

Lager im Bauwesen nach DIN EN 1337

Herrn em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. *Gerhard Sedlacek* zur Vollendung seines 70. Lebensjahres gewidmet

In Deutschland wurden die nationalen Regelungen für Lager nach DIN 4141 und die darauf basierenden nationalen Zulassungen mittlerweile nahezu vollständig durch das Europäische Regelwerk DIN EN 1337 ersetzt. Diese Norm regelt die Anforderungen an die Bemessung, konstruktive Ausbildung, Herstellung, Transport, Einbau und Inspektion von Lagern im Bauwesen. Geregelt werden Elastomerlager, Rollenlager, Topflager, Kipplager, Kalotten- und Zylinderlager mit PTFE sowie Festhaltekonstruktionen und Führungslager. Moderne, hochfeste Gleitwerkstoffe, die außerhalb des Anwendungsbereiches der DIN EN 1337 liegen, können auf der Grundlage von europäischen Zulassungen (ETA) eingesetzt werden. Für die in Deutschland im Brückenbau am häufigsten zum Einsatz kommenden Lagertypen – Kalottenlager und Elastomerlager – werden die alten und neuen Regelungen hinsichtlich des Sicherheitsniveaus analysiert und bewertet sowie auf weitere Punkte hingewiesen, die im Rahmen der geplanten Überarbeitung der Normenreihe DIN EN 1337 nochmals kritisch hinterfragt werden müssen. Die bisherigen nationalen und derzeitigen europäischen Regelwerke gelten nur für Lager, die nicht durch Zugkräfte beansprucht werden. Obwohl die Vermeidung von Lagerzugkräften insbesondere im Brückenbau ein fundamentaler Konstruktionsgrundsatz ist, können in Sonderfällen Zugkräfte nicht vermieden werden. Da es für Zuglager keine normativen Vorgaben gibt, müssen an den speziellen Anwendungsfall angepasste Bemessungs- und Konstruktionsregeln erarbeitet werden. Anhand von Anwendungsbeispielen wird die besondere Problematik bei der Verwendung von Lagern unter Druck-Zug-Beanspruchungen erläutert.

Structural bearings for bridges and buildings according to DIN EN 1337. *In Germany the national design rules for bearings according to DIN 4141 and corresponding national approvals are meanwhile nearly completely replaced by the European Standard DIN EN 1337. This code specifies the requirements for design and manufacturing of structural bearings for bridges and buildings. DIN EN 1337 covers elastomeric bearings, roller bearings, pot bearings, rocker bearings and spherical and cylindrical PTFE bearings. Special applications, e. g. applying modern sliding elements outside the scope of DIN EN 1337 which differ from the technical rules given in DIN EN 1337, can be used on the basis of European Technical Approvals (ETA). On this background for spherical bearings and elastomeric bearings the new rules are analyzed and assessed regarding the necessary safety requirements and also point to further items that should be inquired critically in the scope of revision of the DIN EN 1337. The old National Standards as well as the new European Standards are only valid for bearings without any uplift forces. Avoiding uplift forces is a fundamental design principle especially within the scope of bearings for bridges. However, in rare and worse cases it cannot be avoided that uplift forces occur. Under these conditions the rules in DIN 4141 and DIN EN 1337 for the design and the manufacture of bearings do not apply and modified design rules have to be developed. This is shown by means of two examples, where specially developed bearings for compression and uplift forces were designed.*

1 Übersicht über die derzeitigen Regelwerke

1.1 Allgemeine Regelungen

Bauwerkslager sind derzeit in Deutschland in der Normenreihe DIN EN 1337

[1] geregelt, die die bisherige Normenreihe DIN 4141 [2] und die auf DIN 4141 basierenden Zulassungen für Brückenlager ersetzt. Eine Übersicht über die aus 11 Teilen bestehende Normenreihe findet sich in

Bild 1. Für die gängigen Lagerarten gibt es eigene harmonisierte Normenteile, so dass für die meisten der bisher in Deutschland über Zulassungen geregelten Lager keine besonderen Lagerzulassungen mehr erforderlich sind. In DIN EN 1337-1 wurde das in den Eurocodes verankerte semiprobabilistische Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten umgesetzt, wohingegen DIN 4141 auf dem globalen Sicherheitskonzept mit zulässigen Spannungen beruht. Im Zuge der Umstellung des Sicherheitskonzeptes wird nun in DIN EN 1337 zwischen Nachweisen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit unterschieden.

Bei Brückenlagern treten in den Fällen, in denen z. B. von den Regelungen der DIN EN 1337 „nicht nur unwesentlich“ abgewichen wird [31], an die Stelle der nationalen Zulassungen europäische technische Zulassungen (ETA – European Technical Approval) als technische Spezifikationen, die zur CE-Kennzeichnung führen können. Eine derartige „nicht nur unwesentliche“ Abweichung ist z. B. die Verwendung eines anderen als in DIN EN 1337 angegebenen Gleitwerkstoffes in den Hauptgleitflächen. Neben dem in DIN EN 1337 geregelten Gleitwerkstoff PTFE gibt es mittlerweile mehrere gültige europäische Zulassungen für Kalottenlager mit hochfesten Gleitwerkstoffen (z. B. den Gleitwerkstoff MSM der Firma Maurer Söhne [9]). Diese Werkstoffe sind hinsichtlich ihrer Festigkeit und ihren Verschleißigenschaften dem PTFE deutlich überlegen.

Die Struktur der DIN EN 1337 im Sinne der EU-Bauproduktenrichtlinie

DIN EN 1337 Lager im Bauwesen	Teil 1: Allgemeine Regelungen, Februar 2001	(DIN EN 1337-1:2001-02)
	Teil 2: Gleitteile, Juli 2004	(DIN EN 1337-2:2004-07)
	Teil 3: Elastomerlager, Juli 2005	(DIN EN 1337-3:2005-07)
	Teil 4: Rollenlager, August 2004	(DIN EN 1337-4:2004-08)
	Teil 4: Rollenlager Berichtigungen zu DIN EN 1337-4:2004-08, Mai 2007	(DIN EN 1337-4 Ber 1:2007-05)
	Teil 5: Topflager, Juli 2005	(DIN EN 1337-5:2005-07)
	Teil 6: Kipplager, August 2004	(DIN EN 1337-6:2004-08)
	Teil 7: Kalotten- und Zylinderlager mit PTFE, August 2004	(DIN EN 1337-7:2004-08)
	Teil 8: Führungslager und Festpunktager – Baustoffe, Anforderungen, Prüfungen und Überwachung, Januar 2008	(DIN EN 1337-8:2008-01)
	Teil 9: Schutz, April 1998	(DIN EN 1337-1:1998-09)
	Teil 10: Inspektion und Instandhaltung, November 2003	(DIN EN 1337-10:2003-11)
Teil 11: Transport, Zwischenlagerung und Einbau, April 1998	(DIN EN 1337-11:1998-04)	

Bild 1. Übersicht über DIN EN 1337
Fig. 1. Overview of DIN EN 1337

ist in Bild 2 dargestellt, die so in ähnlicher Form der Literatur [32] entnommen werden kann. Die Teile 3 bis 8 gelten als Produktnormen im Sinne der EU-Bauproduktenrichtlinie, das heißt, diese Lager dürfen zukünftig mit einem CE-Kennzeichen „in Verkehr gebracht“ werden. Im Unterschied zu anderen Sektoren bedeutet eine CE-Kennzeichnung nach der Bauproduktenrichtlinie im Bausektor

lediglich, dass das Produkt mit einer harmonisierten technischen Spezifikation nach der Bauproduktenrichtlinie übereinstimmt (hier: z. B. mit einem der Normenteile 3 bis 8 der DIN EN 1337 oder mit einer entsprechenden europäischen Zulassung) und dass die Angaben zur CE-Kennzeichnung unter Einhaltung der Bestimmungen der harmonisierten Spezifikation erfolgten [31].

Da Gleitteile keine eigenständigen Lager sind, sondern stets mit einem Lager nach Teil 3 bis Teil 8 zusammen hergestellt werden, gelten Gleitteile nicht als eigenständiges Bauprodukt und Teil 2 nicht als Produktnorm [32]. In Bild 2 sind auch die Koexistenzperioden für die Teile 3 bis 8 aufgeführt. Eine Koexistenzperiode ist der Zeitraum, in dem die nationale und die europäische Norm für ein konkretes Produkt gleichrangig angewandt werden dürfen und nach deren Ablauf die Anwendung der europäischen Norm verbindlich ist. Für die Teile 3 bis 7 sind die Koexistenzperioden bereits abgelaufen, für Teil 8 hat die Koexistenzperiode Anfang 2009 begonnen. Aus diesem Grund gilt derzeit in Deutschland ersatzweise für Teil 8 noch DIN V 4141-13 in der derzeitigen gültigen Fassung vom November 2008 [7]. In dieser Norm ist insbesondere die in Deutschland z. B. bei Elastomerlagern übliche Stahl-Stahl-Paarung für die Übertragung von Horizontalkräften geregelt.

Nach Bild 2 stellt sich DIN EN 1337 als (äußerlich) formal streng

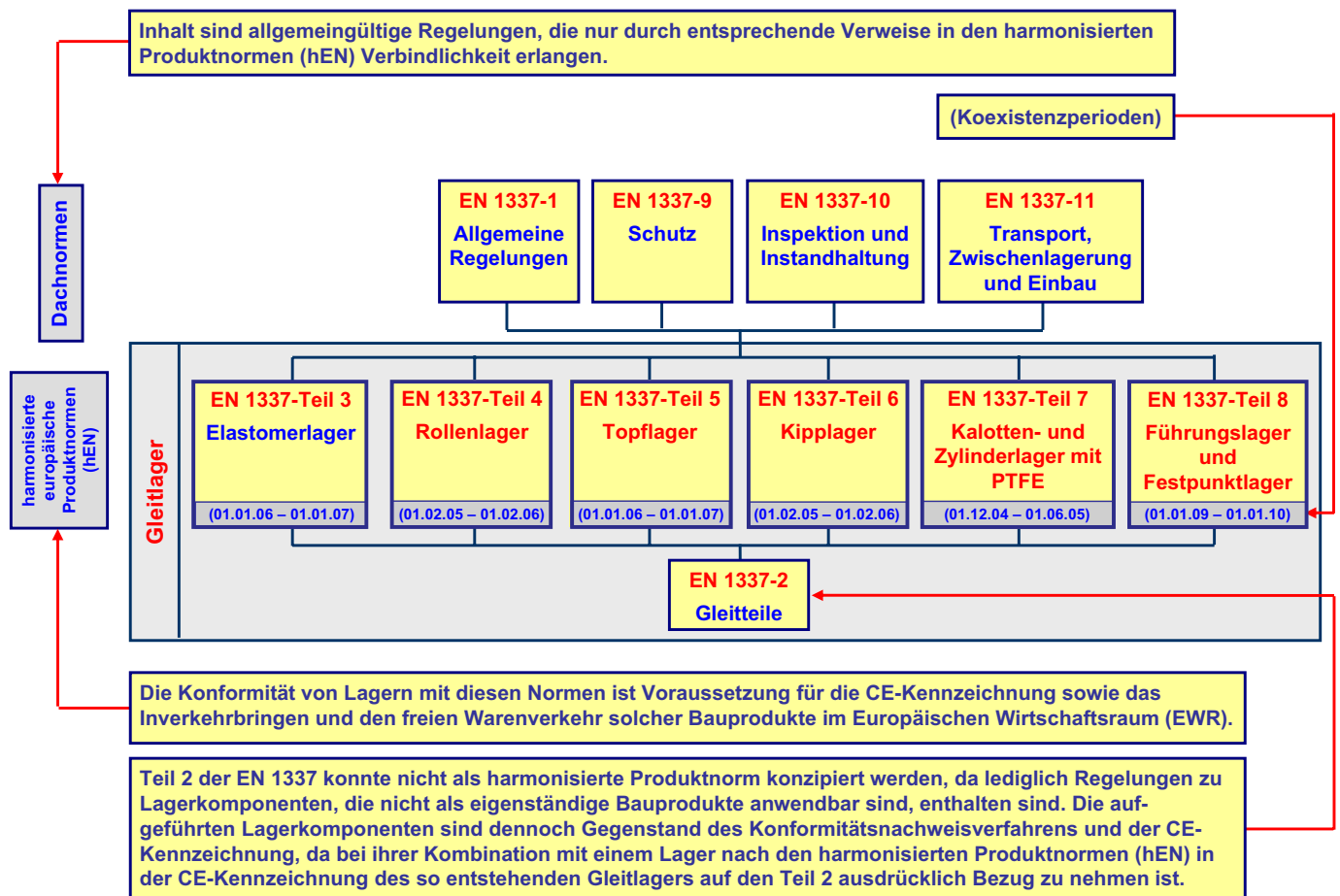


Bild 2. Struktur der DIN EN 1337 im Sinne der EU-Bauproduktenrichtlinie [30], [32]
Fig. 2. Structure of DIN EN 1337 in terms of the EU Construction Products Directive (CPD) [30], [32]

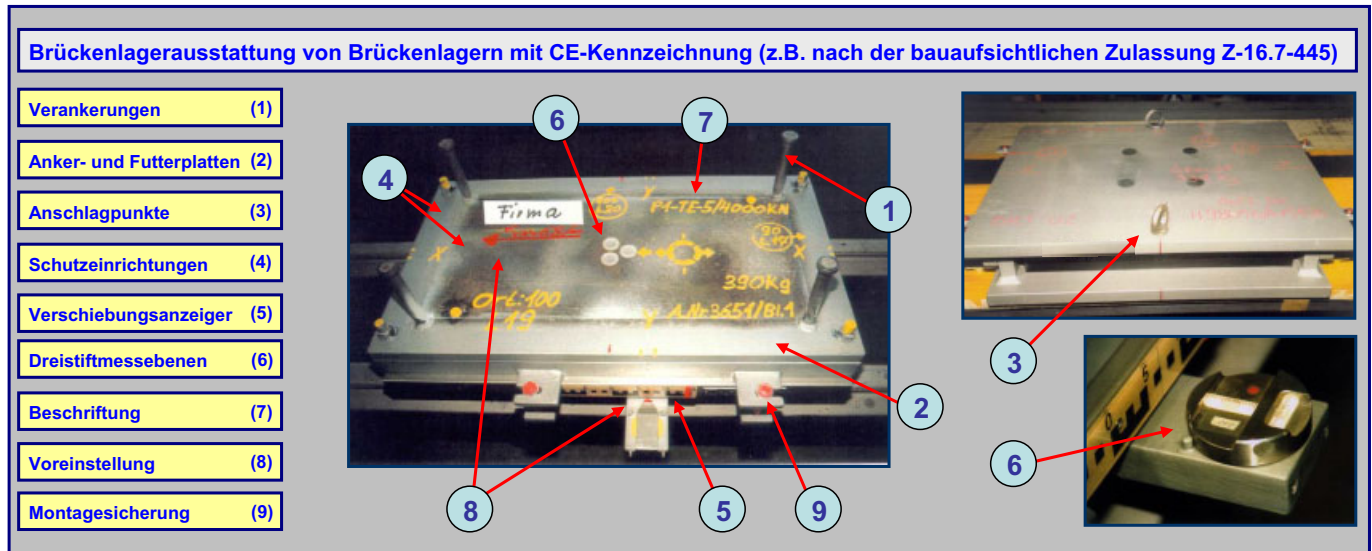


Bild 3. Wesentlicher Inhalt der bauaufsichtlichen Ausstattungszulassungen (z. B. [10]) für Brückenlager mit CE-Kennzeichnung
Fig. 3. Content of National Approval for the equipment (e. g. [10]) for bridge bearings with CE-marking

hierarchisch strukturiert dar, dies wird jedoch inhaltlich nicht in allen Fällen unterstützt. Während nach Bild 2 bei der Bemessung und Konstruktion von Kalottenlagern mit Festhaltung lediglich auf die Teile 1, 2 und 7 Bezug genommen werden müsste, sind tatsächlich auch die Teile 5 und 8 (bzw. DIN V 4141-13) zu berücksichtigen. Dazu kommt, dass es zwischen den Normteilen kein einheitlich durchgängiges und mit den übrigen Eurocodes harmonisiertes Bezeichnungssystem gibt [33]. Zwischen Teil 2 und Teil 7 ist keine klare Abgrenzung gegeben und darüber hinaus sind die Normteile teilweise nicht widerspruchsfrei. Auf spezielle Punkte wird nachfolgend noch eingegangen.

Neben DIN EN 1337 gibt es in Deutschland ergänzende Regelungen für Lager, die in speziell entwickelten Ausstattungszulassungen (z. B. [10]) für Brückenlager mit CE-Kennzeichnung der Lagerhersteller zusammengefasst sind. Dabei handelt es sich um Regelungen zu Ausstattungselementen, die bislang maßgeblich in den nationalen bauaufsichtlichen Zulassungen und den LAG-Richtzeichnungen gefordert wurden, jedoch nicht Gegenstand der DIN EN 1337 sind, da die Ausstattungen zum Einbau der Lager unterschiedlich gehandhabt werden. Im Rahmen der alten nationalen Zulassungen unterlagen diese Ausstattungen einer Überwachung. Der maßgebliche Inhalt der neuen Ausstattungszulassungen ist in Bild 3 grafisch dargestellt. Da die Ausstattung eines

nach DIN EN 1337 bemessenen, konstruierten und ausgeführten Brückenlagers nicht vollständig in der Normreihe DIN EN 1337 oder in anderen Normen geregelt ist, darf ein Lager, welches ein EC-Konformitätszertifikat mit der entsprechenden harmonisierten Produktnorm nach Bild 2 besitzt, zwar mit einer CE-Kennzeichnung versehen und in Verkehr gebracht werden, jedoch in Deutschland nicht eingebaut werden. Diese Regelungslücke wird nunmehr in Deutschland durch die zuvor erwähnten Ausstattungszulassungen geschlossen [32].

Für den Bereich des BMVBS sind alle Teile der DIN EN 1337 – ausgenommen Teil 8 – eingeführt. Die derzeitigen Regelungen sehen vor, dass die Verwendung von Lagern nach DIN EN 1337 bzw. von Lagern, die von DIN EN 1337 maßgeblich abweichen (z. B. Lager mit besonderem Gleitwerkstoff), deren Verwendbarkeitsnachweis jedoch durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Ü-Kennzeichnung) oder eine europäische technische Zulassung (CE-Kennzeichnung) erbracht wurde [13], an das Vorhandensein einer zugehörigen Ausstattungszulassung gebunden ist. Letztere führt zu einem Ü-Zeichen der Ausstattung in Verbindung mit dem CE-Zeichen für die Lager, die durch entsprechende Übereinstimmungszertifikate und EC-Konformitätszertifikate der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen bestätigt werden. Formal stehen diese Anforderungen im Widerspruch zur

Bauproduktenrichtlinie. Für Eisenbahnbrücken gelten die in [12] und [46] angegebenen Regelungen. Vor diesem Hintergrund lässt sich die Einbettung der DIN EN 1337 in das derzeitige nationale Regelwerkskonzept wie in Bild 4 darstellen.

Nach Einführung der DIN-Fachberichte war eine Überarbeitung des Anhangs O des DIN-Fachberichtes 101 notwendig geworden, da die im Anhang O getroffenen Festlegungen zu den Bewegungen von Lagern und Fahrbahnübergängen auf der Grundlage der charakteristischen Einwirkungskombination des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit basierten und die Lagerkräfte davon abweichend auf der Grundkombination des Grenzzustandes der Tragfähigkeit. Diese Inkonsistenz wurde zwischenzeitlich durch die 3. Auflage des DIN-Fachberichtes 101 (Ausgabe 2009) [3] beseitigt. Lagerwege und Lagerkräfte basieren nach den neuen Regelungen übereinstimmend auf dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und sind damit kompatibel zu den Regelungen der DIN EN 1337.

2 Grundlagen für die konstruktive Ausbildung und Bemessung von Kalottenlagern

2.1 Ausführungsvarianten

Bei Kalottenlagern nach Bild 5 handelt es sich um Lager, die aus einer Trägerplatte (Lagerunterteil) mit konkav-kugelförmiger Oberfläche, einem Verdrehungselement (Kalotte) mit plan-kon-

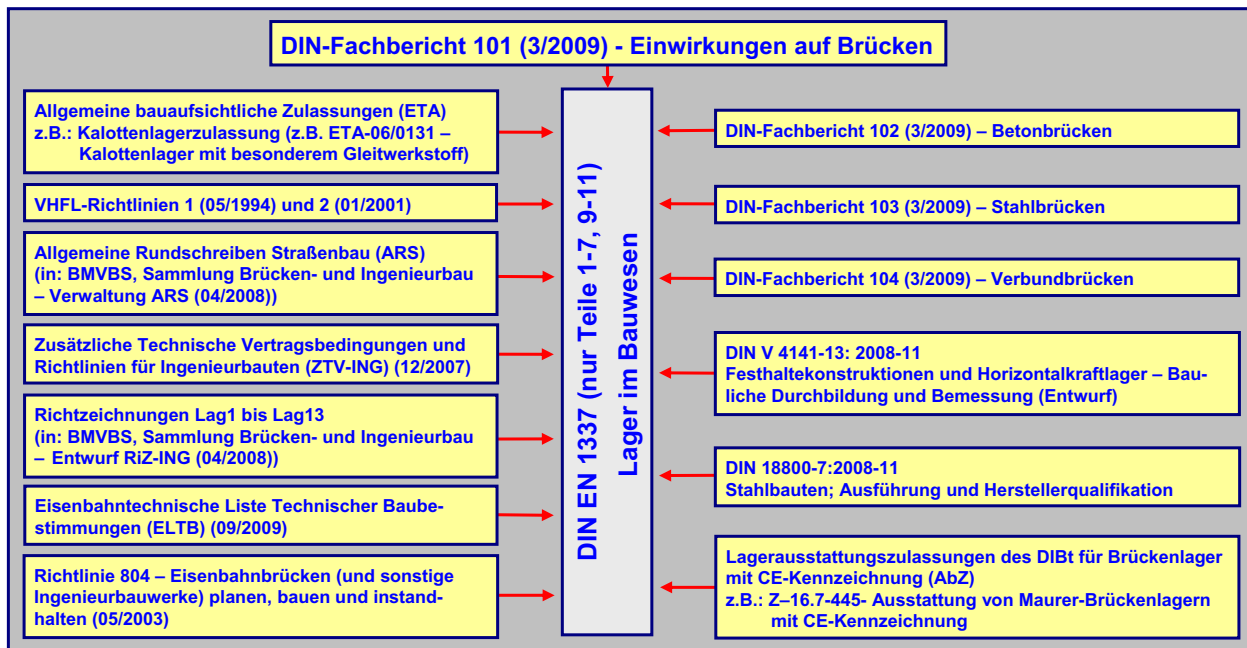


Bild 4. Einbettung der derzeit gültigen Fassung der DIN EN 1337 (ohne Teil 8) in das nationale Normen- und Regelwerkskonzept

Fig. 4. DIN EN 1337 (without Part 8) within the scope of national design rules

vexer Oberfläche und einer ebenen Gleitplatte bestehen [20] bis [24], [28], [29]. Bei diesem Lagertyp wird eine Kippbewegung ausschließlich durch Gleiten der oberen Gleitplatte auf der Kalotte und durch Gleiten der Kalotte auf dem Lagerunterteil realisiert. Eine zwängungsarme Verdrehung wird dadurch erreicht, dass in den beiden Gleitflächen Gleit- und Gegenwerkstoffe mit günstigem Reibungsverhalten eingesetzt werden. Zur Gewährleistung langjährig günstiger tribologischer Eigenschaften kommt der Dauerhaftigkeit der Gleitwerkstoffe und der Abdichtung der Gleitflächen gegen Verschmutzung eine besondere Bedeutung zu.

Hinsichtlich der Ausführung von Kalottenlagern werden drei Arten unterschieden:

- allseits bewegliches Kalottenlager (KGa) - Typ P2 - Symbol:
- einseitig bewegliches Kalottenlager (KGe) - Typ P1 - Symbol:
- allseits festes Kalottenlager (KF) - Typ P - Symbol:

Die Eigenschaften eines Kalottenlagers werden maßgeblich von den Eigenschaften der Gleitwerkstoffe bestimmt. Als Gleitwerkstoff hat sich der teilkristalline Thermoplast Polytetrafluorethylen (PTFE) als besonders geeignet erwiesen, da dieser Werkstoff neben chemischer Beständigkeit sich vor allem durch ein günstiges Reibungs- und Tragverhalten auszeichnet [25],

[26]. Als Gegenwerkstoff hat sich geschliffener, hochglanzpolierter austenitischer Stahl 1.4401 (X5 CrNiMo 17-12-2) bzw. 1.4404 (X2 CrNiMo 17-12-3) und für gekrümmte Gleitflächen hartverchromter Stahl bewährt. Zur Schmierung der Gleitflächen wird lithiumverseiftes Siliconfett in Brückenlagerqualität verwendet.

Wie Bild 5 zeigt, sind die PTFE-Scheiben der ebenen und der ge-

krümmten Gleitfläche zu diesem Zweck mit Schmieraschen ($\varnothing 8$ mm, Tiefe 2 mm) ausgeführt, die auf jedem 2. Punkt eines rechtwinkligen Rasters mit 7,5 mm bzw. 13,5 mm Abstand versetzt sind und die bei Zusammenbau vollständig mit Schmierstoff gefüllt werden. Zusätzlich werden die Gleitflächen der Gegenkörper mit einem dünnen Schmierfilm versehen. Die im PTFE eingepprägten Schmier-

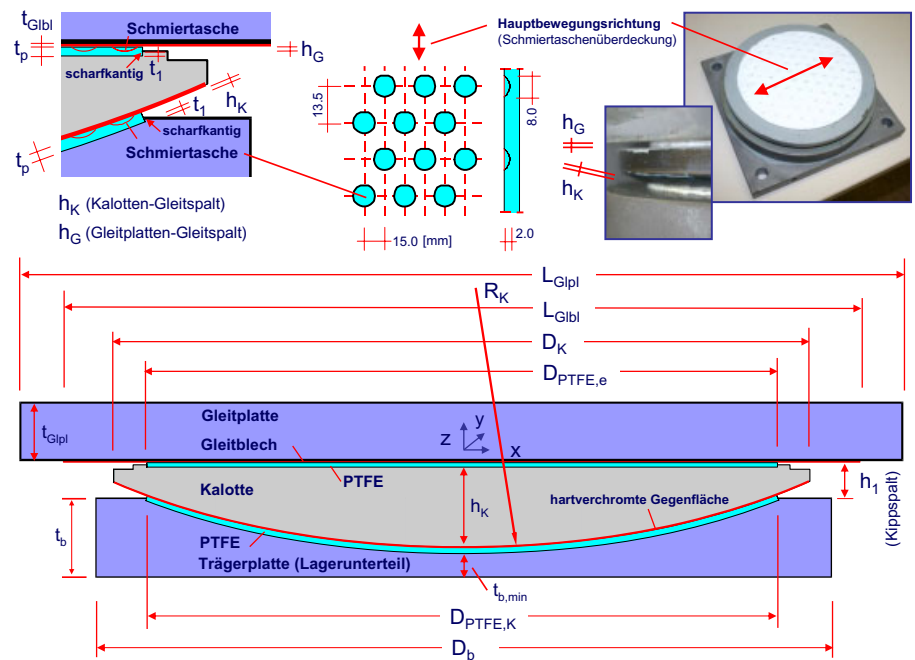


Bild 5. Ausführungsbeispiel eines allseits beweglichen PTFE-Kalottenlagers (P2)
Fig. 5. Example for a typical spherical bearing (PTFE) with multidirectional sliding part (P2)

taschen sorgen aufgrund der damit verbundenen Schmierstoffspeicherung dafür, dass der Schmierstoff langfristig in der Gleitfläche verfügbar ist. Versuche an PTFE-Modelllagern [20], [22], [24] mit unterschiedlicher Anordnung der Schmierfaschen zeigen, dass die Höhe der Gleitreibungszahl maßgeblich von der Richtung der Gleitbewegung zur Anordnung der Schmierfaschen abhängig ist. Die geringsten Gleitreibungszahlen werden dann erzielt, wenn die Schmierfaschen in Bezug auf die Hauptgleitrichtung so versetzt angeordnet sind, dass es zu einer Schmierfaschenüberdeckung kommt.

Durch die Struktur und den Aufbau der Molekülketten weist der thermoplastische Werkstoff PTFE unter Last eine relativ hohe Neigung zum Kriechen und zum Fließen auf. In ungekammerter Form kann deshalb PTFE (weiß) nur bis zu einer Flächenbelastung von 7 N/mm^2 belastet werden. Die Formstabilität lässt sich jedoch durch Kammerung des Werkstoffes so verbessern, dass für PTFE in Brückenlagerqualität in den Hauptauflagerflächen ein charakteristischer Wert der Druckfestigkeit (Fraktilwert der Festigkeit, bei der nach 48 h keine weiteren Kriechverformungen mehr auftreten) $f_k = 90 \text{ N/mm}^2$ bei Beanspruchungen aus ständigen und veränderlichen Lasten in Rechnung gestellt werden kann. Zur Erzielung solcher hohen Pressungen müssen die PTFE-Scheiben nahezu spielfrei in

eine scharfkantige Stahlfassung eingesenkt werden und für das Verhältnis der Einsenkung (t_1) zur Spalthöhe (h_K bzw. h_G - PTFE Überstand) ist $t_1/h_K \leq 1,2$ bzw. $t_1/h_G \leq 1,2$ einzuhalten.

Aus dem in Bild 5 dargestellten Lagertyp wird durch Anordnung zusätzlicher paralleler Führungsleisten, durch die die Bewegungsmöglichkeit der Gleitplatte gegenüber dem Lagerunterteil eingeschränkt wird, aus einem allseits beweglichen Kalottenlager ein einseitig bewegliches Kalottenlager, welches die Übertragung von Horizontallasten vom Überbau in den Unterbau quer zur freien Bewegungsrichtung des Lagers ermöglicht. Ein typisches Beispiel für ein solches querfestes Lager zeigt Bild 6. Bei der Ausbildung der Seitenführung ist darauf zu achten, dass eine Kippbewegung des Lageroberteils gegenüber dem Lagerunterteil kinematisch möglich ist und dass analog zu den Gleitbewegungen in der ebenen und der gekrümmten Gleitfläche die Reibungswiderstände in den Gleitflächen der Führungsleisten dauerhaft niedrig bleiben. Aufgrund von Fertigungstoleranzen kommt es in den Seitenführungen zu einem unvermeidlichen Lagerspiel x , welches sowohl nach den nationalen als auch nach den europäischen Regelungen im Auslieferungszustand (Neuzustand) eines Lagers maximal jeweils 1 mm betragen darf. Das Lagerspiel erlaubt geringfügige Verdrehungen des Lageroberteils gegenüber dem Lagerunterteil, so dass aus einer kleinen Überbauverdrehung um die z-Achse (Vertikalachse) keine Zwangsbeanspruchungen infolge einer Einspannung resultieren. Andererseits kann das Lagerspiel jedoch dazu führen, dass sich bei einer Anordnung mehrerer Lager mit gleichgerichteter Festhaltung die Lager nicht mehr gleichzeitig am Horizontallastabtrag beteiligen, so dass es in Abhängigkeit des Lagerungsschemas zu einer ungleichmäßigen Verteilung der horizontalen Lagerkräfte kommen kann. Bei der Planung des Lagerungsschemas eines Brückenbauwerkes ist daher die Wirkung des (unvermeidbaren) Lagerspiels zu berücksichtigen. Im ungünstigsten Fall, z. B. bei zunehmendem Lagerspiel infolge von Verschleiß und bei einer Anordnung mehrerer längsfester Kalottenlager in einer Brückennachse sollte auf der sicheren Seite liegend jede Längsfesthaltung für die volle Horizontallast bemessen werden. Eine Alternative stellen hier justierbare Führungen mit MSM dar. Diese können, falls erforderlich, vorgespannt (spielfrei) und nachjustierbar ausgeführt werden. Andernfalls sind genauere Untersuchungen unter Berücksichtigung des Lagerspiels und der Nachgiebigkeit des Überbaus und der Unterbauten erforderlich. Die Größe des vorhandenen Lagerspiels sollte daher in den Planungsunterlagen vorgegeben werden und grundsätzlich in dem Lagerprotokoll vermerkt werden.

Wird anstatt der parallelen Führungsleisten ein kreisrunder Arretierungsring ausgeführt, so entsteht aus einem allseits beweglichen Kalottenlager ein festes Kalottenlager. Ein typisches Beispiel für ein festes Kalottenlager ist in Bild 7 dargestellt. Dieses Lager überträgt nach Überwindung des Lagerspiels über die stählerne Anschlagfläche zwischen dem Lagerober- und dem Lagerunterteil Horizontalkräfte aus beliebiger Richtung und ermöglicht dabei wie bereits das allseits bewegliche Kalottenlager eine Verdrehung des Überbaus um alle drei Achsen x, y (in Blattebene hinein) und z (Vertikalachse).

Die in den Gleitflächen auftretenden Relativbewegungen führen zu einem Verschleiß der an den Gleitvorgängen beteiligten Gleitpartner (z. B. tribologisches System bestehend aus

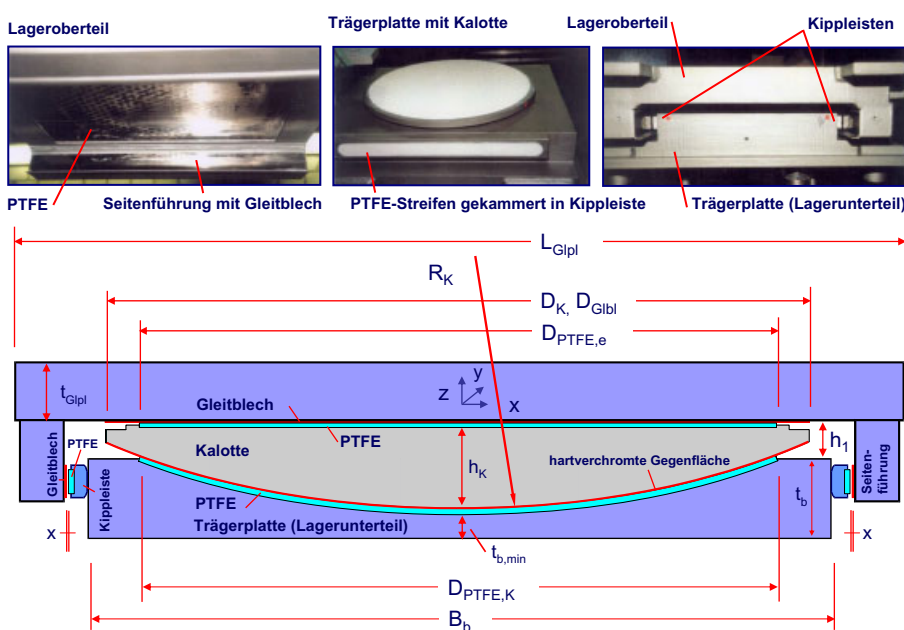


Bild 6. Typische Ausführung eines einseitig festen Kalottenlagers (P1)
 Fig. 6. Example for a typical spherical bearing with restraint for one axis (P1)

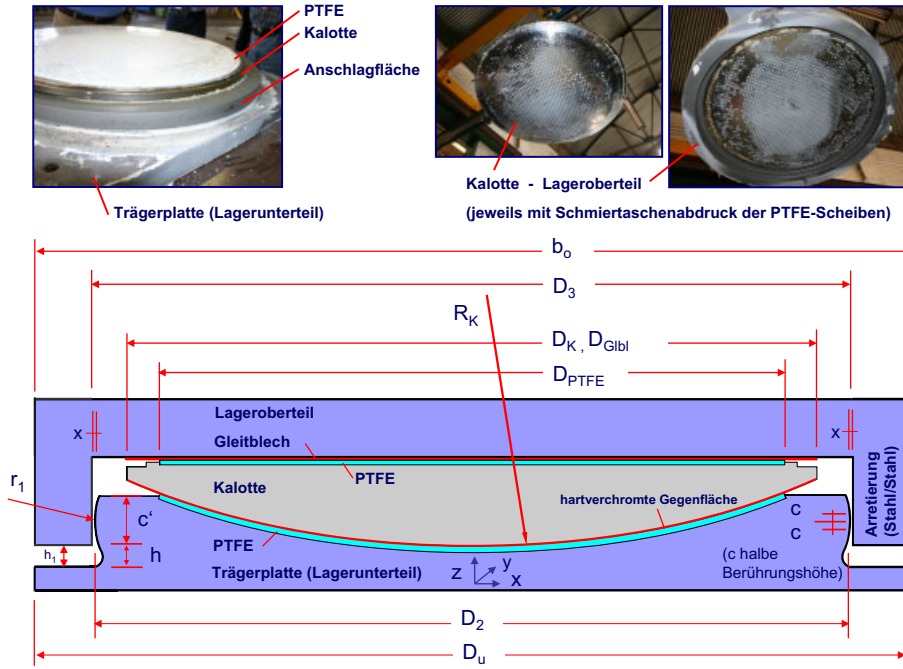


Bild 7. Typische Ausführung eines festen Kalottenlagers (P)
 Fig. 7. Example for a typical spherical bearing with restraints for both lateral axes (P)

PTFE – Siliconfett – austenitisches Gleitblech), woraus bei PTFE-Lagern u. a. eine Abnahme der Dicke (t_p) der PTFE-Scheiben resultiert. Daher kommt bei der Beurteilung der Funktionstauglichkeit und der (Rest-)Lebensdauer von Kalottenlagern den Gleitspalthöhen (h_G bzw. h_K nach Bild 5) und den Kippspalthöhen (h_1) bei der Überwachung eine besondere Bedeutung zu. Die für die Kontrolle vorgesehenen Messstellen sind nach den Angaben der Richtzeichnungen Lag2 und Lag3 [15] im Kalottenrand oder auf dem Lagerunterteil besonders zu kennzeichnen. Bei allseits beweglichen und bei querfesten Kalottenlagern (KGa und KGe) ist es auf Grund der Zugänglichkeit der Gleitebenen möglich, mit Hilfe von Fühler- und Teleskoplehren sowohl den Gleitspalt als auch den Kippspalt zu messen. Bei festen Kalottenlagern muss jedoch beachtet werden, dass der um-

laufende Anschlag eine Inspektion der ebenen und der gekrümmten Gleitfläche verhindert, so dass bei diesem Lagertyp nur eine Kippspaltmessung möglich ist, mit der nur auf den mittleren Zustand der beiden Hauptgleitflächen geschlossen werden kann. In den derzeitigen Regelwerken sind keine eindeutigen Regelungen zur Berücksichtigung der Verformungseinschränkung (Verdrechkapazität) durch Abnutzung des PTFE's enthalten. Hierzu werden von den Lagerherstellern teilweise (auf Erfahrungen basierende) Zuschläge berücksichtigt.

Alle zuvor erwähnten Kalottenlagertypen können sowohl wie in den Bildern 5 bis 7 dargestellt mit oben liegender Gleitplatte oder in umgedrehter Lage mit unten liegender Gleitplatte eingebaut werden. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn im Überbau keine großen Lagerwege aufgenommen werden können. In diesem

Fall ist bei den beweglichen Lagern noch größerer Wert auf den Schutz der ebenen Gleitfläche gegenüber Verschmutzung zu legen.

2.2 Kombination (Paarung) von Gleitwerkstoffen

Nach DIN EN 1337 dürfen die in Tabelle 1 aufgeführten Werkstoffe kombiniert werden. Dabei muss bei der Wahl der Gleitpartner zwischen der ebenen und der gekrümmten Gleitfläche und zwischen Führungen unterschieden werden. Während in den ebenen Gleitflächen die Gegenflächen ausschließlich aus austenitischem Stahl bestehen müssen, darf in den gekrümmten Gleitflächen darüber hinaus geschmiertes PTFE mit Hartchrom und Aluminium kombiniert werden. In Führungen ist neben der Verwendung von PTFE auch die Verwendung der Mehrschichtenwerkstoffe CM1 (DU-B) und CM2 möglich. Da diese jedoch im Gegensatz zu PTFE, welches eine elastoplastische Bettung ermöglicht, nur eine sehr kleine Nachgiebigkeit in Dickenrichtung besitzen, dürfen diese nur verwendet werden, wenn sich die zusammenwirkenden Lagerbauteile selber in die Verschiebungsrichtung einfluchten können. Aufgrund der mit dem Lagerspiel verbundenen Klaffung der Gleitflächen in Führungen und aufgrund der Zwangslage des PTFE (i. d. R. vertikale Anordnung) wird in diesem Fall das PTFE grundsätzlich ohne Schmiertaschen ausgeführt. Auf das Führungsgleitmaterial (d. h. auch auf die Mehrschichtenwerkstoffe) wird lediglich eine Einlaufschmierung aufgebracht, in dem die Oberflächen mit einer geringen Menge Schmierstoff eingerieben werden und der Rest abgewischt wird. Die in den Zulassungen für Kalottenlager vorgesehene Verwendbarkeit von „Chemisch Nickel“ (Nickel-Phosphor-Legierung) als Ge-

Tabelle 1. Zulässige Kombination von Gleitwerkstoffen für die Langzeit-Anwendung von Gleitflächen nach DIN EN 1337-2 bzw. DIN EN 1337-8

Table 1. Combination of sliding materials in sliding surfaces according to DIN EN 1337-2 and DIN EN 1337-8

ebene Gleitfläche		gekrümmte Gleitfläche		Führungen		
PTFE mit Schmiertaschen	austenitischer Stahl	PTFE mit Schmiertaschen	austenitischer Stahl	PTFE ohne Schmiertaschen	austenitischer Stahl	
			Hartchrom			CM1
			Aluminium			CM2

genwerkstoff in der gekrümmten Gleitfläche ist nach europäischen Regelungen nicht mehr möglich.

Bei der Werkstoffwahl der Gegenfläche ist zu beachten, dass eine hartverchromte Schicht nicht beständig gegen Chlorionen in saurer Lösung und gegen Fluorionen ist und durch feste Partikel in der Luft beschädigt werden kann. Liegen solche Randbedingungen, wie z. B. in Industriegebieten vor, müssen besondere Maßnahmen zum Schutz der Oberfläche getroffen werden, da die Funktion des Lagers durch Lochfraß beeinträchtigt werden kann. Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Anwendung einer Hartchromschicht auf die gekrümmte Gleitfläche beschränkt. Zum einen, weil die gekrümmte Gleitfläche bei Kalottenlagern nahezu vollständig überdeckt ist und zum anderen, weil sich die Kalotte selbst bei voller Ausnutzung der zulässigen PTFE-Pressungen nahezu starr verhält.

2.3 Zur Frage der Kraftübertragung über Hertzische Pressung in Stahl-Stahl-Anschlagflächen

Wie Bild 7 zeigt, wird bei festen Kalottenlagern die Horizontalkraft vom Lageroberteil an das Lagerunterteil unter Ausnutzung Hertzscher Pressung über unmittelbaren Kontakt der mechanisch bearbeiteten stählernen Anschlagflächen realisiert. Nach [27] muss in diesem Fall der Abstand vom theoretischen Berührungspunkt zum freien Rand etwa das 2 bis 2,5-fache der rechnerischen Berührungshöhe betragen. In DIN EN 1337 findet sich zu diesem Randabstand keine Regelung. Zudem ist nicht geregelt, wie beim Eingriff des Lagerunterteils in das Lageroberteil (Abstand c' nach Bild 7) die in DIN EN 1337-1, 5.4 geforderten additiven Verdrehzuschläge berücksichtigt werden müssen. Obwohl es sich bei diesem Lagertyp um ein Standardlager handelt, werden in der Praxis aufgrund der unklaren Normensituation an dieser Stelle oft unterschiedliche Berechnungsansätze verwendet, die zu einer deutlichen Überbeanspruchung der Anschläge führen können.

Dass es im Bereich des Stahl-Stahl-Anschlages von Kalottenlagern zu Schäden kommen kann, zeigen die ersten Ergebnisse, die im Rahmen von zur Zeit durchgeführten Bauwerks-

und Lageruntersuchungen an zwei 1999 errichteten Bogenbrücken bei Ladbergen im Zuge der A1 über den Dortmund-Ems-Kanal gewonnen wurden [19]. Es handelt sich dabei jeweils um eine schiefwinklige stählerne Stabbogenbrücke (Kreuzungswinkel 42,57°) mit einer Spannweite von 104 m und einer Breite 20 m, die unter den Hauptträgern auf Kalottenlagern der Typen KGA, KGe und KF gelagert ist. Bei diesen Brücken ist zu erwarten, dass bereits im Jahr 2011 die ersten Kalottenlager aufgrund hoher Abtragungsraten des PTFE in den Hauptgleitflächen als Folge überdurchschnittlich hoher Gleitwege ausgetauscht werden müssen. Darüber hinaus kommt es an den Festlagern bei nahezu jeder LKW-Fahrt zu Geräuschentwicklungen des Lagers, die durch Relativbewegungen des Lageroberteils gegenüber dem Lagerunterteil in der stählernen Anschlagfläche hervorgerufen werden. Nach Entfernen der in dem Kippspalt eingelegten Dichtung wurde in dem Bereich der Anschlagflächen erwartungsgemäß erheblicher Abrieb (d. h. große Mengen an Metallpulver) festgestellt. Vergleichbare Schäden wurden in den Niederlanden an hochbeanspruchten Kalottenlagern an der Brücke Hagstein [47] festgestellt.

Diese Erkenntnisse müssen im Zusammenhang mit den Regelungen zu den Reibungskoeffizienten für Stahl-Stahl-Anschlagflächen gesehen werden. Anstatt einer einheitlichen Regelung variiert der Reibungskoeffizient je nach Lagertyp zwischen 0,2 (für Kalottenlager) und 1,0 (für die Stahl-Stahl-Anschlagflächen bei Elastomerlagern). Angesichts der festgestellten Verschleißerscheinungen muss vermutet werden, dass der für Kalotten- und auch für Topflager in den Regelwerken verankerte Reibungskoeffizient ($\mu = 0,2$) für die Bestimmung der Rückstellmomente infolge der Reibungskräfte in den Anschlagflächen zu niedrig ist. Bei einer Revision der DIN EN 1337 sollten darüber hinaus Festlegungen zur Höhe der zulässigen Hertzischen Pressungen und zur zulässigen Größe der Lagerverdrehungen unter Gebrauchslasten ergänzt werden, um nennenswerten Verschleiß an den Anschlagflächen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund besteht für die Beurteilung von Stahl-Stahl-Anschlagflächen weiterer Forschungsbedarf.

2.4 Verwendung moderner hochfester Gleitwerkstoffe

Die modernen hochfesten Gleitwerkstoffe weisen auch bei hohen Gleitwegen nur sehr geringe Abtragungsraten auf und die Druckfestigkeit des Materials übersteigt die Druckfestigkeit des in DIN EN 1337 geregelten Werkstoffes PTFE um nahezu das Zweifache. Diese Eigenschaften haben dazu geführt, dass sich hochfeste Gleitwerkstoffe in Deutschland mittlerweile zum Standardgleitmaterial in Gleiteilen von Brückenlagern entwickelt haben.

Die gegenüber dem PTFE erheblich höheren Druckfestigkeiten führen bei gleichen Lagereinwirkungen im Vergleich zu PTFE-Kalottenlagern zu deutlich geringeren Durchmessern der Gleitwerkstoffscheiben, so dass vor diesem Hintergrund die Außenabmessungen der Lager kleiner ausgeführt werden können. In diesem Fall ist bei der Bemessung der Lager und der angrenzenden Bauteile jedoch zu berücksichtigen, dass kleinere Lageraußenabmessungen zu deutlich größeren Pressungen in den Lagerfugen und damit zu erheblich höheren Beanspruchungen und Verformungen der angrenzenden Bauteile im Bereich der Lager führen können. Die Erfahrungen mit MSM-Kalottenlagern zeigen, dass bei einer vollen Ausnutzung der neuen Gleitwerkstoffgeneration aufgrund der konzentrierteren Übertragung der Lasten in vielen Fällen höhere Betonfestigkeitsklassen erforderlich sind. Zudem kommen zur Erzielung ausreichender Lastverteilung in zunehmendem Maße für die Lagerbauteile Bleche mit Dicken von über 100 mm zum Einsatz. Aus diesem Grund kann es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, die hochfesten Gleitwerkstoffe nicht voll auszunutzen. Zur Vermeidung von Lagerschäden, die nicht aus falscher Konstruktion der Lager resultieren, sondern aus fehlerhafter Lastweiterleitung kommt im Rahmen der Bemessung in viel stärkerem Maße als bisher den Nachweisen der Lasteinleitung der Lagerkräfte in die angrenzenden Bauteile und insbesondere den Nachweisen der Verformung der Gleitplatten bzw. der Lagerunterteile zur Wahrung eines funktionsgerechten Gleitpaltes und hinreichend gleichmäßiger Gleitwerkstoffpressungen eine besondere

Bedeutung zu. Im Rahmen des Lager-einbaus ist noch stärker als bisher auf eine ordnungsgemäße Herstellung der Fugen zu den an die Lager angrenzenden Bauteilen zu achten. Die Eignung des Herstellungsverfahrens und des für den Einbau der Lager verantwortlichen Personals (Qualifikationsnachweis: TZEN-Schein) sollte im Zweifel durch entsprechende Baustellenversuche überprüft werden.

Der Einsatz der modernen hochfesten Gleitwerkstoffe ist nicht nur bei neuen Lagern vorteilhaft, sondern kann auch bei bereits eingebauten Lagern zweckmäßig sein, bei denen ein zu hoher Verschleiß in den Hauptgleitflächen festgestellt wird. Dies zeigen Beispiele an Kalottenlagern an der Wuppertaler Schwebebahn, bei denen aufgrund zu hoher akkumulierter Gleitwege unter Betriebslasten und falsch bestimmter Gleitflächenbeanspruchungen das verwendete PTFE in den ebenen Hauptgleitflächen bereits nach einem Jahr nahezu vollständig abgenutzt war. Als Sanierungsmaßnahme wurden die PTFE-Scheiben vor Ort gegen MSM-Scheiben mit

übereinstimmender Geometrie ausgetauscht und seitdem kein nennenswerter Verschleiß mehr festgestellt [48].

3 Druck-Zug-Kalottenlager für die Eisenbahnüberführungen Amsinckstraße und Oberhafen in Hamburg

3.1 Allgemeines

Bei den Brücken EÜ Amsinckstraße und EÜ Oberhafen handelt es sich um neue Eisenbahnüberführungen in unmittelbarer Nähe zum Hamburger Hauptbahnhof, bei denen insgesamt 76 Kalottenlager, die mit dem hochfesten Gleitwerkstoff MSM (Maurer Sliding Material) ausgestattet sind, zum Einsatz kommen. In 47 Fällen handelt es sich dabei um von der Fa. Maurer Söhne speziell entwickelte Druck-Zug-Kalottenlager. Die Anwendung dieses hochfesten Gleitwerkstoffes ist durch nationale [8] und europäische Zulassungen [9] geregelt. Die Ausstattung der Lager richtet sich in allen Fällen nach der nationalen Ausstattungszulassung der Fa. Maurer Söhne.

Die EÜ Amsinckstraße besteht aus zwei neuen zweigleisigen Stahl-

überbauten mit einer gemeinsamen Längsfuge und einem durchgehenden Schotterbett. Beide Überbauten sind jeweils ca. 10.0 m breit und als Durchlaufträger über 5 Felder mit Stützweiten von 6.4 m – 12.0 m – 12.0 m – 12.0 m – 15 m (Gesamtlänge 57.4 m) ausgebildet. Jeder Überbau liegt in jeder Lagerachse (Achsen 10 bis 60) unterhalb der Querträger auf jeweils vier Kalottenlagern auf, so dass insgesamt 48 Kalottenlager zum Einsatz kommen. Die Unterbauten werden als Widerlager (Achsen 10 und 60), Stahlrahmen (Achsen 20, 30 und 50) und Stahlbetonrahmen (Achse 40) ausgeführt. Das Lagerschema für die EÜ Amsinckstraße ist in Bild 8 dargestellt.

Aufgrund der hohen Anzahl von Lagern in Querrichtung und der kurzen Spannweite des Endfeldes zwischen den Achsen 10 und 20 kommt es je Überbau an 21 Lagern zu Lagerzugkräften. Von den insgesamt 48 Lagern sind 42 Lager speziell entwickelte Druck-Zug-Kalottenlager (Z) und die übrigen 6 Lager (Druck-)Kalottenlager des Typs KGa. Die zugbeanspruch-

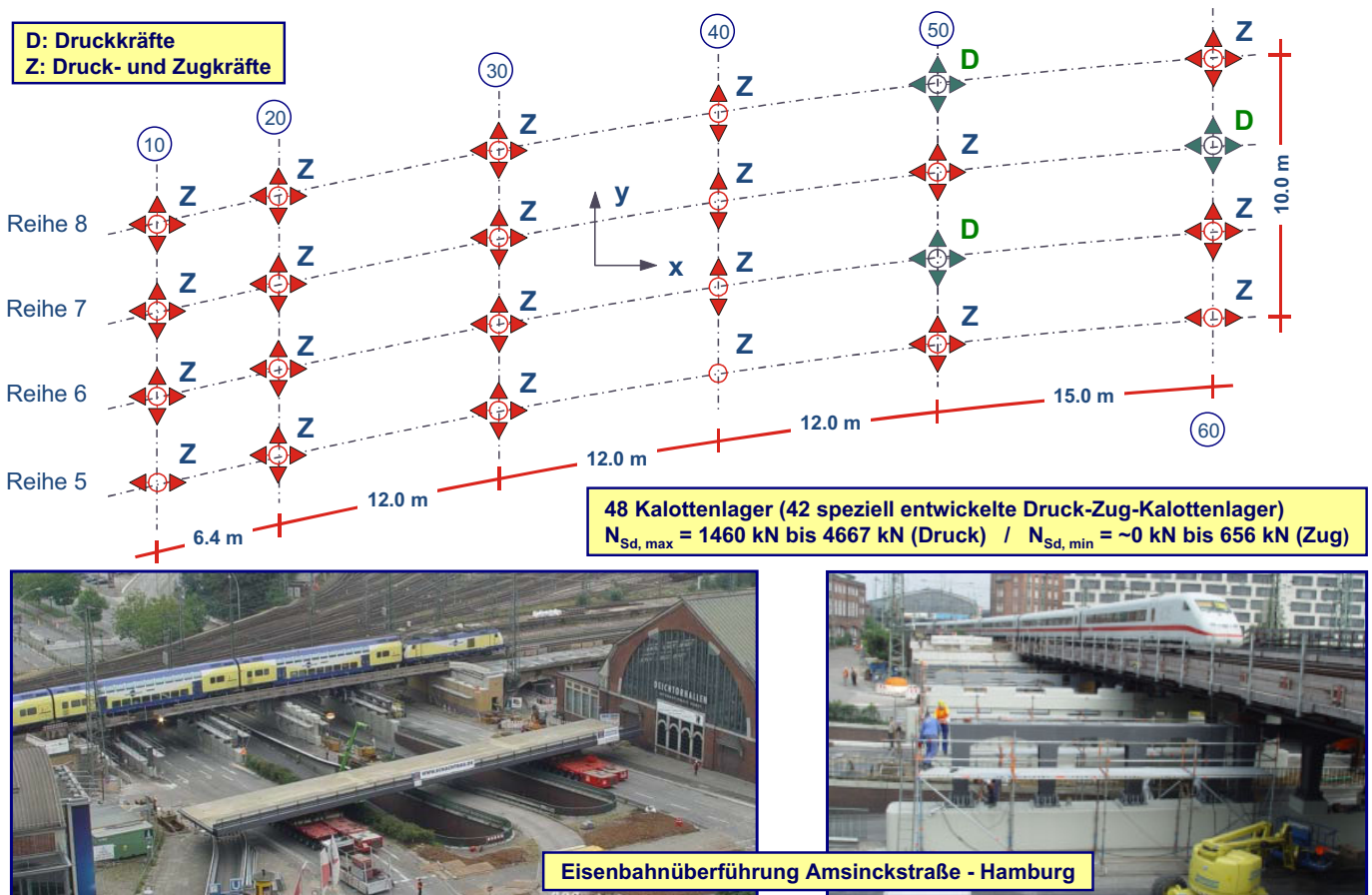


Bild 8. Eisenbahnüberführung Amsinckstraße/Lagerungssystem (Überbau 2)
 Fig. 8. Railway bridge Amsinckstraße/bearing system (superstructure 2)

ten Kalottenlager sind in Bild 8 durch einen zusätzlichen Buchstaben „Z“ gekennzeichnet. Betroffen sind alle üblichen Kalottenlagertypen, d. h. allseits bewegliche Lager (KGa-Z), längs- bzw. querbewegliche Lager (KGe-Z bzw. KGeq-Z) und allseits feste Lager (KF-Z). Die ausschließlich druckbelasteten Kalottenlager sind durch einen zusätzlichen Buchstaben „D“ gekennzeichnet. Für die Druck-Zug-Kalottenlager betragen die Lagerdruckkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit zwischen 1460 kN und 4667 kN, die Lagerzugkräfte liegen zwischen ~0 und 656 kN. Aufgrund des ungünstigen Spannweitenverhältnisses des Endfeldes zwischen den Achsen 10 und 20 zum benachbarten Feld treten an den Lagern in der Achse 10 unter der häufigen Lastfallkombination Zugkräfte auf, die zu einer Ermüdungsbeanspruchung der Lager führen.

Lager, die zusätzlich zu den üblichen Druckkräften und den gleichzeitigen Lagerverdrehungen und Lagerverschiebungen im Betriebszustand nennenswerte Zugkräfte übertragen können, liegen aufgrund der einwir-

kenden Zugkräfte nicht mehr im Anwendungsbereich der DIN 4141 [2] und der DIN EN 1337 [1] und sind bisher auch nicht durch weitere bauaufsichtliche Zulassungen abgedeckt. Die Verwendung derartiger Lager im Anwendungsbereich der Bahn ist derzeit nur durch unternehmensinterne Genehmigungen (UiG) der Deutschen Bahn und durch Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) durch das Eisenbahnbundesamt [18] möglich.

Bild 9 zeigt einen Schnitt durch ein typisches Druck-Zug-Kalottenlager des Typs P2-KGa-Z der EÜ Amsinckstraße. Typisches Konstruktionselement ist die mittig angeordnete Zugkalotte (Pos. 4), gegen die sich die Druckkalotte (Pos. 2) im Fall einer auftretenden Zugkraft in einer gekrümmten Gleitfläche nach oben abstützen kann. Die Zugkalotte ist zu diesem Zweck über ein Futterblech (Pos. 6) gegen das Lagerunterteil (Pos. 1) mittels HV-Schrauben vorgespannt. Infolge dieser Rückverankerung weicht die Druckkalotte erheblich von der sonst üblichen Form ab. Sie besitzt eine mittige runde Ausnehmung und ist im Bereich des Ein-

griffs unter die Zugkalotte nicht massiv, sondern konstruktionsbedingt als dickwandige Schale mit Loch ausgebildet. Je nach Lage der ebenen zur gekrümmten Gleitfläche kommt es im vorliegenden Fall durch die zusätzliche Realisierung des Zugkraftabtrags zu einer erheblichen Beeinflussung des Druckkraftabtrags. Verglichen mit herkömmlichen (Druck-)Kalottenlagern mit zwei Gleitflächen besitzt dieser Typ vier Hauptgleitflächen ((a) und (b) für den Drucklastabtrag sowie (c) und (d) für den Zuglastabtrag). Die Lager sind seit Dezember 2008 in Betrieb und werden auf der Grundlage eines eigens dafür entwickelten Inspektionskonzeptes überwacht. Wesentlicher Bestandteil der Überwachung ist die Größe der bei Verkehrsbeanspruchungen auftretenden vertikalen Lagerverformungen, um darüber auf einen möglichen inneren Lagerverschleiß schließen zu können.

3.2 Zur Entwicklung von Druck-Zug-Kalottenlagern

Da dieser spezielle Lagertyp nicht mehr durch die Regelwerke erfasst wird,

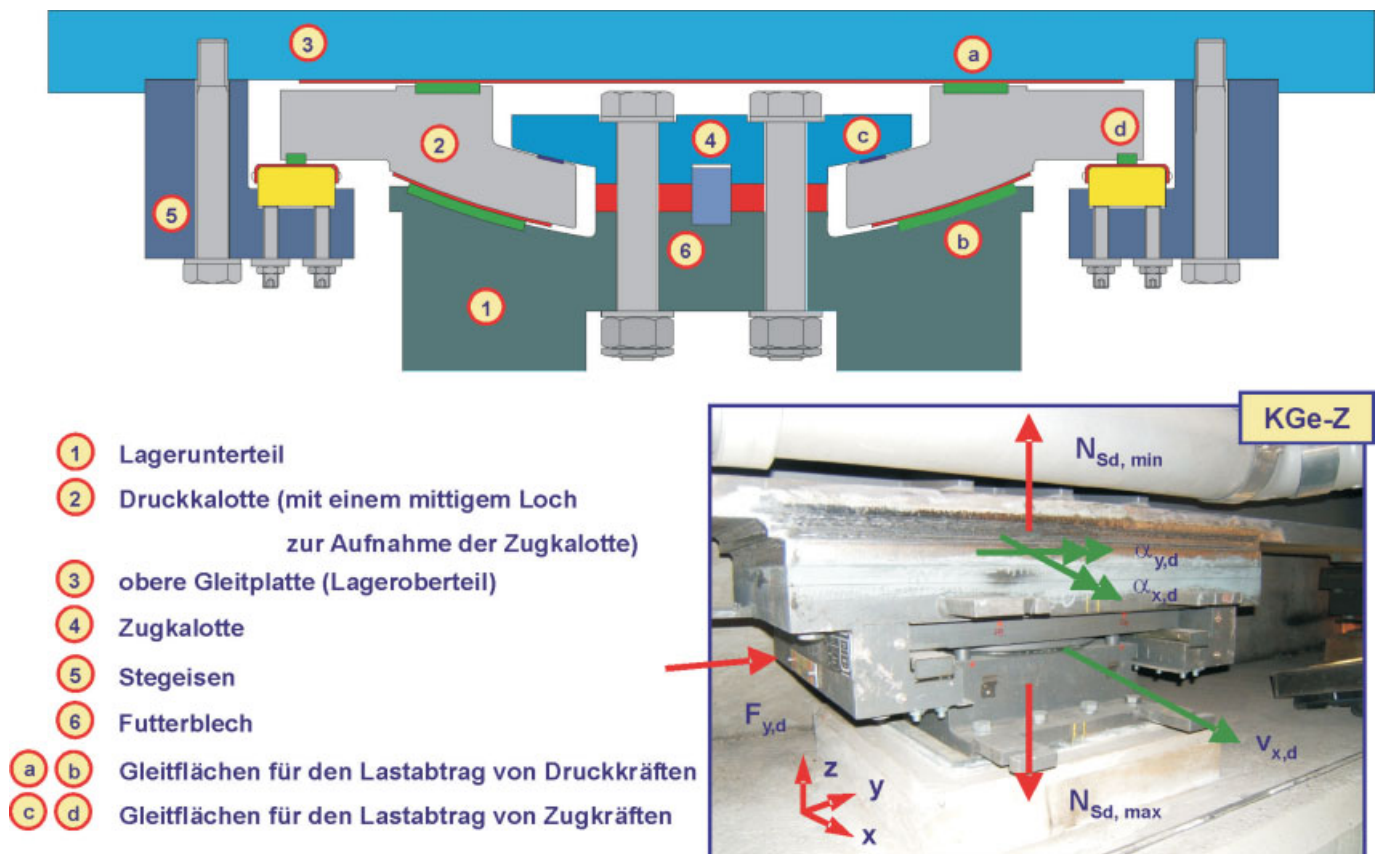


Bild 9. Druck-Zug-Kalottenlager (EÜ Amsinckstraße)

Fig. 9. Spherical bearings with compression and uplift forces (Railway bridge Amsinckstraße)

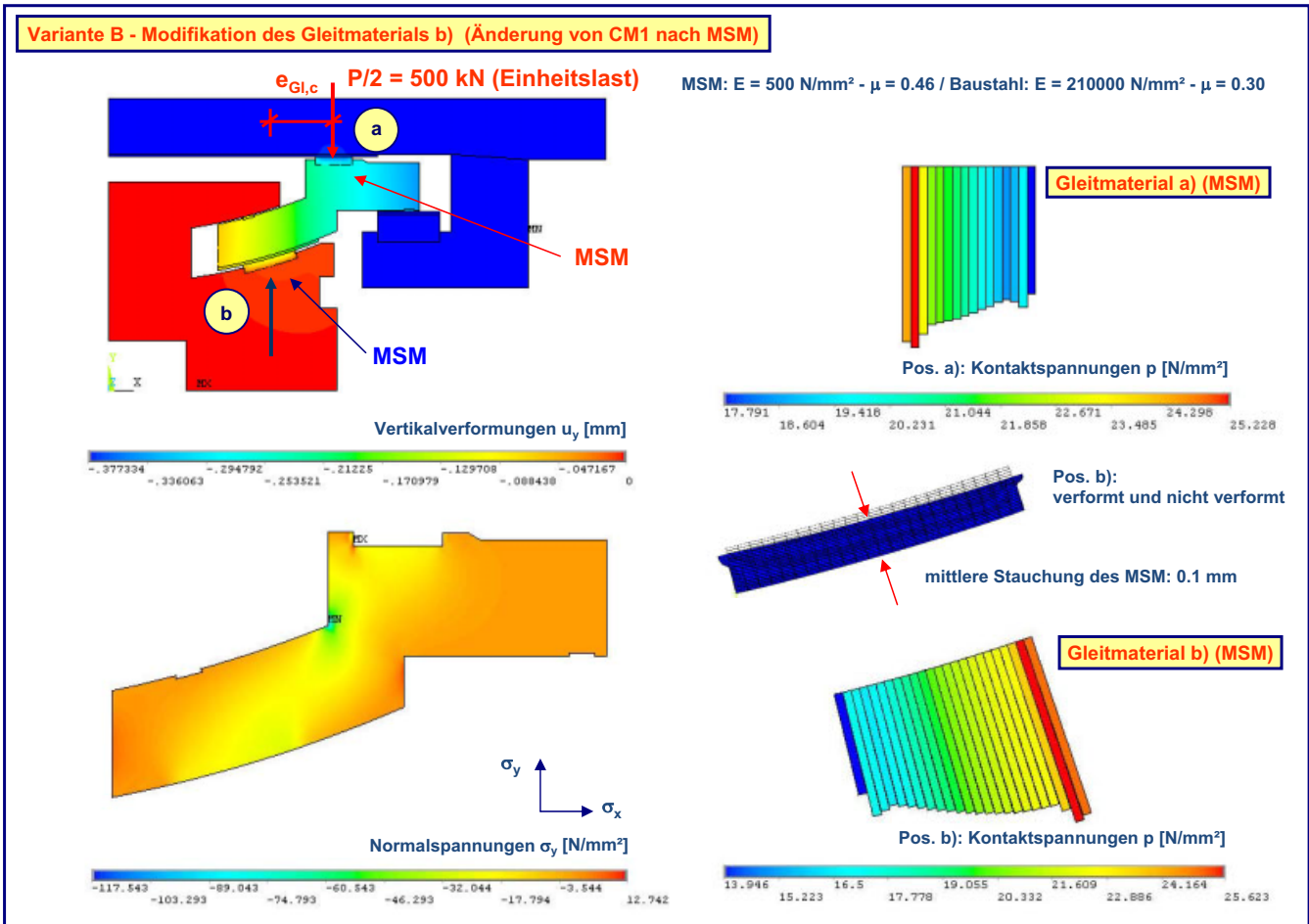
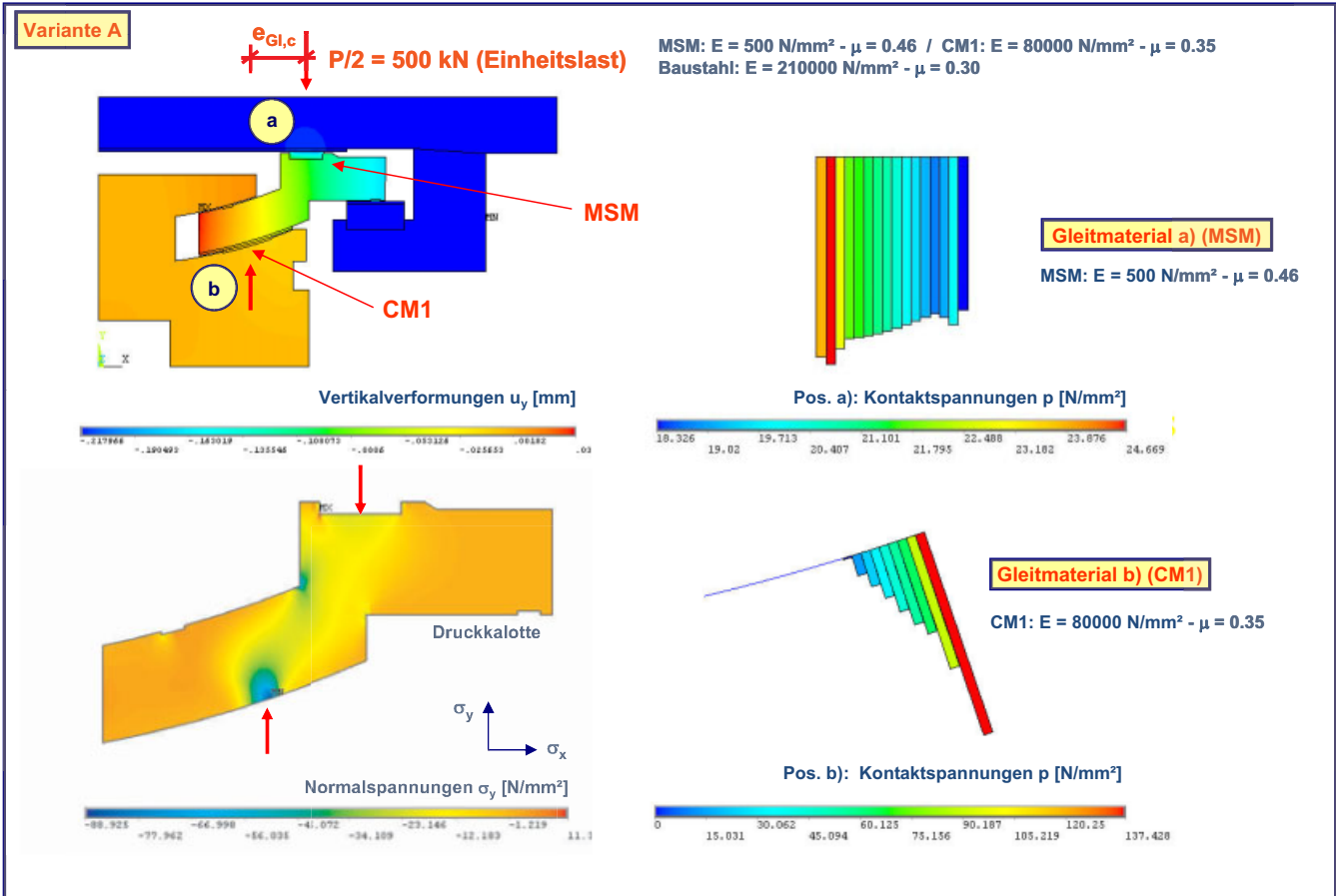


Bild 10. Numerische Untersuchungen zum Lastabtrag von Druckkräften
 Fig. 10. Numerical investigation to the load transfer in case of compression forces

wurden im Rahmen der Entwicklung auf der Grundlage umfangreicher theoretischer Untersuchungen mit Hilfe von FE-Berechnungen (vgl. Bilder 10 und 11) zunächst Bemessungsregeln und Anforderungen an die Herstellung entwickelt [18], um so ein ausreichendes Sicherheitsniveau und eine ausreichende Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Diese Untersuchungen waren vornehmlich auf die folgenden Punkte gerichtet:

- Lastabtrag der Druckkräfte (in Verbindung mit Verdrehungen und Reibungseinflüssen)
- Lastabtrag von Zugkräften (in Verbindung mit Verdrehungen und Reibungseinflüssen)
- Einfluss der Exzentrizität $e_{GL,c}$ zwischen den Hauptgleitflächen a) und b) gem. Bild 10 auf die Verteilung der Kontaktspannungen in den zugehörigen Gleitwerkstoffen
- Einfluss der Exzentrizität $e_{GL,u}$ zwischen den Hauptgleitflächen c) und d) gem. Bild 11 auf die Verteilung der Kontaktspannungen in den zugehörigen Gleitwerkstoffen

- Einfluss der Rückstellmomente auf die Beanspruchung der am Zuglastabtrag beteiligten Lagerbauteile.

In diesem Zusammenhang zeigt Bild 10 das Ergebnis der numerischen Untersuchungen für den Lastabtrag einer (Einheits-)Druckkraft. Die Variante A zeigt eine Lagerausbildung mit einer sehr großen Exzentrizität $e_{GL,c}$ zwischen den beiden Hauptgleitflächen a) und b), was zu unverträglichen Randspannungen an den Kanten des ursprünglich gewählten Gleitwerkstoffes CM1 in der Gleitfläche b) führt, und mit einer Ausbildung der Gleitfläche b) mit CM1. Die Untersuchungen zeigten ferner, dass sich eine wesentlich günstigere Verteilung der Kontaktspannungen einstellt, wenn in der Gleitfläche b) statt des sehr dehnstifen Gleitmaterials CM1 der nachgiebigere Werkstoff MSM eingesetzt wird. Gleichzeitig zeigten die Untersuchungen, dass die Stauchung des Gleitwerkstoffes MSM in der gekrümmten Hauptgleitfläche b) unter Gebrauchslasten auf verträgliche Maße beschränkt werden kann, was eine

sehr wichtige Anforderung für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit dieses Lagertyps ist.

Das gleiche Verhalten konnte bei den Gleitflächen c) und d) im Fall des Lastabtrages einer Zugkraft beobachtet werden. Dies wird mit Hilfe von Bild 11 deutlich, in dem die Verteilung der Kontaktspannungen in der ebenen CM1-Gleitfläche d) infolge einer (Einheits-)Zugkraft dargestellt ist. Die für CM1 (und MSM) in den Regelwerken angegebenen Bemessungswerte der Druckfestigkeiten (f_d) in Führungen sind nur dann in der vollen Höhe anwendbar, wenn sichergestellt ist, dass die Gleitwerkstoffe nahezu zentrisch beansprucht werden und sich die zugehörigen Lagerbauteile zum Ausgleich von Beanspruchungen aus Exzentrizitäten selber einfluchten können. Da dies beim Lastabtrag einer auftretenden Lagerzugkraft im Fall der Gleitflächen c) und d) nicht möglich ist, sollten für die Beanspruchbarkeiten der Gleitwerkstoffe in den Gleitflächen c) und d) nur geringere Werte in Ansatz ge-

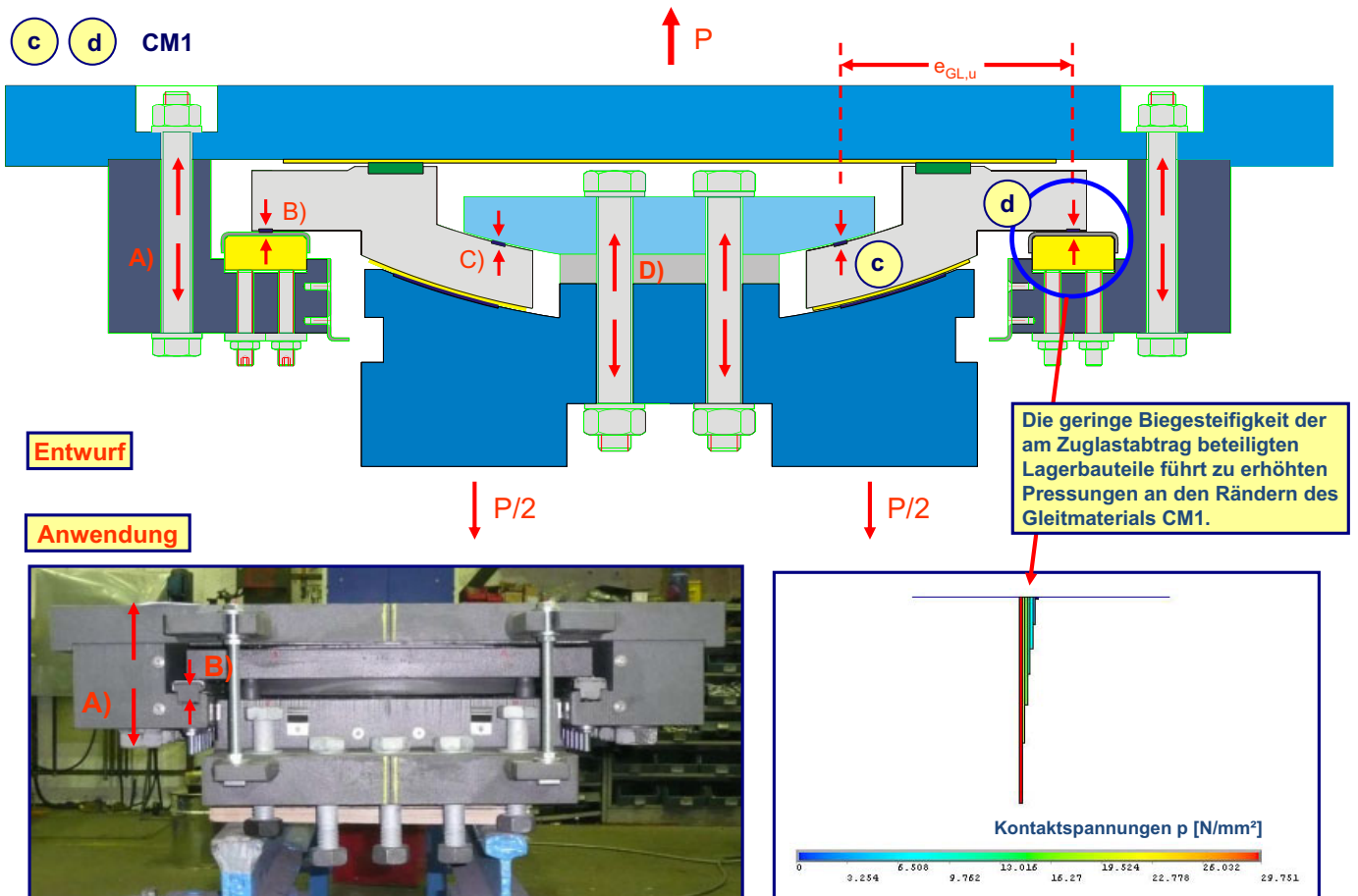


Bild 11. Numerische Untersuchungen zum Lastabtrag von Zugkräften
 Fig. 11. Numerical investigation to the load transfer in case of uplift forces

bracht werden, um die in Bild 11 dargestellte ungleichmäßige Verteilung der Kontaktspannungen in der ebenen Gleitfläche d) zu kompensieren. Vor diesem Hintergrund wurden zur Vermeidung frühzeitiger Lagerschäden an den am Zuglastabtrag beteiligten Gleitflächen die Bemessungswerte der Druckfestigkeiten (f_d) für CM1 (und MSM) auf 2/3 der in den Regelwerken festgelegten Werte reduziert.

Bild 12 fasst die maßgeblichen Bemessungsregeln zusammen und zeigt für ein typisches Druck-Zug-Kalottenlager einen Vergleich zwischen der zuvor als Variante A vorgestellten Ausführung und der zur Ausführung gelangten Konstruktion. Die wesentlichen zusätzlichen Maßnahmen umfassen:

- Reduktion der Exzentrizität $e_{GL,u}$
- Ersetzen des Gleitmaterials CM1 in den Gleitflächen b) und d) durch MSM
- Einführung eines zusätzlichen Abminderungsfaktors von 2/3 für den Bemessungswert der Druckfestigkeit (f_d) für die Gleitwerkstoffe in den Gleitflächen c) und d)
- Bemessung der am Zuglastabtrag beteiligten Bauteile (inklusive der Gleitwerkstoffe in den Gleitflächen c) und d)) für die Zugkräfte und die damit korrespondierenden Rückstellmomente (hervorgerufen durch die Bewegungswiderstände in den Gleitflächen und durch gleichzeitig auftretende Verdrehungen)
- Einführung eines unteren Grenzwertes für die Größe des Reibungs-

- koeffizienten μ_{min} von 5 % für die Gleitflächen a) und b) zur Berücksichtigung der Verschlechterung der Schmierbedingungen, wenn kleine vertikale Abhebewegungen in den Hauptgleitflächen auftreten
- Begrenzung der minimalen Breite der MSM-Ringe in den Hauptgleitflächen a) und b) auf 50 bzw. 75 mm
- Herstellung der Lager so, dass unter Gebrauchslasten ein möglicher Spalt zwischen den Gleitflächen b) und c) auf 0,5 mm begrenzt wird
- Vermeidung scharfkantiger Übergänge in den stählernen Lagerbauteilen zur Erhöhung der Spröbruchsicherheit

Der Nachweis der am Zuglastabtrag beteiligten Lagerbauteile gelingt aufgrund der hohen Beanspruchung

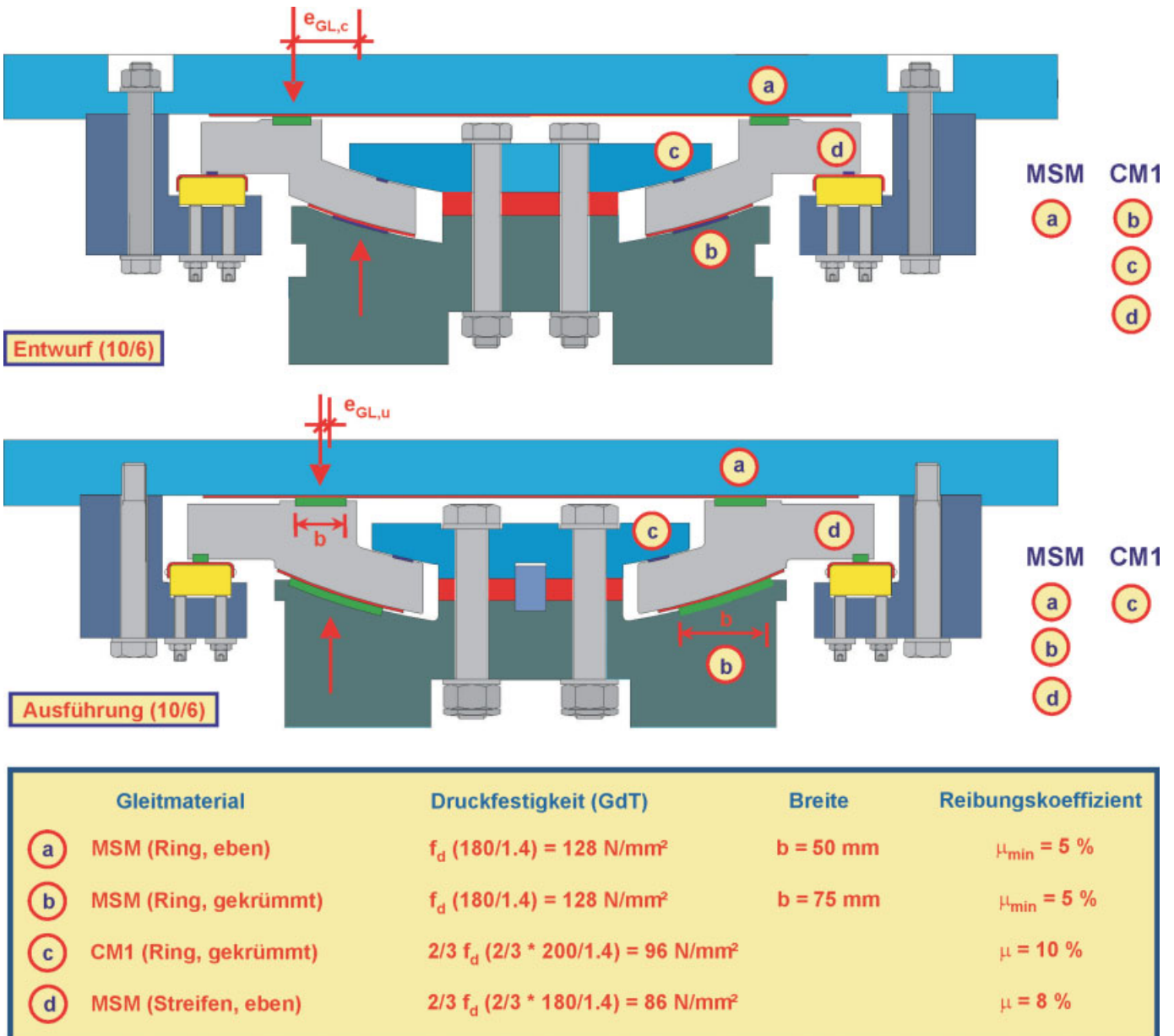


Bild 12. Maßgebliche Bemessungsregeln für die speziell entwickelten Druck-Zug-Kalottenlager
 Fig. 12. Main design rules for spherical bearings with compression and uplift forces

und der komplexen Geometrie nur noch mit Hilfe aufwändiger FE-Berechnungen am Gesamtmodell eines Druck-Zug-Kalottenlagers. Da der Lastabtrag einer Zugkraft vornehmlich über Biegung der Lagerbauteile realisiert wird, unterscheidet sich das vertikale Verformungsverhalten solcher Lager bei einer Zugbeanspruchung deutlich von dem bei einer Druckbeanspruchung. Dies wird insbesondere mit Hilfe von Bild 13 deutlich, in dem die Verformungsfiguren für die charakteristische Lastfallkombination (oben links) und für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (oben rechts) eines typischen Druck-Zug-Kalottenlagers der EÜ Amsinckstraße dargestellt sind. Während derartige Lager auf eine Druckbeanspruchung ähnlich steif reagieren wie (Druck-)Kalottenlager, verhalten sie sich beim Zuglastabtrag deutlich weicher. Dies mag von Vorteil sein, wenn, wie im Fall der EÜ Amsinckstraße und EÜ Oberhafen, die Zugbeanspruchungen in vielen Fällen aus Zwangskräften resultieren, da diese durch Nachgiebigkeit der Lager abgebaut werden.

Der Einsatz von Zuglagern führt insbesondere bei Massivbaukonstruk-

tionen zu der Frage nach der geeigneten Rückverankerung der Lager. Zur Übertragung von Horizontalkräften werden in der Regel Kopfbolzendübel verwendet, die mit Hilfe der im DIN-Fachbericht 104 festgelegten Schubtragfähigkeiten für die angreifenden Horizontalkräfte bemessen werden. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass sich die Kopfbolzendübel aufgrund ihres angestauchten Kopfes ungewollt am Lastabtrag vertikaler Zugkräfte beteiligen und so zusätzlich beansprucht werden. Um Schäden an der Verankerung zu vermeiden, müssen die Kopfbolzendübel und der umgebende Beton die Beanspruchungen aus Zug und Schub mit ausreichender Sicherheit aufnehmen können. Bei der Bemessung muss dann beachtet werden, dass die im DIN-Fachbericht 104 [5] für Kopfbolzendübel angegebenen Schubtragfähigkeiten nur gelten, wenn keine bzw. nur kleine zusätzliche Zugkräfte auf die Dübel einwirken [44]. Falls daher auf genauere Nachweise verzichtet werden soll, so müssen die Ankerplatten gegen die Unterbauten ausreichend vorgespannt werden, damit die Kontaktfuge immer überdrückt ist. Gleiches gilt für Lager

mit hohen Horizontallasten oder großen Rückstellmomenten in Kombination mit geringen Auflasten, bei denen die Gefahr einer Klaffung der Lagerfugen besteht.

Grundsätzlich muss bei einbetonierten Anbauteilen auf der rückwärtigen Seite von Ankerplatten davon ausgegangen werden, dass sich diese ungewollt am Lastabtrag beteiligen. Dies gilt z. B. für unterseitige Hülsen (Hülsen für Muttern, Ankerhülsen für Gewindestangen), bei denen aufgrund ihrer viel höheren Schubsteifigkeit im Gegensatz zu den Kopfbolzendübeln eine erhebliche Mitwirkung bei Schubbeanspruchungen infolge von Horizontallasten unterstellt werden muss. Zur Erzielung eines eindeutigen Kraftflusses müssen die rückwärtigen Anbauteile so gegen den Beton abgepolstert werden, dass sich diese nicht am Lastabtrag beteiligen können. Zudem sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für diesen Anwendungsfall Muttern, die in den Beton hineinragen, nur mit zusätzlicher Verdrehsicherung und gegen den Beton geschützt verwendet werden müssen.

Die Verwendung der Druck-Zug-Kalottenlager in Hamburg führte ins-

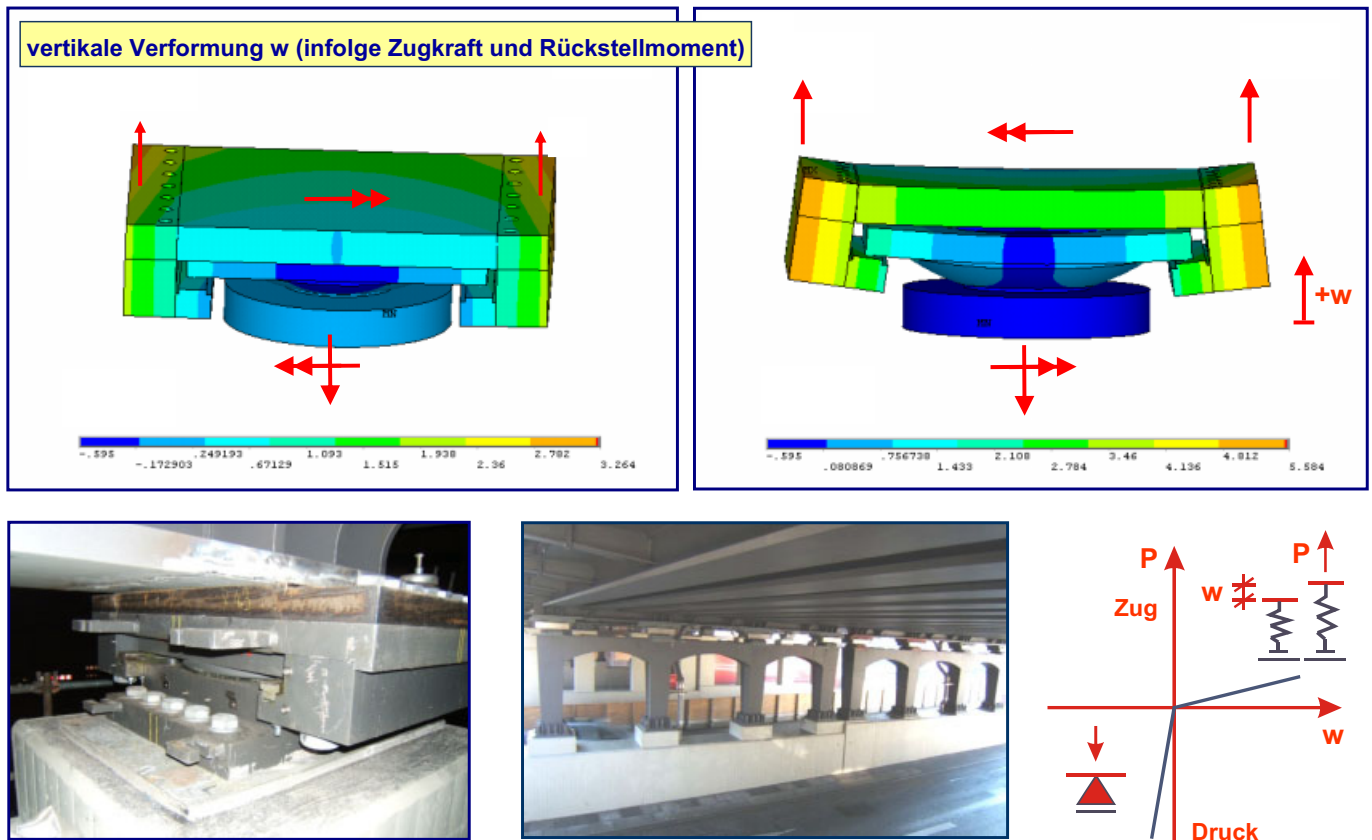


Bild 13. Unterschiedliches Verformungsverhalten bei Druck- und bei Zugbeanspruchung
 Fig. 13. Different load-deformation-behaviour in case of compression and uplift forces

besondere bei Eisenbahnbrücken zu einer weiteren Diskussion in Deutschland, die auch die übrigen Lagerarten betrifft. Bei Lagern mit hohen Zugkräften oder mit großen Horizontalkräften werden häufig Bleche in der Materialgüte S355 J2+N verwendet, die z. T. dicker sind als 100 mm. Für diesen Werkstoff beträgt die in der neuesten Ausgabe des DIN-Fachberichtes 103 [4] festgelegte zulässige Werkstoffdicke für Bleche von Stahlteilen im Zugbereich geschweißter Bauteile für Eisenbahnbrücken 55 mm. Zur Beurteilung ausreichender Sprödbruchsicherheit ist damit ein gesonderter Nachweis der Sprödbruchsicherheit auf der Grundlage der DASt-Ri 009 [11] bzw. DIN EN 1993-1-10 [6] erforderlich. Neueste Untersuchungen für zug- und biegebeanspruchte Lagerbauteile [45] zeigen, dass aufgrund der fehlenden Ermüdungsbeanspruchung und der mechanischen

Oberflächenbehandlung diese Dickenbegrenzung für Lagerbauteile eine sehr konservative Abschätzung darstellt. Diese Untersuchungen sind derzeit noch nicht vollständig abgeschlossen. Die Ergebnisse sollen so aufbereitet werden, dass für typische Lagerdetails zukünftig auf einen rechnerischen Sprödbruchnachweis verzichtet werden kann.

4 Regelungen im Zusammenhang mit Elastomerlagern

4.1 Vergleich der Anwendungsbereiche für bewehrte Elastomerlager nach DIN 4141-14:1985-09 und DIN EN 1337-3

Eine zentrale Frage bei der Beurteilung des europäischen Regelwerkes auf der Grundlage des in DIN 4141-14:1985-14 verankerten Sicherheitsniveaus ist, ob mit dem neuen Regelwerk der bisher geregelte Anwendungsbereich (und da-

mit der bisher vorhandene Erfahrungsbereich) verlassen wird. Im europäischen Konzept wird der Anwendungsbereich bewehrter Elastomerlager maßgeblich durch die in DIN EN 1337, Kapitel 5.3.3 vorgestellten Regelungen zur Schubbeanspruchung im Gummi, zum Schubknicken und zur Verdrehungsbegrenzung (Klaffen der Lagerfuge) bestimmt. Nach DIN 4141-14:1985-09 bestand der Anwendungsbereich für Regellager aus einer beliebigen Beanspruchungskombination aus Auflast und Verdrehung, deren Einzelwerte kleiner gleich den im Regelwerk tabellierten maximal zulässigen Pressungen und maximal zulässigen Verdrehungen war. Da es abweichend zu den heutigen europäischen Regelungen bei Berücksichtigung der Regellaßgrößen keine Interaktion zwischen der Verdrehung und der Auflast gab, entsprach diese Vorgehensweise im Gegensatz zur heutigen (aufwändige-

Kriterium:		
Schubverzerrung:	$F_{z,d} \leq \frac{G \beta a'}{3(1+\beta)t_i} \left[\frac{\varepsilon_{u,k}}{\gamma_m K_L} - \frac{v_{x,d}}{T_q} - \frac{a'^2 \alpha_{i,d}}{2 t_i^2} \right] (a' - v_{x,d}) \cdot b' (f_2)$	G = 0.9 N/mm² ε _{u,k} = 7 γ _m = 1.0 K _L = 1.0 v _{x,d} / T _q = 1.0 K _{r,d} = 3 E _b = 2000 N/mm ² a' = 439 mm b' = 589 mm β = 1.342
Verdrehung:	$\alpha_{i,d} \leq \frac{3 \cdot F_{z,d} \cdot t_i}{a'^3 \cdot \beta} \left(\frac{1}{5 G \left(\frac{\beta \cdot a'}{2(1+\beta)t_i} \right)^2} + \frac{1}{E_b} \right) (f_1)$	
Schubknicken:	$F_{z,d} \leq \frac{1}{3} G \frac{a'^2}{T_e t_i} \frac{\beta}{1+\beta} \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} \right) (a' \cdot b') (f_3)$	

Elastomerlager: a x b = 450 x 600 mm - T_b = 186 mm - T₀ = 146 mm - T_e = T_q = 110 mm - r = 5.5 mm
 t_i = 11 mm - t_{so} = 20 mm - n = 10 - t_s = 4 mm - v_{x,d} / T_e = 1.0

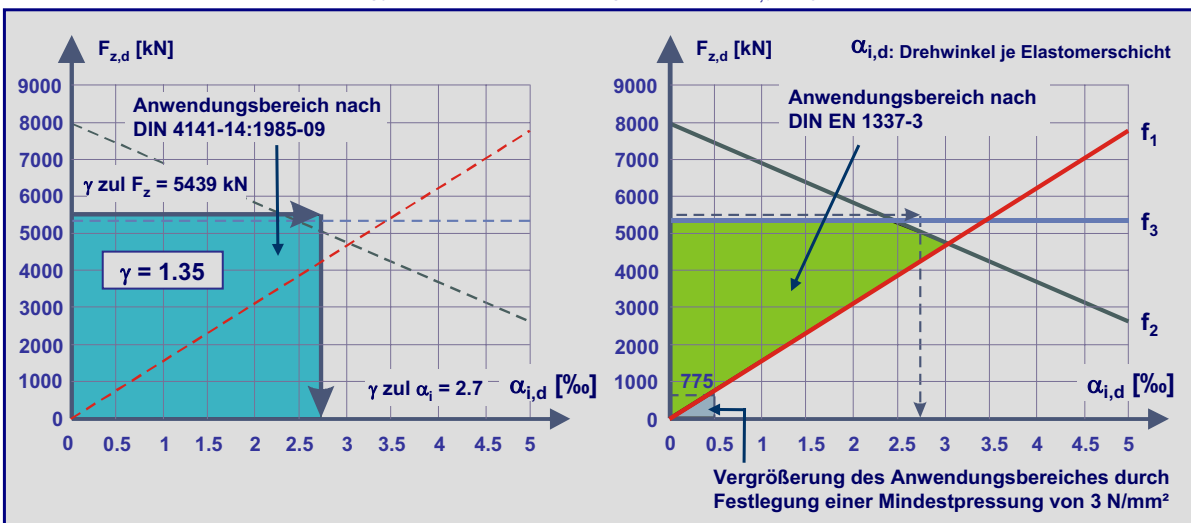


Bild 14. Einschränkung des Anwendungsbereiches von Elastomerlagern durch Einführung der DIN EN 1337-3 – Auswirkung der Festlegung einer Mindestpressung von 3 N/mm² (am Beispiel eines (verankerten) Regellagers 450 x 600 mm aus DIN 4141-14:1986-09)

Fig. 14. Limitation of the range of application after introducing DIN EN 1337-3 – effect of introducing a minimum pressure of 3 N/mm² (elastomeric bearing 450 x 600 mm according to DIN 4141-14:1986-09)

ren) Bemessung nach DIN EN 1337 eher einer vereinfachten Bemessung.

Bild 14 veranschaulicht anhand eines (verankerten) Regellagers $a \times b = 450 \times 600 \text{ mm} / T_b = 186 \text{ mm}$, dass das neu eingeführte Kriterium der Verdrehungsbegrenzung (DIN EN 1337, 5.3.3.6) zu einer Einschränkung des Anwendungsbereiches für Elastomerlager führt, da dadurch die bisherige Entkopplung zwischen Auflast und Verdrehung aufgehoben wird. Für den Vergleich wurde der Fall einer Verdrehung um die längere Lagerseite in Verbindung mit einer Verschiebung in Richtung der kürzeren Lagerseite untersucht. Die maßgeblichen Bemessungsgleichungen wurden so umgeformt, dass sich diese unmittelbar als Funktionen „Lagerlast über Verdrehung“ beschreiben lassen. Um die unterschiedlichen Sicherheitskonzepte zu berücksichtigen, wurden die in DIN 4141-14:1985-09 angegebenen Werte für die zulässige Pressung σ_m und den zulässigen Drehwinkel je Elastomerschicht zu α_i jeweils mit $\gamma = 1,35$ vergrößert.

Der Vergleich zeigt, dass im vorliegenden Fall der Anwendungsbereich

des untersuchten Elastomerlagers durch die neuen Regelungen der DIN EN 1337-3 nahezu „halbiert“ wird. In der praktischen Auswirkung bedeutet dies jedoch, dass insbesondere für Brücken mit geringen Auflasten aus Eigengewicht, in denen nach DIN 4141 noch Elastomerlager einsetzbar waren, mittlerweile Kalottenlager eingesetzt werden müssen.

Um diese Einschränkung des Anwendungsbereiches wieder aufzuheben, wurde im Rahmen des Rundschreibens des Bundesverkehrsministers vom 05.12.2007 [14] eine zusätzliche Regelung für den Nachweis der Verdrehungsgrenzbedingung eingeführt. Danach ist bei der Ermittlung der vertikalen Gesamtverformung für den Nachweis der Verdrehungsbegrenzung nach DIN EN 137-5:2005, Abschnitt 5.3.3.6 (erster Spiegelstrich) für verankerte Lager (Lager mit mindestens einseitiger Dübelsicherung) $F_{z,d}/A'$ unabhängig von dem errechneten Wert der Spannung mit mindestens 3 N/mm^2 anzusetzen. Bild 14 macht deutlich, wie diese zusätzliche Regelung einzustufen ist. Durch diese Festlegung werden zusätzlich gering-

füüge Verdrehungen bei sehr niedrigen Auflasten ermöglicht, jedoch keinesfalls die Regelungen der DIN EN 1337-3 so modifiziert, dass wieder der vollständige Anwendungsbereich DIN 4141-14:1985-09 möglich wird. Aus Bild 14 lässt sich zunächst folgern, dass die derzeitigen Regelungen zur Begrenzung der Fugenklaffung in DIN EN 1337-3 in Kombination mit dem Ansatz einer Mindestpressung von 3 N/mm^2 hinsichtlich der Schubbeanspruchung des Elastomers im Vergleich zu den früheren Regelungen der DIN 4141 sehr konservativ zu sein scheinen. In Amerika durchgeführte Untersuchungen [49] zeigen jedoch, dass bei großen Verdrehungen in Kombination mit kleinen Auflasten ein Zugversagen in der Vulkanisationsfläche zwischen Stahlblech und Elastomer auftreten kann. Dies ist insbesondere bei Lagern unter hohen dynamischen Beanspruchungen und nicht optimalen Vulkanisationsbedingungen von Bedeutung. Zur Erweiterung des Anwendungsbereiches in DIN EN 1337 sind daher noch weitere systematische experimentelle Untersuchungen erforderlich.

**Elastomerlager: $a \times b = 900 \times 900 \text{ mm} - T_b = 127 \text{ mm} - T_0 = 87 \text{ mm} - T_e = T_q = 72 \text{ mm} - r = 9.0 \text{ mm} - t_i = 18 \text{ mm}$
 $t_{sa} = 20 \text{ mm} - n = 4 - t_s = 5 \text{ mm} - v_{x,d} / T_e = 0.0$
 (keine Beanspruchung parallel zur Lagerebene)**

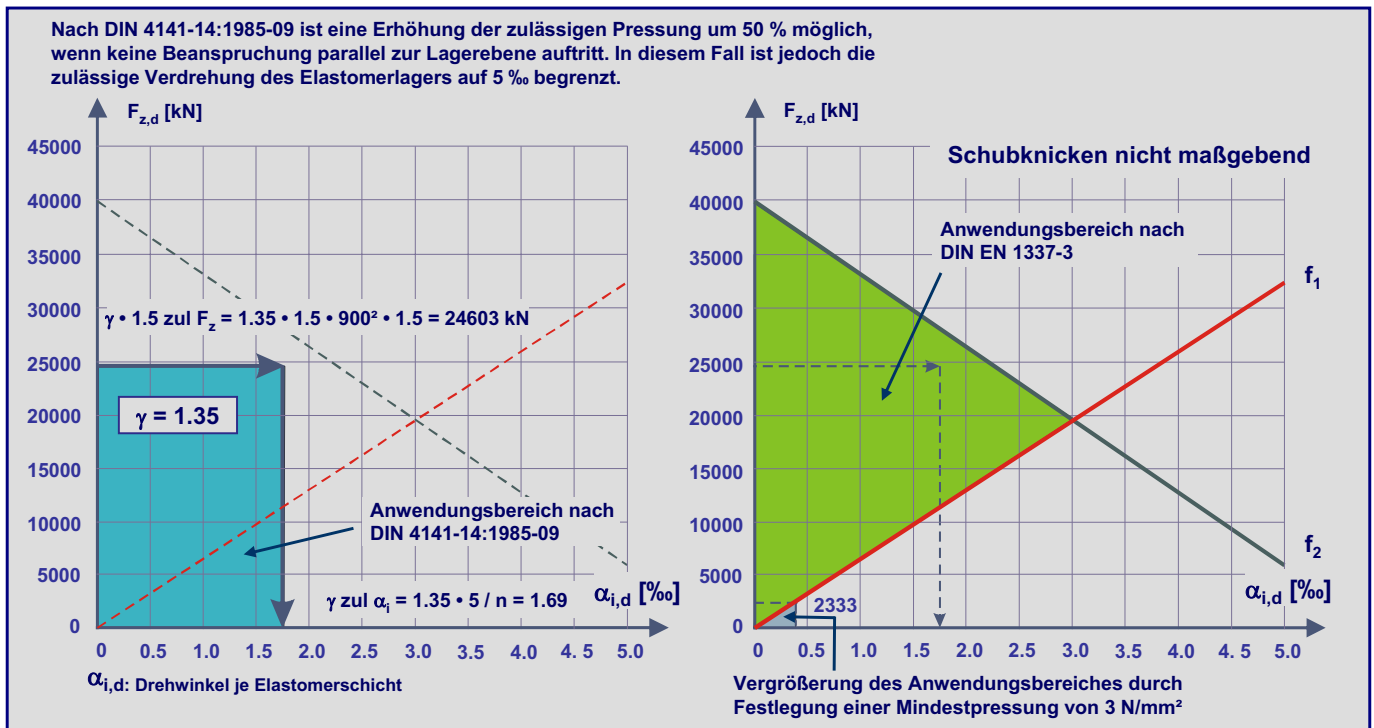


Bild 15. Vergrößerung des Anwendungsbereiches von Elastomerlagern bei hohen Auflasten durch Einführung der DIN EN 1337-3 (am Beispiel eines (verankerten) Regellagers $900 \times 900 \text{ mm}$ aus DIN 4141-14:1986-09)

Fig. 15. Extension of the range of application in case of high loadings after introducing DIN EN 1337-3 (elastomeric bearing $900 \times 900 \text{ mm}$ according to DIN 4141-14:1986-09)

Mit den Regelungen der DIN EN 1337-3 kann jedoch auch eine erhebliche Erweiterung des Anwendungsbereiches für Elastomerlager verbunden sein, und damit der vorhandene Erfahrungsbereich verlassen werden. Wie Bild 15 zeigt, geschieht dies gerade dann, wenn es sich um gedrungene Lager unter hohen Auflasten handelt, bei denen der Nachweis des Schubknickens gegenüber dem Nachweis der Schubverformungen nicht maßgebend wird. In diesem Fall werden deutlich höhere Pressungen in Verbindung mit deutlich größeren Verdrehungen als in den früheren nationalen Regelungen erlaubt [17]. Die Aufweitung des Anwendungsbereiches für hohe Auflasten kann von erheblicher Größenordnung sein, die daraus resultierenden Folgen für die Lebensdauer im Vergleich zu den in Deutschland bisher gemachten Erfahrungen sind jedoch ohne weitere experimentelle Untersuchungen nicht unmittelbar abschätzbar.

4.2 Versuche im Zusammenhang mit den Druck-Zug-Elastomerlagern der Wuppertaler Schwebbahn, Wuppertal

Im Rahmen der Erneuerung der Tragkonstruktion der Wuppertaler Schwebbahn mit über 67 Ankerstützen mit jeweils vier Elastomerlagern wurde im Auftrag der WSW (Wuppertaler Stadtwerke) in den Jahren 2000 bis 2002 an der TU München ein umfangreiches Versuchsprogramm an runden Elastomerlagern (Sonderlager) [34], [35], [36] durchgeführt, da die Elastomerlager teilweise durch Druck- sowie (in seltenen Fällen) auch durch Zugkräfte jeweils in Kombination mit großen Verdrehungen beansprucht werden und für den letztgenannten Fall keine Regelungen in den Normen enthalten sind. Untersucht wurden runde Elastomerlager der Typen $\varnothing 350 \times 147 \text{ mm}/T = 72 \text{ mm}$, $\varnothing 470 \times 193 \text{ mm}/T = 108 \text{ mm}$ und $\varnothing 500 \times 193 \text{ mm}/T = 108 \text{ mm}$ (Ausführung wie

im Fall des Durchmessers $\varnothing 470 \text{ mm}$) der Firma GLT, von denen die beiden kleineren in Bild 16 dargestellt sind.

Zur Erzielung einer besonders hohen Zugtragfähigkeit wurden die Lager der Schwebbahn im Vergleich zu konventionell hergestellten druckbeanspruchten Elastomerlagern einem besonderen Vulkanisationsprozess mit gezielter thermischer Nachbehandlung unterzogen. Als Gummimischung wurde die Mischung CC 6 AMZ der Gummiwerke Kraiburg verwendet. Zur Übertragung der Zugkräfte wurden die Elastomerkissen auf beiden Seiten mit anvulkanisierten äußeren Bewehrungsblechen ausgeführt, die mit der angrenzenden Stahlkonstruktion verschraubt wurden. Wegen dieser Rückverankerung stimmen diese Elastomerlager mit dem Typ C nach DIN EN 1337-3 überein.

Angepasst an die besonderen Beanspruchungskombinationen der Lager der Wuppertaler Schwebbahn, standen im Rahmen der experimen-

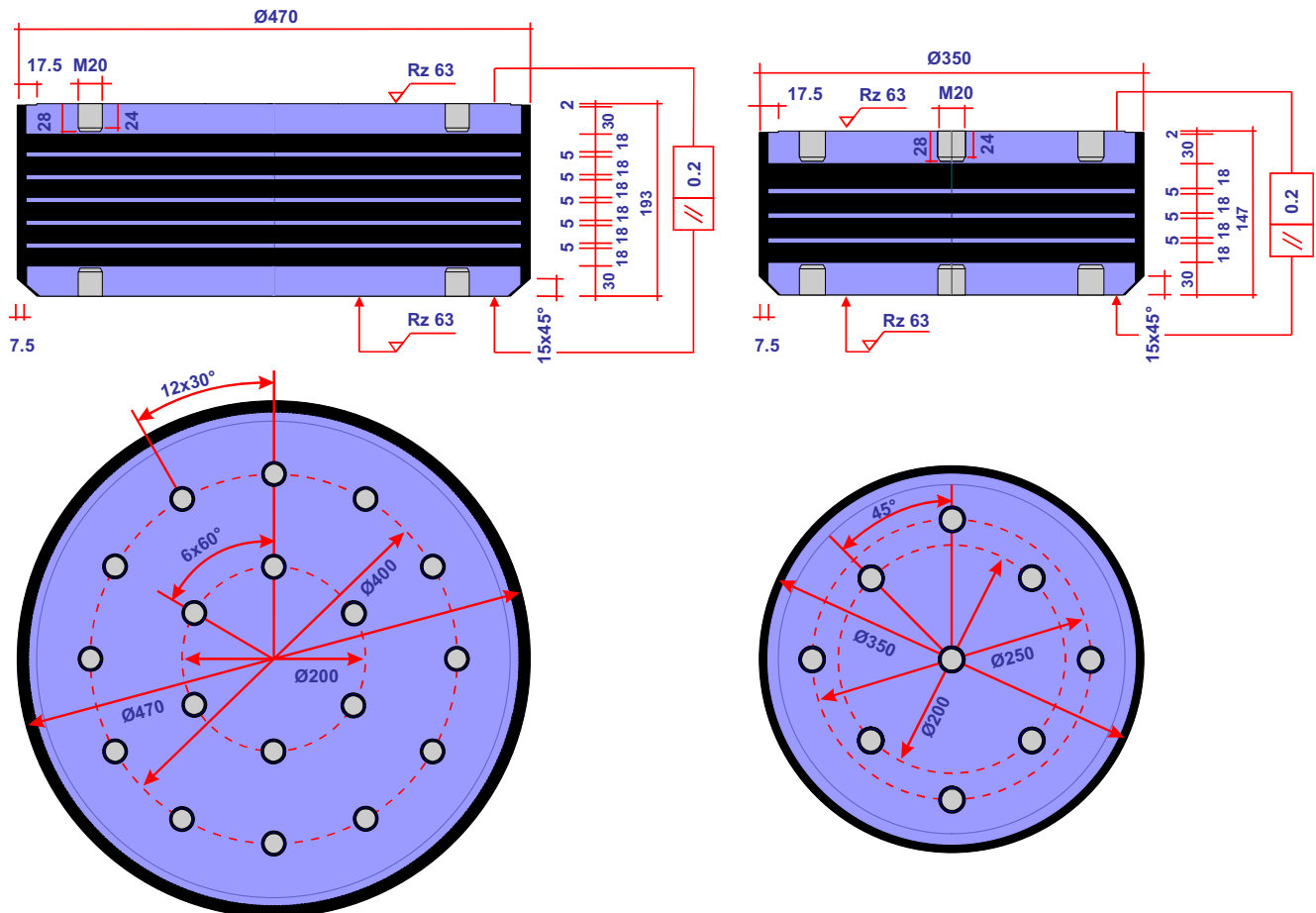


Bild 16. Wuppertaler Schwebbahnlager der Typen $\varnothing 470 \times 193 \text{ mm}/T = 108 \text{ mm}$ (links) und $\varnothing 350 \times 147 \text{ mm}/T = 72 \text{ mm}$ (rechts) [34], [36]

Fig. 16. Elastomeric bearings for the "Wuppertaler Schwebbahn" ($\varnothing 470 \times 193 \text{ mm}/T = 108 \text{ mm}$ (left) and $\varnothing 350 \times 147 \text{ mm}/T = 72 \text{ mm}$ (right)) [34], [36]

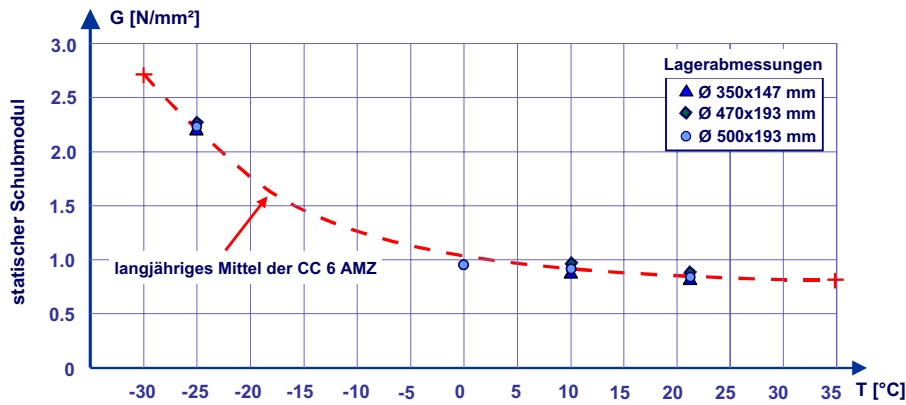


Bild 17. Abhängigkeit des statischen Schubmoduls G von der Temperatur für die Gummimischung CC 6 AMZ

Fig. 17. Effect of temperature on the shear modulus G for the rubber compound CC 6 AMZ

tellen Untersuchungen [34], [36] maßgeblich folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Größe des Schubmoduls G der verwendeten Gummimischung CC 6 AMZ in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abhängigkeit der Rückstellmomente vom Durchmesser, der statischen Auflast und der Belastungsgeschwindigkeit (Verdrehfrequenz)
- Höhe der Zugfestigkeit bewehrter Elastomerlager in Abhängigkeit vom Durchmesser, von der Temperatur und von der Qualität der Vulkanisation

Die Temperaturabhängigkeit des statischen Schubmoduls G der untersuchten Elastomerlager ist in Bild 17 dargestellt. Der dabei verwendete Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung richteten sich nach dem für die Schubmodulprüfung maßgeblichen Anhang F der DIN EN 1337-3. Im vorliegenden Fall stimmt der experimentell ermittelte temperaturabhängige Verlauf des Schubmoduls mit der in DIN EN 1337 vorgenommenen Eingrenzung des Schubmoduls überein, wonach der Schubmodul bei tiefen

Temperaturen, d. h. bei $T = -25\text{ °C}$, nicht höher als der dreifache Wert des für Raumtemperatur geltenden Schubmoduls sein darf. Der deutliche Anstieg des Schubmoduls bei abnehmenden Temperaturen führt zu einer zunehmenden Versteifung bewehrter Elastomerlager, was bei den Nachweisen der angrenzenden Bauteile von Bedeutung ist. Diese Auswirkung widerspricht der in DIN EN 1337-3 festgelegten Vorgehensweise, wonach bei allen Nachweisen grundsätzlich der Wert des Schubmoduls verwendet werden darf. Mit Bezug auf die für die Wuppertaler Schwebbahn durchgeführten Versuche wurde daher mit Bekanntmachung des o. g. Rundschreibens des Bundesverkehrsministers vom 05.12.2007 [14] für Straßenbrücken gefordert, die Einflüsse aus dem Verhalten des Elastomers bei tiefen Temperaturen zu berücksichtigen. Sofern kein genauere Nachweis geführt wird, dürfen die Rückstellkräfte und Rückstellmomente von Elastomerlagern aus veränderlichen

Einwirkungen (z. B. Verkehr, Temperatur, Wind) bei Betrachtung der Kombination mit der Temperatureinwirkung $\Delta T_{N,neg}$ nach DIN-Fachbericht 101, V-6.3.1.3.3 (3)P mit dem Rechenwert des Schubmoduls $G_{T,d} = 2.0\text{ N/mm}^2$ ermittelt werden.

Ein weiterer Teil des Versuchsprogramms an den Elastomerlagern der Wuppertaler Schwebbahn beschäftigte sich mit der Frage der Größe der Rückstellmomente der in Bild 16 dargestellten Lagertypen. Die Rückstellmomente wurden in Abhängigkeit von der Lagertemperatur T ($T = 45/20/-25\text{ °C}$), der während des Verdrehvorganges wirkenden zentrischen Vorbelastung (Druck) F_z ($F_z = 250/1200\text{ kN}$ im Fall des Durchmessers $\varnothing 350\text{ mm}$ und $F_z = 250/1200/2200\text{ kN}$ im Fall des Durchmessers $\varnothing 470\text{ mm}$) und der Verdrehfrequenz f ($f = 0,03/1,0\text{ Hz}$) gemessen, da diese Einflüsse mit den in den Regelwerken festgelegten Bemessungskonzepten nur unzureichend bzw. nicht erfasst werden können.

Der schematische Versuchsaufbau und die maßgeblichen Ergebnisse der Versuche zu den Rückstellmomenten (Angaben jeweils bezogen auf ein Lager) sind in den Bildern 18 und 19 dargestellt. Die Prüfung der Rückstellmomente erfolgte in Übereinstimmung mit DIN EN 1337-3 in einem Versuchsstand, bei dem jeweils zwei identische Elastomerlager übereinander angeordnet wurden und die exzentrische Belastung mit Hilfe eines Hebelarms aufgebracht wurde. Die Rückstellmomente wurden für Drehwinkel α von 6/9/12 ‰ ($\varnothing 350\text{ mm}$) bzw. 3/6/9/12 ‰ ($\varnothing 470\text{ mm}$) bestimmt.

Neben den experimentell ermittelten Rückstellmomenten sind in den Diagrammen (Bild 19) auch die

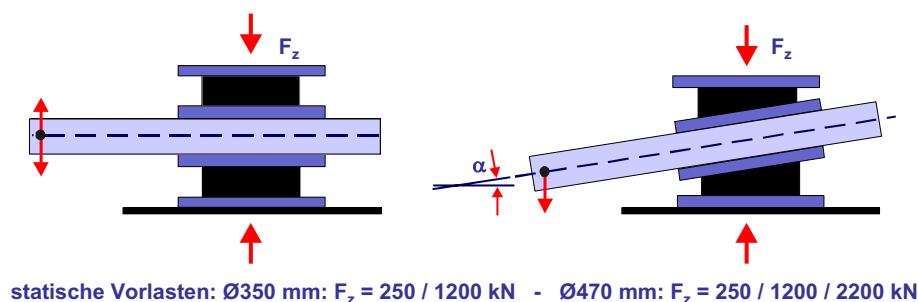
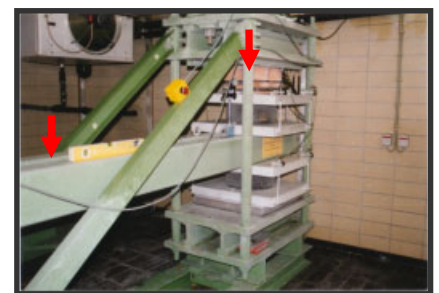


Bild 18. Versuchsaufbau zur Bestimmung der Rückstellmomente an rückverankerten Elastomerlagern der Wuppertaler Schwebbahn (schematisch)

Fig. 18. Test set-up for the determination of the restraint moment (schematic)



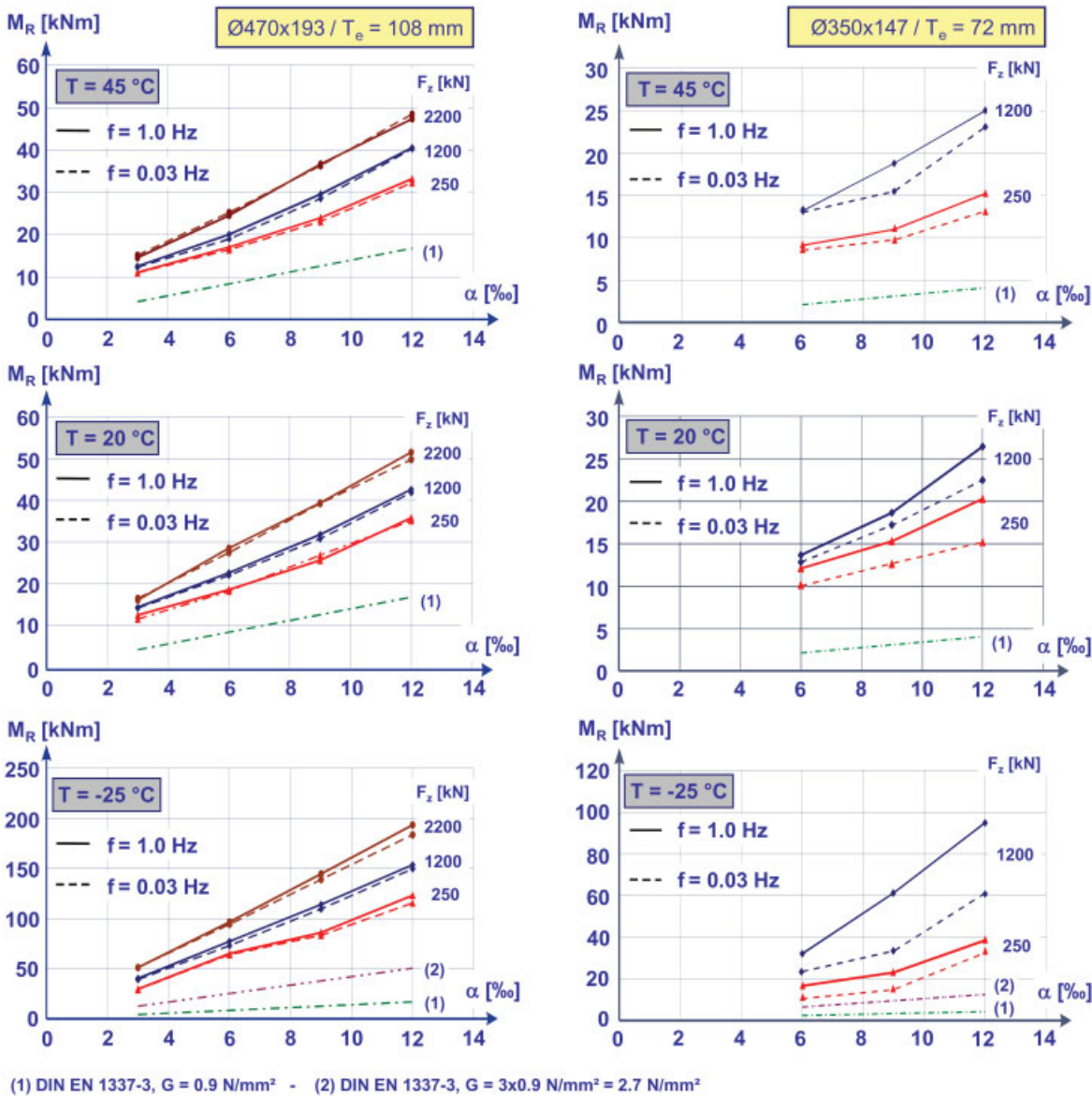


Bild 19. Rückstellmomente an rückverankerten Elastomerlagern der Wuppertaler Schwebbahn (Gummimischung CC 6 AMZ)
 Fig. 19. Results of the rotation tests (rubber compound CC 6 AMZ)

Rückstellmomente angegeben, die sich rechnerisch nach DIN EN 1337-3 für runde Lager für den Schubmodul $G = 0,9 \text{ N/mm}^2$ (gültiger Schubmodul für $T = 20 \text{ °C}$) bzw. $G = 3 \times 0,9 = 2,7 \text{ N/mm}^2$ (gültiger Schubmodul für $T = -25 \text{ °C}$) ergeben. Die Versuche bestätigten den signifikanten Einfluss der Vorbelastung und der Lagertemperatur auf die Größe der Rückstellmomente. Der Frequenzeinfluss äußerte sich nur bei dem kleineren geprüften Lagerdurchmesser. Trotz der sehr großen Verdrehungen wurden bei den Versuchen keine Lagerschäden festgestellt.

In allen untersuchten Fällen liegen die experimentell bestimmten Rückstellmomente erheblich über den rechnerischen Werten, zum Teil

überschreiten diese die rechnerischen Werte um ein Vielfaches. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn wie im Fall einer Prüftemperatur $T = -25 \text{ °C}$ der zu dieser niedrigen Temperatur gehörende normative Wert des Schubmoduls (3-facher Wert des Schubmoduls für $T = 20 \text{ °C}$) $G = 2,7 \text{ N/mm}^2$ gewählt wird.

Das in DIN EN 1337-3 verankerte Bemessungskonzept für Elastomerlager basiert maßgeblich auf experimentellen und theoretischen Untersuchungen, die um 1960 herum vom Sachverständigenausschuss D60 des Forschungs- und Versuchsamtes ORE der UIC (Internationaler Eisenbahnverband) [37] bis [41] sowie von Topaloff [42], [43] durchgeführt wurden. Die dabei verwendeten Versuchskör-

per wiesen Seitenabmessungen von ca. 200 mm auf, so dass die Anwendung der damaligen Untersuchungsergebnisse auf die heutigen Lagerabmessungen streng genommen eine experimentell nicht abgesicherte Extrapolation von Versuchsergebnissen darstellt. Die für die Wuppertaler Schwebbahn durchgeführten Versuche machen deutlich, dass der Maßstabeffekt von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist und die Bestimmungsgleichungen in den Regelwerken überdacht werden müssen. Im Rahmen der Bemessung der Elastomerlager der Wuppertaler Schwebbahn wurden aufgrund der unsicheren Vorhersagen durch die Regelwerke unmittelbar die experimentell ermittelten Rückstellmomente verwendet.

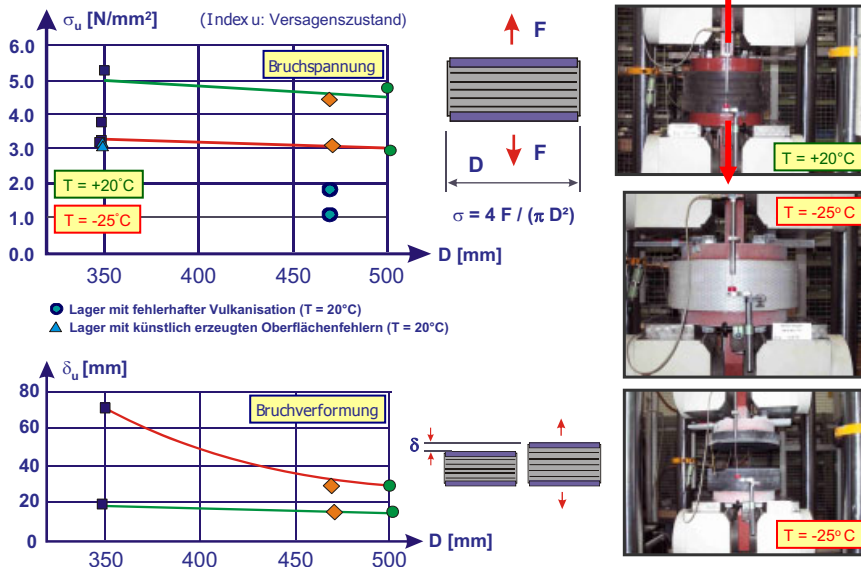


Bild 20. Ergebnisse der Zugbruchversuche
Fig. 20. Results of the tensile tests

Die Ergebnisse der ebenfalls durchgeführten Zugbruchversuche sind in Bild 20 dargestellt. Maßgeblichen Einfluss auf die Zugbruchspannungen hat der Vulkanisationsprozess. Während bei ordnungsgemäßer, einer der Zugbeanspruchung der Elastomerlager angepassten Vulkanisation bei Raumtemperatur die Zugbruchspannung ca. 3 N/mm² beträgt, sind bei nicht ausreichendem Druck während der Vulkanisation nur noch Werte unter 2 N/mm² ertragbar. In einigen Fällen wurden sogar noch geringere Werte gemessen. Bei ordnungsgemäßer Vulkanisation wiesen die Bruchbilder einen einwandfreien Vulkanisationsverbund ohne Haftungsfehlstellen in den Elastomerschichten oder in der Elastomer-/Metallzone auf. Von eher untergeordneter Rolle ist hingegen die Oberflächengüte. Es zeigt sich, dass Lager mit „normaler Vulkanisationshaut“ nur geringfügig höhere Zugfestigkeiten liefern als Lager, bei denen die Oberflächen durch Anrauen mit Schleifpapier (Korundscheibe Körnung 60) bzw. durch kurze Schnitte in unregelmäßiger Anordnung mit einem Skalpell künstlich geschädigt wurden.

Die Anwendung der Druck-Zug-Elastomerlager erfolgte über eine Zustimmung im Einzelfall, in der festgelegt wurde, die Herstellung eines jeden Lagers fremd zu überwachen und darüber hinaus jedes Lager im Rahmen der Güteüberwachung einer Druck- und Zugsteifigkeitsprüfung für

das Lastniveau im Gebrauchszustand zu unterziehen.

Schlussbemerkung

In Deutschland wurden die nationalen Regelungen für Lager nach DIN 4141 und die darauf basierenden nationalen Zulassungen mittlerweile nahezu vollständig durch das europäische Regelwerk DIN EN 1337 ersetzt. Die zwischenzeitlich gesammelten Erfahrungen mit dem neuen Regelwerk zeigen, dass noch einige Fragen für die Praxis nicht ausreichend geklärt sind und einige Regelungen in der zur Zeit stattfindenden Überarbeitungsphase modifiziert werden sollten.

Literatur

- [1] DIN EN 1337-1:2001-02: Lager im Bauwesen, Allgemeine Regelungen.
- [2] DIN V 4141-1:2003-05: Lager im Bauwesen, Allgemeine Regelungen.
- [3] DIN-Fachbericht 101, 3. Auflage, Ausgabe 09/2003 – Einwirkungen auf Brücken.
- [4] DIN-Fachbericht 103, 3. Auflage, Ausgabe 09/2003 – Stahlbrücken.
- [5] DIN-Fachbericht 104, 3. Auflage, Ausgabe 09/2003 – Verbundbrücken.
- [6] DIN EN 1993-1-10:2005-07: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung.
- [7] DIN V 4141-13:2008-11: Führungslager und Festhaltekonstruktionen; Bemessung und Herstellung (Entwurf).

- [8] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z16.4-443 der Firma Maurer Söhne GmbH und Co. KG, Frankfurter Ring 193, 80807 München – Zulassungsgegenstand: Maurer-MSM Kalottenlager – Geltungsdauer bis 30. April 2013.

- [9] European technical approval ETA-08/0131 of Maurer Söhne GmbH und Co. KG, Frankfurter Ring 193, 80807 München – generic type and use of construction product: spherical bearing with special sliding material – validity from 19 June 2006 to 19 June 2011.

- [10] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z16.7-445 der Firma Maurer Söhne GmbH und Co. KG, Frankfurter Ring 193, 80807 München – Zulassungsgegenstand: Ausstattung von Maurer-Brückenlagern mit CE-Kennzeichnung – Geltungsdauer bis 30.11.2011 (Ausgabe 02.08.2007).

- [11] DASt-Ri 009:2005-01: Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten, Deutscher Stahlbau-Verband, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf, 2005-11-23.

- [12] Eisenbahnspezifische Liste technischer Baubestimmungen (ELTB), Eisenbahn-Bundesamt (derzeitiger Stand: 09.2009).

- [13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr: Hinweise zu den ZTV-ING Teil 8 Abschnitt 3 – Anwendung von Lagern nach Normreihe DIN EN 1337, Stand: 05.12.2007.

- [14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr: Ermittlungen der Bewegungen an Lagern und Übergangskonstruktionen nach DIN-Fachbericht 101 sowie ergänzende Regelungen für die Bemessung von Lagern, Fassung 22. August 2007.

- [15] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr: Sammlung Brücken- und Ingenieurbau, Entwurf, Richtzeichnungen für Ingenieurbauten – RiZ-ING; Verkehrsblatt-Verlag (derzeitiger Stand: April 2008).

- [16] Hanswille, G., Porsch, M.: Zur Frage der Vergleichbarkeit der Regelungen für Kalottenlager nach DIN 4141 und DIN EN 1337 – Beurteilung der Kalottengleitlager (KGa) unter dem Schwebeträger der Eisenbahnüberführung Hochdonn, Bochum, 19.04.2008.

- [17] Hanswille, G., Porsch, M.: Anwendung der Normenreihe DIN EN 1337 zur Bemessung und konstruktiven Durchbildung von CE-gekennzeichneten Elastomerlagern der EÜ Warnow (km 87,495 – Strecke 1122 Lübeck – Strasburg (Meckl.)), Bochum, 05.11.2008.

- [18] Hanswille, G., Porsch, M.: Gutachterliche Stellungnahme zur Frage der

- Vergleichbarkeit von 49 Druck-Zug-Kalottenlagern bei den Hamburger Bauvorhaben EÜ Amsinckstraße und EÜ Oberhafen mit den Druck-Zug-Kalottenlagern beim Lehrter Bahnhof (Los 1.4) in Berlin“, Bochum, 11.09.2007.
- [19] *Hanswille, G., Porsch, M., Piel, W., Hammer, W.*: Gutachterliche Stellungnahme zur Frage der Lagerschäden an der Stabbogenbrücke im Zuge der BAB A1 über den Dortmund-Ems-Kanal bei Ladbergen (Münster), Bochum, 2009 (Entwurf, bislang unveröffentlicht).
- [20] *Eggert, H., Grote, J., Kauschke, W.*: Lager im Bauwesen, Band I, Entwurf Berechnung Vorschriften. Berlin: Ernst & Sohn, 1974.
- [21] *Eggert, H., Hakenjos, V.*: Die Wirkungsweise von Kalottenlagern. Der Bauingenieur 49 (1974), S. 93–94.
- [22] *Eggert, H., Kauschke, W.*: Lager im Bauwesen, 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 1995.
- [23] *Eggert, H.*: Kalottengleitlager. Bautechnik 79 (2002), H. 2, S. 84–90.
- [24] *Eggert, H., Kauschke, W.*: Structural bearings. Berlin: Ernst & Sohn, 2002.
- [25] *Hakenjos, V., Richter, K.*: Dauerleitungsverhalten der Gleitpaarung PTFE weiß/Austenitischer Stahl für Lager im Brückenbau, Straße, Brücke, Tunnel 11 (1975), S. 294–297.
- [26] *Uetz, H., Wiedemeyer, J.*: Tribologie der Polymere. München/Wien: Carl Hanser Verlag 1985.
- [27] *Weihprecht, M.*: Auflagerung von Brücken. Sonderdruck aus Elsners Taschenbuch für den bautechnischen Eisenbahndienst, 39. Band 1967, S. 231–277. Frankfurt/M.: Dr. Artur Tetzlaff-Verlag, 1967.
- [28] *Rahlwes, K., Maurer, R.*: Lagerung und Lager von Bauwerken. In: Beton-Kalender 84. Jg. 1995, Teil II, Seite 61 ff, Berlin: Ernst & Sohn, 1995.
- [29] *Braun, Chr., Bergmeister, K.*: Brückenausstattung. In: Beton-Kalender 93 Jg. 2004, Band I, S. 249–307, Berlin: Ernst & Sohn, 2004.
- [30] Amtsblatt der Europäischen Union, Mitteilungen der Kommission im Rahmen der Durchführung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte – Veröffentlichung der Titel und der Bezugsdaten der harmonisierten Normen im Sinne dieser Richtlinie, (2006/C 304/01) 13.12.2006.
- [31] *Springhorn, M.*: Inverkehrbringen und Verwendung von Bauprodukten – die Bauproduktenrichtlinie und ihre Umsetzung, DIBt-Mitteilungen 1/2008.
- [32] *Buche, H.*: Zum Stand der Einführung der Normenreihe EN 1337 sowie deren Auswirkung auf die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Prüfzeugnisse und die Normenreihe DIN 4141, DIBt-Mitteilungen 3/2005.
- [33] *Stolzenburg, U.*: Review of European Standards – EN 1337-1:2000, EN 1337-2:2004, EN 1337-3:2005, EN 1337-4:2004, EN 1337-5:2005, EN 1337-6:2004, EN 1337-7:2004, EN 1337-9:1997 – Member body replying: DIN, 30.01.2007.
- [34] Forschungsbericht über die experimentelle Ermittlung der Temperaturabhängigkeit von Zug-, Druck- Schub- und Verdrehverhalten von Sonderlagern der Wuppertaler Schwebbahn (WSW-Wuppertal), Bericht Nr. 1932 vom 20.02.2002, Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfam für Bau von Landesverkehrswegen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Leykauf.
- [35] Forschungsbericht über die experimentelle Ermittlung der Rückstellmomente sowie der Zugbeanspruchbarkeit von Sonderlagern für die Wuppertaler Schwebbahn (WSW-Wuppertal), Bericht Nr. 1780 vom 22.04.2001, Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfam für Bau von Landesverkehrswegen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Leykauf.
- [36] Prüfzeugnis „Ermittlung der Zugfestigkeit und des Zugbruchverhaltens an WSW-Sonderlagern $\varnothing 500 \times 147/T = 72 \text{ mm}$ “ vom 24.09.2002, Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfam für Bau von Landesverkehrswegen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Leykauf.
- [37] ORE – Forschungs- und Versuchsamts: Frage D 60 – Verwendung von Gummi für Brückenlager, Arbeitsergebnis Nr. 1: Dauerversuche mit vertikaler zentrischer Lastpulsierung bei konstantem Gleitwinkel und mit Pulsierung des Gleitwinkels bei konstanter vertikaler Last, Utrecht, Oktober 1962.
- [38] ORE – Forschungs- und Versuchsamts: Frage D 60 – Verwendung von Gummi für Brückenlager, Arbeitsergebnis Nr. 2 (ohne Anlage C): Dauerversuche mit vertikaler exzentrischer Lastpulsierung – Bruchlasten, Dauerstandversuche, Reibbeiwerte – Vorläufige Empfehlungen, Utrecht, März 1964.
- [39] ORE – Forschungs- und Versuchsamts: Frage D 60 – Verwendung von Gummi für Brückenlager, Arbeitsergebnis Nr. 2 – Anlage C: Dauerversuche mit vertikaler exzentrischer Lastpulsierung – Bruchlasten, Dauerstandversuche, Reibbeiwerte – Vorläufige Empfehlungen, Utrecht, März 1964.
- [40] ORE – Forschungs- und Versuchsamts: Frage D 60 – Verwendung von Gummi für Brückenlager, Schlussbericht (ohne Anlage 2): Versuche bei extremen Temperaturen – Empfehlungen, Utrecht, Oktober 1965.
- [41] ORE – Forschungs- und Versuchsamts: Frage D 60 – Verwendung von Gummi für Brückenlager, Anlage 2 zum Schlussbericht: Empfehlungen, Utrecht, Oktober 1965.
- [42] *Topaloff, B.*: Gummilager für Brücken – Berechnung und Anwendung, Der Bauingenieur 39 (1964), S. 50–64.
- [43] *Topaloff, B.*: Gummilager für Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959), H. 9, S. 229–230.
- [44] *Hanswille, G., Porsch, M.*: Zur Festlegung der Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln in Vollbetonplatten in DIN 18000-5 und EN 1994-1-1. In: Schriftenreihe des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Festschrift Prof. Kindmann, Bochum, Heft 2007-06.
- [45] *Feldmann, M., Sedlacek, G., Eichler, B.*: Nachweis der Materialzähigkeit von Druck-Zug-Kalottenlagern bei den Hamburger Bauvorhaben EÜ Oberhafen und EÜ Amsinckstraße, Gutachten-Nr. 2008-26-0090, Entwurfsfassung vom 21.11.2008 (bisher unveröffentlicht).
- [46] Schreiben des Eisenbahn-Bundesamtes, Postfach 28 61, 53018 Bonn vom 14.05.2008 an „SbL 2 der EBA – Ast“ zur Verwendung von Lagern im Eisenbahnbrückenbau.
- [47] *Leendertz, Han*: Rapport Brugoplegingen, Rijkswaterstaat, 2002.
- [48] *Pesch, W.*: Lagerprotokolle zur 1. bis 4. Sonderprüfung (2007–2009) für Kalottenlager P2 Typ 4 $\pm 130 \text{ mm}$, Stütze PW 234, Brücke Nr. 235, Wuppertaler Schwebbahn.
- [49] NCHRP Report No. 596: Rotation Limits for Elastomeric Bearings, Washington, 2008.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Christian Braun, Maurer Söhne, Frankfurter Ring 193, 80807 München; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hanswille, Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich D, Fachgebiet Stahlbau und Verbundkonstruktionen, Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal; Dipl.-Ing. Markus Porsch (SFI, EWE), Ingenieurgesellschaft HRA GmbH, Hauptstraße 17–19, Gebäude 6321, 55120 Mainz; Dipl.-Ing. Christian Schürmann, Maurer Söhne, Zum Holzplatz 2, 44536 Lünen