

# Kommentar K1 zu DIN 19704-1: 1998-05

## Stahlwasserbauten – Teil 1:

### Berechnungsgrundlagen

G. Schmauß, H. Nölke, E. Herz

#### K1 Änderungen gegenüber früherer Ausgabe

Die Notwendigkeit, das semiprobabilistische **Sicherheitskonzept** der „Grenzzustände der Tragfähigkeit mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten“ einzuführen, hat sich zwangsläufig aus der Gültigkeit der Stahlbau-Grundnormen der Reihe DIN 18800 und aus den Festlegungen von DIN V ENV 1993 (Eurocode 3) ergeben. Die Neuauflage der Fachnorm DIN 19704 (ebenso wie alle anderen Fachnormen des Stahlbaus) hatte daher das für bauliche Anlagen vereinheitlichte Sicherheitskonzept zu verwirklichen. Im Sinne der gebotenen ganzheitlichen Betrachtungsweise im Stahlwasserbau ist dieses Sicherheitskonzept konsequenterweise sowohl für die Stahlkonstruktionen als auch für die Maschinenkonstruktionen anzuwenden.

„Grenzzustände der Tragfähigkeit“ sind Einwirkungsintensitäten, unter denen ein Tragwerk seine Tragfähigkeit gerade verliert oder unbrauchbar wird. Die Erkenntnis, daß eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Bauwerke die Grenzzustände der Tragfähigkeit erfassen muß und hierzu Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt werden sollten, ist nicht neu. Mayer [1] hat dies bereits 1926 dargelegt, und Keldysa [2] hat 1951 dieses Sicherheitskonzept ebenfalls vorgeschlagen. Die Grundlagen und die Quantifizierung des wahrscheinlichkeitstheoretischen Sicherheitsansatzes wurden 1981 zusammengefaßt [3] und damit die Anforderungen an die Sicherheit baulicher Anlagen einschließlich ihrer Gebrauchsfähigkeit über die gesamte Nutzungsdauer unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gegebenheiten festgelegt.

Die Größe der maßgebenden unabhängigen Parameter („Basisvariablen“), von denen die Einwirkungen und die Widerstände bei Bauwerken und Bauteilen abhängen, unterliegt unvermeidbar zufälligen, statistischen Verteilungen. Daraus folgt zwangsläufig, daß die berechneten Sicherheiten nicht exakt mit der Wirklichkeit übereinstimmen können. Abhängig von den statistischen Verteilungen und deren mathematischer Beschreibung ergibt sich theoretisch eine – wenn auch sehr kleine – rechnerische („operative“) Versagenswahrscheinlichkeit. Trotz Erfüllung der Anforderungen bei rechnerischen Nachweisen läßt sich daher ein Restrisiko im juristischen Sinn nur „mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit“ ausschließen. Das Restrisiko ist dadurch definiert, daß ein Schaden zwar theoretisch möglich, aber praktisch ausgeschlossen und die Versagenswahrscheinlichkeit somit hinnehmbar ist.

Bei den baulichen Anlagen des Stahlwasserbaus sind neben der Tragsicherheit auch Aspekte der Gebrauchstauglichkeit zu beachten und daher durch die Regelungen in DIN 19704 erfaßt. Die Gebrauchstauglichkeit wird durch Kriterien der Funktionsfähigkeit und Nutzung definiert, z.B. Einhaltung von zulässigen Verformungen, Beschränkung der Herstellungs- und Montageungenauigkeiten durch Toleranzen und Passungen, Anforderungen hinsichtlich Dichtigkeit, Vermeidung von Schwingungen, Beständigkeit der Baustoffe bezüglich Korrosion und Verschleiß, Zugänglichkeit der Konstruktion zwecks Inspektionen, Möglichkeiten der wirtschaftlichen Unterhaltung und Vermeidung von Risiken bei der Bedienung.

### K1-1 Anwendungsbereich

Die Norm gilt für Verschlüsse mit ihren Baugruppen (Verschlußkörper, Antrieb, Verbindungsglied(er) zwischen Verschlußkörper und Antrieb, fest mit dem Massivbauwerk verbundene Teile, elektrische Ausrüstung) einschließlich

- Einlaufrechen,
- Schwimmpoller,
- Stoßschutzeinrichtungen,
- Kanalbrücken,
- Schiffshebwerke,
- sinngemäß für Druckrohrleitungen und deren Armaturen.

Vom Anwendungsbereich sind einige Sonderkonstruktionen ausdrücklich ausgenommen:

- Dalben,
- Leitwerke,
- Ufereinfassungen,
- Landungsanlagen (Schiffsanleger),
- Seebauwerke (Offshore-Plattformen, Hubinseln, Halbtaucher und dgl.).

Die Gründe, diese Konstruktionen nicht mitzuerfassen, sind in den hierbei vorherrschenden speziellen Problemen zu suchen. Deren Lösungen hätten den Rahmen der Norm gesprengt, zumal auch die Konstruktionspraxis in diesen Fällen eigene Wege geht. Typische Merkmale der genannten Sonderkonstruktionen sind die Energieaufnahme infolge besonders starker Schiffsstöße, die Probleme der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Gründung oder Verankerung, und – noch zusätzlich bei Seebauwerken – die enormen Nutzlasten auf den Decks und die hydrodynamischen Einwirkungen sowie die Schwingungsanregungen infolge des Wellengangs.

**Abweichungen von der Norm** sind bei kleinen, gering belasteten Verschlüssen zulässig. Vorausgesetzt wird in diesem Fall, daß das Produkt aus Wasserdruck  $p$  (bar) und belasteter Staufläche  $A$  (m<sup>2</sup>) den Wert

$$p \cdot A = 0,5$$

nicht überschreitet und der Auftraggeber der abweichenden Vorgehensweise nicht widerspricht. Ein Beispiel für kleine, gering belastete Verschlüsse sind gehäuselose Absperrorgane in Kläranlagen. Hierzu liegt E DIN19569-4 vor. Wenn aber kleine, gering belastete Verschlüsse Bestandteil einer größeren Anlage sind, z. B. Füllschütze von Schiffsschleusen, wird man Abweichungen von den getroffenen Regelungen nicht zustimmen können.

Bei Anlagen des Stahlwasserbaus sind die Verschlußkörper bewegliche Stahlkonstruktionen. Zu ihrer Lagerung und ihrem Antrieb dienen Maschinenkonstruktionen. Die Antriebsleistung liefert die elektrische Ausrüstung, die sämtliche elektrischen Betriebsmittel einschließt. Alle diese Komponenten wirken als Ganzes zusammen. Es ist deshalb geboten, Stahlwasserbauten als Synthese von Stahlkonstruktion, Maschinenkonstruktion und elektrischer Ausrüstung aufzufassen. (Dies trifft übrigens auf alle anderen Arten von beweglichen Stahlkonstruktionen zu, z. B. auch auf bewegliche Brücken. Bemerkenswerterweise muß DIN 19704 laut Vorschrift DS 804 für die Berechnung von beweglichen Eisenbahnbrücken herangezogen werden).

Die Normung zum Stahlwasserbau hat somit die Aufgabe, einen ungewöhnlich breiten Querschnitt durch die unterschiedlichsten Disziplinen der Ingenieurwissenschaften zu erfassen.

In der Neuausgabe von DIN 19704 ist ebenso wie in den erwähnten früheren Ausgaben das bewährte und unerläßliche Prinzip dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise der Stahlwasserbauten beibehalten.

Den Berechnungsgrundlagen von DIN 19704 liegt ein **einheitliches Sicherheitskonzept für die Stahlkonstruktionen und die Maschinenkonstruktionen** zugrunde; allerdings mußten Zuordnungen formuliert werden, weil die Teilsicherheitsbeiwerte zahlenmäßig unterschiedlich festgelegt wurden.

Zu den Stahlkonstruktionen gehören:

- Verschlußkörper (auch „Schütze“ und bei Schleusen „Tore“ genannt),
- fest eingebaute Teile (Schienenträger, Anschlagflächen, Betonpanzerungen).

Zu den Maschinenkonstruktionen gehören:

- Elektromechanische Antriebe,
- ölhydraulische Antriebe,
- Handantriebe,
- Maschinengehäuse und -rahmen,
- Druckdeckel von Schüttschächten,
- Lauf- und Führungsrollen und deren Schienen,
- Knaggen, Gelenklager und Verriegelungen,
- Verbindungsglieder zwischen Verschlußkörper und Antrieb  
(Ketten, Seile, Triebstöcke, Triebstockketten, Zahnstangen, Gestänge).

Zur elektrischen Ausrüstung gehören alle elektrischen Betriebsmittel, d. h.

- Motore, Bremsen, Schaltgeräte (Endschalter, Druckschalter, Bedienelemente),
- Schaltschränke, Kabel, Leitungen, elektrische Heizungen,
- MSR-Einrichtungen (Meß-, Steuer-, Regeleinrichtungen),
- SPS-Systeme (speicherprogrammierbare Steuerungen).

Gestaltungs- und Berechnungsgrundlagen für Verschlußkörper, Lager und Dichtungen finden sich nebst einer Systematik der Verschlußkörpertypen in *Schmauß/Wickert* [4].

Den Entwurf ganzer Wehranlagen, die Gestaltung der zugehörigen Stahlwasserbau-Verschlüsse und deren Anordnung im Gesamtbauwerk behandelt *Häusler* [5].

## **K1-2 Normative Verweisungen**

Die drei Teile der Norm DIN 19704 enthalten zahlreiche kurze, normative Verweise auf andere Publikationen. Hierdurch werden die darin enthaltenen Festlegungen – soweit nichts einschränkend vermerkt ist – als mitgeltend erklärt, und es werden Widersprüche und Lücken vermieden, die bei einer nur auszugsweisen Wiedergabe oder fehlenden Erwähnung aufgetreten wären.

Die zusätzlichen, als Anhang 1 dieses Kommentars zusammengestellten Verweisungen können nur informativen Charakter haben, es sei denn, sie ersetzen als „gleitende“ Verweisungen entsprechende undatiert zitierte, aber inzwischen zurückgezogene genormte Berechnungsgrundlagen oder andere Regelwerke.

In Ergänzung zur Neuausgabe von DIN 19704 ist eine Neuauflage der „**Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV-W)**“ des Bundesministeriums für Verkehr erschienen wegen der Bedeutung und der geforderten weitgehenden Einsatzbereitschaft und Zuverlässigkeit der Anlagen der Bundeswasserstraßenverwaltung und wegen der daraus herzuleitenden besonderen Qualitätsansprüche.

Darüber hinaus sind vom Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) für die Betreiber der Stahlwasserbauten noch sehr hilfreiche Richtlinien für die Prüfung, Abnahme, Instandhaltung und Modernisierung erarbeitet worden. Sie sind als **DVWK-Merkblatt 249 „Betrieb von Verschlüssen im Stahlwasserbau“** herausgegeben.

### **K1-3 Bautechnische Unterlagen**

Die bautechnischen Unterlagen müssen alle im Abschnitt K1-1 genannten Bauteile erfassen, d.h. sowohl die Stahlkonstruktionen als auch die Maschinenkonstruktionen und die elektrische Ausrüstung. Es ist grundsätzlich unzulässig, Bauteile, die für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit wichtig sind, ohne entsprechende Sicherheitsnachweise oder Dokumentationen der technischen Daten zu verwenden.

Die bautechnischen Unterlagen müssen zwecks Erleichterung späterer Instandhaltungs-, Reparatur-, Umbau- oder Modernisierungsarbeiten eindeutig und vollständig sein. Dies gilt auch für zugelieferte spezielle Konstruktionsteile, z.B. hinzugekaufte Serienprodukte. Die zu archivierende Dokumentation der bautechnischen Unterlagen muß während der gesamten Nutzungsdauer der Konstruktionsteile benutzbar bleiben. Eine Beschränkung auf Archivierung der bautechnischen Unterlagen nur in Form von EDV-Datenträgern scheidet wegen der zu erwartenden Einschränkungen der Lesbarkeit infolge der schnellen technischen Entwicklung auf dem Gebiet der EDV aus.

Die Arten der Prüfbescheinigungen nach DIN EN 10204 sind eigentlich zur Verwendung bei der Bestellung von Erzeugnissen aus metallischen Werkstoffen (ursprünglich nur Eisen- und Stahlerzeugnissen) entwickelt und definiert worden. Gleichwohl dürfen sie auch auf weiterverarbeitete Produkte aus metallischen Werkstoffen und auf andere Werkstoffe angewendet werden, wenn dies bei der Bestellung vereinbart wurde. In welchem Umfang die Erfüllung der Anforderungen durch Prüfbescheinigungen bestätigt werden müssen, bedarf der Vorgabe des Auftraggebers.

### **K1-4 Werkstoffe**

#### **K1-4.1 Werkstoffe für Stahlkonstruktionen**

Außer den Stahlsorten, die in DIN 18800-1 genannt sind, werden mit geänderter Bezeichnungsweise unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025, schweißgeeignete Feinkornbaustähle nach DIN EN 10113-1, -2 und -3 und Baustähle mit höherer Streckgrenze nach DIN EN 10137-1 und -2 verwendet. Wetterfeste Baustähle nach DIN EN 10155 ohne Korrosionsschutz kommen für den Stahlwasserbau in der Regel nicht in Betracht.

Die charakteristischen Werte der Werkstoff-Festigkeitswerte sind definitionsgemäß Fraktilwerte. Daher stimmen sowohl ihre Formelzeichen als auch im allgemeinen ihre Zahlenwerte nicht mit den entsprechenden Werkstoffkennwerten der Werkstoffnormen überein, denn dort handelt es sich um Mindestwerte, die etwas kleiner sein können. Man liegt in der Regel auf der



„sicheren Seite“, wenn die Mindestwerte in die Berechnungen eingesetzt werden, falls über die Fraktilwerte noch keine verbindlichen Regelungen vorliegen.

Es kann vorkommen, daß eine Erhöhung der Streckgrenze zu einer Erhöhung der Beanspruchung führt, aber nicht zu einer proportionalen Erhöhung der Beanspruchbarkeit. Auf ein Beispiel hierfür und eine geeignete Vorgehensweise wird im Abschnitt K1-10.26 hingewiesen.

Bei der Auswahl der Werkstoffe muß auch ein möglicher Abfall der Kerbschlagzähigkeit bei tiefen Temperaturen beachtet werden.

## **K1-4.2 Werkstoffe für Dichtungen**

### **K1-4.2.2 Kunststoffe**

Für die Polymerwerkstoffe PE-UHMW und PA6G+PE liegen bei Verwendung als Gleitleisten bzw. Gleitklötze (Knaggen) von Verschlußkörpern z.Zt. noch keine ausreichenden Betriebserfahrungen vor, die eine Festlegung von Bemessungswerten für Beanspruchbarkeiten (Pressungen, auch Kantenpressungen) abhängig von charakteristischen Werten der Festigkeitseigenschaften ermöglichen.

Generell gilt für PE-UHMW im Vergleich zu PA6G+PE:

Streckspannung (siehe DIN EN ISO 527-1) kleiner, Zug-Elastizitätsmodul kleiner, Reibungszahl kleiner, Abrieb größer, Wasseraufnahme kleiner.

## **K1-4.3 Werkstoffe für Maschinenkonstruktionen**

Für Maschinenteile wird eine erheblich größere Vielfalt von Werkstoffen eingesetzt als für Stahlkonstruktionen, außer unlegierten Baustählen insbesondere auch nichtrostende Stähle, Vergütungsstähle, Einsatzstähle und Nichteisenmetalle.

Die Werkstoffkennwerte von Vergütungsstählen sind in DIN EN 10083-1 und von Einsatzstählen in DIN EN 10084 festgelegt.

Nichteisenmetalle, die für Gleitlager verwendet werden, sind Kupferlegierungen, die z. B. in folgenden Normen erfaßt sind:

DIN ISO 4381, DIN ISO 4382-1, DIN ISO 4382-2 und DIN ISO 4383.

Die charakteristischen Werte der Festigkeitseigenschaften von Stahlguß und Gußeisen können der „Anpassungsrichtlinie Stahlbau“ entnommen werden.

## **K1-5 Charakteristische Werte der Einwirkungen auf die Stahlkonstruktionen**

### **K1-5.1 Ständige Einwirkungen**

Dichte von Schlick (ausgetaucht) kann mit  $\rho = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  angesetzt werden.

## K1-5.2 Veränderliche Einwirkungen

### K1-5.2.2 Hydrodynamische Einwirkungen

Beim Wellendruck werden drei Fälle unterschieden, siehe *Kortenhaus/Oumeraci* [6]:

- nicht brechende Welle (stehende Welle),
- bereits gebrochene Welle,
- Sturzbrecher.

### K1-5.2.5 Eisdruck

Als Einwirkungen aus dem Eis werden im Abschnitt 3.2.7 von DIN 19702 genannt:

- Eisstoß durch Eisschollen,
- Eisdruck durch nachschiebendes Eis (z. B. Packeis),
- Eisdruck einer geschlossenen Eisdecke,
- Eisauflast.

Die Neufassung von DIN 19704 behandelt lediglich die Eisauflast gesondert und trifft hinsichtlich der übrigen Eiseinwirkungen keine Unterscheidung.

Gegenüber der früheren Ausgabe von DIN 19704: 1976-09 erfordert die Neuauflage einen größeren Materialaufwand für die Stahlkonstruktion des Verschlusskörpers, für die Lager und ggf. für den Antrieb. Insbesondere wird z. B. der Antrieb eines Klappenwehres durch den Eisdruck häufig höher beansprucht, sofern er nicht „nachgiebig“ ausgebildet ist, z. B. als ölhdraulischer Antrieb mit Druckbegrenzungsventil.

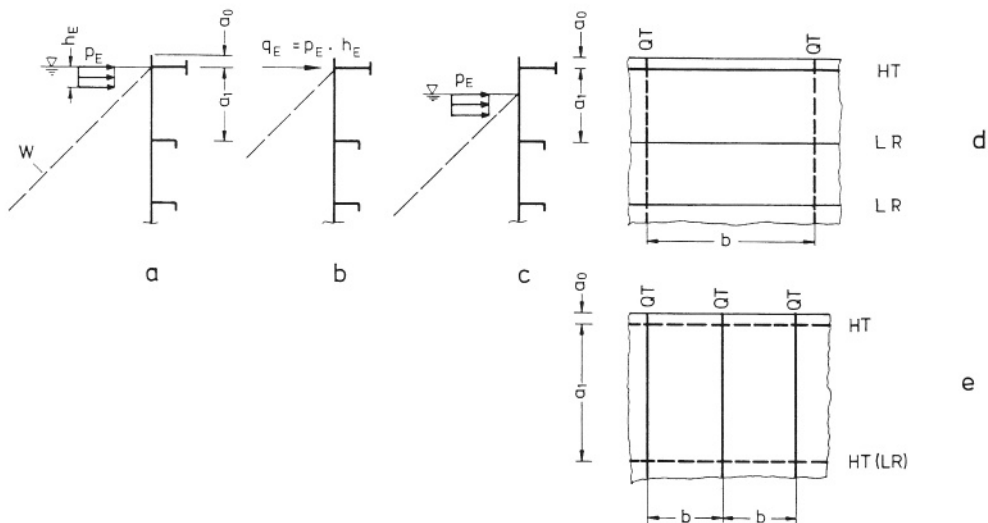
Der Mehraufwand für die Stauwand und deren Steifen wird in Grenzen gehalten durch die erlaubte (physikalisch jedoch nicht begründete) Ermäßigung des Eisdrucks auf die Hälfte bei Verdoppelung der Eisdicke. Diese „Erleichterung“ wurde eingeführt, weil

- die versteifte Stauwand hinsichtlich der Wasserdruckbelastung im oberen, dem Eisdruck ausgesetzten Bereich des Verschlusskörpers i. a. überdimensioniert ist (Mindestblechdicke),
- das Tragsystem Stauwand/Stauwandsteifen große Tragreserven hat (wichtig: Stabilität der Steifen),
- die Eisdruckbelastung keinen Betriebsfestigkeitsnachweis erfordert.

Eine Vereinfachung der Berechnung des Haupttragwerks besteht in dem erlaubten Ersatz der Flächenlast  $p_E$  [kN/m<sup>2</sup>] durch eine äquivalente Linienlast  $q_E = p_E \cdot h_E$  [kN/m] in Wasserspiegelhöhe bzw. in Stegebene des oberen Hauptträgers (Bild K1-5-1) oder in der Kante eines zusammengesetzten Querschnitts (z. B. bei einer Fischbauchklappe in der oberen Anschlußlinie der Rückwand an die Stauwand).

Der Eisdruck auf eine geneigte Stauwand wird nicht als Komponenten-Zerlegung des horizontalen Eisdrucks nach dem Parallelogramm der Kräfte angesetzt, sondern nach einer plausibel erscheinenden, einfachen Interpolationsbeziehung.

Der Ansatz einer Linienlast von 30 kN/m am unteren Rand der unterströmbaren Verschlusskörper geht von der Vorstellung aus, daß Eisschollen, die beim Unterströmen mitgerissen werden, gegen den Verschlusskörper stoßen. Diese Linienlast am unteren Rand braucht nur örtlich aufgenommen zu werden und bleibt daher bei der Berechnung des Haupttragwerks sowie bei der Ermittlung der Hubkräfte unberücksichtigt.

**Bild K1-5-1**

Eisdruck auf ausgesteifte Stauwand

- a) Querschnitt, Eisdruck als Flächenlast
- b) Querschnitt, Eisdruck als äquivalente Linienlast
- c) Querschnitt, Eisdruck bzw. Wasserspiegel etwa in Feldmitte der Stauwand
- d, e) Ansichten der versteiften Stauwand

HT = Hauptträger bzw. LR = Längsrippe (Horizontalsteife), QT = Querträger bzw. QR = Querrippe (Vertikalsteife), W = Wasserdruck

Das Festfrieren eines Verschlusskörpers an der Sohle (Grundeis), das z.B. auftreten kann, wenn der Unterwasserstand in der Nähe der Sohle liegt, wird mit dieser Linienlast nicht erfaßt, sondern gehört zu den „Außergewöhnlichen Einwirkungen“.

Das Festfrieren des Verschlusskörpers an einer geschlossenen Eisdecke (in Wasserspiegelhöhe) ist mit der Reibungszahl  $\mu = 0,1$  für die Reibung zwischen Stahl und Eis nicht erfaßbar, sondern gehört ebenfalls zu den „Außergewöhnlichen Einwirkungen“.

Die Eisdrücke einer geschlossenen Eisdecke können zu größeren als die im Abschnitt 5.2.5 von DIN 19704-1 genannten Werte anwachsen, z.B. bei Kanalbrücken und bei Trögen von Schiffshebewerken. Maßnahmen zur Eisfreihaltung siehe Abschnitt 7 von DIN 19704-2 und K2-7.

Zu entlastend wirkenden Anteilen der Eisdrücke siehe auch K1-7.2.

### K1-5.2.8 Änderung der Stützbedingungen

Änderungen der Stützbedingungen entstehen auch als Folge der Herstellungs- und Montagegenauigkeiten nach DIN 19704-2, 5.2, bei statisch unbestimmt gelagerten Verschlusskörpern. Beispielsweise wird die Stemmwirkung der Stemmtor-Hauptträger (Riegel) bei ungenauer Lage der Stemmknaggen sowie infolge elastischer Nachgiebigkeit der Kammerwände beim Füllen der Schleusenammer empfindlich gestört.

Der Einfluß von Herstellungs- und Montageungenauigkeiten der fest eingebauten Teile auf die Berechnung der Rollschütze ist in der Regel vernachlässigbar gering, falls nicht mehr als zwei fest eingebaute Laufräder je Seite vorhanden sind.

Zur Vorgehensweise bei mehr als 2 Laufrädern je Seite siehe auch K2-5.2.3.

### **K1-5.2.12 Windlast**

Die Windlasten nach DIN 1055-4 gelten als charakteristische Werte der Einwirkungen. Zur Berechnung der Antriebe sind sie daher bei der Ermittlung der Bemessungswerte der Einwirkungen noch mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F = 1,35$  zu multiplizieren.

Bei der Berechnung von Portalen gelten die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 18800-1.

## **K1-5.3 Außergewöhnliche Einwirkungen**

### **K1-5.3.2 Transport-, Montage- und Reparaturzustände**

Transport-, Montage- und Reparaturzustände können sich vom betriebsbereiten Zustand z. B. in den Einwirkungen, im Tragsystem und in dessen Lagerungsbedingungen unterscheiden.

Die Einwirkungen auf einen **Notverschluß**, der sich in Staustellung zwecks Reparatur eines anderen Verschlußkörpers oder anderer Anlagenbereiche befindet, gehören nicht zu der als außergewöhnlich bezeichneten Einwirkungsart der Reparaturzustände.

## **K1-5.4 Weitere vorzugebende Einwirkungen**

### **K1-5.4.2 Bewegungsbehinderung durch Fremdkörper**

Nicht immer auszuschließende lokale, durch Fremdkörper verursachte Beschädigungen sind z. B. Schäden an der Dichtungskonstruktion und im Bereich der Stauwandkanten.

## **K1-6 Reibung**

### **K1-6.1 Allgemeines**

Die Reibung ist weder den Einwirkungen nach Tabelle 5 oder Tabelle 6 noch den Beanspruchbarkeiten nach Abschnitt 7.3 oder 9.4 von DIN 19704-1 zugeordnet, sondern ist in einem eigenen Abschnitt 6 erfaßt. Damit wird verdeutlicht, daß Reibungskräfte und Reibungsmomente keine unabhängigen mechanischen Größen sind, sondern Doppelwirkungen ähnlich Auflagerreaktionen und Schnittgrößen, so daß ihre Streuung nicht mit zusätzlichen Teilsicherheitsbeiwerten erfaßt werden muß.

Die Streuung der Reibungszahlen wird durch empirisch festgestellte Mindest- und Höchstwerte beschrieben, die fallweise als ungünstigste Werte eingesetzt werden müssen.

Der Mindestwert der Reibungszahl ist z. B. beim Stemmator anzusetzen, wenn nachzuweisen ist, daß die Wirkungslinie des Stemmdrucks (Wendesäulen-Gelenkkraft) eines Hauptträgers nicht außerhalb des Reibungswinkels  $\rho$  liegt ( $\tan \rho = \mu$ ).

Für die Werkstoffpaarung Stahl/Elastomer ist in Tabelle 3 die – in früheren Ausgaben von DIN 19704 in Anlehnung an [7] vorgenommene – Abstufung der Reibungszahlen in Abhängigkeit von der Shore-Härte (vgl. DIN 53505) entfallen, da die Reibungszahlen auch wesentlich von weiteren Variablen, wie Flächenpressung, Oberflächenrauheit der Gleitfläche, Gleitgeschwindigkeit, Schwebstoff- und Sandgehalt des Wassers, abhängen.

Die für die Werkstoffpaarung Stahl/Polyamid bzw. Stahl/Polyethylen in den Werkstoffblättern der Hersteller genannten Reibungszahlen basieren i.a. auf maschinenbauspezifischen Anwendungen und sind nicht ohne weiteres auf die Einsatzbedingungen des Stahlwasserbaus (kleine Gleitgeschwindigkeit, relativ große Flächenpressung, relativ große Oberflächenrauheit z.B. von Gleitschützen) übertragbar. Die Tabelle 3 enthält die gemittelten Ergebnisse von neueren Laboruntersuchungen, siehe *Schmauß* [8].

## K1-6.2 Gleitreibung

Den Maschinenkonstruktionen nach Tabelle 4 ist auch das Reibungssystem Laufrad/Schiene zugeordnet. Im Fall sehr verschmutzter Oberflächen, z.B. infolge Ansatz von Muscheln und Mineralien auf der Schiene, sollten größere Gleitreibungszahlen (Höchstwert  $\mu \approx 0,25$ ) angesetzt werden.

## K1-6.4 Rollreibung

### K1-6.4.2 Laufrolle auf Laufschiene

Der Hebelarm der Rollreibung läßt sich nach *Föppl* [9] auch in Abhängigkeit von der Breite der Hertzschen Berührungsfläche des Kontaktproblems angeben. Für eine zylindrische Laufrolle auf ebener Laufschieneoberfläche gilt der Zusammenhang

$$f = \pi \cdot b / 32$$

Dabei ist  $f$  der Hebelarm der Rollreibung und  $b$  die halbe Gesamtbreite der in diesem Fall rechteckigen Hertzschen Berührungsfläche.

Zur Prüfung der Härte nach unterschiedlichen Verfahren siehe auch K1-10.22.

Im Fall sehr rauher Oberflächen von Rad und Schiene sollte die Rollreibungszahl um bis zu 100 % größer angesetzt werden.

## K1-7 Berechnung der Stahlkonstruktionen

### K1-7.1 Erforderliche Nachweise

Die **Beanspruchungen**  $S_d$  infolge der **Bemessungswerte der Einwirkungen** sind für Einwirkungskombinationen zu ermitteln und bei den Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen den **Beanspruchbarkeiten**  $R_d$  infolge der **Bemessungswerte der Widerstandsgrößen** gegenüberzustellen. Die Anforderungen bei rechnerischen Nachweisen haben daher allgemein die Form

$$S_d / R_d \leq 1$$

Die erforderliche Sicherheit ist nachgewiesen, wenn diese Ungleichung für Grenzzustände mit Bemessungswerten nicht verletzt wird.

Die Beanspruchungen  $S_d$  werden unter Berücksichtigung von **Teilsicherheitsbeiwerten**  $\gamma_F$  und **Kombinationsbeiwerten**  $\psi$  ermittelt (siehe K1-7.2) und die Beanspruchbarkeiten  $R_d$  unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M$  (siehe K1-7.3). Dadurch werden zufällige Abweichungen der streuenden Basisvariablen abgedeckt und das geforderte ausreichende Sicherheitsniveau erreicht.

Die Tragsicherheit ist erst dann nicht mehr gegeben, d.h. das durch die Teilsicherheitsbeiwerte definierte und in den Bemessungswerten enthaltene Sicherheitsniveau ist aufgezehrt, wenn die tatsächlich auftretenden Einwirkungen die tatsächlich vorhandene Beanspruchbarkeit überschreiten, ein Fall, der beispielsweise bei groben Konstruktions-, Fertigungs-, Berechnungs-, Werkstoff- oder Bedienungsfehlern oder bei „höherer Gewalt“ vorkommen kann. Das sind Sachverhalte, die entweder durch hinreichende Kontrollen nicht verhindert wurden oder nicht vorhersehbar waren und die durch Regelungen in technischen Baubestimmungen nicht abgedeckt werden können.

### K1-7.2 Berechnung der Beanspruchungen

Nach den früheren Ausgaben von DIN 19704 wurden durch Zusammenfassung der Einwirkungen unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens und der Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens die folgenden drei Lastfälle gebildet:

- Normale Betriebsfälle (NB),
- Besondere Betriebsfälle (BB),
- Außergewöhnliche Lastfälle (AL).

Den Lastfällen waren für die statischen Nachweise zulässige Spannungen in unterschiedlicher Größe zugeordnet (zul  $\sigma$ -Konzept). Demzufolge galten ebenfalls nach Lastfällen abgestufte, globale Sicherheitsfaktoren für die Bauteile. Die Sicherheitsfaktoren waren für die Maschinenteile größer festgelegt als für die Stahlkonstruktionen.

Die frühere Einteilung in die Lastfälle NB, BB, AL ist jetzt entfallen. An ihre Stelle treten drei Fälle von **Einwirkungskombinationen**, das sind die **Grundkombinationen** Fall 1 und 2 und die **Außergewöhnlichen Kombinationen** Fall 3. Ebenso ist der Begriff der zulässigen Spannungen jetzt entfallen.

Die als Ausgangspunkt der Berechnung anzusetzenden Einwirkungen – die sogenannten **charakteristischen Werte der Einwirkungen** – entsprechen den früheren Lastannahmen. Aus ihnen werden nach Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_F$  die sogenannten **Bemessungswerte der Einwirkungen** erhalten. Letztere sind außerdem noch mit Kombinationsbeiwerten  $\psi$  zu multiplizieren, falls mehrere veränderliche Einwirkungen gleichzeitig auftreten, und dann zu den erwähnten Grundkombinationen und Außergewöhnlichen Kombinationen zusammenzufassen. Welche Einwirkungen auf diese Weise kombiniert werden müssen, ist vom Auftraggeber vorzugeben. Wenn mehrere Kombinationen möglich sind, ist die für den betrachteten „Bemessungsquerschnitt“ jeweils ungünstigste maßgebend.

Veränderliche Einwirkungen, die im **Betrieb** häufig zusammentreffen, zählen zu den Grundkombinationen Fall 1, und die im Betrieb selten zusammentreffen zu den Grundkombinationen

nen Fall 2. Daher ist der Betriebsfestigkeitsnachweis nur für die Grundkombinationen Fall 1 erforderlich, siehe auch K1-7.5.4.1.

Der Fall 3 ist dadurch gekennzeichnet, daß **kein Betrieb** mehr stattfindet. Zum Fall 3 gehört immer eine einzige der als „außergewöhnlich“ bezeichneten Einwirkungsarten.

Das gleichzeitige Auftreten mehrerer außergewöhnlicher Einwirkungsarten ist somit nicht Gegenstand der Berechnung; es kann als „höhere Gewalt“ bezeichnet werden.

In den Fällen 2 und 3 berücksichtigen die Kombinationsbeiwerte  $\psi < 1$  die geringere Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens mehrerer veränderlicher Einwirkungen. Es ist somit stets  $\psi = 1$  zu setzen, wenn die Berechnung mit nur einer einzigen veränderlichen Einwirkung maßgebend ist.

Diese Anforderungen haben zur Folge, daß eine hydrostatische Einwirkung stets mit  $\psi = 1$  und  $\gamma_F = 1,35$  zu berücksichtigen ist, falls sie die einzige veränderliche Einwirkung ist. Eine **selten** vorkommende erhöhte hydrostatische Einwirkung, die nach Vorgabe des Auftraggebers als Fall 2 eingestuft werden darf, unterscheidet sich folglich lediglich dadurch von den häufig vorkommenden geringeren hydrostatischen Einwirkungen, daß nur für letztere ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden muß.

Aus Tabelle 5 von DIN 19704-1 geht hervor, daß die einzeln oder nur in Grundkombinationen Fall 1 und 2 vorkommenden, als veränderlich bezeichneten Einwirkungsarten, z. B. eine selten vorkommende, erhöhte hydrostatische Einwirkung, nicht zu den außergewöhnlichen Einwirkungsarten gehören.

Der Auftraggeber kann für eine **selten** vorkommende, erhöhte hydrostatische und hydrodynamische Einwirkung, die er als Fall 2 eingestuft hat, nach seinem Ermessen auch einen ermäßigten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F < 1,35$  vorgeben. Es wird jedoch empfohlen, den Wert  $\gamma_F = 1,20$  nicht zu unterschreiten.

Bei einem Notverschluß ist für eine selten auftretende, erhöhte hydrostatische Einwirkung die Ermäßigung des Teilsicherheitsbeiwerts auf den Wert  $\gamma_F = 1,20$  (anstatt 1,35) in der Regel vertretbar.

Die Einwirkungen im Stahlwasserbau sind insofern etwas Besonderes, als ihre Größe im allgemeinen recht genau angegeben werden kann. Dies trifft auch für die veränderlichen Einwirkungen zu. Deren obere Schranken sind im allgemeinen gut bekannt. Beispiele hierfür sind:

- der vorgegebene höchste Wasserspiegel und damit der maximale hydrostatische Druck,
- die Kippmomente und Bremsmomente von elektromechanischen Antrieben,
- die einstellbaren oder die plombierten eingestellten Maximalwerte der Kraftübertragung bei elektromechanischen Antrieben mit eingebauter Überlast-Schutzeinrichtung,
- die Einstellwerte der Druckbegrenzungsventile bei hydraulischen Antrieben und damit die Betriebsdrücke.

Veränderliche Einwirkungen, deren Größen so begrenzt sind, heißen **kontrollierte veränderliche Einwirkungen**. Für diese darf in Übereinstimmung mit DIN 18800-1 anstatt des sonst üblichen Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_F = 1,5$  der um 10 % ermäßigte Wert  $\gamma_F = 1,35$  eingesetzt werden. Hiervon wird in der Neuauflage von DIN 19704 weitgehend Gebrauch gemacht. Ausnahmen bilden lediglich der Schiffsstoß auf Stoßschutzeinrichtungen und die Trossenzugkräfte auf Poller. In diesen beiden Fällen sind größere Streuungen der Einwirkungen zu erwarten, und daher muß mit  $\gamma_F = 1,5$  gerechnet werden.



Gleichzeitig belastende und entlastende hydrostatische und hydrodynamische Einwirkungen, z. B. Wasserdrücke auf der Ober- und der Unterwasserseite, gelten als zusammengehörig und sind somit stets mit gleichen Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsbeiwerten zu multiplizieren.

Falls jedoch Eisdrücke sowohl an der Ober- als auch an der Unterwasserseite eines Bauteils möglich sind, hat man die entlastenden Anteile der Eisdrücke wegzulassen.

### K1-7.3 Berechnung der Beanspruchbarkeiten

Beim Bemessungskonzept nach Grenzzuständen sind auch auf der Seite der Beanspruchbarkeiten Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  einzuführen, mit denen man aus den **charakteristischen Werten der Beanspruchbarkeiten** durch Division die **Bemessungswerte  $R_d$  der Beanspruchbarkeiten** erhält.

Für die Stahlkonstruktionen stimmen die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  mit den Anforderungen nach DIN 18800-1 überein.

### K1-7.4 Nachweisverfahren

Die Stahlkonstruktionen der Verschlusskörper gelten grundsätzlich als nicht vorwiegend ruhend belastet. Somit sind Betriebsfestigkeitsnachweise für die wiederholte Belastung erforderlich.

Nun ist die elastische Grenzlast eine obere Schranke der Beanspruchbarkeit bei wiederholter Belastung. Daher wird als Grenzzustand der statischen Tragfähigkeit der Beginn des Fließens definiert.

Es ist deshalb nur das Nachweisverfahren „Elastisch-Elastisch“ im Sinne von DIN 18800-1 anwendbar, d. h. unter den Bemessungswerten der Einwirkungen darf (bei Anwendung der elementaren Verfahren der Spannungsberechnung) der Bemessungswert der Streckgrenze nicht überschritten werden.

Dies bedeutet, daß auch bei Tragsicherheitsnachweisen für stabilitätsgefährdete Bauteile sowohl die Schnittgrößen als auch die Beanspruchbarkeiten nur nach der Elastizitätstheorie zu berechnen sind. Plastische Querschnitts- und Systemreserven bleiben unberücksichtigt.

Somit dürfen beispielsweise in den Tragsicherheitsnachweisen Normalkräfte  $N_{pl}$  und Biegemomente  $M_{pl}$  im vollplastischen Zustand und der plastische Formbeiwert  $\alpha_{pl}$  (vgl. DIN 18800-2) nicht vorkommen.

Ausnahmsweise ist bei durchlaufenden Stauwandplatten eine geringfügige Plastizierung an den Stellen der Stützmomente zulässig, wenn die Beanspruchungen nur schwellend sind. Bei schwellender Beanspruchung wird auf diese Weise die Möglichkeit des elastischen „Einspiellens“ ausgenutzt.

Auch für die selten vorkommenden Stahlkonstruktionen der Verschlusskörper mit sehr geringer Anzahl der Spannungsspiele (z. B. Sperrtore, Turbineneinlaufschütze und Notverschlüsse) wird im Interesse einer Einheitlichkeit der Regelungen die Anwendung der Elastizitätstheorie als alleiniges Nachweisverfahren gefordert, zumal es sich meistens um geschweißte Plattenkonstruktionen handelt, deren Breiten/Dicken-Verhältnisse die Grenzwerte ( $b/t$ ) nach den

Tabellen 15 und 18 von DIN 18800-1 überschreiten, was der Ausnutzung plastischer Tragreserven entgegensteht.

## K1-7.5 Tragsicherheitsnachweise

### K1-7.5.2 Stabilitätsnachweis

Bei Stäben und Stabwerken mit Stabilitätsfällen hat man ausreichende Sicherheit gegen Erreichen der elastischen Grenzlaster nachzuweisen. Hierbei ist die Elastizitätstheorie 2. Ordnung anzuwenden, falls der Verzweigungslastfaktor des Systems (das ist die *Eulersche* Knicklast)  $\eta_{Ki} \leq 10$  ist.

Beim Tragsicherheitsnachweis ist Element 717 von DIN 18800-1 oder Element 117 von DIN 18800-2 zu beachten.

Demnach ergibt sich beispielsweise für einen planmäßig mittig belasteten, beiderseitig gelenkig gelagerten **Druckstab** mit einer Imperfektion in Form einer Sinushalbwellen (ungekollte) Vorverformung

$$w_0(x) = \max w_0 \cdot \sin(\pi \cdot x / L)$$

die maximale Gesamtdurchbiegung

$$\begin{aligned} \max w + \max w_0 &= \max w_0 / [1 - N_d / N_{Ki,d}] \\ &= \max w_0 / [1 - \gamma_M \cdot \gamma_F \cdot N_k / N_{Ki,k}] \end{aligned}$$

der Bemessungswert des Biegemoments nach Theorie I. Ordnung (Kennzeichen: (..)I)

$$M_d^I(x) = N_d \cdot w_0(x) = \gamma_F \cdot N_k \cdot \max w_0 \cdot \sin(\pi \cdot x / L)$$

und der Bemessungswert des maximalen Biegemoments nach Theorie II. Ordnung (Kennzeichen: (..)II)

$$\max M_d^{II} = \max M_d^I / [1 - N_d / N_{Ki,d}]$$

Der Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung lautet daher, wenn alle Größen in Bemessungswerten geschrieben werden,

$$(N_d / A) + (\max M_d^{II} / W) \leq f_{y,d} = f_{y,k} / \gamma_M$$

oder

$$(N_d / A) + (\max M_d^I / W) / [1 - N_d / N_{Ki,d}] \leq f_{y,d}$$

oder gleichbedeutend, alles in charakteristischen Werten geschrieben,

$$(N_k / A) + (\max M_k^I / W) / [1 - \gamma_M \cdot \gamma_F \cdot N_k / N_{Ki,k}] \leq f_{y,k} / (\gamma_M \cdot \gamma_F)$$

Dabei ist:

$L$	Knicklänge
$N_d$	Bemessungswert der Druckkraft
$N_k$	charakteristischer Wert der Druckkraft
$N_{Ki}$	<i>Eulersche</i> Knicklast
$W$	Widerstandsmoment der Stabquerschnittsfläche
$f_{y,d}$	Bemessungswert der Streckgrenze

$f_{y,k}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze
$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit

Die Beulsicherheit planmäßig schwach gekrümmter **Platten** (mit abwickelbarer Plattenmittelfläche) ohne Querlasten darf nach Element 803 von DIN 18800-3 oder nach Element 422 von DIN 18800-4 wie für ebene Platten mit Beibehaltung der Lagerungsbedingungen und der Schnittgrößen in der Plattenmittelfläche nachgewiesen werden.

## K1-7.5.4 Betriebsfestigkeitsnachweis

### K1-7.5.4.1 Allgemeines

Die Regelungen zum Betriebsfestigkeits- bzw. Dauerfestigkeitsnachweis nach der früheren Ausgabe von DIN 19704 haben sich als zu großzügig herausgestellt und mußten daher korrigiert werden. Über Schäden, die auf die frühere mangelhafte Bemessungs- und Konstruktionspraxis zurückzuführen sind, berichtet *Wagner* [10].

Die **Nutzungsdauer** für Bauteile des Stahlwasserbaus wird unterschiedlich festgelegt. Wenn vom Auftraggeber nichts anderes festgelegt ist, gilt:

- 70 Jahre für Stahlkonstruktionen,
- 35 Jahre für Maschinenkonstruktionen,
- 35 Jahre für elektrische Ausrüstungen.

Diese Unterschiede werden für sinnvoll gehalten, weil man sowohl bei den Maschinenkonstruktionen als auch bei den elektrischen Ausrüstungen schon eher ein Auswechseln wegen erforderlicher Modernisierungen oder Umbauten erwartet als bei den Stahlkonstruktionen.

Die Nutzungsdauer für die Stahlkonstruktionen ist in dieser Größe auch aus dem Stahlbrückenbau bekannt.

Die Nutzungsdauer hat selbstverständlich nichts zu tun mit Gewährleistungsfristen oder Garantiezusagen. Sie ist lediglich ein rechnerischer Wert, der als Grundlage der Betriebsfestigkeitsnachweise benötigt wird. Der Auftraggeber gibt nach seinen Erfahrungen und Prognosen die Anzahl der täglichen Bewegungsvorgänge eines Verschleißkörpers und die Anzahl der Betriebstage je Jahr an. Anhaltspunkte und Mindestwerte hierzu sind dem normativen Anhang A des Teils 1 der Norm zu entnehmen. Die Gesamtzahl der Bewegungsvorgänge während der festgelegten Nutzungsdauer läßt sich somit leicht ermitteln. Die Spannungsanalyse ergibt dann die Anzahl und Intensität der Spannungsspiele in Abhängigkeit von den Einwirkungen und von der Kinematik der Bewegungsvorgänge während der Nutzungsdauer.

Die **Spannungsspielzahl** der veränderlichen Einwirkungen der Grundkombinationen Fall 1 ist i.a. nicht bei allen Einwirkungen gleich, sie ist z.B. bei Eisauflast geringer als bei den Einwirkungen infolge Wasserdruck. Die **Spannungsschwingbreiten** sind daher i.a. veränderlich. Das Beanspruchungskollektiv läßt sich beim Betriebsfestigkeitsnachweis mittels einer Schädigungshypothese durch eine schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite rechnerisch ersetzen.

### K1-7.5.4.2 Teilsicherheitsbeiwerte

Bei einseitig ausgesteiften Stauwandblechen liegen die Stellen der größten Kerbwirkung, die Ausgangspunkt eines Schadens sein könnten, meistens im Druckschwellbereich der Halskehlnähte. Der Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit darf in diesem Fall auf  $\gamma_{Mf} = 1,15$  ermäßigt werden, weil die Betriebsfestigkeitsnachweise für die Stahlkonstruktionen mit ertragbaren Spannungsschwingbreiten (ohne Berücksichtigung der Mittelspannungsabhängigkeit) geführt werden. Der Druckanteil der Spannungsschwingbreite wirkt jedoch eigentlich günstiger als der Zuganteil und führt daher zu einer Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit, die bei Stauwandblechen nicht unberücksichtigt zu bleiben braucht.

## K1-7.7 Besonderheiten für bestimmte Bauformen und Bauteile

### K1-7.7.1 Träger mit breiten Gurten

Bei Vollwandträgern mit breiten Gurten treten die Größtwerte der GurtNormalspannungen über den Stegen auf. Die äußeren Gurtbereiche entziehen sich mit zunehmender Entfernung vom Steg der Spannungsaufnahme.

Ursachen dieses Effektes sind:

- Schubverformungen der Gurtscheibe,
- Beulverformungen der Gurtplatten im Nachbeulzustand,
- planmäßige Krümmung der Gurte.

Die ungleichmäßige Verteilung der GurtNormalspannungen infolge **Schubverformungen** (engl.: shear lag) wird durch die **mittragende Breite** erfaßt.

Die ungleichmäßige Verteilung der GurtNormalspannungen infolge **Beulverformungen** wird durch die **wirksame Breite** erfaßt. Die Tragreserven im Nachbeulzustand – gekennzeichnet durch die Überschreitung der idealen Plattenbeulspannung – werden nach DIN 18800-3 teilweise ausgenutzt. Je größer der Überschreitungsgrad unter den Bemessungswerten der Einwirkungen, um so geringer ist die wirksame Breite.

Eine planmäßige Gurtkrümmung liegt bei **kreisförmigen Stauwänden** vor, die mit Aussteifungen in Ringrichtung oder in Längsrichtung oder in beiden Richtungen schubfest verbunden sind. Die Querschnittswerte dieser Aussteifungen können unter Berücksichtigung einer reduzierten wirksamen Flanschbreite nach DAST-Richtlinie 017 wie für Ringsteifen bzw. Längssteifen von Kreiszylinderschalen ermittelt werden.

Für in Tragrichtung planmäßig kreisförmig **gekrümmte Träger** mit breiten kreiszylindrischen Gurten wird die mittragende Breite von *Peil/Siems* angegeben [11].

Liegt die planmäßig gerade Achse einer Aussteifung (Längssteife) parallel zur Erzeugenden der kreiszylindrischen Stauwand, kann die mittragende Gurtbreite durch einen äquivalenten Ersatzgurt erfaßt werden, dessen Lage und Querschnittsfläche nach *Peil* [12] ermittelt werden kann.

Man ermittelt die Beanspruchungen (Schnittgrößen und Spannungen) unter Berücksichtigung der mittragenden Breite. Im allgemeinen ist die wirksame Breite nach DIN 18800-3 und DAST-Richtlinie 017 kleiner als die mittragende Breite nach [11] und [12] und daher für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten bei den Beulsicherheitsnachweisen maßgebend.

### K1-7.7.2 Berechnung von Blechen mit Biegebeanspruchung

Durch Wasserdruck beanspruchte, ebene oder kreiszyklindrisch gekrümmte Bleche, insbesondere Stauwandbleche sind i.a. 4seitig gestützt durch Randträger in Form von horizontalen Hauptträgern und/oder Längsrippen (Längssteifen) und rechtwinklig dazu angeordneten Quertägern und/oder Querrippen (Quersteifen).

Die zur Vereinfachung der Berechnung des Verschlußkörpers zugelassene Annahme der starren Stützung der Bleche ist eine Näherung, da die Durchbiegungen der Randträger in der Regel verschieden groß sind, siehe Berechnungsbeispiel Z10.

Eine starre Stützung ist auch im **Anhang 3** für die Ermittlung der Biegebeanspruchungen querbelasteter Rechteckplatten für die Randbedingungen „volle Einspannung“ und „frei drehbare Lagerung“ als Grenzfälle der elastischen Einspannung vorausgesetzt.

Die Biegespannungen in den äußeren Fasern ebener Platten ergeben sich aus

$$\sigma = k \cdot p \cdot a^2 / (100 \cdot s^2)$$

Hierin bedeuten:

$p$	Wasserdruck in N/mm <sup>2</sup> (bezogen auf den Plattenmittelpunkt)
$a, b$	Stützweiten in mm nach Anhang 3
$s$	Plattendicke in mm
$k$	dimensionsloser Beiwert für die im Anhang 3 angegebenen Punkte und Lagerungsbedingungen bei konstantem Wasserdruck

Beiwerte  $k$  für linear veränderliche Wasserdruckverteilung können *Wickert/Schmauß* [13] entnommen werden.

Neben der starren Stützung sollte bei Seitenverhältnissen  $a / b \geq 2$  ( $b$  = kleinere Stützweite) der Stauwand-Einzelfelder deren Durchlaufwirkung in Richtung der kleineren Stützweite näherungsweise berücksichtigt werden, siehe Berechnungsbeispiel Z10.

### K1-7.7.3 Ausschnitte in Blechen

Ausschnitte als Wasserablauföffnungen werden meistens kreisrund ausgeführt. Die Wasserauflast während des Abflusses beeinflusst z. B. die Hubkraft bei Hubtoren.

Ausschnitte in Blechen haben eine Störung des elementaren Scheibenspannungszustandes zur Folge. Am Ausschnittsrand treten Spannungsspitzen auf, deren Größe sowohl für Fälle ohne als auch mit Randverstärkung bekannt ist, siehe z. B. *Nölke* [14] und *Radaj/Schilberth* [15].

### K1-7.7.4 Laufschienen

Der Balken auf elastischer Bettung liefert, da er in Querrichtung als starr vorausgesetzt ist, nur eine lineare Querverteilung der Betonpressungen über die Schienenbreite  $B$ , vgl. Berechnungsbeispiel Z31, Bild 1b.

Bei einer **Blockschiene** nach Bild 4 von DIN 19704-1 erhält man eine zutreffendere, nichtlineare Querverteilung anhand einer FEM-Berechnung mit Modellierung der Platte als Kontinuum auf elastischer Bettung, vgl. Berechnungsbeispiel Z31, Bild 1c.

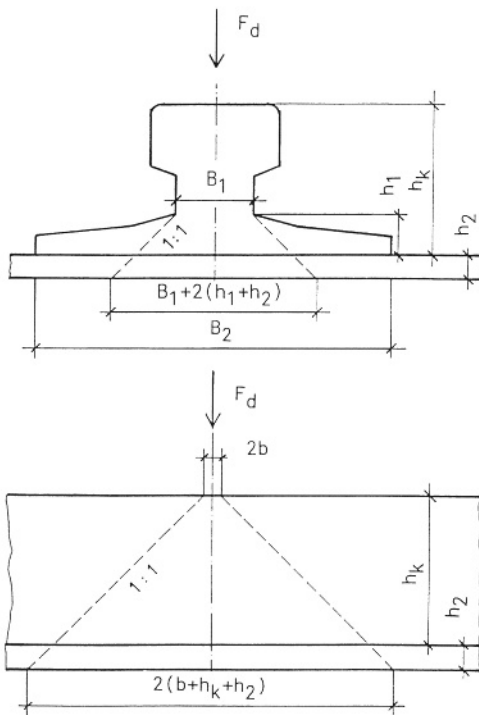
Die Modellierung mit 3D-Elementen von Schiene und Beton (letzterer als Ausschnitt eines Halb- oder Viertelraums) kommt der Wirklichkeit am nächsten, vgl. Berechnungsbeispiel Z31, Bild 2.

Die rechteckige rechnerische Betondruckfläche  $A_{c0}$  unter der Wirkungslinie der Radkraft darf gemäß CEB-FIP Model Code 1990, Abschnitt 3.3.1, durch eine Kreisfläche gleicher Größe ersetzt werden, wenn das Seitenverhältnis des Rechtecks nicht kleiner als 1 : 2 ist.

Zu den Grundlagen der Regelungen über die Berücksichtigung der Druckschwellbeanspruchung des Betons siehe *König/Danielewicz* [16].

Bei einer **Laufschiene** (Blockschiene) **auf einem einbetonierten Schienenträger** mit T-Querschnitt kann die maximale Betonpressung unter dem Flansch und unter dem Steg näherungsweise nach *Valtinat/Eberwien/Hagen* [17] unter Beachtung der Voraussetzungen berechnet werden. Dabei wird die Radkraft teils dem Flansch und teils dem Steg zugewiesen.

Die maximale Betonpressung unter einer **Kranschiene** kann sinngemäß wie bei einer Blockschiene ermittelt werden. Anstelle eines Schienenträgers mit T-Querschnitt kann auch nur ein Unterlagsblech von der Dicke  $h_2$  einbetoniert sein. Für die Ermittlung der maximalen Betonpressung  $\max p_{\text{Beton}}$  ist die rechnerisch anzusetzende Höhe aus Bild K1-7-1 zu entnehmen.



**Bild K1-7-1**

Laufschiene (Kranschiene) auf einbetoniertem Unterlagsblech, Querschnitt und Längsschnitt

## **K1-8 Charakteristische Werte der Einwirkungen auf die Maschinenkonstruktionen**

### **K1-8.2 Ermittlung der Antriebskräfte**

Die Grundlagen für den Entwurf elektromechanischer Antriebe mit elektronischer Regelung haben *Brosch* [18] und *Vögel* [19] dargestellt, siehe auch Berechnungsbeispiel Z19.

Die Reibungskräfte müssen mit den Haftreibungszahlen nicht nur für die beiden Endpositionen („geschlossen“ bzw. „geöffnet“) des Verschlusskörpers ermittelt werden, sondern auch für Zwischenpositionen, weil auch dort ein Halt stattfinden kann.

Nach sehr langem Verweilen des Verschlusskörpers, z. B. in der Schließstellung, kann zu Beginn der Bewegung ein stark erhöhter Widerstand (sog. Losreiß-Widerstand) auftreten. Dieser ist durch die Haftreibungszahl nach den Tabellen 3 und 4 nicht abgedeckt, jedoch i. a. durch die größtmögliche Kraftübertragung des Antriebs nach Abschnitt 8.4 bzw. 9.3.

### **K1-8.4 Charakteristische Werte der größtmöglichen Kraftübertragung**

Die größtmögliche Kraftübertragung tritt beispielsweise auf, wenn der Verschlusskörper durch Vereisung oder Verklemmung blockiert ist.

Bei ölhydraulischen Antrieben ergibt sich der charakteristische Wert der größtmöglichen Kraftübertragung des Hydrozylinders aus dem gemäß DIN 19704, 8.5.2, ermittelten Einstellwert des Druckbegrenzungsventils DV1 und der unter Last stehenden Wirkfläche des Kolbens und beim Hydromotor aus dem Einstellwert des Druckbegrenzungsventils DV1, das direkt auf dem Hydromotor aufgefänscht ist, und dem spezifischen Drehmoment (in Nm/bar).

Bei zweiseitigen Antrieben mit mechanischem Gleichlauf müssen die **Gleichlaufwellen** wegen der Möglichkeit des ungleichmäßigen Einfallens der Bremsen auch das volle Bremsmoment einer Seite aufnehmen können.

Die Grundlagen der Berechnung **elektrischer Ausgleichswellen** können aus *Vögel* [19] und *Ungruh/Jordan* [20] entnommen werden, siehe auch Berechnungsbeispiel Z18.

## **K1-8.5 Ölhydraulische Antriebe**

### **K1-8.5.1 Berechnungsgrundlagen**

Der hydraulische Antrieb von Verschlusskörpern im Stahlwasserbau erfolgt fast ausschließlich durch **Hydrozylinder**. Antriebe mit **Hydromotoren** in Verbindung mit mechanischen Bauteilen, wie Zahnradvorgelege, sind auf Ausnahmen beschränkt, z. B. Antriebe von Schiebetoren an Schleusen.

Es hat sich gezeigt, daß bei ausgeführten Anlagen der in den früheren Ausgaben von DIN 19704 und DIN 19705 aufgeführte Besondere Betriebsfall (BB) für die Berechnung und Auslegung von hydraulischen Antrieben meistens maßgebend war. Daher sieht die Neuausgabe von DIN 19704-1 hierfür nunmehr nur einen **Betriebsfall** (Bewegen bzw. Halten des Verschlusskörpers) vor.

Sind **außergewöhnliche Einwirkungen** gemäß DIN 19704-1, 5.3 und 5.5, sowie vorzuziehende Einwirkungen gemäß DIN 19704-1, 5.4, zu berücksichtigen und maßgebend, muß beim



Eintreten einer dieser Einwirkungen der Antrieb selbsttätig stillgesetzt werden. Anschließend ist lediglich die Bewegung des Verschlußkörpers in eine der Endstellungen oder in eine Reparaturstellung erlaubt. Hierzu sind vom Auftraggeber Festlegungen bezüglich der zu treffenden Maßnahmen vorzugeben (siehe unten).

Wenn der Verschlußkörper unter den Bedingungen der außergewöhnlichen bzw. vorzugebenden Einwirkungen vorübergehend zur Aufrechterhaltung des Betriebs wiederholt bewegt werden muß, ist dies für den Antrieb als (normaler) Betriebsfall zu berücksichtigen. Diese Einstufung sollte auf solche Verschlußkörper beschränkt werden, für die eine sehr hohe Funktionssicherheit gefordert wird, z. B. bei Anlagen zur Sturmflutsicherung oder zur Hochwasserentlastung.

Es muß möglich sein, den Verschlußkörper mit Fernsteuerung und/oder Automatikbetrieb zu bewegen.

Wenn bei einem zweiseitig angetriebenen Verschlußkörper das „Bewegen mit einseitigem Antrieb“ (bei Ausfall einer Antriebsseite) realisiert werden muß, setzt dies torsionssteife Verschlußkörper (in der Regel mit Rotationsbewegung) voraus. Einseitiger Antrieb von Hubtoren (mit Translationsbewegung) ist nur möglich, wenn das Verhältnis Höhe zu Breite (Seitenführung!) größer als ca. 1,2 ist.

Betriebliche Maßnahmen nach einer **außergewöhnlichen Einwirkung des Antriebs im Störfall** sind z. B.:

- Ermittlung der Ursache des Störfalls,
- Überprüfung der Bewegungsfähigkeit des Verschlußkörpers,
- Fahren des Verschlußkörpers in eine Endstellung oder Reparaturstellung,
- Abkopplung oder Freischaltung des ausgefallenen Hydrozylinders bzw. Hydromotors bei zweiseitig angetriebenen Verschlußkörpern,
- Abschaltung der Fernsteuerung und des elektrisch wirkenden Überlastschutzes,
- Fahren des Verschlußkörpers mit minimaler Geschwindigkeit unter ständiger visueller Kontrolle,
- Ständige NOT-AUS-Bereitschaft.

Konstruktive Maßnahmen sind z. B.:

- Bemessung des Hydrozylinders bzw. Hydromotors und, soweit erforderlich, der Hydraulikkomponenten für den aus der außergewöhnlichen Einwirkung sich ergebenden höheren Öl- druck sowie Auslegung des Hydrosystems entsprechend der erforderlichen Bewegung.
- Absenken in Endlage oder Reparaturstellung unter Eigenlast. Hierzu werden zweckmäßig separate, möglichst manuell zu bedienende Steuergeräte einschließlich Stromventile eingebaut.
- Fahren des Verschlußkörpers in Endstellung oder Reparaturstellung. Es wird empfohlen, im Hydrauliksystem separate ortsfeste oder transportable Pumpeneinheiten mit zugeordneten Druckbegrenzungsventilen vorzusehen. Es muß sichergestellt sein, daß diese im Betriebsfall „Bewegen“ nicht wirksam werden können.

### **K1-8.5.2 Ermittlung der rechnerischen Betriebsdrücke**

In der Regel ist bei ölhydraulischen Antrieben der Systemdruck am Pumpenausgang am höchsten. Zwischen dem Pumpenausgang und dem Zylindereingang bzw. dem Sperrblockeingang sind die verschiedensten Regel- und Steuergeräte und die Rohrleitungen angeordnet, deren Druck- und Strömungsverluste zu überwinden sind.

#### **K1-8.5.2.1 Rechnerischer Betriebsdruck im Hydrozylinder oder Hydromotor**

Aus den Druckanteilen 1 bis 6 ergibt sich der maximale Betriebsdruck im System  $p_{B, Sys}$  und der um 10 % höher zu wählende Einstelldruck des Druckbegrenzungsventiles DV2. Dieser Einstellwert ist der Bemessungsdruck für die Hydraulik-Komponenten und Rohrleitungen.

Die Ermittlung der einzelnen Druckanteile wird in den Berechnungsbeispielen Z16 und Z17 verdeutlicht.

#### **K1-8.5.2.2 Rechnerischer Betriebsdruck im übrigen System**

Je nach den baulichen Gegebenheiten können Rohrleitungsabschnitte, z.B. in Gängen, Schächten oder in sonstigen geschlossenen Räumen, verschieden großen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sein. Es kann daher bei langen Rohrleitungen wirtschaftlich sein, die Druckverluste entsprechend den minimalen Umgebungstemperaturen für die einzelnen Rohrabschnitte getrennt zu ermitteln.

Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn der Antriebszylinder in einem geschlossenen Raum angeordnet ist. Rohrkanäle, die auf der Oberfläche des Massiv-Bauwerks angeordnet und nur mit Metallabdeckungen versehen sind, sind nicht als geschlossene Räume anzusehen.

Ist der Hydrozylinder jedoch im Freien angeordnet, muß die gesamte Rücklaufleitung für den Viskositätswert bei  $-25\text{ °C}$  berechnet werden.

Befinden sich sowohl Hydrozylinder als auch Hydraulikaggregat in einem geschlossenen Raum, sind die Druckverluste nur für die minimal zu erwartende Raumtemperatur zu ermitteln.

Falls die Ermittlung der Druckverluste in den Rohrleitungen abschnittsweise erfolgt, sind die entsprechenden Temperaturvorgaben durch den Auftraggeber zu liefern.

#### **K1-8.5.3 Ermittlung des statischen Drucks im Hydrozylinder oder Hydromotor**

Sind außergewöhnliche bzw. vorzugebende Einwirkungen nach DIN 19704-1, 5.3 bis 5.4, zu berücksichtigen, ist ein weiteres Druckbegrenzungsventil DV3 erforderlich, welches den entsprechend höheren Druck begrenzt.

Der Einstellwert von DV3 entspricht dem Druckanteil 1, ermittelt unter Berücksichtigung der außergewöhnlichen bzw. vorzugebenden Einwirkungen. Dieser Einstellwert ist maßgebend für die Ermittlung der größtmöglichen Kraftübertragung beim „**Halten des Verschlußkörpers**“.

## K1-8.5.4 Grenzwerte der Öldrücke

### K1-8.5.4.1 Grenzwerte im Betriebsfall

Die Festlegung des Grenzwerts **250 bar im Betriebsfall** ist wie folgt begründet:

In der Regel sind die Stellorgane an den Hydraulikkomponenten, wie Magnete, Rückstellfedern und dgl., herstellenseitig für Betriebsdrücke von 280 bis 315 bar zugelassen bzw. ausgelegt. Somit ist bei maximalem Betriebsdruck eine ausreichende Funktionssicherheit gegeben, auch unter ungünstigen Umständen, wie z. B. bei tiefen Temperaturen.

Die Beschränkung auf den Grenzwert von 250 bar im Betriebsfall berücksichtigt auch die Anforderung von DIN 19704-1, 10.4, daß bei allen Hydraulikkomponenten der vom Hersteller gewährleistete Dauerbetriebs-/Nennndruck um ca. 25 % größer als der rechnerische Betriebsdruck gemäß Abschnitt 8.5.2 sein muß.

Ist der Betriebsdruck wesentlich kleiner als 250 bar (z. B. ca. 125 bar), können auch Hydraulikkomponenten mit kleineren Dauerbetriebs-/Nennndrücken gewählt werden. Dies ist auch innerhalb eines Hydrauliksystems zulässig, z. B. für Nebenantriebe.

### K1-8.5.4.2 Grenzwert im Störfall

Der Grenzwert **300 bar im Störfall** nach 8.5.4.2 liegt im Bereich der oben genannten Werte.

Beim früheren Außergewöhnlichen Lastfall (AL) war es nicht ausdrücklich ausgeschlossen, einen Notbetrieb über längere Zeit mit einem maximalen Druck von 300 bar zu fahren. Dies ist nach DIN 19704-1: 1998-05 nicht mehr zulässig.

## K1-9 Berechnung der Maschinenkonstruktionen

### K1-9.1 Allgemeines

Im Stahlwasserbau gelten Maschinenteile ebenso wie Stahlkonstruktionen als nicht vorwiegend ruhend belastet. Sie sind daher mit der gleichen Begründung wie bei K1-7.4 nach der Elastizitätstheorie zu berechnen. Darüber hinaus setzt ein gutes Funktionieren der Maschinenkonstruktionen die Einhaltung von Passungen voraus, so daß die Anwendung der Plastizitätstheorie schon allein wegen der dabei auftretenden Größenordnung der Verformungen nicht in Betracht kommt.

### K1-9.2 Erforderliche Nachweise

Die Anforderungen bei rechnerischen Nachweisen für Maschinenteile haben grundsätzlich die gleiche Form wie bei Stahlkonstruktionen, vgl. K1-1.7.1:

$$S_d / R_d \leq 1$$

Für die Teilsicherheitsbeiwerte wurden jedoch andere Werte festgelegt, vgl. Abschnitte 9 und 10 von DIN 19704-1.

### **K1-9.3 Berechnung der Beanspruchungen**

Im Querschnitt stark gekrümmter Biegeträger, z.B. Lasthaken, sind die Normalspannungen nichtlinear verteilt. Die maßgebenden Randspannungen können sinngemäß wie in DIN 15400 ermittelt werden.

### **K1-9.4 Berechnung der Beanspruchbarkeiten**

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  für die Beanspruchbarkeit für Maschinenteile ist größer als für Stahlkonstruktionen.

Es sind die Gesichtspunkte des Funktionierens, z.B. der Einhaltung der Passungsspiele und des gleichmäßigen Tragens von Verzahnungen über die Zahnbreite, die größere Steifigkeiten und geringe Verformungen der Maschinenteile erfordern. Am einfachsten läßt sich dieses Ziel durch geringere Ausnutzung der Querschnitte erreichen, also durch Beanspruchbarkeiten, die mit größeren Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M$  berechnet werden.

Bei der Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte hat man sich an den bisher üblichen globalen Sicherheitsfaktoren, die sich im großen und ganzen langjährig bewährt haben, als leitendes Prinzip orientiert.

### **K1-9.5 Tragsicherheitsnachweise**

#### **K1-9.5.2 Stabilitätsnachweis**

Für die Stabilitätsnachweise von Maschinenteilen gelten uneingeschränkt die Erläuterungen K1-7.5.2.

#### **K1-9.5.3 Nachweis der Betriebsfestigkeit**

##### **K1-9.5.3.1 Allgemeines**

Zur Nutzungsdauer für Maschinenkonstruktionen und für elektrische Ausrüstungen siehe K1-7.5.4.1

Die angegebene Nutzungsdauer läßt sich nicht bei allen Bauteilen erreichen. Bei kinematisch bewegten Konstruktionen kommen Bauteile vor, die im Betrieb verschleifen oder die wegen unvermeidbarer Änderung der Werkstoffeigenschaften ihre Gebrauchstauglichkeit verlieren.

### **K1-10 Berechnung spezieller Maschinenteile**

#### **K1-10.1 Allgemeines**

Zahlreiche wichtige Bauteile des Stahlwasserbaus, insbesondere spezielle Maschinenteile, sind **Serienprodukte** oder allgemein gebräuchliche Maschinenelemente. Falls hierfür bereits Berechnungsgrundlagen als Normen verfügbar sind, wurde auf nochmalige ausführliche Regelungen verzichtet. Statt dessen wurden durch normative Verweise die bestehenden Regelwerke zu mitgeltenden erklärt. Diese Vorgehensweise vermeidet Widersprüche innerhalb der Gesamtheit technischer Regelungen, sie dient der Kürze von DIN 19704, und sie beabsichtigt, anwenderfreundliche Hilfen zu bieten.

Bei den älteren bestehenden Regelwerken wird – wie bisher im Maschinenbau üblich – noch mit dem zu  $\sigma$ -Konzept oder mit globalen Sicherheitsfaktoren  $S$  gerechnet. In diesem Fall ist das Produkt aus den Teilsicherheitsbeiwerten, die in DIN 19704-1 festgelegt sind, dem bisher üblichen globalen Sicherheitsfaktor gleichzusetzen:

$$\gamma_F \cdot \gamma_M = S$$

In einigen Fällen sind die Berechnungsgrundlagen für Serienprodukte nicht genormt, sondern der Hersteller hat eigene, zum Teil umfangreiche Anweisungen für rechnerische Nachweise der ausreichenden Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit entwickelt, oder der Hersteller kann die Eignung durch eine ausreichende Anzahl repräsentativer Versuche nachweisen, und er legt über die Ergebnisse technische Datenblätter vor, oder die Abmessungen und Tragfähigkeiten sind typisiert und genormt.

Typische Beispiele hierfür sind:

- Kompaktantriebe, Stellantriebe und Spindelantriebe, z. B. Rollengewindetriebe,
- kleine genormte Hydrozylinder,
- Gelenklager mit sphärischer Gleitfläche,
- Ringkonus-Klemmverbindungen.

Der Einsatz derartiger Serienprodukte im Stahlwasserbau darf nicht behindert werden. Es wird daher dem Auftraggeber überlassen, mit dem Hersteller Art und Umfang der Eignungsnachweise zu vereinbaren. Als Eignungsnachweise können auch Prüfbescheinigungen in Anlehnung an DIN EN 10204 dienen, wenn die zu prüfenden Eigenschaften klar definiert sind.

## **K1-10.2 Hydrozylinder**

### **K1-10.2.1 Genormte Hydrozylinder**

Genormte Hydrozylinder müssen die über DIN 24333 hinausgehenden Anforderungen nach DIN 19704-2, 10.1.2.2 (Kolbenstangen), 10.1.2.3, Absatz 1 (Lagerung und Anschlüsse), 10.1.2.4, Absatz 2, 3 und 4 (Dichtungen) und 10.9, Absatz 1 (Gelenklager) erfüllen.

### **K1-10.2.2 Spannungsnachweis für statische Beanspruchung**

Das Zylinderrohr muß so dimensioniert sein, daß es auch Stöße durch Treibgut oder Eis schadlos aufnehmen kann.

### **K1-10.2.3 Knicksicherheitsnachweis**

Beim Spannungsnachweis für schlanke Hydrozylinder nach Theorie II. Ordnung ist die Vorkrümmung in Form einer Sinushalbwelle mit dem Stich  $w_0 = L / 300$  ohne Berücksichtigung des Faktors  $2/3$  einzusetzen, der in DIN 18800-2, Element 201, angegeben ist.

Es bestehen jedoch keine Bedenken, bei Hydrozylindern mit Zylinderrohren, die auch außen auf ganzer Länge spanabhebend bearbeitet worden sind, wegen der dadurch erzielten Genauigkeit den Stich der Vorkrümmung auf  $L/450$  zu reduzieren.

Die Vorkrümmung wurde in Anlehnung an die Knickspannungslinie a nach DIN 18800-2, Tabelle 3, festgesetzt, obwohl einer Kolbenstange mit Vollquerschnitt eigentlich die Knick-

spannungslinie  $c$  zugeordnet ist. Die Herstellungsungenauigkeiten der Kolbenstange sind jedoch wegen der Oberflächenbearbeitung geringer als bei einem Rundstahl des Stahlbaus.

Statt von einer Vorkrümmung in Form einer Sinushalbwellen kann auch von einem ungefähr entsprechenden anderen Funktionsverlauf bei gleichem Stich ausgegangen werden.

Die o.g. Vorkrümmung erfaßt nicht nur als geometrische Imperfektion die unplanmäßige Abweichung von der Geradheit der Achse des unbelasteten Hydrozylinders; sie ist daher nicht am Hydrozylinder meßbar.

Wenn in die Berechnung der Knicksicherheit die o.g. Vorkrümmung stellvertretend für alle denkbaren Imperfektionen und für den Einfluß der Passungen eingesetzt wird, brauchen nicht noch zusätzlich das Spiel und die elastische Nachgiebigkeit der Kolben- und Stangenführungsbuchse bzw. -führungsringe, die ungleichen Wanddicken infolge unplanmäßiger Exzentrizität der Zylinderbohrung, die Aufweitung des Zylinderrohres infolge Innendruck und die Eigenspannungen berücksichtigt zu werden.

Andererseits ist eine Verringerung der oben angegebenen Werte für den Stich der Vorkrümmung  $w_0$  von  $L/300$  auf  $L/500$  bzw. von  $L/450$  auf  $L/750$  vertretbar, wenn beim Knicksicherheitsnachweis das Spiel und die Nachgiebigkeit der Kolben- und Stangenführungsbuchsen bzw. -führungsringe gesondert mit planmäßigen bzw. wirklichkeitsnahen Zahlenwerten in die Berechnung eingesetzt werden.

### **K1-10.5 Elektromotore**

Typisch für den Stahlwasserbau ist der intermittierende Betrieb mit fallweise unterschiedlich langen Aussetzzeiten. Voraussetzung zur Wahl der Elektromotore ist die Festlegung der Betriebsart nach DIN EN 60034-1. Wenn die Betriebsart nicht vom Auftraggeber anders festgelegt wurde, ist für die Bemessung der Elektromotore Dauerbetrieb anzunehmen. Dauerbetrieb bedeutet, daß der Elektromotor im Betrieb bei konstanter Belastung den thermischen Beharrungszustand erreichen kann; es bedeutet jedoch nicht, daß die angetriebene Maschinenkonstruktion dauerhaft (d.h. mit entsprechend großer Anzahl der Spannungsspiele) ausgelegt werden muß.

Die relative Einschaltdauer kann in der Phase des Probelaufs wesentlich größer sein als im späteren bestimmungsmäßigen Betrieb.

### **K1-10.8 Wellen**

Für die Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen stehen die Normen der Reihe E DIN 743 zur Verfügung. Einzelheiten zur Berücksichtigung der Kerbwirkung bei der Berechnung von Wellen können auch DIN 6892 entnommen werden.

Zu den Stützkonstruktionen einer Welle, die von Schwingungen betroffen sein können, zählt insbesondere auch ein Wehrsteg, über den eine mechanische Gleichlaufwelle führt.

## K1-10.9 Welle-Nabe-Verbindungen

### K1-10.9.1 Paßfedern und Keile

Die Anforderungen an Paßfederverbindungen sind in DIN 6892 genormt. Der bei der Berechnung von Zahnrad- und Schneckengetrieben eingeführte Anwendungsfaktor  $K_A$  wird in gleicher Größe auch in die Berechnung von Paßfederverbindungen eingesetzt.

Anforderungen an Wellen mit Paßfedernut sind auch in den Normen der Reihe E DIN 743 enthalten.

### K1-10.10 Zahnradgetriebe

Nach den im Abschnitt 10.10 genannten Normen ist für Zahnradgetriebe außer der Berechnung mit dem Motornennmoment auch der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit unter der statisch wirkend anzunehmenden größtmöglichen Kraftübertragung zu führen.

Der Anwendungsfaktor  $K_A$  erfaßt nach DIN 3990-1 Zusatzkräfte, die – über die Nenn-Umfangskraft hinaus – von außen in ein Radpaar eingeleitet werden. Hierbei handelt es sich um Stoßbelastungen während des Betriebs, die abhängig von der Arbeitsweise sind, also um dynamische Effekte. Definitionsgemäß ist daher beim Nachweis ausreichender Tragfähigkeit unter statisch wirkend anzunehmender größtmöglicher Kraftübertragung  $K_A = 1$  zu setzen, ebenso wie auch bei jedem Nachweis für Einwirkungskombinationen mit angehaltener Bewegung eines Verschleißkörpers, also immer beim Stillstand des Antriebs.

Abhängig von der Lastwechselzahl  $N_L$  werden die Lebensdauerfaktoren  $Z_{NT}$  nach DIN 3990-2 und  $Y_{NT}$  nach DIN 3990-3 und damit die Grübchen-Grenzfestigkeit und die Zahnfuß-Grenzfestigkeit ermittelt.

### K1-10.11 Schneckengetriebe

Für Schneckengetriebe gelten die geometrischen Festlegungen nach DIN 3975. Mangels genormter Berechnungsgrundlagen werden Einzelheiten der zu führenden Tragfähigkeitsnachweise aus *Niemann/Winter* [21] entnommen.

Abhängig von der Lebensdauer  $L_h$  werden nach [21] der Lebensdauerfaktor  $Z_h$ , die Lastwechselzahl  $N_L$  und damit die Verschleißfestigkeit  $\sigma_{Wlim}$  ermittelt.

Außer der Berechnung mit dem Motornennmoment ist auch der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit unter der statisch wirkend anzunehmenden größtmöglichen Kraftübertragung zu führen. Auch hier ist der Anwendungsfaktor  $K_A = 1$  zu setzen, wenn der Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Erreichen der statischen Festigkeit geführt wird.

### K1-10.12 Gleitlager aus Nichteisen-Gußwerkstoffen

Unter Nichteisen-Gußwerkstoffen sind hier nur Nichteisenmetalle (NE-Metalle) zu verstehen. NE-Metalle sind definiert als

- alle unlegierten Metalle mit Ausnahme des Eisens,
- alle Legierungen, in denen irgendein Metall – mit Ausnahme des Eisens – den größten Einzelanteil darstellt.



Für Gleitlager kommen im wesentlichen infrage:

- Kupfer-Zink-Legierungen (alte Benennung nach DIN 1718: Messing und Sondermessing),
- Kupfer-Zinn-Legierungen (alte Benennung: Zinnbronze und Mehrstoff-Zinnbronze),
- Kupfer-Zinn-Zink-Legierungen (alte Benennung: Rotguß),
- Kupfer-Blei-Zinn-Legierungen (alte Benennung: Bleibronze).

Normen für Gleitlager-Werkstoffe sind im Abschnitt K1-4.3 genannt.

Nach Beiblatt 1 zu DIN 17600-11 sollten einige ältere Benennungen, z.B. Sondermessing, Zinnbronze, Mehrstoff-Zinnbronze, Bleibronze und Phosphorbronze, nicht mehr verwendet werden, während die Benennungen Messing, Bronze und Rotguß weiterhin zulässig sind.

Zum Stand der Normung der Begriffe und deren Übersetzungen in Fremdsprachen und der Definitionen wird außerdem auf DIN ISO 4378-1 bis 4378-4 verwiesen.

**Gleitlager mit periodischer Nachschmierung** sind dadurch gekennzeichnet, daß sie wegen ihrer Bauart in regelmäßigen Intervallen, die durch einen Wartungsplan vorzugeben sind, planmäßig mit Schmierstoff versorgt werden. Die Berechnung nach Abschnitt 10.12 setzt dies voraus. Sie wirken daher mit hydrodynamischer **Vollschmierung**, also mit Flüssigkeitsreibung; ihr Verschleiß ist bei ordnungsgemäßer Wartung vernachlässigbar.

Bei unterlassener Wartung kann jedoch bei ihnen unplanmäßig Mischreibung oder sogar Trockenreibung auftreten. Dieser als **Mangelschmierung** zu bezeichnende Zustand kann durch Regelungen in technischen Baubestimmungen nicht erfaßt werden.

Bei Mischreibung findet in der Gleitfläche eine teilweise metallische Berührung statt, und nur im übrigen Bereich sind die beiden metallischen Gleitpartner durch den Schmierstoff voneinander getrennt.

Bei **selbstschmierenden Gleitlagern** aus NE-Metallen sind zu unterscheiden:

- NE-Gußwerkstoffe mit Festschmierstoff-Einsätzen,
- gesinterte Kupferlegierungen mit eingelagertem, feinverteilten Festschmierstoff,
- gerollte Buchsen, z.B. aus nichtrostendem Bandstahl als Stützkörper mit einer Laufschiene aus aufgesinteter Kupferlegierung mit eingelagertem Festschmierstoff.

Der Tragwerkstoff wird in den beiden zuletzt genannten Fällen mit Verfahren der Pulvermetallurgie hergestellt. Wegen der Verwendung von Festschmierstoffen arbeiten selbstschmierende Gleitlager planmäßig im Zustand der Mischreibung. Sie sind daher unvermeidbar einem gewissen Verschleiß ausgesetzt. Dem Vorteil der Selbstschmierung steht somit der Nachteil einer von Zeit zu Zeit erforderlichen Erneuerung gegenüber.

Das komplexe tribologische System der selbstschmierenden Gleitlager ist durch das Zusammenwirken zahlreicher Parameter und Einflüsse gekennzeichnet:

- Pressung,
- Gleitweg,
- Festigkeitseigenschaften des Gleitlager- und Gegenwerkstoffs,
- Verschleiß,
- Gleitgeschwindigkeit,
- Reibungsbeiwert,
- Erwärmung und Wärmeableitung,
- Passungsspiel und Verformung bei Radiallagern,

- Oberflächenrauheit und Einlaufvorgang,
- Schwenkbewegung oder umlaufende Buchsen,
- Verschmutzung.

Der große Einfluß der Verschmutzung auf den Verschleiß läßt sich durch Abdichtung der Gleitlager verringern, allerdings ist dies aus Platzgründen bei Laschenkettten in der Regel nicht möglich.

Für die Abhängigkeit des Verschleißes von den weiteren Einflüssen liegen Ergebnisse von genormten Laborversuchen vor, die meistens jedoch als Stift/Scheiben-Versuche durchgeführt worden sind, siehe E DIN ISO 7148-1. (Stift aus dem Gleitlagerwerkstoff drückt radial oder axial auf rotierende Scheibe aus dem Gegenwerkstoff). Die Einsatzbedingungen in der Praxis weichen besonders bei Radialgleitlagern von derartigen Versuchsanordnungen ab, so daß quantitative Angaben über Verschleißraten nicht verallgemeinert werden können.

Für die Anwendungen im Stahlwasserbau konnten die Regelungen bezüglich der Beanspruchbarkeiten der Gleitlager auf die Beziehungen zwischen wenigen Parametern zurückgeführt werden, weil hier ein Sonderfall vorliegt, der das Problem vereinfacht, nämlich:

- kleine Gleitgeschwindigkeiten,
- intermittierender Betrieb mit kurzer Gleitzeit,
- kein Wärmestau.

Bei allen Gleitlagerwerkstoffen aus NE-Metallen läßt sich als Festigkeitseigenschaft die Brinellhärte HBS nach genormten Versuchsbedingungen eindeutig angeben; sie wird deshalb als Berechnungsgrundlage herangezogen.

Es ist zu beachten, daß die Härteprüfungen nach DIN ISO 4384-1 bei Sintermetallen und nach DIN ISO 4384-2 bei homogenen NE-Gußwerkstoffen sich unterscheiden. Es darf daher nicht für ein Sintermetall die Brinellhärte des homogenen metallischen Ausgangswerkstoffs für die Berechnung der Beanspruchbarkeit eingesetzt werden, sondern es ist die Brinellhärte des inhomogenen Endprodukts maßgebend.

In früheren Ausgaben von DIN 19704 wurden die gegenseitigen Verdrehungen in den Gelenken von Laschenkettten mit dem Begriff **Flexuren** beschrieben. In der Neuausgabe wird statt dessen für die Berechnung aller selbstschmierenden Gleitlager einheitlich der unter Last zurückgelegte **Jahresgleitweg**  $s$  eingeführt, weil sich damit die Zusammenhänge zutreffender erfassen lassen. Als Bezugszeitraum wurde somit 1 Jahr gewählt. Diese pragmatische Vorgehensweise vermeidet Aussagen zur ungewissen Lebensdauer dieser Verschleißteile.

Diese Erkenntnisse haben für Gleitlager mit hin- und hergehenden Schwenkbewegungen zu den Bemessungswerten der Beanspruchbarkeiten  $\sigma_{R,L}$  nach Tabelle K1-10-1 geführt.

Hiermit können bei Beachtung einiger zusätzlicher Anforderungen hinsichtlich der Mindestwerte der Brinellhärten des Gegenwerkstoffs und des Gleitlagers und bei Beachtung der Hersteller-Empfehlungen über die Qualität der Oberflächenrauheit ausreichende Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit von selbstschmierenden Gleitlagern erwartet werden.

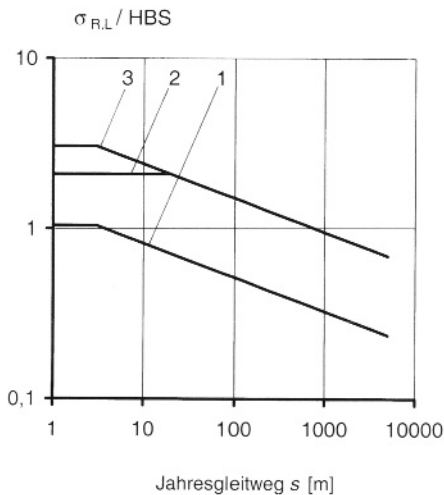
Wenn sowohl der Gegenwerkstoff als auch das Gleitlager aus homogenen Metallen bestehen, werden die Anforderungen an die Brinellhärte als Mindestwert der Stahlhärte und der Härte-differenz der Gleitpartner angegeben.

**Tabelle K1-10-1**

Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten von Gleitlagern mit Schwenkbewegungen

Gleitlager-Werkstoffe	Härteprüfung	Beanspruchbarkeit
NE-Gusswerkstoff mit periodischer Nachschmierung	DIN ISO 4384-2	$\sigma_{R,L} = 0,90 \cdot HBS$
NE-Gusswerkstoff mit Festschmierstoff-Einsätzen	DIN ISO 4384-2	$\sigma_{R,L} = 1,3 \cdot HBS \cdot \sqrt[5]{\frac{1}{s}}$ $s \geq 3 \text{ m}$
Gesinterte Kupferlegierung mit feinverteiltem Festschmierstoff	DIN ISO 4384-1	$\sigma_{R,L} = 3,8 \cdot HBS \cdot \sqrt[5]{\frac{1}{s}}$ $s \geq 20 \text{ m}$
Dünnwandige gerollte Buchsen	DIN ISO 4384-1	$\sigma_{R,L} = 3,8 \cdot HBS \cdot \sqrt[5]{\frac{1}{s}}$ $s \geq 3 \text{ m}$

Im Bild K1-10-1 sind die auf die Brinellhärte bezogenen Beanspruchbarkeiten von Gleitlagern im doppellogarithmischen Maßstab veranschaulicht.

**Bild K1-10-1**

Bezogene Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten von Gleitlagern mit Schwenkbewegungen  
 1 NE-Gußwerkstoff mit Festschmierstoffeinsätzen  
 2 Gesinterte Kupferlegierung mit feinverteiltem Festschmierstoff  
 3 Dünnwandige gerollte Buchsen

Wenn die Gleitlagerbuchsen sich umlaufend drehen anstatt nur Schwenkbewegungen auszuführen, wirkt sich dies ungünstiger aus, weil sich das anfängliche, im unbenutzten Zustand vorhandene Lagerspiel allmählich vergrößert, wodurch auch die Maximalwerte der Pressungen anwachsen. Deshalb wurde für diesen Fall festgelegt, daß die angegebenen Beanspruchbarkeiten auf 50% zu ermäßigen sind.

Die Neuauflage von DIN 19704 enthält nur Regelungen zu Ausführungen der Gleitlager aus NE-Metallen. Gleitlager, die nur aus Kunststoffen bestehen, können sicherlich zukünftig In-

teresse finden, weil bei ihnen der tragende Werkstoff (mit geringem Reibungsbeiwert) zugleich die Funktion des benötigten Schmierstoffs übernimmt. Einer Normung der Beanspruchbarkeiten stand aber im Wege, daß Erfahrungen noch nicht in ausreichendem Maß vorlagen.

Zum Stand der Regelwerke bezüglich Gleitlager aus Kunststoffen wird auf E DIN ISO 6691, E ISO 7148-2 und VDI 2541 verwiesen.

Zur Klärung des Verschleißverhaltens von Gleitlagern aus Kunststoffen hat sich als eine Art Industriestandard der nichtgenormte „sand-slurry-Test“ herausgestellt, siehe *Berzen* [22]. Hierbei handelt es sich um Abriebmessungen, die auf einem Versuchsstand im Labor an einem Versuchskörper aus dem Kunststoff durchgeführt werden. Der Versuchskörper rotiert während mehrerer Stunden in einem Sand-Wasser-Gemisch. Die Ergebnisse in Form von Gewichtsverlusten liefern allerdings keine absoluten, wirklichkeitsnahen Verschleißraten, sondern sie ermöglichen lediglich relative Vergleiche in Prozentangaben zwischen verschiedenen Produkten. (Wenn die Verschleißrate des Produkts A als Bezugswert gleich 100 % gesetzt wird, dann ist die Verschleißrate des Produkts B gleich x%).

### **K1-10.13 Gleitlager aus Verbundwerkstoffen mit Festschmierstoff**

Zum Stand der Normung bezüglich Gleitlager aus Verbundwerkstoffen und aus gerollten Buchsen wird auf E DIN ISO 4383, E ISO 7148-2, DIN ISO 12306 und DIN ISO 12307-1 verwiesen.

Wenn der Gegenwerkstoff aus homogenem Stahl und das Gleitlager aus einem Sintermetall bestehen, wird die Anforderung an die Brinellhärte lediglich als Mindestwert der Stahlhärte angegeben, weil eine Härte Differenz der Gleitpartner sich wegen der unterschiedlichen genormten Härte-Prüfverfahren nicht sinnvoll definieren läßt.

Die Beanspruchbarkeiten sind in der Tabelle K1-10-1 und im Bild K1-10-1 enthalten.

### **K1-10.14 Gelenklager mit sphärischer Gleitfläche**

Maße und Anforderungen für Gelenkköpfe mit breiten Gelenklagern sind in E DIN 24338 enthalten. Bei der Auslegung der Gelenklager sollten die Betriebsbedingungen, z. B. stets einseitige Lastrichtung, mit dem Herstellerwerk erörtert werden.

### **K1-10.15 Augenstäbe, Kettenlaschen, Augenbleche**

Die Anforderungen an Augenstäbe nach Abschnitt 8.3 von DIN 18800-1 berücksichtigen Teilplastizierungen und sind deshalb im Stahlwasserbau nicht gültig.

Den Anforderungen nach Abschnitt 10.15 von DIN 19704-1 liegen Parameterstudien zugrunde, die von der Randbedingung (Kontinuitätsbedingung) einer gegebenen Verformung am belasteten Bohrungsrand ausgehen (anstatt von einer angenommenen Randspannung).

Maße und Anforderungen für Schwenkköpfe, die als kraftübertragende Verbindungsteile zum beweglichen Ankuppeln, z. B. von Hydrozylindern, dienen, sind in E DIN 24337 und E DIN 24338 genormt.

### K1-10.16 Laschenkettengelenke

Für Laschenkettengelenke werden keine Beanspruchbarkeiten für die Werkstoffpaarung Stahl/Stahl angegeben, weil diese Werkstoffpaarung bei Gleitbewegung unter Last ungeeignet ist. Sie wäre nur in Kettenabschnitten möglich, die unter Last nicht umgelenkt werden; die Beanspruchbarkeit ist dann durch die allgemeinen Anforderungen des Abschnitts 9 von DIN 19704-1 eindeutig festgelegt.

Die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Kettenkraft  $F$  auf die Laschen (z. B. bei der 3fach gelagerten Laschenkette mit 2 Innenlaschen und 4 Außenlaschen im Kettenglied), also unabhängig von den Steifigkeiten der Laschen und des Bolzens, vereinfacht die Berechnung der Beanspruchungen, stimmt aber nicht mit der „richtigen“ Lastverteilung überein, vgl. Berechnungsbeispiel Z24.

Obwohl i. a. die Pressung in den Laschenbuchsen für die Tragfähigkeit und Funktion der Kette maßgebend ist, sind auch Tragfähigkeitsnachweise und Betriebsfestigkeitsnachweise der Bolzen und Laschen zu führen.

Die Kettenbolzen versagen im Zerreißversuch meistens durch Abscheren in Kombination mit Biegung. Die üblicherweise angewendeten elementaren Berechnungsansätze nach der Technischen Balkenbiegelehre für die Kettenbolzen können beim hier vorliegenden gedrungenen „Balken“ (Stützweiten des Kettenbolzens in der Größenordnung des Durchmessers) nur rohe Anhaltswerte für die Beanspruchungen ergeben. Die zusätzliche näherungsweise Berücksichtigung der Querkraft-Schubverzerrungen des Bolzens liefert eine Korrektur der Durchbiegungen und Schnittgrößen.

Allerdings sind nicht vernachlässigbar kleine Durchbiegungsanteile infolge Schubverzerrungen immer ein Indiz lediglich dafür, daß die Technische Balkenbiegelehre eigentlich nicht anwendbar ist (weil kein schlanker Balken vorliegt).

### K1-10.18 Triebstöcke, Triebstockketten, Zahnstangen

Berechnungsgrundlagen für Triebstockverzahnungen werden von *Ernst* [23], *Niemann/Winter* [24] und *Scheffler* [25] angegeben.

### K1-10.20 Seiltriebe

Sicherheitstechnische Festlegungen über Drahtseile aus Stahldrähten sind auch in der Normenreihe DIN 3051 enthalten. Tendenzen bei der zukünftigen Weiterentwicklung der Berechnungsmethoden für Seiltriebe hat *Feyrer* [26, 27] dargestellt.

Die im Abschnitt 9 von DIN 18800-1 angegebenen Beanspruchbarkeiten hochfester Zugglieder gelten unter der (dort nicht erwähnten) Voraussetzung, daß die Zugglieder nicht über Rollen oder Seiltrommeln laufen; sie gelten daher nicht für Seiltriebe.

### K1-10.22 Laufrollen, Führungsrollen, Stemmknaggen, Schienen

Mit Rücksicht auf die unvermeidbare Verschleißerscheinungsform des **Abriebs** ist es notwendig, nicht nur die Laufräder, sondern bei häufig bewegten Verschlüssen auch die Laufschienen ausbaubar zu konstruieren. Vom Abrieb zu unterscheiden sind der **Ermüdungsverschleiß** und **Wälzverschleiß**, das sind Verschleißarten die durch Oberflächenzerrüttung mit der Folge von

Grübchenbildung und Ausbruch gekennzeichnet sind. Die Konstruktionsregeln und Berechnungsgrundlagen haben das Ziel, diese letzteren Verschleißarten zu vermeiden und damit die Instandsetzungskosten möglichst gering zu halten.

Bei der Überarbeitung der Regelungen für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten im Berührungsbereich von Laufrad und Laufschiene wurden einerseits die Voraussetzungen für die Ermittlung der maximalen Pressungen  $\max p$  beachtet, und andererseits die Wälzfestigkeiten berücksichtigt, die bei wiederholten Überrollungen maßgebend sein können.

In der von *H. Hertz* stammenden Theorie des Kontaktproblems elastischer Körper wird vorausgesetzt, daß die Radien und sonstigen Abmessungen der beiden kraftübertragenden Körper groß sind gegenüber den Abmessungen der sich unter der Belastung einstellenden Berührungsfläche. Folglich sind bei Anwendung der Theorie Laufrad und Laufschiene so zu konstruieren, daß sich ein räumlicher Spannungszustand ohne Störung durch in der Nähe liegende Laufrad- oder Schienenkanten ausbilden kann. Der Kantenlauf (also das Abrollen auf der Kante) muß ebenso wie eine Beanspruchung in der Nähe der Kanten wegen der Gefahr der Überbeanspruchung und des übermäßigen Verschleißes verhindert werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Zugänglichkeit der Laufschiene erschwert und ein Auswechseln daher schwierig ist.

Bei Laufrädern mit fest im Verschlußkörper eingebauten Achsen wird deshalb die ballige Ausführung verlangt. Hierfür stellt sich unter der Radlast eine elliptische Berührungsfläche ein. Für deren Lage sind Randabstände von den Kanten angegeben, die nicht unterschritten werden dürfen.

Im Berechnungsbeispiel Z29 wird das starke Anwachsen der Pressungen für den Fall demonstriert, daß ein Kantenlauf im Widerspruch zu den Regelungen der Norm in Kauf genommen wird.

Grundlage der neuen Regelungen für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten ist die Tatsache, daß die ungünstigste Beanspruchung des Werkstoffs nicht in der Oberfläche am Ort der maximalen Pressungen auftritt. Sie tritt im Innern der beiden Körper in einem bekannten Abstand von der Oberfläche auf, beim rollenden Rad als größte Wechselschubspannung seitlich neben der Wirkungslinie der Radlast und beim Kontaktproblem ohne Rollbewegung als größte schwellende Hauptschubspannung in der Wirkungslinie der Radlast.

Die Spannungen im Inneren der kraftübertragenden Körper sind den *Hertz*schen Pressungen in der Berührungsfläche proportional. Deshalb ist es berechtigt, bei Kontaktproblemen die maximalen *Hertz*schen Pressungen zu berechnen; aber bei der Festlegung der Beanspruchbarkeiten mußte darauf Rücksicht genommen werden, daß ein Ort im Innern Ausgangspunkt einer Schädigung sein kann.

Die **Dauerwälzfestigkeit** (bei  $N = 2 \cdot 10^6$  Überrollungen unter maximalem Raddruck) darf abhängig vom Zahlenwert der Brinellhärte mit

$$p_D = 3,0 \cdot \text{HBS N/mm}^2$$

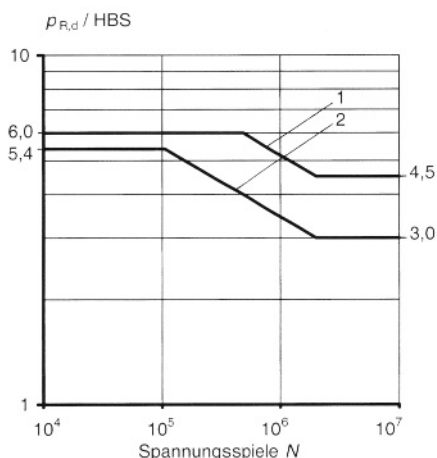
angenommen werden. Ein „Lebensdauer-Exponent“ mit dem Betrag  $m = 5,0$  läßt sich durch Vergleich mit Ermüdungsfestigkeitskurven für Spannungsschwingbreiten der Schubspannungen gut begründen, ebenso die Möglichkeit, den günstigen Einfluß von Eigenspannungen auszunutzen, die sich beim mehrfachen Überrollen im Werkstoff in der Umgebung der Kontaktzone ausbilden.

Diese Überlegungen haben die Grundlagen für die Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten bei *Hertz*schen Pressungen  $p_{R,d}$  geliefert, die in der Tabelle K1-10-2 zusammengestellt sind. Im Bild K1-10-2 sind die auf die Brinellhärte bezogenen Beanspruchbarkeiten im doppellogarithmischen Maßstab veranschaulicht.

**Tabelle K1-10-2**

Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten bei *Hertz*schen Pressungen

Anzahl der Überrollungen	Beanspruchbarkeit
$N \leq 10^5$	$p_{R,d} = 2,3 \cdot f_{y,k}$ $p_{R,d} = 5,4 \cdot \text{HBS}$
$10^5 < N < 2 \cdot 10^6$	$p_{R,d} = p_D \cdot \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{N}}$
$N \geq 2 \cdot 10^6$	$p_{R,d} = p_D$



**Bild K1-10-2**

Bezogene Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten bei *Hertz*schen Pressungen  
1 nicht rollend  
2 rollend

Für den Fall, daß keine Überrollungen stattfinden (z. B. bei Stemmknaggen), sondern die Berührungsfläche sich allenfalls nur geringfügig infolge elastischer Durchbiegung oder Temperaturdehnung der Bauteile verschiebt, ist eine Erhöhung des Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit im Zeitfestigkeitsbereich um 50% vertretbar, weil hierbei die größte schwelende Schubbeanspruchung in der Wirkungslinie der Kraft maßgebend wird.

Außer der Bezeichnung HBS für die mit einer Stahlkugel ermittelte Brinellhärte kommt nach E DIN EN ISO 6506-1 auch die Bezeichnung HBW vor, wenn bei der Härteprüfung eine Hartmetallkugel anstelle einer Stahlkugel benutzt wird. Die früher übliche Bezeichnung HB wird nicht mehr verwendet.



Weitere genormte Verfahren zur Härteprüfung sind:

E DIN EN ISO 6507-1 Härteprüfung nach Vickers,  
DIN EN ISO 6508-1 Härteprüfung nach Rockwell,  
DIN 50359-1 Universalhärteprüfung.

Die einander entsprechenden Zahlenwerte der Härteprüfung nach Brinell, Vickers und Rockwell lassen sich mit Hilfe von Diagrammen nach ISO 4964 bestimmen. Die Norm DIN 50150, die Umwertungstabellen hierfür enthielt, ist zurückgezogen.

Der Mindestabstand  $c \geq 3b$  ( $b$  = Länge der kleinen Ellipsenhalbachse) der *Hertz*schen Berührungsfläche bezieht sich auf die Außenkante der Bauteile unter Einschluß einer etwaigen Fase.

Es bestehen keine Bedenken, im Fall außergewöhnlicher Einwirkungen nach Tabelle 5 von DIN 19704-1 das Maß  $3b$  (ermittelt für Fall 3 nach Tabelle 5) auf die Hälfte zu reduzieren, wenn das Verhältnis  $\max p_{\text{Fall 3}} / \max p_{\text{Fall 1}} \leq 1,5$  ist.

Die Beanspruchbarkeiten bezüglich *Hertz*scher Pressungen bei anderen Wälzsystemen (als Rad/Schiene) sind im Abschnitt 10.22 nicht geregelt.

Die maximale *Hertz*sche Pressung bei der Berührung zweier Bauteile mit kugelförmigen Oberflächen mit den Radien  $R_1$  bzw.  $R_2$  ergibt sich aus

$$\max p_d = 1,5 F_d / (\pi \cdot a^2)$$

mit dem Radius der in diesem Fall kreisförmig sich einstellenden Berührungsfläche

$$a = [1,5 \cdot F_d \cdot (1 - \nu^2) \cdot R / E]^{1/3}$$

und dem Ersatzradius

$$R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

Bei Berührung einer Hohlkugel auf der Innenseite ist der Radius dieser Oberfläche negativ einzusetzen.

Bei allen Kontaktproblemen von Bauteilen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul  $E_1 \neq E_2$  kann der Ersatz-Elastizitätsmodul

$$E = 2 E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$$

in die Berechnungen eingesetzt werden.

Die *Hertz*schen Formeln gelten nicht für Kontaktpressungen von Paarungen mit sehr kleinen Krümmungsunterschieden, z. B. Kettenbolzen/Kettenritzel, Spurlagerzapfen/-kalotte von Stemmtern.

Die maximalen Pressungen im Fall kugelförmiger Spurlagerzapfen/-kalotte bei gleichen Radien können wie für Stützsäulen nach *Kurth* [28], Seite 61 bis 64, ermittelt werden, ebenso auch die Reibungsmomente.

### K1-10.23 Achsen, Gelenkbolzen

Die Berechnung von Achsen ohne Berücksichtigung einer Einspannung in den Bohrungen bedeutet, daß auch die Lochleibungsdrücke über die tragende Auflagerlänge konstant anzunehmen sind. Wenn jedoch ausnahmsweise zwei aufeinander liegende Platten zwecks Schubüber-

tragung durch einschnittige Scherbolzen ohne hinreichende Klemmwirkung (Vorspannung) verbunden sind, sind aus Gleichgewichtsgründen die Lochleibungsdrücke über die Plattendicken veränderlich, was daher rechnerisch berücksichtigt werden muß.

### K1-10.26 Verbindungsmittel

Nach der „Anpassungsrichtlinie Stahlbau“ muß das Verhältnis  $\xi$  von Einschraubtiefe zum Außendurchmesser (Gewindenenddurchmesser) bei Sacklochverbindungen mindestens folgenden Wert erreichen:

$$\xi = (600 / f_{u,k}) \cdot (0,3 + 0,4 \cdot (f_{u,b,k} / 500))$$

Dabei ist:

- $f_{u,k}$  charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Teils mit Innengewinde
- $f_{u,b,k}$  charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Teils (Bolzen) mit Außengewinde

Bei einer genaueren Berechnung der erforderlichen Einschraubtiefe ist auch die Berücksichtigung des Gewindespiels erforderlich, siehe z. B. *Pittner/Dose* [29]. Darüber hinaus ist zu beachten, daß eine mögliche Erhöhung der Streckgrenze („Überfestigkeit“) eines der beiden Verbindungsteile sich ungünstig auswirken kann. Es ist daher als Bemessungswert der Streckgrenze  $f_{y,k} / \gamma_M$  in dem einen Teil und gleichzeitig ein oberer Grenzwert – empfohlen wird  $1,3 \cdot f_{y,k} / \gamma_M$  – in dem anderen Teil der Schraubverbindung anzunehmen.

### K1-A.1.1 Schleusenverschlüsse

Ein Lastspiel eines Verschlößkörpers ist stets ein Bewegungsvorgang von einer Ausgangslage in eine Endlage und wieder zurück in die Ausgangslage. Bei Schleusenverschlüssen ist es für die Zählung der Lastspiele gleichgültig, ob eine „Schleusung“ mit oder ohne Schiff stattfindet.