Stahlbau
Leichtmetallbau

Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

Univ. Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D – 52074 Aachen

Tel.: +49-(0)241-8025177
Fax: +49-(0)241-8022140

Stahlsortenwahl für Brückenlager

Bruchmechanische Untersuchungen für die

VHFL - Vereinigung der Hersteller von
Fahrbahnübergängen und Lagern für Bauwerke

Nr. 2009 – 05 – 0090

Aachen, 06. Mai 2011

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Sedlacek

Dipl.-Ing. Björn Eichler

106 Seiten einschließlich Deckblatt

RWTH AACHEN
RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

Stahlbau
Leichtmetallbau

Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

Univ. Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D – 52074 Aachen

Tel.: +49-(0)241-8025177
Fax: +49-(0)241-8022140

Stahlsortenwahl für Brückenlager

Bruchmechanische Untersuchungen für die

VHFL - Vereinigung der Hersteller von
Fahrbahnübergängen und Lagern für Bauwerke

Nr. 2009 – 05 – 0090

Aachen, 06. Mai 2011

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Sedlacek

Dipl.-Ing. Björn Eichler

106 Seiten einschließlich Deckblatt

RWTH AACHEN
RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

Inhalt:

1 Veranlassung und Zielsetzung 4

2 Bruchmechanischer Sicherheitsnachweis in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 zur Vermeidung von Sprödbruch 6

2.1 Allgemeines 6

2.2 Bruchmechanische Grundgleichungen 6

2.3 Bemessungssituation 7

2.4 Angenommene Detailgeometrie und Rissgröße 9

2.5 Tabelle 2.1 von DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 12

3 Brückenlager, Typen und Regelungen und untersuchte Standardausbildungen 14

3.1 Lagertypen und Regelungen 14

3.2 Untersuchte Standardausbildungen 17

4 Modifikationen des bruchmechanischen Sicherheitsnachweises 19

4.1 Allgemeines 19

4.2 Bauteiltypische Festlegungen für Strukturparameter 19

4.2.1 Bruchmechanisches Modell 19

4.2.2 Form und Größe des Fehlers 19

4.2.3 Ansatz von Eigenspannungen 19

4.2.4 Kritische Risslänge b_{eff} 20

4.2.5 Berechnung der Spannung σ_{gy} 21

4.2.6 Inhomogenität der Zähigkeit über die Zeugnisdicke 21

4.2.7 Dehnrateneinfluss, Kaltverformung 22

4.3 Bestimmung der Nennwerte der Beanspruchung σ_{Ed} aus Geometrie und Belastung des Bauteils 22

4.3.1 Allgemeines 22

4.3.2 Ermittlung der Bezugsspannung σ_{Ed} nach Dong 26

4.3.3 Beispiele für die Ermittlung der Strukturspannungen nach Dong 28

5 Numerische Untersuchungen und Ergebnisse 32

5.1 Allgemeines 32

5.2 Bauteil Nr. 1 – Rotationssymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung) 34

5.2.1 Geometrie, Belastungsvarianten und Randbedingungen 34

5.2.2 Hot-Spot-Spannungen 36

5.2.3 Spannungsintensitätsfaktoren 37

5.2.4 Sprödbruchnachweise 39

5.3 Bauteil Nr. 2A – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung) 42

5.3.1 Geometrie, Belastungsvarianten und Randbedingungen 42

5.3.2 Hot-Spot-Spannungen 42

5.3.3 Spannungsintensitätsfaktoren 43

5.3.4 Sprödbruchnachweise 46

5.4 Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil des Referenzlagers B (geschweißte Variante) 49

5.4.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen 49

5.4.2 Hot-Spot-Spannungen 53

5.4.3 Spannungsintensitätsfaktoren 56

5.4.4 Sprödbruchnachweise 62

5.5 Bauteil Nr. 3 – Achsensymmetrisches Lagerunterteil 71

5.5.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen 71
5.5.2 Hot-Spot-Spannungen 73
5.5.3 Spannungsintensitätsfaktoren 74
5.5.4 Sprödbruchnachweis 76
5.6 Bauteil Nr. 4 – Achsensymmetrische Ankerplatte 80
5.6.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen 80
5.6.2 Hot-Spot-Spannungen 81
5.6.3 Spannungsintensitätsfaktoren 82
5.6.4 Sprödbruchnachweis 83
5.7 Bauteil Nr. 5 – Horizontallager ohne Verdrehmöglichkeit 85
5.7.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen 85
5.7.2 Hot-Spot-Spannungen 87
5.7.3 Spannungsintensitätsfaktoren 88
5.7.4 Sprödbruchnachweis 90
6 Vorschlag für die Normenregelung bei Verwendung von Finite-Element-Berechnungen 95
7 Anwendungsbeispiel für die Anwendung von Finiten-Elementen 99
7.1 Allgemeines 99
7.2 Genauere Berechnung der Hot-Spot-Spannungen 100
7.3 Nachweis 102
8 Vereinfachter Nachweis mit Bezug auf Tragfähigkeitsnachweise 103
8.1 Allgemeines 103
8.2 Korrelationen 103
8.3 Konsequenzen für die Stahlgütewahl 104
9 Referenzen 106

1 Veranlassung und Zielsetzung

(1) Die Bemessungsregeln für Stahlkonstruktionen gelten in der Regel für den Hochlagenbereich der Stahlzähigkeits-Temperaturkurve, in dem der Stahl duktiles Verhalten zeigt. Die Abminderung der Zähigkeitseigenschaften im Temperatur-Übergangsbereich der Stahlzähigkeits-Temperaturkurve wird durch eine bestimmte Stahlsortenwahl erfasst, der ein bruchmechanischer Sicherheitsnachweis für ein bestimmtes Schadens- und Belastungsszenario bei tiefstmöglicher Temperatur zugrunde liegt.

(2) Für die Stahlsortenwahl von Stahlbauten liefern DIN EN 1993-1-10 [2] und DASt-Richtlinie 009 [1] Tabellen, in die für die übliche Ausbildung der Stahlbauteile folgende Parameter eingehen:

- die niedrigste Einsatztemperatur T_{Ed},
- die Bauteilausbildung am kritischen Detail, die sich an den Ermüdungsdetailklassen in DIN EN 1993-1-9 – Ermüdungsnachweise für Stahlbauten - orientiert.

  Die in DIN EN 1993-1-9 angegebenen Details sind Ausschnitte aus den Konstruktionen. Sie enthalten auch die „Hot-Spots“, an denen Ermüdungsrisse erwartet werden können und eine Definition der „Nennspannung“, angewendet auf den Konstruktionsausschnitt, auf die sich die Ermüdungsfestigkeit bezieht.

  Für die Stahlsortenwahl wird der gleiche „Hot-Spot“ und die gleiche Definition der Nennspannung σ_{Ed}, allerdings nicht für die Ermüdungslasten, sondern für die sogenannten „häufigen Lasten“, benutzt. Für die Tabellen werden diese als Teil des Nennwertes der Streckgrenze (0,25 f_y, 0,5 f_y, 0,75 f_y) klassifiziert.
- Die Erzeugnisdicke (Blechdicke) am „Hot-Spot“.

(3) Brückenlager bestehen aus maschinell hergestellten gedrungenen Bauelementen, deren geometrische Ausbildung nicht unbedingt den Annahmen für die Berechnung von Stahlbauteilen entspricht, die eine besondere Belastung abhängig von der Auflagerfläche haben und die einer besonderen Qualitätskontrolle bei der Herstellung unterliegen.

(4) Daher treffen die Voraussetzungen für DIN EN 1993-1-9 und DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 im Allgemeinen nicht zu, und DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 sind nicht ohne Weiteres auf die Stahlsortenwahl für die Herstellung von Brückenlagern anwendbar.

(5) Der vorliegende Bericht geht deshalb auf die Stahlsortenwahl von Brückenlagern ein und liefert für lagerspezifische Details abhängig von der tiefsten Einsatztemperatur T_{Ed}, dem Detailtyp und dem Beanspruchungsniveau σ_{Ed} und der maßgebenden Erzeugnisdicke am „Hot-Spot“ die Angaben zur „sicheren“ Stahlsorte.

(6) Für die Herleitung der Tabellen wird das gleiche bruchmechanische Verfahren angewendet wie in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009, jedoch sind an folgenden Punkten Modifikationen des Verfahrens erforderlich:

1. Größe und Form eines rissähnlichen Bemessungsfehlers, da anders als bei DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 Ermüdungseffekte vernachlässigbar sind.
2. Definition der Nennspannung σ_{Ed} für die „Hot-Spots“, die anders als in DIN EN 1993-1-9 häufig nicht mehr konventionell als Kraft pro Fläche ermittelt werden kann.

   Dabei werden zwei Vorgehensweisen gewählt:

   i. Vorgehensweise beim Nachweis mit Finiten Elementen.

   ii. Vereinfachte Vorgehensweise beim Nachweis mit „Spannungsnachweisen nach der Biegetheorie“.

(7) Der vorliegende Bericht ist in folgende Abschnitte gegliedert:

1. Bruchmechanischer Sicherheitsnachweis in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 zur Vermeidung von Sprödbruch.
2. Brückenlager, Typen und Regelungen und untersuchte Standardausbildungen.
3. Modifikationen des bruchmechanische Sicherheitsnachweises in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 für Brückenlager.
4. Numerische Untersuchungen und Ergebnisse.
5. Vorschlag für eine Normenregelung bei Anwendung Finiter Elemente.
6. Vorschlag bei Bezug auf den Spannungsnachweis nach der Biegetheorie.

2 Bruchmechanischer Sicherheitsnachweis in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 zur Vermeidung von Sprödbruch

2.1 Allgemeines

(1) Die Verfahren zur Bestimmung der Stahlsortenwahl in DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 sind im Hintergrundbericht [3] zu diesen Normen dargestellt.

(2) Im Folgenden wird eine Kurzfassung zum Verständnis der abweichenden Vorgehensweise bei Brückenlagern gegeben.

2.2 Bruchmechanische Grundgleichungen

(1) In der Bemessungsgleichung mit bruchmechanischen Kennwerten (hier: Spannungsintensitätsfaktoren K)

$$K^*_{appl,d} \leq K_{Mat,d}$$

beschreibt $K^*_{appl,d}$ den Bemessungswert der Beanspruchung an der Spitze eines unterstellten Risses, der sich an der Stelle der höchsten Spannungskonzentration des Bauteile befindet. Lokale plastische Anteile werden in $K^*_{appl,d}$ durch den Korrekturbeiwert k_{R6} nach dem vereinfachten Failure Assessment Diagramm berücksichtigt. Die Einwirkungsseite lautet:

$$K^*_{appl,d} = K_{appl} / (k_{R6} - \rho)$$

mit

K_{appl} Spannungsintensitätsfaktor, der aus einer linear-elastischen bruchmechanischen Berechnung ermittelt wurde.

k_{R6} Faktor zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen sprödem Materialversagen und Fließen, s. [2]

ρ Korrekturfunktion zur Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Spannungen aus äußeren Lasten und lokalen Schweißeigenspannungen, die bei höherer Plastizierung partiell abgebaut werden.

(2) Die Widerstandsseite wird durch die Bruchzähigkeit $K_{Mat,d}$ ausgedrückt. Die Bruchzähigkeit kann experimentell ermittelt werden. Daneben existieren für die üblichen Baustähle Korrelationen, die eine Abschätzung der Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von den Normenwerten oder den in Werkszeugnissen festgestellten Werten der Kerbschlagzähigkeit ermöglichen. Die Anforderungen an die im Kerbschlagbiegeversuch zu erreichenden Kerbschlagarbeiten abhängig von der Prüftemperatur sind in den Liefernormen standardisiert.

(3) Um das bruchmechanische Verfahren zu standardisieren und an die Liefernormen anzupassen, ist die Nachweisgleichung in eine Temperaturgleichung transformiert worden:

$$T_{Ed} \geq T_{Rd}$$

(4) Die Einwirkung T_{Ed} enthält die Effekte der Umgebungstemperatur, der Beanspruchung und Beanspruchungsgeschwindigkeit, der Bauteilgeometrie, und der anzunehmenden Rissschäden:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_{\dot{\varepsilon}} + \Delta T_{\varepsilon cf}$$

mit

T_{md} tiefste Umgebungstemperatur

ΔT_r Strahlungsverlust des Bauteils: $\Delta T_r \sim -5$

ΔT_R Sicherheitselement in Form einer Temperaturverschiebung

ΔT_σ Temperaturverschiebung durch den Einfluss von $K^*_{appl,d}$, d.h. durch den Einfluss der im Bauteil vorliegenden Spannung, der Detailgeometrie und der Risskonfiguration:

$$\Delta T_\sigma = -52 \cdot \ln\left[\frac{(K^*_{appl,d} - 20) \cdot \left(\frac{b_{eff}}{25}\right)^{1/4} - 10}{70}\right] \leq 120\,°C$$

$\Delta T_{\dot\varepsilon}$ Temperaturverschiebung durch den Einfluss erhöhter Dehnraten:

$$\Delta T_{\dot\varepsilon} = -\frac{1440 - f_y(t)}{550}\left(\ln\frac{\dot\varepsilon}{\dot\varepsilon_0}\right)^{1,5}$$

mit

$f_y(t)$ Streckgrenze in Abhängigkeit der Blechdicke t

$\dot\varepsilon$ Dehnrate aus den Einwirkungen

$\dot\varepsilon_0$ = $0.0001\ s^{-1}$, Bezugsdehnrate als Abgrenzung zwischen statischen und dynamischen Einwirkungen

$\Delta T_{\varepsilon cf}$ Temperaturverschiebung durch den Einfluss der Kaltumformung:

$\Delta T_{\varepsilon cf} = 0$ für $\varepsilon_{cf} \leq 2\%$

$\Delta T_{\varepsilon cf} = -3 \times \varepsilon_{cf}$ für $\varepsilon_{cf} > 2\%$

mit

ε_{cf} Grad der Kaltumformung (plastische Verformung) in %

(5) Die Widerstandsseite beinhaltet die Materialzähigkeit, ausgedrückt durch die Kerbschlagzähigkeit:

$$T_{Rd} = (T_{27J} - 18) + \Delta T_{27J}$$

mit

T_{27J} Temperatur im Kerbschlagbiegeversuch, bei der die Kerbschlagarbeit 27J erreicht wird

ΔT_{27J} Einfluss der Inhomogenität der Materialzähigkeit über die Erzeugnisdicke, dann anzusetzen, wenn der angenommene Riss in den Kernbereich des Erzeugnisses hineinragt. Als Kernbereich ist das mittlere Drittel des Bleches, bezogen auf die Blechdicke, definiert.

2.3 Bemessungssituation

(1) Bei der Entwicklung der DASt-Richtlinie 009 bzw. im Eurocode 3, Teil 1-10 zur Stahlsortenwahl zur Vermeidung von Sprödbruch wurde eine außergewöhnliche Bemessungssituation (Fall A_1-A_2-A_3) mit folgenden Randbedingungen zugrunde gelegt, vgl. Bild 2-1.

- Alle Anforderungen basieren auf einem Nachweis im unteren Bereich der Zähigkeitsübergangskurve (K_{IC}-Bereich)
- An dem betreffenden Bauteil befindet sich ein Riss an einer kritischen Stelle, und dieser Riss hat eine kritische Größe erreicht. (Der Riss wird hypothetisch unterstellt als nicht detektierter Herstellungsfehler, der weiter durch eine unterstellte Ermüdungsbelastung gewachsen ist).

- Die Temperatur des Bauteils hat einen Minimalwert T_{min} erreicht, an dem auch die Größe der Materialzähigkeit ihren kleinsten möglichen Wert J_C (Punkt A1 in Bild 2-1) erreicht hat. Dabei kann die Temperatur zähigkeitsreduzierende Einflüsse durch fiktive Temperaturverschiebungen beinhalten wie zum Beispiel den Einfluss der Kaltverformung oder von Anpralllasten.
- Veränderliche Lasten Q und die Temperatur des Bauteils sind unabhängig voneinander (z. B. klimabedingte Temperaturen). Daraus resultiert eine außergewöhnliche Lastkombination, in der $T_{min,d}$ die Haupteinwirkungsgröße darstellt, die mit den Spannungen aus den Begleiteinwirkungen $G_K + \psi_1 Q_K$ verknüpft ist (Punkt A2 in Bild 2-1).
- Aufgrund der außergewöhnlichen Lastkombination sind die auftretenden Spannungen $\sigma_{Ed} = \sigma (G_K + \psi_1 Q_K)$ elastisch, (Punkt A3 in Bild 3).

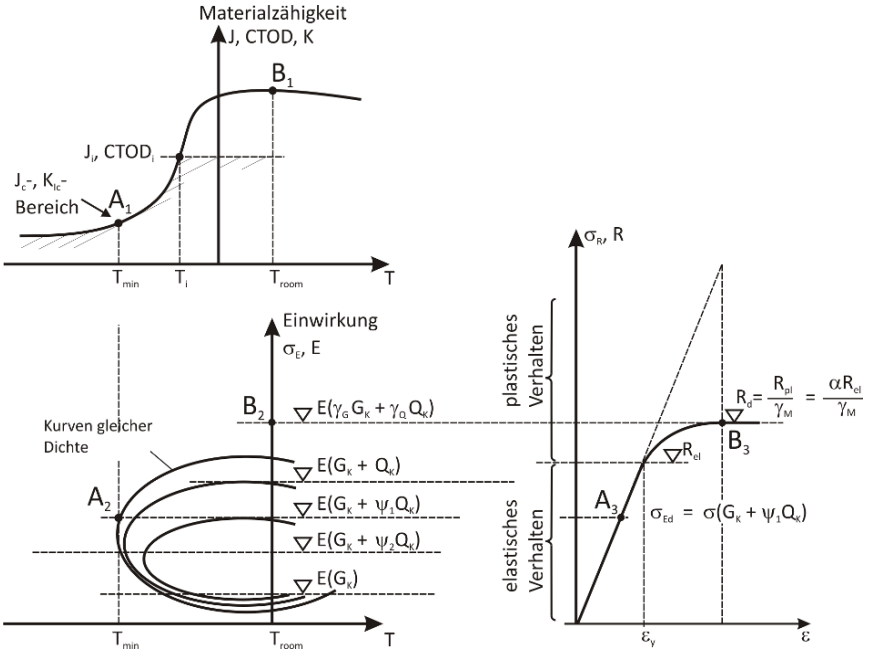


Bild 2-1: Bemessungssituation für die Stahlsortenwahl in DIN EN 1993-1-10

(2) Für den Sicherheitsnachweis zur Vermeidung von Sprödbruch wird aufgrund des Zusammenwirkens mehrerer ungünstiger Einflüsse (tiefe Temperaturen gleichzeitig mit der Annahme eines bei der Fertigungsprüfung übersehenen Risses an der ungünstigsten Stelle des Bauteils) auf das Sprödbruchverhalten von einer außergewöhnlichen Bemessungssituation ausgegangen, die mit der folgenden Lastkombination beschrieben wird:

$$E_d = E \{A [T_{Ed}] \text{“+”} \Sigma G_k \text{“+”} \psi_{1,1} Q_{k1} \text{”+”} \Sigma \psi_{2,i} Q_{ki} \}$$

(3) Als außergewöhnliche Einwirkung A $[T_{Ed}]$ wird der Extremwert der tiefsten Umgebungstemperatur mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren angenommen. Nach DASt-Richtlinie 009, Tabelle 1, ist diese z.B. für ein außen liegendes Stahltragwerk T_{mdr} = -30°C. Hierin sind Strahlungsverluste bereits enthalten.

(4) Die Begleiteinwirkungen sind die Spannungen aus den ständigen und veränderlichen Einwirkungen. Aus Gründen der Wahrscheinlichkeit wird angenommen, dass sie selbst während der relativ kurzen Dauer der extremen Temperatureinwirkung keine Extremwerte annehmen, sondern mit „häufigen Werten“ angesetzt werden.

(5) Aus den begleitenden Einwirkungen werden Nennspannungen im maßgebenden Querschnitt ermittelt, nach folgender Lastkombination:

$$\sigma_P = \sigma \{\Sigma G_k \text{ “+” } \psi_{1,1} Q_{k1} \text{ ”+” } \Sigma \psi_{2,i} Q_{ki} \}$$

mit

$\psi_{1,1}$ Kombinationsbeiwert für „häufige“ Lasten mit einer Wiederkehrperiode von ~ 1 Monat

$\psi_{2,i}$ Kombinationsbeiwert für „quasi-ständige“ Lasten

(6) Zusätzlich zu diesen „primären“ Nennspannungen σ_P sind in die vereinfachte Tabelle für die Wahl zulässiger Erzeugnisdicken in [1] und [2] „Sekundär“spannungen σ_S aus Eigenspannungen und nicht berechneten Zwängungen aus Einbau eingerechnet worden, so dass resultiert:

$$\sigma_{Ed} = \sigma_P + \sigma_S$$

mit

σ_P s. oben

σ_S Sekundärspannungen definiert als globale Eigenspannungen. In der standardisierten Tabelle ist ein pauschaler Wert σ_S = 100N/mm² enthalten. Lokale Eigenspannungen, die sich in der Umgebung der Schweißnähte kurzschließen, brauchen nicht besonders spezifiziert werden, da sie im Nachweisverfahren infolge der Auswertung mit Versuchen mit geschweißten Proben bereits enthalten sind.

(7) Die Tabellenwerte beziehen sich alleine auf die Angabe von $\sigma_{Ed} = \sigma_P$, d.h. bei Anwendung der Tabelle braucht σ_S nicht mehr gesondert in σ_{Ed} eingerechnet zu werden.

(8) Ist σ_{Ed} eine Druckspannung, so wird vereinbarungsgemäß mit der geringsten Zugspannungsklasse $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y$ gerechnet.

2.4 Angenommene Detailgeometrie und Rissgröße

(1) Da die derzeitigen Regelungen ursprünglich für den Stahlbrückenbau entwickelt wurden, wurden für die Erstellung der vereinfachten Tabelle brückenbautypische Annahmen hinsichtlich der Detailgeometrie und der Lage und Größe des unterstellten Risses getroffen.

(2) Der für die Erstellung von Zahlenwerten zugrunde gelegte Standardfall für die Geometrie ist ein zugbeanspruchtes Blech mit aufgeschweißter nicht tragender Längssteife, Bild 2-2. Dieser Fall repräsentiert einen häufigen Anschluss im Brückenbau. Durch seine geometrische Kerbwirkung besitzt es gegenüber anderen typischen Brückenbaudetails eine erhöhte Sprödbruchgefährdung. Dieses Detail ist im Kerbfallkatalog der Eurocode 3, Teil 1-9 [5] enthalten. Für die standardisierte Einwirkung $K^*_{appl,d}$ werden bestimmte Abmessungsverhältnisse (Abmessungen der Steife zu Blechdicke und –breite, Kehlnahtwinkel und a-Maß) angenommen, in der die übliche Detailausbildung wiederzufinden ist.

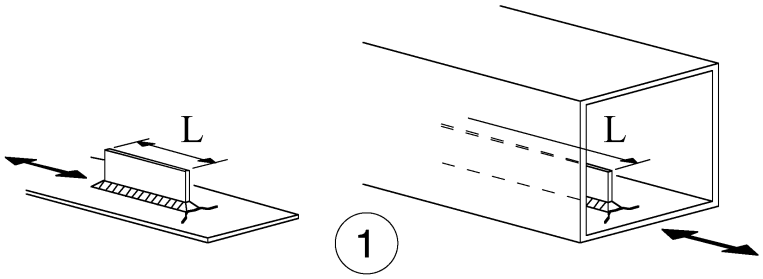


Bild 2-2: Zugrunde gelegtes Standarddetail für die Stahlsortenauswahl in DIN EN 1993-1-10

(3) Die anderen in [5] tabellierten Kerbfälle sind durch diese Detailgeometrie und die verwendete auf der sicheren Seite liegende Berechnung hinsichtlich der Stahlsortenauswahl sicher abgedeckt. Im Falle einer Konstruktion, die keinem der Kerbfälle in [5] zugeordnet werden kann, ist die vereinfachte Tabelle für zulässige Erzeugnisdicken nicht anwendbar.

(4) Als Rissannahme wird ein halbelliptischer Oberflächenriss im Bauteil unterstellt, und zwar an der Position der höchsten Spannungskonzentration am Ende der Längssteife. Bild 2-3 zeigt den Querschnitt eines Rechteckblechs mit elliptischem Riss. Das Verhältnis der Ellipsenhalbachsen Risstiefe a / Rissbreite c (a/c) ist für das zugrunde gelegte Standarddetail (Längssteife) mit a/c = 0,4 festgelegt.

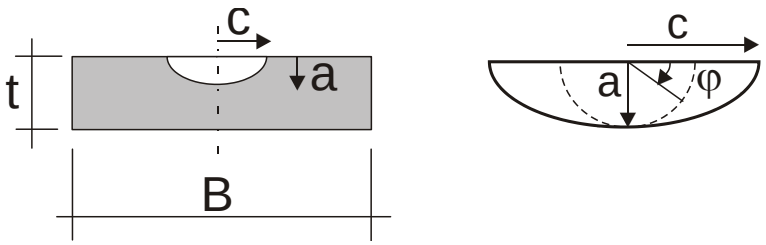


Bild 2-3: Annahme eines halbelliptischen Oberflächenrisses im Blech mit Rechteckquerschnitt

(5) Die Rissgröße wird bestimmt, indem ein fertigungsbedingter Anfangsdefekt unterstellt wird, der bei einer Schweißnahtprüfung mit den im Stahlbau üblichen Prüfmethoden übersehen worden ist. Bild 2-4 zeigt die Größe der Risstiefe a_0 und der Rissbreite $2c_0$ abhängig von der Erzeugnisdicke t.

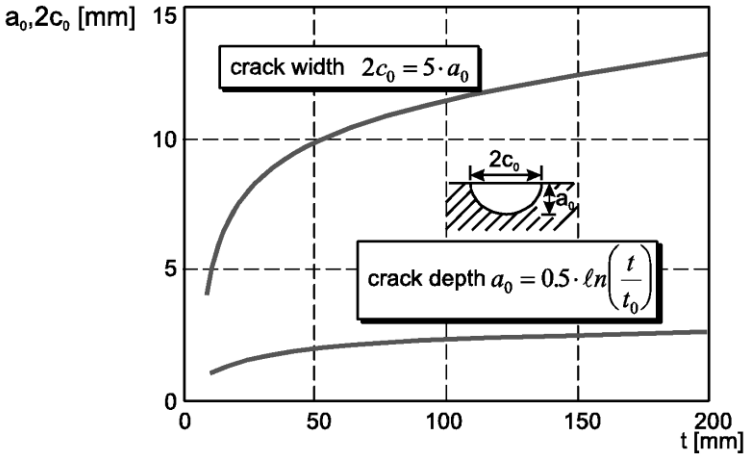


Bild 2-4: Größe des fertigungsbedingten Anfangsdefektes in EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009

(6) Der Bemessungswert der Risstiefe a_d und Rissbreite $2c_d$ wird unter Berücksichtigung des Risszuwachses durch die maximal mögliche Ermüdungsbeanspruchung ermittelt.

(7) Dazu wird die maximal mögliche Ermüdungsbeanspruchung aus der Detailklasse und der entsprechenden Lastspielzahl zugrunde gelegt. Entsprechend dem Ermüdungsnachweis im Eurocode 3 [5] betragen die maximal möglichen Ermüdungsbeanspruchungen $\Delta\sigma_C^3$ x 2 10^6 Lastspiele.

(8) Da bei ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen, wie Brücken, jedoch während ihrer Nutzungsdauer Inspektionen gefordert werden, wird für das Risswachstum $\Delta a = a_d - a_0$ und $\Delta c = c_d - c_0$ wegen der üblichen Inspektionsintervalle nur eine Ermüdungslast angenommen,

die ¼ der maximalen Ermüdungsbeanspruchung entspricht. Der Risszuwachs wurde damit für die Ermüdungslast $\Delta\sigma_C{}^3$ x 500.000 Lastspiele berechnet.

(9) Mittels Rissfortschrittsgesetz wurde der Risszuwachs ausgehend vom Anfangsriss am Schweißnahtübergang vor der aufgeschweißten Längssteife für die Detailgeometrie in Bild 2-2 berechnet. In Abhängigkeit von der Blechdicke des geschweißten Bleches wurde eine Kurve für die resultierende Rissgröße $a_d(t)$ (Index "d" für *Design*) aufgestellt, siehe Bild 2-5.

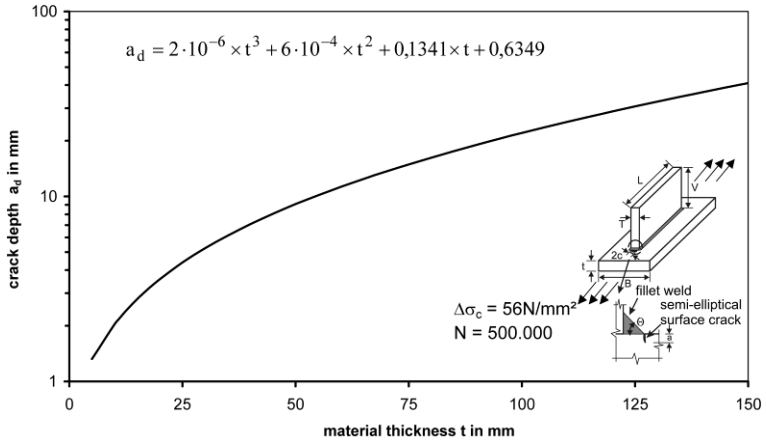


Bild 2-5: Bemessungswerte der Risstiefe $a_d = a_0 + \Delta a$

(10) Der Spannungsintensitätsfaktor K für diese Rissgröße a_d ist der Bemessungswert $K_{appl,d}$, siehe Bild 2-6.

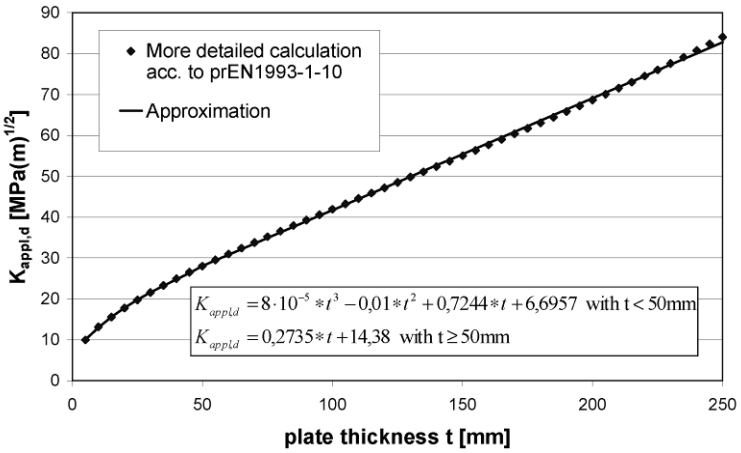


Bild 2-6: Spannungsintensitätsfaktor $K_{appl,d}$ berechnet für die Rissgröße a_d in Bild 2-5

(11) Die Annahme der Größe des Anfangsrisses nach Bild 2-4 als „bei der Fertigungskontrolle übersehener Defekt" wird dadurch gerechtfertigt, dass diese Anfangsrissgrößen mit üblichen Rissprüfungsverfahren erkennbar wären. Bild 2-7 liefert die Verläufe $2c_0$ des Anfangfehlers und $2c_d$ des Bemessungsfehlers in Verbindung mit der Erkennbarkeit nach Sichtprüfung, Farbeindringverfahren, Ultraschalltest und Magnetpulververfahren.

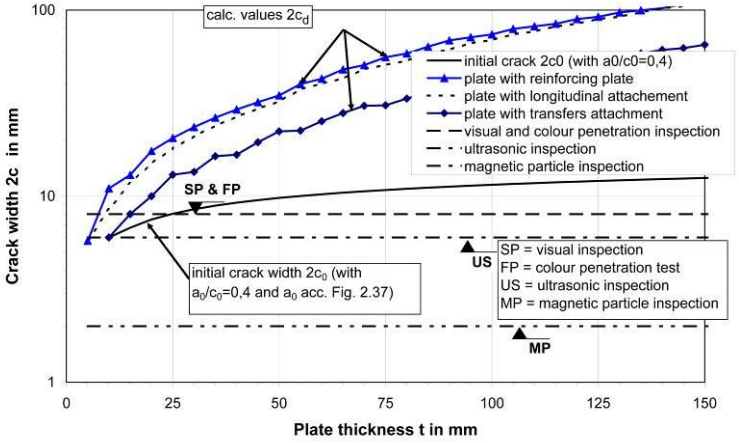


Bild 2-7: Angenommene Rissgröße und Risserkennung durch Prüfverfahren

(12) Demnach wären die angenommenen Anfangsfehler bei Produktkontrollen erkennbar und können als „übersehen“ angenommen werden.

2.5 Tabelle 2.1 von DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009

(1) Als Ergebnis der bruchmechanischen Berechnungen für DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 wurde die Tabelle 2.1 ermittelt, die für alle Konstruktionsdetails nach DIN EN 1993-1-9 verwendbar ist, siehe Bild 2-8.

Reference temperature T_{Ed} [°C] — $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y(t)$

Steel grade	Sub-grade	Charpy energy CVN at T [°C]	J_{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120
S235	JR	+20	27	58	49	41	34	29	25	21	18	15	13	12	11	9	9
	J0	0	27	82	69	58	49	41	34	29	25	21	18	15	13	12	11
	J2	-20	27	115	97	82	69	58	49	41	34	29	25	21	18	15	14
S275	JR	+20	27	63	53	44	37	32	27	23	20	17	15	13	12	11	10
	J0	0	27	88	74	63	53	44	37	32	27	23	20	17	15	13	13
	J2	-20	27	122	104	88	74	63	53	44	37	32	27	23	20	17	16
	M, N	-20	40	141	121	103	87	74	62	52	44	37	31	27	23	20	18
	ML, NL	-50	27	189	165	142	122	104	88	74	63	53	44	37	32	27	25
S355	JR	+20	27	41	34	28	23	19	16	13	11	9	8	7	6	5	5
	J0	0	27	60	50	41	34	28	23	19	16	13	11	9	8	7	6
	J2	-20	27	87	72	60	50	41	34	28	23	19	16	13	11	9	9
	K2, M, N	-20	40	102	86	72	60	49	41	34	28	23	19	16	13	11	10
	ML, NL	-50	27	143	122	103	87	72	60	50	41	34	28	23	19	16	15
S420	M, N	-20	40	90	75	62	51	42	35	28	23	19	16	13	11	9	8
	ML, NL	-50	27	128	108	91	76	63	52	43	35	29	24	19	16	13	12
S460	Q	-20	30	74	61	50	41	34	27	22	18	15	12	10	8	7	6
	M, N	-20	40	84	70	57	47	39	32	26	21	17	14	11	9	8	7
	QL	-40	30	105	88	74	61	50	41	34	27	22	18	15	12	10	9
	ML, NL	-50	27	120	101	85	70	58	48	39	32	26	21	17	14	12	10
	QL1	-60	30	147	125	105	88	74	61	50	41	34	27	22	18	15	13
S690	Q	0	40	38	31	25	20	16	12	10	8	6	5	3	1	-	-
	Q	-20	30	50	41	33	26	21	17	13	11	8	6	5	4	2	1
	QL	-20	40	58	47	38	31	25	20	16	12	10	8	6	5	3	2
	QL	-40	30	75	62	50	41	33	26	21	17	13	11	8	6	5	4
	QL1	-40	40	86	71	58	47	38	31	25	20	16	12	10	8	6	5
	QL1	-60	30	109	91	75	62	50	41	33	26	21	17	13	11	8	7

Reference temperature T_{Ed} [°C] — $\sigma_{Ed} = 0{,}50 \cdot f_y(t)$

Steel grade	Sub-grade	Charpy energy CVN at T [°C]	J_{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120
S235	JR	+20	27	84	72	61	53	45	39	34	30	26	23	21	19	17	16
	J0	0	27	113	97	84	72	61	53	45	39	34	30	26	23	21	20
	J2	-20	27	150	131	113	97	84	72	61	53	45	39	34	30	26	25
S275	JR	+20	27	76	65	55	47	40	35	30	26	23	20	18	16	15	14
	J0	0	27	105	90	76	65	55	47	40	35	30	26	23	20	18	17
	J2	-20	27	141	122	105	90	76	65	55	47	40	35	30	26	23	22
	M, N	-20	40	161	140	121	104	89	76	65	55	47	40	34	30	26	24
	ML, NL	-50	27	199	185	162	141	122	105	90	76	65	55	47	40	35	32
S355	JR	+20	27	65	54	46	39	33	28	24	21	18	16	14	12	11	11
	J0	0	27	90	76	65	54	46	39	33	28	24	21	18	16	14	13
	J2	-20	27	124	106	90	76	65	54	46	39	33	28	24	21	18	17
	K2, M, N	-20	40	143	123	105	89	76	64	54	46	38	33	28	24	21	19
	ML, NL	-50	27	190	166	144	124	106	90	76	65	54	46	39	33	28	26
S420	M, N	-20	40	130	111	94	80	67	56	47	39	33	28	24	20	17	16
	ML, NL	-50	27	176	152	131	112	95	80	68	57	48	40	34	28	24	22
S460	Q	-20	30	110	93	78	66	55	46	38	32	27	23	19	16	14	13
	M, N	-20	40	123	105	88	74	62	52	44	36	30	26	22	18	16	14
	QL	-40	30	150	129	110	93	78	66	55	46	38	32	27	23	19	18
	ML, NL	-50	27	168	145	124	106	89	75	63	53	44	37	31	26	22	20
	QL1	-60	30	198	173	150	129	110	93	78	66	55	46	38	32	27	25
S690	Q	0	40	64	53	43	36	29	24	20	16	13	11	9	8	6	6
	Q	-20	30	81	67	56	46	38	31	25	21	17	14	12	10	8	7
	QL	-20	40	92	77	64	53	43	36	29	24	20	16	13	11	9	8
	QL	-40	30	115	97	81	67	56	46	38	31	25	21	17	14	12	11
	QL1	-40	40	129	109	92	77	64	53	43	36	29	24	20	16	13	12
	QL1	-60	30	158	135	115	97	81	67	56	46	38	31	25	21	17	15

Reference temperature T_{Ed} [°C] — $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y(t)$

Steel grade	Sub-grade	Charpy energy CVN at T [°C]	J_{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120
S235	JR	+20	27	126	110	96	84	74	65	57	51	46	41	38	35	32	31
	J0	0	27	164	144	126	110	96	84	74	65	57	51	46	41	38	36
	J2	-20	27	199	185	164	144	126	110	96	84	74	65	57	51	46	43
S275	JR	+20	27	119	104	90	79	69	60	53	47	42	38	35	32	29	28
	J0	0	27	156	137	119	104	90	79	69	60	53	47	42	38	35	33
	J2	-20	27	199	178	156	137	119	104	90	79	69	60	53	47	42	40
	M, N	-20	40	199	199	177	155	136	118	103	90	78	68	60	53	47	44
	ML, NL	-50	27	212	199	199	199	178	156	137	119	104	90	79	69	60	57
S355	JR	+20	27	107	93	80	70	60	53	46	41	36	33	29	27	25	24
	J0	0	27	143	124	107	93	80	70	60	53	46	41	36	33	29	28
	J2	-20	27	186	163	143	124	107	93	80	70	60	53	46	41	36	34
	K2, M, N	-20	40	199	185	162	141	123	106	92	80	69	60	52	46	40	38
	ML, NL	-50	27	199	199	199	186	163	143	124	107	93	80	70	60	53	49
S420	M, N	-20	40	198	174	151	131	114	98	84	73	63	54	47	41	36	34
	ML, NL	-50	27	199	199	199	175	153	133	115	99	85	73	63	55	47	44
S460	Q	-20	30	174	152	131	113	97	84	72	62	53	46	40	35	31	29
	M, N	-20	40	191	167	145	126	108	93	80	69	59	51	44	38	34	32
	QL	-40	30	199	199	174	152	131	113	97	84	72	62	53	46	40	37
	ML, NL	-50	27	199	199	193	169	147	127	109	94	81	69	60	51	44	41
	QL1	-60	30	210	199	199	199	174	152	131	113	97	84	72	62	53	49
S690	Q	0	40	117	99	84	72	61	51	44	37	32	27	24	21	18	17
	Q	-20	30	142	122	104	89	75	64	54	46	39	33	29	25	22	20
	QL	-20	40	158	136	117	99	84	72	61	51	44	37	32	27	24	22
	QL	-40	30	189	165	142	122	104	89	75	64	54	46	39	33	29	27
	QL1	-40	40	199	182	158	136	117	99	84	72	61	51	44	37	32	29
	QL1	-60	30	199	199	189	165	142	122	104	89	75	64	54	46	39	36

Note: *The values in this table are for some parameters slightly different to those given in Table 2.1 of EN 1993-1-10. In a future revision of Table 2.1 of EN 1993-1-10 these values could be adopted.*

Bild 2-8: Tabelle 2.1 in DIN EN 1993-1-10, hier mit Erweiterung zur Erfassung eines größeren Temperaturbereiches T_{Ed} [4]

3 Brückenlager, Typen und Regelungen und untersuchte Standardausbildungen

3.1 Lagertypen und Regelungen

(1) Brückenlager sind Mittel zum Verformungsausgleich und zur definierten Schnittgrößenübertragung im Bauwerk.

(2) Die Funktions- und Wirkungsprinzipien gehen aus Bild 3-1 hervor.

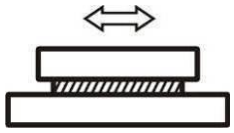
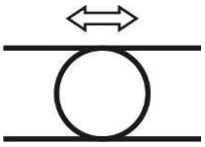
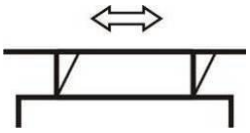
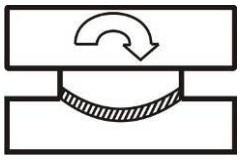
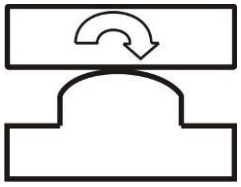
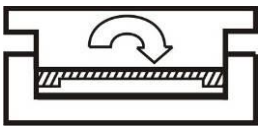
Funktionsprinzip	**Gleiten**	**Wälzen**	**Verformen**
Wirkprinzip			
Verschieben			
Verdrehen			

Bild 3-1: Funktions- und Wirkungsprinzip von Brückenlagern [7]

(3) Die Aufgabe der Lager besteht darin, von den 6 jeweils räumlichen Schnittgrößen, die an den Verbindungsstellen zwischen Überbau und Unterbauten möglich sind, bestimmte ausgewählte Schnittgrößen (Hauptschnittgrößen des Lagers) ohne oder mit begrenzten Relativbewegungen der Bauwerksteile zu übertragen und im Wirkungssinn der übrigen Schnittgrößen Relativbewegungen der Bauwerksteile (Verschiebungen, Verdrehungen) an den Lagerungspunkten zu ermöglichen. Diesen Relativbewegungen wirken Lagerwiderstände (Nebenschnittgrößen) entgegen. Nach Art der Widerstände ist zu unterscheiden zwischen

- Bewegungswiderständen von Bewegungslagern (Rollenlager, Gleitteile, Kalottenlager, Topfgleitlager, Führungslager);
- Verformungswiderständen von Verformungslagern (Elastomerlager, Topflager bei Verdrehung).

(4) Brückenlager werden in Europa nach der DIN-EN 1337 – Lager im Bauwesen – geregelt, deren Struktur aus Bild 3-2 [7] hervorgeht.

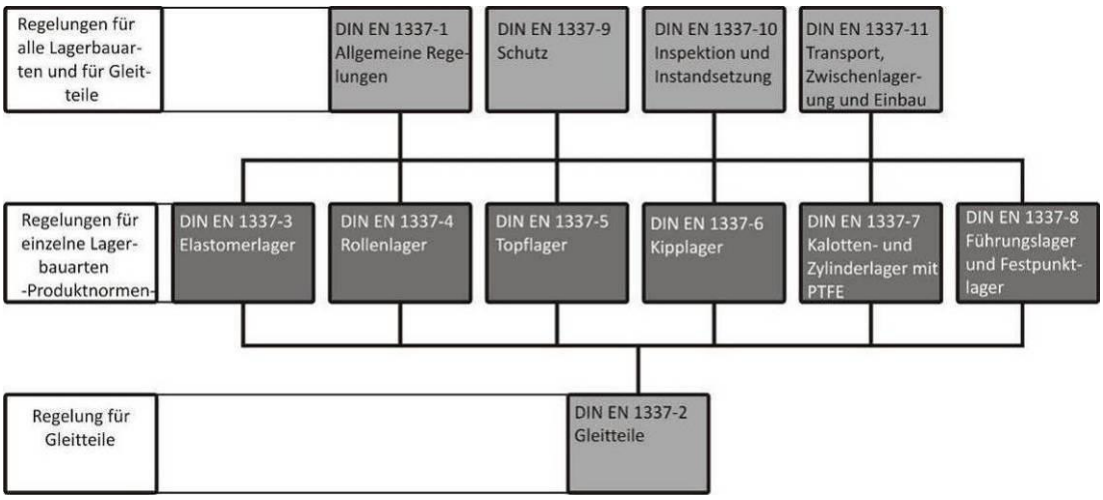


Bild 3-2: Struktur der EN 1337 – Lager im Bauwesen [7]

(5) Tabelle 3-1 zeigt die derzeitige Gültigkeit der Normenteile von DIN-EN 1337 und ihren Bezug zu den Teilen der bisher gültigen DIN-Norm 4114.

(6) Die DIN EN 1337 regelt ausschließlich das Bauprodukt „Lager“. Nicht geregelt sind z.B. der Einbau und zusätzliche Komponenten wie Ankerplatten und weitere ursprünglich vor allem in den Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen und den Lager-Richtzeichnungen enthaltene Forderungen. Da diese Gesichtspunkte die Qualität des Lagers und dessen Lebensdauer und Betriebssicherheit mitbestimmen, sind sie in Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt, z.B. Z-16.7-444 „Ausstattung von RWSH-Brückenlagern mit CE-Kennzeichnung“ oder Z-16.4-436 bzw. ETA-06/0131 „Maurer MSM®-Kalottenlager“ zusammengefasst. Das Lager kann in Verbindung mit den Anschlussbauteilen nach dieser Zulassung direkt in das Brückenbauwerk ohne weitere Ausstattung eingebaut werden.

(7) Die Stahlsortenwahl der Ausstattungsteile, z.B. Verankerungsteile, Verbindungsmittel, Futter-, Keil- und Zwischenplatten, deren Werkstoff nach Bauregelliste A Teil 1 entsprechend dem vorgesehenen Verwendungszweck und seiner Schweißeignung auszuwählen ist, erfolgt nach DIN Fachbericht 103 [9].

(8) Als wirksame Lagertemperatur zur Bestimmung des Anwendungsbereichs nach der Normenreihe DIN EN 1337 [7] ist die minimale bzw. maximale Außenlufttemperatur gemäß DIN Fachbericht 101 [8], Kapitel V, Abschnitt 6.3.1.3, zu verstehen. Sofern keine genauere Ermittlung vorgenommen wird, kann die minimale wirksame Lagertemperatur mit -24 °C und die maximale wirksame Lagertemperatur mit +37 °C angenommen werden.

(9) Ziel des vorliegenden Berichtes ist eine Regelung der Stahlsortenwahl für Lagerteile aus ferritischem Stahl, die die Regelungen im DIN-Fachbericht 103 für Stahlbauteile ergänzt.

Tabelle 3-1: Übersicht über DIN EN 1337 und Bezug zu DIN 4114

Norm	Bezeichnung	Status, Anmerkungen
DIN EN 1337-1, Februar 2001	Allgemeine Regelungen	Gültige Norm, keine Produktnorm Ersetzt teilweise DIN V 4141-1, -2, -3
DIN EN 1337-2, Juli 2004	Gleitteile	Gültige Norm, keine Produktnorm

Tabelle 3-1 (fortgesetzt)

Norm	Bezeichnung	Status, Anmerkungen
DIN EN 1337-3 Juli 2005 Produktnorm	Elastomerlager	Gültige Norm Koexistenzperiode war am 31.12.06 beendet Ersetzt DIN 4141-14-14/A1, -140/A1, teilweise -15, -140, -150
DIN EN 1337-4, April 2004 Produktnorm	Rollenlager	Gültige Norm Koexistenzperiode war am 01.02.06 beendet Ersetzt keine DIN-Norm
DIN EN 1337-5, Juli 2005 Produktnorm	Topflager	Gültige Norm Koexistenzperiode war am 31.12.06 beendet Ersetzt keine DIN-Norm
DIN EN 1337-6, Juni 2004 Produktnorm	Kipplager	Gültige Norm Koexistenzperiode war am 01.02.06 beendet Ersetzt keine DIN-Norm
DIN EN 1337-7, August 2003 Produktnorm	Kalotten- und Zylinderlager mit PTFE	Gültige Norm Koexistenzperiode war am 01.06.05 beendet Ersetzt keine DIN-Norm
DIN 1337-8, Januar 2008 Produktnorm	Führungslager und Festpunkt-lager	Koexistenzperiode hat noch nicht begonnen Ersetzt DIN 4141-13
DIN EN 1337-9, April 1998	Schutz	Gültige Norm, keine Produkt-norm Ersetzt teilweise DIN V 4141-1
DIN EN 1337-10, November 2003	Inspektion und Instandsetzung	Gültige Norm, keine Produkt-norm Ersetzt teilweise DIN V 4141-1
DIN EN 1337-11, April 1998	Transport , Zwischenlagerung und Einbau	Gültige Norm, keine Produkt-norm Ersetzt DIN 4141-4

3.2 Untersuchte Standardausbildungen

(1) Von den Lagertypen in Bild 3-1 werden zwei Referenzlager von Typ A und Typ B ausgewählt, siehe Bild 3-3.

(2) Der Lagertyp B unterscheidet sich von Typ A in der Ausführung der Gleitplatte und der angeschweißten Seitenführungsschiene.

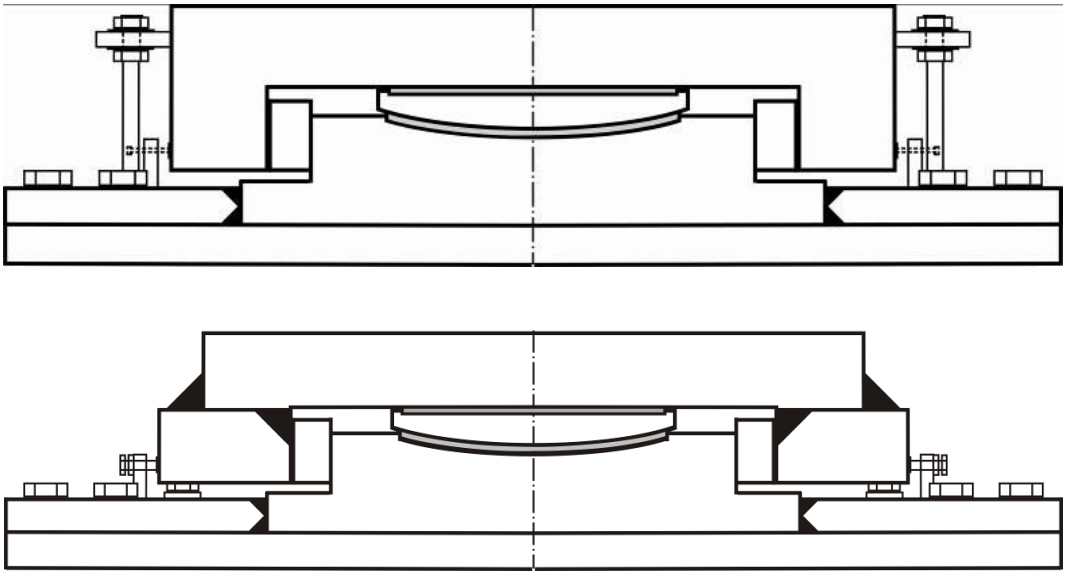


Bild 3-3: Referenzlager von Typ A (oben) und Typ B (unten)

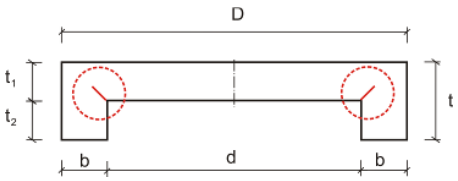
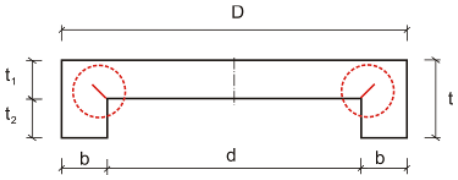
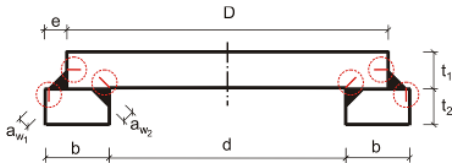
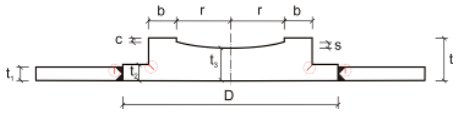
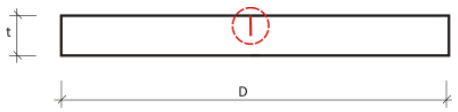
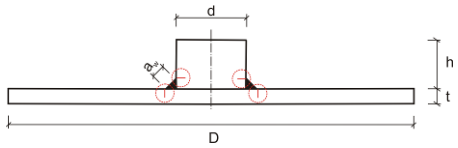
(3) Die Untersuchungen umfassen die Bauteile des Brückenlagers, die der Produktnorm DIN EN 1337 – „Lager im Bauwesen“ [7] entsprechen, als auch die „Ankerplatte“.

(4) Die Bauteile und Details gehen aus Tabelle 3-2 hervor.

(5) Die Referenzlager nach Bild 3-3 und die Standarddetails nach Tabelle 3-2 sind mit der Vereinigung der Hersteller von Fahrbahnübergängen und (Brücken-)Lagern - VHFL abgestimmt worden.

(6) Tabelle 3-2 gibt auch die „Hot-Spots“ an, an denen die bruchmechanischen Untersuchungen durchgeführt werden.

Tabelle 3-2: Standarddetails der zu untersuchenden Lagerkomponenten

Nr.	Bauteil	Geometrie Lagertyp A	Geometrie Lagertyp B	Symmetrie
1	*Lageroberteil* *(Gleitplatte + Seitenführung)* 	t: 55 – 315 mm t_1: 20 – 215 mm t_2: 25 – 100 mm *D: 500 – 1800 mm* *d: 355 - 1385 mm* *b: 50 - 505 mm*		Rotations-symmetrie
2A	*Lageroberteil* *(Gleitplatte + Seitenführung)* 	t: 55 – 315 mm t_1: 20 – 215 mm t_2: 25 – 100 mm *D: 500 – 1800 mm* *d: 355 - 1385 mm* *b: 50 - 500 mm*		Achsen-symmetrie
2B	*Lageroberteil* *(Gleitplatte + Seitenführung)* 		t_1: 55 – 285 mm t_2: 55 – 170 mm a_w: 12 - 42 mm *(K oder Y-Naht)* *D: 440 – 2580 mm* *b: 55 - 570 mm*	Achsen-symmetrie
3	*Lagerunterteil* 	t: 55 – 255 mm t_1: 20 – 55 mm t_2: 20 – 60 mm t_3: 35 – 150 mm *D: 330 – 1800 mm* *b: 40-100 mm* *r: 135-590 mm*	t: 55 – 255 mm t_1: 20 – 55 mm t_2: 20 – 60 mm t_3: 35 – 150 mm *D: 330 – 1800 mm* *b: 40-100 mm* *r: 135-590 mm*	Achsen-symmetrie
4	*Ankerplatte* 	t: ≥ 55 mm *D: 440-3300 mm*	t: ≥ 55 mm *D: 440-3300 mm*	Achsen-symmetrie
5	*Horizontallager ohne Verdrehmöglichkeit und ohne Vertikallager* 	t: 30 – 150 mm d: 55 – 300 mm a_w: 5 – 25 mm *D: 440 - 3300 mm*	t: 30 – 150 mm d: 55 – 300 mm a_w: 5 – 25 mm *D: 440 - 3300 mm*	Rotations-symmetrie

4 Modifikationen des bruchmechanischen Sicherheitsnachweises

4.1 Allgemeines

(1) Die Anpassung der Berechnungsprozedur, die für DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 angewendet wurde, an die Nachweise für Lagerbauteilen nach Tabelle 3-2 erfolgt im Hinblick auf:

1. Bauteiltypische Festlegungen für Strukturparameter,
2. Bestimmung der „Nennwerte“ der Beanspruchungen σ_{Ed} aus Geometrie und Belastung der Bauteile.

4.2 Bauteiltypische Festlegungen für Strukturparameter

4.2.1 Bruchmechanisches Modell

(1) Die Einzelbauteile der Lager sind entweder rotationssymmetrisch (z.B. bei Kalottenlagern mit allseitiger Bewegungsbeschränkung) oder prismatisch (z.B. bei Kalottenlager mit einseitiger Bewegungsbeschränkung) ausgebildet.

(2) Zur Vereinfachung wird bei beiden Ausführungen als bruchmechanisches Modell ein Streifen betrachtet, der im Fall der rotationssymmetrischen Ausbildung einen Sektor, im Fall der prismatischen Ausbildung einen Abschnitt quer zur Erzeugenden darstellt. Entsprechend diesem vereinfachten Modell wird auch von einem rotationssymmetrisch verteilten umlaufenden bzw. linear längs der Erzeugenden verteilten Fehler, z.B. in Form einer durch die mechanische Bearbeitung oder Schweißung entstandenen Risskerbe ausgegangen.

4.2.2 Form und Größe des Fehlers

(1) In den betrachteten Streifen bzw. Sektoren des bruchmechanischen Modells wird ein umlaufender bzw. linear längs zur Erzeugenden verteilter Fehler als gerader Anriss unterstellt, der eine durch mechanische Bearbeitung oder Schweißung entstandene Risskerbe idealisiert. Dieser umlaufende Fehler befindet sich an der Stelle von Spannungskonzentrationen, an denen Ermüdungsrisse bei entsprechender Belastung erwartet werden müssten. Die Fehlertiefe entspricht dem Ansatz für Anfangsrisstiefen in DIN EN 1993-1-10 [2], siehe Bild 2-4. Da die hier betrachteten Lager nicht ermüdungsgefährdet sind, entspricht die Bemessungsrissgröße a_d der Anfangsrissgröße a_0.

$$a_d = a_0 = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right) \qquad \text{für} \quad t < 15 \text{ mm} \qquad \text{mit } t_0 = 1 \text{ mm}$$

$$a_d = a_0 = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \qquad \text{für} \quad t \geq 15 \text{ mm} \qquad \text{mit } t_0 = 1 \text{ mm}$$

(2) Zur Risserkennbarkeit bei Produktionsprüfungen, siehe Bild 2-7.

4.2.3 Ansatz von Eigenspannungen

(1) DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 sehen zwei Typen von Eigenspannungen vor:

1. Eigenspannungen im Werkstoff in der unmittelbaren Umgebung der Schweißnaht am Hot-Spot, die vor allem zu Zusatzbeanspruchungen in der Schweißnaht führen (primäre Eigenspannungen), und sich lokal kurzschließen und bei Rissbildung abfallen.
2. Fernwirkungen des Schweißschrumpfens infolge von Zwängungen, die durch Lagerung des Bauteils ausgelöst werden (sekundäre Eigenspannungen). Diese Eigenspannungen vergrößern die Spannungen aus äußeren Lasten.

(2) Das Auftreten derartiger signifikanter Sekundärspannungen ist bei den Referenzlagern des Typs A (vgl. Bild 3-3, links) als eher unwahrscheinlich anzusehen. Bei der geschweißten Variante (Referenzlager vom Typ B) werden teilweise große Schweißnahtdicken mit a_w = 42 mm realisiert, die hingegen hohe lokale (primäre) Schweißeigenspannungen erwarten lassen.

(3) In DIN EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009 wird angenommen, dass die primären Eigenspannungen durch die Kalibrierung des bruchmechanischen Berechnungsverfahren an den Ergebnissen von stahlbautypischen Großteilversuchen erfasst werden und für Zwängungen eine sekundäre Eigenspannung von σ_S = 100 MPa ausreichend ist.

(4) Für Lager wird angenommen, dass möglicherweise höhere primäre Eigenspannungen aus der Fertigung und andere nicht identifizierbare Zwängungen sowohl für Typ A als auch für Typ B durch den Ansatz einer sekundären Eigenspannung von σ_S = 100 MPa abgegolten werden können.

4.2.4 Kritische Risslänge b_{eff}

(1) In dem Ansatz ΔT_σ (s. 2.2(4)) fließt eine Funktion

$$f(b_{eff}) = \left(\frac{25}{b_{eff}} \right)^{0,25}$$

ein, die den Einfluss unterschiedlicher Rissfrontlängen auf die Versagenswahrscheinlichkeit berücksichtigt und von einem „Weakest-Link-Modell“ abgeleitet wurde. Der Term b_{eff} erfasst dabei die Länge der kritischen Rissfrontlänge. [6] enthält Angaben zu Werten für die anzusetzende Länge b_{eff} in Abhängigkeit von der Rissart. Für den hier vorliegenden Fall unterstellter Streifen- bzw. Sektorenmodelle mit über die Länge durchgehenden umlaufenden Anrissen können die Angaben gemäß [6] nicht verwendet werden.

(2) Bild 4-1 zeigt den Einfluss der effektiven Rissfrontlänge b_{eff} auf die Funktion $f(b_{eff})$.

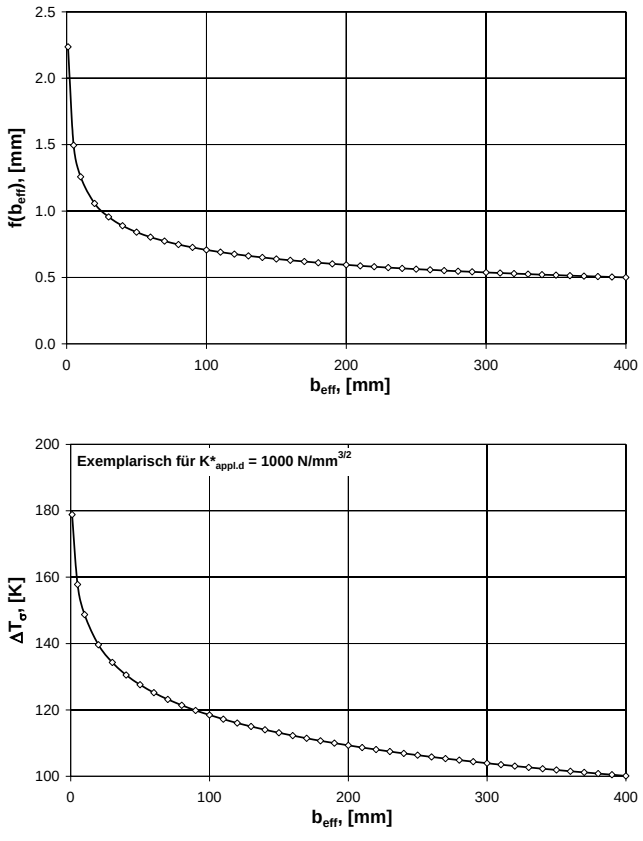


Bild 4-1: Einfluss der Rissfrontlänge b_{eff} auf die Sprödbruchsicherheit

(3) Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender effektiver Rissfrontlänge der Funktionswert abnimmt und gegen einen Grenzwert zu laufen scheint. Im Nachweiskonzept gegen Sprödbruch wirkt sich ein geringerer Wert b_{eff} demnach günstig aus, da die Einwirkungsseite T_{Ed}, die die Temperaturverschiebung ΔT_σ berücksichtigt, größer wird, vgl. Bild 4-1.

(4) Um den Maßstabseffekt in $f(b_{eff})$ berücksichtigen zu können, wird

$$f\left(b_{eff}\right)=\left(\frac{25}{b_{eff}}\right)^{0,25}$$

durch

$$f\left(b_{eff}\right)=\left(\frac{25}{t}\right)^{0,25}$$

Ersetzt, wobei t die Erzeugnisdicke (Blechdicke) am Hot-Spot ist. Dies entspricht der Vorgehensweise bei der Korrektur von Ermüdungsfestigkeiten in DIN EN 1993-1-9.

(5) Als Folge von

$$f\left(b_{eff}\right)=\left(\frac{25}{t}\right)^{0,25}$$

wird die Anforderungstemperatur T_{Ed} ($\geq T_{Rd}$) auf der Einwirkungsseite mit zunehmender Blechdicke geringer.

4.2.5 Berechnung der Spannung σ_{gy}

(1) Die Spannung σ_{gy} ist die Spannung, die im Nettoquerschnitt Fließen hervorruft. Sie wird zur Berechnung der Korrekturfunktion k_{R6} entsprechend dem CEGB-R6-Diagramm benötigt. Für den Standardfall eines geraden Oberflächenrisses gemäß [6], siehe Bild 4-2, berechnet sich σ_{gy} zu:

$$\sigma_{gy}(t)=f_y(t)\cdot\left(1-\frac{a}{t}\right)$$



Bild 4-2: Definition der Nettofließspannung

4.2.6 Inhomogenität der Zähigkeit über die Zeugnisdicke

(1) Der Nachweis bezieht sich auf die Einzelbauteile eines Lagers, z.B. Platten, Kalotten, etc., die entweder Endprodukt-fern oder Endprodukt-nah aus dickerem Vormaterial maschinell herausgearbeitet sind.

(2) Für das Vormaterial liegen Werkstoffzeugnisse vor, die bei Endprodukt-naher Fertigung direkt verwendet werden können. Bei Endprodukt-ferner Fertigung sind besondere Werkstoffproben in der Schichthöhe des Endproduktes zu prüfen.

(3) Im Sprödbruchkonzept wird der „normale“ Zähigkeitsabfall im Materialkernbereich durch den Term

$$\Delta T_{27J}=12{,}9\cdot\tanh\left(2{,}1\cdot\ln\left(t\right)-7{,}5\right)+12{,}8$$

berücksichtigt. Die Temperatur auf der Widerstandsseite T_{Rd} des Nachweiskonzeptes gegen Sprödbruch wird dadurch ungünstigerweise erhöht.

(4) Da bei der Lagerherstellung vorab nicht klar ist, ob die Lagerbauteile aus Endprodukt-nah oder Endprodukt-fern gewonnenem Material gefertigt werden, wird in diesem Gutachten immer eine „normale“ Inhomogenität der Materialzähigkeit im Nachweiskonzept berücksichtigt, auch wenn ein unterstellter Riss nicht in den Kernbereich des Bauteils hineinreichen sollte.

(5) Eine „normale Inhomogenität“ der Zähigkeitseigenschaften bei größeren Erzeugnisdicken setzt voraus, dass die Inneneigenschaften dicker Erzeugnisse nicht erheblich von den durch Werkszeugnis belegten Randeigenschaften abweichen, z.B. durch ungenügenden Durchwalzungsgrad.

(6) Solange EN 10025 hierzu keine Bestelloptionen liefert, sind bei der Materialbestellung zusätzliche Prüfungen zu vereinbaren.

4.2.7 Dehnrateneinfluss, Kaltverformung

(1) Temperaturverschiebungen durch den Einfluss hoher Dehnraten oder durch den Einfluss einer Kaltumformung werden aufgrund ihrer Irrelevanz bei den betrachten Brückenlagern nicht angesetzt.

4.3 Bestimmung der Nennwerte der Beanspruchung σ_{Ed} aus Geometrie und Belastung des Bauteils

4.3.1 Allgemeines

(1) Der bruchmechanische Nachweis gegen Sprödbruch von Bauteilen in DIN EN 1993-1-10 beruht auf der Vorstellung, dass man gemäß Bild 4-3 aus dem Bauteil einen bruchmechanischen Probekörper herausschneiden könnte, der alle bruchmechanisch relevanten Elemente wie geometrische Form, Risskonfiguration oder lokale Eigenspannungen aus dem Schweißvorgang enthält und an den Rändern durch die als „gleichmäßig verteilt“ angenommene Spannungen σ_{Ed} aus der Bauteilbelastung und aus den Eigenspannungen aus Fernwirkung von Zwängungen belastet wird.

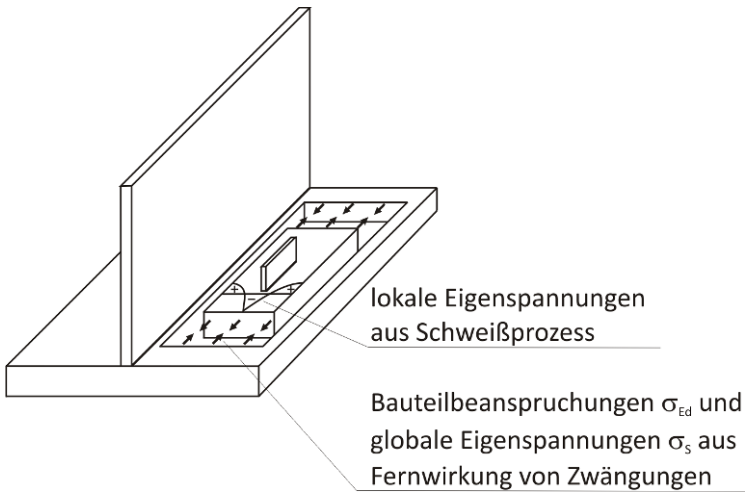


Bild 4-3: Lokale und globale Sekundärspannungen bei einem geschweißten Bauteil

(2) Der bruchmechanische Prüfkörper gilt als bruchmechanisches Modell, an dem der Nachweis entweder experimentell oder rechnerisch durchgeführt werden kann.

(3) Die Beanspruchung σ_{Ed} wird nach der Biegetheorie ermittelt und ergibt sich durch

$$\sigma_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{w}$$

Für nicht gleichmäßige Spannungen σ_{Ed} über die Probendicke wird auf der sicheren Seite die ungünstigste Oberflächenspannung σ_{Ed} als gleichmäßig verteilte Spannung σ_{Ed} für den bruchmechanischen Nachweis angenommen.

(4) Bei den gedrungenen Bauteilen von Lagern haben die Bauteile selbst die Größenordnung von bruchmechanischen Modellen und können lediglich durch Symmetrieüberlegungen noch verkleinert werden.

(5) Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Modelle für die Bauteilnummern nach Tabelle 3-2 und die Belastungsannahmen und Randbedingungen, die für die Berechnungen zugrunde gelegt wurden. Diese Belastungsannahmen und Randbedingungen in Tabelle 4-1 sind nicht in jedem Falle realistisch. Sie eignen sich aber für die Herleitung eines standardisierten Vorgehens.

(6) Die standarisierte Vorgehensweise geht zunächst von der Voraussetzung aus, dass die Bauteilbeanspruchung σ_{Ed} bei Lagern nicht nach der Biegetheorie , siehe 4.3.1(3), sondern nur mit Finiten Elementen ermittelt werden kann.

(7) Damit muss ein Bezug zwischen der Nennspannung σ_{Ed} und den Ergebnissen von Finite-Element-Berechnungen hergestellt werden.

(8) Dieser Bezug gelingt wie folgt

1. Für die in Tabelle 4-1 dargestellte Belastungssituation und Risskonfiguration werden längs des Risspfades die Spannungsintensitätsfaktoren $K_{appl,d}$ für eine Einheitsbelastung und für veränderliche Bauteilgeometrien bestimmt.
2. Für die gleichen Situationen, Risskonfigurationen, Einheitsbelastung und Bauteilgeometrien wird ohne Ansatz eines Risses, aber längs des in 1. angenommenen Risspfades, der Verlauf der Hauptspannungen σ_1 ermittelt und daraus mit dem Verfahren nach Dong die „Hot-Spot-Spannung“ σ_{HS} an der Stelle des Anfangsrisses berechnet.
3. Durch Normierung des Verlaufs und der Größe der Spannungsintensitätsfaktoren $K_{appl,d}$ auf die ermittelten Hot-Spot-Spannungen σ_{HS} erhält man einen Einheitsverlauf $\overline{K}$ für die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm².
4. Es wird vorausgesetzt, dass dieser Einheitsverlauf der normierten Spannungsintensitätsfaktoren $\overline{K}$ unempfindlich gegenüber Variationen der Bauteillagerung und der Belastung ist und sich als Bezugsgröße für Hot-Spot-Spannungen σ_{HS} eignet, die für eine genauere Geometrie, Belastung und Randbedingung ermittelt wurde. Damit wird die wirkliche bruchmechanische Belastung

   $$K_{appl,d} = \overline{K} \cdot \sigma_{HS}$$

   wobei

   $\overline{K}$: normierter Verlauf der Spannungsintensitätsfaktoren für die Geometrie und Belastung nach Tabelle 4-1

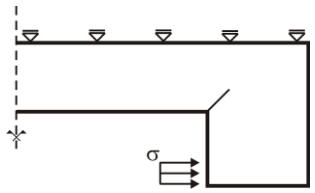
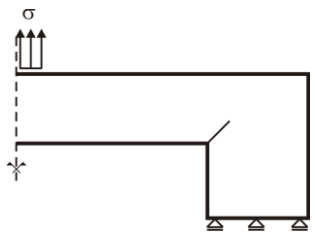
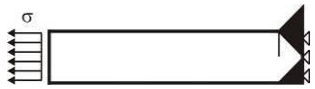
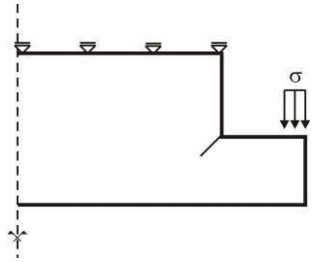
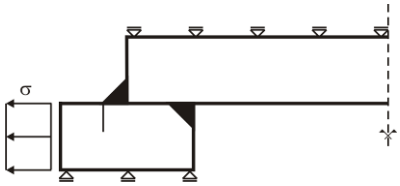
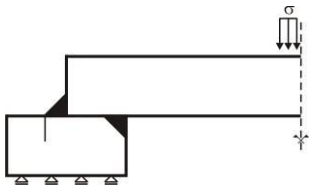
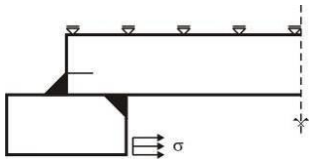
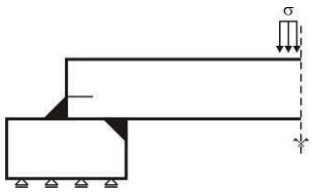
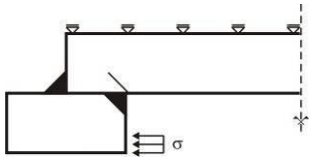
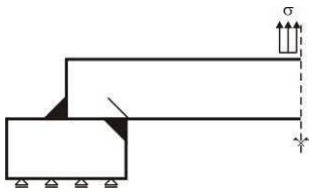
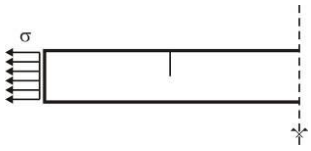
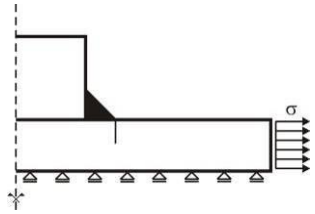
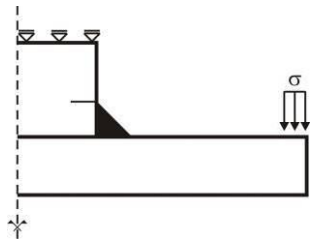
   σ_{HS}: Hot-Spot-Spannung nach Dong ermittelt für realistische geometrische und Belastungsbedingungen

5. Dadurch erhält die für realistische geometrische Abmessungen und Belastungsbedingungen ermittelte Hot-Spot-Spannung nach Dong die Eigenschaft der Nennspannung σ_{Ed} in EN 1993-1-10 und DASt-Richtlinie 009.

(9) Damit ist dem Produzent die Möglichkeit gegeben, eigene Finite-Element-Untersuchungen der Lagerteile unter realistischer Belastung durchzuführen und anhand der normierten Größe $\overline{K}$ und der Bezugswerte σ_{Ed} die Stahlgütewahl zu treffen.

(10) Da Lagerbauteile üblicher Abmessungen und üblicher Werkstoffgüte S355J2 in der Regel keine Einschränkung infolge der bruchmechanischen Nachweise zur Vermeidung von Sprödbruch erfahren, wird im weiteren Verlauf des Berichtes eine Möglichkeit geliefert, für die üblichen Fälle anhand von vereinfachten Tragfähigkeitsnachweisen nach der Biegetheorie zu entscheiden, ob die übliche Konfiguration von Abmessungen und Werkstoffgüte ausreichend ist, so dass Finite-Element-Untersuchungen eingespart werden können.

Tabelle 4-1: Bruchmechanische zweidimensionale Modelle mit angenommenen Belastungen und Randbedingungen

Nr.	Bauteil	Nr.	Bauteil
1, 2A	1  2 	**3**	1  2 
2B	1  2  3  4  5  6 	**4**	
		5	1  2 

4.3.2 Ermittlung der Bezugsspannung σ_{Ed} nach Dong

(1) Bei der Ermittlung der Bezugsspannungen σ_{Ed} kommt die „Hot-Spot-Stress“-Methode mit einer Modifikation nach Dong [13][14] zum Einsatz.

(2) Die „Hot-Spot-Stress“-Methode nach IIW-Dokument [10] liefert eine „Strukturspannung“ am „Hot-Spot“, die experimentell oder numerisch über Stützstellen (Referenzpunkte) aus dem Spannungsverlauf bei Annäherung an den „Hot-Spot“ extrapoliert werden, siehe Bild 4-4.

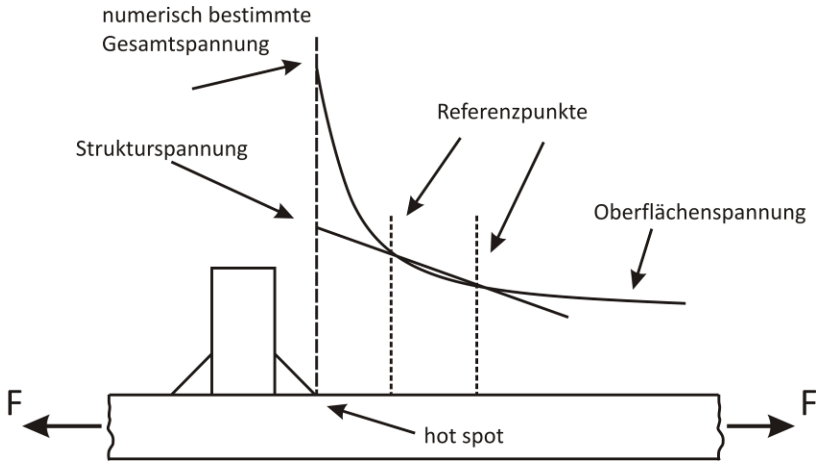


Bild 4-4: Definition der Strukturspannungen gemäß IIW-Dokument [10]

(3) In den IIW-Empfehlungen werden zwei Arten von Strukturspannungen (Typ „a“ mit Extrapolation auf der Bauteiloberfläche und Typ „b“ mit Extrapolation a dem Bauteilrand) unterschieden, siehe Bild 4-5.

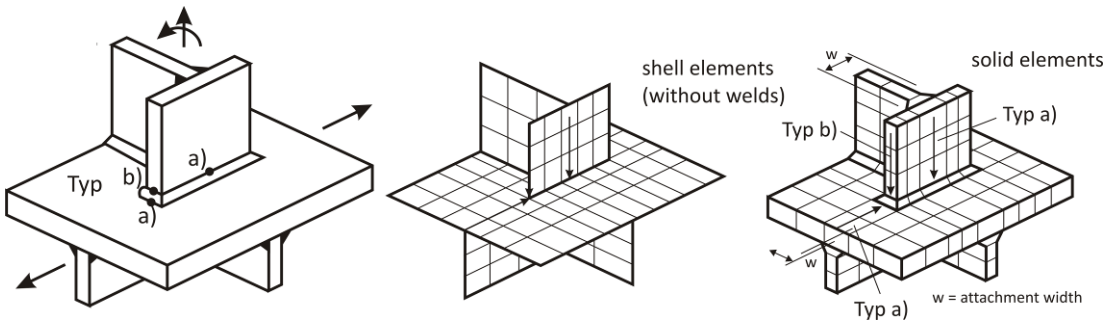
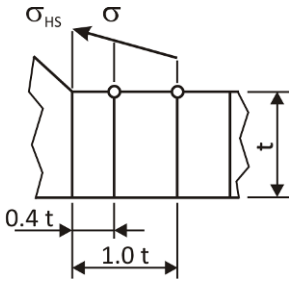
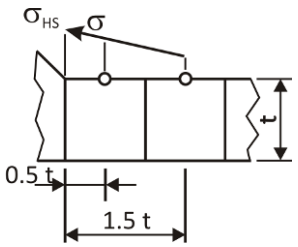
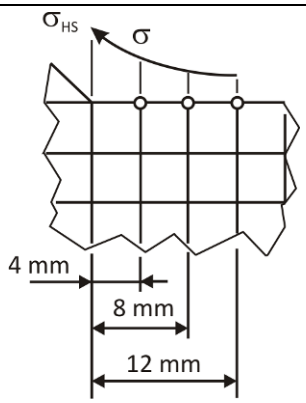
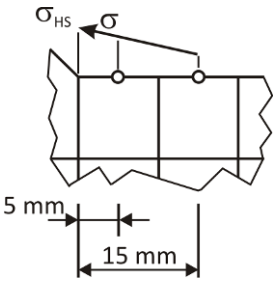


Bild 4-5: Typen von Strukturspannungen (Typ „a“ und Typ „b“) gemäß IIW-Dokument [10]

(4) Die Bedingungen für die Wahl der Stützstellen und die Extrapolationsfunktion zur Bestimmung der Strukturspannungen, geht aus Tabelle 4-2 hervor.

Tabelle 4-2: Ermittlung der Hot-Spot-Spannung σ_{HS} (Strukturspannung) gemäß IIW-Dokument [10]

Hot-Spot	feine Netzdichte (wie abgebildet oder feiner)	gröbere Netzdichte (konstante Elementgröße)
Typ „a“	a)  $\sigma_{HS} = 1{,}67 \cdot \sigma_{0{,}4 \cdot t} - 0{,}67 \cdot \sigma_{1{,}0 \cdot t}$ Bei stärkerem Anstieg der Spannungen, dickwandiger Bauteile $\sigma_{HS} = 2{,}52 \cdot \sigma_{0{,}4 \cdot t} - 2{,}24 \cdot \sigma_{0{,}9 \cdot t} + 0{,}72 \cdot \sigma_{1{,}4 \cdot t}$	b)  $\sigma_{HS} = 1{,}50 \cdot \sigma_{0{,}5 \cdot t} - 0{,}50 \cdot \sigma_{1{,}5 \cdot t}$
Typ „b“	c)  $\sigma_{HS} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm}$	d)  $\sigma_{HS} = 1{,}50 \cdot \sigma_{0{,}5 \cdot t} - 0{,}50 \cdot \sigma_{1{,}5 \cdot t}$

(5) Die modifizierte Strukturspannungsmethode von Dong liefert die Strukturspannung σ_{HS} durch Linearisierung der Spannungsverteilung über den Querschnitt in Rissrichtung.

(6) Dabei werden für die Anwendung bei Lagerbauteilen drei Linearisierungsansätze nach Bild 4-6 gebraucht.

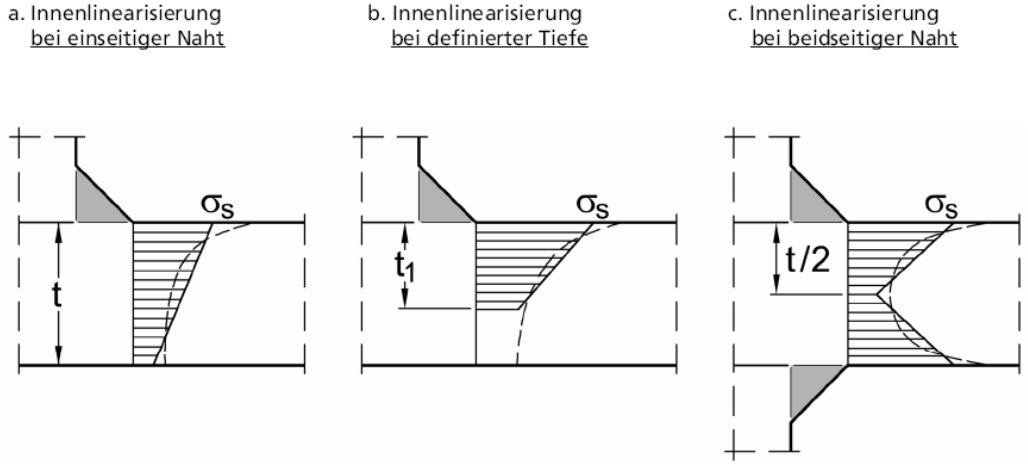


Bild 4-6: Definition der Strukturspannung nach Dong [10]

(7) Die Vorteile dieser Methode gegenüber den üblichen Hot-Spot-Stress-Ermittlungen sind folgende:

1. Die so definierte Strukturspannung σ_{HS} wird nur durch einen einzigen Linearisierungspfad eindeutig bestimmt.
2. Es wird berücksichtigt, dass nicht nur kleine Risse an Hot-Spot, sondern auch größere Risse in Dickenrichtung auftreten, die durch die totale Spannung senkrecht zur Rissrichtung kontrolliert werden. Diese Gesamtbeanspruchung wird durch eine linearisierte Strukturspannung angenähert.
3. Das Verfahren wurde anhand von Ermüdungsversuchen mit verschiedener Detailgeometrie kalibriert.
4. Die Ermittlung der Strukturspannungen aus FE-Netzen ist relativ netzunempfindlich. Die Bedingungen für feine Netzdichten nach Tabelle 4-2 werden angewendet.
5. Die Methode wird u.a. im ASME-Standard [12] für Druckbehälter und Pipelines angewendet.

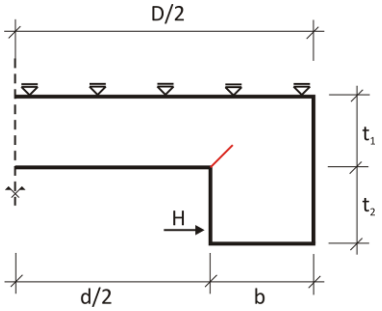
(8) Für die Fälle der Linearisierung in Bild 4-6 gilt

- Fall a) monotone Abnahme der Originalspannungen (gestrichelte Linie) über den Querschnitt; Innenlinearisierung über den kompletten Querschnitt. Das führt in der Regel zu den Spannungsergebnissen der Biegetheorie.
- Fall b) monotone Abnahme der Originalspannungen (gestrichelte Linie) in dicken bzw. breiten Querschnitten oder Platten; reduzierte Innenlinearisierung über einen Teil des Querschnitts bis zu einer Tiefe $t_1 < t$ empfohlen, beispielsweise bei Anrissen von der Plattenkante, wobei t_1 die Endrisslänge darstellt. Für Lager wurde t_1 als die Tiefe bestimmt, bei der die Spannung bis auf 10% der Maximalspannung abfällt.
- Fall c) nicht-monotone Abnahme der Originalspannungen über den Querschnitt, z.B. eine dicke Platte mit Quersteifen auf beiden Seiten; bilineare Innenlinearisierung

  Bei beidseitigen Schweißverbindungen unter symmetrischer Belastung wird eine Linearisierung über die halbe Plattendicke vorgeschlagen ($t_1 = t/2$), wodurch sich eine veränderte Strukturspannungsdefinition gegenüber dem herkömmlichen Konzept ergibt. Prinzipiell erfolgt die Linearisierung nach Dong nur über Bereiche mit monoton fallender Spannungsverteilung.

4.3.3 Beispiele für die Ermittlung der Strukturspannungen nach Dong

(1) Als Beispiel für die Berechnung der Strukturspannungen nach Dong wird das Detail 2A nach Bild 4-4 mit den Abmessungen nach Bild 4-7 angewendet.



H	=	10	N
D	=	1800	mm
B	=	50	mm
t_1	=	95	mm
t_2	=	100	mm

Bild 4-7: Beispiel Detail 2A nach Bild 4-4 für die Berechnung der Strukturspannung nach Dong

(2) Die Berechnung erfolgte mit der Software ABAQUS mit 8-knotigen Flächenelementen, mit durchschnittlicher Elementgröße 1x1 mm.

(3) Zunächst wurde die übliche Hot-Spot-Stress-Methode zur Ermittlung der Hauptnormalspannungen, die nahezu senkrecht zur potentiellen Rissrichtung stehen, mit nicht-linearer Extrapolation in horizontaler Richtung und in vertikaler Richtung durchgeführt, Bild 4-8. Die Ergebnisse sind σ_{HS} = 2,38 N/mm² für den horizontalen Pfad und σ_{HS} = 3,65 N/mm² für den vertikalen Pfad.

(4) Eine Abschätzung der Oberflächenspannung über die Biegetheorie für die angenommene Rissfläche würde σ_{HS} = 2,4 N/mm² ergeben.

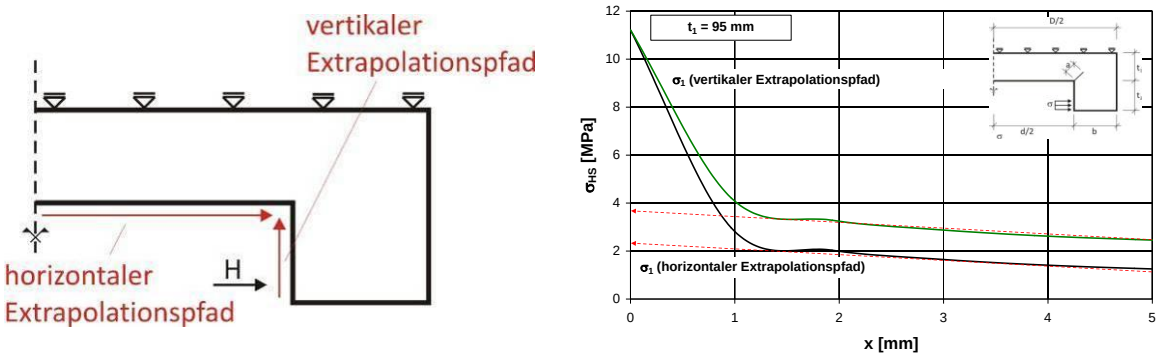


Bild 4-8: Ermittlung von Hot-Spot-Spannungen σ_{HS} mit dem Hot-Spot-Verfahren mit Oberflächenextrapolation

(5) Bei Anwendung nach Methode nach Dong ergibt sich eine Innenlinearisierung der Spannungen entlang der gedachten Rissorientierung (45°), siehe Bild 4-9. Die Innenlinearisierung der Spannungen wird automatisiert durch die FE-Software ABAQUS vorgenommen. Der Hauptnormalspannungsverlauf entlang der theoretischen Rissorientierung erreicht für s → 0 ein Maximum an der geometrischen Singularität und nimmt für s > 0 stetig ab.

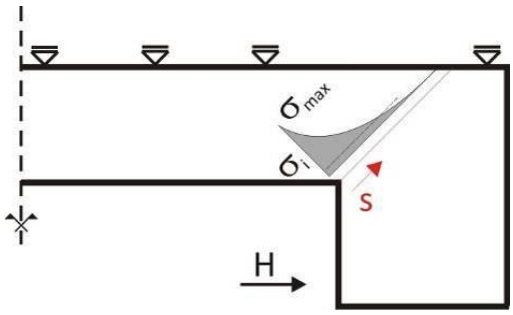
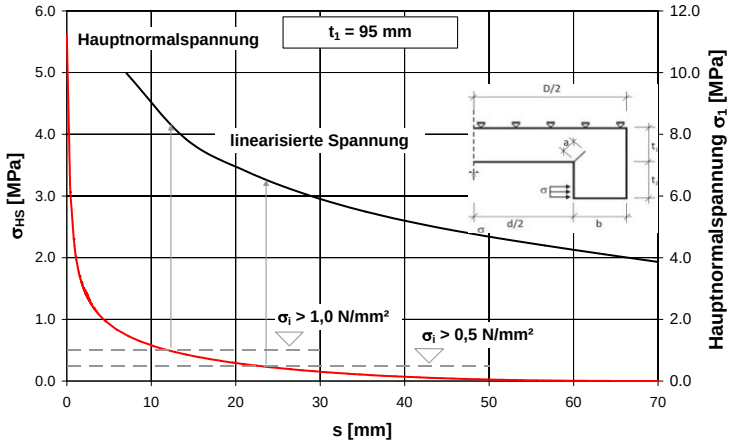


Bild 4-9: Ermittlung von Hot-Spot-Spannungen durch Innenlinearisierung nach Dong

(6) Naturgemäß hängen die Hot-Spot-Spannungen von der Linearisierungstiefe s ab, die durch eine Grenzspannung σ_i vorgegeben ist, unter der Spannungen vernachlässigt werden können.

(7) In Bild 4-10 sind für ein Beispiel die Hot-Spot-Spannungen abhängig von der Linearisierungstiefe und der dazu passenden Schwellenspannung σ_i angegeben: Für σ_i > 1,0 N/mm² kommt σ_{HS} = 4,05 N/mm² heraus, für σ_i > 0,5N/mm²: σ_{HS} = 3,33 N/mm².

a)



b)

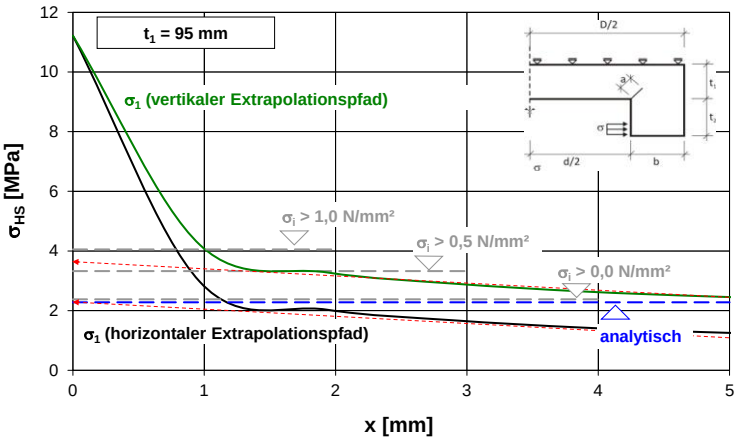


Bild 4-10: Ermittlung von Hot-Spot-Spannungen durch Innenlinearisierung nach Dong (a) und Vergleich mit Hot-Spot-Spannungen nach Oberflächenextrapolation nach Bild 4-8 (b)

(8) Bild 4-10 und Tabelle 4-3 zeigen auch einen Vergleich mit der Hop-Spot-Methode mit Oberflächenextrapolation.

Tabelle 4-3: Vergleich der für das Detail 2A ermittelten Hot-Spot-Spannungen

	Biegetheorie	Hot-Spot-Methode				
		Extrapolation		Innenlinearisierung		
		Horizontal	Vertikal	σ_i > 0,0 MPa	σ_i > 0,5 MPa	σ_i > 1,0 MPa
σ_{HS} [MPa]	2,4	2,38	3,65	1,92	3,33	4,05

(9) Als Ergebnis des Einzelbeispiels zeigt sich, dass die Außenextrapolation nur für den vertikalen Extrapolationspfad und die Innenlinearisierung nach Dong nur mit $\sigma_i > 1{,}0$ N/mm² zu für die bruchmechanische Berechnung repräsentativen Ergebnisse führt.

(10) Aus mehreren Vergleichsberechnungen folgt, dass der absolute Wert des Schwellenwertes σ_i durch einen relativen Wert ersetzt werden kann.

$\sigma_i = 0{,}10\ \sigma_{max}$ siehe Bild 4-11

(11) Die Ergebnisse der Innenlinearisierung mit diesem Schwellenwert und der Extrapolation mit vertikalem Pfad sind abhängig von der Erzeugnisdicke t_1 in Bild 4-11 dargestellt.

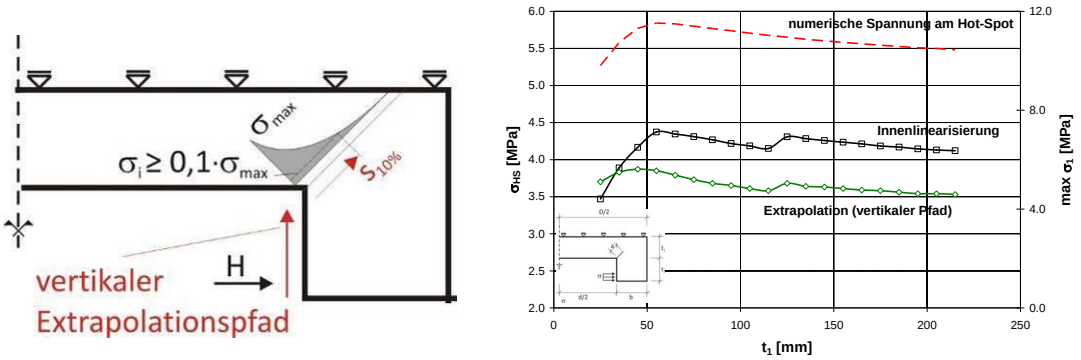


Bild 4-11: Hot-Spot-Spannungen bei Innenlinearisierung nach Dong für $\sigma_i \geq 0{,}10\ \sigma_{max}$ (10 %-Regel) und Vergleich mit Ergebnissen der Außenextrapolation

(12) Die Abhängigkeit der Hot-Spot-Spannungen von der Erzeugnisdicke ist für alle Verfahren affin.

(13) Im weiteren Gutachten wurde deshalb das Verfahren der Innenlinearisierung nach Dong angewendet.

(14) Dabei werden folgende Regeln beachtet:

1. Festlegung der potentiellen Rissorientierung als Linearisierungspfad.
2. Spannungsermittlung entlang des Linearisierungspfades und Ableitung der Spannungskomponente Zug senkrecht zur Rissrichtung.
3. Ableitung der Linearisierungstiefe aus dem Verlauf der maximalen Zugspannung (10 % Kriterium).
4. Durchführung der Linearisierung.
5. Ableitung der Hot-Spot-Spannung σ_{HS}.

Hinweis: Bei der Erstellung von Finite-Elemente-Modellen ist es notwendig, an geometrischen Unstetigkeiten geeignete Ausrundungen vorzunehmen. Wenn keine genaueren Angaben vorhanden sind, wird angenommen, dass der Radius r = 1 mm beträgt.

5 Numerische Untersuchungen und Ergebnisse

5.1 Allgemeines

(1) Für die Modelle nach Tabelle 3-2 und Tabelle 4-1 wurden die numerischen Untersuchungen zur Ermittlung der

- Hot-Spot-Spannungen σ_{HS} nach Abschnitt 4.3 und
- Spannungsintensitätsfaktoren K

mit der FE-Software ABAQUS, Version 6.8 durchgeführt, da keine katalogisierten Lösungen für diese Geometrien bekannt sind.

(2) Die Berechnung erfolgte mit linear-elastischem Werkstoffgesetzt.

(3) Die Berechnung liefert die Spannungsintensitätsfaktoren K entlang der Rissfront.

(4) Ausgegeben werden die K-Werte für die Rissöffnungsmoden K_1 und K_2, siehe Bild 5-1.

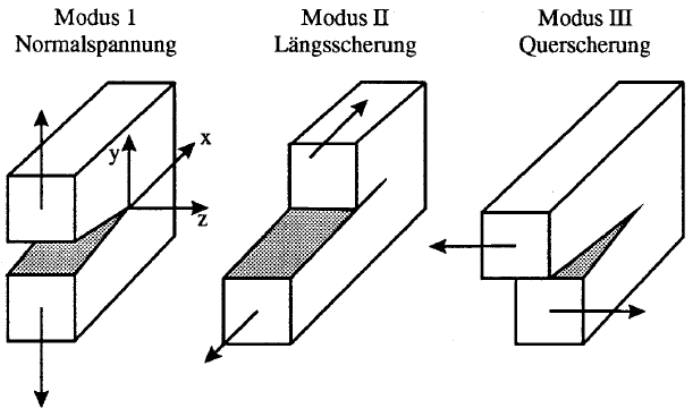


Bild 5-1: Rissöffnungsmoden

(5) Der Nachweis geht davon aus, dass die Hauptspannungen im Rissöffnungsmodus 1 wirken.

(6) Um den Effekt einzufangen, dass die Hauptspannung im Bauteil möglicherweise nicht senkrecht zur Rissoberfläche liegt, wird ein effektiver resultierender K_{eff}-Wert berechnet.

$$K_{eff} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$$

(7) In das bruchmechanische Nachweiskonzept geht der maximale Spannungsintensitätsfaktor

$$K = \max\left(K_1, K_{eff}\right)$$

ein.

(8) Die Berechnungen erfolgen aus Vereinfachungsgründen immer mir einer Einheitslinienlast der Größe σ = 1 N/mm auf einen Abschnitt der Länge 10 mm (Lasteinleitung). Aufgrund der Linearität ist somit eine Herauf- oder Herabskalieren der Beanspruchungsgrößen (Spannungen, Dehnungen, Spannungsintensitätsfaktoren) ohne Weiteres möglich.

(9) In der Regel erfolgten jeweils zwei Berechnungen mit denjenigen maximalen bzw. minimalen Geometrieabmessungen, die den maßgeblichen Einfluss auf die Sprödbruchgefährdung ausüben. Im Rahmen dieses Berichtes wurden demnach Sprödbruchnachweise an den Obergrenzen und an den Untergrenzen der Lagergeometrie durchgeführt.

(10) Die Modelle wurden immer unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften erstellt, um so Modellierungsaufwand und Rechenzeit einzusparen.

(11) Die Modellierung erfolgte mit höherwertigen zweidimensionalen Flächenelementen (8-Knoten-Elemente). Speziell für die Modellierung des Risses sind sehr feine Vernetzungen der Rissspitze erforderlich.

(12) Weiterhin erfordert die Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren eine spezielle Vernetzung des Rissbereiches mit spezifischen kollabierten Rissspitzenelementen, die die dort vorhandene Spannungssingularität berücksichtigen, vgl. Bild 5-2 für das Beispiel der Geometrie des Lagerdetails 1, Lagerplatte.

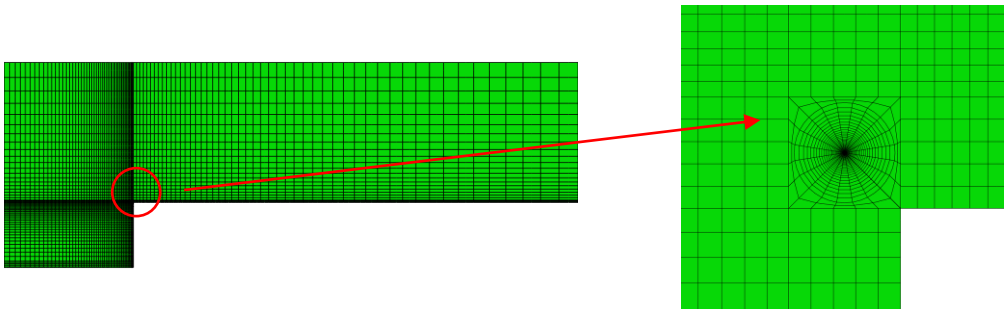


Bild 5-2: Spinnennetzartige Vernetzung der Rissspitze mit kollabierten Elementen an der Rissspitze am Beispiel des FE-Modells für das Lagerdetail 1

5.2 Bauteil Nr. 1 – Rotationssymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

5.2.1 Geometrie, Belastungsvarianten und Randbedingungen

(1) Die geometrische Ausführung des Lageroberteils ist in Bild 5-3 angegeben.

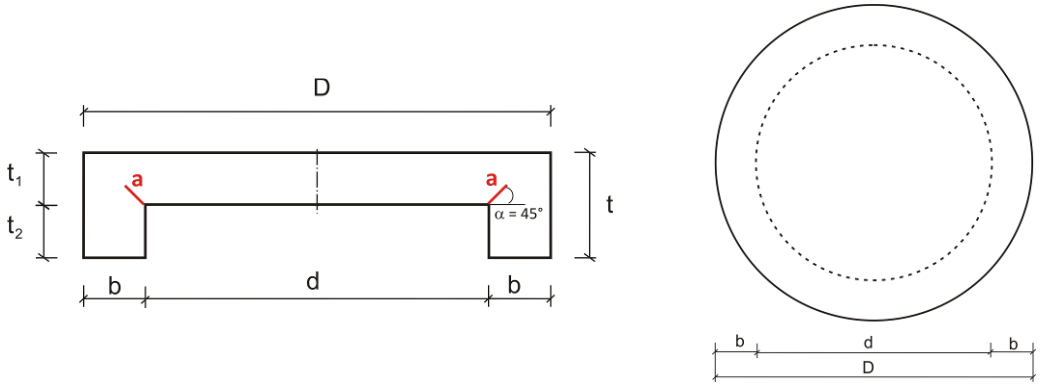


Bild 5-3: Bauteil 1: Lageroberteil (Gleitplatte + Seitenführung) des Referenzlagers A

(2) Die Abmessungen gehen aus Tabelle 5-1 hervor.

Tabelle 5-1: Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Detail 1

t [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	D [mm]	d [mm]	b [mm]
55 – 315	20 – 215	25 – 100	500 – 1800	355 – 1385	50 - 500

(3) Als Belastungen, die unabhängig von der realen Belastung zur größtmöglichen bruchmechanischen Belastung führen, wurden die Varianten 1-1 und 1-2 nach Bild 5-4 gewählt.

(4) Beide Belastungsvarianten führen zu Zugbeanspruchungen an der einspringenden Ecke am Übergang Lagerplatte-Seitenführung.

Beanspruchungsvariante 1-1 **Beanspruchungsvariante 1-2**

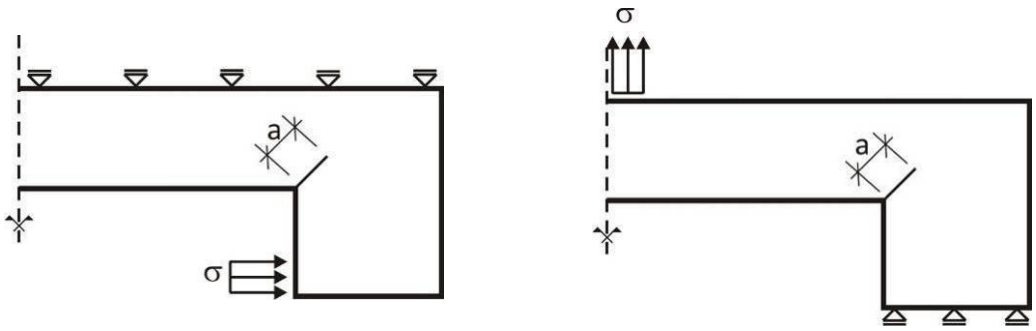


Bild 5-4: Belastungsvarianten am Detail 1: Variante 1-1 - Horizontalbelastung (links) und Variante 1-2 - Vertikalbelastung (rechts)

(5) Die Berechnung erfolgte an zwei unterschiedlichen Konfigurationen an den Ober- bzw. Untergrenzen der geometrischen Abmessungen, vgl. Tabelle 5-2. Als maßgeblich Einflussgröße auf die Veränderung der Spannungsintensitätsfaktoren neben der zu variierenden Lagerplattendicke t_1 hat sich hier die Breite der Seitenführungen b herausgestellt. Der Durchmesser der Lagerplatte D wurde maximal gehalten, da hier insbesondere bei der Belastungsvariante 1-2 das größtmögliche Moment an der einspringenden Ecke erzielt wird.

Tabelle 5-2: Ober- und Untergrenzen der geometrischen Abmessungen für Detail 1

Obergrenzen		Untergrenzen	
t_1 [mm]	20 - 215	t_1 [mm]	20 - 215
t_2 [mm]	100	t_2 [mm]	100
D [mm]	1800	D [mm]	1800
d [mm]	970	d [mm]	1700
b [mm]	415	b [mm]	50

(6) Die Rissanordnung erfolgte in Abhängigkeit der Belastungssituation unter 45°, so dass die größtmögliche bruchmechanische Beanspruchung hervorgerufen wurde. Vertikal und/oder horizontal ausgerichtete Risse gleicher Länge beeinflussen den Spannungsintensitätsfaktor nur geringfügig und stellten sich als weniger kritisch heraus als die schräge Variante.

(7) Die Rissgröße a_0 wird in Abhängigkeit der Plattendicke t_1 berechnet und steigt mit zunehmender Plattendicke.

(8) Bild 5-5 zeigt einen Ausschnitt aus dem FE-Modell sowie die zugehörige Verformungsfigur mit Rissöffnung.

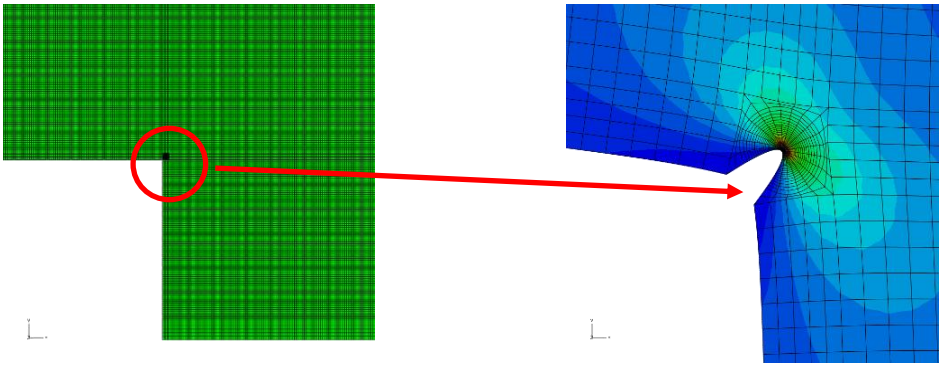


Bild 5-5: Ausschnitt aus dem FE-Modell (links unten) und Ausschnitt Rissöffnung (rechts unten)

5.2.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Für die Belastungsvariante 1-1 zeigen Bild 5-6 links die Hot-Spot-Spannungen für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen nach Tabelle 5-2 und Bild 5-6 rechts für die Untergrenze der geometrischen Abmessungen nach Tabelle 5-2.

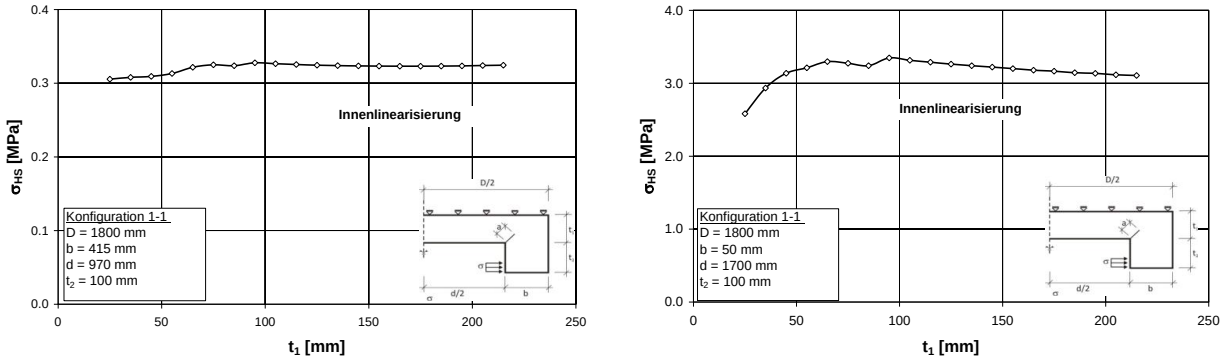


Bild 5-6: Hot-Spot-Spannungen mit dem Verfahren der Innenlinearisierung (Dong) für geometrische Obergrenzen (links) und Untergrenzen (rechts) für die Belastungsvariante 1-1

(2) Der Einfluss der Erzeugnisdicke t_1 ist gering, bei den geometrischen Untergrenzen gibt es ein Maximum bei t_1 = 95 mm.

(3) Für die Belastungsvariante 1-2 zeigt Bild 5-7 die Abhängigkeit der Hot-Spot-Spannungen von der Erzeugnisdicke t_1 bei geometrischen Obergrenzen (links) und Untergrenzen (rechts).

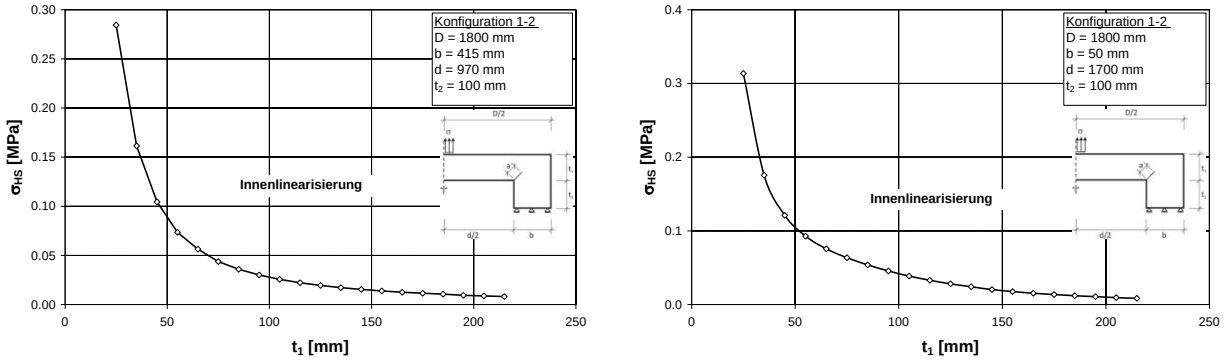


Bild 5-7: Hot-Spot-Spannungen mit dem Verfahren der Innenlinearisierung (Dong) für geometrische Obergrenzen (links) und Untergrenzen (rechts) für Belastungsvariante 1-2

(4) Die Abhängigkeit von t_1 ist ausgeprägt, die der geometrischen Obergrenzen und Untergrenzen geringer (geringfügig höhere Werte bei den Untergrenzen).

5.2.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Für die Belastungsvariante 1-1 zeigt Bild 5-8, links, die Entwicklung der Spannungsintensitätsfaktoren für die Beanspruchungsvariante 1-1 bei Variation der Plattendicke t_1 zwischen 25 mm und 215 mm für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen. Es ist ein relativ konstanter Verlauf der K_1-Werte bei konstanter äußerer Last zu erkennen mit leichter Abschwächung bei zunehmenden t_1. Die Beanspruchung im Modus 2 ist vernachlässigbar klein.

(2) Nach Normierung der K-Werte auf die Einheitsbeanspruchung 1 N/mm² ist gemäß Bild 5-8, rechts, festzustellen, dass die K-Werte für größer werdende Plattendicken t_1 nahezu konstant bleiben.

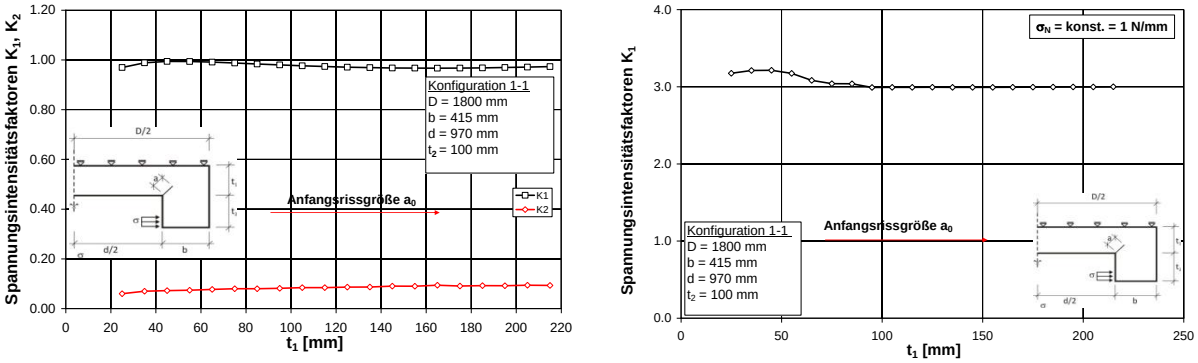


Bild 5-8: K-Werte für geometrische Obergrenzen für Beanspruchungsvariante 1-1 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(3) Die Ergebnisse für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen sind in Bild 5-9 dargestellt.

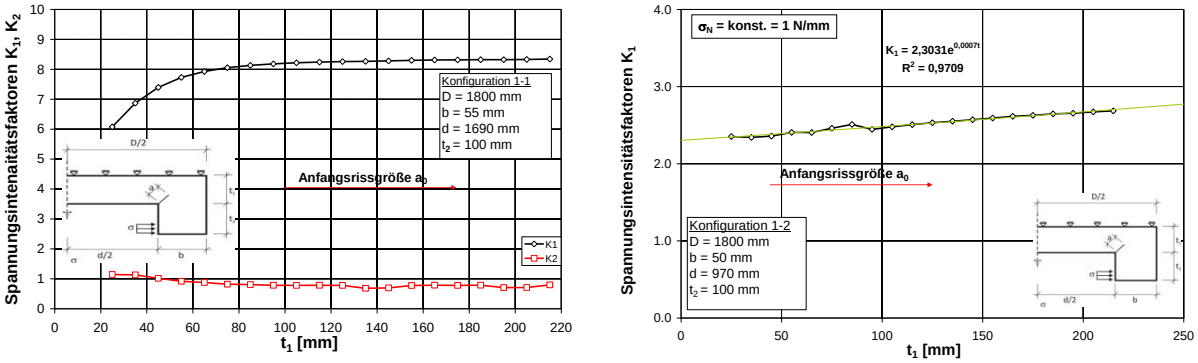


Bild 5-9: K-Werte für geometrische Untergrenzen für Beanspruchungsvariante 1-1 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(4) Während in Bild 5-9, links, die K-Werte für t < 100 mm abfallen, liefern die auf die Einheitsbeanspruchungen σ_{HS} = 1 N/mm² normierten K-Werte (Bild 5-9 rechts) einen linearen Verlauf, der durch

$$K_1 = 2{,}3021\, e^{0{,}0007 t_1}$$

angenährt werden kann.

(5) Für die Belastungsvariante 1-2 liefert Bild 5-10 die Abhängigkeit der K-Werte von der Erzeugnisdicke t_1 für die geometrischen Obergrenzen der Abmessungen.

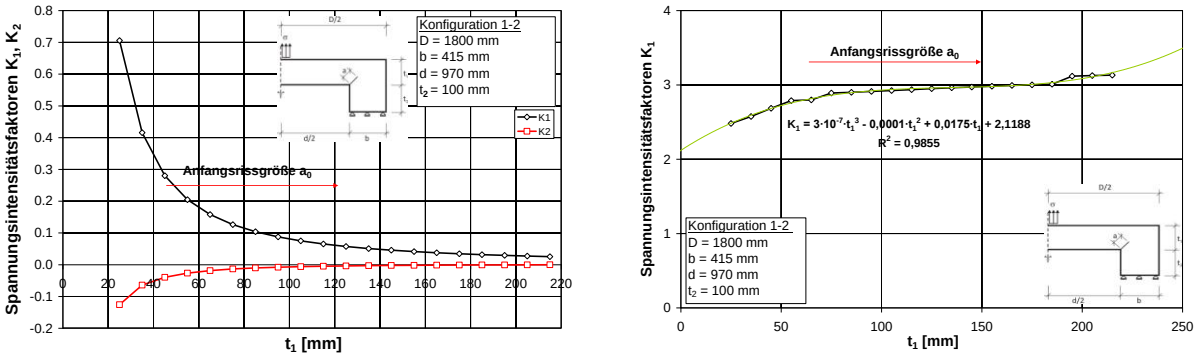


Bild 5-10: K-Werte für geometrische Obergrenzen für Beanspruchungsvariante 1-2 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(6) Nach Normierung der K-Werte auf die Einheitsbeanspruchung σ_{HS} = 1 N/mm² kann der K_1-Wert durch das Polynom

$$K_1(t_1) = 3{,}0779 \cdot 10^{-7} t_1^3 - 1{,}2514 \cdot 10^{-4} t_1^2 + 1{,}7547 \cdot 10^{-2} t_1 + 2{,}1188$$

angenähert werden.

(7) Bild 5-11 zeigt ähnliche Werte K für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen.

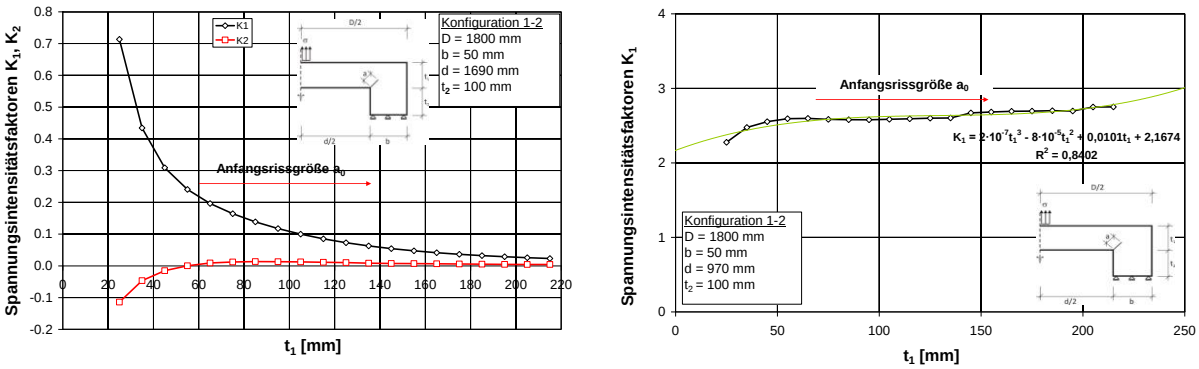


Bild 5-11: K-Werte für geometrische Untergrenzen für Beanspruchungsvariante 1-2 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(8) Nach Normierung der K-Werte auf die Einheitsbeanspruchungen σ_{HS} = 1 N/mm² kann der K_1-Wert durch das Polynom

$$K_1(t_1) = 1{,}9297 \cdot 10^{-7} t_1^3 - 7{,}5274 \cdot 10^{-5} t_1^2 + 1{,}0121 \cdot 10^{-2} t_1 + 2{,}1674$$

angenähert werden.

5.2.4 Sprödbruchnachweise

(1) Die Sprödbruchnachweise erfolgte für Werkstoff S355J2 für unterschiedliche

- Erzeugnisdicken t_1,
- Ausnutzungsgrade $\frac{\sigma_{Ed}}{f_y} = \frac{\sigma_{HS}}{f_y}$ und
- Bauteiltemperaturen T_{Ed}.

(2) Für die Beanspruchungsvariante 1-1 liefert die Tabelle 5-5 die Nachweise $T_{Ed} = T_{Rd}$ für $\sigma_{Ed}/f_y = 0{,}75$ und $T_{Ed} = -50°C$. die sämtlich zur vollen Ausnutzbarkeit einer als Grenzwert angenommenen Erzeugnisdicke von 250 mm führen.

(3) Für die Beanspruchungsvariante 1-2 führen ähnliche Berechnungen, die in Tabelle 5-6 aufgeführt sind zu kleinen Eingrenzungen der Erzeugnisdicke t_1 bei $\sigma_{Ed}/f_y = 0{,}75$ und $T_{Ed} = -50°C$.

(4) Aus den Berechnungen in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 können für die Beanspruchungsvariante 1-1 die Grenzwerte der Erzeugnisdicke nach Tabelle 5-3 und für die Beanspruchungsvariante 1-2 die Erzeugnisdicke nach Tabelle 5-4 hergeleitet werden.

(5) Als für die Normenregelungen maßgebenden Werte können die der Tabelle 5-4 herangezogen werden.

Tabelle 5-3: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Lageroberteil (Beanspruchungsvariante 1-1)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig),*

Tabelle 5-4: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Lageroberteil (Beanspruchungsvariante 1-2)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	235

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig)*

Tabelle 5-5: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 1-1 für Bauteil Nr. 1 – Rotationssymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{FJ}	ΔT_{FJ}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	$\Delta T_\bullet$	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	3.17	0.75	266.3	100	1.61	25	845	317	1163	36.8	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1407	44.5	25	81.9	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**39**	**-33**	no risk
2	1.0	3.21	0.75	266.3	100	1.78	35	855	321	1176	37.2	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1421	44.9	35	73.2	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**30**	**-26**	no risk
3	1.0	3.21	0.75	266.3	100	1.90	45	856	321	1177	37.2	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1422	45.0	45	68.0	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**25**	**-19**	no risk
4	1.0	3.17	0.75	266.3	100	2.00	55	845	317	1162	36.7	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1405	44.4	55	65.8	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**23**	**-16**	no risk
5	1.0	3.08	0.75	266.3	100	2.09	65	821	308	1129	35.7	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1365	43.2	65	66.7	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**24**	**-14**	no risk
6	1.0	3.04	0.75	266.3	100	2.16	75	809	304	1113	35.2	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1347	42.6	75	65.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**23**	**-13**	no risk
7	1.0	3.04	0.75	266.3	100	2.22	85	809	304	1113	35.2	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1347	42.6	85	63.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**20**	**-13**	no risk
8	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.28	95	796	299	1095	34.6	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1327	42.0	95	63.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**20**	**-13**	no risk
9	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.33	105	796	299	1096	34.6	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1328	42.0	105	61.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**18**	**-13**	no risk
10	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.37	115	796	299	1096	34.6	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1329	42.0	115	59.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**17**	**-12**	no risk
11	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.41	125	797	299	1096	34.7	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1331	42.1	125	57.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
12	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.45	135	797	299	1096	34.7	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1332	42.1	135	56.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
13	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.49	145	797	299	1096	34.7	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1333	42.1	145	54.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**12**	**-12**	no risk
14	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.52	155	797	299	1096	34.7	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1334	42.2	155	53.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
15	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.55	165	797	299	1096	34.7	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1336	42.2	165	52.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**9**	**-12**	no risk
16	1.0	2.99	0.75	266.3	100	2.58	175	797	299	1097	34.7	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1337	42.3	175	51.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
17	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.61	185	798	300	1097	34.7	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1339	42.3	185	49.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**7**	**-12**	no risk
18	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.64	195	798	300	1097	34.7	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1341	42.4	195	48.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
19	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.66	205	798	300	1098	34.7	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1343	42.5	205	47.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
20	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.69	215	799	300	1098	34.7	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1344	42.5	215	46.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
21	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.71	225	799	300	1098	34.7	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1346	42.6	225	45.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
22	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.73	235	799	300	1098	34.7	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1347	42.6	235	44.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
23	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.75	245	799	300	1098	34.7	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1348	42.6	245	44.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk
23	1.0	3.00	0.75	266.3	100	2.76	250	799	300	1098	34.7	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1349	42.7	250	43.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk

Tabelle 5-6: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 1-2 für Bauteil Nr. 1 – Rotationssymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -40 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_δ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.481	0.75	266.3	100	1.61	25	661	248	909	28.7	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1099	34.8	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**87**	**-33**	no risk
2	1.0	2.575	0.75	266.3	100	1.78	35	686	257	943	29.8	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1140	36.0	35	116.5	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**83**	**-26**	no risk
3	1.0	2.685	0.75	266.3	100	1.90	45	715	269	983	31.1	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1188	37.6	45	99.3	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**66**	**-19**	no risk
4	1.0	2.788	0.75	266.3	100	2.00	55	742	279	1021	32.3	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1234	39.0	55	86.8	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**54**	**-16**	no risk
5	1.0	2.797	0.75	266.3	100	2.09	65	745	280	1025	32.4	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1239	39.2	65	82.4	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**49**	**-14**	no risk
6	1.0	2.891	0.75	266.3	100	2.16	75	770	289	1059	33.5	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1281	40.5	75	73.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**41**	**-13**	no risk
7	1.0	2.900	0.75	266.3	100	2.22	85	772	290	1062	33.6	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1286	40.7	85	70.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**37**	**-13**	no risk
8	1.0	2.912	0.75	266.3	100	2.28	95	775	291	1066	33.7	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1292	40.8	95	67.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**35**	**-13**	no risk
9	1.0	2.924	0.75	266.3	100	2.33	105	779	292	1071	33.9	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1298	41.1	105	64.8	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**32**	**-13**	no risk
10	1.0	2.936	0.75	266.3	100	2.37	115	782	294	1075	34.0	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1305	41.3	115	62.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**29**	**-12**	no risk
11	1.0	2.950	0.75	266.3	100	2.41	125	786	295	1081	34.2	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1312	41.5	125	59.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**27**	**-12**	no risk
12	1.0	2.961	0.75	266.3	100	2.45	135	788	296	1085	34.3	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1318	41.7	135	57.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**25**	**-12**	no risk
13	1.0	2.971	0.75	266.3	100	2.49	145	791	297	1088	34.4	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1323	41.9	145	55.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**23**	**-12**	no risk
14	1.0	2.982	0.75	266.3	100	2.52	155	794	298	1092	34.5	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1329	42.0	155	54.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**21**	**-12**	no risk
15	1.0	2.992	0.75	266.3	100	2.55	165	797	299	1096	34.7	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1335	42.2	165	52.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**19**	**-12**	no risk
16	1.0	3.001	0.75	266.3	100	2.58	175	799	300	1099	34.8	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1340	42.4	175	50.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**18**	**-12**	no risk
17	1.0	3.009	0.75	266.3	100	2.61	185	801	301	1102	34.8	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1345	42.5	185	49.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**16**	**-12**	no risk
18	1.0	3.117	0.75	266.3	100	2.64	195	830	312	1142	36.1	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1395	44.1	195	43.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
19	1.0	3.125	0.75	266.3	100	2.69	215	833	313	1147	36.3	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1403	44.4	215	41.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
20	1.0	3.130	0.75	266.3	100	2.69	215	833	313	1147	36.3	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1403	44.4	215	41.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
21	1.0	3.238	0.75	266.3	100	2.71	225	862	324	1186	37.5	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1453	45.9	225	36.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
22	1.0	3.326	0.75	266.3	100	2.73	235	886	333	1218	38.5	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1494	47.2	235	32.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-1**	**-12**	no risk
23	1.0	3.433	0.75	266.3	100	2.75	245	914	343	1257	39.8	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1543	48.8	245	27.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-5**	**-12**	no risk
24	1.0	3.494	0.75	266.3	100	2.76	250	930	349	1280	40.5	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1571	49.7	250	25.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-7**	**-12**	no risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_δ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.481	0.75	266.3	100	1.61	25	661	248	909	28.7	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1099	34.8	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**77**	**-33**	no risk
2	1.0	2.575	0.75	266.3	100	1.78	35	686	257	943	29.8	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1140	36.0	35	116.5	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**73**	**-26**	no risk
3	1.0	2.685	0.75	266.3	100	1.90	45	715	269	983	31.1	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1188	37.6	45	99.3	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**56**	**-19**	no risk
4	1.0	2.788	0.75	266.3	100	2.00	55	742	279	1021	32.3	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1234	39.0	55	86.8	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**44**	**-16**	no risk
5	1.0	2.797	0.75	266.3	100	2.09	65	745	280	1025	32.4	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1239	39.2	65	82.4	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**39**	**-14**	no risk
6	1.0	2.891	0.75	266.3	100	2.16	75	770	289	1059	33.5	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1281	40.5	75	73.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**31**	**-13**	no risk
7	1.0	2.900	0.75	266.3	100	2.22	85	772	290	1062	33.6	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1286	40.7	85	70.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**27**	**-13**	no risk
8	1.0	2.912	0.75	266.3	100	2.28	95	775	291	1066	33.7	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1292	40.8	95	67.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**25**	**-13**	no risk
9	1.0	2.924	0.75	266.3	100	2.33	105	779	292	1071	33.9	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1298	41.1	105	64.8	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**22**	**-13**	no risk
10	1.0	2.936	0.75	266.3	100	2.37	115	782	294	1075	34.0	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1305	41.3	115	62.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**19**	**-12**	no risk
11	1.0	2.950	0.75	266.3	100	2.41	125	786	295	1081	34.2	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1312	41.5	125	59.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**17**	**-12**	no risk
12	1.0	2.961	0.75	266.3	100	2.45	135	788	296	1085	34.3	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1318	41.7	135	57.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
13	1.0	2.971	0.75	266.3	100	2.49	145	791	297	1088	34.4	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1323	41.9	145	55.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
14	1.0	2.982	0.75	266.3	100	2.52	155	794	298	1092	34.5	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1329	42.0	155	54.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
15	1.0	2.992	0.75	266.3	100	2.55	165	797	299	1096	34.7	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1335	42.2	165	52.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**9**	**-12**	no risk
16	1.0	3.001	0.75	266.3	100	2.58	175	799	300	1099	34.8	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1340	42.4	175	50.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
17	1.0	3.009	0.75	266.3	100	2.61	185	801	301	1102	34.8	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1345	42.5	185	49.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
18	1.0	3.117	0.75	266.3	100	2.64	195	830	312	1142	36.1	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1395	44.1	195	43.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk
19	1.0	3.125	0.75	266.3	100	2.66	205	832	313	1145	36.2	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1400	44.3	205	42.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-1**	**-12**	no risk
20	1.0	3.130	0.75	266.3	100	2.69	215	833	313	1147	36.3	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1403	44.4	215	41.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-2**	**-12**	no risk
21	1.0	3.238	0.75	266.3	100	2.71	225	862	324	1186	37.5	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1453	45.9	225	36.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-7**	**-12**	no risk
22	1.0	3.326	0.75	266.3	100	2.73	235	886	333	1218	38.5	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1494	47.2	235	32.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk
23	1.0	3.377	0.75	266.3	100	2.74	240	899	338	1237	39.1	355	295	292	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1517	48.0	240	30.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-13**	**-12**	risk
24	1.0	3.494	0.75	266.3	100	2.76	250	930	349	1280	40.5	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1571	49.7	250	25.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-17**	**-12**	risk

5.3 Bauteil Nr. 2A – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

5.3.1 Geometrie, Belastungsvarianten und Randbedingungen

(1) Beim Bauteil Nr. 2A handelt es sich um das achsensymmetrische Pendant zu Bauteil Nr. 1, siehe 5.2.1. Geometrie, Belastungsvarianten und Randbedingungen sind identisch mit den Ausführungen in Abschnitt 5.2.1 und können Bild 5-3, Tabelle 5-1, Bild 5-4 und Tabelle 5-2 entnommen werden.

5.3.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Die Bild 5-6 entsprechenden Ergebnisse sind in Bild 5-12 dargestellt.

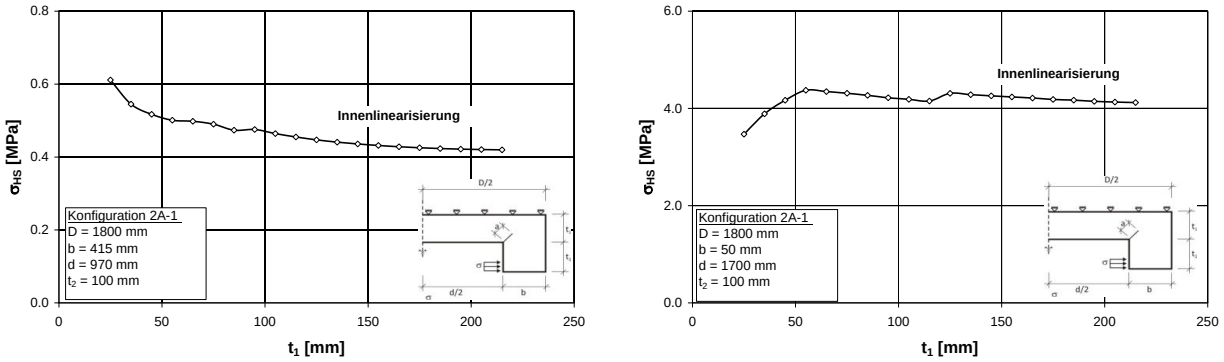


Bild 5-12: Hot-Spot-Spannungen mit dem Verfahren der Innenlinearisierung (Dong) für geometrische Obergrenzen (links) und Untergrenzen (rechts) für die Belastungsvariante 2A-1

(2) Die Bild 5-7 entsprechenden Ergebnisse sind in Bild 5-13 aufgeführt.

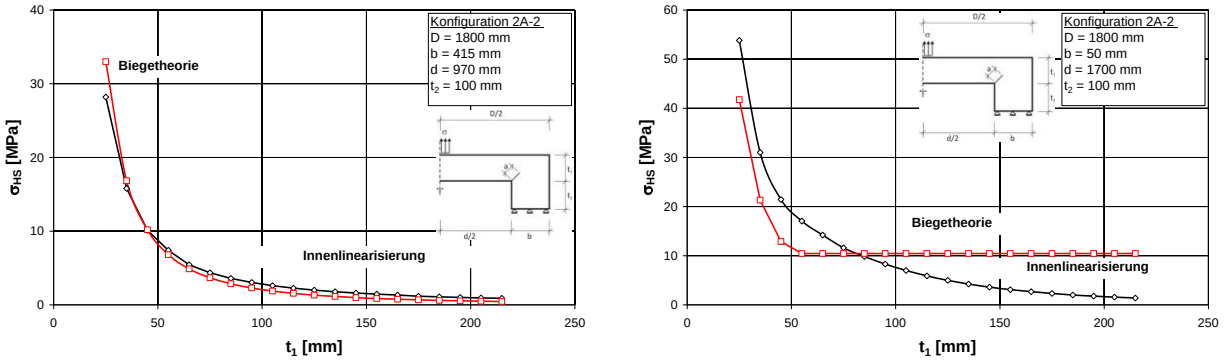


Bild 5-13: Hot-Spot-Spannungen mit dem Verfahren der Innenlinearisierung (Dong) für geometrische Obergrenzen (links) und Untergrenzen (rechts) für die Belastungsvariante 2A-2

(3) In Bild 5-13 wird vergleichsweise auch die Randspannung nach der Biegetheorie angegeben, wobei das Widerstandsmoment in Rissrichtung angenommen wurde und für $t_1 > 50$ mm wegen der Annahme b = 50 mm für die Untergrenzen der Abmessungen zu einer konstanten Spannung führt. Der Vergleich begründet die Zweckmäßigkeit der Anwendung der Hot-Spot-Spannung zur Erfassung der Steifigkeitsverteilungen auf den Referenzspannungsverlauf.

5.3.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Die Bild 5-8 entsprechenden Ergebnisse für geometrische Obergrenzen sind in Bild 5-14 für die Beanspruchungsvariante 2A-1 dargestellt.

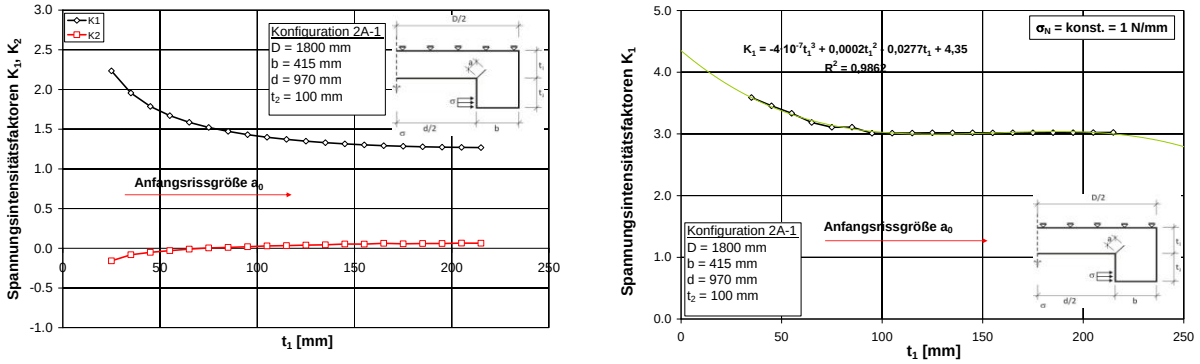


Bild 5-14: K-Werte für geometrische Obergrenzen für Beanspruchungsvariante 2A-1 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(2) Der Verlauf der auf die Einheitsspannung σ_{HS} = 1 N/mm² normierte Spannungsintensitätsfaktoren kann durch ein Polynom 3. Grades angenähert werden.

$$K_1(t_1) = 3{,}933 \cdot 10^{-7} t_1^3 + 1{,}8441 \cdot 10^{-4} t_1^2 - 2{,}7747 \cdot 10^{-2} t_1 + 4{,}35$$

(3) Die Bild 5-9 entsprechenden Ergebnisse für geometrische Untergrenzen sind in Bild 5-15 angegeben.

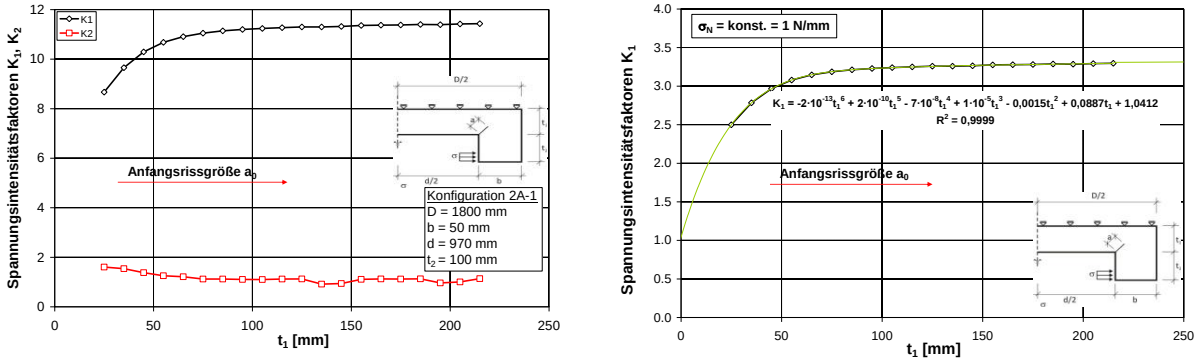


Bild 5-15: K-Werte für geometrische Obergrenzen für Beanspruchungsvariante 2A-1 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(4) Der Verlauf der auf die Einheitsspannung σ_{HS} = 1 N/mm² normierte Spannungsintensitätsfaktoren in Bild 5-15 (rechts) kann durch ein Polynom 6. Grades angenähert werden.

$$K_1(t_1) = -2{,}1617 \cdot 10^{-13} t_1^6 + 1{,}9489 \cdot 10^{-10} t_1^5 - 7{,}2084 \cdot 10^{-8} t_1^4 + 1{,}4030 \cdot 10^{-5} t_1^3 - 1{,}5232 \cdot 10^{-3} t_1^2 + 8{,}8669 \cdot 10^{-2} t_1 + 1{,}0412$$

(5) Zur Bestätigung der Unempfindlichkeit wurde auch der Einfluss der Lagerplattenbreite D bei konstanter Dicke t_1 untersucht. Das Ergebnis in Bild 5-16 zeigt, dass die Lagerplattenbreite D keinen signifikanten Einfluss auf die K-Werte hat.

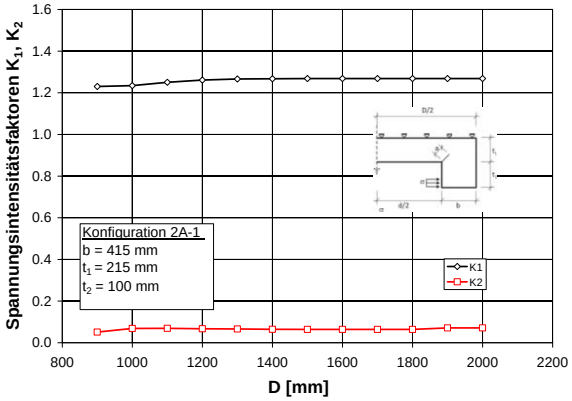


Bild 5-16: Einfluss der Lagerplattenbreite D, bei konstanten anderen Abmessung auf die K-Werte bei Beanspruchungsvariante 2A-1

(6) Für die Belastungsvariante 2A-2 sind die Bild 5-10 entsprechenden Ergebnisse in Bild 5-17 dargestellt.

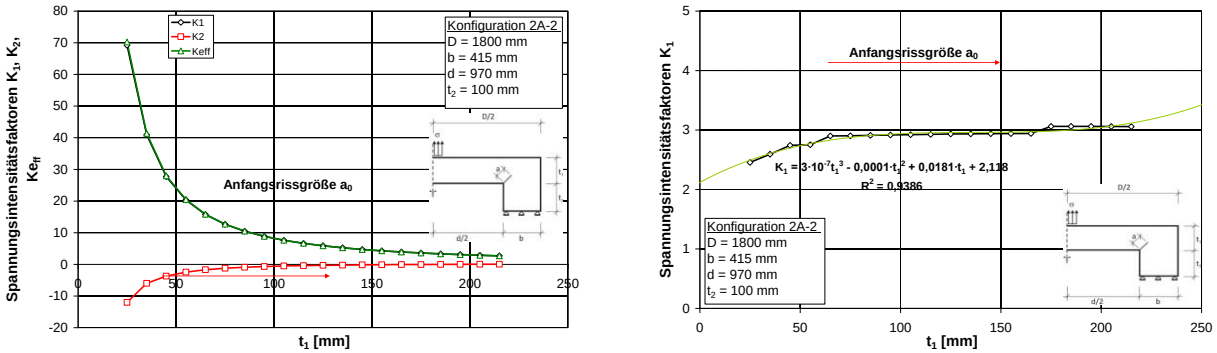


Bild 5-17: K-Werte für geometrische Obergrenzen für Beanspruchungsvariante 2A-2 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(7) Die Annäherung des K-Verlaufs in Bild 5-17 (rechts) erfolgt durch ein Polynom 3. Grades.

$$K_1 = 3{,}1686 \cdot 10^{-7} \cdot t_1^{\,3} - 1{,}3076 \cdot 10^{-4} \cdot t_1^{\,2} + 1{,}8109 \cdot 10^{-2} \cdot t_1 + 2{,}1180$$

(8) Für die Untergrenze der geometrischen Abmessungen sind die Bild 5-11 entsprechenden Ergebnisse in Bild 5-18 dargestellt.

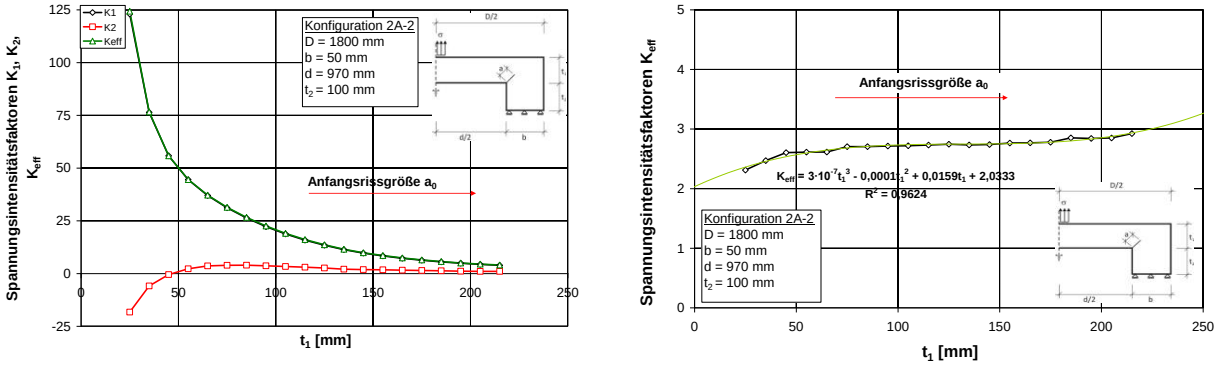


Bild 5-18: K-Werte für geometrische Untergrenzen für Beanspruchungsvariante 2A-2 (rechtes Bild für Normierung auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm²)

(9) Die Annäherung des Kurvenverlaufs in Bild 5-18 erfolgt durch ein Polynom 3. Grades.

$$K_{eff} = 3{,}0192 \cdot 10^{-7} t_1^{\,3} - 0{,}1949 \cdot 10^{-4} \cdot t_1^{\,2} + 1{,}5920 \cdot 10^{-2} \cdot t_1 + 2{,}0333$$

(10) Maßgeblich ist hier der Wert K_{eff}.

(11) Anders als in Bild 5-16 ist die Lagerplattenbreite D bei der Beanspruchungsvariante A2-2 von erheblichem Einfluss, wie das Bild 5-19 deutlich macht.

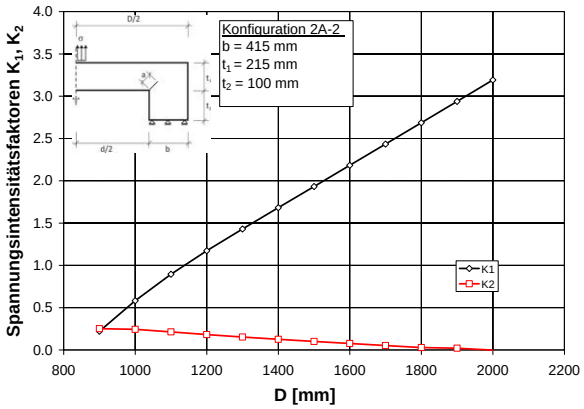


Bild 5-19: Einfluss der Lagerplattenbreite D bei konstanten anderen Abmessungen auf die K-Werte bei Beanspruchungsvariante 2A-2

5.3.4 Sprödbruchnachweise

(1) Die Sprödbruchnachweise erfolgten wie in Abschnitt 5.2 für die Beanspruchungsvariante 2A-1 in Tabelle 5-7 und für die Beanspruchungsvariante 2A-2 in Tabelle 5-8.

(2) Die Ergebnisse der Berechnungen in Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8 können für die Beanspruchungsvariante 2A-1 für die maximale Erzeugnisdicke nach Tabelle 5-9 und für die Beanspruchungsvariante 2A-2 nach Tabelle 5-10 hergeleitet werden.

Tabelle 5-7: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Beanspruchungsvariante 2A-1)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig)*

Tabelle 5-8: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Beanspruchungsvariante 2A-2)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	240

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig)*

(3) Die für die Normenregelung maßgebenden Werte gehen aus Tabelle 5-8 hervor.

Tabelle 5-9: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2A-1 für Bauteil Nr. 2A – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{dy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{Z7J}	ΔT_{Z7J}	ΔT_R	T_{mat}	ΔT_τ	ΔT_σ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	3.65	0.75	266.3	100	1.61	25	973	365	1339	42.3	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1619	51.2	25	62.1	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**19**	**-33**	no risk
2	1.0	3.59	0.75	266.3	100	1.78	35	956	359	1314	41.6	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1589	50.2	35	58.1	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**15**	**-26**	no risk
3	1.0	3.45	0.75	266.3	100	1.90	45	920	345	1265	40.0	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1529	48.4	45	58.2	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**15**	**-19**	no risk
4	1.0	3.33	0.75	266.3	100	2.00	55	888	333	1221	38.6	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1476	46.7	55	59.1	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**16**	**-16**	no risk
5	1.0	3.18	0.75	266.3	100	2.09	65	848	318	1166	36.9	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1410	44.6	65	62.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**19**	**-14**	no risk
6	1.0	3.19	0.75	266.3	100	2.16	75	848	319	1167	36.9	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1412	44.6	75	59.2	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**16**	**-13**	no risk
7	1.0	3.21	0.75	266.3	100	2.22	85	855	321	1176	37.2	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1424	45.0	85	55.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**13**	**-13**	no risk
8	1.0	3.23	0.75	266.3	100	2.28	95	860	323	1183	37.4	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1433	45.3	95	52.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**10**	**-13**	no risk
9	1.0	3.24	0.75	266.3	100	2.33	105	863	324	1187	37.5	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1439	45.5	105	50.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**8**	**-13**	no risk
10	1.0	3.25	0.75	266.3	100	2.37	115	865	325	1190	37.6	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1444	45.7	115	48.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
11	1.0	3.26	0.75	266.3	100	2.41	125	867	326	1193	37.7	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1449	45.8	125	46.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
12	1.0	3.26	0.75	266.3	100	2.45	135	867	326	1193	37.7	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1450	45.8	135	45.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
13	1.0	3.26	0.75	266.3	100	2.49	145	869	326	1195	37.8	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1454	46.0	145	43.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk
14	1.0	3.28	0.75	266.3	100	2.52	155	872	328	1200	37.9	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1460	46.2	155	41.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-1**	**-12**	no risk
15	1.0	3.28	0.75	266.3	100	2.55	165	873	328	1201	38.0	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1463	46.3	165	40.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-2**	**-12**	no risk
16	1.0	3.28	0.75	266.3	100	2.58	175	874	328	1202	38.0	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1465	46.3	175	39.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-4**	**-12**	no risk
17	1.0	3.29	0.75	266.3	100	2.61	185	875	329	1204	38.1	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1469	46.5	185	38.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-5**	**-12**	no risk
18	1.0	3.28	0.75	266.3	100	2.64	195	874	328	1203	38.0	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1469	46.5	195	37.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-6**	**-12**	no risk
19	1.0	3.29	0.75	266.3	100	2.66	205	877	329	1206	38.1	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1475	46.6	205	35.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-7**	**-12**	no risk
20	1.0	3.30	0.75	266.3	100	2.69	215	877	330	1207	38.2	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1477	46.7	215	34.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-8**	**-12**	no risk
21	1.0	3.30	0.75	266.3	100	2.71	225	879	330	1209	38.2	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1481	46.8	225	33.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-9**	**-12**	no risk
22	1.0	3.30	0.75	266.3	100	2.73	235	879	330	1209	38.2	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1482	46.9	235	33.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-10**	**-12**	no risk
23	1.0	3.30	0.75	266.3	100	2.75	245	879	330	1209	38.2	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1484	46.9	245	32.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk
23	1.0	3.30	0.75	266.3	100	2.76	250	879	330	1209	38.2	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1484	46.9	250	31.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk

Tabelle 5-10: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2A-2 für Bauteil Nr. 2A – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -40 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.455	0.75	266.3	100	1.61	25	654	245	899	28.4	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1088	34.4	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-35	-5	0	0	**87**	**-33**	no risk
2	1.0	2.592	0.75	266.3	100	1.78	35	690	259	949	30.0	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1148	36.3	35	114.6	27	-20	-20	12	7	-35	-5	0	0	**82**	**-26**	no risk
3	1.0	2.743	0.75	266.3	100	1.90	45	730	274	1004	31.8	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1214	38.4	45	94.8	27	-20	-20	19	7	-35	-5	0	0	**62**	**-19**	no risk
4	1.0	2.752	0.75	266.3	100	2.00	55	733	275	1008	31.9	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1218	38.5	55	89.3	27	-20	-20	22	7	-35	-5	0	0	**56**	**-16**	no risk
5	1.0	2.899	0.75	266.3	100	2.09	65	772	290	1062	33.6	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1284	40.6	65	76.3	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**43**	**-14**	no risk
6	1.0	2.904	0.75	266.3	100	2.16	75	773	290	1063	33.6	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1286	40.7	75	72.9	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**40**	**-13**	no risk
7	1.0	2.909	0.75	266.3	100	2.22	85	775	291	1066	33.7	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1290	40.8	85	70.0	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**37**	**-13**	no risk
8	1.0	2.916	0.75	266.3	100	2.28	95	776	292	1068	33.8	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1294	40.9	95	67.3	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**34**	**-13**	no risk
9	1.0	2.921	0.75	266.3	100	2.33	105	778	292	1070	33.8	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1297	41.0	105	64.9	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**32**	**-13**	no risk
10	1.0	2.926	0.75	266.3	100	2.37	115	779	293	1072	33.9	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1300	41.1	115	62.8	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**30**	**-12**	no risk
11	1.0	2.932	0.75	266.3	100	2.41	125	781	293	1074	34.0	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1304	41.2	125	60.8	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**28**	**-12**	no risk
12	1.0	2.936	0.75	266.3	100	2.45	135	782	294	1075	34.0	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1306	41.3	135	59.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**26**	**-12**	no risk
13	1.0	2.938	0.75	266.3	100	2.49	145	782	294	1076	34.0	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1308	41.4	145	57.5	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**24**	**-12**	no risk
14	1.0	2.940	0.75	266.3	100	2.52	155	783	294	1077	34.1	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1310	41.4	155	56.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**23**	**-12**	no risk
15	1.0	2.942	0.75	266.3	100	2.55	165	783	294	1077	34.1	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1313	41.5	165	54.7	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**22**	**-12**	no risk
16	1.0	3.061	0.75	266.3	100	2.58	175	815	306	1121	35.5	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1367	43.2	175	48.1	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
17	1.0	3.061	0.75	266.3	100	2.61	185	815	306	1121	35.5	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1368	43.3	185	47.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**14**	**-12**	no risk
18	1.0	3.060	0.75	266.3	100	2.64	195	815	306	1121	35.4	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1369	43.3	195	45.9	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
19	1.0	3.058	0.75	266.3	100	2.66	205	814	306	1120	35.4	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1370	43.3	205	45.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**12**	**-12**	no risk
20	1.0	3.057	0.75	266.3	100	2.69	215	814	306	1120	35.4	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1370	43.3	215	44.1	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
21	1.0	3.182	0.75	266.3	100	2.71	225	847	318	1165	36.9	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1428	45.2	225	38.2	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-5**	**-12**	no risk
22	1.0	3.265	0.75	266.3	100	2.73	235	869	326	1196	37.8	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1466	46.4	235	34.3	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-9**	**-12**	no risk
23	1.0	3.313	0.75	266.3	100	2.74	240	882	331	1213	38.4	355	295	292	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1489	47.1	240	32.2	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk
24	1.0	3.366	0.75	266.3	100	2.75	245	896	337	1233	39.0	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1513	47.8	245	30.1	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-13**	**-12**	risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.455	0.75	266.3	100	1.61	25	654	245	899	28.4	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1088	34.4	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**77**	**-33**	no risk
2	1.0	2.592	0.75	266.3	100	1.78	35	690	259	949	30.0	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1148	36.3	35	114.6	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**72**	**-26**	no risk
3	1.0	2.743	0.75	266.3	100	1.90	45	730	274	1004	31.8	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1214	38.4	45	94.8	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**52**	**-19**	no risk
4	1.0	2.752	0.75	266.3	100	2.00	55	733	275	1008	31.9	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1218	38.5	55	89.3	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**46**	**-16**	no risk
5	1.0	2.899	0.75	266.3	100	2.09	65	772	290	1062	33.6	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1284	40.6	65	76.3	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**33**	**-14**	no risk
6	1.0	2.904	0.75	266.3	100	2.16	75	773	290	1063	33.6	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1286	40.7	75	72.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**30**	**-13**	no risk
7	1.0	2.909	0.75	266.3	100	2.22	85	775	291	1066	33.7	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1290	40.8	85	70.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**27**	**-13**	no risk
8	1.0	2.916	0.75	266.3	100	2.28	95	776	292	1068	33.8	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1294	40.9	95	67.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**24**	**-13**	no risk
9	1.0	2.921	0.75	266.3	100	2.33	105	778	292	1070	33.8	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1297	41.0	105	64.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**22**	**-13**	no risk
10	1.0	2.926	0.75	266.3	100	2.37	115	779	293	1072	33.9	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1300	41.1	115	62.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**20**	**-12**	no risk
11	1.0	2.932	0.75	266.3	100	2.41	125	781	293	1074	34.0	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1304	41.2	125	60.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**18**	**-12**	no risk
12	1.0	2.936	0.75	266.3	100	2.45	135	782	294	1075	34.0	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1306	41.3	135	59.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**16**	**-12**	no risk
13	1.0	2.938	0.75	266.3	100	2.49	145	782	294	1076	34.0	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1308	41.4	145	57.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**14**	**-12**	no risk
14	1.0	2.940	0.75	266.3	100	2.52	155	783	294	1077	34.0	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1310	41.4	155	56.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
15	1.0	2.942	0.75	266.3	100	2.55	165	783	294	1077	34.1	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1313	41.5	165	54.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**12**	**-12**	no risk
16	1.0	3.061	0.75	266.3	100	2.58	175	815	306	1121	35.5	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1367	43.2	175	48.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
17	1.0	3.061	0.75	266.3	100	2.61	185	815	306	1121	35.5	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1368	43.3	185	47.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
18	1.0	3.060	0.75	266.3	100	2.64	195	815	306	1121	35.4	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1369	43.3	195	45.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
19	1.0	3.058	0.75	266.3	100	2.66	205	814	306	1120	35.4	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1370	43.3	205	45.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
20	1.0	3.057	0.75	266.3	100	2.69	215	814	306	1120	35.4	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.84	1370	43.3	215	44.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk
21	1.0	3.182	0.75	266.3	100	2.71	225	847	318	1165	36.9	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1428	45.2	225	38.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-5**	**-12**	no risk
22	1.0	3.265	0.75	266.3	100	2.73	235	869	326	1196	37.8	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1466	46.4	235	34.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-9**	**-12**	no risk
23	1.0	3.313	0.75	266.3	100	2.74	240	882	331	1213	38.4	355	295	292	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1489	47.1	240	32.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk
24	1.0	3.366	0.75	266.3	100	2.75	245	896	337	1233	39.0	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1513	47.8	245	30.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-13**	**-12**	risk

5.4 Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil des Referenzlagers B (geschweißte Variante)

5.4.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen

(1) Bauteil Nr. 2B entspricht in seiner Funktionsweise dem Lageroberteil 2A, nur das es sich hierbei um einen zusammengesetzten achsensymmetrischen Querschnitt handelt, der gemäß Bild 5-20 verschweißt wird.

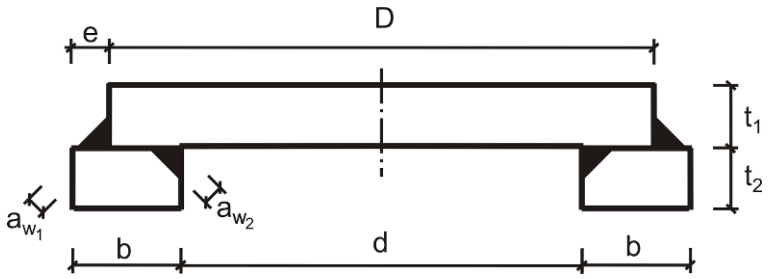


Bild 5-20: Bauteil 2B: Lageroberteil (Gleitplatte + Seitenführung) des Referenzlagers B

(2) Tabelle 5-11 zeigt die geometrischen Abmessungen.

Tabelle 5-11: Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Detail 2B

t_1 [mm]	t_2 [mm]	D [mm]	b [mm]	a_w [mm]
55 - 285	55 - 170	440 – 2580	55 - 570	12 - 42

(3) Analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3 wurden jeweils zwei unterschiedliche Belastungsvarianten mit horizontalem bzw. vertikalem Lastangriff untersucht.

(4) Potentielle Rissentstehungsorte sind die Unstetigkeiten an den Schweißnahtübergängen.

(5) Für die Begrenzung der Blechdicke t_2 werden die Beanspruchungsvarianten 2B-1 und 2B-2 herangezogen. Dazu wurde der Riss in den angeschweißten Führungsschienen gemäß Bild 5-21 angenommen. Die Risslänge in diesen Varianten hängt von der Dicke t_2 der Führungsschienen ab. Relevante Zugspannungen sind unter realen Bedingungen in diesem Bereich nicht zu erwarten.

Beanspruchungsvariante 2B-1 **Beanspruchungsvariante 2B-2**

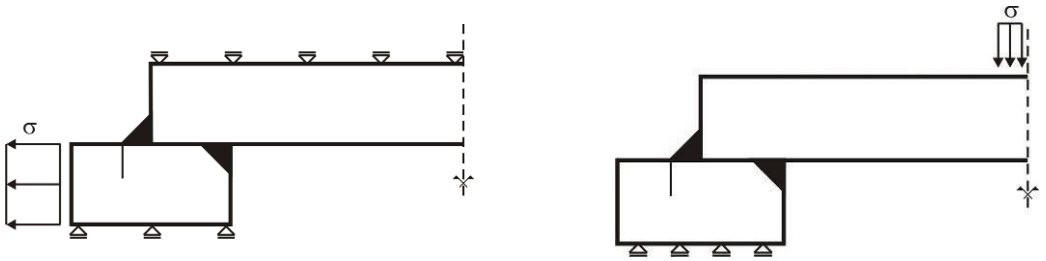


Bild 5-21: Belastungsvarianten am Detail 2B: Variante 2B-1 - Horizontalbelastung (links) und Variante 2B-2 - Vertikalbelastung (rechts) für die Begrenzung der Blechdicke t_2

(6) Für die Begrenzung der Plattendicke t_1 werden die Modelle mit den Beanspruchungsvarianten 2B-3, 2B-4, 2B-5 und 2B-6 herangezogen.

Die Rissanordnung in den Varianten 2B-3 und 2B-4 ist eher theoretischer Natur und kann Bild 5-22 entnommen werden. Die Risslänge in diesen Varianten hängt von der Dicke t_1 der La-

gerplatte ab. Zugspannungen sind ebenfalls in diesem Bereich unter realen Bedingungen nicht zu erwarten.

Beanspruchungsvariante 2B-3 **Beanspruchungsvariante 2B-4**

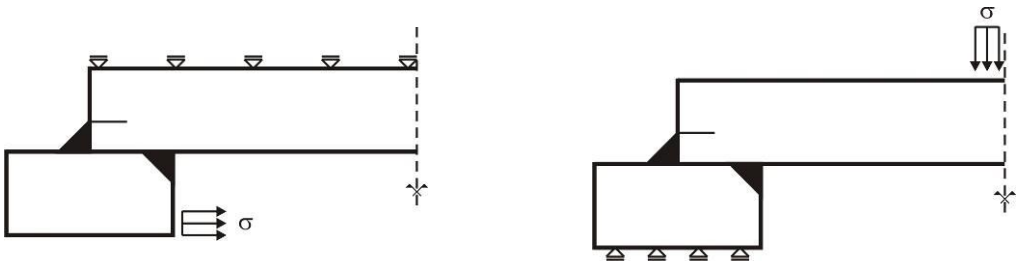


Bild 5-22: Belastungsvarianten am Detail 2B: Variante 2B-3 - Horizontalbelastung (links) und Variante 2B-4 - Vertikalbelastung (rechts) für die Begrenzung der Blechdicke t_1

(7) Weiterhin wird ein Riss in der einspringenden Ecke gemäß Bild 5-23 unterstellt. Für diese Risskonfiguration stellte sich in Voruntersuchungen ein 45°-Winkel kritischer heraus, als eine vertikale Orientierung. Die Risslänge in diesen Varianten hängt von der Dicke t_1 der Lagerplatte ab. Zugspannungen sind in diesem Bereich unter realen Bedingungen realistisch.

Beanspruchungsvariante 2B-5 **Beanspruchungsvariante 2B-6**

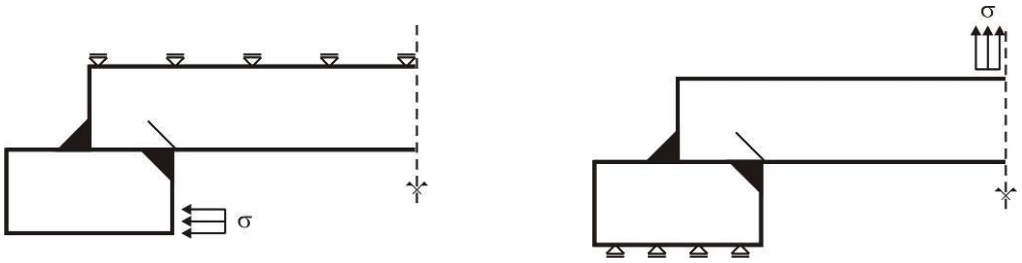


Bild 5-23: Belastungsvarianten am Detail 2B: Variante 2B-5 - Horizontalbelastung (links) und Variante 2B-6 - Vertikalbelastung (rechts) für die Begrenzung der Blechdicke t_1

(8) Auch hier erfolgten die Berechnungen an zwei unterschiedlichen Konfigurationen der Lagergeometrie gemäß Tabelle 5-12 bei Variation der Größe t_2 sowie gemäß Tabelle 5-13 bei Variation der Größe t_1.

Der geometrische Einfluss der Schweißnaht auf die Sprödbruchgefahr ändert sich nur geringfügig mit zunehmender Dicke. Für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen wurden auf der sicheren Seite die Untersuchungen mit der größtmöglichen Schweißnaht von a_w = 42 mm durchgeführt. Für die Untersuchungen der Lager mit den Untergrenzen der geometrischen Abmessungen war dies nicht möglich. Hier wurde geometriebedingt eine Schweißnahtdicke von a_w = 16 mm angesetzt.

Tabelle 5-12: Ober- und Untergrenzen der geometrischen Abmessungen für Bauteil 2B zur Ermittlung der Bleckdickenbegrenzung t_2

Obergrenzen		Untergrenzen	
t_1 [mm]	285	t_1 [mm]	55
t_2 [mm]	50-200	t_2 [mm]	50 – 200
D [mm]	2580	D [mm]	2580
d [mm]	1980	d [mm]	2525
b [mm]	570	b [mm]	55
a_w [mm]	42	a_w [mm]	16

Tabelle 5-13: Ober- und Untergrenzen der geometrischen Abmessungen für Bauteil 2B zur Ermittlung der Bleckdickenbegrenzung t_1

Obergrenzen		Untergrenzen	
t_1 [mm]	55 – 285	t_1 [mm]	55 – 285
t_2 [mm]	170	t_2 [mm]	170
D [mm]	2580	D [mm]	2580
d [mm]	1980	d [mm]	2525
b [mm]	570	b [mm]	55
a_w [mm]	42	a_w [mm]	16

(9) Exemplarisch werden für die unterschiedlichen Rissvarianten Ausschnitte aus den FE-Modellen sowie die zugehörigen Verformungsfiguren und Rissöffnungen gezeigt, Bild 5-24 - Bild 5-26.

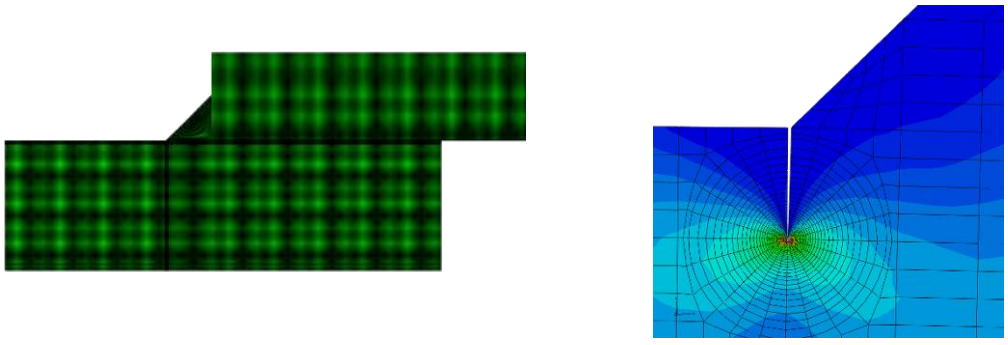


Bild 5-24: Ausschnitt aus dem FE-Modell (links) und Ausschnitt Rissöffnung (rechts), Variante 2B-1 und Variante 2B-2

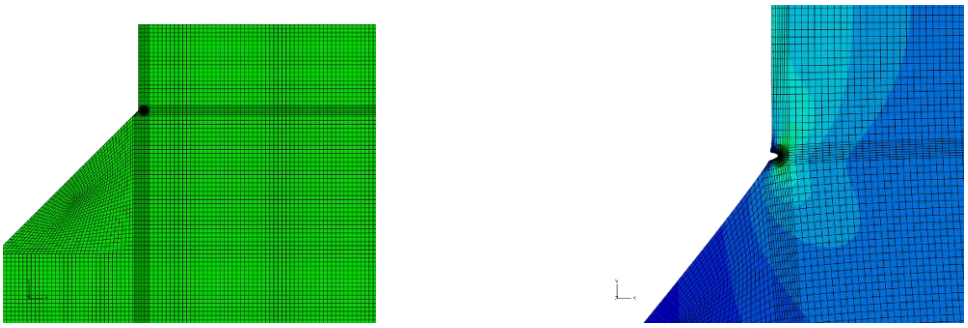


Bild 5-25: Ausschnitt aus dem FE-Modell (links) und Ausschnitt Rissöffnung (rechts), Variante 2B-3 und Variante 2B-4

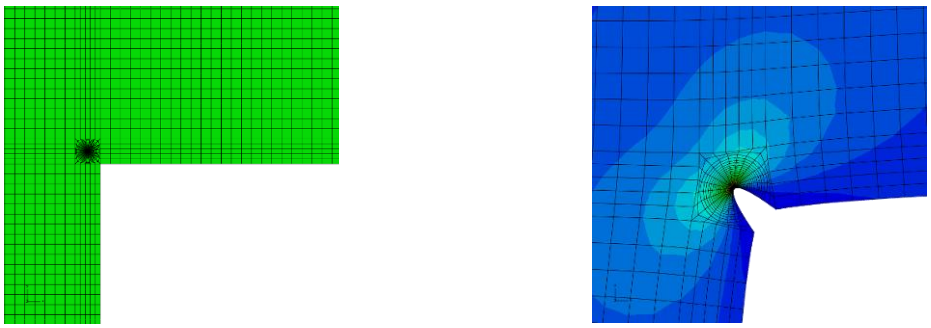


Bild 5-26: Ausschnitt aus dem FE-Modell (links) und Ausschnitt Rissöffnung (rechts), Variante 2B-5 und Variante 2B-6

5.4.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Für die Belastungsvariante 2B-1 ist die für den Sprödbruchnachweis erforderlichen Spannung σ_{HS} die Spannung, die im FE-Modell als Belastung aufgebracht wurde.

(2) Für die Belastungsvariante 2B-2 zeigt Bild 5-27, links, die linear ansteigende Hot-Spot-Spannung für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen bei zunehmender Dicke t_2 der Seitenführung.

(3) Der gegenteilige Verlauf der Hot-Spot-Spannungen ist in Bild 5-27, rechts, für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen gezeigt. Hier nehmen die Hot-Spot-Spannungen mit zunehmender Dicke t_2 der Seitenführungen linear ab.

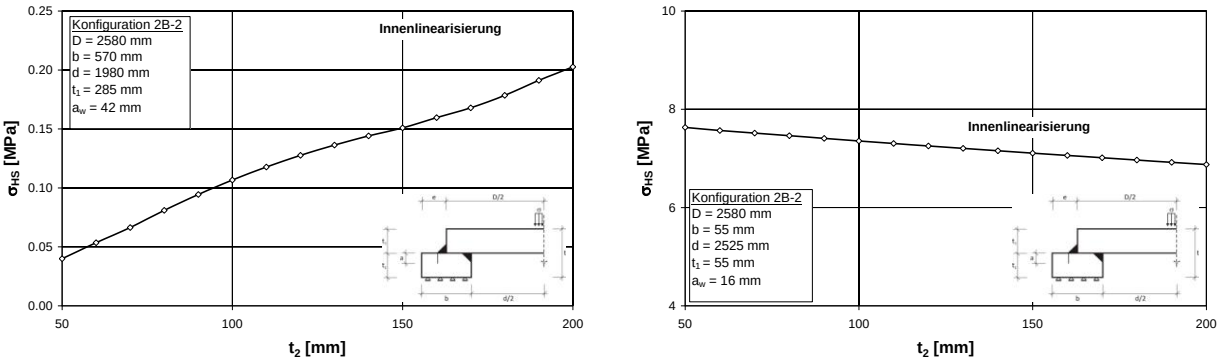


Bild 5-27: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für Belastungsvariante 2B-2 - Vertikalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

(4) Für die Belastungsvariante 2B-3 zeigt Bild 5-28, links, den Verlauf der Hot-Spot-Spannungen bei Variation der Blechdicke t_1 für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen. Es ist festzustellen, dass die Hot-Spot-Spannungen relativ gering ausfallen und für große t_1 abfallen.

(5) Bild 5-28, rechts, zeigt identisches Verhalten für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Für $t_1 > 160$ mm kann der weitere Verlauf linear approximiert werden.

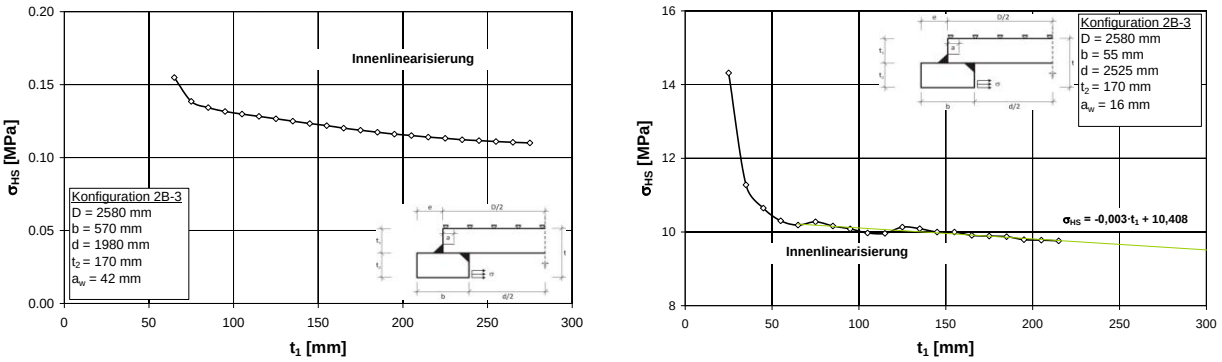


Bild 5-28: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für Belastungsvariante 2B-3 - Horizontalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

(6) Für die Belastungsvariante 2B-4 nehmen die Hot-Spot-Spannungen in Bild 5-29, links, für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen mit zunehmender Lagerplattendicke t_1 zu.

(7) Bild 5-29, rechts, zeigt den entsprechenden Verlauf der Hot-Spot-Spannungen für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Im Bereich zwischen 25 mm ≤ t_1 ≤ 55 mm nehmen

die Hot-Spot-Spannungen zunächst stark zu. Für t_1 > 55 mm nehmen die Hot-Spot-Spannungen exponentiell ab.

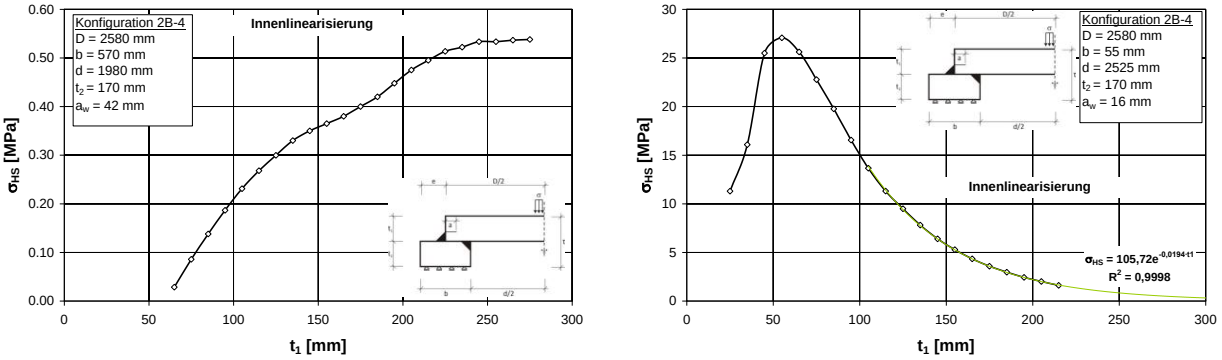


Bild 5-29: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für Belastungsvariante 2B-4 - Vertikalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

(8) Bei der Belastungsvariante 2B-5 zeigt Bild 5-30, links, die Hot-Spot-Spannung für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen.

(9) Bild 5-30, rechts, zeigt den Verlauf der Hot-Spot-Spannungen für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen.

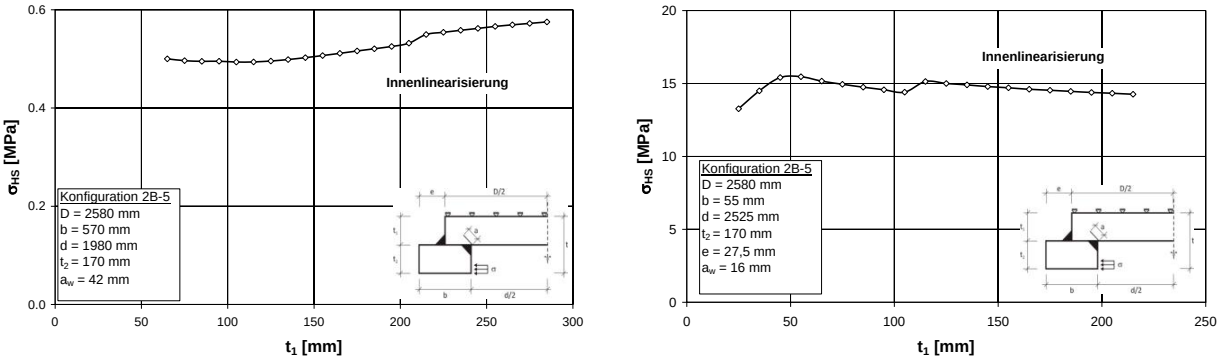


Bild 5-30: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für Beanspruchungsvariante 2B-5 - Horizontalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

(10) Bei Belastungsvariante 2B-6 zeigt Bild 5-31, links, den stetig fallenden Verlauf der Hot-Spot-Spannungen für große Plattendicken t_1 für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen.

(11) Die Hot-Spot-Spannungen gemäß Bild 5-31, rechts, zeigen für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen einen stetigen Abfall für große Plattendicken t_1.

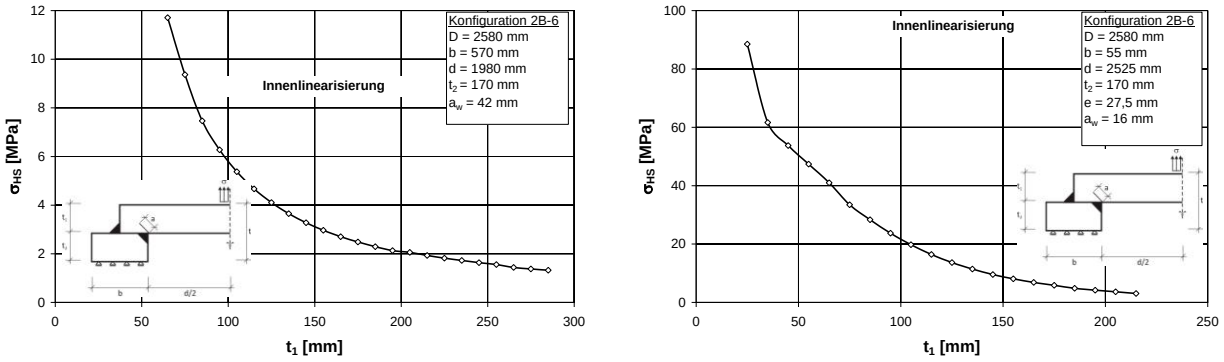


Bild 5-31: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für Belastungsvariante 2B-6 - Vertikalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

5.4.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Bei Belastungsvariante 2B-1 zeigt Bild 5-32 die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen einen nahezu linearen Anstieg der bruchmechanischen Beanspruchung für große Dicken t_2 der Seitenführungen. Der Einfluss aus Modus 2-Beanspruchung bleibt hier vernachlässigbar klein.

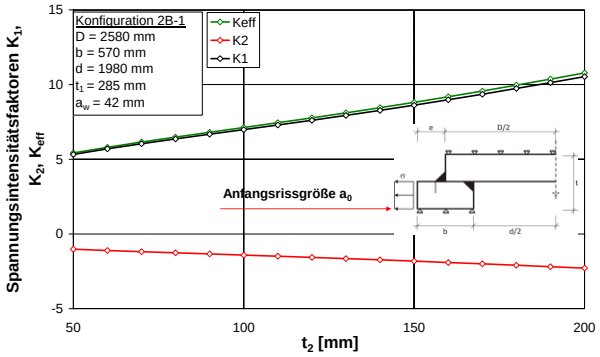


Bild 5-32: K-Wert für die Belastungsvariante 2B-1 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_2: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot

(2) Bild 5-33 zeigt den Verlauf der K-Werte infolge der Einheitsbeanspruchung für die Beanspruchungsvariante 2B-1 und die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Aufgrund dieser Geometrie und den gewählten Lagerungsbedingungen ist ein Abfall der K_1-Werte bei zunehmender Dicke t_2 der Seitenführungen festzustellen. Die so entstehende große Verformung für große t_2-Werte bewirkt einen zunehmenden Einfluss der Modus-2-Beanspruchung.

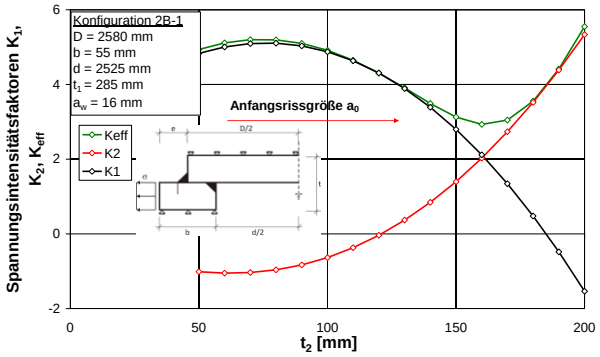


Bild 5-33: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-1 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_2: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot

(3) Bei Belastungsvariante 2B-2 bewirkt eine Zunahme der Dicke der Seitenführungen t_2 für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen in Bild 5-34, links, eine stetige Zunahme der K-Werte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Risse mit zunehmender Dicke t_2 ebenso größer werden.

(4) Bild 5-34, rechts, zeigt den Verlauf der effektiven K-Werte nach Normierung auf eine Hot-Spot-Spannung von 1 N/mm². Die bruchmechanische Beanspruchung wird mit zunehmender Dicke t_2 der Seitenführungen größer.

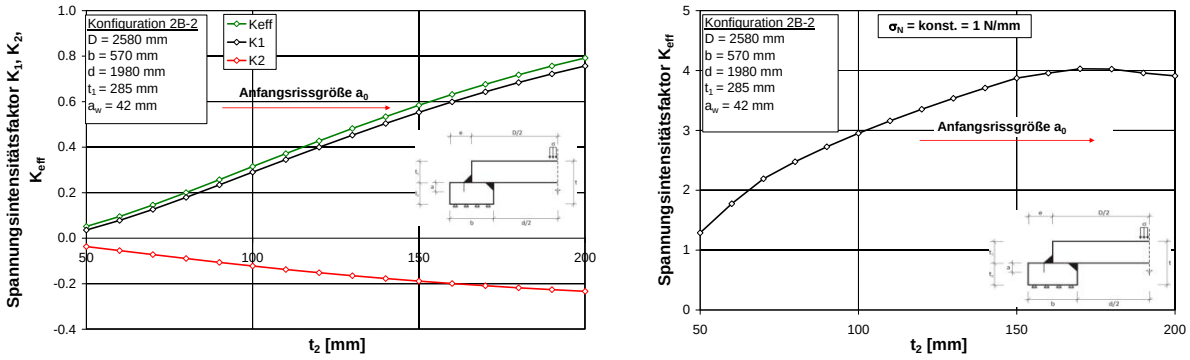


Bild 5-34: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-2 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_2: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(5) Die bruchmechanische Beanspruchung für die Beanspruchungsvariante 2B-2 bleibt für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen bei Variation der Blechdicke nahezu konstant, vgl. Bild 5-35, links. Maßgebend wird auch hier die effektive bruchmechanische Beanspruchung, die Modus 2-Banspruchung berücksichtigt.

(6) Nach Normierung der effektiven K-Werte ist in Bild 5-35, rechts, ein leichter Anstieg der Hot-Spot-Spannungen mit Zunahme der Dicken t_2 der Seitenführungen zu erkennen.

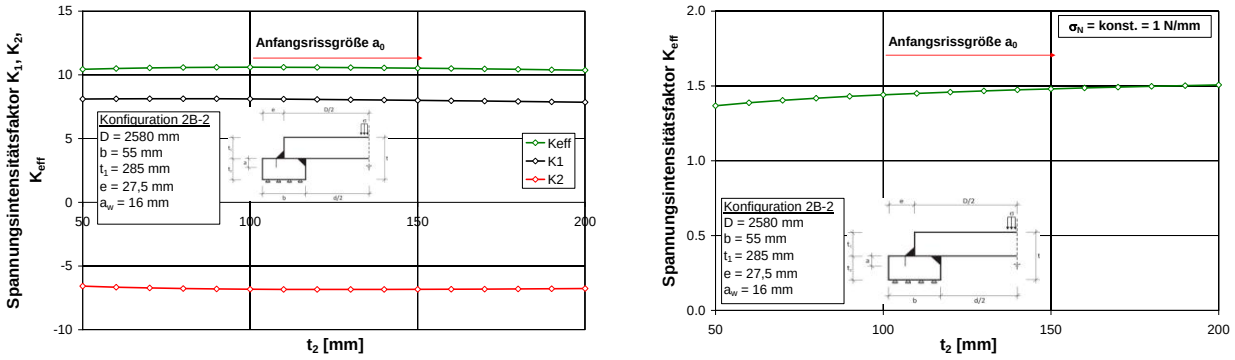


Bild 5-35: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-2 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_2: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(7) Bei Belastungsvariante 2B-3 erkannt man gemäß Bild 5-36, links, für die geometrischen Obergrenzen des Lagerdetails sehr schwach abnehmende K_1-Werte bei zunehmender Lagerplattendicke t_1.

(8) Normiert man die K-Werte an der potentiellen Rissstelle auf σ_{HS} = 1 N/mm² so ergibt sich der stetig ansteigende Verlauf für große t_1 gemäß Bild 5-36, rechts. Der Verlauf der Kurve kann für t_1 > 100 mm durch eine Potenzfunktion $K_{eff} = 3{,}1366 \cdot t_1^{0{,}0771}$ beschrieben werden. Es wurde dafür ein effektiver K-Wert berechnet, da die Modus 2-Beanspruchung hier nicht zu vernachlässigen ist.

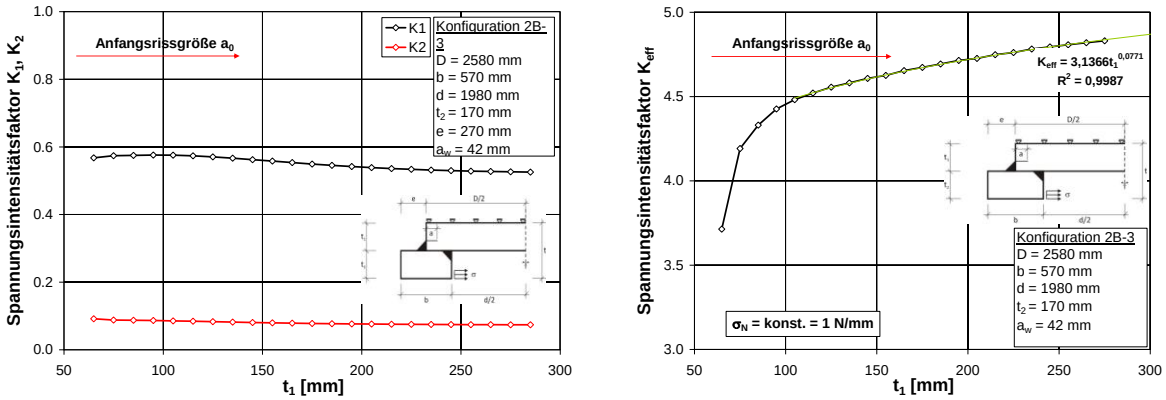


Bild 5-36: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-3 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(9) Qualitativ ähnliches Verhalten tritt für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen gemäß Bild 5-37, links, auf. Lediglich die K-Werte nehmen hier größere Werte an.

(10) Unter Berücksichtigung der effektiven bruchmechanischen Beanspruchung und nach Normierung kann ein stetig zunehmender Verlauf der K-Werte für größer werdende Plattendicken t_1 Bild 5-37, rechts, entnommen werden. Der Verlauf der Kurve kann durch die folgende Potenzfunktion beschrieben werden: $K_{eff} = 1{,}3661 \cdot t_1^{0{,}1052}$.

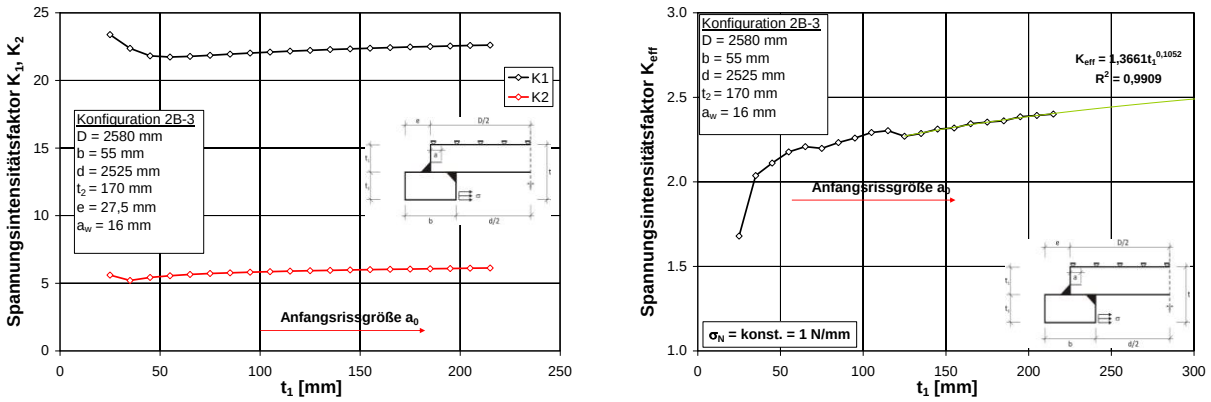


Bild 5-37: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-3 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(11) Für die Belastungsvariante 2B-4 nehmen die K-Werte für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen gemäß Bild 5-38, links, zu, erreichen einen Maximalwert für t_1 = 250 mm und zeigen leichte Tendenzen wieder gering abzufallen.

(12) Der für den Sprödbruchnachweis maßgebliche auf die Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm² normierte Verlauf der K-Werte ist Bild 5-38, rechts, zu entnehmen. Für t_1 = 180 mm wird ein Maximum erreicht, für t_1 > 180 mm nimmt die bruchmechanische Beanspruchung wieder ab. Ein Polynom 3. Grades beschreibt den Verlauf der Kurve im Bereich 190 mm ≤ t_1 ≤ 300 mm: $K_{eff} = -5{,}01730 \cdot 10^{-7} \cdot t_1^3 + 4{,}09628 \cdot 10^{-4} \cdot t_1^2 - 1{,}12831 \cdot 10^{-1} \cdot t_1 + 13{,}8884$.

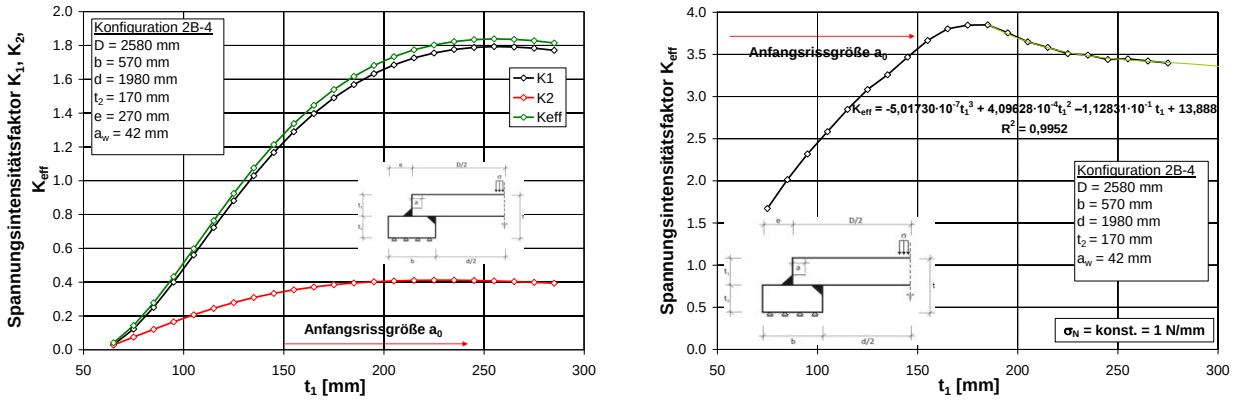


Bild 5-38: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-4 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(13) Für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen zeigt Bild 5-39, links, ein tendenziell identisches Verhalten. Besonders zu beachten ist hier jedoch der steile Anstieg für kleine Dicken t_1 und der starke Abfall der K-Werte fast zurück auf Null bei zunehmender Dicke $t_1 > 50$ mm.

(14) Bild 5-39, rechts, zeigt einen nahezu konstanten Verlauf der bruchmechanischen Beanspruchung für $t_1 \geq 55$ mm nach Normierung der K-Werte auf eine Hot-Spot-Spannung σ_{HS} = 1 N/mm². Für t_1 = 35 mm wird ein stark abweichendes Maximum erzielt.

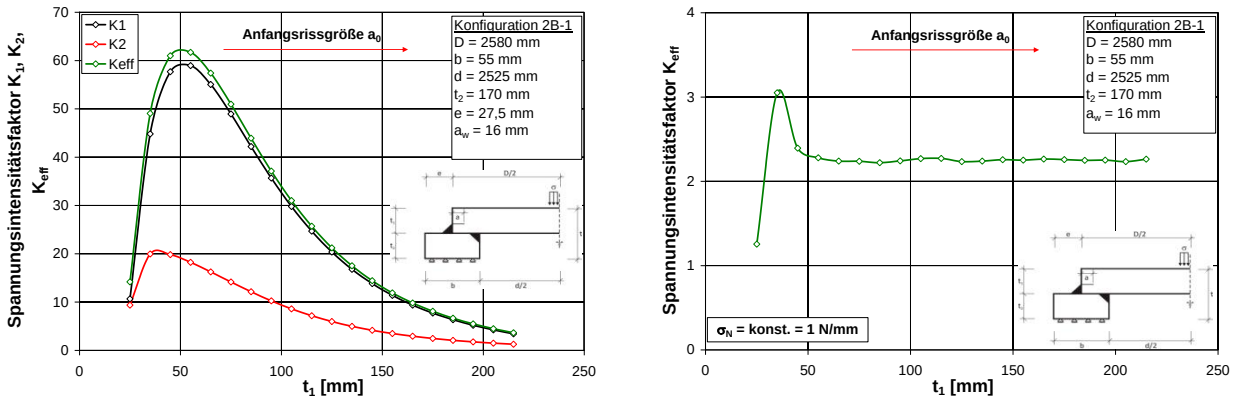


Bild 5-39: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-4 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(15) Bei der Belastungsvariante 2B-5 befindet sich der Riss in der einspringenden Ecke zwischen Lagerplatte und Führungsschiene. Der Verlauf der K-Werte stellt sich für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen bei zunehmender Lagerplattendicke t_1 gemäß Bild 5-40, links, dar. Die quantitative Veränderung der K-Werte bei konstanter äußerer Belastung ist gering.

(16) Ebenso ist ein nur geringer Einfluss der K-Werte in Abhängigkeit der Blechdicke t_1 nach Normierung der bruchmechanischen Beanspruchung zu verzeichnen. Die in Bild 5-40, rechts, dargestellten K-Werte bleiben nahezu konstant.

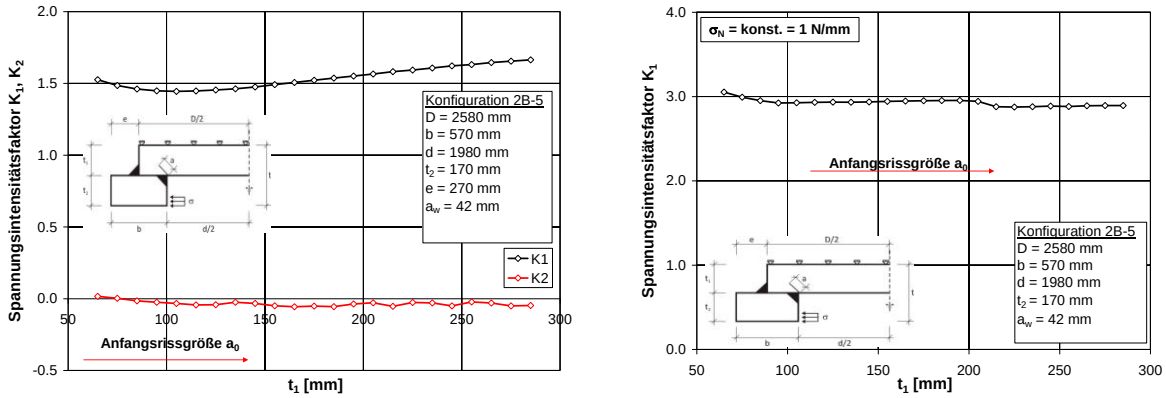


Bild 5-40: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-5 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(17) Bild 5-41, links, zeigt den monotonen Anstieg der K-Werte bei zunehmender Lagerplattendicke t_1 für die Belastungsvariante 2B-5 und die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Die K-Werte werden hier im Vergleich zu Bild 5-40, links, quantitativ größer, ändern sich jedoch nur geringfügig und bleiben eher auf demselben Level.

(18) Wird der K_1-Wert auf eine Beanspruchung von 1 N/mm² normiert, so ergibt sich der Verlauf nach Bild 5-41, rechts. Für t_1 > 215 mm kann dieser durch die Funktion $K_1 = 2{,}0352e^{0{,}0006t1}$ angenähert werden.

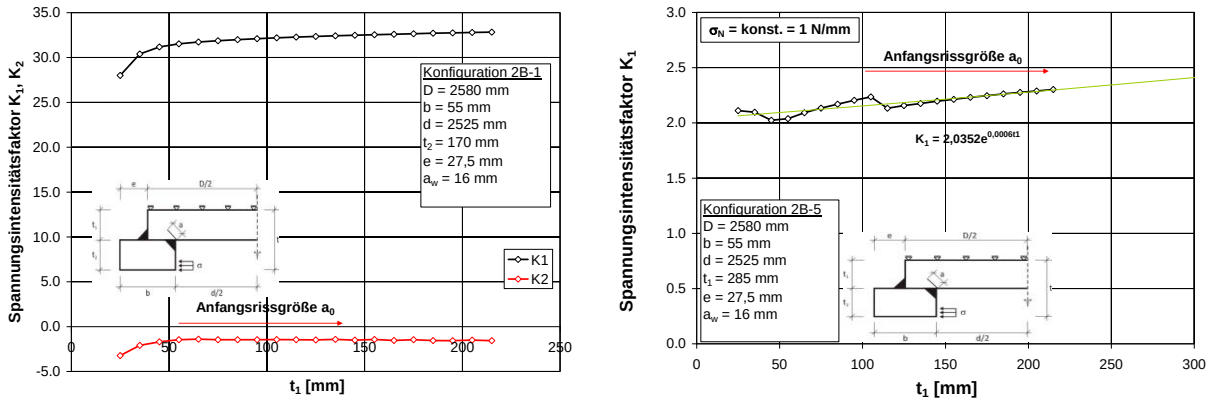


Bild 5-41: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-5 – Horizontalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(19) Erfolgt die Beanspruchung nach Variante 2B-6, nehmen die K-Werte für große t_1 für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen merklich nicht-linear ab, vgl. Bild 5-42, links.

(20) Nach Normierung auf eine Hot-Spot-Spannung von σ_{HS} = 1 N/mm² stellt sich ein nahezu konstanter Verlauf der K-Werte in Abhängigkeit der Plattendicke t_1 ein, vgl. Bild 5-42, rechts.

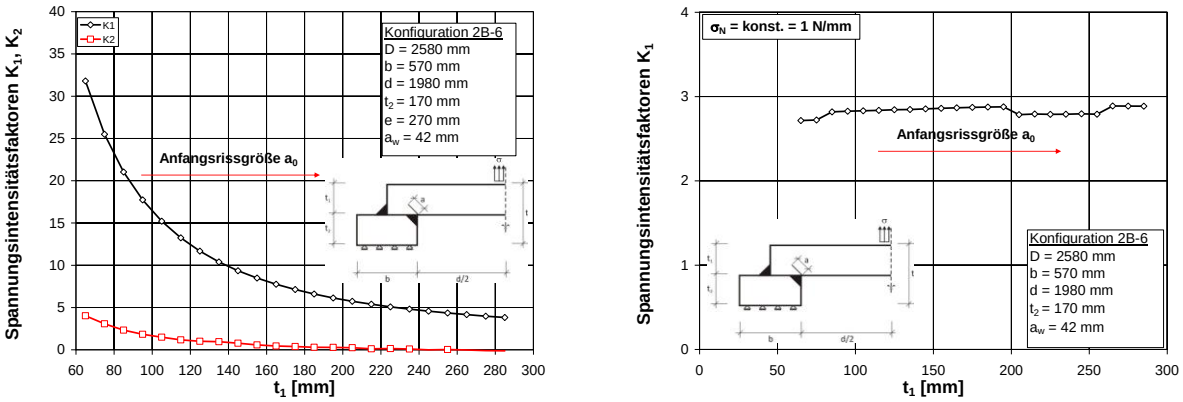


Bild 5-42: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-6 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

(21) Bild 5-43, links, zeigt qualitativ ähnliches Verhalten wie in Bild 5-42, links, für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen.

(22) Nach Normierung der bruchmechanischen Beanspruchung ergibt sich der Verlauf gemäß Bild 5-43, rechts, bei Variation der Plattendicke t_1. Für $t_1 > 215$ mm kann eine Exponentialfunktion den weiteren Anstieg der K-Werte ausreichend genau beschreiben:
$K_1 = 6{,}8975 \cdot 10^{-9} t_1^{\,3} - 5{,}8020 \cdot 10^{-7} t_1^{\,2} + 1{,}8563 \cdot 10^{-3} t_1 + 2{,}0015$.

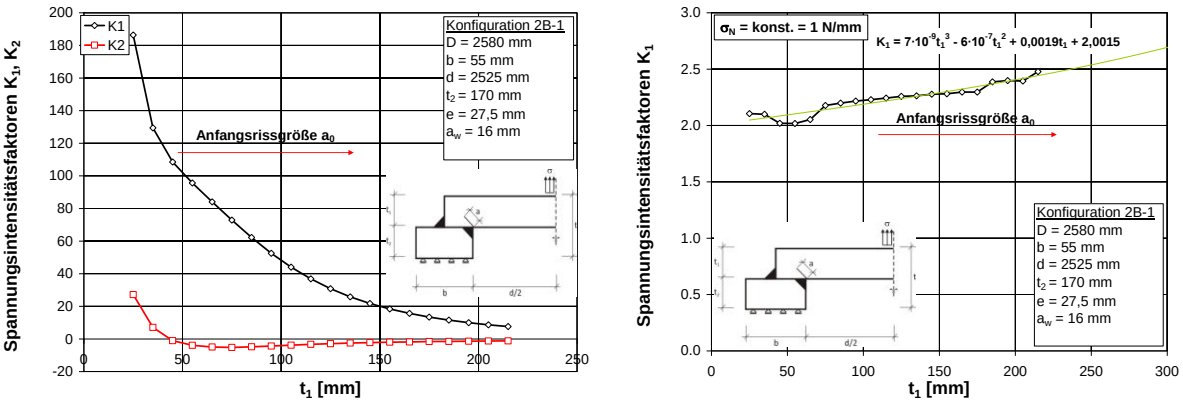


Bild 5-43: K-Werte für die Belastungsvariante 2B-6 – Vertikalbeanspruchung; Variation der Plattendicke t_1: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)

5.4.4 Sprödbruchnachweise

(1) Die Sprödbruchnachweise erfolgten tabellarisch mit der Zuordnung nach Tabelle 5-14.

Tabelle 5-14: Zuordnung von Beanspruchungsvarianten und Tabellenberechnung

Beanspruchungsvariante	Tabelle	Bemerkung
2B-1	Tabelle 5-21	Wegen Druck maximale Ausnutzung $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y + \sigma_S$
2B-2	Tabelle 5-22	Wegen Druck maximale Ausnutzung $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y + \sigma_S$
2B-3	Tabelle 5-23	Wegen Druck maximale Ausnutzung $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y + \sigma_S$
2B-4	Tabelle 5-24	Wegen Druck maximale Ausnutzung $\sigma_{Ed} = 0{,}25 \cdot f_y + \sigma_S$
2B-5	Tabelle 5-25	
2B-6	Tabelle 5-26	

(2) Die Ergebnisse der Tabellenrechnungen in Tabelle 5-21 bis Tabelle 5-26 sind in Tabelle 5-15 bis Tabelle 5-20 dargestellt.

Tabelle 5-15: Blechdickenbegrenzung t_2 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-2), Druckbeanspruchung

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	200*)	200	190	170	150	130

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 200$ mm zulässig)*

Tabelle 5-16: Blechdickenbegrenzung t_2 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-2), Druckbeanspruchung

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 200$ mm zulässig)*

Tabelle 5-17: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-3), Druckbeanspruchung

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 300 mm zulässig)*

Tabelle 5-18: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-4), Druckbeanspruchung

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 300 mm zulässig)*

Tabelle 5-19: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-5)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 300 mm zulässig)*

Tabelle 5-20: Blechdickenbegrenzung t_1 in [mm] für das Bauteil Lageroberteil (Konfiguration 2B-6)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig)*

Tabelle 5-21: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-1 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_μ/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.323	0.25	88.8	100	1.96	50	472	532	1005	31.8	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1069	33.8	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-45	-5	0	0	**77**	**-17**	no risk
2	1.0	5.694	0.25	88.8	100	2.05	60	505	569	1075	34.0	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1143	36.2	60	100.6	27	-20	-20	23	7	-45	-5	0	0	**58**	**-15**	no risk
3	1.0	6.036	0.25	88.8	100	2.12	70	536	604	1139	36.0	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1212	38.3	70	84.8	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**42**	**-14**	no risk
4	1.0	6.360	0.25	88.8	100	2.19	80	564	636	1200	38.0	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1278	40.4	80	72.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**30**	**-13**	no risk
5	1.0	6.673	0.25	88.8	100	2.25	90	592	667	1260	39.8	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1341	42.4	90	62.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**20**	**-13**	no risk
6	1.0	6.982	0.25	88.8	100	2.30	100	620	698	1318	41.7	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1404	44.4	100	54.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**12**	**-13**	no risk
7	1.0	7.293	0.25	88.8	100	2.35	110	647	729	1377	43.5	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1467	46.4	110	47.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**4**	**-13**	no risk
8	1.0	7.609	0.25	88.8	100	2.39	120	675	761	1436	45.4	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1531	48.4	120	40.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-2**	**-12**	no risk
9	1.0	7.934	0.25	88.8	100	2.43	130	704	793	1498	47.4	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1597	50.5	130	34.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-9**	**-12**	no risk
10	1.0	8.271	0.25	88.8	100	2.47	140	734	827	1561	49.4	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1666	52.7	140	28.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-14**	**-12**	risk

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -40 °C

Nr	σ_P	K1	σ_μ/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.323	0.25	88.8	100	1.96	50	472	532	1005	31.8	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1069	33.8	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-35	-5	0	0	**87**	**-17**	no risk
2	1.0	5.694	0.25	88.8	100	2.05	60	505	569	1075	34.0	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1143	36.2	60	100.6	27	-20	-20	23	7	-35	-5	0	0	**68**	**-15**	no risk
3	1.0	6.036	0.25	88.8	100	2.12	70	536	604	1139	36.0	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1212	38.3	70	84.8	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**52**	**-14**	no risk
4	1.0	6.360	0.25	88.8	100	2.19	80	564	636	1200	38.0	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1278	40.4	80	72.7	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**40**	**-13**	no risk
5	1.0	6.673	0.25	88.8	100	2.25	90	592	667	1260	39.8	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1341	42.4	90	62.9	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**30**	**-13**	no risk
6	1.0	6.982	0.25	88.8	100	2.30	100	620	698	1318	41.7	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1404	44.4	100	54.6	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**22**	**-13**	no risk
7	1.0	7.293	0.25	88.8	100	2.35	110	647	729	1377	43.5	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1467	46.4	110	47.3	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**14**	**-13**	no risk
8	1.0	7.609	0.25	88.8	100	2.39	120	675	761	1436	45.4	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1531	48.4	120	40.6	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
9	1.0	7.934	0.25	88.8	100	2.43	130	704	793	1498	47.4	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1597	50.5	130	34.5	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**1**	**-12**	no risk
10	1.0	8.271	0.25	88.8	100	2.47	140	734	827	1561	49.4	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1666	52.7	140	28.8	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-4**	**-12**	no risk
11	1.0	8.619	0.25	88.8	100	2.51	150	765	862	1627	51.4	355	318	312	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1737	54.9	150	23.4	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-10**	**-12**	no risk
12	1.0	8.980	0.25	88.8	100	2.54	160	797	898	1695	53.6	355	315	310	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1810	57.2	160	18.3	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-15**	**-12**	risk

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -30 °C

Nr	σ_P	K1	σ_μ/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.323	0.25	88.8	100	1.96	50	472	532	1005	31.8	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1069	33.8	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-25	-5	0	0	**97**	**-17**	no risk
2	1.0	5.694	0.25	88.8	100	2.05	60	505	569	1075	34.0	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1143	36.2	60	100.6	27	-20	-20	23	7	-25	-5	0	0	**78**	**-15**	no risk
3	1.0	6.036	0.25	88.8	100	2.12	70	536	604	1139	36.0	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1212	38.3	70	84.8	27	-20	-20	24	7	-25	-5	0	0	**62**	**-14**	no risk
4	1.0	6.360	0.25	88.8	100	2.19	80	564	636	1200	38.0	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1278	40.4	80	72.7	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**50**	**-13**	no risk
5	1.0	6.673	0.25	88.8	100	2.25	90	592	667	1260	39.8	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1341	42.4	90	62.9	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**40**	**-13**	no risk
6	1.0	6.982	0.25	88.8	100	2.30	100	620	698	1318	41.7	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1404	44.4	100	54.6	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**32**	**-13**	no risk
7	1.0	7.293	0.25	88.8	100	2.35	110	647	729	1377	43.5	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1467	46.4	110	47.3	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**24**	**-13**	no risk
8	1.0	7.609	0.25	88.8	100	2.39	120	675	761	1436	45.4	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1531	48.4	120	40.6	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**18**	**-12**	no risk
9	1.0	7.934	0.25	88.8	100	2.43	130	704	793	1498	47.4	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1597	50.5	130	34.5	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
10	1.0	8.271	0.25	88.8	100	2.47	140	734	827	1561	49.4	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1666	52.7	140	28.8	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
11	1.0	8.619	0.25	88.8	100	2.51	150	765	862	1627	51.4	355	318	312	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1737	54.9	150	23.4	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**0**	**-12**	no risk
12	1.0	8.980	0.25	88.8	100	2.54	160	797	898	1695	53.6	355	315	310	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1810	57.2	160	18.3	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-5**	**-12**	no risk
13	1.0	9.353	0.25	88.8	100	2.57	170	830	935	1765	55.8	355	313	308	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1887	59.7	170	13.5	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-10**	**-12**	no risk
14	1.0	9.736	0.25	88.8	100	2.60	180	864	974	1838	58.1	355	310	306	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	1965	62.1	180	8.9	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-14**	**-12**	risk

Tabelle 5-21: fortgesetzt

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -20 °C

Nr	σ_P	K1	σ_p/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_e	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.323	0.25	88.8	100	1.96	50	472	532	1005	31.8	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1069	33.8	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-15	-5	0	0	**107**	**-17**	no risk
2	1.0	5.694	0.25	88.8	100	2.05	60	505	569	1075	34.0	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1143	36.2	60	100.6	27	-20	-20	23	7	-15	-5	0	0	**88**	**-15**	no risk
3	1.0	6.036	0.25	88.8	100	2.12	70	536	604	1139	36.0	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1212	38.3	70	84.8	27	-20	-20	24	7	-15	-5	0	0	**72**	**-14**	no risk
4	1.0	6.360	0.25	88.8	100	2.19	80	564	636	1200	38.0	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1278	40.4	80	72.7	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**60**	**-13**	no risk
5	1.0	6.673	0.25	88.8	100	2.25	90	592	667	1260	39.8	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1341	42.4	90	62.9	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**50**	**-13**	no risk
6	1.0	6.982	0.25	88.8	100	2.30	100	620	698	1318	41.7	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1404	44.4	100	54.6	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**42**	**-13**	no risk
7	1.0	7.293	0.25	88.8	100	2.35	110	647	729	1377	43.5	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1467	46.4	110	47.3	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**34**	**-13**	no risk
8	1.0	7.609	0.25	88.8	100	2.39	120	675	761	1436	45.4	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1531	48.4	120	40.6	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**28**	**-12**	no risk
9	1.0	7.934	0.25	88.8	100	2.43	130	704	793	1498	47.4	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1597	50.5	130	34.5	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**21**	**-12**	no risk
10	1.0	8.271	0.25	88.8	100	2.47	140	734	827	1561	49.4	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1666	52.7	140	28.8	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**16**	**-12**	no risk
11	1.0	8.619	0.25	88.8	100	2.51	150	765	862	1627	51.4	355	318	312	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1737	54.9	150	23.4	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**10**	**-12**	no risk
12	1.0	8.980	0.25	88.8	100	2.54	160	797	898	1695	53.6	355	315	310	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1810	57.2	160	18.3	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
13	1.0	9.353	0.25	88.8	100	2.57	170	830	935	1765	55.8	355	313	308	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1887	59.7	170	13.5	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**0**	**-12**	no risk
14	1.0	9.736	0.25	88.8	100	2.60	180	864	974	1838	58.1	355	310	306	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	1965	62.1	180	8.9	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-4**	**-12**	no risk
15	1.0	10.130	0.25	88.8	100	2.62	190	899	1013	1912	60.5	355	308	303	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	2046	64.7	190	4.5	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-8**	**-12**	no risk
16	1.0	10.530	0.25	88.8	100	2.65	200	935	1053	1988	62.9	355	305	301	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	2128	67.3	200	0.4	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-13**	**-12**	risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -10 °C

Nr	σ_P	K1	σ_p/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_e	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.323	0.25	88.8	100	1.96	50	472	532	1005	31.8	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1069	33.8	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-5	-5	0	0	**117**	**-17**	no risk
2	1.0	5.694	0.25	88.8	100	2.05	60	505	569	1075	34.0	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	1143	36.2	60	100.6	27	-20	-20	23	7	-5	-5	0	0	**98**	**-15**	no risk
3	1.0	6.036	0.25	88.8	100	2.12	70	536	604	1139	36.0	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1212	38.3	70	84.8	27	-20	-20	24	7	-5	-5	0	0	**82**	**-14**	no risk
4	1.0	6.360	0.25	88.8	100	2.19	80	564	636	1200	38.0	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1278	40.4	80	72.7	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**70**	**-13**	no risk
5	1.0	6.673	0.25	88.8	100	2.25	90	592	667	1260	39.8	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	1341	42.4	90	62.9	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**60**	**-13**	no risk
6	1.0	6.982	0.25	88.8	100	2.30	100	620	698	1318	41.7	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1404	44.4	100	54.6	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**52**	**-13**	no risk
7	1.0	7.293	0.25	88.8	100	2.35	110	647	729	1377	43.5	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1467	46.4	110	47.3	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**44**	**-13**	no risk
8	1.0	7.609	0.25	88.8	100	2.39	120	675	761	1436	45.4	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	1531	48.4	120	40.6	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**38**	**-12**	no risk
9	1.0	7.934	0.25	88.8	100	2.43	130	704	793	1498	47.4	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1597	50.5	130	34.5	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**31**	**-12**	no risk
10	1.0	8.271	0.25	88.8	100	2.47	140	734	827	1561	49.4	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1666	52.7	140	28.8	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**26**	**-12**	no risk
11	1.0	8.619	0.25	88.8	100	2.51	150	765	862	1627	51.4	355	318	312	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	1737	54.9	150	23.4	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**20**	**-12**	no risk
12	1.0	8.980	0.25	88.8	100	2.54	160	797	898	1695	53.6	355	315	310	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1810	57.2	160	18.3	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
13	1.0	9.353	0.25	88.8	100	2.57	170	830	935	1765	55.8	355	313	308	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	1887	59.7	170	13.5	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**10**	**-12**	no risk
14	1.0	9.736	0.25	88.8	100	2.60	180	864	974	1838	58.1	355	310	306	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	1965	62.1	180	8.9	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
15	1.0	10.130	0.25	88.8	100	2.62	190	899	1013	1912	60.5	355	308	303	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	2046	64.7	190	4.5	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
16	1.0	10.530	0.25	88.8	100	2.65	200	935	1053	1988	62.9	355	305	301	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	2128	67.3	200	0.4	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-3**	**-12**	no risk

Tabelle 5-22: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-2 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_f	ΔT_σ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	1.37	0.25	88.8	100	1.96	50	121	137	258	8.2	355	343	329	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	275	8.7	50	120.0	27	-20	-20	21	7	-45	-5	0	0	**77**	**-17**	no risk
2	1.0	1.77	0.25	88.8	100	2.05	60	157	177	335	10.6	355	340	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	356	11.3	60	120.0	27	-20	-20	23	7	-45	-5	0	0	**77**	**-15**	no risk
3	1.0	2.19	0.25	88.8	100	2.12	70	195	219	414	13.1	355	338	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	440	13.9	70	120.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**77**	**-14**	no risk
4	1.0	2.48	0.25	88.8	100	2.19	80	220	248	467	14.8	355	335	326	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	497	15.7	80	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
5	1.0	2.72	0.25	88.8	100	2.25	90	242	272	514	16.3	355	333	324	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	548	17.3	90	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
6	1.0	2.95	0.25	88.8	100	2.30	100	262	295	557	17.6	355	330	322	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	593	18.8	100	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
7	1.0	3.16	0.25	88.8	100	2.35	110	280	316	596	18.9	355	328	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	635	20.1	110	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
8	1.0	3.35	0.25	88.8	100	2.39	120	298	335	633	20.0	355	325	319	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	675	21.3	120	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
9	1.0	3.53	0.25	88.8	100	2.43	130	314	353	667	21.1	355	323	316	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	712	22.5	130	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
10	1.0	3.71	0.25	88.8	100	2.47	140	329	371	700	22.1	355	320	314	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	747	23.6	140	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
11	1.0	3.87	0.25	88.8	100	2.51	150	344	387	731	23.1	355	318	312	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	780	24.7	150	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
12	1.0	3.96	0.25	88.8	100	2.54	160	351	396	747	23.6	355	315	310	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	798	25.2	160	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
13	1.0	4.03	0.25	88.8	100	2.57	170	357	403	760	24.0	355	313	308	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	812	25.7	170	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
14	1.0	4.02	0.25	88.8	100	2.60	180	357	402	759	24.0	355	310	306	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	812	25.7	180	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
15	1.0	3.96	0.25	88.8	100	2.62	190	351	396	747	23.6	355	308	303	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	799	25.3	190	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
16	1.0	3.91	0.25	88.8	100	2.65	200	347	391	738	23.3	355	305	301	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	790	25.0	200	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk

Tabelle 5-23: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-3 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_f	ΔT_δ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	3.71	0.25	88.8	100	2.09	65	330	371	701	22.2	355	339	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	746	23.6	65	120.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**77**	**-14**	no risk
2	1.0	4.19	0.25	88.8	100	2.16	75	372	419	791	25.0	355	336	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	842	26.6	75	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
3	1.0	4.33	0.25	88.8	100	2.22	85	384	433	817	25.8	355	334	325	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	870	27.5	85	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
4	1.0	4.43	0.25	88.8	100	2.28	95	393	443	835	26.4	355	331	323	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	890	28.1	95	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
5	1.0	4.48	0.25	88.8	100	2.33	105	398	448	846	26.7	355	329	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	901	28.5	105	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
6	1.0	4.52	0.25	88.8	100	2.37	115	401	452	853	27.0	355	326	320	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	909	28.8	115	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
7	1.0	4.56	0.25	88.8	100	2.41	125	404	456	860	27.2	355	324	317	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	917	29.0	125	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
8	1.0	4.58	0.25	88.8	100	2.45	135	407	458	865	27.3	355	321	315	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	922	29.2	135	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
9	1.0	4.61	0.25	88.8	100	2.49	145	409	461	870	27.5	355	319	313	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	928	29.4	145	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
10	1.0	4.63	0.25	88.8	100	2.52	155	411	463	873	27.6	355	316	311	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	932	29.5	155	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
11	1.0	4.65	0.25	88.8	100	2.55	165	413	465	878	27.8	355	314	309	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	938	29.7	165	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
12	1.0	4.67	0.25	88.8	100	2.58	175	415	467	882	27.9	355	311	307	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	943	29.8	175	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
13	1.0	4.69	0.25	88.8	100	2.61	185	417	469	886	28.0	355	309	304	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	947	30.0	185	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
14	1.0	4.71	0.25	88.8	100	2.64	195	418	471	890	28.1	355	306	302	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	952	30.1	195	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
15	1.0	4.73	0.25	88.8	100	2.66	205	419	473	892	28.2	355	304	300	0.30	0.33	0.04	0.04	0.98	955	30.2	205	117.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**75**	**-12**	no risk
16	1.0	4.75	0.25	88.8	100	2.69	215	421	475	896	28.3	355	301	297	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	960	30.4	215	114.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**71**	**-12**	no risk
17	1.0	4.76	0.25	88.8	100	2.71	225	423	476	899	28.4	355	299	295	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	963	30.5	225	112.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**69**	**-12**	no risk
18	1.0	4.78	0.25	88.8	100	2.73	235	424	478	903	28.5	355	296	293	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	968	30.6	235	109.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**66**	**-12**	no risk
19	1.0	4.79	0.25	88.8	100	2.75	245	426	479	905	28.6	355	294	290	0.31	0.34	0.05	0.05	0.98	971	30.7	245	106.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**64**	**-12**	no risk
20	1.0	4.81	0.25	88.8	100	2.77	255	427	481	907	28.7	355	291	288	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	975	30.8	255	104.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**62**	**-12**	no risk
21	1.0	4.82	0.25	88.8	100	2.79	265	428	482	910	28.8	355	289	286	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	978	30.9	265	102.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**60**	**-12**	no risk
22	1.0	4.83	0.25	88.8	100	2.81	275	429	483	912	28.8	355	286	283	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	981	31.0	275	100.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**58**	**-12**	no risk
23	1.0	4.85	0.25	88.8	100	2.83	285	430	485	915	28.9	355	284	281	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	985	31.2	285	98.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**56**	**-12**	no risk
24	1.0	4.86	0.25	88.8	100	2.84	295	432	486	918	29.0	355	281	279	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	989	31.3	295	96.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**54**	**-12**	no risk
25	1.0	4.87	0.25	88.8	100	2.85	300	432	487	919	29.1	355	280	277	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	990	31.3	300	95.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**53**	**-12**	no risk

Tabelle 5-24: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-4 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_f	ΔT_δ	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.240	0.25	88.8	100	2.09	65	199	224	423	13.4	355	339	328	0.27	0.30	0.04	0.04	0.98	450	14.2	65	120.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**77**	**-14**	no risk
2	1.0	2.237	0.25	88.8	100	2.16	75	199	224	422	13.4	355	336	327	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	449	14.2	75	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
3	1.0	2.221	0.25	88.8	100	2.22	85	197	222	419	13.3	355	334	325	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	446	14.1	85	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
4	1.0	2.319	0.25	88.8	100	2.28	95	206	232	438	13.8	355	331	323	0.27	0.31	0.04	0.04	0.98	466	14.7	95	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
5	1.0	2.584	0.25	88.8	100	2.33	105	229	258	488	15.4	355	329	321	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	520	16.4	105	120.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**77**	**-13**	no risk
6	1.0	2.848	0.25	88.8	100	2.37	115	253	285	537	17.0	355	326	320	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	573	18.1	115	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
7	1.0	3.083	0.25	88.8	100	2.41	125	274	308	582	18.4	355	324	317	0.28	0.31	0.04	0.04	0.98	620	19.6	125	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
8	1.0	3.258	0.25	88.8	100	2.45	135	289	326	615	19.4	355	321	315	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	656	20.7	135	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
9	1.0	3.468	0.25	88.8	100	2.49	145	308	347	655	20.7	355	319	313	0.28	0.32	0.04	0.04	0.98	699	22.1	145	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
10	1.0	3.665	0.25	88.8	100	2.52	155	325	367	692	21.9	355	316	311	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	739	23.4	155	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
11	1.0	3.804	0.25	88.8	100	2.55	165	338	380	718	22.7	355	314	309	0.29	0.32	0.04	0.04	0.98	767	24.3	165	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
12	1.0	3.847	0.25	88.8	100	2.58	175	341	385	726	23.0	355	311	307	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	776	24.5	175	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
13	1.0	3.850	0.25	88.8	100	2.61	185	342	385	727	23.0	355	309	304	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	777	24.6	185	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
14	1.0	3.755	0.25	88.8	100	2.64	195	333	376	709	22.4	355	306	302	0.29	0.33	0.04	0.04	0.98	758	24.0	195	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
15	1.0	3.649	0.25	88.8	100	2.66	205	324	365	689	21.8	355	304	300	0.30	0.33	0.04	0.04	0.98	737	23.3	205	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
16	1.0	3.583	0.25	88.8	100	2.69	215	318	358	676	21.4	355	301	297	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	725	22.9	215	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
17	1.0	3.510	0.25	88.8	100	2.71	225	311	351	662	20.9	355	299	295	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	710	22.5	225	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
18	1.0	3.492	0.25	88.8	100	2.73	235	310	349	659	20.8	355	296	293	0.30	0.34	0.05	0.05	0.98	707	22.4	235	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
19	1.0	3.439	0.25	88.8	100	2.75	245	305	344	649	20.5	355	294	290	0.31	0.34	0.05	0.05	0.98	697	22.0	245	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
20	1.0	3.447	0.25	88.8	100	2.77	255	306	345	651	20.6	355	291	288	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	699	22.1	255	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
21	1.0	3.422	0.25	88.8	100	2.79	265	304	342	646	20.4	355	289	286	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	694	22.0	265	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
22	1.0	3.398	0.25	88.8	100	2.81	275	302	340	641	20.3	355	286	283	0.31	0.35	0.05	0.05	0.98	690	21.8	275	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
23	1.0	3.389	0.25	88.8	100	2.83	285	301	339	640	20.2	355	284	281	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	689	21.8	285	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
24	1.0	3.371	0.25	88.8	100	2.84	295	299	337	636	20.1	355	281	279	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	685	21.7	295	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk
25	1.0	3.359	0.25	88.8	100	2.85	300	298	336	634	20.0	355	280	277	0.32	0.36	0.05	0.05	0.98	683	21.6	300	120.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**77**	**-12**	no risk

Tabelle 5-25: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-5 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρl	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_f	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	3.052	0.75	266.3	100	2.09	65	813	305	1118	35.3	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1352	42.7	65	68.2	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**25**	**-14**	no risk
2	1.0	2.991	0.75	266.3	100	2.16	75	796	299	1096	34.6	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1325	41.9	75	68.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**25**	**-13**	no risk
3	1.0	2.952	0.75	266.3	100	2.22	85	786	295	1081	34.2	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1308	41.4	85	67.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**25**	**-13**	no risk
4	1.0	2.924	0.75	266.3	100	2.28	95	778	292	1071	33.9	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1297	41.0	95	66.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**24**	**-13**	no risk
5	1.0	2.926	0.75	266.3	100	2.33	105	779	293	1072	33.9	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1299	41.1	105	64.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**22**	**-13**	no risk
6	1.0	2.931	0.75	266.3	100	2.37	115	780	293	1073	33.9	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1302	41.2	115	62.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**20**	**-12**	no risk
7	1.0	2.934	0.75	266.3	100	2.41	125	781	293	1075	34.0	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1305	41.3	125	60.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**18**	**-12**	no risk
8	1.0	2.932	0.75	266.3	100	2.45	135	781	293	1074	34.0	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1305	41.3	135	59.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**16**	**-12**	no risk
9	1.0	2.936	0.75	266.3	100	2.49	145	782	294	1075	34.0	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1308	41.3	145	57.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
10	1.0	2.942	0.75	266.3	100	2.52	155	783	294	1078	34.1	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1312	41.5	155	55.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
11	1.0	2.946	0.75	266.3	100	2.55	165	784	295	1079	34.1	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1314	41.6	165	54.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
12	1.0	2.949	0.75	266.3	100	2.58	175	785	295	1080	34.2	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1317	41.7	175	53.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**10**	**-12**	no risk
13	1.0	2.952	0.75	266.3	100	2.61	185	786	295	1081	34.2	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1320	41.7	185	51.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**9**	**-12**	no risk
14	1.0	2.953	0.75	266.3	100	2.64	195	786	295	1082	34.2	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1321	41.8	195	50.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
15	1.0	2.942	0.75	266.3	100	2.66	205	783	294	1077	34.1	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1317	41.7	205	50.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**7**	**-12**	no risk
16	1.0	2.878	0.75	266.3	100	2.69	215	766	288	1054	33.3	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1290	40.8	215	52.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**9**	**-12**	no risk
17	1.0	2.875	0.75	266.3	100	2.71	225	766	288	1053	33.3	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1290	40.8	225	51.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
18	1.0	2.879	0.75	266.3	100	2.73	235	767	288	1054	33.3	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1293	40.9	235	50.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**7**	**-12**	no risk
19	1.0	2.886	0.75	266.3	100	2.75	245	768	289	1057	33.4	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1297	41.0	245	49.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
20	1.0	2.881	0.75	266.3	100	2.77	255	767	288	1055	33.4	355	291	288	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1296	41.0	255	48.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
21	1.0	2.890	0.75	266.3	100	2.79	265	769	289	1058	33.5	355	289	286	0.93	0.35	0.05	0.02	0.84	1302	41.2	265	47.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
22	1.0	2.893	0.75	266.3	100	2.81	275	770	289	1059	33.5	355	286	283	0.94	0.35	0.05	0.02	0.83	1304	41.2	275	46.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
23	1.0	2.893	0.75	266.3	100	2.83	285	770	289	1059	33.5	355	284	281	0.95	0.36	0.05	0.02	0.83	1305	41.3	285	45.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
24	1.0	2.893	0.75	266.3	100	2.84	295	770	289	1059	33.5	355	281	279	0.96	0.36	0.05	0.02	0.83	1307	41.3	295	44.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
24	1.0	2.893	0.75	266.3	100	2.85	300	770	289	1059	33.5	355	280	277	0.96	0.36	0.05	0.02	0.83	1307	41.3	300	44.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk

Tabelle 5-26: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 2B-6 für Bauteil Nr. 2B – Achsensymmetrisches Lageroberteil (Gleitplatte und Seitenführung)

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{ay}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_f	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.716	0.75	266.3	100	2.09	65	723	272	995	31.5	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1203	38.0	65	88.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**45**	**-14**	no risk
2	1.0	2.722	0.75	266.3	100	2.16	75	725	272	997	31.5	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1206	38.1	75	84.2	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**41**	**-13**	no risk
3	1.0	2.818	0.75	266.3	100	2.22	85	750	282	1032	32.6	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1249	39.5	85	75.2	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**32**	**-13**	no risk
4	1.0	2.826	0.75	266.3	100	2.28	95	752	283	1035	32.7	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1254	39.6	95	72.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**29**	**-13**	no risk
5	1.0	2.831	0.75	266.3	100	2.33	105	754	283	1037	32.8	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1257	39.7	105	69.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**27**	**-13**	no risk
6	1.0	2.836	0.75	266.3	100	2.37	115	755	284	1039	32.8	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1260	39.8	115	67.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**25**	**-12**	no risk
7	1.0	2.843	0.75	266.3	100	2.41	125	757	284	1041	32.9	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1264	40.0	125	65.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**22**	**-12**	no risk
8	1.0	2.846	0.75	266.3	100	2.45	135	758	285	1042	33.0	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1266	40.0	135	63.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**21**	**-12**	no risk
9	1.0	2.853	0.75	266.3	100	2.49	145	760	285	1045	33.0	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1271	40.2	145	61.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**19**	**-12**	no risk
10	1.0	2.860	0.75	266.3	100	2.52	155	761	286	1047	33.1	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1275	40.3	155	60.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**17**	**-12**	no risk
11	1.0	2.866	0.75	266.3	100	2.55	165	763	287	1050	33.2	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1279	40.4	165	58.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
12	1.0	2.871	0.75	266.3	100	2.58	175	764	287	1051	33.2	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1282	40.5	175	56.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**14**	**-12**	no risk
13	1.0	2.875	0.75	266.3	100	2.61	185	766	288	1053	33.3	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1285	40.6	185	55.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
14	1.0	2.878	0.75	266.3	100	2.64	195	766	288	1054	33.3	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1288	40.7	195	54.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
15	1.0	2.785	0.75	266.3	100	2.66	205	742	279	1020	32.3	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1247	39.4	205	58.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
16	1.0	2.792	0.75	266.3	100	2.69	215	743	279	1023	32.3	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1252	39.6	215	56.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**14**	**-12**	no risk
17	1.0	2.789	0.75	266.3	100	2.71	225	743	279	1021	32.3	355	299	295	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	1251	39.6	225	55.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
18	1.0	2.790	0.75	266.3	100	2.73	235	743	279	1022	32.3	355	296	293	0.91	0.34	0.05	0.03	0.84	1253	39.6	235	54.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**12**	**-12**	no risk
19	1.0	2.795	0.75	266.3	100	2.75	245	744	280	1024	32.4	355	294	290	0.92	0.34	0.05	0.02	0.84	1257	39.7	245	53.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
20	1.0	2.791	0.75	266.3	100	2.77	255	743	279	1022	32.3	355	291	288	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1256	39.7	255	53.1	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**10**	**-12**	no risk
21	1.0	2.888	0.75	266.3	100	2.79	265	769	289	1058	33.4	355	289	286	0.93	0.35	0.05	0.02	0.84	1301	41.1	265	47.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
22	1.0	2.887	0.75	266.3	100	2.81	275	769	289	1057	33.4	355	286	283	0.94	0.35	0.05	0.02	0.83	1302	41.2	275	46.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk
23	1.0	2.885	0.75	266.3	100	2.83	285	768	288	1057	33.4	355	284	281	0.95	0.36	0.05	0.02	0.83	1302	41.2	285	46.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
24	1.0	2.887	0.75	266.3	100	2.84	295	769	289	1057	33.4	355	281	279	0.96	0.36	0.05	0.02	0.83	1304	41.2	295	45.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk
24	1.0	2.887	0.75	266.3	100	2.85	300	769	289	1057	33.4	355	280	277	0.96	0.36	0.05	0.02	0.83	1305	41.3	300	44.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk

5.5 Bauteil Nr. 3 – Achsensymmetrisches Lagerunterteil

5.5.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen

(1) Bauteil Nr. 3 stellt das achsensymmetrische Lagerunterteil dar, Bild 5-44.

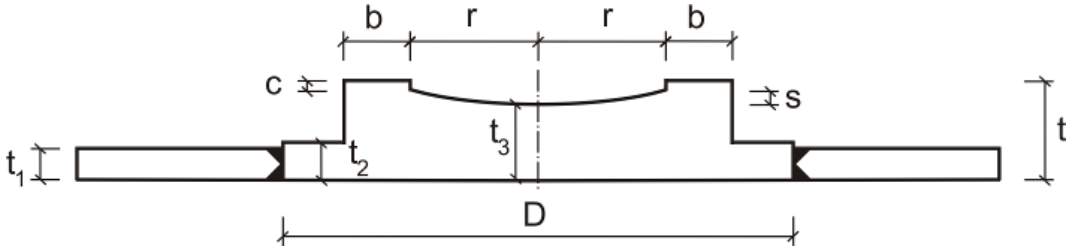


Bild 5-44: Bauteil 3: Achsensymmetrisches Lagerunterteil

(2) Tabelle 5-27 zeigt die Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Bauteil 3.

Tabelle 5-27: Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Detail 3

t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	D [mm]	b [mm]	r [mm]
20 – 55	20 – 60	35 – 150	330 – 1800	40 – 100	135 - 590

(3) Es werden bruchmechanische Untersuchungen für die Beanspruchungsvariante 3-1 mit einer an die Kalottenschale angeschweißten Platte sowie für die Beanspruchungsvariante 3-2, Kalottenschale, vgl. Bild 5-45, durchgeführt.

Beanspruchungsvariante 3-1 **Beanspruchungsvariante 3-2**

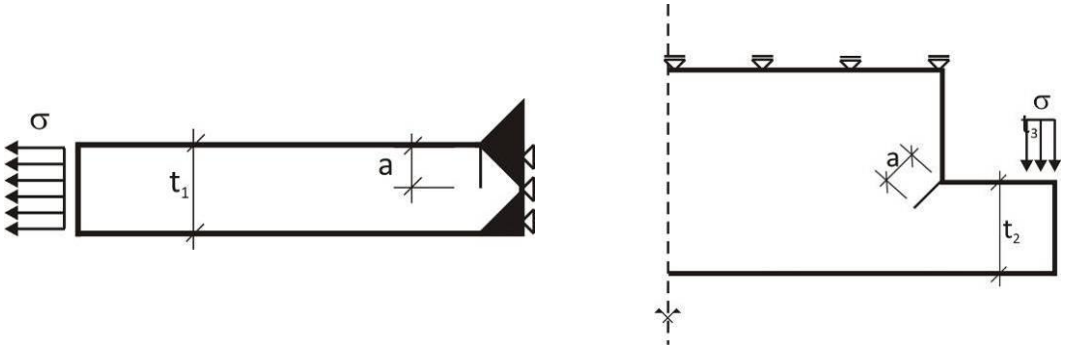


Bild 5-45: Beanspruchungsvariante am Bauteil 3: Variante 3-1 - Horizontalbelastung (links) und Variante 3-2 - Vertikalbelastung (rechts)

(4) Der Schweißnahtanschluss bei Beanspruchungsvariante 3-1 wird als K-Naht ausgeführt. Potentieller Rissentstehungsort für dieses Detail ist der Schweißnahtübergang gemäß Bild 5-45, links, Riss senkrecht zur Plattenoberfläche. Die theoretische Belastung erfolgt horizontal (senkrecht zum Riss), so dass die aufgebrachte Nennspannung σ_N der Beanspruchung σ_{HS} entspricht.

(5) Beanspruchungsvariante 3-2 findet am eigentlichen Lagerunterteil statt. Aus Vereinfachungsgründen wurden die Aussparungen für die Druckkalotten nicht modelliert. Der Riss wird gemäß Bild 5-45, rechts, unter 45° an der einspringenden Ecke angesetzt und berechnet sich in Abhängigkeit der Plattendicke t_2.

Die angesetzte Belastung in vertikaler Richtung tritt in der Realität so nicht auf. Vielmehr erfährt das Lager eine horizontale Beanspruchungskomponente, die jedoch hinsichtlich der

bruchmechanischen Beanspruchung gering ausfällt. Aus diesem Grund wurde die theoretische Vertikalbeanspruchung gewählt, um so konservativ eine Zugbeanspruchung am Riss zu erzeugen.

(6) Die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren für die Beanspruchungsvariante 3-1 hängt ausschließlich von der Plattendicke t_1 ab. Demzufolge wird hier nur eine Konfiguration untersucht.

In der Beanspruchungsvariante 3-2 werden die Untersuchungen an zwei geometrischen Grenzen der Lager durchgeführt, vgl. Tabelle 5-28, unter Berücksichtigung des Einflusses der Breite der Aufsatzschale b+r. Für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen wurde der Maximalwert b+r = 690 mm, für die Untergrenzen der Minimalwert der geometrischen Grenzen b+r = 175 mm angesetzt. Entsprechend der vertikalen Beanspruchungsrichtung und dem somit größtem resultierenden Anschnittsmoment an der angenommenen Rissstelle wurde die Unterteilbreite D maximal auf D = 1800 mm gesetzt.

Tabelle 5-28: Ober- und Untergrenzen der geometrischen Abmessungen für Beanspruchungsvariante 3-2

Obergrenzen		Untergrenzen	
t_2 [mm]	20 - 60	t_2 [mm]	20 - 60
t_3[mm]	150	t_3 [mm]	150
D [mm]	1800	D [mm]	1800
b + r [mm]	690	b + r [mm]	175

(7) Bild 5-46 zeigt einen Ausschnitt der Verformungsfiguren und die Rissöffnungen für die Beanspruchungsvarianten 3-1 und 3-2.

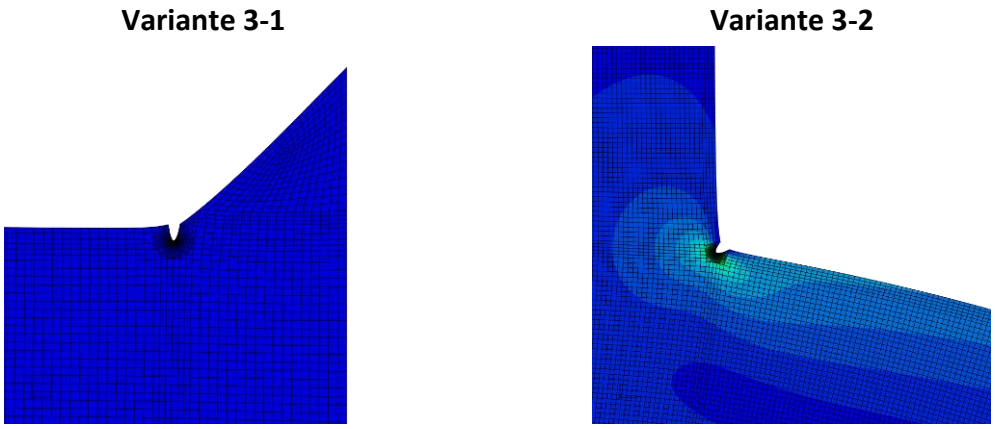


Bild 5-46: Ausschnitt Rissöffnung für Beanspruchungsvariante 3-1: Lagerunterteil angeschweißte Platte (links) und für Beanspruchungsvariante 3-2: Kalottenschale (rechts)

5.5.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Die Berechnung der für den Sprödbruchnachweis erforderlichen Spannungen σ_{HS} erfolgt für die Beanspruchungsvariante 3-1 nach der Biegetheorie.

(2) Die Nennspannungen σ_{Ed} entsprechen derjenigen Spannung, die im FE-Modell als Belastung aufgebracht wurde.

(3) Bild 5-47, links, zeigt den Verlauf der Hot-Spot-Spannungen für die Beanspruchungsvariante 3-2 sowie die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen. Es ist ein stetiger Abfall der Spannungen zu verzeichnen, der gegen einen Grenzwert zu konvergieren scheint.

Weiterhin ist der Spannungsverlauf nach Biegetheorie dargestellt, der qualitativ analog verläuft, jedoch für geringe Blechdicken t_2 fast doppelt so hohe Spannungswerte liefert. Die Auswertung und die Führung des Sprödbruchnachweises erfolgt mit den ermittelten Hot-Spot-Spannungen.

(4) Bild 5-47, rechts, zeigt den analogen Verlauf der Hot-Spot-Spannungen für die Beanspruchungsvariante 3-2 und die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen.

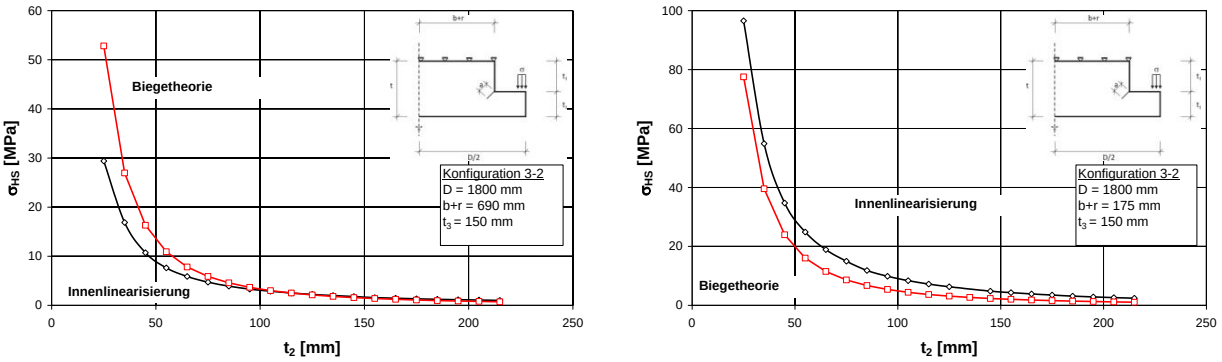


Bild 5-47: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für die Beanspruchungsvariante 3-2 - Vertikalbeanspruchung: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

5.5.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Bei der Beanspruchungsvariante 3-1 wurden die bruchmechanischen Untersuchungen auf Platten bis zu 200 mm Dicke erweitert.

(2) Wie zu erwarten zeigt sich ein Trend, dass die Spannungsintensitätsfaktoren K_1 mit zunehmender Plattendicke t_1 (somit zunehmende Rissgröße a) bei konstanter Spannung ansteigen, s. Bild 5-48, links.

Die Rissgröße für die Platte mit t = 10 mm beträgt a = 1,151 mm und die für die größte Plattendicke (t = 100 mm) a = 2,303 mm.

(3) Eine weitere Darstellung in Bild 5-48, rechts, zeigt den Abfall der normierten Spannungsintensitätsfaktoren bei konstanter Zugkraft F_H und zunehmender Plattendicke.

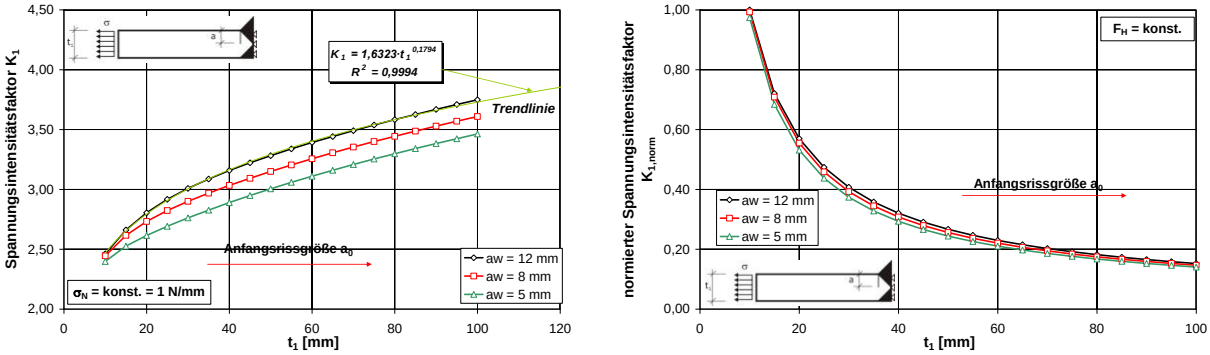


Bild 5-48: K-Werte für das Detail 3-1 infolge einer Randbelastung in Form der Nennspannung $\sigma_N(t)$ = 1 N/mm² (links), normierte K-Werte infolge F(t) = konst. (rechts)

(4) Des Weiteren wurde im FE-Modell der Einfluss der Kehlnahtdicke a_w exemplarisch für drei Schweißnahtdicken untersucht. Bild 5-48 (rechts) zeigt deutlich, dass größere Schweißnahtdicken kritischer sind, dieser Einfluss jedoch vernachlässigbar klein bleibt. Für die folgenden Sprödbruchnachweise werden jedoch die Berechnungen mit den größten Schweißnahtdicken verwendet.

(5) Für die Beanspruchungsvariante 3-2 zeigt Bild 5-49, links, sowohl den Verlauf der K-Werte für die Obergrenzen als auch für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Mit zunehmender Blechdicke t_2 nimmt der K_1-Wert sukzessive ab und läuft für sehr große Blechdicken gegen Null.

Je kleiner die Breite b+r des Lagerunterteils desto größer wird die bruchmechanische Spannung.

Der Einfluss der Beanspruchung aus Modus 2 kann vernachlässigt werden.

(6) Bild 5-49, rechts, stellt den Verlauf der K-Werte für eine einheitliche Beanspruchung σ_{HS} in Höhe von 1 N/mm² am Hot-Spot dar. Es ist zu erkennen, dass der für den Sprödbruchnachweis maßgebliche Fall für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen erreicht wird.

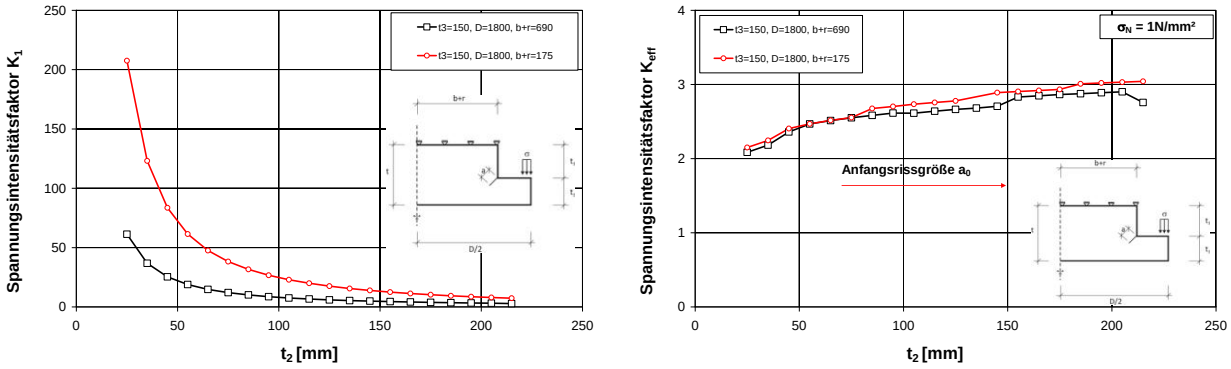


Bild 5-49: **K-Werte für die Beanspruchungsvariante 3-2: Variation der Plattendicke t_2: K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)**

(7) Die Variierung der Variierung der Höhe t_3 des Lagerunterteils ist in Bild 5-50 dargestellt. Die bruchmechanische Beanspruchung bleibt hiervon unbeeinflusst und konstant unveränderlich. Maßgeblich bleibt der in Bild 5-49 untersuchte Fall mit Variation der Blechdicke t_2.

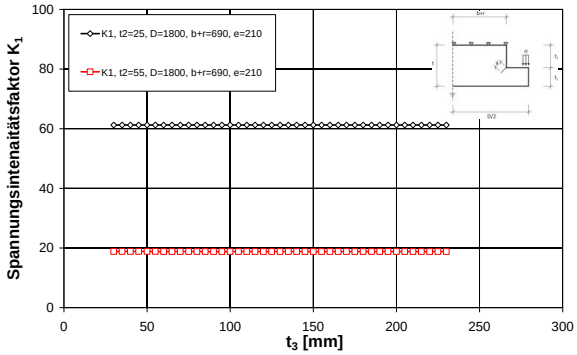


Bild 5-50: **K-Werte für die Beanspruchungsvariante 3-2: Variation der Plattendicke t_3: K-Werte infolge Einheitsbelastung**

5.5.4 Sprödbruchnachweis

(1) Die Sprödbruchnachweise erfolgten tabellarisch für die Beanspruchungsvariante 3-1 in Tabelle 5-31 und für Beanspruchungsvariante 3-2 in Tabelle 5-32.

(2) Die Ergebnisse der Tabellenrechnungen in der Tabelle 5-31 und Tabelle 5-32 sind in Tabelle 5-29 und Tabelle 5-30 dargestellt.

Tabelle 5-29: Blechdickenbegrenzung in [mm] für das Bauteil Lagerunterteil (Beanspruchungsvariante 3-1)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	200	140	110

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig),*

Tabelle 5-30: Blechdickenbegrenzung in [mm] für das Bauteil Lagerunterteil (Beanspruchungsvariante 3-2)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 200 mm zulässig)*

Tabelle 5-31: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 3-1 für Bauteil Nr. 3

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -30 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{Gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.462	0.75	266.3	100	1.15	10	656	246	902	28.5	355	353	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1097	34.7	10	120.0	27	-20	-20	0	7	-35	-5	0	0	**97**	**-38**	no risk
2	1.0	2.661	0.75	266.3	100	1.35	15	708	266	975	30.8	355	351	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1182	37.4	15	120.0	27	-20	-20	1	7	-35	-5	0	0	**97**	**-37**	no risk
3	1.0	2.805	0.75	266.3	100	1.50	20	747	281	1027	32.5	355	350	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1244	39.3	20	110.9	27	-20	-20	2	7	-35	-5	0	0	**88**	**-36**	no risk
4	1.0	2.917	0.75	266.3	100	1.61	25	777	292	1068	33.8	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1293	40.9	25	96.8	27	-20	-20	5	7	-35	-5	0	0	**74**	**-33**	no risk
5	1.0	3.008	0.75	266.3	100	1.70	30	801	301	1102	34.8	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1332	42.1	30	86.9	27	-20	-20	8	7	-35	-5	0	0	**64**	**-30**	no risk
6	1.0	3.087	0.75	266.3	100	1.78	35	822	309	1131	35.8	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1367	43.2	35	79.2	27	-20	-20	12	7	-35	-5	0	0	**56**	**-26**	no risk
7	1.0	3.158	0.75	266.3	100	1.84	40	841	316	1157	36.6	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1398	44.2	40	72.9	27	-20	-20	16	7	-35	-5	0	0	**50**	**-22**	no risk
8	1.0	3.222	0.75	266.3	100	1.90	45	858	322	1180	37.3	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1426	45.1	45	67.6	27	-20	-20	19	7	-35	-5	0	0	**45**	**-19**	no risk
9	1.0	3.282	0.75	266.3	100	1.96	50	874	328	1202	38.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1453	45.9	50	63.0	27	-20	-20	21	7	-35	-5	0	0	**40**	**-17**	no risk
10	1.0	3.339	0.75	266.3	100	2.00	55	889	334	1223	38.7	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1478	46.7	55	58.9	27	-20	-20	22	7	-35	-5	0	0	**36**	**-16**	no risk
11	1.0	3.392	0.75	266.3	100	2.05	60	903	339	1242	39.3	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1502	47.5	60	55.2	27	-20	-20	23	7	-35	-5	0	0	**32**	**-15**	no risk
12	1.0	3.442	0.75	266.3	100	2.09	65	916	344	1261	39.9	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1524	48.2	65	51.9	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**29**	**-14**	no risk
13	1.0	3.491	0.75	266.3	100	2.12	70	929	349	1279	40.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1546	48.9	70	48.8	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**26**	**-14**	no risk
14	1.0	3.538	0.75	266.3	100	2.16	75	942	354	1296	41.0	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1568	49.6	75	46.0	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**23**	**-13**	no risk
15	1.0	3.583	0.75	266.3	100	2.19	80	954	358	1312	41.5	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1588	50.2	80	43.3	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**20**	**-13**	no risk
16	1.0	3.626	0.75	266.3	100	2.22	85	965	363	1328	42.0	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1608	50.8	85	40.9	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**18**	**-13**	no risk
17	1.0	3.668	0.75	266.3	100	2.25	90	977	367	1343	42.5	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1627	51.4	90	38.6	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**16**	**-13**	no risk
18	1.0	3.709	0.75	266.3	100	2.28	95	988	371	1358	43.0	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1645	52.0	95	36.5	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**13**	**-13**	no risk
19	1.0	3.749	0.75	266.3	100	2.30	100	998	375	1373	43.4	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1664	52.6	100	34.4	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**11**	**-13**	no risk
20	1.0	4.223	0.75	266.3	100	2.65	200	1124	422	1547	48.9	355	305	301	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1890	59.8	200	10.8	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-12**	**-12**	no risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -40 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{Gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm^3/2	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm^3/2	N/mm^3/2	N/mm^3/2	MPam^1/2	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm^3/2	MPam^1/2	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.462	0.75	266.3	100	1.15	10	656	246	902	28.5	355	353	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1097	34.7	10	120.0	27	-20	-20	0	7	-35	-5	0	0	**87**	**-38**	no risk
2	1.0	2.661	0.75	266.3	100	1.35	15	708	266	975	30.8	355	351	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1182	37.4	15	120.0	27	-20	-20	1	7	-35	-5	0	0	**87**	**-37**	no risk
3	1.0	2.805	0.75	266.3	100	1.50	20	747	281	1027	32.5	355	350	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1244	39.3	20	110.9	27	-20	-20	2	7	-35	-5	0	0	**78**	**-36**	no risk
4	1.0	2.917	0.75	266.3	100	1.61	25	777	292	1068	33.8	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1293	40.9	25	96.8	27	-20	-20	5	7	-35	-5	0	0	**64**	**-33**	no risk
5	1.0	3.008	0.75	266.3	100	1.70	30	801	301	1102	34.8	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1332	42.1	30	86.9	27	-20	-20	8	7	-35	-5	0	0	**54**	**-30**	no risk
6	1.0	3.087	0.75	266.3	100	1.78	35	822	309	1131	35.8	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1367	43.2	35	79.2	27	-20	-20	12	7	-35	-5	0	0	**46**	**-26**	no risk
7	1.0	3.158	0.75	266.3	100	1.84	40	841	316	1157	36.6	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1398	44.2	40	72.9	27	-20	-20	16	7	-35	-5	0	0	**40**	**-22**	no risk
8	1.0	3.222	0.75	266.3	100	1.90	45	858	322	1180	37.3	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1426	45.1	45	67.6	27	-20	-20	19	7	-35	-5	0	0	**35**	**-19**	no risk
9	1.0	3.282	0.75	266.3	100	1.96	50	874	328	1202	38.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1453	45.9	50	63.0	27	-20	-20	21	7	-35	-5	0	0	**30**	**-17**	no risk
10	1.0	3.339	0.75	266.3	100	2.00	55	889	334	1223	38.7	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1478	46.7	55	58.9	27	-20	-20	22	7	-35	-5	0	0	**26**	**-16**	no risk
11	1.0	3.392	0.75	266.3	100	2.05	60	903	339	1242	39.3	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1502	47.5	60	55.2	27	-20	-20	23	7	-35	-5	0	0	**22**	**-15**	no risk
12	1.0	3.442	0.75	266.3	100	2.09	65	916	344	1261	39.9	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1524	48.2	65	51.9	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**19**	**-14**	no risk
13	1.0	3.491	0.75	266.3	100	2.12	70	929	349	1279	40.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1546	48.9	70	48.8	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**16**	**-14**	no risk
14	1.0	3.538	0.75	266.3	100	2.16	75	942	354	1296	41.0	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1568	49.6	75	46.0	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**13**	**-13**	no risk
15	1.0	3.583	0.75	266.3	100	2.19	80	954	358	1312	41.5	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1588	50.2	80	43.3	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**10**	**-13**	no risk
16	1.0	3.626	0.75	266.3	100	2.22	85	965	363	1328	42.0	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1608	50.8	85	40.9	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**8**	**-13**	no risk
17	1.0	3.668	0.75	266.3	100	2.25	90	977	367	1343	42.5	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1627	51.4	90	38.6	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**6**	**-13**	no risk
18	1.0	3.709	0.75	266.3	100	2.28	95	988	371	1358	43.0	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1645	52.0	95	36.5	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**3**	**-13**	no risk
19	1.0	3.749	0.75	266.3	100	2.30	100	998	375	1373	43.4	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1664	52.6	100	34.4	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**1**	**-13**	no risk
20	1.0	3.961	0.75	266.3	100	2.47	140	1055	396	1451	45.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	1764	55.8	140	22.9	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-10**	**-12**	no risk

Tabelle 5-31: fortgesetzt

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.462	0.75	266.3	100	1.15	10	656	246	902	28.5	355	353	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1097	34.7	10	120.0	27	-20	-20	0	7	-45	-5	0	0	**77**	**-38**	no risk
2	1.0	2.661	0.75	266.3	100	1.35	15	708	266	975	30.8	355	351	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1182	37.4	15	120.0	27	-20	-20	1	7	-45	-5	0	0	**77**	**-37**	no risk
3	1.0	2.805	0.75	266.3	100	1.50	20	747	281	1027	32.5	355	350	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1244	39.3	20	110.9	27	-20	-20	2	7	-45	-5	0	0	**68**	**-36**	no risk
4	1.0	2.917	0.75	266.3	100	1.61	25	777	292	1068	33.8	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1293	40.9	25	96.8	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**54**	**-33**	no risk
5	1.0	3.008	0.75	266.3	100	1.70	30	801	301	1102	34.8	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1332	42.1	30	86.9	27	-20	-20	8	7	-45	-5	0	0	**44**	**-30**	no risk
6	1.0	3.087	0.75	266.3	100	1.78	35	822	309	1131	35.8	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1367	43.2	35	79.2	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**36**	**-26**	no risk
7	1.0	3.158	0.75	266.3	100	1.84	40	841	316	1157	36.6	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1398	44.2	40	72.9	27	-20	-20	16	7	-45	-5	0	0	**30**	**-22**	no risk
8	1.0	3.222	0.75	266.3	100	1.90	45	858	322	1180	37.3	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1426	45.1	45	67.6	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**25**	**-19**	no risk
9	1.0	3.282	0.75	266.3	100	1.96	50	874	328	1202	38.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1453	45.9	50	63.0	27	-20	-20	21	7	-45	-5	0	0	**20**	**-17**	no risk
10	1.0	3.339	0.75	266.3	100	2.00	55	889	334	1223	38.7	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1478	46.7	55	58.9	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**16**	**-16**	no risk
11	1.0	3.392	0.75	266.3	100	2.05	60	903	339	1242	39.3	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1502	47.5	60	55.2	27	-20	-20	23	7	-45	-5	0	0	**12**	**-15**	no risk
12	1.0	3.442	0.75	266.3	100	2.09	65	916	344	1261	39.9	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1524	48.2	65	51.9	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**9**	**-14**	no risk
13	1.0	3.491	0.75	266.3	100	2.12	70	929	349	1279	40.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1546	48.9	70	48.8	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**6**	**-14**	no risk
14	1.0	3.538	0.75	266.3	100	2.16	75	942	354	1296	41.0	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1568	49.6	75	46.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**3**	**-13**	no risk
15	1.0	3.583	0.75	266.3	100	2.19	80	954	358	1312	41.5	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1588	50.2	80	43.3	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**0**	**-13**	no risk
16	1.0	3.626	0.75	266.3	100	2.22	85	965	363	1328	42.0	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1608	50.8	85	40.9	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-2**	**-13**	no risk
17	1.0	3.668	0.75	266.3	100	2.25	90	977	367	1343	42.5	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1627	51.4	90	38.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-4**	**-13**	no risk
18	1.0	3.709	0.75	266.3	100	2.28	95	988	371	1358	43.0	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1645	52.0	95	36.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-7**	**-13**	no risk
19	1.0	3.749	0.75	266.3	100	2.30	100	998	375	1373	43.4	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1664	52.6	100	34.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-9**	**-13**	no risk
20	1.0	3.793	0.75	266.3	100	2.35	110	1010	379	1389	43.9	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1685	53.3	110	31.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-11**	**-13**	no risk

Tabelle 5-32: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 3-2 für Bauteil Nr. 3

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{ZTJ}	ΔT_{ZTJ}	ΔT_R	T_{mid}	ΔT_r	ΔT_s	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.149	0.75	266.3	100	1.61	25	572	215	787	24.9	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	952	30.1	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**77**	**-33**	no risk
2	1.0	2.244	0.75	266.3	100	1.78	35	598	224	822	26.0	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	994	31.4	35	120.0	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**77**	**-26**	no risk
3	1.0	2.406	0.75	266.3	100	1.90	45	641	241	881	27.9	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1065	33.7	45	120.0	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**77**	**-19**	no risk
4	1.0	2.468	0.75	266.3	100	2.00	55	657	247	904	28.6	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1093	34.6	55	114.6	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**72**	**-16**	no risk
5	1.0	2.515	0.75	266.3	100	2.09	65	670	252	921	29.1	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1114	35.2	65	104.8	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**62**	**-14**	no risk
6	1.0	2.553	0.75	266.3	100	2.16	75	680	255	935	29.6	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1131	35.8	75	97.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**54**	**-13**	no risk
7	1.0	2.676	0.75	266.3	100	2.22	85	712	268	980	31.0	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1186	37.5	85	84.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**42**	**-13**	no risk
8	1.0	2.703	0.75	266.3	100	2.28	95	720	270	990	31.3	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1199	37.9	95	80.0	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**37**	**-13**	no risk
9	1.0	2.733	0.75	266.3	100	2.33	105	728	273	1001	31.7	355	329	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1213	38.4	105	75.8	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**33**	**-13**	no risk
10	1.0	2.756	0.75	266.3	100	2.37	115	734	276	1009	31.9	355	326	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1224	38.7	115	72.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**29**	**-12**	no risk
11	1.0	2.778	0.75	266.3	100	2.41	125	740	278	1018	32.2	355	324	317	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	1235	39.1	125	69.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**26**	**-12**	no risk
12	1.0	2.830	0.75	266.3	100	2.45	135	753	283	1036	32.8	355	321	315	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1259	39.8	135	64.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**22**	**-12**	no risk
13	1.0	2.889	0.75	266.3	100	2.49	145	769	289	1058	33.5	355	319	313	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1287	40.7	145	59.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**17**	**-12**	no risk
14	1.0	2.904	0.75	266.3	100	2.52	155	773	290	1064	33.6	355	316	311	0.86	0.32	0.04	0.03	0.86	1295	40.9	155	57.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**15**	**-12**	no risk
15	1.0	2.917	0.75	266.3	100	2.55	165	777	292	1069	33.8	355	314	309	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1302	41.2	165	55.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
16	1.0	2.932	0.75	266.3	100	2.58	175	781	293	1074	34.0	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1310	41.4	175	53.9	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
17	1.0	3.009	0.75	266.3	100	2.61	185	801	301	1102	34.8	355	309	304	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1345	42.5	185	49.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**6**	**-12**	no risk
18	1.0	3.021	0.75	266.3	100	2.64	195	804	302	1106	35.0	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1352	42.7	195	47.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
19	1.0	3.031	0.75	266.3	100	2.66	205	807	303	1110	35.1	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1358	42.9	205	46.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**3**	**-12**	no risk
20	1.0	3.042	0.75	266.3	100	2.69	215	810	304	1114	35.2	355	301	297	0.89	0.34	0.05	0.03	0.85	1363	43.1	215	44.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**2**	**-12**	no risk

5.6 Bauteil Nr. 4 – Achsensymmetrische Ankerplatte

5.6.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen

(1) Die achsensymmetrische Ankerplatte, Bild 5-51, dient als Fundament für das Lagerunterteil und wird mit diesem in der Regel verschraubt.

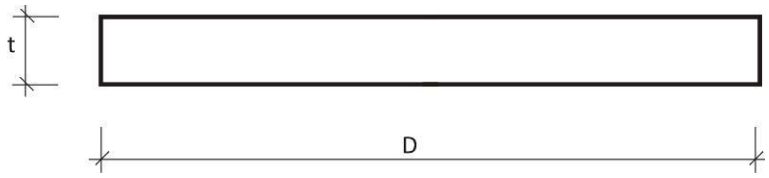


Bild 5-51: Bauteil 4: Achsensymmetrische Ankerplatte

(2) Tabelle 5-33 zeigt die Grenzen der geometrischen Abmessungen, die der Untersuchung zugrunde lagen.

Tabelle 5-33: Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Bauteil 4

t [mm]	D [mm]
≥ 55	440 - 3300

(3) Die Schraubenlöcher stellen einen potentiellen geometrischen Punkt dar, an dem aus der Fertigung herrührende Ungänzen auftreten können.

Für den Sprödbruchnachweis wird hingegen ein konservativeres bruchmechanisches Ersatzmodell gemäß Bild 5-25 verwendet, dass durch einen senkrechten zur Beanspruchungsrichtung durchlaufenden Oberflächenriss der Größe a(t) abgebildet wird.

Da die Ankerplatte durch die Lagerbeanspruchungen im wesentlichen auf Druck (potentielle Fehlstellen wären überdrückt) und durch Horizontalkräfte beansprucht wird, wird als repräsentative Belastungsgröße eine über die Plattendicke konstante Spannung σ_{Ed} angesetzt.

Die Rissposition an der Bauteiloberfläche wirkt sich nicht auf die Höhe der bruchmechanischen Beanspruchung aus und steht deswegen im alleinigen Zusammenhang mit der Belastung σ_{Ed} und der Plattendicke t.

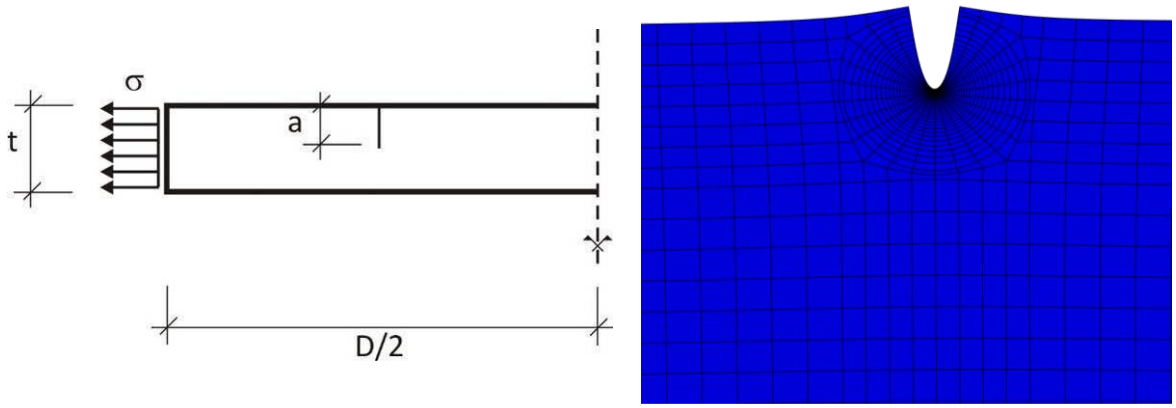


Bild 5-52: Randbedingungen des FE-Modells für Bauteil 4: Ankerplatte (links) sowie Ausschnitt aus dem FE-Modell: geöffneter Riss unter Zug (rechts)

5.6.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Die Berechnung der für den Sprödbruchnachweis erforderlichen Spannungen erfolgt für das Bauteil 4 nach der Biegetheorie.

(2) Die Nennspannungen σ_{Ed} entsprechen derjenigen Spannung, die im FE-Modell als Belastung aufgebracht wurde.

5.6.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Die Ankerplatten wurden mit Breiten von 440 – 3300 mm und einer Standarddicke von t = 75 mm vorgegeben.

(2) Bild 5-53, links, zeigt die Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen bei einer über die Plattendicke konstanten Einheitsbelastung σ = 1 N/mm.

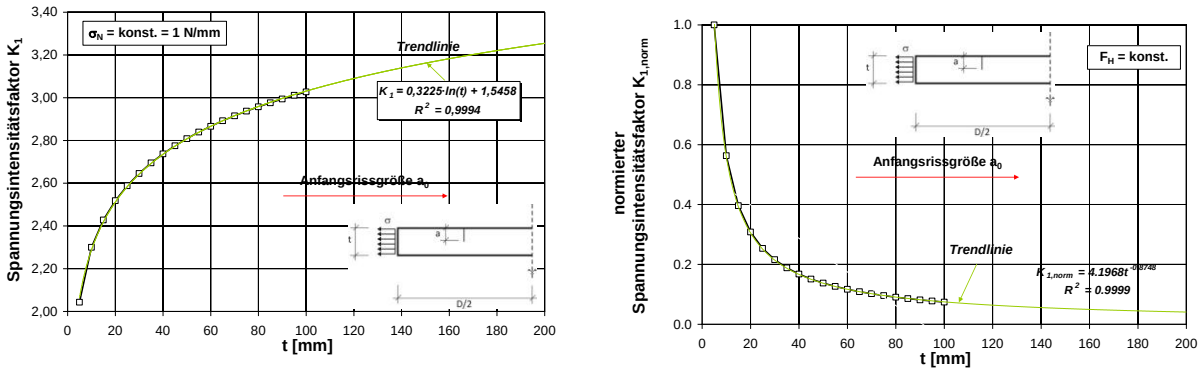


Bild 5-53: K-Werte für das Bauteil 4 infolge der Nennspannung $\sigma_N(t)$ = 1 N/mm (links), normierte K-Werte infolge F(t) = konst. (rechts)

(3) Wie zu erwarten, steigen die Spannungsintensitätsfaktoren infolge der mit steigender Plattendicke resultierenden größeren Kraft sowie der größer werdenden Anfangsrissgröße a kontinuierlich an.

Die Rissgröße a für die kleinste untersuchte theoretische Plattendicke t = 5 mm beträgt 0,805 mm und für die größte Plattendicke (t = 100 mm) a = 2,303 mm.

Die Plattenbreite D beeinflusst die Höhe der Spannungsintensitätsfaktoren im gewählten bruchmechanischen Modell nicht.

(4) Bild 5-53, rechts, zeigt eine weitere Darstellung der Spannungsintensitätsfaktoren in normierter Form infolge einer einheitlichen Horizontalkraft F_H.

5.6.4 Sprödbruchnachweis

(1) Der Sprödbruchnachweis erfolgt tabellarisch in Tabelle 5-35.

(2) Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-34 zusammengestellt.

Tabelle 5-34: Blechdickenbegrenzung t in [mm] für das Bauteil Ankerplatte

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig)*

Tabelle 5-35: Bruchmechanische Nachweise für Bauteil Nr. 4

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{ZTJ}	ΔT_{ZTJ}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_s	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.043	0.75	266.3	100	0.80	5	544	204	748	23.7	355	354	297	0.90	0.34	0.05	0.03	0.84	916	29.0	5	120.0	27	-20	-20	0	7	-45	-5	0	0	**77**	**-38**	no risk
2	1.0	2.300	0.75	266.3	100	1.15	10	612	230	842	26.6	355	353	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1025	32.4	10	120.0	27	-20	-20	0	7	-45	-5	0	0	**77**	**-38**	no risk
3	1.0	2.428	0.75	266.3	100	1.35	15	646	243	889	28.1	355	351	320	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1079	34.1	15	120.0	27	-20	-20	1	7	-45	-5	0	0	**77**	**-37**	no risk
4	1.0	2.518	0.75	266.3	100	1.50	20	670	252	922	29.2	355	350	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1117	35.3	20	120.0	27	-20	-20	2	7	-45	-5	0	0	**77**	**-36**	no risk
5	1.0	2.588	0.75	266.3	100	1.61	25	689	259	948	30.0	355	349	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1147	36.3	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**77**	**-33**	no risk
6	1.0	2.645	0.75	266.3	100	1.70	30	704	265	969	30.6	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1171	37.0	30	113.9	27	-20	-20	8	7	-45	-5	0	0	**71**	**-30**	no risk
7	1.0	2.695	0.75	266.3	100	1.78	35	718	270	987	31.2	355	346	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1193	37.7	35	105.0	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**62**	**-26**	no risk
8	1.0	2.737	0.75	266.3	100	1.84	40	729	274	1002	31.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1211	38.3	40	98.2	27	-20	-20	16	7	-45	-5	0	0	**55**	**-22**	no risk
9	1.0	2.775	0.75	266.3	100	1.90	45	739	278	1016	32.1	355	344	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1228	38.8	45	92.5	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**49**	**-19**	no risk
10	1.0	2.808	0.75	266.3	100	1.96	50	748	281	1028	32.5	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1243	39.3	50	87.7	27	-20	-20	21	7	-45	-5	0	0	**45**	**-17**	no risk
11	1.0	2.839	0.75	266.3	100	2.00	55	756	284	1040	32.9	355	341	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1257	39.7	55	83.5	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**41**	**-16**	no risk
12	1.0	2.866	0.75	266.3	100	2.05	60	763	287	1050	33.2	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1269	40.1	60	79.9	27	-20	-20	23	7	-45	-5	0	0	**37**	**-15**	no risk
13	1.0	2.892	0.75	266.3	100	2.09	65	770	289	1059	33.5	355	339	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1281	40.5	65	76.7	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**34**	**-14**	no risk
14	1.0	2.915	0.75	266.3	100	2.12	70	776	292	1068	33.8	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1291	40.8	70	73.8	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**31**	**-14**	no risk
15	1.0	2.937	0.75	266.3	100	2.16	75	782	294	1076	34.0	355	336	327	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1301	41.1	75	71.1	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**28**	**-13**	no risk
16	1.0	2.957	0.75	266.3	100	2.19	80	787	296	1083	34.2	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1311	41.4	80	68.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**26**	**-13**	no risk
17	1.0	2.976	0.75	266.3	100	2.22	85	792	298	1090	34.5	355	334	325	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	1319	41.7	85	66.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**23**	**-13**	no risk
18	1.0	2.994	0.75	266.3	100	2.25	90	797	299	1097	34.7	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1328	42.0	90	64.4	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**21**	**-13**	no risk
19	1.0	3.011	0.75	266.3	100	2.28	95	802	301	1103	34.9	355	331	323	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1336	42.2	95	62.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**19**	**-13**	no risk
20	1.0	3.027	0.75	266.3	100	2.30	100	806	303	1109	35.1	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1343	42.5	100	60.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**18**	**-13**	no risk
21	1.0	3.326	0.75	266.3	100	2.30	250	886	333	1218	38.5	355	293	290	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	1496	47.3	250	31.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-12**	**-12**	no risk

5.7 Bauteil Nr. 5 – Horizontallager ohne Verdrehmöglichkeit

5.7.1 Geometrie, Belastungsvarianten, Randbedingungen

(1) Eine spezielle Untersuchung wird für ein Horizontallager gemäß Bild 5-54 durchgeführt. Dieses Lager bietet keine Verdrehmöglichkeiten.

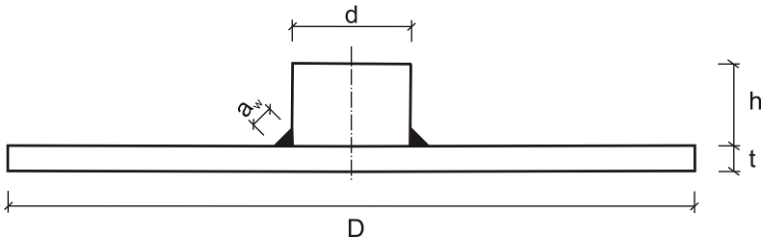


Bild 5-54: Bauteil 5: Horizontallager ohne Verdrehmöglichkeit und ohne Vertikallager

(2) Bei dem Bauteil handelt es sich um einen zylindrischen Bolzen, der auf eine Platte der Dicke t geschweißt wird.

(3) Tabelle 5-36 zeigt die Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Bauteil 5.

Tabelle 5-36: Grenzen der geometrischen Abmessungen für das Detail 5

t [mm]	D [mm]	d [mm]	a_w [mm]
30 – 150	440 - 3300	55 – 300	5 - 25

(4) Für die bruchmechanischen Modelle werden die unterschiedlichen theoretischen Belastungs- und Rissszenarien gemäß Bild 5-55 definiert. Die Randbedingungen wurden so gewählt, so dass die Rissspitzenbeanspruchung möglichst hoch wird und gleichzeitig die Verformungsmöglichkeiten der Lager nicht zu stark von den realen Bedingungen im eingebauten Zustand abweichen. Die Höhe des Zylinders spielt für die bruchmechanischen Untersuchungen keine tragende Rolle.

(5) Bei der Variante 5-1 tritt der Riss an der Plattenoberfläche am Schweißnahtübergang auf, der eine reine Modus I Beanspruchung erfährt.

(6) Variante 5-2 geht von einem übersehenen Riss im Zylinder aus, der auch am Schweißnahtübergang auftritt, jedoch auch auf Biegung beansprucht wird.

Beanspruchungsvariante 5-1 **Beanspruchungsvariante 5-2**

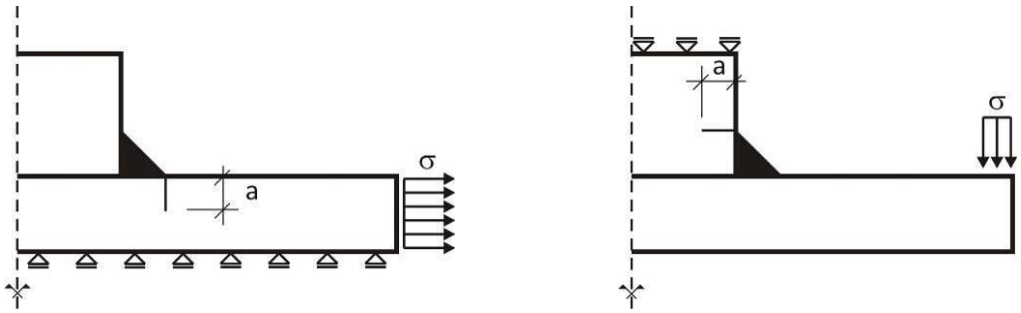


Bild 5-55: Belastungsvarianten am Bauteil 5: Variante 5-1 - Horizontalbelastung (links) und Variante 5-2 - Vertikalbelastung (rechts)

(7) Für die Riss- und Belastungssituation für die Beanspruchungsvariante 5-1 ist maßgeblich nur die Plattendicke t von Bedeutung. Demzufolge wird hier nur eine Konfiguration untersucht.

Bei der Beanspruchungsvariante 5-2 wurden zwei Konfigurationen geometrischer Abmessungen untersucht. Ein Zylinder mit einem maximalen Durchmesser in Höhe von d = 300 mm bzw. mit minimalen Durchmesser d = 50 mm.

Die Zylinderhöhe h sowie die Breite der Lagerplatte D des Horizontallagers wurden konstant gehalten.

Tabelle 5-37: Ober- und Untergrenzen der geometrischen Abmessungen für Beanspruchungsvariante 5-2

Obergrenzen		Untergrenzen	
t [mm]	30-150	t [mm]	30 - 150
D [mm]	3300	D [mm]	3300
d [mm]	300	d [mm]	50
h [mm]	100	h [mm]	100
a_w [mm]	25	a_w [mm]	25

(8) Bild 5-56 zeigt einen Ausschnitt der Verformungsfiguren und die Rissöffnungen für die Beanspruchungsvarianten 5-1 und 5-2.

Beanspruchungsvariante 5-1 **Beanspruchungsvariante 5-2**

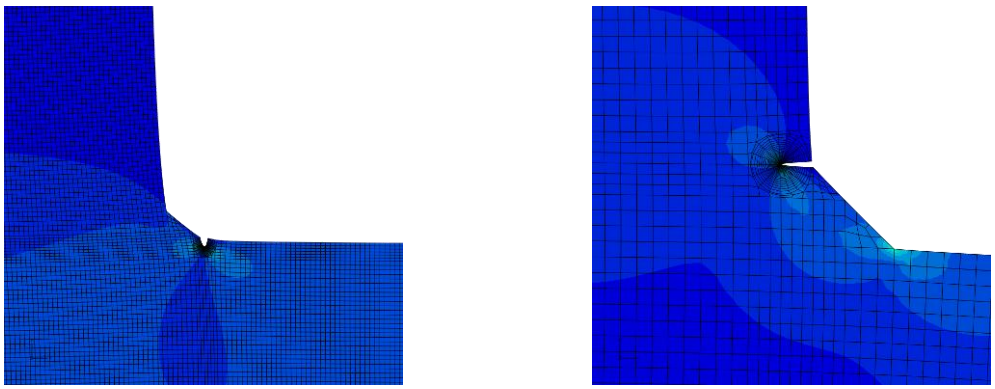


Bild 5-56: Ausschnitte aus dem FE-Modell der Rissöffnung: Beanspruchungsvariante 5-1 - Horizontalbelastung (links) und Beanspruchungsvariante 5-2 - Vertikalbelastung (rechts)

5.7.2 Hot-Spot-Spannungen

(1) Die Berechnung der für den Sprödbruchnachweis erforderlichen Spannungen σ_{HS} erfolgt für die Beanspruchungsvariante 5-1 nach der Biegetheorie.

Die Nennspannungen σ_{Ed} entsprechen derjenigen Spannung, die im FE-Modell als Belastung aufgebracht wurde.

(2) Bild 5-57, links, zeigt für die Beanspruchungsvariante 5-2 den Verlauf der Hot-Spot-Spannungen bei Variation der Plattendicke t für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen. Es ist eine stetige Abnahme der Hot-Spot-Spannungen bei gleichzeitiger Zunahme der Blechdicke t zu erkennen. Weiterhin sind die Hot-Spot-Spannungen für geringe Blechdicken t und für Schweißnähte mit a_w = 5 mm größer als für Schweißnähte mit a_w = 25 mm. Werden die Blechdicken t größer, so verringert sich der Unterschied zwischen den Hot-Spot-Spannungen mit a_w = 5 mm und a_w = 25 mm.

(3) Bild 5-57, rechts, zeigt identisches Verhalten der Hot-Spot-Spannungen bei Variation der Plattendicke t für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen. Für t > 100 mm ändern sich die Hot-Spot-Spannungen nur noch marginal.

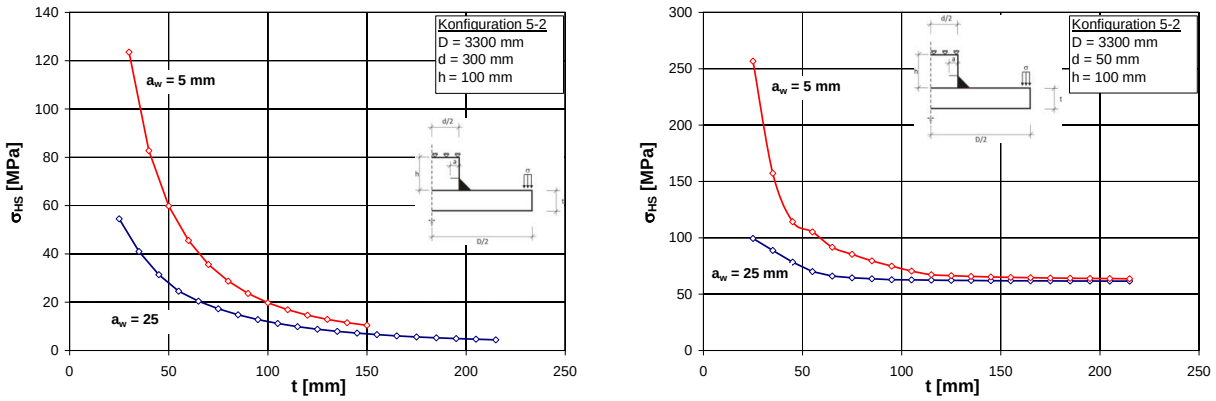


Bild 5-57: Hot-Spot-Spannungen infolge äußerer Einheitsbeanspruchung für die Beanspruchungsvariante 5-2: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen (links), Untergrenzen der geometrischen Abmessungen (rechts)

5.7.3 Spannungsintensitätsfaktoren

(1) Bild 5-58, links, zeigt für die Beanspruchungsvariante 5-1 den erwarteten Anstieg der Spannungsintensitätsfaktoren K_1 bei zunehmender Blechdicke t, und somit gleichzeitig zunehmender Rissgröße a, unter einheitlicher Normalspannungsbeanspruchung σ_N = 1 N/mm².

(2) Die Rissgrößen variieren innerhalb der untersuchten Grenzen der Plattendicken zwischen 1,701 mm und 2,505 mm.

Die Plattenbreite D sowie die Höhe h und der Durchmesser d des Zylinders haben keinen signifikanten Einfluss auf die bruchmechanische Beanspruchung und wurden deshalb nicht näher untersucht.

(3) Die Darstellung in Bild 5-58, rechts, zeigt den nur sehr geringfügigen Einfluss der Schweißnahtdicke a_w bei einer konstanten Zugkraft F_H. Im Folgenden werden die Sprödbruchnachweise dennoch mit der konservativen Annahme einer größtmöglichen Schweißnaht durchgeführt.

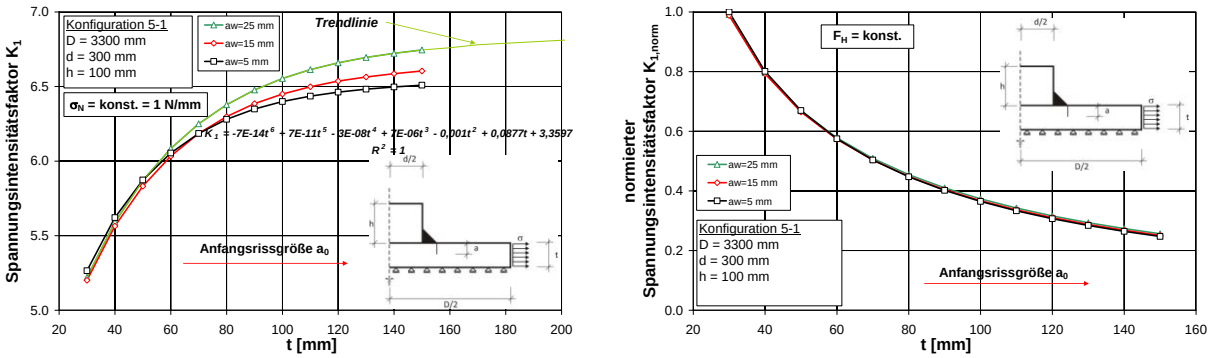


Bild 5-58: K-Werte für die Beanspruchungsvariante 5-1 infolge der Nennspannung $\sigma_N(t)$ = 1 N/mm (links), normierte K-Werte infolge F(t) = konst. (rechts)

(4) Für die Beanspruchungsvariante 5-2 zeigt Bild 5-59, links, bei konstanter Vertikalbeanspruchung einen stetigen Abfall der K-Werte mit zunehmender Plattendicke t für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen.

Die Modus 2-Beanspruchung führt zu geringfügig höheren effektiven K-Werten im Vergleich zu denjenigen aus reiner Modus 1-Beanspruchung.

Weiterhin ist zu erkennen, dass für kleine Schweißnahtdicken a_w die größere bruchmechanische Beanspruchung erzielt wird.

(5) Werden die K-Werte auf eine Beanspruchung von σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot normiert, so kann Bild 5-59, rechts, entnommen werden, dass die maßgebliche bruchmechanische Beanspruchung für Dicke Schweißnähte erreicht wird. Für große Blechdicken t steigen die Spannungsintensitätsfaktoren zunehmend an.

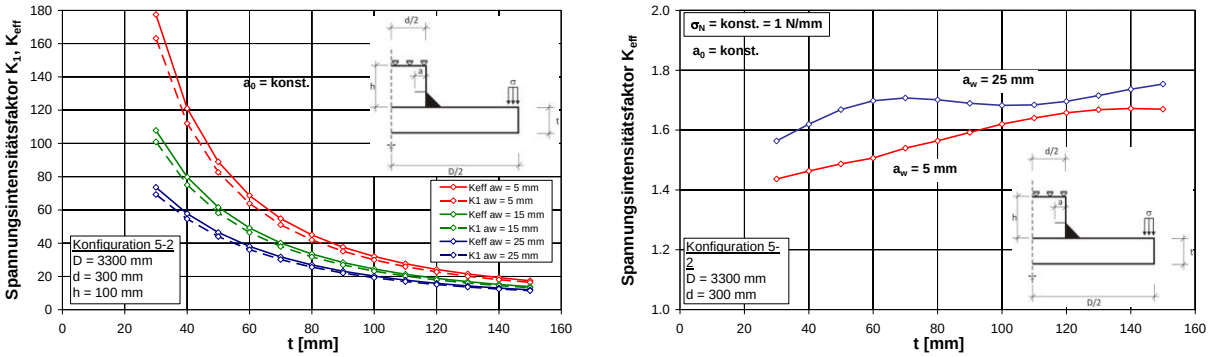


Bild 5-59: **K-Werte für die Beanspruchungsvariante 5-2: Variation der Plattendicke t: Obergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)**

(6) Für die Untergrenzen der geometrischen Abmessungen ist der Verlauf der K-Werte qualitativ ähnlich wie in Bild 5-59, links. Aus den Ergebnissen für die Obergrenzen der geometrischen Abmessungen wurde ersichtlich, dass die bruchmechanische Beanspruchung für große Schweißnahtdicken maßgeblich wird. Es zeigt sich zudem, dass die bruchmechanische Beanspruchung signifikant größer ist, der Abfall der K-Werte für große Plattendicken aber nicht so rapide voranschreitet.

(7) In Bild 5-60, rechts, wurde die bruchmechanische Beanspruchung auf eine Einheits-Hot-Spot-Spannung von σ_{HS} = 1 MPa normiert. Es ist ein Anstieg der effektiven K-Werte bei größer werdender Plattendicke t zu verzeichnen.

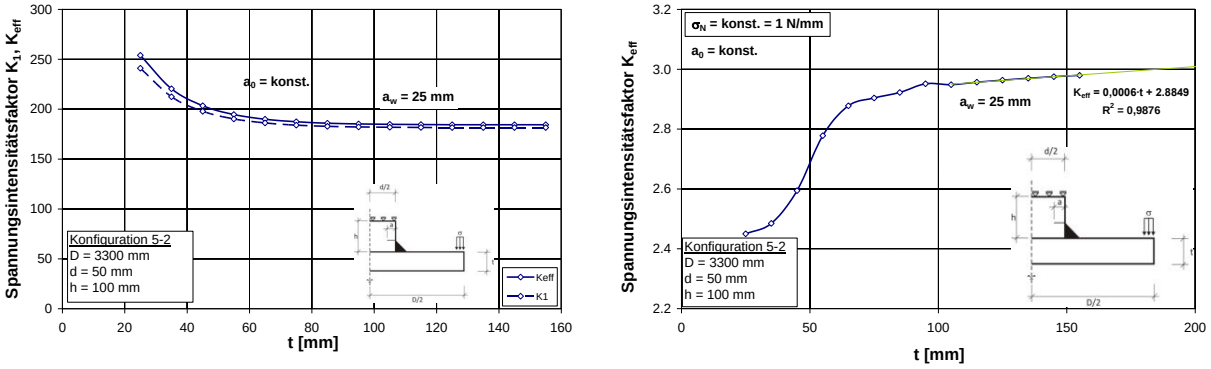


Bild 5-60: **K-Werte für die Beanspruchungsvariante 5-2: Variation der Plattendicke t: Untergrenzen der geometrischen Abmessungen; K-Werte infolge Einheitsbelastung (links); K-Werte infolge σ_{HS} = 1 N/mm² am Hot-Spot (rechts)**

5.7.4 Sprödbruchnachweis

Die bruchmechanischen Nachweise sind für das Bauteil 5 – Horizontallager – für die Beanspruchungsvariante 5-1 in Tabelle 5-40 und für die Beanspruchungsvariante 5-2 in Tabelle 5-41 dargestellt.

(1) Die Ergebnisse der Tabellenrechnungen gehen aus der Tabelle 5-38 und Tabelle 5-39 hervor.

Tabelle 5-38: Blechdickenbegrenzung t in [mm] für das Bauteil Horizontallager (Beanspruchungsvariante 5-1)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	180	110	80	60
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	120	80	60	40	40	30

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 250 mm zulässig),*

Tabelle 5-39: Blechdickenbegrenzung d in [mm] für das Bauteil Horizontallager (Beanspruchungsvariante 5-2)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)	200*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit t ≥ 200 mm zulässig)*

(2) Zylinderdurchmesser bis max. d = 300 mm sind hinsichtlich Sprödbruch unkritisch.

Tabelle 5-40: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 5-1 für Bauteil Nr. 5

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = 0 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	5	-5	0	0	**29**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	5	-5	0	0	**19**	**-22**	no risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	5	-5	0	0	**12**	**-17**	no risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	5	-5	0	0	**6**	**-15**	no risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	5	-5	0	0	**2**	**-14**	no risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	5	-5	0	0	**-2**	**-13**	no risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	5	-5	0	0	**-5**	**-13**	no risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	5	-5	0	0	**-7**	**-13**	no risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	5	-5	0	0	**-9**	**-13**	no risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	5	-5	0	0	**-11**	**-12**	no risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	5	-5	0	0	**-13**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	5	-5	0	0	**-14**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	5	-5	0	0	**-15**	**-12**	risk
20	1.0	6.790	0.75	266.3	100	2.60	180	1808	679	2487	78.6	355	310	306	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	3034	95.9	180	-25.5	27	-20	-20	26	7	5	-5	0	0	**-19**	**-12**	risk

Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -10 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	-5	-5	0	0	**19**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	-5	-5	0	0	**9**	**-22**	no risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	-5	-5	0	0	**2**	**-17**	no risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	-5	-5	0	0	**-4**	**-15**	no risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	-5	-5	0	0	**-8**	**-14**	no risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**-12**	**-13**	no risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**-15**	**-13**	risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**-17**	**-13**	risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	-5	-5	0	0	**-19**	**-13**	risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-21**	**-12**	risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-23**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-24**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-25**	**-12**	risk
20	1.0	6.790	0.75	266.3	100	2.60	180	1808	679	2487	78.6	355	310	306	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	3034	95.9	180	-25.5	27	-20	-20	26	7	-5	-5	0	0	**-29**	**-12**	risk

Tabelle 5-40: fortgesetzt

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -20 °C

Nr	σ_P	K1	σ_p/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	-15	-5	0	0	**9**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	-15	-5	0	0	**-1**	**-22**	no risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	-15	-5	0	0	**-8**	**-17**	no risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	-15	-5	0	0	**-14**	**-15**	no risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	-15	-5	0	0	**-18**	**-14**	risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**-22**	**-13**	risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**-25**	**-13**	risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**-27**	**-13**	risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	-15	-5	0	0	**-29**	**-13**	risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-31**	**-12**	risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-33**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-34**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-35**	**-12**	risk
20	1.0	6.790	0.75	266.3	100	2.60	180	1808	679	2487	78.6	355	310	306	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	3034	95.9	180	-25.5	27	-20	-20	26	7	-15	-5	0	0	**-39**	**-12**	risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -30 °C

Nr	σ_P	K1	σ_p/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	-25	-5	0	0	**-1**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	-25	-5	0	0	**-11**	**-22**	no risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	-25	-5	0	0	**-18**	**-17**	risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	-25	-5	0	0	**-24**	**-15**	risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	-25	-5	0	0	**-28**	**-14**	risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**-32**	**-13**	risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**-35**	**-13**	risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**-37**	**-13**	risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	-25	-5	0	0	**-39**	**-13**	risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-41**	**-12**	risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-43**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-44**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-45**	**-12**	risk
20	1.0	6.860	0.75	266.3	100	2.76	250	1826	686	2512	79.5	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	3086	97.6	250	-31.4	27	-20	-20	26	7	-25	-5	0	0	**-54**	**-12**	risk

Tabelle 5-40: fortgesetzt

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -40 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	-35	-5	0	0	**-11**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	-35	-5	0	0	**-21**	**-22**	no risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	-35	-5	0	0	**-28**	**-17**	risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	-35	-5	0	0	**-34**	**-15**	risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	-35	-5	0	0	**-38**	**-14**	risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**-42**	**-13**	risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**-45**	**-13**	risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**-47**	**-13**	risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	-35	-5	0	0	**-49**	**-13**	risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-51**	**-12**	risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-53**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-54**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-55**	**-12**	risk
20	1.0	6.860	0.75	266.3	100	2.76	250	1826	686	2512	79.5	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	3086	97.6	250	-31.4	27	-20	-20	26	7	-35	-5	0	0	**-64**	**-12**	risk

Nachweis für $\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$ und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_P/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	$\rho 1$	ρ	k_{R6}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{27J}	ΔT_{27J}	ΔT_R	T_{md}	ΔT_r	ΔT_ε	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm$^{3/2}$	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm$^{3/2}$	MPam$^{1/2}$	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	5.220	0.75	266.3	100	1.70	30	1390	522	1912	60.5	355	348	328	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2312	73.1	30	22.3	27	-20	-20	8	7	-45	-5	0	0	**-21**	**-30**	no risk
2	1.0	5.590	0.75	266.3	100	1.84	40	1488	559	2047	64.7	355	345	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2474	78.2	40	12.1	27	-20	-20	16	7	-45	-5	0	0	**-31**	**-22**	risk
3	1.0	5.870	0.75	266.3	100	1.96	50	1563	587	2150	68.0	355	343	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2598	82.2	50	4.7	27	-20	-20	21	7	-45	-5	0	0	**-38**	**-17**	risk
4	1.0	6.084	0.75	266.3	100	2.05	60	1620	608	2228	70.5	355	340	328	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	2694	85.2	60	-0.8	27	-20	-20	23	7	-45	-5	0	0	**-44**	**-15**	risk
5	1.0	6.250	0.75	266.3	100	2.12	70	1664	625	2289	72.4	355	338	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	2768	87.5	70	-5.2	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**-48**	**-14**	risk
6	1.0	6.378	0.75	266.3	100	2.19	80	1698	638	2336	73.9	355	335	326	0.82	0.31	0.04	0.04	0.87	2827	89.4	80	-8.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-52**	**-13**	risk
7	1.0	6.477	0.75	266.3	100	2.25	90	1725	648	2372	75.0	355	333	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	2872	90.8	90	-11.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-55**	**-13**	risk
8	1.0	6.554	0.75	266.3	100	2.30	100	1745	655	2400	75.9	355	330	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2909	92.0	100	-14.1	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-57**	**-13**	risk
9	1.0	6.613	0.75	266.3	100	2.35	110	1761	661	2422	76.6	355	328	321	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	2937	92.9	110	-16.2	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**-59**	**-13**	risk
10	1.0	6.659	0.75	266.3	100	2.39	120	1773	666	2439	77.1	355	325	319	0.84	0.31	0.04	0.04	0.86	2960	93.6	120	-18.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-61**	**-12**	risk
11	1.0	6.695	0.75	266.3	100	2.43	130	1783	670	2452	77.5	355	323	316	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	2978	94.2	130	-19.6	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-63**	**-12**	risk
12	1.0	6.722	0.75	266.3	100	2.47	140	1790	672	2462	77.9	355	320	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	2993	94.6	140	-21.0	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-64**	**-12**	risk
13	1.0	6.745	0.75	266.3	100	2.51	150	1796	675	2470	78.1	355	318	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	3006	95.0	150	-22.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-65**	**-12**	risk
20	1.0	6.860	0.75	266.3	100	2.76	250	1826	686	2512	79.5	355	293	289	0.92	0.35	0.05	0.02	0.84	3086	97.6	250	-31.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**-74**	**-12**	risk

Tabelle 5-41: Bruchmechanische Nachweise für Beanspruchungsvariante 5-2 für Bauteil Nr. 5

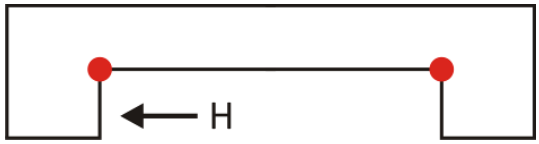
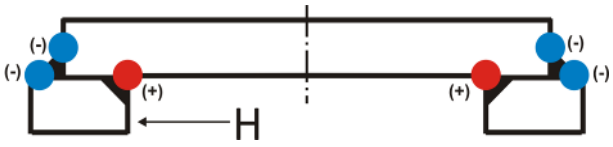
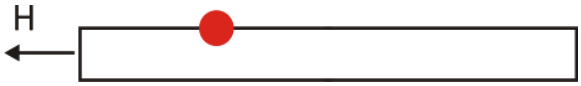
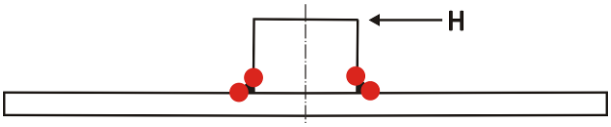
Nachweis für σ_{Ed} = 0,75·f_y und T = -50 °C

Nr	σ_P	K1	σ_S/f_y	σ_P	σ_S	a_0	t	K1	K1	K1,ges	K1	$f_{y,nom}$	$f_y(t)$	σ_{gy}	L_r	ψ	ρ1	ρ	k_{KS}	$K_{appl,d}$	$K_{appl,d}$	b_{eff}	ΔT_σ	$K_{V,nom}$	T_{KV}	T_{ZTJ}	ΔT_{ZTJ}	ΔT_R	T_{mid}	ΔT_r	ΔT_s	ΔT_{DCF}	T_{Ed}	T_{Rd}	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
	N/mm²	N/mm³/²	[-]	N/mm²	N/mm²	mm	mm	N/mm³/²	N/mm³/²	N/mm³/²	MPam¹/²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	-	-	-	-	N/mm³/²	MPam¹/²	mm	°C	J	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
1	1.0	2.450	0.75	266.3	100	2.85	25	652	245	897	28.4	355	349	344	0.77	0.29	0.04	0.04	0.88	1073	33.9	25	120.0	27	-20	-20	5	7	-45	-5	0	0	**77**	**-33**	no risk
2	1.0	2.485	0.75	266.3	100	2.85	35	662	248	910	28.8	355	346	342	0.78	0.29	0.04	0.04	0.88	1090	34.5	35	120.0	27	-20	-20	12	7	-45	-5	0	0	**77**	**-26**	no risk
3	1.0	2.594	0.75	266.3	100	2.85	45	691	259	950	30.0	355	344	339	0.79	0.29	0.04	0.04	0.87	1140	36.1	45	109.0	27	-20	-20	19	7	-45	-5	0	0	**66**	**-19**	no risk
4	1.0	2.778	0.75	266.3	100	2.85	55	740	278	1017	32.2	355	341	337	0.79	0.30	0.04	0.04	0.87	1224	38.7	55	88.5	27	-20	-20	22	7	-45	-5	0	0	**45**	**-16**	no risk
5	1.0	2.878	0.75	266.3	100	2.85	65	766	288	1054	33.3	355	339	334	0.80	0.30	0.04	0.04	0.87	1270	40.2	65	78.0	27	-20	-20	24	7	-45	-5	0	0	**35**	**-14**	no risk
6	1.0	2.904	0.75	266.3	100	2.85	75	773	290	1064	33.6	355	336	332	0.80	0.30	0.04	0.04	0.87	1284	40.6	75	73.2	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**30**	**-13**	no risk
7	1.0	2.922	0.75	266.3	100	2.85	85	778	292	1070	33.8	355	334	329	0.81	0.30	0.04	0.04	0.87	1293	40.9	85	69.5	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**27**	**-13**	no risk
8	1.0	2.952	0.75	266.3	100	2.85	95	786	295	1081	34.2	355	331	327	0.81	0.31	0.04	0.04	0.87	1308	41.3	95	65.6	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**23**	**-13**	no risk
9	1.0	2.948	0.75	266.3	100	2.85	105	785	295	1080	34.1	355	329	324	0.82	0.31	0.04	0.04	0.86	1307	41.3	105	63.7	27	-20	-20	25	7	-45	-5	0	0	**21**	**-13**	no risk
10	1.0	2.957	0.75	266.3	100	2.85	115	787	296	1083	34.2	355	326	322	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1312	41.5	115	61.4	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**18**	**-12**	no risk
11	1.0	2.964	0.75	266.3	100	2.85	125	789	296	1085	34.3	355	324	319	0.83	0.31	0.04	0.04	0.86	1317	41.6	125	59.3	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**16**	**-12**	no risk
12	1.0	2.970	0.75	266.3	100	2.85	135	791	297	1088	34.4	355	321	317	0.84	0.32	0.04	0.04	0.86	1321	41.8	135	57.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**14**	**-12**	no risk
13	1.0	2.975	0.75	266.3	100	2.85	145	792	298	1090	34.5	355	319	314	0.85	0.32	0.04	0.04	0.86	1324	41.9	145	55.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**13**	**-12**	no risk
14	1.0	2.979	0.75	266.3	100	2.85	155	793	298	1091	34.5	355	316	312	0.85	0.32	0.04	0.03	0.86	1328	42.0	155	54.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**11**	**-12**	no risk
15	1.0	2.984	0.75	266.3	100	2.85	165	794	298	1093	34.6	355	314	310	0.86	0.32	0.04	0.03	0.85	1331	42.1	165	52.7	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**10**	**-12**	no risk
16	1.0	2.990	0.75	266.3	100	2.85	175	796	299	1095	34.6	355	311	307	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1335	42.2	175	51.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**8**	**-12**	no risk
17	1.0	2.996	0.75	266.3	100	2.85	185	798	300	1097	34.7	355	309	305	0.87	0.33	0.04	0.03	0.85	1339	42.3	185	49.8	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**7**	**-12**	no risk
18	1.0	3.002	0.75	266.3	100	2.85	195	799	300	1099	34.8	355	306	302	0.88	0.33	0.04	0.03	0.85	1343	42.5	195	48.5	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**5**	**-12**	no risk
19	1.0	3.008	0.75	266.3	100	2.85	205	801	301	1102	34.8	355	304	300	0.89	0.33	0.04	0.03	0.85	1347	42.6	205	47.2	27	-20	-20	26	7	-45	-5	0	0	**4**	**-12**	no risk

6 Vorschlag für die Normenregelung bei Verwendung von Finite-Element-Berechnungen

(1) Beim Nachweis von Lagerbauteilen gegen Sprödbruch sind die Nachweisstellen entscheidend, an denen Kerbeffekte für die Spannungen aus der geometrischen Gestaltung und infolge Schweißens und Zugbeanspruchungen auftreten können, siehe Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Kritische Punkte für bruchmechanische Beanspruchungen bei Lagerbauteilen

Bauteil	Einwirkung	Beschreibung	Beanspruchung
1 **2A**		Einspringende Ecke	Zug (+)
2B		Einspringende Ecke Schweißnahtfuß oben Schweißnahtfuß unten	Zug (+) Druck (-) Druck (-)
3		Einspringende Ecke Schweißnahtfuß	Zug (+) Zug (+)
4		Oberflächendefekt	Zug (+)
5		Schweißnahtfuß oben Schweißnahtfuß unten	Zug (+) Zug (+)

(2) Ausgehend von der Annahme des Auftretens von Rissen an diesen Stellen und einer kritischen Richtung jedes Risses, siehe Tabelle 6-2, werden für die Lastkombination häufiger Wert der Einwirkungen an der Stelle des Rissbeginns die Bezugsspannungen σ_{Ed} bestimmt, mit denen zusammen mit der geringst mögliche Bauteiltemperatur die zulässige Erzeugnisdicke t ermittelt werden.

(3) Die Bezugsspannungen σ_{Ed} werden aus Finite-Element-Untersuchungen als Hot-Spot-Spannungen σ_{HS} nach der Methode von Dong bestimmt, indem der Spannungsverlauf längs der Risslinie ermittelt und im Bereich von σ_{max} (Rand) und $0{,}1 \cdot \sigma_{max}$ (Innenpunkt) durch lineare Extrapolation am Rand bestimmt wird (Innenextrapolation).

(4) Die maximalen Erzeugnisdicken ergeben sich abhängig von der Bezugspannung σ_{Ed} und der Bauteiltemperatur T_{Ed} für die jeweilige Bauteilnummer aus der Tabelle 6-3 bis Tabelle 6-10. Die Zuordnung der Tabellen zu den Bauteilnummern erfolgt in Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Stellen und Richtung zur Bestimmung von σ_{Ed}

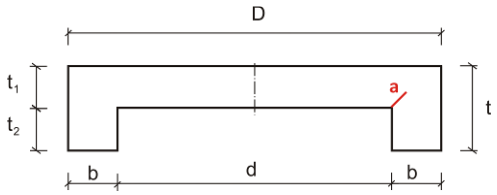
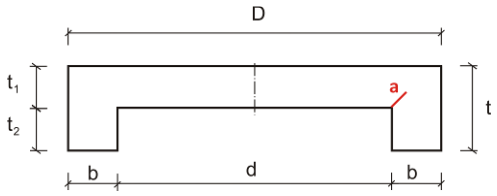
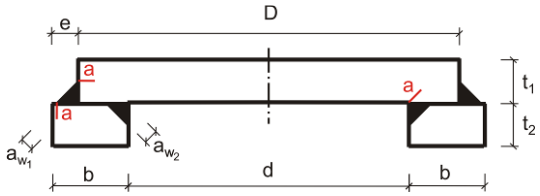
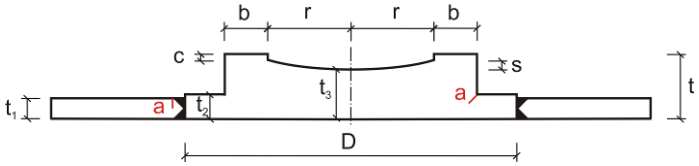
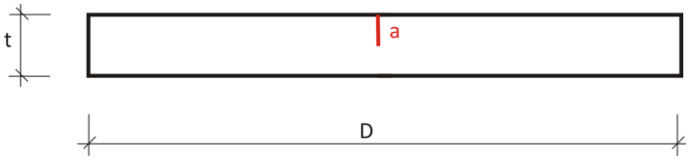
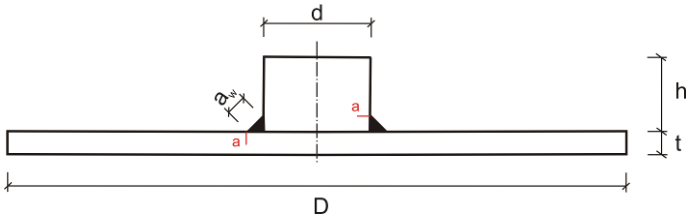
Bauteil	Prinzipskizze	Ergebnisse
1	**Lageroberteil - rotationssymmetrisch** 	Tabelle 6-3
2A	**Lageroberteil - achsensymmetrisch** 	Tabelle 6-4
2B	**Lageroberteil - achsensymmetrisch, geschweißt** 	Tabelle 6-5 (Blechdicke t_1) Tabelle 6-6 (Blechdicke t_2)
3	**Lagerunterteil** 	Tabelle 6-7 (Blechdicke t_1) Tabelle 6-8 (Blechdicke t_2)
4	**Ankerplatte** 	Tabelle 6-9
5	**Horizontallager** 	Tabelle 6-10

Tabelle 6-3: Blechdickenbegrenzung für das Bauteil 1 – Rotationssymmetrisches Lageroberteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	235

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 250$ mm zulässig)*

Tabelle 6-4: Blechdickenbegrenzung für das Bauteil 2A – Achsensymmetrisches Lageroberteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	240

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 250$ mm zulässig)*

Tabelle 6-5: Blechdickenbegrenzung t_1 für das Bauteil 2B – Geschweißtes Lageroberteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)	300*)

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t_1 \geq 300$ mm zulässig)*

Tabelle 6-6: Blechdickenbegrenzung t_2 für das Bauteil 2B – Geschweißtes Lageroberteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	200*)	200	190	170	150	130

*) *Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t_2 \geq 200$ mm zulässig)*

Tabelle 6-7: Blechdickenbegrenzung t_1 für das Bauteil 3 –Lagerunterteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	200	140	110

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t_1 \geq 250$ mm zulässig)*

Tabelle 6-8: Blechdickenbegrenzung t_2 für das Bauteil 3 –Lagerunterteil

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	200	140	110

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t_2 \geq 250$ mm zulässig)*

Tabelle 6-9: Blechdickenbegrenzung t für das Bauteil 4 - Ankerplatte

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 250$ mm zulässig)*

Tabelle 6-10: Blechdickenbegrenzung t für das Bauteil 5 –Horizontallager

Stahlgüte nach DIN EN 10025	σ_{Ed}	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
		[mm]					
S355J2	$0{,}25 \cdot f_y$	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)	250*)
S355J2	$0{,}50 \cdot f_y$	250*)	250*)	180	110	80	60
S355J2	$0{,}75 \cdot f_y$	120	80	60	40	40	30

**) Annahme eines fertigungstechnischen Grenzwertes (theoretisch wären Blechdicken mit $t \geq 250$ mm zulässig)*

7 Anwendungsbeispiel für die Anwendung von Finiten-Elementen

7.1 Allgemeines

(1) Das Anwendungsbeispiel betrifft den Typ eines Lageroberteils mit Belastung, s. Bild 7-1.

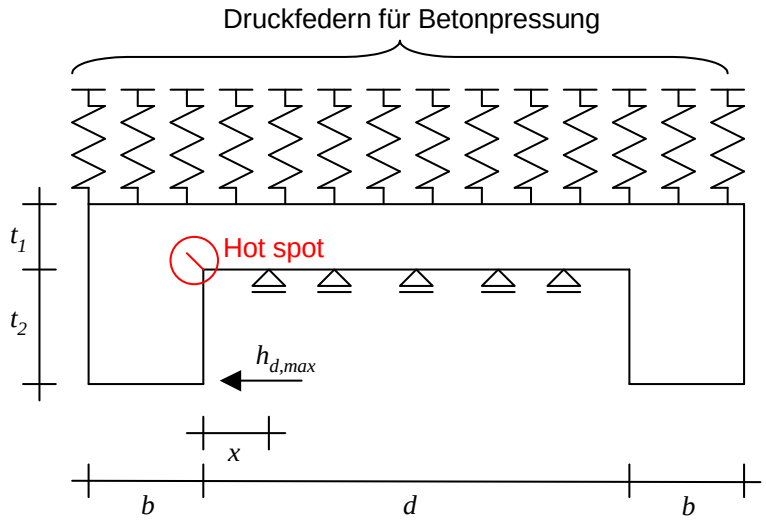


Bild 7-1: Lageroberteil mit Betonpressung und Horizontalbelastung

(2) Die Gültigkeit dieses Typs gilt für Bauteil Nr. 1 (allseits festes Kalottenlager) oder Bauteil Nr. 2A (einseitig verschiebliches Kalottenlager).

(3) Für Bauteil Nr. 1 würde die Horizontalkraft parabelförmig verteilt, für Bauteil Nr. 2A konstant verteilt sein.

(4) Der Nachweis wird in diesem Beispiel für das allseits feste Kalottenlager mit den Eigenschaften und der Belastung nach Tabelle 7-1 geführt.

Tabelle 7-1: Eigenschaften und Belastung für Lagertyp 1

Geometrie		
Dicke der Platte	t_1 [mm]	60
Höhe des Bunds	t_2 [mm]	65
Rohblechdicke	t_{Walz} [mm]	130
Breite des Bunds	b [mm]	142,5
Abstand zwischen Innenseite des Bunds zur Kalotte	x [mm]	50
Innendurchmesser des Lageroberteils	d [mm]	543

Beanspruchung		
Horizontalkraft	H_d [kN]	1936
Maximale Horizontalkraft auf den Bund	$h_{d,max}$ [N/mm]	3404
Fließgrenze	f_y (t_{Walz}) [N/mm^2]	295

(5) Die Berechnung erfolgt mit FEM, auch da die stark nicht-linearen Effekte der Bettung im Beton berücksichtigt werden sollen.

(6) Für den Beton wurde Betongüte C30/40 angenommen.

(7) Die Betonpressung wird über bilineare Druckfedern ermittelt, s. Bild 7-2, wobei eine maximale Teilflächenpressung von $3 \cdot f_{cd}$ angenommen wird.

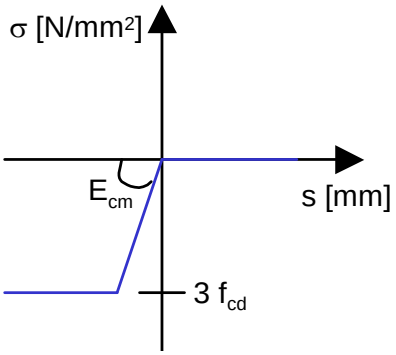


Bild 7-2: Druckfederkennlinie des Betons

(8) Die numerischen Untersuchungen erfolgten mit dem Programm ANSYS 12. Die Vereinfachung in 2-dimensionale Sektoren ermöglicht die Anwendung 2-dimensionaler Elementtypen.

- PLANE82 mit linear-elastischen Materialeigenschaften für Stahl, d.h., E-Modul 210.000 N/mm² und Querkontraktionszahl ν =0,3,
- COMBIN39 als bilineare Druckfedern für die Betonpressung.

7.2 Genauere Berechnung der Hot-Spot-Spannungen

(1) Für den Nachweis an der potentiellen Rissstelle kann das mechanische Modell in Bild 7-1 vereinfacht als Teilmodell dargestellt in Bild 7-3 modelliert werden.

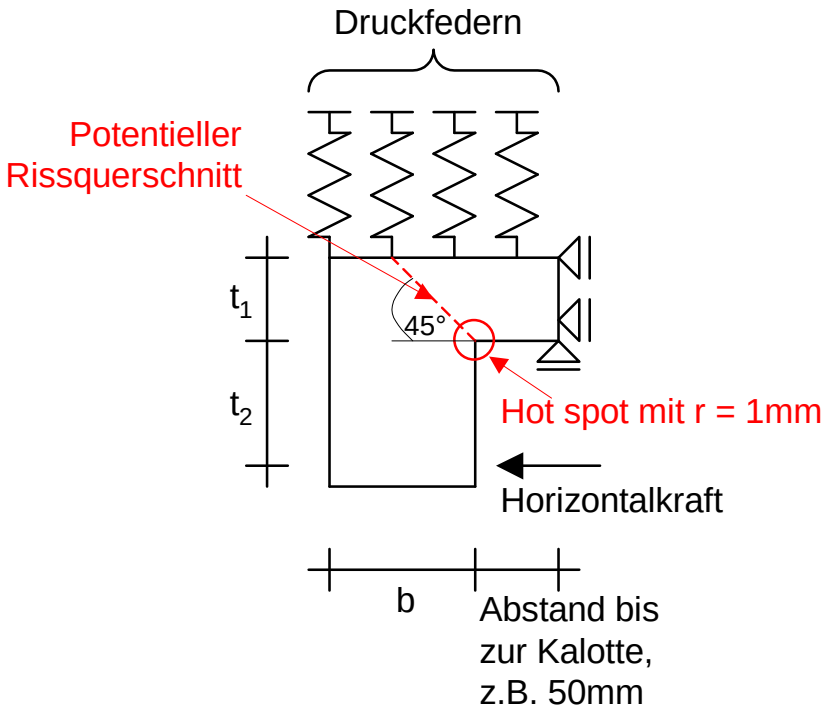


Bild 7-3: Mechanisches Modell für das Detail der potentiellen Rissstellen

(2) Die FEM-Berechnungen werden mit einem Finite-Element-Modell nach Bild 7-4 geführt, indem die Auflagerung zum Beton durch bilineare Druckfedern abgebildet wird.

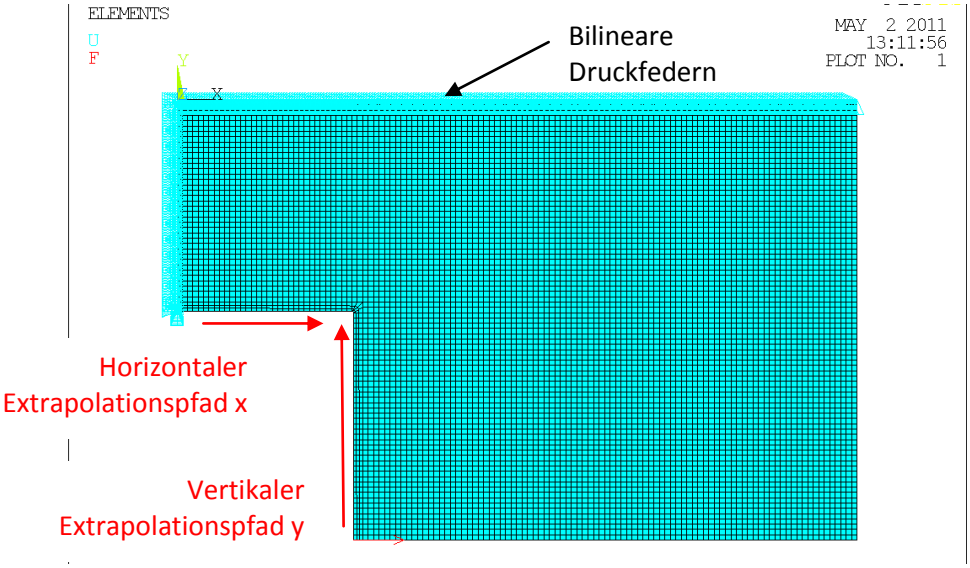


Bild 7-4: Rissstelle und Rissverlauf im FE-Netz

(3) Der Ausrundungsradius im kritischen Detail beträgt 1 mm.

(4) Die aufgebrachte Horizontalkraft beträgt 3404 N/mm.

(5) Die Elementlänge im Bereich des Risses beträgt 1 x 1 mm und ist durch Konvergenzuntersuchungen bestätigt.

(6) Es wird die übliche Hot-Spot-Stress-Methode zur Ermittlung der Hauptnormalspannungen, die nahezu senkrecht zur potentiellen Rissrichtung stehen, mit nicht-linearer Extrapolation in horizontaler und in vertikaler Richtung durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3.2), Bild 7-5.

(7) Die Hauptspannung σ_{HS} ergibt sich bei der horizontalen Extrapolation zu 106,3 N/mm² und bei der vertikalen zu 127,4 N/mm². Bei der vertikalen Extrapolation wurde der Einfluss auf die Hauptspannung am Bund im Bereich des Angriffspunktes der Horizontalkraft separiert.

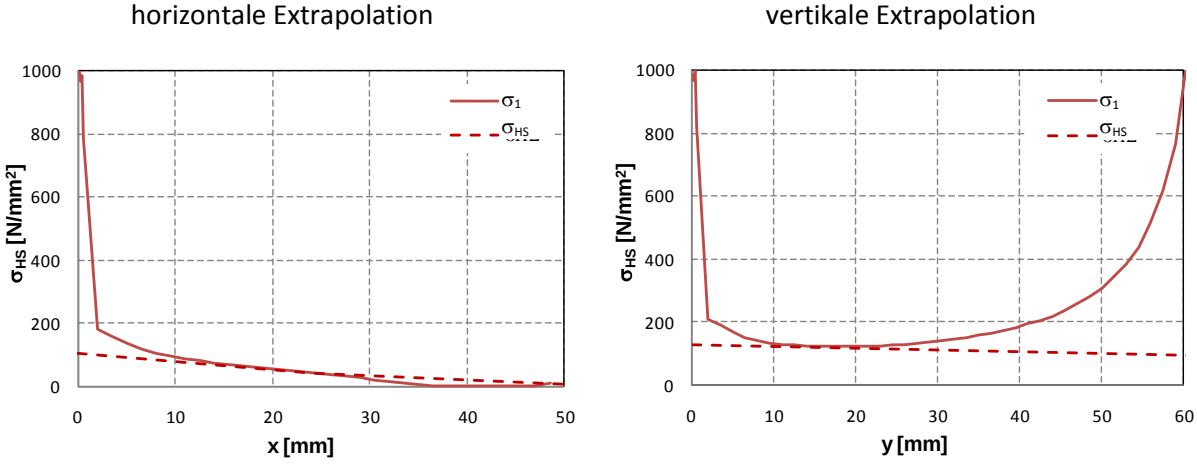


Bild 7-5: Ermittlung der Hauptspannung σ_{HS} mit Hilfe nicht-linearer Extrapolation

7.3 Nachweis

(1) Der Nachweis erfolgt mit

$$\sigma_{Ed} = 127{,}4 \text{ N/mm}^2$$

daher

$$\frac{\sigma_{Ed}}{f_y} = \frac{127{,}4}{295} = 0{,}43$$

(2) Nach Tabelle 6-3 sind die Bauteilabmessungen im sicheren Bereich.

8 Vereinfachter Nachweis mit Bezug auf Tragfähigkeitsnachweise

8.1 Allgemeines

(1) Die Bemessung von Lagern mit Tragfähigkeitsnachweisen führt in der Regel zu Lagerabmessungen nach Tabelle 3-2.

(2) Es wird im Folgenden angenommen, dass

1. die Tragfähigkeitsnachweise mit elastischen Verfahren nach der Biegetheorie für Stäbe bis zur Ausnutzung der Streckgrenze geführt werden,
2. bei den Nachweisen verformungsverträgliche Ansätze für die Belastung getroffen werden,
3. die Nachweise im ungünstigsten Anschnitt des Querschnitts senkrecht zur Mittelachse (nicht in der Richtung des wahrscheinlichen Risspfades) geführt werden,
4. die Nachweise mit Bemessungswerten der Schnittgrößen (aus γ-fachen Lasten) geführt werden,
5. Kerbspannungseffekte bei der Nachweisführung vernachlässigt werden.

(3) Um einen Zusammenhang zwischen den Bezugsspannungen σ_{Ed} als Hot-Spot-Spannungen nach Dong für den bruchmechanischen Nachweis, für die in den Tabellen 6-3 bis 6-10 die zulässigen Blechdicken vorliegen, und den Tragfähigkeitsnachweisen herzustellen, sind folgende Korrelationen erforderlich:

1. Unterschied zwischen dem Lastniveau für „häufige Lasten“ und demjenigen für Tragsicherheitsnachweise,
2. Unterschied zwischen der Hot-Spot-Spannung σ_{HS} aus der Linearisierung längs des Risspfades und der Streckgrenze f_y aus dem Tragsicherheitsnachweis im benachbarten Anschnitt senkrecht zur Mittelachse.

8.2 Korrelationen

(1) Zur Erfassung des Unterschiedes zwischen dem Lastniveau für „häufige Lasten“ und für die Tragsicherheitsnachweise wird der ungünstigste Fall von Kanalbrücken angenommen, bei denen,

- die „häufige Last“ durch die charakteristische Last (G+W) (Eigengewichtslasten) und
- die Bemessungslast für Tragsicherheitsnachweise mit γ_G(G+W) mit γ_G = 1,35

definiert sind.
Damit beträgt die „häufige Last“ gleich das 1/1,35 ≈ 0,75-fache der Bemessungslast für Tragsicherheitsnachweise.

(2) Da die Hot-Spot-Spannungen nach Bild 4-6a für den Anschnitt senkrecht zur Mittelachse in der Regel der Randspannung aus der Biegetheorie entspricht und die Hot-Spot-Spannung am Anschnitt größer als die Hot-Spot-Spannung in Richtung des Risses ist, wird angenommen, dass die Spannung am Anschnitt nach der Biegetheorie mindestens die Größe der Hot-Spot-Spannung mit Linearisierung längs des Risses annimmt. Es wird also davon ausgegangen, dass die Bezugsspannung σ_{Ed} als Hot-Spot-Spannung in Kapitel 6 der Spannung nach der Biegetheorie (beide für häufige Lasten) entspricht.

(3) Mit den Annahmen (1) und (2) beträgt die Bezugsspannung für den bruchmechanischen Nachweis

$$\sigma_{Ed} = 0{,}75 \cdot f_y$$

wobei

σ_{Ed} näherungsweise nach der Biegetheorie am Anschnitt für „häufige Belastung“ ermittelt ist,

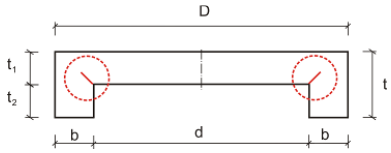
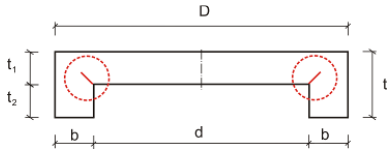
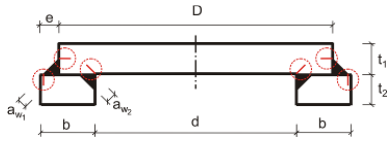
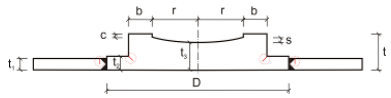
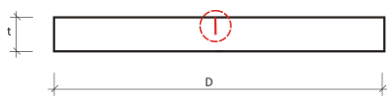
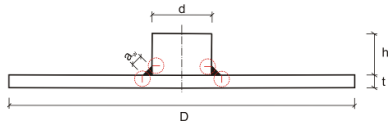
f_y die Streckgrenze ist, die beim Tragfähigkeitsnachweis nach der Biegetheorie am Anschnitt maximal erreicht wird,

0,75 der Korrelationsfaktor zwischen „häufiger Belastung“ und Bemessungslast für den Tragsicherheitsnachweis ist.

8.3 Konsequenzen für die Stahlgütewahl

(1) Die Konsequenzen aus den Vereinfachungen in 8.1 und 8.2 sind in Tabelle 8-1 dargestellt. Sie ergeben Angaben auf der sicheren Seite.

Tabelle 8-1: Stahlsortenwahl für Lagerbauteile innerhalb der Abmessungsgrenzen für Typ A und Typ B für Stahl S355 J2 und T_{Ed} = -30 °C

Nr.	Bauteil	Geometrie Lagertyp A	Geometrie Lagertyp B	Begrenzungen
1	*Lageroberteil (Gleitplatte + Seitenführung)* 	t: 55 – 315 mm t_1: 20 – 215 mm t_2: 25 – 100 mm *D: 500 – 1800 mm* *d: 355 - 1385 mm* *b: 50 - 505 mm*		t = 250 mm
2A	*Lageroberteil (Gleitplatte + Seitenführung)* 	t: 55 – 315 mm t_1: 20 – 215 mm t_2: 25 – 100 mm *D: 500 – 1800 mm* *d: 355 - 1385 mm* *b: 50 - 500 mm*		t = 250 mm
2B	*Lageroberteil (Gleitplatte + Seitenführung)* 		t_1: 55 – 285 mm t_2: 55 – 170 mm a_w: 12 - 42 mm *(K oder Y-Naht)* *D: 440 – 2580 mm* *b: 55 - 570 mm*	t_1 = 300 mm t_2 = 170 mm
3	*Lagerunterteil* 	t: 55 – 255 mm t_1: 20 – 55 mm t_2: 20 – 60 mm t_3: 35 – 150 mm *D: 330 – 1800 mm* *b: 40-100 mm* *r: 135-590 mm*	t: 55 – 255 mm t_1: 20 – 55 mm t_2: 20 – 60 mm t_3: 35 – 150 mm *D: 330 – 1800 mm* *b: 40-100 mm* *r: 135-590 mm*	t_1 = 200 mm t_2 = 200 mm
4	*Ankerplatte* 	t: ≥ 55 mm *D: 440-3300 mm*	t: ≥ 55 mm *D: 440-3300 mm*	t = 250 mm
5	*Horizontallager ohne Verdrehmöglichkeit und ohne Vertikallager* 	t: 30 – 150 mm d: 55 – 300 mm a_w: 5 – 25 mm *D: 440 - 3300 mm*	t: 30 – 150 mm d: 55 – 300 mm a_w: 5 – 25 mm *D: 440 - 3300 mm*	t = 40 mm

9 Referenzen

[1] DASt-Richtlinie 009: Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten, Deutscher Ausschuss für Stahlbau. Januar 2005.

[2] DIN EN 1993-1-10: Eurocode 3, Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung. 2005.

[3] JRC – Scientific and Technical Report: Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-10 “Material Toughness and Through Thickness Properties and Other Toughness Oriented Rules in EN 1993. CRC, September 2008.

[4] JRC – Scientific and Technical Report: Choice of Steel Material to avoid Brittle Fracture for Hollow Section Structures – Addition to EN 1993-1-10. 2011.

[5] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3, Teil 1-9: Ermüdung. 2005.

[6] Kühn, B.: Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch. Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 2005, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8322-3901-4.

[7] DIN EN 1337-1: Lager im Bauwesen – Teil 1: Allgemeine Regelungen. 2001.

[8] DIN Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken. 2003.

[9] DIN Fachbericht 103: Stahlbrücken. 2003.

[10] Hobbacher, A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW-documentXIII-2151-07/XV-1254-07, 2007.

[11] Marshall, P.W.: Design of Welded Tubular Connections. Basis and Use of AWS Code Provisions. Development in Civil Engineering, 37, Elsevier, 1992. pp. 412.

[12] ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section III, Rule for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Subsection NB, Class 1 Componets. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1989.

[13] Dong, P.: A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints. International Journal of Fatigue, Vol. 23, 2001, pp. 865-876.

[14] Dong, P., Hong, J.K., de Jesus, A.M.: Analysis of recent Data using the Structural Stress Procedure in ASME Div 2 Rewrite. Proceedings ASME Pressure Vessel and Piping Conference. PVP2005-71511, New York, ASME, 2005.