

# Leckbildung in unverankerten Tankbauwerken bei Erdbebenbeanspruchung

Manfred Wasicek, Franz Dieter Fischer

*Institut für Mechanik, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Strasse 18, A-8700 Leoben, Austria*

Otmar Kolednik

*Erich Schmid Institut für Materialwissenschaften der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Montanuniversität Leoben, Jahnstrasse 12, A-8700 Leoben, Austria*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Für die Untersuchung des Dichtheitsverhalten der geschweißten Tankbodeneckverbindung des untersten zylindrischen Mantelschusses mit dem Bodenrandblech wird ein unverankerter, hoher Flachbodentank mit Schwimmdachausführung zugrunde gelegt, welcher zyklisch durch Erdbeben zufolge der Flüssigkeitsfüllung beansprucht werden. Zuzufolge der Baustellenschweißung sind an dieser geschweißten Tankbodeneckverbindung Schweißnahtfehler wie Einbrandkerben und Kaltrisse am Schweißnahtübergang zum Grundmaterial nicht auszuschließen. Für die Vorhersage von Undichtheiten ist daher die genaue Kenntnis der Rissentstehung und des Risswachstums bei zyklischer Beanspruchung an dieser hochbeanspruchten Stelle erforderlich. Als Kriterium für die Undichtheit wird einerseits das Eintreten des stabilen Risswachstums an der fehlerhaften Struktur, welches durch den bruchmechanische Kennwert, das  $J_{IC}$ -Integral, gekennzeichnet ist, und andererseits die kritische Lastwechselzahl für den Anriss bei Einbrandkerben und das Risswachstum bei Kaltrissen bestimmt. Die Berechnung der J-Integrale zufolge Abheben der Tankbodenecke bei verschiedenen Erdbebenbeschleunigungen wurde mit einem axialsymmetrischen FE-Modell ausgeführt. Der  $J_{IC}$ -Wert für den Beginn des stabilen Risswachstums wurde an Proben für zwei ausgewählte Werkstoffe (S335 J2 G3 und S460N) mit verschiedenen Kerb- bzw. Risstiefen bestimmt.

## 1. EINLEITUNG

Oberirdische, zylindrische Flachbodentanks mit Fest- oder Schwimmdach werden häufig für die Lagerung von petrochemischen oder umweltgefährdenden Produkten eingesetzt. Diese Lagerbehälter werden meist direkt auf einer Bitumenschicht, welche auf verdichtetem Untergrund aufgebracht wird, errichtet, wobei auf eine Verankerung in den meisten Fällen verzichtet wird. Für die Untersuchungen wird ein typischer hoher, unverankerter Flachbodentank mit Schwimmdachausführung ( $H/R=2$ ), herangezogen.

Die den Berechnungen zugrunde gelegten typischen Schweißnahtfehler an der Tankbodeneckverbindung – der Verbindungsstelle des Mantelbleches mit dem Bodenrandblech - sind aus Abbildung 1 ersichtlich.

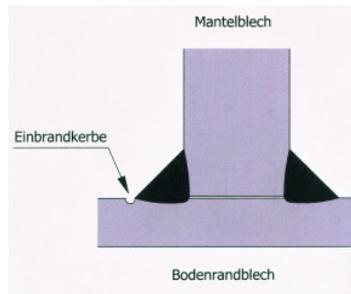


Abbildung 1: Einbrandkerbe am Übergang zum Grundmaterial

Das Ziel dieses Beitrages soll sein zu beurteilen, ob die angenommenen Einbrandkerben bzw. Kaltrisse an der Tankbodenecke bei Erdbebenbeanspruchung zur Undichtheit des mit Flüssigkeit gefüllten Tanks führen können.

## 2. ERDBEBENBEANSPRUCHUNG

Die dynamisch aktivierten Druckkomponenten bei Erdbebenbeanspruchung zufolge der Flüssigkeitsbewegung setzen sich aus den folgenden 3 Komponenten zusammen, siehe auch Abbildung 2,:

- 1) Konvektive Druckkomponente  $p_{sl}$  (vertikale Oberflächenschwingung),
- 2) Impulsive Druckkomponenten  $p_{i1}$  (Starrkörperparallelverschiebung des Behälterbodens) und  $p_{i2}$  (Schwingung der Flüssigkeit mit der Behälterwand in Bezug auf den Behälterboden)

Die dynamischen Drücke werden nach Rammerstorfer und Fischer (2004) unter Verwendung des des Response Spektrums des Eurocode 8-1 (2006) ermittelt.

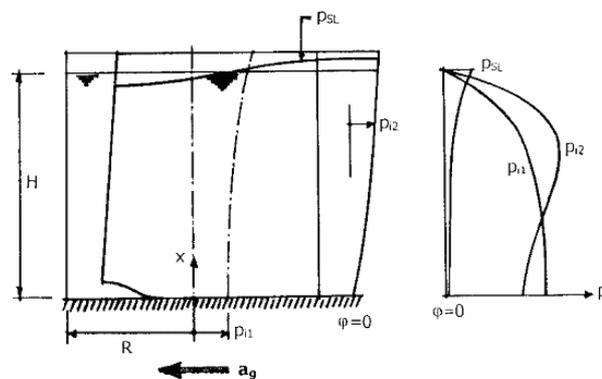


Abbildung 2: Dynamische Innendruckkomponenten

## 3. AXIALSYMMETRISCHES FE-MODELL ZUR ERMITTLUNG DER J-WERTE

Bei der Vereinfachung eines dreidimensionalen Modells, Kettler (2004), durch ein axialsymmetrisches Modell, Wasicek et al. (2007), wird die Tankbodenecke über den gesamten Umfang im gleichen Ausmaß abgehoben. Diese Vereinfachung der Berechnung bei Erdbeben ist zulässig, da die Membranzugkraftverteilung  $V_{max}$  über

einen Bereich von  $155^\circ \leq \varphi \leq 205^\circ$ , gemessen bezüglich der Erdbebenbeschleunigungsrichtung, nahezu konstant ist und ausserhalb nur langsam abnimmt. Die rotationssymmetrische Ersatzlast  $V_{eq}$  [N/mm] des axialsymmetrischen Systems wird in der Weise bestimmt, dass die Abhebehöhe  $w_{max}$  für das dreidimensionale Modell und das axialsymmetrische Modelle denselben Wert ergibt. Zu bemerken ist, dass mit zunehmender Bodenbeschleunigung die  $V_{eq}$ -Werte sich den  $V_{max}$ -Werten des dreidimensionalen Modells angleichen.

Mittels einer geometrisch- und materiell nichtlinearen Finite-Elemente-(FE)-Berechnung (Werkstoffgesetz mit isotroper Verfestigung) wird die rissstreibende Kraft, das J-Integral, für die verschiedenen Belastungsstufen bei Erdbebenbeanspruchung bestimmt. Die numerische Berechnung wird mit dem FE-Programm Abaqus ([www.abaqus.com](http://www.abaqus.com)) ausgeführt, wobei das Tankeck als axialsymmetrische Struktur mittels Solid Elements CAX4 modelliert wird.

#### 4. BESTIMMUNG DER RISSWIDERSTANDSKURVEN UND DES BRUCHMECHANISCHEN KENNWERTES $J_{IC}$ AUS DEM 3-PUNKT-BIEGEVERSUCHEN

Die bruchmechanischen Versuche wurden einerseits mittels einer 3-Punkt-Biegeprobe mit eingesägten Kerben mit  $a_0 = 2$  mm und  $a_0 = 4$  mm und andererseits mit eingeschwungenen Ermüdungsrissen von  $a_0 = 5$  mm ausgeführt. Die J-Werte wurden durch numerische Integration der an der Probe geleisteten Arbeit (Fläche unter der Kraftverschiebungskurve) nach ASTM E 1737-96 (1996) bestimmt. Das Risswachstum  $\Delta a$  wurde mit Hilfe der Gleichstrompotentialmethode gemessen. Aus den J- und  $\Delta a$ -Werten werden die Risswiderstandskurven ermittelt. Der Schnittpunkt der Rissabstumpfunggeraden mit der Risswiderstandskurve ergibt das  $J_{IC}$ -Integral als Initiierungswert des stabilen Risswachstums, siehe Abbildung 3.

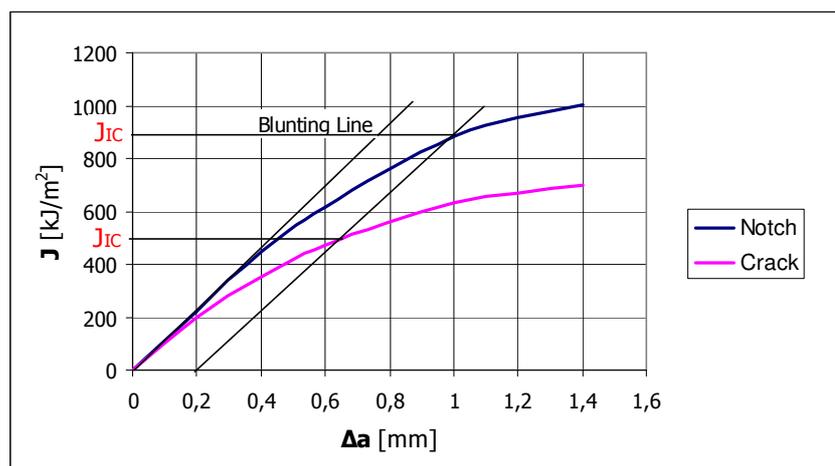


Abbildung 3: Risswiderstandskurven J- $\Delta a$  für Material S235 J2 G3

## 5. BESTIMMUNG DER KRITISCHEN KERB- BZW. RISSSTIEFE FÜR DEN BEGINN DES STABILEN RISSWACHSTUMS

Zuerst werden die J-Integrale für verschiedene Anfangskerb- bzw. Risstiefen  $a_0$  mittels der rotationssymmetrischen Membranzugkraft  $V_{eq}$  an der abgehobenen Bodenecke für 3 verschiedene Bodenbeschleunigungsstufen bestimmt und in einem J- $a_0$  Diagramm dargestellt. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, werden die kritischen Kerb- bzw. Risstiefen für den Beginn des stabilen Risswachstums durch den Schnittpunkt der J- $a_0$  Kurven mit den  $J_{IC}$ -Linien, welche für Kerben und Risse aus den Materialversuchen ermittelt wurden, bestimmt.

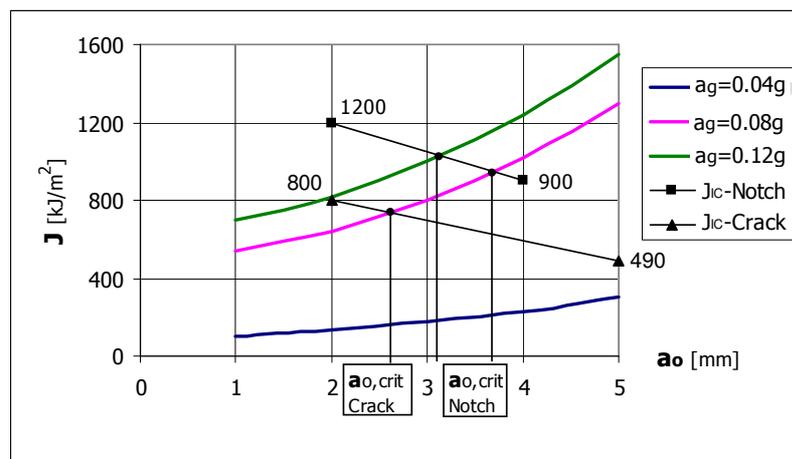


Abbildung 4: Kritische Anfangskerb- bzw. Risstiefen  $a_0$  in Abhängigkeit von der Bodenbeschleunigungsstufe  $a_g$

## 6. VERHALTEN VON KERBEN UND RISSEN BEI ZYKLISCHER ERDBEBENBEANSPRUCHUNG

Die zyklische Belastung erfolgt durch das wechselnde Abheben und Aufsetzen der Tankbodenecke auf das Fundament zufolge Massenbewegung der Flüssigkeitsfüllung. Bei einem 40 Sekunden dauernden Erdbeben kann mit rd. 15 maximalen Abhebungen der Tankbodenecke gerechnet werden.

### 6.1 ERMÜDUNGSANRISSE BEI EINBRANDKERBEN, $a_0 = 2\text{mm}$

Mit dem Kurzzeitfestigkeitskonzept (Low-Cycle-Fatigue) von Coffin-Manson, siehe z.B. Dowling (1999), wird die erforderliche Anzahl von Zyklen  $N_A$  bestimmt, die für einen Anriss von ca. 0.1 mm erforderlich ist. Dieses Konzept geht von einer Dehnschwingbreite  $\Delta\varepsilon$  im Kerbgrund aus, welche mithilfe des Spannungs-Dehnungsdiagramms, siehe Abbildung 5, ermittelt wird. Wie aus dem Diagramm ersichtlich wird das erste Abheben im nahezu verfestigungsfreien Bereich der wahren Arbeitslinie abgeschlossen. Die folgenden Zyklen von Aufsetzen und Abheben der Bodenecke erfolgen in einer Schleife, wobei es zum Einspielen im plastischen Bereich kommt. Die Dehnschwingbreite  $\Delta\varepsilon$  ergibt sich aus dem Anfangs- und Endpunkten dieser Hysterese.

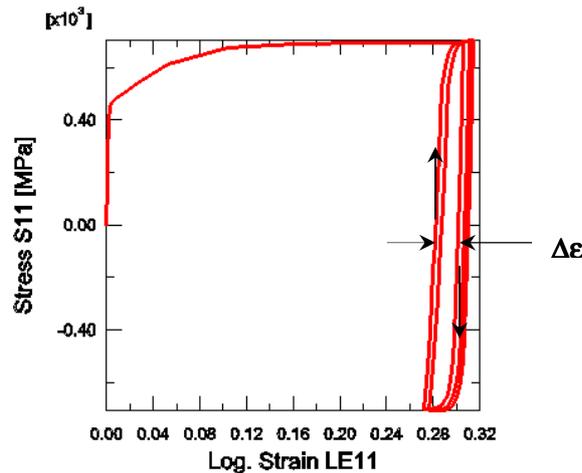


Abbildung 5: Plastisches Einspielen im Kerbgrundbereich

Folgende Formeln kommen zur Anwendung:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N^*)^b + \varepsilon'_f (2N^*)^c,$$

$$N_A = N^* \left(1 - \sigma_m / \sigma'_f\right)^{-1/b}.$$

$\sigma'_f$  und  $\varepsilon'_f$  sind die wahre Bruchspannung bzw. Bruchdehnung, welche mithilfe des Zugversuches bestimmt werden;  $b$  und  $c$  sind elastische- bzw. plastische Dehnungs-exponenten.

Das Ergebnis für  $N_A$  lautet bezogen auf die maximale Bodenbeschleunigung  $a_g$ ,

$$a_g = 0.04 \cdot g, \Delta\varepsilon/2 = 0.021, N_A = 210,$$

$$a_g = 0.08 \cdot g, \Delta\varepsilon/2 = 0.050, N_A = 80,$$

$$a_g = 0.12 \cdot g, \Delta\varepsilon/2 = 0.080, N_A = 30.$$

Der  $N_A$ -Wert von 30 kommt bereits sehr nahe an 15 heran. Dies bedeutet, dass ein Anriss im Kerbgrund wahrscheinlich ist und die Kerbe so gefährlich wird wie ein Riss.

## 6.2 RISSWACHSTUM BEI KALTRISSEN, $a_0 = 2\text{mm}$

Das Wachstum eines Risses bei zyklischer Beanspruchung kann mithilfe des Paris-Shi-Erdogan Konzeptes, siehe Dowling (1999), bestimmt werden. Hierzu wird die erforderliche Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K$  mithilfe des J-Integrals bestimmt, indem der mit dem FE-Programm Abaqus ermittelte  $\Delta J$ -Wert in die bekannte Beziehung  $\Delta K = \left(E \Delta J / (1 - \nu^2)\right)^{1/2}$  eingesetzt wird. Die  $\Delta J$ -Werte sind in Abbildung 6 für eine maximale Bodenbeschleunigung  $a_g = 0.04g$  aufgetragen.

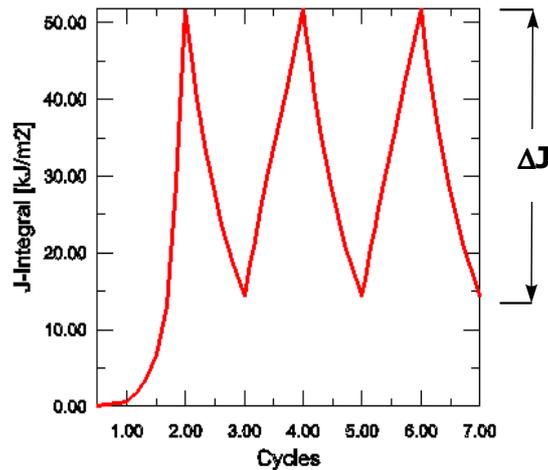


Abbildung 6: J-Integral für 3 Lastzyklen mit  $a_g=0.04g$ ,  $\Delta J=52-14=38 \text{ kJ/m}^2$

Die Anzahl der Lastzyklen  $N_f$  für ein Risswachstumsinkrement  $\Delta a$  wird mit der Beziehung  $\Delta a = N_f \cdot C (\Delta K)^m$  bestimmt; C und m sind dabei Materialkonstanten.

Als Grenzwerte von  $\Delta K$  für Stahl S355 J2 G3 werden verwendet:

$\Delta K \leq \Delta K_{th} = 40 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$  ...kein Risswachstum ,

$\Delta K \geq \Delta K_{th} = 200 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$  ..Beginn des instabilen Risswachstums.

Daraus folgt:

$a_g = 0.04g$ ,  $\Delta J = 38 \text{ KJ/m}^2$ ,  $\Delta K = 162 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ ,

$a_g = 0.08g$ ,  $\Delta J = 621 \text{ KJ/m}^2$ ,  $\Delta K = 369 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ .

Offensichtlich kann ein Erdbeben mit  $a_g \cong 0,05g$  den  $\Delta K_{max}$  Wert von  $200 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$  erreichen, und daher muß mit der Undichtheit der Tankbodenecke gerechnet werden.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNGEN

- Die durch Erdbeben aktivierte hydrodynamische Druckverteilung für die Berechnung des Verformungszustandes des 3-D Tank Modells (Abheben der Tankbodenecke) wird mithilfe von Richtlinien und Normen ermittelt.
- Mit einem axialsymmetrischen Ersatzmodell kann vereinfacht die Beanspruchung der Tankbodenecke, ausgedrückt durch den bruchmechanischen J-Integral Wert, auf Grund von verschiedenen Erdbebenbodenbeschleunigungen  $a_g$  ermittelt werden.
- Mithilfe des materialabhängigen Rissinitiierungswertes  $J_{IC}$  und dem J-Integral aus der FE-Berechnung für die fehlerhafte Struktur wird die kritische Anfangskerb- bzw. Risstiefe bestimmt.
- Für die zyklische Erdbebenbelastung wird im Falle von Kerben mithilfe des Kurzzeitfestigkeitskonzeptes die Rissentstehung im Kerbgrund analysiert. Mittels dem Paris-Shi-Erdogan Konzept wird das Risswachstum von bestehenden Rissen überprüft und damit die Entstehung von Undichtheiten am Tankbodeneck festgestellt.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness, ASTM E 1737-96, 1996.
- Dowling, N.E. 1999. Mechanical Behavior of Materials, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- EN 1998-4, Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 4: Silos, tanks and pipelines, Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2006, Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines, European Committee for Standardization (CEN), 2006.
- Kettler, M. 2004. Earthquake design of large liquid-filled steel storage tanks, Diplomarbeit, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz.
- Rammerstorfer, F.G., Fischer, 2004. Ein Vorschlag zur Ermittlung von Belastungen und Beanspruchungen von zylindrischen, flüssigkeitsgefüllten Tankbauwerken bei Erdbebeneinwirkung, Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, Neuauflage des Institutsberichtes ILFB-2/90.
- Wasicek, M., Fischer, F.D., Kolednik, O., 2007. Leaking of Unanchored Tanks Subjected to Cyclic Loading, in Proc. ECCOMAS, Rethymno, Greece, 12 Seiten.