

## Stutzen bei DRL

Bemessung von Einzelstutzen und Einstiegsöffnungen mit Flanschen und Deckeln im Druckrohrleitungsbau

<b>Programm / Ausschreibung</b>	IWI 24/26, IWI 24/26, Basisprogramm Ausschreibung 2025	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.01.2025	<b>Projektende</b>	31.12.2025
<b>Zeitraum</b>	2025 - 2025	<b>Projektlaufzeit</b>	12 Monate
<b>Keywords</b>			

### Projektbeschreibung

Dieses Projekt behandelt die Bemessung und konstruktive Auslegung von Einstiegsöffnungen und Anschlussstutzen bei stählernen Druckrohrleitungen (DRL) in Hinblick einer realitätsnahen Tragfähigkeit, eines reduzierten Materialaufwandes und einer erhöhten Betriebs- bzw. Lebensdauer.

Druckrohrleitungen müssen mit Öffnungen versehen sein, um die Durchführung von Inspektionen und Prüfungen zu ermöglichen. Ab einem Innendurchmesser von 800 mm sind Einstiegsöffnungen bei Druckrohrleitungen vorzusehen. Vielfach weisen Druckrohrleitungen auch Einzelstutzen (von Zu- und Entleerleitungen oder Be- und Entlüftungsventilen...) mit kleineren Rohrdurchmessern auf, die hier ebenfalls behandelt werden sollen. Meist sind die Einstiegsöffnungen mit einem aufgeschraubten Deckel verschlossen. Damit verbunden sind auch die zu führenden Nachweise von Flansch, Deckel und Schrauben.

Bei Einstiegsöffnungen und Stutzen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausführungen. Weiters sind bei den Einstiegsöffnungen und Stutzen hohe Spannungsspitzen infolge der Innendruckbelastung zu erwarten und die Erfahrung hat gezeigt, dass in diesen Bereichen der Ermüdungsnachweis oft maßgebend wird. Im Zuge des Projektes soll auf folgende Punkte eingegangen werden:

- Beurteilung von Einstiegsöffnungen und Stutzen im Altbestand

Ziel ist es hier die Beurteilung der Restlebensdauer mit Hilfe von FE-Modellen zu zeigen. Weiters sollen die plastischen Traglastreserven gezeigt werden, da die elastischen Spannungsnachweise bei Einstiegsöffnungen und Stutzen in Bestandsanlagen oft nicht erfüllt werden können. Aus den gewonnen Erkenntnissen können dann Optimierungen für eine Neuplanung getroffen werden.

- Hinweise für die Neuplanung von Einstiegsöffnungen und Stutzen

Optimierung der Ausführung von Verstärkungen im Bereich des Lochausschnittes im Hauptrohr infolge der Einstiegsöffnungen und Stutzen vor allem in Hinblick Ermüdung. Herausarbeiten des Einflusses der Stutzenlänge auf die Beanspruchung des Flansches, des Deckels und der Schrauben.

- Beurteilung und Neuauslegung von Rohrflansch, Deckel und zugehöriger Verschraubung

Hier gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Richtlinien und Normen. Ziel ist es herauszuarbeiten wann welche Richtlinie bzw. Norm eingesetzt werden soll. Ein weiters Ziel ist Vorgehensweise zu definieren wie die Führung der Nachweise mit Hilfe

von FE-Berechnungen erfolgen kann.

## **Endberichtkurzfassung**

Im Zuge des Projektes wurden 12 ausgeführte Einstiegsöffnungen (Öffnungen zum Einsteigen in die Druckrohrleitung zu Inspektions- und Revisionszwecken) und 8 Blockflansche (kleinere Öffnungen von Füll- oder Entleerleitungen bzw. Be- und Entlüftungsleitungen) von Druckrohrleitungen bei (Pump-)Speicherkraftwerken auf deren Trag- und Verformungsverhalten mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen untersucht. Einstiegsöffnungen (EÖ) und Blockflansche (BFL) stellen Diskontinuitäten in der Zylinderschale der Druckrohrleitung dar und es entstehen Spannungskonzentrationen aufgrund der Innendruckbelastung in diesen Bereichen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (ULS) sowie der Ermüdungsnachweis (FAT) in diesen Bereichen oft bemessungsbestimmend wird.

Die FE-Berechnungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit haben Folgendes gezeigt:

Unabhängig von der Ausführung der EÖ oder des BFL liegt die maximale Spannung immer an derselben Stelle vor. Der maßgebende Punkt liegt an der Innenseite des Rohres, am Lochrand im Scheitel der Öffnung. Der Grund hierfür liegt in der Umlenkung der Umfangsspannungen um den Lochausschnitt herum.

Die elastisch-plastischen FE-Berechnungen haben gezeigt, dass ausreichende plastische Tragreserven vorliegen. Bei manchen EÖ kann auch bei Betriebsinnendruck kein elastischer Spannungsnachweis erfüllt werden, jedoch haben die Berechnungen gezeigt, dass auch beim 1,4-fachen (entspricht dem Sicherheitsfaktor) Betriebsinnendruck ausreichend kleine maximale plastische Dehnungen vorliegen. Bei der Überprüfung von Bestandsanlagen sollte bei einem negativen Befund für den rein elastischen Spannungsnachweis am maßgebenden Punkt, ein ergänzender plastischer Nachweis erfolgen.

Die Schrauben bei EÖ weisen unter Innendruckbelastung deutlich unterschiedliche Beanspruchungen auf, entgegen der Modellvorstellung einer rotationssymmetrischen und daher identen Schraubenbeanspruchung. Es sind in der höchstbeanspruchten Schraube, trotz Vorspannung, den Membranspannungen hohe Biegespannungen überlagert. Diese sind für den ULS-Nachweis nicht relevant, da sie durch Plastizieren sich selbst beschränken. Daher sollten für den ULS-Nachweis wie bisher nur die Membranspannungen beurteilt werden.

Aus den elastischen und plastischen FE-Berechnungen hat sich herausgestellt, dass die Ausführung eines Kragenbleches oder einer verstärkten Viertel- oder Halbschale im Bereich der EÖ empfohlen werden kann (Mindestlänge des Kragenblechs wurde im Projekt ermittelt), da erhöhte Spannungen um den Lochausschnitt auftreten, die nur durch eine größere Rohrwanddicke reduziert werden können. Auch sollte die Stutzenwanddicke bei EÖ nicht zu gering ausgeführt werden, da ein dickeres Stutzenblech ebenso die Spannungen beim Lochausschnitt reduziert. Auch Blockflansche mit Kragenverstärkungen empfehlen sich als Ausführungsform für EÖ, da hier die Schweißnaht relativ weit von der Öffnung entfernt liegt und dort die Spannungen schon deutlich geringer sind (geringere Ermüdungsgefahr). Ebenso besitzen Blockflansche große Wanddicken im Bereich der Öffnung, sodass unter Umständen auch eine Kragenverstärkung entfallen kann. Bei kleineren Öffnungen empfiehlt sich die Lösung eines eingesetzten Blockflansches.

Die FE-Berechnungen für den Grenzzustand der Materialermüdung haben Folgendes gezeigt:

Die Ermüdungsnachweise in den Blechen werden bei EÖ meist an der Schweißnaht zwischen EÖ-Stützen und den Hauptrohr maßgebend. Die Ermüdungsnachweise sollten mit Strukturspannungen geführt werden, auf Basis der Spannungsspiele senkrecht und parallel zur Naht. Die Reduktion der Ermüdungsfestigkeit bei größeren Blechdicken ist zu beachten. Eine Kragenverstärkung (falls notwendig) um die EÖ sollte in das Rohr mit einer volldurchgeschweißten Naht eingesetzt werden. Weiters hat sich aus den Auswertungen der Strukturspannungen für den Ermüdungsnachweis gezeigt, dass die beste Lösung ist, den Stützen auf das Rohr aufzusetzen. Zum einen ist die Schweißnahtdicke meist geringer als bei eingesetzten Stützen, zum anderen sind die ermüdungswirksamen Spannungen an der Schweißnaht geringer.

Für die Ermüdungsnachweise der Schrauben müssen die Gesamtspannungen (Membran- und Biegespannungen) herangezogen werden. Die alleinige Berücksichtigung der Membranspannungen aus den Schraubennormalkräften liefert deutlich zu günstige Ergebnisse. Bei der Spannungsermittlung ist die ausgeprägte Nichtlinearität der Schraubengesamtspannung bezogen auf den jeweiligen Betriebsinnendruck zu beachten. Daher müssen zwei getrennte Lastfälle für oberen und unteren Wert des Betriebsinnendrucks im Ermüdungsfall berechnet werden ( $p_{i,o}$  und  $p_{i,u} = p_{i,o} - \Delta p_{i,e}$ ) und erst aus den Einzelergebnissen der Schraubengesamtspannung ( $\sigma_{ges,o}$  bzw.  $\sigma_{ges,u}$ ) kann dann die zutreffende Gesamtspannung  $\Delta\sigma_{ges} = \sigma_{ges,o} - \sigma_{ges,u}$  ermittelt werden

Weitere Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt:

Die Ausbildung von Flansch und Deckel sollte bei EÖ mit entlasteten Flanschen ausgeführt werden. Bei entlasteten Flanschen liegt ein vollflächiger Kontakt zwischen Flanschblatt und Deckel vor, dadurch erfahren die Schrauben beim Vorspannen vorwiegend Membranzugspannungen und kaum Biegespannungen. Über die absolute Höhe der Vorspannkraft ist es schwierig eine Empfehlung auszusprechen, da sich gezeigt hat, dass die unterschiedlichen Ausführungen der EÖ (unterschiedliche Blechdicken von Flansch und Deckel, unterschiedliche Stützenblechdicken, unterschiedliche Anzahl und Durchmesser der Schrauben) einen Einfluss darauf haben wie sich der Vorspanngrad der Schrauben auf die ermüdungswirksamen Schraubenspannungen auswirkt. Bei hohen Innendruckschwankungen  $\Delta p_i$  empfiehlt es sich jedenfalls die Schrauben ausreichend vorzuspannen, da ein höherer Vorspanngrad der Schrauben immer zu geringeren ermüdungswirksamen Schraubengesamtspannungen führt. Auch werden die Klaffungen in der Fuge zwischen Flansch und Deckel bei höheren Vorspanngraden geringer (Auswirkungen auf Dichtheit). Die FE-Berechnungen haben auch gezeigt, dass mindestens 16 Schrauben um den Umfang des Deckels der EÖ angeordnet werden sollten (4 Schrauben je 90°). Je größer der Durchmesser  $d_i$  ist der Einstiegsöffnung und die Innendruckbeanspruchung sind, desto mehr Schrauben werden empfohlen. Bei wenigen Schrauben im Lochkreis kommt es zu großen überlagerten Biegespannungen einzelner Schrauben, die beim Ermüdungsnachweis mit zu berücksichtigen sind.

Im Zuge des Projektes wurden empfohlene konstruktive Ausbildungen von EÖ und BFL vorgeschlagen, um die Tragfähigkeit sowie die Restlebensdauer aufgrund von Ermüdung zu erhöhen. Weiters wurden Empfehlungen zur FE-Modellierung für den rechnerischen Nachweis von EÖ und BFL gegeben, umso möglichst effiziente und treffsichere FE-Modelle zu erstellen.

Es wurden auch die einschlägigen Normen und Richtlinien zur Auslegung von Einstiegsöffnungen auf deren Anwendbarkeit bei EÖ von Druckrohrleitungen in der Praxis bewertet.

### **Projektpartner**

- Österreichs E-Wirtschaft