

Dauerstandverhalten unbewehrter Elastomerlager

T 2329

T 2329

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

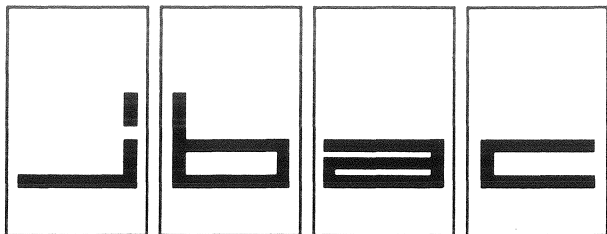
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

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

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
unbewehrter Elastomerlager

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 239

Projektleiter

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

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. M. Breitbach

Auftraggeber/
Förderer

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftragsdatum

18.07.1985

Aktenzeichen

IV/1-5-446/85

Dieser Bericht umfaßt 123 Seiten, davon 123 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

	Seite
1	EINFÜHRUNG..... 1
1.1	Baupraktische Problemstellung..... 1
1.2	Ziele..... 2
1.3	Vorgehensweise..... 3
2	BAUAUFSICHTLICHE REGELUNGEN..... 3
2.1	Zulassungs- und Normungswesen..... 3
2.2	Technische Funktion..... 4
2.2.1	Schnittgrößen und Verformungen..... 4
2.2.1.1	Allgemeines..... 4
2.2.1.2	Lagerungsklassen..... 4
2.2.1.3	Lagerbeanspruchungen..... 5
2.2.1.3.1	Beanspruchungen rechtwinkelig zur Lagerebene..... 5
2.2.1.3.2	Beanspruchungen parallel zur Lagerebene..... 6
2.2.1.3.3	Verdrehungen..... 6
2.2.2	Unebenheit und Schiefwinkeligkeit angrenzender Bauteildruckflächen..... 7
2.2.3	Pressungsverteilung in der Fuge elastomergelagerter Bauteile..... 9
2.3	Anwendungsbereiche..... 9
2.3.1	Allgemeines..... 9
2.3.2	Stützenstöße..... 10
2.3.3	Nicht vorwiegend ruhende Bauteile..... 11
2.4	Bauliche Durchbildung..... 11
2.4.1	Lagerfläche..... 1
2.4.2	Lagerdicke..... 12
2.4.3	Regellager..... 12
2.5	Qualitätssicherung..... 13
2.5.1	Allgemeines..... 13
2.5.2	Physikalische Eigenschaften des Elastomers..... 14
2.5.2.1	Kurzzeitversuche..... 14
2.5.2.2	Versuche zur Dauerhaftigkeit..... 14
2.5.2.2.1	Allgemeines..... 14
2.5.2.2.2	Dauerstandverhalten..... 14
3	CHEMORHEOLOGISCHE EFFEKTE DER ELASTOMERE..... 15
3.1	Baustoffe für Elastomerlager im Hochbau..... 15
3.2	Werkstoffverhalten von Elastomeren unter hoher mechanischer Beanspruchung..... 18

	Seite
3.3	Kennntnisstand über das Kriechen bei Elastomerlagern... 20
3.3.1	Dauerstandfestigkeit..... 20
3.3.2	Kriechverhalten..... 20
3.3.2.1	Allgemeines..... 20
3.3.2.2	Kurzzeitversuche..... 22
3.3.2.3	Langzeitversuche..... 23
3.4	Elastizitätstheoretische Spannungszustände..... 23
4	UNTERSUCHUNGEN ZUM DAUERSTANDVERHALTEN..... 24
4.1	Festlegung des Rahmenplanes..... 24
4.1.1	Übersicht..... 24
4.1.2	Elastomertypen und Elastomerqualitäten..... 26
4.1.3	Kontaktflächen..... 27
4.2	Versuchsdurchführung..... 28
4.2.1	Allgemeines..... 28
4.2.2	Versuchseinrichtung..... 28
4.2.2.1	Versuchsaufbau..... 28
4.2.2.2	Belastungsvorgang..... 30
4.2.2.3	Meßwerterfassung..... 31
4.2.2.4	Versuchsdauer..... 32
4.2.2.5	Versuchsumfang..... 32
4.3	Auswertekriterien und -verfahren..... 32
4.3.1	Übersicht..... 32
4.3.2	Spannungszustand der Elastomerlager..... 34
4.3.2.1	Rechnerische maximale Randschubspannungen..... 34
4.3.2.2	Zulässige Randschubspannungen norm- bzw. zulassungs- gerechter Regellager..... 35
4.3.3	Kriechzahl und Kriechfunktion..... 37
4.3.4	Extrapolation eines Endkriechmaßes..... 39
4.3.5	Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades..... 41
4.3.5.1	Allgemeines..... 41
4.3.5.2	Kriterien..... 41
4.3.5.2.1	Oberflächentextur der Grundrißflächen..... 41
4.3.5.2.2	Oberflächenzustand der freien Seitenflächen..... 41
4.3.5.2.3	Riefenbildung an den Lagerflächen..... 42
4.3.5.2.4	Ablösungen der oberflächennahen Druckflächen..... 42
4.3.5.2.5	Strukturzerstörung..... 42
4.3.5.2.6	Integraler Schädigungsgrad der Lagerprobe..... 42
5	VERSUCHSAUSWERTUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE..... 45
5.1	Quantitative Beurteilung der Kriechfunktionen..... 45
5.1.1	Zielsetzung..... 45
5.1.2	Dokumentation der Einzelergebnisse..... 45
5.1.3	Summarischer Überblick..... 46
5.1.3.1	Allgemeines..... 46

	Seite	
5.1.3.2	Einfluß des Elastomertyps.....	46
5.1.3.3	Einfluß der Elastomerqualität.....	48
5.1.3.3.1	Mittelwertkurven.....	48
5.1.3.3.2	Kurvenscharen.....	51
5.1.3.3.3	Einfluß der mittleren Pressung.....	53
5.1.3.4	Einfluß der Lagerfläche.....	55
5.1.3.5	Einfluß der Lagerdicke.....	56
5.1.3.6	Einfluß der Lagerverdrehung.....	58
5.1.3.7	Einfluß der baulichen Durchbildung.....	60
5.1.4	Kurzzeitversuche unter Wärmebeanspruchung.....	62
5.1.4.1	Prüfverfahren (DIN 53 547).....	62
5.1.4.2	Qualitative Beurteilung des Kriechverhaltens.....	63
5.2	Bewertungskriterien für das Dauerstandverhalten.....	65
5.2.1	Zielsetzung.....	65
5.2.2	Vertikale Lagerverformung.....	65
5.2.2.1	Allgemeines.....	65
5.2.2.2	Anfangsverformung.....	65
5.2.2.3	Gesamtverformung.....	69
5.2.2.4	Kriechzahl nach 100 d Beanspruchungsdauer.....	71
5.2.2.5	Extrapolation von Endkriechmaßen.....	73
5.2.3	Integraler Schädigungsgrad.....	77
6	BEURTEILUNG DES DAUERSTANDVERHALTENS.....	79
6.1	Allgemeines.....	79
6.2	Zeitstandfestigkeit.....	79
6.3	Integraler Gütewert.....	82
6.4	Anforderungskriterien.....	84
7	BAUPRAKTISCHE VERWERTBARKEIT.....	84
7.1	Prüfverfahren.....	84
7.2	Lagerungsklasse 1.....	85
7.2.1	Normungswesen.....	85
7.2.2	Zulassungswesen.....	85
7.3	Lagerungsklasse 2.....	85

		Seite
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	89
9	BEGRIFFE UND FORMELZEICHEN.....	92
10	DOKUMENTATION DER KRIECKKURVEN.....	94

1 EINFÜHRUNG

1.1 Baupraktische Problemstellung

Wirtschaftliche Fertigungsmethoden im Beton-Fertigteilbau erfordern kostengünstige, montagefreundliche und wartungsfreie Lagerausbildungen. Den Auflagerpunkten werden vorrangig zentrische Beanspruchungen zugewiesen, obwohl Exzentrizitäten aus Bauteilverdrehungen und Fertigungstoleranzen nicht vermeidbar sind. Traditionelle Mörtelbettausbildungen führen zu vergleichsweise starren Bettungen, deren Kantenpressungen bei Bauteilverdrehungen Schädigungen am Mörtelbett und an den angrenzenden Bauteilen hervorrufen können.

Untersuchungen an elastomergelagerten, zentrisch und exzentrisch beanspruchten Stützenstößen /1/ ergaben, daß bei zweckmäßiger Bewehrungsanordnung (auch bei durchaus wirtschaftlicher Spaltzugbewehrung) wesentlich höhere Spalt- und Quersugkräfte aufgenommen werden können, als die zulässigen Lagerbeanspruchungen hervorrufen. Auf der Grundlage dreiaxialer Verformungsmessungen an geometrisch unterschiedlichen Stützenstoßausbildungen im Bereich der Gebrauchslast sowie durch Bruchversuche, konnte ein einfaches Bemessungsverfahren bis zu mittleren Lagerpressungen von 20 N/mm^2 entwickelt werden. Für stark bewehrte Betondruckflächen können Elastomerlager wegen der Begrenzung der mittleren Pressung bisher nicht verwendet werden. Das schädigungsfreie Dauerstandverhalten ist für die bisher im bauaufsichtlichen Bereich zugelassenen Elastomerqualitäten auf der Basis von Chloropren-Kautschuk (CR) nur bis zu mittleren Pressungen von rd. 15 N/mm^2 bis rd. 20 N/mm^2 gesichert.

Untersuchungen an elastomergelagerten, zentrisch und exzentrisch beanspruchten Stützenstößen /1/ ergaben, daß bei zweckmäßiger Bewehrungsanordnung (auch bei durchaus wirtschaftlicher Spaltzugbewehrung) wesentlich höhere Spalt- und Quersugkräfte aufgenommen werden können als die zulässigen Lagerbeanspruchungen hervorrufen. Auf der Grundlage dreiaxialer Verformungsmessungen an geometrisch unterschiedlichen Stützenstoßausbildungen im Bereich der Gebrauchslast sowie durch Bruchversuche, konnte ein einfaches Bemessungsverfahren bis zu mittleren Lagerpressungen von 20 N/mm^2 entwickelt werden. Für stark bewehrte Betondruckflächen können Elastomerlager wegen der Begrenzung der mittleren Pressung bisher nicht verwendet werden.

Die Untersuchungen des Dauerstandverhaltens unbewehrter Elastomerlager erfolgten synchron mit den Beratungen zur DIN 4141 Teil 15; Lager im Bauwesen; Unbewehrte Elastomerlager; Bauliche Durchbildung und Bemessung /2/ sowie Teil 150; Lager im Bauwesen, Unbewehrte Elastomerlager; Baustoffe, Anforderungen, Prüfungen und Überwachung /3/. Anfängliche Untersuchungen zur Eignung ausgewählter Elastomertypen für den Sonderfall der Stützenstöße im Beton-Fertigteilbau erfolgten an lediglich zwei Elastomertypen eines Herstellers /4/. Aufgrund des dort festgestellten, extrem unterschiedlichen Dauerstandverhaltens dieser Elastomertypen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Untersuchungen auf alle im bauaufsichtlichen Bereich zugelassenen Elastomertypen deutscher Lagerhersteller erweitert.

1.2 Ziele

Ausgehend von dem in /4/ festgestellten, extrem unterschiedlichen Dauerstandverhalten zweier Elastomerqualitäten eines Herstellers sollen die hier beschriebenen Untersuchungen u. a. zur Klärung folgender Fragen beitragen:

- Welche maximalen, ständigen mittleren Pressungen können unbewehrten Elastomerlagern in Technischen Regelwerken (Norm, Bauaufsichtliche Zulassung) zugewiesen werden?
- Inwieweit liegt bei norm- bzw. zulassungsgerechter Elastomerzusammensetzung herstellerspezifisch differierendes Dauerstandverhalten vor?
- Inwieweit liegt zwischen den beiden bisher innerhalb bauaufsichtlicher Regelungen verwendeten Elastomertypen differierendes Dauerstandverhalten vor?
- Kann der Elastomertyp Ethylen-Propylen-Dienterpolymer (EPDM) als Baustoff gemäß DIN 4141 Teil 15 /2/ vorgesehen werden?

1.3 Vorgehensweise

Auf der Grundlage experimenteller und theoretischer, meist grundlagenorientierter Untersuchungen chemorheologischer Eigenschaften der Elastomere aus den Bereichen der chemischen Industrie und des Maschinenbaus werden die für das Verständnis und die Deutung experimentell gewonnener Erkenntnisse des Dauerstandverhaltens relevant erscheinenden Zusammenhänge erläutert.

Die spezielle baupraktische Situation der interaktiven Wechselwirkung zwischen der beanspruchungsbedingten Lagerverformung und dem Reibungsschluß an den Betondruckflächen und den daraus resultierenden, inneren mechanischen Gefügebeanspruchungen wird durch Langzeit-Druckkriechversuche (Dauerstandversuche) an unbewehrten Elastomerlagern mit Betondruckplatten als Kontaktflächen simuliert. Innerhalb eines nicht vollständigen Faktorplanes werden alle im bauaufsichtlichen Bereich zugelassenen Elastomerqualitäten unter Variation ausgewählter interessierender Versuchsparameter untersucht.

Als Bewertungskriterien für das Dauerstandverhalten werden die Kriechverformungskurven u. a. unter Beachtung progressiver Verformungszuwächse und durch rechnerische Extrapolation von Endkriechmaßen interpretiert und mit dem visuell beobachteten Schädigungsgrad der Lagerproben nach Versuchsende korreliert. Aus der Summe der Ergebnisse wird ein Bewertungskonzept zur Beurteilung des Dauerstandverhaltens hergeleitet.

2 BAUAUFSICHTLICHE REGELUNGEN

2.1 Zulassungs- und Normungswesen

In der Bundesrepublik Deutschland hat sich im bauaufsichtlichen Bereich des Hoch- und Brückenbaus der Elastomertyp **CHLOROPREN-KAUTSCHUK (CR)** mit einer spezifischen Härte durchgesetzt. Im Jahre 1972 wurde in der Bundesrepublik Deutschland die Verwendung von unbewehrten Elastomerlagern erstmals in den vorläufigen Richtlinien des Instituts für Bautechnik (IfBt) geregelt /5/. Zu diesem Zeitpunkt lag nach anfänglichem Austesten verschiedener elastomerer Werkstoffe der Verwendungsschwerpunkt bei CR-La-

gern. Seit Beginn der 80er Jahre sind kostengünstigere Elastomerqualitäten auf der Basis von **ETHYLEN-PROPYLEN-DIENTERPOLYMEREN (EPDM)** auf dem Markt. Die in der Richtlinie des IfBt formulierten Güteanforderungen sind bis heute im wesentlichen unverändert, für beide Elastomertypen wurden die Güteanforderungen gleichermaßen angewendet.

Zwischenzeitlich wurde im Rahmen der Normenreihe DIN 4141 Lager im Bauwesen ein Normenteil 15; Unbewehrte Elastomerlager; Bauliche Durchbildung und Bemessung /2/ erarbeitet.

2.2 Technische Funktion

2.2.1 Schnittgrößen und Verformungen

2.2.1.1 Allgemeines

Als Lagerung von Bauteilen gilt baupraktisch die Gesamtheit aller Maßnahmen zur Übertragung von

- Schnittgrößen (Kräfte, Momente)
- Bauteilverformungen (Verschiebungen, Verdrehungen)

zwischen zwei Bauteilen /6/. Die statisch/konstruktiv vorgesehenen Relativbewegungen benachbarter Bauteile sind möglichst zwängungsfrei zu übertragen. Bei modernen Baulagern werden solche Bewegungen durch Verformung geeigneter Kunststoffe (hier: Elastomere) realisiert /7/.

2.2.1.2 Lagerungsklassen

Lagerungen für Hochbauten werden in der Normenreihe DIN 4141 Teil 3 /6/, nach zwei Lagerungsklassen differenziert.

Lagerungsklasse 1 umfaßt solche Lagerungen, bei deren Überbeanspruchung oder dem Ausfall der Lagerfunktion die Standsicherheit des Bauwerks gefährdet ist. Für die Lagerungsklasse 1

- dürfen nur genormte Lager verwendet werden
- müssen alle auf die Lagerung einwirkenden Kräfte nach ihrer Größe, Lage und Richtung sowie die zu erwartenden Lagerverformungen ermittelt wer-

den. Die in den angrenzenden Bauteilen wirkenden Lagerwiderstände (Rückstellkräfte und -momente, Reibungskräfte, Querkzugkräfte und Lastexzentrizitäten infolge der Lagerverformung) sind in ihrer Wirkung auf angrenzende Bauteile zu verfolgen.

Lagerungsklasse 2 umfaßt alle Lagerungen, bei denen die angrenzenden Bauteile, außer durch die rechnerische mittlere Pressung, nur unwesentlich durch andere Lagerreaktionen beansprucht wird. Die Standsicherheit des Bauwerks ist bei Überbeanspruchung der Lager oder beim Ausfall der Lagerfunktion nicht gefährdet. Neben genormten Lagern können auch solche verwendet werden, für die geeignete Nachweise (Prüfungen) für den vorgesehenen Verwendungszweck an einer dafür anerkannten Prüfstelle geführt worden sind.

2.2.1.3 Lagerbeanspruchungen

2.2.1.3.1 Beanspruchungen rechtwinklig zur Lagerebene

Durch die elastische Verformbarkeit unbewehrter Elastomerlager werden innerhalb bestimmter Grenzen Abweichungen von der Ebenheit und Schiefwinkligkeit zu lagernder Bauteildruckflächen ohne kritische örtliche Spannungsspitzen ausgeglichen. Insbesondere werden die Pressungen zu den Lagerrändern hin abgebaut. Infolge der Volumenkonstanz des nahezu inkompressiblen Elastomers führen Lagerverformungen zur Ausbreitung des Elastomer-kissens im Lagerspalt (bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes - Reibungsschluß). Aufgrund der nur unzutreffend erfaßbaren Reibungsverhältnisse an den Kontaktflächen werden für den allgemeinen Einsatz solcher Lager im Hochbau sehr vorsichtige Beanspruchungen formuliert. Von der (vorzugsweise) Fertigteilindustrie werden aus konstruktiv/wirtschaftlichen Gründen, z. B. zur Minimierung der Auflagerflächen, weitaus höhere Pressungen gewünscht. Durch die horizontale Lagerausbreitung unbewehrter Elastomerlager werden nicht unerhebliche Querkzug- und Spaltzugkräfte in die angrenzenden Auflagerflächen eingeleitet.

Geometrieabhängig (Lagerfläche und Elastomerdicke) erfolgt daher, unabhängig von der Lagerungsklasse, eine Begrenzung der mittleren Pressung solcher Lager. Gleichzeitig wird die vertikale Lagerzusammendrückung inner-

halb vertretbarer Grenzen gehalten. Über eine empirische Formel, die die Lagerlast berücksichtigt, ist die Querkraft nachzuweisen.

Bei bewehrten Elastomerlagern wird die horizontale Lagerausbreitung durch die Bewehrungsbleche verhindert, auftretende Schubspannungen werden von den Blechen aufgenommen und die Lagerzusammendrückung wird minimiert. Dadurch treten nur geringe Querkraften auf. Innerhalb der Normenteile für bewehrte Elastomerlager (Teil 14 /8/) und unbewehrte Elastomerlager (Teil 15 /2/) ist der Übergang für die zulässigen mittleren Pressungen daher nahezu stetig angeglichen.

2.2.1.3.2 Beanspruchungen parallel zur Lagerebene

Planmäßige Beanspruchungen parallel zur Lagerebene aus ständigen äußeren Lasten sind unzulässig. Für die Beanspruchungen aus Zwang, aufgezwungenen Verformungen und kurzzeitigen Lasten ist für die Lagerungsklasse 1 die Gleitsicherheit nachzuweisen, das Durchrutschen konstruktiv zu verhindern oder es ist zu beurteilen, ob ein Durchrutschen unschädlich ist. Ein zulässiger Schubverformungswinkel wird, im Gegensatz zu den bewehrten Elastomerlagern, die in der Regel eine größere Elastomergesamtschichtdicke aufweisen, den unbewehrten Elastomerlagern nicht zugewiesen. Allerdings erfolgt über den Ansatz der Zwängungskraft für den Nachweis des Durchrutschens indirekt eine Beschränkung der zulässigen Schubverformung.

2.2.1.3.3 Verdrehungen

Für die Lagerungsklasse 1 ist die Verdrehung des Lagers infolge der elastischen und plastischen Verformung des Bauteils und zusätzlich für die Anteile aus den Abweichungen von der Ebenheit und Schiefwinkeligkeit der Auflagerdruckflächen geometrieabhängig auf $\alpha \leq 0,5 \text{ t/a}$ begrenzt, wobei a die Lagerkante rechtwinkelig zur Drehwinkelachse ist.

2.2.2 Unebenheit und Schiefwinkeligkeit angrenzender Bauteil- druckflächen

Die Ebenheitstoleranzen für die Auflagerflächen sind für Lager im Hochbau einheitlich für alle Lagergrößen auf $\pm 2,5$ mm begrenzt /6/. Im allgemeinen Fertigteilbau wurden im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung für Bauteilabmessungen, wie sie für Auflagerbänke üblich sind (bis rd. 500 mm), mittlere Unebenheiten bis zu 5 mm registriert /9/ (Bild 2.1).

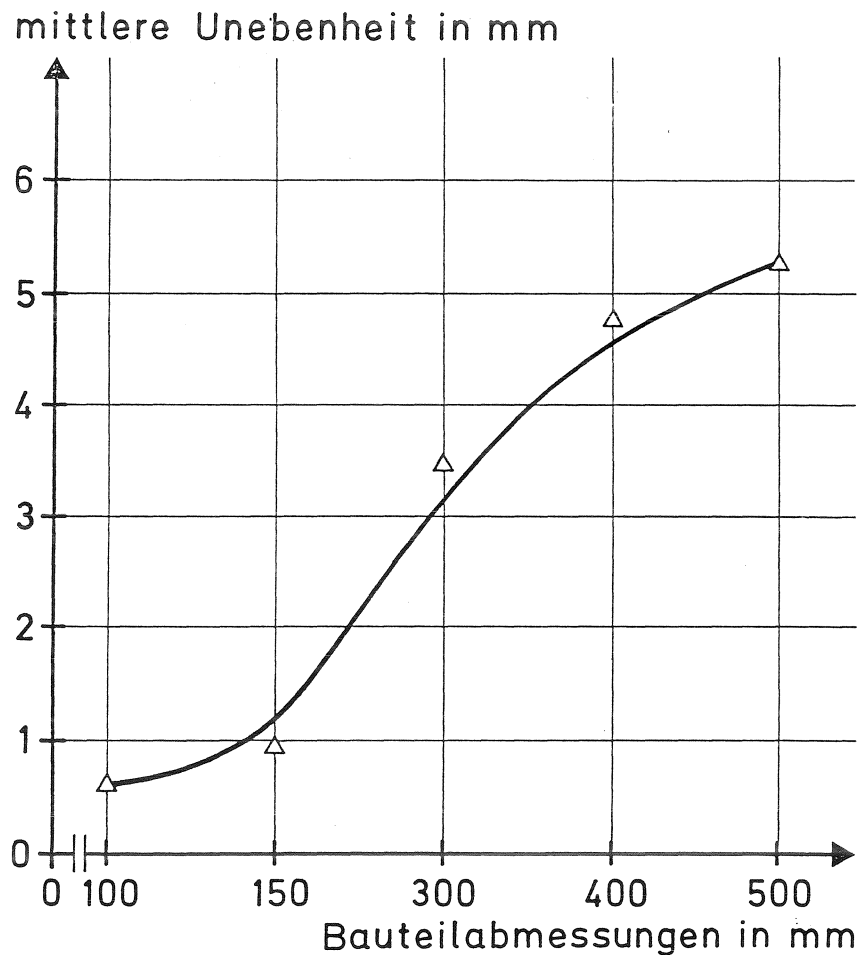


Bild 2.1: Abweichungen von der Ebenheit bei Fertigteilen

Für Auflagerdruckflächen sind daher besondere Anforderungen an die Ebenheit zu vereinbaren, gemäß DIN 4141 Teil 3 /6/ sind die Toleranzen für Auflagerdruckflächen in den Ausführungszeichnungen einzutragen. Bei beson-

deren Lagerungen, z. B. Lager mit sehr geringer Dicke (vgl. Abschn. 2.4.2) sind ggf. erhöhte Anforderungen an die Ebenheitstoleranzen zu stellen.

Abweichungen von der Parallelität zugehöriger Auflagerflächen infolge von Herstell- und Montagetoleranzen sind in der statischen Berechnung mit mindestens 1 % zu berücksichtigen und rechnerisch wie planmäßige Verdrehungen zu behandeln /6/. Für übliche Fertigteilausführungen wurden für den überwiegenden Anteil der Auflagerflächen Abweichungen von der Planparallelität $< 1\%$ ermittelt /10/ (Bild 2.2). Die zulässige Gesamtverdrehung (vgl. Abschn. 2.2.1.3.3) ist um die Schiefwinkeligkeit \geq zu reduzieren /2/.

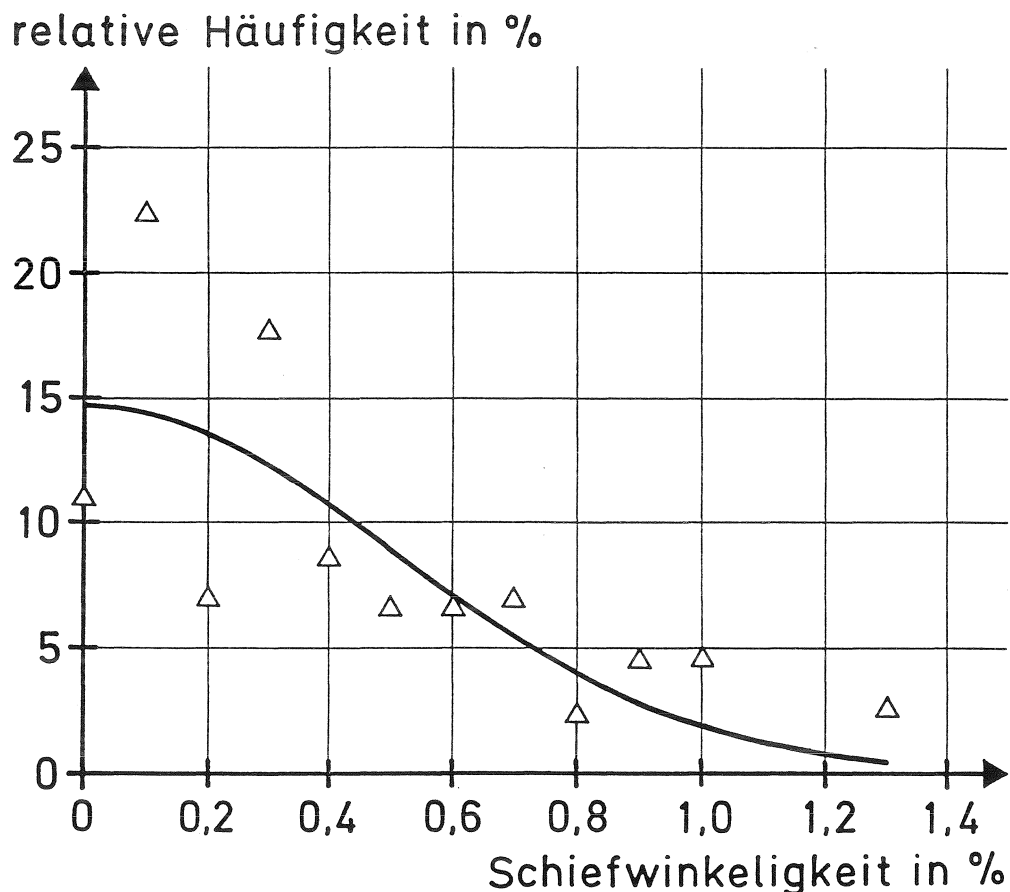


Bild 2.2: Schiefwinkeligkeiten bei Fertigteilauf Lagerflächen

2.2.3 Pressungsverteilung in der Fuge elastomergelagerter Bauteile

Für die Spannungsverteilung in der Fuge elastomergelagerter Bauteile (unbewehrte und bewehrte Elastomerlager) liegen für erhöhte mittlere Pressungen bis 30 N/mm^2 unter zentrischer und exzentrischer Beanspruchung experimentelle Erfahrungen vor /11/. Mit zunehmender Pressung und zunehmender Lagerdicke nimmt die horizontale Lagerausbreitung in der Lagerfuge zu, in beiden Fällen wird die Spannungskonzentration im Innern der Druckflächen erhöht. Gegenüber den rechnerischen Druckspannungen ergeben sich Spannungsspitzen bis zu 200 %, und Lagerausbreitungen bis zu 180 % der Lagerabmessungen im unbelasteten Zustand (Bild 2.3). Exzentrische Lasteinleitung (Auflagerverdrehung) führt zu einer weiteren Lastkonzentration. Dennoch nehmen die Pressungen zu den Lagerrändern (theoretisch bis zu Null) ab. Das besondere Prinzip der Spannungsmessung (Druckmeßfolien /11/) erlaubt die Messung der maximalen Pressungszustände nur unmittelbar nach der Lastaufbringung. Die anschließenden Fließ-, Kriech- und Relaxationsvorgänge lassen jedoch Spannungsumlagerungen erwarten, die zu einer wesentlich gleichmäßigeren Spannungsverteilung führen.

2.3 Anwendungsbereiche

2.3.1 Allgemeines

Die Standardanwendung unbewehrter Elastomerlager im Hochbau regelt DIN 4141 Teil 15 /2/. Die Qualitätssicherung solcher Lager ist in Teil 150 der Norm /3/ festgelegt. Diese Regelungen gelten für Lagerungsklasse 1 (vgl. Abschn. 2.3), für Lagerungsklasse 2 sind reduzierte Anforderungen vorzusehen, die geeignet erscheinen, die dauerhafte Lagerfunktion für den vorgesehenen Verwendungszweck zu gewährleisten.

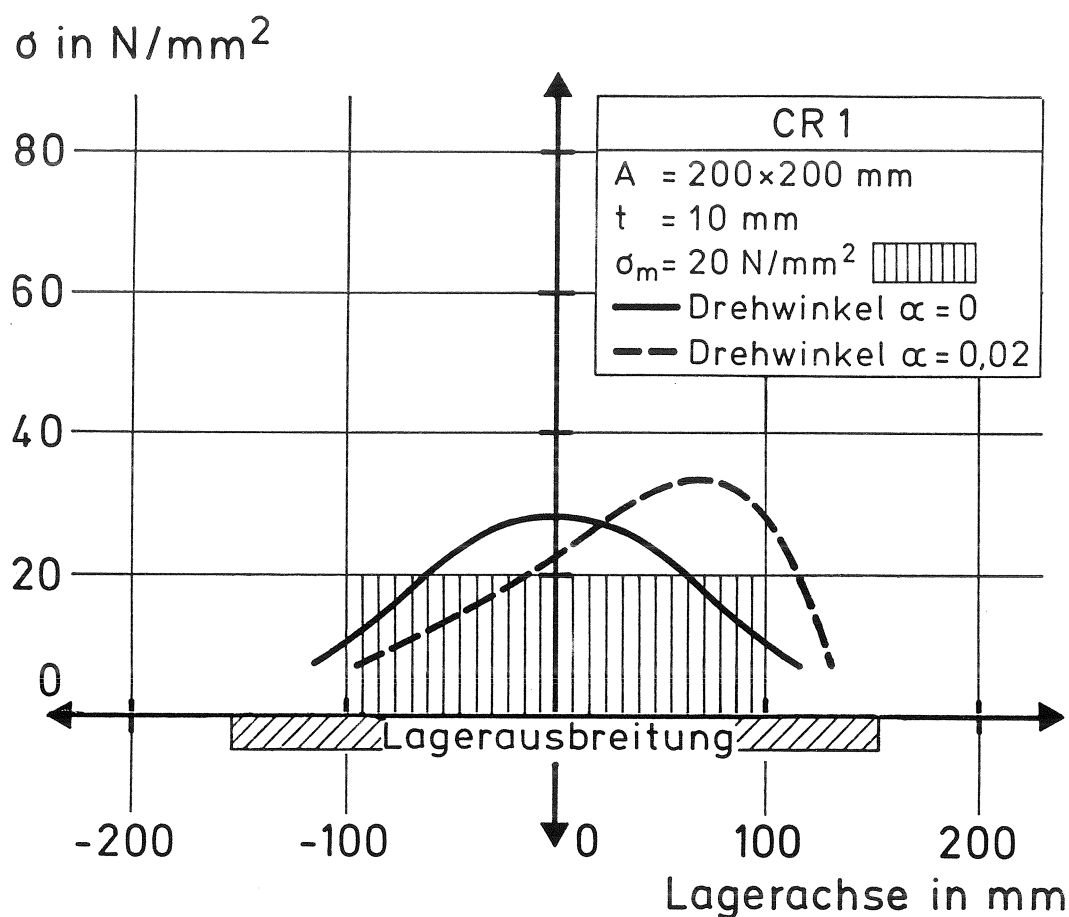


Bild 2.3: Pressungsverteilung eines normgerechten unbewehrten Elastomerlagers in der Lagerfuge unter erhöhter zentrischer und exzentrischer Beanspruchung

2.3.2 Stützenstöße

Innerhalb der Normenreihe DIN 4141 ist die Verwendung von unbewehrten Elastomerlagern für Stützenstöße ausdrücklich ausgegrenzt. Unbewehrte Elastomerlager unterliegen in Stützenstößen vergleichsweise hohen, ständigen vertikalen Pressungen. Das nach umfangreichen Untersuchungen herausgegebene Heft 339 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton /1/ enthält alle für die Gebrauchssicherheit solcher Lagerungen notwendigen Regelungen, so daß eine Normbedürftigkeit für diesen Anwendungsfall derzeit nicht gegeben ist.

2.3.3 Nicht vorwiegend ruhende Bauteile

Im Gegensatz zu vergleichbaren Anwendungen im Ausland (z. B. Brückenbau in den USA) wird der Einsatz von unbewehrten Elastomerlagern für die Lagerung von dynamisch beanspruchten Bauteilen nicht geregelt. Bei pulsierender Beanspruchung kann das Herauswandern des Lagerkissens aus dem Lagerspalt nicht ausgeschlossen werden (sog. Kirschkerneffekt). Aus diesem Grund werden Lagerungen von im Brückenbau, von Kranbahnen bzw. nicht vorwiegend ruhenden Bauteilen für den Anwendungsbereich des Teils 15 der DIN 4141 ausdrücklich ausgegrenzt; die Verwendung unbewehrter Elastomerlager ist ausschließlich auf den Hochbau beschränkt.

2.4 Bauliche Durchbildung

2.4.1 Lagerfläche

Unbewehrte Elastomerlager weisen im Regelfall rechtwinkelige (quadratische, rechteckige) oder kreisrunde Lagerflächen auf. Für die Lagerungsklasse 1 dürfen die Lagerkissen keine Oberflächenprofilierungen und/oder gleichmäßig verteilte Lochungen in der Lagerfläche aufweisen. Unter vereinfachenden Annahmen für die Werkstoffgesetze und für vollständigen Kraftschluß in den Kontaktflächen, wurde für kompakt ausgebildete Lager eine auf der Kontinuumsmechanik beruhende Theorie des mechanischen Lagerverhaltens entwickelt /12/. Das einfach handhabbare Verfahren hat (vielfach indirekt) die Bemessungsgrundsätze bei den Elastomerlagern (bewehrt/unbewehrt) maßgeblich beeinflußt.

Bei Abweichungen von den zuvor beschriebenen Lagerformen ist die Übertragung der in der Norm geregelten Bemessungsgrundsätze nur begrenzt möglich, z. B. bei ellipsenförmigem oder dreieckigem Grundriß. Bei andersartigen Grundrissen mit z. B. Aussparungen oder mit Krümmungen wechselnden Vorzeichen sind geeignete Versuche erforderlich.

2.4.2 Lagerdicke

Abhängig von den Kantenabmessungen werden untere und obere Einschränkungen für die Lagerdicke getroffen /2/. So wird für den Regelfall eine Mindestdicke von 5 mm gefordert, bei erhöhten Anforderungen an die Ebenheit und Planparallelität der angrenzenden Bauteile kann die Lagerdicke auf 4 mm reduziert werden. Die maximale Lagerdicke beträgt 12 mm.

2.4.3 Regellager

Aufgrund der aus konstruktiven Gründen vielfältigen Lagergeometrien werden rechteckige, unbewehrte Elastomerlager im Gegensatz zu den bewehrten Elastomerlagern im Normenteil 3 der DIN 4141 in "groben" Klassen zusammengefaßt /2/ (Tabelle 2.1), wobei die Obergrenzen der Klassen durch den sog. Formfaktor gebildet werden. Der Formfaktor S gibt das Verhältnis zwischen der gedrückten Lagerfläche und der freien Lagerfläche an den Kanten im unbelasteten Zustand eines Lagerkörpers an. Aufgrund des Verformungsverhaltens bei Druckbeanspruchung (Reibungsschluß in den Lagerflächen, Schlupf und Verwölbungen an den freien Flächen) erweist sich der Formfaktor zur empirischen Spannungsermittlung als geeignet. Gemäß der Norm ist daher die zulässige, rechnerische (zentrische) Spannung auf

$$\sigma_m \leq 1,2 \cdot G \cdot S$$

G = Schubmodul (Rechengröße = 1 N/mm²)

S = Formfaktor

begrenzt.

Tabelle 1: Regellager gemäß DIN 4141 Teil 15, Abmessungen, Formfaktor und zulässige Presungen

-	b = a			b = 2 a		
t mm	b/a/t mm	S	σ_{m2} 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

2.5 Qualitätssicherung

2.5.1 Allgemeines

Die Qualitätssicherung unbewehrter Elastomerlager erfolgt gemäß DIN 4141 Teil 150 /3/ auf der Grundlage der DIN 18 200 durch eine

- Eignungsprüfung hinsichtlich der Elastomerzusammensetzung und physikalischer Eigenschaften
- Eigenüberwachung
- Fremdüberwachung.

Umfang und Anforderungen sind in DIN 4141 Teil 150 geregelt. Die Regelungen gelten uneingeschränkt für Lager der Lagerungsklasse 1 (vgl. Abschn. 2.2.1.2); für Lager der Lagerungsklasse 2 kann ein auf den Anwendungszweck abgestimmter, reduzierter Umfang vereinbart werden.

2.5.2 Physikalische Eigenschaften des Elastomers

2.5.2.1 Kurzzeitversuche

Neben der Prüfung Elastomerzusammensetzung und der Lagerbeschaffenheit sind im Rahmen der Eignungsprüfung vorrangig Kurzzeitversuche, z. B. zur Bestimmung der Härte, der Reißdehnung, des Weiterreißwiderstandes und des Druckverformungsrestes vorgesehen /3/. Das Verhalten des Elastomers innerhalb der vorgesehenen Einsatztemperaturen (-25 °C bis $+50\text{ °C}$) wird durch Kälte- und Wärmeeinwirkung über wenige Stunden bis einige Tage bei den Prüfungen zur Härteänderung, Reißfestigkeit und -dehnung und zum Druckverformungsrest überprüft.

Als mechanische Kennwerte sind die Lager- (Federkennlinie) und die Schubsteifigkeit jeweils bei Lagertemperaturen von -30 °C , -25 °C , -20 °C , -15 °C , 0 °C , $+23\text{ °C}$, $+50\text{ °C}$ zu bestimmen.

2.5.2.2 Versuche zur Dauerhaftigkeit

2.5.2.2.1 Allgemeines

Die Dauerhaftigkeit solcher Lager wird im Rahmen der Eignungsprüfung durch das

- Verhalten gegen Ozoneinwirkung (Alterung, vgl. Abschn. 3.1)
- Dauerstandverhalten

untersucht.

2.5.2.2.2 Dauerstandverhalten

Die Untersuchungen zu diesem Forschungsvorhaben erfolgten zu den Beratungen der DIN 4141 Teil 150 /3/ zur Frage des Dauerstandverhaltens von unbewehrten Elastomerlagern. Das in dem Normenteil niedergelegte Prüfverfahren (Abschn. 4.1.10 des Teils 150) resultiert aus den Untersuchungserfahrungen und -ergebnissen. In den nachfolgenden Berichtsabschnitten werden Grundlagen, Vorgehensweisen und Beurteilungskriterien, die zu dem Prüfverfahren geführt haben, ausführlich erläutert.

Abschnitt 4.1.10 (DIN 4141 Teil 150) Dauerstandfestigkeit

Die Dauerstandfestigkeit ist an zwei Lagerkörpern einer bestimmten Lagergeometrie (100 x 100 x 10 mm²) in einem Dauerdruckversuch über eine Belastungsdauer von 100 d mit einer konstanten zentrischen Pressung von 40 N/mm² zu beurteilen. Als Kontaktdruckflächen sind definierte Feinbetonscheiben zu verwenden. Als Beurteilungskriterien dienen

- die "elastische" Anfangsverformung 5 Minuten nach der Belastung
- das Kriechmaß nach 100 d Beanspruchungsdauer
- die eingetretenen Veränderungen am Lagerkörper nach Versuchsende.

Als Anforderung darf das Kriechmaß nach 100 Tagen einen Wert von $\varphi = 0,3$ nicht überschreiten.

3 CHEMORHEOLOGISCHE EFFEKTE DER ELASTOMERE

3.1 Baustoffe für Elastomerlager im Hochbau

Elastomertypen werden gemäß ASTM D 1418 - 85 Standard Practice for Rubber and Rubber Latices-Nomenclature /13/ in 8 Gruppen klassifiziert. Für Lager im Hochbau werden Elastomere aus zwei dieser Gruppen verwendet (vgl. Abschn. 2.1):

R-Rubbers:

Elastomer mit einer ungesättigten Kohlenstoffkette (CR)

M-Rubbers:

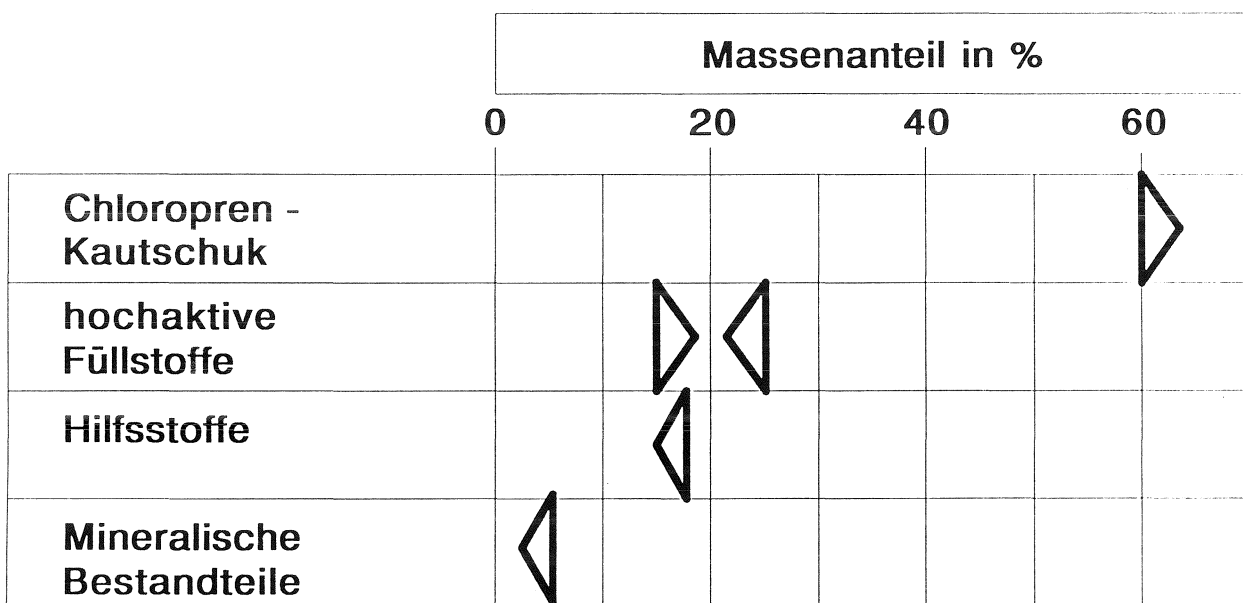
Elastomer mit einer gesättigten Polymethylkette (EPDM).

Diese Klassifizierung bezieht sich allerdings nur auf die chemische Zusammensetzung des Rohkautschuks, der in dieser Form jedoch baupraktisch nicht verwendbar ist. Zur Erzielung der gewünschten

- Verarbeitungseigenschaften
- mechanischen Eigenschaften
- Dauerstand- und Alterungseigenschaften

werden dem Rohkautschuk ein Vielfalt von Hilfs- und Füllstoffen zugesetzt. Neben der genau abgestimmten Dosierung der Inhaltsstoffe beeinflusst die Vulkanisation (Prozeßführung und Vulkanisationsgrad) die physikalischen

Eigenschaften des fertigen Lagers maßgeblich. Solche Veränderungen sind häufig nicht im Kurzzeitversuch, z. B. im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung, sondern z. B. durch das Kriechverhalten und die Versteifung des Elastomeren bei tiefen Temperaturen (Kristallisation) feststellbar. In Bild 3.1 sind die Anforderungen an die Elastomerzusammensetzung gemäß DIN 4141 zusammengefaßt.



▷ **Mindestanforderungen**
 ◁ **Maximalanforderungen**

Bild 3.1: Anforderungen an die Elastomerzusammensetzung (DIN 4141) für Chloropren-Kautschuk-Lager (CR)

Der Rußtyp und der -korndurchmesser (hochaktiver Füllstoff) beeinflusst nicht zuletzt durch seinen hohen Massenanteil die mechanischen Lagereigenschaften maßgeblich /14/. Mit zunehmenden Korndurchmessern werden abnehmende Härte, Elastizität und Reißspannung registriert.

Unter dem Begriff "Alterung" werden bei Elastomeren verschiedene Mechanismen zusammengefaßt, die technisch erwünscht oder unerwünscht sein können /15/:

Autooxidation

Die chemische Bindung von Luftsauerstoff führt zunächst zu einer Erweichung der oberflächennahen Bereiche durch Molekülkettenspaltung. Mit zunehmender Alterung kann eine Nachvernetzung zur Verhärtung (Versprödung) der Oberfläche führen.

Ermüdung

Unter dauernder mechanischer (vorzugsweise unter Schwelllast) Beanspruchung (Spannungsänderung) bilden sich in der Regel senkrecht zur Spannungsrichtung relativ rasch Risse in der Oberfläche aus, deren Rißwachstum im allgemeinen schnell abklingt. Bei Lagern werden solche Risse von der Normalspannung überdrückt, so daß hinter dem Deformationsbereich (systemimmanente Auswölbung zwischen den Kontaktflächen) bei planmäßiger Beanspruchung in der Regel keine Risse beobachtet werden.

Ozonrißbildung

Unter mechanischer Dehnungsbeanspruchung, etwa der Schubverformung des Lagers, wird die Rißbildung unter Ozoneinwirkung verstärkt. Ozonrißbildung zeichnet sich durch viele kleine Risse mit geringer Rißtiefe aus. In der Regel stabilisiert sich die Schädigung nach Ozonbeanspruchung nach längerer Zeit.

Crazing-Effekt

Bei Elastomeren bildet sich z. B. unter UV-Bestrahlung ein System netzartiger Rillen ohne eine ausgeprägte Orientierung an der Oberfläche aus, die sog. Elefantenhaut. Der Prozeß kommt zu einem Stillstand, wobei keine Schädigungen der molekularen Struktur, jedoch eine deutliche Versprödung und ein Abkreiden des Füllstoffes beobachtet werden kann.

Frosting

Unter Frosting wird das Mattwerden der Oberfläche verstanden. Der Vorgang ist relativ unerforscht, nennenswerte Beeinflussungen der Materialeigenschaften werden nicht beobachtet.

Gegen die Alterungsprozesse werden dem Elastomer sog. Antioxidantien und Antiozonanten zugegeben. Allgemein wird in der Fachliteratur betont, daß stark schwarz-braun-färbende Alterungsschutzmittel bessere Eigenschaften gegenüber hellfärbenden aufweisen, hier jedoch eine starke Kontaktfärbung

auftritt. Vielfach werden mehrere Substanzen in unterschiedlicher Konzentration zugefügt. Die naturgegeben im Kautschuk vorhandenen Stabilisatoren werden vielfach bei der Vulkanisation zerstört. Die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften hängen jedoch wesentlich von den Füllstoffen und Stabilisatoren ab. Überdosierte Alterungsschutzmittel begünstigen vielfach diese Eigenschaften.

Über die Wirkungsweise der Alterungsschutzmittel liegen weitgehend phänomenologische Erkenntnisse vor. Die Reagentien werden dem gesamten Elastomervolumen zugefügt. Man weiß lediglich, daß die Mittel an der Oberfläche durch Ozoneinwirkung oder Reaktion mit Oxidationsprodukten reagieren und verbraucht werden. Diffusionsvorgänge der Substanzen an oberflächennahen Bereichen müssen unterstellt werden.

Weiter werden dem Elastomer sog. Weichmacher zur Verbesserung der Verarbeitung, der Füllstoffverteilung und insbesondere der mechanischen Eigenschaften zugesetzt. Als Substanzen kommen Fettsäuren, pflanzliche Öle, Mineralöle, Fette, Harze, synthetische Weichmacher vom Ester- oder Äthertyp in Frage.

Letztlich werden Trennmittel verwendet, die das Herauslösen der Lager aus den Vulkanisationsformen erleichtern. Vielfach werden Silicone verwendet. Im oberflächennahen Bereich werden Teile der Trennmittel während der Vulkanisation unter hohem Druck und hoher Temperatur eingelagert.

3.2 Werkstoffverhalten von Elastomeren unter hoher mechanischer Beanspruchung

Elastomere Werkstoffe bestehen aus weitmaschig vernetzten Molekülketten. Äußere Verformungen des Lagerkissens bewirken Relativbewegungen der Ketten und mechanische Beanspruchungen der Vernetzungsstellen. Innerhalb bestimmter Dehnungen weisen Elastomere viskoelastisches, d. h. zeitabhängig reversibles, Verhalten auf, bei Entlastung gleiten die Ketten in den Ursprungszustand zurück /16, 17/. Dagegen führen hohe mechanische Beanspruchungen zu chemorheologischen Effekten wie /18/

- irreversible Umstrukturierung der Moleküle
- Bruch von Polymerketten oder Vernetzungsstellen
- Mikrohohlraumbildung als Folge von Molekülkettengleiten oder
- Mikrohohlraumbruch
- Ablösen der Polymermatrix von den Füllstoffpartikeln.

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

- tritt eine Beschleunigung des Kriechens auf
- treten irreversible Deformationen des Lagerkörpers auf (im Gegensatz zu den elastisch-verzögerten Verformungen bei mäßig beanspruchten Elastomeren)
- wird die Reißspannung herabgesetzt.

Elastomere weisen infolge der dreidimensionalen Vernetzung zwischen den Molekülen kein ausgeprägt plastisches Verhalten auf /15/. "Fließen" kann nur durch chemische oder physikalische Veränderungen in der Polymerstruktur, z. B. infolge von Umlagerungen oder Lösen von Vernetzungsstellen, Zersetzen oder Alterung, eintreten. Materialeigenschaften wie Festigkeit und Volumenkonstanz infolge mechanischer Beanspruchung werden wesentlich von der Vernetzungsstruktur bestimmt, wobei neben der Anzahl der Vernetzungspunkte je Volumenelement auch die chemische Struktur der Vernetzung von Bedeutung sind. Beide sind werkstoffspezifisch.

Veränderungen in der chemischen oder physikalischen Struktur äußern sich u. a. in der Abnahme der Bruchspannung, in irreversiblen Deformationen oder in der Beschleunigung des Kriechens. Solche Veränderungen sind zeitabhängig und können in der Regel im Kurzzeitversuch auch unter verschärften Versuchsbedingungen nicht beobachtet werden.

3.3 Kenntnisstand über das Kriechverhalten

3.3.1 Dauerstandfestigkeit

Die Dauerstandfestigkeit wird durch Dauerstandversuche unter konstanter Beanspruchung ermittelt, wobei beanspruchungsabhängig (in der Regel von der Pressung) der Zeitpunkt von Versagensvorgängen (z. B. Bruch), oder das schadfreie Dauerverhalten, beobachtet wird. Gegenüber der Kurzzeitfestigkeit nimmt die Dauerstandfestigkeit unter konstant hohen Dauerbeanspruchungen vorrangig infolge von Kriechvorgängen ab.

Bei Kunststoffen nimmt allgemein die Festigkeit im doppelt-logarithmischen Maßstab über die Zeit linear ab, und eine eindeutige Dauerstandfestigkeit kann in der Regel aus solchen Versuchen nicht definiert werden /19/. Bei Kunststoffen werden Dauerstandfestigkeitskurven vielfach anhand ausreichender Praxiserfahrung extrapoliert, sie dienen dann vorrangig als Bewertungskriterium zur Werkstoffauswahl. Als Beurteilungsmaßstab wird vielfach das Verhalten nach 1000stündiger Belastung (rd. 1,4 Monate) herangezogen. Für die Verwendung z. B. im Maschinenbau scheint dieser Beurteilungszeitraum ausreichend, im Bauwesen müssen allerdings für tragende Bauteile verlässliche Angaben über die Standsicherheit nach 10 a bis 100 a erfolgen. Bei mäßigen Pressungen bis zu rd. 20 N/mm² wurden in der Praxis allerdings ausreichende Lebensdauern für unbewehrte Elastomerlager spezifischer Herstellerqualitäten (meist vom Elastomertyp CR, vgl. Abschn. 3.1) beobachtet. Solche Lager befinden sich seit über 25 a schadensfrei im Einsatz.

Aufgrund des hohen Zeitaufwandes bei Dauerstandversuchen wird prüftechnisch der Versuch unternommen, durch erhöhte Beanspruchungen einen zeitraffenden Effekt zu erzielen. Bei den meisten Kunststoffen kann ein Teil des Zeiteinflusses durch erhöhte Temperaturen oder Pressungen kompensiert werden.

3.3.2 Kriechverhalten

3.3.2.1 Allgemeines

Während der horizontalen Lagerausbreitung im Spalt infolge vertikaler Belastung erfolgt eine Überlagerung von spontan-elastischen Zug-, Druck- und Schubverformungen mit Kriech- und Fließanteilen /20/. Unter Fließen wird hierbei, 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 Gleichgewichtszustandes ergibt. Unter mäßigen Beanspruchungen wird im allgemeinen die Reißdehnung des Elastomeren nicht erreicht. Allerdings kann bei erhöhter Beanspruchung der Reibungsschluß schubweise überwunden werden. Dieser "stick-slip-Vorgang" wurde mit der Überlagerung von Fließverformungen aus der Vertikalbelastung und den verformungsbedingten Horizontallasten erklärt /20/.

Über der logarithmischen Zeitachse zeigt die Kriechfunktion unbewehrter Elastomerlager zunächst einen linearen, und nach bestimmter Blastungsdauer einen progressiven Verlauf /21/. Der Anstieg der Kriechgeschwindigkeit (Übergang vom linearen zum progressiven Verlauf) wird in der Literatur mit "pre rupture" erläutert, da davon ausgegangen wird, daß strukturelle Schädigungen des Elastomeren den Prozeß einleiten. WOOD /21/ stellte den Zeitpunkt des "pre rupture" bei eigenen Versuchen nach rd. 30 d fest, berichtete aber auch über vergleichbare Ergebnisse anderer Forscher, die den Kriechanstieg nach Belastungsdauern zwischen rd. 120 d und rd. 240 d registrierten. Angaben über den Elastomertyp und dessen physikalische Eigenschaften sowie über die Formfaktoren und die Pressungen werden an dieser Stelle jedoch nicht gegeben. Es kann vermutet werden, daß die in den USA gebräuchlichen Elastomertypen Chloropren-Kautschuk (CR) oder Naturkautschuk (NR) bei mäßigen Beanspruchungen untersucht wurden.

Folgende Einfüsse auf das Kriechverhalten sind u. a. aus den Literaturangaben quantifizierbar. Die Kriechneigung

- wird vom Elastomertyp und der Herstellung sowie der Mischungszusammensetzung beinflußt
- steigt mit zunehmender Härte
- sinkt mit zunehmendem Vulkanisationsgrad
- steigt zunächst mit zunehmender Verformung, nimmt aber oberhalb bestimmter Verformungen wieder ab
- steigt mit zunehmender Temperatur
- sinkt bei mäßigen Beanspruchungen mit der Verformungsdauer
- steigt bei dynamischen (pulsierenden) und alternierenden Verformungen.

Insbesondere wird angemerkt, daß bei der Überlagerung von vertikalen Lasten mit alternierenden horizontalen Schubverformungen oder Auflagerdrehwinkeln die Kriechneigung progressiv zunimmt.

3.3.2.2 Kurzzeitversuche

In der Literatur werden vorwiegend Kriechversuche an Elastomeren mit Belastungsdauern von nur wenigen Stunden oder Tagen dokumentiert. Die vorrangig für Anwendungen gering beanspruchter Elastomere im Maschinenbau anzuwendende DIN 53 547 02.81, Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung des Kriechens von Elastomeren bei Druckbeanspruchung /22/, fordert lediglich Beanspruchungsdauern, je nach Anwendungsfall, unter Wärmealterung zwischen 1 d und 7 d.

Für Anwendungen im Bauwesen sind nur wenige Langzeit-Kriechversuche bekannt. So wurden z. B. an unbewehrten Elastomerlagern höherer Härte (70 Shore A) mit Lagergrundflächen von 200 x 200 mm² und Lagerdicken zwischen 10 mm und 40 mm (Formfaktoren S zwischen 1,25 und 5) unter mittleren zentrischen Pressungen von 10 N/mm² nach einer Beanspruchungsdauer von rd. 38 d Kriechmaße zwischen $\varphi = 0,05$ bis $\varphi = 0,12$, bezogen auf die spontan-elastische und verzögert-elastische Verformung nach 30 Minuten ermittelt /23/.

Neuere Untersuchungen an normgerechten /24/ CR-Lagern (60 Shore A) mit Formfaktoren S zwischen 2,5 und 5 unter zentrischen Pressungen von 10 N/mm² und einem Lagerdrehwinkel $\text{tg } \alpha = 0,03$, ergeben nach einer Belastungsdauer von nur 0,33 d (8 h) vergleichbare Kriechmaße zwischen $\varphi = 0,04$ und $\varphi = 0,16$ /24/. Die Kriechverformung wird hier auf die Anfangsverformung nach einer Belastungsdauer von 5 Minuten bezogen.

Dieser Bezugszeitpunkt wird vielfach in der Literatur für die Analyse von Kriechverformungen herangezogen /25/ (in /22/ wird der Bezugszeitpunkt mit 10 Minuten definiert, hier wirken aber vergleichsweise niedrige Pressungen und die Anfangsverformung ist unbedeutend). Aufgrund der sehr hohen Anfangsverformungen unmittelbar nach der Lastaufbringung (auch bei mäßigen Pressungen geometrieabhängig bis zu rd. 20 % der Lagerdicke im unbelaste-

ten Zustand, bei Pressungen von 20 N/mm^2 allerdings schon bis zu 50 %) scheint es baupraktisch sinnvoll, die verzögert-elastischen Anteile nach 5 Minuten mit den Vorgängen zur Stabilisierung des Reibungsschlusses zu den beginnenden Kriechverformungen zusammenzufassen.

Aus den zugänglichen Veröffentlichungen kann für unbewehrte Elastomerlager mit den normgerechten Einschränkungen der Lagerdicke (vgl. Abschn. 2.4.2) und der Pressungen (vgl. Abschn. 2.4.3) mit einem Kriechmaß $\varphi < 0,1$ gerechnet werden.

In /23/ wird eine weitgehende Unabhängigkeit der Versuchsergebnisse von der Kontaktflächenrauheit (polierter Stahl, Sandpapier, Beton) und von der Lagergeometrie (Formfaktor) festgestellt. Den Untersuchungen liegt jedoch ein Elastomer höherer Härte zugrunde, und die niedrige Pressung (10 N/mm^2) führt hier zu vergleichsweise geringen Lagerverformungen. Nach einer Belastungszeit von 30 Minuten (Bezugszeitpunkt für elastische Verformung) werden 90 % der Endverformung (bezogen auf rd. 38 d) erreicht.

3.3.2.3 Langzeitversuche

Nach einer Belastungsdauer von rd. 10 a wurden bei der Firma Du Pont (USA) an CR-Lagern Kriechzahlen zwischen

$\varphi = 0,25$ - 50 Shore A

$\varphi = 0,45$ - 70 Shore A

ermittelt /26/. In /27/ wird aus Versuchen nach rd. 19 a ein Kriechmaß $\varphi = 0,27$ angegeben. Angaben über die den Versuchsergebnissen zugrundeliegenden Versuchsparameter mittlere Pressung, Formfaktor und physikalische Elastomereigenschaften, wurden von beiden Autoren nicht dokumentiert.

3.4 Elastizitätstheoretische Spannungszustände

Die Werkstoffkenngrößen von Elastomeren hängen u. a. von der

- Zeit
- Verformung und deren Geschwindigkeit
- Superposition der Verformungen

- Belastungs- und Verformungsgenese
- Temperatur

ab, und folgen in der Regel nichtlinearen Gesetzmäßigkeiten. Dennoch wurde von TOPALOFF /12/ eine geschlossene Theorie entwickelt, die weitgehend diese Einflüsse unberücksichtigt läßt. Innerhalb bestimmter Grenzen sind versuchstechnisch ermittelte Kennwerte anhand dieser Theorie verifizierbar, und für die vereinfachende Spannungsermittlung wurde das Rechenverfahren in das Normenwerk der DIN 4141 aufgenommen (Ermittlung der Randschubspannungen für den Dauerschwellversuch an bewehrten Elastomerlagern gemäß Teil 140 /28/).

In /29, 30/ wurden Rechenansätze und -methoden zur Verifikation experimentell ermittelter Verformungszustände entwickelt. Die nichtlineare zweidimensionale Verformungstheorie geht von speziellen Randbedingungen, wie die Lagergeometrie (Formfaktor), Kriterien für das lokale Überwinden des Reibungsschlusses in den Kontaktflächen (Fließen) und spezifischen Materialkennwerten aus Zugversuchen ohne Berücksichtigung der Langzeitverformungen (Kriechen, Relaxation) aus. Eine Parameterstudie zur Eingrenzung baupraktischer Randbedingungen (z. B. Regellager, vgl. Abschn. 2.4.3) sowie eine Erweiterung auf dreidimensionale Rechnung erfolgte nicht, und für bauübliche Lagerabmessungen und Lagerungsbedingungen wurde aus den theoretischen Arbeiten kein baupraktisches Rechenverfahren abgeleitet.

Aufgrund der komplexen Werkstoffeigenschaften und der fehlenden Rechenverfahren wurden in der Normenreihe DIN 4141 die Bemessungsregeln für Elastomerlager auf ein Minimum reduziert /2, 3/.

4 UNTERSUCHUNGEN ZUM DAUERSTANDVERHALTEN

4.1 Festlegung des Rahmenplanes

4.1.1 Übersicht

Für die baupraktisch orientierte Fragestellung der Eignung und der zulässigen Beanspruchungen von CR- und EPDM-Elastomerqualitäten unter hohen Beanspruchungen wurden an allen derzeit auf dem deutschen Markt befindlichen, normgerechten oder bauaufsichtlich zugelassenen Elastomerqualitäten für unbewehrte Elastomerlager Dauerstandversuche durchgeführt.

Aufgrund der Marktübersicht und unter Berücksichtigung baupraktischer Rahmenbedingungen sowie aus der Literatur gewonnener grundlagenorientierter, werkstoffspezifischer Hinweise zum Dauerstandverhalten der Elastomere wurden

- 2 Elastomertypen (EPDM - CR)
- 4 Hersteller
- 10 Elastomerqualitäten (6 EPDM, 4 CR)
- 3 Lagerflächen ($A = 100 \times 100 / 100 \times 200 / 200 \times 200 \text{ mm}^2$)
- 2 Lagerdicken ($t = 5 / 10 \text{ mm}$)
- 2 Auflagerdrehwinkel ($\alpha = 0 / 0,3 \text{ t/a}$)
- 4 Pressungsstufen ($\alpha_m = 20 / 40 / 60 / 100 \text{ N/mm}^2$)
- 2 bauliche Durchbildungen (kompakt, profiliert)

berücksichtigt. Alle Versuche erfolgten bei Raumtemperatur. Der nachfolgende Rahmenplan (Tabelle 4.1) vermittelt eine Übersicht über die Versuchsparameter.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Faktorkombinationen (nicht vollständiger Faktorversuch)

Elastomertyp	EPDM						CR			
Elastomerqualität	EPDM						CR			
	1	2	3	3.1	3.2	4	1	2	2.1	4
Lagerfläche A mm^2	100 - 100			100 - 200			200 - 200			
Lagerdicke t mm	5						10			
Drehwinkel α	0						0.3 t/a			
mittlere Pressung N/mm^2	20		40				60		100	

4.1.2 Elastomertypen und Elastomerqualitäten

Alle verwendeten Elastomerqualitäten

- besaßen eine bauaufsichtliche Zulassung des Institutes für Bautechnik, Berlin (IfBt)
- unterlagen einer Eigen- und Fremdüberwachung gemäß der Richtlinie für die Herstellung und Verwendung von unbewehrten Elastomer-Lagern des IfBt /5/ bzw. der entsprechenden Norm /3/
- verfügten über ausreichende Materialkennwerte zur Erfüllung der Anforderungen gemäß /5/ bzw. /3/.

Die Elastomerqualität CR 2.1 zeichnete sich gegenüber allen anderen Qualitäten (60 Shore A) durch eine höhere Härte von 70 Shore A aus.

Die bauliche Durchbildung der Lagerquerschnitte ist in Bild 4.1 dargestellt. Vorzugsweise wurden kompakte, quaderförmige Lagerkörper verwendet.


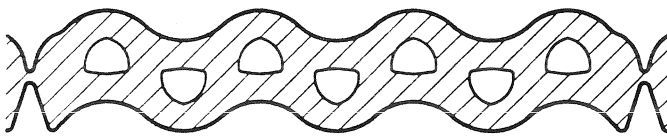
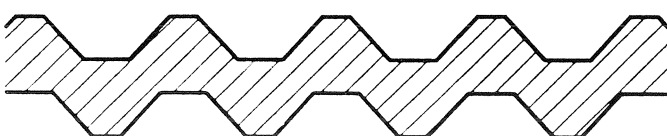
Bauliche Durchbildung	Elastomertyp ¹⁾
	EPDM 1,2,3,3.1
	CR 1,2,2.1
	EPDM 3.2
	EPDM 4
	CR 4

Bild 4.1: Bauliche Durchbildung der verwendeten Elastomerlager

Die EPDM 3.2-Qualität wies eine wellenförmige Oberflächenprofilierung mit inneren Querschnittsöffnungen auf (Bild 4.1). Dagegen wiesen die Qualitäten EPDM 4 und CR 4 trapezförmige Profilierungen mit ansonst geschlossenem Lagerquerschnitt auf. Gegenüber den kompakten Lagerkörpern weisen die profilierten Lager einen verminderten Elastomeranteil, bezogen auf die Lagerdicke t im unbelasteten Zustand, auf. Aus diesem Grund darf gemäß der entsprechenden Zulassungen zur Bemessung solcher Lager die Lagerdicke nur mit $0,7 t$ angerechnet werden.

4.1.3 Kontaktflächen

Die interaktive, für die spezielle baupraktische Fragestellung relevante Wechselwirkung zwischen Lagerverformungen (Fließen) und Reibungsschluß wurde durch die Anordnung von Betondruckflächen berücksichtigt. Zur Simulation von Betonoberflächenverhältnissen, wie sie im Fertigteilebau üblich sind, wurden nach umfangreichen Vorversuchen Feinbetonscheiben mit einem Zuschlag der Regelsieblinie B 8 gemäß DIN 1045 konzipiert. Unter Verwendung eines Zementes PZ 45 F gemäß DIN 1164 und einem Wasser/Zementwert von 0,50 war eine für Fertigteile geläufige Betonfestigkeit von 45 N/mm^2 gemäß DIN 1045 zu gewährleisten. Nach Erreichen der 7-d-Festigkeit wurden die glatt geschalteten Oberflächen von unerwünschten Oberflächenbelegungen (z. B. Schalöl /6/) und Zementschlempe durch Hochdruckwasserstrahlen gereinigt. Herstellungseinflüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit, wie die Rauigkeit, Lunker und anteilige Oberflächenbelegung mit gröberen Zuschlagskörnern, waren nicht vermeidbar. Dennoch wurde aufgrund der für die Untersuchungen wichtigen Reibungs- und Verzahnungseffekte diesem praxisnahen Kontaktflächentyp gegenüber profilierten Stahlplatten der Vorzug gegeben. Dem erwartbar größeren Steubereich der Untersuchungsergebnisse aufgrund der differierenden Kontaktflächenverhältnisse stehen erheblich höhere innere, mechanische Beanspruchungen des Elastomeren unter Dauerlast gegenüber (vgl. Abschn. 3.2).

Zur Minimierung der Betonverformungen, zur Erhöhung der Steifigkeit, und zur Vermeidung von Rissen (infolge der Querzugspannungen und des Durchstanzens), wurden als Schalungselemente steife Stahlrahmen verwendet, die später während der Versuche als Bewehrung der Kontaktplatten dienten.

Der Abstand zwischen dem Lagerrand und dem Kontaktflächenrand betrug im unbelasteten Zustand der Elastomerlager rd. 20 mm. Die Dicke der Kontaktplatten betrug rd. 50 mm. Für Versuche mit exzentrischer Lasteinleitung (Auflagerdrehwinkel) wurden Kontaktplatten mit entsprechend geneigter Druckfläche verwendet. Die zulässige Summe der Verdrehungsanteile beträgt gemäß DIN 4141 Teil 15 /2/ 0,5 t/a (vgl. Abschn. 2.2.1.3.3). Unter Beachtung der Abweichungen aus Schiefwinkeligkeit und Ebenheit (vgl. Abschn. 2.2.2) reduziert sich der planmäßige, maximale Auflagerdrehwinkel auf etwa 0,3 t/a (Tabelle 4.1).

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Allgemeines

Für die Durchführung der Dauerstandversuche war die Konzeption neuer Dauerkriechstände erforderlich. Vorhandene, konventionelle Versuchseinrichtungen für Beton, Mauerwerk oder Kunststoffe, mit z. B. Totlasten oder einfachen Hydraulikeinheiten, waren wegen ihrer Geometrie- und Lasteinschränkungen nicht tauglich. So ergeben sich für die größte angestrebte Lagerfläche von 200 x 200 mm² (vgl. Tabelle 4.1) eine Kontaktdruckfläche von rd. 240 x 240 mm² und bei einer mittleren Pressung von 60 N/mm² eine erforderliche Dauerlast von 2,4 MN. Zudem waren exzentrische Belastungsverhältnisse zu realisieren.

4.2.2 Versuchseinrichtung

4.2.2.1 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurden 6 viersäulige Lastrahmen konzipiert. Je zwei Rahmen wurden entsprechend der statischen Berechnung für eine maximale Last der Druckzylinder von 0,5 / 1,0 / 2,0 MN ausgelegt (Bild 4.6). Zur Vermeidung von Durchbiegeverformungen waren die Querhäupter (äußere Druckplatten) besonders steif auszulegen, sie besaßen eine Dicke (beanspruchungsabhängig) zwischen 80 mm und 130 mm.

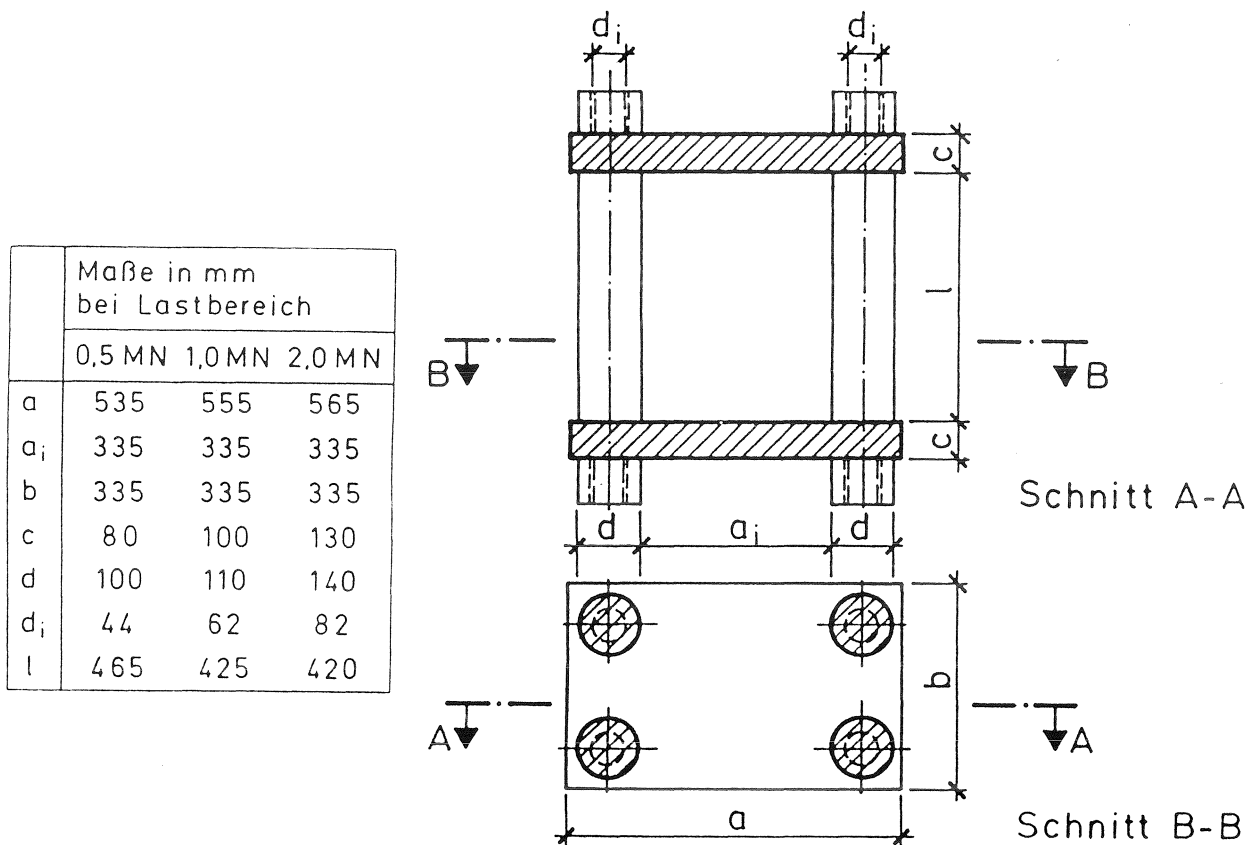


Bild 4.2: Prinzipdarstellung der Lastrahmen für Dauerkriechversuche (Maßangaben in mm)

Für Versuche mit einer Maximallast von 2,4 MN wurde eine Druckprüfmaschine, LOS 5,0 MN, durch Festlegung der oberen Kalotte und Zwischenschaltung eines Absperrventiles in der Druckförderleitung entsprechend umgerüstet.

Zur Regelung der Druckspannung (innerhalb labortechnisch begrenzter Zeitabstände) wurden Gasdruckspeicher im Hydrauliksystem (auch bei der Druckprüfmaschine) über Dreiwegeventile steuerbar zwischengeschaltet. Die Stickstoffspeicher (Volumen 0,5 l) besaßen einen Druck von rd. 300 bar, und waren über ein Manometer der Genauigkeitsklasse 0,6 kontrollierbar.

Die Lagerproben wurden im Lastrahmen zwischen den Kontaktplatten und dem Druckkolben im zweiseitigen Versuchsaufbau (zwei Prüfebene) angeordnet. In der Regel wurden je Versuch eine Elastomerqualität mit zwei Lager-

dicken ($t = 5/10 \text{ mm}$) geprüft. Bei exzentrischer Lasteinleitung (Verdrehung) wurden zur Erzielung annähernd zentrischer Beanspruchungen der Hydraulikzylinder zwei Lagerproben je Prüfebene mit spiegelsymmetrischem Gefälle der Kontaktplatten angeordnet (Bild 4.3).

Beanspruchung der Proben

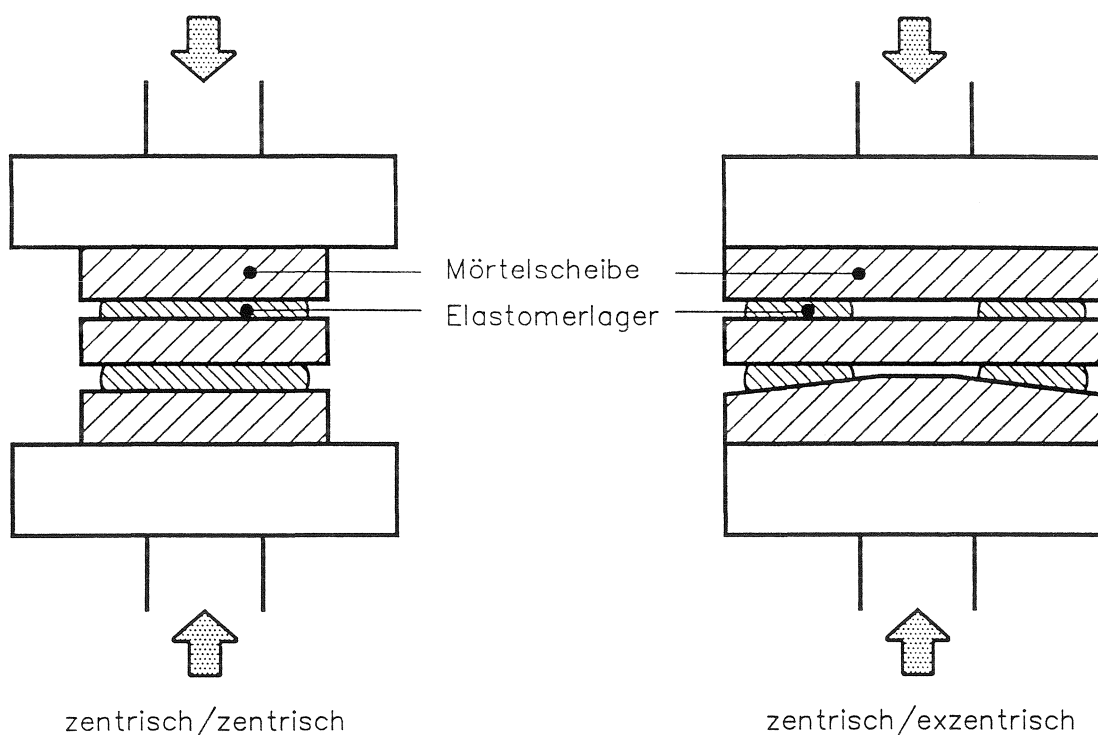


Bild 4.3: Anordnung der Lagerproben im Dauerstand, Prinzipdarstellung

4.2.2.2 Belastungsvorgang

Vor Versuchsbeginn wurde die Druckmeßeinrichtung kalibriert und die entsprechenden Arbeitsdrücke der Hydraulikzylinder und der Stickstoffspeicher wurden festgelegt.

Nach dem zentrischen Einjustieren der Versuchsaufbauten (Lagerproben und Kontaktplatten) wurde eine Vorlast (3 bar des Stickstoffspeichers, bei der Druckprüfmaschine 10 % der Sollast) zur Nullablesung der Meßuhren aufgebracht. Anschließend wurde die vorgesehene Kolbenlast handgeregelt und stoßfrei mittels einer Pumpe innerhalb von 2 Minuten aufgebracht. Nachfolgend wurde der Stickstoffspeicher erneut zugeschaltet. Infolge der raschen Anfangsverformung mußte in der Regel innerhalb der ersten 30 Belastungsmi-
nuten der Stickstoffspeicher mehrfach nachgeregelt und der Hydraulikzylinder nachgefahren werden. Bei der Druckprüfmaschine lief die maschinelle Ölförderung bis rd. 30 Minuten nach dem Belastungsbeginn, danach wurde auch hier der Stickstoffspeicher aktiviert.

Im Verlauf der Langzeitversuche wurde der Druck innerhalb der

- 1. Belastungsstunde permanent
- zwischen der 1. und 3. Belastungsstunde alle 10 Minuten
- zwischen der 3. und 8. Belastungsstunde stündlich
- in der ersten Belastungswoche täglich
- in den ersten drei Belastungsmonaten wöchentlich
- danach im logarithmischen Zeitmaßstab in äquidistanten Abständen

überprüft und erforderlichenfalls nachgeregelt.

4.2.2.3 Meßwarterfassung

Die Dehnung (Stauchung, Einfederung) der Lagerproben wurde je Prüfebene (vgl. Bild 4.3) mittels zwei diagonal angeordneter Meßuhren (Genauigkeit $\pm 0,01$ mm) registriert, aus beiden Meßwerten wurde das arithmetische Mittel gebildet.

Der Ablesungsturnus der Meßuhren erfolgte nach jeder der in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebenen Kontrollen des Prüfdruckes. Bei zuvor erforderlichem Nachregeln des Prüfdruckes erfolgte die Ablesung der Meßuhren rd. 10 Minuten nach Beendigung des Nachpumpvorganges.

4.2.2.4 Versuchsdauer

Bei erkennbarer

- starker Schädigung des Lagers durch visuelle Kontrollen im Lagerspalt
- progressiver Kriechgeschwindigkeitszunahme der Kriechkurve

wurde der Versuch abgebrochen und der Dauerstand mit einer anderen Faktorkombination belegt. Die Belastungsdauer betrug, abhängig von den zuvor genannten Kriterien, zwischen rd. 25 d und 1100 d (3 a).

4.2.2.5 Versuchsumfang

Unter Berücksichtigung des zeitlichen und finanziellen Aufwandes wurde ein nicht vollständiger Faktorplan mit ausgewählten Parameterkombinationen realisiert (480 mögliche Faktorkombinationen). Untersucht wurden 48 Faktorkombinationen. Tabelle 4.2 vermittelt eine Übersicht über den Versuchsumfang.

4.3 Auswertekriterien und -verfahren

4.3.1 Übersicht

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 formulierten Zusammenhänge zwischen dem Dauerstandverhalten und chemorheologischen Vorgängen bei Elastomerlagern erscheinen

- der rechnerische Spannungszustand der Elastomerlager
- das Maß der elastischen Anfangsverformung
- die Kriechfunktion (zeitabhängige Kriechverformung, Kriechmaß)
- das extrapolierte Endkriechmaß
- der Schädigungsgrad

als Beurteilungskriterien für das Dauerstandverhalten von besonderer Bedeutung.

Tabelle 4.2: Übersicht über den Versuchsumfang

Elastomer- typ	Lager- fläche	Lager- dicke	Dreh- winkel	Versuch Nr.			
				mittlere Pressung N/mm ²			
				20	40	60	100
EPDM 1	100 · 100	5	0	■	■	■	■
			0.3	■	■		
		10	0	■		■	■
			0.3	■			
	100 · 200	5	0			■	
			0.3				
		10	0			■	
			0.3				
	200 · 200	5	0	■	■		
			0.3	■			
		10	0		■		
			0.3				
EPDM 2	100 · 100	5		■	■		
10			■	■			
EPDM 3		5		■	■		
10		0		■	■		
EPDM 3.1		5			■		
10					■		
EPDM 3.2		10			■		
EPDM 4		10		■		■	
CR 1	100 · 100	5	0	■	■		■
			0.3		■		
		10	0	■			■
			0.3				
	100 · 200	5	0			■	
			0.3				
		10	0			■	
			0.3				
	200 · 200	5	0		■		
			0.3				
		10	0		■		
			0.3				
CR 2	100 · 100	5			■		
		10			■		
		CR 2.1	10	■	■		
		CR 4	10			■	

4.3.2 Spannungszustand der Elastomerlager

4.3.2.1 Rechnerische maximale Randschubspannungen

Zur rechnerischen Spannungsermittlung wurde das Verfahren nach TOPALOFF /12/ verwendet (vgl. Abschn. 3.4). Die maximale mechanische Lagerbeanspruchung wurde als Summe der maximalen rechnerischen Randschubspannungen, die nach diesem Verfahren von

- der mittleren Pressung
- dem Formfaktor
- dem Drehwinkel
- dem Schubverformungswinkel

abhängen, ermittelt. Sie beträgt für Rechtecklager mit einem Seitenverhältnis $b/a > 1$

infolge der Normalspannung:

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

infolge einer Verdrehung:

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

mit:

t = Lagerdicke im unbelasteten Zustand

a = kürzere Lagerseite

η = Einflußfaktor nach /12/

α = Drehwinkel

G = Schubmodul (Rechenwert = 1 N/mm²)

Bei exzentrischer Lasteinleitung (Verdrehung) werden die zugehörigen Anteile der maximalen Schubspannungen aus beiden Lastfällen superponiert. Für die zugrundeliegenden Parameter (vgl. Tabelle 4.2) ergibt sich danach ein Spektrum der rechnerischen maximalen Schubspannungen zwischen:

$$\max \tau = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

mit:

$$A = 200 \times 200 \text{ mm}^2$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 0$$

und

$$\max \tau = 28,8 \text{ N/mm}^2$$

mit:

$$A = 100 \times 100 \text{ mm}^2$$

$$t = 10 \text{ mm}$$

$$\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 0.$$

Bei Gewaltversuchen mit einer mittleren Pressung von 100 N/mm^2 werden maximale rechnerische Schubspannungen von $\max \tau = 48,4 \text{ N/mm}^2$ erreicht.

4.3.2.2 Zulässige Randschubspannungen norm- bzw. zulassungsgerechter Regellager

Für die baupraktische Beurteilung der bei den hier beschriebenen Untersuchungen zugrundeliegenden Beanspruchungen unter höheren Pressungen sind die maximalen Schubspannungen infolge der zulässigen Beanspruchungen der im bauaufsichtlichen Bereich geregelten Elastomerlager (Zulassungen, Norm) von Interesse.

Abhängig von bestimmten Geometrie einschränkungen werden in DIN 4141 Teil 15 /2/ sogenannte Regellager zusammengefaßt (s. Tabelle 4.1). Abweichend von der Norm /2/ wurden in den Zulassungen die zulässigen, mittleren Pressungen (vgl. Abschn. 2.2.1.3.1) auf $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ begrenzt. Desgleichen wurden erheblich geringere Verdrehungen (vgl. Abschn. 2.2.1.3.3) zul. $\alpha = 0,2 \text{ t/a}$ für EPDM-Lager zugelassen. Für die Regellager (Tabelle 4.1) ergibt sich die in Bild 4.4 dargestellte Zuordnung der maximalen Schubspannungen in Abhängigkeit vom Formfaktor.

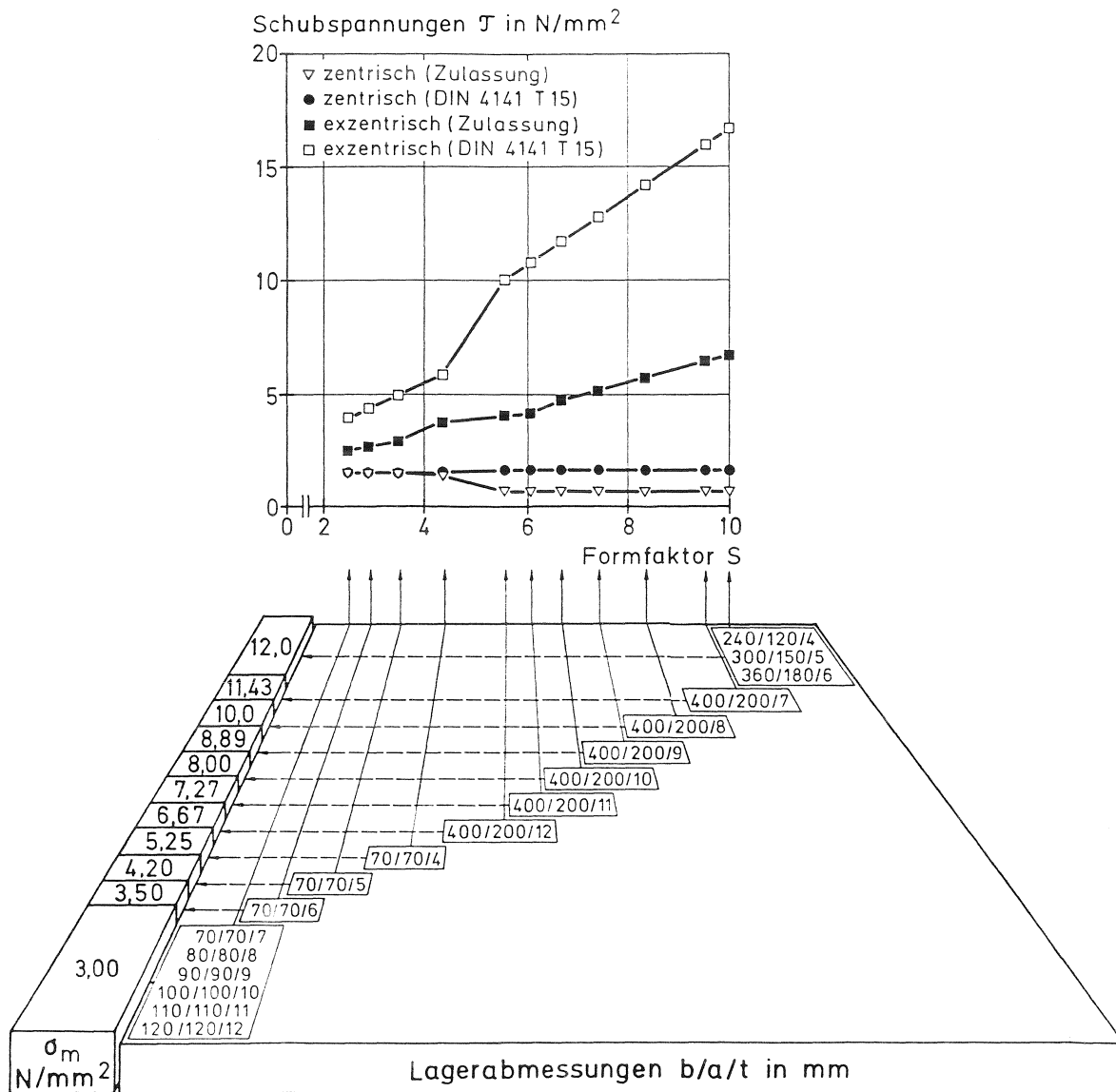


Bild 4.4: Maximale rechnerische Schubspannungen für die zulässigen Beanspruchungen gemäß der Zulassungen und der DIN 4141 Teil 15

Laut einer Umfrage der Fertigteilmindustrie /10/ variiert der Formfaktor für praxisrelevante Anwendungen zwischen rd. $S = 4$ und rd. $S = 10$. Die im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Lager besaßen Formfaktoren zwischen $S = 2,5$ und $S = 10$. Der überwiegenden Zahl der Versuche lagen danach rechnerische Schubspannungen zugrunde, wie sie beim Ausschöpfen der zulässigen Beanspruchungen der Norm (hier CR-Lager) oder der Zulassungen (hier EPDM-Lager) erreicht werden.

4.3.3 Kriechzahl und Kriechfunktion

Die kriechbedingte vertikale Lagerverformung (Stauchung) wird auf die Anfangseinfederung ϵ_1 5 Minuten nach dem Belastungsbeginn bezogen; die Anfangseinfederung wird als elastische Dehnung ϵ_{e1} definiert (vgl. Abschn. 3.3.2.2). Eine Differenzierung zwischen elastisch-verzögerter und plastischer Verformung ließ u. a. die Kontaktflächengeometrie nicht zu. Im Bauwesen ist allgemein die Angabe der Kriechzahl φ_k als Verhältnis der Kriechdehnung ϵ_k zur elastischen Dehnung geläufig:

$$\varphi_k = \frac{\epsilon_k}{\epsilon_{e1}} \cdot 100$$

In Anlehnung an DIN 53 547 /22/ (nach dieser Norm ist ϵ_{e1} auf die Stauchung nach 5 Minuten zu beziehen, vgl. Abschn. 3.3.2.2) werden die Meßwerte der zeitabhängigen Stauchung in die Kriechzahl transformiert:

$$\varphi_k = \frac{t_1 - t_k}{t_0 - t_1} \cdot 100 \text{ (in \%)}$$

mit:

t_0 = Lagerdicke im unbelasteten Zustand

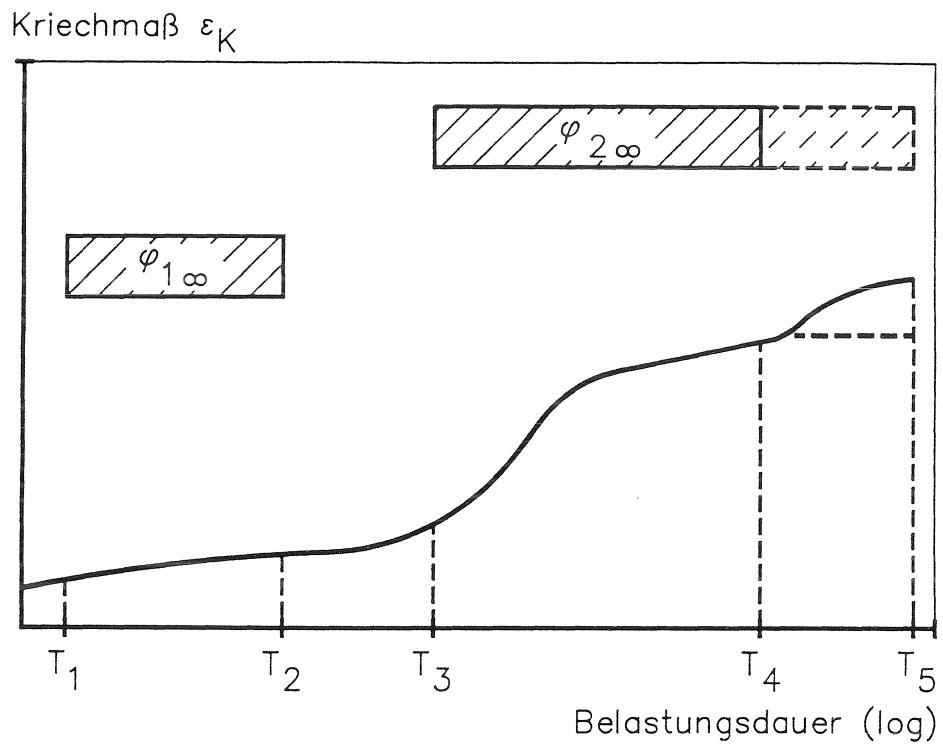
t_1 = Lagerdicke nach einer Belastungszeit von 5 Minuten

t_k = Lagerdicke zum Beanspruchungszeitpunkt.

Eine qualitative Darstellung der Kriechfunktion (zeitabhängige Kriechzahl) wird in Bild 4.5 gegeben.

Das Kriechen wird nach dem Belastungsintervall T_1 (5 Minuten) betrachtet. Innerhalb eines kurzen Zeitintervalls zwischen T_1 (5 Minuten) und T_2 (1 d) kann in der Regel eine vergleichsweise geringe Kriechzahl mit konstanter Kriechgeschwindigkeit erwartet werden.

Nach einem progressiv ansteigenden Zeitintervall (beginnend bei T_3) flacht die Kriechkurve wieder ab, die Kriechgeschwindigkeit ist jedoch größer als am ersten Belastungstag (bis T_1). Vereinzelt kann nach längerer Belastungsdauer (T_4) ein weiterer progressiver Bereich des Kriechens registriert werden (stick-slip-Effekt, vgl. Abschn. 3.3.2.1 /20/). Entsprechend der Kriterien für die Versuchsdauer (vgl. Abschn. 4.2.2.4) leitet die erneute überproportionale Kriechzahl meist Schädigungsprozesse ein, die zum Versuchsabbruch (T_5) führten.




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

Bild 4.5: Qualitative Darstellung der Kriechfunktion (zeitabhängige Kriechzahl)

4.3.4 Extrapolation eines Endkriechmaßes

Eine im Bauwesen geläufige Beschreibung des Kriechverhaltens ist die Extrapolation nach ROSS /31/. In /32/ wird der Nachweis erbracht, daß das Verfahren nach Ross das Kriechverhalten, z. B. von Beton innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls, zutreffend beschreibt. Das einfach handhabbare Verfahren erscheint auch, allerdings mit deutlichen Einschränkungen, für Kunststoffe geeignet /33/. Bei Polymerwerkstoffen nehmen die lastabhängigen Verformungen stetig und bei mäßigen Beanspruchungen immer langsamer zu; ein Ende des Kriechens konnte nicht festgestellt werden. Unter hohen Beanspruchungen stellt sich bei Elastomeren eine mehr oder weniger ausgeprägte Zunahme der Kriechgeschwindigkeit ein, ähnlich wie dies bei anderen Werkstoffen in der Nähe der Zeitstandfestigkeit auch beobachtet wird /19/.

Das Extrapolationsverfahren nach Ross überführt eine hyperbolische Funktion im Bereich ihrer Asymptote durch numerische Umformung in eine Geradengleichung. Die Steigung der Geraden liefert das Endkriechmaß φ_{∞} . Das Verfahren liefert nur dann ein wirkliches Endkriechmaß, wenn die Kriechkurve sich einem Endwert annähert und mindestens 3 Meßpunkte auf der Geraden liegen. Das Ross-Verfahren eignet sich hier lediglich zur qualitativen Beurteilung des Kriechverhaltens, da die zuvor genannten Voraussetzungen nicht gegeben sind (vgl. auch Bild 4.5). In Bild 4.6 ist exemplarisch die Ross-Funktion für ein CR-Lager dargestellt, dessen Kriechkurve keine signifikante Kriechgeschwindigkeitszunahme aufwies. Die Darstellung verdeutlicht, daß innerhalb bestimmter Zeitintervalle die Ermittlung von Endkriechmaßen möglich scheint.

Im Belastungsintervall

$$T_1 < T < T_2$$

(bis 1 d, vgl. Bild 4.5)

kann davon ausgegangen werden, daß noch keine oder nur geringfügige Schädigungsprozesse vorliegen. Das innerhalb dieses Belastungsintervalls ermittelte Endkriechmaß $\varphi_{1\infty}$ erlaubt die qualitative (vergleichende) Beurteilung der Kriechneigung der Elastomerqualitäten untereinander.

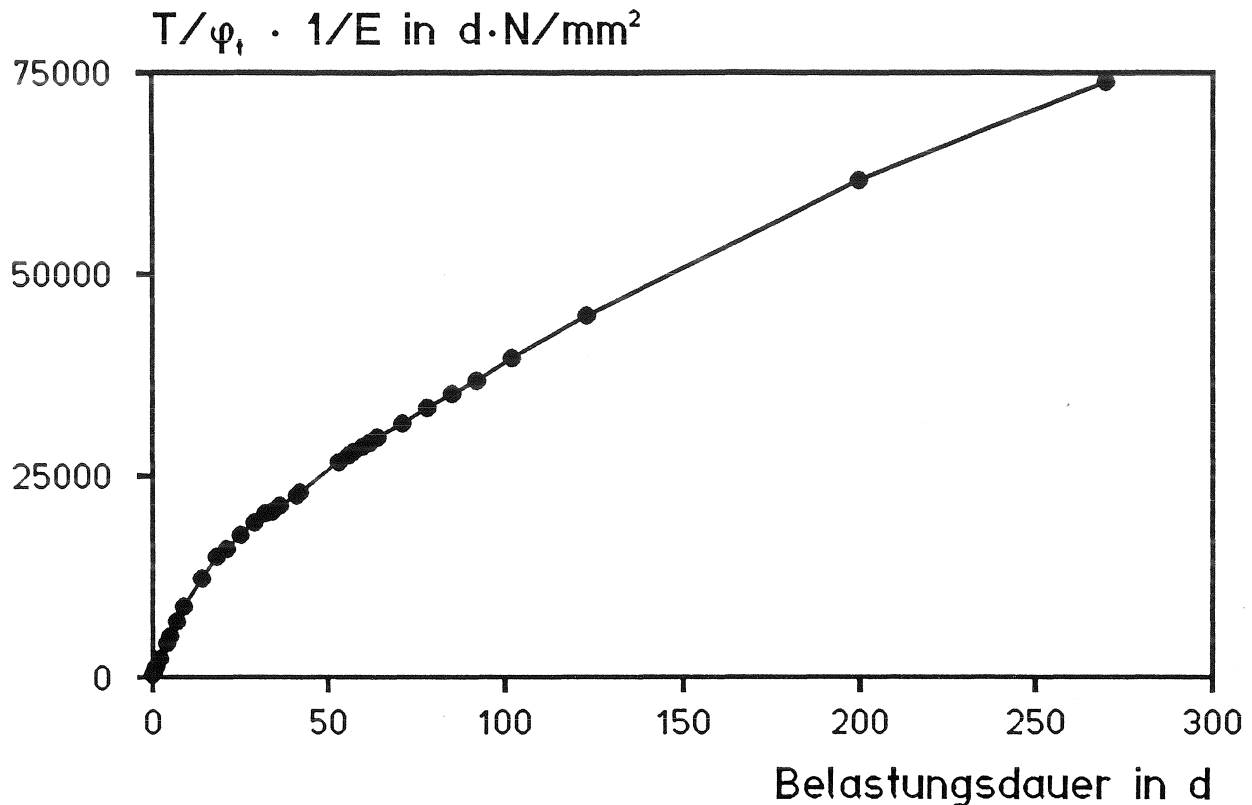


Bild 4.6: Kriechfunktion nach Ross

Zur Beurteilung der Lagerschädigung wird in einem Intervall

$$T_3 < T < T_4 \quad (T_5)$$

(nach beginnendem progressivem Kriechverlauf, vgl. Bild 4.5)

das Endkriechmaß $\varphi_{2\infty}$ ermittelt.

Zur Transformation der Ross-Funktion ist die Kenntnis der Angabe des Elastizitätsmoduls erforderlich. In /12/ wird ein von der Pressung unabhängiger Ansatz zur Ermittlung des E-Moduls gegeben. Aus der Literatur (z. B. /25/) sind jedoch vielfältige Einflüsse auf den E-Modul von druckbeanspruchten Elastomerlagern bekannt, so daß eine eindeutige Angabe für die vorliegenden Geometrien und Belastungen nicht möglich ist. Für die vergleichende Auswertung wird der E-Modul als das Verhältnis der Druckspannung zur Anfangseinfederung definiert. Dies trägt der Vereinbarung Rechnung, rein elastische Verformungsanteile lediglich bis zu einer Belastungsdauer von 5 Minuten zu betrachten (vgl. Abschn. 3.3.2.2). Obwohl der

Anfangseinfederungswert bestimmte nicht-elastische Reaktionen beinhaltet, wird das Endkriechmaß durch diese Vereinfachung nur unwesentlich verfälscht. Die relativen Unterschiede zwischen den Versuchen bleiben erhalten.

4.3.5 Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades

4.3.5.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der eingetretenen Veränderungen an den Lagerkörpern wurden die Proben nach dem Ausbau aus den Versuchsständen visuell bemustert und auf spezifische Schädigungen untersucht.

4.3.5.2 Kriterien

4.3.5.2.1 Oberflächentextur der Grundrißflächen

Infolge der Rauheit der Kontaktflächen (vgl. Abschn. 4.1.3) sowie der Querdehnungsbehinderung weisen die Lagerdruckflächen eine flachmuldige Textur auf, die in den Randbereichen zunehmend schuppigen Oberflächencharakter aufgrund der Lagerausbreitung annimmt. Der prozentuale Flächenanteil beider Druckflächen mit derartigen Oberflächenveränderungen wurde bestimmt.

4.3.5.2.2 Oberflächenzustand der freien Seitenflächen

Die Behinderung der Querdehnung infolge des Reibungsschlusses sowie die Wölbung der seitlichen Flächen führt zu Gratbildungen und Aufreißen, die in meist sichelförmige Risse übergehen. Infolge der Reibung während der Lagerausbreitung stellt sich in den Kantenbereichen eine treppenförmig geschichtete, bisweilen porige Textur ein. Der prozentuale Flächenanteil der derart geschädigten freien Seitenflächen wurde bestimmt.

4.3.5.2.3 Riefenbildung an den Lagerflächen

Der Schlupf in den Randzonen führt zu furchigen Oberflächen und Riefen parallel der Lagerkanten, deren Ausmaß prozentual zu den Seitenabmessungen ermittelt wurde.

4.3.5.2.4 Ablösungen der oberflächennahen Druckflächen

Die Beschädigungen der Seitenflächen und der Randbereiche der Lagerflächen setzen sich parabelförmig über die Grundfläche bis annähernd zur Probenmitte fort, wobei infolge der Verzahnung mit den Kontaktflächen (Reibungsschluß) die oberflächennahen Elastomerschichten erhalten bleiben, und mit zunehmender Zerstörung wird das Probeninnere durch Fließvorgänge angeschert. Die Ablösungsbereiche wurden prozentual zu den Lagerdruckflächen ermittelt.

4.3.5.2.5 Strukturzerstörung

Unter Strukturzerstörung wird hier eine von den Randbereichen ausgehende Auflösung des kompakten Materialzusammenhaltes in schuppige bis granulatförmige Bestandteile verstanden. Diese Gefügezerstörung wurde prozentual zum Lagervolumen quantifiziert.

4.3.5.3 Integraler Schädigungsgrad der Lagerprobe

Aus visuell an den Lagerkörpern beobachteten einzelnen Schädigungsmerkmalen

- Risse
- Änderung der Oberflächentextur
- Ablösen der Randschicht an Lagerdruckflächen
- Strukturzerstörungen

kann ein integraler Schädigungsgrad der einzelnen Lagerprobe gefunden werden. Entsprechend der Wichtigkeit der einzelnen Merkmale für die dauerhafte Lagerfunktion werden die einzelnen Schädigungsmerkmale durch relative

Anteile an der Gesamtschädigung gewichtet (Tabelle 4.3). Das Ausmaß des jeweiligen Schädigungsmerkmals wird entsprechend auf prozentuale Flächen-, Längen- oder Volumenanteile (im unbelasteten Zustand) bezogen.

In Bild 4.7 sind exemplarisch repräsentative Schädigungsstadien dargestellt, die Abfolge vermittelt einen visualisierten Eindruck von den fortschreitenden Schädigungsstadien im Lagerspalt. Den ausgewählten Schädigungsstadien werden integrale Schädigungsgrade der Lager zugeordnet. Die fotografische Darstellung erläutert die Schadensmerkmale Risse, Ablösen der Randschicht und Strukturzerstörung.

Tabelle 4.3: Kriterien und Wichtung zur Ermittlung des integralen Schädigungsgrades eines Lagers

Merkmal	Bezugsgröße		Relativer Anteil an der Gesamt- schädigung
			%
schuppige Oberflächen- textur	Grundrissflächen	I	10
	freie Seitenflächen	II	5
Risse	Grundrissflächen	III	5
	freie Seitenflächen	III	5
Riefen	Grundrissflächen	III	5
Ablösen der Randschicht	Grundrissflächen	I	30
Struktur- zerstörung	Lagerkörper	IV	40
			Summe 100

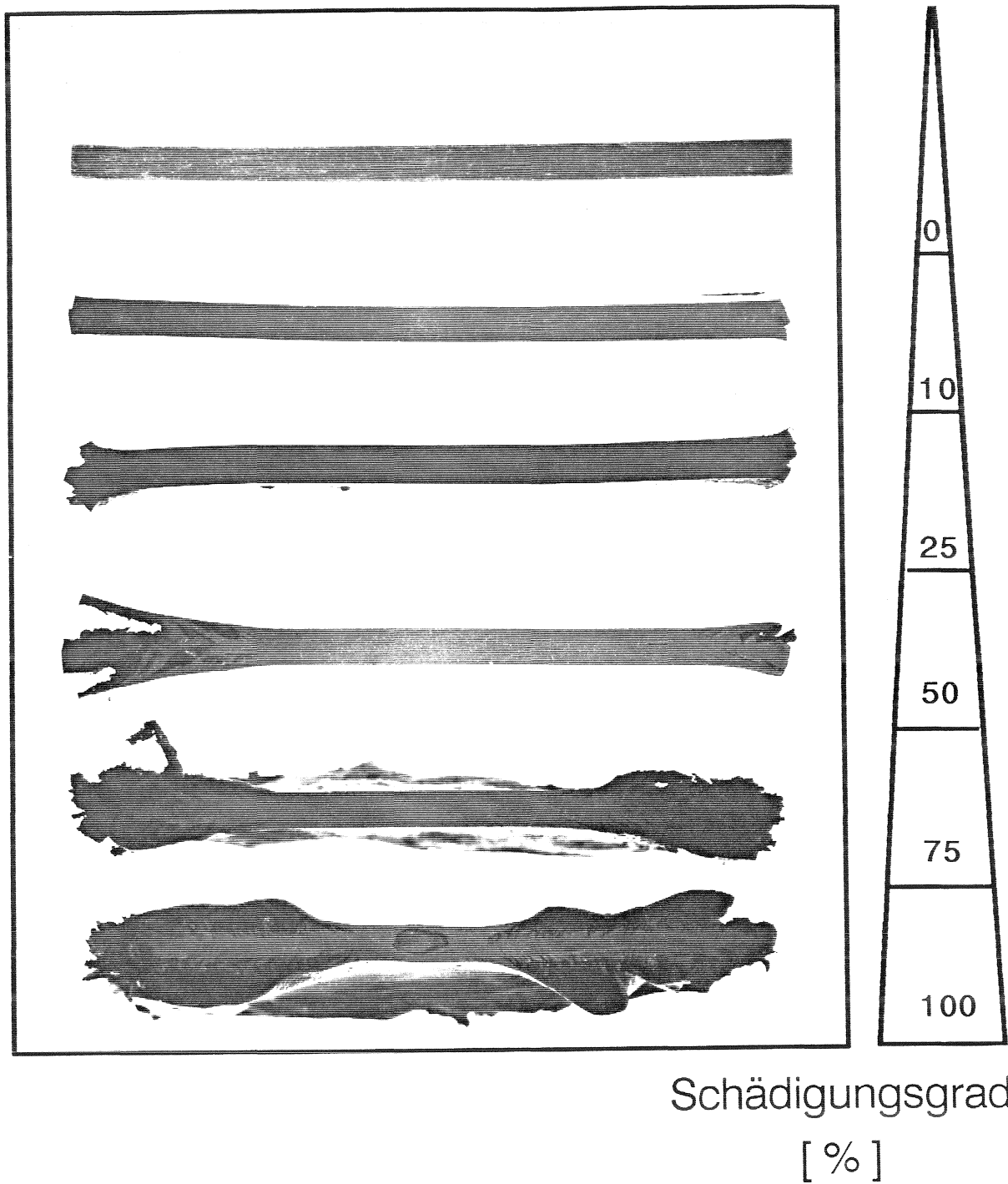


Bild 4.7: Schädigungsstadien an Elastomerlagern und Zuordnung integraler Schädigungsgrade

5 VERSUCHSAUSWERTUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

5.1 Quantitative Beurteilung der Kriechfunktionen

5.1.1 Zielsetzung

Ziel der Auswertung ist die Formulierung quantitativer Abhängigkeiten des Kriechverhaltens von

- dem Elastomertyp
- der Elastomerqualität
- baupraktischen Beanspruchungsparametern
- der baulichen Durchbildung.

Durch summarische Betrachtungen der Kriechfunktionen unter Vernachlässigung differenzierter Versuchsparameter werden vergleichende Aussagen über das Kriechverhalten gewonnen. Die baupraktische Eignung der Vorgehensweise für die zuvor genannte Zielsetzung wird anhand eines bereits genormten Prüfverfahrens (für allgemeine Anwendungsfälle) verifiziert.

5.1.2 Dokumentation der Einzelergebnisse

Unter Berücksichtigung der besonderen Zielsetzung des Forschungsvorhabens und insbesondere bislang fehlender systematischer Langzeitversuche (vgl. Abschn. 3.3.2.3) waren zur Formulierung von Aussagen über die Dauerhaftigkeit von Elastomerlagern möglichst lange Beanspruchungsdauern anzustreben. Zur Minimierung der Laufzeit des Vorhabens wurde das Versuchsprogramm als nicht vollständiger Faktorversuch betrachtet (vgl. Abschn. 4.2.2.5). Insgesamt wurden 48 Kriechkurven ermittelt, als Summe ergab sich für die 7 Versuchseinrichtungen eine Betriebsdauer von rd. 25 a. Für spezifische Parameterausprägungen liegen in der Regel einzelne Versuchsergebnisse vor (abgesehen von Doppelbestimmungen bei exzentrischer Lasteinleitung, vgl. Bild 4.3).

Die Versuchsergebnisse werden im Abschnitt 10 (Bilder 10.1 bis 10.23) als zeitabhängiges Kriechmaß dokumentarisch wiedergegeben.

Die Ur-Meßwerte der Kriechversuche, mathematisch transformierte Meßwerte (vgl. Abschn. 4.3) und zur weiteren analytischen Auswertung errechnete Daten aus den transformierten Meßwerten liegen im ibac auf magnetischen Datenträgern vor.

5.1.3 Summarischer Überblick

5.1.3.1 Allgemeines

Aufgrund des begrenzten Versuchsumfanges werden zur Formulierung trendmäßiger Zusammenhänge im folgenden ausgewählte Versuchsergebnisse

- in Kurvenscharen mit umhüllendem und schraffiertem Streubereich
- zu sogenannten mathematischen Mittelwertkurven

zusammengefaßt. Kurvenscharen dienen zur Quantifizierung erwartbarer Streubereiche bestimmter Faktorausprägungen. Generierte Mittelwertkurven dienen zur vergleichenden Wertung einzelner Faktorkombinationen. Die Mittelwertkurven werden zur übersichtlichen Darstellung als Flächenhalbierende aus entsprechenden Kurvenscharen erzeugt. Aufgrund der unterschiedlichen Belastungsdauern ergeben sich bei den Mittelwertkurven Unstetigkeiten, die rechnerisch nur insoweit eliminiert wurden, als sie den Verlauf der angrenzenden Kurvenbereiche nicht beeinflußten. Verbleibende Unstetigkeiten deuten bei den Mittelwertkurven nicht zwangsläufig auf solche Schädigungsprozesse hin, wie sie (vereinfachend) in Bild 4.5 erläutert werden.

5.1.3.2 Einfluß des Elastomertyps

In Bild 5.1 sind differenziert nach den betrachteten Elastomertypen EPDM und CR zunächst, unabhängig von Elastomerqualitäten und Versuchsparametern, alle Kriechkurven zusammengefaßt. Die beiden Diagramme illustrieren, daß

- EPDM-Qualitäten gegenüber solchen aus CR stärkere Kriechneigung aufweisen. Dies gilt für die Kriechverformung (Kriechmaß) und die Kriechgeschwindigkeit gleichermaßen.

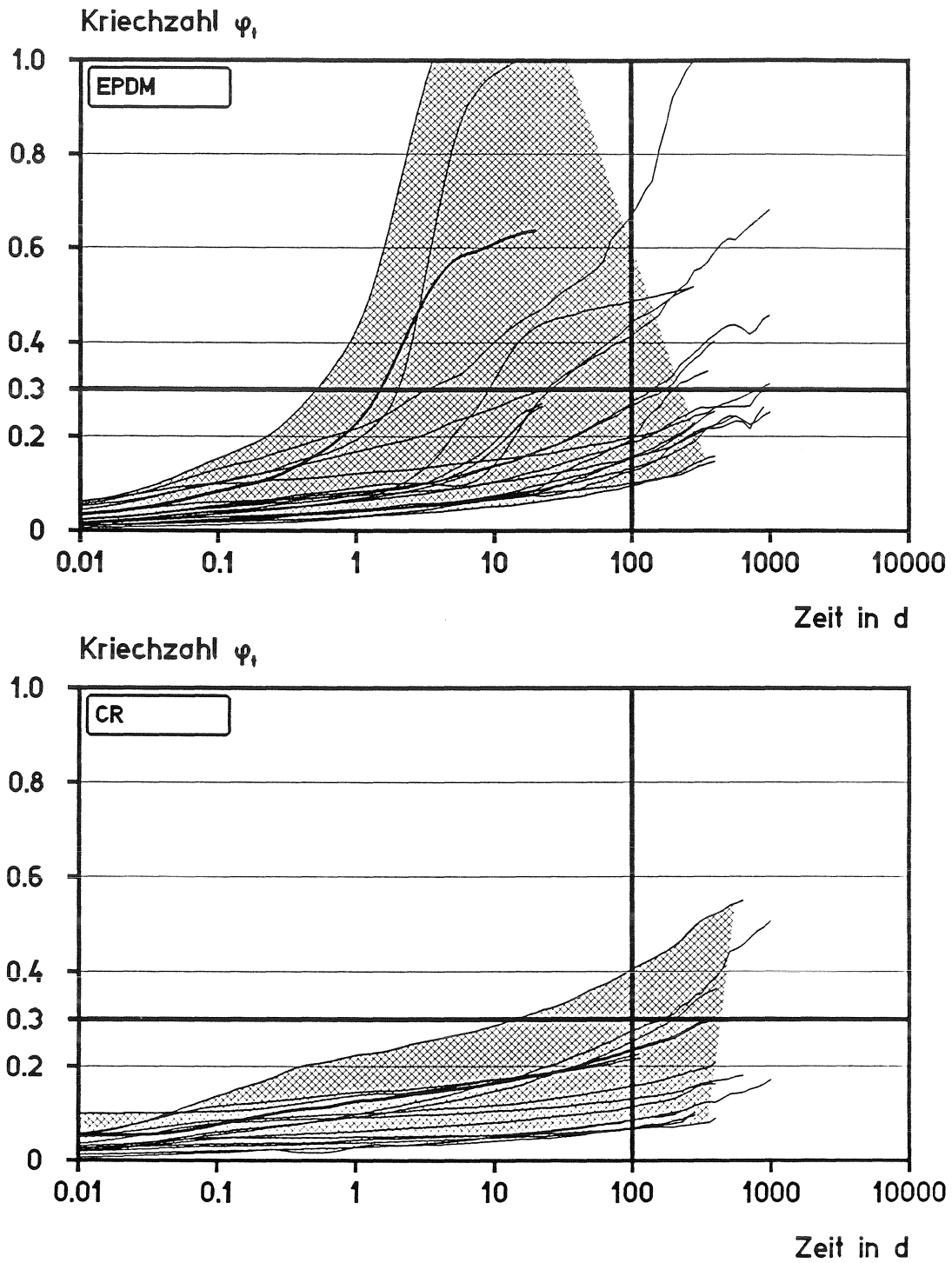


Bild 5.1: Einfluß des Elastomertyps

Kurvenschar aller Kriechkurven mit EPDM-Qualitäten (Bild oben) und mit CR-Qualitäten (Bild unten)

- EPDM-Qualitäten innerhalb der zugrundeliegenden Parametervariationen einen relativ großen, CR-Qualitäten dagegen einen vergleichsweise engen Streubereich aufweisen.
- verglichen mit dem Streubereich der CR-Qualitäten auch EPDM-Lager mäßige Kriechneigung aufweisen können.
- alle Kriechkurven mit EPDM-Qualitäten progressive Kriechanstiege aufweisen, während bei nur wenigen Kriechkurven der CR-Qualitäten leichte Kriechanstiege nach Belastungsdauern deutlich länger als 100 d verzeichnet werden.
- die Kriechzahl bei Versuchen mit EPDM-Qualitäten nach z. B. 100tägiger Beanspruchungsdauer Werte zwischen rd. 0,1 und > 1 , und bei Versuchen mit CR Werte zwischen rd. 0,05 und rd. 0,4 annimmt. Die Anforderung der DIN 4141 Teil 150 /3/ beträgt $< 0,3$ (vgl. Abschn. 2.5.2.2.2). Aus der Literatur sind Kriechzahlen zwischen rd. 0,05 und rd. 0,45 (vgl. Abschn. 3.3.2) bekannt.

5.1.3.3 Einfluß der Elastomerqualität

5.1.3.3.1 Mittelwertkurven

Die differenzierte Zusammenstellung der Kriechversuche nach Elastomerqualitäten durch vereinfachende Mittelwertkurven (Bild 5.2) erlaubt eine erste vergleichende Bewertung der Elastomerqualitäten hinsichtlich der Kriechneigung.

Quantifiziert nach der Kriechneigung nach einem Beurteilungszeitraum von 100 d scheint nachfolgende grobe Qualifizierung zulässig:

EPDM 3.2 $>$ EPDM 2 = EPDM 4 $>$ EPDM 3.1 $>$ EPDM 3 $>$ EPDM 1

CR 4 $>$ CR 2 $>$ CR 2.1 = CR 1 $>$ günstiger als

CR 4 = EPDM 3.2 = vergleichbar.

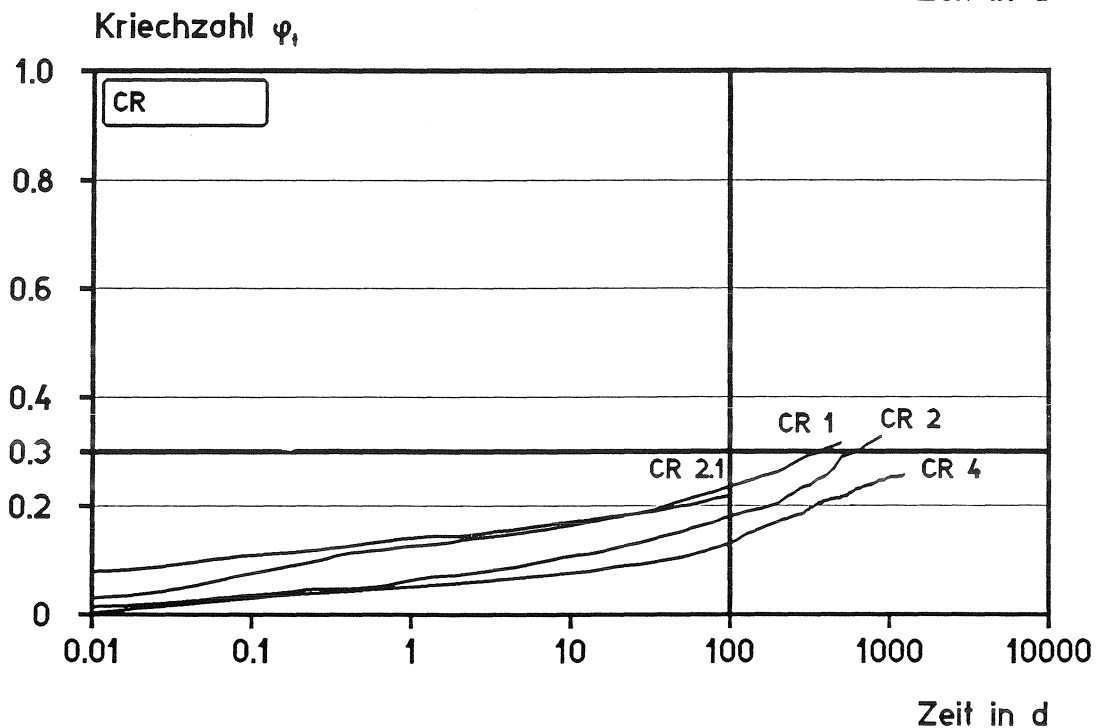
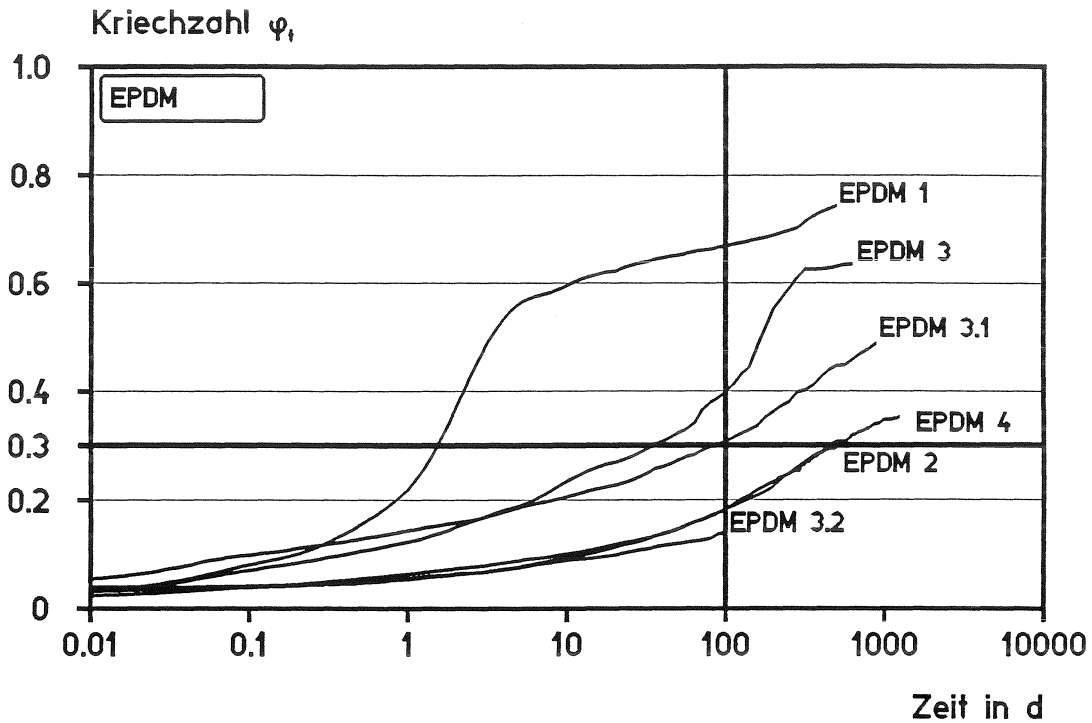


Bild 5.2: Einfluß der Elastomerqualitäten

Mittelwertkurven für jeweils alle Versuche mit EPDM-Qualitäten (Bild oben) und CR-Qualitäten (Bild unten)

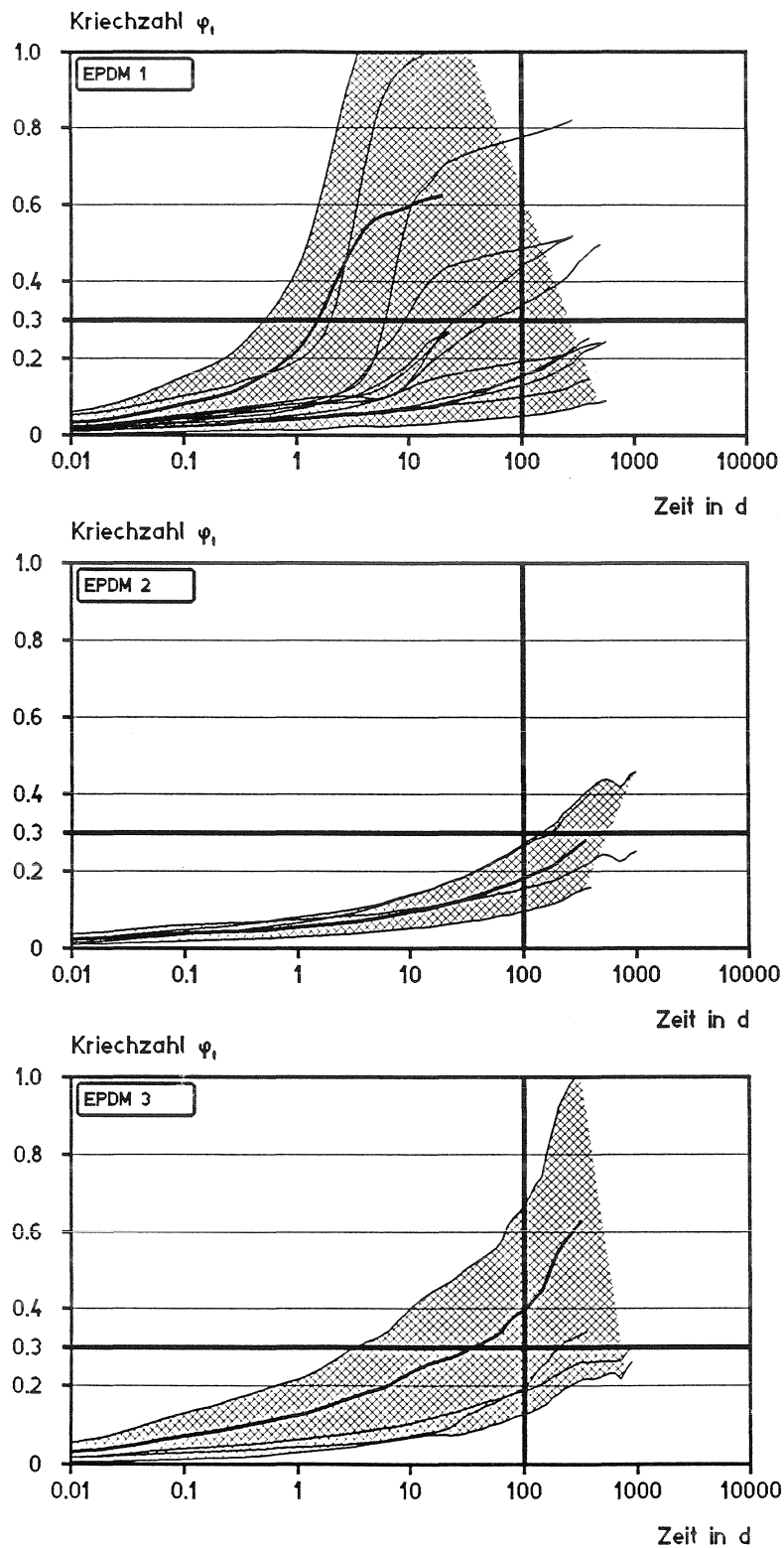


Bild 5.3: Einfluß der Elastomerqualität

Kurvenscharen für alle Versuche mit EPDM 1 (oben), EPDM 2 (Mitte) und EPDM 3 (unten)

5.1.3.3.2 Kurvenscharen

In Bild 5.3 sind die Streubereiche der Elastomerqualitäten EPDM 1, EPDM 1 und EPDM 3, in Bild 5.4 solche der CR-Qualitäten CR1, CR 2 und CR 2.1 zusammengestellt. Die beiden Bilder erläutern, daß

- die EPDM-Qualitäten 1 und 3 innerhalb der zugrundeliegenden Parametervariationen sehr große Streuungen des Kriechverhaltens aufweisen, während die Kriechkurven der EPDM 2-Qualität innerhalb eines vergleichsweise engen Streubereichs verlaufen (Bild 5.3).
- bei EPDM 1 und EPDM 3 nach 100 d Überschreiten der zulässigen Kriechzahl von 0,3 nicht ausgeschlossen werden kann, während bei EPDM 2 selbst bei ungünstigen Parameterkombinationen nach 100 d das zulässige Niveau der Kriechzahl nicht überschritten wird.
- die Streubereiche und das Niveau der Kriechmaße der verschiedenen CR-Qualitäten zeigen keine signifikanten Unterschiede (der nach oben erhöhte Streubereich der CR-1-Qualität resultiert aus den Versuchen mit einer Pressung von 100 N/mm²). Abgesehen von den Versuchen mit extrem hoher Pressung wird bei den untersuchten CR-Qualitäten das Niveau der zulässigen Kriechzahl nicht überschritten (Bild 5.4).

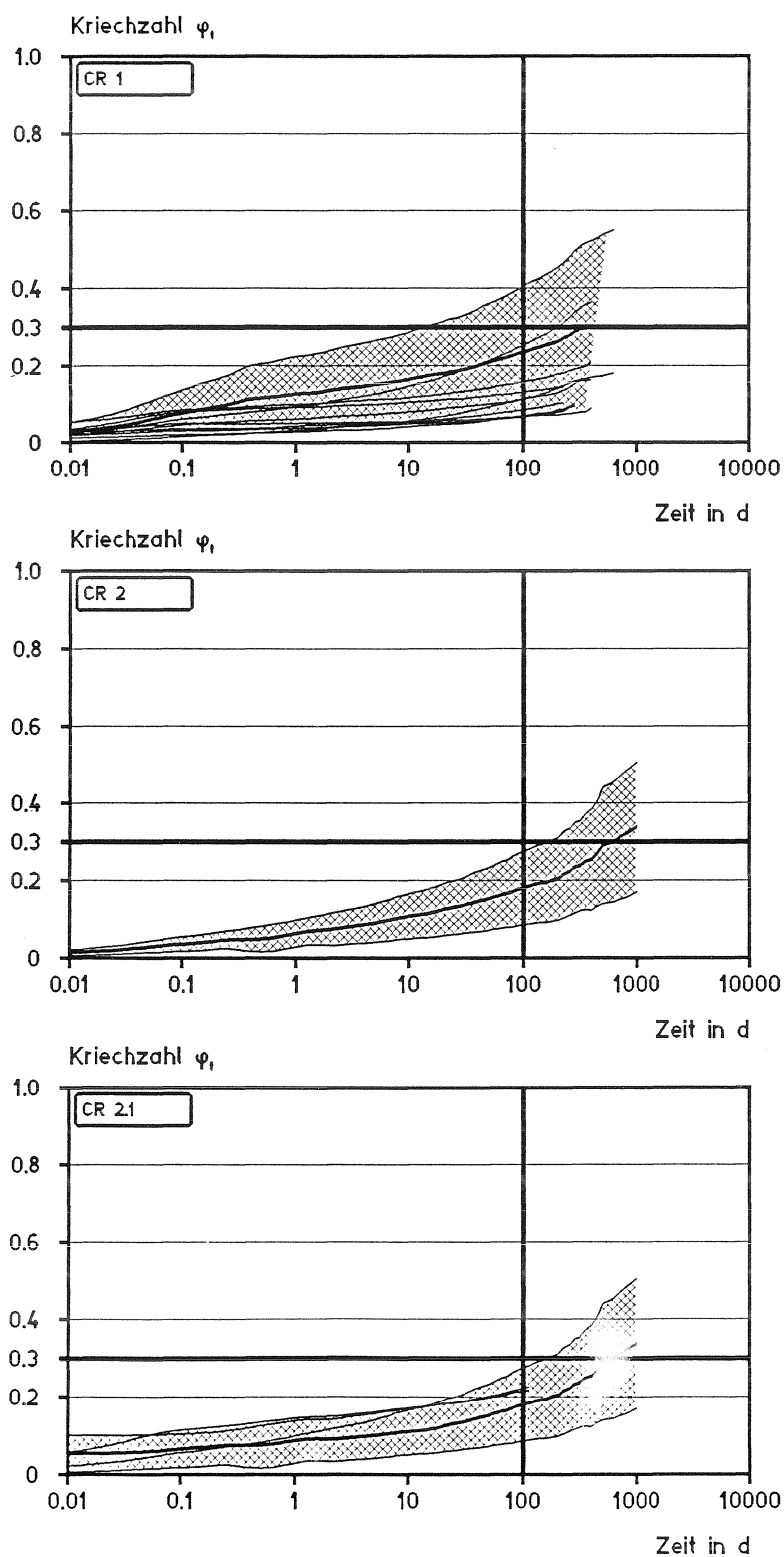


Bild 5.4: Einfluß der Elastomerqualität

Kurvenscharen für alle Versuche mit CR 1 (oben), CR 2 (Mitte) und CR 2.1 (unten)

5.1.3.3 Einfluß der mittleren Pressung

In Bild 5.5 sind die Mittelwertkurven aller Versuche jeweils mit dem EPDM- und CR-Elastomertyp, differenziert nach den mittleren Pressungen, dargestellt. Die Darstellungen verdeutlichen, daß

- mit zunehmender mittlerer Pressung bei beiden Elastomertypen die Kriechzahlen (Kriechverformung) und die Kriechgeschwindigkeit ansteigen,
- bei dem EPDM-Typ die Kriechzahlen und die Kriechgeschwindigkeit mit zunehmender Pressung deutlich stärker anwachsen als bei dem CR-Typ,
- bei dem EPDM-Typ bei Pressungen von 20 N/mm² mit einem Kriechanstieg bereits nach rd. 10 d und einem Überschreiten der Kriechzahl von 0,3 gerechnet werden muß. Mittlere Pressungen von 40 N/mm² lassen den Kriechanstieg nach rd. 3 d, und Pressungen von 60 N/mm² nach rd. 0,3 d erwarten. Pressungen von 100 N/mm² führen zunächst infolge der Überdrückung zu Belastungsbeginn zu geringer Kriechneigung, und nach rd. 10 d unmittelbar zum Versagen.
- bei dem CR-Typ kein signifikanter Unterschied in der Kriechfunktion zwischen einer mittleren Pressung von 20 N/mm² und 40 N/mm² erwartbar ist, in beiden Fällen werden nach 100 d Kriechzahlen von rd. 0,1 ermittelt. Pressungen von 60 N/mm² führen insgesamt zu einem erhöhten Niveau der Kriechzahl und einer erhöhten Kriechgeschwindigkeit, die Kriechfunktion ist jedoch vergleichbar mit der Mittelwertkurve des EPDM-Typs bei einer Pressung von 20 N/mm².
- der pressungsabhängige Beginn progressiver Kriechgeschwindigkeit liegt im logarithmischen Zeitmaßstab annähernd auf einer Geraden. Beginnende Kriechanstiege in Beanspruchungszeiträumen < 5 d deuten danach auf mäßige Dauerstandfestigkeit hin, und Kriechanstiege < rd. 3 d lassen ein Überschreiten der Kriechzahl von 0,3 innerhalb der ersten 100 d erwarten.

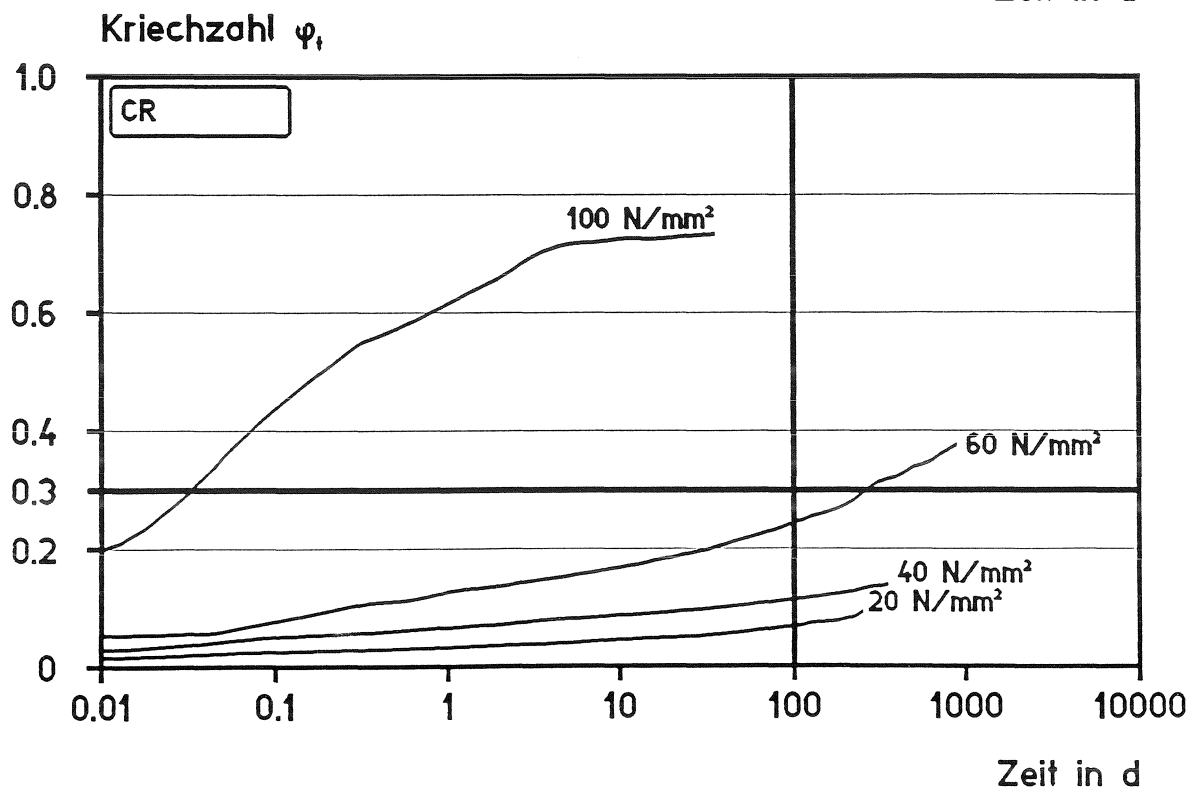
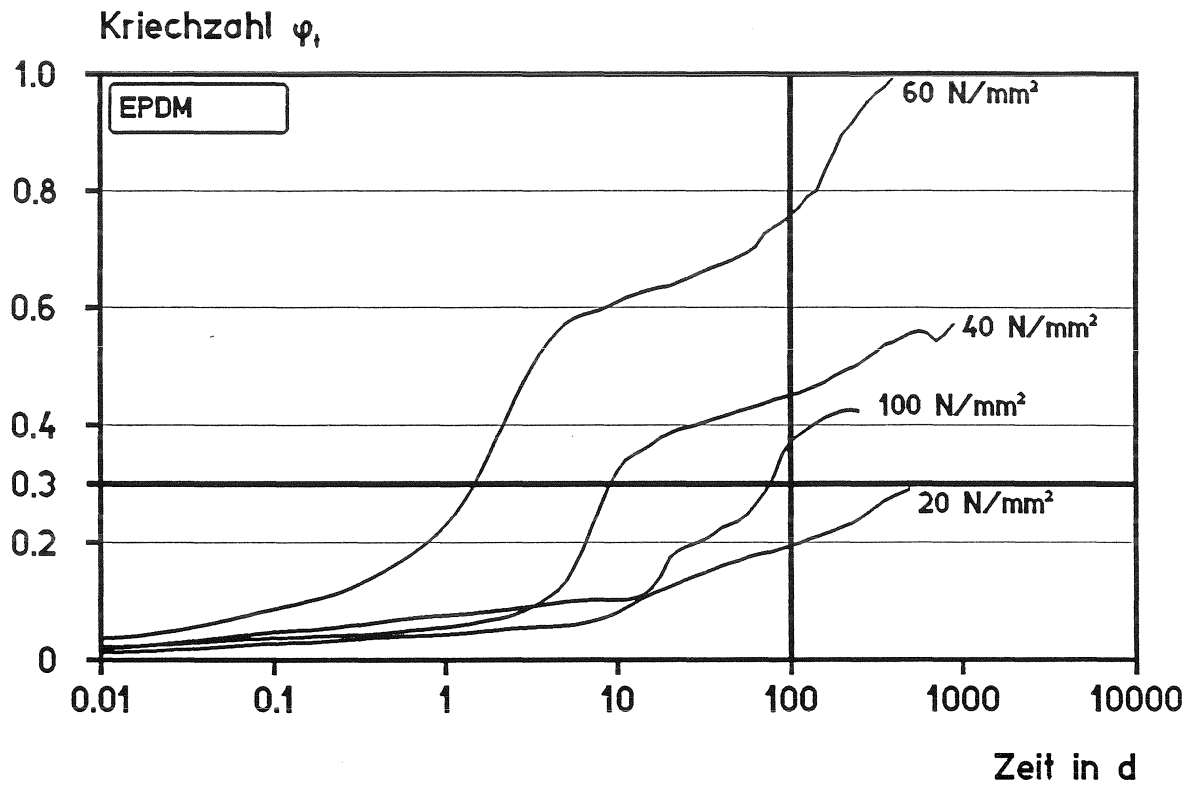


Bild 5.5: Einfluß der mittleren Pressung

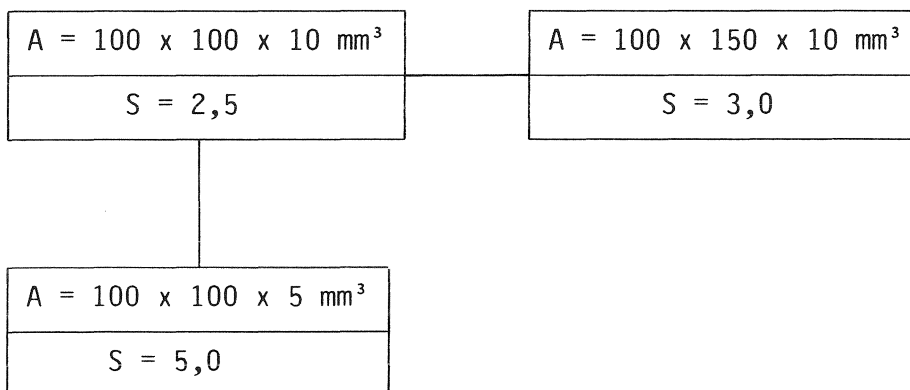
Mittelwertkurven aller Versuche mit EPDM- Qualitäten (oben) und CR-Qualitäten (unten)

5.1.3.4 Einfluß der Lagerfläche

Zur Beurteilung des Einflusses der Lagerfläche sind in Bild 5.6 exemplarisch Kriechkurven der EPDM 1- und der CR 1-Qualität unter gleicher Pressung (60 N/mm^2), gleicher Lagerdicke (10 mm) und unterschiedlichen Lagerflächen

- $A = 100 \times 100 \text{ mm}^2$ - Formfaktor $S = 2,5$
- $A = 100 \times 200 \text{ mm}^2$ - Formfaktor $S = 3,0$

zusammengestellt. Aus den Lagergeometrien resultieren Formfaktoren $S = 2,5$ und $S = 3,0$. Die wenigen vergleichbaren Versuche lassen keinen signifikanten Einfluß der Lagerfläche, selbst bei sehr hohen Pressungen und verschiedenen Elastomertypen, feststellen (Bild 5.6). Aus anderen experimentellen Untersuchungen (z. B. /23/) werden ähnliche Schlüsse gezogen. Vermutlich beeinflußt die Lagerfläche das globale Verformungsverhalten nur unbedeutend. Die horizontale Lagerausbreitung wird üblicherweise bei der Ermittlung der mittleren Pressung nicht berücksichtigt, minimiert die rechnerischen Pressungen allerdings erheblich (vgl. Bild 2.3). Vielfach wird der Formfaktor S als Einflußgröße des mechanischen Lagerverhaltens angesehen. Der Formfaktor wird jedoch weit stärker von der Lagerdicke als von der Lagerfläche beeinflusst:



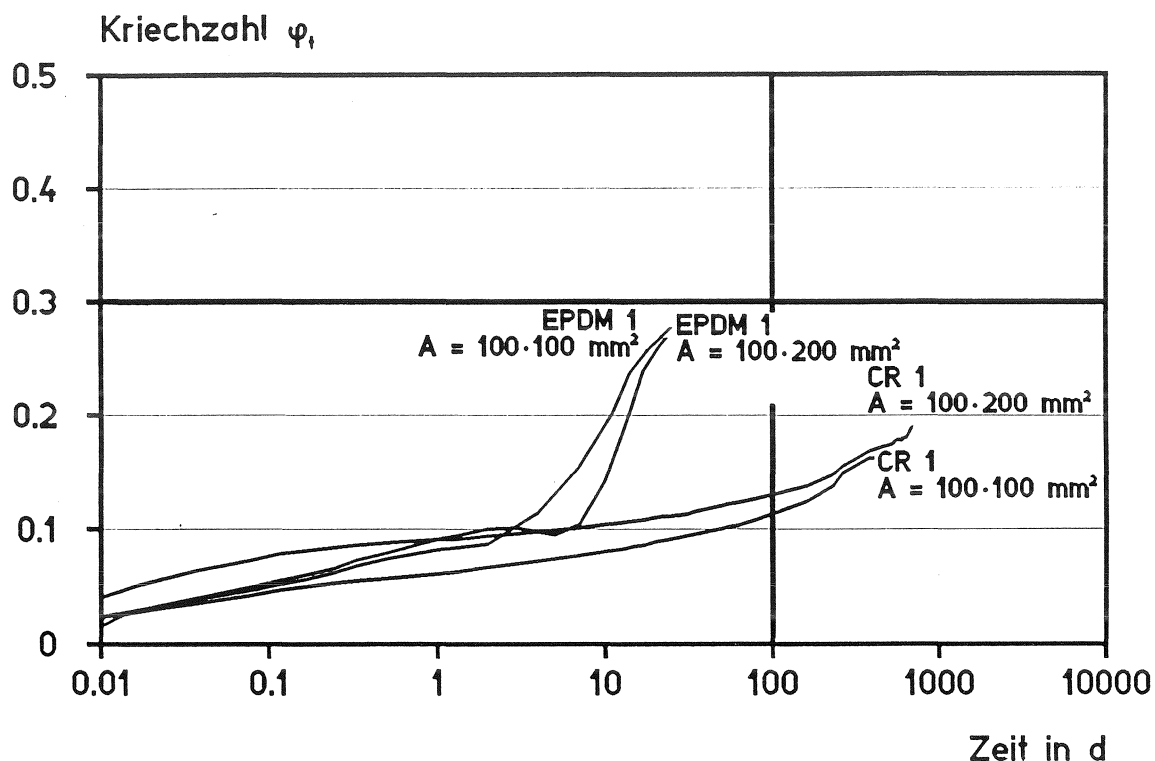


Bild 5.6: Einfluß der Lagerfläche

Kriechkurven von Versuchen mit EPDM 1 und CR 1, $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$,
 $t = 10 \text{ mm}$

5.1.3.5 Einfluß der Lagerdicke

Exemplarisch für die Beeinflussung der Kriechverformung durch die Lagerdicke sind in Bild 5.7 die Kriechfunktionen zweier Elastomerqualitäten

- eines Herstellers
- verschiedener Elastomertypen (EPDM 2, CR 2)
- gleicher Lagerfläche ($A = 100 \times 100 \text{ mm}^2$)
- gleicher mittlerer Pressung ($\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$)

gegenübergestellt.

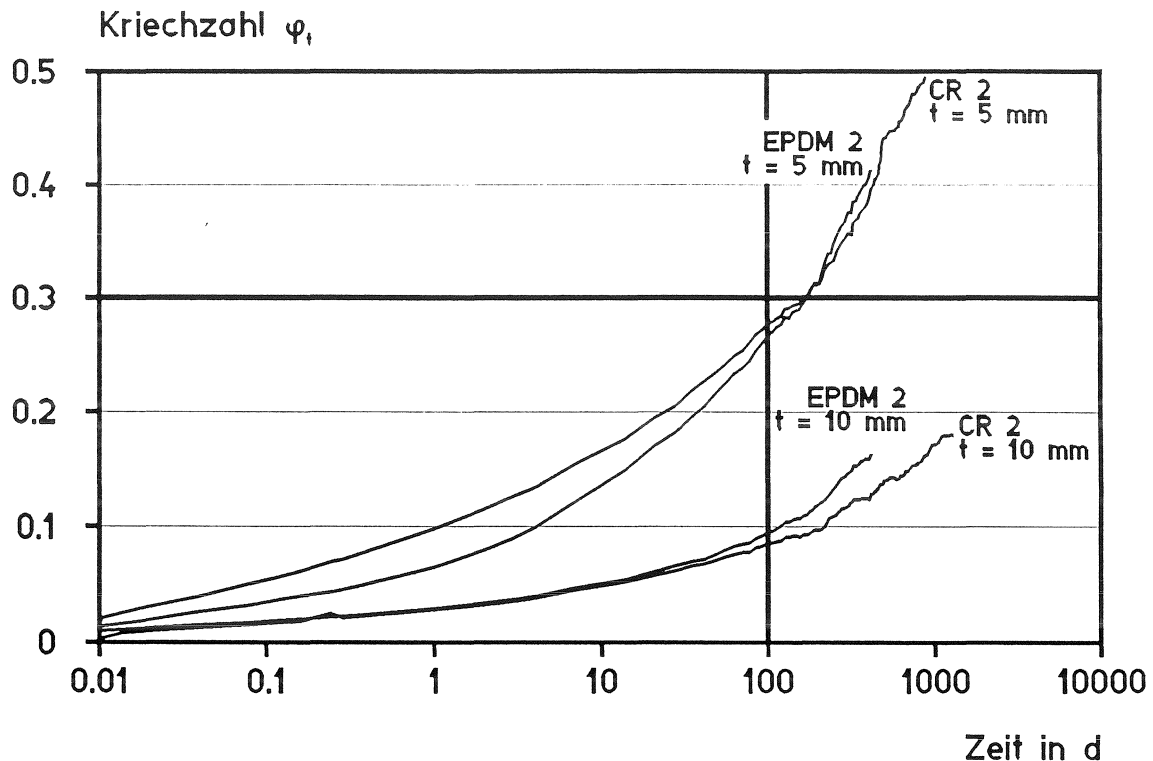


Bild 5.7: Einfluß der Lagerdicke

Kriechkurven ausgewählter Versuche mit EPDM 2 und CR 2
 $\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$, $A = 100 \times 100 \text{ mm}^2$

Aus der Zusammenstellung ausgewählter Versuchsergebnisse können (und unter Beachtung des gesamten Versuchsumfanges) folgende Tendenzen präzisiert werden:

- die Kriechverformungen dickerer Lager (hier $t = 10 \text{ mm}$) sind deutlich geringer als die dünner Lager (hier $t = 5 \text{ mm}$), sie betragen zwischen rd. 20 % und rd. 30 % der Kriechverformung dünner Lager unter vergleichbaren Beanspruchungen,
- bei EPDM-Qualitäten ist der zuvor erläuterte Einfluß der Lagerdicke auf das Niveau der Kriechverformung größer als bei CR-Qualitäten,
- die Progression der Verformungszunahme (Kriechgeschwindigkeit) ist bei dicken Lagern geringer, und der Beginn des progressiven Kriechanstieges erfolgt später als bei den dünnen Lagern.

5.1.3.6 Einfluß der Lagerverdrehung

Die Überlagerung der zentrischen Pressung mit einer Auflagerverdrehung führt zu einer Erhöhung der Randschubspannungen (vgl. Abschn. 3.4). In Bild 5.8 sind exemplarisch die Kriechfunktionen der Versuche mit der EPDM 1-Qualität (Lagergeometrie: $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$) infolge zentrischer und exzentrischer Beanspruchung bei verschiedenen Pressungsstufen wiedergegeben. Die exemplarisch zusammengestellten Kriechkurven verdeutlichen, daß

- bei niedrigen Pressungen (20 N/mm^2) der aufgezwungene Drehwinkel die Kriechzahl annähernd verdoppelt. Die Spannungskonzentrationen führen bei dieser Qualität zu einem progressiven Kriechanstieg $< 5 \text{ d}$.
- bei zentrischen Pressungen von $\sigma_m = 40 \text{ N/mm}^2$, hier vergleichbare Endkriechmaße wie bei exzentrischen Versuchen mit $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ erwartet werden können, der Zeitpunkt des progressiven Kriechanstiegs liegt ebenfalls $< 5 \text{ d}$.
- bei sehr hohen Pressungen (zentrisch 60 N/mm^2) der Lagerkörper überdrückt wird, und die Lagerbeanspruchung (bei dieser Qualität) unmittelbar zum Versagen führt.

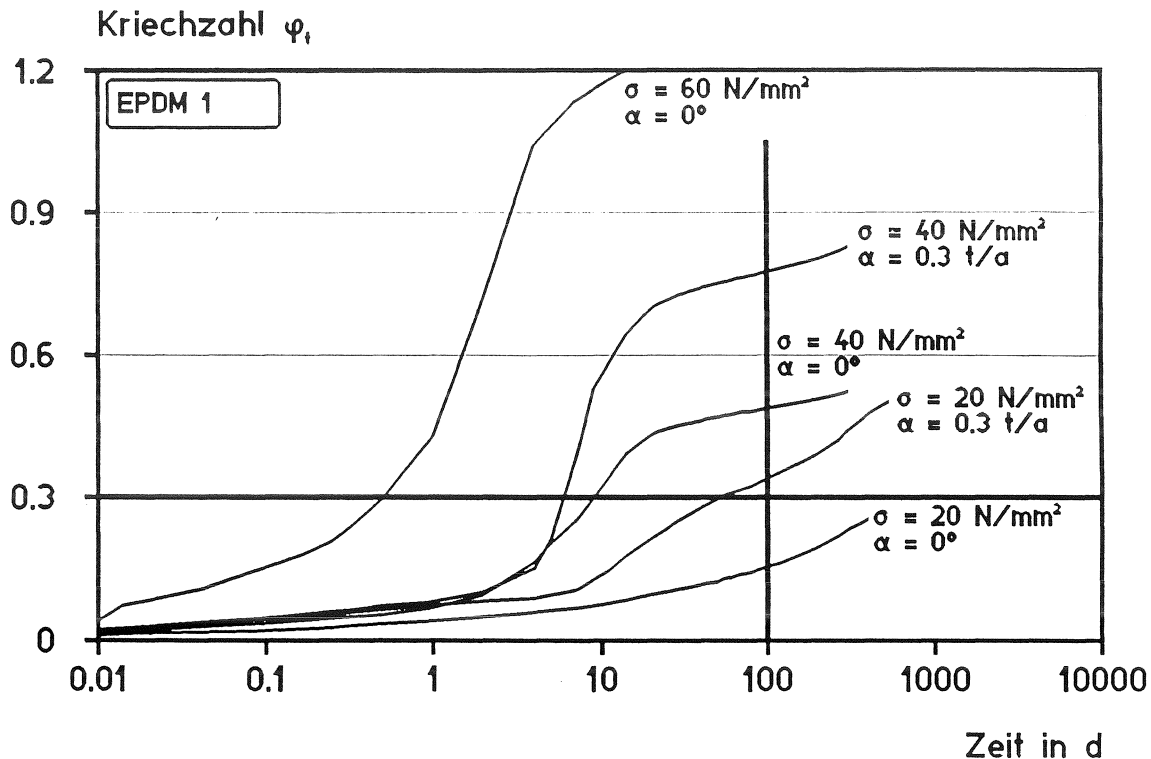


Bild 5.8: Einfluß der Lagerverdrehung

Kriechkurven aus Versuchen mit der EPDM 1-Qualität
 $A = 100 \times 100 \text{ mm}^2$, $t = 5 \text{ mm}$,

Zur Beurteilung des Dauerstandverhaltens scheinen daher zentrische Beanspruchungen bei 40 N/mm^2 und 60 N/mm^2 zweckmäßig, da einerseits bei niedrigeren Pressungen die Verdrehungen einen geringeren Einfluß auszuüben scheinen, und andererseits bei höheren Pressungen der gesamte Lagerkörper einer hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt wird. Prüftechnisch sind zentrische Versuchsaufbauten zu bevorzugen, da exzentrische Beanspruchungen der Hydraulikzylinder bei Langzeituntersuchungen zu Undichtigkeiten der Kolbendichtungen und als Folge davon ggf. zum Versuchsabbruch führen können.

5.1.3.7 Einfluß der baulichen Durchbildung

Innerhalb der Untersuchungen wurden vorrangig kompakte Lagerkörper und vereinzelt profilierte Lager untersucht (vgl. Abschn. 4.1.2). Zur qualitativen Beschreibung des Einflusses von Profilierungen auf die Kriechverformung werden in Bild 5.9 die Mittelwertkurven aller Versuche mit kompakten und profilierten Lagern, differenziert nach dem Elastomertyp, gegenübergestellt.

Die qualitative Betrachtungsweise verdeutlicht, daß profilierte Lager zu geringeren Kriechverformungen neigen. Bei den untersuchten CR-Qualitäten führen Profilierungen zu einer abgeschwächten Kriechverformung nach längerer Beanspruchungsdauer, die Verformungsdifferenz ist für die Mittelwertkurven allerdings sehr gering, und liegt innerhalb der versuchsimmanenten Streuungen (z. B. Kontaktflächenbeschaffenheit).

Für die EPDM-Qualitäten erscheint der Einfluß der Profilierung besonders ausgeprägt. Die Mittelwertkurve der kompakten Lager trägt hier jedoch dem vergleichsweise großen Streubereich der Kriechkurven (vgl. Bild 5.1) Rechnung. In Bild 5.10 sind daher die Mittelwertkurven aller Versuche mit den EPDM-Qualitäten eines Herstellers (EPDM 3, EPDM 3.1 und EPDM 3.2) zusammengefaßt. Während die EPDM 3-Lager übliche unbewehrte Lager darstellen, handelte es sich bei dem EPDM 3.2-Lagern um profilierte Lager (vgl. Bild 4.1), deren Elastomerzusammensetzung derart modifiziert wurde, daß die Lager durch Extrusion hergestellt werden können. Die Lager EPDM 3.1 besaßen kompakte Lagerkörper aus der Elastomerqualität 3.2 und waren in üblichen Vulkanisationsformen nicht durch Extrusion hergestellt worden.

Die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse von EPDM-Qualitäten eines Herstellers zeigt, daß in diesem konkreten Fall die modifizierte Qualität 3.1 günstigeres Kriechverhalten gegenüber der Qualität 3 aufweist, und daß die profilierte Ausführung 3.2 deutlich geringere Kriechverformung und Kriechgeschwindigkeit aufweist. Die Profilierung gleicht offenbar örtliche Spannungsspitzen rasch aus, und führt zu gleichmäßigen Materialbeanspruchungen.

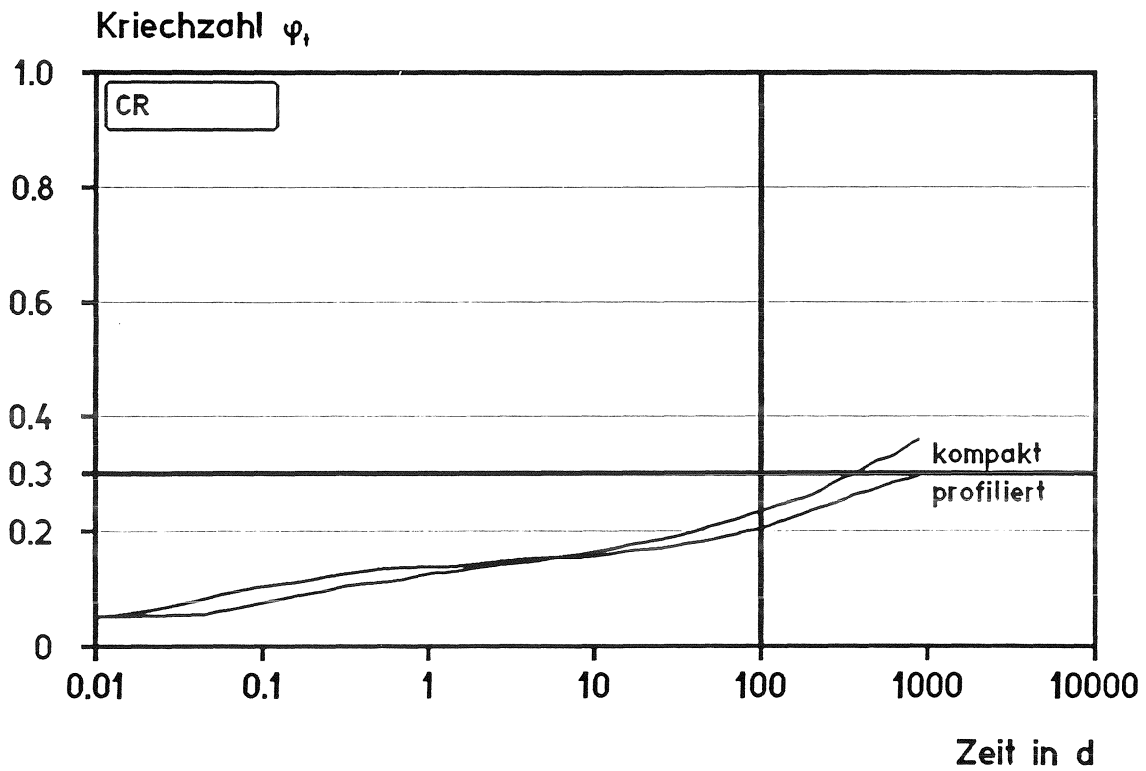
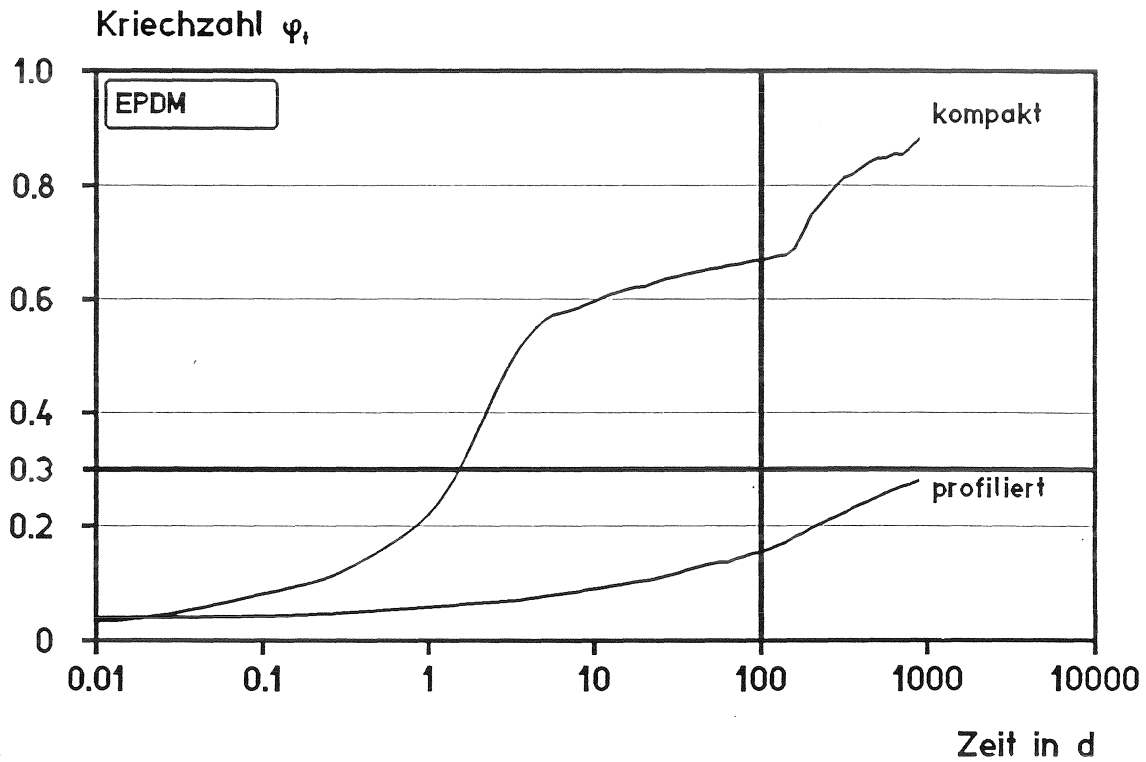


Bild 5.9: Einfluß der baulichen Durchbildung

Mittelwertkurven aller Versuche mit EPDM- (oben) und CR-Qualitäten (unten) differenziert nach kompakten und profilierten Lagerkörpern (vgl. Bild 4.1)

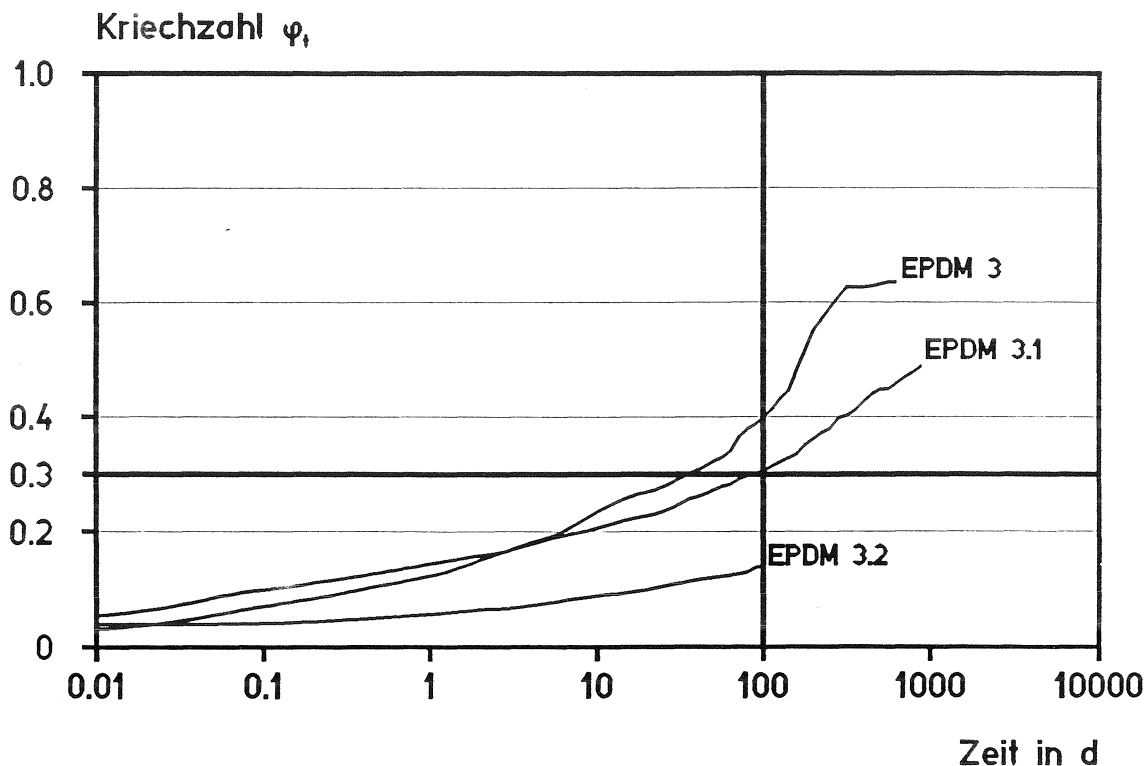


Bild 5.10: Einfluß der baulichen Durchbildung

Mittelwertkurven aller Versuche an EPDM-Qualitäten eines Herstellers mit und ohne Profilierung

5.1.4 Kurzzeitversuche unter Wärmebeanspruchung

5.1.4.1 Prüfverfahren (DIN 53 547)

Die Bestimmung des Kriechens ist in DIN 53 547 /22/ für Elastomere unter Druckbeanspruchung genormt. Das Verfahren geht von einer vergleichsweise kleinen Probengeometrie aus, es sind Elastomerscheiben mit einem Durchmesser von $(13 \pm 0,5)$ mm und einer Dicke von $(6,3 \pm 0,3)$ mm zu verwenden. Als Kontaktflächen dienen zwei parallele, ebene, polierte und verchromte Edelstahlflächen. Abhängig von der Härte ist für Elastomere, wie sie im Bauwesen verwendet werden, eine konstante mittlere Pressung von nur $1,05 \text{ N/mm}^2$ zu beaufschlagen. Für diese Pressung wird in der Norm eine erwartbare An-

fangsverformung von (20 ± 5) % angegeben. Als maximale Beanspruchungsdauer sind 7 d vorgesehen. Innerhalb definierter Beanspruchungstemperaturen, die je nach Anwendungsfall auszuwählen sind, erscheint eine Prüftemperatur von 70 °C für Anwendungen im Bauwesen sinnvoll (und ist in der Kunststoffprüftechnik geläufig).

5.1.4.2 Qualitative Beurteilung des Kriechverhaltens

In Bild 5.11 sind die nach dem zuvor beschriebenen Prüfverfahren ermittelten Kriechfunktionen dargestellt. Die Kurvenscharen (Proben aus kompakten Lagern gemäß Abschn. 5.1.5.1) verdeutlichen, daß

- innerhalb der Elastomertypen keine deutlichen Unterschiede erkennbar sind. Die CR-Qualitäten zeigen eine nur unbedeutend geringere Kriechverformung gegenüber den EPDM-Qualitäten,
- innerhalb der Elastomerqualitäten keine trennscharfen Differenzierungen möglich sind. Die CR-Qualitäten zeigen einen etwas engeren Streubereich.
- die Kriechzahlen auch unter Wärmeeinwirkung bei weitem nicht die Werte annehmen, wie sie bei unbewehrten Lagern auch unter mäßigen Pressungen (vgl. Abschn. 3.3.2.2) auftreten.

Das Prüfverfahren gemäß DIN 53 547 ist für die vorliegende Fragestellung nicht geeignet. Es können weder baupraktische Angaben über das Kriechverhalten (relativ/absolut) noch verwertbare Hinweise zum Dauerstandverhalten gewonnen werden.

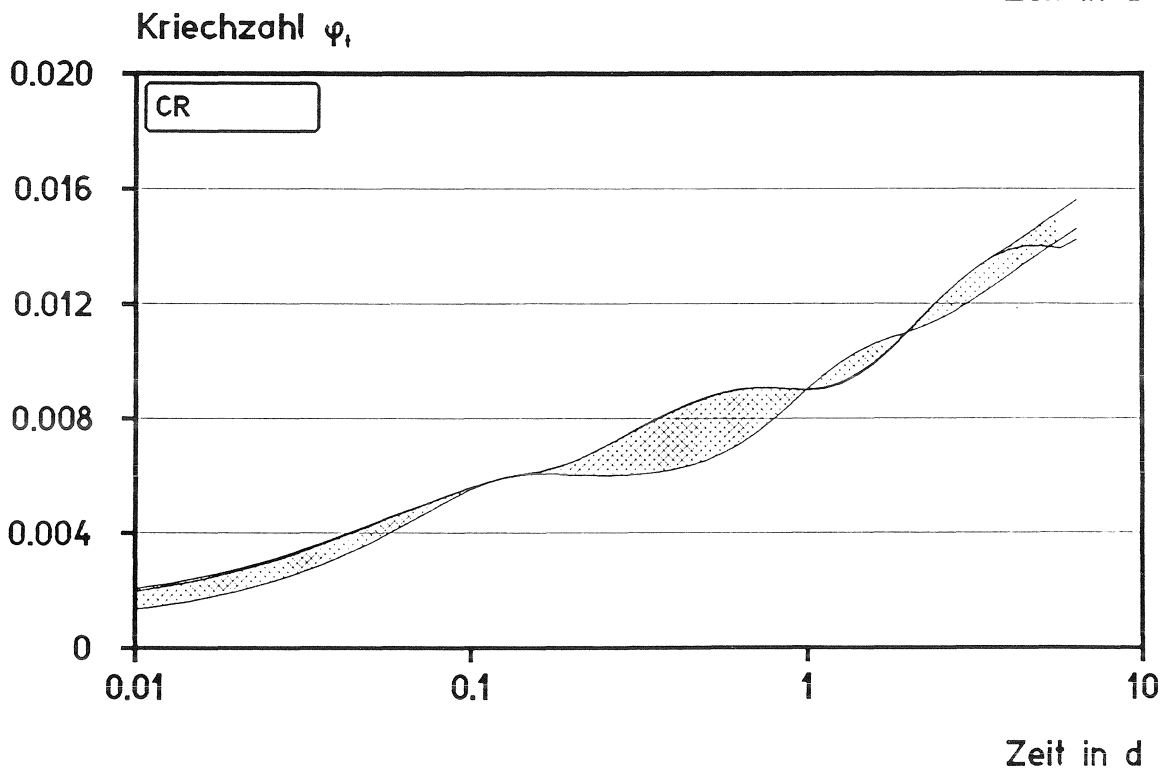
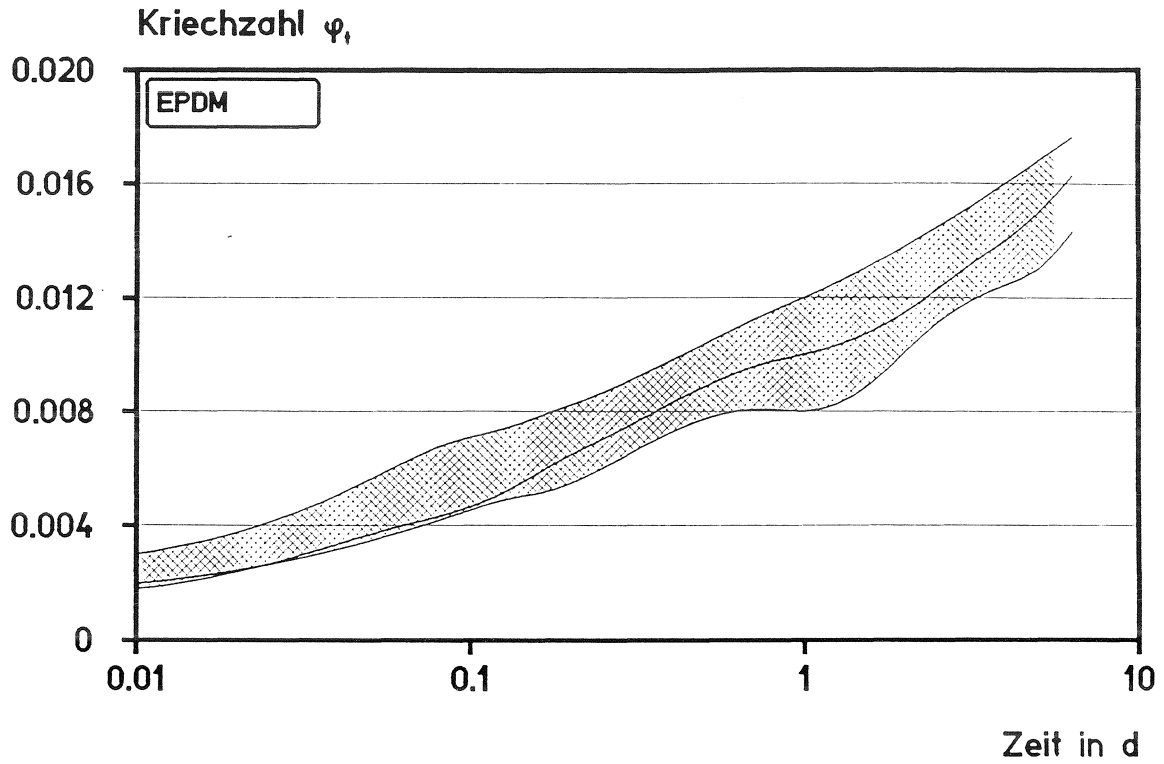


Bild 5.11: Prüfung des Kriechverhaltens gemäß DIN 53 547
EPDM-Qualitäten (oben) und CR-Qualitäten (unten)

5.2 Bewertungskriterien für das Dauerstandverhalten

5.2.1 Zielsetzung

Unter Beachtung der durch quantitative Beurteilung der Kriechfunktionen gewonnenen Zusammenhänge (vgl. Abschn. 5.1) werden Kriterien formuliert, die geeignet erscheinen, das Dauerstandverhalten von unbewehrten Elastomerlagern aus vergleichsweise kurzen Beanspruchungsdauern (bis 100 d) zuverlässig zu prognostizieren.

5.2.2 Vertikale Lagerverformung

5.2.2.1 Allgemeines

Baupraktisch sind bei komplexeren (z. B. Deckensysteme) oder summarischen (z. B. mehrgeschossige Strukturen) Lagerungen absolute (beanspruchungsabhängige) Lagerverformungen von Interesse. Nach DIN 4141 Teil 15 /2/ ist neben einem Stauchungsanteil infolge der Lageranpassung an Schiefwinkeligkeit und Unebenheit von 1 mm unter zulässigen Beanspruchungen mit einer Stauchung von 20 % der Lagerdicke im unbelasteten Zustand zu rechnen. Für die im Rahmen dieses Vorhabens verwendeten Lagerdicken ergeben sich danach folgende maximalen vertikalen Lagerverformungen:

$$t = 10 \text{ mm} \rightarrow 20 \% (2 \text{ mm}) + 1 \text{ mm} (10 \%) = 30 \% (3 \text{ mm})$$

$$t = 5 \text{ mm} \rightarrow 20 \% (1 \text{ mm}) + 1 \text{ mm} (20 \%) = 40 \% (2 \text{ mm}).$$

Die maximale Lagerverformung ergibt sich für Regellager mit einer Dicke von 4 mm zu 45 %.

5.2.2.2 Anfangsverformung

Bild 5.12 zeigt die Anfangsverformung (5 Minuten Belastungsbeginn) in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach den Elastomertypen und der Lagerdicke. In die Diagramme ist die maximale Schubspannung eingetragen, die sich bei den zulässigen Beanspruchungen an Regellagern gemäß /2/ ergibt (vgl. Bild 5.4). Tendenziell lassen sich folgende Zusammenhänge präzisieren:

- Die vertikale Anfangsverformung nimmt Werte zwischen rd. 25 % bis rd. 80 % der Lagerdicke im unbelasteten Zustand an.
- Selbst bei sehr mäßigen Beanspruchungen (Schubspannungen $< 10 \text{ N/mm}^2$) wird das Niveau der maximalen zu berücksichtigenden Einfederung gemäß /2/ erreicht.
- Innerhalb der Elastomertypen ist kein signifikanter Einfluß auf das Spektrum der Anfangsverformung zu verzeichnen.
- Die Anfangseinfederung der profilierten Lager (EPDM 3.2; EPDM 4; CR 4) ist (rd. 70 %) gegenüber kompakten Lagern (rd. 40 % bis 60 %) deutlich höher. Unter Berücksichtigung der reduzierten Lagerdicke (vgl. Abschn. 4.1.2) ergibt sich für solche Lager allerdings auch ein vergleichbares Niveau (rd. 50 %) wie bei kompakten Lagern.
- Dünne Lager erreichen bereits unterhalb der maximalen Schubspannung für Regellager Verformungen bis zu 80 %. Bei kompakten dicken Lagern wird dieses Verformungsniveau erst bei extrem hohen Schubspannungen von rd. 50 N/mm^2 erreicht.

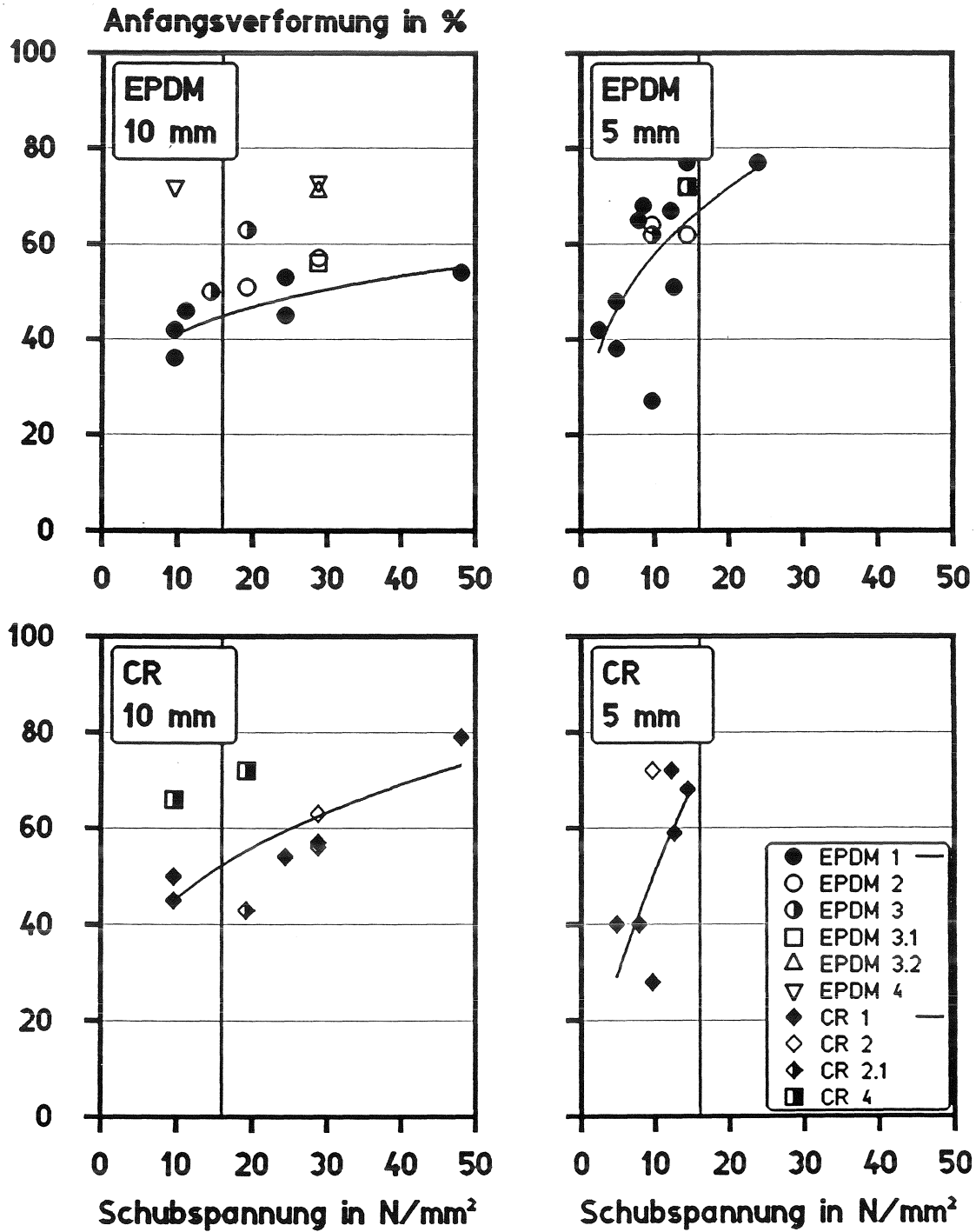


Bild 5.12: Anfangsverformung ϵ_1 in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung

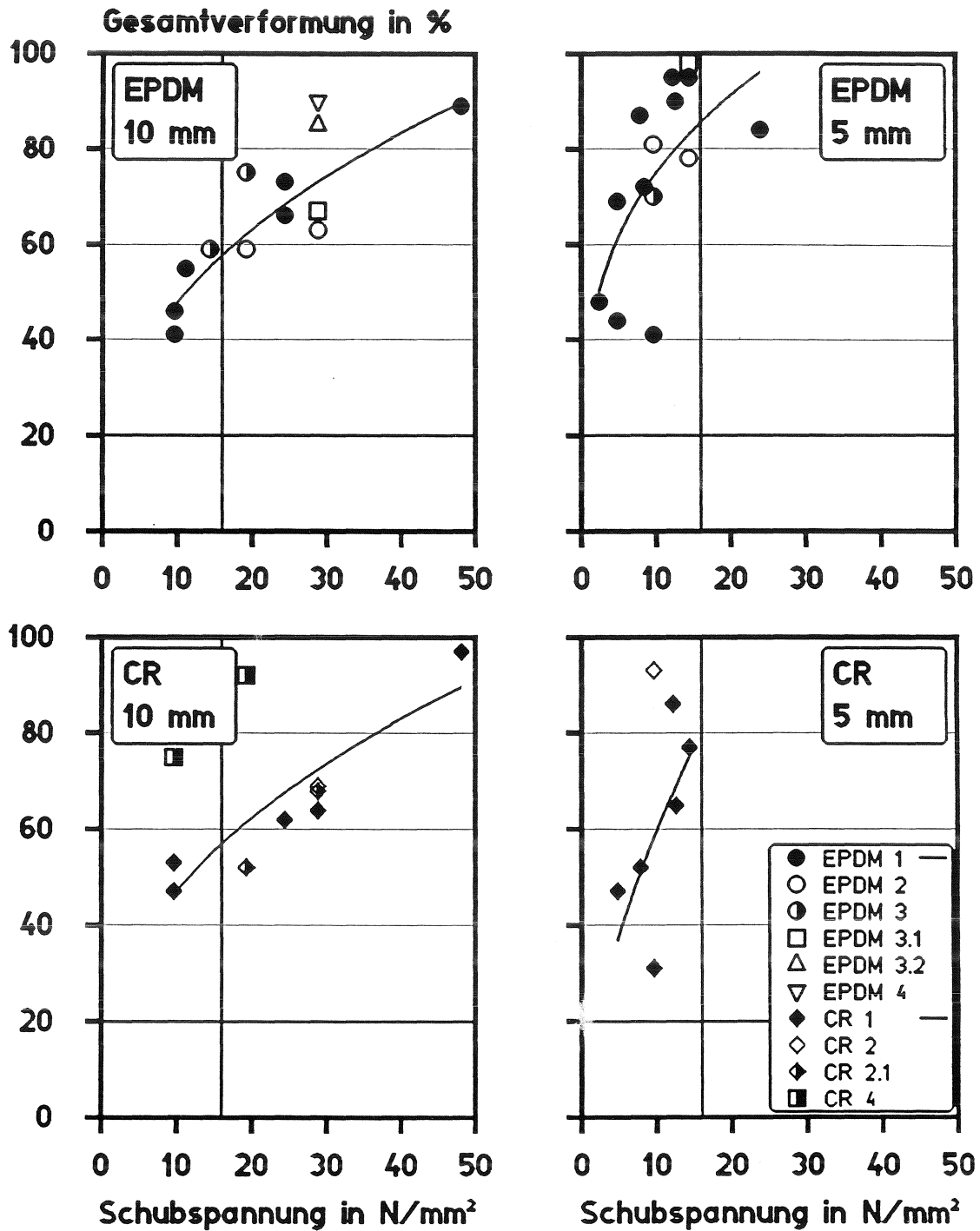


Bild 5.13: Gesamtverformung ϵ_{ges} in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung

5.2.2.3 Gesamtverformung

Abhängig von der maximalen Schubspannung der Lager ergeben sich Gesamtverformungen ϵ_{ges} (Anfangsverformung ϵ_1 und Kriechverformung ϵ_k) zwischen rd. 40 % und rd. 95 % (Bild 5.13). Die maximale zu berücksichtigende Gesamtverformung gemäß der Norm /2/ beträgt dagegen nur 45 % (vgl. Abschn. 5.2.2.1).

Verglichen mit der Anfangsverformung ϵ_1 wird ersichtlich, daß die EPDM-Qualitäten ein größeres Kriechmaß gegenüber solchen aus CR-Material aufweisen. In Bild 5.14 sind die Relativwerte der jeweilig erreichten Gesamtverformung zur Anfangsverformung $\epsilon_{\text{ges}}/\epsilon_1$, differenziert nach der Elastomerqualität und der Lagerdicke, aufgetragen. Die Diagramme lassen nachfolgende Tendenzen erkennen:

- EPDM-Qualitäten lassen ein Niveau der Relativwerte bis zu 1,8 erwarten; dünne Lager weisen selbst bei vergleichsweise geringen Schubspannungen diesen hohen Anteil der Kriechverformungen auf.
- Unter Vernachlässigung der EPDM 1-Qualität weisen andere EPDM-Qualitäten bei einer Lagerdicke von 10 mm Schubspannungen von bis zu 30 N/mm² einen Relativwert von nur 1,2 auf, bei 5 mm dicken Lagern wird ein Niveau von 1,3 erreicht.
- Bei CR-Qualitäten wird unabhängig von der Schubspannung und der Lagerdicke ein Niveau von 1,2 bis 1,3 erreicht.
- Das relativ eng begrenzte Spektrum der Relation zwischen Anfangsverformung ϵ_1 und Gesamtverformung ϵ_{ges} gibt Anlaß zu der Vermutung, daß die Anfangsverformung als Maß für die lokale Lageranpassung und der Neigung zum Fließen geeignet erscheint, das Dauerstandverhalten maßgeblich zu charakterisieren. Hohe Anfangsverformungen weisen auf eine geringe Vernetzungsdichte und eine Orientierung sowie das Abgleiten von Molekülketten hin.

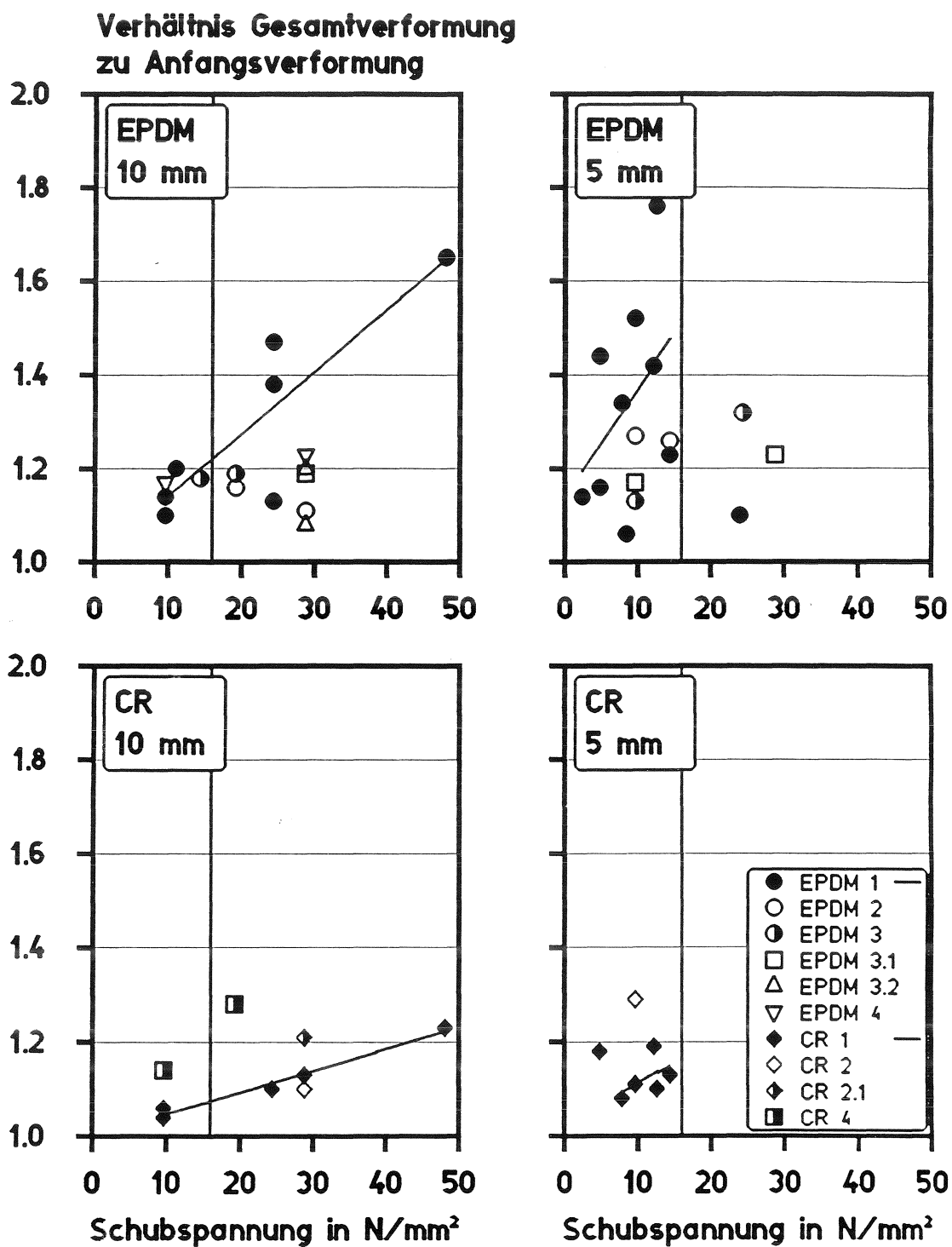


Bild 5.14: Relativwert der Gesamtverformung ϵ_{ges} zur Anfangsverformung ϵ_1 in Abhängigkeit von der maximalen Schubspannung

5.2.2.4 Kriechzahl nach 100 d Beanspruchungsdauer

Als maßgebliches Bewertungskriterium für das Dauerstandverhalten dient gemäß /3/ die Kriechzahl nach einer Belastungsdauer von 100 d (vgl. Abschn. 2.5.2.2.2). In Bild 5.15 ist dieses Kriechmaß φ_{t100} in Abhängigkeit von der maximalen Schubspannung und differenziert nach Elastomertypen sowie Lagerdicken aufgetragen. In die Diagramme ist die maximal aus den zulässigen Beanspruchungen gemäß /2/ resultierende Schubspannung und die gemäß /3/ zulässige Kriechzahl eingetragen. Für die Elastomerqualitäten EPDM 1 und CR 1 werden zur trendmäßigen Beschreibung des Zusammenhangs Regressionskurven angegeben. Die Bilder illustrieren, daß die Kriechzahl nach 100 d bei

- 10 mm dicken EPDM-Lagern unterhalb der maximalen Schubspannung gemäß /2/, abgesehen von extrem belasteten EPDM 1-Lagern (60 und 100 N/mm²), das Niveau der zulässigen Kriechzahl (0,3) nicht erreicht wird,
- 10 mm dicken EPDM-Lagern bei der Schubspannung, die sich aus den Beanspruchungen des Dauerstandversuches /3/ ergibt (19,2 N/mm²), die zulässige Kriechzahl nicht überschritten wird,
- 10 mm dicken CR-Lagern nur bei extrem hohen Beanspruchungen (100 N/mm²) das Niveau der zulässigen Kriechzahl überschritten wird,
- 5 mm dicken EPDM-Lagern das Niveau der zulässigen Kriechzahl bis auf die EPDM 2-Qualität bereits bei vergleichsweise niedrigen Beanspruchungen überschritten wird,
- bei 5 mm dicken CR-Lagern tendenziell das Niveau der zulässigen Kriechzahl nicht überschritten wird.

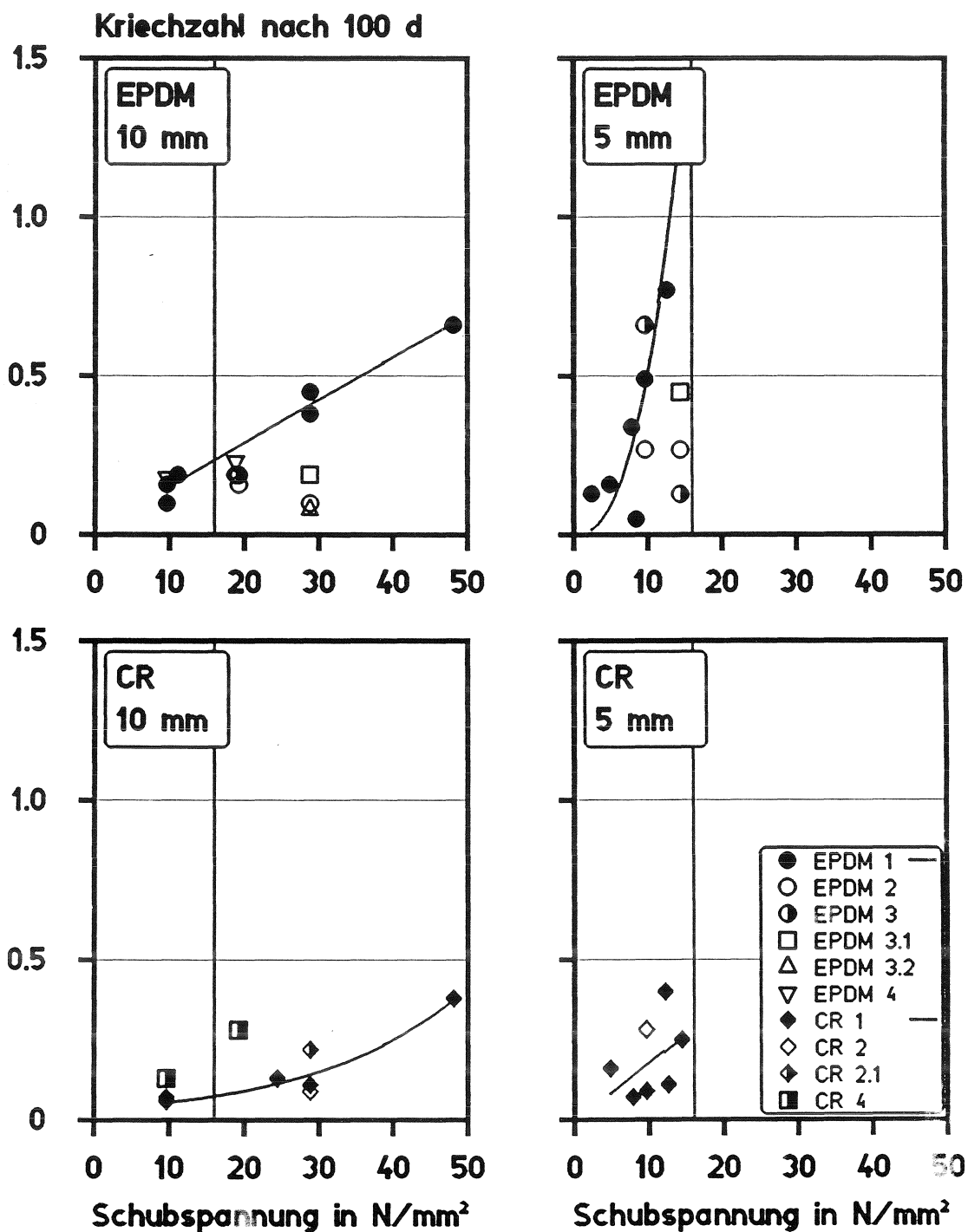


Bild 5.15: Kriechzahl φ_{t100} in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach dem Elastomertyp und der Lagerdicke

Die Kriechzahl φ_{t100} korreliert innerhalb der versuchsbedingten Ungenauigkeiten für die Qualitäten EPDM 1 und CR 1 mit der rechnerischen Schubspannung. Aus den in /2/ geregelten Versuchsparametern resultiert eine rechnerische maximale Schubspannung von $\tau = 19,2 \text{ N/mm}^2$. Danach muß sowohl für dünne ($t = 5 \text{ mm}$) EPDM- als auch für CR-Lager mit dem Überschreiten der zulässigen Kriechzahl gerechnet werden. Bei dicken ($t = 10 \text{ mm}$) Lagern ist unter dieser Beanspruchung mit einem Spektrum der Kriechzahl zwischen rd. 0,1 und rd. 0,3 zu rechnen. Abgesehen von den profilierten Lagern (CR 4) und der Qualität mit höherer Härte (CR 2.1) kann bei den untersuchten CR-Qualitäten mit einem deutlich niedrigeren Niveau der Kriechzahl gegenüber den EPDM-Qualitäten gerechnet werden.

5.2.2.5 Extrapolation von Endkriechmaßen

Durch Extrapolation von Endkriechmaßen (vgl. Abschn. 4.3.4) soll untersucht werden, inwieweit das Dauerstandverhalten aus kürzeren Versuchsdauern abgeschätzt werden kann. Hierzu erscheint zunächst das Endkriechmaß $\varphi_{1\infty}$ geeignet, das innerhalb des ersten Belastungstages (ohne weitestgehend Schädigungsprozesse des Elastomeren) zu erfassen, ermittelt wird. In Bild 5.16 sind die Endkriechmaße $\varphi_{1\infty}$ in Abhängigkeit von der Elastomerqualität und der Lagerdicke zusammengestellt. Tendenziell werden für die CR-Qualitäten geringere Endkriechmaße als bei den EPDM-Qualitäten extrapoliert und der Streubereich der Ergebnisse ist für die CR-Materialien vergleichsweise eng begrenzt. Verglichen mit der Kriechzahl φ_{t100} (vgl. Bild 5.15) kann hier nur ein mäßiger Zusammenhang zwischen dem Endkriechmaß und der Beanspruchung vermutet werden. Wird dennoch die zulässige Kriechzahl $\varphi_{t100} < 0,3$ zugrundegelegt, so ergäbe sich im Kurzzeittest (Bild 5.16) eine vergleichbarere Aussage als bei dem Langzeitversuch nach 100 d (Bild 5.15). Das Endkriechmaß $\varphi_{1\infty}$ scheint geeignet, für eine Materialvorauswahl im Kurzzeittest erste vergleichende Hinweise, nicht jedoch Aussagen über das Dauerstandverhalten oder das Maß der Kriechverformungen zu liefern.

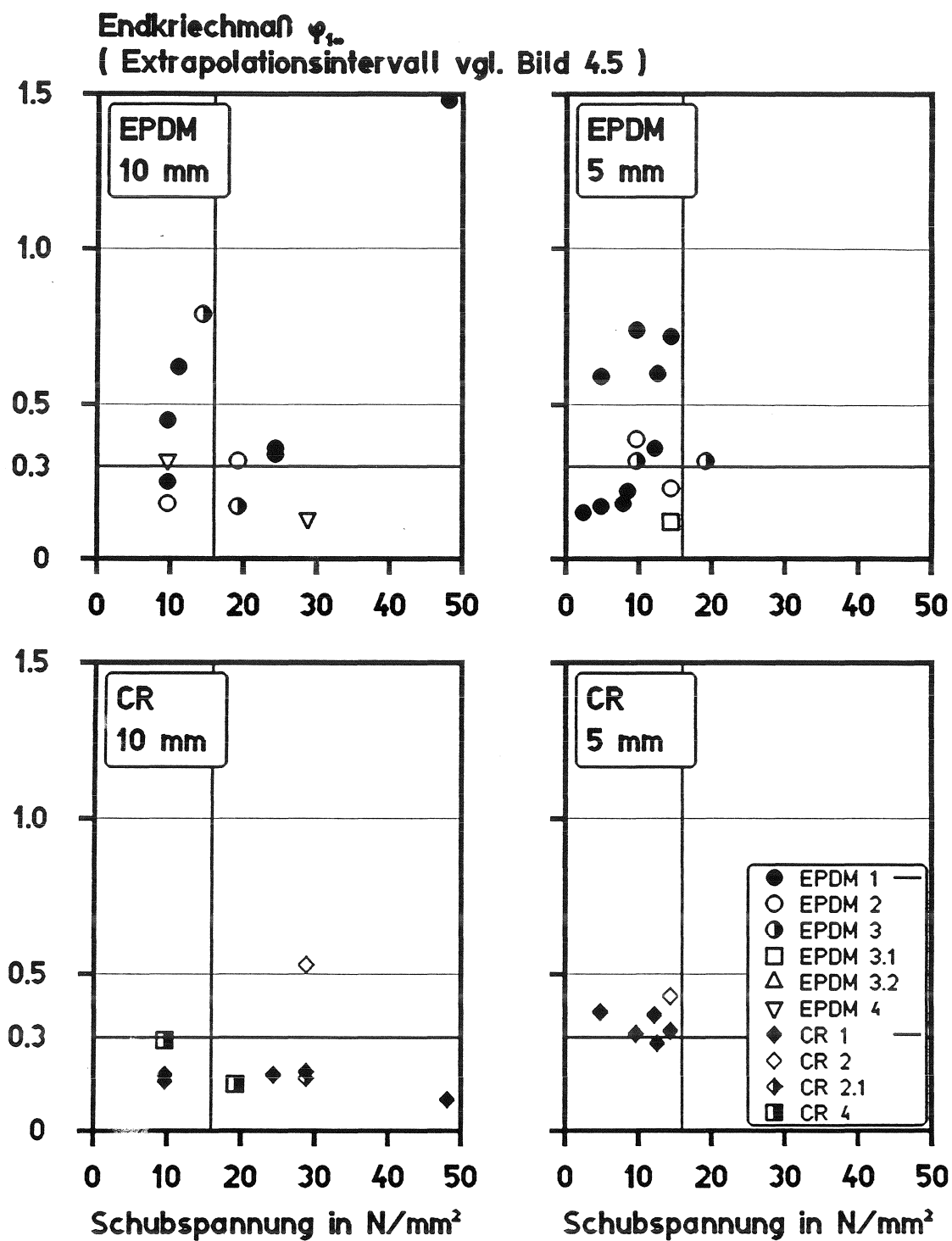


Bild 5.16: Endkriechmaß $\varphi_{1\infty}$ in Abhängigkeit von der Elastomerqualität und der Lagerdicke

In Bild 5.16 sind die Endkriechmaße $\varphi_{2\infty}$ in ihrer Anhängigkeit der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach der Elastomerqualität und der Lagerdicke, dargestellt. Tendenziell ergibt sich

- bei gleicher Beanspruchung für die EPDM-Qualitäten ein höheres Endkriechmaß verglichen mit den CR-Qualitäten,
- bei dünnen EPDM-Lagern ein größeres Endkriechmaß gegenüber den dicken Lagern, bei CR-Lagern ist dieser Einfluß nicht ausgeprägt,
- keine ausgeprägte Abhängigkeit des Endkriechmaßes von der Lagerbeanspruchung (Schubspannungen),
- erwartungsgemäß keine Übereinstimmung mit den Gesamtverformungen (vgl. Bild 5.13).

Durch analytische Bewertungsverfahren anhand solcher Bereiche der Kriechfunktion (Endkriechmaß $\varphi_{2\infty}$), die auf Schädigungsprozesse hinweisen, kann das Schädigungsmaß eines Lagers nicht ausreichend beschrieben werden. Progressive Kriechgeschwindigkeiten können z. B. aus dem Überwinden des Reibungsschlusses oder aus dem Festigkeitsverlust des Elastomeren (z. B. Kettenbruch) resultieren. Die Beeinflussung der Lagerfunktion und das Maß der Dauerstandfestigkeit kann aus der Kriechfunktion alleine nicht abgeleitet werden.

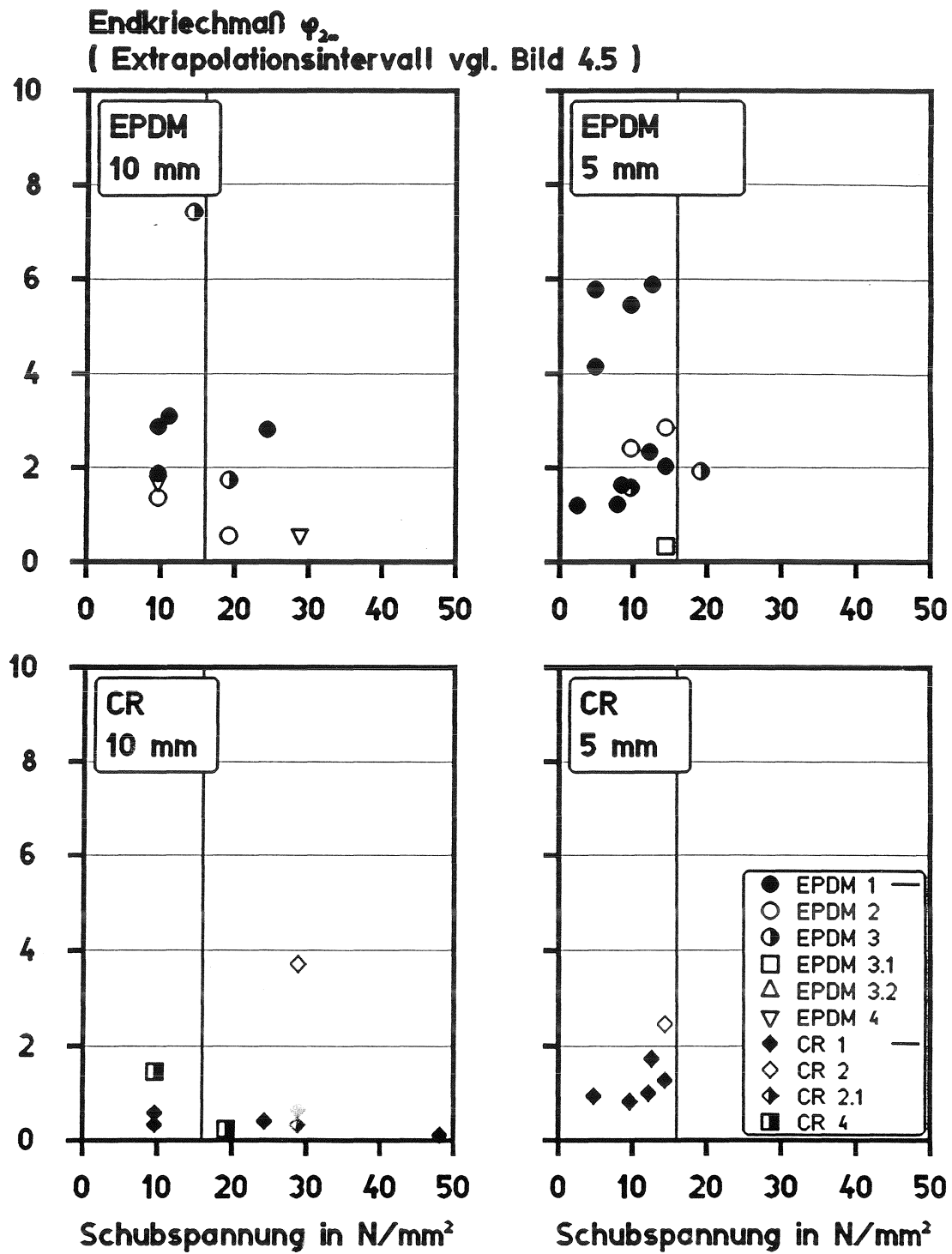


Bild 5.17: Endkriechmaß $\varphi_{2\infty}$ in Abhängigkeit von der Elastomerqualität und der Lagerdicke

5.2.3 Integraler Schädigungsgrad

In Bild 5.18 ist der visuell aus Einzelmerkmalen ermittelte und rechnerisch zusammengefaßte Schädigungsgrad der Lagerproben in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach Elastomerqualitäten und der Lagerdicke, dargestellt. In die Diagramme sind in Abhängigkeit vom Formfaktor S die maximalen Schubspannungen eingetragen, die sich gemäß /2/ für die zulässigen Beanspruchungen der Regellager ergeben. Aus dem Wichtungsverfahren der Einzelkriterien zur Ermittlung des Schädigungsgrades (vgl. Abschn. 4.3.5.3) wird für die dauerhafte Funktionsfähigkeit eines Lagers eine Toleranzgrenze des Schädigungsgrades von 25 % als baupraktisch sinnvoll erachtet. Innerhalb des Beurteilungsverfahrens werden damit unterhalb der Toleranzgrenze z. B. Schädigungsmerkmale wie Gefügezerstörungen und Risse in das Lagerinnere weitgehend ausgeschlossen. Dagegen sind unvermeidbare Lagerveränderungen, wie z. B. Risse an den freien Seitenflächen infolge der extremen Wölbung, die sich jedoch nicht in das Lagerinnere fortsetzen, mit geringen Schädigungsgraden $< 5 \%$ zu bewerten.

Aus der Summe der Ergebnisse können nachfolgende tendenzielle Aussagen gewonnen werden:

- Der Schädigungsgrad unbewehrter Elastomerlager nimmt mit zunehmendem Formfaktor (zunehmende Lagerfläche, abnehmende Lagerdicke) progressiv zu.
- Innerhalb der Beanspruchungen von Regellagern /2/ (bauübliche Formfaktoren) muß bei EPDM-Qualitäten mit dem Überschreiten der Toleranzgrenze des Schädigungsgrades gerechnet werden, während CR-Qualitäten bei solchen Beanspruchungen geringe Schädigungen unterhalb der Toleranzgrenze erwarten lassen.
- Bei mäßigen Schubspannungen $< 10 \text{ N/mm}^2$ (Formfaktoren < 6 , mittlere Pressungen $< 8 \text{ N/mm}^2$, vgl. Bild 4.4) kann bei den EPDM-Qualitäten 2, 3, 3.1, und 4 mit tolerierbaren Lagerschädigungen $< 25 \%$ gerechnet werden. Dagegen muß die Eignung der EPDM 1-Qualität für den vorgesehenen Verwendungszweck in Frage gestellt werden.
- Die CR-Qualität CR 2 erfüllt die Anforderung an das Schädigungsmaß innerhalb der Norm /2/, während die CR-Qualitäten 1, 2.1 und 4 darüber hinaus (auch bei höheren mittleren Pressungen) vergleichsweise geringe Schädigungen erwarten lassen.

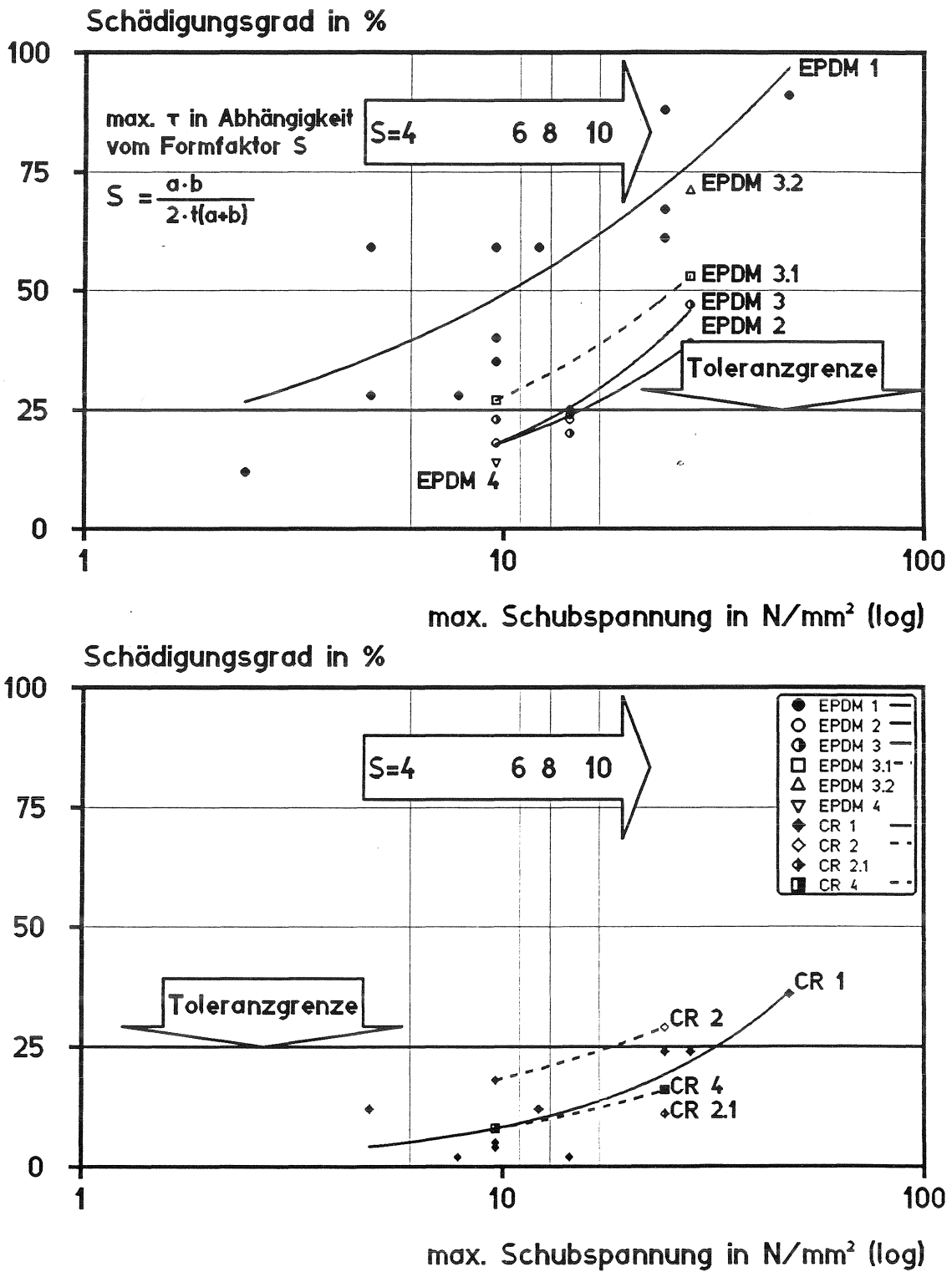


Bild 5.18: Schädigungsgrad in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung

6 BEURTEILUNG DES DAUERSTANDVERHALTENS

6.1 Allgemeines

Aufgrund der synergetischen Wechselwirkungen zwischen äußeren Lagerbeanspruchungen, materialspezifischem Verformungsverhalten im Lagerspalt und den molekularen Versagensvorgängen ist die Beurteilung des Dauerstandverhaltens von unbewehrten Elastomerlagern anhand einzelner Beurteilungskriterien, wie z. B. die Kriechfunktion, die Kriechzahl zu einem bestimmten Zeitpunkt, nicht möglich (vgl. Abschn. 5). Dennoch ergeben sich für einzelne Beurteilungskriterien (innerhalb der Faktorkombinationen) verwertbar erscheinende Zusammenhänge. Baupraktisch erscheint es daher sinnvoll, durch komplexe Verknüpfung von relevant erscheinenden Beurteilungskriterien ein Bewertungskonzept für das Dauerstandverhalten, unter Berücksichtigung eines vertretbaren Prüfaufwandes, zu formulieren.

6.2 Zeitstandfestigkeit

Ein für die Beurteilung der Dauerstandfestigkeit (Zeitstandfestigkeit) von Kunststoffen geläufiges Verfahren ist die Ermittlung des sogenannten Dauerstandfestigkeits-Diagramms /19/ (vgl. Abschn. 3.3.1). Bei Kunststoffen kann allgemein (im doppeltlogarithmischen Maßstab) keine eindeutige Dauerstandfestigkeit definiert werden, da die (im Idealfall Geraden) keiner Asymptote zustreben. Dennoch können derartige Diagramme zur qualitativen Bewertung herangezogen werden, wenn für einzelne Werkstoffe übliche Lebensdauern und ausreichende Funktionsfähigkeit im praktischen Betrieb (unter vergleichbaren Beanspruchungen) beobachtet wurden.

Als Versagenskriterium wird für die unbewehrten Elastomerlager der Übergang vom linearen in einen progressiven Verlauf der Kriechfunktion im logarithmischen Zeitmaßstab ("pre rupture") angesehen /21/ (vgl. Abschn. 3.3.2.1). Aufgrund der physikalischen Wechselwirkungen zwischen Kontaktflächen (Beton) und Elastomer erfolgen zeitabhängige elastische und viskose Vorgänge /1/, die jedoch nicht zwangsläufig zu unvermeidbaren Schädigungen am Lagerkörper führen müssen (vgl. Abschn. 4.3.5.3 und 5.2.3). Dennoch leitet ein sog. "pre rupture" immer eine Zunahme der Kriechgeschwindigkeit ein (vgl. Abschn. 11).

In Bild 6.1 sind die Zeitstandfestigkeits-Diagramme für EPDM- und CR-Qualitäten dargestellt. Abhängig von den im Versuchsprogramm verwendeten Beanspruchungen können für einzelne Qualitäten Zeitstandlinien angegeben werden. Für die CR 1-Qualität ergibt sich ein strenger linearer Zusammenhang, bei der EPDM 1-Qualität ist entweder der Streubereich größer, oder der Verlauf zeigt einen Knick, ähnlich wie dies bei anderen Kunststoffen, z. B. bei Spannungsrißbildung, beobachtet wird /19/.

Für den CR 1-Werkstoff kann eine ausreichende Praxiserfahrung unterstellt werden, der Werkstoff wird z. B. auch bei bewehrtem Elastomerlager, u. a. im Brückenbau, verwendet. Eine qualitative Bewertung anhand der Zeitstandfestigkeit der Elastomerqualitäten untereinander ergibt folgende Bewertung:

- CR 1 zeigt von allen untersuchten Elastomerqualitäten die beste Zeitstandfestigkeit. Die Qualitäten CR 2.1 und CR 2 lassen selbst bei hohen Pressungen ($\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$), verglichen mit EPDM-Qualitäten bei niedrigeren Pressungen besseres Zeitstandfestigkeitsverhalten erwarten. CR 4 zeigt von allen CR-Qualitäten das ungünstigste Zeitstandverhalten, verhält sich jedoch bei mäßigen Pressungen deutlich besser als die EPDM-Qualitäten.
- EPDM 3.1 läßt das günstigste Zeitstandverhalten innerhalb der EPDM-Qualitäten erwarten und zeigt bei hohen Pressungen ($\sigma_m = 60 \text{ N/mm}^2$) ein vergleichbares "pre rupture" wie die CR 2-Qualität. Für die weiteren EPDM-Qualitäten ergibt sich die Reihenfolge der qualitativen Wertigkeit: EPDM 2, EPDM 3, EPDM 1, EPDM 3.2, EPDM 4.
- Profilierte Lager (EPDM 4, EPDM 3.2, CR 4) weisen ungünstigeres Zeitstandverhalten als kompakte Lager auf.

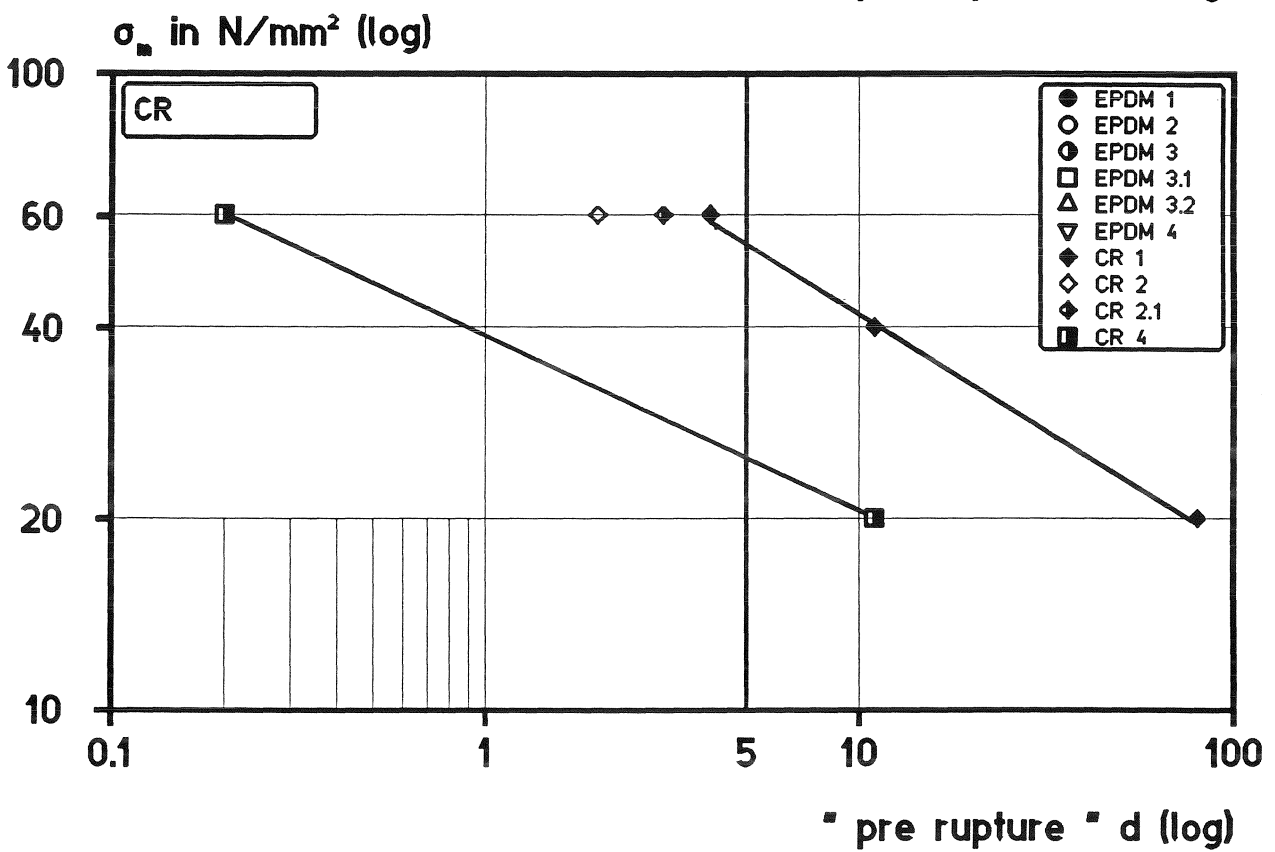
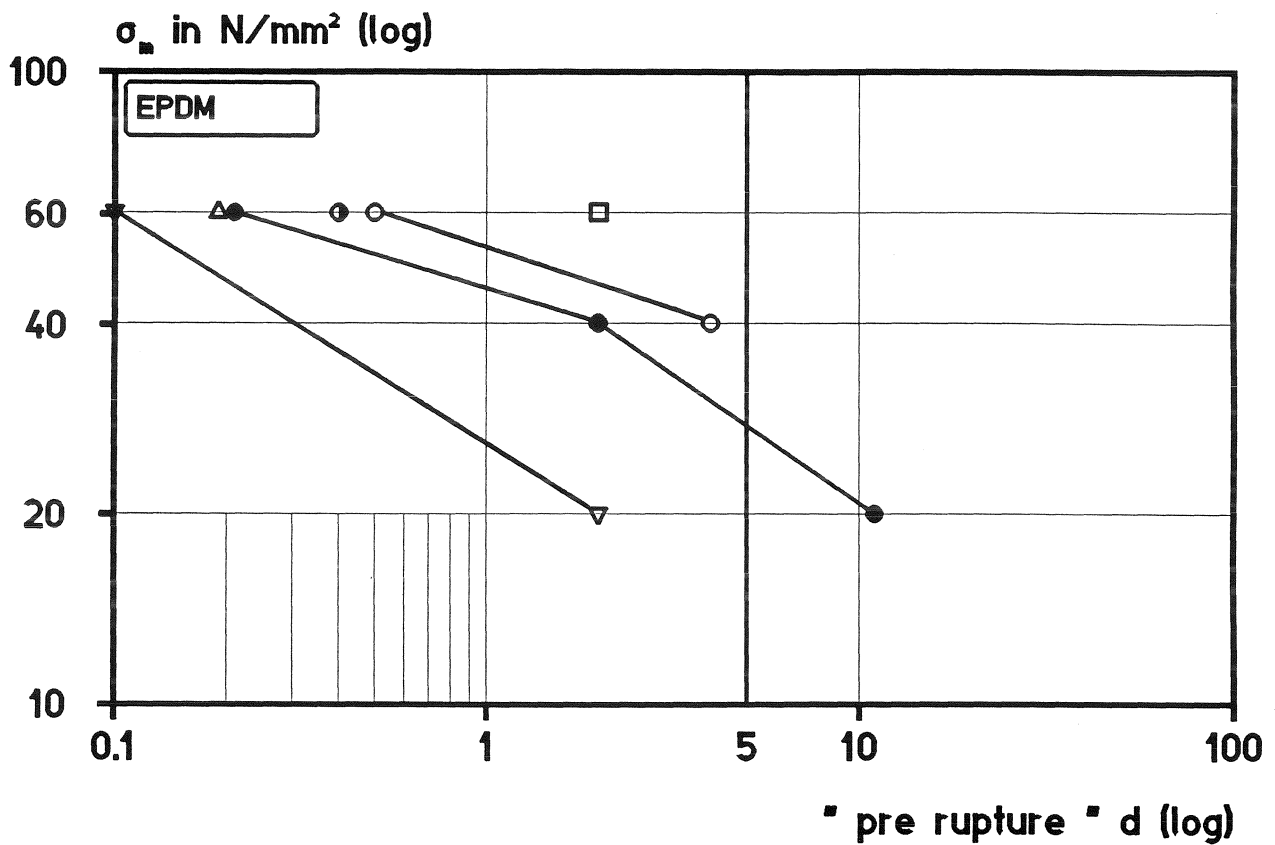


Bild 6.1: Zeitstandfestigkeits-Diagramm, Lagerdicke $t = 10$ mm

6.3 Integraler Gütewert

Das Dauerstandverhalten ist gemäß /3/ anhand der Kriterien

- Anfangsverformung ϵ_1 (vgl. Bild 5.12)
- Kriechzahl nach 100 d Belastungsdauer φ_{t100} (vgl. Bild 5.15)
- Schädigung des Lagerkörpers SG (vgl. Bild 5.18)

zu beurteilen. Aus den drei Bewertungskriterien läßt sich ein sogenannter "Gütewert (GW)" zusammenfassen, der maßgebliche Verformungen und Schädigungen berücksichtigt. Der Gütewert wird nach folgendem Zusammenhang ermittelt:

$$GW = \epsilon_1 \times \varphi_{t100} \times SG [-]$$

In Bild 6.2 sind die Gütewerte in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach Elastomerqualitäten und Lagerdicken, zusammengestellt. Die resultierenden Ergebnisse lassen sich tendenziell wie folgt präzisieren:

- 10 mm dicke EPDM-Qualitäten weisen oberhalb der maximalen Schubspannung, die aus den zulässigen Beanspruchungen gemäß /2/ resultieren, Gütewerte $\geq 2,0$ auf. Mäßige Beanspruchungen führen zu Gütewerten $< 1,0$.
- 5 mm dicke EPDM-Lager führen auch bei sehr niedrigen Schubspannungen zu Gütewerten $> 2,0$.
- Abgesehen von profilierten Lagern (CR 4) führen hohe Beanspruchungen (Schubspannungen bis 30 N/mm^2) an 10 mm dicken CR-Lagern zu Gütewerten $< 2,0$.
- Dünne CR-Lager ($t = 5 \text{ mm}$) führen innerhalb der Beanspruchungen der Norm /2/ zu Gütewerten überwiegend $< 2,0$.
- Für die rechnerische Schubspannung der Dauerstandversuche gemäß /3/ ($19,2 \text{ N/mm}^2$) kann bei EPDM-Lagern ein Gütewert $< 2,0$ für EPDM 2, und bei CR-Qualitäten für CR 1, CR 2 und CR 2.1 erwartet werden.

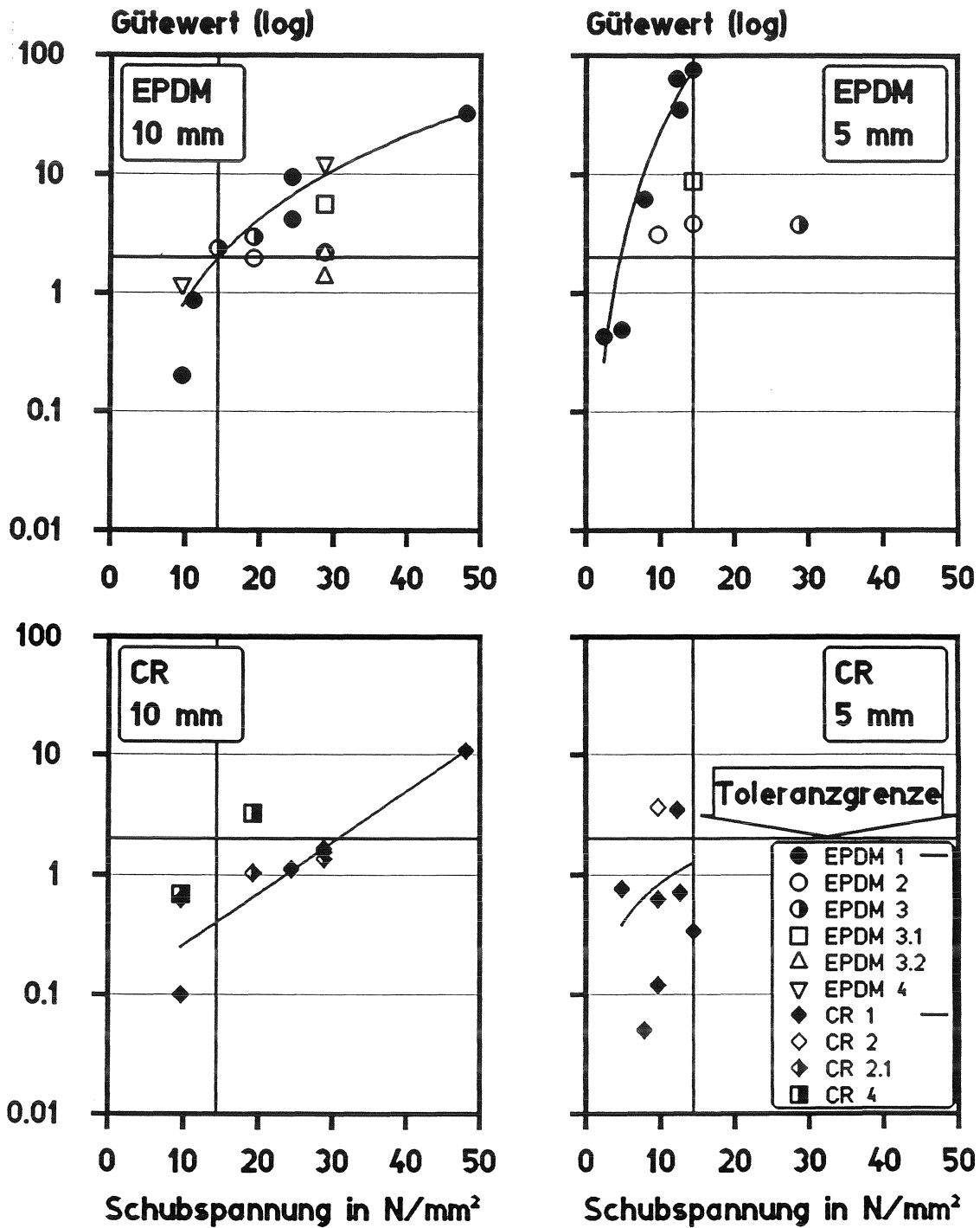


Bild 6.2: Integraler Gütwert in Abhängigkeit von der maximalen rechnerischen Schubspannung, differenziert nach Elastomerqualitäten und Lagerdicke

6.4 Anforderungskriterien

Zur Beurteilung des ausreichenden Dauerstandverhaltens unbewehrter Elastomerlager (innerhalb zulässiger Beanspruchungen gemäß der Norm /2/ erscheinen folgende Anforderungskriterien hinreichend:

- Zur überschläglichen Beurteilung des ausreichenden Dauerstandverhaltens in Kurzzeitversuchen gemäß /3/, unter einer mittleren Pressung von 40 N/mm^2 , muß ein Mindestmaß für das "pre rupture" von $> 5 \text{ d}$ gefordert werden (Bild 6.1). Dieser Wert wird bei EPDM-Qualitäten voraussichtlich nur bei niedrigeren Pressungen ($< 40 \text{ N/mm}^2$) erreicht.
- Baupraktisch erscheint der integrale Gütewert geeignet, das Dauerstandverhalten zu beurteilen. Nach Dauerstandversuchen gemäß /3/ darf ein Gütewert von 2,0 nicht überschritten werden.

7 BAUPRAKTISCHE VERWERTBARKEIT

7.1 Prüfverfahren

Das Prüfverfahren zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit /3/ (vgl. Abschn. 2.5.2.2.2) erweist sich als geeignet, Beurteilungskriterien für die baupraktische Fragestellung zu liefern. Dagegen erscheinen Kurzzeit- und vergleichbare Druckkriechversuche unter künstlicher Wärmebeanspruchung (vgl. Abschn. 5.1.5.1) nicht geeignet, aussagekräftige Zusammenhänge zu formulieren. Aus den in Abschnitt 5 niedergelegten Überlegungen können tendenzielle Aussagen über die Eignung verschiedener

- Elastomertypen
- Elastomerqualitäten
- Lagerdicken

abgeleitet werden, die für die Zielgröße

- Gütewert

relevant erscheinen. Zur Erfassung der komplexen Vorgänge im Lagerspalt erweist sich als baupraktisch sinnvoll, die Merkmale Anfangsverformung, Kriechzahl und Schädigungsgrad zu einem integralen Gütewert zusammenzufassen. Für die speziellen Randbedingungen des in der Norm beschriebenen Prüfverfahrens ist zur Gewährleistung ausreichender Dauerstandfestigkeit und Funktionsfähigkeit des Lagers ein Gütewert $< 2,0$ zu fordern.

Das Dauerstandverhalten der Elastomere (EPDM und CR) ist hersteller- und rezepturabhängig. Baupraktische Aussagen über das Dauerstandverhalten können erst nach Dauerstandversuchen mit deutlich erhöhten mittleren Pressungen von 40 und 60 N/mm² und in besonderen Fällen nach einer Beanspruchungsdauer deutlich länger als 100 d gewonnen werden.

7.2 Lagerungsklasse 1

7.2.1 Normungswesen

Die Auswertung der vorliegenden Forschungsergebnisse an allen derzeit verfügbaren zulassungs- bzw. normgerechten EPDM- und CR-Qualitäten erlaubt die Formulierung nachfolgender baupraktischer Aussagen:

- CR-Lager weisen ausreichende Dauerstandfestigkeit innerhalb der zulässigen Beanspruchungen und der besonderen Geometrie einschränkungen /2/ bis zu mittleren Pressungen von 12 N/mm² auf.
- EPDM-Qualitäten weisen innerhalb der Regelungen der Norm /2/ nicht uneingeschränkt für alle Qualitäten und Beanspruchungen ausreichendes Dauerstandverhalten auf. EPDM kann daher nicht als genereller Baustoff in die Norm /2/ aufgenommen werden.

7.2.2 Zulassungswesen

- EPDM-Qualitäten weisen innerhalb der Regelungen der bauaufsichtlichen Zulassungen /5/ sowohl für kompakte als auch für profilierte Lager ausreichendes Dauerstandverhalten bis zu mittleren Pressungen von 5 N/mm² auf. Dies gilt für profilierte CR-Lager gleichermaßen.
- Dünne Lager führen bei EPDM-Qualitäten zu Einschränkungen hinsichtlich der zulässigen mittleren Pressungen.

7.3 Lagerungsklasse 2

- Für Lager der Lagerungsklasse 2 mit Einschränkungen, u. a. hinsichtlich der Verdrehungen, sind für CR-Lager ständige mittlere Pressungen bis zu 20 N/mm² für das Dauerstandverhalten unbedenklich, wenn ein geeigneter

Nachweis, mindestens unter den in /3/ geregelten Versuchsbedingungen zum Dauerstandverhalten, erbracht wird. Für besondere Lagergeometrien und dünne Lagerdicken sind ggf. besondere Veruchparameter erforderlich.

- Für günstige EPDM-Qualitäten sind gegenüber den Zulassungen ebenfalls erhöhte Pressungen denkbar, allerdings gelten die zuvor getroffenen Einschränkungen hinsichtlich der Lagergeometrie, der Lagerdicke und der Pressung gleichermaßen. Bei EPDM-Qualitäten muß zusätzlich empfohlen werden, die Beanspruchungsdauer deutlich zu erhöhen (z. B. auf 180 d).

8 WEITERE FORSCHUNGSARBEITEN

Die vorliegenden Ergebnisse scheinen geeignet, maßgebliche Hinweise auf das Dauerstandverhalten elastomerer Werkstoffe unter hohen mechanischen Beanspruchungen zu liefern. Es liegt die Vermutung nahe, daß hersteller- und rezepturspezifische Einflüsse das Dauerstandverhalten wesentlich beeinflussen. Im Rahmen des in /2/ geregelten Analysenganges mit vergleichsweise groben Grenzbereichen (vgl. Bild 3.1) sind solche Einflüsse offensichtlich nicht eingrenzbar. Weitere Untersuchungen sollten daher eine Korrelation des Dauerstandverhaltens mit

- der Vernetzungsdichte (Anzahl der Vernetzungsstellen je Volumenelement)
 - dem Schwefelgehalt oder vergleichbarer Reagenzien zur Vulkanisation
- ermöglichen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Dauerstandverhalten ausschließlich anhand der Kriechfunktion und des Schädigungsgrades betrachtet. Die bau- praktisch relevante Funktionsfähigkeit der Lager nach langer und erhöhter Beanspruchung wurde außer Acht gelassen. Wichtige Zielgrößen zur Beurteilung der Restfestigkeit und -elastizität sind

- physikalische Kennwerte (z. B. Reißdehnung)
 - mechanische Kennwerte (z. B. Federlinie, Rückstellmomente, Schubmodul)
- vor und nach Dauerstandversuchen.

Das diskutierte Forschungsvorhaben berücksichtigt ausschließlich statische Beanspruchungen. Baupraktisch sind jedoch dynamische und/oder alternierende Beanspruchungen durch

- Vertikallasten
- Verdrehungen
- Schubverformungen

nicht auszuschließen. Allgemein herrscht die Auffassung, daß solche Beanspruchungen

- zu einer progressiven Zunahme der Kriechverformungen führen können
- zum Wandern des Lagers ("Kirschkerneffekt") führen können, was derzeit zu einer Beschränkung des Anwendungsbereiches unbewehrter Lager geführt hat.

Letztlich übt die Anfangsverformung und der Reibungsschluß einen maßgeblichen Einfluß auf das Dauerstandverhalten aus. Die vertikale Einfederung führt dabei nicht nur zu übermäßigen Zugbeanspruchungen des Elastomeren, sondern auch durch die horizontale Lagerausbreitung zu in der Lagerstatik unberücksichtigten kritischen Spannungszuständen /1/.

Von vorrangigem Interesse ist daher die Untersuchung des Dauerstandverhaltens von Elastomerlagern und der Beanspruchung angrenzender Bauteildruckflächen in Abhängigkeit von der Kontaktflächenbeschaffenheit

- glatt geschaltete Betonflächen (z. B. B 55)
- Lagerdruckflächen aus kunststoffmodifizierten Mörteln oder Polymerbeton (z. B. Bei Lagerungen von Maschinenfundamenten oder Rohrleitungen)
- Stahl mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung (gestrahlt, glatt beschichtet, Korrosionsschutz)
- kombinierte Kontaktflächen (z. B. Beton und korrosionsgeschützter Stahl).

Mit zunehmender Lagertemperatur steigt die Kriechneigung (vgl. Abschn. 3.3.2.1). Das vorgesehene Spektrum der Einsatztemperaturen reicht von -25 °C bis $+50\text{ °C}$ (vgl. Abschn. 2.5.2.1), vielfach werden unbewehrte Elastomerlager höheren Temperaturen (z. B. Lagerungen im Maschinen- und Anla-

genbau, Fassadenelemente) ausgesetzt. Systematische Untersuchungen unter baupraktischen Randbedingungen (z. B. Kontaktflächenbildungen) sind nicht bekannt. Insbesondere für Sonderfälle im Industriebau ist von technischem Interesse, inwieweit sich erhöhte Umgebungstemperaturen ($> 23\text{ }^{\circ}\text{C}$) auf das Fließ- und Kriechverhalten auswirken.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ MUELLER, F. ; SASSE, H.R. ; THORMAEHLEN, U.: STUETZENSTOESSE IM STAHLBETON-FERTIGTEILBAU MIT UNBEWEHRTEN ELASTOMERLAGERN. BERLIN : ERNST & SOHN - IN: SCHRIFTENREIHE DES DEUTSCHEN AUSSCHUSSES FUER STAHLBETON (1982), NR. 339
- /2/ DIN 4141 TEIL 15 ENTWURF 04.88. LAGER IM BAUWESEN; UNBEWEHRTE ELASTOMERLAGER; BAULICHE DURCHBILDUNG UND BEMESSUNG
- /3/ DIN 4141 TEIL 150 ENTWURF 04.88. LAGER IM BAUWESEN; UNBEWEHRTE ELASTOMERLAGER; BAUSTOFFE UND UEBERWACHUNG
- /4/ BREITBACH, M.: DAUERSTANDVERHALTEN HOCHBELASTETER UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER IN STUETZENSTOESSEN DES BETONFERTIGTEILBAUES. AACHEN : INSTITUT FUER BAUFORSCHUNG DER RWTH AACHEN, 1988. - FORSCHUNGS-BERICHT NR. F 179
- /5/ RICHTLINIEN FUER DIE HERSTELLUNG UND VERWENDUNG VON UNBEWEHRTEN ELASTOMERLAGERN. IN: MITTEILUNGEN DES INSTITUTS FUER BAUTECHNIK 3 (1972), NR. 6, S. 7-9
- /6/ DIN 4141 TEIL 3 09.84. LAGER IM BAUWESEN; LAGERUNG FUER HOCHBAUTEN
- /7/ SASSE, H.R.: GLEIT- UND VERFORMUNGSLAGER IM HOCH- UND BRUECKENBAU. IN: VDI-BERICHTE (1980), NR. 384, S. 103-111
- /8/ DIN 4141 TEIL 14 09.85. LAGER IM BAUWESEN; BEWEHRTE ELASTOMERLAGER; BAULICHE DURCHBILDUNG UND BEMESSUNG
- /9/ TILTMANN, K.O.: TOLERANZEN BEI STAHLBETONFERTIGTEILEN : NORMEN, GROESSEN UND KOSTEN. KOELN-BRAUNSFELD : MUELLER, 1977
- /10/ KESSLER, E.: DIE ANWENDUNG UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER. IN: BETONWERK UND FERTIGTEIL-TECHNIK 53 (1987), NR. 6, S. 419-429
- /11/ ROESSLER, G.: VERTEILUNG DER PRESSUNG IN DER FUGE VON ELASTOMER-GELAGERTEN BAUTEILEN. AACHEN : INSTITUT FUER BAUFORSCHUNG DER RWTH AACHEN, 1986/87 FORSCHUNGSBERICHT NR. F 233
- /12/ TOPALOFF, B.: GUMMILAGER FUER BRUECKEN - BERECHNUNG UND ANWENDUNG. IN: BAUINGENIEUR 39 (1964), NR. 2, S. 50-64
- /13/ ASTM D 1418-85 STANDARD PRACTICE FOR RUBBER AND RUBBER LATICES - NOMENCLATURE. PHILADELPHIA : AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 1985
- /14/ GOHL, W. ; BARTZ, W.J.: ELASTOMERE : DICHT- UND KONSTRUKTIONSWERK-STOFFE. GRAFENAU/WUERTEMBERG : EXPERT VERLAG, 1983 - REIHE KONTAKT & STUDIUM 5 (1983) KONSTRUKTION (BARTZ, W.J. (HRSG.))
- /15/ HOFMANN, W.: KAUTSCHUK-TECHNOLOGIE. UERDINGEN : BAYER AG, 1973

- /16/ FREAKLEY, P.K. ; PAYNE, A.R.: THEORY AND PRACTICE OF ENGINEERING WITH RUBBER. LONDON : APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, 1978
- /17/ TOBOLSKY VON, A. ; HOFFMANN, M.: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN UND STRUKTUR VON POLYMEREN. STUTTGART : BERLINER UNION, 1967 -
- /18/ BRAUN, D. ; WENDORFF, J.H.: UNTERSUCHUNGEN VON MOLEKULAREN VERSÄGELSVORGAENGEN IN ELASTOMEREN. IN: KAUSCHUK GUMMI KUNSTSTOFFE 33 (1980), NR. 10, S. 821-829
- /19/ WESCHE, K.: BAUSTOFFE FUER TRAGENDE BAUTEILE. BAND 4: HOLZ UND KUNSTSTOFFE. 2. AUFL. WIESBADEN : BAUVERLAG, 1988
- /20/ SASSE, H.R. ; SCHORN, H.: ELASTOMER ALS BAULAGER : STAND DER ENTWICKLUNG. IN: PLASTICONSTRUCTION 1 (1971), NR. 5, S. 214-227
- /21/ WOOD, L.A.: REPRESENTATION OF LONG-TIME CREEP IN A PURE-GUM RUBBER VULKANIZATE. IN: RUBBER CHEMISTRY AND TECHNOLOGY 54 (1981), NR. 2, S. 331-346
- /22/ DIN 53 547 02.81. PRUEFUNG VON KAUSCHUK UND ELASTOMEREN; BESTIMMUNG DES KRIECHENS VON ELASTOMEREN BEI DRUCKBEANSPRUCHUNG
- /23/ FLOHRER, M.: UNTERSUCHUNGEN UEBER DIE EIGNUNG UNBEWEHRTER ELASTOMERLAGER ALS BAULAGER. IN: BETONSTEIN-ZEITUNG 37 (1971), NR. 11, S. 707-718
- /24/ KORDINA, K. ; OSTEROTH, H.-H.: ZUR AUFLAGERUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN MITTELS UNBEWEHRTER UND BEWEHRTER ELASTOMERLAGER. IN: BAUINGENIEUR 59 (1984), S. 461-466
- /25/ EGGERT, H. ; GROTE, J. ; KAUSCHKE, W.: LAGER IM BAUWESEN : ENTWURF BERECHNUNG VORSCHRIFTEN (BAND I). BERLIN : ERNST & SOHN, 1974
- /26/ BELL, L.W. ; SHLOSS, A.L. ; SUBRAMANIAN, N.S.: ADDITIONAL DESIGN DATA BASED ON FULL-SIZE BRIDGE BEARING PADS OF NEOPRENE. DETROIT : AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1981 - (ACI SP-70, VOL. 2) IN: JOINT SEALING AND BEARING SYSTEMS FOR CONCRETE STRUCTURES, S. 1087-1099
- /27/ BATTERMANN, W.: BAULAGER AUS SYNTHETISCHEN ELASTOMEREN. IN: KUNSTSTOFFE IM BAU (1966), NR. 7
- /28/ DIN 4141 TEIL 140 ENTWURF 12.87. LAGER IM BAUWESEN; BEWEHRTE ELASTOMERLAGER; BAUSTOFFE, ANFORDERUNGEN, PRUEFUNGEN UND UEBERWACHUNG
- /29/ BOCK, H.M.: EIN BEITRAG ZUR BERECHNUNG DES EBENEN VERFORMUNGSZUSTANDES VON ELASTOMERLAGERN MIT HILFE DER METHODE DER FINITEN ELEMENTE. DISSERTATION AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITAET BERLIN, 1976

- /30/ LEHMANN, D.: ANWENDUNG DER NICHTLINEAREN ELASTIZITÄTSTHEORIE UND DES MEHRSTELLEN-DIFFERENZEN-VERFAHRENS ZUR BERECHNUNG DES EBENEN VERFORMUNGSZUSTANDES VON ELASTOMER-LAGERN. DISSERTATION AN DER TU BERLIN, 1976
- /31/ ROSS, A.D.: CONCRETE CREEP DATA. IN: THE STRUCTURAL ENGINEER 15 (1937), NR. AUG., S. 314-326
- /32/ WITTMANN, F.H. ; SETZER, M.J.: VERGLEICH EINIGER KRIECHFUNKTIONEN MIT VERSUCHSERGEBNISSEN. IN: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH 1 (1971), S. 679-690
- /33/ EHRENSTEIN, G.W.: DAS KRIECHEN VON THERMOPLASTEN. IN: KONSTRUKTION ELEMENTE METHODEN (KEM) (1977), NR. 5, S. 69-78

9 BEGRIFFE UND 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-Dienterpolymere
φ_k	Kriechzahl, 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 /12/
F_z	Summe aller Lasten normal zur Lagerebene
G	Schubverformungsmodul (Rechengröße, $G = 1 \text{ N/mm}^2$)
γ	Schubverformungswinkel des Lagers
h	Stunde
NR	Naturkautschuk
μ	Querdehnzahl
φ_k	Kriechzahl, $\varphi_k = \frac{\epsilon_k}{\epsilon_{el}}$
φ_∞	aus einem bestimmten Belastungsintervall extrapoliertes Endkriechmaß nach Ross (vgl. Bild 4.5)
$\varphi_{1\infty}$	Endkriechmaß extrapoliert aus dem Belastungsintervall $T_1 \leq T \leq T_2$ vgl. Bild 4.5)
$\varphi_{2\infty}$	Endkriechmaß extrapoliert aus dem Belastungsintervall $T_3 \leq T \leq T_4$ bzw. $T_3 \leq T \leq T_5$ (vgl. Bild 4.5)
φ_{t100}	Kriechzahl nach einer Belastungsdauer von 100 d

S	Formfaktor, Verhältnis der Lagerdruckflächen zu den freien Flächen
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 /12/

10 DOKUMENTATION DER KRIECHKURVEN

Nachfolgende Tabelle 10.1 erlaubt das Auffinden der einzelnen Kriechkurven und deren Bewertung innerhalb der Faktorkombinationen. Die einzelnen Kriechkurven (Kriechzahl als Funktion der Zeit) sind in den Bildern 10.1 bis 10.23 dargestellt.

Tabelle 10.1: Zuordnung der Kriechkurven (Bildnummer) zu der jeweiligen Faktorkombination

Elastomer- typ	Lager- fläche	Lager- dicke	Dreh- winkel	Bild Nr.			
				mittlere Pressung N/mm ²			
				20	40	60	100
EPDM 1	100 · 100	5	0	10.4	10.1		
			0.3	10.2		10.14	
		10	0	10.3			
			0.3				
		100 · 200	5	0			10.6
			10	0			
	200 · 200	5	0	10.7			
			0.3	10.8			
		10	0				
			0.3				
	EPDM 2	100 · 100	5		10.9		
	10			10.10			
EPDM 3	5			10.11			
10			10.12				
EPDM 3.1	5				10.13		
EPDM 3.2	10						
EPDM 4	10		10.16				
CR 1	100 · 100		5	0	10.17		
		0.3		10.18		10.15	
		10	0				
			0.3				
		100 · 200	5	0			10.19
			10	0			
	200 · 200	5	0				
			0.3	10.20			
		10	0				
			0.3				
	CR 2	100 · 100	5			10.21	
	10						
CR 2.1	10		10.22				
CR 4	10						

10.23

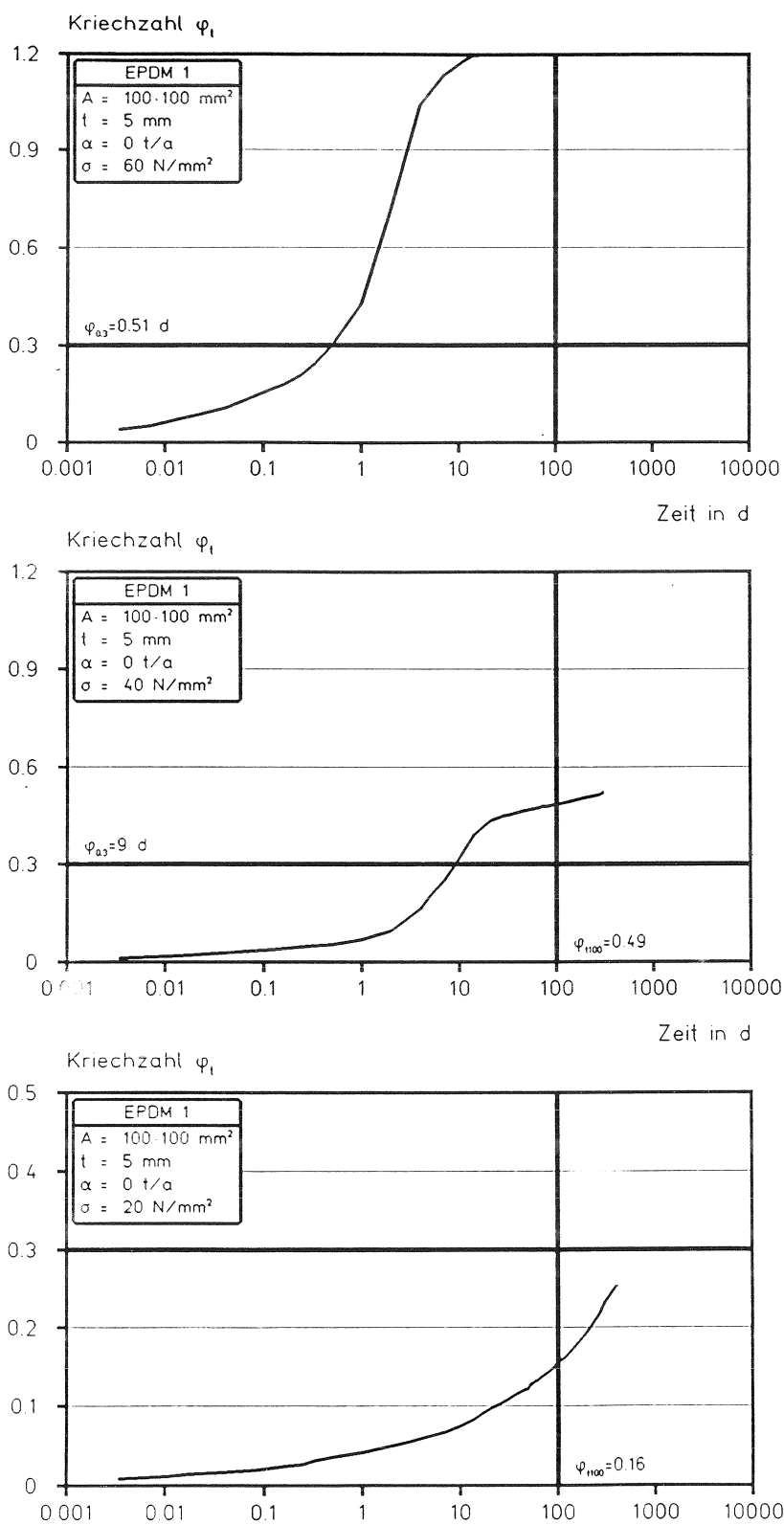


Bild 10.1: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Pressung

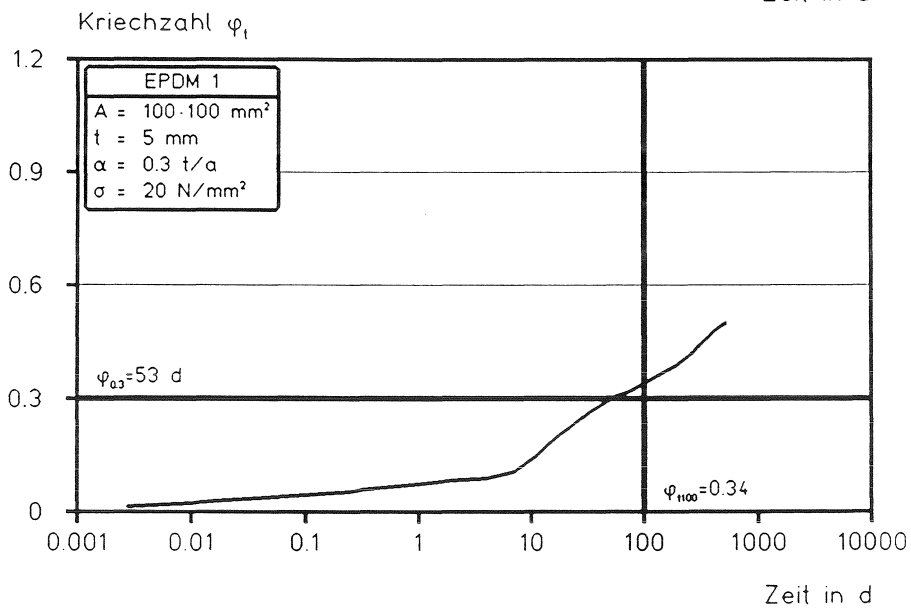
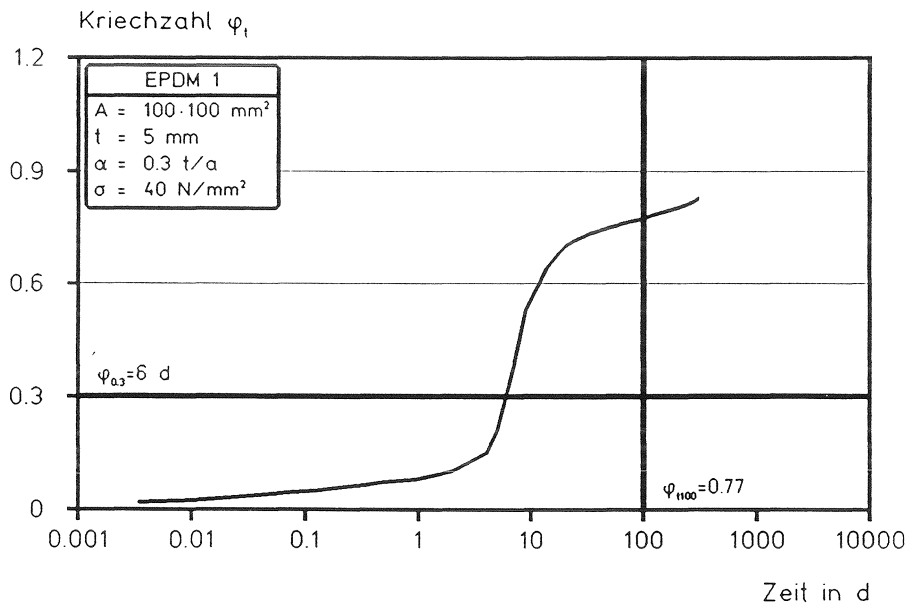


Bild 10.2: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Pressung

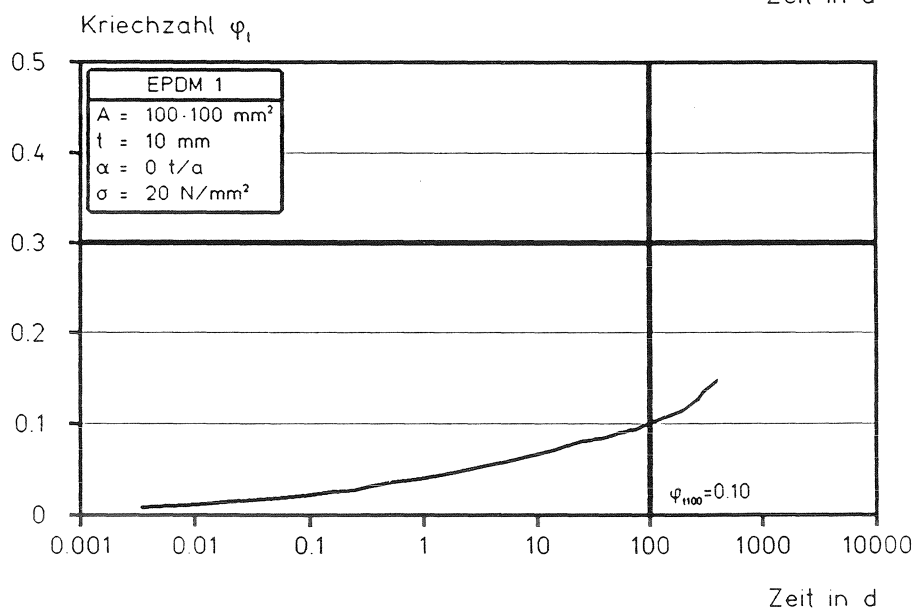
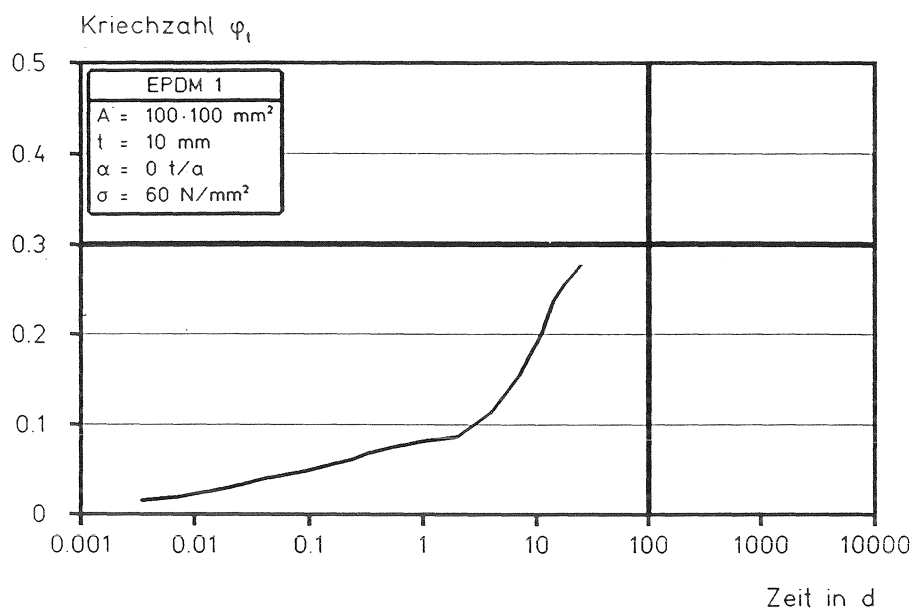


Bild 10.3: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Pressung

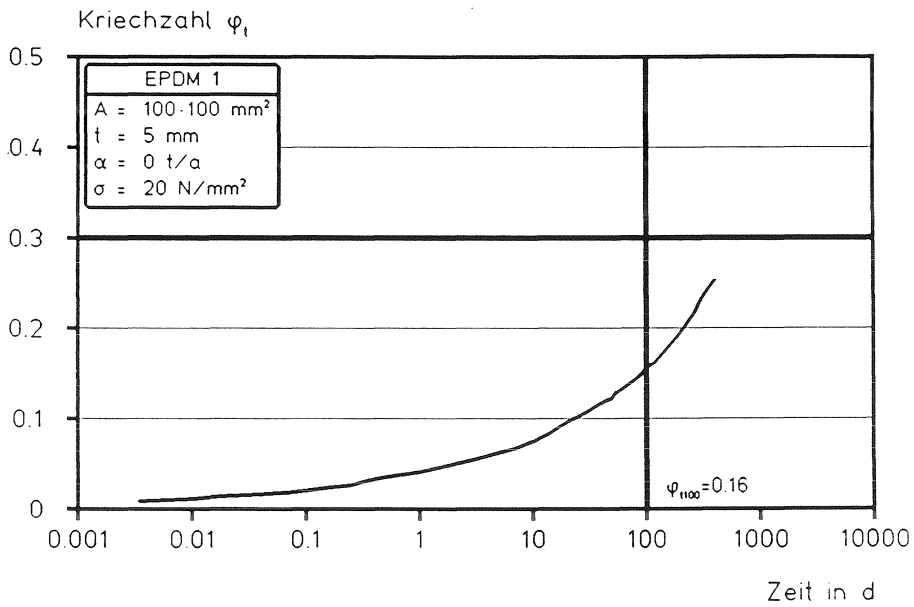
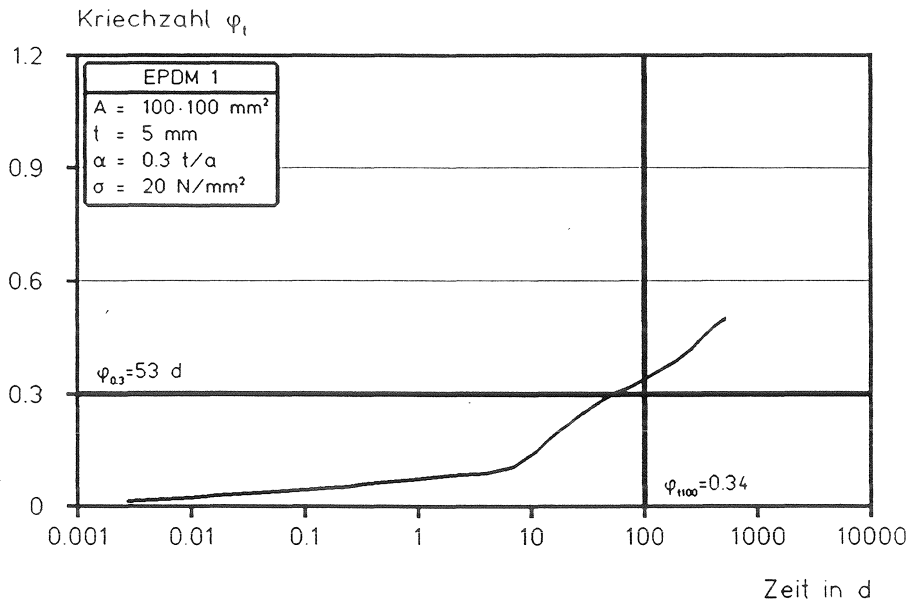


Bild 10.4: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Verdrehung

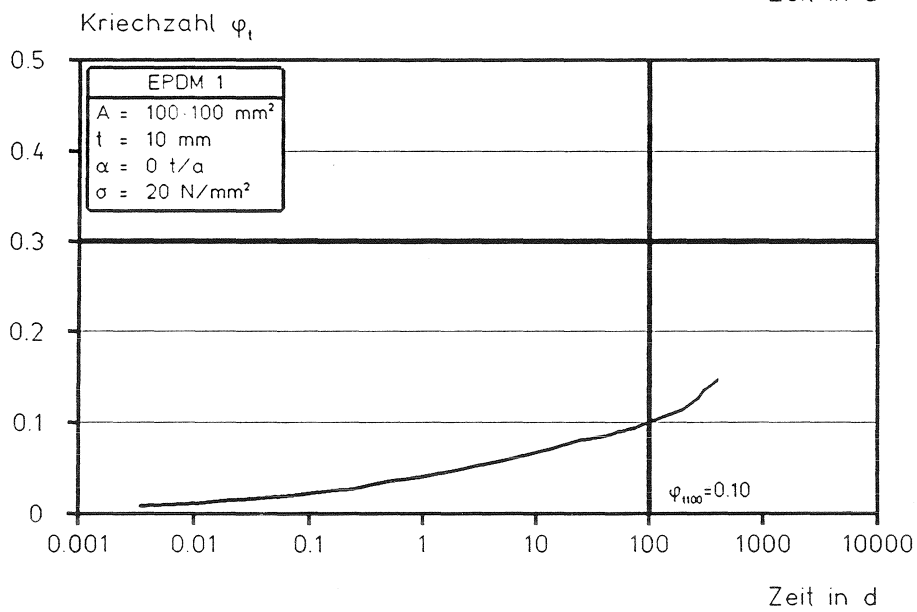
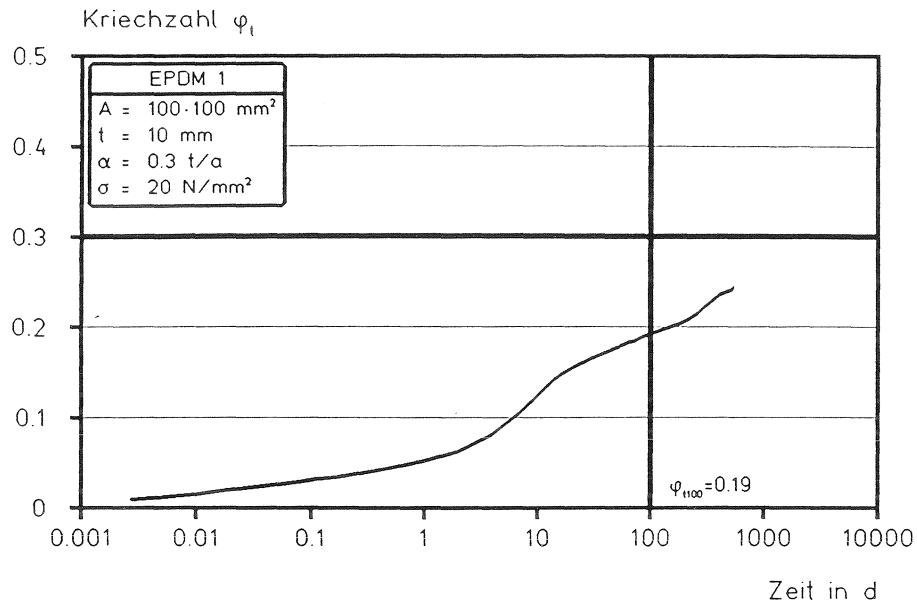


Bild 11.5: Kriechkurven
Elastomerqualität EPDM 1
Einfluß der Verdrehung

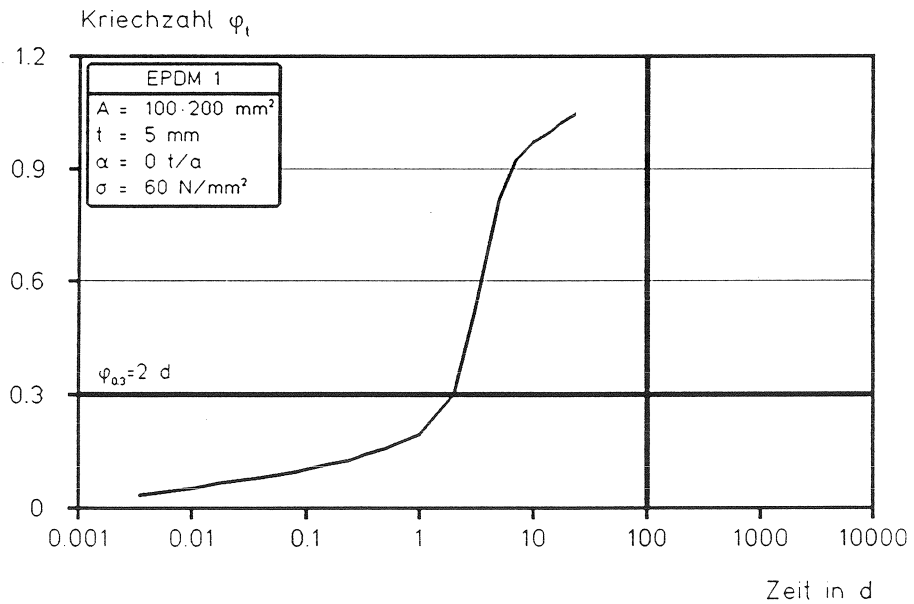
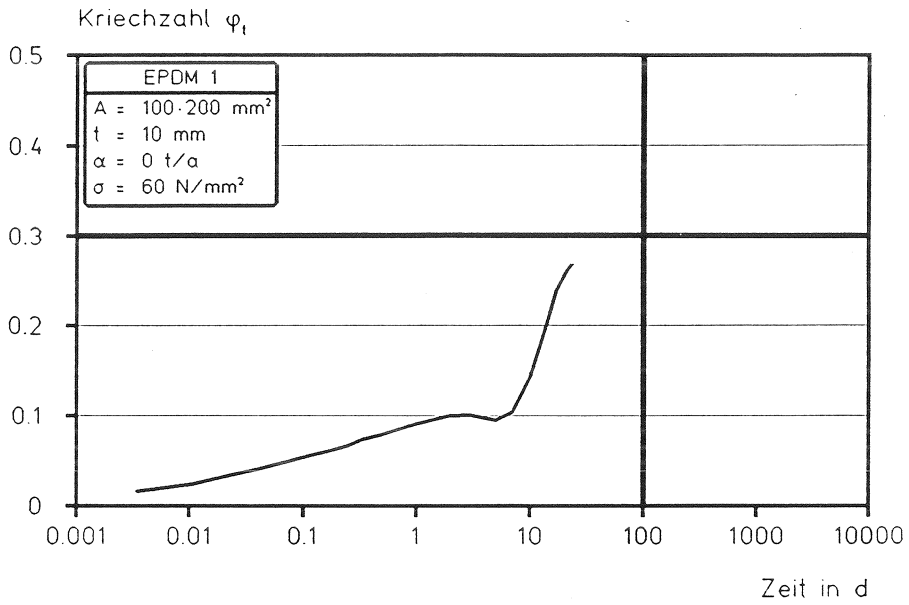


Bild 10.6: Kriechkurven
Elastomerqualität EPDM 1
Einfluß der Lagerdicke

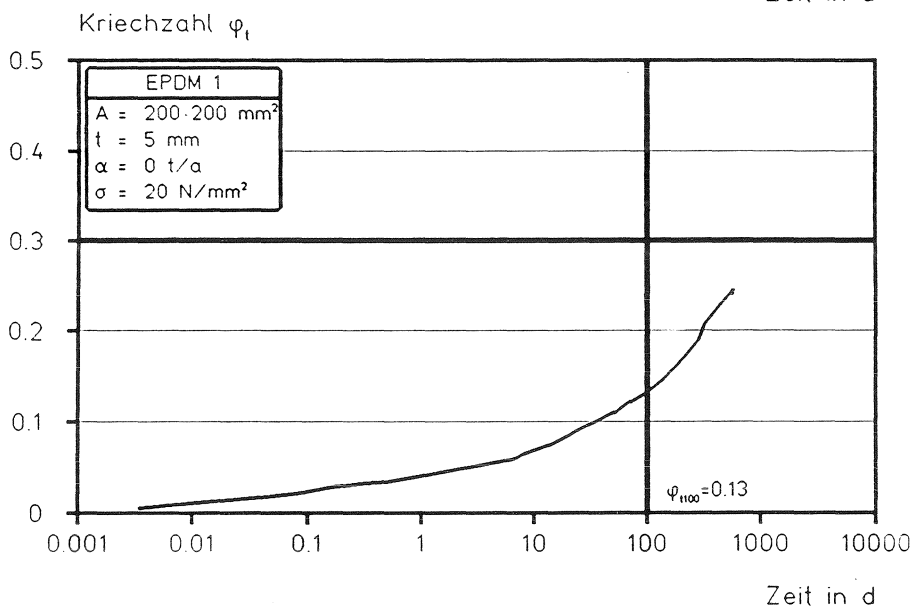
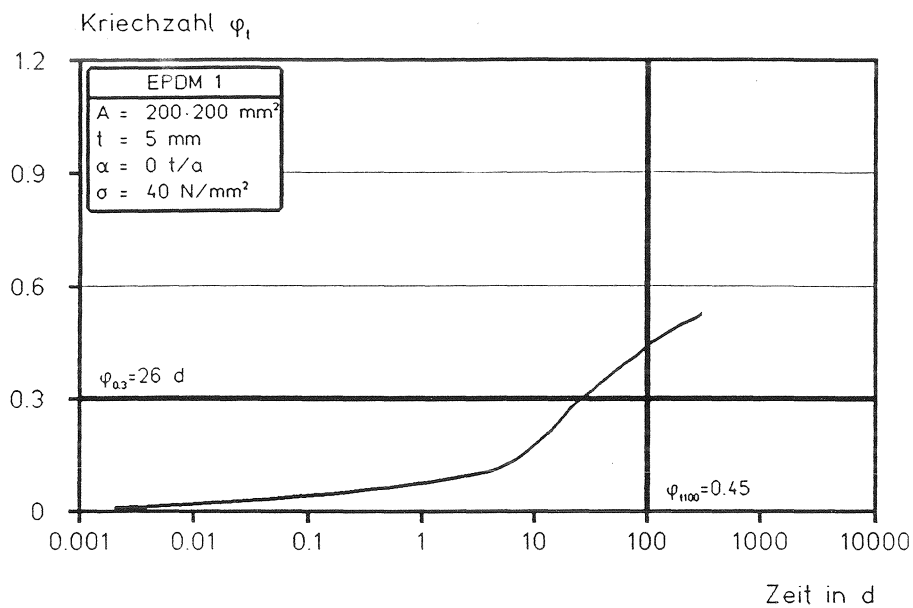


Bild 10.7: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Pressung

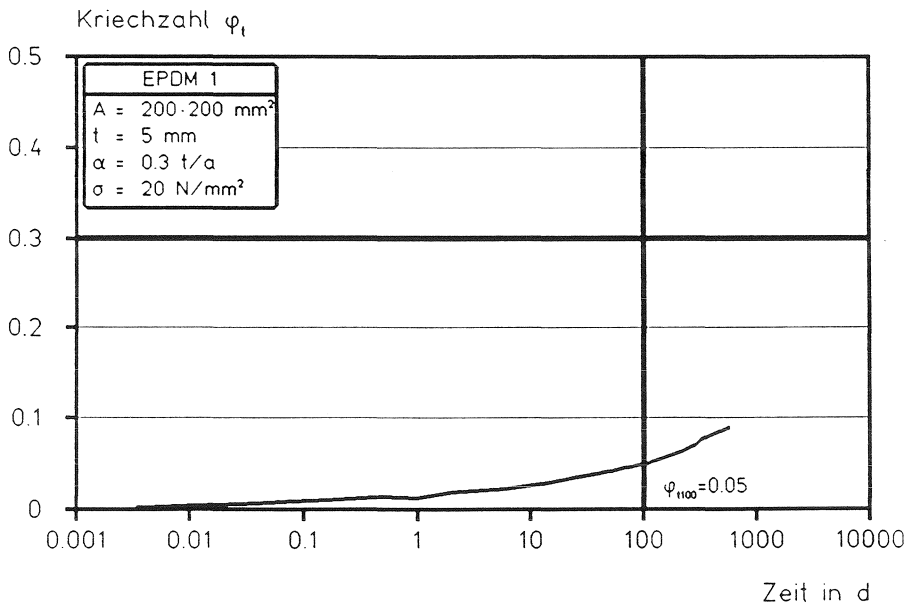
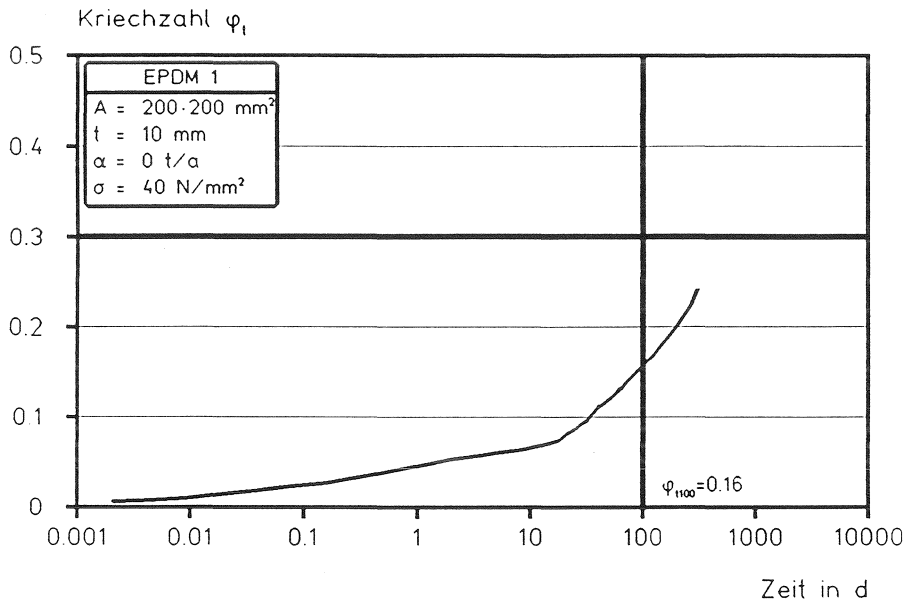


Bild 10.8: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Pressung, der Lagerdicke und der Verdrehung

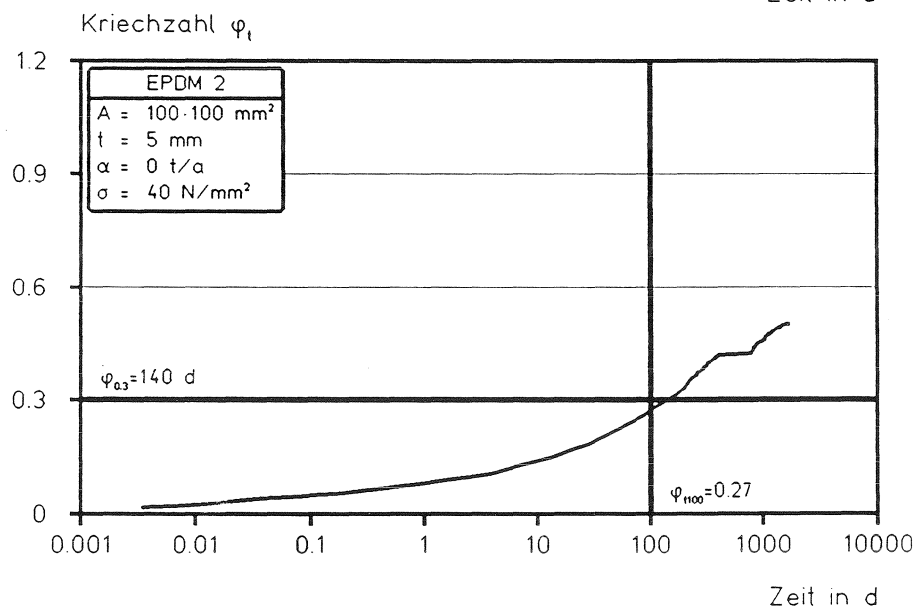
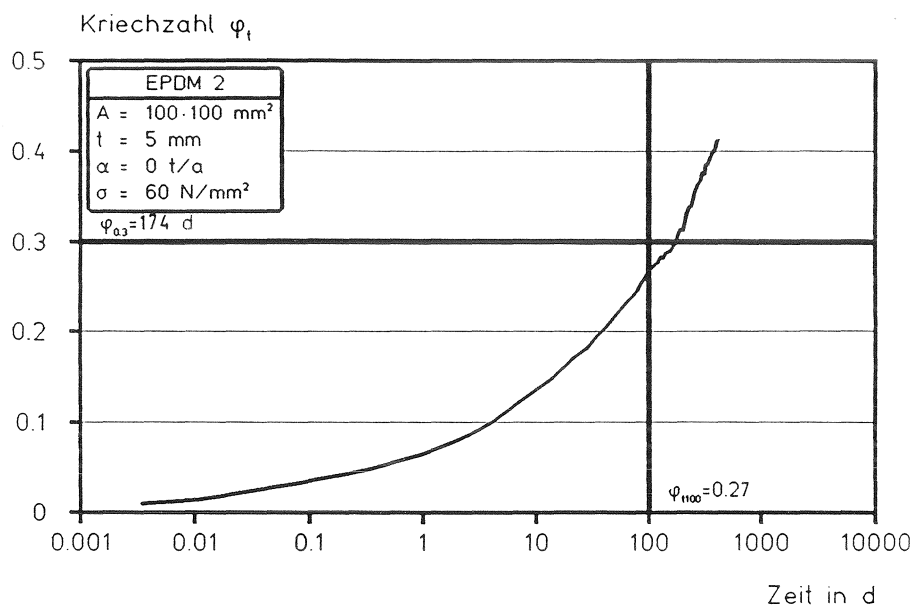


Bild 10.9: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 2
 Einfluß der Pressung

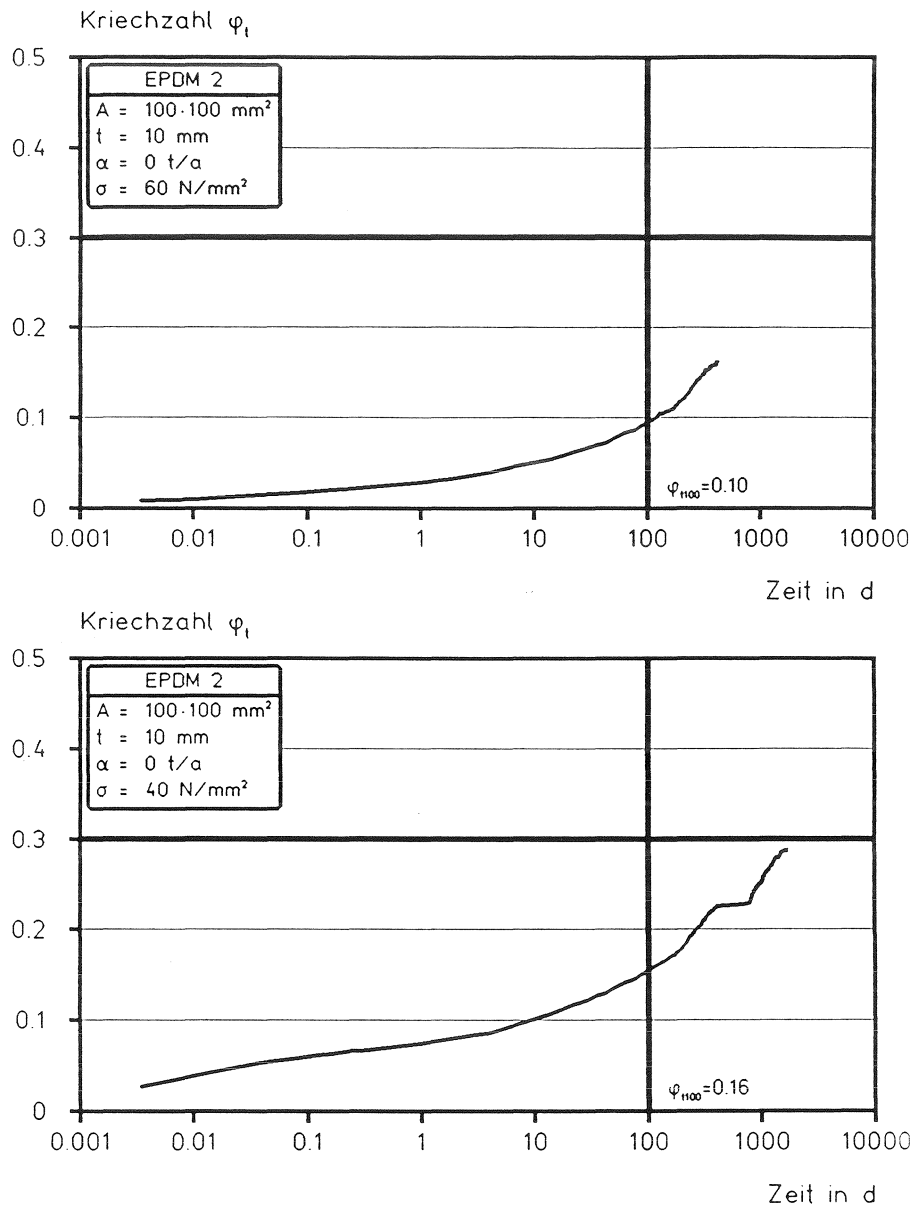


Bild 10.10: Kriechkurven
Elastomerqualität: EPDM 2
Einfluß der Pressung

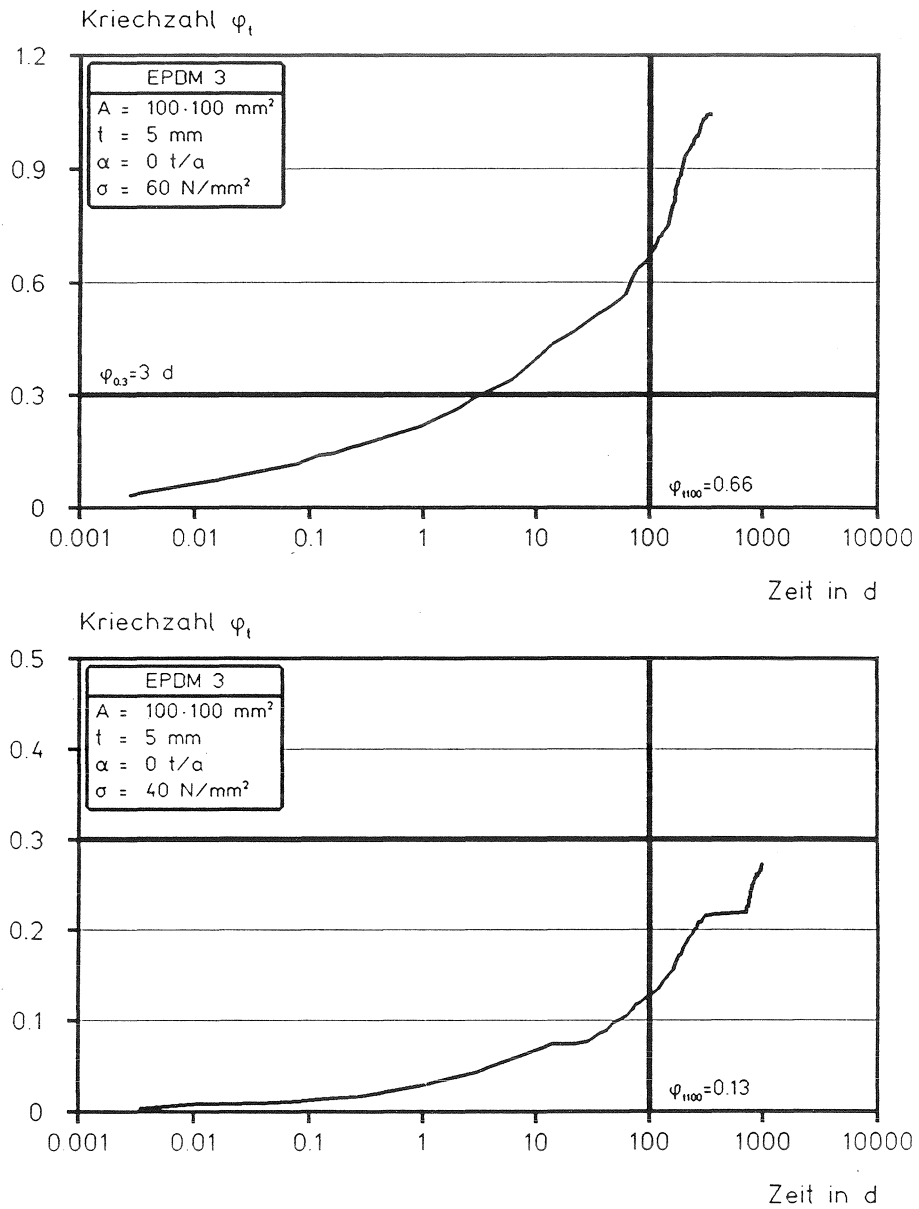


Bild 10.11: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 3
 Einfluß der Pressung

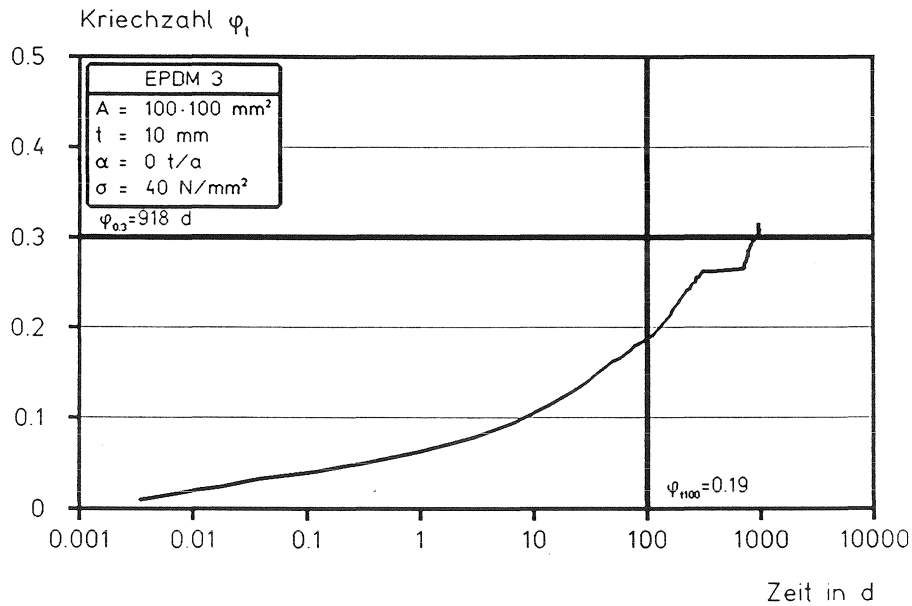
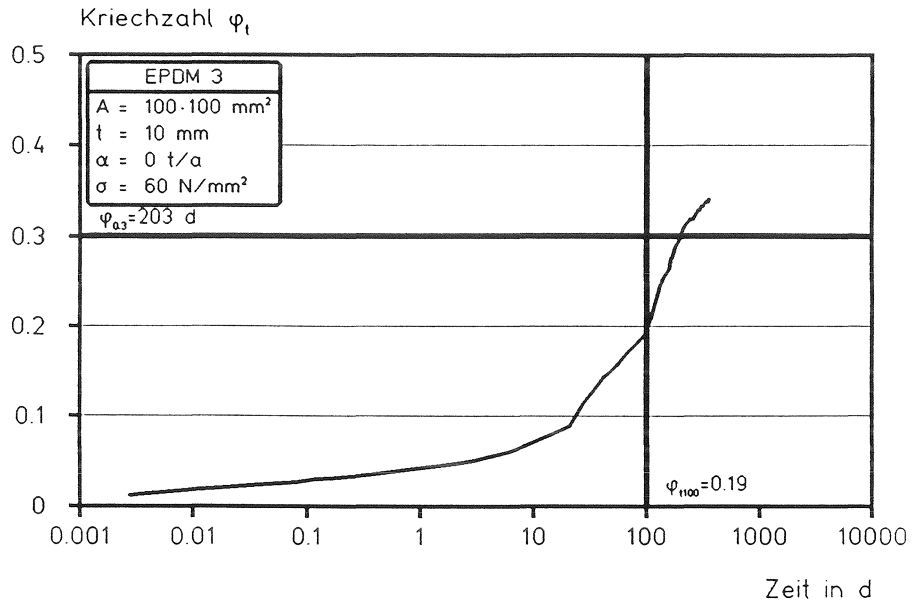


Bild 10.12: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 3
 Einfluß der Pressung

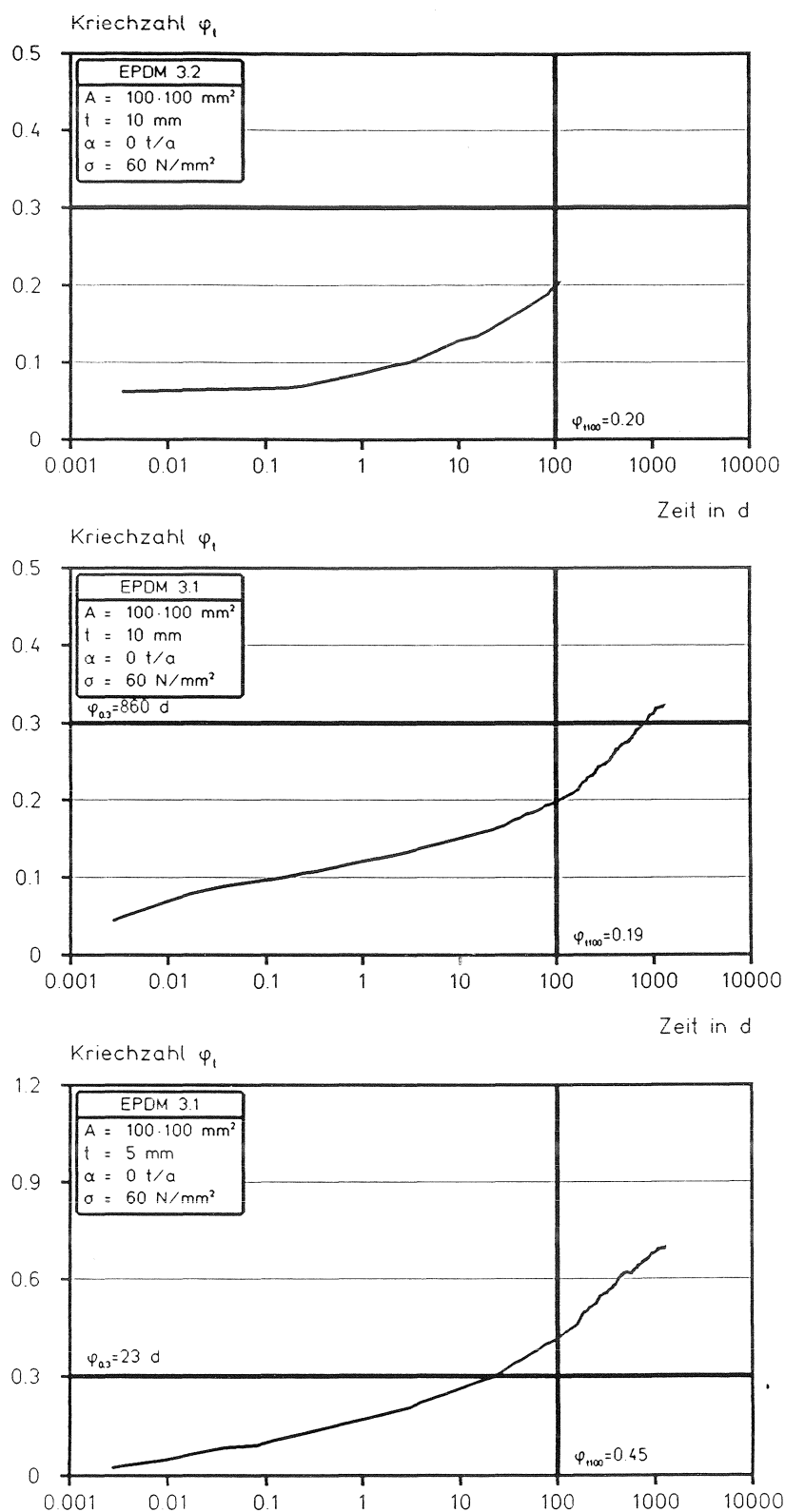


Bild 10.13: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 3.1 und 3.2
 Einfluß der Lagerdicke

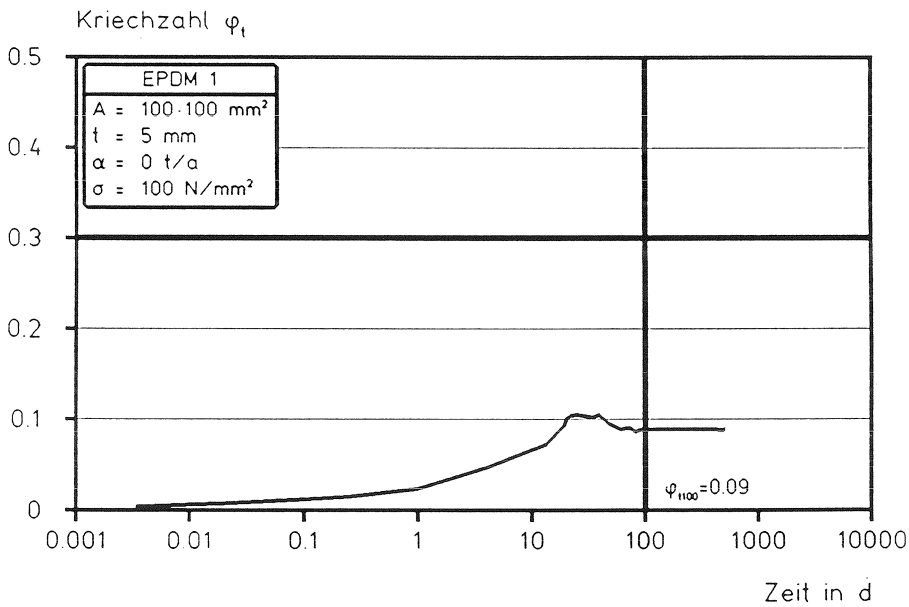
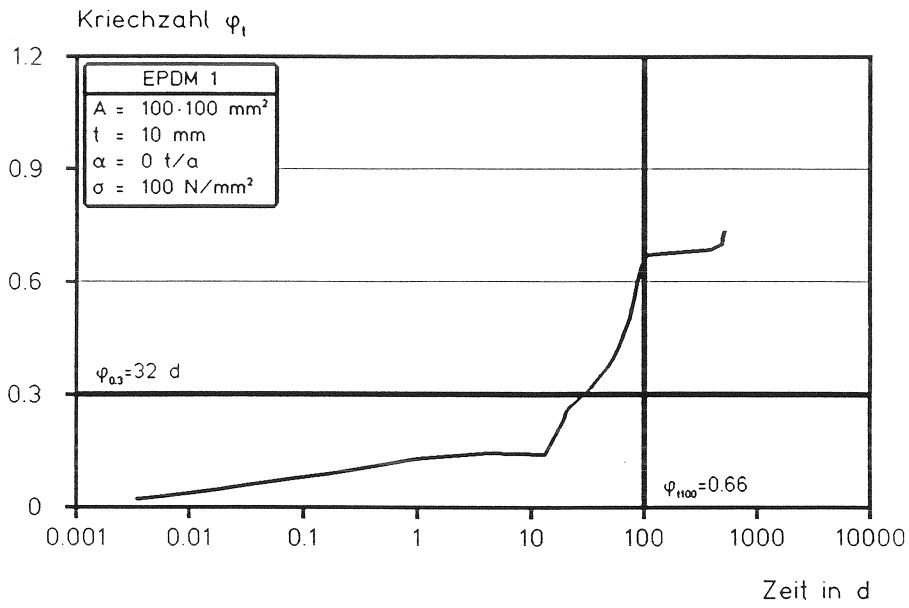


Bild 10.14: Kriechkurven
 Elastomerqualität: EPDM 1
 Einfluß der Lagerdicke

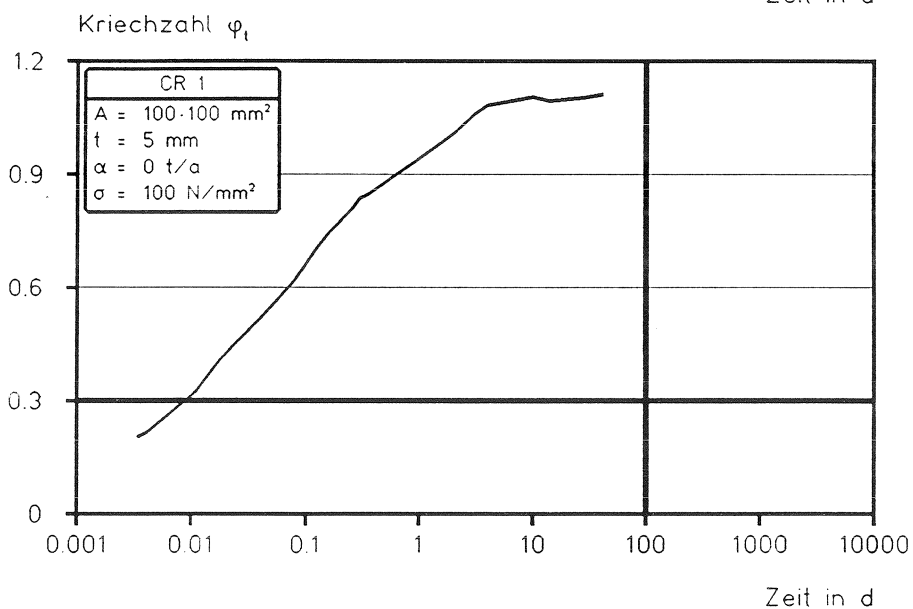
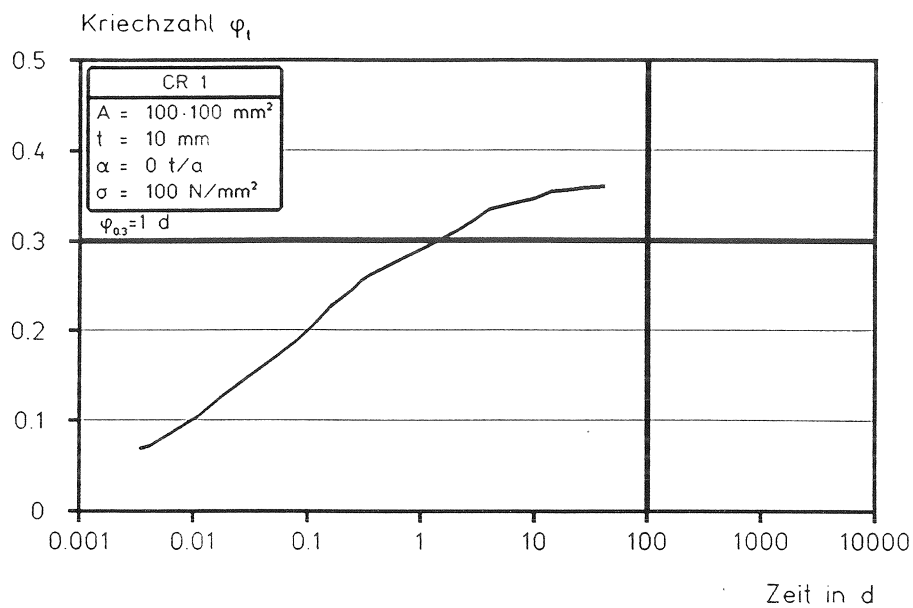


Bild 10.15: Kriechkurven
 Elastomerqualität: CR 1
 Einfluß der Lagerdicke

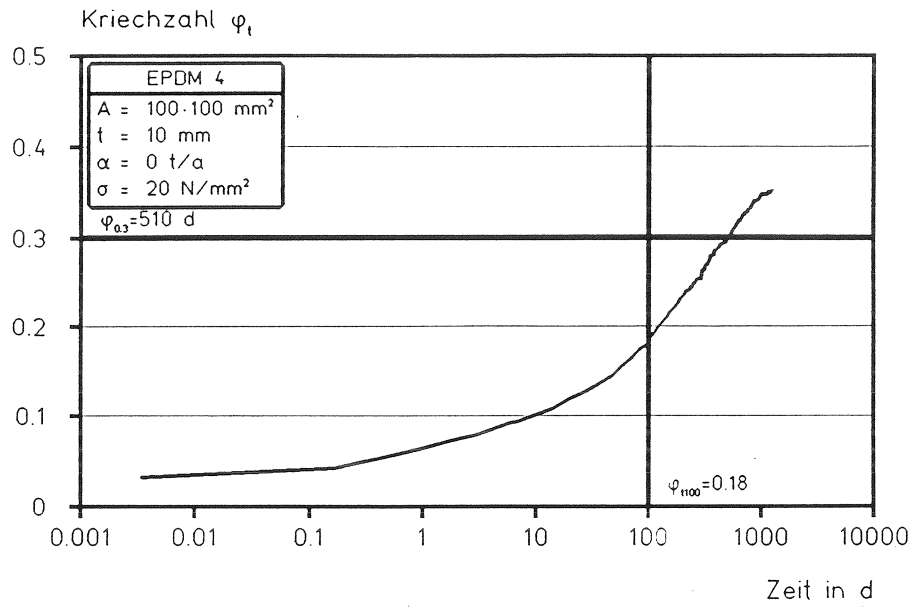


Bild 10.16: Kriechkurve
Elastomerqualität: EPDM 4

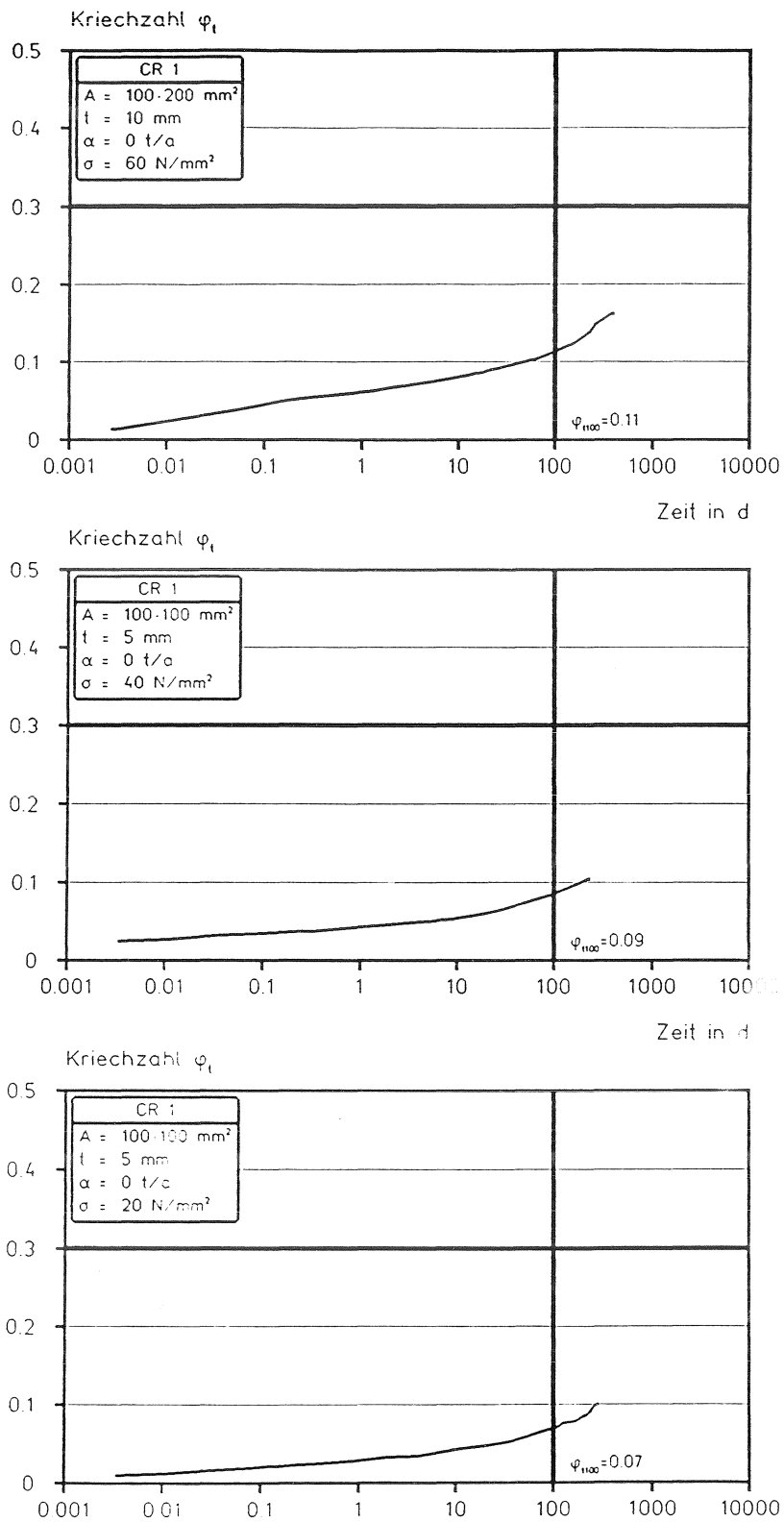


Bild 10.17: Kriechkurven
 Elastomerqualität: CR 1
 Einfluß der Pressung, der Lagerfläche und der Lagerdicke

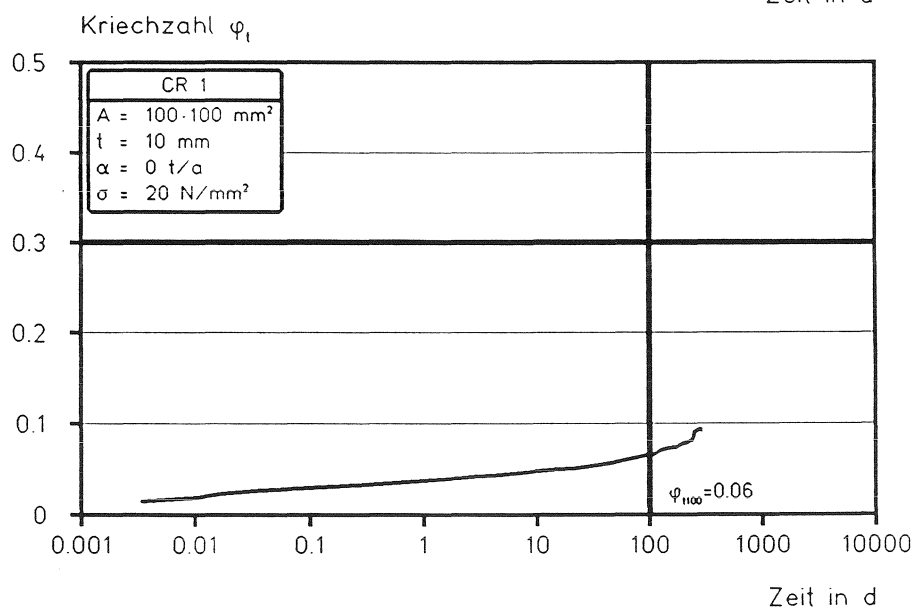
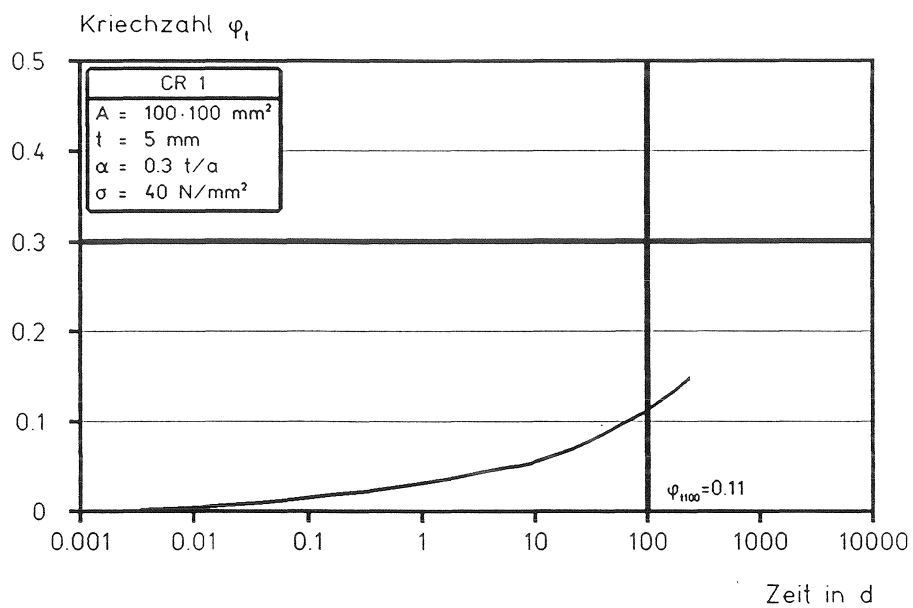


Bild 10.18: Kriechkurven
 Elastomerqualität: CR 1
 Einfluß der Pressung, der Lagerdicke und der Verdrehung

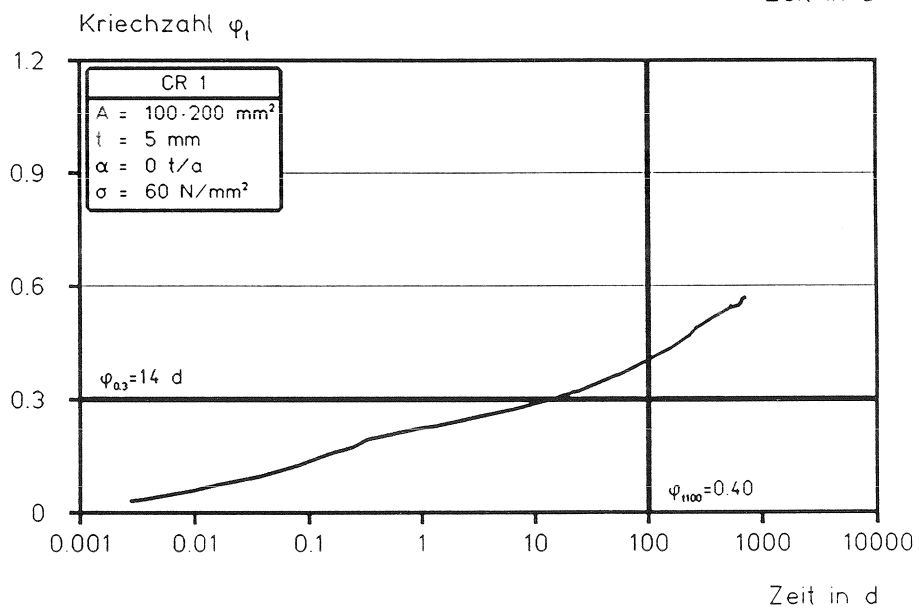
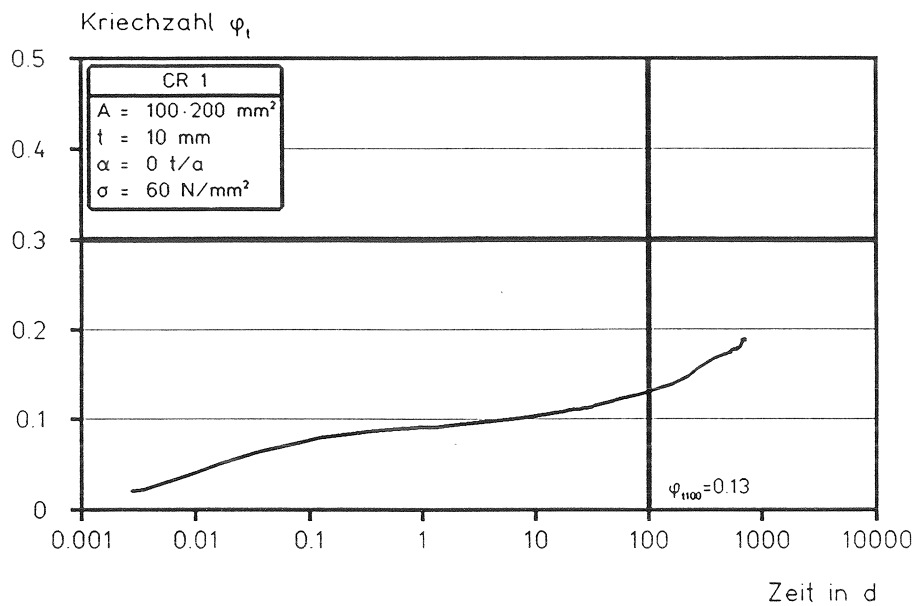


Bild 10.19 Kriechkurven
 Elastomerqualität: CR 1
 Einfluß der Lagerdicke

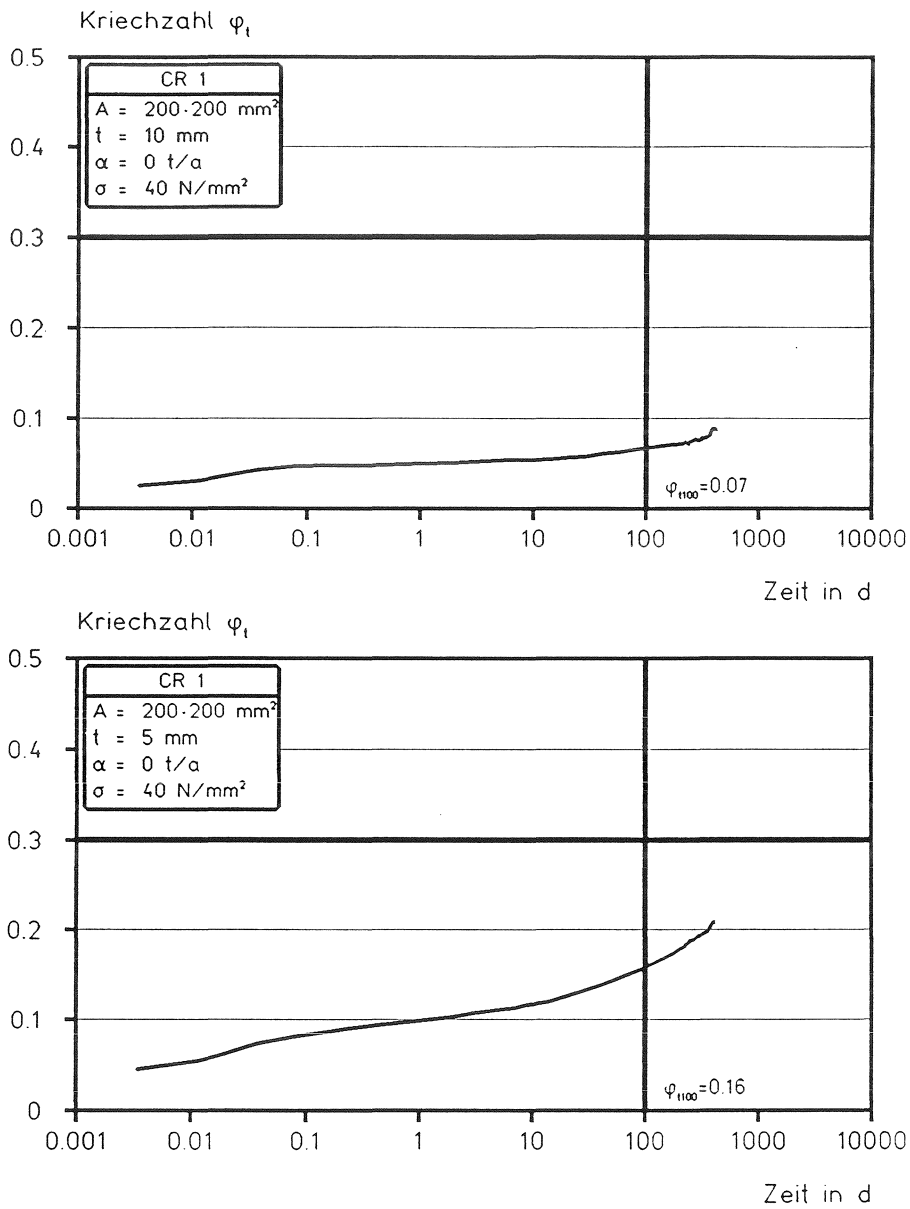


Bild 10.20: Kriechkurven
Elastomerqualität: CR 1
Einfluß der Lagerdicke

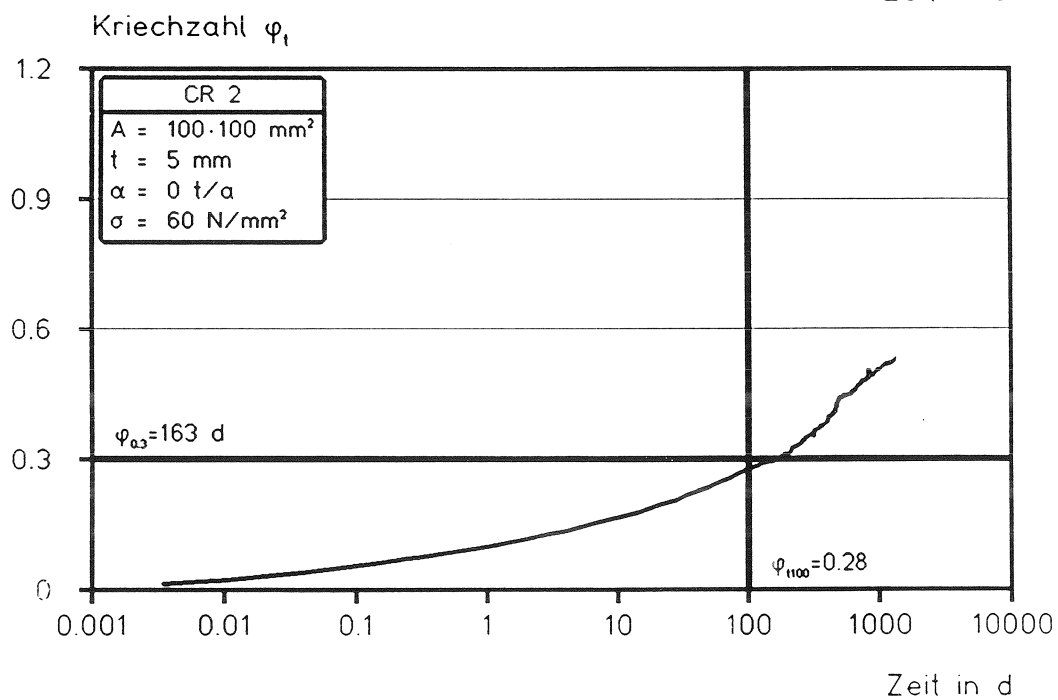
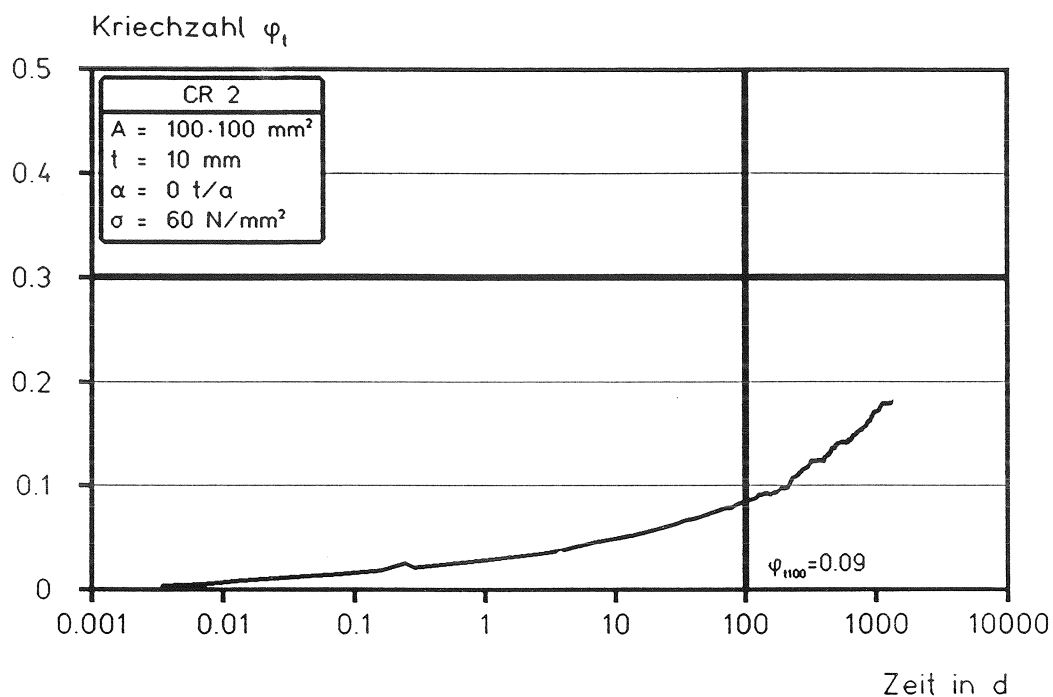


Bild 10.21: Kriechkurven
 Elastomerqualität: CR 2
 Einfluß der Lagerdicke

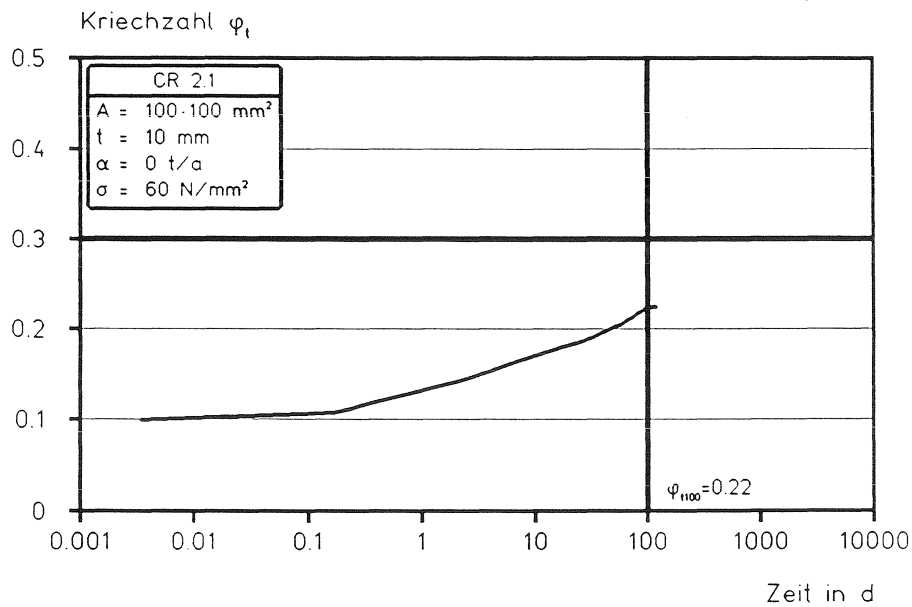
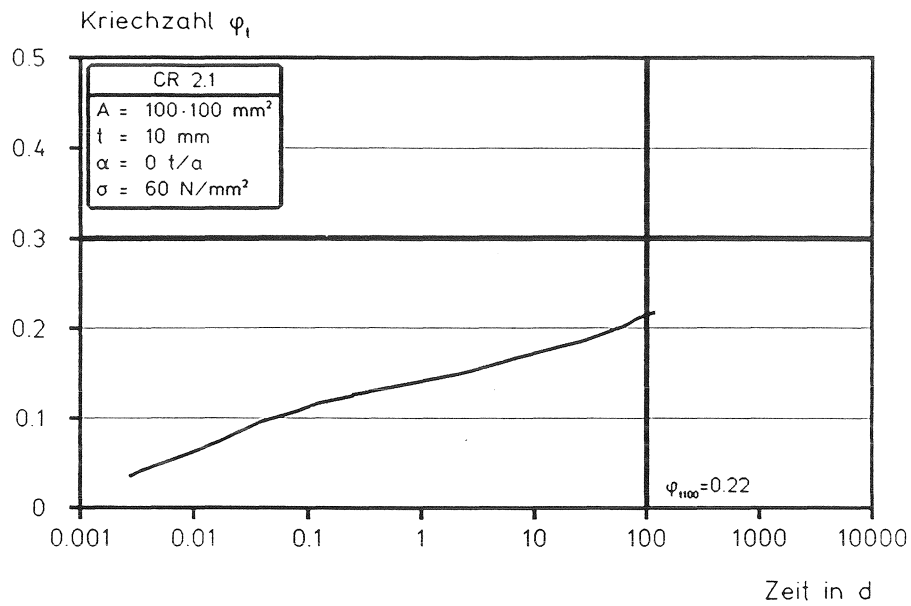


Bild 10.22: Kriechkurven
Elastomerqualität: CR 2.1

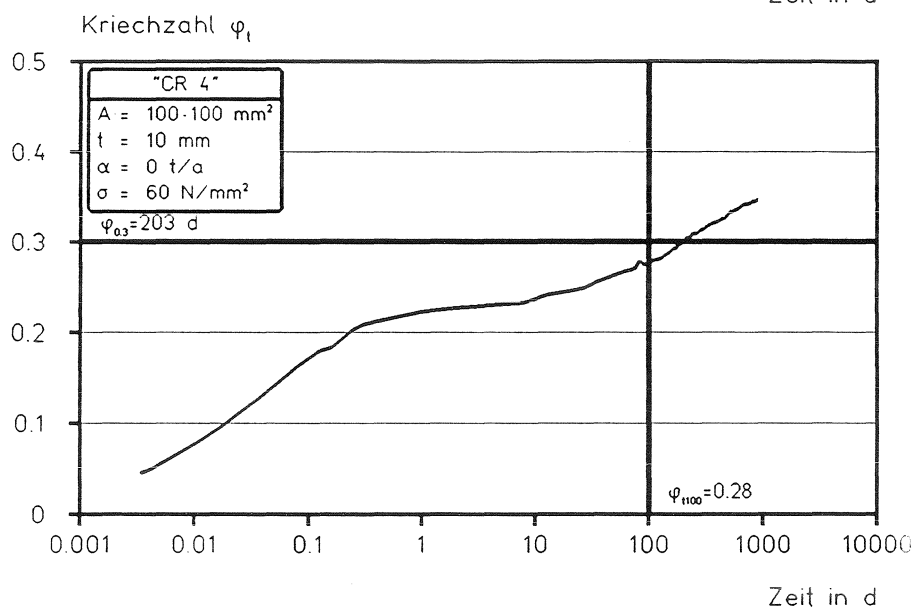
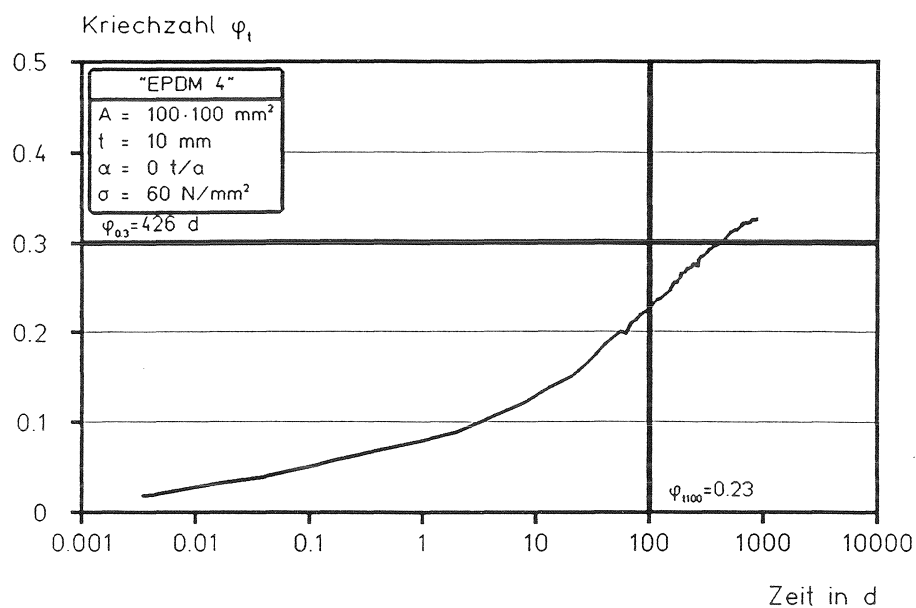


Bild 10.23: Kriechkurven
Elastomerqualität: EPDM 4 und CR 4