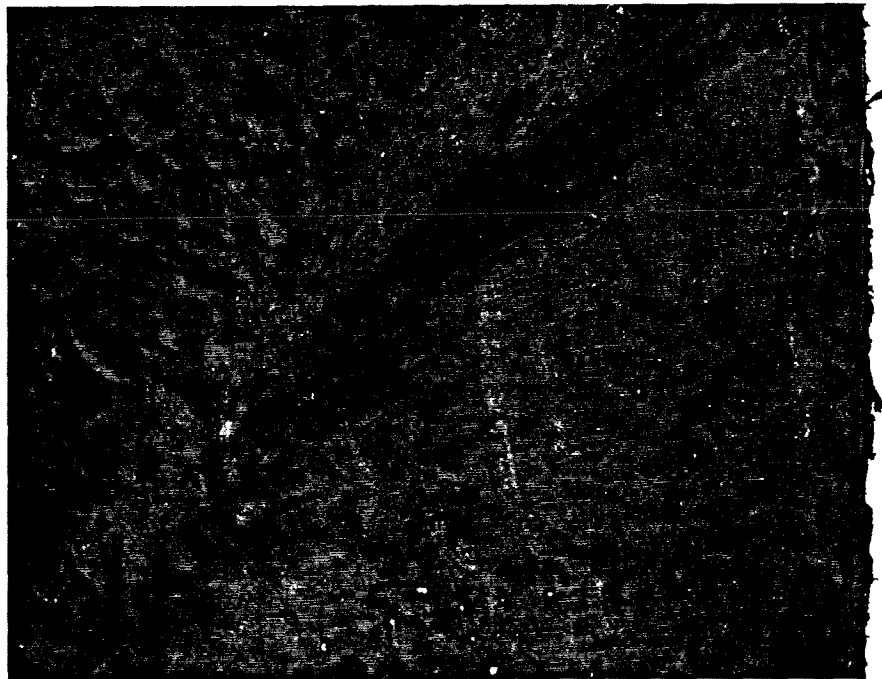


Bild 27: Schuppige Oberflächentextur einer CR 1-Probe, Belastungsdauer rd. 140 Tage bei $\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$, (Versuch 7)



Bild 28: Sichelförmige Risse an den Seitenflächen einer EPDM 1-Probe, Belastungsdauer rd. 560 Tage bei $\sigma = 20 \text{ N/mm}^2$, (Versuch 14)

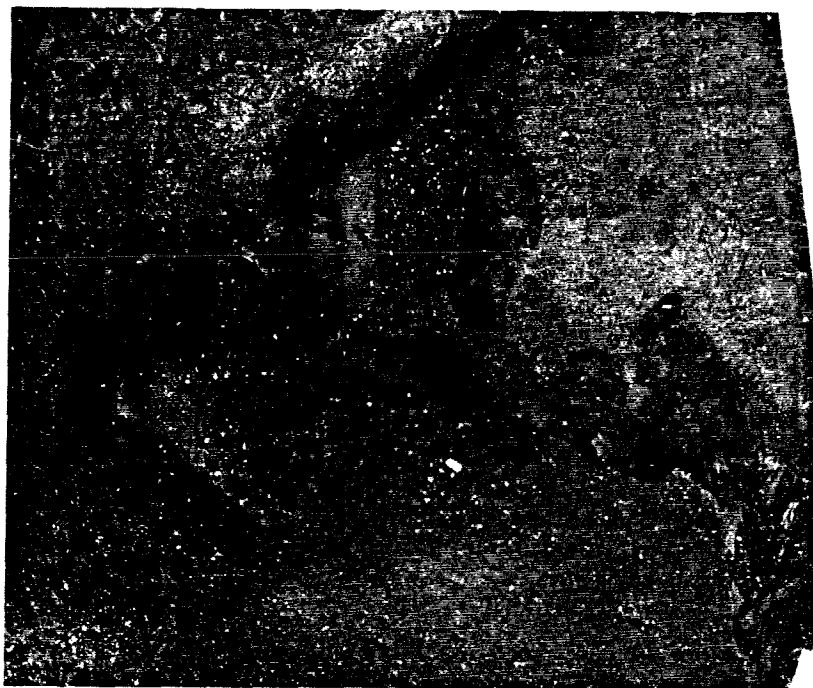


Bild 29: Riefenbildung an den Grundflächen einer EPDM 1-Probe, Belastungsdauer rd. 330 Tage bei $\sigma = 40 \text{ N/mm}^2$, (Versuch 16)

c) Riefenbildung in den Grundrißflächen

Der Schlupf in den Randzonen führte zu furchigen Oberflächen und Riefen parallel der Kanten, deren Ausmaße prozentual zu den Seitenabmessungen geschätzt wurden (Bild 29).

d) Ablösen der Deckschichten

Die Beschädigungen der Seitenflächen und der Randbereiche der Grundrißflächen setzten sich parabelförmig bis zur Probenmitte fort, wobei infolge des Reibungsschlusses die Deckschichten erhalten blieben, während das Probeninnere mit zunehmender Zerstörung abgelöst wurde. Dieses Schädigungsbild konnte nur bei EPDM-Proben registriert werden (Bild 30).

e) Gefügezerstörung im Inneren

Unter Gefügezerstörung wird hier eine von den Randbereichen ausgehende Auflösung des kompakten Materialzusammenhaltes in schuppige bis granulatformige Bestandteile verstanden (Bild 30). Die Gefügezerstörung wurde visuell prozentual zum Probenvolumen quantifiziert, sie konnte ebenfalls nur bei EPDM-Proben registriert werden.

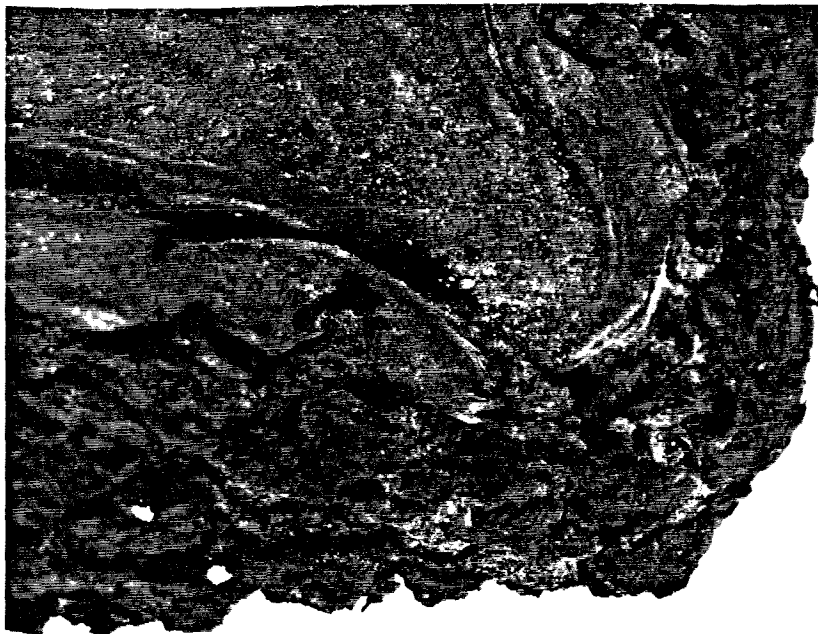


Bild 30: Ablösen der Deckschicht und Gefügezerstörung einer EPDM-Probe, Belastungsdauer rd. 330 Tage bei $\sigma = 40 \text{ N/mm}^2$, (Versuch 15)

Da die einzelnen Schädigungsarten für die dauerhafte Funktion der Lagerung von unterschiedlicher Bedeutung sind, wurden sie nicht gleich gewichtet, sondern mit folgenden relativen Gewichtungsfaktoren belegt (Summe = 100 %):

- | | |
|--|-------|
| a) Oberflächentextur der Grundrißflächen | 10 % |
| b) Oberflächenzustand der freien Seitenflächen | 10 % |
| c) Ribbildungen der Grundrißflächen | 10 % |
| d) Ablösen der Deckschichten | 30 % |
| e) Gefügezerstörung im Inneren | 40 %. |

Die Ergebnisse der jeweiligen Einzelkriterien sowie die zusammenfassende Beurteilung des prozentualen Schädigungsgrades sind in Tabelle 11 zusammengefaßt.

Tabelle 11: Schädigungsgrad der Lagerproben nach visueller Bemusterung

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Dicke t ²⁾ mm	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.) - mm	mittlere Pressung σ_m ³⁾ N/mm ²	Beurteilungskriterien					
					Oberflächen- textur der Grundfläche	Beschädigung der Kanten	Riefen in der Grundfläche	Ablösen der Deckschicht	Gefüge- zerstörung	prozentualer Schädigungs- grad
					1) %	1) %	1) %	1) %	2) %	3) %
1	EPDM 1 ●	10	0	60	30	70	60	10	20	27
2	EPDM 1 ●	5	0	60	70	100	10	70	100	79
3	CR 1 ▲	10	0	60	40	30	50	0	10	16
4	CR 1 ▲	5	0	60	0	30	50	0	10	12
5	EPDM 1 ●	10	0	60	20	80	0	10	20	21
6	EPDM 1 ●	5	0	60	90	100	0	90	90	82
7	CR 1 ▲	10	0	60	50	70	40	0	20	24
8	CR 1 ▲	5	0	60	10	10	0	0	0	2
9	EPDM 1 ●	10	0	20	10	20	20	0	0	5
10	EPDM 1 ●	5	0	20	30	40	0	30	30	28
11	CR 1 ▲	10	0	20	0	0	40	0	0	4
12	CR 1 ▲	5	0	20	50	0	0	0	0	0
13	EPDM 1 ●	5	2.1	20	50	80	0	40	40	42
14	EPDM 1 ●	10	4.2	20	10	70	0	0	10	12
15	EPDM 1 ●	5	0	40	70	100	0	70	70	66
16	EPDM 1 ●	5	2.1	40	90	100	60	90	90	88
17	CR 1 ▲	5	0	40	0	0	0	0	0	0
18	CR 1 ▲	5	2.1	40	10	10	0	0	10	6
19	EPDM 1 ●	10	0	40	40	70	0	40	40	40
20	EPDM 1 ●	5	0	40	60	100	40	60	50	59
21	CR 1 ▲	10	0	40	30	20	50	0	20	18
22	CR 1 ▲	5	0	40	10	10	60	0	10	12
23	EPDM 1 ●	5	0	20	10	50	0	0	10	10
24	EPDM 1 ●	5	1.8	20	20	60	0	10	20	19

1) prozentualer Flächenanteil

2) prozentualer Volumenanteil

3) Beurteilungskriterien mit relativen Gewichtungsfaktoren gemäß Abschnitt 5.4, (Seite 47)

6 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SCHÄDIGUNGSGRAD, ENDKRIECHMABEN, MAXIMALEN SCHUBSPANNUNGEN IM LAGER UND VERLAUF DER KRIECKURVEN

6.1 Schädigungsgrad und Zeitpunkt des Kriechanstieges

Nach /16/ und /18/ leiten Schädigungsprozesse im elastomeren Werkstoff einen progressiven Kriechanstieg ein. Die Belastungsdauer bis zum Kriechanstieg kann als ein Beurteilungskriterium für das Dauerstandverhalten der Vernetzungsstruktur herangezogen werden.

In Bild 31 ist der Schädigungsgrad für die Werkstoffe EPDM 1 und CR 1 in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des ersten progressiven Kriechanstieges aufgetragen. Der Zusammenhang läßt sich durch eine Regression der Funktion $y = a \cdot x^b$ approximieren. Über alle Versuchsergebnisse (CR 1 und EPDM 1-Mittelkurve) wird ein Bestimmtheitsmaß von 72 % erreicht. Aus dem zugrundeliegenden Versuchsprogramm ergeben sich für EPDM 1 Belastungszeiten bis zum Kriechanstieg zwischen 0,2 und 15 Tagen, während aus den Versuchen mit CR 1 eine Belastungsdauer zwischen 10 und 60 Tagen ermittelt werden kann.

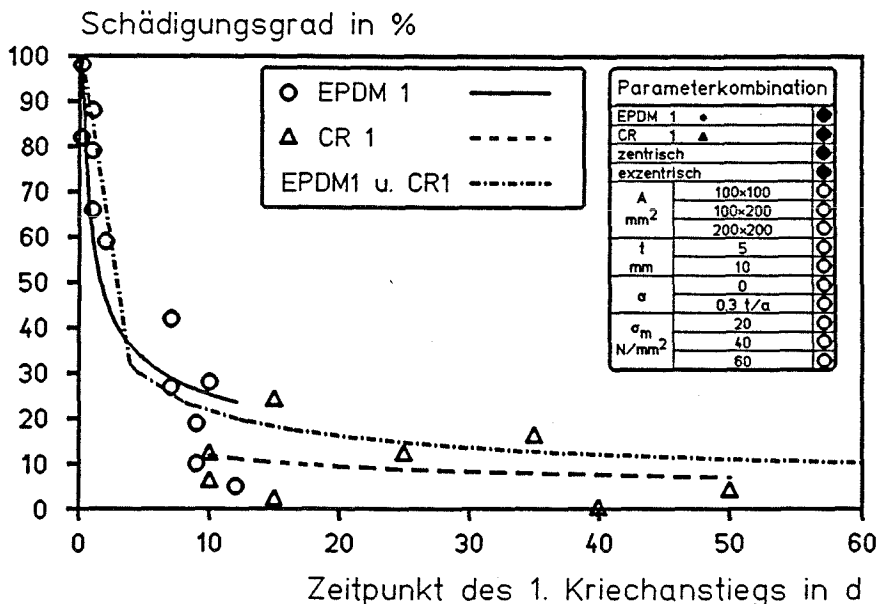


Bild 31: Schädigungsgrad in Abhängigkeit des 1. progressiven Kriechanstieges; Einfluß unterschiedlicher Elastomerqualitäten (vgl. Tabelle 9 und 11)

Aus allen Versuchen mit CR 1 ergibt sich unabhängig von der Parameterkombination ein mittlerer Schädigungsgrad von rd. 10 %, ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Schädigungsgrad und dem Zeitpunkt des Kriechanstieges ist jedoch nicht erkennbar. Dagegen ergibt sich für EPDM bei einem Kriechanstieg unmittelbar nach dem Belastungsvorgang (0,2 bis 1 Tag) ein Schädigungsgrad bis zu 90 %, mit zunehmender Belastungsdauer bis zum Kriechanstieg nimmt der Schädigungsgrad stark ab.

Die relativ hohen Beschädigungen, insbesondere Gefügezerstörung, treten bei Lagerproben aus EPDM 1 mit einer Dicke $t = 5 \text{ mm}$ auf. Für diese Lager werden auch die größten Kriecheinfederungen registriert (Bilder 20a und 20b), generell werden für EPDM 1-Lager größere Kriechverformungen beobachtet als bei CR 1-Lagern (Bilder 21 a und 21b).

Aufgrund der Inkompressibilität ($\mu \approx 0,5$) treten bei EPDM 1 infolge der größeren Vertikalverformung größere innere mechanische Beanspruchungen auf, die Lager neigen zu stärkerer Verwölbung der freien Oberflächen sowie zu stärkerer plastischer Verformung im Lagerspalt. Bei hohen Pressungen kann das Elastomer den Reibungsschluß in den Kontaktflächen nicht überwinden, die Risse an den Seitenflächen setzen sich unterhalb der Deckschicht fort, und können als Ursache für die Gefügezerstörung zum Probeninneren hin angesehen werden (Bild 32).

Ein progressiver Kriechanstieg nach kurzer Belastungsdauer bei gleichzeitig großen Kriechverformungen, wie sie bei EPDM 1 beobachtbar sind, deutet auf beginnende Schadensmechanismen hin, die auf hohe innere mechanische Beanspruchungen zurückzuführen sind /20/.

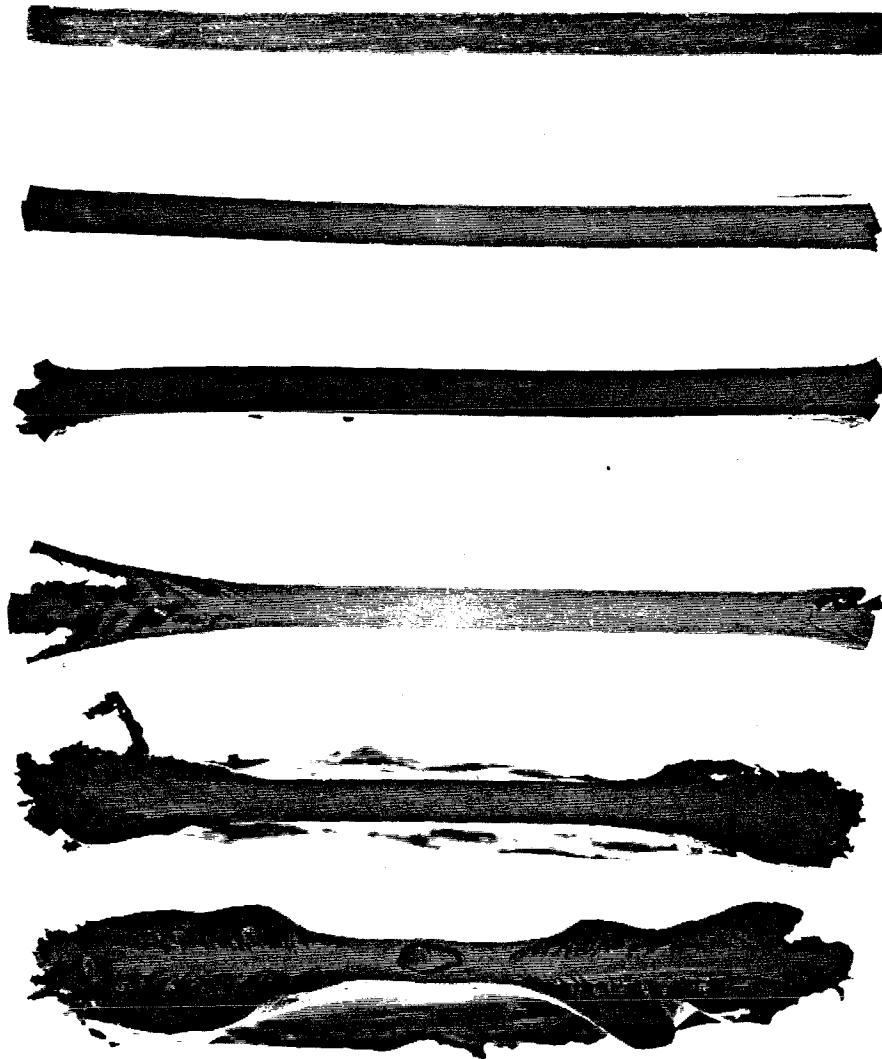


Bild 32: Fortschreitende Gefügezerstörung bei einer 5 mm dicken EPDM 1-
Probe

6.2 Schädigungsgrad und maximale Schubspannungen im Lager

6.2.1 Rechnerischer Spannungszustand

Ein wesentlicher Kennwert zur Charakterisierung der Beanspruchung eines Elastomerlagers ist die Summe der maximalen rechnerischen Schubspannun-

gen, die von der Pressung, dem Formfaktor, dem Drehwinkel sowie ggf. von dem Schubverformungswinkel abhängen.

Die maximale Schubspannung für Rechtecklager mit einem Seitenverhältnis $b/a \geq 1$ infolge einer mittleren Pressung σ_m ist am Lagerrand in der Mitte der längeren Lagerseite /4/

$$\max \tau = \frac{\sigma_m \cdot t}{\eta \cdot a} .$$

Die maximale Schubspannung infolge eines Drehwinkels α ist in der Mitte des Lagerrandes:

$$\max \tau = \alpha \cdot \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t} \right)$$

t = Lagerdicke im unbelasteten Zustand

a = kürzere Lagerseite

η = Einflußfaktor nach /4/

α = Drehwinkel

G = Schubmodul

Bei exzentrischer Lasteinleitung werden die zugehörigen maximalen Schubspannungen aus beiden Lastfällen superponiert, die Werte für die maximalen rechnerischen Schubspannungen sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Parameterkombinationen und zugehörige maximale rechnerische Schubspannungen

Versuch Nr.	Elastomer- qualität	Lager- fläche	Dicke	Neigung ⁴⁾ (Drehwink.)	mittlere Pressung	maximale rechner. Schubspann
						$\sigma_m^{3)}$ N/mm ²
-	-	A ¹⁾ mm ²	t ²⁾ mm	-	-	-
1	EPDM 1 ●	100*200	10	0	60	24.4
2	EPDM 1 ●	100*200	5	0	60	12.2
3	CR 1 ▲	100*200	10	0	60	24.4
4	CR 1 ▲	100*200	5	0	60	12.2
5	EPDM 1 ●	100*100	10	0	60	28.8
6	EPDM 1 ●	100*100	5	0	60	14.4
7	CR 1 ▲	100*100	10	0	60	28.8
8	CR 1 ▲	100*100	5	0	60	14.4
9	EPDM 1 ●	100*100	10	0	20	9.6
10	EPDM 1 ●	100*100	5	0	20	4.8
11	CR 1 ▲	100*100	10	0	20	9.6
12	CR 1 ▲	100*100	5	0	20	4.8
13	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	20	7.8
14	EPDM 1 ●	100*100	10	4.2	20	11.1
15	EPDM 1 ●	100*100	5	0	40	9.6
16	EPDM 1 ●	100*100	5	2.1	40	12.6
17	CR 1 ▲	100*100	5	0	40	9.6
18	CR 1 ▲	100*100	5	2.1	40	12.6
19	EPDM 1 ●	200*200	10	0	40	9.6
20	EPDM 1 ●	200*200	5	0	40	4.8
21	CR 1 ▲	200*200	10	0	40	9.6
22	CR 1 ▲	200*200	5	0	40	4.8
23	EPDM 1 ●	200*200	5	0	20	2.4
24	EPDM 1 ●	200*200	5	1.8	20	8.4

1) Lagerfläche im unbelasteten Zustand

2) Lagerdicke im unbelasteten Zustand

3) bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

4) Höhendifferenz der Kontaktflächen bezogen auf die Lagerfläche im unbelasteten Zustand

6.2.2 Zulässige Randschubspannungen an norm- bzw. zulassungsgerechten Regellagern

Außerhalb der Verwendung von unbewehrten Elastomerlagern bei Stützenstöben, Kranbahnen oder vorwiegend nicht ruhend beanspruchten Bauteilen (vgl. DIN 1055 Teil 3) ist die bauliche Durchbildung und Bemessung solcher Lager in DIN E 4141 Teil 15 /1/ geregelt. Nach dieser Norm dürfen ausschließlich Lager aus dem Elastomerwerkstoff CR verwendet werden. Die Herstellung und Verwendung von zugelassenen EPDM-Lagern erfolgt gemäß einer Richtlinie des Instituts für Bautechnik (IfBt) /6/. Für die praktische Beurteilung der zugrundeliegenden rechnerischen Schubspannungen unter hohen mittleren Pressungen sind die aus den zulässigen Beanspruchungen genormter (zur Norm vorgesehenen) Regellager von Interesse.

Abhängig von bestimmten Geometrie einschränkungen ergeben sich die in Tabelle 1 der DIN E 4141 Teil 15 04.88 niedergelegten Regellager (Tabelle 13):

Tabelle 13: Abmessungen, Formfaktor und zulässige mittlere Pressungen von Regellagern gemäß DIN E 4141 Teil 15 04.88, Tabelle 1

t mm	b = a			b = 2 a		
	b/a/t mm	S	σ_m N/mm ²	b/a/t mm	S	σ_m N/mm ²
4	70/70/4	4,375	5,25	240/120/4	10,0	12,0
5	70/70/5	3,50	4,20	300/150/5	10,0	12,0
6	70/70/6	2,92	3,50	360/180/6	10,0	12,0
7	70/70/7	2,50	3,00	400/200/7	9,52	11,43
8	80/80/8	2,50	3,00	400/200/8	8,33	10,0
9	90/90/9	2,50	3,00	400/200/9	7,41	8,89
10	100/100/10	2,50	3,00	400/200/10	6,67	8,00
11	110/110/11	2,50	3,00	400/200/11	6,06	7,27
12	120/120/12	2,50	3,00	400/200/12	5,56	6,67

Die zulässige mittlere Pressung ergibt sich aus dem Rechenansatz

$$\text{zul } \sigma_m \leq 1,2 \cdot G \cdot S$$

G = Rechenwert des Schubverformungsmoduls ($G \geq 1 \text{ N/mm}^2$)

S = Formfaktor (vgl. Abschn. 6.2.1)

Für zugelassene EPDM-Lager ist die maximale zulässige mittlere Pressung auf

$$\text{zul } \sigma_m \leq 5 \text{ N/mm}^2$$

begrenzt /6/.

Der Verdrehungswinkel α des Lagers infolge elastischer und plastischer Verformung zuzüglich der Anteile aus Unebenheit und Schiefwinkligkeit der Auflagerflächen ist in DIN E 4141 Teil 15 wie folgt begrenzt:

$$\text{zul } \alpha \leq 0,5 \text{ t/a.}$$

Für zugelassene EPDM-Lager ist der zulässige Verdrehwinkel gemäß /6/ auf

$$\text{zul } \alpha \leq 0,2 \text{ t/a}$$

begrenzt.

Aus Tabelle 13 wird ersichtlich, daß sich aus den Regellagern zulässige mittlere Pressungen zwischen $3,0 \text{ N/mm}^2$ und $12,0 \text{ N/mm}^2$ ergeben. Die bei den Versuchen zugrundegelegten Pressungen überschreiten danach die Werte der DIN E 4141 Teil 15 bis zum 5fachen, die der Zulassungen für EPDM-Lager bis zum 12fachen.

Für die Regellager wurden gemäß den zulässigen Beanspruchungen (Norm, Richtlinie) die maximalen rechnerischen Schubspannungen für die Lastfälle zentrische und exzentrische Beanspruchung nach den in Abschnitt 6.2.1 erläuterten Rechenansätzen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 33 dargestellt und durch Zuordnung zu den normgerechten Regellagern wird eine baupraktische Eingrenzung ermöglicht.

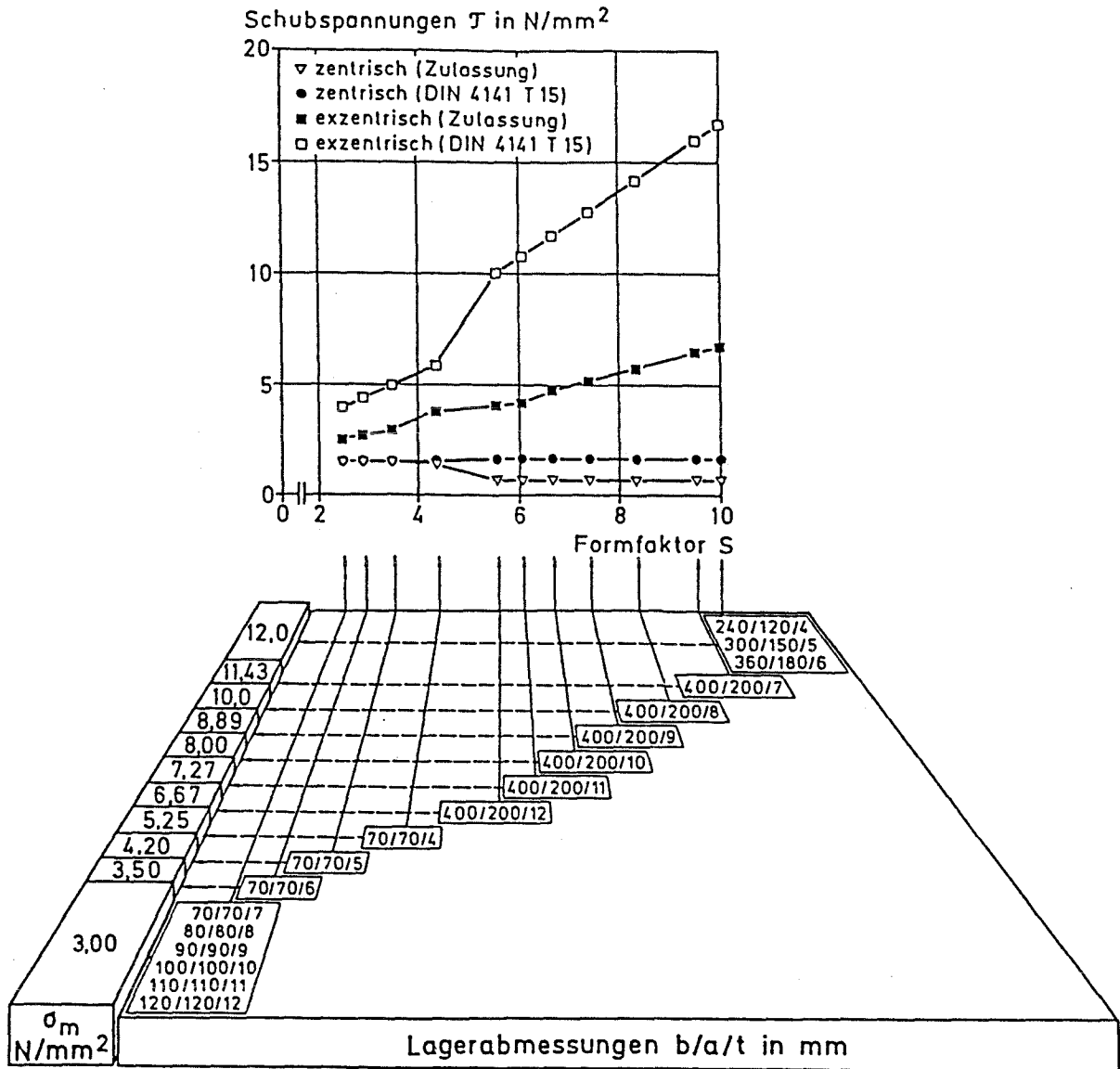


Bild 33: Zulässige rechnerische Schubspannungen für zentrische und exzentrische Belastung gemäß DIN E 4141 Teil 15 04.88 und den Richtlinien des IfBt (Zulassung) /6/

Laut einer Umfrage der Fertigteilverindustrie über die Anwendung unbewehrter Elastomerlager im Jahre 1973 /27/ variiert der Formfaktor S für praxisrelevante Anwendungsbereiche zwischen 4,4 und 9,9. Innerhalb des baupraktischen Anwendungsspektrums muß mit relativ geringen Schubspannungen

aus zentrischer Belastung ($\tau \leq 1,63 \text{ N/mm}^2$ für CR-Lager und $\tau \leq 1,44 \text{ N/mm}^2$ für EPDM-Lager), jedoch mit Schubspannungen bis zu 16 N/mm^2 für CR aus superponierter zentrischer Beanspruchung und Auflagerdrehwinkel gerechnet werden (s. Bild 33). Für Regellager aus EPDM-Qualität ergibt sich eine maximale Schubspannung von rd. $6,7 \text{ N/mm}^2$. Hohe Schubspannungen resultieren aus großen Formfaktoren, d. h. dem Verhältnis aus gedrückter zur freien Oberfläche. Tendenziell führen dünnere Lager zu höheren Formfaktoren und damit Schubspannungen.

Die Schubspannungen aus den zugrundeliegenden Parameterkombinationen der Versuche erreichen Werte zwischen $2,4 \text{ N/mm}^2$ und $28,8 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 12). Rd. 80 % aller Versuche mit CR 1-Qualität lagen rechnerische Schubspannungen im Rahmen der normgerechten Beanspruchungen ($\tau < 16 \text{ N/mm}^2$) zugrunde. Bei den Versuchen mit EPDM 1 lagen rd. 50 % im Rahmen zulassungsgerechter Beanspruchungen ($\tau < 7 \text{ N/mm}^2$).

6.2.3 Einfluß der Elastomerqualitäten

In Bild 34 ist der Schädigungsgrad in Abhängigkeit von den maximalen Schubspannungen, differenziert nach der Elastomerqualität, aufgetragen. Der Zusammenhang läßt sich ebenfalls durch eine Regression der Funktion $y = a \cdot x^b$ approximieren (EPDM 1: Bestimmtheitsmaß 87 %, CR 1: Bestimmtheitsmaß 43 %). Das Steigungsverhältnis der Kurven für CR 1 und EPDM 1 beträgt rd. 1 : 10, d. h. bei gleicher maximaler Schubspannung kann für ein EPDM 1-Lager ein 8mal höherer Schädigungsgrad erwartet werden.

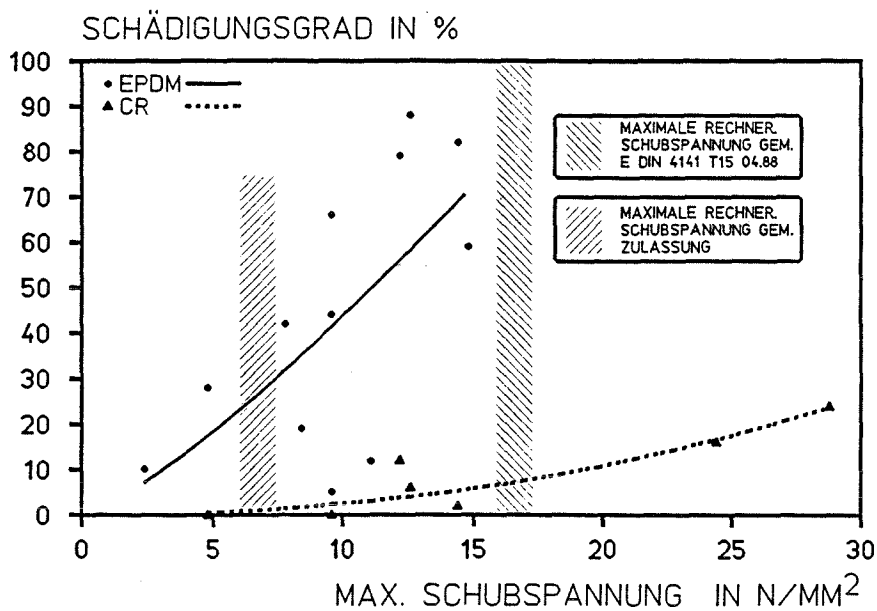


Bild 34: Schädigungsgrad in Abhängigkeit von der max. Schubspannung; Einfluß unterschiedlicher Elastomerqualitäten

6.2.4 Einfluß der Lagerdicken

Der Zusammenhang zwischen dem Schädigungsgrad und den maximalen Schubspannungen wird wesentlich durch die Lagerdicke beeinflusst (Bild 35). Während bei 10 mm dicken Lagern kein signifikanter Unterschied zwischen CR 1 und EPDM 1 erkennbar ist, beträgt das Steigungsverhältnis der Regressionskurven für 5 mm dicke Lager rd. 1 : 12. Bei gleicher maximaler Schubspannung lassen 5 mm dicke CR 1-Lager etwa 50 %, 5 mm dicke EPDM 1-Lager jedoch 500 % des Schädigungsgrades der 10 mm dicken Lager erwarten.

Eine mittlere Pressung von $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$ führt entsprechend den zugrundegelegten Parameterkombinationen zu maximalen Schubspannungen von $\tau = 12,6 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 12). Bis auf 5 mm dicke Lager aus EPDM 1 kann bei dieser Beanspruchung mit einem mittleren Schädigungsgrad von $\leq 10 \%$ gerechnet werden.

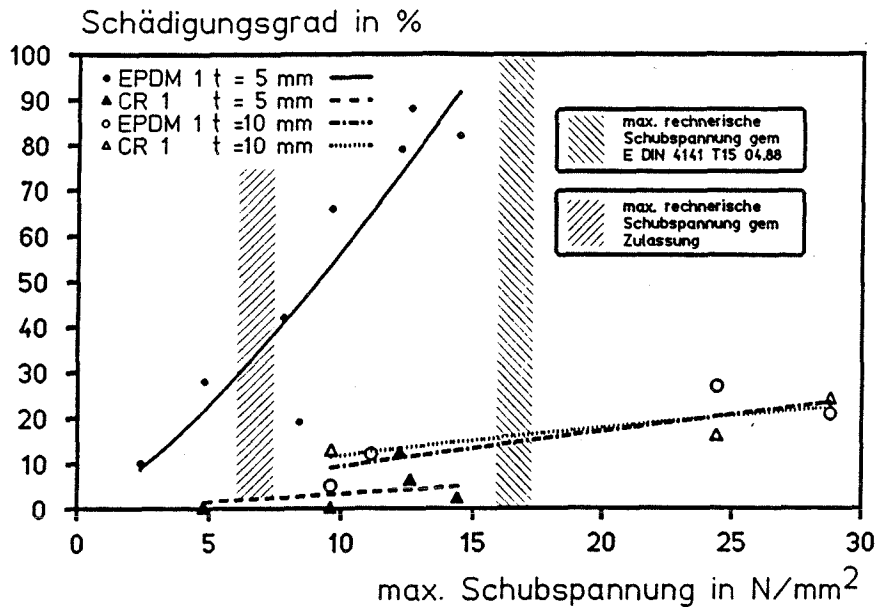


Bild 35: Schädigungsgrad in Abhängigkeit von der max. Schubspannung; Einfluß unterschiedlicher Lagerdicken

6.3 Schädigungsgrad und Endkriechmaße

6.3.1 Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$

Das Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ wird aus der Kriechkurve über ein Belastungsintervall $5\text{ min} < T \leq 1\text{ d}$ ermittelt. Bis auf Versuch 6 (vgl. Tabelle 9) kann innerhalb dieses Belastungsintervalls kein progressiver Kriechanstieg beobachtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, daß bis dahin noch keine Schädigungsprozesse im Elastomer stattgefunden haben. Das extrapolierte Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ nach Ross wird durch die Steigung der Kriechkurve, d. h. die Kriechgeschwindigkeit nach dem Belastungsvorgang, bestimmt. Eine erhöhte Kriechgeschwindigkeit deutet auf zunächst im submikroskopischen Bereich einsetzende Beanspruchungen der Molekülketten und beginnende Mikrorißbildung hin.

In Bild 36 ist der Schädigungsgrad der Lagerproben in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ dargestellt, differenziert nach der Elastomerqualität sind Regressionskurven ($y = a \cdot x^b$) eingetragen. Für die Versuche mit CR 1 ergeben sich Endkriechmaße $< 0,15$, die Endkriechmaße für EPDM 1 erreichen Werte bis $\phi_{1\infty} = 0,27$. Die Versuche mit EPDM 1 weisen unmittelbar nach dem Belastungsbeginn teilweise deutlich höhere Kriechgeschwindigkeit auf, dementsprechend werden nach der visuellen Bemusterung höhere Schädigungsgrade registriert. Das Steigungsverhältnis der Regressionskurven für CR 1 und EPDM 1 beträgt rd. 1 : 2,5 ein Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ von 0,15 läßt bei CR 1-Lagern einen Schädigungsgrad von rd. 15 %, bei EPDM 1-Lagern demnach von 45 %, erwarten.

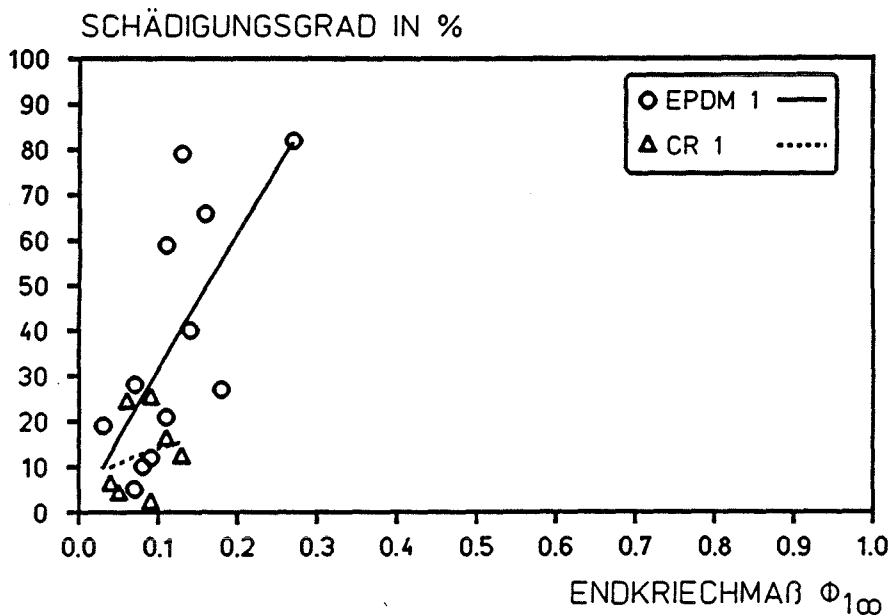


Bild 36: Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß ϕ_1 ; Einfluß unterschiedlicher Materialien

6.3.2 Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$

6.3.2.1 Einfluß der Elastomerqualitäten

Das Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$ wird für das Belastungsintervall nach dem Beginn des 1. Kriechanstieges bis zum 2. Kriechanstieg bzw. dem Versuchsende ermittelt (Bild 3). Es ergeben sich daher nach der Ross-Extrapolation relativ große Endkriechmaße, für CR 1 werden Werte bis zu 0,45, für EPDM 1 bis zu 0,90 errechnet (Tabelle 10). Das Ergebnis aus dem Versuch 1 wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da der Versuch während des progressiven Anstieges abgebrochen wurde (Bild 5).

In Bild 37 ist der Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$, getrennt nach der Elastomerqualität, dargestellt, der prinzipielle Zusammenhang wird durch Regressionskurven beschrieben ($y = a \cdot x^b$). Das Steigungsverhältnis der Kurven für CR 1 und EPDM 1 beträgt rd. 1 : 3. Infolge des progressiven Kriechanstieges und der höheren Kriechgeschwindigkeit nach den Schädigungsprozessen (vgl. Bild 19) nimmt bei EPDM 1 der Schädigungsgrad stärker zu als bei der CR 1-Qualität. Aus den Versuchen mit CR 1-Proben ergibt sich ein maximales Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$ von rd. 0,45 bei einem maximalen Schädigungsgrad von 30 %, dagegen steigt das Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ für EPDM 1 bis auf rd. 0,90 bei maximalem Schädigungsgrad von rd. 90 % an.

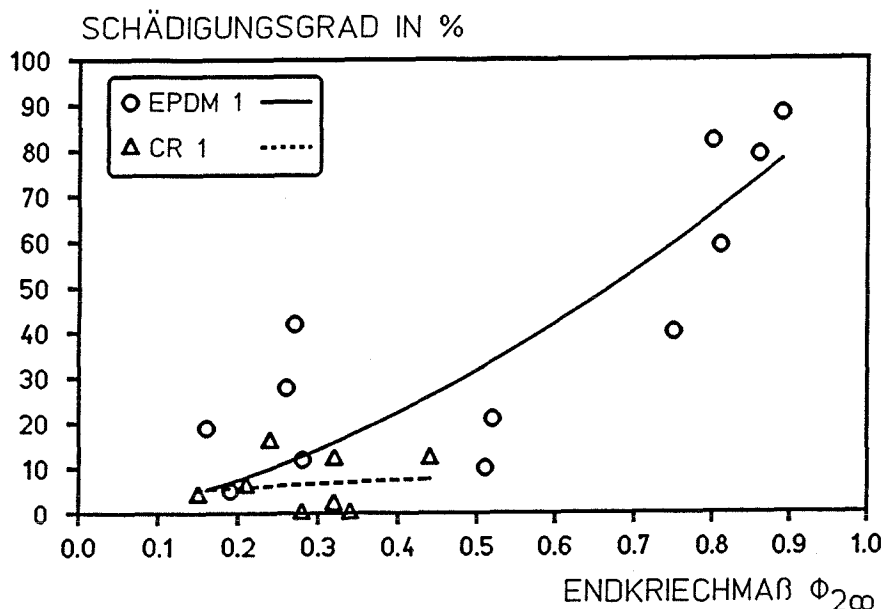


Bild 37: Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$; Einfluß unterschiedlicher Elastomerqualitäten

6.3.2.2 Einfluß der Lagerdicken

Differenziert man den Zusammenhang nach Elastomerqualität und Lagerdicke (Bild 38), so ergeben sich für die EPDM 1-Proben der Lagerdicke $t = 5 \text{ mm}$ die größten Endkriechmaße $\phi_{2\infty}$ (rd. 0,90) bei jeweils hohem Schädigungsgrad (rd. 90 %), dies resultiert überwiegend aus den relativ großen Verformungen bei kurzen Kriechanstiegsphasen. Für EPDM 1 der Lagerdicke $t = 10 \text{ mm}$ können ebenfalls große Endkriechmaße registriert werden ($\phi_{2\infty} < 0,75$), jedoch beträgt der Schädigungsgrad im Mittel nur rd. 50 % der 5 mm dicken Proben.

CR 1-Lager der Dicke $t = 10 \text{ mm}$ erreichen lediglich Endkriechmaße $< 0,25$ und der Schädigungsgrad beträgt im Mittel rd. 15 %. 5 mm dicke CR 1-Proben weisen bei max $\phi_{2\infty}$ von rd. 0,40 jedoch nur einen Schädigungsgrad von $< 10 \%$ auf.

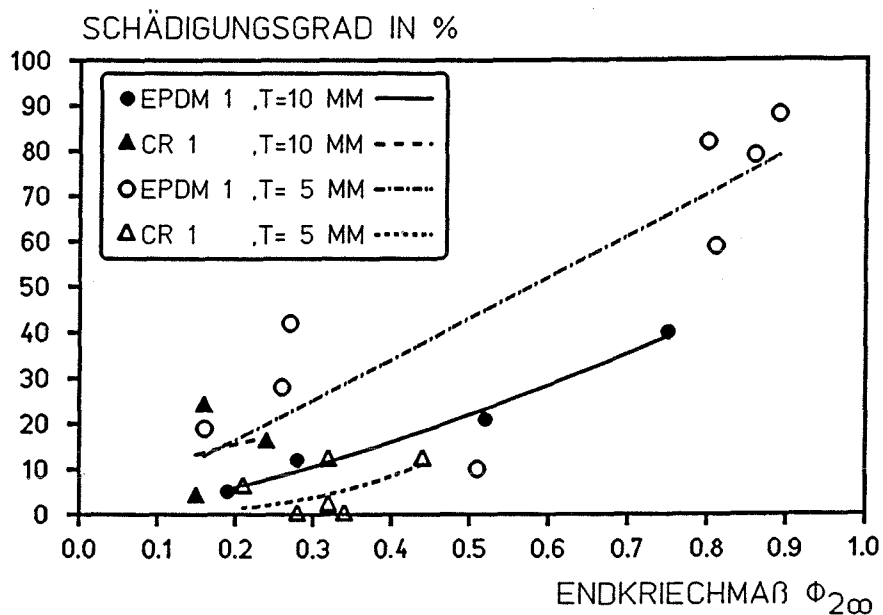


Bild 38: Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$; Einfluß unterschiedlicher Lagerdicken

6.3.2.3 Einfluß der mittleren Pressungen

Der Einfluß der Pressung auf das Verhältnis zwischen Schädigungsgrad und Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$ ist in Bild 39a für EPDM 1 und Bild 39b für CR 1 dargestellt. Bei der EPDM-Qualität führen höhere Pressungen zu größeren Endkriechmaßen $\phi_{2\infty}$ und zu höheren Schädigungsgraden. Ein exponentieller Zusammenhang kann aus den vorliegenden Versuchsergebnissen vermutet werden (Bild 39a). Pressungen oberhalb von 20 N/mm² führen zu Schädigungsgraden deutlich über 25 % sowie Endkriechmaßen $\phi_{2\infty} > 0,5$.

Für die CR 1-Qualität liegen lediglich zwei Versuchsergebnisse mit mittlerer Pressung $\sigma_m = 20$ N/mm² vor, daraus resultieren Endkriechmaße $\phi_{2\infty} < 0,28$ (Tabelle 10) und < 4 % (Tabelle 11). Aus den Versuchsergebnissen mit höheren Pressungen ($\sigma_m = 40/60$ N/mm²) resultieren Kriechmaße $\phi_{2\infty} < 0,35$ für $\sigma_m = 40$ N/mm² und $\phi_{2\infty} < 0,45$ für $\sigma_m = 60$ N/mm² (Bild 39b). Bild 39b illustriert, daß für die CR 1-Qualität entweder ein anderer Zusammenhang oder aber nur wenige Ergebnisse vorliegen. Die Werte

für $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$ lassen Letzteres als wahrscheinlich gelten. Höhere Pressungen ($\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$) führen auch bei EPDM 1-Versuchen fallweise zu andersartigen Ergebnissen, was auf eine zu hohe Beanspruchung in der Belastungsphase hinweist.

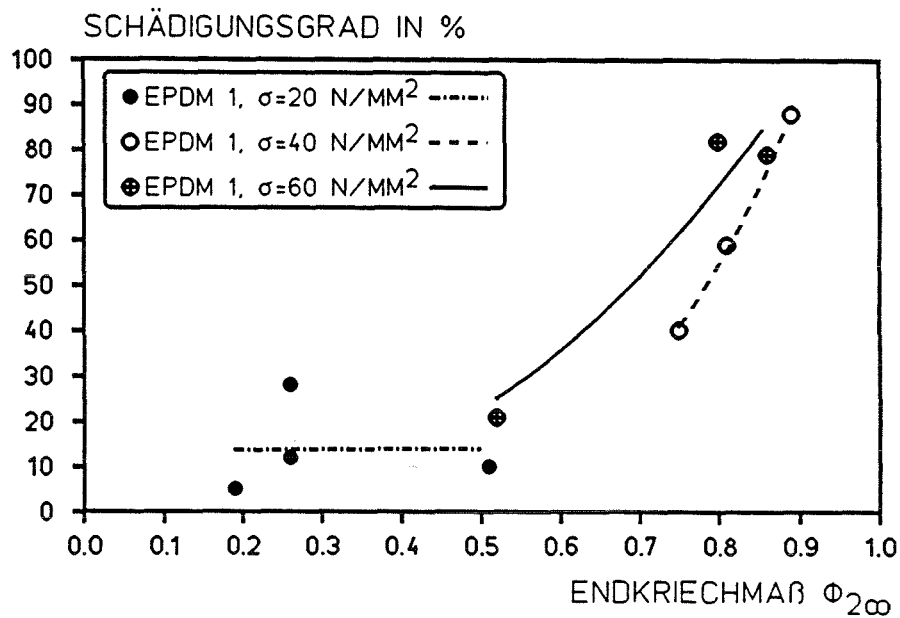


Bild 39a: Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$; EPDM 1, Einfluß unterschiedlicher Pressungen

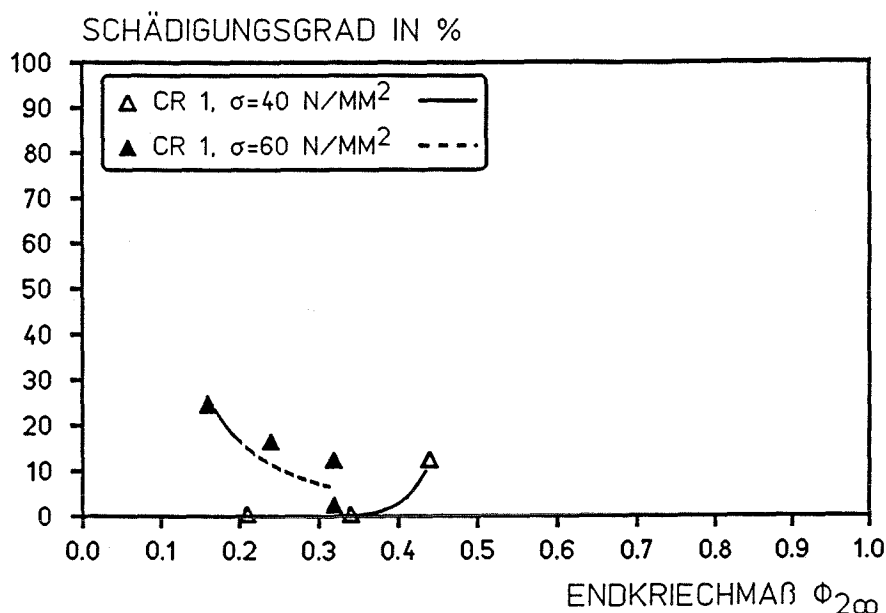


Bild 39b: Schädigungsgrad in Abhängigkeit vom Endkriechmaß $\Phi_{2\infty}$; CR 1, Einfluß unterschiedlicher Pressungen

7 DISKUSSION

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen trendmäßige Aussagen über das Dauerstandverhalten der geprüften Elastomertypen unter deutlich höheren Pressungen als derzeit zugelassen ermöglichen, und für die aktuelle Baupraxis, die Normungsarbeit und die Konzeption weiterer Forschungen geeignete Hinweise liefern.

Einfluß der Elastomerqualitäten auf die Kriechverformung:

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die EPDM 1-Qualität größere Kriechverformungen und -geschwindigkeiten bei identischer Beanspruchung gegenüber der CR 1-Qualität aufweist (Bild 19). Die Kriechneigung (Kriechverformung und -geschwindigkeit) nimmt bei EPDM 1 überproportional mit höherer mittlerer Pressung zu, während bei CR 1-Lagern nur eine geringe Zunahme der Kriechneigung eintritt (Bilder 25a bis 26b).

Das Dauerstandverhalten umfaßt alle elastischen und verzögert-elastischen Verformungen, Fließen, Kriechen sowie chemische oder physikalische Strukturänderungen nach einem Zeitpunkt 5 Minuten nach der Lastaufbringung (vgl. Abschn. 0.1). Im Lagerspalt herrscht eine synergetische Wechselwirkung zwischen Kriecheinfederung (Dickenabnahme), Fließen (Ausbreitung im Lagerspalt) und Zunahme der Randschubspannungen (vgl. Bild 33) sowie der Festigkeitsänderung des elastomeren Werkstoffes. Die Kriechdehnung ϵ_k wird auf die "elastische Verformung" 5 Minuten nach der Lastaufbringung bezogen. Aus den ermittelten "elastischen Verformungen" (Tabelle 8) kann kein signifikanter Unterschied zwischen dem Einfederungsverhalten von EPDM 1 und CR 1 bei vergleichbaren Versuchsparametern abgeleitet werden.

Bild 19 illustriert, daß bis zu einer Belastungsdauer von rd. 1 Tag bei den Elastomerqualitäten gleichartige Verhältnisse im Lagerspalt vorherrschen. Danach weisen EPDM 1-Lager zunehmende Kriechneigung (Überlagerung von materialspezifischem Kriechen, Fließen und chemorheologische Effekte) auf.

Einfluß der Lagerdicken auf die Kriechverformung:

Das Dauerstandverhalten der 5 mm dicken EPDM 1-Proben erweist sich im Hinblick auf die Kriechverformung (Tabelle 4), den Zeitpunkt des Kriechanstieges (Tabelle 4) sowie der Schädigung in Abhängigkeit von der Schubspannung (Bild 35) und des Endkriechmaßes (Bild 38) wesentlich ungünstiger als die 10 mm dicken EPDM 1-Proben. Bei CR 1 kann ein nur geringfügig schlechteres Dauerstandverhalten für die dünneren Lagerproben im Vergleich zu den 10 mm dicken Lagern registriert werden.

Dieses Phänomen kann nicht allein mit zunehmenden Randschubspannungen erklärt werden, es muß aufgrund der Elastomerstruktur des EPDM (geringere Vernetzungsdichte, geringere Bindungsenergie) mit höherer innerer Reibung (Relativbewegung von Volumenelementen) gerechnet werden. Die spezifische Beanspruchung je Vernetzungspunkt ist somit größer und führt im ungünstigsten Falle zur Zerstörung des elastomeren Werkstoffes (Bild 32).

Einfluß des Drehwinkels auf die Kriechverformung:

Entsprechend den in Abschnitt 5.3.5 diskutierten Ergebnissen ist der Einfluß des zugrundegelegten Drehwinkels $\alpha = 0,3 \text{ t/a}$ auf das Dauerstandverhalten als gering einzustufen. Lediglich bei Versuchen mit EPDM 1 bei hohen Pressungen ($\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$) führt die exzentrische Lasteinleitung zu überproportionalem Kriechanstieg.

Exzentrische Lasteinleitung führt zur asymmetrischen Spannungsverteilung, das elastische Materialverhalten führt jedoch mit zunehmender Pressung zur Lastkonzentration in der Lagerachse /11/. Im Kurzzeitversuch zur Ermittlung der Spannungsverteilung in der Lagerfuge /5/ wird deutlich, daß das Maximum der Spannungsverteilung um maximal rd. 30 % der Lagerabmessungen aus der Lagerachse auswandert. Es wird jedoch ebenfalls ersichtlich, daß die Spannungen am Lagerrand (zentrische und exzentrische Lasteinleitung) nicht gegen Null gehen /28/. Tatsächlich sind die realen Randschubspannungen geringer als rechnerisch angenommen. Während einer Langzeitbeanspruchung können Spannungsumlagerungen zu einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung führen.

Einfluß der Lagerfläche auf die Kriechverformung:

Der Einfluß unterschiedlicher Lagerflächen ist im Anhang (Bilder A25 bis A32) dargestellt. Versuche mit einer Lagerfläche von $A = (100 \times 200 \text{ mm}^2)$ weisen gegenüber solchen mit $A = (100 \times 100 \text{ mm}^2)$ ein unwesentlich nachteiligeres Dauerstandverhalten auf, dies gilt auch bei hohen Pressungen.

Größere Lagerflächen führen zu einer Spannungskonzentration in der Lagerachse und damit zu einer deutlichen Verringerung der Normalspannungen am Lagerrand /5, 28/. Damit liegen rechnerisch höhere Randschubspannungen vor, doch ergibt sich durch die größere Druckfläche offensichtlich ein günstigeres Tragverhalten.

Schädigungsgrad der Lagerproben:

Die in Abschnitt 5.4 beschriebene Gefügezerstörung des elastomeren Werkstoffes sowie die damit einhergehende Ablösung der Deckschicht kann lediglich an EPDM 1-Proben registriert werden, und dort mehrheitlich bei

5 mm dicken Lagern. Bei den 5 mm dicken Lagern tritt bei höheren Pressungen fast vollkommene Gefügezerstörung ein. Durch die relativen Gewichtungsfaktoren der Beurteilungskriterien zur Ermittlung des Schädigungsgrades (vgl. Abschn. 5.4) werden die beiden zuletzt genannten Beurteilungskriterien Gefügezerstörung und Ablösen der Deckschicht zusammen mit 70 % berücksichtigt, da sie für die dauerhafte Funktion der Lager von besonderer Bedeutung sind. Die Gefügezerstörung und die damit eingeleitete Ablösung der Deckschicht resultieren aus molekularen Versagenvorgängen, die zunächst zu fortschreitender Mikrorißbildung führen. Dagegen können Risse an den freien Oberflächen infolge der Deformationen bei hohen Pressungen nicht verhindert werden. Die infolge der Auswölbung der freien Seitenflächen hervorgerufenen radialen Zugspannungen werden nach einem Übergangsbereich von den Druckspannungen überlagert. Bei ausreichender Vernetzungsstruktur setzen sich solche Risse infolge der radialen Zugspannungen nicht ins Probeninnere fort. Durch visuelle Bemusterung der CR 1-Proben nach dem Ausbau konnte selbst nach 700tägiger Belastungsdauer kein Fortpflanzen der Risse beobachtet werden (Rißtiefe < 10 % der Kantenlänge). Entsprechend den Gewichtungsfaktoren kann daher ein maximaler Schädigungsgrad von rd. 25 % zur Gewährleistung ausreichender Gebrauchsfähigkeit angesetzt werden.

In den Bildern 34 und 35 sind die maximalen rechnerischen Schubspannungen gemäß DIN 4141 Teil 15 (für CR-Lager) und gemäß der IfBt-Richtlinie /6/ (für EPDM-Lager) eingetragen. Danach werden innerhalb der zulässigen Beanspruchung von normgerechten CR 1-Regellagern ($\max \tau < 16 \text{ N/mm}^2$) Schädigungsgrade < 10 % erreicht. Vergleichbare EPDM-Lager lassen Schädigungsgrade von bis zu 80 % unter normgerechter Beanspruchung erwarten. Gemäß den Zulassungen für EPDM-Lager sind maximale Schubspannungen von rd. $7,0 \text{ N/mm}^2$ möglich, diese führen bei der EPDM 1-Qualität zu Schädigungsgraden von 25 % (Bild 34).

Die analoge Differenzierung nach Lagerdicken (Bild 35) zeigt, daß 5 mm dicke CR 1-Lager sowie 10 mm dicke CR 1- und EPDM 1-Proben innerhalb des Beanspruchungsbereiches der Norm bzw. der Richtlinie keine trennscharfen Zusammenhänge liefern und Schädigungsgrade < 20 % erwarten lassen. 5 mm

dicke EPDM 1-Lager führen selbst nach zugelassener Beanspruchung zu Schädigungen bis 35 % (Bild 35), sofern diese dauernd wirkt.

Extrapolation von Endkriechmaßen:

Die Eignung des elastomeren Werkstoffes für den vorgesehenen Verwendungszweck kann anhand des extrapolierten Endkriechmaßes $\phi_{1\infty}$ nach Ross im Kurzzeitversuch nachgeprüft werden. Eine ungeeignete molekulare Struktur führt bei hohen Pressungen unmittelbar nach dem Belastungsbeginn zu einer hohen Kriechgeschwindigkeit und somit zu einem großen Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen kann bei einem Endkriechmaß $\phi_{1\infty} < 0,15$ mit einem Schädigungsgrad von $< 25\%$ nach dem Dauerstandversuch gerechnet werden (Bild 36).

Aus der Kriechkurve des Dauerstandversuches kann durch Extrapolation des Endkriechmaßes $\phi_{2\infty}$ das Ausmaß der Schädigungsprozesse abgeschätzt werden. Nach einer Versuchsdauer von rd. 1 Jahr sollte das Endkriechmaß $\phi_{2\infty}$ nicht größer als 0,30 sein, um eine unzulässige Schädigung des Lagers auszuschließen (Bild 37).

Aufgrund der hohen Beanspruchung werden unmittelbar nach dem Belastungsvorgang große "elastische Verformungen" erreicht, die zu hohen inneren mechanischen Beanspruchungen führen. Das Material wird bei hohen Pressungen derart "überdrückt", daß Kriechverformungen nur noch in geringem Maße möglich sind. In Bild 40 und 41 ist der Zusammenhang zwischen "elastischer Anfangsverformung" nach 5 Minuten und Endkriechmaß $\phi_{1\infty}$ bzw. $\phi_{2\infty}$ illustriert. Tendenziell führen hohe Anfangseinfederungen zu geringerer Kriechneigung, der Zusammenhang ist jedoch verglichen mit dem Streubereich nicht streng.

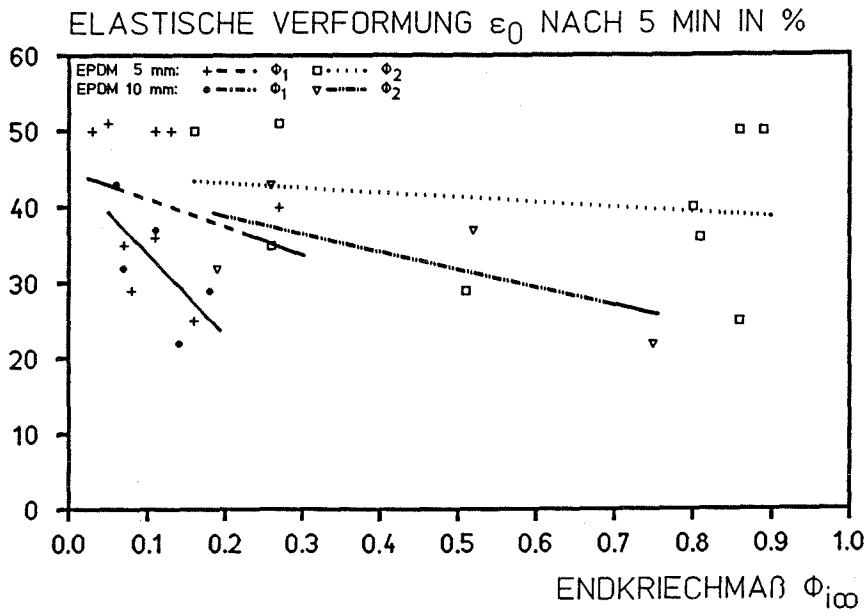


Bild 40: Elastische Anfangsverformung ϵ_0 nach 5 Minuten und zugehöriges Endkriechmaß $\Phi_{1\infty}$ bzw. $\Phi_{2\infty}$ EPDM 1- und CR 1-Qualität, Lagerdicke $t = 5$ mm

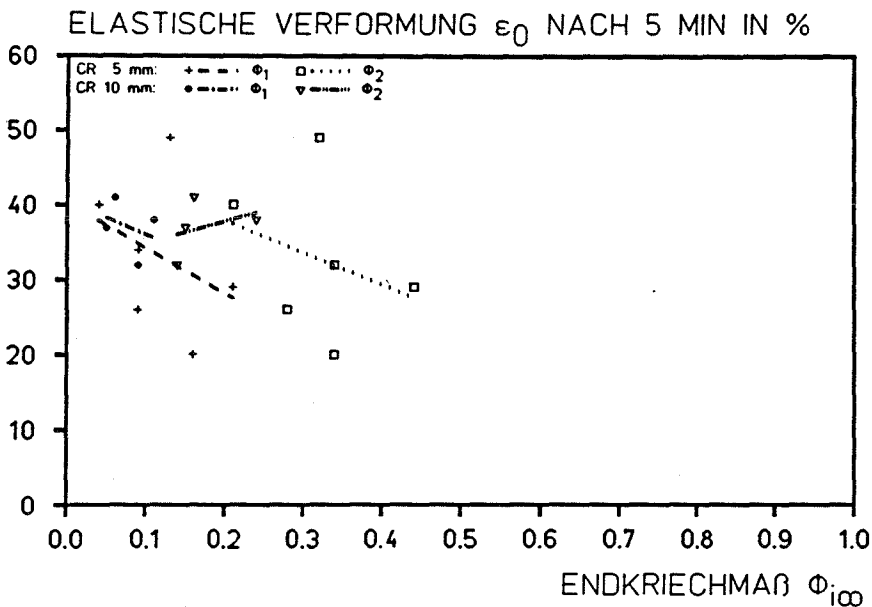


Bild 41: Elastische Anfangsverformung ϵ_0 nach 5 Minuten und zugehöriges Endkriechmaß $\Phi_{1\infty}$ bzw. $\Phi_{2\infty}$ EPDM 1- und CR 1-Qualität, Lagerdicke $t = 10$ mm

8 BAUPRAKTISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Auswertung der vorliegenden Versuchsergebnisse sowie die Resultate weiterführender Untersuchungen an allen derzeit verfügbaren zulassungs- und normgerechten CR- und EPDM-Qualitäten (F 239) /29/ erlaubt die Formulierung erster baupraktischer Aussagen:

- Obwohl die Versuche gezielt höhere Beanspruchungen in Stützenstößen (bis $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$) simulierten, liegen die maximalen rechnerischen Schubspannungen überwiegend im Bereich der zulässigen Beanspruchungen der DIN 4141 Teil 15 (CR-Qualität) /1/ bzw. der Zulassungen (EPDM-Qualität) /6/. Die Ergebnisse gelten daher auch für die hochbeanspruchte zulassungs- und normgerechtere Verwendung solcher Lager in Hochbauten (Bilder 33 bis 35).
- CR-Lager weisen ausreichendes Dauerstandverhalten bis zu mittleren Pressungen von maximal 20 N/mm^2 auf.
- EPDM-Lager weisen innerhalb der in den Zulassungen geregelten mittleren Pressungen von maximal 5 N/mm^2 ausreichendes Dauerstandverhalten auf. Dünne Lager führen hier zu Einschränkungen.
- EPDM-Qualitäten können nach derzeitigem Kenntnisstand nicht als Baustoff in DIN E 4141 Teil 15 04.88 aufgenommen werden.
- Das Dauerstandverhalten von Elastomeren (CR und EPDM) ist hersteller- und rezepturabhängig. Baupraktische Aussagen können erst nach Dauerstandversuchen unter erhöhter Beanspruchung ($\sigma_m = 40/60 \text{ N/mm}^2$) und einer Belastungsdauer deutlich länger als 100 Tage gewonnen werden.

Detaillierte praxisorientierte Aussagen werden im Rahmen des fortführenden Forschungsvorhabens (F 239) /29/ möglich.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR WEITERE FORSCHUNGEN

Die vorliegenden Ergebnisse scheinen geeignet, wichtige Hinweise auf das Dauerstandverhalten elastomerer Werkstoffe zu geben. Das hinsichtlich der Kriechverformung, der Kriechgeschwindigkeit sowie des Schädigungsgrades stark differierende Verhalten zwischen EPDM 1- und CR 1-Lagern gibt zunächst Anlaß zu der Vermutung, daß werkstoffspezifische Unterschiede in der Elastomerstruktur als ursächlich gelten können. Da in diesem Forschungsvorhaben die zwei zulassungs- bzw. richtliniengemäßen Elastomerqualitäten eines Herstellers untersucht werden, sollen in einem Folgevorhaben (F 239) acht weitere zulassungsgemäße Elastomerqualitäten (4 EPDM, 4 CR) untersucht werden, um eventuelle Einflüsse aus dem Herstellungsprozeß sowie der Elastomerrezeptur berücksichtigen zu können.

Da die Versuchsparameter Lagerfläche und Drehwinkel bei gleicher mittlerer Pressung die Kriechgeschwindigkeit, d. h. die Steigung der Kriechkurve, unwesentlich beeinflussen, wird das weitere Versuchsprogramm (F 239) auf eine einheitliche Lagerfläche von $A = (100 \times 100 \text{ mm}^2)$ sowie auf zentrische Lasteinleitung reduziert. Das Versuchsprogramm mit reduzierter Parameterkombination erlaubt die Beurteilung des Dauerstandverhaltens gleichermaßen, führt jedoch schneller zu verifizierbaren Aussagen. Beim Verzicht auf exzentrische Lasteinleitung (z. B. $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$, $\alpha = 0$) ergeben sich vergleichbare maximale Schubspannungen wie bei niedriger Pressung und Drehwinkel (z. B. $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$, $\alpha = 0,3 \text{ t/a}$), der elastomere Werkstoff wird jedoch über den gesamten Querschnitt einer höheren Schubspannung ausgesetzt (Tabelle 12). Es erfolgt eine zusätzliche Beschränkung auf höhere Pressungen von $\sigma_m = 40/60 \text{ N/mm}^2$.

Die weiterführenden Versuche beziehen alle derzeit zugelassenen Elastomerqualitäten ein und sollen ein allgemeingültiges Bewertungsverfahren für die Dauerstandfestigkeit liefern. Dabei sollten die chemisch-physikalischen Prüfungen aus der Fremdüberwachung /6, 30/ (Elastomerzusammensetzung, physikalische Kennwerte an ungealterten und gealterten Proben, Schubmodul) durch einen geeigneten Versuch zur Charakterisierung der Vernetzungsstruktur ergänzt werden. Die u. a. in /30/ festgelegte Elastomerzusammensetzung genügt allein offenbar nicht zur Charakterisierung eines Elastomers mit ausreichender Dauerstandfestigkeit. In /31/

wird der Quellversuch als geeignetes Kriterium für die Ermittlung der Vernetzungsdichte angeführt. Die Durchführung solcher Versuche kann sinnvollerweise in Anlehnung an DIN 53 521 04.79 /32/ erfolgen. Wichtige Hinweise auf die Vernetzungsstruktur liefert die Bestimmung des Schwefelgehalts oder vergleichbarer Stoffe.

Elastomere sind gezielt durch thermographische (TG) und thermoanalytische (DSC) Untersuchungen differenzierbar /33/. Dazu ist ein Katalog der Elastomerqualitäten und handelsüblicher Inhaltsstoffe erforderlich (finger-print). Die Verfahren erlauben

- die Überprüfung der Rezeptur und Produktionskonstanz (im Gegensatz zu einzelnen Inhaltsstoffen /30/)
- die Differenzierung einzelner Elastomere und Inhaltsstoffe
- durch Korrelation mit den physikalischen Eigenschaften /30/ und den Ergebnissen der Dauerstandversuche Bewertungskriterien für die Dauerhaftigkeit solcher Lager.

Durch Infrarot-Spektrogramme (IR) am Extrakt des Elastomeren sind die Hilfsstoffe (z. B. Weichmacher), die bis zu 15 M.-% ausmachen /30/, näher differenzierbar. Die Spektrogramme sind ebenfalls als "finger-print" für die Güteüberwachung (Produktionskonstanz) denkbar.

Das diskutierte Forschungsvorhaben befaßt sich ausschließlich mit dem Dauerstandverhalten unbewehrter Elastomerlager unter konstanter mittlerer Pressung. Allgemein herrscht die Auffassung, daß abwechselnde Be- und Entlastung zum Wandern des Lagers im Lagerspalt führen kann /1/. Daher sollte als weiterer Prüfparameter eine zyklisch wechselnde Belastung auch im Hinblick auf das Dauerstandverhalten untersucht werden. Es besteht Grund zu der Annahme, daß eine zyklische Belastung die Kriechverformungen ungünstig beeinflusst.

Eine abschließende Beurteilung des Dauerstandverhaltens kann erst nach Vorliegen der weiterführenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens F 239 /29/ gegeben werden. Die Interpretation der Ergebnisse von 10 verschiedenen zulassungsgemäßen Lagertypen von 3 Herstellern erlaubt die Präzisierung ergänzender Versuche zur Optimierung der Lager für den vorgesehenen Verwendungszweck.

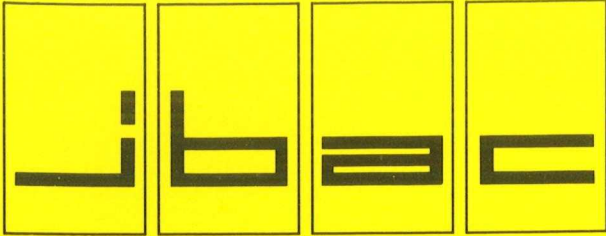
8 LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ DIN E 4141 Teil 15 04.88. Lager im Bauwesen - unbewehrte Elastomerlager
- /2/ DIN 4141 Teil 3 09.84. Lager im Bauwesen - Lagerung für Hochbauten
- /3/ Müller, F. ; Sasse, H. R. ; Thormählen, U.: Stützenstöße im Stahlbetonfertigteilbau mit unbewehrten Elastomerlagern. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1982), Nr. 339
- /4/ Topaloff, B.: Gummilager für Brücken - Berechnung und Anwendung. In: Der Bauingenieur 39 (1964), Nr. 2, S. 50-64
- /5/ Rößler, G.: Verteilung der Pressung in der Fuge von elastomergelagerten Bauteilen. Forschungsbericht F 233, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (Hrsg.), 1986
- /6/ Richtlinien für die Herstellung und Verwendung von unbewehrten Elastomerlagern. In: Mitteilungen des Instituts für Bautechnik (1972), Nr. 6, S. 7-9
- /7/ Schäffer, E. et al.: Handbuch der Ingenieurwissenschaften. Bd. 2: Der Brückenbau. Leipzig : W. Engelmann, 1890
- /8/ Findley, W. N. ; Peterson, D. P.: Prediction of long-time creep with ten-year creep data on four plastic laminates. In: Proceedings of the American Society for Testing and Materials (ASTM) (1958), S. 841-855
- /9/ Cessna, L. C.: Stress-time superposition of creep data for polypropylene and compled glass-reinforced polypropylene. In: Polymere Engineering and Science 11 (1971), Nr. 3
- /10/ Büche, F.: The dynamics of network, response creep. Physical Properties of Polymers. Interscience Publication : New York, 1962
- /11/ Sasse, H. R. ; Schorn, H.: Elastomere als Baulager - Stand der Entwicklung. In: "plasticonstruction" (1971), Nr. 5, S. 214-227

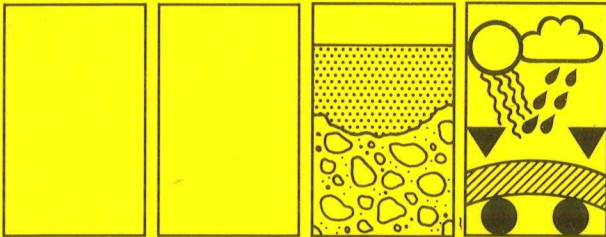
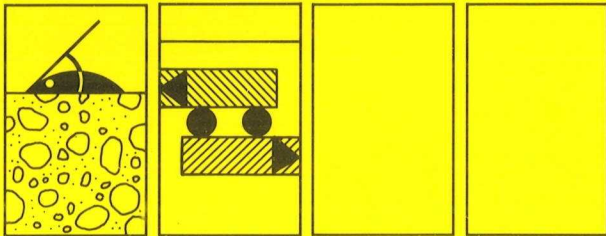
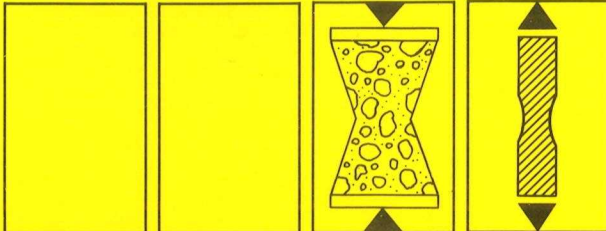
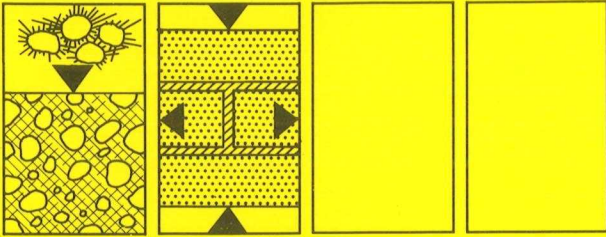
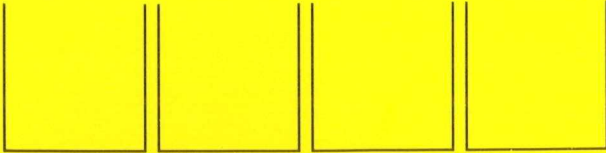
- /12/ Flohrer, M.: Untersuchungen über die Eignung unbewehrter Elastomerlager als Baulager. In: Betonstein-Zeitung (1971), Nr. 11
- /13/ Battermann, W.: Baulager aus synthetischen Elastomeren. In: Kunststoffe im Bau (1966), Nr. 7
- /14/ Bock, H. M.: Ein Beitrag zur Berechnung des ebenen Verformungszustandes von Elastomerlagern mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente. Berlin : Selbstverlag. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 1976
- /15/ Lehmann, D.: Anwendung der nichtlinearen Elastizitätstheorie und des Mehrstellen-Differenzen-Verfahrens zur Berechnung des ebenen Verformungszustandes von Elastomer-Lagern. Berlin : Selbstverlag. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 1976
- /16/ Bell, L. W. ; Shloss, A. L. ; Subramanian, N. S.: Additional design data on full-size bridge bearing pads of neoprene. World Congress on Joint Sealings and Bearing Systems for Concrete Structures, American Institute, Detroit, 1982
- /17/ Kordina, K. ; Osteroth, H.-H.: Zur Auflagerung von Stahlbetonbauteilen mittels unbewehrter und bewehrter Elastomerlager. In: Der Bauingenieur 59 (1984)
- /18/ Wood, L. A.: Representation of long-time creep in a pure-gum rubber vulcanizate. In: Journal of Research of the National Bureau of Standards, Washington D. C., 1980
- /19/ Hofmann, W.: Kautschuk-Technologie. Uerdingen : Bayer AG, 1973
- /20/ Braun, D. ; Wendorff, J. H.: Untersuchungen von molekularen Versagensvorgängen in Elastomeren. In: Kautschuk + Gummi, Kunststoffe 33 (1980), Nr. 10
- /21/ Prüfbericht Nr. A 689: Eignungsprüfung unbewehrter Elastomerlager, Typ "bi-Trapezlager". Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (Hrsg.), 1977
- /22/ Prüfbericht Nr. A 904: Eignungsprüfung bewehrter Elastomerlager, Typ "Magnumlager". Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (Hrsg.), 1980

- /23/ Ross, A. D.: Concrete Creep Data. In: The Structural Engineer (1937)
- /24/ Wittmann, F. ; Setzer, M.: Vergleich einiger Kriechfunktionen mit Versuchsergebnissen. In: Cement and Concrete Research 1 (1971), S. 679-690
- /25/ Ehrenstein, G. W.: Das Kriechen von Thermoplasten. In: Konstruktion Elemente Methoden (KEM), 1977
- /26/ Eggert, H. ; Grote, J. ; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen. Bd. 1. Berlin : W. Ernst & Sohn, 1974
- /27/ Kessler, E.: Die Anwendung unbewehrter Elastomerlager. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 53 (1987), Nr. 6, S. 419-429
- /28/ Sasse, H. R.: Gleit- und Verformungslager im Hoch- und Brückenbau. In: VDI-Berichte Nr. 384 (1980)
- /29/ Breitbach, M.: Dauerstandverhalten unbewehrter Elastomerlager. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), Forschungsvorhaben F 239 (unveröffentlicht)
- /30/ DIN E 4141 Teil 150 05.87. Lager im Bauwesen - Unbewehrte Elastomerlager, Baustoffe und Überwachung
- /31/ Hoffmann, M. ; Krämer, H. ; Kuhn, R.: Polymeranalytik I. Stuttgart : Georg Thieme, 1977
- /32/ DIN 53 521 04.79. Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Bestimmung des Verhaltens gegen Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase

Aachen, 26.06.1988 Br/Pj.-

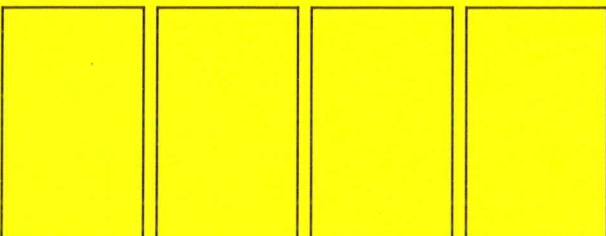


Institut für Bauforschung Aachen
 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



Baustoff · Bauteil · Bauwerk

**Forschung · Entwicklung
 Überwachung
 Prüfung · Beratung**



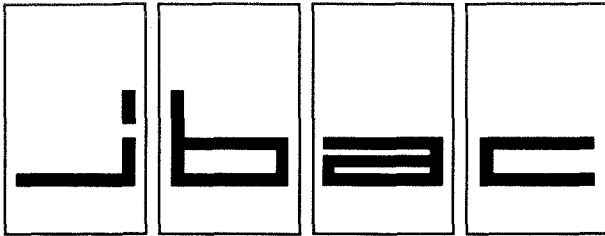
Schinkelstraße 3 · D-5100 Aachen
 Tel. (02 41) 80-5100 · Telex 8 32 704 THAC D
 Telefax (02 41) 80-5120

DAUERSTANDVERHALTEN HOCHBELASTE-
 TER UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER
 IN STÜTZENSTÖSSEN DES BETONFERTIG-
 TEILBAUES

- ANHANG -

ABSCHLUSSBERICHT

F 1 7 9



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Schinkelstraße 3, D-5100 Aachen

Telefon (02 41) 80-5100 · Telex 832 704 thac d · Telefax (02 41) 80-5120

THEMA

DAUERSTANDVERHALTEN HOCHBELASTE-
TER UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER
IN STÜTZENSTÖSSEN DES BETONFERTIG-
TEILBAUES

- ANHANG -

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 1 7 9

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. H. R. Sasse

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. M. Breitbach

Auftraggeber/
Förderer

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftragsdatum
Aktenzeichen

23.06.1982

IV/1-5-346/82

Dieser Bericht umfaßt 33 Seiten, davon - Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

INHALTSVERZEICHNIS DES ANHANGS

Vergleich der Kriechkurven mit gleicher Parameterkombination

	Bild Nr.
Einfluß der Lagerdicken	A1 bis A9
Einfluß der mittleren Pressungen	A10 bis A15
Einfluß der mittleren Pressungen und der Lagerdicke	A16
Einfluß des Drehwinkels	A17 bis A21
Einfluß des Drehwinkels und der mittleren Pressungen	A22 bis A24
Einfluß der Lagerfläche	A25 bis A32

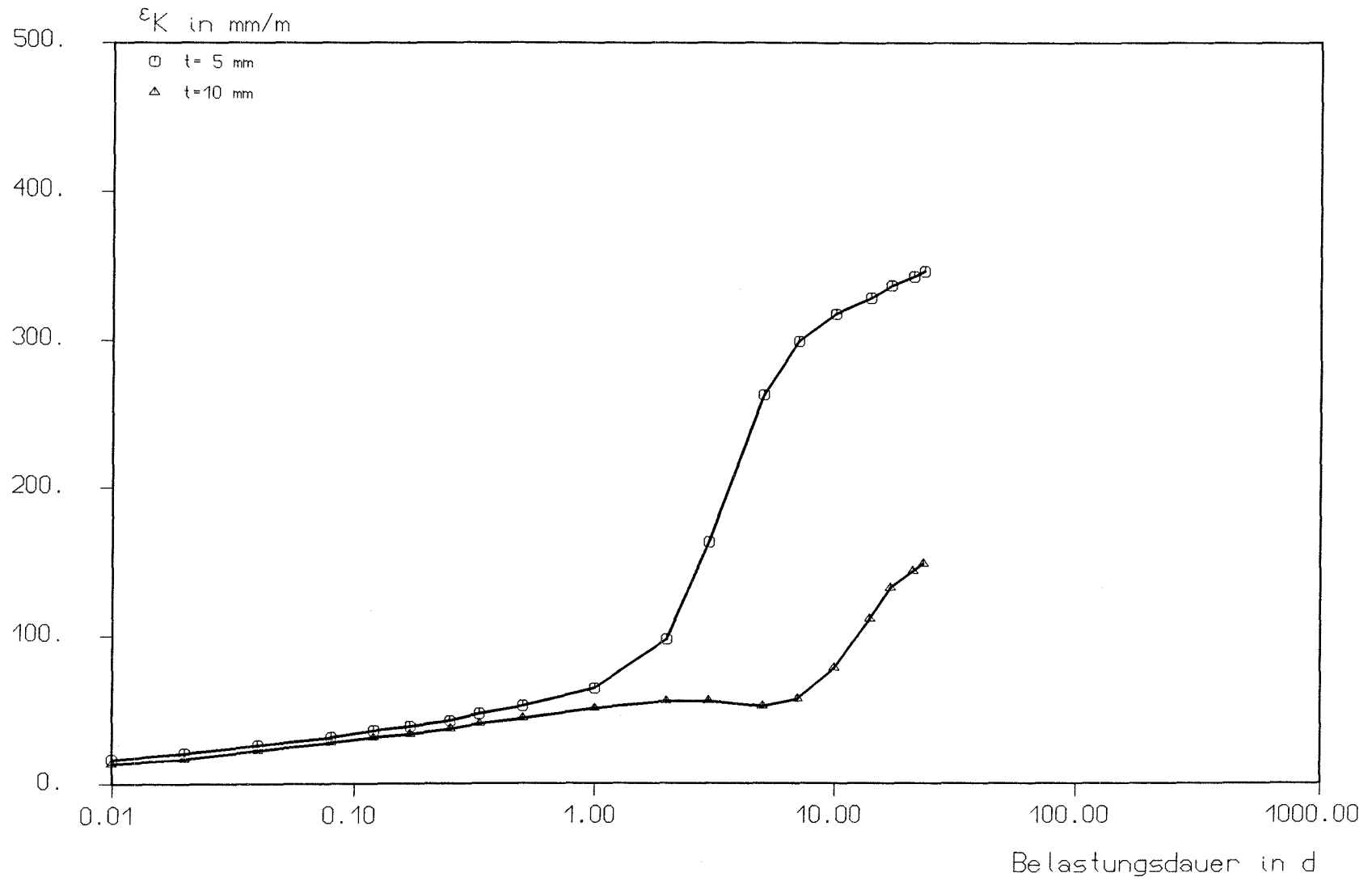


Bild A1

Kriechkurven Versuch Nr.1 und 2
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \cdot 200 \text{ mm}^2$, $t=5/10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m=60 \text{ N/mm}^2$

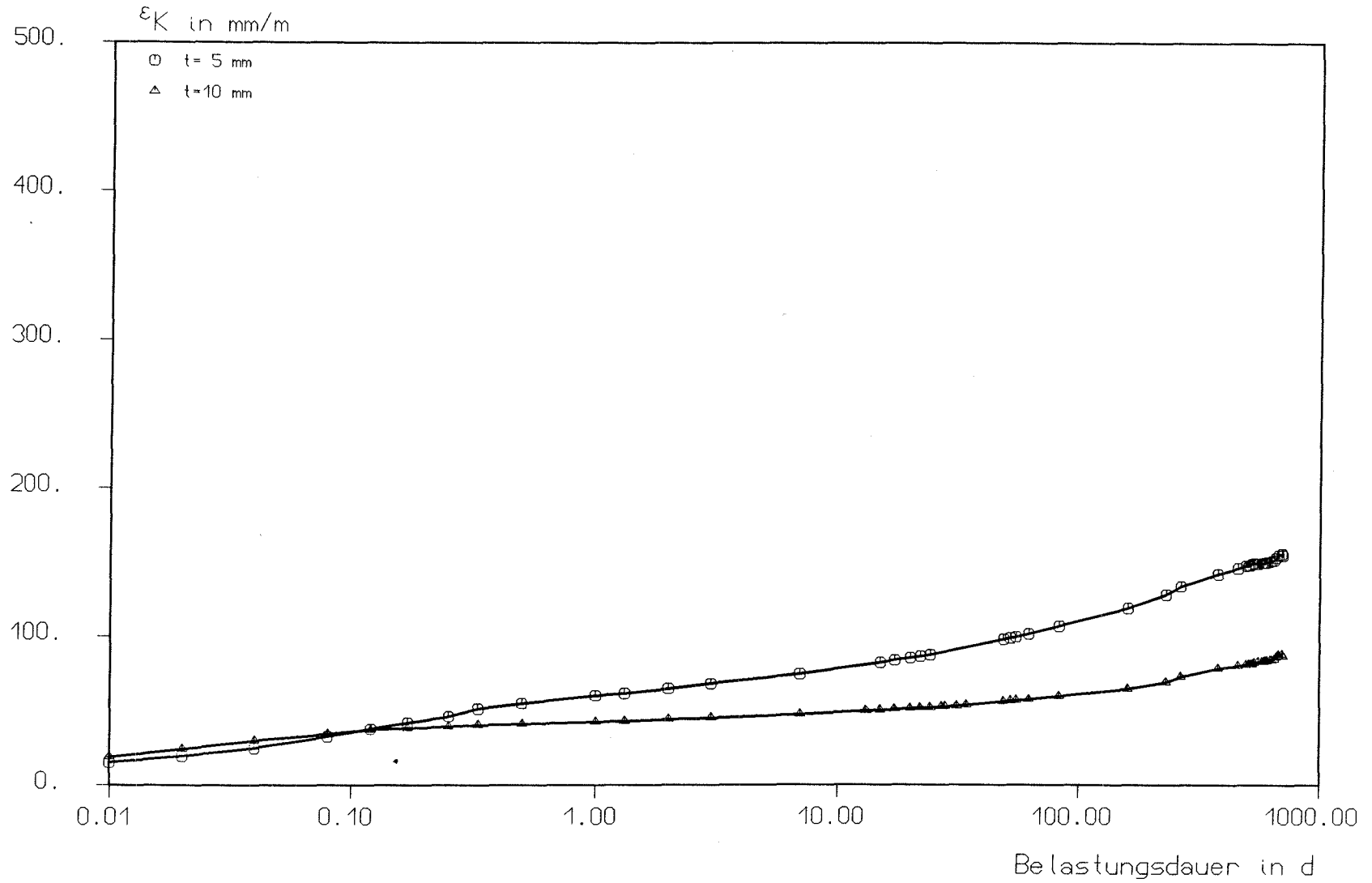


Bild A2

Kriechkurven Versuch Nr.3 und 4
 Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=100 \times 200 \text{ mm}^2$, $t=5/10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m=60 \text{ N/mm}^2$



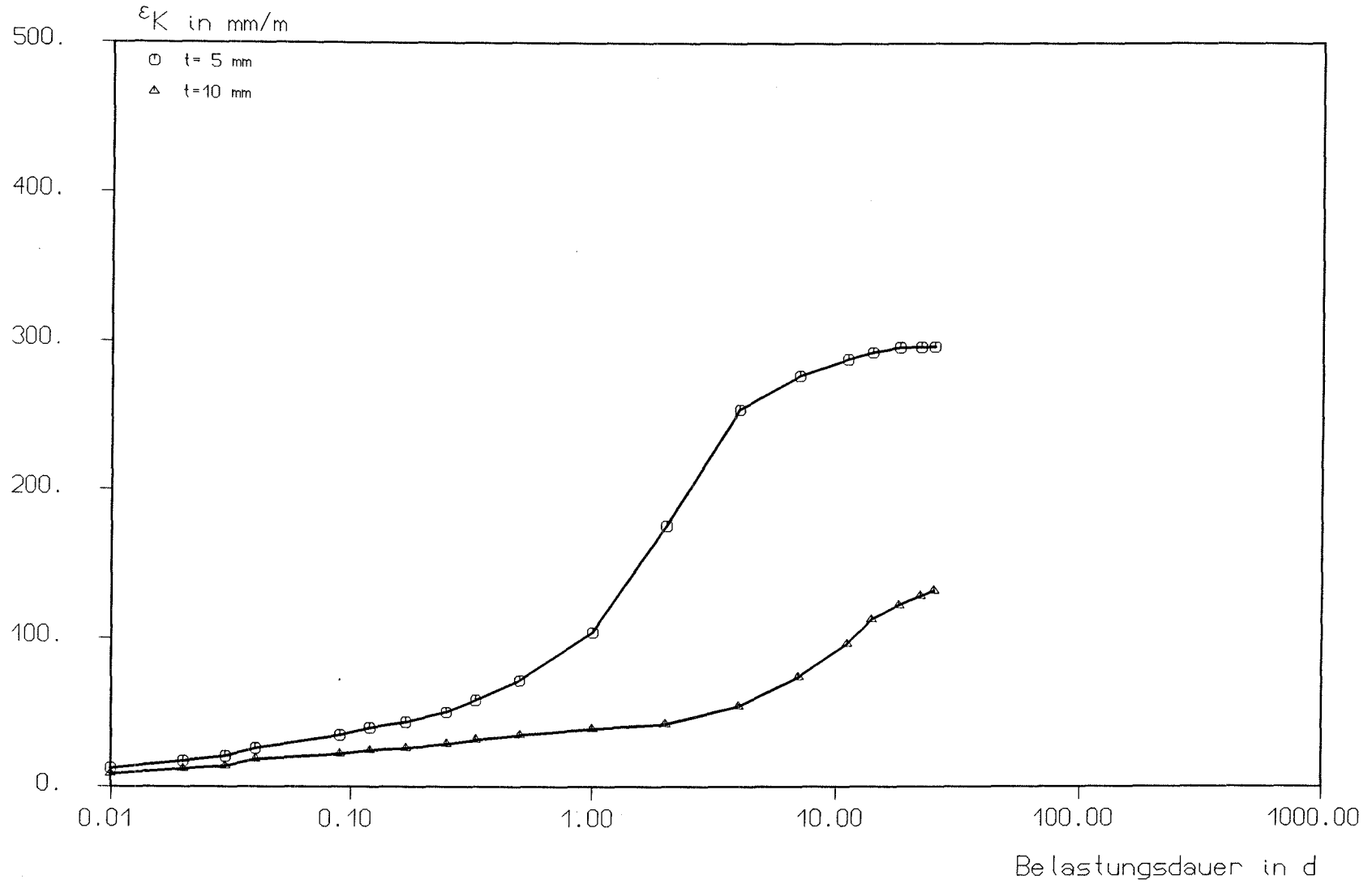


Bild A3

Kriechkurven Versuch Nr.5 und 6

Elastomerqualität: EPDM 1

A=100*100mm², t=5/10 mm, Neigung 0 mm, σ_m=60 N/mm²



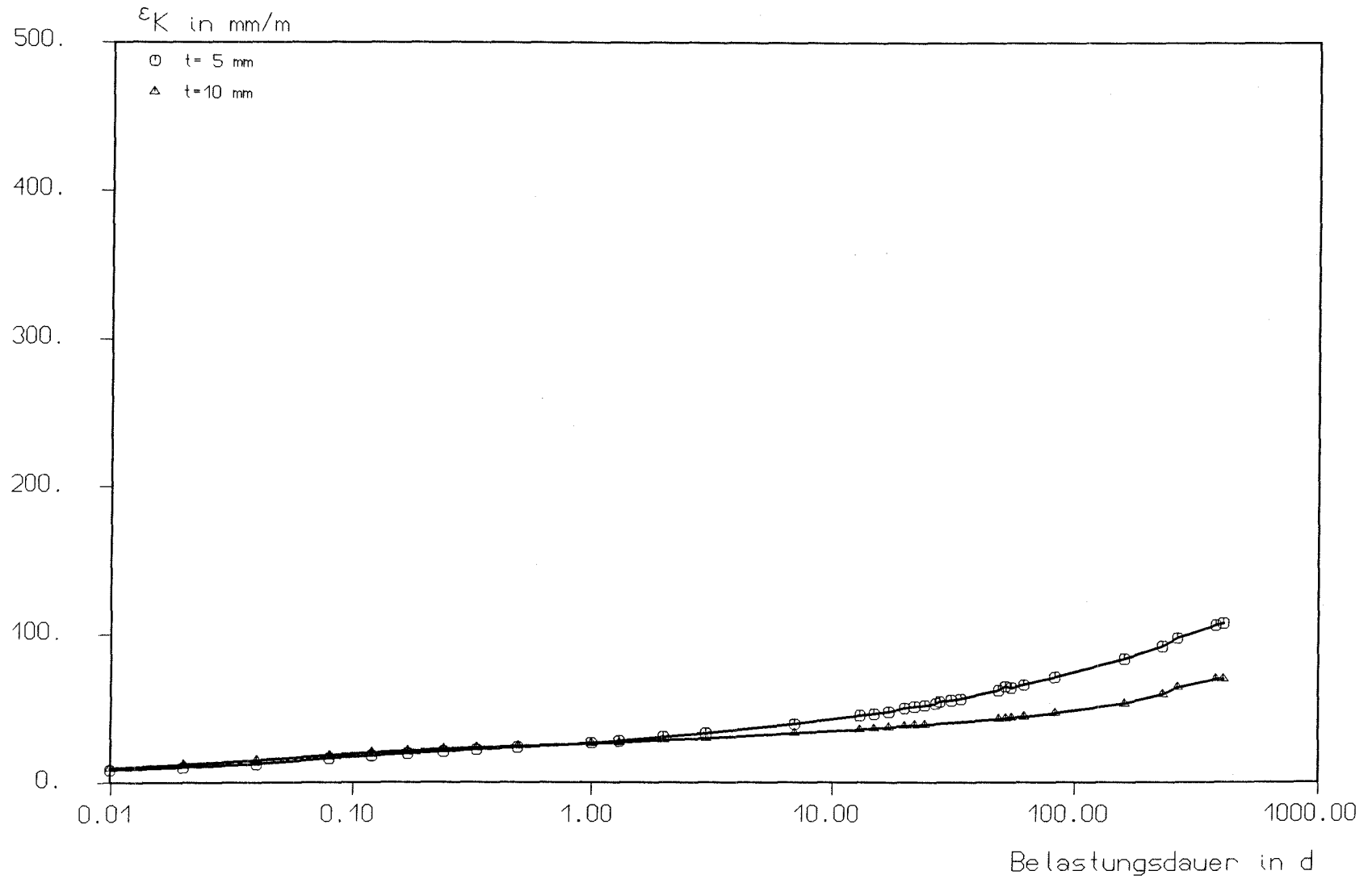


Bild A4

Kriechkurven Versuch Nr.7 und 8

Elastomerqualitaet: CR 1

$A=100*100\text{mm}^2$, $t=5/10\text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m=60\text{ N/mm}^2$

jbac

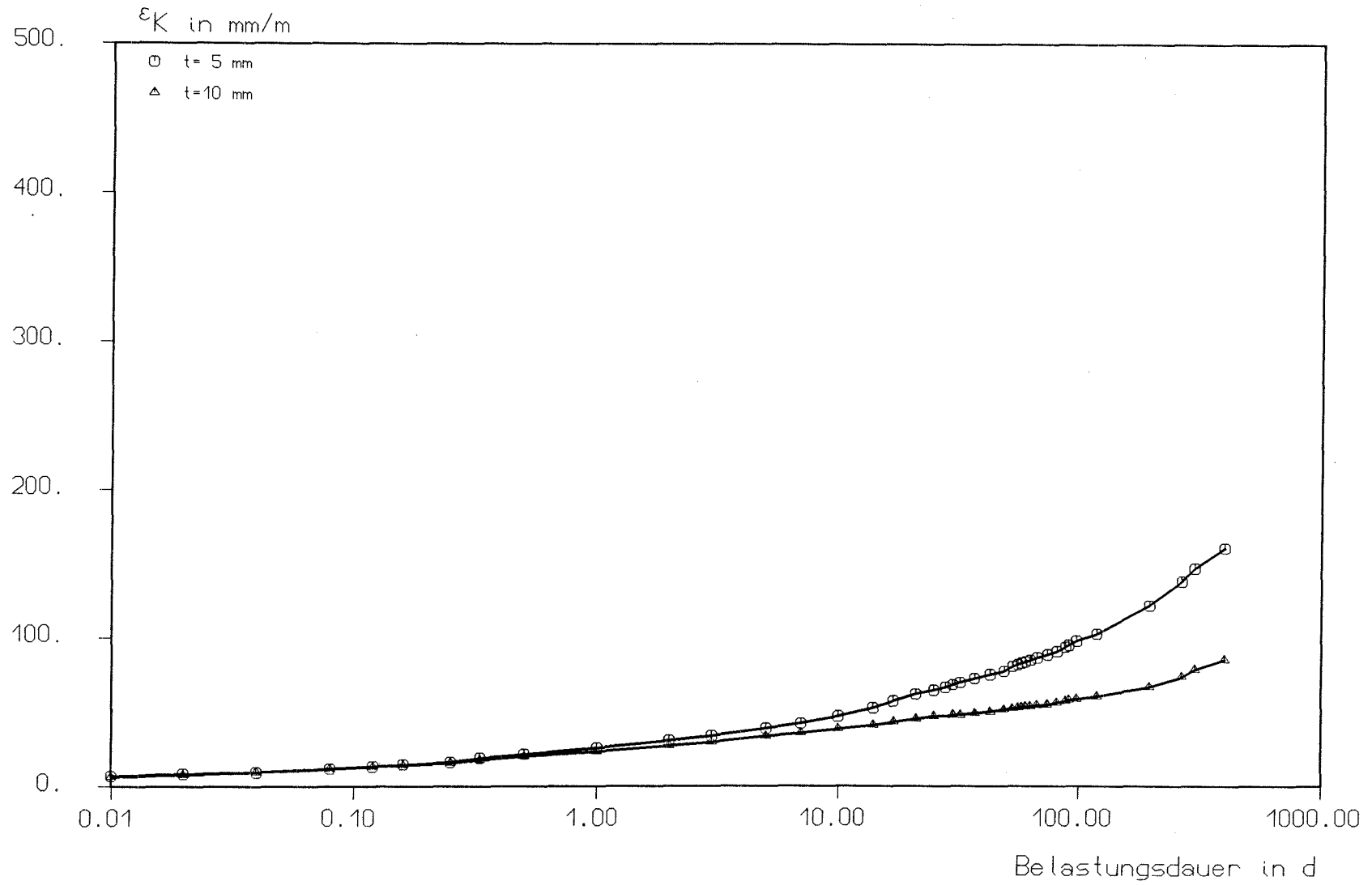


Bild A5

Kriechkurven Versuch Nr.9 und 10
Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100*100\text{mm}^2$, $t=5/10$ mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m=20$ N/mm²

JbAC

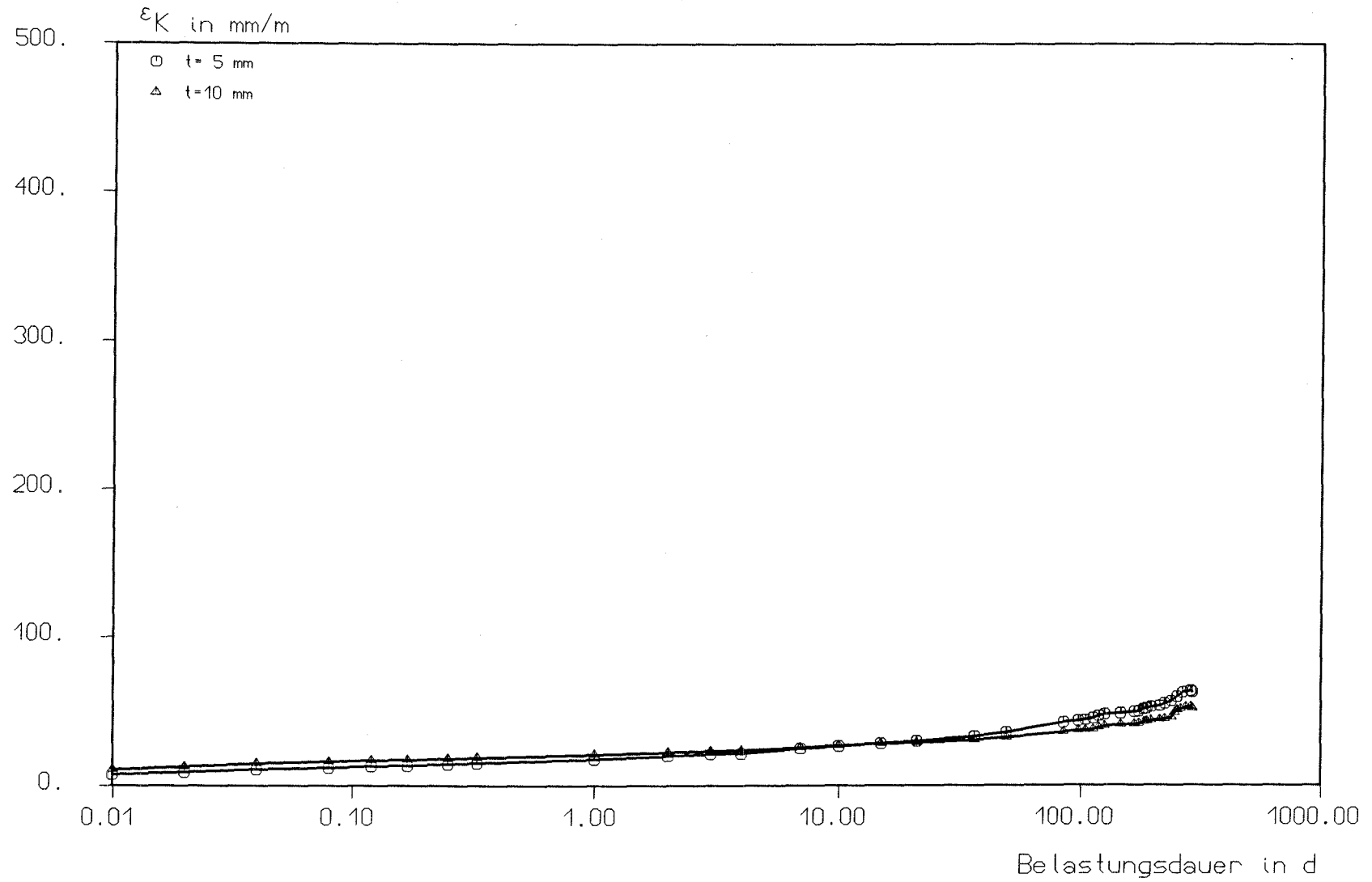


Bild A6

Kriechkurven Versuch Nr.11 und 12

Elastomerqualitaet: CR 1

 $A=100*100\text{mm}^2$, $t=5/10$ mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m=20$ N/mm²

bac

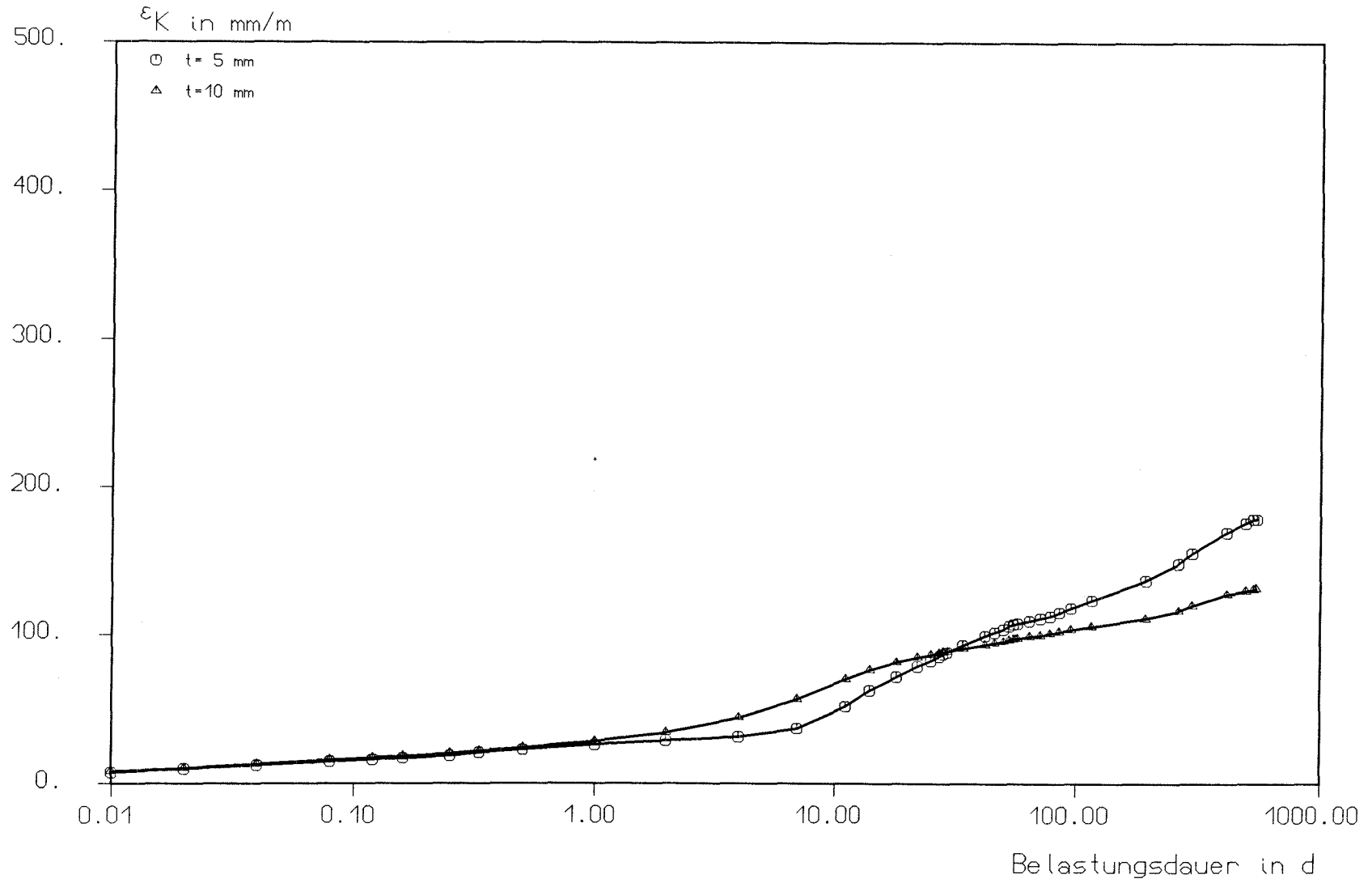


Bild A7

Kriechkurven Versuch Nr.13 und 14

Elastomerqualität: EPDM 1

A=100*100mm², t=5/10 mm, Neigung 2,1/4,2 mm, $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$



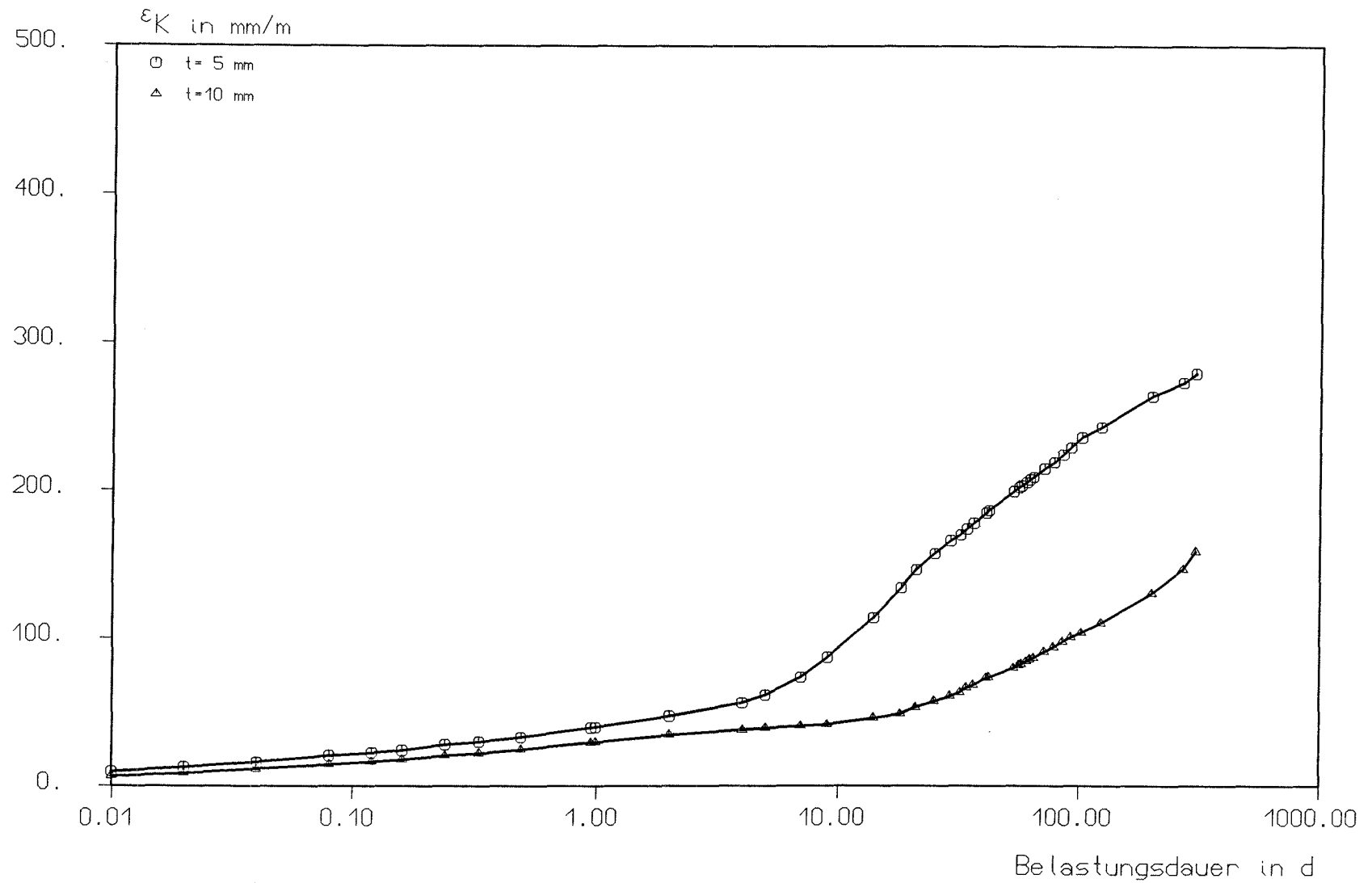


Bild A8

Kriechkurven Versuch Nr.19 und 20
Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=200*200\text{mm}^2$, $t=5/10$ mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m=40$ N/mm²



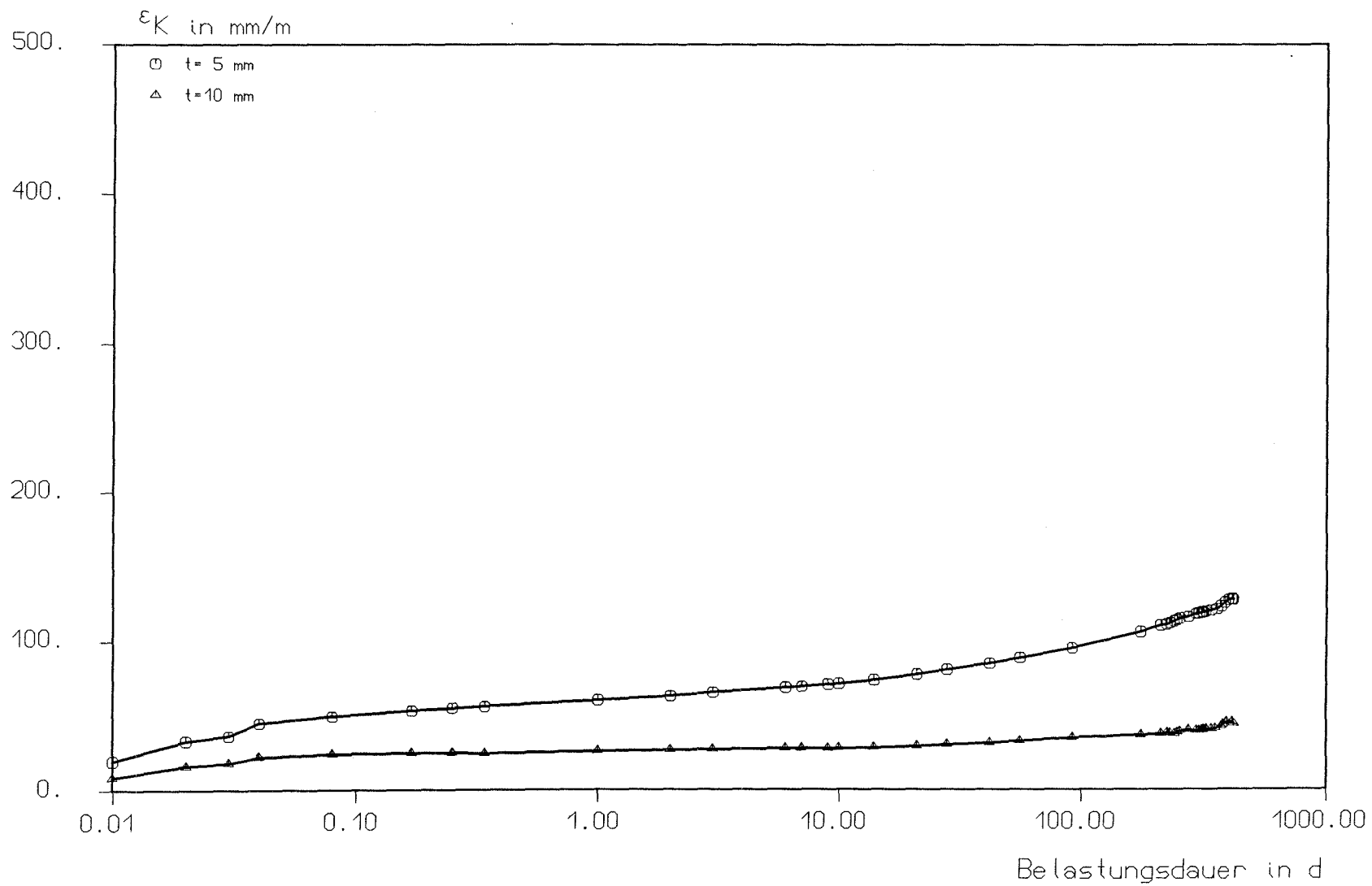


Bild A9

Kriechkurven Versuch Nr.21 und 22
Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=200*200\text{mm}^2$, $t=5/10$ mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m=40$ N/mm²

ibac

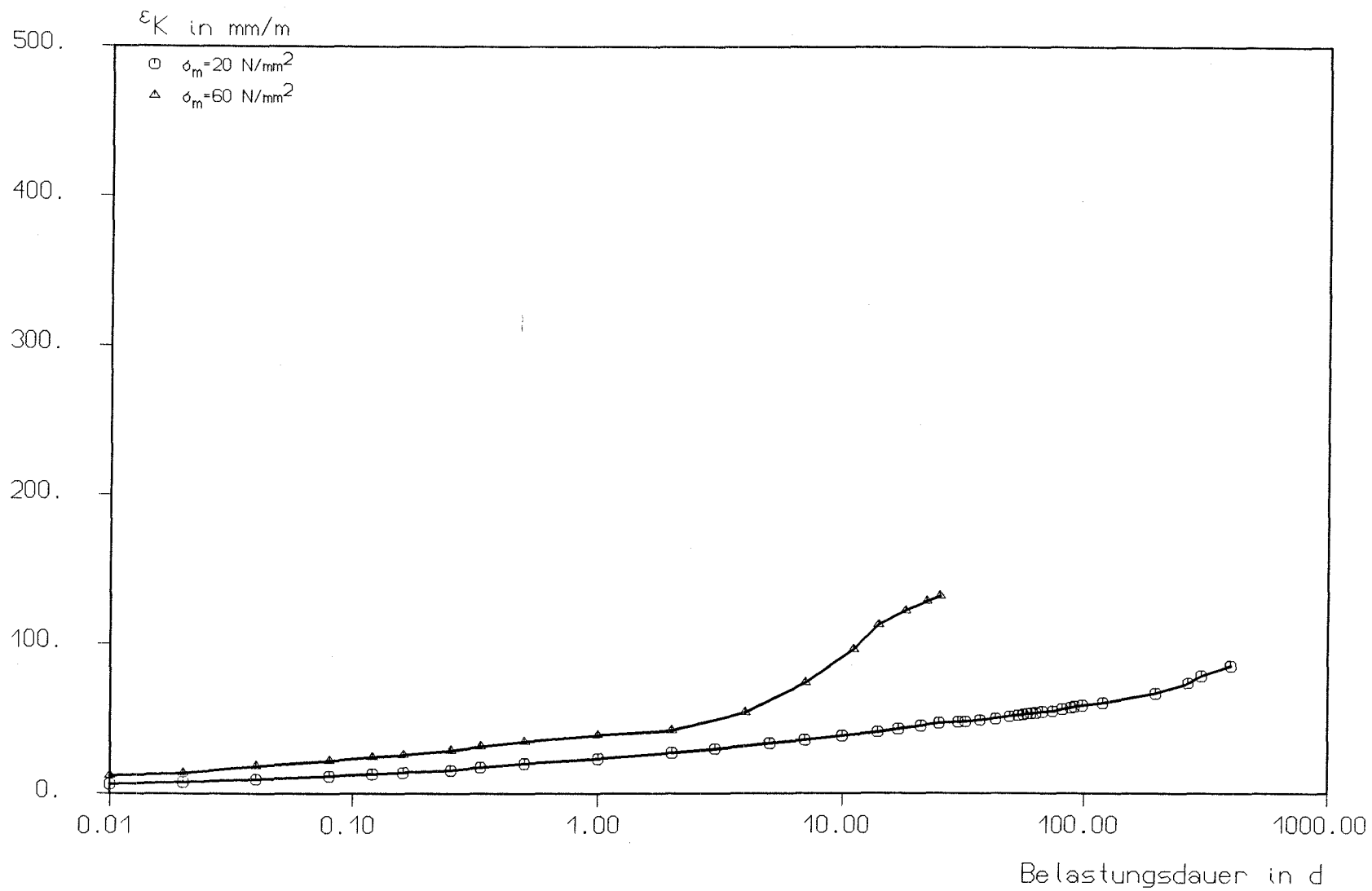


Bild A10

Kriechkurven Versuch Nr.5 und 9
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \cdot 100 \text{ mm}^2$, $t=10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m=20/60 \text{ N/mm}^2$



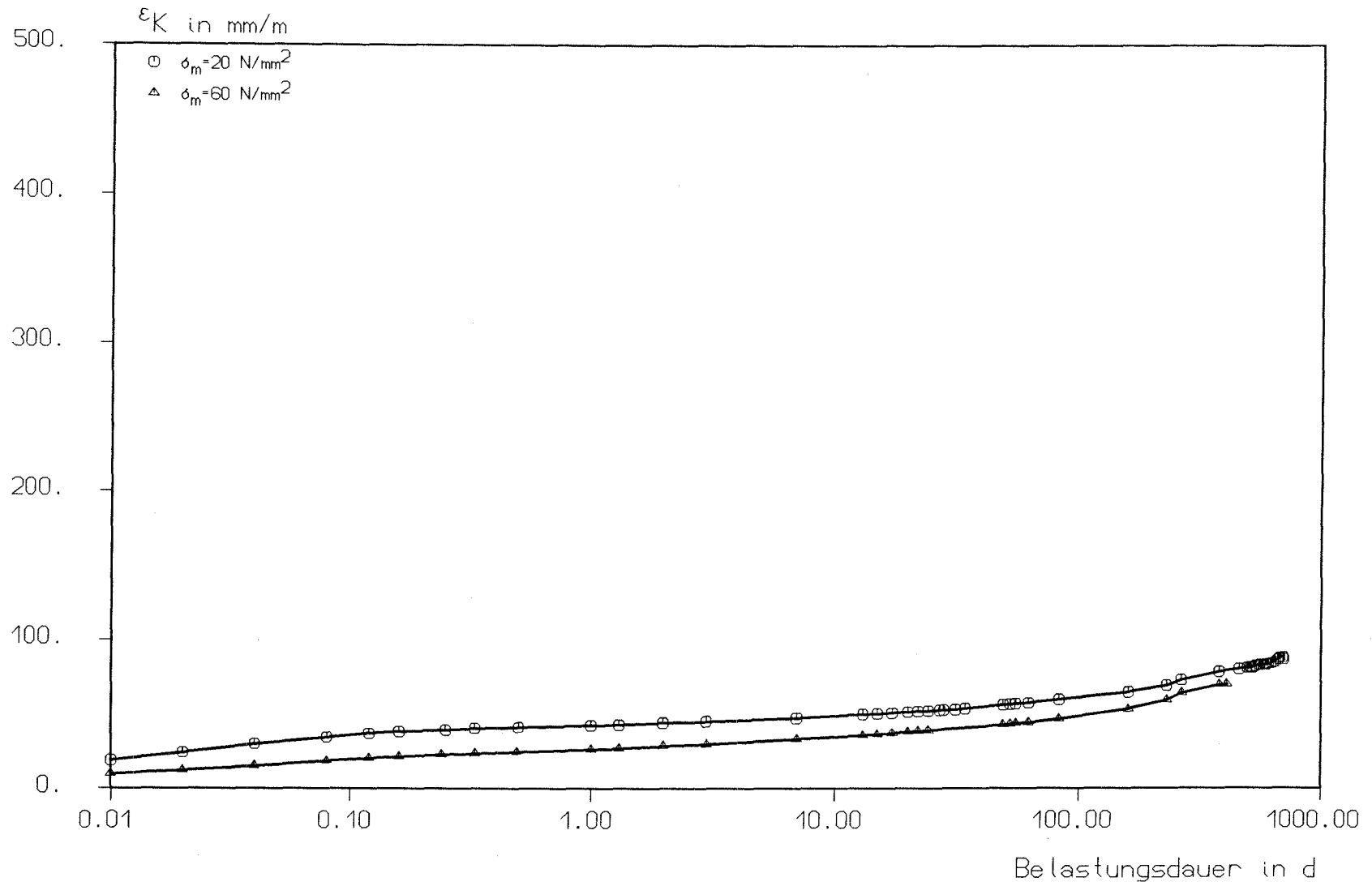


Bild A11

Kriechkurven Versuch Nr.7 und 11
 Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=100 \cdot 100 \text{ mm}^2$, $t=10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m = 20/60 \text{ N/mm}^2$



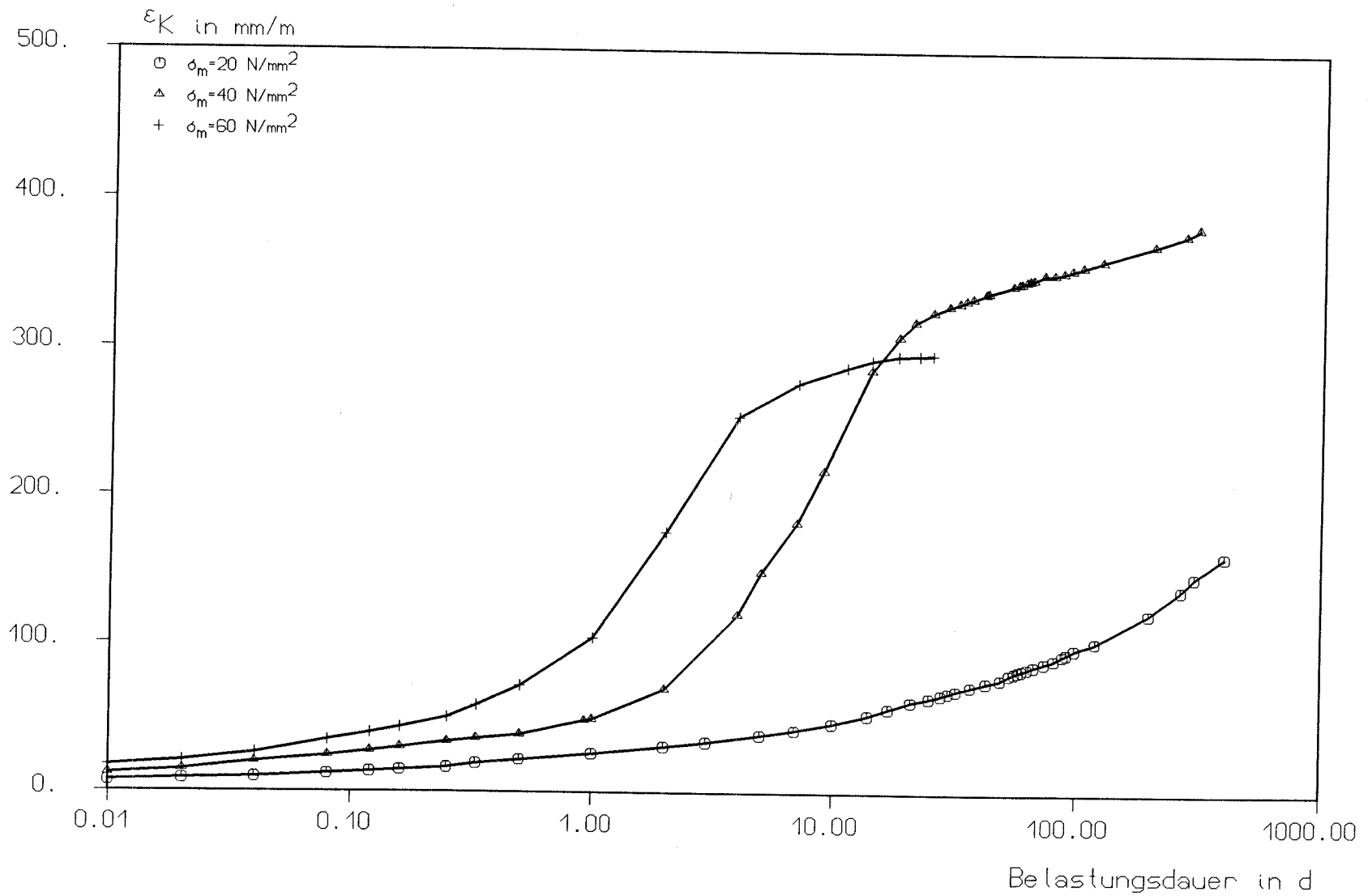


Bild A12

Kriechkurven Versuch Nr.6, 10 und 15
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100*100\text{mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m=20/40/60 \text{ N/mm}^2$



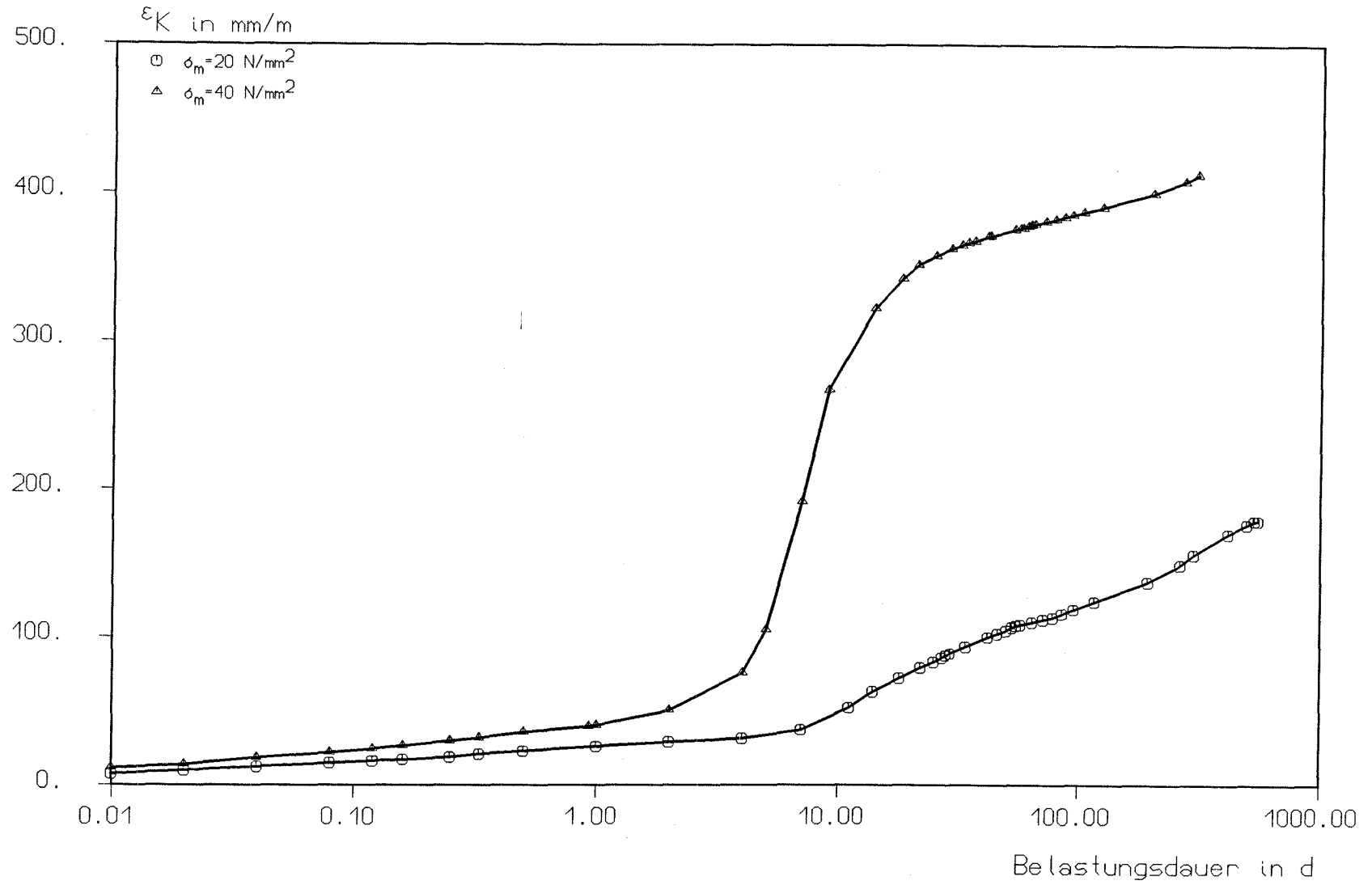


Bild A13

Kriechkurven Versuch Nr.13 und 16
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \times 100 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 2,1 mm, $\sigma_m = 20/40 \text{ N/mm}^2$



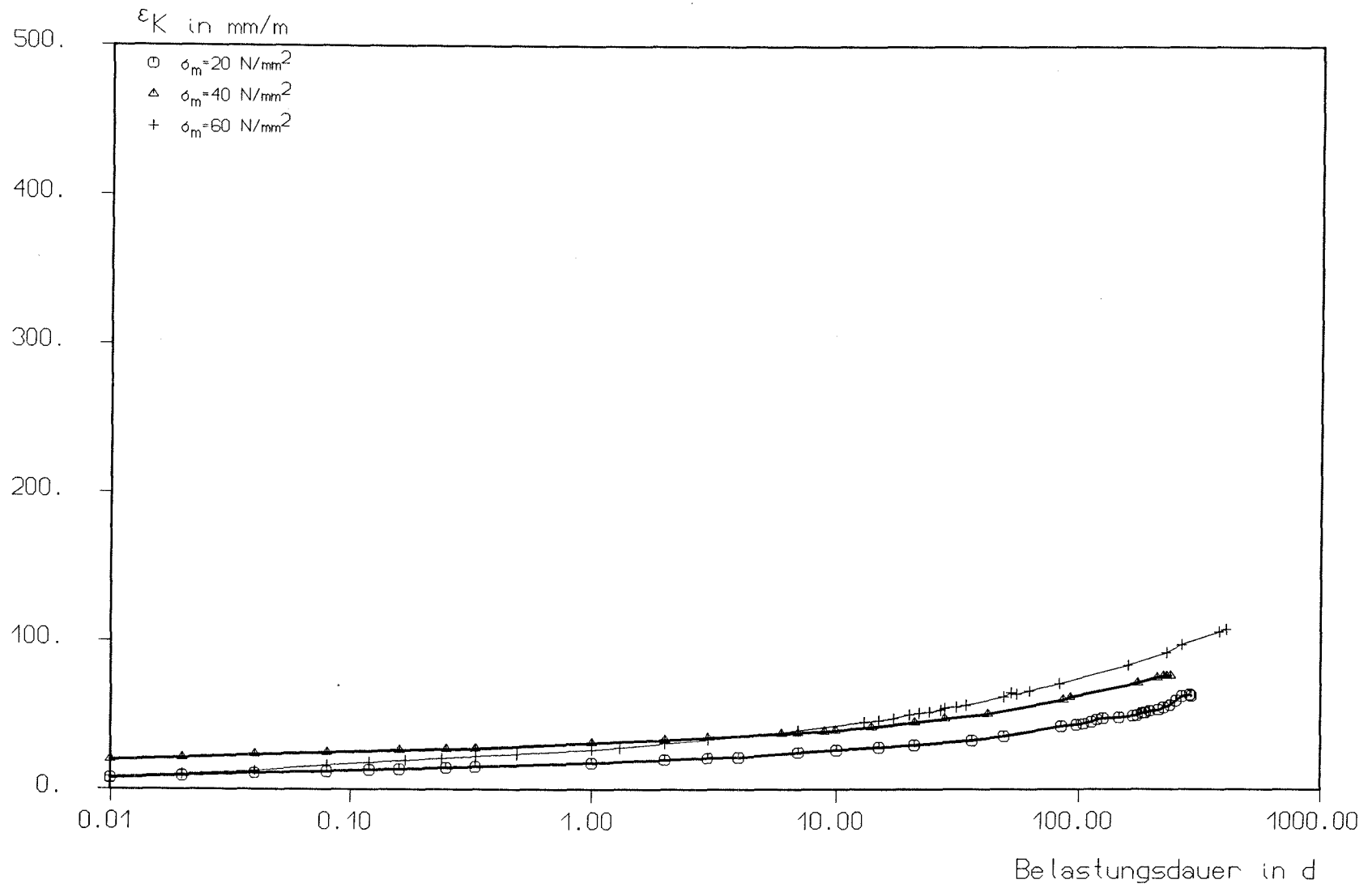


Bild A14

Kriechkurven Versuch Nr.8, 12 und 15
Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=100 \times 100 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m = 20/40/60 \text{ N/mm}^2$



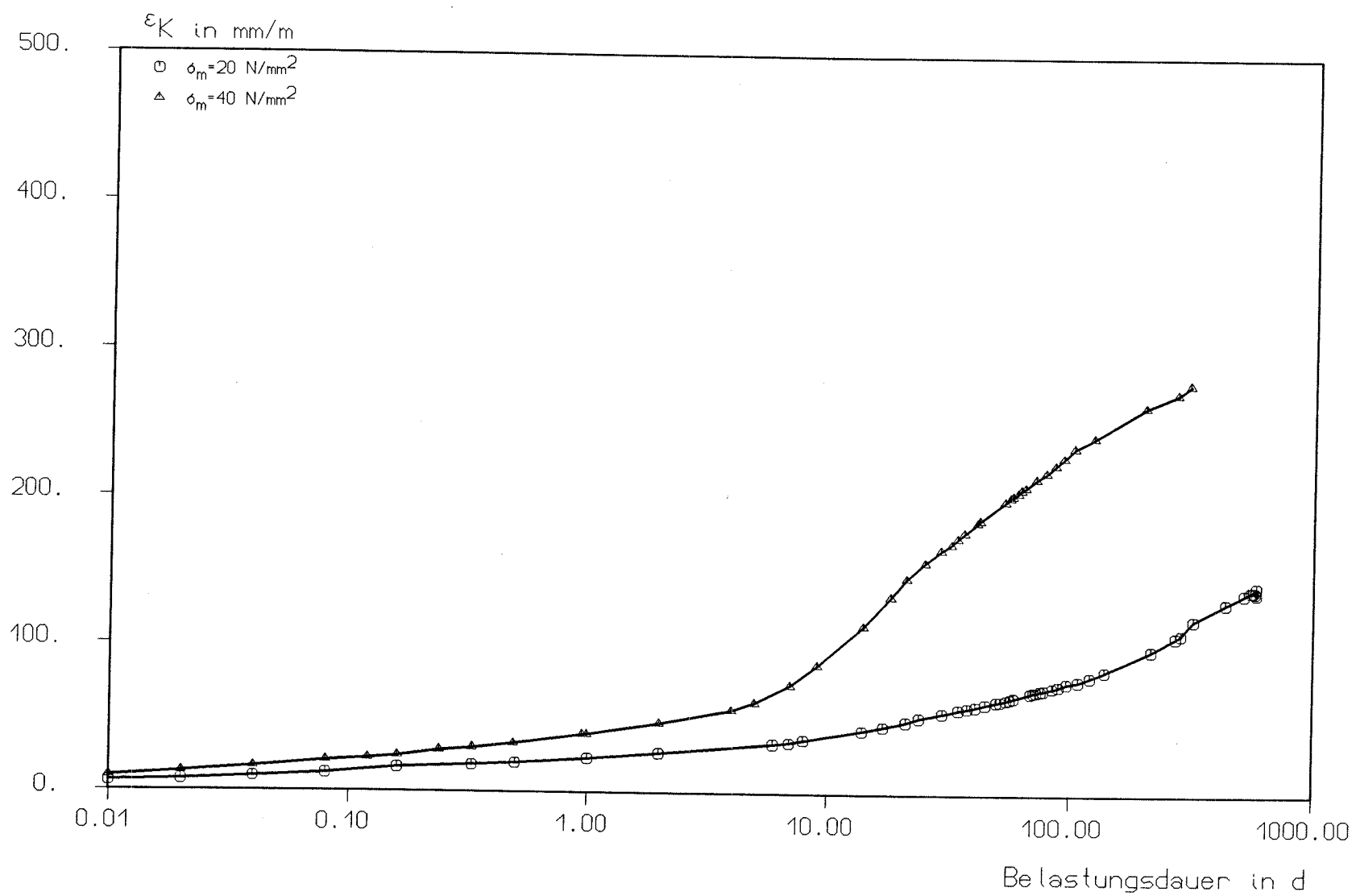
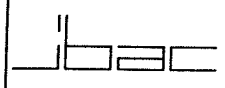


Bild A15

Kriechkurven Versuch Nr.20 und 23
Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=200*200\text{mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m = 20/40 \text{ N/mm}^2$



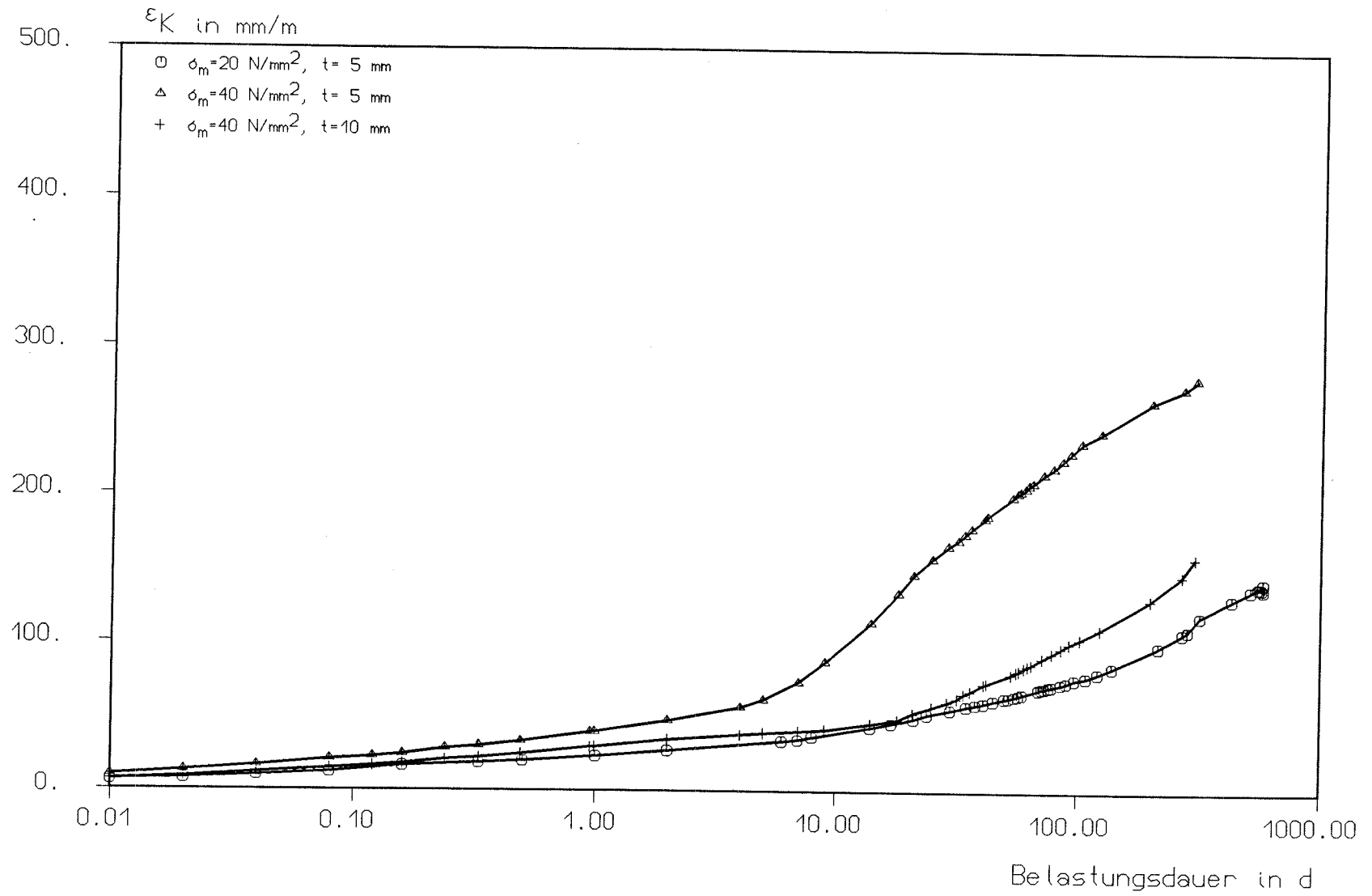


Bild A16

Kriechkurven Versuch Nr.19, Nr.20 und Nr.23
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A = 200 \times 200 \text{ mm}^2$, $t = 5/10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m = 20/40 \text{ N/mm}^2$



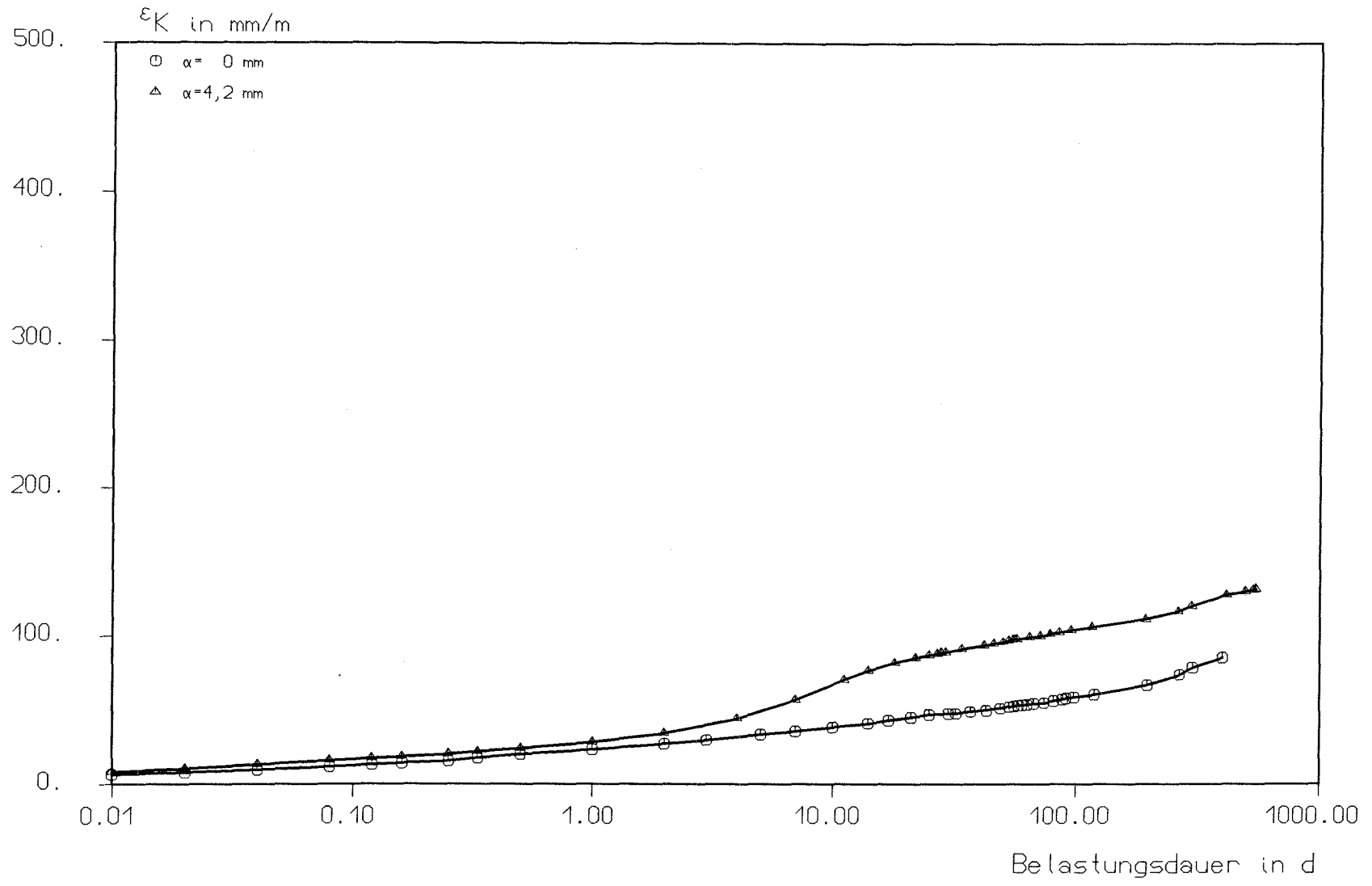


Bild A17

Kriechkurven Versuch Nr.9 und 14
Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \times 100 \text{ mm}^2$, $t=10$ mm, Neigung $0/4,2$ mm, $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$



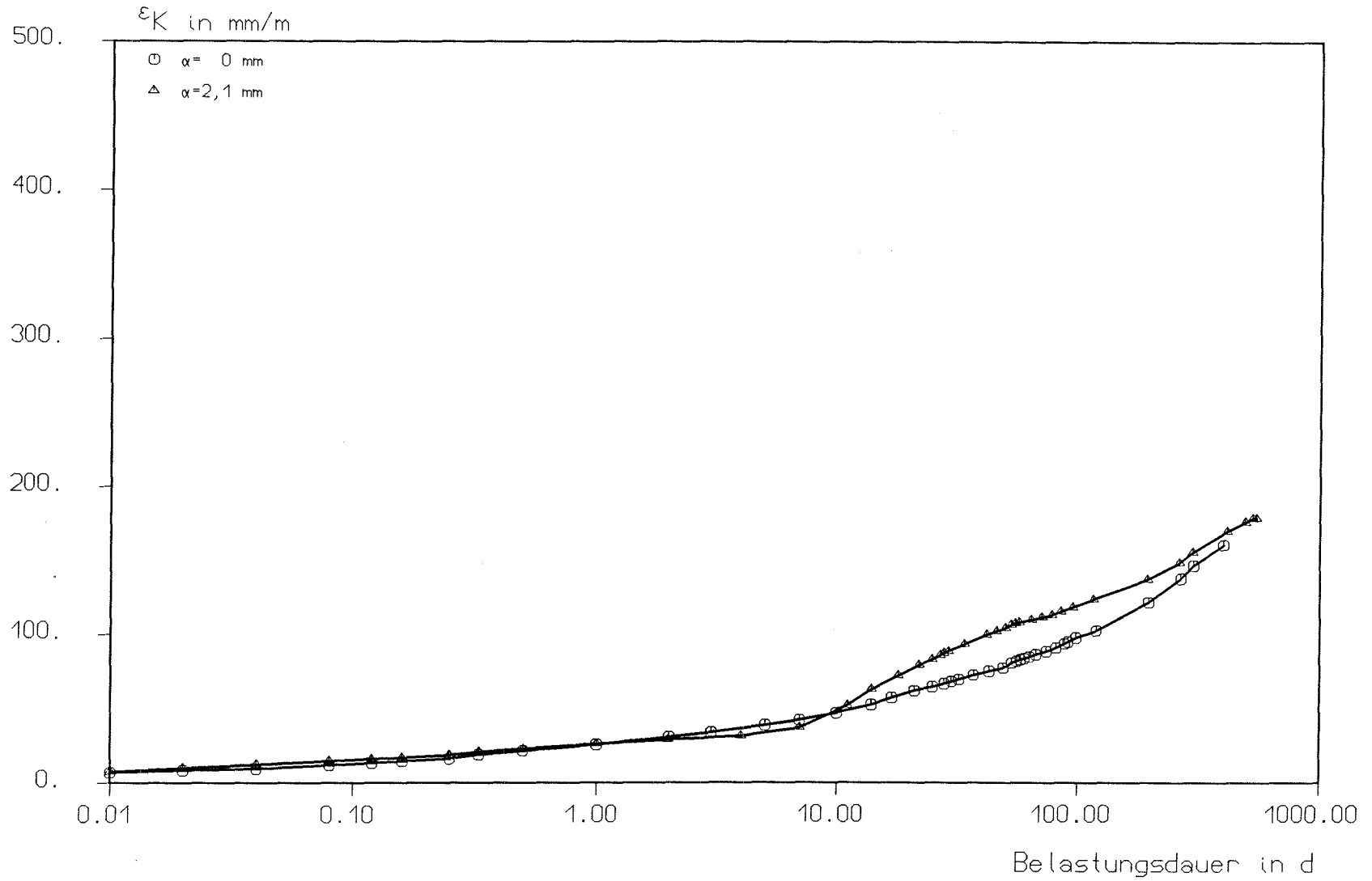


Bild A18

Kriechkurven Versuch Nr.10 und 13
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \cdot 100 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0/2,1 mm, $\sigma_m=20 \text{ N/mm}^2$



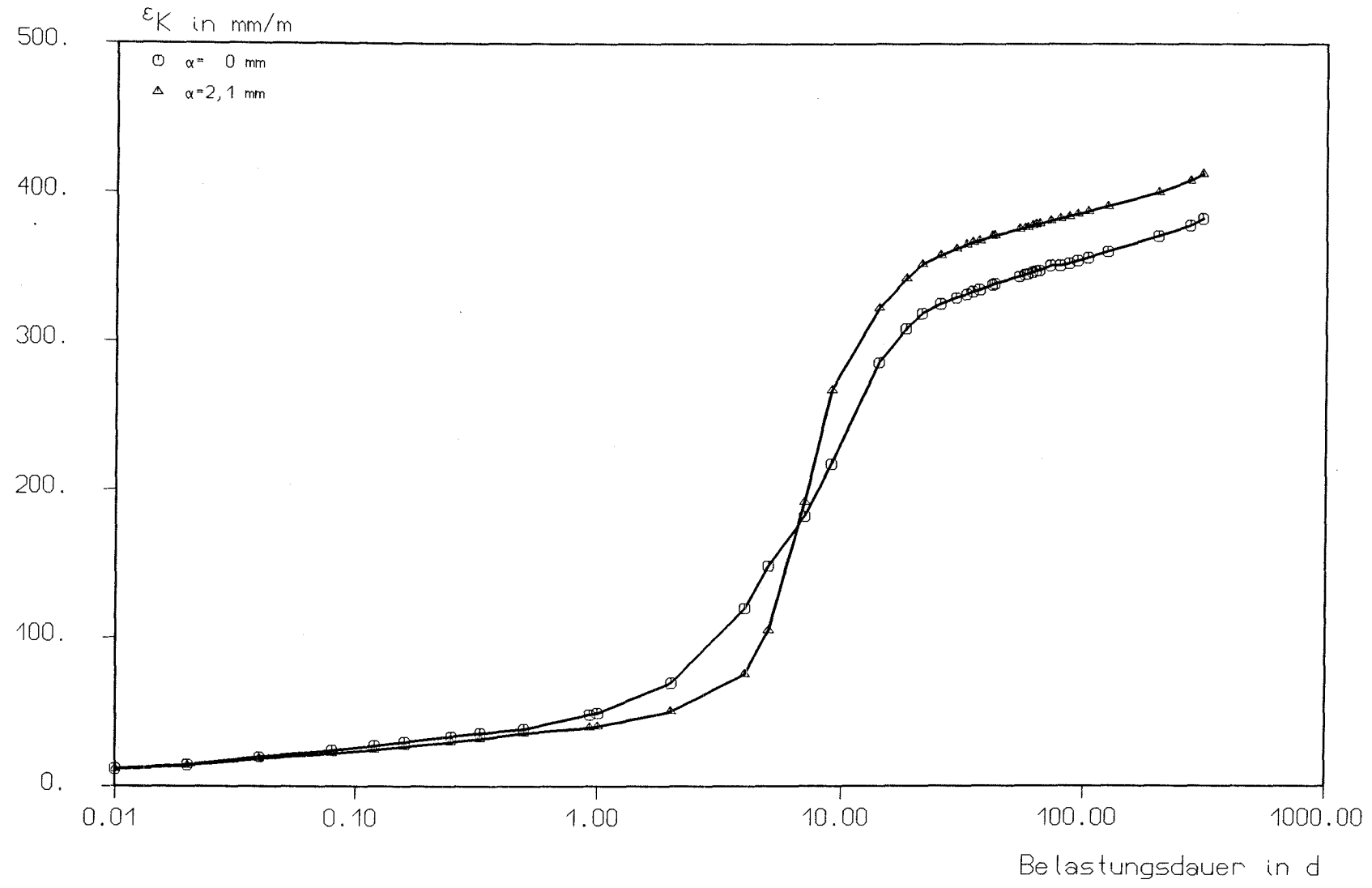


Bild A19

Kriechkurven Versuch Nr.15 und 16
Elastomerqualitaet: EPDM 1
A=100*100mm², t=5 mm, Neigung 0/2,1 mm, σ_m=40 N/mm²



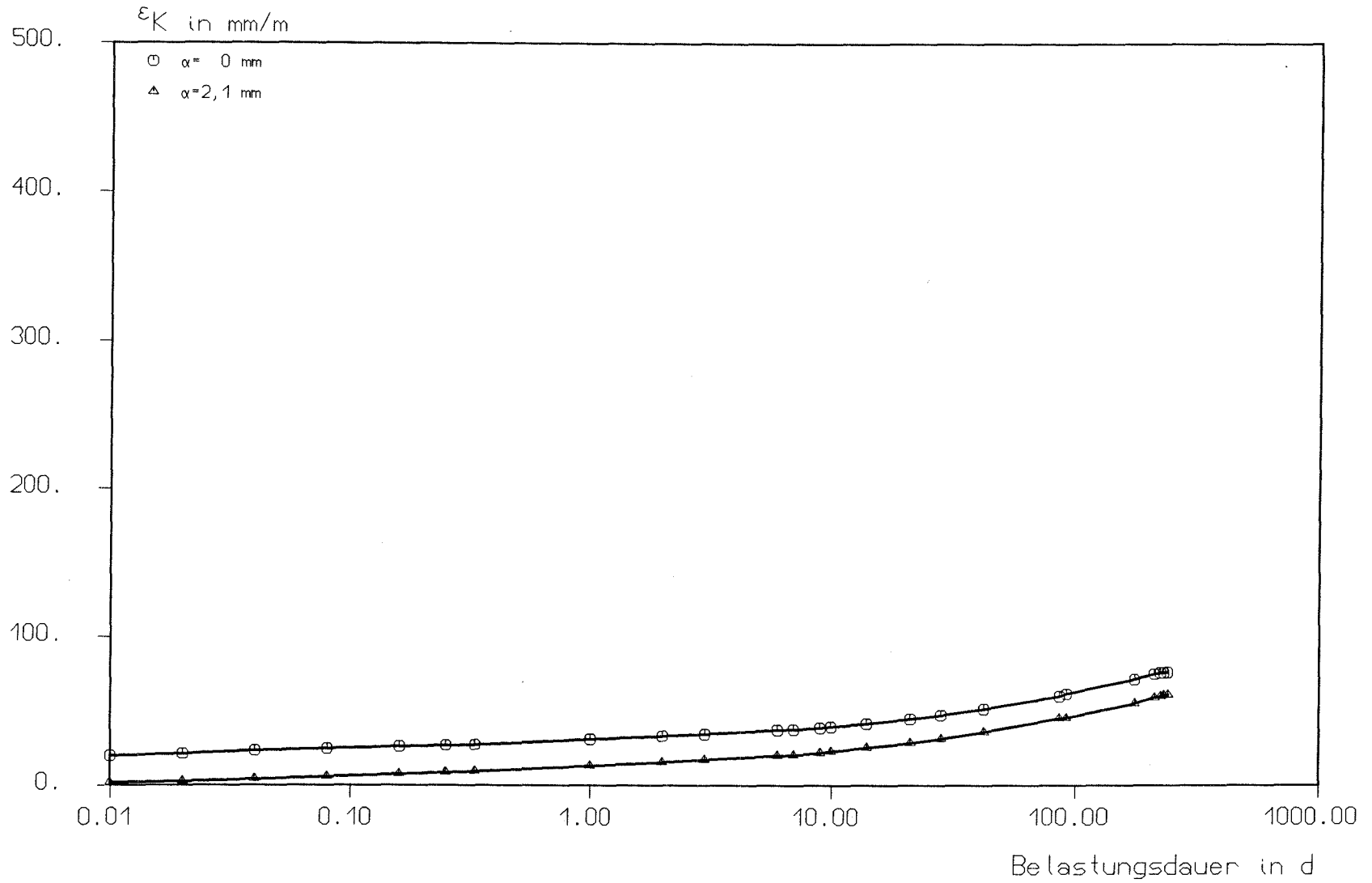


Bild A20

Kriechkurven Versuch Nr. 17 und 18
 Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=100 \cdot 100 \text{ mm}^2$, $t=5$ mm, Neigung 0/2,1 mm, $\sigma_m=40 \text{ N/mm}^2$



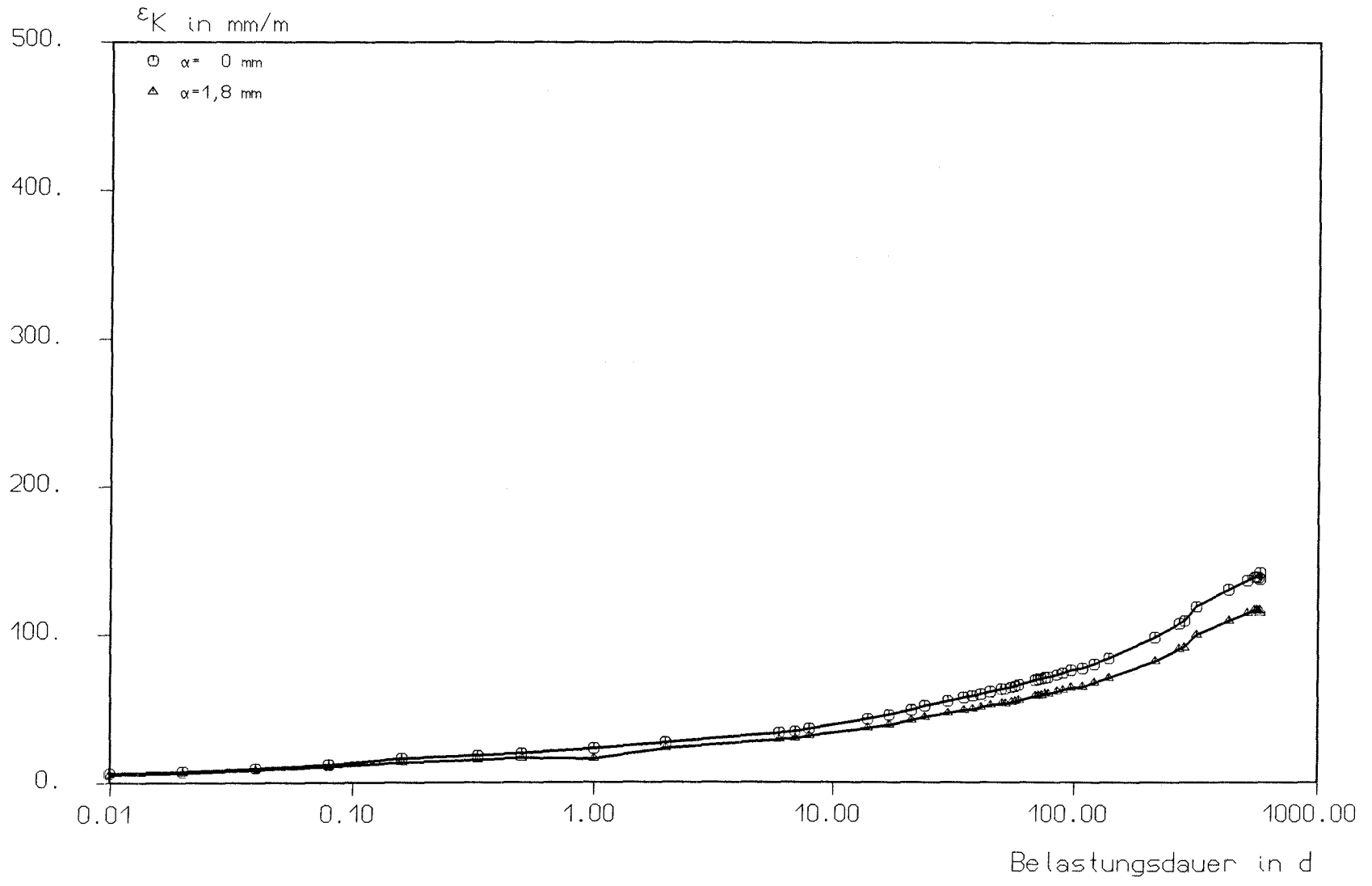
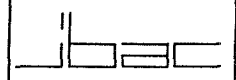


Bild A21

Kriechkurven Versuch Nr.71 und 72
Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=200*200\text{mm}^2$, $t=5$ mm, Neigung 0/1,8 mm, $\sigma_m=20$ N/mm²



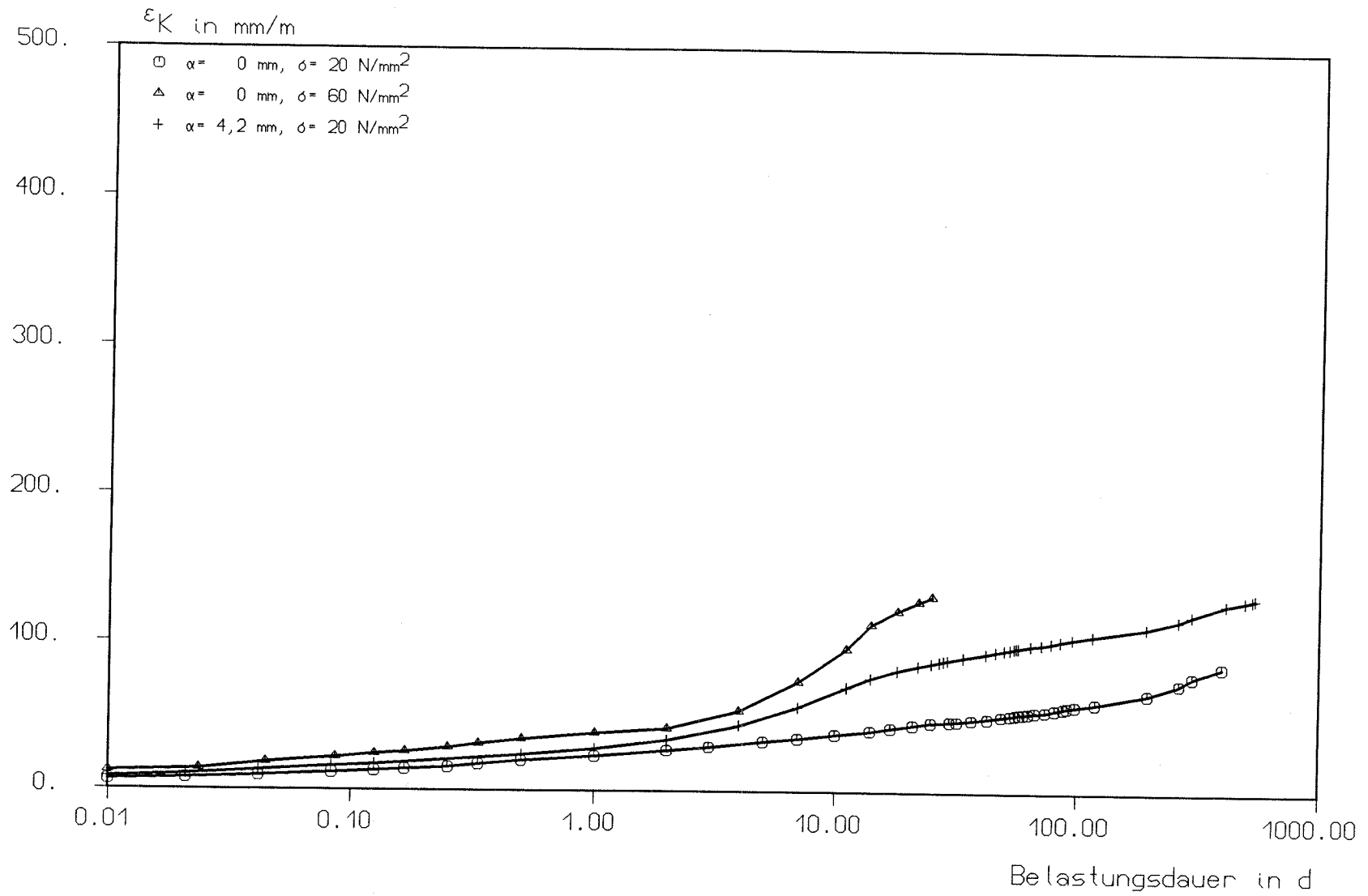


Bild A22

Kriechkurven Versuch Nr.5, Nr.9 und 14
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=100 \times 100 \text{ mm}^2$, $t=10$ mm, Neigung 0/4,2 mm, $\sigma_m=20/60$ N/mm²

ibac

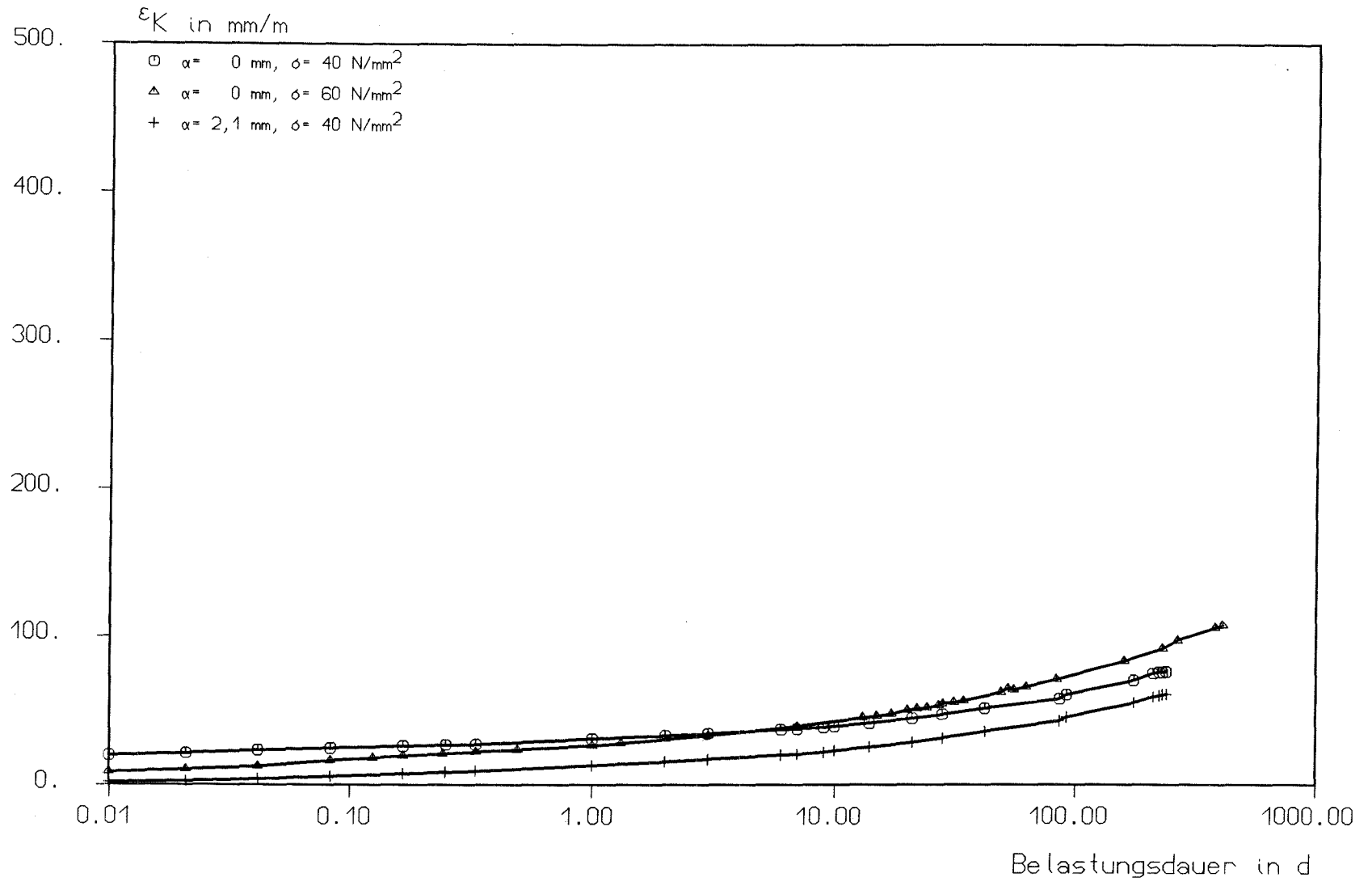


Bild A23

Kriechkurven Versuch Nr.8, Nr.17 und 18

Elastomerqualitaet: CR 1

$A=100*100\text{mm}^2$, $t=5$ mm, Neigung 0/2,1 mm, $\sigma_m=40/60$ N/mm²



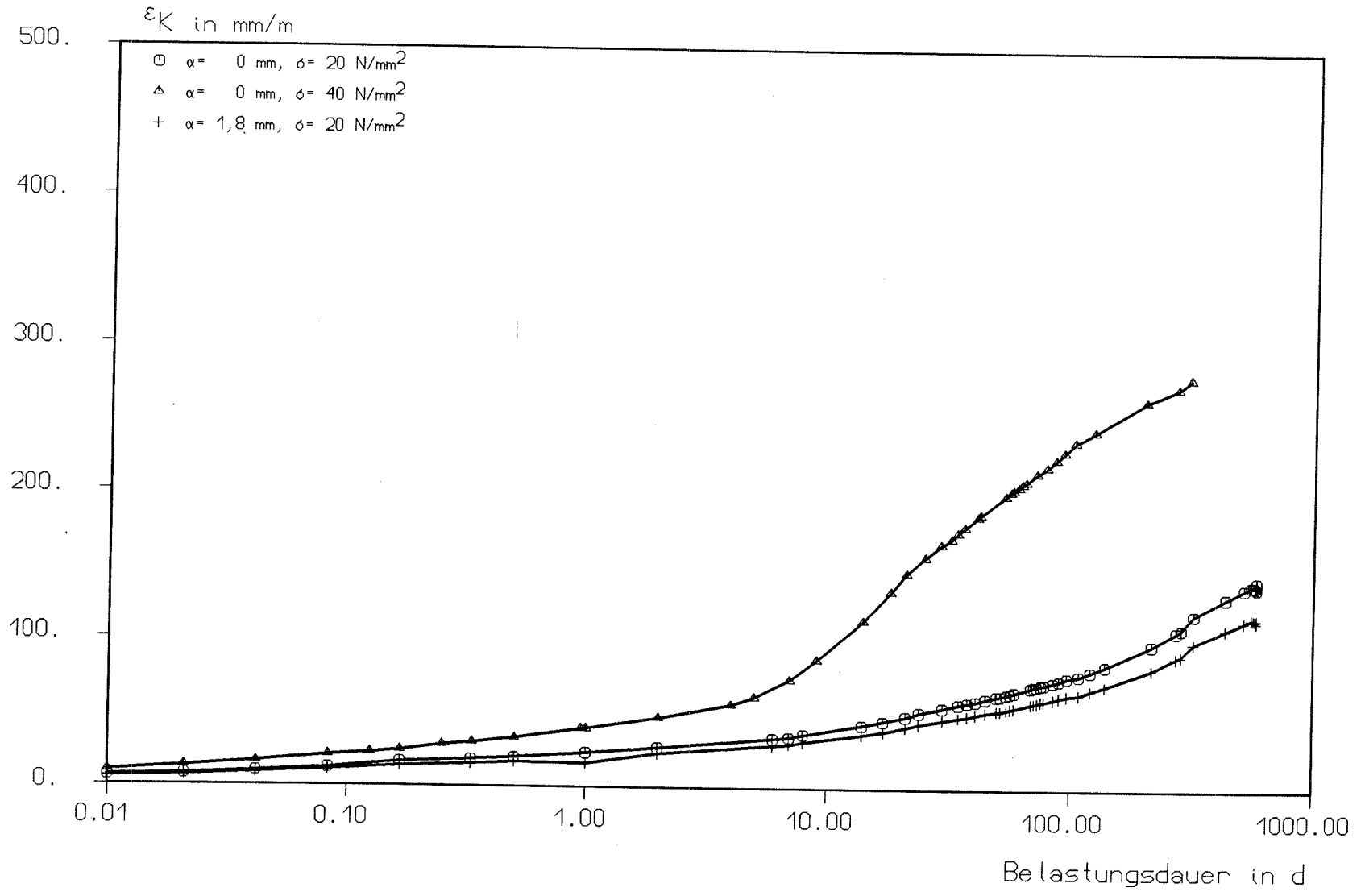


Bild A24

Kriechkurven Versuch Nr.20, Nr.23 und 24
 Elastomerqualitaet: EPDM 1
 $A=200*200\text{mm}^2, t=5 \text{ mm}, \text{Neigung } 0/1,8 \text{ mm}, \sigma_m = 20/40 \text{ N/mm}^2$



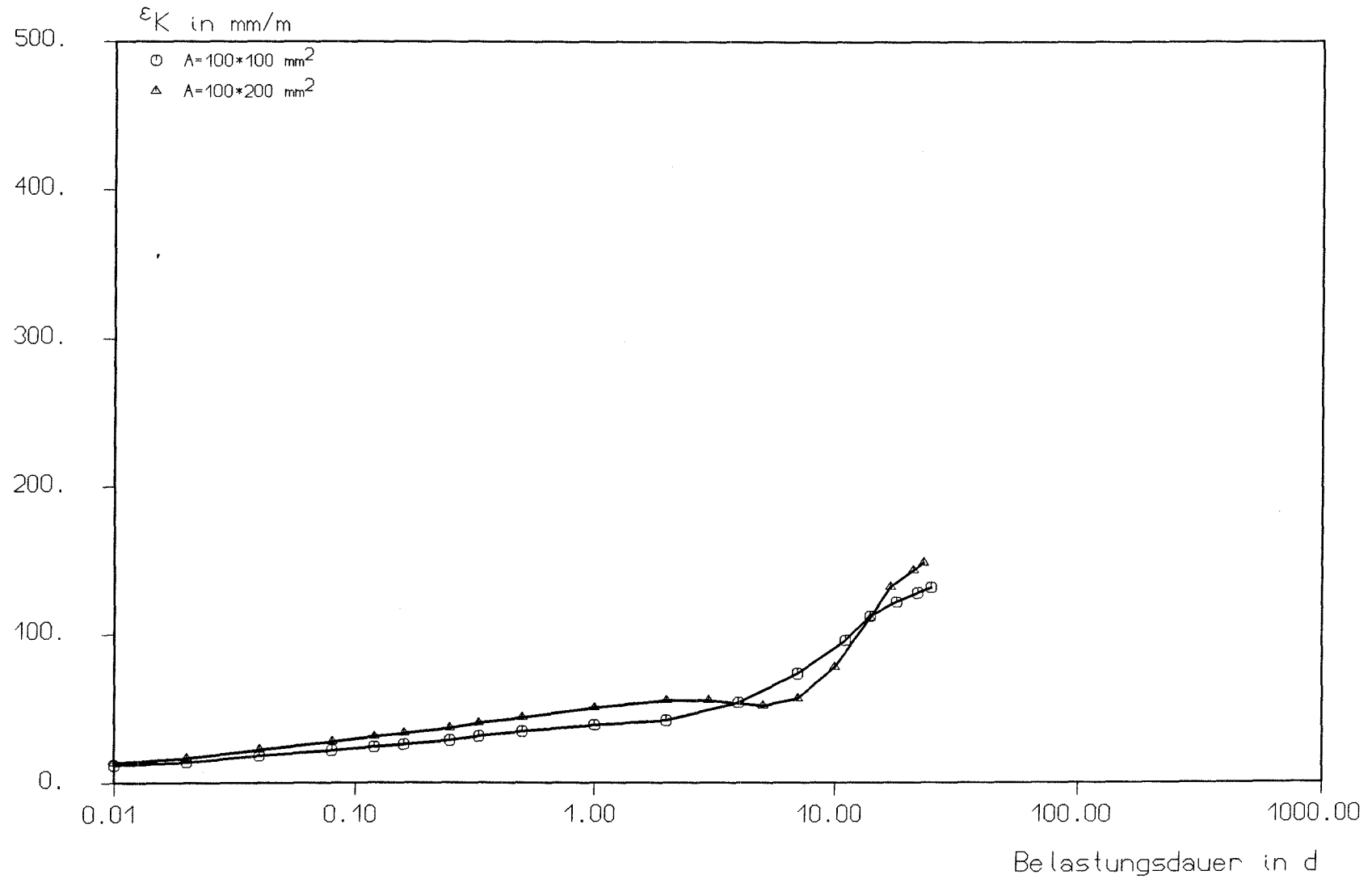


Bild A25

Kriechkurven Versuch Nr.1 und 5

Elastomerqualitaet: EPDM 1

A=100*100/100*200mm², t=10 mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m=60$ N/mm²

ibac

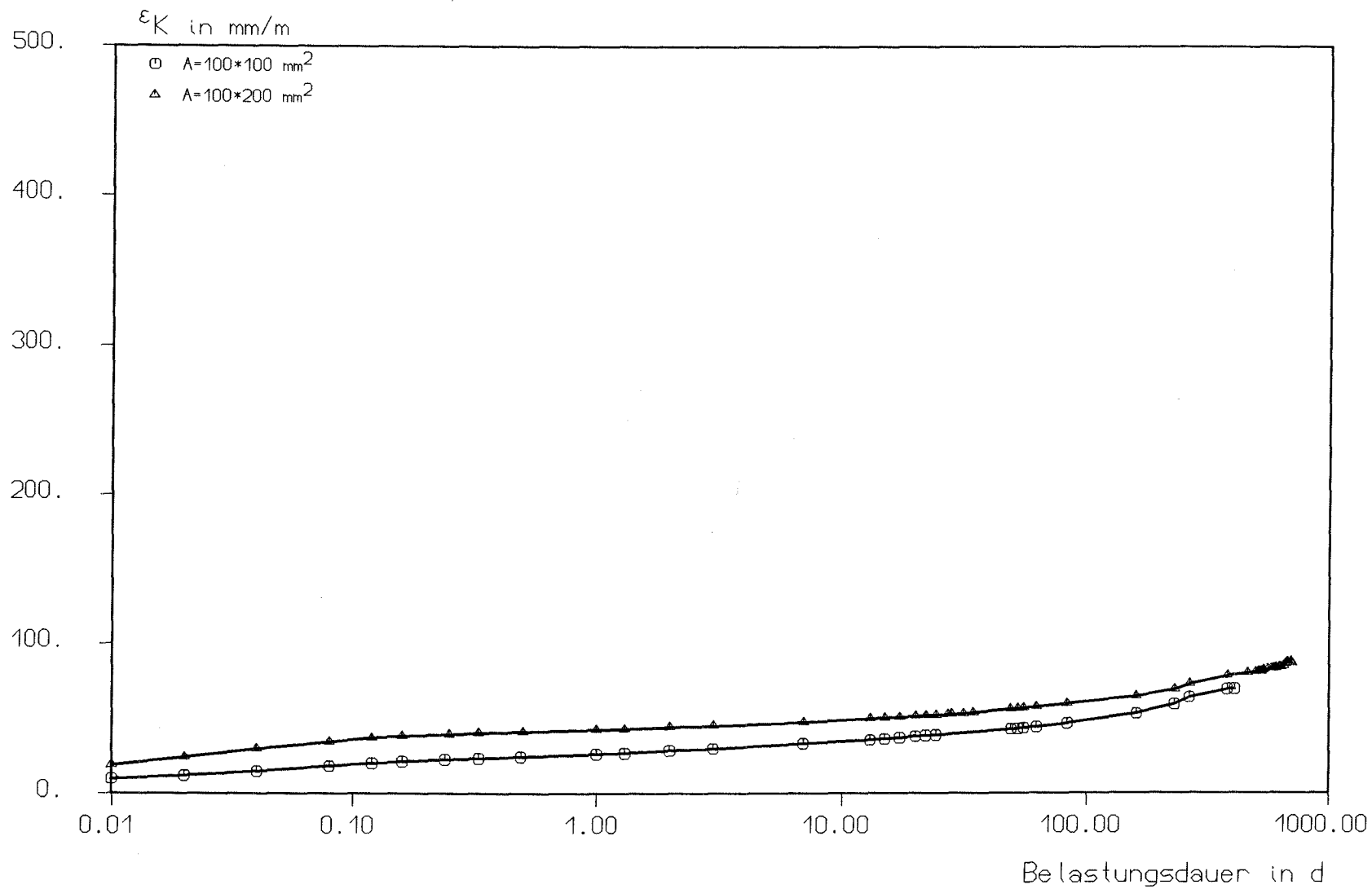


Bild A26

Kriechkurven Versuch Nr.3 und 7

Elastomerqualitaet: CR 1

 $A=100 \times 100 / 100 \times 200 \text{ mm}^2$, $t=10 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m=60 \text{ N/mm}^2$

JbAC

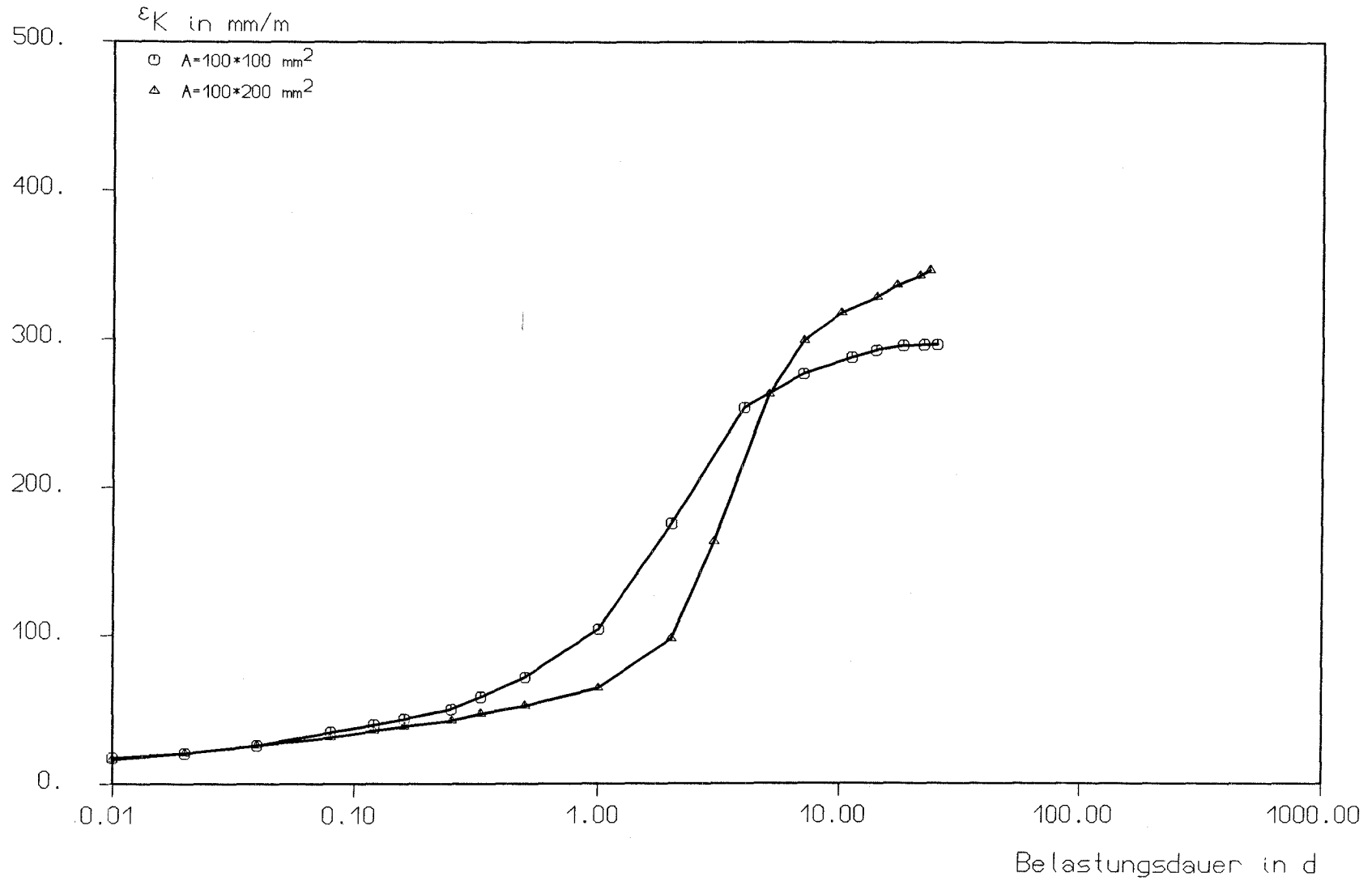


Bild A27

Kriechkurven Versuch Nr.2 und 6

Elastomerqualität: EPDM 1

 $A=100 \times 100 / 100 \times 200 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm , $\sigma_m=60 \text{ N/mm}^2$

ibac

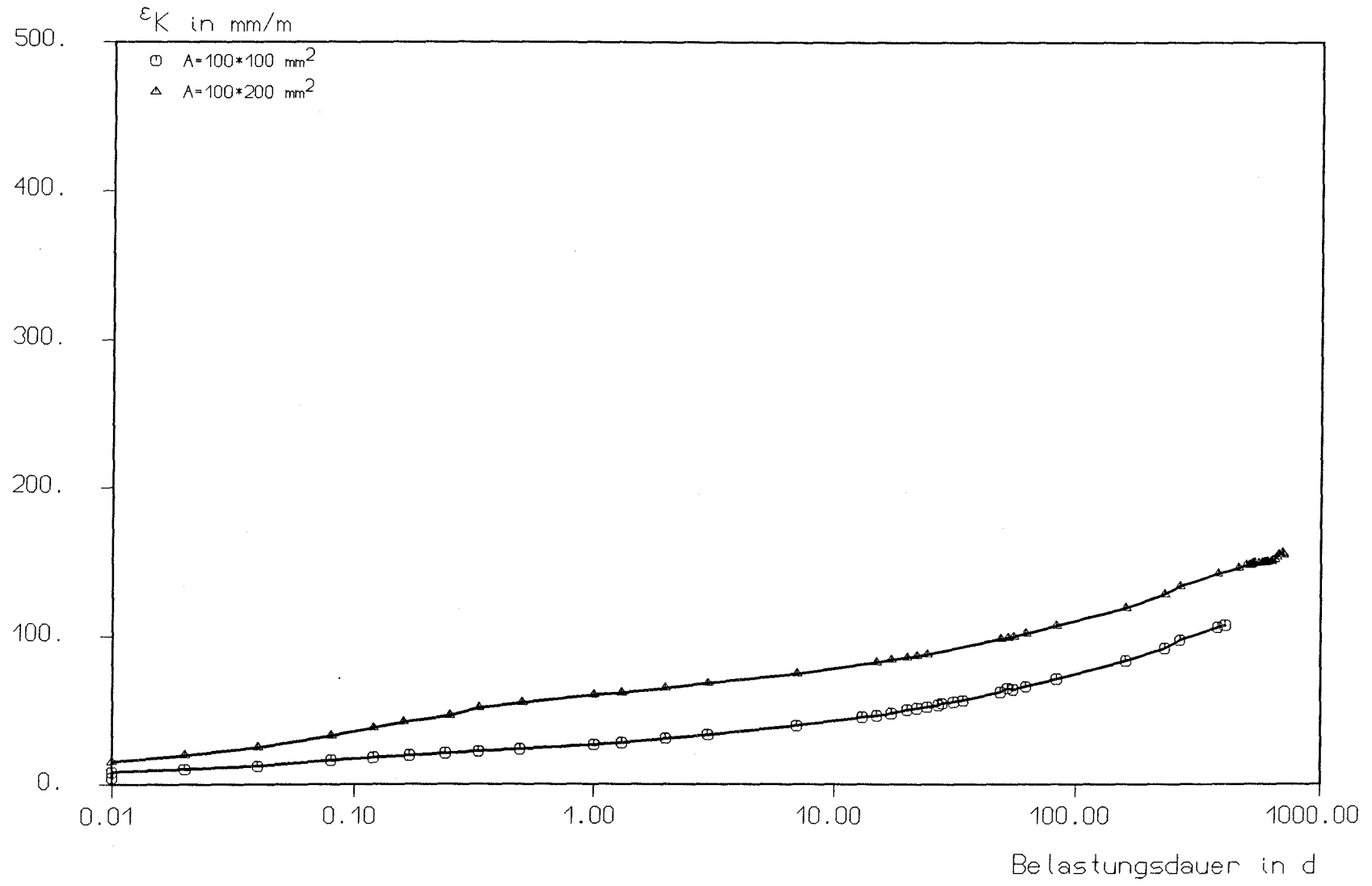


Bild A28

Kriechkurven Versuch Nr.4 und 8
Elastomerqualitaet: CR 1
 $A=100 \times 100 / 100 \times 200 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m=60 \text{ N/mm}^2$



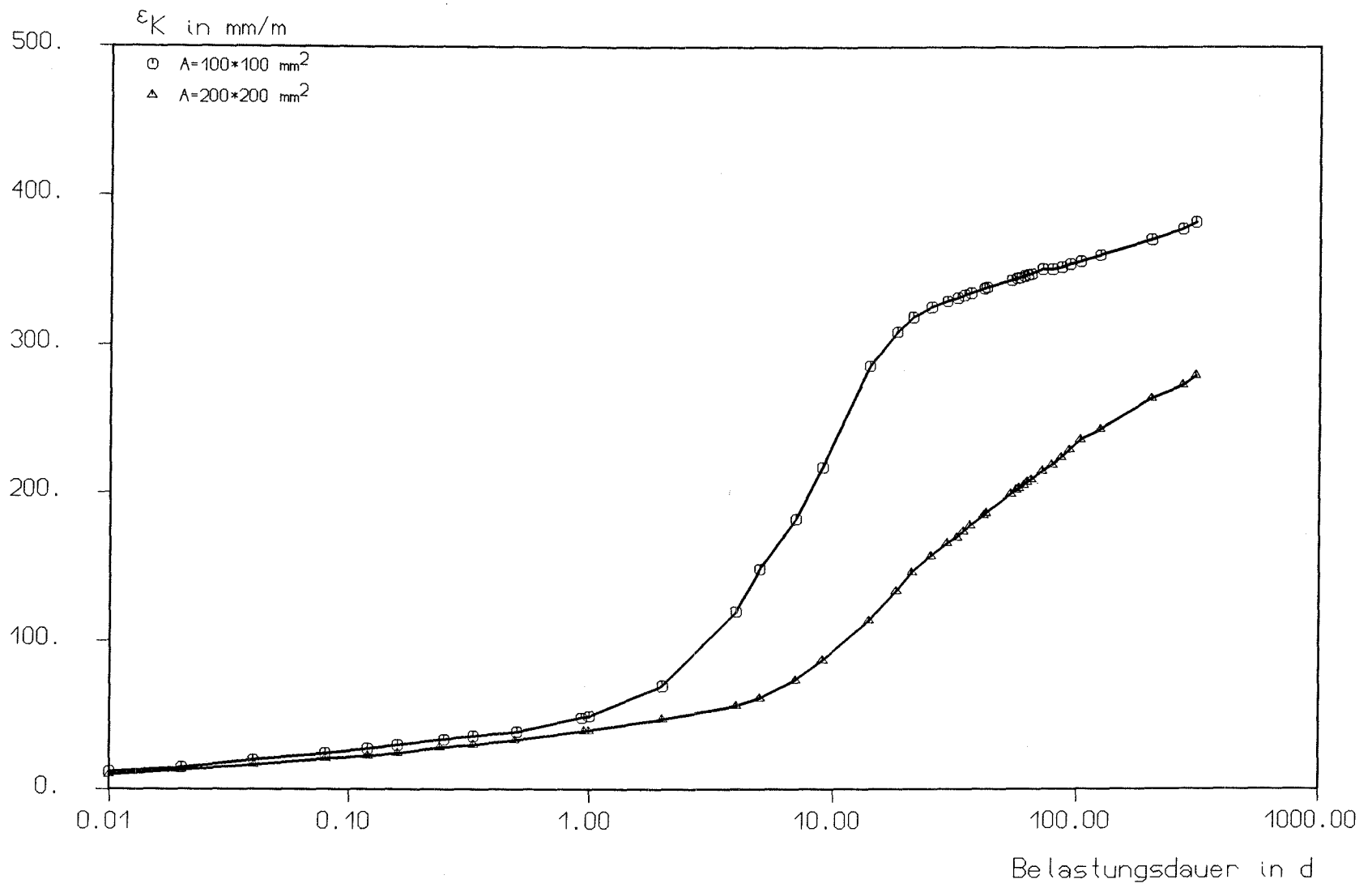


Bild A29

Kriechkurven Versuch Nr.15 und 20
Elastomerqualitaet: EPDM 1
A=100*200/200*200mm², t=5 mm, Neigung 0 mm, $\sigma_m = 40$ N/mm²



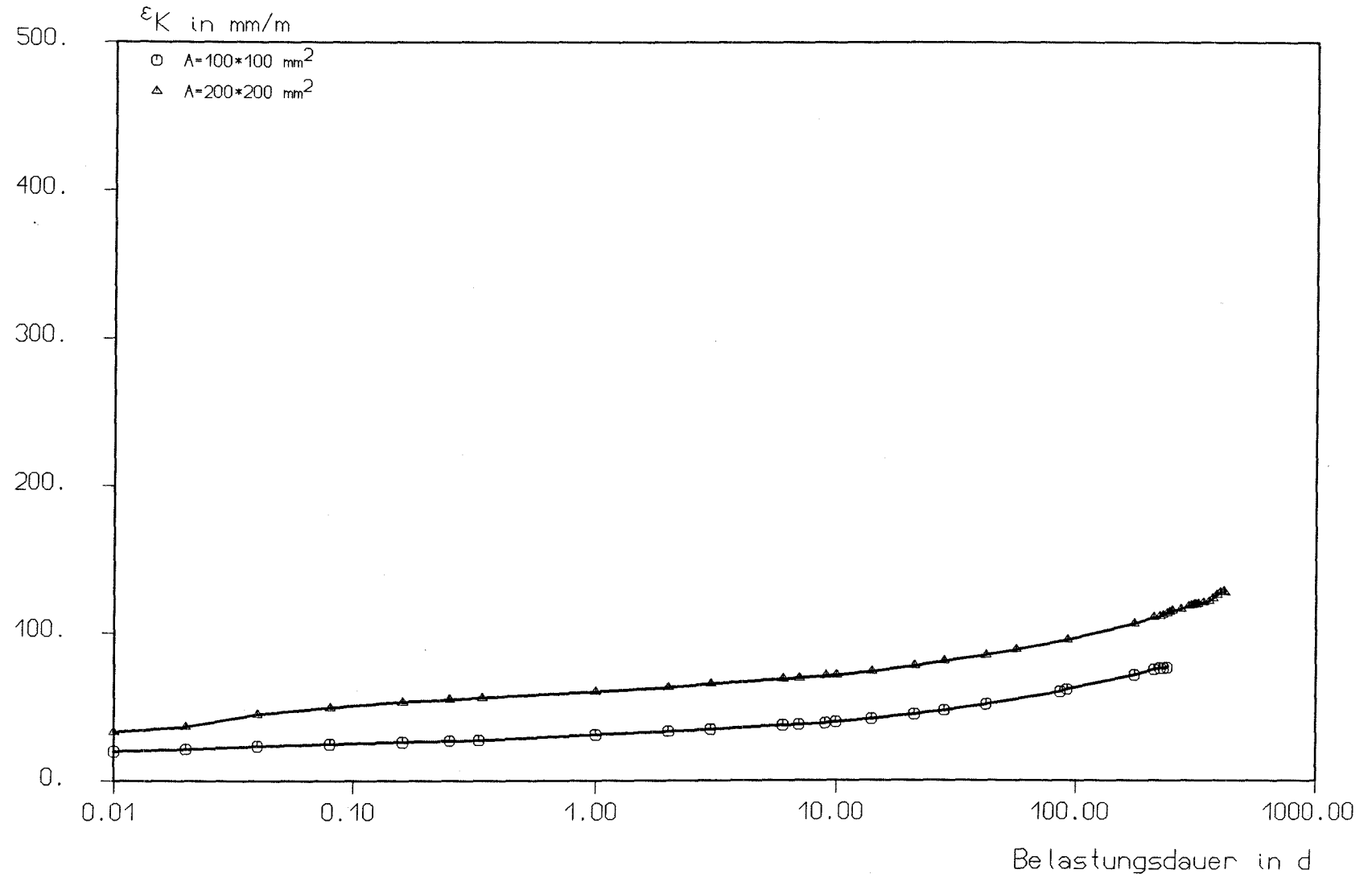


Bild A30

Kriechkurven Versuch Nr.17 und 22
Elastomerqualitaet: CR 1
A=100*100/200/200mm², t=5 mm, Neigung 0 mm; $\sigma_m = 40$ N/mm²



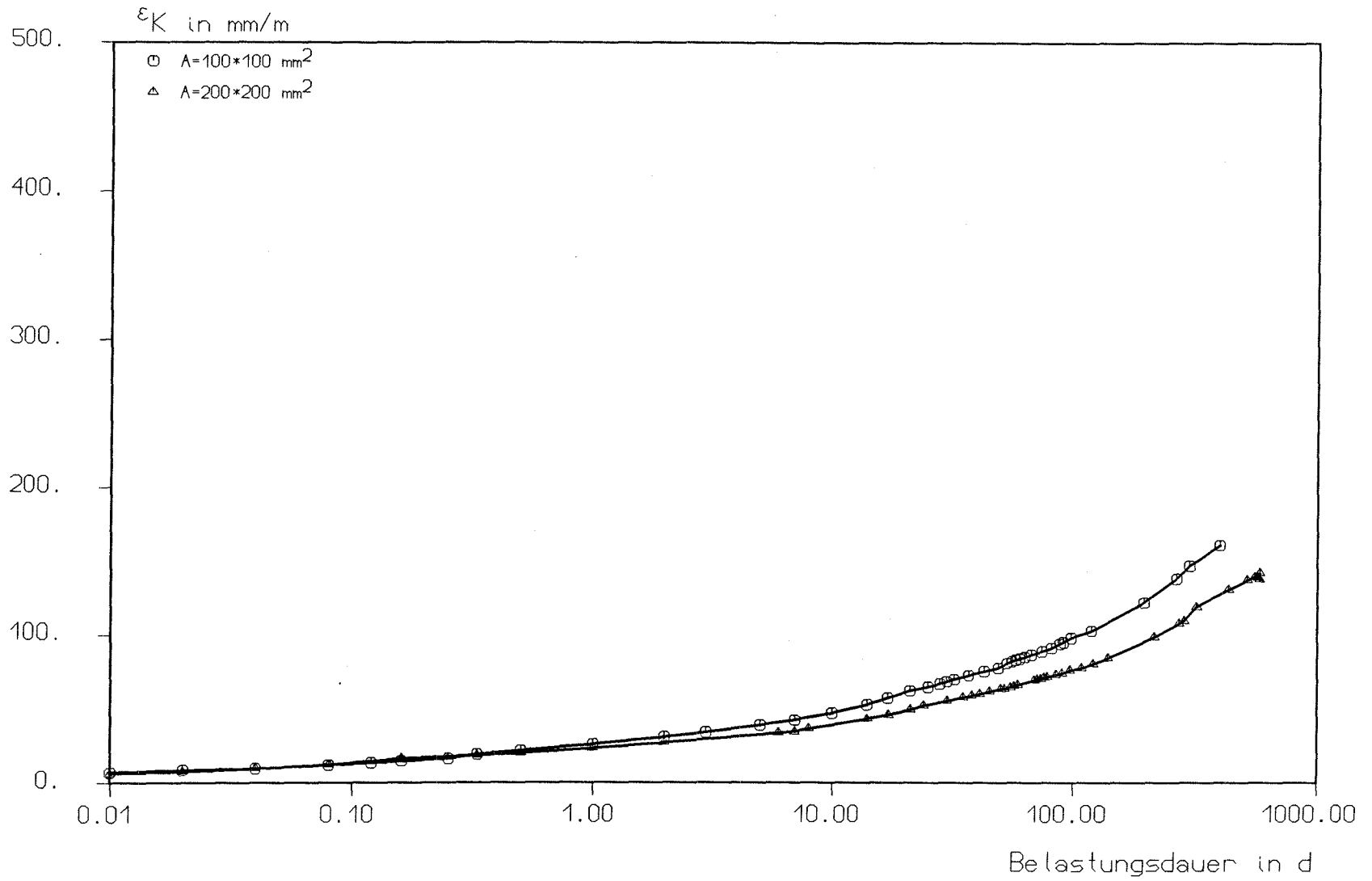


Bild A31

Kriechkurven Versuch Nr.10 und 23
Elastomerqualität: EPDM 1
 $A=100 \cdot 100 / 200 \cdot 200 \text{ mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$, Neigung 0 mm, $\sigma_m=20 \text{ N/mm}^2$



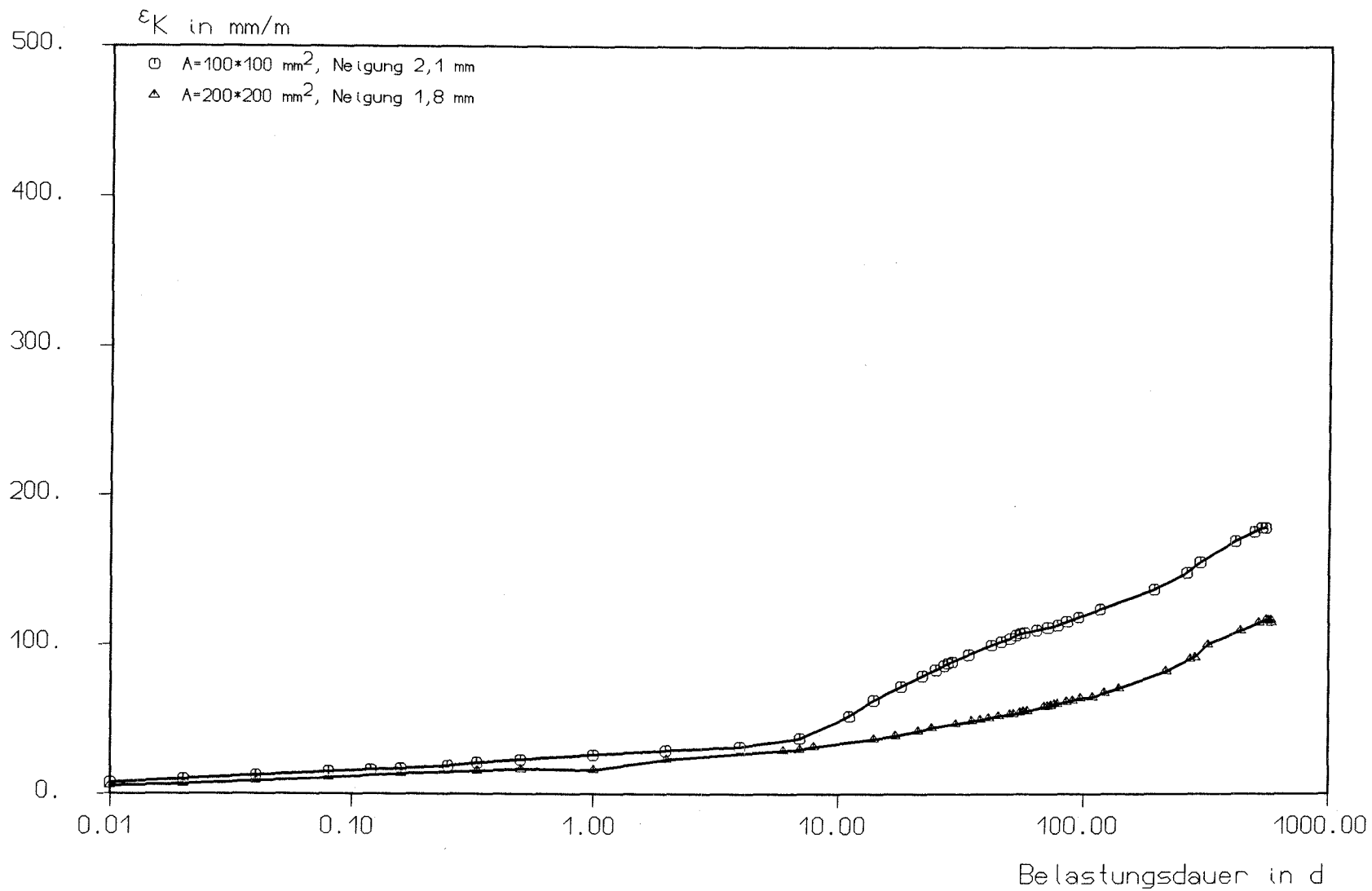


Bild A32

Kriechkurven Versuch Nr.13 und 24

Elastomerqualitaet: EPDM 1

A=100*100/200*200mm², t=5 mm, Neigung 1,8/2,1 mm, $\sigma_m=20$ N/mm²

JbAC

Telefon:
Vermittlung (02 41) 80-5100
Durchwahl (02 41) 80- 67 84

Datum 13.07.1989
Br/Pj/gb-F 179

LONGTIME-BEHAVIOUR OF PLAIN ELASTOMERIC BEARINGS UNDER
ELEVATED STRESS IN COLUMN JOINTS

=====

Summary

Within certain limits tolerances in accuracy of levels and parallelism of adjoining concrete structures are leveled out without local stress riser due to the elastic deformability of unreinforced elastomeric bearings. The standard application of those bearings is laid down in the german building code DIN 4141 Part 15, special regulations for bearing systems are given in DIN 4141 Part 3. Particular excluded in the field of application of DIN 4141 Part 15 is the use in column joints.

Elastomeric bearing pads allow clearly higher mean design pressure than permissible due to the regulations if a effective tensile split and transverse pull reinforcement system is used. The durability of the bearing function under permanent mean design pressure of 35 N/mm^2 is out of experience for Chloroprene-Rubber (CR) as well as for the cost favourable EPDM (Ethylen-Propylen-Terpolymere).

In a incomplete factor test program pressure creep tests were investigated to improve the durability of the bearing function under variation of the parameter

- elastomer quality of one producer (CR1, EPDM1)
- plan area of the bearing (100 x 100, 100 x 200, 200 x 200) mm²
- thickness of elastomer layer (5, 10) mm
- angle of rotation of elastomer layer (0, 0,3 t/a)
- mean design pressure (20, 40, 60) N/mm².

Though the tests simulate purposed^e full higher stress in column joints, the maximum design shear stress is within the value of the resulting shear stress due to the building codes for bearing systems for buildings. Out of the test results it can be concluded^e, that

- CR bearings show sufficient durability under maximum mean design pressure of 20 N/mm^2

- EPDM can not be accepted for general material in DIN 4141 Part 15
- EPDM bearings show sufficient durability under maximum mean design pressure of 5 N/mm²
- the durability of the bearing function can be improved under higher mean design pressure of (40, 60) N/mm² after a test period clearly longer than 100 days.