

Institut für Stahlbau*Institutsvorstand
Univ.Prof. DI Dr. H. Unterweger*Lessingstr. 25,
A-8010 Graz
Tel: ++43-316/873-6200
Fax: ++43-316/873-6707
h.unterweger@tugraz.atSekretariat: Simone Pammer
Tel.: ++43 316/873-6201
s.pammer@tugraz.at

DVR: 008 1833

UID: ATU 574 77 929

DRUCKSCHACHT KW LANGENEGG UND KW WALGAU**Bericht über die FE-Berechnungen zu den
Stollenpanzerungen KW Langenegg und KW Walgau**

Univ.Prof. DI Dr. Unterweger Harald

Bearbeiter: DI Dr. Kettler Markus

Institut für Stahlbau, TU Graz

Oktober 2012



Auftraggeber:

VORARLBERGER ILLWERKE AG

Batloggstrasse 36

6780 SCHRUNS

Bericht über die FE-Berechnungen zu den Stollenpanzerungen KW Langenegg und KW Walgau

Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterweger

Bearbeiter: DI Dr. Markus Kettler

Institut für Stahlbau, TU Graz

Inhalt

1.	Problemstellung.....	3
2.	KW Langenegg – FE-Berechnungen zur Ermittlung des zulässigen Außendrucks.....	6
2.1.	Berechnungsgrundlagen.....	6
2.1.1.	Material und Geometrieparameter.....	6
2.1.2.	Imperfektionsannahme (Unrundheiten der Rohrwand)	6
2.1.3.	Belastung, Randbedingungen und Modellierung.....	9
2.1.4.	Definition der Kontaktfläche und der Gebirgsmitwirkung.....	12
2.1.5.	Berechnungsmethode	12
2.2.	Ergebnisse im Bereich A, Rohre 8-6 (16 Prätzen).....	13
2.2.1.	Modell A1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)	13
2.2.2.	Modell A2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung).....	16
2.2.3.	Modell A3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmitwirkung berücksichtigt).....	19
2.2.4.	Traglastberechnung mit Modell A3 (LPF=1.30).....	22
2.3.	Ergebnisse im Bereich B, Rohre 6-3 (8 Prätzen).....	26
2.3.1.	Modell B1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)	26
2.3.2.	Modell B2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung).....	28
2.3.3.	Modell B3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmitwirkung berücksichtigt).....	31
2.3.4.	Traglastberechnung mit Modell B3 (LPF=1.60).....	35

3.	KW Walgau – FE-Berechnungen zur Ermittlung des zulässigen Außendrucks	39
3.1.	Berechnungsgrundlagen.....	39
3.1.1.	Material und Geometrieparameter.....	39
3.1.2.	Imperfektionsannahme (Unrundheiten der Rohrwand)	39
3.1.3.	Belastung, Randbedingungen und Modellierung	40
3.1.4.	Definition der Kontaktfläche	42
3.1.5.	Berechnungsmethode	42
3.2.	Ergebnisse im Bereich der Rohre 3-6 (16 Prätzen).....	43
3.2.1.	Modell C1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)	43
3.2.2.	Traglastberechnung mit Modell C2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung), (LPF=0.936)	46
3.2.3.	Modell C3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmitwirkung berücksichtigt)	49
3.2.4.	Traglastberechnung mit Modell C3, (LPF=1.01)	53

1. Problemstellung

Der vorliegende Bericht beschreibt die numerischen Berechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente und deren Ergebnisse zu den Stollenpanzerungen der Kraftwerke Langenegg und Walgau. Im Detail handelt es sich genau um jene Bereiche der Stollenpanzerungen, welche mit zusätzlichen Prätzen ausgeführt sind. Ausgangspunkt der gegenständlichen Untersuchungen ist der im Sommer 2010 eingebeulte Druckschacht des Kraftwerk Rodund II und der Bericht über die FE-Berechnungen und mögliche Schadensmechanismen vom 15. Juli 2011. Aufbauend auf den damals gewonnenen Erkenntnissen werden die Panzerungen der Kraftwerke Langenegg und Walgau auf ihre Tragfähigkeit gegen Gebirgswasserdruck – bei entleerter Rohrleitung – untersucht. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Beanspruchungen der Prätzen einschließlich ihrer Anschweißnähte zum Rohr.

Für KW Langenegg lassen sich zwei Bereiche unterscheiden. Bereich A besteht aus den Rohren 8-6 (Rohr $\varnothing = 3100$, Dicke $t = 11$ mm), siehe Abb. 1 und ist mit 16 Prätzen entlang des Umfangs ausgeführt, die in Rohrlängsrichtung jeweils um den halben Winkel versetzt angeordnet sind. Zusätzlich ist in der Abbildung der für die FE-Berechnungen modellierte Bereich eingezeichnet. Der Ausschnitt weist einen Öffnungswinkel von $33.75^\circ (= 1.5 \cdot 360^\circ / 16)$ und eine Länge von 750mm (=Prätzenabstand) auf.

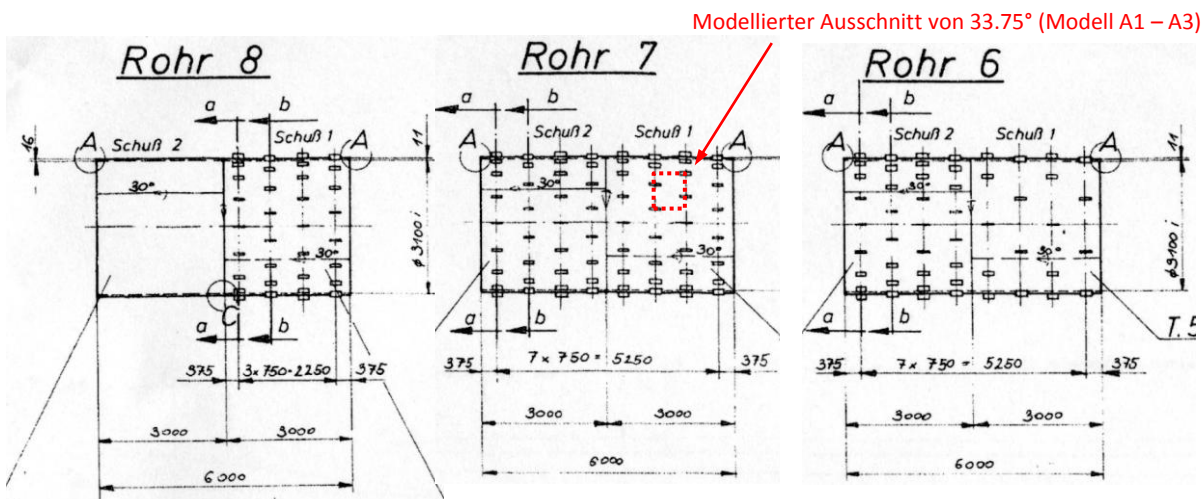


Abb. 1 KW Langenegg – Bereich A, Rohre 8-6 (16 Prätzen, in Längsrichtung um den halben Winkel versetzt).

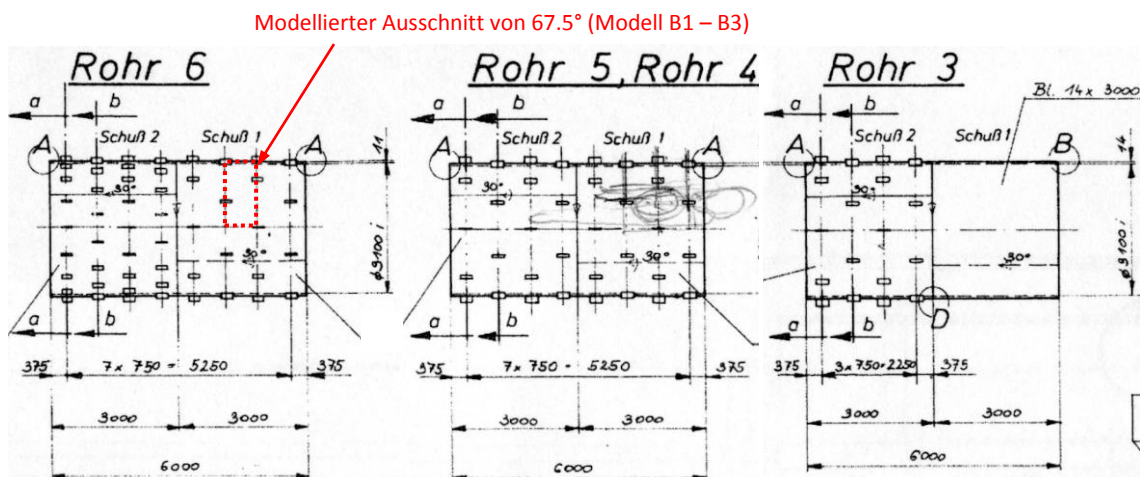


Abb. 2 KW Langenegg – Bereich B, Rohre 6-3 (8 Prätzen, in Längsrichtung um den halben Winkel versetzt).

Bereich B besteht aus den Rohren 6-3 (Rohr \varnothing 3100, Dicke $t = 11$ mm), siehe Abb. 2 und ist mit 8 Prätzen entlang des Umfangs ausgeführt, die ebenfalls in Rohrlängsrichtung um den halben Winkel versetzt angeordnet sind. Zusätzlich ist in der Abbildung der für die FE-Berechnungen modellierte Bereich eingezeichnet. Der Ausschnitt weist einen Öffnungswinkel von $67.5^\circ (=1.5 \cdot 360^\circ / 8)$ und eine Länge von 750mm (=Prätzenabstand) auf.

Abb. 3 zeigt die Prätzenabmessungen der durchgehend gleichen Y-Prätzen 220x120x13 mm des KW Langenegg, mit umlaufender Schweißnaht $a = 4$ mm.

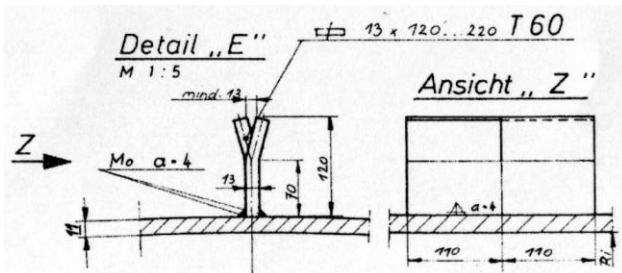


Abb. 3 KW Langenegg – Prätzengeometrie.

Für KW Walgau wurde der in Abb. 3 dargestellte Bereich C, stellvertretend für die Rohre 3-6 (Rohr $\varnothing = 5100$, Dicke $t = 21$ mm) untersucht. Die 16 Prätzen über den Umfang sind hier in Längsrichtung um 10.5° versetzt angeordnet. Somit sind die Prätzen auch hier nahezu um den halben Winkel versetzt angeordnet ($360^\circ / 16 = 22.5^\circ$). Zusätzlich ist in der Abbildung der für die FE-Berechnungen modellierte Bereich eingezeichnet. Der Ausschnitt weist einen Öffnungswinkel von $34.5^\circ (=10.5^\circ + 2 \cdot 12^\circ)$ und eine Länge von 1000mm (=Prätzenabstand) auf. Abb. 5 zeigt die Prätzenabmessungen der Y-Prätzen 250x150x15 mm des KW Walgau, mit umlaufender Schweißnaht $a = 4$ mm.

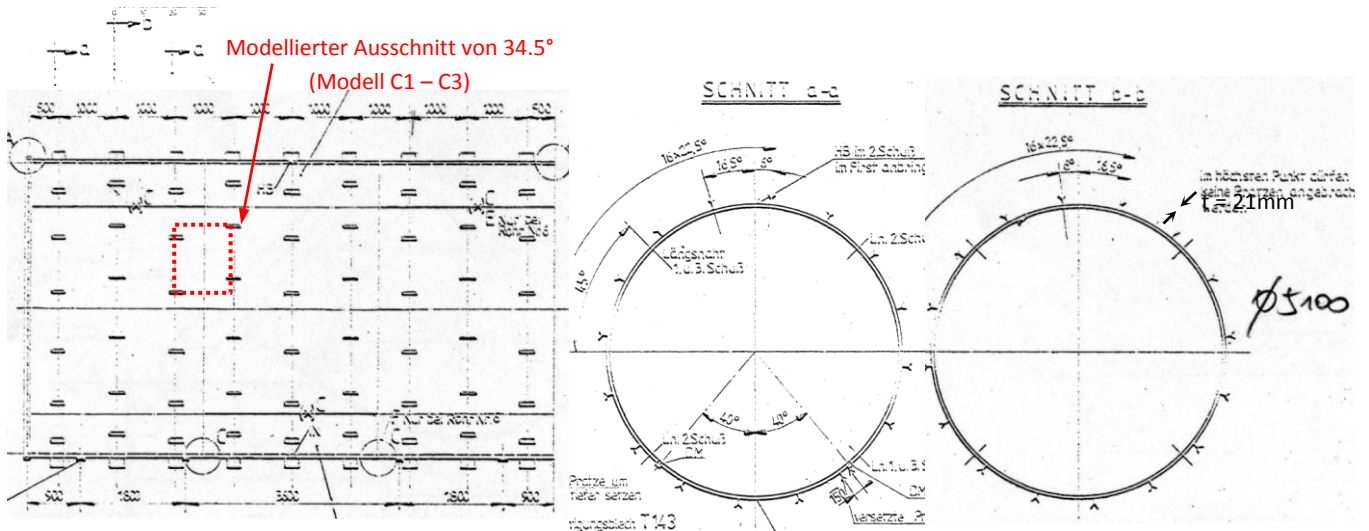


Abb. 4 Prätzenanordnung KW Walgau (16 Prätzen um 10.5° versetzt angeordnet).

Anm.: Versatz in Längsrichtung nicht maßstäblich dargestellt

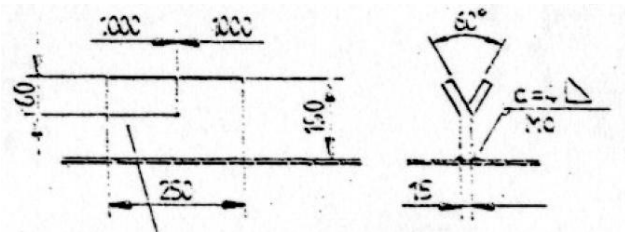


Abb. 5 KW Walgau – Pratzengeometrie.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Modellierung der FE-Berechnungen und deren Ergebnisse.

2. KW Langenegg – FE-Berechnungen zur Ermittlung des zulässigen Außendrucks

2.1. Berechnungsgrundlagen

2.1.1. Material und Geometrieparameter

In den untersuchten Bereichen weist die Rohrwand ($D_i = 3100\text{mm}$, $t = 11\text{mm}$) durchgehend die Stahlgüte Aldur 58 ($f_y = 410\text{N/mm}^2$) auf. Der E-Modul wurde mit $E = 210000\text{N/mm}^2$ festgelegt. Die Pratzten sind in ST 37 ($f_y = 235\text{N/mm}^2$) ausgeführt und mit Kehlnähten ($a = 4\text{mm}$) aufgeschweißt. Der Abstand der Pratzten in Rohrlängsrichtung beträgt 750mm . Bereich A (Rohre 8-6) hat 16 Pratzten. Bereich B (Rohre 6-3) hat 8 Pratzten. Die Pratzten sind jeweils um den halben Winkel in Längsrichtung versetzt angeordnet, siehe Abb. 1 bzw. Abb. 2. Die Abmessungen der Y-Pratzten betragen $220 \times 120 \times 13\text{mm}$ (LängexHöhexDicke). Das Materialgesetz ist linear elastisch - ideal plastisch, mit der jeweiligen Fließgrenze von Rohr bzw. Pratzte, modelliert.

An den Rändern des FE-Modells (vgl. Abb. 1 und Abb. 2) wurden die Lagerungsrandbedingungen angepasst an das weiterführende Rohr.

2.1.2. Imperfektionsannahme (Unrundheiten der Rohrwand)

Den in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnissen liegen folgende geometrischen Imperfektionsannahmen zugrunde:

a) KW Langenegg – 16 Pratzten (um den halben Winkel versetzt):

Die Abweichungen von der idealen Kreisform durch Unrundheiten wurden mit einem nach innen gerichteten Stich von 3mm im Bereich der Symmetrieachse und mit einem nach außen gerichteten Stich von 1.2mm im anschließenden Feld berücksichtigt. Die Stiche wurden mit unterschiedlichen Radien realisiert. Die geometrische Imperfektion ist in Abb. 6 graphisch dargestellt. Sie ist konstant in Rohrlängsrichtung. Der Verlauf entlang des Umfangs wurde so gewählt, dass sich die zu erwartende Versagensform „rautenförmiges Beulen“ einstellt, siehe Abb. 7a. Die Stichgrößen (3 bzw. $1,2\text{mm}$) wurden aus den Daten des KW Rodund II gemäß den Bogenlängen umgerechnet.

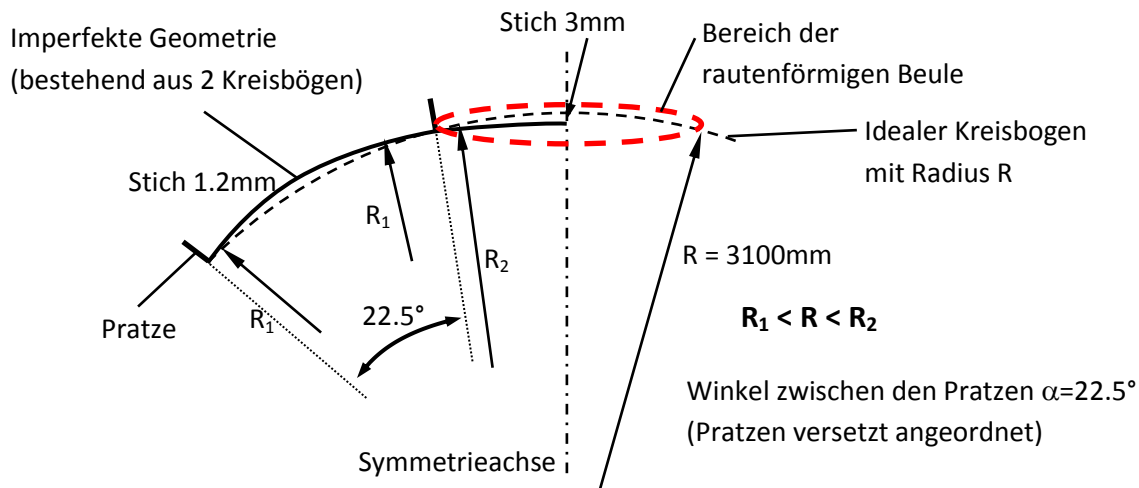


Abb. 6 Geometrische Imperfektion zur Abbildung von Unrundheiten, KW Langenegg 16 Pratzten (versetzt).

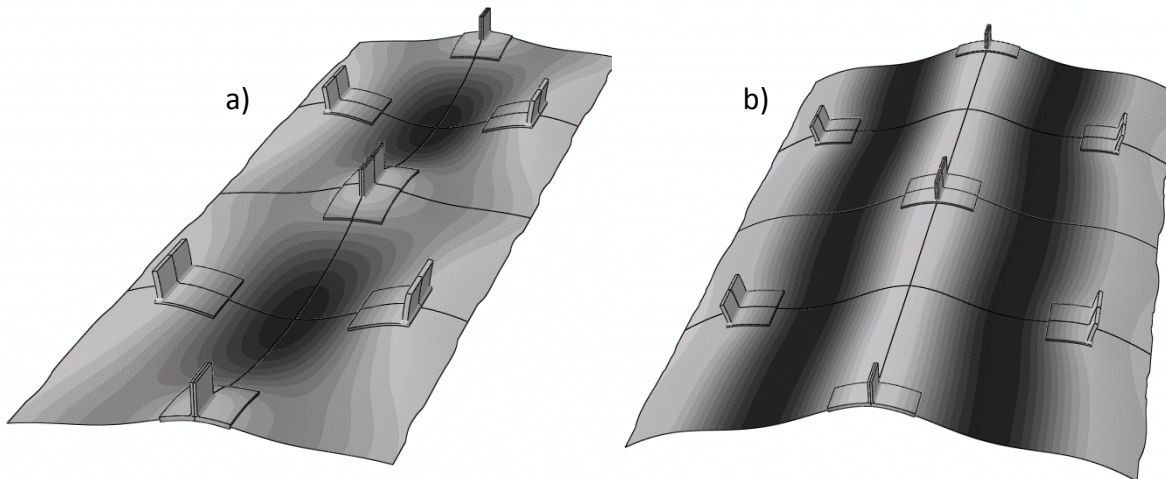


Abb. 7 Darstellung einer raute-förmigen Beule a) und einer „durchschlüpfenden“ Beule b).
Anm.: das eigentliche FE-Modell in Abb. 7 stellt jeweils 1/8 des Gesamtausschnittes dar.

b) KW Langenegg – 8 Pratzten (um den halben Winkel versetzt):

Die Abweichungen von der idealen Kreisform durch Unrundheiten wurden mit einem nach innen gerichteten Stich von 3mm im halben Feld nahe der Symmetrieachse und mit einem nach außen gerichteten Stich von 4.8mm im anschließenden Feld berücksichtigt. Die Stiche wurden mit unterschiedlichen Radien realisiert. Die geometrische Imperfektion ist in Abb. 8 graphisch dargestellt. Sie ist konstant in Rohrlängsrichtung. Der Verlauf wurde so gewählt, dass sich die zu erwartende Versagensform „durchschlüpfende Beule“ einstellt, siehe Abb. 7b. Die Stichgrößen (3 bzw. 4,8 mm) wurden aus den Daten des KW Rodund II gemäß den Bogenlängen umgerechnet.

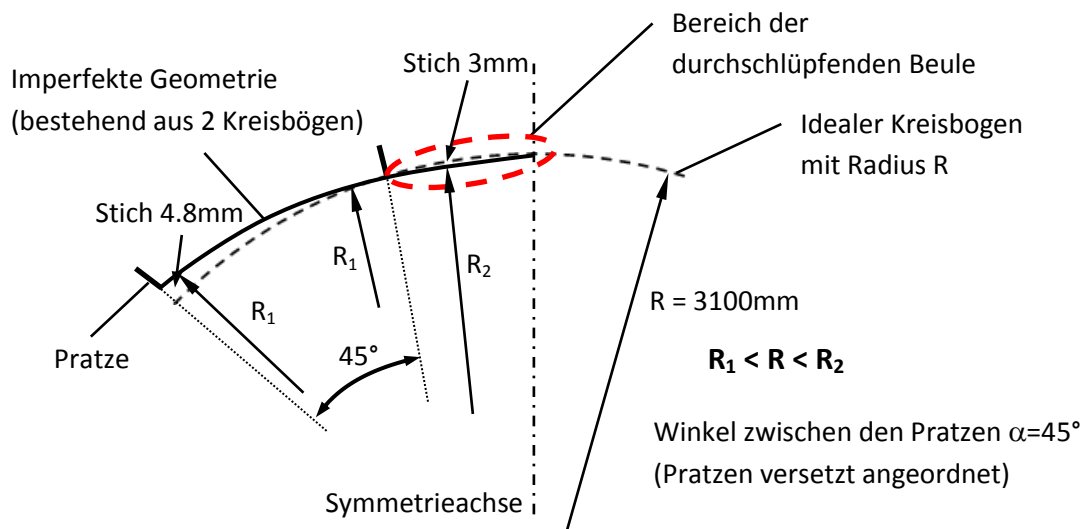


Abb. 8 Geometrische Imperfektion zur Abbildung von Unrundheiten, KW Langenegg 8 Pratzen (versetzt).
Anmerkung: Die gewählten geometrischen Imperfektionen wurden gewählt in Hinblick einer möglichst hohen Beanspruchung der Pratze im Anschlussbereich zum Rohr.

2.1.3. Belastung, Randbedingungen und Modellierung

Als Belastung wurde für alle Modelle ein konstanter Außendruck angesetzt. Dieser betrug – ohne weitere Teilsicherheitsbeiwerte – $p_e = 10.53\text{bar}$ für Bereich A (16 Prätzen) und $p_e = 7.48\text{bar}$ für Bereich B (8 Prätzen). Diese Werte wurden aus der alten Statik übernommen.

Die Modellbildung und Berechnung der Systeme erfolgte in drei Stufen. In einem ersten Schritt wurde die Rohrwand mit Schalenelementen abgebildet und die Prätzen über geeignete Randbedingungen (achsiale Feder c) berücksichtigt (**Modell A1** und **Modell B1**), siehe Abb. 9 und Abb. 10. Die Imperfektionsformen der vorangegangenen Abbildungen sind als Schnitte entlang der hier gekennzeichneten Achsen (a) bzw. (b) zu verstehen.

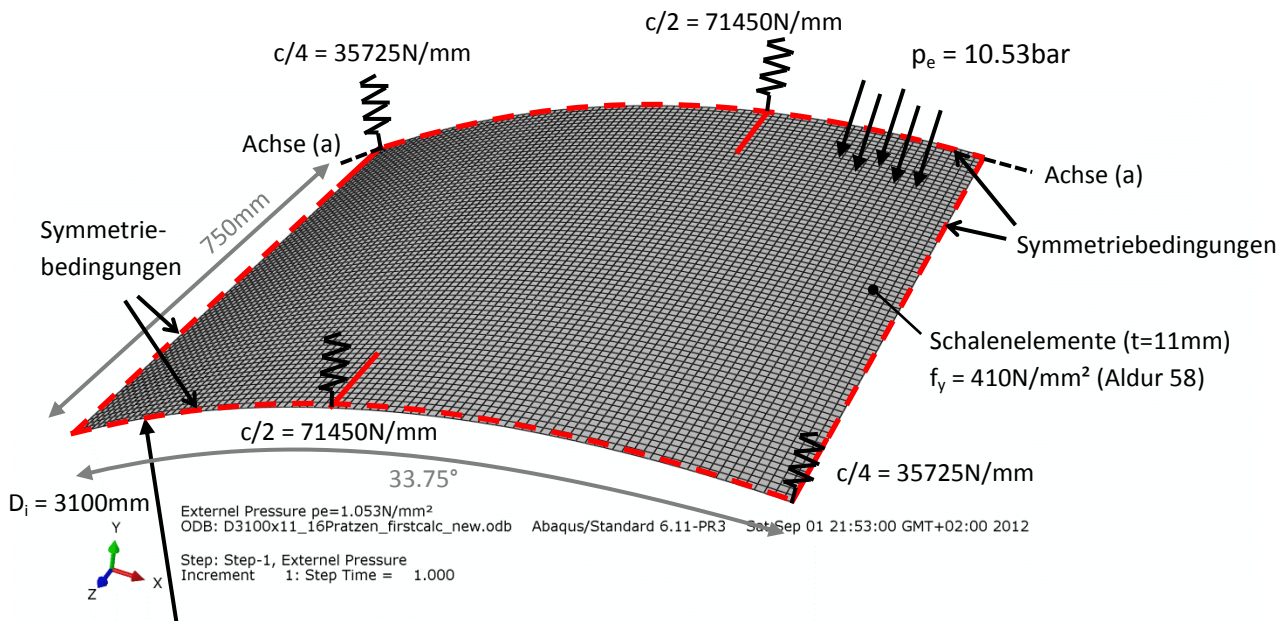


Abb. 9 Modell A1: FE-Netz, Randbedingungen und Belastung, KW Langenegg 16 Prätzen.

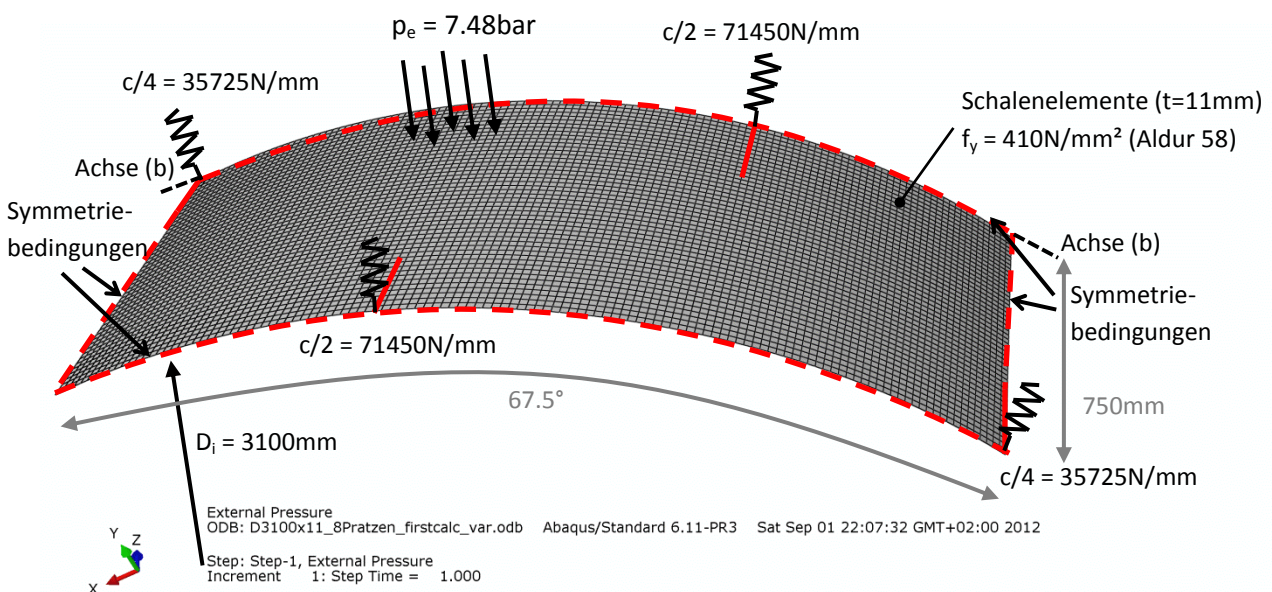


Abb. 10 Modell B1: FE-Netz, Randbedingungen und Belastung, KW Langenegg 8 Prätzen.

An den rot strichlierten Modellrändern sind Symmetriebedingungen aufgebracht. Die Prätzen werden mit radialen Federn modelliert. Die Federsteifigkeit c ergibt sich aus einer Rückrechnung der Nachgiebigkeit gemäß den Empfehlungen des AK Beulversuche mit $c = 1/f_z = 10^2/0.0007 = 142900\text{N/mm}$. Durch die Ausnutzung von Symmetriebedingungen sind entweder $c/2$ oder $c/4$ in der Berechnung anzusetzen. An den Punkten der radialen Federn wurden zusätzlich alle Verdrehungen und die Verschiebung in Umfangsrichtung gesperrt. Es wird die Gebirgsmitwirkung in diesem Modell A.1 bzw. B.1 nicht berücksichtigt, da vor allem die Formfindung der ungünstigsten Imperfektionen Zweck dieser Berechnung ist. Dieses relativ einfache Modell mit ca. 7000 S4R Schalenelementen eignet sich aufgrund seiner vergleichsweise geringen Rechenzeit sehr gut zur Formfindung und Definition der Imperfektionen. Das geschieht durch Überprüfung verschiedener geeigneter Ansätze und einem Vergleich der sich ergebenden Beanspruchungen und Verformungsmuster. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass die gewählten Imperfektionen zu einer Reduktion der Traglast führen und sich das zu erwartende Versagensmuster („rautenförmige“ bzw. „durchschlüpfende“ Beule, siehe Abb. 7) einstellen kann. Aus mehreren Berechnungen an diesem Modell ergaben sich die in Abschnitt 2.1.2 angeführten Imperfektionsannahmen.

Unter Verwendung der durch die Modelle A1 und B1 gewonnenen geometrischen Imperfektionen wurde das Modell verfeinert und die Prätzen und Teile der Rohrwand im Bereich der Beulen mithilfe von Volumenelementen abgebildet, siehe Abb. 11 und Abb. 13. Hierbei kamen sowohl quaderförmige C3D8R Elemente als auch, wenn nötig, tetraederförmige C3D4 Elemente zum Einsatz, wie Abb. 12 und Abb. 14 im Detailausschnitt zeigen. Die so entwickelten **Modelle A2 und B2** bestehen aus ca. 124.000 Elementen (372.000 Unbekannte), was zu einem deutlich höheren Rechenaufwand gegenüber den Modellen A1 bzw. B1 führt. Die tatsächlichen Verhältnisse, vor allem die lokalen Beanspruchungen im Bereich der Prätzen, können mit diesem Modell jedoch deutlich besser wiedergegeben werden.

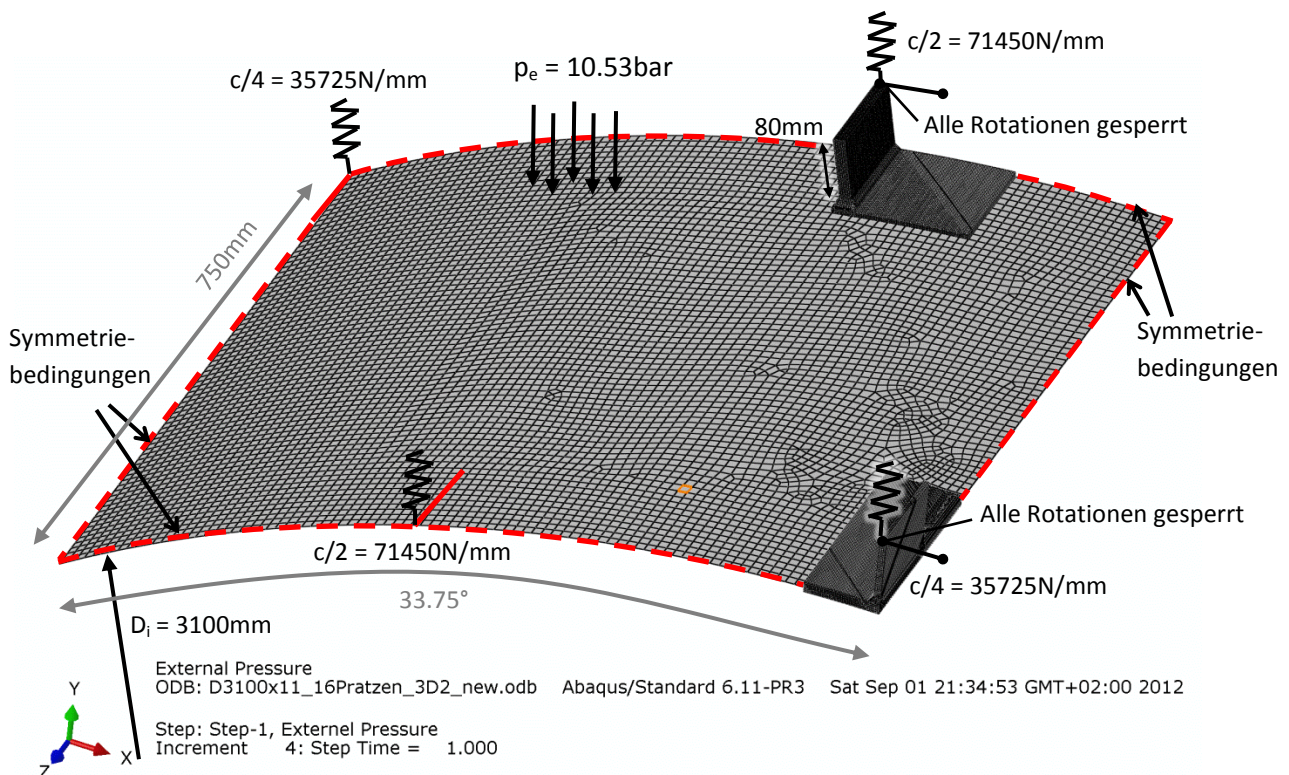


Abb. 11 Modell A2 bzw. A3: FE-Netz, Randbedingungen und Belastung, KW Langenegg 16 Prätzen.

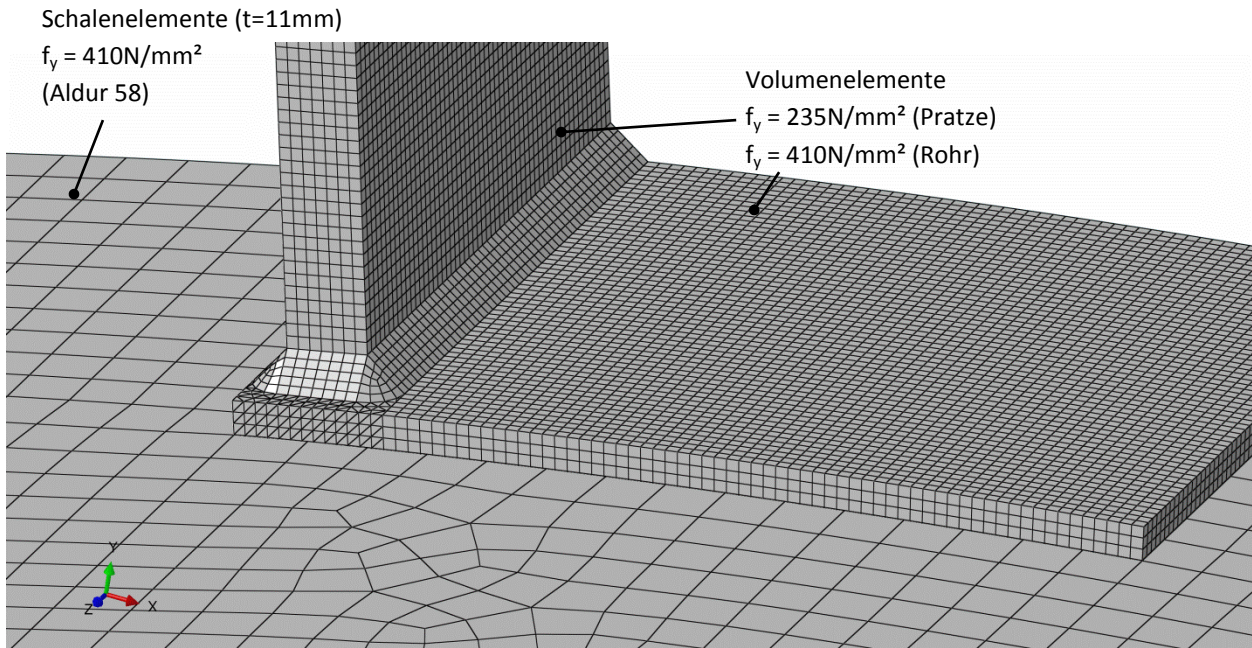


Abb. 12 Modell A2 bzw. A3: FE-Netz Detailansicht, KW Langenegg 16 Pratzen.

Der Unterschied der **Modelle A3 und B3** gegenüber den Modellen A2 und B2 besteht in der zusätzlichen Berücksichtigung der Gebirgsmitwirkung (für Details zur Definition der Kontaktfläche siehe Abschnitt 2.1.4). Das bedeutet, dass die Modelle A2 und B2 ohne Gebirgsmitwirkung berechnet wurden und bei den Modellen A3 und B3 die radiale Nachgiebigkeit, entsprechend dem Bettungsmodul, Berücksichtigung fand.

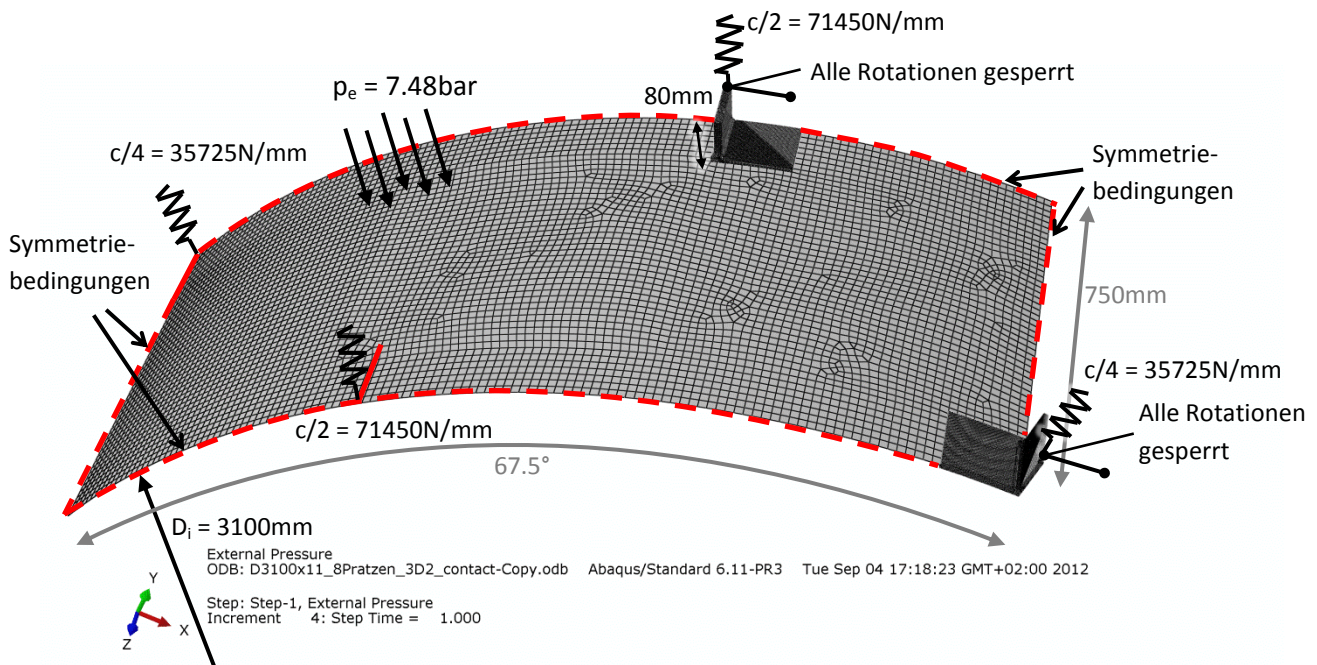


Abb. 13 Modell B2 bzw. B3: FE-Netz, Randbedingungen und Belastung, KW Langenegg 8 Pratzen.

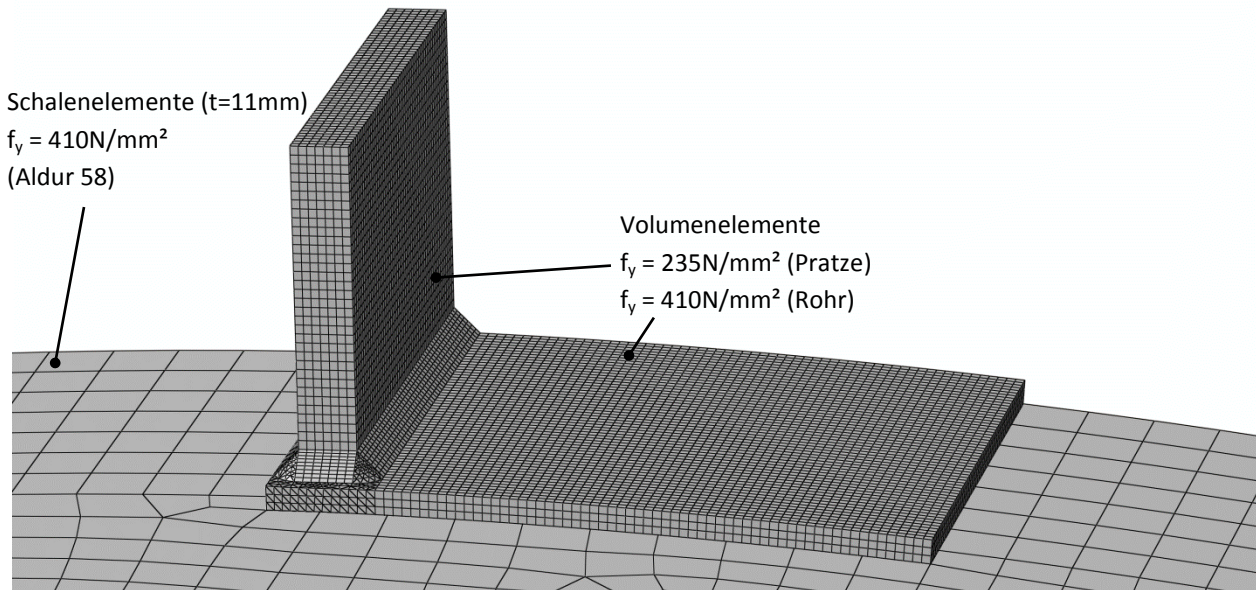


Abb. 14 Modell B2 bzw. B3: FE-Netz Detailansicht, KW Langenegg 8 Prätzen.

2.1.4. Definition der Kontaktfläche und der Gebirgsmitwirkung

Für alle Berechnungen mit Modell A3 und B3 wurde eine unverschieblich gelagerte Kontaktfläche als Oberfläche definiert, die das Rohr im unbelasteten Zustand in allen Punkten berührt (d.h. ohne Spalt). Die Verformung des Rohres nach innen – also weg von der Kontaktfläche – ist unbehindert möglich. Verformungen nach außen berücksichtigen die Gebirgsmitwirkung mit einem Bettungsmodul von $K_s = 1.46 \text{ N/mm}^3$. Dieser Wert ergibt sich durch Umrechnung der in der alten Statik angegebenen Werte des Verformungsmoduls $V_F = 3000 \text{ N/mm}^2$ und Poisson'schen Zahl des Gebirges $m_F = 3.0$ ($\nu_F = 0.33$) mit folgender Formel:

$$K_s = \frac{V_F}{r \cdot (1 + \nu_F)} = \frac{3000}{1550 \cdot (1 + 0.33)} = 1.46 \text{ N/mm}^3$$

2.1.5. Berechnungsmethode

Sämtliche Berechnungen wurden mit dem Finiten-Elemente-Programm Abaqus, Version 6.10 durchgeführt. Es wurden sowohl geometrische Nichtlinearitäten (große Verformungen) als auch plastisches Materialverhalten und Systemimperfectionen gemäß Abschnitt 2.1.2 in allen Berechnungen berücksichtigt. Somit handelt es sich um Berechnungen des Typs GMNIA (geometrisch und materiell nichtlineare Analyse unter Berücksichtigung von Imperfectionen).

2.2. Ergebnisse im Bereich A, Rohre 8-6 (16 Prätzen)

2.2.1. Modell A1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell A1 dargestellt. Das Modell besteht ausschließlich aus Schalenelementen und die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

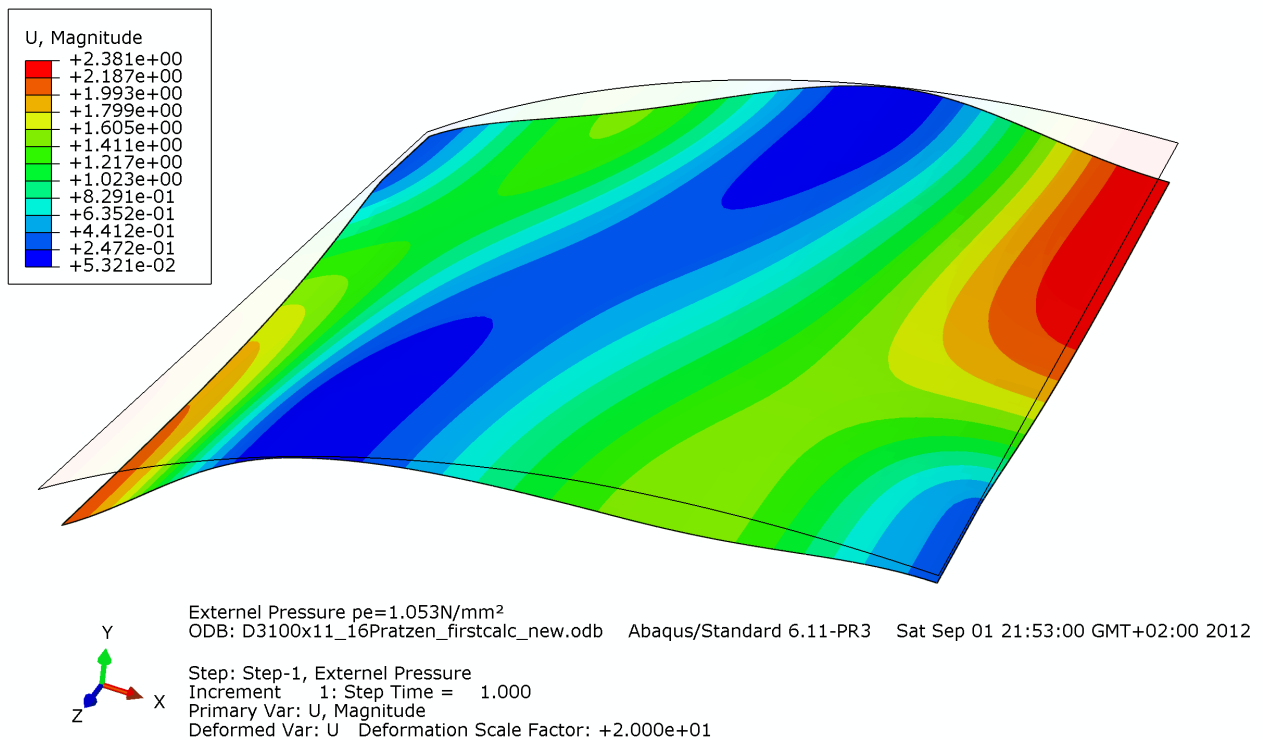


Abb. 15 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$).

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Prätzen (rechtes oberes Eck des Modellausschnitts, vgl. Prätzenlage in Abb. 9) ist in Abb. 15 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 10.53\text{bar}$ stellt sich eine moderate maximale Verformung von rund 2.4mm in Beulenmitte ein (zusätzlich zur geometrischen Anfangsimperfektion).

Die weiteren Darstellungen der Vergleichsspannungen an der Rohr-Innen- bzw. Rohr-Außenseite sowie der Schalenmittelfläche zeigen, dass die Fließgrenze $f_y = 410\text{N/mm}^2$ im Wesentlichen nicht erreicht wird. Somit verhält sich das System elastisch – mit Ausnahme eines kleinen Bereiches rund um den kritischen Prätzen-Anschlusspunkt, jedoch an der Rohrinneenseite, siehe Abb. 18.

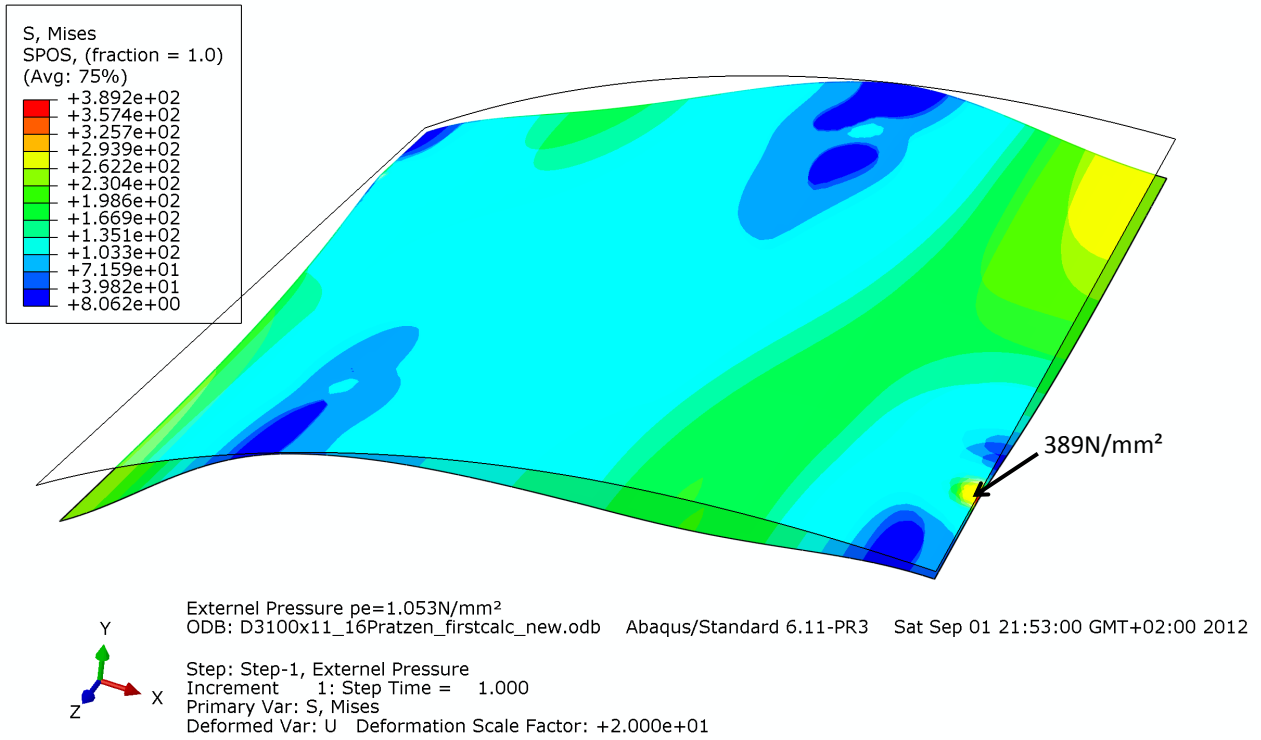


Abb. 16 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) – Rohr-Außenseite.

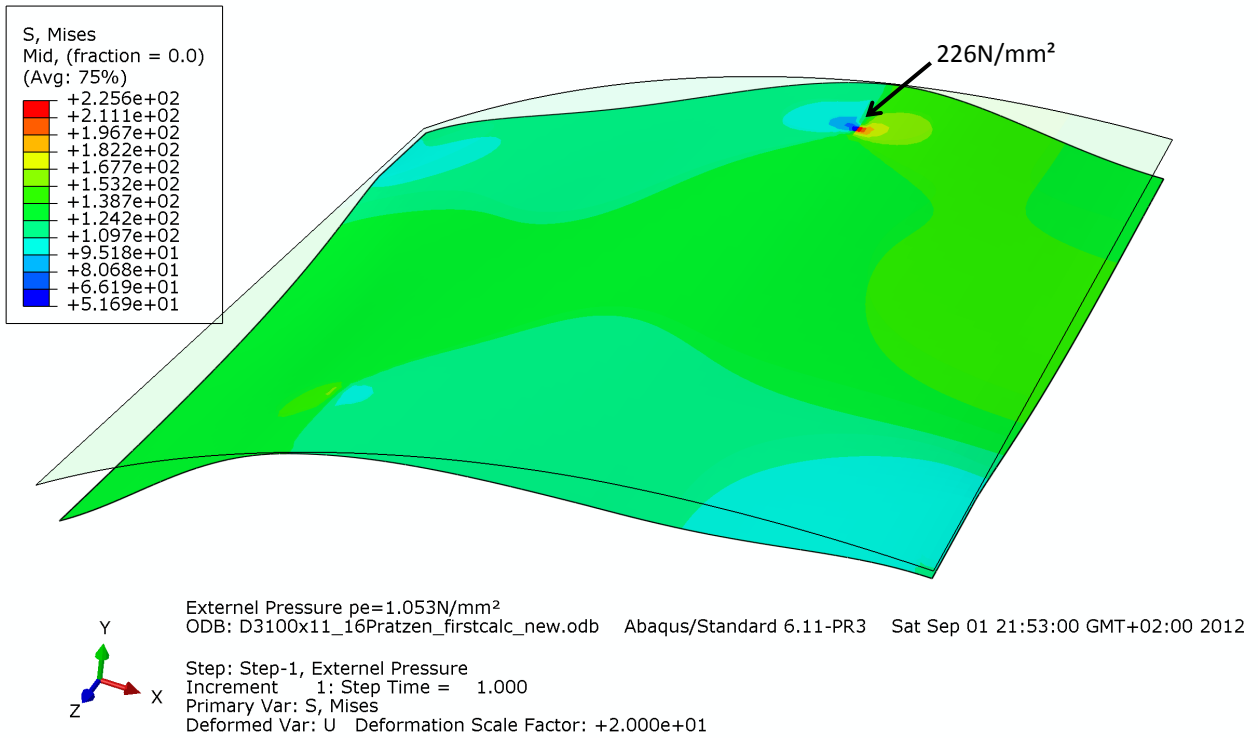


Abb. 17 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) – Rohr-Mittelfläche.

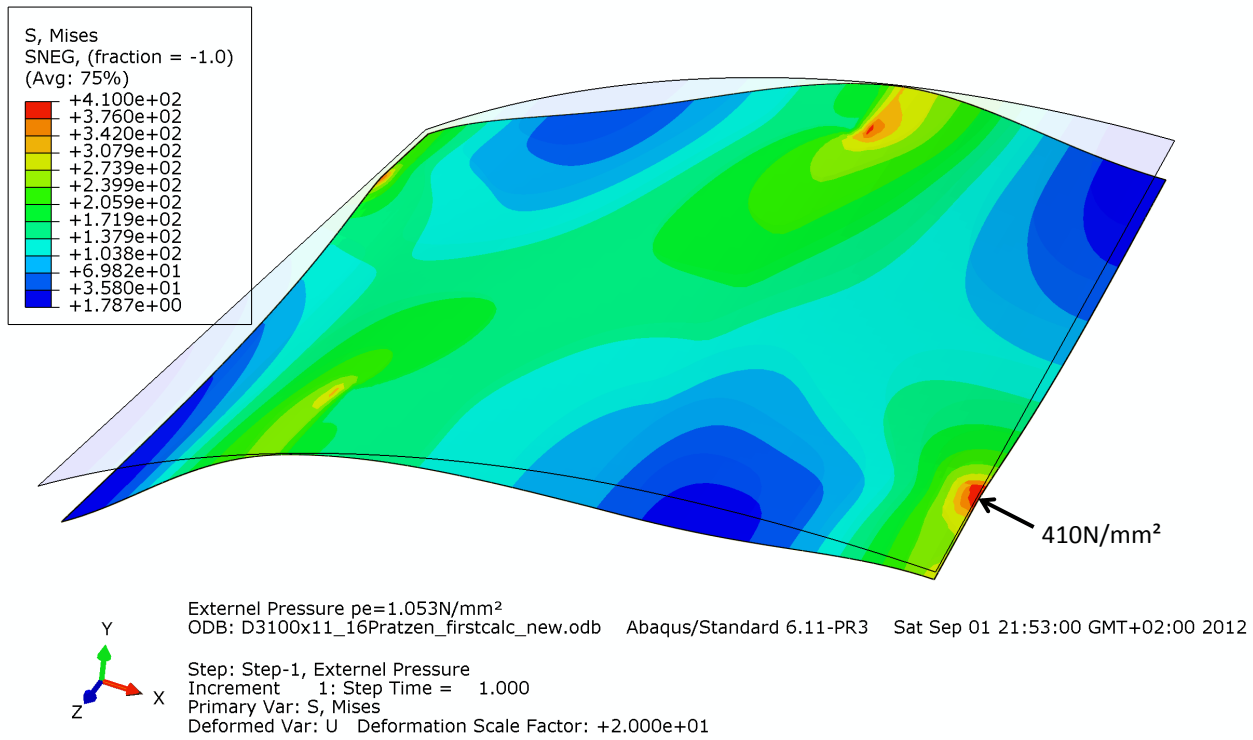


Abb. 18 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) – Rohr-Innenseite.

2.2.2. Modell A2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell A2 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen wieder die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

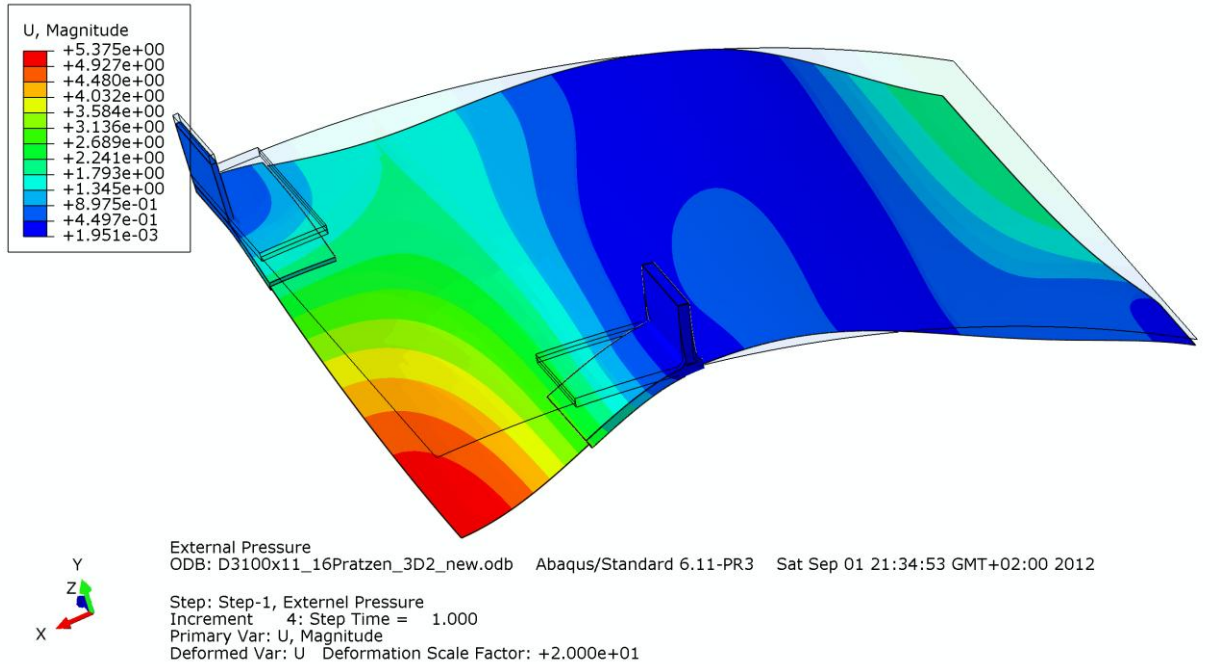


Abb. 19 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$).
(Anm.: Modellausschnitt gegenüber Abb. 11 um 180° gedreht)

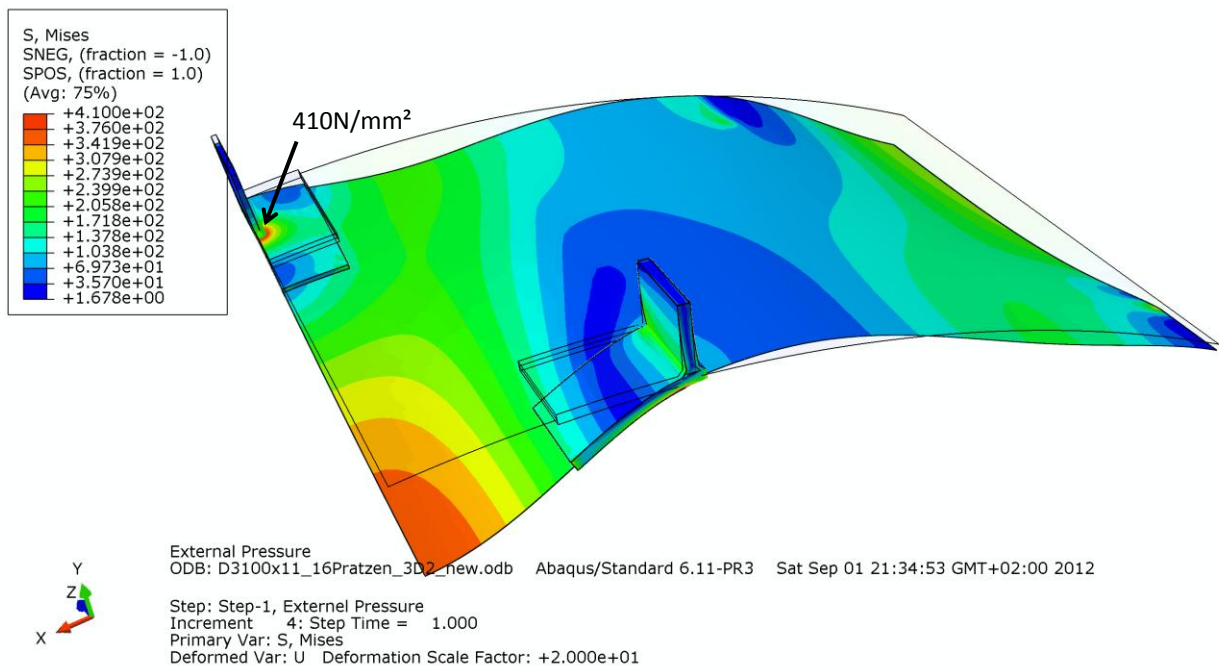


Abb. 20 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Prätzen (hier linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 19 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 10.53\text{bar}$ stellt sich eine maximale Verformung von rund 5.4mm in Beulenmitte ein. Somit sind die hier auftretenden Verformungen in etwa doppelt so groß wie für die Berechnung mit Modell A1. Der Grund hierfür liegt bei der zusätzlichen Verformungsmöglichkeit durch die Biegung der in Modell A2 zusätzlich modellierten Prätzen (Verdrehbarkeit des Rohres unter der Prätze).

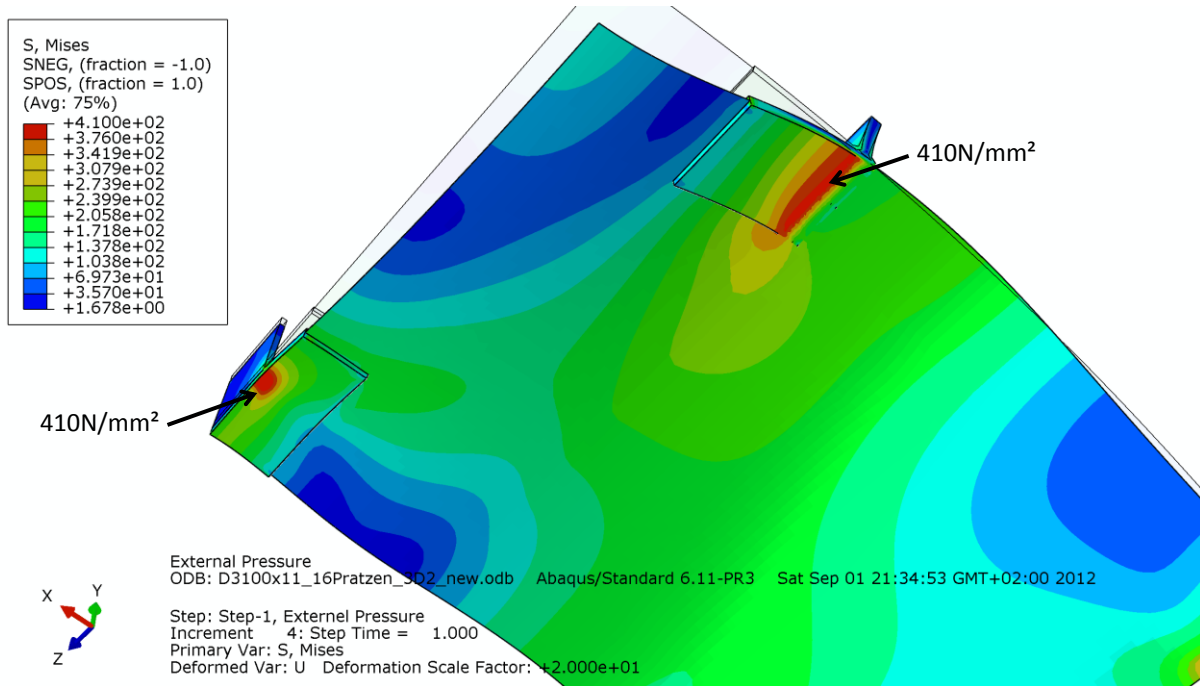


Abb. 21 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) an der Rohrrinnenseite.

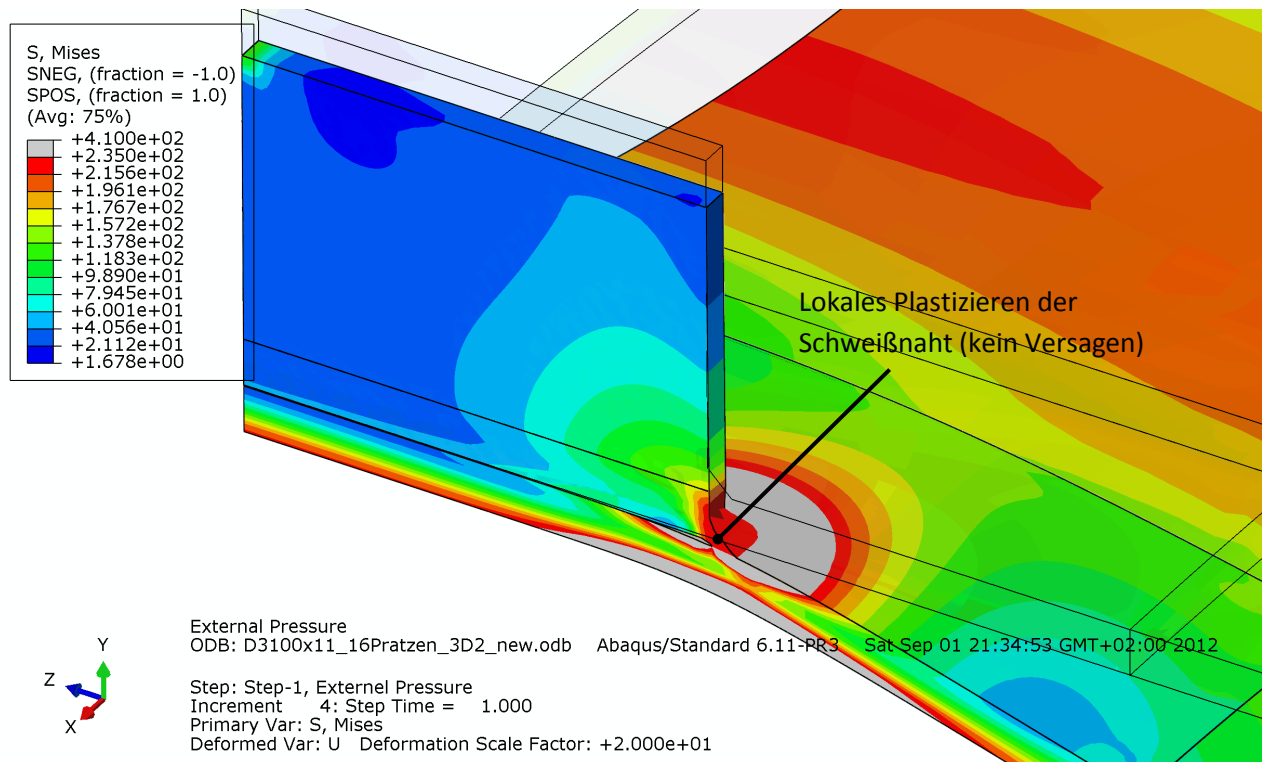


Abb. 22 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) – Detailansicht der Prätze.

Die weiteren Darstellungen der Vergleichsspannungen an der Rohr-Innen- bzw. Rohr-Außenseite zeigen lokal begrenzt auftretendes Plastizieren in der Rohrwand (Abb. 20 bzw. Abb. 21) und somit Erreichen der Fließgrenze von $f_y = 410\text{N/mm}^2$. Das Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 235\text{N/mm}^2$) im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 22) führt für diesen Belastungszustand aufgrund der begrenzten plastischen Dehnungen zu keinem Versagen des Systems.

Abb. 23 zeigt das Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 10.53\text{bar}$. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse des modellierten Teilbereiches (Ergebnisse nach Abb. 19 mit Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformungen zwischen den Prätzen in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 23 ist der modellierte Teilbereich nach Abb. 19 insgesamt 8-mal dargestellt.

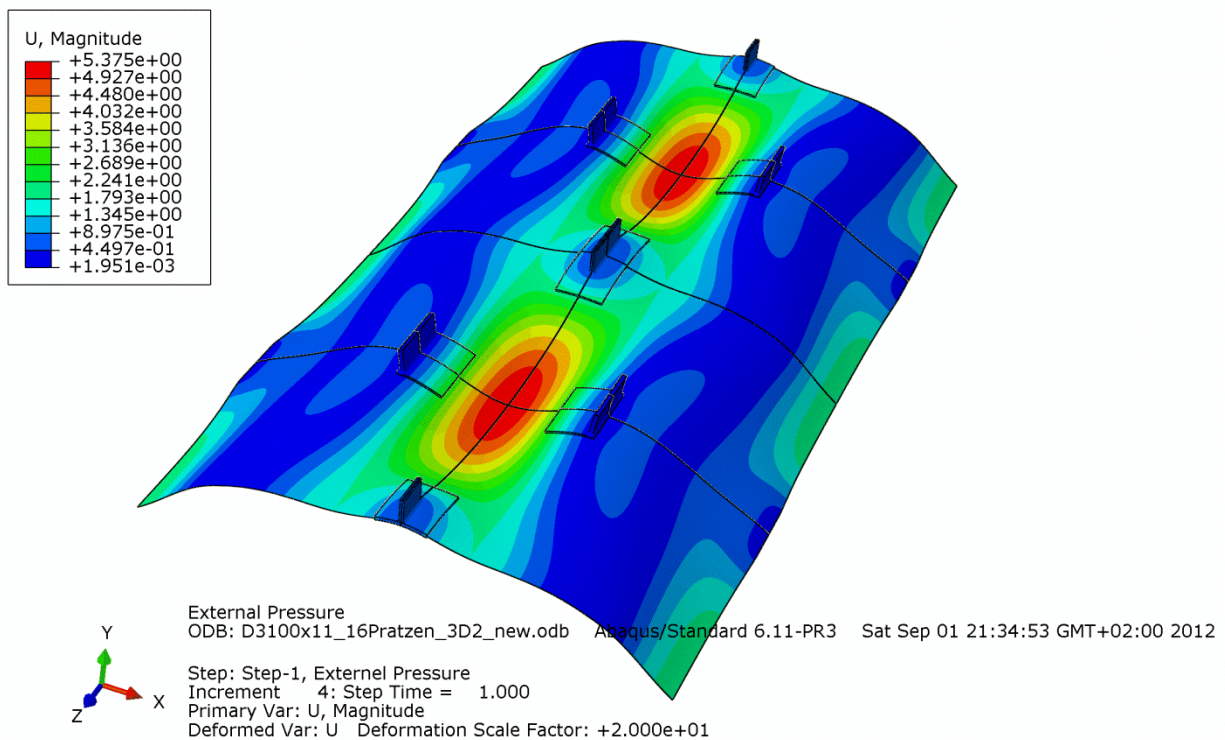


Abb. 23 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$).

2.2.3. Modell A3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmittwirkung berücksichtigt)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell A3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmittwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 2.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

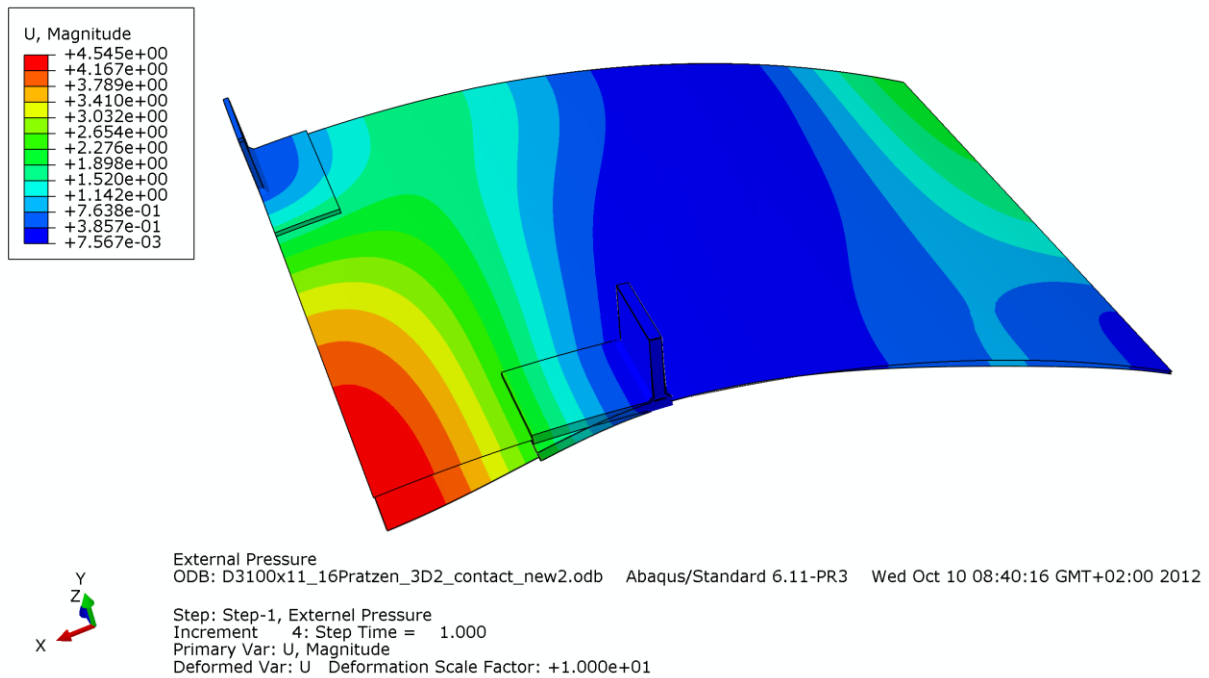


Abb. 24 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$).

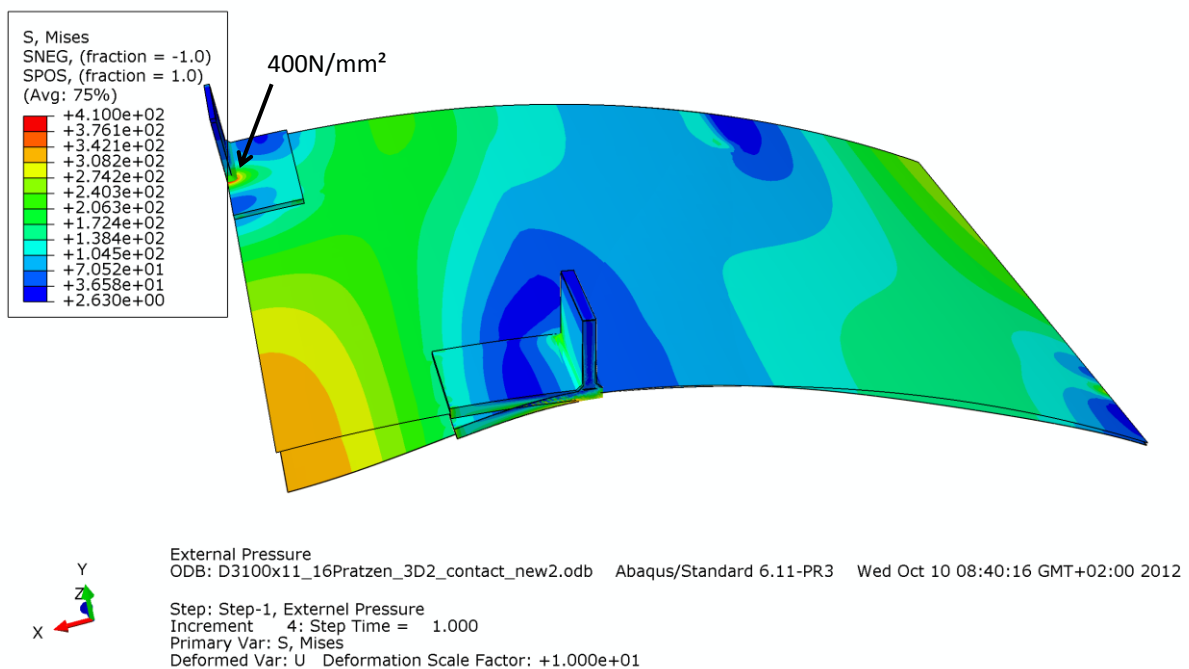


Abb. 25 Vergleichsspannung [N/mm^2] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Prätzen (linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 24 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 10.53 \text{ bar}$ stellt sich eine maximale Verformung von rund 4.5mm in Beulenmitte ein. Somit sind die hier auftretenden Verformungen in etwa 80% so groß wie für die Berechnung mit Modell A2 ohne Gebirgsmitwirkung. Die Reduktion der Verformungen um ca. 20% ist durch die mögliche Abstützung des Rohres gegen das Gebirge und eine dadurch bedingte Versteifung des Systems begründet.

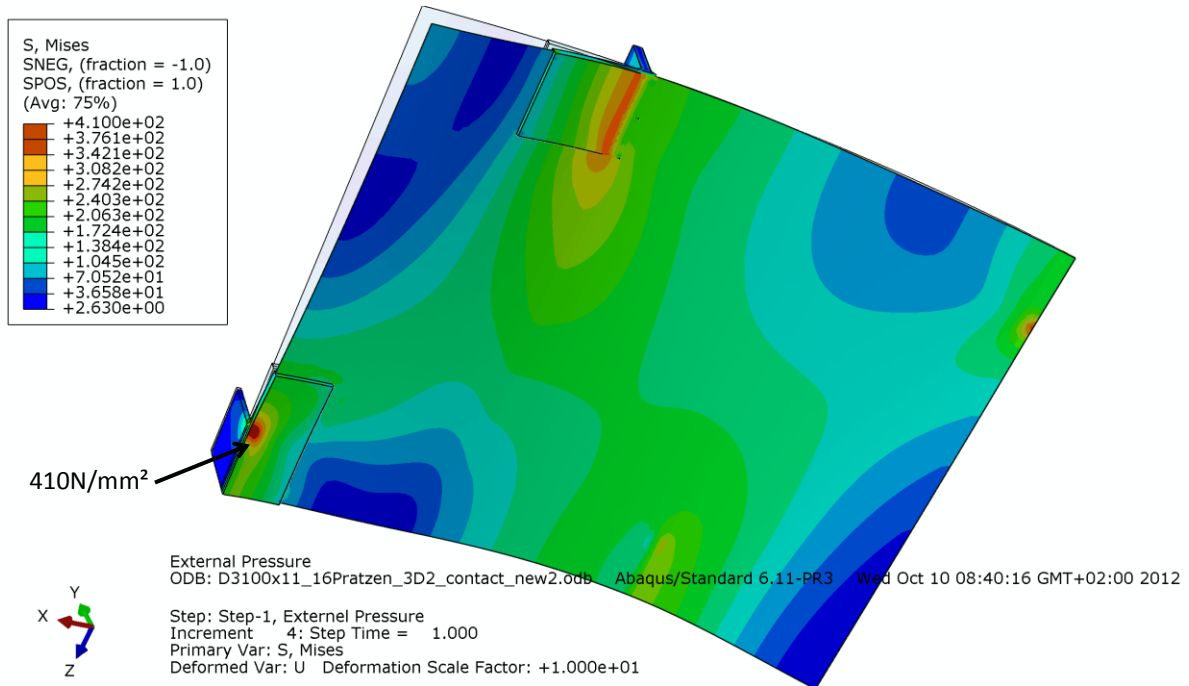


Abb. 26 Vergleichsspannung $[\text{N}/\text{mm}^2]$ bei Bemessungslast ($p_a = 10.53 \text{ bar}$) an der Rohrinneinnenseite.

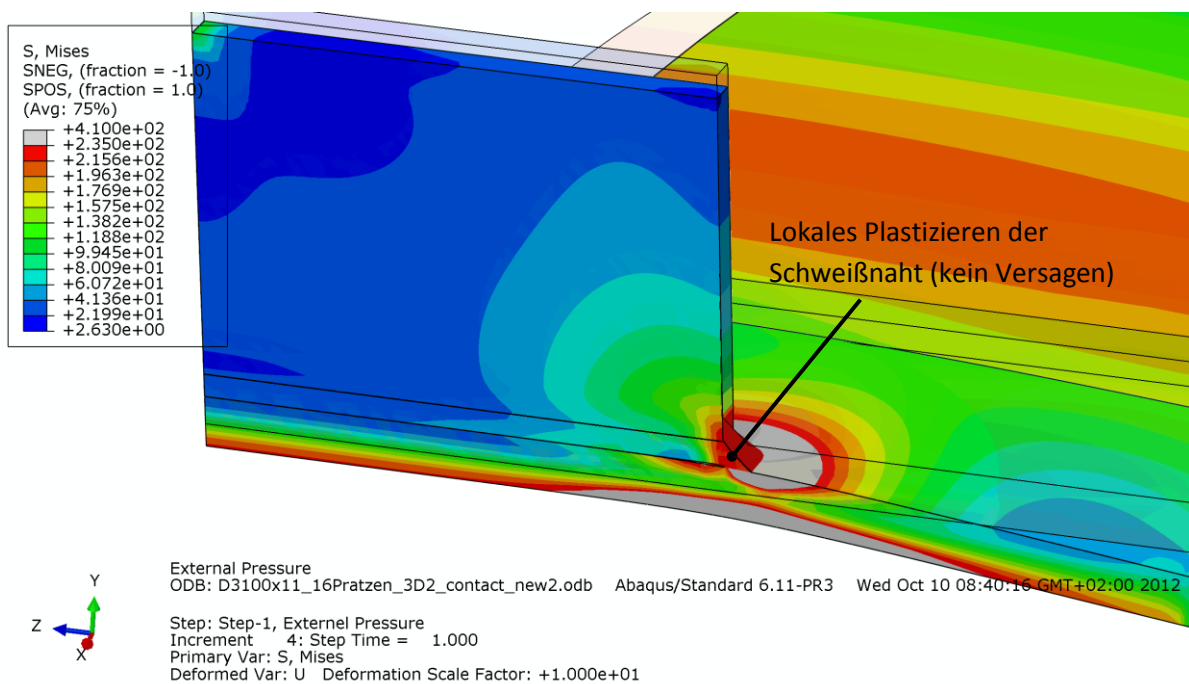


Abb. 27 Vergleichsspannung $[\text{N}/\text{mm}^2]$ bei Bemessungslast ($p_a = 10.53 \text{ bar}$) – Detailansicht der Prätze.

Die weiteren Darstellungen der Vergleichsspannungen an der Rohr-Innen- bzw. Rohr-Außenseite zeigen äußerst lokal begrenztes Plastizieren alleine an der Rohrrinnenwand ($f_y = 410\text{N/mm}^2$) im Bereich des kritischen Prätzen-Anschlusspunktes, siehe Abb. 26. Das Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 235\text{N/mm}^2$) im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 27) führt für diesen Belastungszustand aufgrund der begrenzten plastischen Dehnungen zu keinem Versagen des Systems.

Die in Abb. 28 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.25N/mm^2 auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

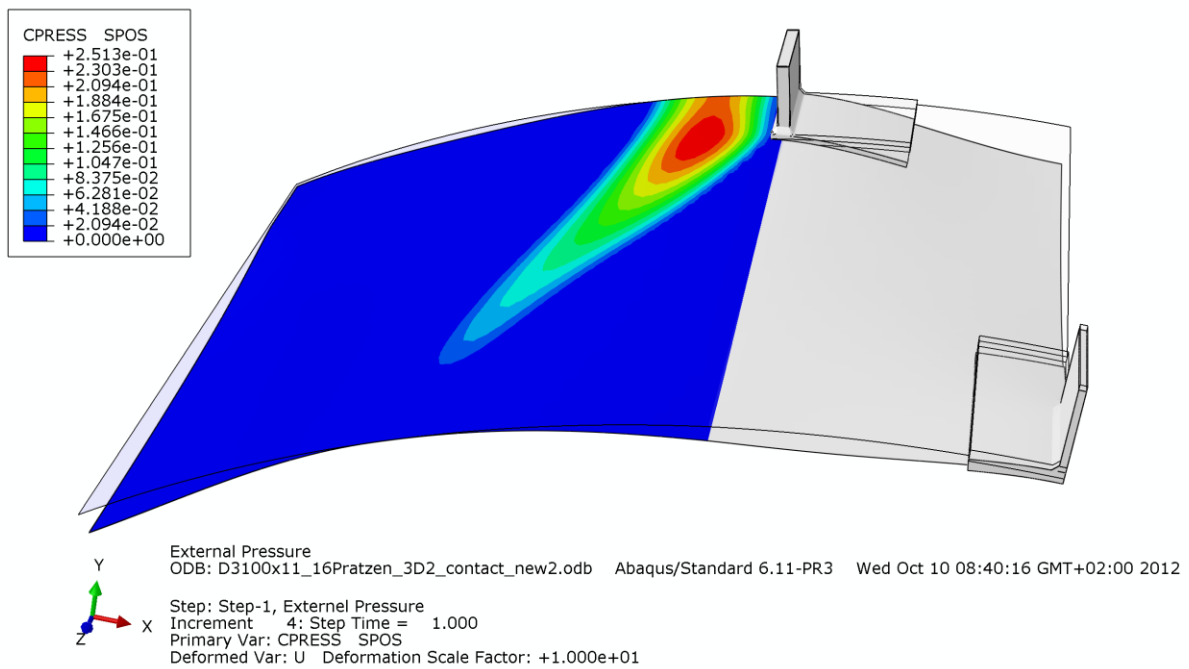


Abb. 28 Kontaktpressung [N/mm^2] bei Bemessungslast ($p_a = 10.53\text{bar}$).

2.2.4. Traglastberechnung mit Modell A3 (LPF=1.30)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Traglastberechnung mit Modell A3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmittwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 2.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3. Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde. Der maximal zulässige Außendruck (ohne Sicherheitsbeiwerte) – als Ergebnis der Traglastberechnung, die einen Laststeigerungsfaktor von LPF = 1,30 ergab – beträgt $p_{a,max} = 13.66\text{bar}$.

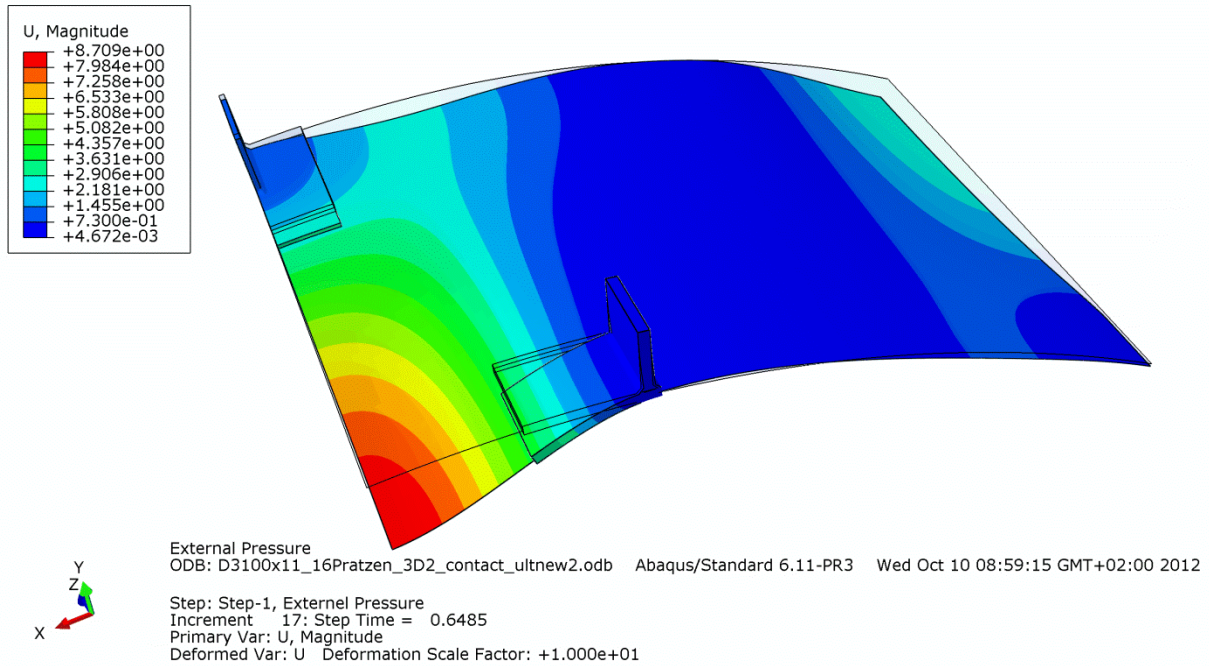


Abb. 29 Verformungen des Systems [mm] bei Traglast ($p_{a,max} = 13.66\text{bar}$).

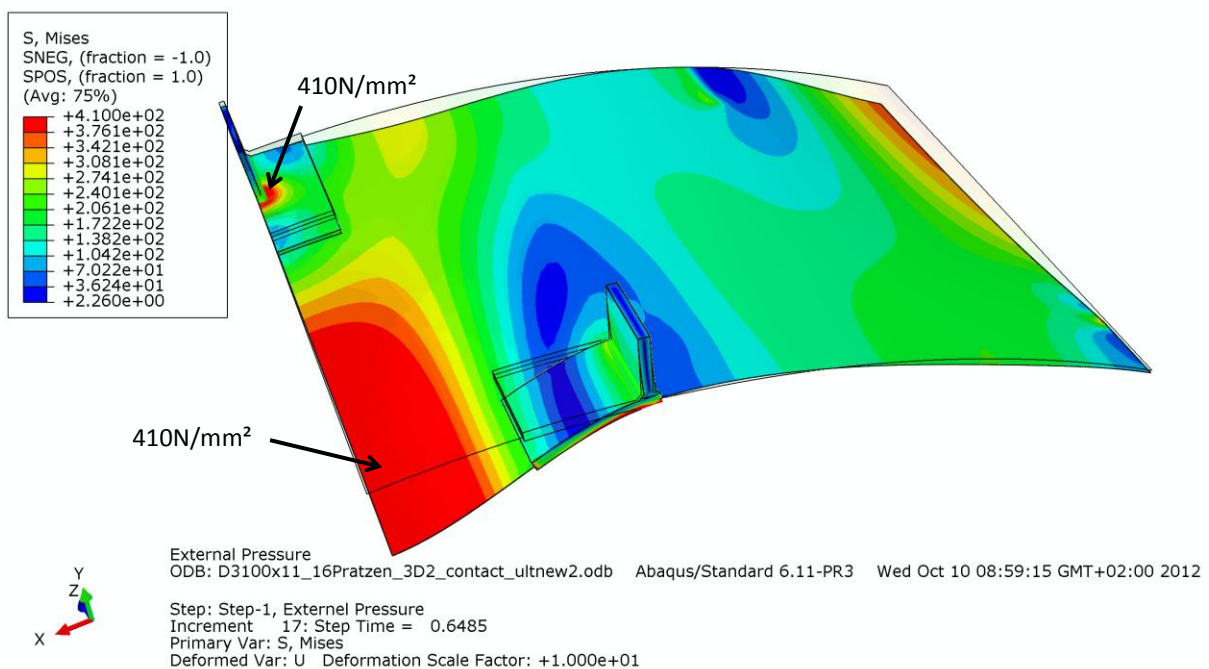


Abb. 30 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 13.66\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

Die Versagensform „rautenförmige Beule“ zwischen den Prätzen (linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 29 deutlich zu erkennen. Unter der Traglast von $p_{a,max} = 13.66\text{bar}$ stellt sich eine Verformung von rund 8.7mm in Beulenmitte ein. Bei weiterem Anstieg des Außendrucks würden diese Verformungen überproportional zunehmen und zu einem Versagen des Systems führen.

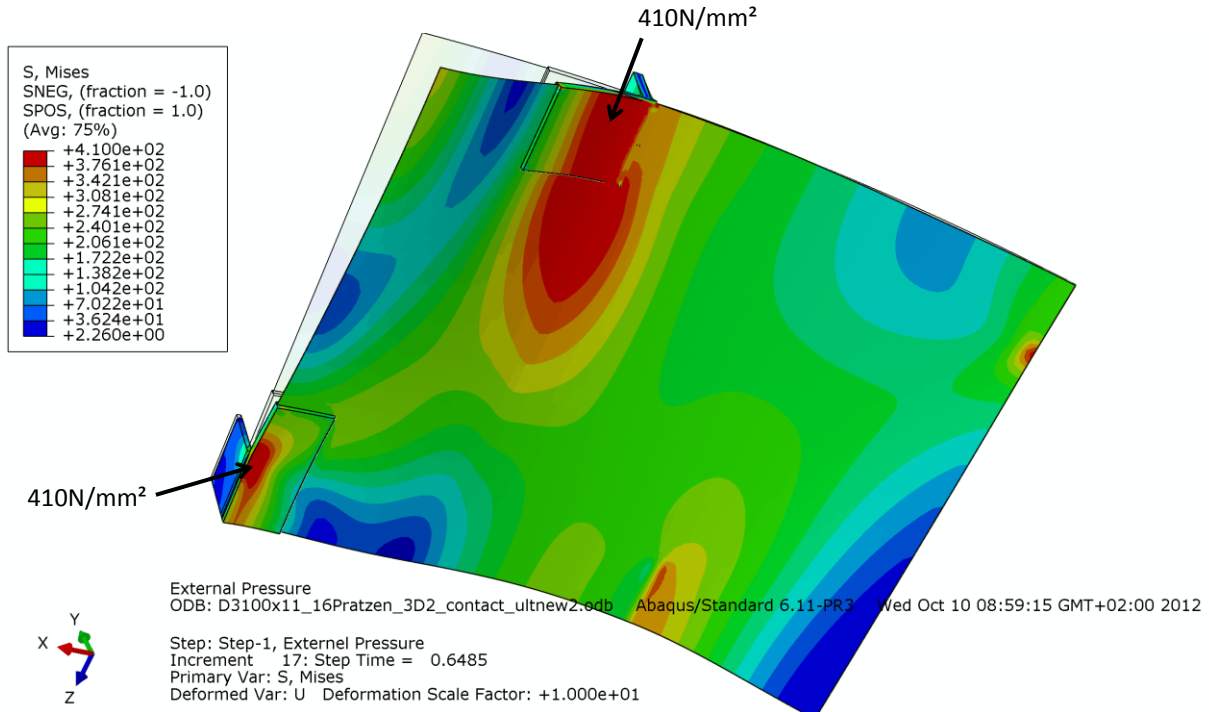


Abb. 31 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 13.66\text{bar}$) an der Rohrinneenseite.

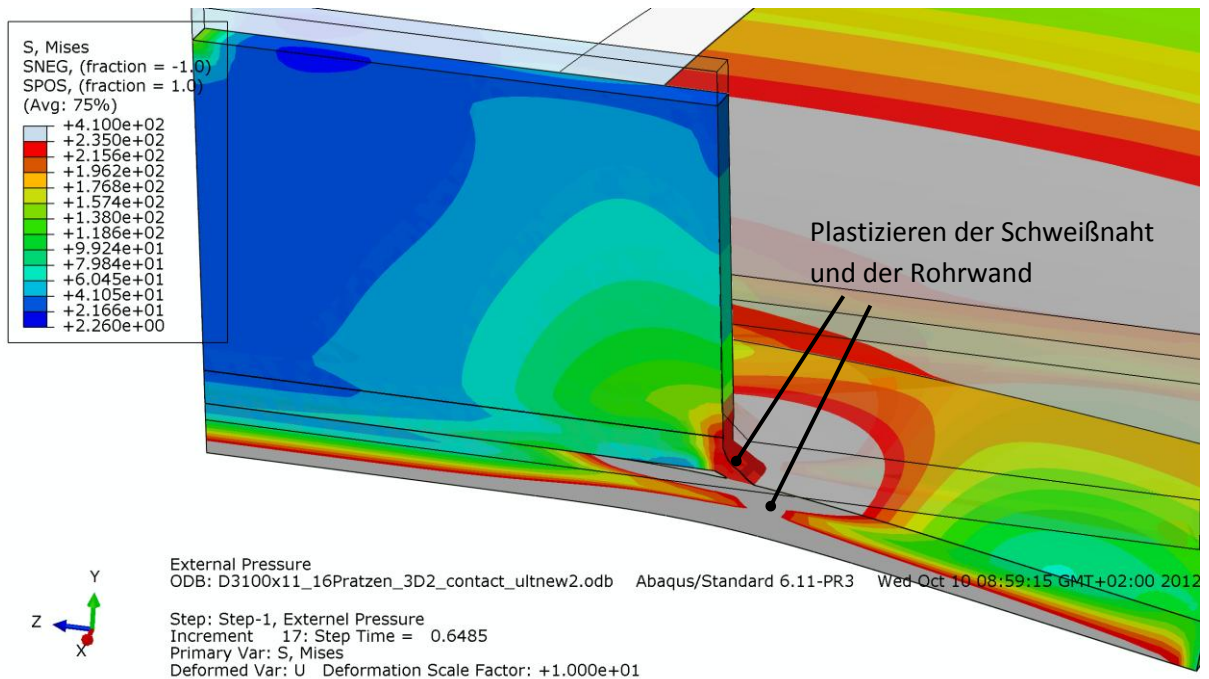


Abb. 32 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 13.66\text{bar}$) – Detailansicht der Prätze.

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche ($f_y = 410\text{N/mm}^2$) im Beulfeld (Rohraußenseite, Abb. 30) und unter den modellierten Prätzen (Rohrinnenseite, Abb. 31). Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 32) zeigt Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 235\text{N/mm}^2$) bei gleichzeitigem Durchplastizieren der Rohrwand, was die Traglast mit $p_{a,\max} = 13.66\text{bar}$ begrenzt.

Abb. 33 zeigt das Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei $p_{a,\max} = 13.66\text{bar}$. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse aus Abb. 29 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformungen zwischen den Prätzen in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 33 ist der modellierte Teilbereich nach Abb. 29 insgesamt 8-mal dargestellt.

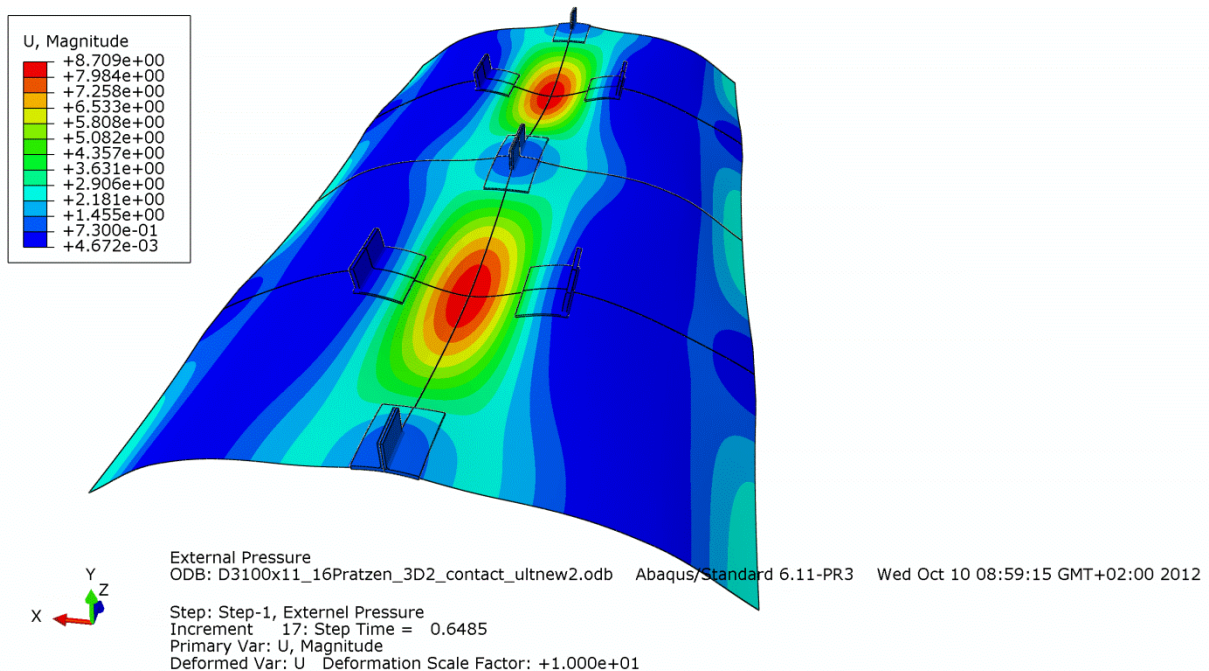


Abb. 33 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Traglast ($p_{a,\max} = 13.66\text{bar}$).

Die in Abb. 34 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.56N/mm^2 auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

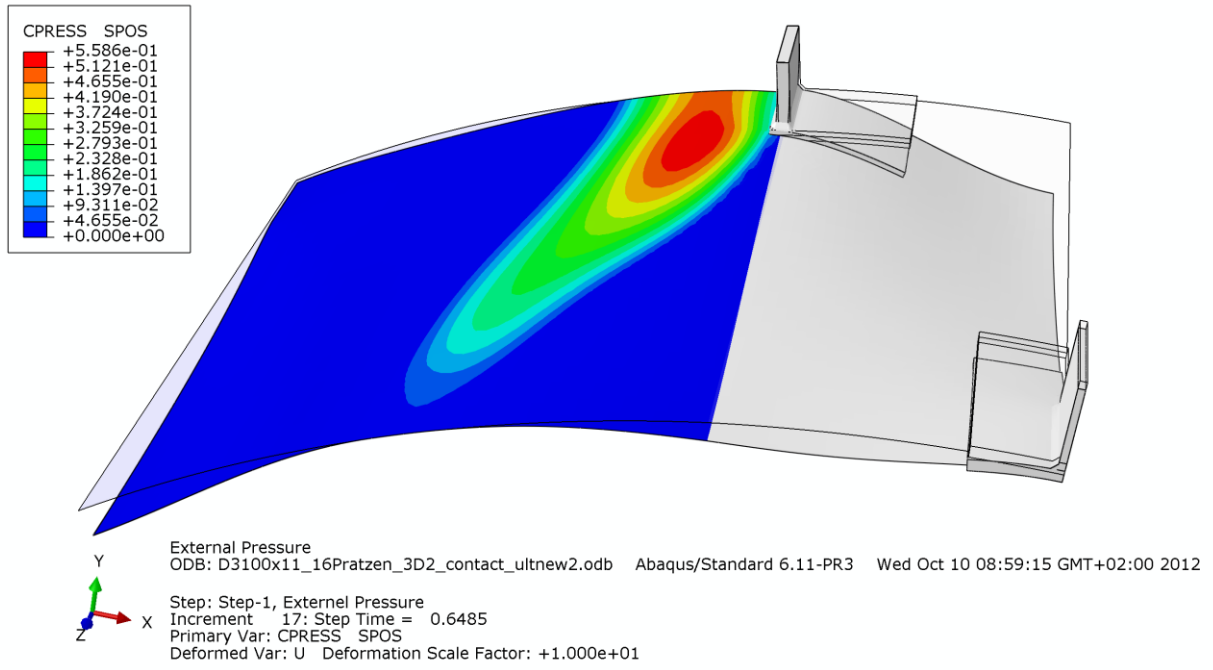


Abb. 34 Kontaktpressung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 13.66\text{bar}$).

2.3. Ergebnisse im Bereich B, Rohre 6-3 (8 Prätzen)

2.3.1. Modell B1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell B1 dargestellt. Das Modell besteht ausschließlich aus Schalenelementen und die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

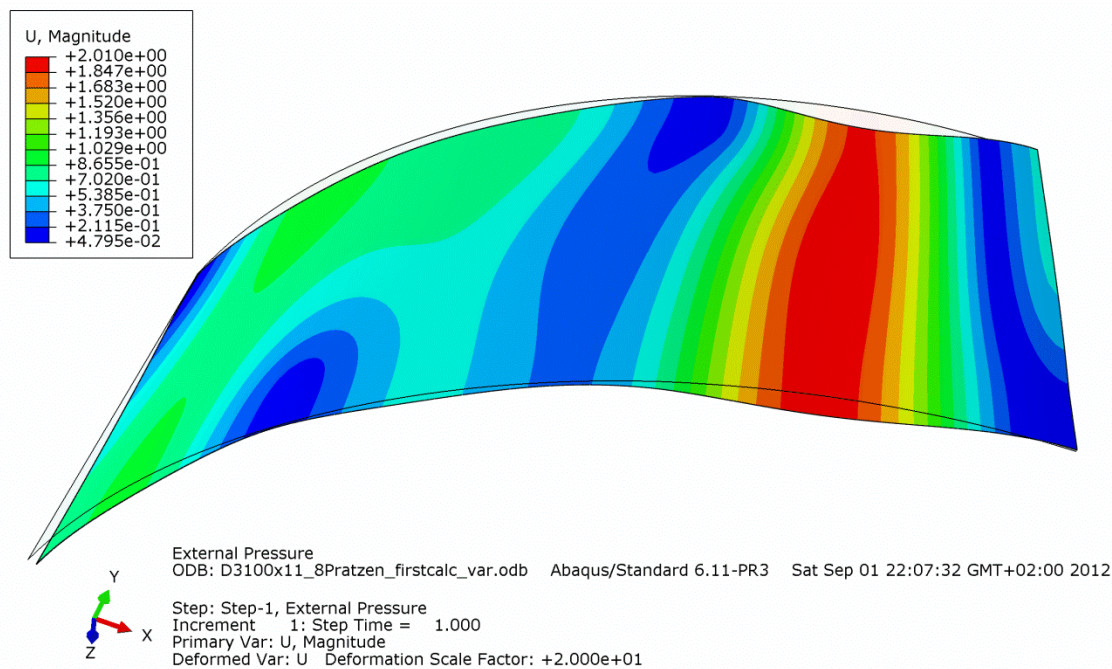


Abb. 35 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$).

Die Verformungsfigur „durchschlupfende Beule“ zwischen den Prätzen (rechtes Drittel des Modellausschnitts, Prätzenlage vgl. Abb. 10) ist in Abb. 35 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 7.48\text{bar}$ stellt sich eine moderate maximale Verformung von rund 2.0mm in Beulenmitte ein.

Die weiteren Darstellungen der Vergleichsspannungen an der Rohr-Innen- bzw. Rohr-Außenseite zeigen, dass die Fließgrenze $f_y = 410\text{N/mm}^2$ nicht erreicht wird. Somit verhält sich das System elastisch.

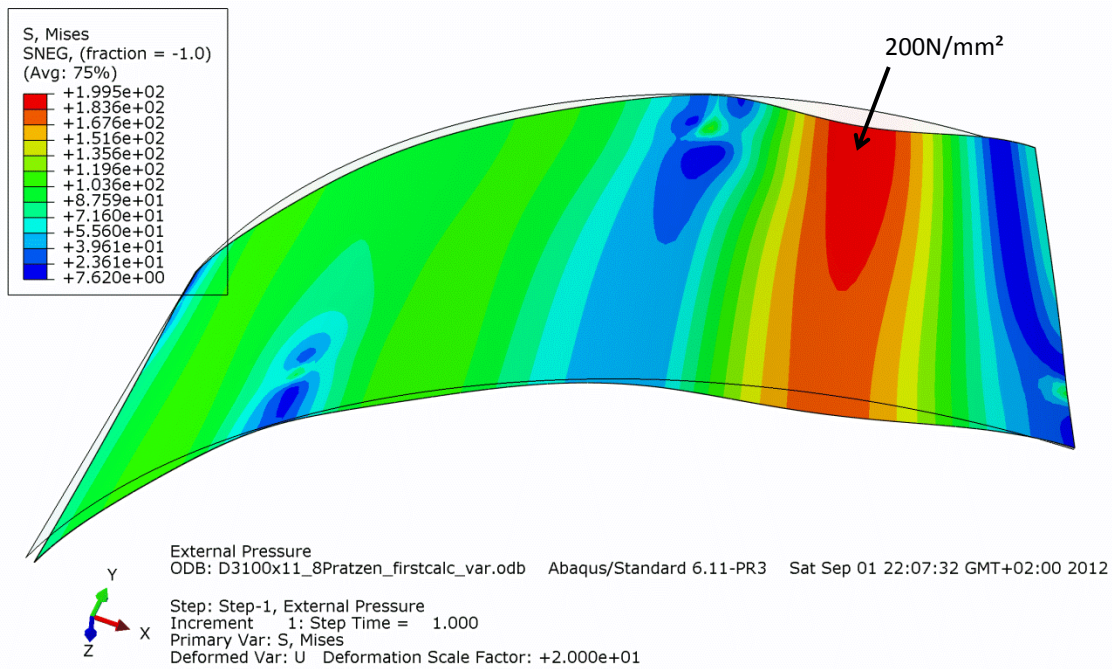


Abb. 36 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$) – Rohr-Außenseite.

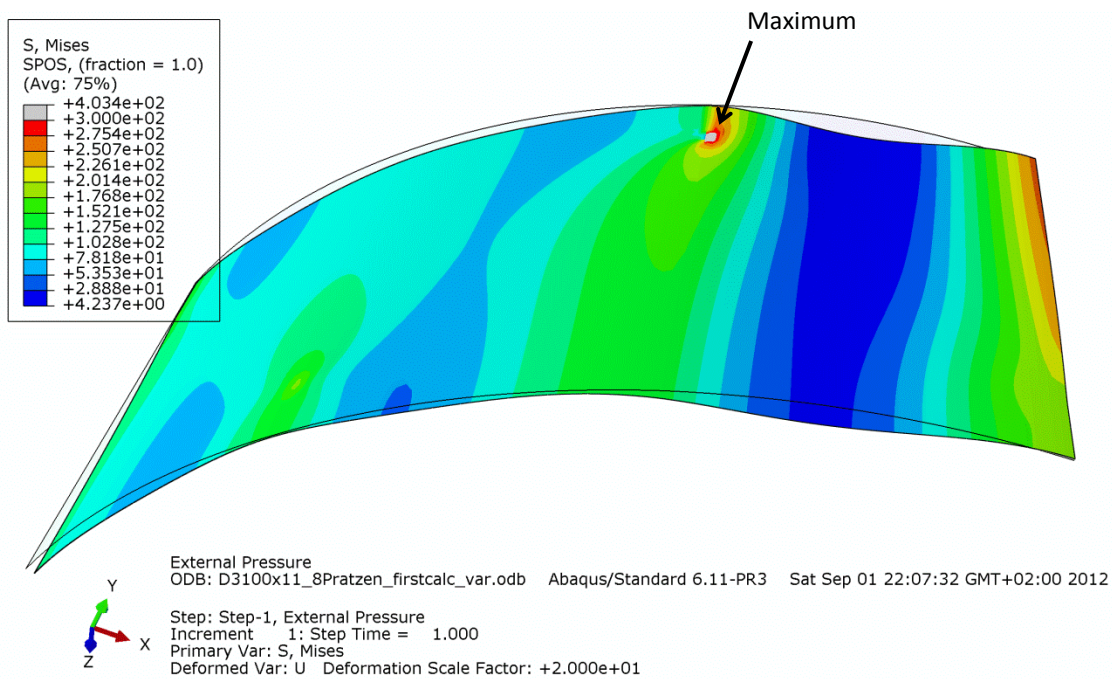


Abb. 37 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$) – Rohr-Innenseite.

2.3.2. Modell B2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell B2 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde. Die Verformungsfigur „durchschlupfende Beule“ zwischen den Prätzen (rechtes Drittel des Modellausschnitts) ist in Abb. 38 deutlich zu erkennen. Unter einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 7.44\text{bar}$ stellt sich eine maximale Verformung von rund 12.7mm in Beulenmitte ein. (Anmerkung: Die Bemessungslast von $p_a = 7.48\text{bar}$ wird für diese System nur zu 99% erreicht. Die Ergebnisse stellen also bereits den Traglastzustand ohne Gebirgsmitwirkung dar).

Somit sind die hier auftretenden Verformungen in etwa doppelt so groß wie für die Berechnung mit Modell B1. Der Grund hierfür liegt bei der zusätzlichen Verformungsmöglichkeit durch die Biegung der in Modell B2 zusätzlich modellierten Prätzen.

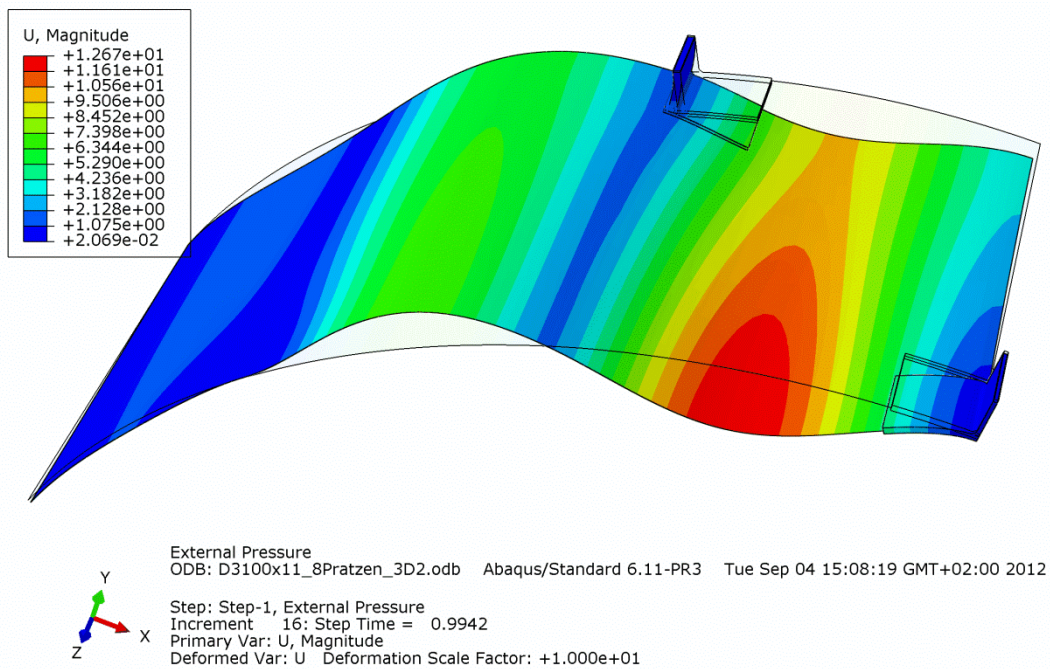


Abb. 38 Verformungen des Systems [mm] ca. bei Bemessungslast ($p_a = 7.44\text{bar}$).

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche ($f_y = 410\text{N/mm}^2$) im Beulfeld (Rohr außenseite, Abb. 39) und unter den modellierten Prätzen (Rohrinnenseite, Abb. 40).

Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 41) zeigt das Durchplastizieren der Rohrwand, was die Traglast des Systems ohne Gebirgsmitwirkung mit $p_a = 7.44\text{bar}$ – dies entspricht etwa dem charakteristischen Wert des Außendrucks – begrenzt.

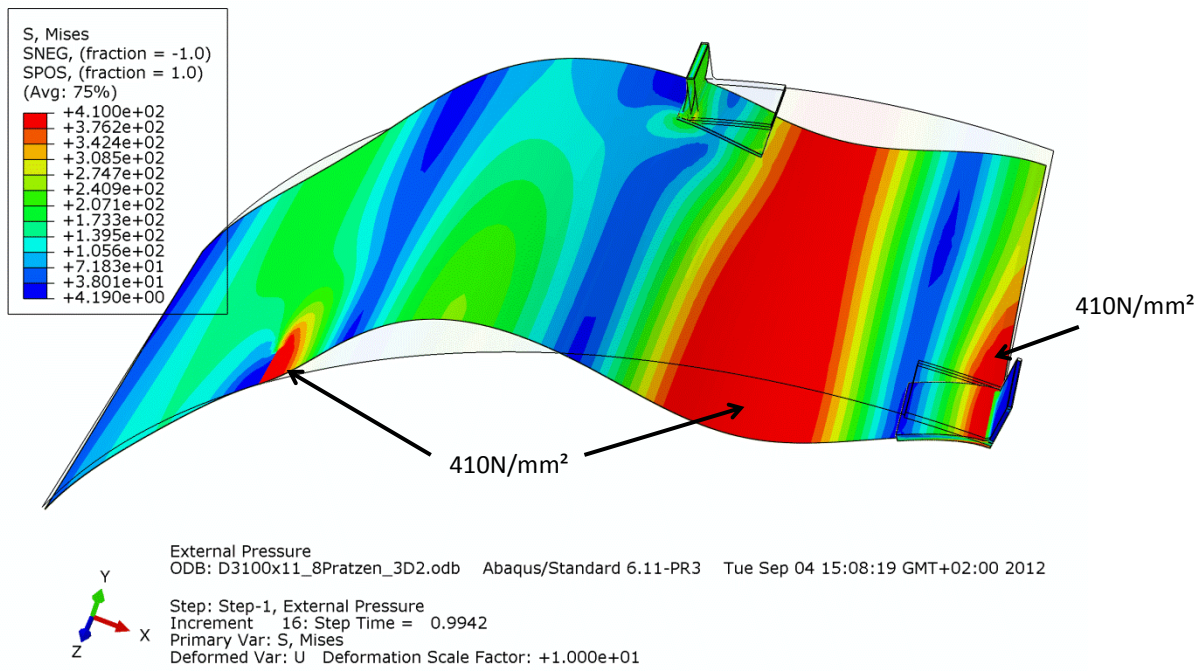


Abb. 39 Vergleichsspannung [N/mm²] ca. bei Bemessungslast ($p_a = 7.44\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

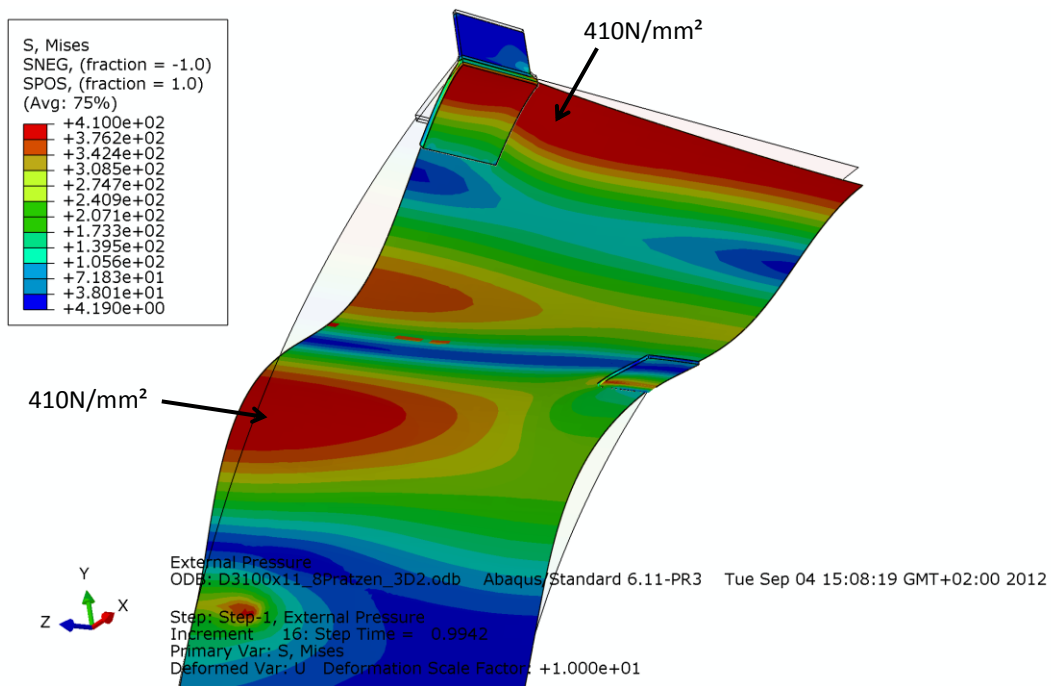


Abb. 40 Vergleichsspannung [N/mm²] ca. bei Bemessungslast ($p_a = 7.44\text{bar}$) an der Rohrinenseite.

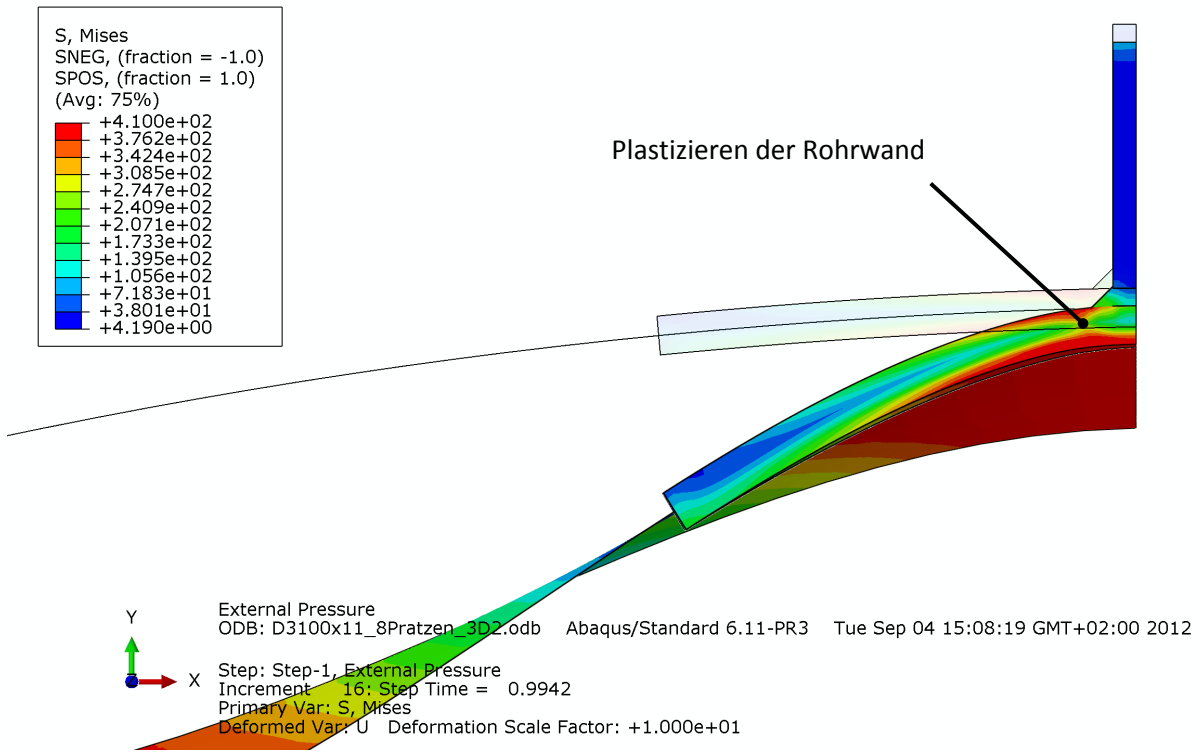


Abb. 41 Vergleichsspannung [N/mm²] ca. bei Bemessungslast ($p_a = 7.44\text{bar}$) – Detailansicht der Prätze.

2.3.3. Modell B3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmitwirkung berücksichtigt)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell B3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 2.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde.

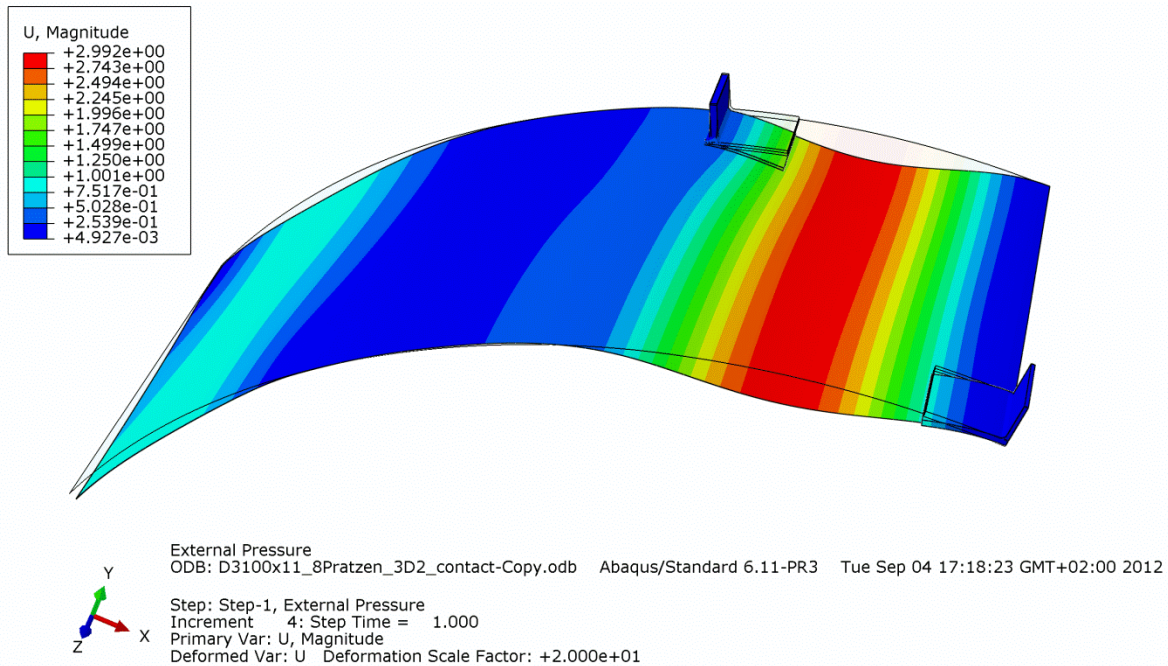


Abb. 42 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$).

Die Verformungsfigur „durchschlupfende Beule“ zwischen den Pratzen (rechtes Drittel des Modellausschnitts) ist in Abb. 42 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 7.48\text{bar}$ stellt sich eine maximale Verformung von rund 3.0mm in Beulenmitte ein. Somit sind die hier auftretenden Verformungen deutlich kleiner als jene für die Berechnung mit Modell B2, ohne Gebirgsmitwirkung. Die signifikante Reduktion der Verformungen um ca. 76% ist durch die mögliche Abstützung des Rohres gegen das Gebirge und eine dadurch bedingte Versteifung des Systems begründet.

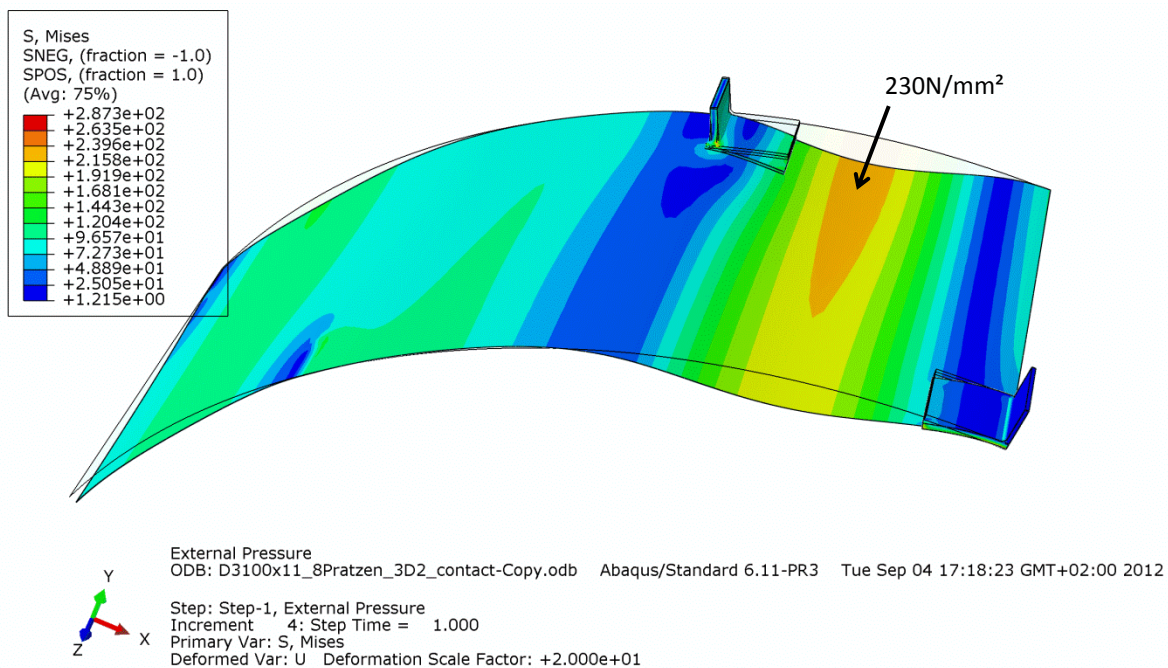


Abb. 43 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

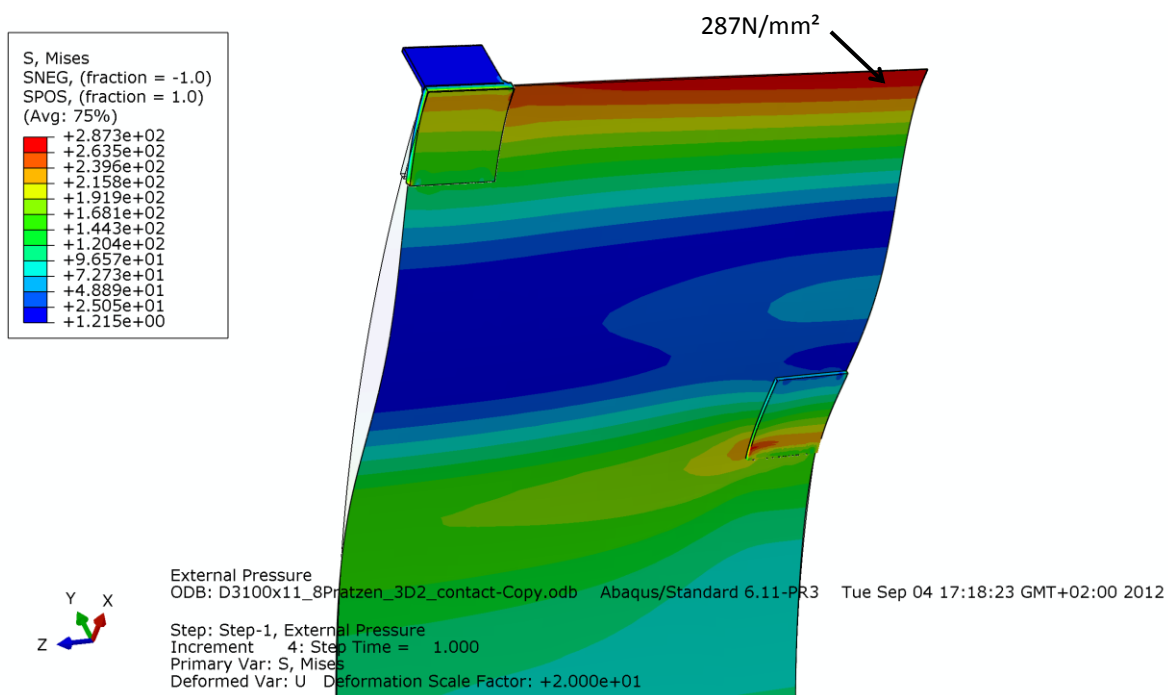


Abb. 44 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$) an der Rohrinenseite.

Die weiteren Darstellungen der Vergleichsspannungen an der Rohr-Innen- bzw. Rohr-Außenseite zeigen maximale Spannungen von 290 bzw. 230N/mm² ($f_y = 410\text{N/mm}^2$, Abb. 43 und Abb. 44). Demnach verhält sich das System in allen Bereichen – auch in den Pratzen (Abb. 45) – elastisch.

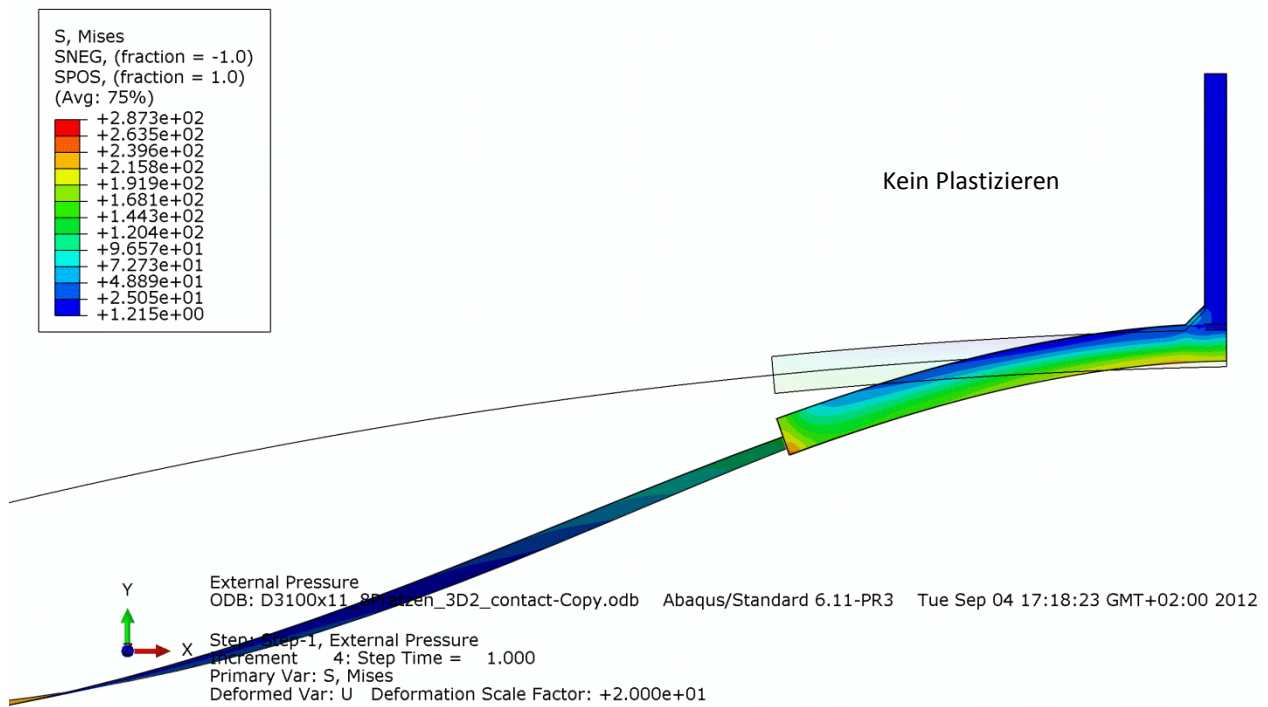


Abb. 45 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$) – Detailansicht der Pratzte.

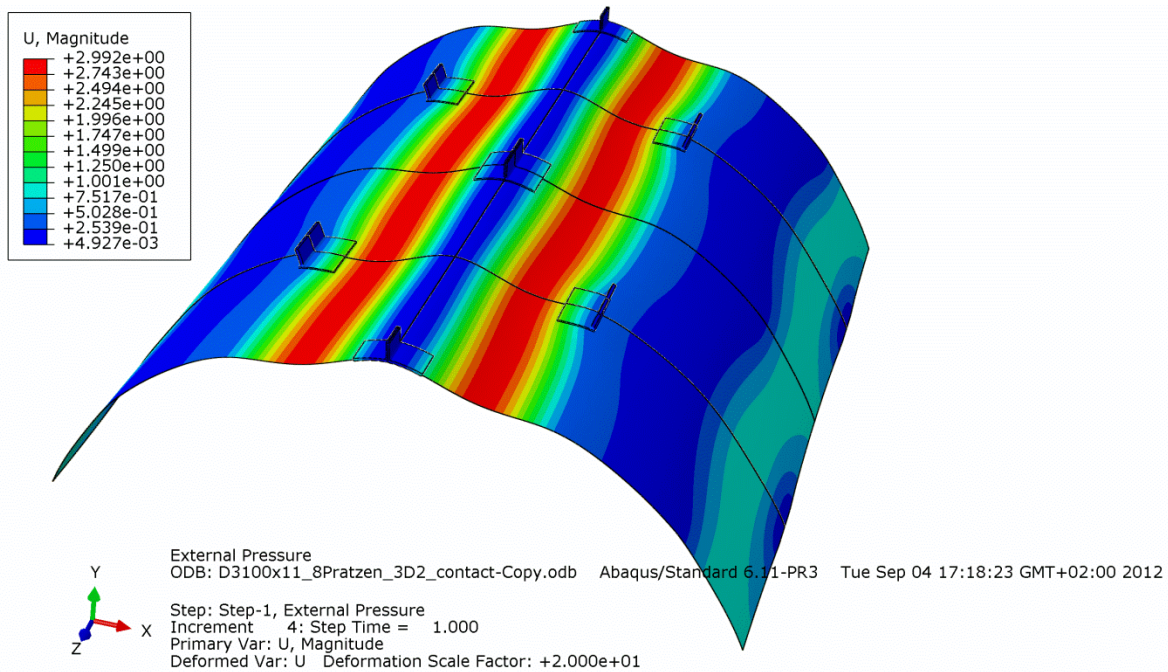


Abb. 46 Verformungsmuster „durchschlupfende Beule“ bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$).

Abb. 46 zeigt das Verformungsmuster „durchschlupfende Beule“ bei $p_a = 7.48\text{bar}$. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Abb. 42 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformungen zwischen den Pratzten in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 46 ist der modellierte Teilbereich insgesamt 8-mal dargestellt.

Die in Abb. 47 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.12N/mm^2 auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

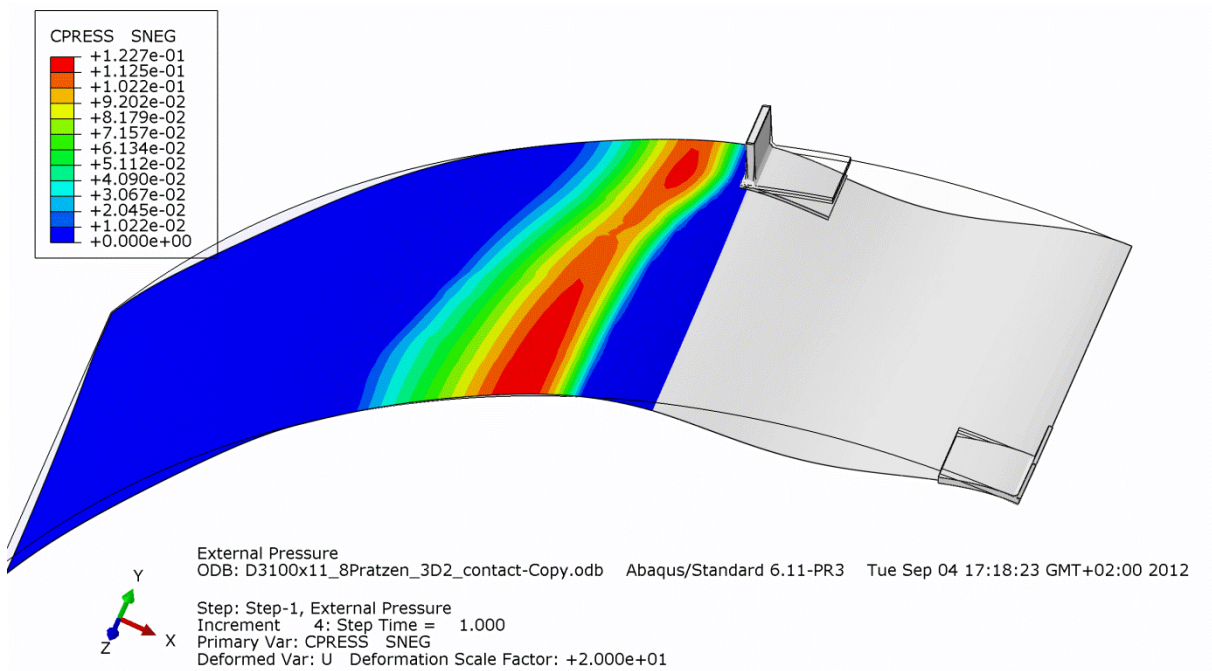


Abb. 47 Kontaktpressung [N/mm^2] bei Bemessungslast ($p_a = 7.48\text{bar}$).

2.3.4. Traglastberechnung mit Modell B3 (LPF=1.60)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Traglastberechnung mit Modell B3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmittwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 2.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 2.1.3. Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 2.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde.

Der maximal zulässige Außendruck (ohne Sicherheitsbeiwerte) – als Ergebnis der Traglastberechnung, die einen Laststeigerungsfaktor von LPF = 1,60 ergab – beträgt $p_{a,max} = 11.95\text{bar}$.

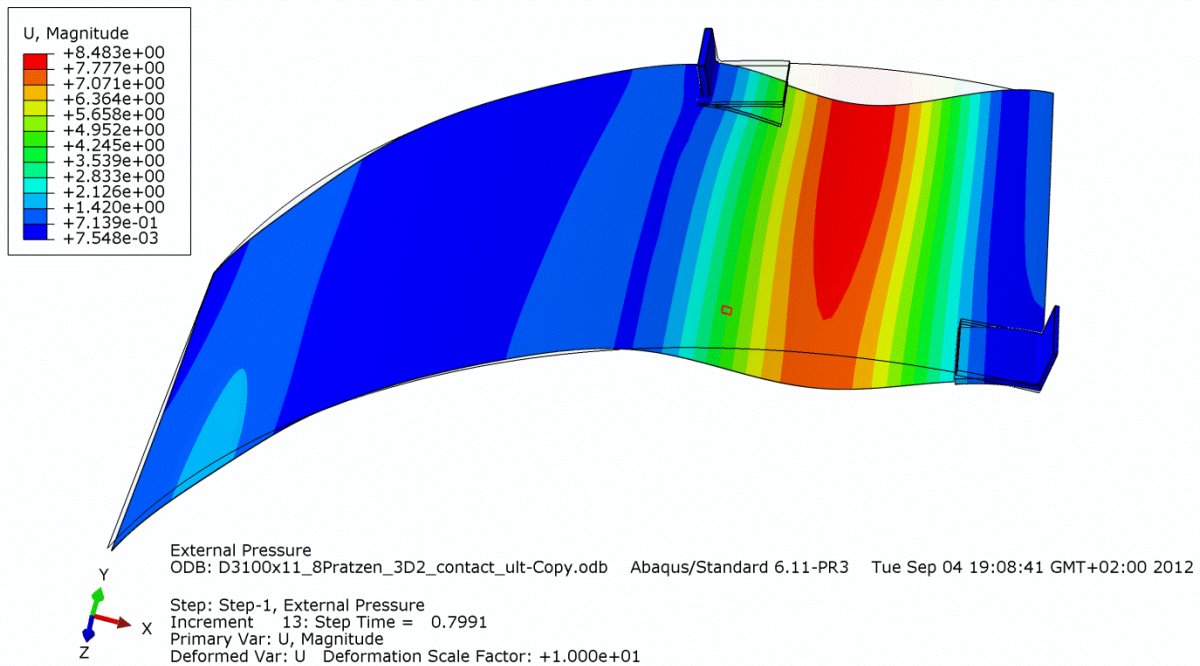


Abb. 48 Verformungen des Systems [mm] bei Traglast ($p_{a,max} = 11.95\text{bar}$).

Die Versagensform „durchschlupfende Beule“ zwischen den Pratzen (rechtes Drittel des Modellausschnitts) ist in Abb. 48 deutlich zu erkennen. Unter der Traglast von $p_{a,max} = 11.95\text{bar}$ stellt sich eine Verformung von rund 8.5mm in Beulenmitte ein. Bei weiterem Anstieg des Außendrucks würden diese Verformungen überproportional zunehmen und zu einem Versagen des Systems führen.

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche ($f_y = 410\text{N/mm}^2$) im Beulfeld (Rohraußenseite, Abb. 49) und unter den modellierten Pratzen entlang der Rohrlängsachse (Rohrinnenseite, Abb. 50).

Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Pratzen-Anschlusspunkt (Abb. 51) zeigt Plastizieren der Pratze ($f_y = 235\text{N/mm}^2$) bei gleichzeitigem Durchplastizieren der Schweißnaht ($f_y = 235\text{N/mm}^2$), was die Traglast mit $p_{a,max} = 11.95\text{bar}$ begrenzt.

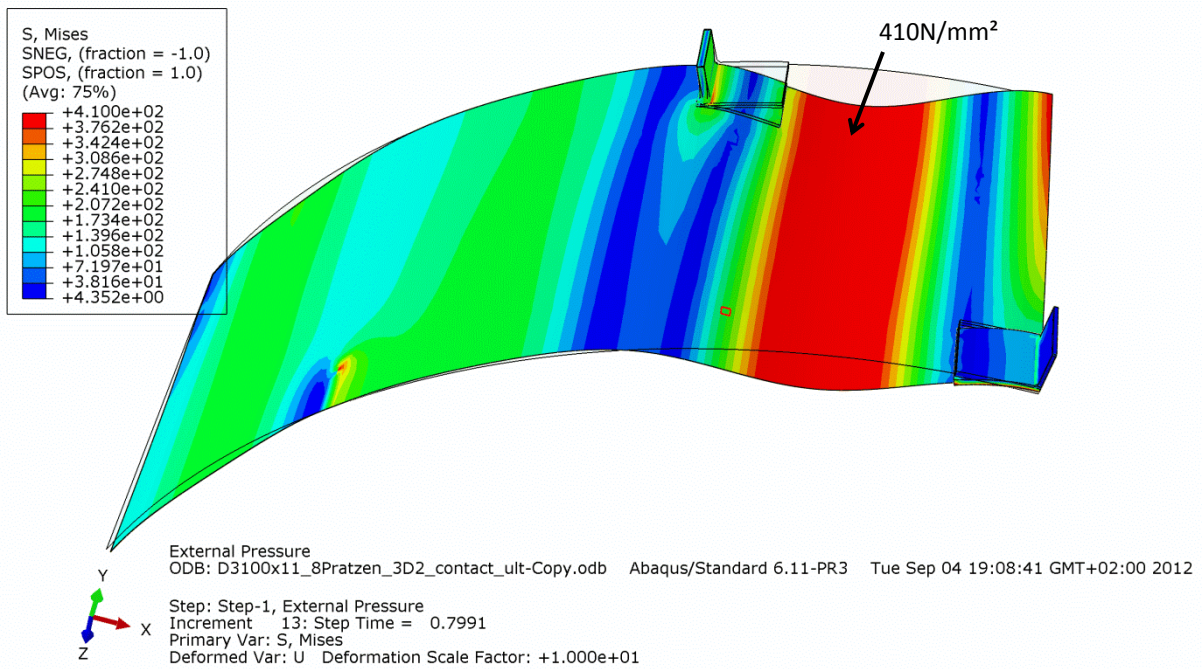


Abb. 49 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 11.95\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

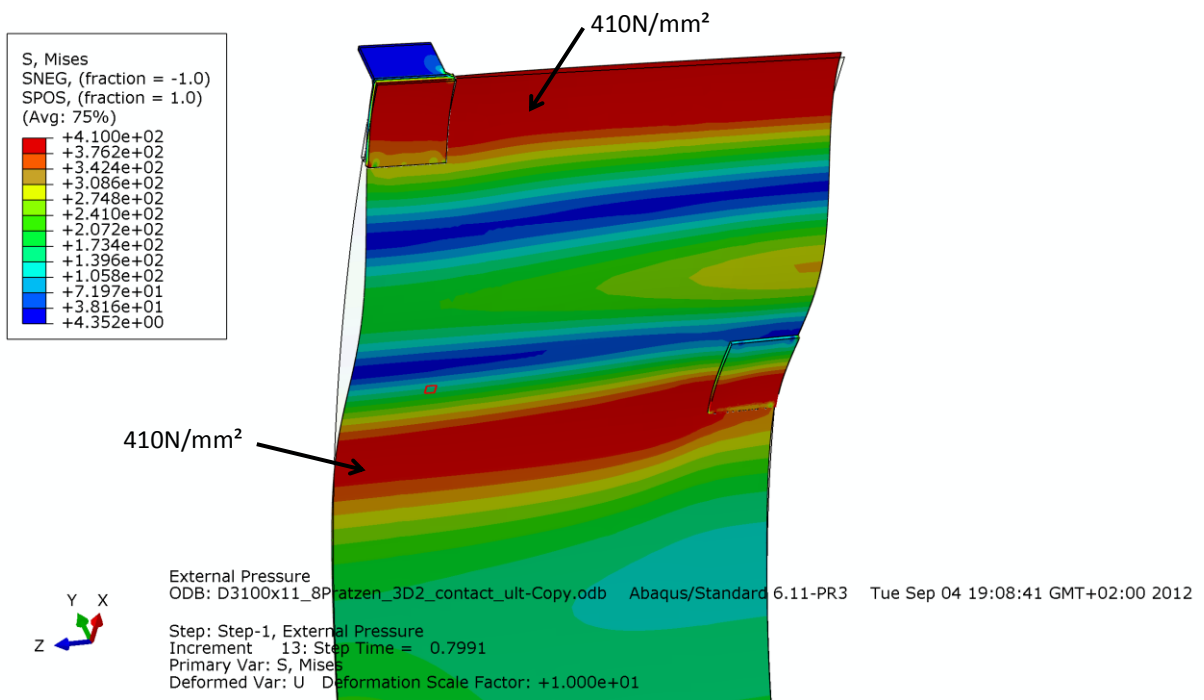


Abb. 50 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 11.95\text{bar}$) an der Rohrinenseite.

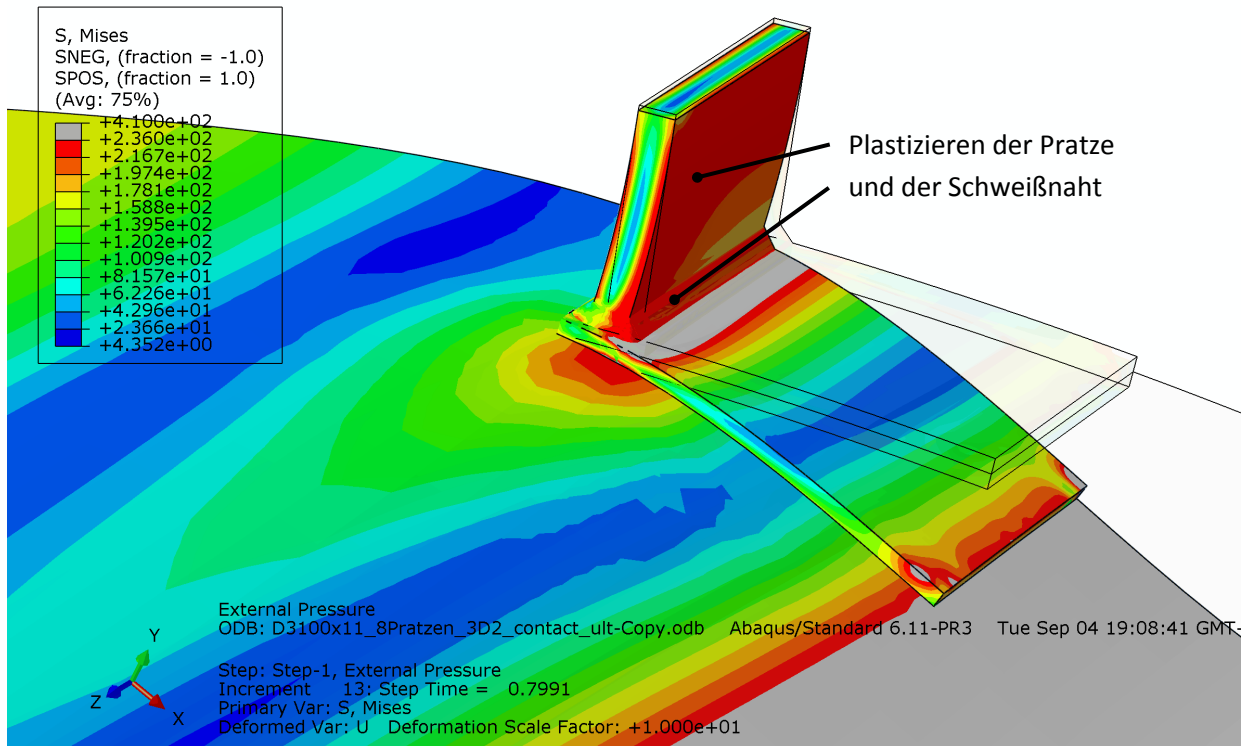


Abb. 51 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ($p_{a,max} = 11.95\text{bar}$) – Detailansicht der Pratte.

Abb. 52 zeigt das Verformungsmuster „durchschlupfende Beule“ bei einem Gebirgswasserdruck von $p_{a,max} = 11.95\text{bar}$. Für diesen Lastzustand ist der Traglastzustand des Systems erreicht. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Abb. 48 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformungen zwischen den Pratten in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 52 ist der modellierte Teilbereich insgesamt 8-mal dargestellt.

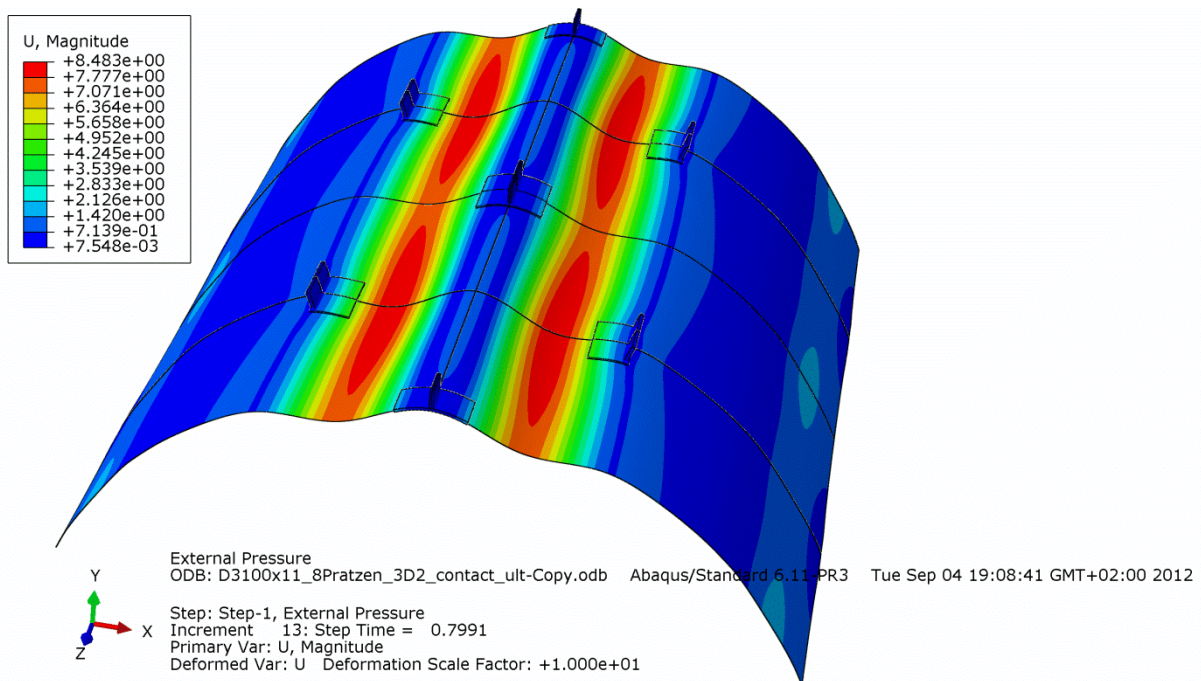


Abb. 52 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Traglast ($p_{a,max} = 11.95\text{bar}$).

Die in Abb. 53 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.90N/mm^2 auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

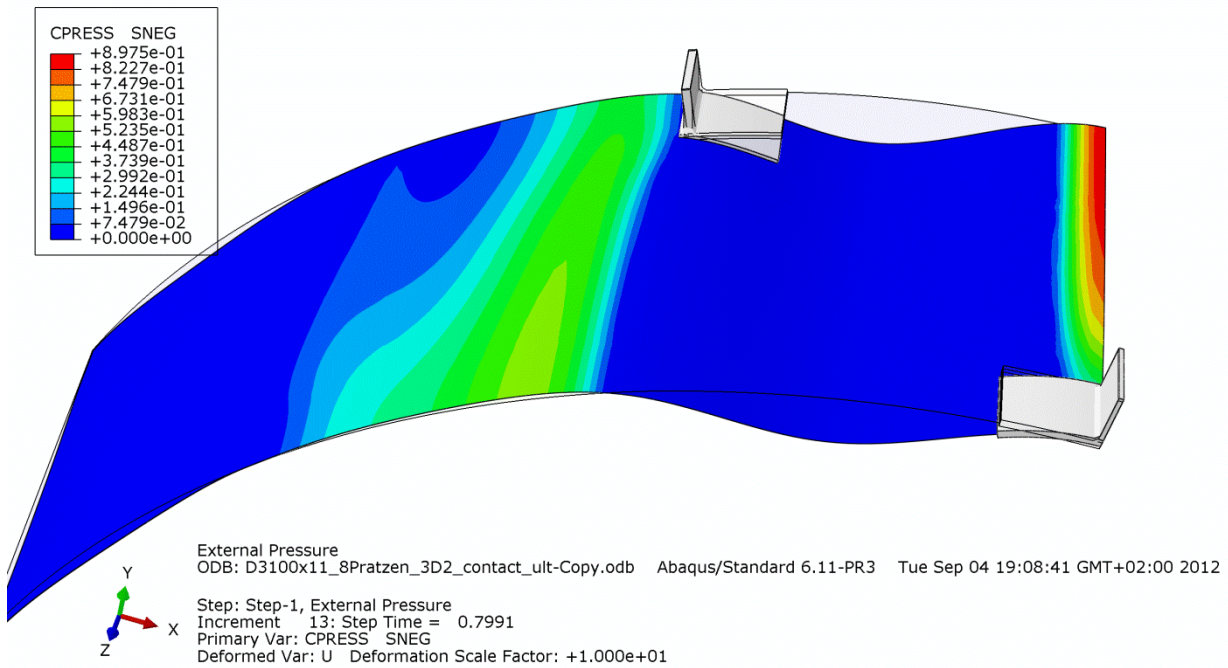


Abb. 53 Kontaktpressung [N/mm^2] bei Traglast ($p_{a,\text{max}} = 11.95\text{bar}$).

3. KW Walgau – FE-Berechnungen zur Ermittlung des zulässigen Außendrucks

3.1. Berechnungsgrundlagen

3.1.1. Material und Geometrieparameter

Im untersuchten Bereich weist die Rohrwand ($D_i = 5100\text{mm}$, $t = 21\text{mm}$) die Stahlgüte Aldur 50 ($f_y = 360\text{N/mm}^2$) auf. Der E-Modul wurde mit $E = 210000\text{N/mm}^2$ festgelegt. Die Pratzten sind in ST 52 ($f_y = 355\text{N/mm}^2$) ausgeführt und mit Kehlnähten ($a = 4\text{mm}$) aufgeschweißt. Der Abstand der Pratzten in Rohrlängsrichtung beträgt 1000mm . Die 16 Pratzten entlang des Umfangs sind in Rohrlängsrichtung um 10.5° versetzt angeordnet, siehe Abb. 4. Die Abmessungen der Y-Pratzten betragen $250 \times 150 \times 15\text{mm}$ (LängexHöhexDicke), vgl. Abb. 5. Das Materialgesetz ist linear elastisch - ideal plastisch mit der jeweiligen Fließgrenze für Rohr bzw. Pratzte modelliert.

3.1.2. Imperfektionsannahme (Unrundheiten der Rohrwand)

Den in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnissen liegt folgende geometrische Imperfektionsannahme zugrunde:

KW Walgau – 16 Pratzten (um 10.5° versetzt):

Die Abweichungen von der idealen Kreisform durch Unrundheiten wurden mit einem nach innen gerichteten Stich von 5mm im Bereich der Symmetrieachse und mit einem nach außen gerichteten Stich von 2mm im anschließenden Feld berücksichtigt. Die Stiche wurden mit unterschiedlichen Radien realisiert. Die geometrische Imperfektion ist in Abb. 54 graphisch dargestellt. Sie ist konstant in Rohrlängsrichtung. Der Verlauf entlang des Umfangs wurde so gewählt, dass sich die zu erwartende Versagensform „rautenförmiges Beulen“ einstellt, siehe Abb. 7a. Die Stichgrößen (5 bzw. 2mm) wurden aus den Daten des KW Rodund II gemäß den Bogenlängen umgerechnet.

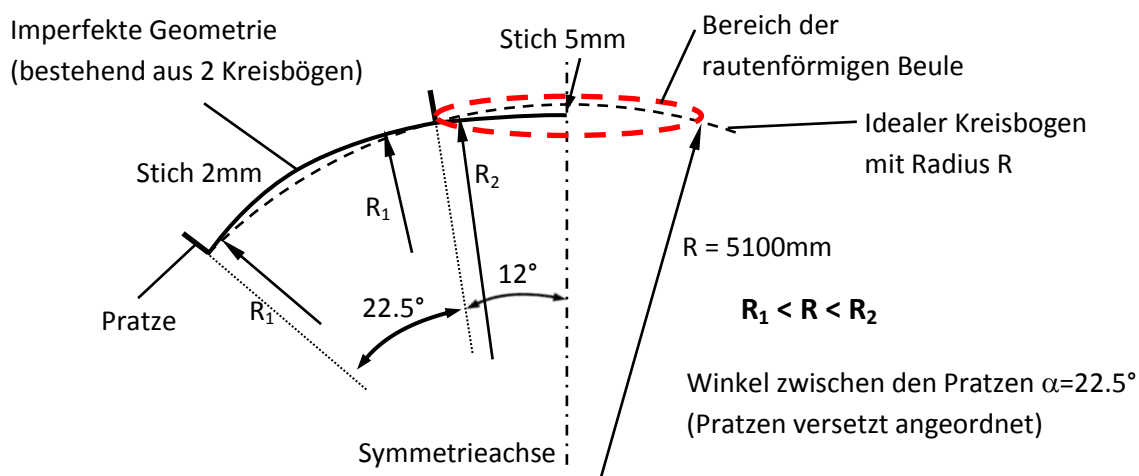


Abb. 54 Geometrische Imperfektion zur Abbildung von Unrundheiten, KW Walgau 16 Pratzten (um 10.5° versetzt).

3.1.3. Belastung, Randbedingungen und Modellierung

Als Belastung wurde für alle Modelle ein konstanter Außendruck von $p_e = 17.658\text{bar}$ – ohne weitere Teilsicherheitsbeiwerte – angesetzt. Dieser Wert wurde aus der alten Statik übernommen.

Die Modellbildung und Berechnung der Systeme erfolgte in drei Stufen. In einem ersten Schritt wurde die Rohrwand mit Schalenelementen abgebildet und die Pratten über geeignete Randbedingungen berücksichtigt (**Modell C1**), siehe Abb. 55. Die Imperfektionsform der vorangegangenen Abbildung ist als Schnitt entlang der hier gekennzeichneten Achse (c) zu verstehen.

An den rot strichlierten Modellrändern sind Symmetriebedingungen aufgebracht. Die Pratten werden mit radialen Federn modelliert. Die Federsteifigkeit c ergibt sich aus einer Rückrechnung der Nachgiebigkeit gemäß den Empfehlungen des AK Beulversuche mit $c = 1/f_z = 10^2/0.00064 = 156250\text{N/mm}$. Durch die Ausnutzung von Symmetriebedingungen sind entweder $c/2$ oder $c/4$ in der Berechnung anzusetzen. An den Punkten der radialen Federn wurden zusätzlich alle Verdrehungen und die Verschiebung in Umfangsrichtung gesperrt. Es wird die Gebirgsmitwirkung nicht berücksichtigt, da vor allem die Formfindung Zweck dieser Berechnung ist.

Dieses relativ einfache Modell mit ca. 15000 S4R Schalenelementen eignet sich aufgrund seiner vergleichsweise geringen Rechenzeit sehr gut zur Formfindung und Definition der Imperfektionen. Das geschieht durch Überprüfung verschiedener geeigneter Ansätze und einem Vergleich der sich ergebenden Beanspruchungen und Verformungsmuster. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass die gewählten Imperfektionen zu einer Reduktion der Traglast führen und sich das zu erwartende Versagensmuster („rautenförmige“ Beule, siehe Abb. 7a) einstellen kann. Aus mehreren Berechnungen an diesem Modell ergaben sich die in Abschnitt 3.1.2 angeführten Imperfektionsannahmen.

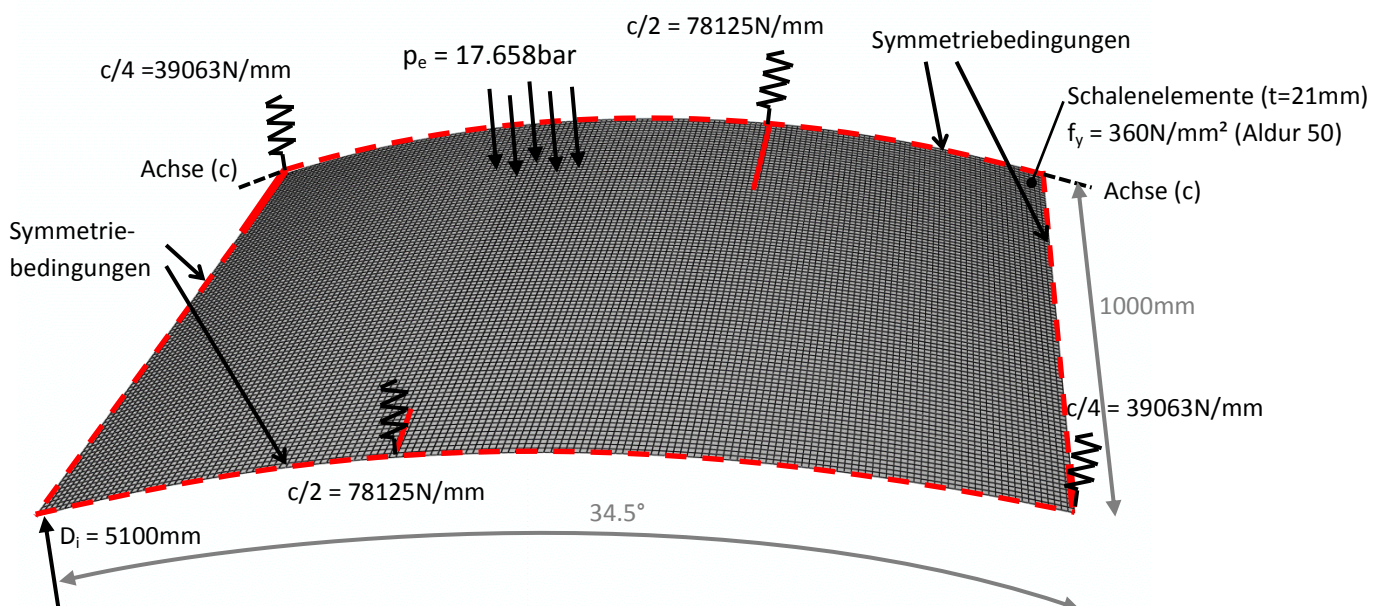


Abb. 55 Modell C1: FE-Netz, Randbedingungen und Belastung, KW Walgau 16 Pratten (um 10.5° versetzt).

Unter Verwendung dieser geometrischen Imperfektionen wurde das Modell verfeinert und die Pratten und Teile der Rohrwand im Bereich der Beulen mithilfe von Volumenelementen abgebildet, siehe Abb. 56. Hierbei kamen quaderförmige C3D8R Elemente zum Einsatz, wie Abb. 57 im Detailausschnitt zeigt. Das so entwickelte **Modell C2** besteht aus ca. 56.000 Elementen (221.000 Unbekannte), was zu einem

deutlich höheren Rechenaufwand gegenüber Modell C1 führt. Die tatsächlichen Verhältnisse, vor allem die lokalen Beanspruchungen im Bereich der Prätzen, können jedoch mit diesem Modell deutlich besser wiedergegeben werden.

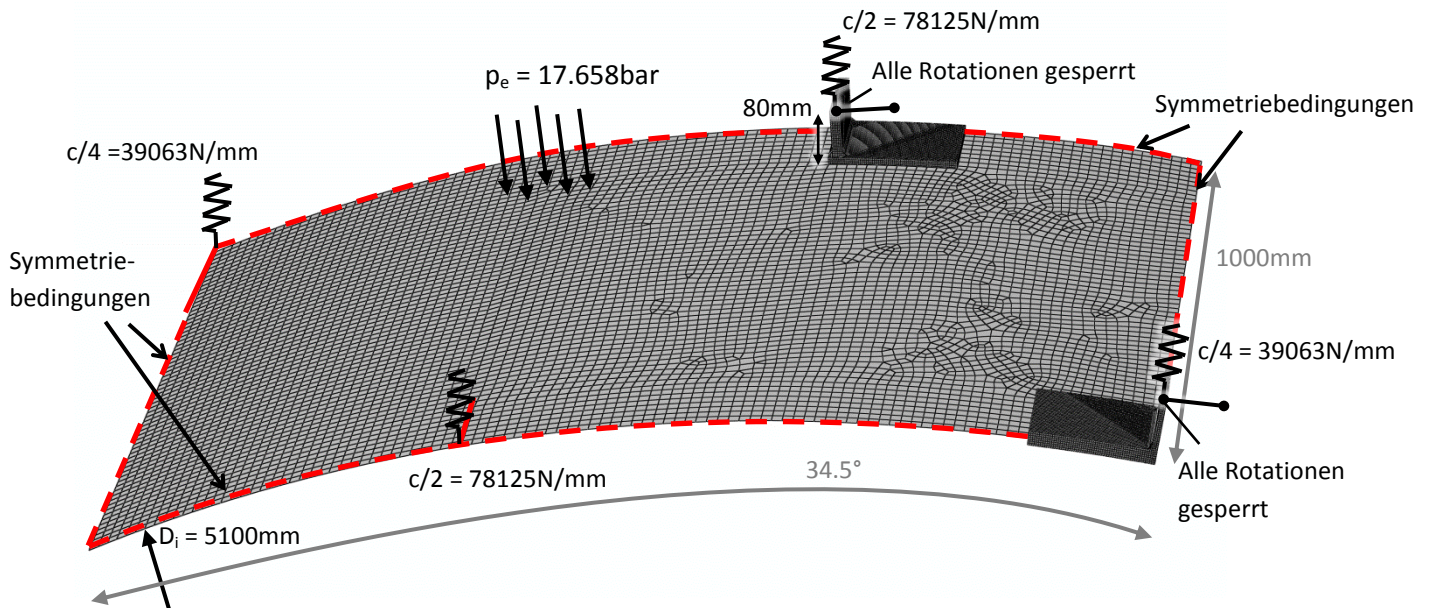


Abb. 56 Modell C2 bzw. C3: FE-Netz, Randbedingungen, Belastung, KW Walgau 16 Prätzen (um 10.5° versetzt).

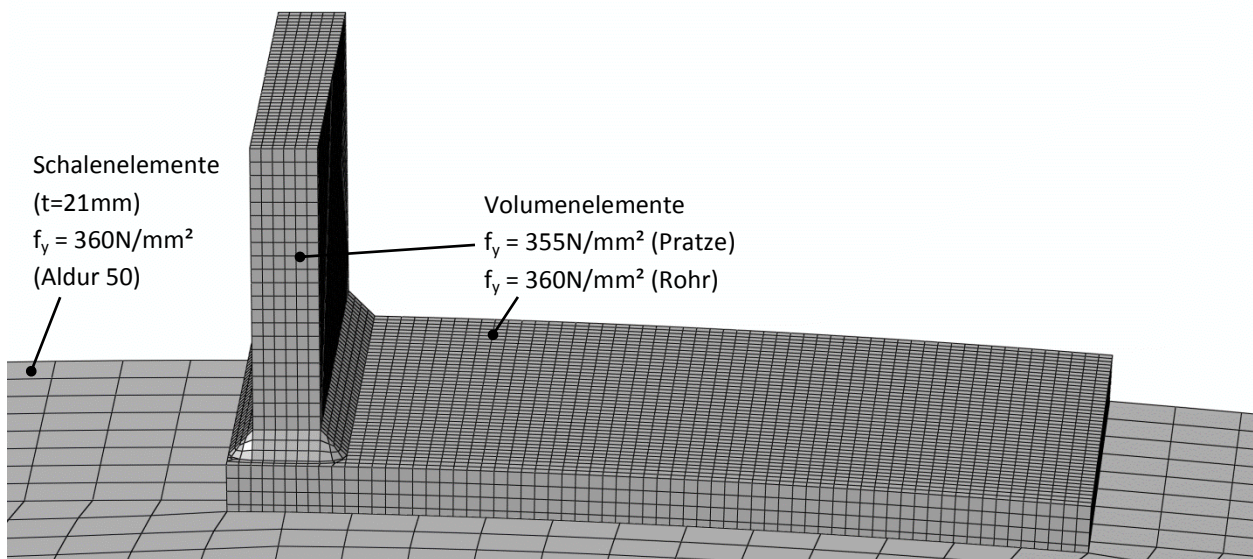


Abb. 57 Modell C2 bzw. C3: FE-Netz Detailansicht, KW Walgau 16 Prätzen (um 10.5° versetzt).

Der Unterschied von **Modell C3** gegenüber Modell C2 besteht in der zusätzlichen Berücksichtigung der Gebirgsmitwirkung (für Details zur Definition der Kontaktfläche siehe Abschnitt 3.1.4). Das bedeutet, dass Modell C2 ohne Gebirgsmitwirkung berechnet wurde und bei Modell C3 die radiale Nachgiebigkeit, entsprechend dem Bettungsmodul, Berücksichtigung fand.

3.1.4. Definition der Kontaktfläche

Für alle Berechnungen mit Modell B3 wurde eine unverschieblich gelagerte Kontaktfläche als Oberfläche definiert, die das Rohr im unbelasteten Zustand in allen Punkten berührt (d.h. ohne Spalt). Die Verformung des Rohres nach innen – also weg von der Kontaktfläche – ist unbehindert möglich. Verformungen nach außen berücksichtigen die Gebirgsmitwirkung mit einem Bettungsmodul von $K_S = 0.74\text{N/mm}^3$. Dieser Wert ergibt sich durch Umrechnung der in der alten Statik angegebenen Werte des Verformungsmoduls $V_F \approx 2500\text{N/mm}^2$ und Poisson'schen Zahl des Gebirges $m_F = 3.0$ ($\nu_F = 0.33$) mit folgender Formel:

$$K_S = \frac{V_F}{r \cdot (1 + \nu_F)} = \frac{2500}{2550 \cdot (1 + 0.33)} = 0.74\text{N/mm}^3$$

3.1.5. Berechnungsmethode

Sämtliche Berechnungen wurden mit dem Finiten-Elemente-Programm Abaqus, Version 6.10 durchgeführt. Es wurden sowohl geometrische Nichtlinearitäten (große Verformungen) als auch plastisches Materialverhalten und Systemimperfectionen gemäß Abschnitt 3.1.2 in allen Berechnungen berücksichtigt. Somit handelt es sich um Berechnungen des Typs GMNIA (geometrisch und materiell nichtlineare Analyse unter Berücksichtigung von Imperfectionen).

3.2. Ergebnisse im Bereich der Rohre 3-6 (16 Pratzten)

3.2.1. Modell C1 (nur Schalenelemente, keine Gebirgsmitwirkung)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell C1 dargestellt. Das Modell besteht ausschließlich aus Schalenelementen und die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 3.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Pratzten (rechtes oberes Eck des Modellausschnitts, vgl. Pratztenlage in Abb. 55) ist in Abb. 58 deutlich zu erkennen. Unter der Bemessungslast von $p_a = 17.66\text{bar}$ stellt sich eine moderate maximale Verformung von rund 5.6mm in Beulenmitte – zusätzlich zur geometrischen Anfangsimperfektion – ein.

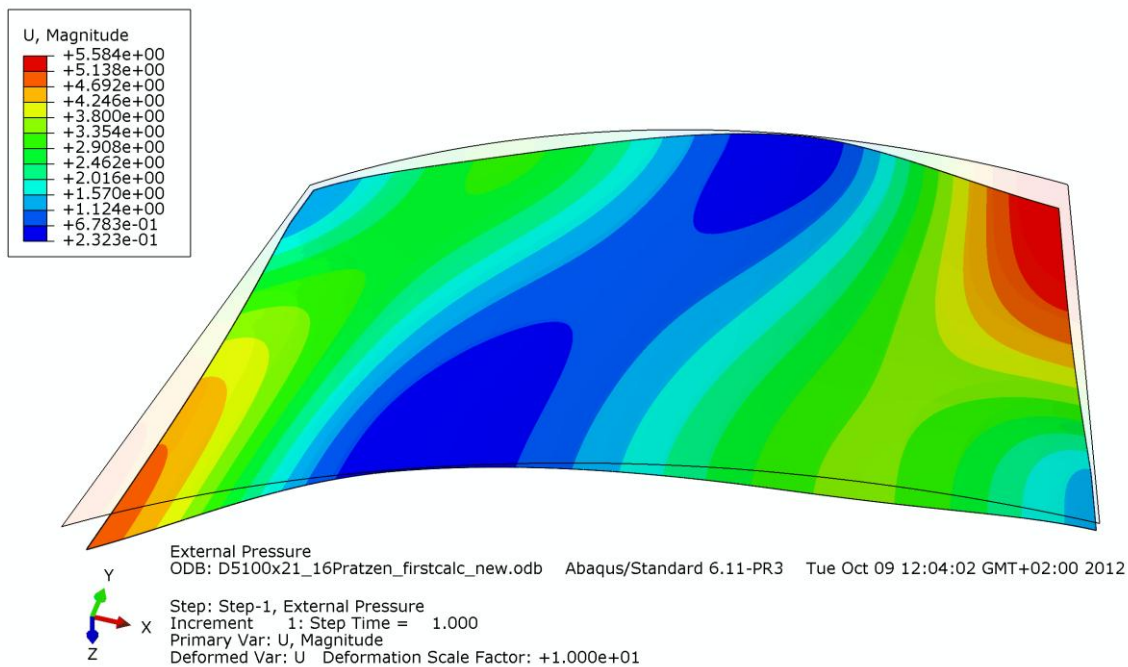


Abb. 58 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast ($p_a = 17.66\text{bar}$).

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche ($f_y = 360\text{N/mm}^2$) im Beulfeld (Rohraußenseite, Abb. 59) und unter den modellierten Pratzten (Rohrinnenseite, Abb. 61). Die Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass die Traglast des Systems nahezu (wenn auch noch nicht zur Gänze) erreicht ist.

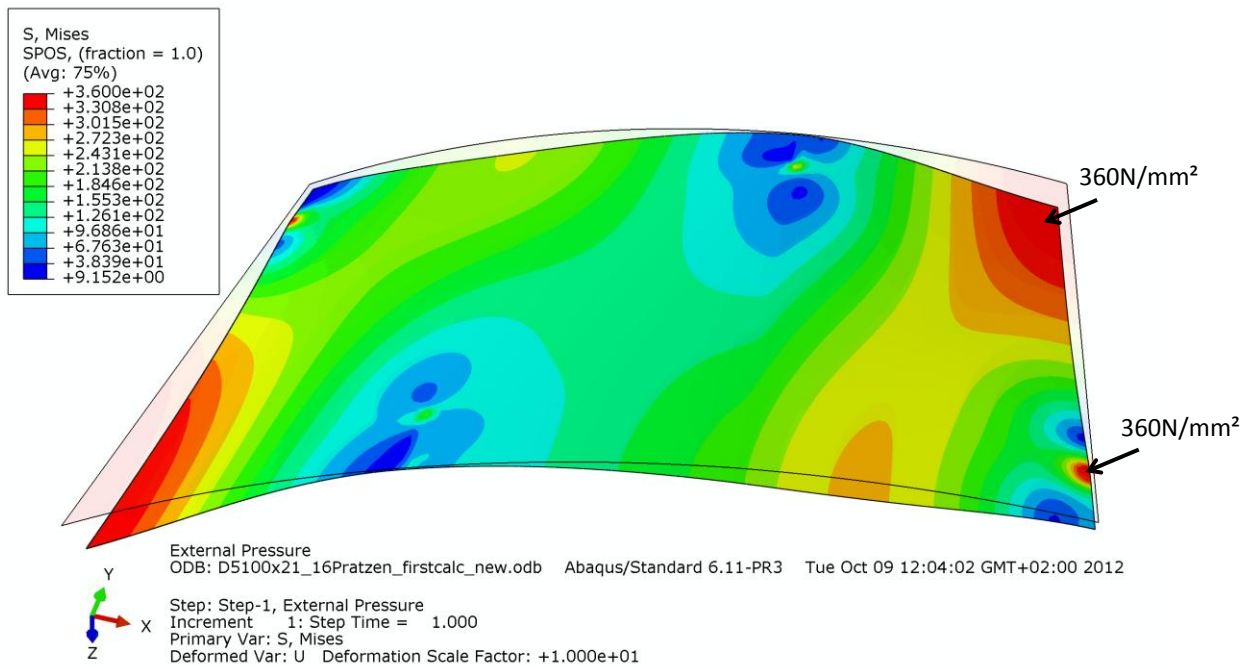


Abb. 59 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Rohr-Außenseite.

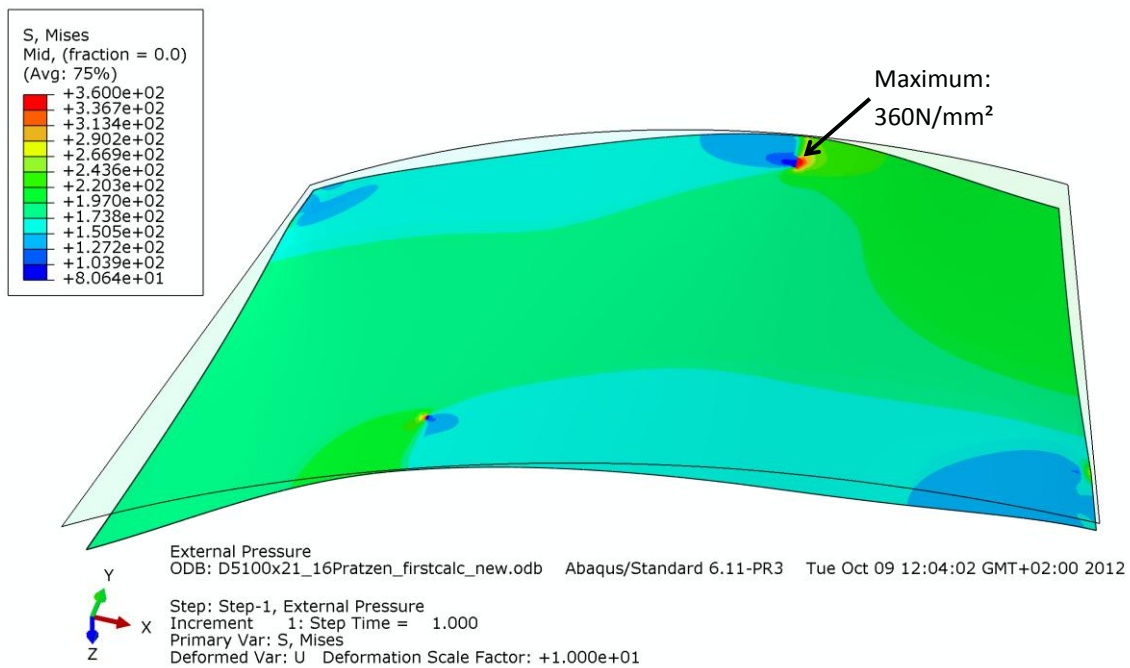


Abb. 60 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Rohr-Mittelfläche.

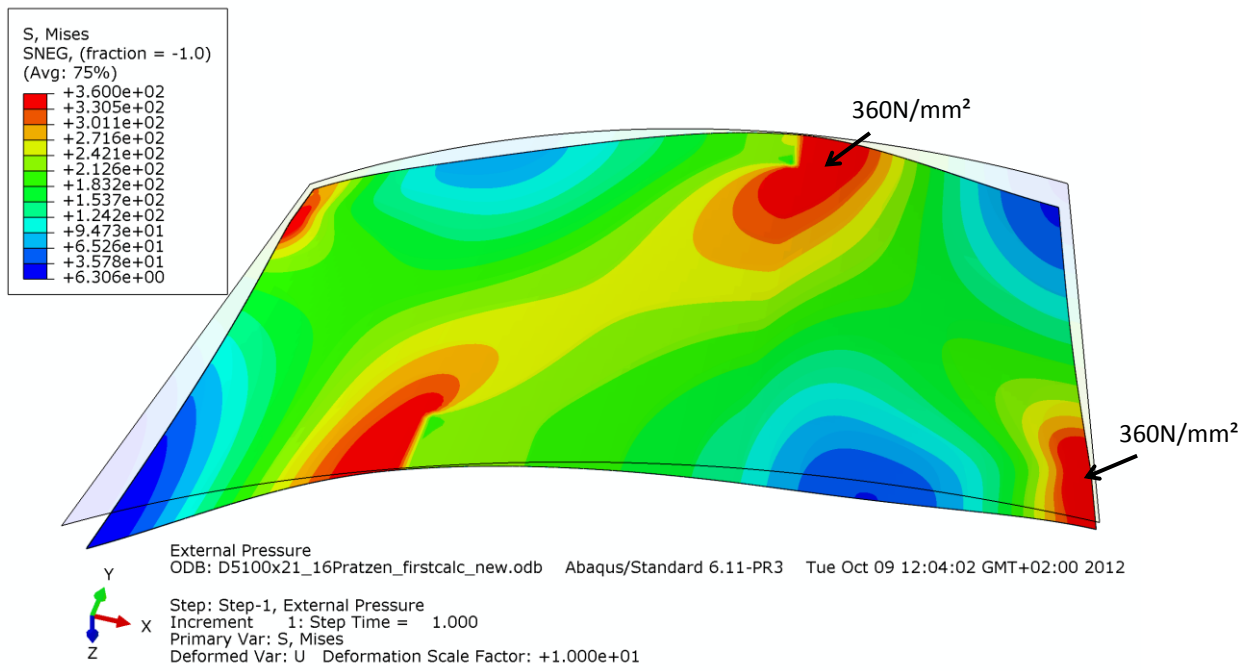


Abb. 61 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Rohr-Innenseite.

3.2.2. Traglastberechnung mit Modell C2 (Schalen- und Volumenelemente, keine Gebirgsmitwirkung), (LPF=0.936)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell C2 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier nicht berücksichtigt. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 3.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde. Der maximal zulässige Außendruck (ohne Sicherheitsbeiwerte) – als Ergebnis der Traglastberechnung, die einen Laststeigerungsfaktor von LPF = 0,936 ergab – beträgt $p_{a,max} = 16,53$ bar.

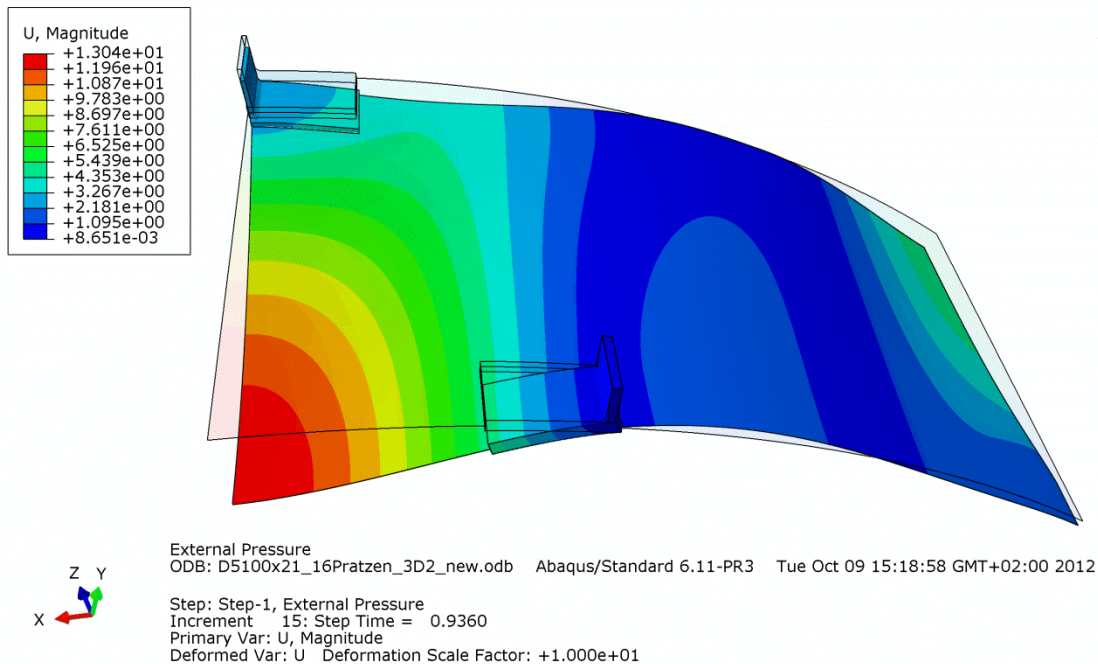


Abb. 62 Verformungen des Systems [mm] bei Traglast, ohne Gebirgsstützung ($p_a = 16.53$ bar).

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Pratzen (linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 62 deutlich zu erkennen. Unter einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 16.53$ bar stellt sich eine maximale Verformung von rund 13.0mm in Beulenmitte ein. (Anmerkung: Die charakteristische Bemessungslast von $p_a = 17.66$ bar wird für diese System nur zu 94% erreicht. Die Ergebnisse stellen also den Traglastzustand ohne Gebirgsmitwirkung dar.) Die hier auftretenden Verformungen sind mehr als doppelt so groß wie für die Berechnung mit Modell C1. Der Grund hierfür liegt bei der zusätzlichen Verformungsmöglichkeit durch die Biegung der in Modell C2 zusätzlich modellierten Pratzen.

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche im Rohr ($f_y = 360$ N/mm²) im Bereich der Beule (Rohraußenseite, Abb. 63) und unter den modellierten Pratzen (Rohrinnenseite, Abb. 64).

Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Pratzen-Anschlusspunkt (Abb. 65) zeigt Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 355$ N/mm²) bei gleichzeitigem Durchplastizieren der Rohrwand ($f_y = 360$ N/mm²), was die Traglast des Systems ohne Gebirgsmitwirkung mit $p_a = 16.53$ bar begrenzt.

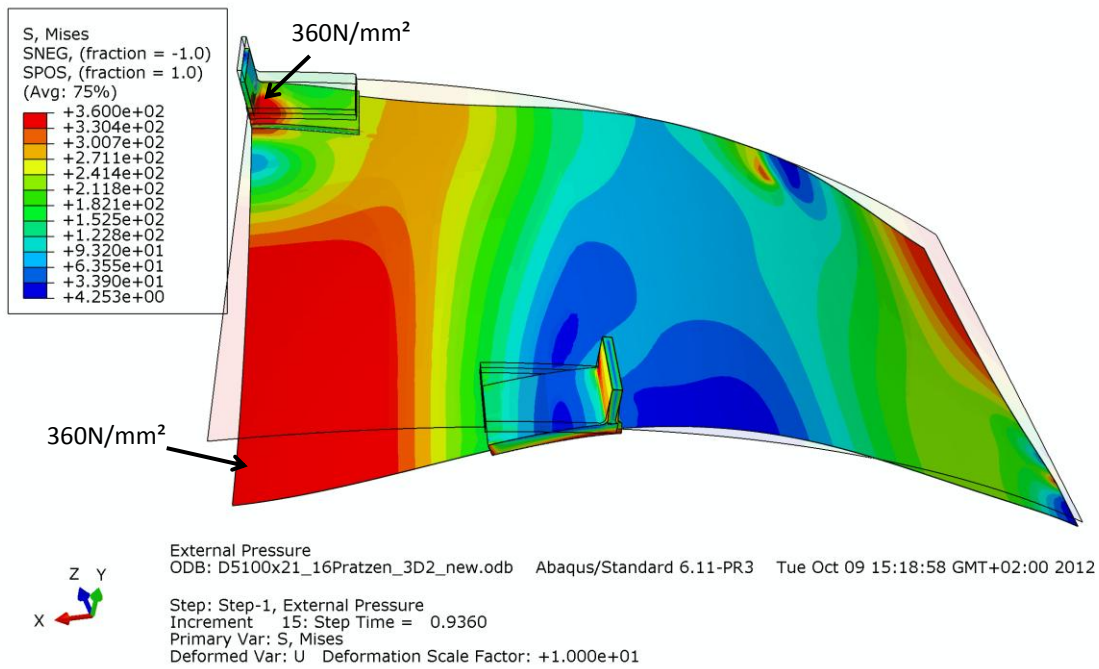


Abb. 63 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ohne Gebirgsstützung ($p_a = 16.53\text{bar}$) an der Rohraußenseite.

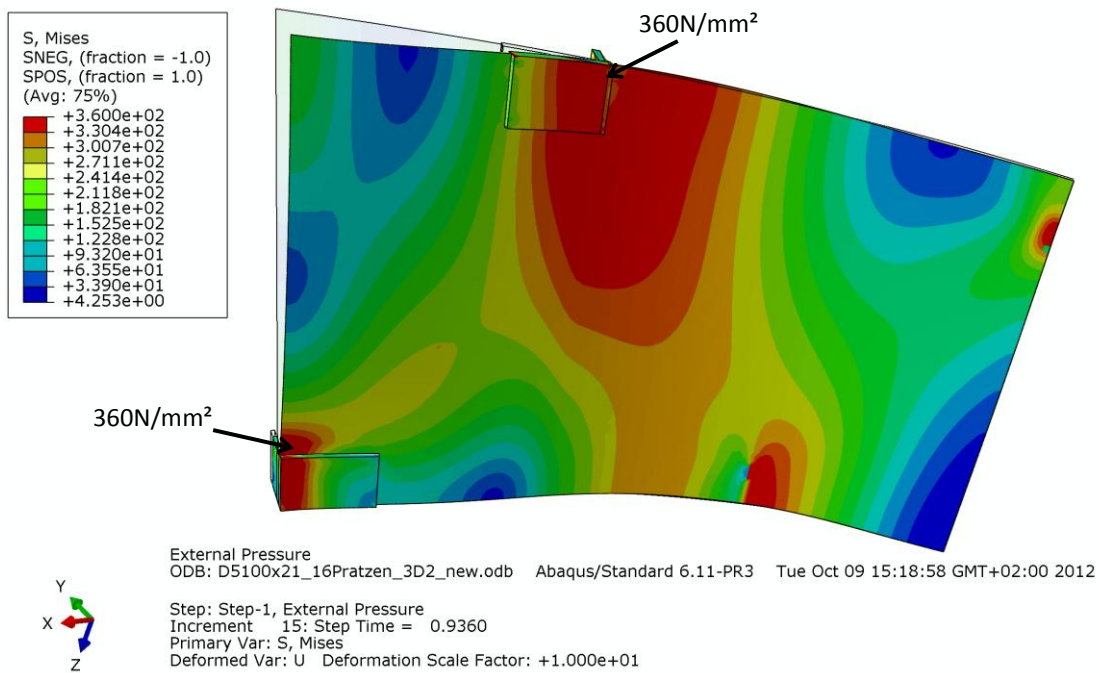


Abb. 64 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ohne Gebirgsstützung ($p_a = 16.53\text{bar}$) an der Rohrinneinnenseite.

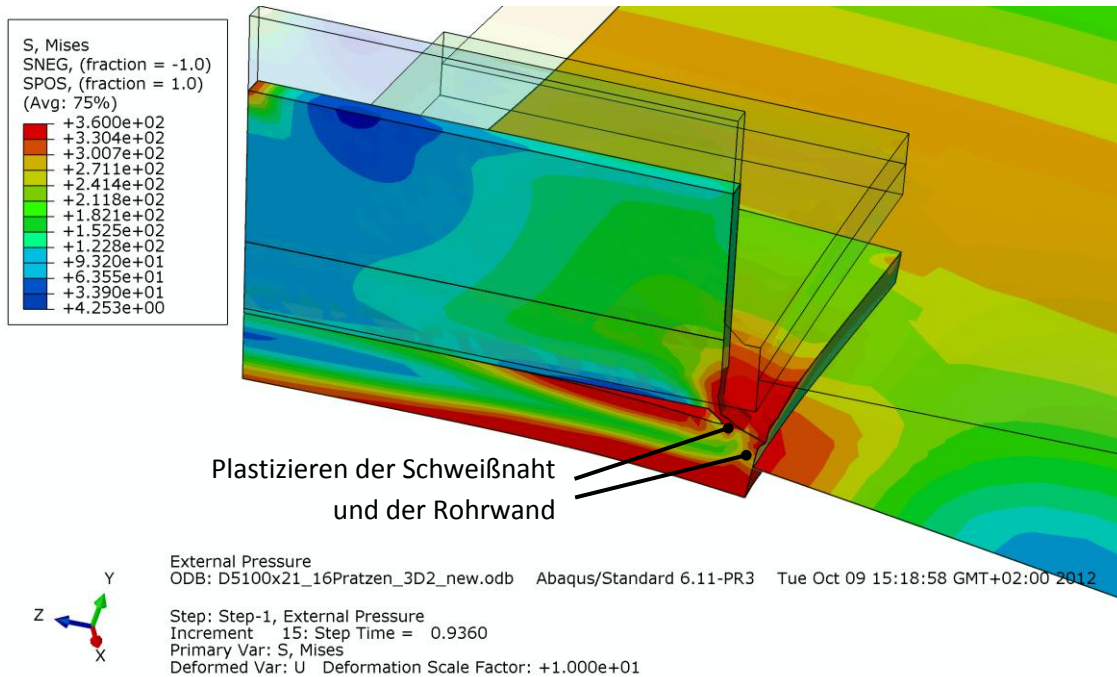


Abb. 65 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast ohne Gebirgsstützung ($p_a = 16.53\text{bar}$) – Detailansicht Prätze.

Abb. 66 zeigt das Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 16.53\text{bar}$. Für diesen Lastzustand ist der Traglastzustand des Systems ohne Berücksichtigung der Gebirgsstützung erreicht. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Abb. 62 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformungen zwischen den Prätzen in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 66 ist der modellierte Teilbereich insgesamt 8-mal dargestellt.

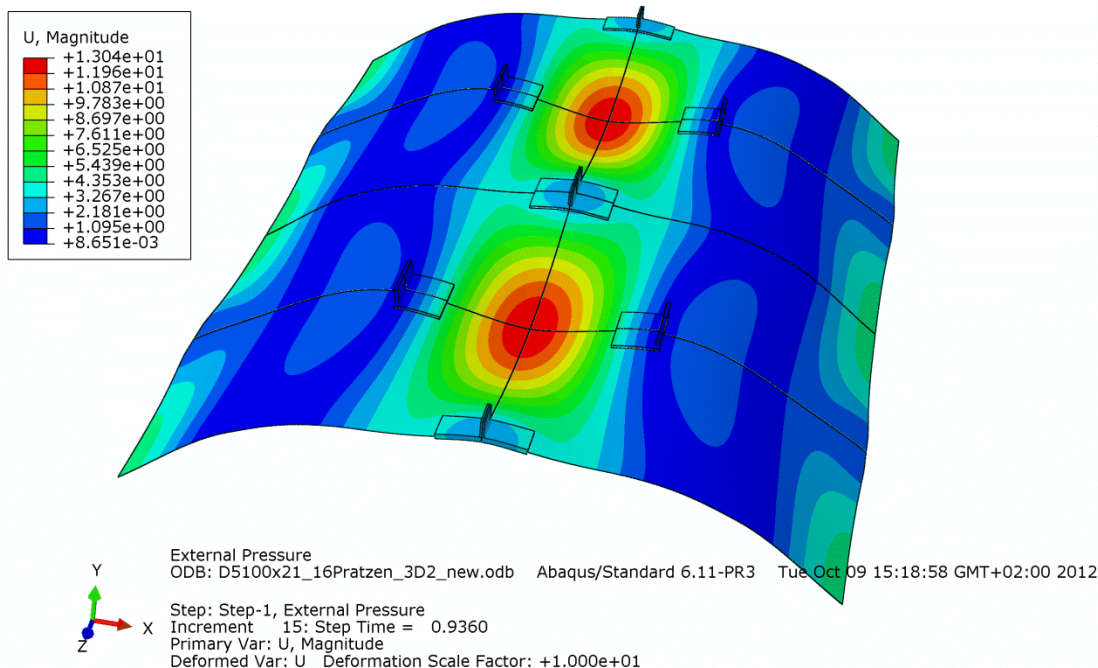


Abb. 66 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Traglast ohne Gebirgsstützung ($p_a = 16.53\text{bar}$).

3.2.3. Modell C3 (Schalen- und Volumenelemente, Gebirgsmitwirkung berücksichtigt)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Modell C3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 3.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 3.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen sowie der charakteristische Wert des Außendrucks zugrunde.

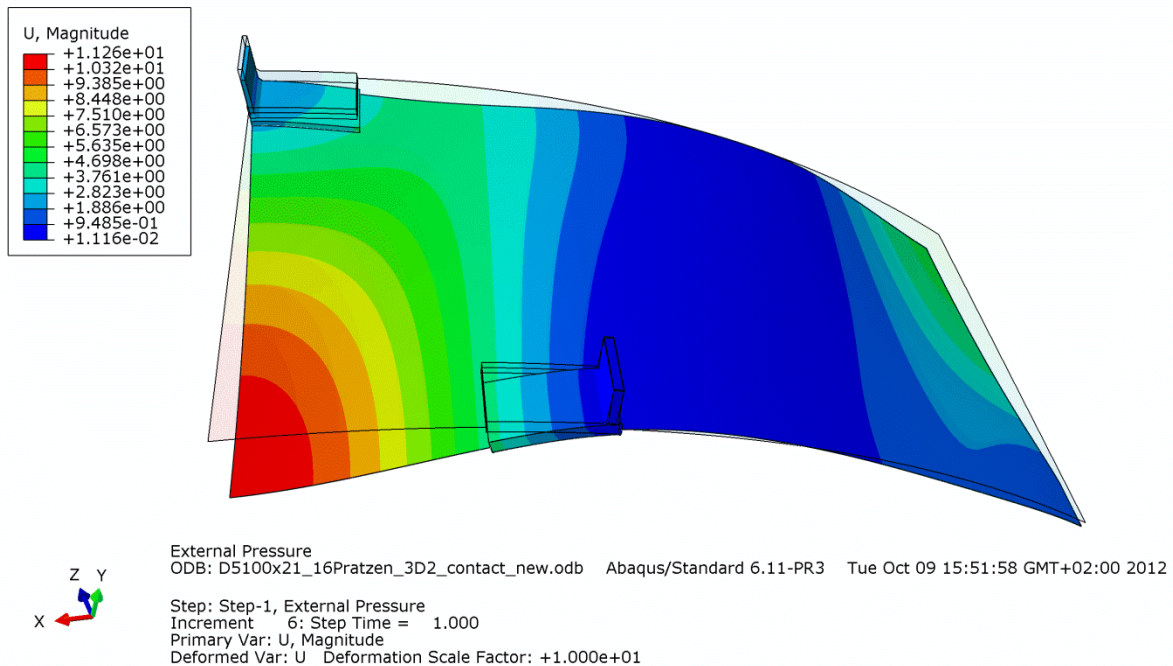


Abb. 67 Verformungen des Systems [mm] bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$).

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Pratzen (linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 67 deutlich zu erkennen. Unter einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 17.66\text{bar}$ stellt sich eine maximale Verformung von rund 11.3mm in Beulenmitte ein. Somit sind die hier auftretenden Verformungen in etwa 87% so groß wie für die Berechnung mit Modell C2 ohne Gebirgsmitwirkung (obwohl die Ergebnisse sich dort auf einen Außendruck von 94% des hier auftretenden Drucks beziehen). Die Reduktion der Verformungen um ca. 13% ist durch die mögliche Abstützung des Rohres gegen das Gebirge und eine dadurch bedingte Versteifung des Systems begründet.

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche im Rohr ($f_y = 360\text{N/mm}^2$) im Bereich der Beule (Rohraußenseite, Abb. 68) und unter den modellierten Pratzen (Rohrinnenseite, Abb. 69).

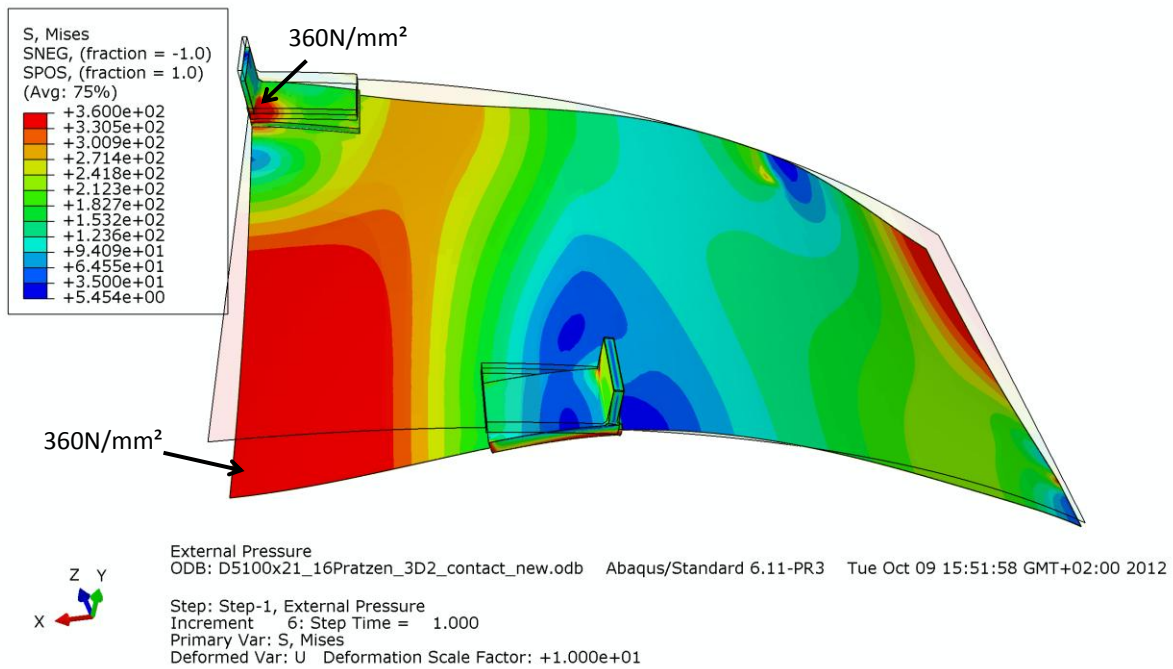


Abb. 68 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Rohraußenseite.

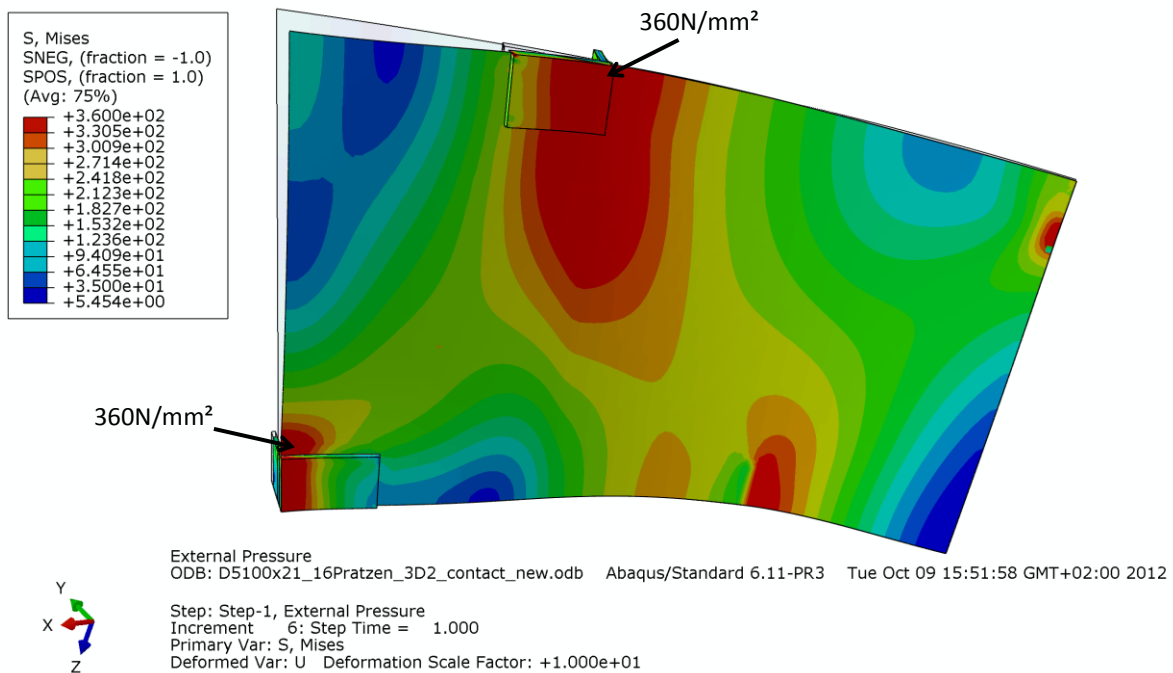
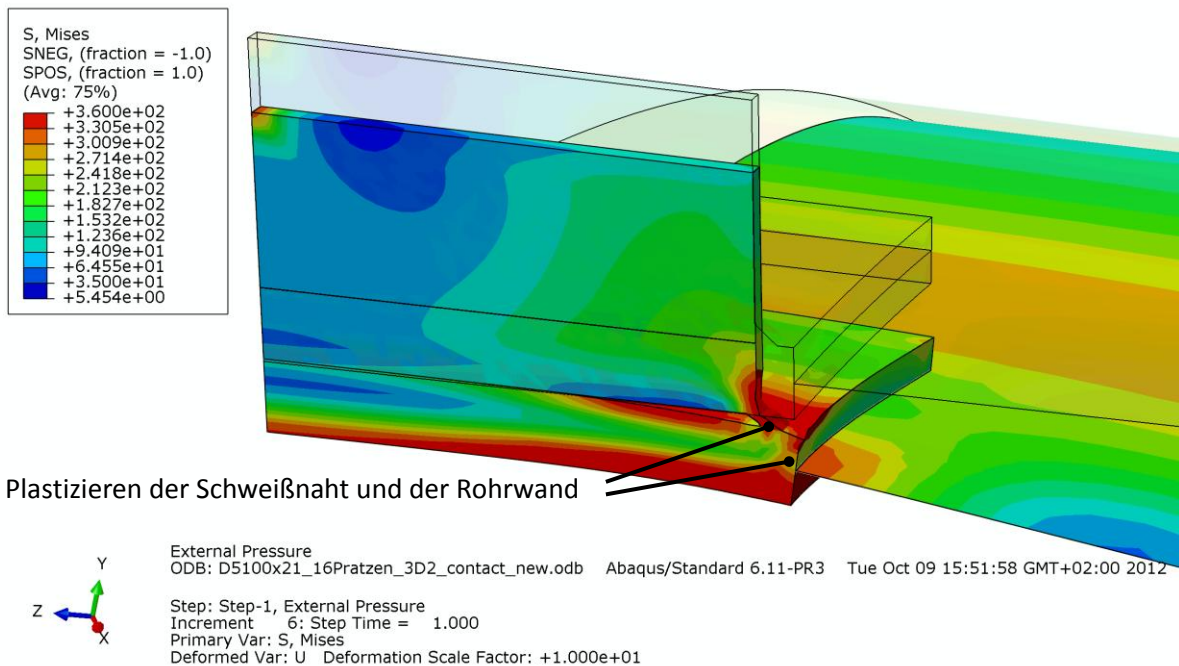


Abb. 69 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Rohrinneinnenseite.

Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 70) zeigt Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 355\text{N/mm}^2$) bei gleichzeitigem Durchplastizieren der Rohrwand ($f_y = 360\text{N/mm}^2$).

Die Ergebnisse geben einen deutlichen Hinweis darauf, dass die Traglast des Systems nahezu erreicht ist.



Plastizieren der Schweißnaht und der Rohrwand

Abb. 70 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$) – Detailansicht.

Abb. 71 zeigt das Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei einem Gebirgswasserdruck von $p_a = 17.66\text{bar}$. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Abb. 67 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformung zwischen den Pratzen in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 71 ist der modellierte Teilbereich insgesamt 8-mal dargestellt.

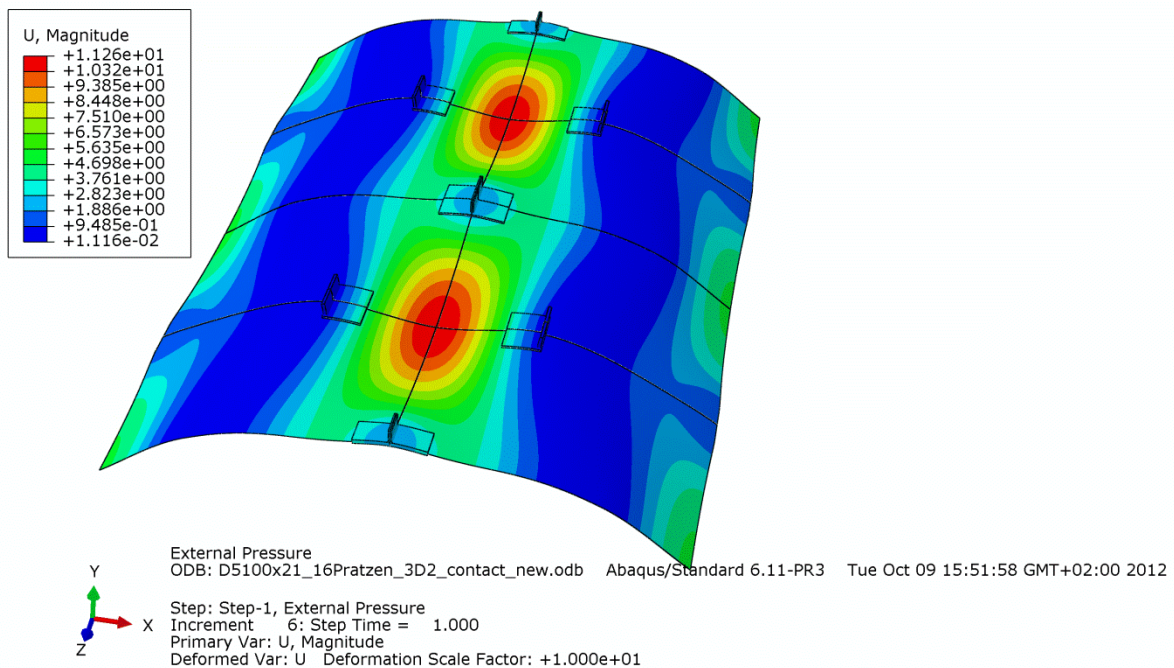


Abb. 71 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$).

Die in Abb. 72 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.45N/mm^2 auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

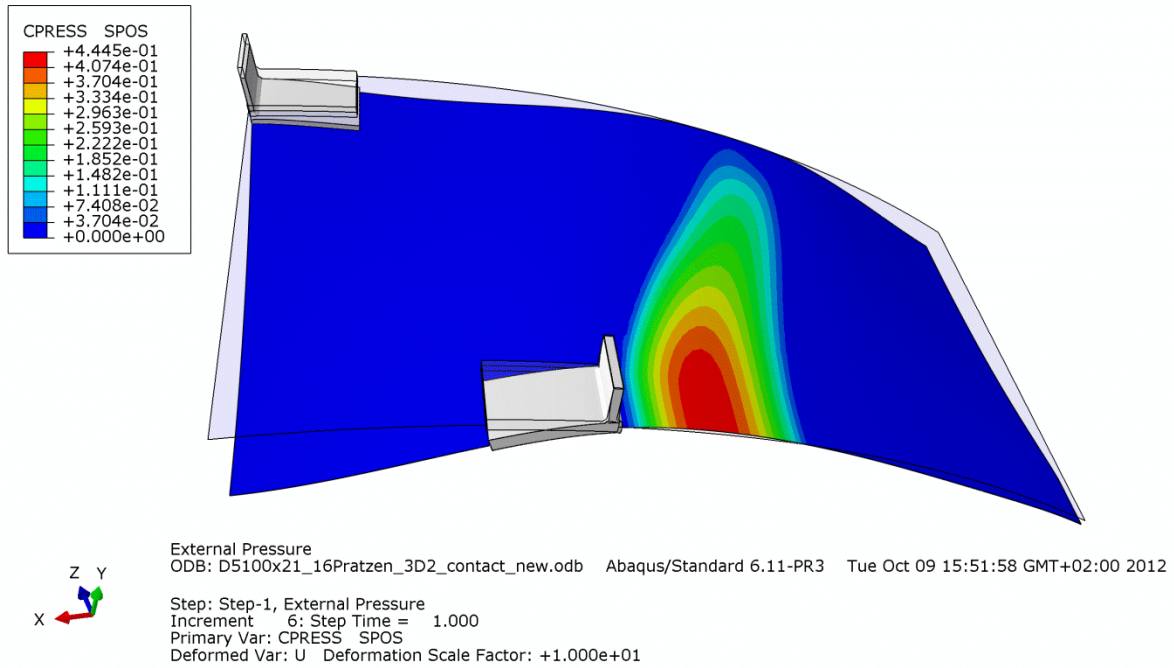


Abb. 72 Kontaktpressung $[\text{N/mm}^2]$ bei Bemessungslast mit Gebirgsstützung ($p_a = 17.66\text{bar}$).

3.2.4. Traglastberechnung mit Modell C3, (LPF=1.01)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Traglastberechnungen mit Modell C3 dargestellt. Das Modell besteht aus Schalen- und Volumenelementen. Die Gebirgsmitwirkung ist hier durch eine Kontaktbedingung berücksichtigt, siehe Abschnitt 3.1.4. Für weitere Details zur Modellierung siehe Abschnitt 3.1.3.

Den Berechnungen liegen die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten geometrischen Imperfektionen zugrunde. Der maximal zulässige Außendruck (ohne Sicherheitsbeiwerte) – als Ergebnis der Traglastberechnung, die einen Laststeigerungsfaktor von LPF = 1,01 ergab – beträgt $p_{a,max} = 17,86$ bar.

Die Verformungsfigur „rautenförmige Beule“ zwischen den Prätzen (linkes unteres Eck des Modellausschnitts) ist in Abb. 73 deutlich zu erkennen. Unter der Traglast von $p_{a,max} = 17,86$ bar stellt sich eine maximale Verformung von rund 13,3 mm in Beulenmitte ein. Bei weiterem Anstieg des Außendrucks würden diese Verformungen überproportional zunehmen und zu einem Versagen des Systems führen.

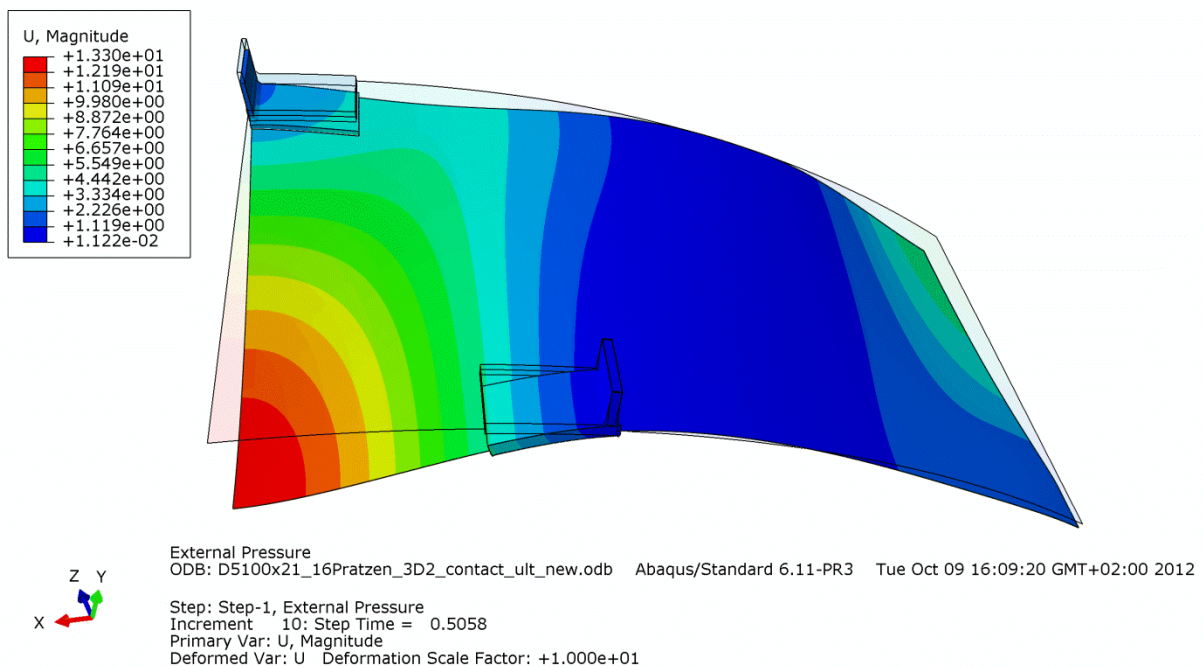


Abb. 73 Verformungen des Systems [mm] bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17,86$ bar).

Die Darstellungen der Vergleichsspannungen zeigen große plastizierte Bereiche im Rohr ($f_y = 360$ N/mm²) im Bereich der Beule bzw. des kritischen Prätzen-Anschlusses (Rohraußenseite, Abb. 74) und unter den modellierten Prätzen (Rohrinnenseite, Abb. 75).

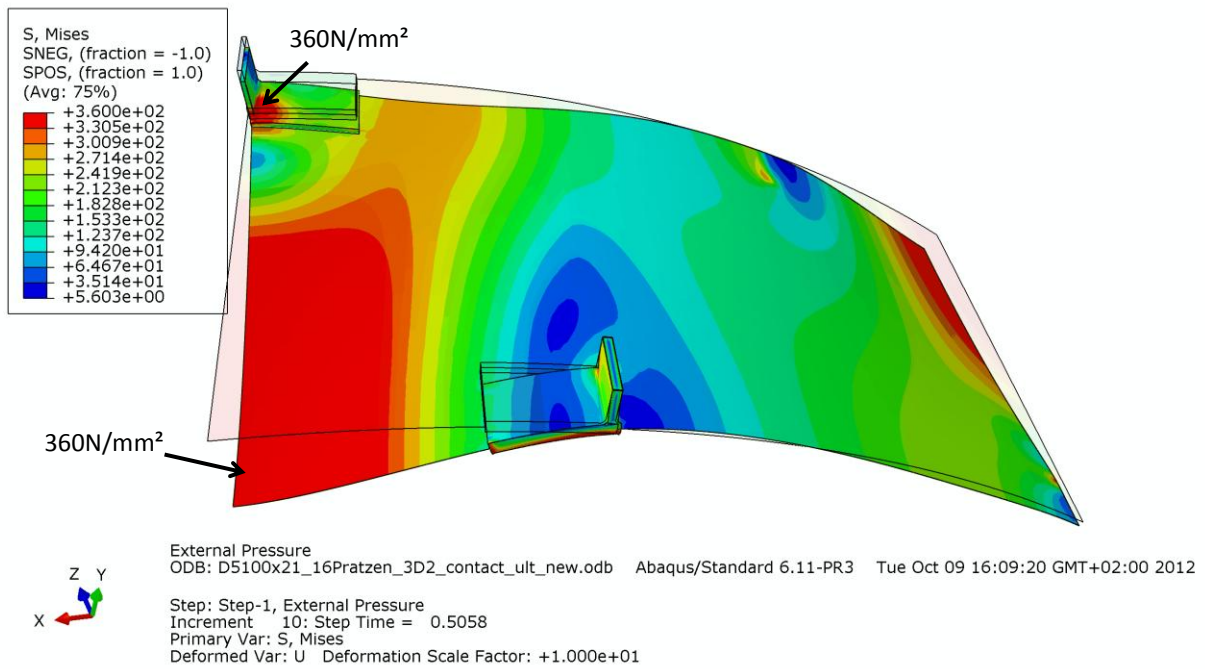


Abb. 74 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17.86\text{bar}$), Rohraußenseite.

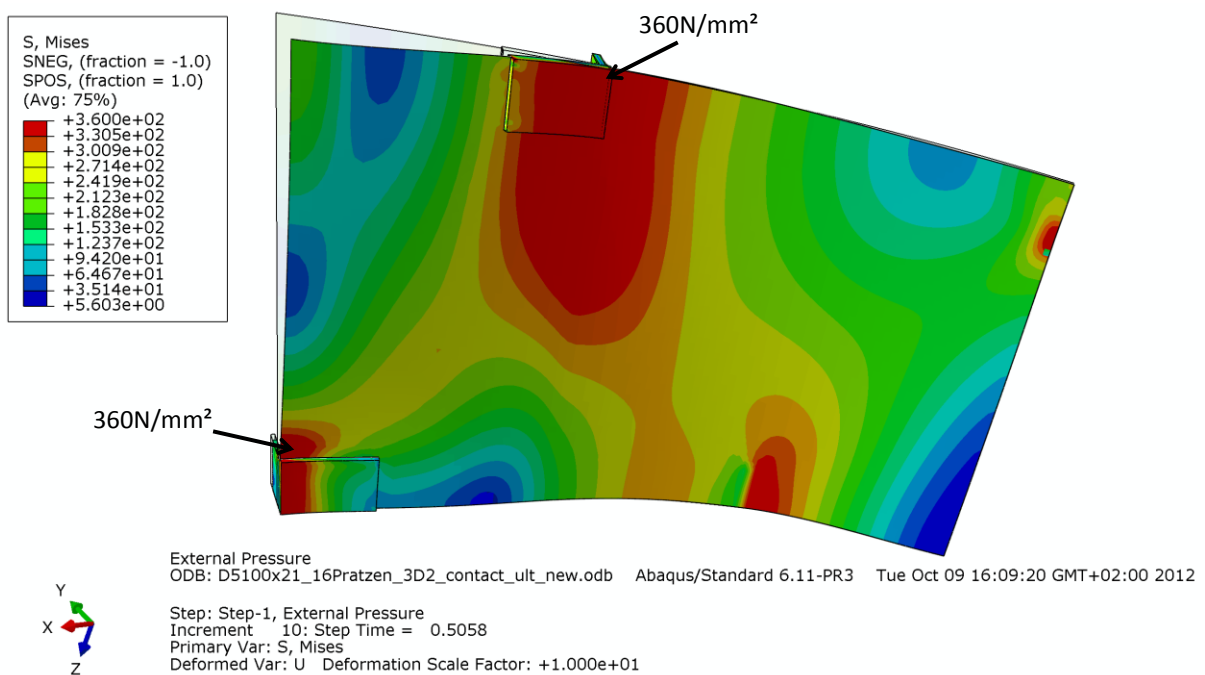
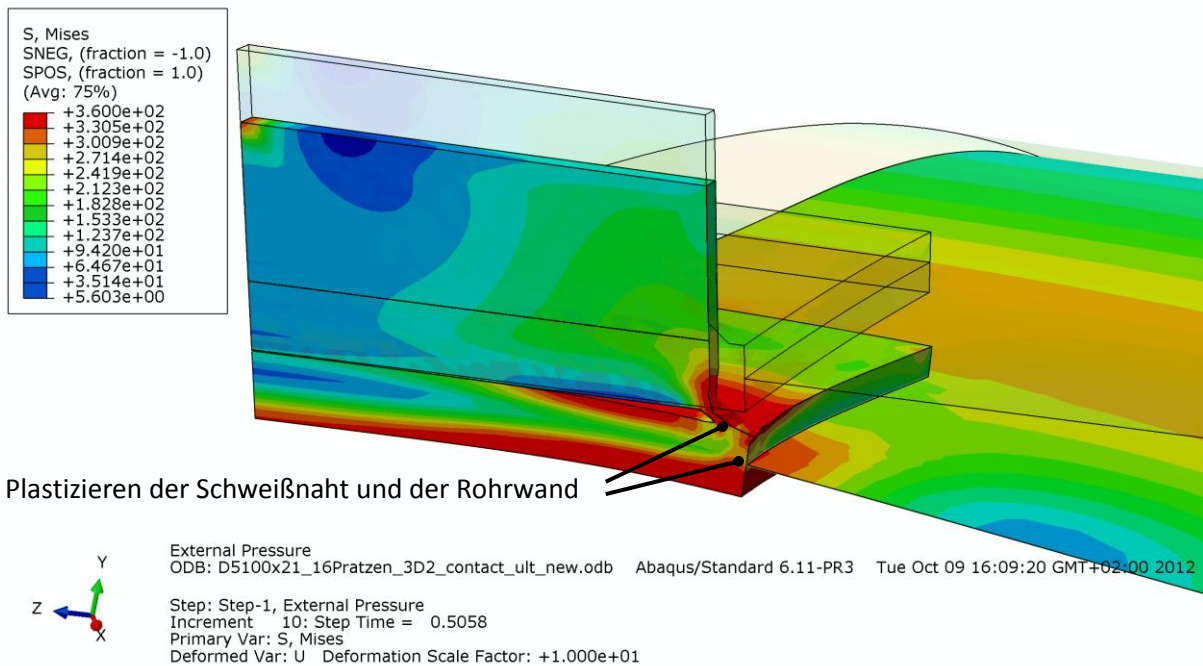


Abb. 75 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17.86\text{bar}$) an der Rohrinenseite.

Die Detailansicht der Vergleichsspannungen im kritischen Prätzen-Anschlusspunkt (Abb. 76) zeigt Plastizieren der Schweißnaht ($f_y = 355\text{N/mm}^2$) bei gleichzeitigem Durchplastizieren der Rohrwand ($f_y = 360\text{N/mm}^2$), was die Traglast mit $p_{a,max} = 17.86\text{bar}$ begrenzt.



Plastizieren der Schweißnaht und der Rohrwand

Abb. 76 Vergleichsspannung [N/mm²] bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17.86\text{bar}$) – Detailansicht Prätze.

Abb. 77 zeigt das Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei einem Gebirgswasserdruck von $p_{a,max} = 17.86\text{bar}$. Für diesen Lastzustand ist der Traglastzustand des Systems erreicht. Durch graphische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Abb. 73 des modellierten Teilbereiches (Spiegelung an zwei Ebenen und Kopieren in Längsrichtung) ist es möglich, die Verformung zwischen den Prätzen in einer sehr anschaulichen Weise darzustellen. In der Abb. 77 ist der modellierte Teilbereich insgesamt 8-mal dargestellt.

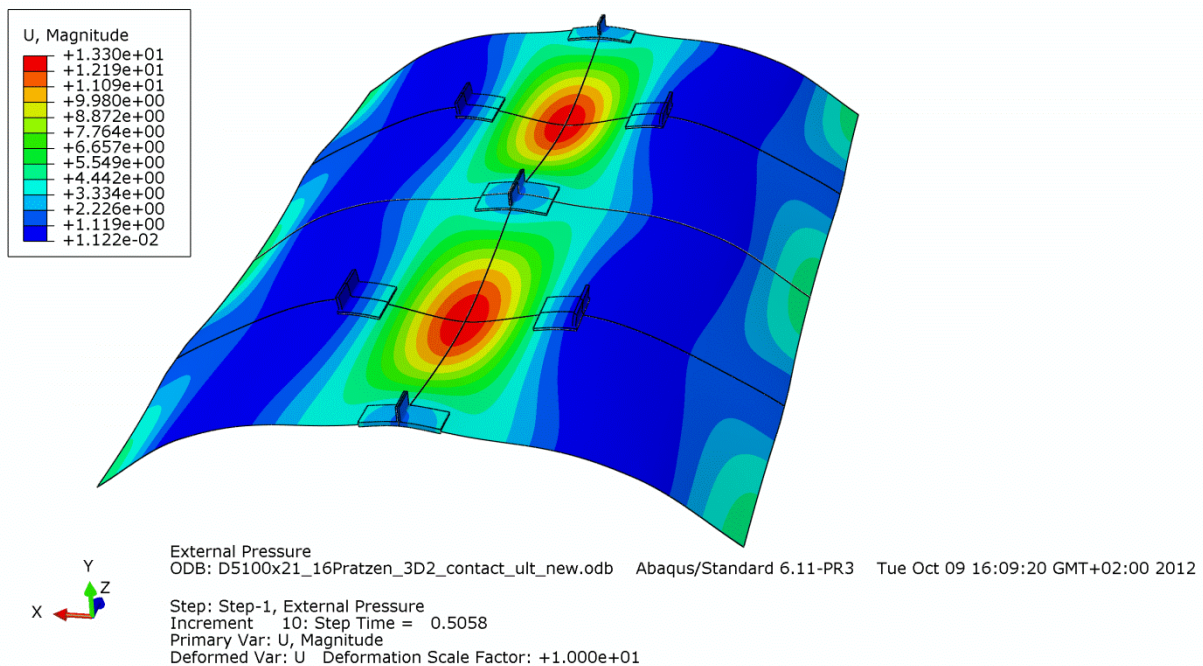


Abb. 77 Verformungsmuster „Rautenbeulen“ bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17.86\text{bar}$).

Die in Abb. 78 dargestellten Kontaktpressungen weisen einen maximalen Druck von 0.51N/mm² auf. Dieser vergleichsweise geringe Druck reicht aus, um die Steifigkeit des Systems deutlich zu erhöhen.

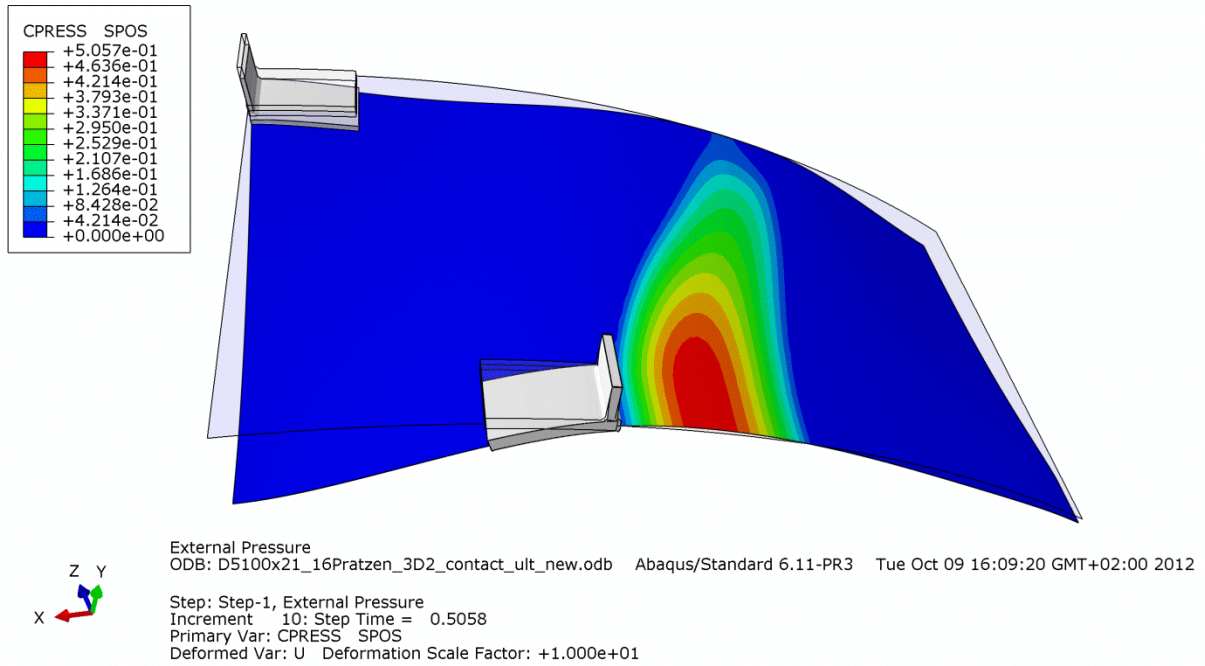


Abb. 78 Kontaktpressung [N/mm²] bei Traglast mit Gebirgsstützung ($p_{a,max} = 17.86\text{bar}$).