

# Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter unsymmetrischen Bettungsbedingungen



D-5-33-2011

**Stering Wilfried**  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz

# Masterarbeit

*Thema*

## Tragverhalten von Druckschichtpanzerungen unter unsymmetrischen Bettungsbedingungen

*verfasst von*

Wilfried STERING

*eingereicht am*

Institut für Stahlbau

Technische Universität Graz

*Betreuer:*

Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard GREINER

*mitbetreuender Assistent:*

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas LECHNER

Graz, November 2011



Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)



## DANKSAGUNG

Die erfolgreiche Erstellung meiner Masterarbeit mit dem Titel „*Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter unsymmetrischen Bettungsbedingungen*“ und der damit verbundene Abschluss des Bauingenieurstudiums wurden am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Graz abgehandelt. Die ersten Zeilen dieser Arbeit möchte ich nutzen, mich bei all jenen Personen zu bedanken, die Anteil am Gelingen dieser Masterarbeit hatten.

Hier gilt mein Dank meinem Betreuer, Herrn Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Richard Greiner, der mir den Zugang zu dieser Thematik schmackhaft machte und mir als Institutsvorstand die Möglichkeit geboten hat, diese Arbeit unter Bereitstellung der Institutsräumlichkeiten durchführen zu können. Ganz besonderen Dank möchte ich auch meinem betreuenden Assistenten, Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Lechner, aussprechen. In angenehmer Gesprächsatmosphäre hatte er stets ein Ohr für offene Fragen und seine engagierte Hilfsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung trugen wesentlich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit bei. Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Institutes bedanken, die es zu dem machen was es ist und die für das angenehme Arbeitsklima sorgen.

Einen nicht minder wertvollen Beitrag zum Erfolg einer Arbeit oder einem Vorhaben im Allgemeinen leisten die Leute, die sich in schwierigen Situationen als große Stütze erweisen.

Ich möchte meiner Familie, vor allem meinen Eltern, größten Dank bekunden. Danke für den enormen Rückhalt und das Vertrauen, das Ihr mir während meiner gesamten Ausbildungszeit geschenkt und mir damit das Studium überhaupt ermöglicht habt.

Auch meinen Freunden und Bekannten möchte ich dafür danken, dass sie in so manchen schwierigen Stunden für mich da waren und meine Studienzeit zu einem meiner bisher schönsten Lebensabschnitte machten. Dazu zählen meine Kollegen des Stahlbauzeichensaals, mit denen ich eine schöne gemeinsame Zeit verbrachte.

Einen herzlichen Dank richte ich zuletzt an meinen Freund Alexander, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand, und natürlich an meinen Freund Oliver, mit dem ich zusammen in unglaublicher Teamarbeit und wertvoller gegenseitiger Ergänzung das gesamte Studium absolvierte.



## KURZFASSUNG

**Titel:** „Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter unsymmetrischen Bettungsbedingungen“

Druckschachtpanzerungen als wesentlicher konstruktiver Teil von Hochdruck-Wasserkraftwerken haben heutzutage, im Zeitalter von großem Energiebedarf und dem gleichzeitigen Drang nach erneuerbaren „grünen“ Energiequellen, große Bedeutung erlangt. Bei der Bemessung von Druckschachtpanzerungen aus Stahl sind in der Praxis bisher analytische Berechnungsverfahren unter großer Modellabstraktion, Vereinfachung und Linearisierung der Verbundtragwirkung von Panzerung und dem umgebenden Beton- /Gebirgsmantel im Einsatz. Das eigentliche Tragverhalten erweist sich in Realität jedoch als weitaus komplexer, wenn von radialsymmetrischen Bettungsbedingungen abgewichen wird. Die folgenden Untersuchungen sollen dazu dienen, die Auswirkung dieser Effekte zu erfassen.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter Innendruck. Es erfolgt zunächst eine Darstellung der derzeit angewandten Berechnungsmethoden und deren Sicherheitskriterien. Ein Hauptaugenmerk steckt in der Entwicklung geeigneter numerischer Finite Elemente Modelle zur Berechnung komplexer Bettungsszenarien unter Berücksichtigung des Effektes der Reibung zwischen Panzerung und Beton- /Gebirgsumhüllung. In Form ingenieurmäßig entwickelter Bettungsmodelle werden mögliche Bettungsszenarien mit stetig veränderlichem Bettungsverlauf sowie mit lokalen Störzonen abgebildet. Anhand dieser Bettungsmodelle werden elastische Untersuchungen (numerisch) durchgeführt und es folgt ein direkter Vergleich zu den analytischen Berechnungsverfahren im Zuge einer Parameterstudie. Dabei werden die zufolge Biegeverformungen auftretenden Sekundäreffekte näher untersucht. In einer weiteren Parameterstudie werden plastische Untersuchungen zum Grenztragverhalten der Stahlpanzerung mit realitätsnäheren unsymmetrischen Bettungsbedingungen durchgeführt.

**Schlagwörter:** Druckstollen, Druckschachtpanzerung, Gebirge, Tragverhalten, Rohrleitung, Verbundwirkung, unsymmetrische Bettung, FE-Modellierung



## ABSTRACT

**Title:** *“Load-carrying behavior of steel penstocks under asymmetrical bedding conditions“*

Nowadays, in the ages of great energy demand and the simultaneous ambition of sustainable (so called “green”) energy, penstocks, as an integral structural component of hydro power plants, have obtained great relevance. In the design of penstocks, it is currently common practice to use analytical arithmetic techniques. These require certain restrictions such as significant abstraction of the design model, linearization and simplification in the composite behavior of the shielding and the surrounding rock. If the bedding conditions differ from rotationally symmetric distribution, the actual bearing capacity proves itself to be more complex in reality. The following researches shall investigate and capture the impact of these effects.

This master thesis concerns with the load-carrying capacity of steel-lined penstocks (pressure shafts) under internal pressure. Initially it starts with an illustration of the common methods of calculation and the safety criteria currently in use. An essential part is the development of suitable numerical finite element models for the calculation of complex bedding scenarios including the effect of friction between the steel lining and the surrounding concrete/rock. According to engineering practice, bedding conditions are simulated through bedding models with continuous variable bedding behavior as well as a local fault zone. With the use of these bedding models, elastic investigations (numerical) are performed in a parametric study that provides a direct comparison with the analytical formulae. Secondary effects, resulting from bending deformation, are investigated. Furthermore, another parametric study deals with the elasto-plastic behavior of the shielding under realistic asymmetric bedding conditions. It provides information on the plastic limit and ultimate bearing capacity of penstocks.

**Key words:** Penstock, pressure shaft, shielding, hydro power plant, rock, composite load-carrying capacity, steel piping, asymmetrical bedding, finite element modeling



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Aufgabenstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Einleitung Druckschachtpanzerungen .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Berechnungsmethoden .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Allgemeines.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Analytische Berechnungsverfahren .....</b>	<b>15</b>
3.2.1 Voraussetzung für die Anwendbarkeit analytischer Verfahren.....	17
3.2.2 Vorzeichenfestlegung für Druckstollenstatik.....	18
3.2.3 Das mathematische Modell.....	18
3.2.4 Der Initialspalt – Berechnung .....	22
3.2.5 Berechnungsbeispiele.....	24
3.2.6 Graphisches Bemessungsverfahren nach Seeber [1].....	29
<b>3.3 Numerische Berechnungsverfahren.....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Allgemeines.....	30
3.3.2 Berechnungskonzepte .....	31
3.3.3 Die FE-Modelle .....	33
<b>3.4 Verifikation der analyt. Berechnung zur FE-Simulation .....</b>	<b>41</b>

3.4.1	Eingangsparameter .....	41
3.4.2	Vergleich analyt. Berechnung mit Federmodell bei konstanter Bettung und LGEOM .....	41
3.4.3	Vergleich analyt. Berechnung mit Federmodell bei konstanter Bettung und NLGEOM.....	42
3.4.4	Vergleich analyt. Berechnung mit Kontaktmodell bei konstanter Bettung, Reibung $\mu = 0$ und LGEOM .....	42
3.4.5	Vergleich analyt. Berechnung mit Kontaktmodell bei konstanter Bettung, Reibung $\mu = 0$ und NLGEOM.....	43
3.4.6	Ergebnisvergleich.....	43
<b>4.</b>	<b>Variable Bettungsverläufe.....</b>	<b>45</b>
4.1	Linearer Verlauf (ungleichmäßiger Verlauf) .....	46
4.2	Lokaler Sprung (Störstelle).....	47
<b>5.</b>	<b>Bemessungskriterien .....</b>	<b>49</b>
5.1	Kriterium 1: Bemessung mit Gebirgswirkung (Seeber).....	49
5.2	Kriterium 2: freitragende Bemessung .....	49
5.3	Abgrenzungsdiagramme Seeber/freitragend.....	50
5.3.1	Herleitung der reinen Abhängigkeit von $V_F^*$ und $R_m/t$ .....	51
5.3.2	Abgrenzungsdiagramme .....	52
5.3.3	Erläuterung der Diagramme im Detail .....	54
5.3.4	Leitfaden zur Anwendung der Diagramme .....	55
5.3.5	Eingangsparameter der Diagramme .....	59
5.3.6	Abgrenzungsdiagramme .....	60
<b>6.</b>	<b>Parameterstudie ELASTISCH.....</b>	<b>67</b>
6.1	Erläuterung der numerischen Berechnungen .....	67
6.1.1	Berechnungsmodelle.....	67

6.1.2	Sekundärspannungen .....	69
6.1.3	Reibung.....	69
<b>6.2</b>	<b>Auswertung der FE-Berechnungen .....</b>	<b>70</b>
6.2.1	Spannungsdiagramme .....	70
6.2.2	Verschiebungsdiagramme.....	71
6.2.3	Ergebnisvergleich.....	72
<b>6.3</b>	<b>Dateiensystem.....</b>	<b>74</b>
<b>6.4</b>	<b>Detailauswertung Bettungsfall: linearer Verlauf .....</b>	<b>75</b>
6.4.1	KM_S550_D3600_t45_S4_EL_EF_NLGEOM_uR03_P1129_VF2500_Linear_10zu1_ mue00.....	76
6.4.2	KM_S550_D3600_t45_S4_EL_EF_NLGEOM_uR03_P1129_VF2500_Linear_10zu1_ mue03.....	81
6.4.3	KM_S550_D3600_t45_S4_EL_EF_NLGEOM_uR03_P1129_VF2500_Linear_10zu1_ mue06.....	85
<b>6.5</b>	<b>Detailauswertung: lokaler Sprung .....</b>	<b>89</b>
6.5.1	Fall: Spannungsspitze an Rohrinneenseite ( $\sigma_{11\_bottom\_max}$ ).....	90
6.5.2	Fall: Spannungsspitze an Rohraußenseite ( $\sigma_{11\_top\_max}$ ).....	101
6.5.3	Glättungseffekt - Vergleich NLGEOM zu LGEOM.....	111
<b>6.6</b>	<b>Parameterstudie linearer Verlauf .....</b>	<b>114</b>
6.6.1	Auswertungspunkte im Abgrenzungsdiagramm.....	114
6.6.2	Ergebnisdiagrammerläuterung Fall: linearer Verlauf.....	115
6.6.3	Ergebnisse Parameterstudie linearer Verlauf.....	117
6.6.4	Ergebnisinterpretation linearer Verlauf.....	122
<b>6.7</b>	<b>Parameterstudie lokaler Sprung .....</b>	<b>123</b>
6.7.1	Auswertungspunkte im Abgrenzungsdiagramm.....	123

6.7.2	Ergebnisdiagrammläuterung Fall: lokaler Sprung .....	124
6.7.3	Ergebnisse Parameterstudie lokaler Sprung .....	125
6.7.4	Ergebnisinterpretation lokaler Sprung .....	129
<b>7.</b>	<b>Parameterstudie PLASTISCH.....</b>	<b>131</b>
<b>7.1</b>	<b>Allgemein .....</b>	<b>131</b>
7.1.1	Plastische Berechnungsweise.....	133
<b>7.2</b>	<b>Modellverifikation, plastische Berechnung.....</b>	<b>134</b>
7.2.1	Untersuchungen mit konstanter Bettung .....	134
7.2.2	Fall: Konstante Bettung, lokale Materialstörung, ideale Plastizierung .....	137
7.2.3	Fall: Konstante Bettung, lokale Materialstörung mit Verfestigung .....	150
<b>7.3</b>	<b>Bettungsfall: Linearer Verlauf.....</b>	<b>157</b>
7.3.1	Detailauswertung Bettungsfall: Linearer Verlauf.....	157
7.3.2	Parameterstudie Bettungsfall: Linearer Verlauf .....	167
<b>7.4</b>	<b>Bettungsfall: lokaler Sprung.....</b>	<b>206</b>
7.4.1	Detailauswertung Bettungsfall: lokaler Sprung .....	206
7.4.2	Parameterstudie Bettungsfall: lokaler Sprung .....	216
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>255</b>
<b>8.1</b>	<b>Themenstellung der Arbeit .....</b>	<b>255</b>
<b>8.2</b>	<b>Elastische Berechnung .....</b>	<b>256</b>
8.2.1	Bettungsszenario: linearer Verlauf von $V_F^*_{min}$ auf $V_F^*_{max}$ .....	257
8.2.2	Bettungsszenario: lokaler Sprung von $V_F^*_{max}$ auf $V_F^*_{min}$ .....	258
<b>8.3</b>	<b>Plastische Berechnung .....</b>	<b>259</b>
<b>8.4</b>	<b>Veranschaulichung der Ergebnisse.....</b>	<b>260</b>

8.4.1	Allgemeines zu den Diagrammen .....	261
8.4.2	Bettungsfall linearer Verlauf .....	264
8.4.3	Bettungsfall lokaler Sprung .....	266
<b>8.5</b>	<b>Relevanz der Ergebnisse für die stahlbauliche Bemessung .....</b>	<b>268</b>
<b>9.</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>273</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>275</b>
<b>11.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>277</b>



# 1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Panzerungen aus Stahl stellen im Druckstollenbau eine Auskleidung dar, die höchsten Innendrücken widerstehen kann und die bei entsprechender Ausführung und Dimensionierung sehr lange Betriebszeiten (>70 Jahre) unter geringem Wartungsaufwand gewährleistet. Die Ausführung von Druckschachtpanzerungen aus Stahl beansprucht einen erheblichen Kostenanteil im Bau von Pumpspeicherkraftwerksprojekten. Grund dafür ist, neben den hohen Stahlpreisen, der Herstellungsaufwand (meist vor Ort geschweißter) dickwandiger Rohrpanzerungen. Neben der Stahlpanzerung kommt auch der sie umhüllende Gebirgsmantel der Lastabtragung des Innendruckes zu Gute. Das letztendliche Ziel -aus wirtschaftlicher Sicht- für die Herstellung solcher Panzerungen ist es folglich, die Wandstärke der Stahlpanzerung zu reduzieren und somit den Stahlbedarf zu minimieren. Dies könnte durch eine möglichst gute (optimale) Ausnutzung der Gebirgsmitwirkung erreicht werden. Dafür sind jedoch Informationen über die globalen und lokalen Gebirgseigenschaften entlang des Druckschachtverlaufes sowie Erfahrungen über das Tragverhalten der Panzerung notwendig. Anders als bei Stahl ist das Felsverhalten nur sehr schwer richtig erfassbar und Felserkundungen lassen sich wegen des hohen Kostenaufwands nur lokal durchführen. Aufgrund dieser Situation versteht es sich von selbst, dass Anstrengungen unternommen werden müssen, Kenntnisse des Tragverhaltens solcher Panzerungen unter möglichst wirklichkeitsnahen Verhältnissen zu gewinnen. Die Auslegung der Wandstärke der Stahlpanzerung hängt nämlich direkt mit der Sicherheit der Beurteilung ihrer realen Beanspruchungen zusammen. Im vorliegenden Wechselspiel von Gebirgstragwirkung und Tragwirkung der Stahlpanzerung liegt ein Hauptgewicht natürlich auf der Erforschung des Gebirgsverhaltens, ein zweiter aber auf der Erforschung des Tragverhaltens der Panzerung. Auf den letzteren Aspekt ist die vorliegende Arbeit ausgerichtet.

Der Begriff der Sicherheitsphilosophie spielt in vielen Fällen (nationale Unterschiede) eine große Rolle und aufgrund der begrenzten Kenntnisse wird heutzutage eine eher konservative Herangehensweise auf Basis einfacher analytischer Berechnungsmethoden in der Praxis angewandt. Bei der Bemessung mit der sogenannten Berechnung nach Seeber [1] wird die panzerungsentspannende Gebirgsmitwirkung über die gesamte Umfangslänge mit dem ungünstigsten festgestellten Gebirgsverhalten radialsymmetrisch (konstant) in Rechnung gestellt. Diese stark idealisierten Gebirgseigenschaften entsprechen aber nicht der Wirklichkeit. Die inhomogenen, anisotropen Materialeigenschaften des Felsens äußern sich in teils stark unterschiedlichen Bettungsverhalten der Druckschachtpanzerung. Aufgrund der unsymmetrischen Bettungsbedingungen kommt es zu einem weit komplexeren Tragverhalten der Panzerung und zur Aktivierung von Sekundäreffekten. Bei diesen Bedingungen stoßen die analytischen Berechnungsmethoden an ihre Grenzen. Numerische Berechnungsmethoden, wie die Finite Elemente Methode, sind heutzutage sehr ausgebreitet und lassen viel tiefgründigere Untersuchungen dieser Thematik zu.

Daraus entsteht die Zielsetzung zu dieser Arbeit mit dem Titel „Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter unsymmetrischen Bettungsbedingungen“.

Gegenstand dieser Arbeit ist es mit Hilfe numerischer Methoden Neuland in diesem Gebiet zu betreten, einen Einblick in das weit komplexere Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen unter Berücksichtigung nicht radialsymmetrischer Bettungszustände und Störzonen (sowie materielle Störzonen der Panzerung) mittels genauer Berechnungsmethoden zu geben, diese mit den derzeit angewandten analytischen Berechnungsverfahren zu Vergleichen, um letztendlich auch eine Aussage über deren reale Beanspruchung treffen zu können. Ziel ist es, mittels vertiefter Kenntnisse verbesserte Grundlagen hinsichtlich Sicherheit und Materialeinsparung zu schaffen.

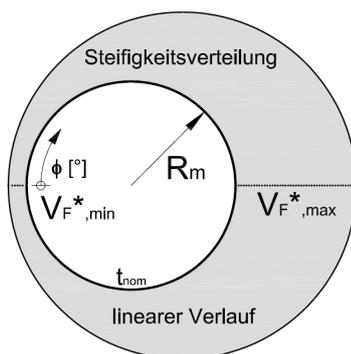
**Vorgehensweise:**

Nach kurzer Einführung in die Thematik und in die analytischen Berechnungsverfahren besteht die Aufgabe der Masterarbeit in der Entwicklung geeigneter FE-Modelle zur Berechnung der Druckschachtpanzerung mit variablen Bettungseigenschaften.

Nach Verifikation der Modelle mit den analytischen Methoden werden anhand von zwei ingenieurmäßig angenommenen Bettungsfällen Untersuchungen an Druckschachtpanzerungen durchgeführt.

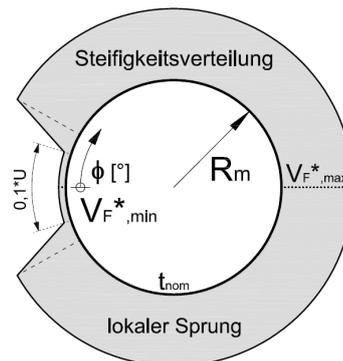
• Bettungsfall: ungleichförmiger Verlauf

(linearer Verlauf)



• Bettungsfall: Störstelle

(lokaler Sprung)



Diese und weitere Untersuchungen werden sowohl mit elastischer als auch mit plastischer Berechnung durchgeführt. Besonderer Gegenstand der Untersuchungen ist der Reibungseinfluss zwischen Stahlpanzerung und umgebender Betonumhüllung. Die rechnerische Erfassung stellt einerseits eine schwierige mechanische Aufgabe dar, andererseits zeigt sich aber ihr wesentlicher Einfluss auf das Tragverhalten der realen Struktur.

In einer elastischen Parameterstudie wird neben der detaillierten Auswertung ein direkter Vergleich zu den vereinfachten analytischen Bemessungsverfahren vorgenommen. Die anschließenden plastischen Untersuchungen mit Parameterstudie geben Aufschluss über die eigentliche Grenztragfähigkeit bzw. Tragreserven einer Druckschachtpanzerung.

Die Ergebnisse werden in Form von Einzeldarstellungen (Diagramme, FE-Konturbilder, Tabellen) und einem Ergebnisvergleich für elastisches und plastisches Verhalten dargestellt.

Ein Anhang stellt unter anderem die Ergebnisse im Einzelnen zur vertiefenden Studie bereit.



## 2. Einleitung Druckschachtpanzerungen

Der Inhalt dieses Kapitels bezieht sich unter anderem auf Informationen der Literaturquellen [1], [2], [3], [4].

Ein Tunnel oder Schacht bzw. Stollen stellt bis zu seiner baulichen Fertigstellung und Inbetriebnahme eine sehr komplexe Ingenieurleistung dar. Er und das ihn umgebene Gebirge durchlaufen eine Reihe von unterschiedlichen Bau- und Belastungsphasen. Es sind dies -angefangen beim natürlichen Primärspannungszustand im Gebirge- der sich einstellende Sekundärspannungszustand nach Ausbruch des Stollens, die temporäre Stützung während der Bauphasen oder einer permanenten Auskleidung sowie der Spannungszustand des Berg-, Sicker- bzw. Kluftwasserdruckes, um die wichtigsten zu nennen. Anders als klassische Tunnelbauwerke wie z.B. Verkehrstunnel im Betrieb, welche meist keine zusätzliche Belastung außer der Abtragung der Gebirgsspannung an der Tunnellaubung (Primär-/Sekundärspannung) und eventuell des Bergwasserdruckes erleiden, haben Druckstollen und Druckschächte von Wasserkraftanlagen aber auch noch eine ganz andere entscheidende Art der Belastung im Betrieb zu widerstehen, nämlich dem hydraulischem Innendruck des Triebwasserweges. Demzufolge werden sie in den hochbeanspruchten Bereichen durch Stahlpanzerungen ausgekleidet.

Das Anwendungsgebiet der Druckschachtpanzerungen erfolgt dabei heute größtenteils in Bauprojekten von Hochdruck-Wasserkraftanlagen wie Pumpspeicherkraftwerken, die zurzeit eine besondere Bedeutung erlangt haben. Sie kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn die geographischen Gegebenheiten keine überirdische Druckrohrleitungsverlegung zulassen und dem Fels aufgrund der hohen Innendrucke nicht ausreichend Tragfähigkeit zugetraut werden kann. Abbildung 1 zeigt den schemenhaften Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes.

## Pumpspeicherkraftwerk – Schema

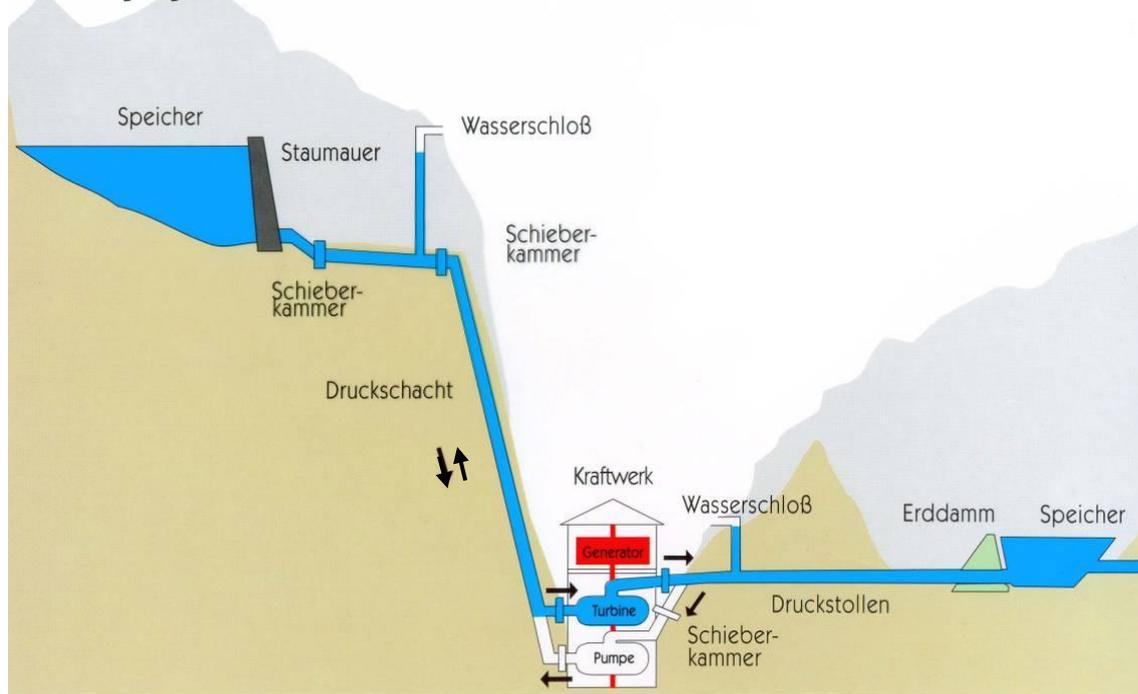


Abbildung 1: Schema Pumpspeicherkraftwerk [9]

Eine wirklichkeitsnahe Druckschachtbemessung hat nun alle diese resultierenden Spannungszustände zu berücksichtigen. Dabei muss jeder einzelne Spannungszustand richtig erfasst und überlagert werden.

Je nach Gebirgsverhältnissen und Ausbruchart benötigen Druckschächte meist zusätzliche Auskleidungen, um einerseits die Triebwasserverluste zu reduzieren und die hydraulischen Druckverluste aufgrund der Rauigkeit der Stollenwandung herabzusetzen und andererseits die Standsicherheit bzw. Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, um somit die Betriebssicherheit des Druckstollens über seine gesamte Lebensdauer zu gewährleisten. Je nach Anforderung können diese Auskleidungen in unterschiedlichen Formen ausfallen. Während in Druckstollen neben dem reinen Ausbruchquerschnitt meist eine Spritzbetonauskleidung oder (vorgespannte) Betonauskleidung mit ev. Dichtungshaut ausreichen, ist bei Druckschächten aufgrund der hohen Wasserdrücke durch Fallhöhe und Druckstoß eine stabilere Dichthaut aus Stahl erforderlich. Diese Panzerung erfüllt neben der hundertprozentigen Abdichtung gegen Triebwasseraustritt die zusätzliche Aufgabe der Teils gänzlichen Lastabtragung zur Aufnahme des Innendrucks. In Abbildung 2 sind mögliche Auskleidungsarten skizziert.

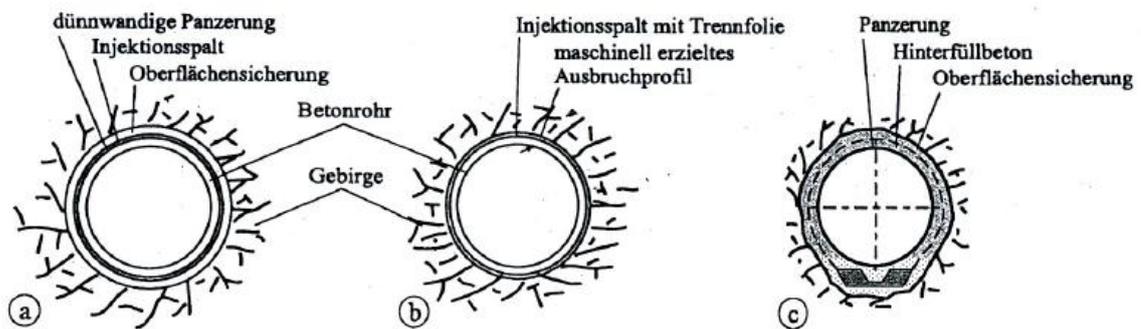


Abbildung 2: Stollenauskleidungsarten; a) Dünnwandige Stollenpanzerung; b) Spaltinjektion mit Dichtungsfolie; c) stahlgepanzelter Druckstollen [4]

Die Ausführung eines stahlgepanzerten Druckschachtes erfolgt in der Art und Weise, dass nach dem Stollenausbruch die Stahlpanzerung in den Ausbruchquerschnitt eingebracht und anschließend hinterbetoniert wird. Durch das Auffüllen des restlichen Ausbruchsspalt (Hohlraumes) entsteht somit ein kraftschlüssiges Verbundsystem aus Stahlpanzerung, Hinterfüllbeton und dem anschließenden Gebirgsmantel. Durch den kraftschlüssigen Verbund unter Innendruckbelastung wird somit neben dem Stahl auch das umliegende Gebirge zur Lastabtragung herangezogen, was letztendlich zu einer Verringerung des Stahlanteiles gegenüber dem freitragenden Stahlrohr und folglich zu einer reduzierten Rohrwanddicke führt.

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Verlegung und den Einbau der Druckschachtpanzerung (einzelne Rohrschüsse) im Ausbruchquerschnitt. Die glatte Ausbruchwandung des Stollens/Schachtes wurde hier durch den Fräsvortrieb mittels einer Tunnelbohrmaschine (TBM) und entsprechend stabilem Felsmaterial erreicht. Der Hohlraum zwischen Rohrwandung und Gebirgsmantel wird anschließend an den Rohreinbau hinterbetoniert (Abbildung 5) und ausinjiziert.

Aus wirtschaftlichen Gründen gilt es dabei den Gebirgsanteil möglichst gut auszunutzen bzw. zu erhöhen, um die kostenintensive Stahlpanzerung möglichst dünn auszuführen zu können. Die reale Erfassung der Gebirgseigenschaften einschließlich des Primärspannungszustands stellt jedoch die größte Schwierigkeit und Unsicherheit in der Bemessung dar.



Abbildung 3: Verlegung der Stahlpanzerung im Druckschacht, Schachtvortrieb mittels TBM [11]



Abbildung 4: Verlegung der Stahlpanzerung im Druckschacht, Schachtvortrieb mittels TBM [11]



Abbildung 5: Ausbetonierung des Hohlraumes zwischen Panzerung und Gebirgsmantel [11]

Während die Materialeigenschaften der Stollenauskleidungsmaterialien, sprich Stahl und/oder Beton längst normativ erfasst und weitgehend genau mit kleinem Streubereich aus Datenblättern entnommen werden können, lassen sich die erforderlichen Gebirgskennwerte nicht so einfach erfassen. Es gibt unzählige Gesteinsarten, welche sich in ihren mechanischen Eigenschaften grundsätzlich voneinander unterscheiden. Große Streubreiten in ihren Eigenschaften von über 100% sind dabei keine Seltenheit. Weiteres wurden sie im Laufe der Gebirgsbildung weitgehend verändert, wodurch sich ihre eigentlichen Eigenschaften verändert haben. Unterschiedlichste Beanspruchungen, zum Teil auch über die Gebirgsfestigkeit hinaus, zerstörten die Homogenität und Isotropie des Gebirges unter Entstehung von Störzonen, Auflockerungszonen, Schieferungsflächen und Klüften. Diese führen zu dem schwer erfassbaren elasto-plastischem Gebirgsverhalten.

Wie bereits Seeber erwähnt:

*„Da bei einer wirtschaftlichen Konstruktion von Druckstollen das Gebirge in hohem Maße zum Mittragen herangezogen wird, ist es erforderlich, die vielfältigen Eigenschaften der durchfahrenen Gesteinsarten sowie den Primärspannungszustand möglichst genau zu erfassen.“ [1, S.20]*



Abbildung 6: Stahlpanzerung, Gebirge [11]

Die richtige Erfassung der Felsparameter bedarf großer felsmechanischer Erfahrung. Die sichersten Daten für eine Berechnung bei schwer bestimmbar Verhältnissen liefert nach wie vor der Kavernenversuch, bei dem ein Probestück der Panzerung hergestellt und geprüft wird. Als zweitbeste Lösung wurden Versuche im unausgekleideten Stollen entwickelt, welche zum Radialpressenversuch der TIWAG (Abbildung 7 und 8) führten, der heute breite Anwendung findet.

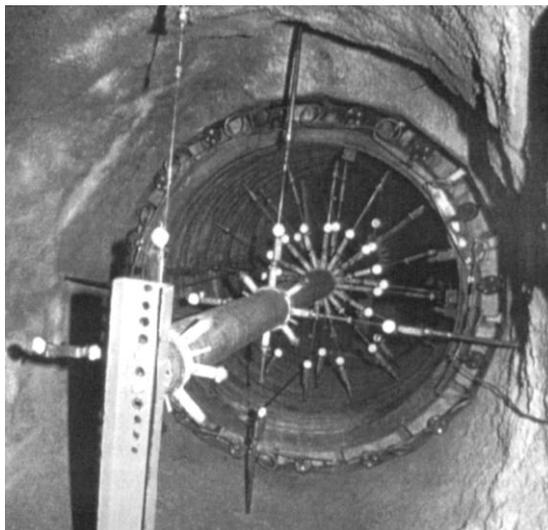


Abbildung 7: Radialpresse der TIWAG [1]

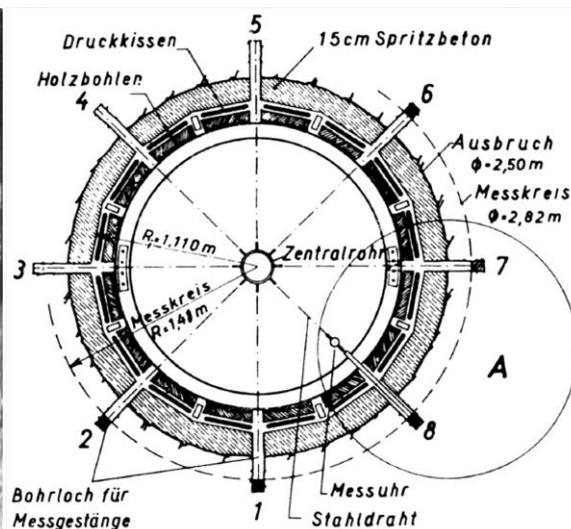


Abbildung 8: Querschnitt TIWAG Radialpresse [1]

Neben der Bestimmung des Felsverhaltens bestehen jedoch auch Methoden zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Druckschacht-Verbund-Konstruktionen durch verschiedene Injektionsverfahren. Abhängig vom gewählten Verfahren wird dabei Mörtel bzw. Zementmilch in unterschiedlicher Weise in das Gebirge eingepresst.

Mögliche Verfahren sind:

- **Tiefeninjektion in den Gesteinsmantel:**

Zementmilch wird mit hohem Druck in den umgebenen Fels eingepresst und stabilisiert dadurch das Gestein durch Auffüllen von Spalten, Klüften und Hohlräumen. Die Gleichmäßigkeit und der Verformungsmodul des Gebirges werden verbessert.

- **Kontaktinjektion in die Baufugen Fels/Beton und Beton/Stahlpanzerung:**

Durch das Schließen von unvermeidbaren Hohlräumen und Schwindrissen aus der Hinterbetonierung und der Auffüllung des Umfangsspalt wird eine gute und gleichverteilte Druckübertragung gewährleistet.

- **Druckinjektion zwischen Beton und Stahl:**

Eine Druckvorspannung durch nachträgliche Injektion unter Druck kann zu einer Verringerung oder sogar Vermeidung des Umfangsspalt führen.

Aus wirtschaftlicher Sicht hat die Praxis gezeigt, dass bei guten Gebirgsverhältnissen der Injektionsaufwand so weit wie möglich zu reduzieren und die Panzerung dementsprechend stärker zu bemessen ist. Einen Vorteil bringt konträr eine aufwendige Gesteinsaufbesserung durch zahlreiche Injektionen bei ungünstigeren Gebirgsverhältnissen.

Ein weiterer Aspekt, den es zu Berücksichtigen gilt, ist der Umfangspalt (wird auch Initial/Koaxialspalt genannt) der zwischen Rohr und Hinterfüllbetonierung/Fels auftritt. Dieser entsteht einerseits aus der Temperaturdehnung bzw. Kontraktion durch die Abkühlung von der Abbinde-temperatur (Hydratationswärme) während der Bauphase, Kriech- und Schwindeffekte der Hinterbetonierung (wenn auch nur geringem Maße) und der Abkühlung des Rohres auf etwa 0°C (niedrigste Triebwassertemperatur) während der Betriebsphase. Die Temperaturdifferenzen sind in der Größenordnung von 20-30°C.

Dazu kommt eine weitere Komponente felsmechanischer Natur. Bei längerer Einwirkung des Innendrucks kommt es eventuell zur Überlagerung einer plastischen Aufweitung des Gebirges mit der elastischen Radialverformung der Druckschachtpanzerung, welche mit einer Kräfteumlagerung auf das Stahlrohr verbunden ist. Bei Entlastung geht die elastische Verformung des Rohres zurück während die plastische Verformung des Gebirges irreversibel ist. Dies kann einen weiteren Anteil am Umfangsspalt zwischen Rohr und Hinterfüllbeton bilden.

Da die Gebirgsmitwirkung (Verbundwirkung Stahl-Gebirge) erst nach dem Anliegen (Kontakt) der Stahlpanzerung an dem Beton bzw. Fels und somit nach der Überwindung des Umfangsspalt zu tragen kommt, bestimmt der Umfangsspalt maßgeblich den Spannungsanteil, der von der Stahlpanzerung aufgenommen werden muss. Ziel ist es, den Umfangsspalt so gering wie möglich zu halten, um den Effekt der Gebirgsmitwirkung zu maximieren. Dies kann durch vorhin beschriebenen Injektionsmethoden, unter Umständen mit Vorspannung, bewerkstelligt werden. Eine Druckprobe mit anschließender Injektion vor Inbetriebnahme kann das Spaltausmaß bis auf den Anteil der Triebwasserabkühlung reduzieren.

Abbildung 9 zeigt einen Panzerungsabschnitt und die Anordnung von den Injektionsnippeln. In Abbildung 10 erfolgt der Arbeitsschritt der Injektion und damit der Verpressung des Initialspaltes und etwaiger Hohlräume (Gebirgsaufbesserung).

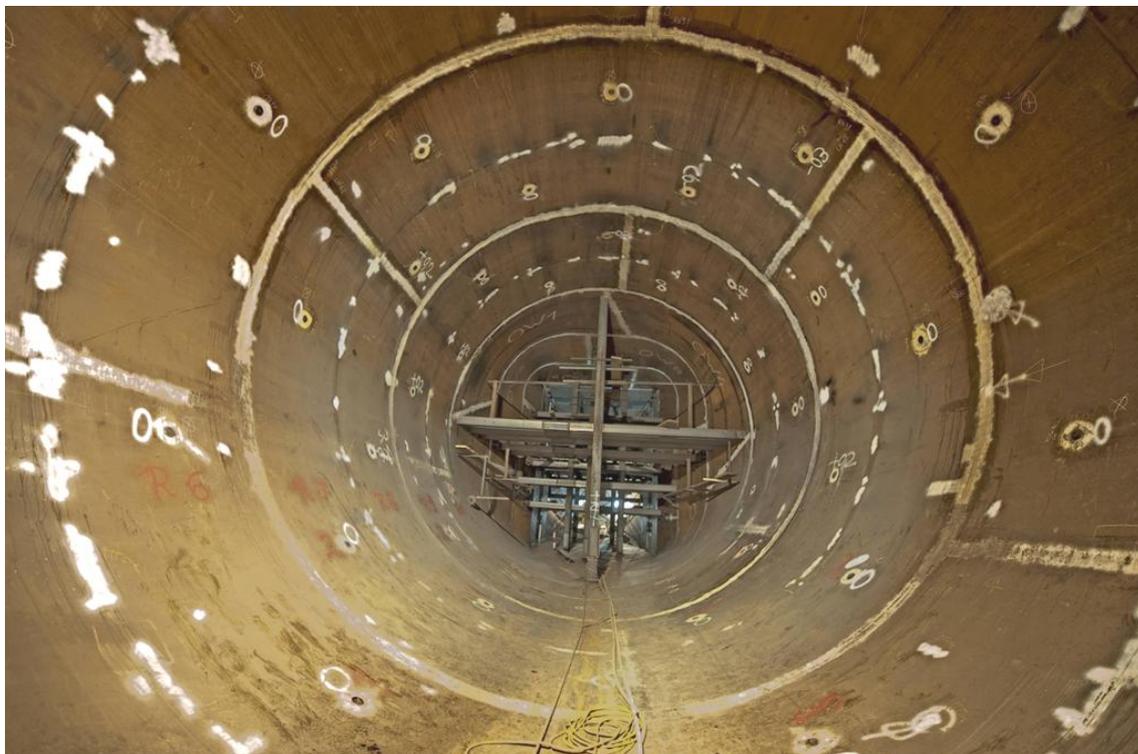


Abbildung 9: Panzerung innenseitig mit Injektionsnippeln [11]



Abbildung 10: Arbeitsschritt Injektion, Injektionsnippel [11]

Mit der Einführung einer dünnwandigen Druckschachtpanzerung ergibt sich auch noch ein neues äußerst wichtiges und entscheidendes Bemessungskriterium, nämlich die Bemessung der Druckschachtpanzerung auf Gebirgswasseraußendruck durch Kluft- und Sickerwasser und der somit entstehenden Stabilitäts-/Beulproblematik der Rohrwandung. Faktoren wie die Gesteinsart und deren Durchlässigkeit, die Hanglage in Bezug auf den Stollen, Lage/Verlauf und Ausrichtung verschiedener durchlässiger Gebirgsschichtungen und die maximal mögliche Höhe einer Sickerwassersäule haben Einfluss auf die Mächtigkeit des Außendruckes. Die realen Verhältnisse sind sehr schwer richtig zu erfassen, wodurch bei der Belastungsannahme große Vorsicht geboten ist und eine sichere, konservative Bemessung empfohlen wird. Die Außendruckbemessung ist neben der Innendruckbemessung häufig das entscheidende Bemessungskriterium, stellt aber eine eigene mechanische Problemstellung dar und ist daher nicht Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit, die sich speziell auf Fragen unter Innendruckbelastung konzentriert.



## 3. Berechnungsmethoden

Der Inhalt dieses Kapitels bezieht sich unter anderem auf Informationen der Literaturquellen [1], [2], [3], [4].

### 3.1 Allgemeines

Die Berechnung der Panzerung von Druckstollen und Druckschächten bedient sich unterschiedlicher analytischer und numerischer Berechnungsmethoden. Moderne numerische Berechnungsverfahren wie die Finite-Elemente Methode lassen eine sehr realitätsnahe Berechnung aller Bau- und Belastungsphasen, sowohl im elastischen als auch im elasto-plastischen Bereich zu. Unter gewissen geometrischen und materialspezifischen Voraussetzungen und Annahmen, wie etwa der meist gegebenen Radialsymmetrie des Druckstollenquerschnittes, einer radialsymmetrischen Innendruckbelastung und einer näherungsweise gleich verteilten Gebirgsspannung um den Stollenquerschnitt führt auch die Anwendung sehr einfacher analytischer Berechnungsverfahren zu akkuraten Ergebnissen. [1]

### 3.2 Analytische Berechnungsverfahren

Die klassischen analytischen Berechnungsmethoden der Innendruckberechnung gehen im Allgemeinen von elastisch, homogenen, isotropen Materialverhalten aus. Es besteht auch die Möglichkeit exakter analytischer Berechnung für elastisch anisotropes Materialverhalten des Gebirges. Bei zusätzlicher radialsymmetrischer Belastung und radialsymmetrischer Spannungsverteilung im Gebirge lassen sich auch elasto-plastische Zustände in analytischer Form berechnen.

Seeber [1] berichtet:

*„Die Spannungsänderung vom primären zum sekundären Spannungszustand findet zu 90% in einem Umfeld mit einem Radius von  $\approx 3 \cdot R$  statt. Soll sich in diesem Feld die vertikale Primärspannung nicht mehr als 15% verändern so muß der Stollen in einer Tiefe von  $\geq 10 \cdot D$  liegen. Diese Bedingung ist bei Druckstollen praktisch immer erfüllt, mit der Ausnahme der Austrittsbereiche aus dem Berg. Dort werden aber ohnehin zugfeste Auskleidungen eingesetzt, die den vollen Innendruck übernehmen.*

*Die Bedingung der Radialsymmetrie ist hinsichtlich der Horizontalspannung schwerer zu erfüllen. Sie ändert sich selbst zwar nicht im maßgebenden Bereich  $\pm 3 \cdot R$ , doch sollte sie etwa 70% der Vertikalspannung erreichen ( $k = 0,7$ ), damit auch die Tangentialspannung annähernd radialsymmetrisch verteilt ist.“ [1, S.132]*

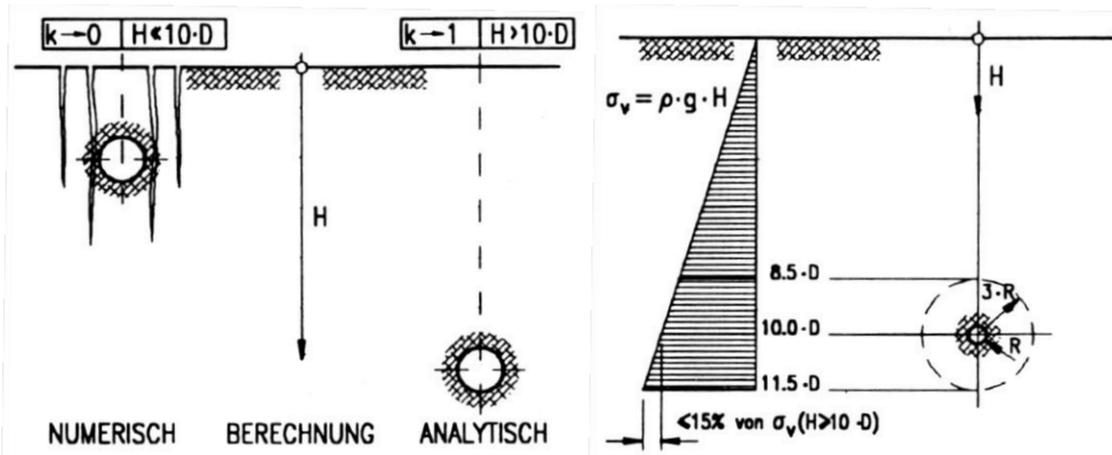


Abbildung 11: Randbedingung für die Wahl der Berechnungsmethode [1]

Abbildung 12: Änderung der Primärspannung um einen Hohlraum mit der Tiefe. Grenzbedingung für rotationssymmetrische Betrachtung  $H \geq 10 * D$  [1]

Das Gebirge wird also je nach Berechnungsart vereinfacht als elastisches, in komplexeren Berechnungsmodellen als elasto-plastisches Kontinuum in die Berechnung mit einbezogen. Definiert wird es durch seinen Elastizitäts- bzw. Verformungs-Modul. Bei plastischer Berechnung wird es durch seine Arbeitslinie definiert.

Die analytischen Berechnungsverfahren für Druckstollen und Druckschachtauskleidungen beziehen sich meist lediglich auf die Innendruckbelastung. Bei Inbezugnahme verschiedener Spannungszustände wie dem Sekundärspannungszustand und den verschiedenen Bau- und Betriebsphasen erfolgt dies meist nur für den elastischen Bereich, bei dem eine einfache Superposition der Einzelspannungen laut Superpositionsgesetz möglich ist. Dies ist jedoch nur für den Fall des radialsymmetrischen Druckstollenquerschnittes sowie radialsymmetrischer Gebirgsspannung und Steifigkeitsverteilung zutreffend.

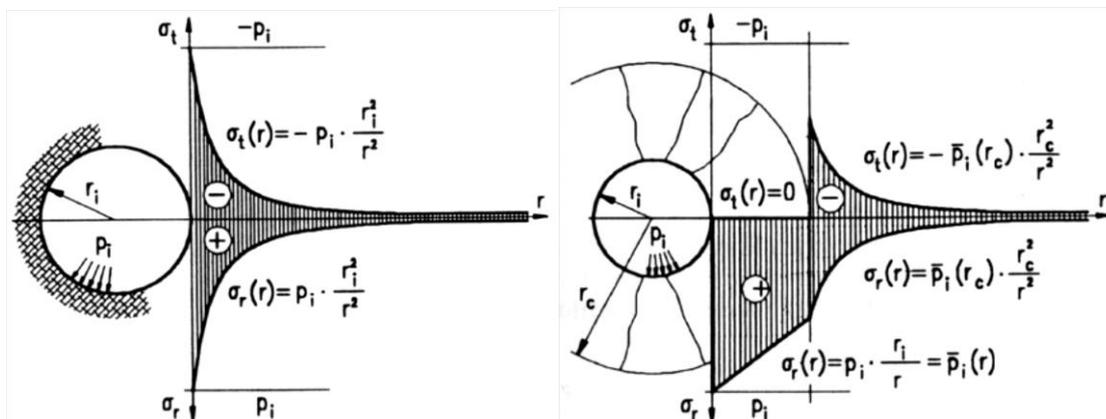


Abbildung 13: Spannungsverlauf in der gelochten Scheibe unter Innendruck [1]

Abbildung 14: Spannungsverlauf um einen kreisförmigen Hohlraum mit gerissener Zone [1]

Leider entspricht es nicht der Realität (Praxis), dass Druckstollen nur standfestes elastisches Gebirge mit gleichförmigen Verformungsverhalten durchdringen. Wie bereits erwähnt, ist die Bestimmung des genauen Gebirgsverhaltens die eigentliche Schwierigkeit und Herausforderung. Die Beherrschung der Berechnungsmethode tritt in der analytischen Druckstollenberechnung in den Hintergrund. Besonders bei tiefliegenden Trassen stößt man beim Vortrieb auch auf gebrechliches, druckhaftes und inhomogenes Gebirge. Das elastische Materialmodell ist in diesem Fall oft nicht mehr passend und muss dem komplexeren elasto-plastischem weichen. Auch hangnahe Stollen mit relativ wenig Gebirgsüberdeckung weisen einen stark unterschiedlichen, nicht radialsymmetrischen Primärspannungszustand auf.

Bei Primärspannungszuständen im Gebirge, welche zu sehr von der Radialsymmetrie abweichen, d.h. unsymmetrischen Belastungen, elasto-plastischem Materialverhalten und gleichzeitiger Überlagerung verschiedener Belastungs-/ Bauzustände ausgesetzt sind, treffen die analytischen Berechnungsmethoden an ihre Grenzen. Es ist kaum mehr möglich ein analytisches Verfahren mit vertretbarem Aufwand einzusetzen und die Verwendung eines numerischen Verfahrens wird notwendig. [1]

### **3.2.1 Voraussetzung für die Anwendbarkeit analytischer Verfahren**

Zusammenfassend stellt Seeber [1] die Bedingungen für eine analytische Berechnung zusammen:

- *„Radialsymmetrische Form des Stollens*
- *Radialsymmetrie hinsichtlich Spannungsverteilung bei nicht elastischem Verhalten*
- *Radialsymmetrie der Belastung durch Innen- und Außendruck*
- *Homogen isotropes Material bei Gebirge und Auskleidung*
- *Materialänderungen müssen auch radialsymmetrisch (ringförmig) sein, z.B. mehrschichtige Inhomogenitäten: Auskleidung – gerissenes Gebirge – kompaktes Gebirge.“ [1, S.132]*

### 3.2.2 Vorzeichenfestlegung für Druckstollenstatik

- Belastung: Druck ( $p_i, p_a < 0$ ) (+)
- Spannungen: Druckspannung (-)  
Zugspannung (+)
- Verformungen: Radialaufweitung (+)  
Radiusverkleinerung (-)

### 3.2.3 Das mathematische Modell

Die klassischen analytischen Berechnungsmethoden gehen von einer dichten Schachtauskleidung aus. Diese kann je nach Bauart als dünne Membran (Kunststoffolie, Stahlpanzerung) oder als dickwandiges Rohr (Betonauskleidung) auftreten. Dadurch kann angenommen werden, dass der Innendruck nur auf der Innenfläche der Auskleidung wirkt und nicht in das Kluftsystem des Gebirges eindringt.

Das Gebirge kann in den meisten Fällen als Kontinuum betrachtet werden und bedient sich eines anderen mathematischen Modells. Der kreisförmige Ausbruchsquerschnitt wird nach der Theorie der gelochten Scheibe beschrieben.

Die beiden Modelle sind in der Verbundwirkung nach Kontakt durch die Übergangsbedingung gleicher radialer Verschiebungen miteinander verknüpft.

Übergangsbedingung:  $u_{r,Panzerung} = u_{r,Gebirge}$

#### 3.2.3.1 Panzerung

##### Spannungen:

Als Berechnungsgrundlage für die analytische Spannungsberechnung am dünnwandigen Rohr dient die Kesselformel am geschlossenen Kreisring. Dieses einfache Berechnungsverfahren beruht auf der Membrantheorie, wonach bei sehr großem Verhältnis  $R \gg t$  die radiale Spannung sehr klein ist und demnach nicht berücksichtigt wird. Der Innendruck wird rein über die tangentielle Spannung abgetragen.

Die Kesselformel für ein dünnwandiges Rohr unter Innen- und Außendruck lautet:

Tangentialspannung:            aus:             $\sigma_t = \frac{p_i \cdot R_i}{t} - \frac{p_a \cdot R_a}{t} \quad [N/mm^2]$

   mit:             $R \gg t \Rightarrow R_i \approx R_a \approx R_m \quad [mm]$

   folgt:         $\sigma_t = (p_i - p_a) \cdot \frac{R_m}{t} \quad [N/mm^2]$

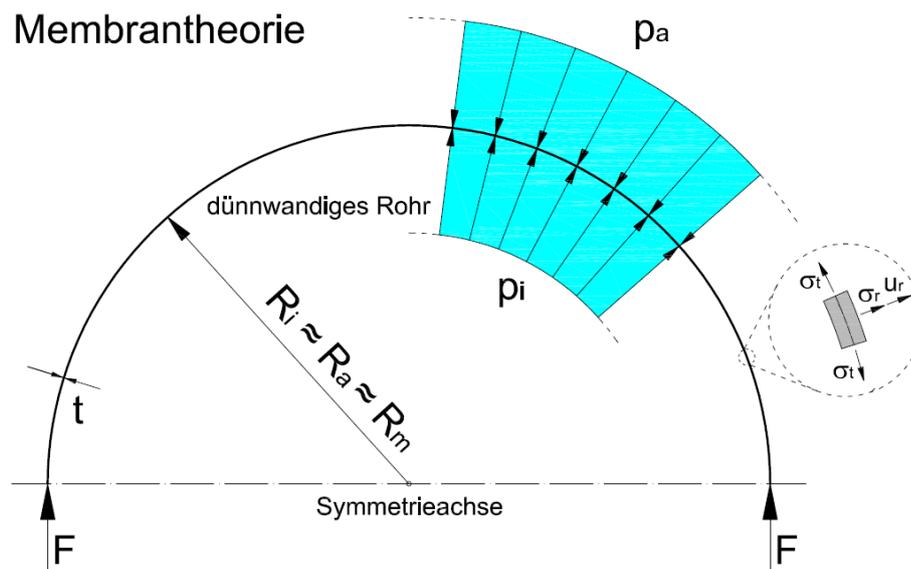


Abbildung 15: Systemskizze zur Berechnung des dünnwandigen Rohres unter Innen- und Außendruck [1]

Da sich die Berechnungen dieser Arbeit lediglich auf den Innendruck beziehen, vereinfacht sich die Formel weiter zu:

Tangentialspannung:

$$\sigma_t = p_i \cdot \frac{R_m}{t} \quad [N/mm^2]$$

### Randbedingungen:

Die Randbedingungen in Stollenlängsrichtung lassen 2 Fälle unterscheiden:

- **Fall ES: Ebener Spannungszustand**

Das Rohr ist in Längsrichtung frei verschiebbar ( $\varepsilon_l \neq 0$ ). Aus der Querdehnung unter Innendruck baut sich somit keine Längsspannung auf ( $\sigma_l = 0$ ).

- **Fall EF: Ebener Formänderungszustand**

Durch beispielsweise Einbetonierung des Rohres wird die Längsdehnung behindert ( $\varepsilon_l = 0$ ). Aufgrund der behinderten Längsdehnung baut sich dabei eine Längsspannung auf ( $\sigma_l \neq 0$ ).

Sowohl im ebenen Formänderungszustand (EF) als auch im ebenen Spannungszustand (ES) ergibt sich die Umfangs-/Tangential-/Ringspannung  $\sigma_t$  aus dem Gleichgewicht und somit besteht eine Unabhängigkeit bezüglich eventueller Längsspannungen (Spannungen in Rohrachse). Anderes Verhalten zeigen jedoch die Dehnungen und Verformungen, welche vom Spannungszustand abhängig sind. In deren Formel geht der E-Modul direkt ein, wodurch im Fall des ebenen Formänderungszustandes, bei dem sich eine zusätzliche Längsspannung aufbaut, der Poisson-Effekt mitberücksichtigt werden muss.

In den folgenden Berechnungsbeispielen wird vom ebenen Formänderungszustand ausgegangen. Dieser Fall trifft für Kernbereich tiefliegender Stollen und Schächte zu.

Umrechnung des Stahl-E-Moduls aufgrund des Poisson-Effektes im ebenen Formänderungszustandes:

$$E_S^* = \frac{E_S}{1 - \nu^2} \quad [N/mm^2] \quad \dots \text{Fall EF}$$

### Verschiebungen:

Radiale Aufweitung des Rohres:                      aus:

$$\Delta u_r = \varepsilon_t * R_m = \varepsilon_r * R_m \quad [mm]$$

mit:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = \frac{p_i * R_m}{E_S^* * t} \quad [-]$$

folgt:

$$\Delta u_r = \frac{p_i}{E_S^*} * \frac{R_m^2}{t} \quad [mm]$$

## 3.2.3.2 Fels

Das dickwandige Rohr geht mit unendlicher Wandstärke in das mathematische Modell der gelochten Scheibe über.

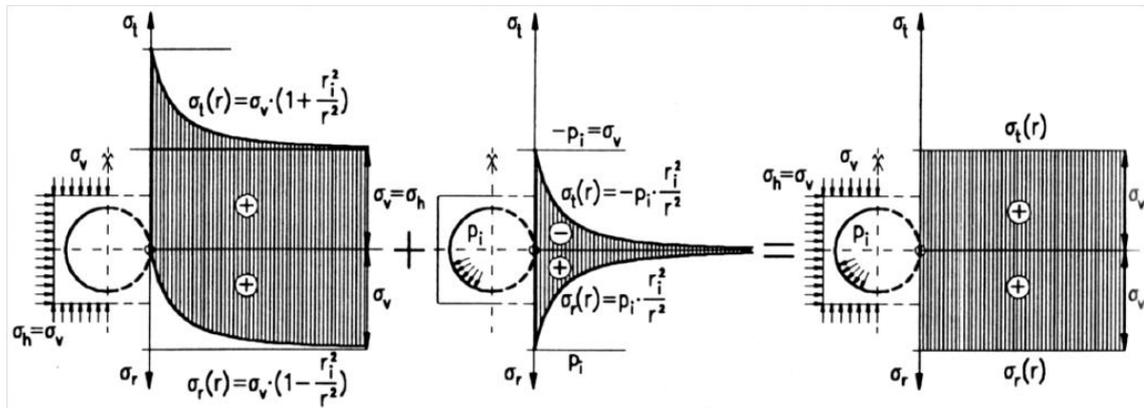


Abbildung 16: Spannungsverläufe am Modell der gelochten Scheibe, Superposition im elastischen Bereich [1]

Die Felssteifigkeit wird mittels 2 Kenngrößen, dem Elastizitätsmodul (E-Modul) oder dem Verformungsmodul (V-Modul) beschrieben.

Der Verformungsmodul wird in der Regel aus der Erstbelastung ermittelt, während der Elastizitätsmodul des Felsens aus der Entlastungsschleife bestimmt wird. Bei ideal elastischem Verhalten im 1-achsigen Spannungszustand würde der Verformungsmodul genau dem Elastizitätsmodul entsprechen. Da der Fels bei Erstbelastung jedoch einen irreversiblen plastischen Verformungsanteil erfährt, liegt der Verformungsmodul je nach Felstyp deutlich unter dem Elastizitätsmodul (bis 60%). Eine Druckschachtpanzerung erfährt bei Inbetriebnahme eine Erstbelastung des Gebirges und somit müssen die Berechnungen mit dem Verformungsmodul durchgeführt werden. Der Fels ist im Kontinuum in seiner Dehnung behindert und somit liegt der ebene Formänderungszustand als Randbedingung vor. Die den Randbedingungen entsprechenden Bezeichnungen der Felssteifigkeit werden mit einem \* versehen.

Elastizitätsmodul Fels: 
$$E_F = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{l,Entlastung}} \quad [N/mm^2]$$

Elastizitätsmodul Fels (EF): 
$$E_F^* = \frac{E_F}{1+\nu} \quad [N/mm^2]$$

Radialpressenversuch: 
$$E_F^* = \frac{p_F^* r_F}{u_{el}} \quad [N/mm^2]$$

Verformungsmodul Fels: 
$$V_F = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{l,Erstbelastung}} \quad [N/mm^2]$$

Verformungsmodul Fels (EF): 
$$V_F^* = \frac{V_F}{1+\nu} \quad [N/mm^2]$$

Radialpressenversuch: 
$$V_F^* = \frac{p_F^* r_F}{u_{ges}} \quad [N/mm^2]$$

### 3.2.3.3 Verbundwirkung/Gebirgsmitwirkung

Die Aufteilung der Innendruckanteile auf die Stahlpanzerung und das Gebirge erfolgt im Verhältnis deren Steifigkeiten zueinander. Diese errechnen sich aus den radialen Federsteifigkeiten des Stahlrohres und des Gebirges folgend.

Radiale Federsteifigkeit Stahlpanzerung:

$$C_{S,r} = \frac{p_i}{\Delta u_r} = \frac{p_i}{\frac{p_i * R_m^2}{E_S^* * t}} = \frac{E_S^* * t}{R_m^2} \quad [N/mm^3]$$

Radiale Federsteifigkeit Fels:

$$C_{F,r} = \frac{V_F^*}{(1 + \nu) * R_m} \quad [N/mm^3]$$

### 3.2.4 Der Initialspalt – Berechnung

Die Gebirgsmitwirkung kommt bei Vorliegen eines Umfangsspalts erst nach dem Anliegen der Panzerung an den umliegenden Fels zu tragen. Das Rohr muss dabei unter Dehnung erst den Umfangsspalt überbrücken.

Die endgültige Spaltweite ergibt sich aus der Addition mehrerer Faktoren:

- **Spalt durch Einfluss der Panzerung**

Die Panzerung erfährt beim Abbinden des Hinterfüllbetons eine Erwärmung in einer Größenordnung von ca. 20-25°C, wodurch sie sich in diesem Bauzustand entsprechend ausdehnt. Infolge der späteren Abkühlung der Panzerung auf die niedrigste Triebwassertemperatur von ca. 0°C im Betrieb, erfährt das Rohr eine Kontraktion und ein Umfangsspalt öffnet sich.

Dehnungsanteil Stahlpanzerung:  $\varepsilon_{S,\Delta T} = \alpha_T * \Delta T$

mit:  $\Delta T = 20^\circ C$

und:  $\alpha_T \cong 1,0 * 10^{-5} / ^\circ C$

ergibt sich:  $\varepsilon_{S,\Delta T} = 1,0 * 10^{-5} * 20 = 2,0 * 10^{-4} \quad [-]$

- **Spalt durch Gebirgeinfluss**

Auch das Gebirge und der Beton kühlen sich am Hohlraumrand von den ca. 20°C auf die 0°C ab. Die mittlere Temperaturänderung im Einflussbereich ergibt sich bei Annahme einer hyperbolischen Temperaturabnahme auf einer Tiefe von  $\sim 1 * R_m$  auf etwa ein Drittel der Temperaturabnahme am Hohlraumrand.

aus:  $\Delta T_i = 20^\circ C$

folgt:  $\Delta T_M \cong \frac{1}{3} \Delta T_i$

Dehnungsanteil Gebirge:  $\varepsilon_{F,\Delta T} = 1,0 * 10^{-5} * \frac{1}{3} * 20 \cong 0,7 * 10^{-4} \quad [-]$

- **Gesamte Spaltweite**

Durch Addition der beiden Anteile ergibt sich eine gesamte Temperaturdehnung von:

$$\varepsilon_{\Delta T} = (2,0 + 0,7) * 10^{-4} \cong 2,7 * 10^{-4} \quad [-]$$

Und die daraus resultierende Spaltweite:

$$u_{\Delta T} \cong 2,7 * 10^{-4} * R_m \quad [mm]$$

Seeber fügt dem folgendes bei:

*„Gemessene wirksame Spaltweiten ( $u_0$ ) liegen meist bei 3 bis  $4 * 10^{-4} * r$  d.h. sie sind etwas größer, da die Abbinde­temperatur häufig über 20°C liegt und auch der Anteil der irreversiblen Erstverformung des Gebirges enthalten ist. Die Wirkung des Schwindens des Betons braucht i.A. nicht berücksichtigt zu werden, da die Gebirgsfeuchtigkeit meist so groß ist, daß der Hinterfüllbeton nicht austrocknen kann.“ [1, S. 178]*

Unter Berücksichtigung aller Einflüsse wird empfohlen eine Spaltweite von

$$u_0 = 3,0 * 10^{-4} * R_m \quad [mm] \quad \text{anzunehmen.}$$

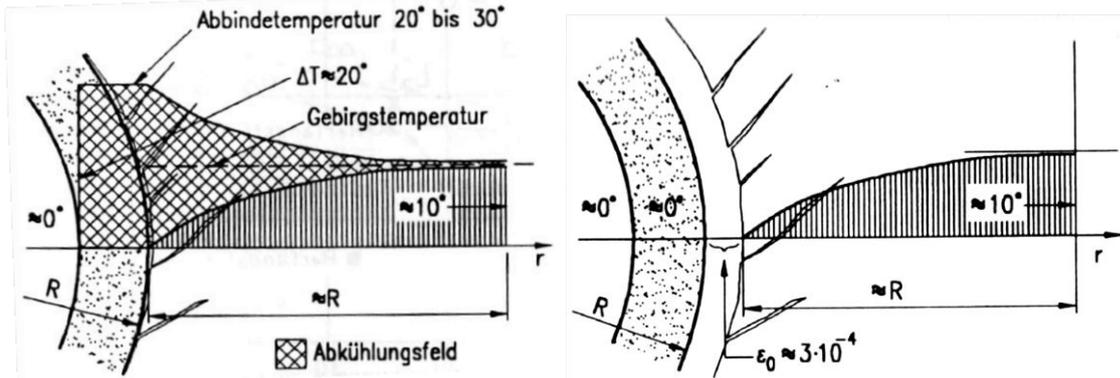


Abbildung 17: Temperaturverlauf bzw. -änderung zwischen Betonierung (Abbindetemperatur) und geringster Triebwassertemperatur [1]

Abbildung 18: Temperaturverlauf nach Abkühlung und daraus resultierender Kontraktionsspalt [1]

### 3.2.5 Berechnungsbeispiele

In diesem Kapitel werden 3 Beispiele mit analytischen Berechnungsmethoden aufgezeigt. Die erste Berechnung (a) erfolgt dabei mit der Kesselformel am freitragenden Rohr, während die zweite Berechnung (b) zusätzlich eine Gebirgsmitwirkung und die dritte Berechnung (c) sowohl eine Gebirgsmitwirkung in der Lastabtragung des Innendruckes integriert, als auch einen Initialspalt zwischen Stahlpanzerung und Injektionsschicht/Gebirge laut Seeber berücksichtigt. In allen Fällen wird der ebene Formänderungszustand im elastischen Bereich zugrunde gelegt und ein Innendruck aufgebracht.

#### 3.2.5.1 Kenngrößen der Berechnung

Die Eingangskenngrößen für die Berechnungen lauten:

Innendruckbelastung:  $p_i = 50 \text{ bar} \equiv 5,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Elastizitätsmodul Stahl:  $E_S = 210000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Elastizitätsmodul Stahl (EF):  $E_S^* = 230769 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Verformungsmodul Gebirge (EF):  $V_F^* = 5000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Mittlerer Rohradius:  $R_m = 1800 \text{ [mm]}$

Wandstärke:  $t = 20 \text{ [mm]}$

### 3.2.5.2 Berechnung

**Fall a:** Berechnung am freitragenden Rohr

Das Stahlrohr wird alleine zur Innendruckaufnahme herangezogen.

Kesselformel:

$$\sigma_t = (p_i) * \frac{R_m}{t}$$

Umfangsspannung:

$$\sigma_t = (5,0) * \frac{1800}{20} = \mathbf{450,00} \quad [N/mm^2]$$

Modifizierter E-Modul für EF:

$$E_S^* = \frac{E_S}{1 - \nu^2} = \frac{210000}{1 - 0,3^2} = 230769 \quad [N/mm^2]$$

Radiale Rohraufweitung:

$$\Delta u_r = \frac{p_i}{E_S^*} * \frac{R_m^2}{t} = \frac{5,0}{230769} * \frac{1800^2}{20} = \mathbf{3,51} \quad [mm]$$

**Fall b:** Berechnung mit Gebirgsmitwirkung

Neben Panzerung trägt auch der Gebirgsmantel zur Lastabtragung bei.

Modifizierter E-Modul für EF:

$$E_S^* = \frac{E_S}{1 - \nu^2} = \frac{210000}{1 - 0,3^2} = 230769 \quad [N/mm^2]$$

Federkonstante Fels radial:

$$C_{F,r} = \frac{V_F^*}{(1 + \nu) * R_m} = \frac{5000}{(1 + 0,33) * 1800} = 2,09 \quad [N/mm^3]$$

Federkonstante Stahlpanzerung radial:

$$C_{S,r} = \frac{p_i}{\Delta r} = \frac{p_i}{\frac{p_i * R_m^2}{E_S^* * t}} = \frac{E_S^* * t}{R_m^2} = \frac{230769 * 20}{1800^2} = 1,43 \quad [N/mm^3]$$

Es folgt die Aufteilung der Innendruckanteile  $p_S$  und  $p_F$  den zugehörigen Steifigkeiten entsprechend:

$$\text{aus:} \quad p_i = p_S + p_F = 5,0 \quad [N/mm^2]$$

$$\text{und:} \quad C_{F,r} * p_F = C_{S,r} * p_S \quad [N/mm^2]$$

errechnen sich die Innendruckanteile

$$\text{Stahlpanzerung:} \quad p_S = 2,03 \quad [N/mm^2]$$

$$\text{Gebirgsmitwirkung:} \quad p_F = 2,97 \quad [N/mm^2]$$

Die tangentielle Stahlspannung ergibt sich zu:

$$\sigma_{s,t} = \frac{p_S * R_m}{t} = \frac{2,03 * 1800}{20} = \mathbf{182,70} \quad [N/mm^2]$$

Die Radialverschiebung lautet:  $\Delta u_r = \Delta u_{S,r} = \Delta u_{F,r}$

$$\Delta u_r = \frac{p_S}{C_{S,r}} = \frac{p_F}{C_{F,r}} = \frac{2,03}{1,43} = \frac{2,97}{2,09} = \mathbf{1,42} \quad [mm]$$

### Fall c: Berechnung mit Gebirgsmitwirkung und Initialspalt

Ein Initialspalt wird in die Berechnung inkludiert. Bis zur Überbrückung des Spaltes wird allein der Stahl zur Lastabtragung herangezogen. Erst dann setzt die Gebirgsmitwirkung ein.

Berechnung des Initialspaltes:

$$\text{Bei Annahme:} \quad u_0 = 3,0 * 10^{-4} * R_m = 3,0 * 10^{-4} * 1800 = 0,54 \quad [mm]$$

Modifizierter E-Modul für EF:

$$E_S^* = \frac{E_S}{1 - \nu^2} = \frac{210000}{1 - 0,3^2} = 230769 \quad [N/mm^2]$$

Federkonstante Fels radial:

$$C_{F,r} = \frac{V_F^*}{(1 + \nu) * R_m} = \frac{5000}{(1 + 0,33) * 1800} = 2,09 \quad [N/mm^3]$$

Federkonstante Stahlpanzerung radial:

$$C_{S,r} = \frac{p_i}{\Delta r} = \frac{p_i}{\frac{p_i * R_m^2}{E_S^* * t}} = \frac{E_S^* * t}{R_m^2} = \frac{230769 * 20}{1800^2} = 1,43 \quad [N/mm^3]$$

Druckanteil Stahl bis Initialspaltüberbrückung:

$$u_0 = \frac{\Delta p_S}{E^*} * \frac{R_m^2}{t} \Rightarrow \Delta p_S = \frac{u_0 * E^* * t}{R_m^2}$$

$$\Delta p_S = \frac{0,54 * 230769 * 20}{1800^2} = 0,77 \quad [N/mm^2]$$

Stahlspannung aus  $\Delta p_S$ :

$$\sigma_{S,t,\Delta p_S} = \frac{\Delta p_S * R_m}{t} = \frac{0,77 * 1800}{20} = 69,30 \quad [N/mm^2]$$

Verbleibender Druck nach „Kontakt“:

$$p_{i,Rest} = p_i - \Delta p_S = 5,0 - 0,77 = 4,23 \quad [N/mm^2]$$

Aufteilung Druckanteile  $p_S$  und  $p_F$ :

$$\text{aus:} \quad p_{i,Rest} = p_S + p_F = 4,23 \quad [N/mm^2]$$

$$\text{und:} \quad C_{F,r} * p_F = C_{S,r} * p_S \quad [N/mm^2]$$

errechnen sich die Innendruckanteile

$$\text{Stahlpanzerung:} \quad p_S = 1,72 \quad [N/mm^2]$$

$$\text{Gebirgsmitwirkung:} \quad p_F = 2,51 \quad [N/mm^2]$$

Ringspannung Stahl:

$$\sigma_{S,t} = \frac{p_S * R_m}{t} + \sigma_{S,t,\Delta p_S} = \frac{1,72 * 1800}{20} + 69,30 = \mathbf{224,10} \quad [N/mm^2]$$

Radialverschiebung der Gebirgslaibung:

$$\Delta u_r = \Delta u_{S,r} = \Delta u_{F,r}$$

$$\Delta u_r = \frac{p_S}{C_{S,r}} = \frac{p_F}{C_{F,r}} = \frac{1,72}{1,43} = \frac{2,51}{2,09} = \mathbf{1,20} \quad [mm]$$

Verschiebung Stahlpanzerung (inkl. Spalt):

$$\Delta u_{S,r,ges} = \Delta u_{S,r} + u_0 = 1,20 + 0,54 = \mathbf{1,74} \quad [mm]$$

### 3.2.5.3 Ergebnisvergleich Berechnungsbeispiele

Tabelle 1: Ergebnisvergleich analytischer Berechnungsbeispiele

	Fall a)	Fall b)	Fall c)	
	freitragendes Rohr	Gebirgsmitwirkung	Gebirgsmitwirkung + Initialspalt	
Umfangsspannung:	450.00	182.70	224.10	[N/mm <sup>2</sup> ]
Radialverschiebung:	3.51	1.42	1.74	[mm]

### 3.2.6 Graphisches Bemessungsverfahren nach Seeber [1]

Seeber entwickelte ein sehr übersichtliches graphisches Anwendungsdiagramm für die Bemessung von Druckschichtpanzerungen. Es basiert auf den vorhin behandelten analytischen Bemessungsverfahren und lässt sowohl die Berücksichtigung der Gebirgsmitwirkung, als auch einen Initialspalt und Temperatureffekte zu.

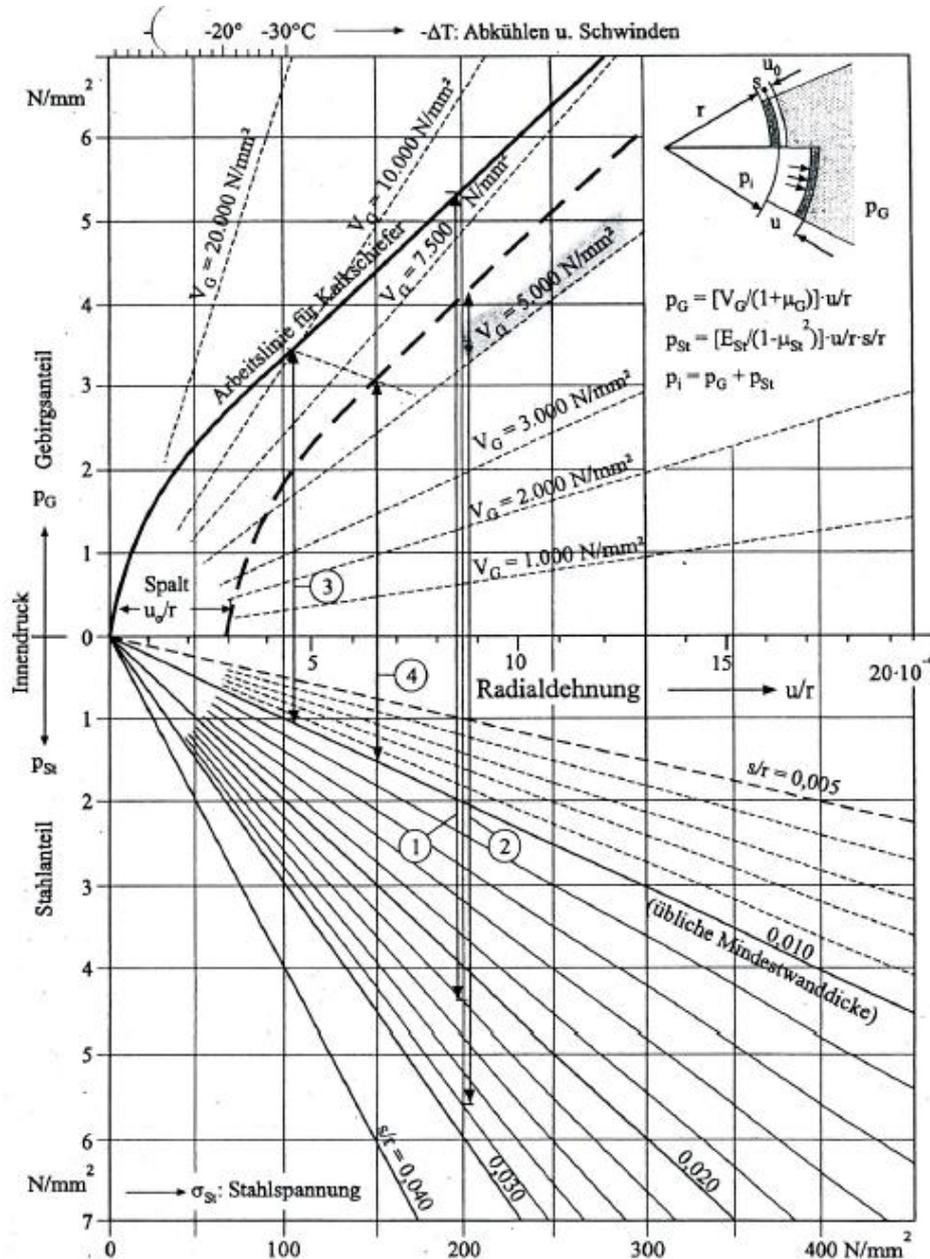


Abbildung 19: Graphische Bemessungsdiagramm nach SEEBER [4]

Für nähere Informationen über die Anwendung des Diagrammes sei der Leser auf die entsprechenden Literaturquellen [1] und [4] verwiesen.

## 3.3 Numerische Berechnungsverfahren

### 3.3.1 Allgemeines

Die analytischen Berechnungsmethoden gehen wie bereits erwähnt von einem isotropen homogenen Materialverhalten (Gebirge) mit konstanter radialsymmetrischer Bettung aus. Nur durch diese klar definierten Einschränkungen ergibt sich eine geschlossene Lösung. Um realistischere Fälle zu untersuchen, welche sich aufgrund von Inhomogenität und Anisotropie durch Störzonen oder Klüfte im Gebirge in einer unterschiedlichen Bettung und in Reibungseffekten äußern, muss man auf die Hilfe der numerischen Berechnung zurückgreifen.

Für die weiteren Untersuchungen werden 2 Finite Elemente Modelle im Programm ABAQUS 6.10 entwickelt.



Abbildung 20: LOGO Abaqus Version 6.10

Während das erste Modell (Federmodell) in einer frühen Phase dieser Arbeit zum Einsatz kommt, wird es im späteren Verlauf durch ein komplexeres Modell (Kontaktmodell) ersetzt, welches zusätzlich den Einfluss der Reibung zwischen Panzerung und Gebirge mitberücksichtigen kann. In Kapitel 3.3.3 werden die beiden Modelle und deren Eingabe kurz vorgestellt.

### 3.3.2 Berechnungskonzepte

Die angewandten Berechnungen dieser Arbeit lassen sich in folgende Berechnungskonzepte einteilen:

Tabelle 2: Berechnungskonzepte nach EN 1993-1-6:2007 (D) [10]

Berechnungskonzept	Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalengeometrie
Membrantheorietische Berechnung	Membrangleichgewicht	entfällt	perfekt
Lineare elastische Berechnung ( <b>LA</b> )	lineare Biegung und Verzerrung	linear	perfekt
Lineare elastische Verzweigungs-berechnung ( <b>LBA</b> )	lineare Biegung und Verzerrung	linear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung ( <b>GNA</b> )	nichtlinear	linear	perfekt
Materiell nichtlineare Berechnung ( <b>MNA</b> )	linear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung ( <b>GMNA</b> )	nichtlinear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen ( <b>GNIA</b> )	nichtlinear	linear	imperfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen ( <b>GMNIA</b> )	nichtlinear	nichtlinear	imperfekt

Die analytischen Berechnungsverfahren erfolgen mittels linearen elastischen Berechnungskonzepts (LA). Genauer bedeutet dies eine Berechnung mit linear elastischem Werkstoffgesetz unter Anwendung der Theorie erster Ordnung, d.h. Belastung und Gleichgewicht werden an der unverformten Ausgangsgeometrie berechnet.

Die numerischen Berechnungen der FE-Methode erfolgen je nach untersuchtem Bemessungsfall neben der linear elastischen Berechnung (LA) auch noch mit folgenden Berechnungskonzepten:

- Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)
- Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

Dabei kommt -wie in Tabelle 2 gezeigt- in GNA die Berechnung am verformten System (ähnlich der Theorie zweiter Ordnung) zum Einsatz. Bei GMNA kommt zusätzlich zur geometrischen Nichtlinearität ein nichtlineares (elasto-plastisches) Materialgesetz für den Stahl zum Einsatz.

Eine Berechnung mit linearem Geometrieverhalten (Theorie erster Ordnung) wird in den Berechnungen und deren Bezeichnung mittels des Kürzels LGEOM bezeichnet. Auf nichtlineares Geometrieverhalten (ähnlich der Theorie zweiter Ordnung) wird mit dem Kürzel NLGEOM hingewiesen. Eine Berechnung mit elastischem Werkstoffgesetz

wird mit EL bezeichnet, auf eine Berechnung mit plastischem Werkstoffgesetz weist das Kürzel PL hin.

### 3.3.2.1 Glättungseffekt

Durch das nichtlineare Geometrieverhalten (nichtlineare Schalentheorie) kommt es beim Rohr unter konstantem Innendruck zum sogenannten Glättungseffekt. Dieser beschreibt, wie in Abbildung 21 schematisch gezeigt, das Bestreben des Rohres bei unsymmetrischer Verformung (radial) in seine kreisrunde Ausgangsform zurückzukehren. Diese Glättung ist dem Effekt der Theorie zweiter Ordnung ähnlich und wirkt sich günstig auf den Spannungszustand (Sekundärbiegespannungen) aus.

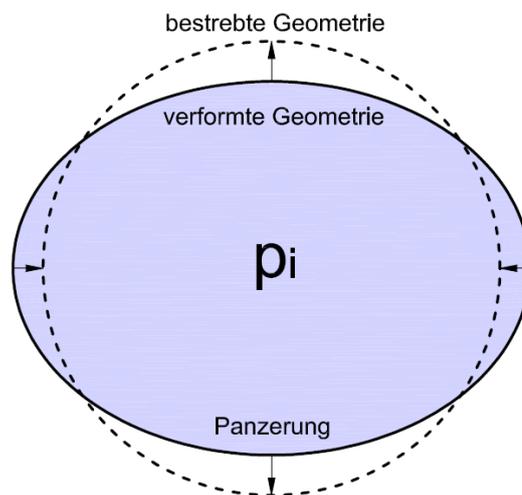


Abbildung 21: Glättungseffekt am Rohr

### 3.3.3 Die FE-Modelle

#### 3.3.3.1 Modellierung der Panzerung

**Geometrie:** Die Panzerung der beiden Modelle wird als 1 Meter breite Halbschale geometrisch definiert. Durch entsprechende Symmetrielagerungen (Y-Symmetrie) wird damit der gesamte Rohrumfang simuliert. Die Wahl einer Halbschale ist für die Berechnung der untersuchten Bettungsfälle (siehe Kapitel 0) ausreichend und ergibt eine Einsparung an Rechenleistung durch Reduzierung der Elementanzahl. Das Modell ist in Längsrichtung an beiden Enden durch Symmetrielager (Z-Symmetrie) gehalten, wodurch der ebene Formänderungszustand (EF) erzeugt wird.

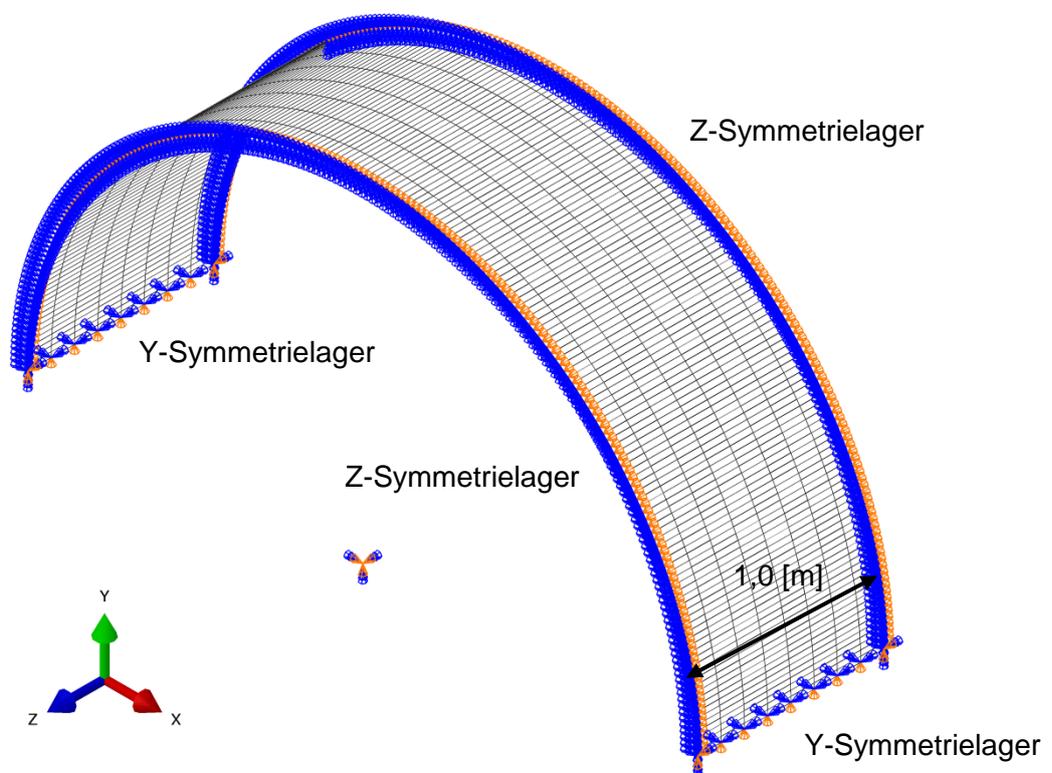


Abbildung 22: Geometrie der Panzerungsmodells mit Randbedingungen

Um das Modell für Untersuchungen und Parameterstudien möglichst variabel und vielseitig zu machen, erfolgte die Eingabe des Modells nicht über die graphische Benutzeroberfläche Abaqus/CAE, sondern über die manuelle Erstellung des Inputfiles. Die Geometrie (Rohrdurchmesser) wird dabei in einem einzigen Eingabebefehl über 2 horizontale Umfangspunkte in einem Zylinderkoordinatensystem definiert. Die gesamte Geometrie, die Netzteilung und die Elementzuweisung bauen auf dieser Eingabe auf und das Modell erstellt sich automatisch schrittweise.

**Netzteilung:** Die Halbschale wurde in Umfangsrichtung in 200 Elementreihen aufgeteilt. Die Längsrichtung (1m) teilt sich in 8 Elementreihen. Daraus ergibt sich eine Gesamtelementanzahl von  $200 * 8 = 1600$  Elementen für die Berechnung der Panzerung.

**Elementtyp:** Die Panzerung stellt eine deformierbare Schalenstruktur dar. Der gewählte Elementtyp in ABAQUS ist ein Schalenelement und trägt die Bezeichnung S4.

Laut ABAQUS 6.10 Documentation, Abaqus Analysis User's Manual 26.6.7 [5] ist der Elementtyp folgend definiert:

S4: Stress/displacement element, 4-node general-purpose shell, finite membrane strains

### Numbering of integration points for output

#### Stress/displacement analysis

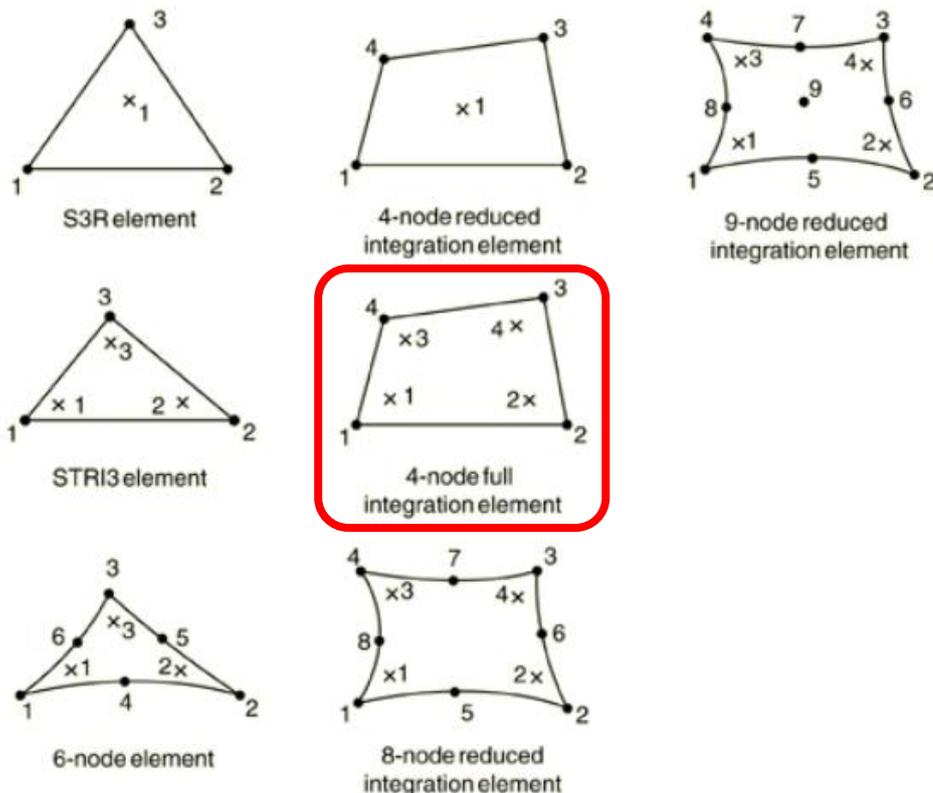


Abbildung 23: Angewandtes Schalenelement S4, Knoten, Integrationspunkte [5]

Weiteres wurde jede einzelne Elementreihe und Knotenreihe in Umfangsrichtung in eigene Sets zugeordnet. Dadurch lässt sich jede der Element-/Knotenreihe einzeln ansprechen und entsprechende Eigenschaften oder Belastungen durch Parameter zuweisen. Die Parameter lassen sich über die zum Eingabefile zugehörigen Excel-Dateien entsprechend einfach definieren.

Durch diese Art der Programmierung sind gewisse Eigenschaften des Modells in seiner Umfangsrichtung variabel definierbar und es lässt sich eine in Umfangsrichtung variable Bettung, Reibungsbeiwerte oder Belastung definieren.

Diese Art der Programmierung ist besonders für Parameterstudien geeignet.

Die entsprechenden grundlegenden ABAQUS Eingabebefehle zur Eingabe der Panzerung (in Eingabereihenfolge) lauten:

```
*NODE, System=C
*NGEN, Line=C, System=C
*NCOPY
*NFILL
*ELEMENT, type=S4
*ELGEN
*NSET, generate
*ELSET, generate
*PARAMETER
```

Für genauere Informationen über die Eingabe siehe Inputfile (Anhang C).

### 3.3.3.2 Felsmodellierung – Interaktion Panzerung/Fels

Die Modellierung der Panzerung als Schale erfolgt bei beiden FE-Modellen gleich. Bei der Gebirgsbettung unterscheiden sich die Modelle. Keines der beiden stellt den Fels als Kontinuumkörper dar, sondern bedient sich anderer ingenieurmäßiger Techniken das Gebirgsverhalten entsprechend abzubilden. Folgend werden die beiden Modelle näher erläutert:

#### a) Federmodell (FM)

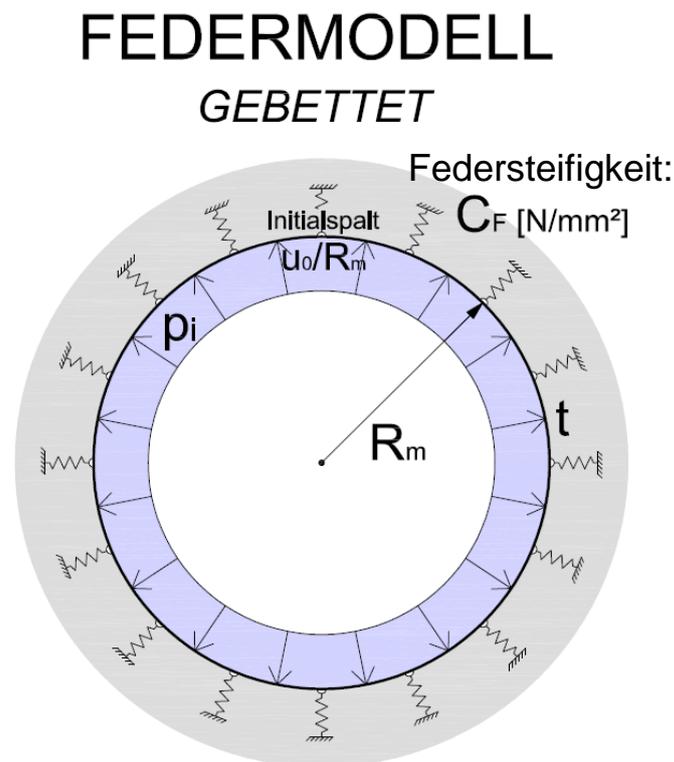


Abbildung 24: Systemskizze Federmodell

Beim Federmodell wird die Bettung über Radialfedern simuliert. Dabei sind Radialfederelementreihen jeder einzelnen der 201 Knotenreihen der Panzerung in Umfangsrichtung zugewiesen.

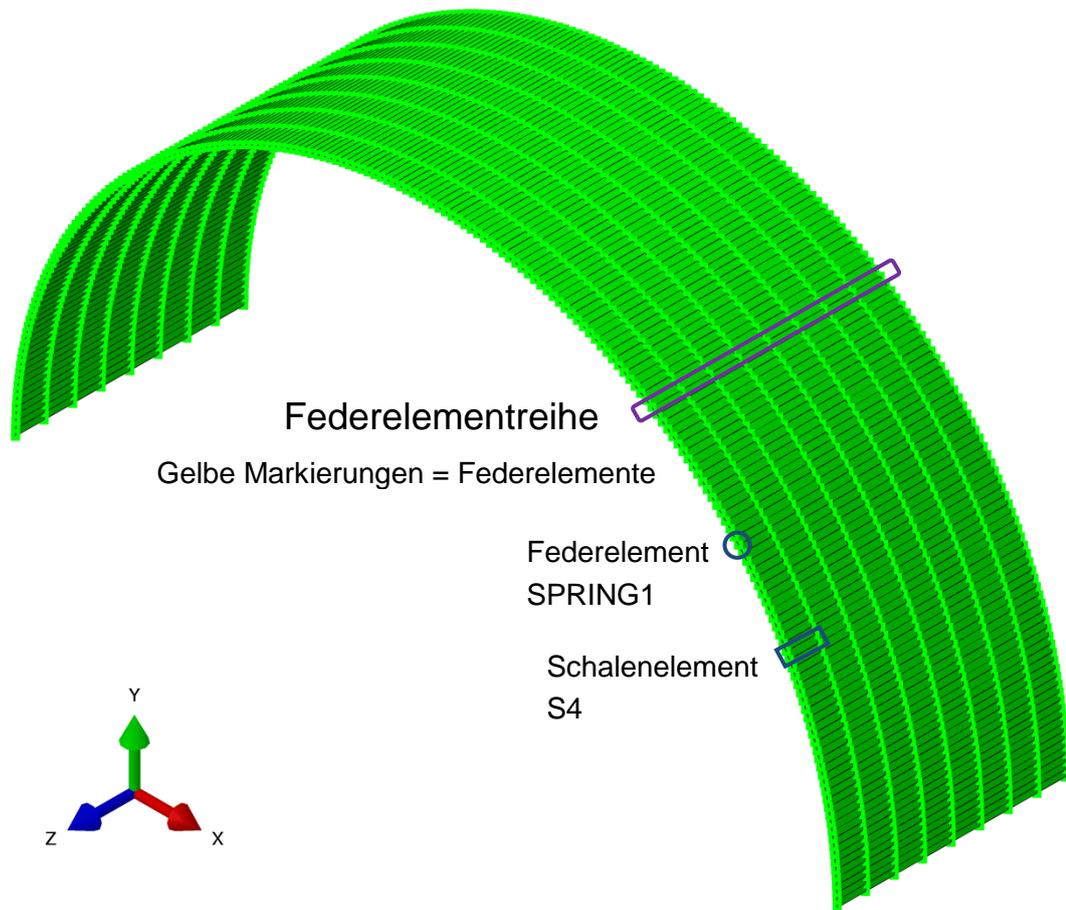


Abbildung 25: Schalenelemente, Federelemente

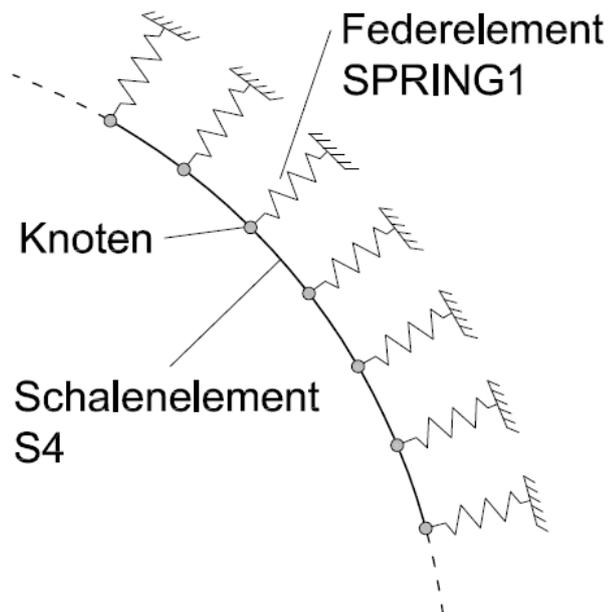


Abbildung 26: FE-Schalenmodell, Detail 2D

Befehl:

```
*ELEMENT, type=spring1
```

Die Federsteifigkeit jeder Federelementreihe ist durch Parameter bestimmt. Dadurch lässt sich jeder freidefinierbare Bettungsverlauf eingeben. Die Bettung ist über die tabellarische Eingabe der Arbeitslinie der Feder definiert und ein Initialspalt wird über einen Leerweg der Feder simuliert. Aufgrund der fehlenden Interaktion in tangentialer Richtung kann mit diesem Modell keine Reibung zwischen Stahlpanzerung und Gebirgsmantel berücksichtigt werden.

Befehl:

```
*SPRING, nonlinear
```

Anmerkung:

Versuche, die Reibung durch tangential ausgerichtete Federn zu simulieren, scheiterten, da die Größe der durch die Reibung übertragenen Kräfte laut Reibungsgesetz bekanntlich von der Normalkomponente abhängig ist. Dies kann nur erzielt werden, wenn die radiale Federkomponente (Bettung) durch eine Subroutine während des Berechnungsvorganges ausgelesen wird und für die Bestimmung der tangentialen Federkraft herangezogen wird. Dieses Vorhaben erwies sich als äußerst schwierig und zeitaufwendig und wurde nach bestimmter Zeit aufgegeben.

Aus diesem Grund musste ein neues Modell entwickelt werden, um den Einfluss der Reibung in die Berechnung mit einbeziehen zu können.

### **b) Kontaktmodell (KM)**

Die Bettungssimulation im Kontaktmodell basiert auf anderer Funktionsweise. Es ist in der Lage, auch den Einfluss der Reibung zwischen Panzerung und umgebenden Gebirgsmantel zu erfassen.

Neben der Panzerung als deformierbare Schale wird geometriedeckend eine starre, nicht verformbare Schale definiert.

Befehl:

```
*ELEMENT, type=R3D4
```

Diese tritt mittels Kontaktpaar-Interaktion mit der Panzerung in Verbindung. Um das Kontaktpaar zu erstellen, werden dem Modell interagierende Oberflächen, so genannte „contact pairs“, zugeteilt. Um die Bettung und Reibung zwischen Rohr und dem Gebirgsmantel zu simulieren, werden dem Kontaktpaar (Knoten-Oberflächen

Interaktion) Interaktionseigenschaften in radialer und tangentialer Richtung zugewiesen. Die Reibung wird dabei über die Eingabe des Reibungskoeffizienten  $\mu$  ( $\mu$ ) angegeben und die Bettung in radialer Richtung erfolgt über die tabellarische Eingabe einer „Pressure-Overclosure“-Bedingung. Ein Umfangsspalt wird wiederum als Leerweg in der „Pressure-Overclosure“-Bedingung berücksichtigt.

Die zugehörigen Befehlen lauten:

\*Surface interaction

\*Friction

\*Surface Behavior, Pressure-Overclosure=TABULAR

\*Contact Pair, interaction="xx", type=NODE TO SURFACE

Um eine in Umfangsrichtung frei veränderliche Bettung zu simulieren wird jede der 200 Elementreihen in Umfangsrichtung einzeln angesprochen und die entsprechende Bettungssteifigkeit und Reibungsbeiwert in der Interaktion dem Kontaktpaar zugewiesen.

Bei Belastung der Panzerung durch Innendruck dehnt sich das Rohr aus, penetriert dabei durch die starre Schale und aktiviert die definierten Kontaktbedingungen.

### 3.3.3.3 *Belastungsmodell*

Die Belastung durch den Innendruck wird je nach Modell als Dload bzw. als Dsload aufgebracht. Beide Lasttypen sind gleichverteilte Flächenlasttypen, wobei die Dload auf ein Element angreift, eine Dsload einer vorher definierten Oberfläche zugewiesen wird.

Die zugehörigen Befehle lauten:

\*DLOAD

\*DSLOAD

#### a) **Modell mit konstanter Innendruckbelastung**

Dieses Lastmodell kommt bei dem anfänglich entwickelten Federmodell zur Anwendung. Die gesamte Innenseite der Panzerung wird als eine Oberfläche definiert und dieser mittels Dsload eine konstante Innendruckbelastung zugewiesen.

### **b) Modell mit variabler Innendruckbelastung**

Hier wird auch die Belastung mittels Dload als variabler Parameter der entsprechenden Elementreihe zugewiesen. Dadurch ist auch die Eingabe einer radial unsymmetrischen Innendruckbelastung möglich. Dieses Modell mit veränderlichem Druck kommt sowohl beim Federmodell als auch beim Kontaktmodell zum Einsatz.

#### **3.3.3.4 Materialverhalten**

Die Berechnung der Panzerung erfolgt auch mittels 2 Materialmodellen. Die Gebirgstragwirkung wird sowohl im Federmodell auch als im Kontaktmodell indirekt mit den entsprechenden mechanischen Modellen simuliert. In der elastischen Parameterstudie wird für die Panzerung ein elastisches Materialmodell verwendet.

Der zugehörigen Befehle lauten:

\*MATERIAL

\*ELASTIC

Die plastische Parameterstudie dagegen erfolgt mit einem bilinear-plastischen Materialmodell der Panzerung.

Der zugehörigen Befehle lauten:

\*MATERIAL

\*ELASTIC

\*PLASTIC

Die Materialgesetze werden in tabellarischer Form eingegeben.

#### **3.3.3.5 Geometrieverhalten**

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, erfolgen die FE-Berechnungen mit:

- Linearem Geometrieverhalten (LGEOM)
- Nichtlinearem Geometrieverhalten (NLGEOM)

### 3.4 Verifikation der analyt. Berechnung zur FE-Simulation

Der nächste Schritt ist die Verifikation der analytischen Berechnung (siehe Abschnitt 3.2.5) und der Finite Elemente Modelle. Die Berechnungen werden mit den gleichen Kenngrößen und Belastungen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend miteinander verglichen.

Untersucht wird Fall (c) aus dem Abschnitt 3.2.5 der analytischen Berechnung.

#### 3.4.1 Eingangsparmeter

Die Eingangsparmeter für die Berechnung (c) sind:

Innendruckbelastung:	$p_i = 50 \text{ bar} \equiv 5,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Elastizitätsmodul Stahl:	$E_S = 210000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Mod. Elastizitätsmodul Stahl (EF):	$E_S^* = 230769 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Verformungsmodul Gebirge:	$V_F^* = 5000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Mittlerer Rohradius:	$R_m = 1800 \text{ [mm]}$
Wandstärke:	$t = 20 \text{ [mm]}$
Initialspalt:	$u_0 = 0,54 \text{ [mm]}$

#### 3.4.2 Vergleich analyt. Berechnung mit Federmodell bei konstanter Bettung und LGEOM

##### 3.4.2.1 Umfangsspannung:

Analytisch:	$\sigma_{S,t,analyt.} = 224,10 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Federmodell (FM):	$\sigma_{S,t,FM,LGEOM} = 223,62 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
	$\Delta\sigma = \frac{223,74}{223,62} = 1,0005 \cong 0,05 \text{ [%]}$

##### 3.4.2.2 Radialverschiebung:

Analytisch:	$\Delta u_{S,r,analyt.} = 1,74 \text{ [mm]}$
Federmodell (FM):	$\Delta u_{S,r,FM,LGEOM} = 1,74 \text{ [mm]}$
	$\Delta u = \frac{1,74}{1,74} = 1,0 \cong 0,00 \text{ [%]}$

### 3.4.3 Vergleich analyt. Berechnung mit Federmodell bei konstanter Bettung und NLGEOM

#### 3.4.3.1 Umfangsspannung:

Analytisch:  $\sigma_{S,t,analyt.} = 224,10 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Federmodell (FM):  $\sigma_{S,t,FM,NLGEOM} = 223,82 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$$\Delta\sigma = \frac{223,82}{223,74} = 1,0004 \cong 0,04 \text{ [%]}$$

#### 3.4.3.2 Radialverschiebung:

Analytisch:  $\Delta u_{S,r,analyt.} = 1,74 \text{ [mm]}$

Federmodell (FM):  $\Delta u_{S,r,FM,NLGEOM} = 1,75 \text{ [mm]}$

$$\Delta u = \frac{1,75}{1,74} = 1,0058 \cong 0,58 \text{ [%]}$$

### 3.4.4 Vergleich analyt. Berechnung mit Kontaktmodell bei konstanter Bettung, Reibung $\mu = 0$ und LGEOM

#### 3.4.4.1 Umfangsspannung:

Analytisch:  $\sigma_{S,t,analyt.} = 224,10 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Kontaktmodell (KM):  $\sigma_{S,t,KM,LGEOM} = 223,51 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$$\Delta\sigma = \frac{223,74}{223,51} = 1,0010 \cong 0,10 \text{ [%]}$$

#### 3.4.4.2 Radialverschiebung:

Analytisch:  $\Delta u_{S,r,analyt.} = 1,74 \text{ [mm]}$

Kontaktmodell (KM):  $\Delta u_{S,r,KM,LGEOM} = 1,74 \text{ [mm]}$

$$\Delta u = \frac{1,74}{1,74} = 1,0 \cong 0,00 \text{ [%]}$$

### 3.4.5 Vergleich analyt. Berechnung mit Kontaktmodell bei konstanter Bettung, Reibung $\mu = 0$ und NLGEOM

#### 3.4.5.1 Umfangsspannung:

$$\text{Analytisch:} \quad \sigma_{S,t,analyt.} = 224,10 \quad [N/mm^2]$$

$$\text{Kontaktmodell (KM):} \quad \sigma_{S,t,KM,NLGEOM} = 223,71 \quad [N/mm^2]$$

$$\Delta\sigma = \frac{223,74}{223,71} = 1,0001 \cong 0,01 \quad [\%]$$

#### 3.4.5.2 Radialverschiebung:

$$\text{Analytisch:} \quad \Delta u_{S,r,analyt.} = 1,74 \quad [mm]$$

$$\text{Kontaktmodell (KM):} \quad \Delta u_{S,r,KM,NLGEOM} = 1,75 \quad [mm]$$

$$\Delta u = \frac{1,75}{1,74} = 1,0058 \cong 0,58 \quad [\%]$$

### 3.4.6 Ergebnisvergleich

Analytisch Berechnung	FE-Berechnung (Modelle)				
	Federmodell LGEOM	Federmodell NLGEOM	Kontaktmodell LGEOM	Kontaktmodell NLGEOM	
	$\sigma_{S,t,FM,LGEOM} = 223.62$	$\sigma_{S,t,FM,NLGEOM} = 223.82$	$\sigma_{S,t,KM,LGEOM} = 223.51$	$\sigma_{S,t,KM,NLGEOM} = 223.71$	
$\Delta u_{S,r,FM,LGEOM} = 1.74$	$\Delta u_{S,r,FM,NLGEOM} = 1.75$	$\Delta u_{S,r,KM,LGEOM} = 1.74$	$\Delta u_{S,r,KM,NLGEOM} = 1.75$	[mm]	
$\sigma_{S,t,analyt.} = 224.10$	0.05	0.04	0.10	0.10	[%]
$\Delta u_{S,r,analyt.} = 1.74$	0.00	0.58	0.00	0.58	[%]

Die Übereinstimmung der analytischen Rechnung mit den FE-Modellen ist damit nachgewiesen. Die Abweichungen der Ergebnisse sind sehr gering (alle deutlich unter 1%) und können dadurch vernachlässigt werden. Auch die Rechenergebnisse beim Reibungsmodell mit Reibungskoeffizienten  $\mu > 0,00$  wurden überprüft und stimmen mit denen mit  $\mu = 0,00$  überein. Diese sind jedoch nicht weiter angeführt.

Anmerkung:

Der Vergleich LGEOM zu NLGEOM ergibt für den Fall der konstanten radialsymmetrischen Bettung bei beiden FE-Modellen eine sehr kleine Abweichung in den Ergebnissen. Erst bei veränderlichem Bettungsverlauf kommt der begünstigende Glättungseffekt bei den Biegespannungen zum Tragen und ergibt bei der Berechnung mit NLGEOM reduzierte Spannungen im Vergleich zu LGEOM. Dies wird später in Kapitel 6.5.3 näher untersucht.



## 4. Variable Bettungsverläufe

Das Thema dieser Arbeit ist die realitätsnahe Berechnung von Druckschachtpanzerungen. Dies beinhaltet im speziellen die Spannungsverteilung der Panzerung bei veränderlichem Bettungsverlauf. Bisher wurden die Berechnungen rein mit radialsymmetrischer, konstanter Bettung durchgeführt, bei denen auch analytische Rechenwege zum Ziel führen. Dies entspricht jedoch in den seltensten Fällen der Realität. Gebirge ist allgemein ein heterogenes, anisotropes Material, welches durch Zerklüftung und Störzonen der Panzerung nur ein variables Bettungsverhalten bietet. Der Verlauf der Bettung trägt maßgeblich zum Tragverhalten des Verbundsystems Panzerung-Gebirge bei. Eine weitere Komponente, welche die Spannungsverläufe beeinflusst, ist die Reibung zwischen Rohr und Fels. Diese wird bei unsymmetrischer Bettung und den daraus folgenden unterschiedlichen Verschiebungen aktiviert.

In diesem Kapitel werden 2 ingenieurmäßig angenommene Bettungsverläufe vorgestellt. Diese dienen als Basis für alle weiteren Untersuchungen und die Parameterstudien.

Die Eingabe der Felssteifigkeit erfolgt im Kontaktmodell elementreihenweise bzw. im Federmodell knotenreihenweise. Jeder Element-/Knotenreihe wird eine konstante Steifigkeit zugeteilt. Das bedeutet, dass ein veränderlicher Verlauf der Steifigkeit durch einen abgestuften Verlauf über die 200 Elementreihen beim Kontaktmodell bzw. den 201 Knotenreihen beim Federmodell angenähert wird.

### 4.1 Linearer Verlauf (ungleichmäßiger Verlauf)

Der lineare Verlauf beschreibt den Fall einer Panzerung und seinem umgebenden Gebirge mit einer allmählichen Steifigkeitsänderung ohne lokaler Störzone. Die auf das Rohr bezogene ungleiche Steifigkeitsverteilung ist daher globaler Natur.

Die radiale Steifigkeit des Felsens nimmt dabei linear im Verhältnis 10 zu 1 von der einen zur anderen Ulme des Ausbruchsquerschnittes ab. Durch die Symmetrie des Halbschalenmodells ist der Bettungsverlauf horizontal symmetrisch.

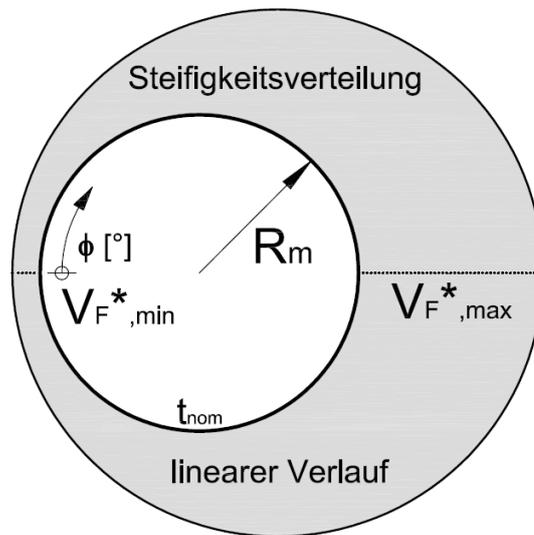


Abbildung 27: Bettungsfall Linearer Verlauf, Systemskizze

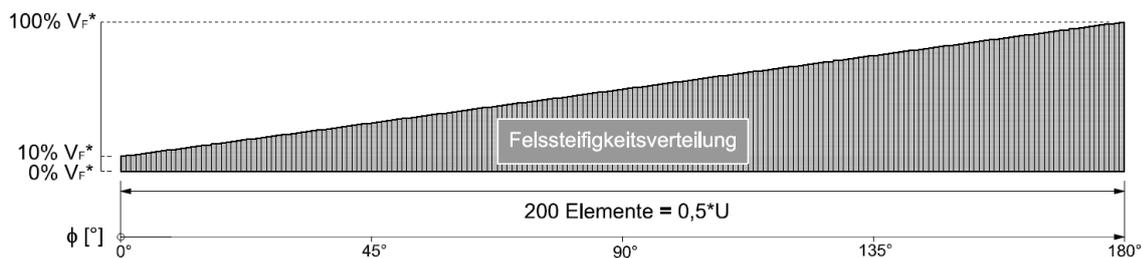


Abbildung 28: Bettungsfall Linearer Verlauf, Eingabeschema FE

## 4.2 Lokaler Sprung (Störstelle)

Dieser Bettungsfall simuliert eine sehr lokale Störzone im Gebirge auf einen Bereich von 10% der Umfangslänge. Diese Störzone soll eine mögliche Klüftung, einen Hohlraum oder eine lokale Lockergesteinszone im Gebirgsmantel darstellen. Im Störbereich beträgt die Bettung/Gebirgssteifigkeit nur 10% des Regelbereichs. Der Rest der Umfangslänge weist eine konstante Bettung/Gebirgssteifigkeit auf. Die Länge des Übergangsbereiches kann durch die Wahl der Elementreihenanzahl selbst definiert werden. In diesem Modell erstreckt sich der Übergangsbereich über 11 Elementreihen und weist je nach Rohrradius eine Länge von ca. einem halben Meter auf. Die Steifigkeitsänderung erfolgt abermals im Verhältnis 10:1.

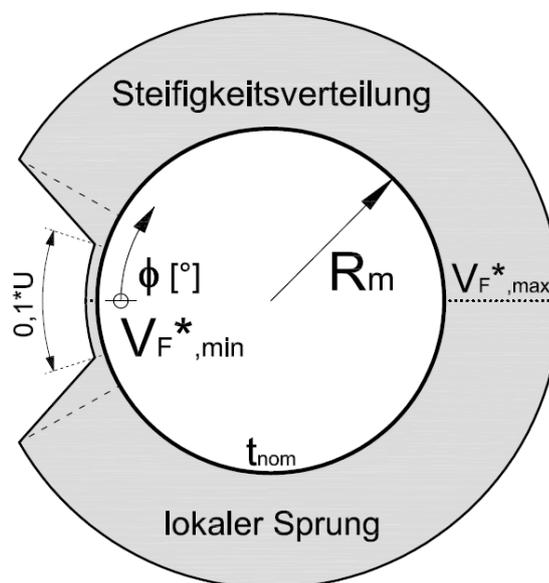


Abbildung 29: Bettungsfall Lokaler Sprung, Systemskizze

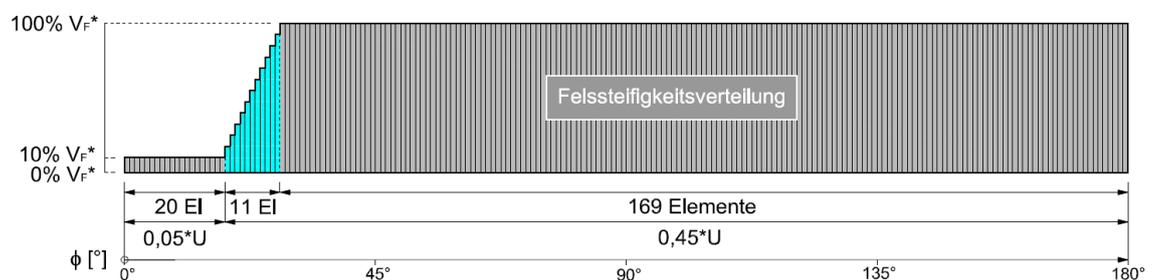


Abbildung 30: Bettungsfall Lokaler Sprung, Eingabeschema FE



## 5. Bemessungskriterien

Die derzeitige Bemessung einer Druckschachtpanzerung erfolgt auf analytischem Wege auf Basis zweier Sicherheitskriterien. Zum einen wird das umliegende Gebirge zur Lastabtragung mit einbezogen, zum anderen wird ein ideeller bzw. „außergewöhnlicher“ Bemessungsfall herangezogen, der das freitragende Rohr zur Grundlage hat. Beide Bemessungskriterien werden dabei mit Sicherheitsfaktoren auf der Widerstandsseite des Stahles beaufschlagt. Die Stahlpanzerung wird dabei auf das jeweils maßgebende Kriterium bemessen.

### 5.1 Kriterium 1: Bemessung mit Gebirgswirkung (Seeber)

Das Gebirge trägt zur Lastabtragung bei. Die Bemessung erfolgt mit doppelten Sicherheitsgedanken. Da die Gebirgseigenschaften nur lokal bestimmt werden können, sehr schwer erfassbar sind und große Streubreiten in Umfangs- und Längsrichtung des Schachtes besitzen, wird die analytische Bemessung aus Sicherheitsgründen laut Seeber für den betrachteten Bereich der Panzerung mit der lokal schwächsten festgestellten Gebirgsfestigkeit  $V_{f^*,min}$  durchgeführt. Auf der Widerstandsseite wird mittels eines Sicherheitsbeiwertes die maximale Spannungsauslastung des Stahles auf etwa 65% der Fließgrenze begrenzt. Die analytische Bemessung erfolgt dann mit radialsymmetrisch konstanter Bettung laut Berechnungsschema des Kapitels 3.2.5. Diese Bemessungsregel ist somit auf der konservativen Seite ausgelegt und berücksichtigt durch die radialsymmetrische Bettung nur die Membranspannung. Andererseits werden jedoch lokale Spannungseffekte aufgrund unterschiedlicher Bettung am Rohr nicht berücksichtigt. Diese werden daher (unter anderem) im Laufe dieser Arbeit genauer untersucht.

Kriterium:  $\sigma_{max} = k_S * f_y$  [N/mm<sup>2</sup>]

Bei Sicherheitsbeiwert Seeber:  $k_S = 0,65$  [-]

$\sigma_{max} = 0,65 * f_y$  [N/mm<sup>2</sup>]

### 5.2 Kriterium 2: freitragende Bemessung

Für den ideellen Fall des kompletten Versagens des umliegenden Gebirgsmantels wird das Kriterium der freitragenden Bemessung eingeführt. Auf lokal begrenztem Raum muss somit die Panzerung der gesamten Innendruckbelastung standhalten. Dies stellt jedoch den außergewöhnlichen Bemessungsfall dar und wird mit einem weitaus kleineren Sicherheitsfaktor auf der Widerstandsseite des Stahles berücksichtigt. Der einzige beanspruchte Bauteil ist damit das Stahlrohr mit seinen gesicherten Festigkeitskennwerten. Das Stahlrohr darf dabei in der Regel auf etwa 90% der Fließgrenze ausgelastet werden. Das freitragende Kriterium berücksichtigt, wie bereits erwähnt, nur den außergewöhnlichen Fall des lokalen Versagens des Gebirgsmantels

und seiner Mitwirkung zur Lastabtragung. Demnach ist dieses Kriterium „zusätzlich“ zu erfüllen, sollte aber nicht zur globalen Bemessung der Panzerung im maßgebenden Bemessungskriterium Seeber herangezogen werden.

Kriterium:  $\sigma_{max} = k_f * f_y$  [N/mm<sup>2</sup>]

Sicherheitsbeiwert freitragend:  $k_f = 0,90$  [-]

$\sigma_{max} = 0,90 * f_y$  [N/mm<sup>2</sup>]

### 5.3 Abgrenzungsdiagramme Seeber/freitragend

Um den Zusammenhang und Einfluss der beiden Bemessungskriterien und der einfließenden Parameter in der analytischen Bemessung besser veranschaulichen zu können, wurden spezielle Abgrenzungsdiagramme entwickelt.

Die Diagramme stellen die maximal aufbringbare Innendruckbelastung in Abhängigkeit der Felssteifigkeit und des Verhältnisses des Rohrradius zur Rohrwandstärke, welche beide Kriterien erfüllt, graphisch dar.

Die für die analytisch zulässige Innendruckberechnung nach Seeber direkt einfließenden Kenngrößen sind:

- Verwendete Stahlgüte mit zugehöriger Fließgrenze:  $f_y$
- E-Modul Stahl im Ebenen Formänderungszustand (EF):  $E_S^*$
- Spaltdehnmaß:  $\varepsilon_{\Delta T} = \frac{u_0}{R_m}$
- Widerstandsseitiger Sicherheitsbeiwert Seeber:  $k_S$
- Widerstandsseitiger Sicherheitsbeiwert freitragend:  $k_f$
- Felssteifigkeit:  $V_F^*$
- Mittlerer Rohrradius:  $R_m$
- Rohrwandstärke:  $t$

Um die Ergebnisse in einem überschaubaren Diagramm darstellen zu können müssen die Parameter analysiert und in konstante und variable Größen eingeteilt werden.

Eine übersichtliche und aussagekräftige Veranschaulichung liefert die Darstellung in Abhängigkeit von zulässigem Innendruck, Felssteifigkeit  $V_F$  und dem Verhältnis  $R_m/t$ . Diese Kenngrößen sind die variablen Parameter im Diagramm. Je Diagramm sind die verwendete Stahlgüte samt Fließgrenze, die Sicherheitsbeiwerte und das Spaltdehnmaß konstant angenommene Größen.

### 5.3.1 Herleitung der reinen Abhängigkeit von $V_F^*$ und $R_m/t$

Dieses Kapitel zeigt die reine Abhängigkeit der Diagramme von der Felssteifigkeit  $V_F^*$  und dem geometrischen Verhältnis  $R_m/t$  bei konstant angenommenen Kennwerten der Stahlsorte mit seiner Stahlfließgrenze  $f_y$ , dem Elastizitätsmodul  $E_S^*$ , dem Umfangsspaltdehnmaß  $\varepsilon_{\Delta T}$  und den Bemessungssicherheitsfaktoren  $k_S$  und  $k_f$ .

Konstante Größen:  $f_y, E_S^*, \varepsilon_{\Delta T}, k_S, k_f$

#### ➤ Innendruckbemessung laut Seeber:

Gesamter Innendruckanteil Stahl:

$$P_{S,Gesamt} = \frac{k_S * f_y * t}{R_m} \quad [N/mm^2]$$

Innendruckanteil Stahl bis Kontakt:

$$P_{S,Kontakt} = \frac{\varepsilon_{\Delta T} * E_S^* * t}{R_m} = \frac{u_0 * E_S^* * t}{R_m^2} \quad [N/mm^2]$$

Restanteil Stahl nach Kontakt:  $P_{S,Rest} = P_{St,Gesamt} - P_{St,Kontakt} \quad [N/mm^2]$

Radiale Federsteifigkeit Stahlpanzerung:

$$C_{S,r} = \frac{E_S^* * t}{R_m^2} \quad [N/mm^3]$$

Radiale Federsteifigkeit Fels:

$$C_{F,r} = \frac{V_F^*}{(1 - \nu) * R_m} \quad [N/mm^3]$$

Innendruckanteil Gebirge entsprechend dem Steifigkeitsverhältnis:

$$P_{F,Cf} = \frac{P_{S,Rest}}{C_{S,r}} * C_{F,r} = \frac{P_{S,Rest}}{\frac{E_S^* * t}{R_m^2}} * \frac{V_F^*}{(1 - \nu) * R_m} = \frac{P_{S,Rest} * V_F^* * R_m}{(1 - \nu) * E_S^* * t} \quad [N/mm^2]$$

Gesamt zulässiger Innendruck:  $P_{zul.,Seeber} = P_{S,Kontakt} + P_{S,Rest} + P_{F,Cf} \quad [N/mm^2]$

➤ Innendruckbemessung freitragende Bemessung:

Zulässiger Innendruck freitragend:

$$P_{zul.,freitr.} = \frac{k_f * f_y * t}{R_m} \quad [N/mm^2]$$

### 5.3.2 Abgrenzungsdiagramme

Jedes Diagramm gilt somit für eine bestimmte Stahlsorte, ein vordefiniertes Spaltdehnmaß und die zu den Bemessungskriterien zugehörigen Sicherheitsbeiwerte. Aus den Diagrammen können für diese Parameter der maximal mögliche aufzubringende Innendruck in reiner Abhängigkeit von der Felssteifigkeit  $V_F^*$  und dem Verhältnis  $R_m/t$  ausgelesen werden. Sie zeigen somit auch den Übergang der beiden Bemessungskriterien in Abhängigkeit der Felssteifigkeit und gewähltem  $R_m/t$ .

Abbildung 31 zeigt ein Abgrenzungsdiagramm für folgende konstante Größen:

- Stahl S355 N
- Spaltdehnmaß  $u_0/R_m = 0,0003$
- Sicherheitsbeiwerten  $k_S=0,65$  und  $k_f=0,90$ .

Die grün markierte Fläche stellt jenen Bereich dar, in dem die Bemessung nach Seeber maßgebend ist. Das freitragende Bemessungskriterium wird mit der blau hinterlegten Fläche als maßgebend angezeigt. Die Linie, die diese Bereiche trennt, ist der

Übergang der beiden Bemessungskriterien. Bewegt man sich entlang dieser Linie, gelten beide als erfüllt.

Jedes Verhältnis  $R_m/t$  entspricht einer Linie. In den Diagrammen sind einige praxisrelevante Verhältnisse ausgewertet. Der linke linear ansteigende Ast stellt den zunehmend zulässigen Innendruck bei anwachsender Felssteifigkeit dar. Die Bemessung mit Gebirgsmitwirkung laut Seeber ist hier das limitierende Kriterium. Beim Übergang zum freitragenden Kriterium wird die jeweilige  $R_m/t$ -Linie durch den horizontalen Ast des neuen Bemessungslimits abgeschnitten. Ab dem Übergang ist keine weitere Druckerhöhung in der Bemessungsphilosophie der beiden Kriterien möglich.

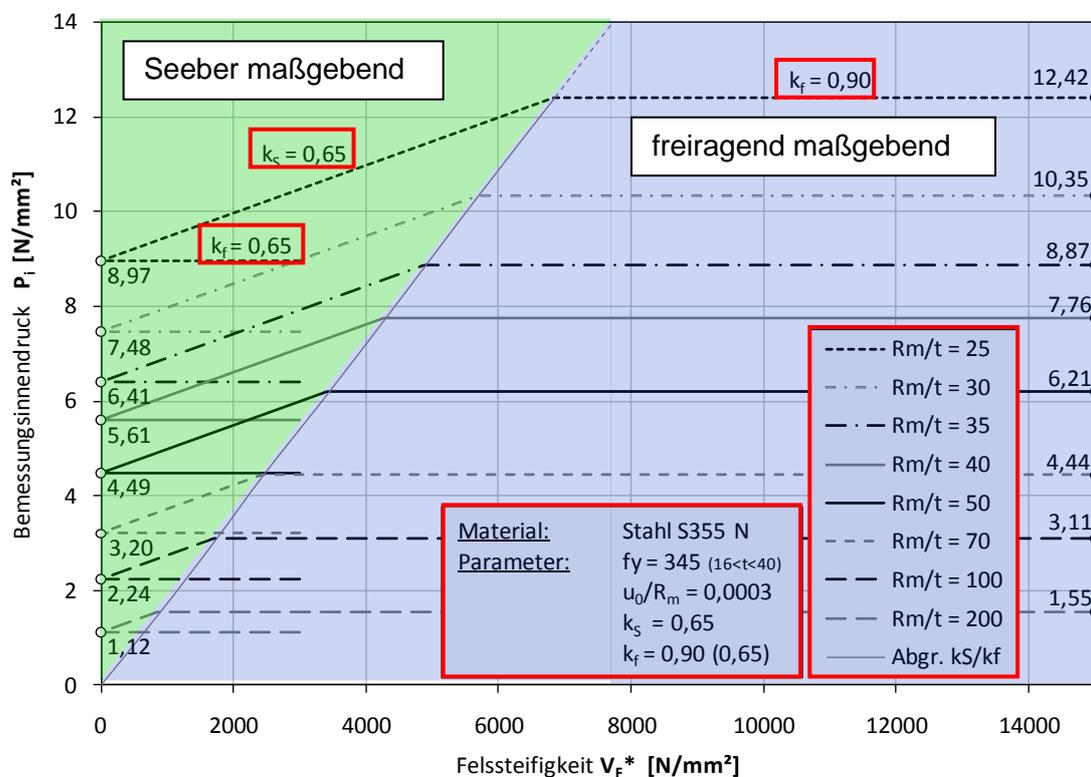


Abbildung 31: Abgrenzungsdiagramm – Bereiche maßgebender Kriterien

Die Diagramme lassen somit eine schnelle Abschätzung der maximal möglichen Innendruckbelastung zu oder lassen bei bekannter Innendruckbelastung ein entsprechendes Verhältnis  $R_m/t$  auslesen.

Sie werden auch für die Auswahl realitätsnaher Bemessungspunkte für die Parameterstudien herangezogen.

### 5.3.3 Erläuterung der Diagramme im Detail

Abbildung 32 zeigt einen Auszug eines Diagrammes mit Darstellung einer repräsentativen Kurve  $R_m/t$ .

Jede der vordefinierten Kurven  $R_m/t$  der Abgrenzungsdiagramme stellt den maximal zulässigen Innendruck des maßgebenden Bemessungslimits dar. Der aufnehmbare Innendruck setzt sich dabei aus verschiedenen Komponenten zusammen. Der unterste dunkelgraue Bereich zeigt die Initialspaltüberbrückung. Dieser Druckanteil ist unabhängig von der Felssteifigkeit konstant und wird alleine vom Stahlrohr aufgenommen. Im linken Bereich, in dem die Bemessung nach Seeber maßgebend ist, zeigt die für den Druckanteil des Stahles nach Kontakt repräsentierende Linie einen konstanten Verlauf. Der Stahl ist bis auf Sicherheitsbeiwert  $k_s=0,65$  mal Fließspannung  $f_y$  ausgenützt. Der letzte Anteil am Gesamtinnendruck ist der Druckanteil des umliegenden mitwirkenden Gebirgsmantels. Er hat bei null Felssteifigkeit keinen Anteil und steigt mit zunehmender Felssteifigkeit im Verhältnis der radialen Steifigkeiten von Fels und Panzerung zueinander. Der zulässig errechnete Innendruck nach Seeber steigt linear bis er das Drucklimit des zweiten Kriteriums erreicht. (Die strichlierte Linie würde den weiteren Verlauf der Seeber Berechnung darstellen) Das freitragende Kriterium lässt durch eine lokale Störzone keine Gebirgsmitwirkung zu und fordert die Panzerung in diesem Bereich zur alleinigen Lastabtragung des gesamten Innendruckes. Die Fließspannung darf dabei maximal bis zum Sicherheitsbeiwert  $k_f=0,90$  ausgenutzt werden. Der horizontale Ast (schwarz, kontinuierlich) im freitragenden Bereich stellt damit den Druckanteil des Stahles bei 90% Auslastung der Fließgrenze dar.

Das freitragende Bemessungskriterium als außergewöhnlicher Lastfall muss zwar entlang der gesamten Druckrohrleitungslänge erfüllt sein, trifft jedoch bei Eintreten nur für einen kleinen lokalen Bereich realistisch zu. Damit limitiert es aber den zulässigen Bemessungsinndruck der gesamten Druckschichtpanzerung. Der Großteil der Panzerung wird jedoch auch im maßgebenden Bemessungsfall des freitragenden Kriteriums durch die Gebirgsmitwirkung entlastet. Entsprechend der zugehörig steigenden Felssteifigkeit wird die durch das freitragende Kriterium reduzierte konstante Gesamtspannung (im außergewöhnlichen Fall rein durch den Stahl aufgenommen) durch die Gebirgsmitwirkung entlastet und es stellt sich für diesen Fall eine gekrümmte degressive Linie für den Druckanteil Stahl ein.



Die Kurve  $R_m/t$  ① stellt eines der ausgewerteten Verhältnisse dar. Liegt ein zu bemessender Innendruck  $P_i$  unterhalb (bzw. zwischen zwei ausgewerteten Verhältnissen), findet sich auch dafür ein exaktes Verhältnis  $R_m/t$  ② was den Innendruck bei maximaler Auslastung des Stahles unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors aufnehmen kann. Die vordefinierten Linien helfen bei der groben Abschätzung.

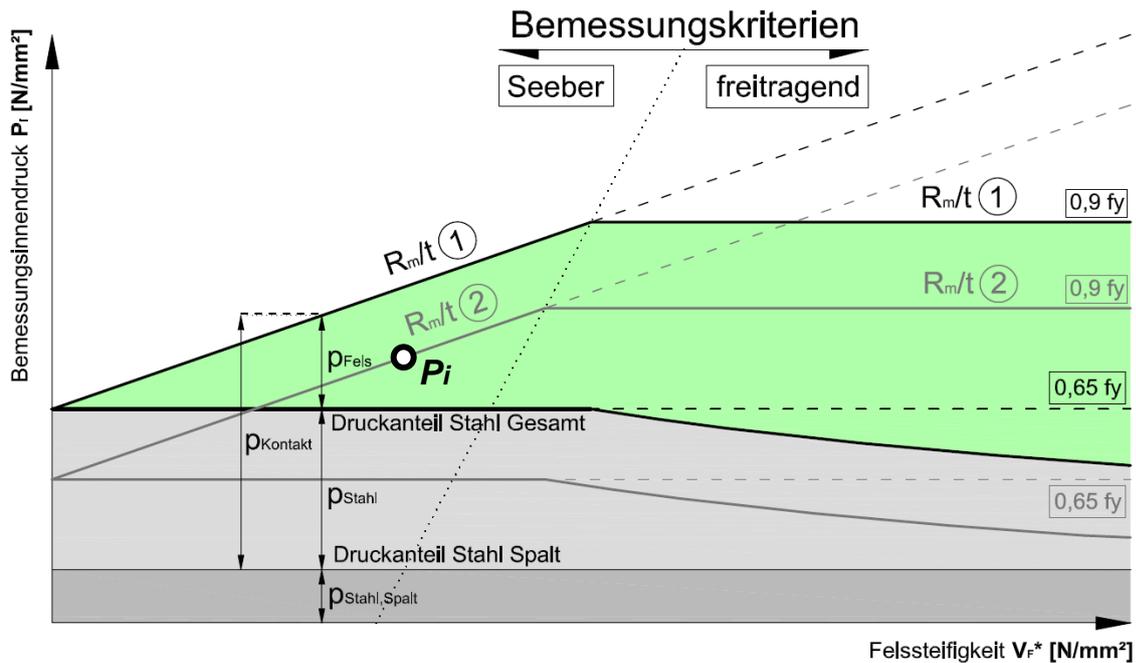


Abbildung 33: Bemessungsdiagramm, Exaktes  $R_m/t$  bei max. Stahlauslastung auswählen

### 5.3.4.3 Stahlausnützung bei Druck $P_i$ und bestimmten $R_m/t$

Diese Darstellungen zeigen das Verhalten der Druckanteile bei einem bestimmten Verhältnis  $R_m/t$ , welches die Stahlspannung nicht an den Bemessungsgrenzen (Sicherheitsfaktoren) ausnutzt. Zur Aufnahme eines bestimmten Innendruckes  $P_i < P_{i,zulässig}$  wird ein Verhältnis  $R_m/t$  gewählt (kleiner als das der maximalen Auslastung entsprechende), wodurch die Druckanteile Stahl und Fels je nach Felssteifigkeit nicht immer voll ausgenutzt werden und einen anderen Verlauf beschreiben. Die schwarzen Linien stellen das gewählte Verhältnis  $R_m/t$  ① mit seinen maximal zulässigen Innendruckanteilen dar. Die grauen Linien zeigen die Druckanteile bei gewähltem Verhältnis  $R_m/t$  ① aber einem geringeren Gesamtdruck als zulässig.

Es lassen sich bestimmte Trends für die Auswirkungen einer Innendruckabnahme erkennen. Diese werden in den folgenden 2 Diagrammen erläutert.

### a) Prozentuelle Druckabnahme

Erfolgt die Reduktion des Druckes in einer konstanten prozentuellen Druckabnahme des zulässigen Gesamtinnendruckes, so stellt sich im maßgebenden Seeber-Bereich wiederum ein horizontaler Ast des gesamten Stahldruckanteiles ein. Dies ergibt sich, da bei steigender Felssteifigkeit sowohl die Innendruckabnahme als auch der Felsanteil steigt. Im Bereich des freitragenden Bemessungskriteriums sinkt der Druckanteil Stahl bei Gebirgsmitwirkung degressiv mit steigender Felssteifigkeit. Die Innendruckabnahme wird im Verhältnis der Steifigkeiten von Fels und Panzerung zueinander von den Druckanteilen Stahl und Fels reduziert. Wichtig dabei ist, dass das Steifigkeitsverhältnis für den Druckanteil  $p_{\text{Kontakt}}$  gebildet wird. Der Druckanteil aus dem Spalt wird immer vom Stahl alleine aufgenommen und fällt nicht in die Verhältnisaufteilung ein. Abbildung 34 zeigt eine Innendruckreduktion von jeweils 25% auf  $0,75 \cdot p_{\text{Kontakt}}$ .

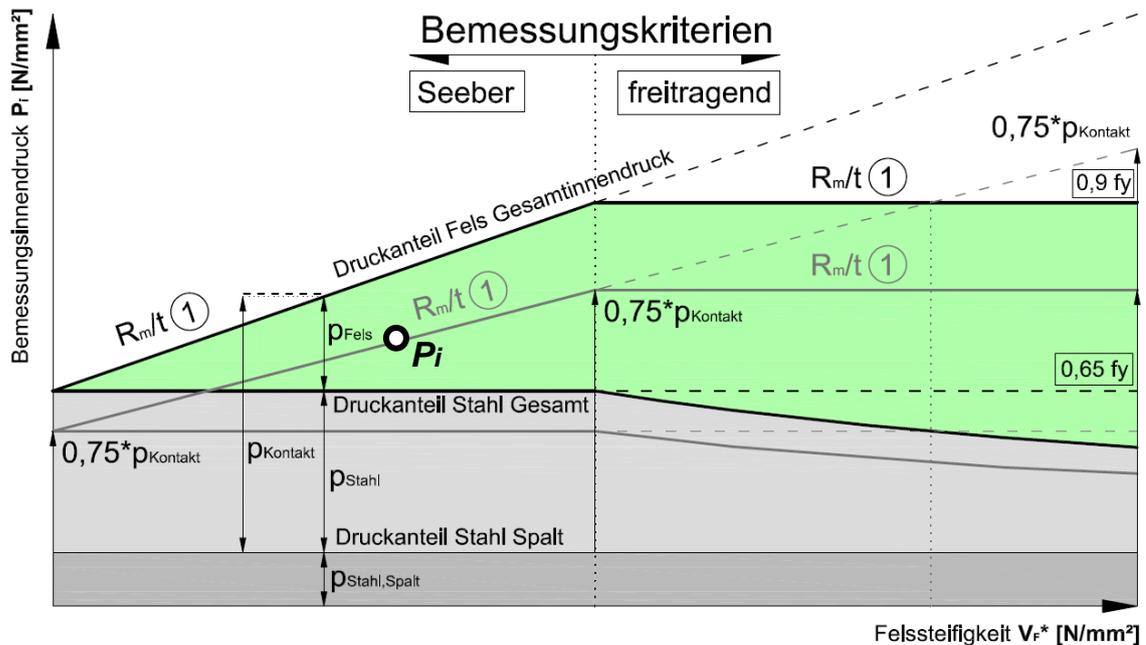


Abbildung 34: Bemessungsdiagramm, Stahlausnutzung bei prozentueller Druckabnahme

b) Konstante Druckabnahme

Erfolgt die Innendruckabnahme in konstanter Größe über den gesamten Bereich der variablen Felssteifigkeit, so ändert sich nur das Steifigkeitsverhältnis. Der Stahlanteil nimmt somit bis zum Erreichen des freitragenden Kriteriums zu.

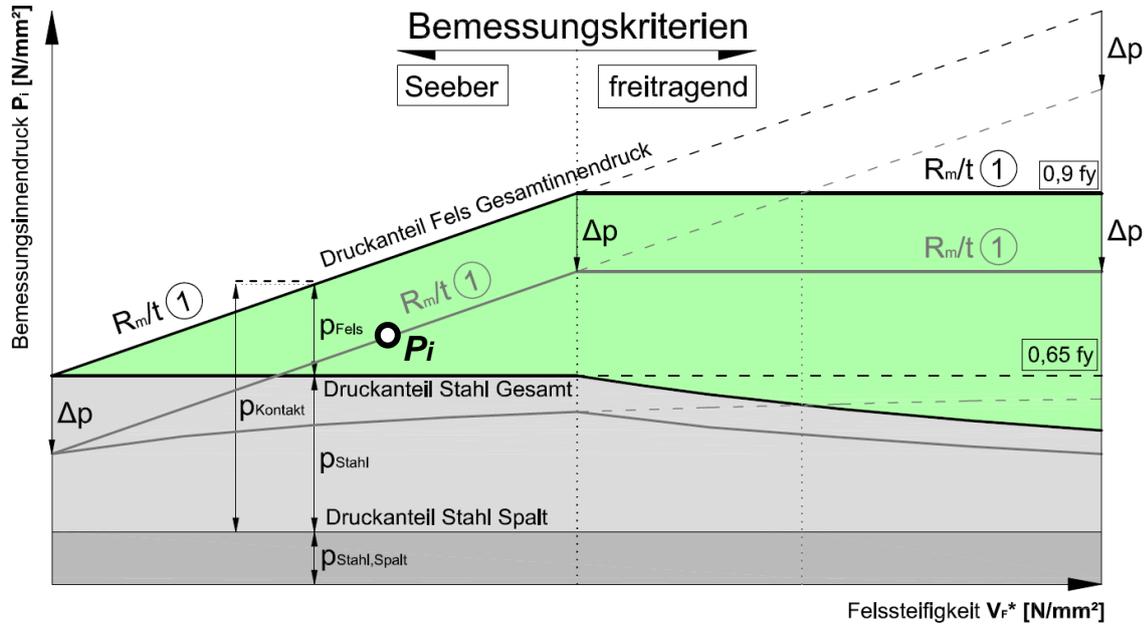


Abbildung 35: Bemessungsdiagramm, Stahlausnutzung bei konstanter Druckabnahme

### 5.3.5 Eingangsparmeter der Diagramme

Es wurden Diagramme für folgende Kennwerte erstellt:

**Stahlsorten:**

- S355 N:

Tabelle 5 — Mechanische Eigenschaften der normalgeglühten Stähle bei Raumtemperatur

Bezeichnung		Mindeststreckgrenze $R_{eH}^a$								Zugfestigkeit $R_m^a$			Mindestbruchdehnung <sup>a</sup>					
		MPa <sup>b</sup>								MPa <sup>b</sup>			%					
nach EN 10027-1 und CR 10260	nach EN 10027-2	Nennstärke mm								Nennstärke mm			$L_0 = 5,65 \sqrt{s_0}$ Nennstärke mm					
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N	1.0490	275	265	255	245	235	225	215	205	370 bis 510	350 bis 480	350 bis 480	24	24	24	23	23	23
S275NL	1.0491																	
S355N	1.0545	355	345	335	325	315	295	285	275	470 bis 630	450 bis 600	450 bis 600	22	22	22	21	21	21
S355NL	1.0546																	
S420N	1.8902	420	400	390	370	360	340	330	320	520 bis 680	500 bis 650	500 bis 650	19	19	19	18	18	18
S420NL	1.8912																	
S460N	1.8901	460	440	430	410	400	380	370	—	550 bis 720	530 bis 700	—	17	17	17	17	17	—
S460NL	1.8903																	

<sup>a</sup> Für Blech, Band und Breitflachstahl in Breiten ≥ 600 mm gilt die Richtung quer (t) zur Walzrichtung. Für alle anderen Erzeugnisse gelten die Werte in Walzrichtung (l).

<sup>b</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

Abbildung 36: Tabelle - Mechanische Eigenschaften der normalgeglühten Stähle bei Raumtemperatur [6]

- S550 Q:
- S690 Q:

Tabelle 5 – Mechanische Eigenschaften der vergüteten Stähle bei Raumtemperatur

Bezeichnung		Mindeststreckgrenze $R_{eH}$ MPa <sup>a</sup> Nenn dicke mm			Zugfestigkeit $R_m$ MPa <sup>a</sup> Nenn dicke mm			Mindestbruch- dehnung % $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$	
		nach EN 10027-1 und CR 10260	nach EN 10027-2	≥ 3 ≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150	≥ 3 ≤ 50		> 50 ≤ 100
S460Q S460QL S460QL1	1.8908 1.8906 1.8916		460	440	400	550 bis 720		500 bis 670	17
S500Q S500QL S500QL1	1.8924 1.8909 1.8984		500	480	440	590 bis 770		540 bis 720	17
S550Q S550QL S550QL1	1.8904 1.8926 1.8986		550	530	490	640 bis 820		590 bis 770	16
S620Q S620QL S620QL1	1.8914 1.8927 1.8987		620	580	560	700 bis 890		650 bis 830	15
S690Q S690QL S690QL1	1.8931 1.8928 1.8988		690	650	630	770 bis 940	760 bis 930	710 bis 900	14
S890Q S890QL S890QL1	1.8940 1.8983 1.8925		890	830	—	940 bis 1 100	880 bis 1 100	—	11
S960Q S90QL	1.8941 1.8933		960	—	—	980 bis 1 150	—	—	10

<sup>a</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

Abbildung 37: Tabelle - Mechanische Eigenschaften der vergüteten Stähle bei Raumtemperatur [8]

#### Spaltweiten:

- $u_0/R_m = 0,0003$
- $u_0/R_m = 0,0006$
- $u_0/R_m = 0,001$  (bzw. 0,0008 bei Stahl S355 N)

#### Sicherheitsbeiwerte:

- $k_S=0,65$  /  $k_f=0,90$
- $k_S=0,60$  /  $k_f=0,90$

### 5.3.6 Abgrenzungsdiagramme

In diesem Kapitel werden die ausgewerteten Diagramme für die Sicherheitsbeiwerte  $k_S=0,65$  und  $k_f=0,90$  dargestellt. Weitere ausgewertete Diagramme für den Sicherheitsbeiwert der Seeber-Berechnung  $k_S=0,60$  sind dem Anhang B zu entnehmen.

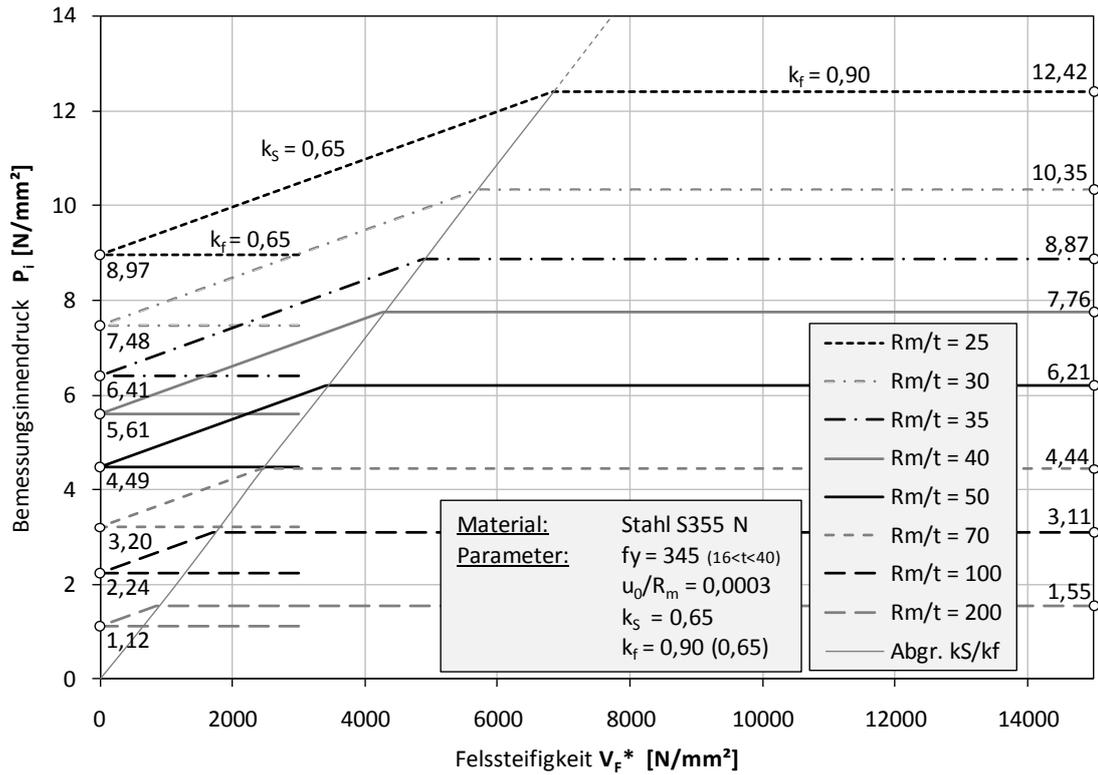


Abbildung 38: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_S=0,65$ ,  $k_f=0,90$

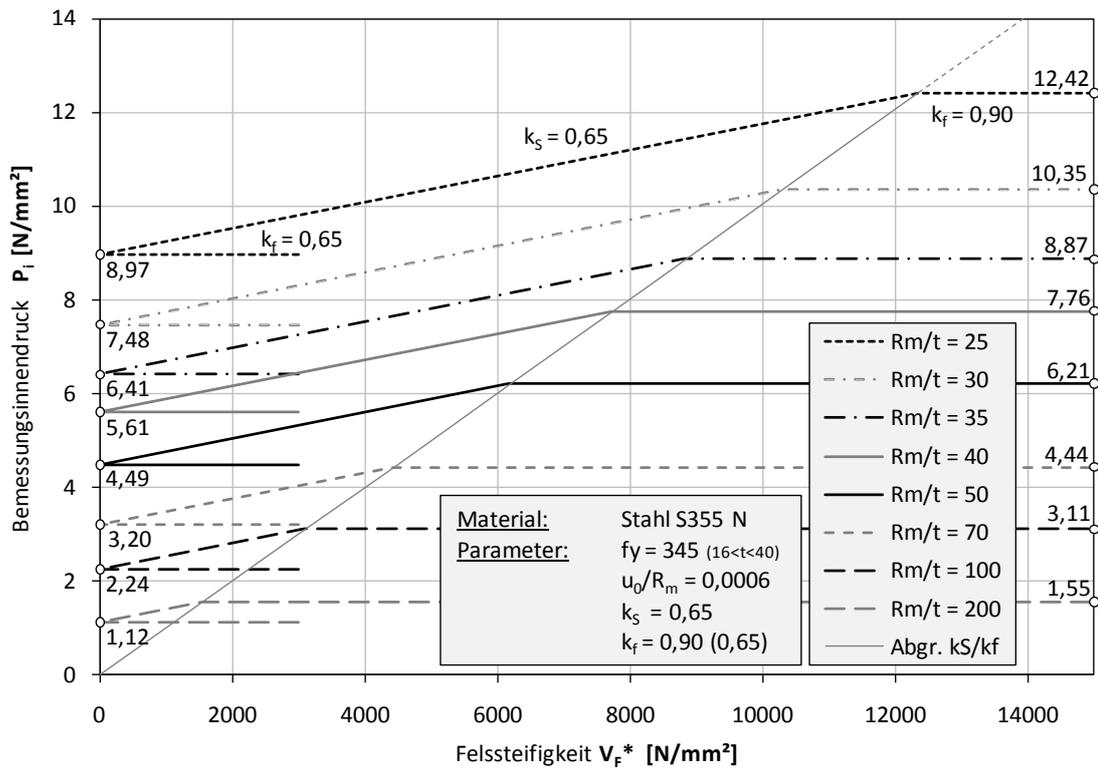


Abbildung 39: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_S=0,65$ ,  $k_f=0,90$

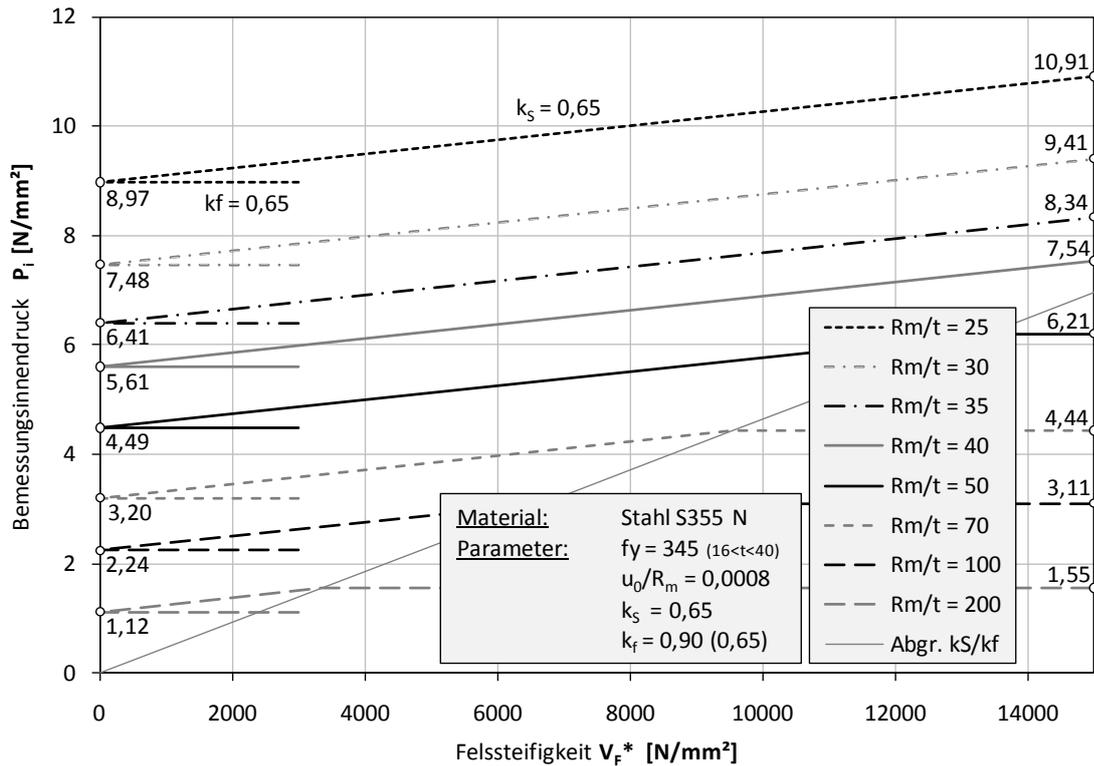


Abbildung 40: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0008$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

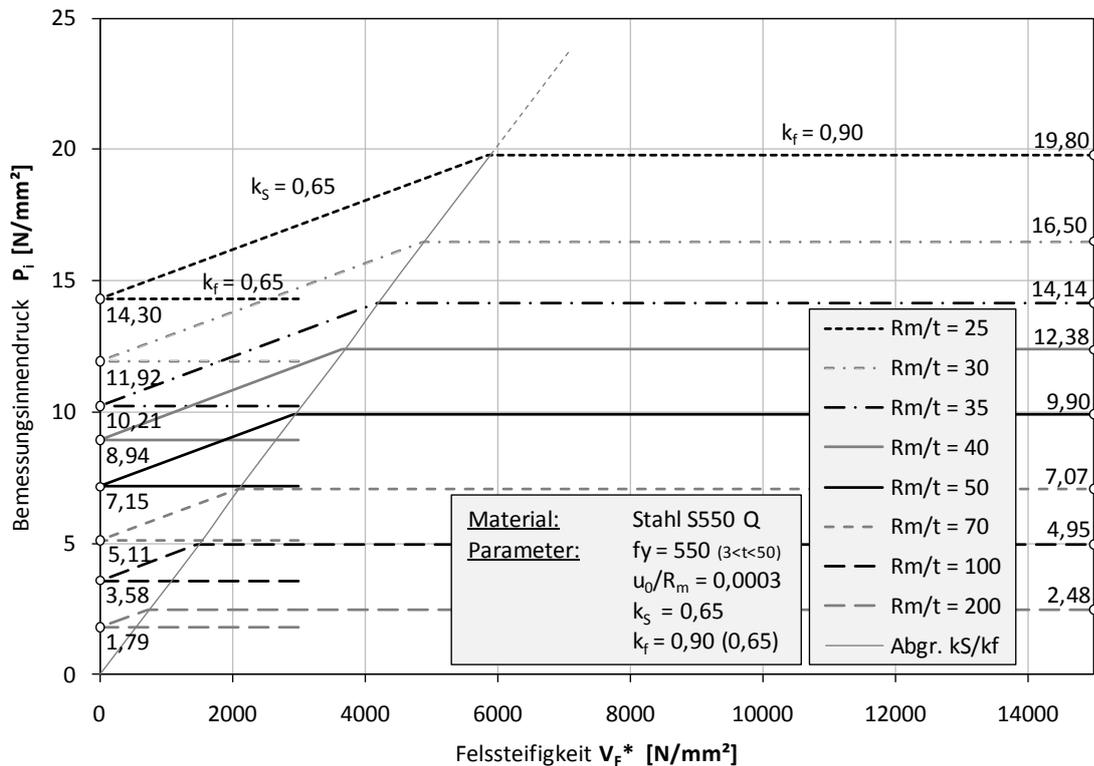


Abbildung 41: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

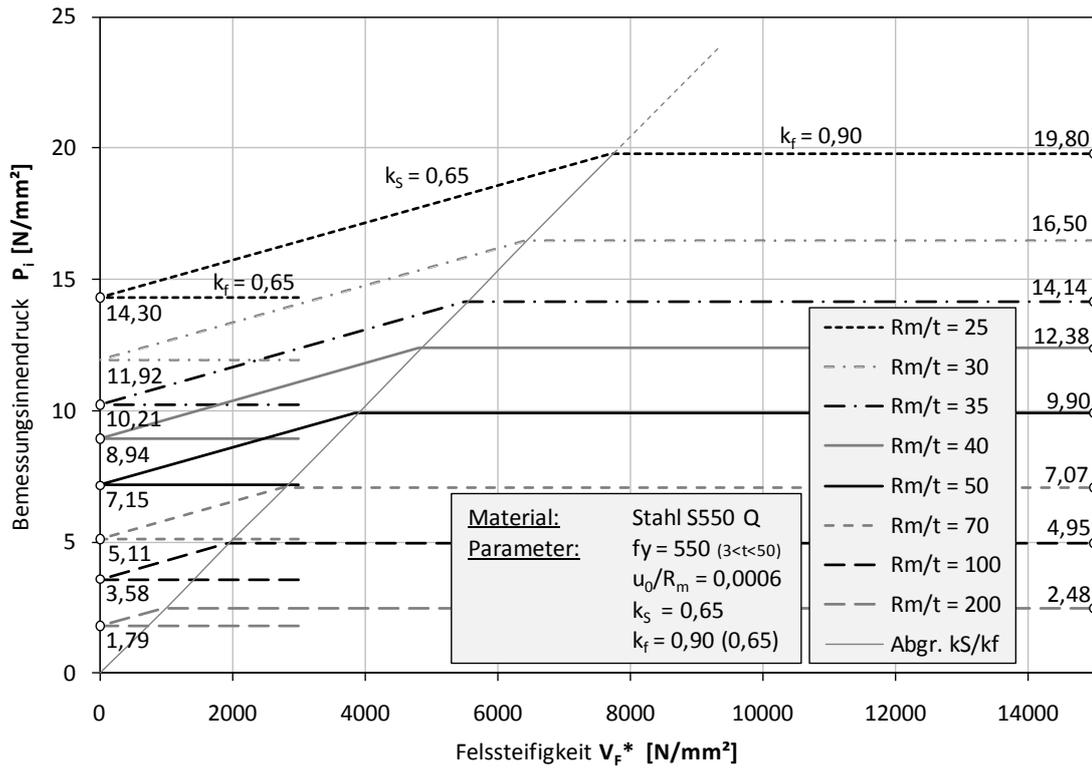


Abbildung 42: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

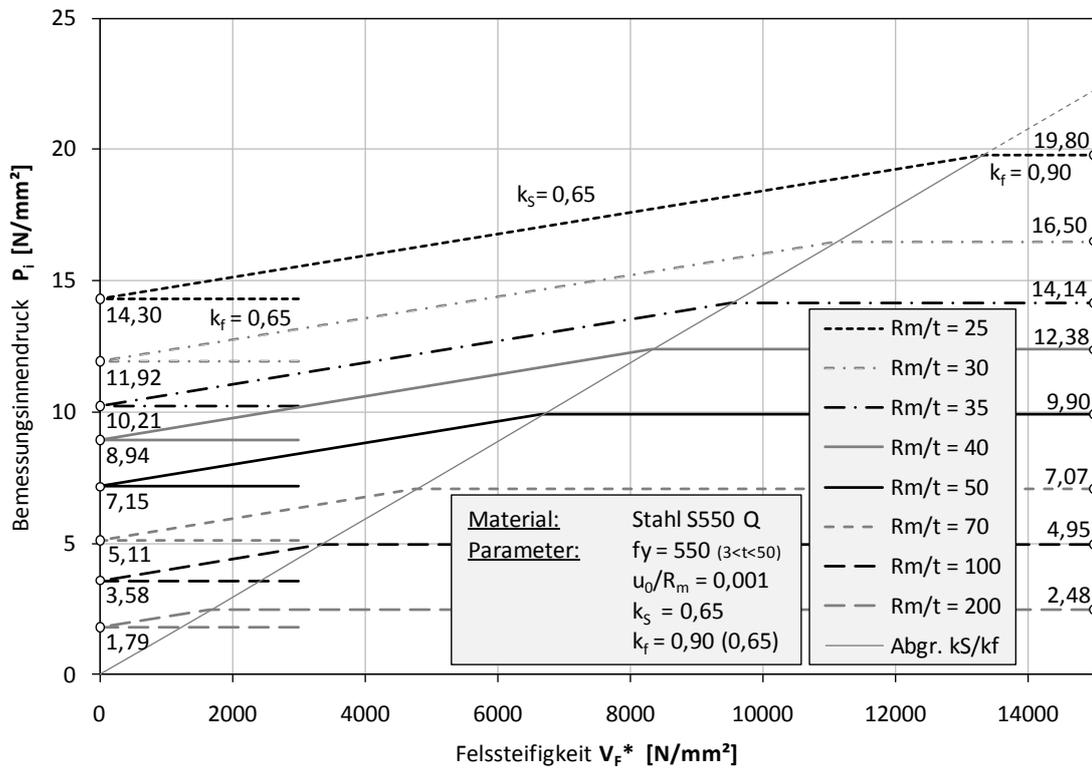


Abbildung 43: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,001$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

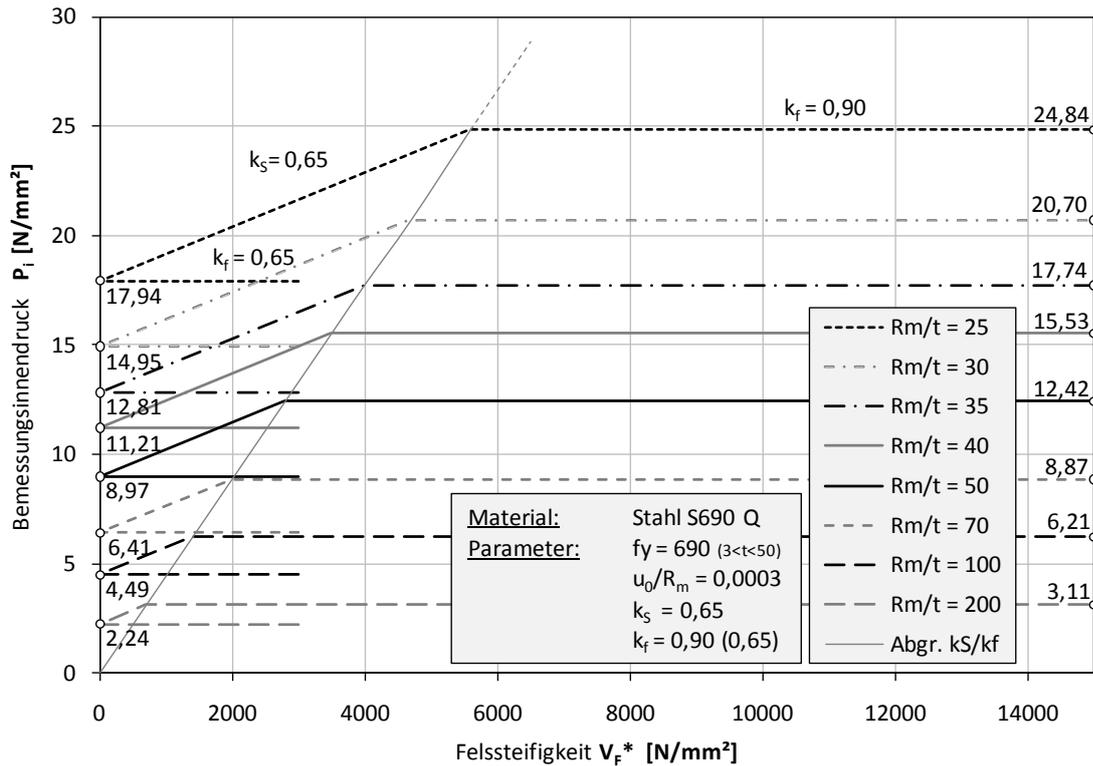


Abbildung 44: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

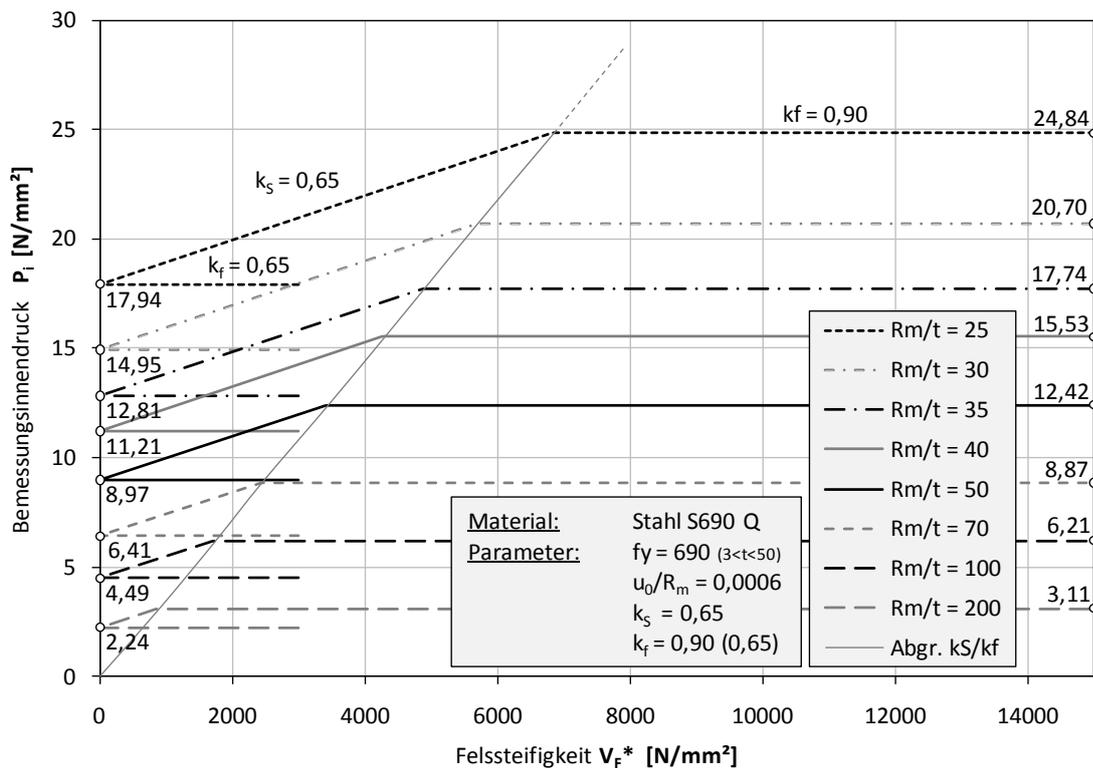


Abbildung 45: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$

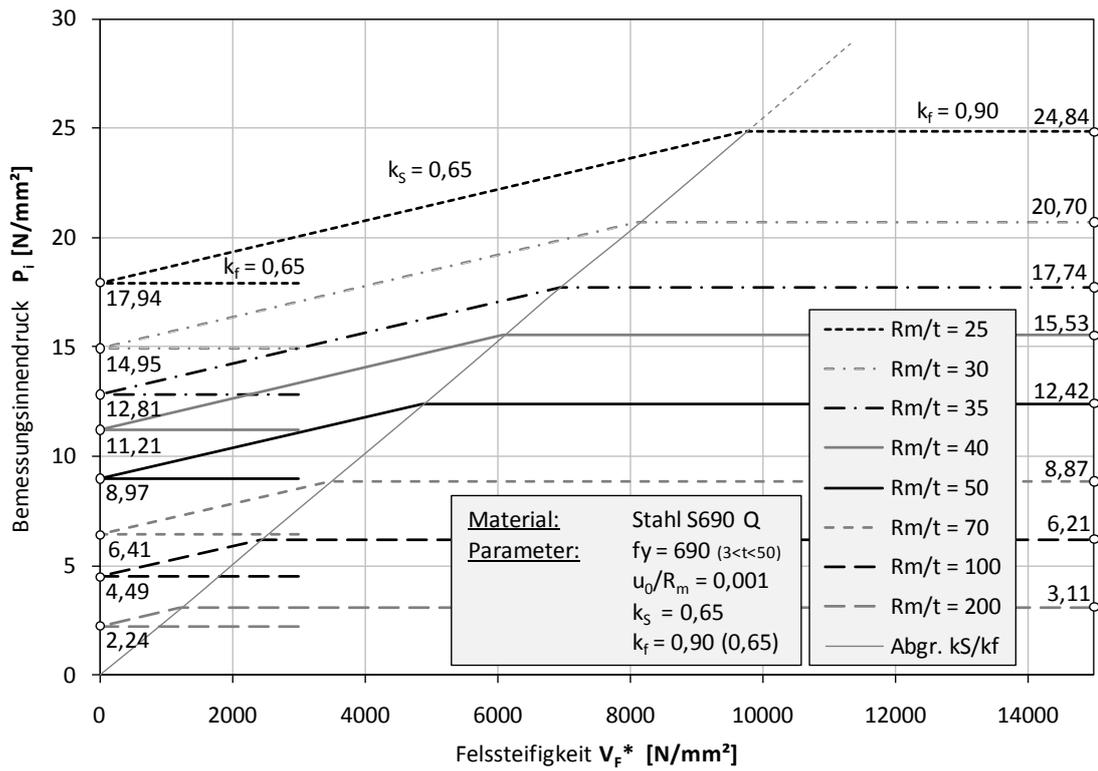


Abbildung 46: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,001$ ,  $k_s=0,65$ ,  $k_f=0,90$



## 6. Parameterstudie ELASTISCH

### 6.1 Erläuterung der numerischen Berechnungen

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht im Vergleich der sehr vereinfachten analytischen Bemessungsergebnissen mit den realistischeren Modellen der numerischen Berechnung. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zur numerischen Berechnung soll Aufschluss über die Sicherheiten bzw. Beanspruchungen einer realistischeren Bemessung gegenüber der konservativen analytischen Berechnung geben. Wie bereits erläutert, erfolgt die analytische Bemessung mit der geringsten lokal festgestellten Felssteifigkeit  $V_{F^*,min}$  global mit radialsymmetrischem Bettungsverlauf über den gesamten Panzerungsumfang. In Realität entspricht der umliegende Gebirgsmantel jedoch keinem homogenen isotropen Kontinuum und somit stellt sich ein in seiner radialen Steifigkeit ungleichförmiger Bettungsverlauf ein. Die FE-Berechnung simuliert diesen Fall mit den 2 spezifisch entwickelten Bettungsmodellen. Die Bettungsmodelle weisen variable Felssteifigkeitsverläufe in den Grenzen zwischen  $V_{F^*,min}$  und  $V_{F^*,max}$  auf.

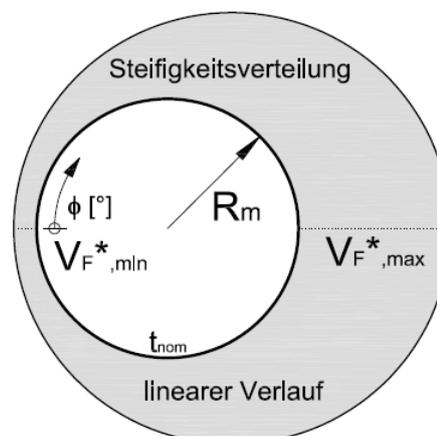
Der Bemessungssinnendruck für die FE-Berechnung wird aus der analytischen Berechnung übernommen. Dieser errechnet sich mit gegebener Felssteifigkeit und den Bemessungskriterien entsprechenden Sicherheitsbeiwerten bei voller Ausnutzung des Stahles. Die analytische Berechnung bildet somit immer die Bemessungsbasis für die anschließenden Ergebnisvergleiche.

In jedem Bemessungsfall wird die FE-Modellierung somit mit der zugehörigen analytischen Berechnung verglichen:

#### 6.1.1 Berechnungsmodelle

##### a) Bettungsfall linearer Verlauf (siehe Abbildung 27)

Dieser Bettungsfall soll einen Standardfall der Bemessung widerspiegeln. Die Erkundung der Felssteifigkeit ergibt Werte zwischen  $V_{F^*,min}$  auf  $V_{F^*,max}$ , deren Positionen nur lokal festgestellt und nicht global in Rohrlängs- und Rohrumfangsrichtung zugewiesen werden können. Die konservative analytische Bemessung erfolgt somit mit der geringsten Felssteifigkeit.

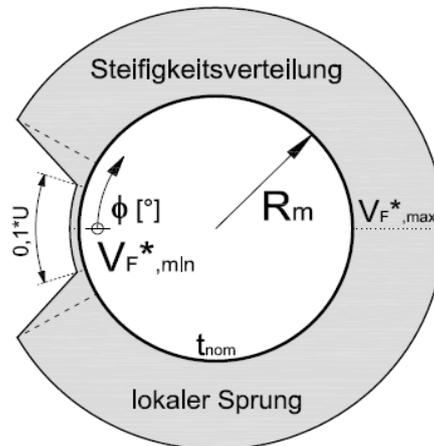


Die FE-Berechnung mit realistischerem linearem Bettungsverlauf erfährt aufgrund der global größeren Felsmitwirkung durch Ansteigen

von  $V_{F^*,min}$  auf  $V_{F^*,max}$  einen Bonus in der Bemessung gegenüber der analytischen Bemessung, welche konstant mit  $V_{F^*,min}$  durchgeführt wird.

**b) Bettungsfall lokaler Sprung (siehe Abbildung 29)**

Um die Auswirkungen von Störzonen wie Klüftungen, welche in der analytischen Bemessung nicht berücksichtigt werden können, zu erfassen, wurde das Bettungsmodell mit lokalem Sprung der Felssteifigkeit eingeführt. Da die analytische Bemessung mit der global geringsten festgestellten Felssteifigkeit erfolgt, diese aber nur punktweise sehr lokal entlang des gesamten Druckschachtes bestimmt werden kann, ist dieser Werte nicht zwingend der niedrigste. Es können lokal nicht erfasste Bereiche (Störzonen) mit noch kleineren Festigkeiten existieren, im Extremfall Klüfte oder sogar Hohlräume.



Die analytische Berechnung erfolgt in diesem Bettungsszenario wiederum mit radialsymmetrischer Bettung und einer konstanten Felssteifigkeit, die in dem Fall aber mit  $V_{F^*,max}$  festgelegt wird. Dieser Bettungsfall „lokaler Sprung“ soll damit eine lokale Störzone simulieren. Die FE-Berechnung erfolgt mit diesem Bettungsverlauf. Sie wird dabei auf 90% der Umfangslänge mit derselben Felssteifigkeit  $V_{F^*,max}$  wie die analytische Berechnung durchgeführt, weist jedoch eine Störzone mit einem Steifigkeitsabfall auf  $V_{F^*,min} = 10\% \cdot V_{F^*,max}$  auf.

Dieser Bemessungsfall berücksichtigt somit das außergewöhnliche Szenario, bei dem die von Haus aus konservative analytische Bemessung mit der geringsten Felssteifigkeit dennoch mit einer lokal nicht erfassten Störzone beaufschlagt wird. Damit stellt es einen Extremfall als „worst case“ Szenario dar.

Die FE-Berechnung, welches ein Abbild der Realität darstellen soll, erhält somit im lokalen Störbereich eine geringere Felssteifigkeit als die der analytischen Berechnung und erfährt somit ein Ausnutzungsdefizit im Vergleich zu dieser.

Im Vergleich zur analytischen freitragenden Bemessung erfährt die FE-Berechnung durch den Bettungsverlauf wiederum einen Bonus im Tragverhalten.

### 6.1.2 Sekundärspannungen

Durch den konstant angenommenen Bettungsverlauf der analytischen Berechnung erfährt das Rohr folglich auch nur eine um den Umfang konstante Verformung. Somit entsteht in der Panzerung nach der Theorie des dünnwandigen Rohres nur eine konstante Membranspannung. Durch die ungleiche Bettung in der numerischen Berechnung verformt sich das Rohr nicht mehr radial konstant. Je nach Steifigkeitsverlauf des umliegenden Gebirgsmantels dehnt sich das Rohr unterschiedlich in Abhängigkeit von Größe und Verlauf der Steifigkeit. Es entstehen Biegezonen im Rohr und daraus resultieren lokale sekundäre Biegespannungen. Die dadurch vergrößerten Umfangsspannungen werden bei der analytischen Bemessung nicht berücksichtigt, ergeben laut den folgenden Untersuchungen aber teils beträchtliche Spannungserhöhungen.

Die Druckschachtpanzerung wird grundlegend auf die Membranspannung bzw. Mises-Vergleichsspannung in der Schalenmittelfläche bemessen. Die lokalen Biegespannungen müssen jedoch auch in den entsprechenden Bereichen den Membranspannungen überlagert und überprüft werden.

### 6.1.3 Reibung

Eine weitere neue Komponente, die durch die variable Bettung mit ins Spiel kommt, ist die Reibung zwischen Panzerungsoberfläche und Hinterfüllbeton, der generell dem umliegenden Gebirgsmantel zugeschrieben werden kann. Durch die variable Bettung weicht das Rohr im verformten Zustand von der Kreisform ab und es entstehen unterschiedlich große radiale Verschiebungen des Rohres und somit auch veränderliche Umfangsdehnungen der Panzerung. Eine größere Verformung des Rohres fordert auch eine größere Umfangsdehnung und Umfangsspannung. Ist dieser Verformungszuwachs lokal begrenzt und herrscht keine Reibung zwischen der Panzerung und dem Gebirgsmantel, so werden die lokalen Spitzendehnungen und Spannungen umgelagert und es wird der gesamte Rohrumfang zur Aufnahme dieser zusätzlichen Umfangsdehnung und Umfangsspannung herangezogen. Der Einfluss der lokalen Störzone wird somit vom gesamten Rohr aufgenommen.

Anders verhält es sich bei Vorhandensein einer Reibungswirkung zwischen den Verbundbauteilen. Die Reibungskomponente behindert die tangentielle Verschiebung zwischen Panzerung und Rohr und reduziert somit die Umlagerung der lokal zusätzlichen Dehnungsbeanspruchung auf den restlichen Rohrumfang. Mit steigendem Reibungsbeiwert wird damit die Einflusszone bzw. Umlagerungszone der Zusatzbeanspruchung geringer und diese konzentriert sich immer mehr auf den gestörten Bereich.

Um die beiden Berechnungsmethoden vergleichen bzw. die Sicherheit der analytischen Berechnung bestimmen zu können, werden 2 Parameterstudien in Abhängigkeit der Felssteifigkeit und des Bemessungslimits durchgeführt. Eine Parameterstudie bezieht sich dabei auf den vorhin erläuterten Bemessungsfall des linear ansteigenden Bettungsverlaufes, eine weitere bezieht sich auf die außergewöhnliche Situation des lokalen abrupten Steifigkeitssprunges aufgrund einer lokalen Störzone.

## **6.2 Auswertung der FE-Berechnungen**

### **6.2.1 Spannungsdiagramme**

In den Auswertungsdiagrammen werden die Spannungen entlang des Umfanges ausgegeben. Der Umfang wird in Form einer Abwicklung –im Winkelmaß unterteilt– aufgetragen. Durch die horizontale Symmetrie wird das Modell nur als Halbschale gerechnet und die Diagramme erstrecken sich bis zu einem maximalen Winkel von 180°. Die Ergebnisse aus der numerischen Berechnung werden zusammen mit den analytischen Spannungen im Diagramm eingetragen. Damit lassen sich die entsprechenden Spannungsverläufe gut miteinander vergleichen. Wichtige Spannungswerte wie z.B. Maximalstellen werden markiert und deren Werte ausgelesen.

In den Spannungsdiagrammen werden folgende Spannungen mit ihren Kürzeln dargestellt:

Tabelle 3: Kürzel Spannungsdiagramme

Kürzel:	Beschreibung:	Berechnung:
$\sigma_{S11\_bottom}$	Umfangsspannung Rohrinne-seitig	FE
$\sigma_{S11\_top}$	Umfangsspannung Rohrausse-seitig	FE
$\sigma_{SSAVG1}$	Umfangsmembranspannung	FE
$\sigma_{Mises\_bottom}$	Vergleichsspannung Rohrinne-seitig	FE
$\sigma_{Mises\_top}$	Vergleichsspannung Rohrausse-seitig	FE
$\sigma_{Mises\_Membran}$	Vergleichsmembranspannung	FE
$\sigma_{S22\_bottom}$	Rohrlängsspannung Rohrinne-seitig	FE
$\sigma_{S22\_top}$	Rohrlängsspannung Rohrausse-seitig	FE
$\sigma_{SSAVG2}$	Rohrlängsmembranspannung	FE
$\sigma_{u\_analyt\_Vf*min}$	Umfangsspannung Seeber mit kleinster Felssteifigkeit	analytisch
$\sigma_{u\_analyt\_Vf*max}$	Umfangsspannung Seeber mit größter Felssteifigkeit	analytisch
$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$	Umfangsspannung am freitragenden Rohr	analytisch

Die Indizes bottom und top stehen jeweils für die Rohrwandinnen- bzw. die Rohrwandaußenseite.

## 6.2.2 Verschiebungsdiagramme

Eine weitere Form der Ergebnisausgabe bilden die Verschiebungsdiagramme. Es werden wieder die Ergebnisse der analytischen Berechnung und deren Vergleichswerte aus der FE-Berechnung als Graphen eingetragen. Als numerische Verschiebungsfiguren werden die Radialverschiebung, die Tangentialverschiebung und des weiteren die maximalen Verschiebungen ausgegeben. Die Maximalverschiebung bildet sich aus Radial- und Tangentialverschiebung und ändert seinen Richtungsvektor entlang des Umfangs. Das Programm ABAQUS erlaubt die Ausgabe der Verschiebungen lediglich im globalen kartesischen Koordinatensystem, weswegen die Umrechnung der Radial- bzw. Tangentialverschiebung im Programm Excel erfolgt. Positive Werte der Radialverschiebung weisen auf eine Rohrwandverschiebung nach außen hin, negative eine Verschiebung zum Rohrmittelpunkt. Eine positive Tangentialverschiebung beschreibt eine Verschiebung im Uhrzeigersinn, während negative Werte der Tangentialverschiebung eine Verschiebung gegen den Uhrzeigersinn zur Folge haben. Die analytischen Verschiebungsgrößen haben durch die konstante Bettung wie erwartet nur eine radiale Komponente konstanter Größe.

Die im Verschiebungsdiagramm abgebildeten Kurven haben folgende Bezeichnungen:

Tabelle 4: Kürzel Verschiebungsdiagramme

Kürzel:	Beschreibung:	Berechnung:
$U_r$	Radialverschiebung	FE
$U_t$	Tangentialverschiebung	FE
$U_{max}$	Maximale Verschiebung (Vektor)	FE
$U_{r\_analyt\_Vf*min}$	Radialverschiebung Seeber mit kleinster Felssteifigkeit	analytisch
$U_{r\_analyt\_Vf*max}$	Radialverschiebung Seeber mit größter Felssteifigkeit	analytisch
$U_{r\_analyt\_freitr.}$	Radialverschiebung am freitragenden Rohr	analytisch

### 6.2.3 Ergebnisvergleich

Der Ergebnisvergleich wird in zweierlei Hinsicht durchgeführt.

#### 6.2.3.1 Kriterium Seeber maßgebend

Die numerischen Ergebnisse werden mit denen der analytischen verglichen. Damit kann die Sicherheit der analytischen Berechnung im Vergleich zu einem durch die numerische Berechnung realitätsnäheren simulierten Bettungsszenario erfasst werden.

Im maßgebenden Bemessungskriterium mit Gebirgsmitwirkung (Seeber) werden die maximale Membranspannung und die maximale Umfangsspannung mit der analytischen Basislösung nach Seeber verglichen.

Spannungsverhältnisse:

- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min/max}$
- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF* min/max}$

#### 6.2.3.2 Kriterium freitragend maßgebend

Bei der Berechnung mit den durch das freitragende Kriterium limitierten Drücken, werden die numerischen Ergebnisse einerseits mit der durch das freitragende Kriterium (bei maximaler Auslastung) erzielten Spannung verglichen. Der Bemessungsfall freitragendes Rohr bildet zwar das maßgebende Kriterium, ist jedoch nur für lokale Störzonenbereiche treffend. Die gesamte Panzerung darf dadurch nur mit dem limitierten Innendruck aus dem freitragenden Kriterium beaufschlagt werden, der Großteil wird aber dennoch durch die Gebirgsmitwirkung nach Seeber entlastet.

Um das globale Verhalten der analytischen Bemessung auch im freitragenden Kriterium mit Gebirgsmitwirkung beurteilen zu können, werden die numerischen Spannungsergebnisse hier auch mit den zugehörigen reduzierten Spannungen der Seeber-Berechnung verglichen.

Spannungsverhältnisse:

- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*}$  min/max
- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*}$  min/max
- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$
- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

### 6.2.3.3 *Spannungsvergleich mit Widerständen*

Die Spannungen aus der numerischen Berechnung werden auch mit den maximalen Widerstandsspannungen verglichen.

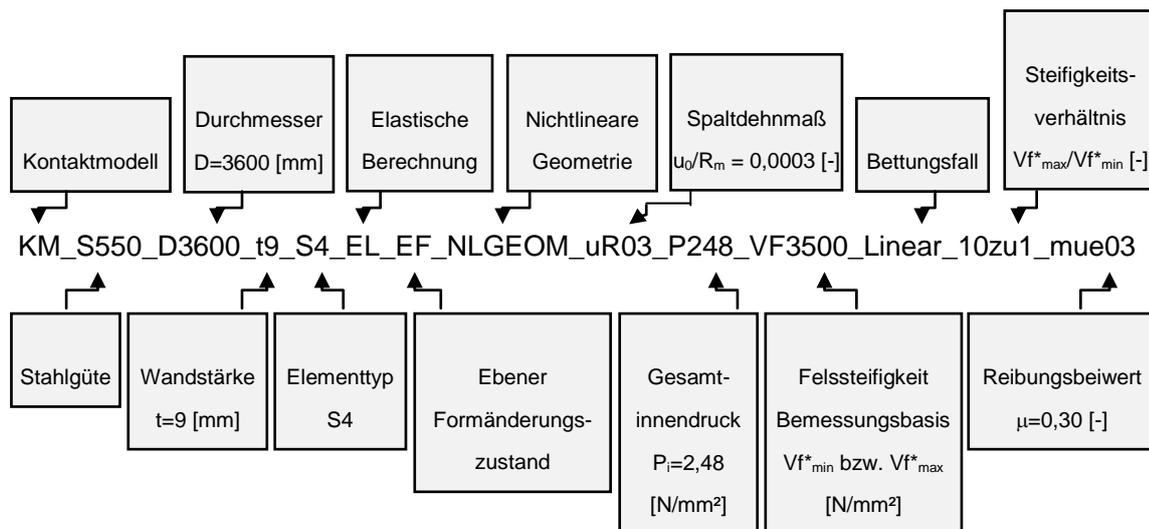
Spannungsverhältnisse:

- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$
- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

## 6.3 Dateiensystem

Die Parameterstudien umfassen über einhundert Rechnungen. Diese erfolgen mittels der unterschiedlichen FE-Modelle und mit variierenden Parametern. Um dabei den Überblick im Dateiensystem zu behalten wurde eine spezielle Dateibenennung eingeführt. Der jedem Bemessungsfall zugehörige Dateiname besteht aus einer Aneinanderreihung von Kürzeln, die das komplette System mit seinen Randbedingungen und Parametern beschreiben.

Ein Beispiel dazu:



Weitere Kürzel in Verwendung sind:

- FM ...Federnmodell
- S355, S690 ...Stahlsorten S355N und S690Q
- PL ...Plastische Berechnung
- ES ...Ebener Spannungszustand
- LGEOM ...lineares Geometrieverhalten
- uR00 ...Spaltdehnmaß  $u_0/R_m = 0,0$  [-]
- uR06 ...Spaltdehnmaß  $u_0/R_m = 0,0006$  [-]
- lokaler Sprung ...Bettungsfall: lokaler Sprung
- Konst ...Bettungsfall: Konstant (radialsymmetrisch)
- MS ...Materielle Störzone
- Ve ...Verfestigung bei Plastizierung
- Pvar ...variabler Innendruck, Laststeigerung bei plastischer Berechnung

### 6.4 Detailauswertung Bettungsfall: linearer Verlauf

Dieses Kapitel zeigt die Auswertung eines Bemessungsbeispiels der Parameterstudie für den linearen Bettungsverlauf im Detail. Abbildung 47 deutet auf den gewählten Bemessungspunkt im Abgrenzungsdiagramm hin. Jeder Bemessungspunkt wird in der Parameterstudie jeweils mit den Reibungsbeiwerten  $\mu=0,00$ ,  $\mu=0,30$  und  $\mu=0,60$  gerechnet. Somit ergeben sich pro Bemessungspunkt 3 numerische Rechnungen und die zugehörigen Auswertungen.

Dieses Beispiel erfolgt für den Stahl S550 Q mit einer Fließgrenze von  $f_y=550$  [N/mm<sup>2</sup>], einem Spaltdehnmaß von  $u_0/R_m=0,0003$  und den Sicherheitsbeiwerten  $k_s=0,65$  [-] und  $k_f=0,90$  [-]. Die Bemessung erfolgt in einem Verhältnis  $R_m/t=40$  [-] und der Bemessungspunkt liegt im Bereich der Seeber-Bemessung als maßgebendes Kriterium.

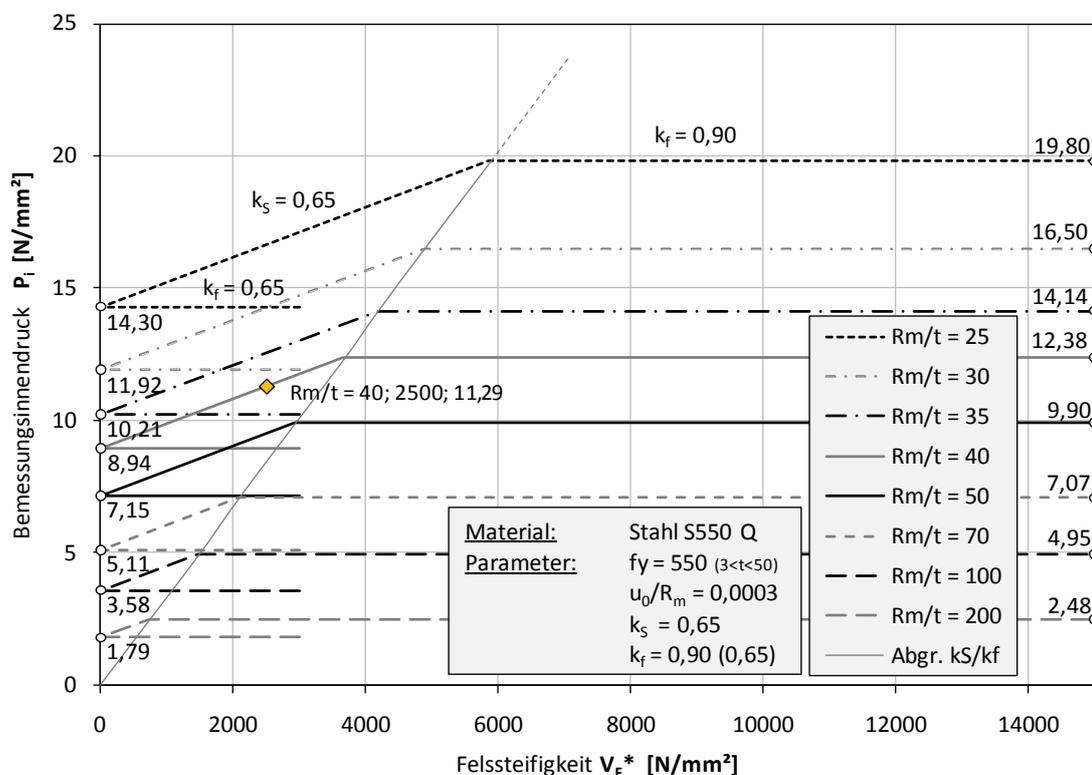


Abbildung 47: Abgrenzungsdiagramm, Bemessungspunkt Detailauswertung Bettungsfall: linearer Verlauf

Der Dateiname des Beispiels lautet:

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_EF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

Wie aus dem Dateinamen ersichtlich, erfolgt die Berechnung an einer Panzerung mit einem mittleren Rohrdurchmesser von 3600 [mm], einer Rohrwandstärke von 45 [mm], dem verwendeten Elementtyp S4, elastischem Materialverhalten, im ebenen

Formänderungszustand, unter Berücksichtigung nichtlinearem Geometrieverhaltens, einem Gesamtinnendruck von 11,29 [N/mm<sup>2</sup>], einer analytischen Bemessungsfelssteifigkeit von 2500 [N/mm<sup>2</sup>], dem linearen Bettungsfall im Verhältnis 10 zu 1 und einem Reibungsbeiwert  $\mu$  zwischen Panzerung und Gebirgsmantel von 0,00 [-].

#### **6.4.1 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_V F2500\_Linear\_10zu1\_mue00**

Es folgt die Auswertung des oben genannten Beispiels mit Reibungsbeiwert  $\mu=0,00$ . In Abbildung 48 sind die Spannungen aufgetragen. Diese unterscheiden sich in analytisch ermittelte Spannungen (durch konstanten Verlauf erkennbar) und den Ergebnissen aus der numerischen Berechnung mittels ABAQUS. Die grau punktierte Linie ergibt die Bemessung nach Seeber. Sie stellt die Basis (Innendruckermittlung) und den Vergleichswert der Auswertung dar. Die Schwarz punktierte Linie ist die zu Vergleichszwecken ausgewertete Berechnung nach Seeber, die jedoch mit der maximalen Felssteifigkeit gerechnet wurde. Der strich-doppelpunktierte Graph zeigt die Spannungsauslastung der analytisch freitragenden Rechnung.

Alle gekrümmten Graphen stammen aus der numerischen Berechnung. Die oberste strichlierte Linienschar zeigt den Verlauf der Umfangsspannungen an der Rohrwandaußenkante und der Innenkante. Mittig liegt eine feiner skalierte Strichlinie, welche die Umfangsmembranspannung veranschaulicht.

Die unterste Kurvenschaar zeigt den Verlauf der Rohrlängsspannungen. Sie und die Umfangsspannung ergeben den Verlauf der mittleren Kurvenschaar, welche wiederum die Mises-Vergleichsspannungen an Rohrwandaußen- bzw. Innenkante sowie in Membranebene darstellen.

Die zugehörigen Verschiebungen sind in Abbildung 49 festgehalten. Auch in diesem Diagramm sind die 2 analytisch ausgewerteten Verschiebungen nach Seeber und die der freitragenden Bemessung aufgetragen. Die 2 gekrümmten Linien im oberen Diagrammbereich stehen für die Radial- sowie für die Maximalverschiebung. Tangentialverschiebungen werden durch die untere grau strichlierte dargestellt. Die Maximalverschiebung ergibt sich aus den Anteilen der Radial- und Tangentialverschiebung und hat einen dementsprechend variierenden Richtungsvektor.

Im Spannungsdiagramm sind die Spannungserhöhungen aus der Rohrbiegung deutlich ersichtlich. Diese Sekundärspannungen entstehen durch lokale Biegeeffekte im Rohr, ausgelöst durch die ungleichmäßige Verformung aufgrund der variablen Bettung. Den Maximalwert erreicht die Umfangsspannung an der Rohraußenkante beim Winkel 0°. Aus dem Vergleich des Spannungs- und Verschiebungsdiagramms wird die Abhängigkeit der Rohrkrümmung und der Sekundärspannungseffekte ersichtlich. Je stärker die Krümmungsänderung der Rohrwandung ist, desto größer und konzentrierter

fallen die daraus folgenden sekundären Biegespannungen aus. Die größte Verformung und Krümmung erfährt das Rohr an der Stelle der geringsten Gebirgssteifigkeit, was sich in der maximalen Spannungsspitze äußert. Die erhöhte Verformung klingt relativ schnell ab und erreicht bei einem Winkel von ca.  $30^\circ$  den mit Seeber ermittelten Vergleichswert. Die Verformung am restlichen Umfang der Halbschale fällt unter dem analytisch ermittelten Wert. Die lokale Verformung erfährt beim Ausklang eine Gegenkrümmung, was wiederum eine Spannungsentlastung der außenliegenden Umfangsspannung bei einem Winkel von ca.  $20^\circ$  zur Folge hat.

Der exakt gleiche Verlauf in gespiegelter Weise stellt die innenliegende Umfangsspannung dar.

Die Randbedingungen der Berechnung erzwingen den ebenen Formänderungszustand, wodurch sich eine Längsspannung aufbaut. Diese ergibt sich im elastischen Materialverhalten zu 30% der Umfangsspannung. Der Verlauf folgt dementsprechend dem gleichen Trend.

Nach dem vollständigen Abklingen der Sekundärspannungen bei einem Winkel von ca.  $80^\circ$  schmiegen diese sich an den Membranspannungsverlauf. Aufgrund der nicht vorhandenen Reibung zwischen Panzerung und Gebirge wird die lokale Spannungserhöhung auf die gesamte Panzerung umgelagert und es stellt sich ein konstanter Wert der Membranspannung ein.

Im Vergleich zur analytischen Spannung nach Seeber ergibt die numerische Berechnung eine Verringerung von 33,5% auf Membranspannungsbasis und 14,0% im Verhältnis zur maximalen Umfangsspannung.

Tabelle 5 zeigt eine genaue Auflistung der Ergebnisse und Vergleiche in tabellarischer Form. Die verformte und unverformte Figur der Panzerung sowie die Umfangsspannungen an der Rohrwandaußenseite werden in Abbildung 50 dargestellt. Zur Veranschaulichung wird die verformte Figur im Skalierungsfaktor 100 dargestellt. Der Membranspannungsverlauf ist farblich in Abbildung 51 ersichtlich.

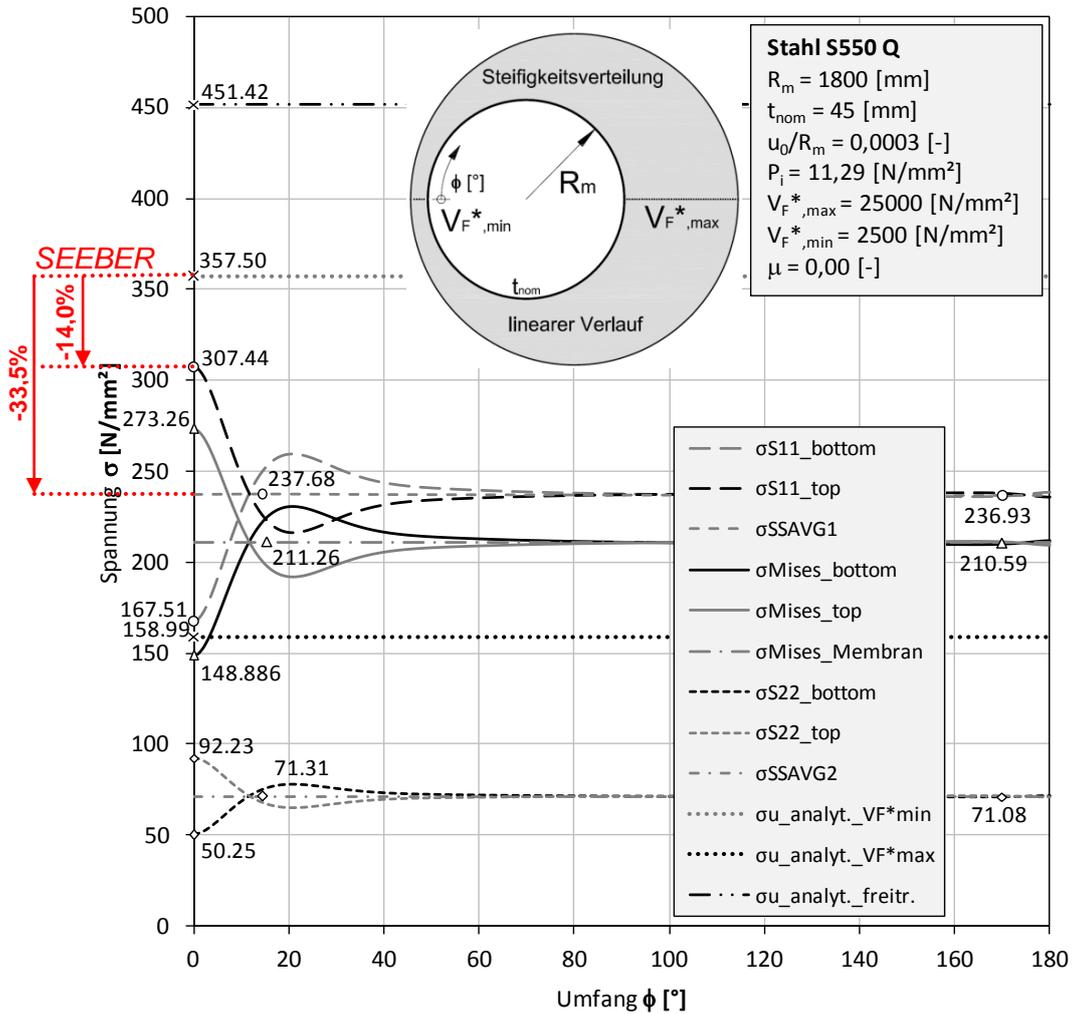


Abbildung 48: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

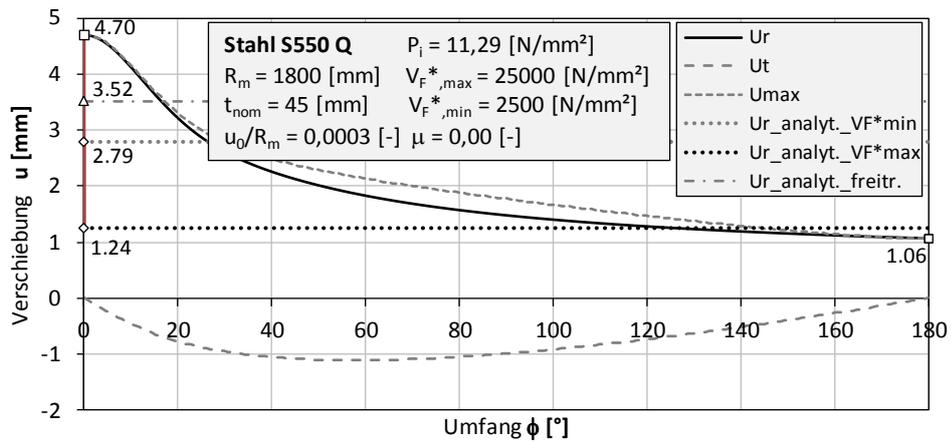


Abbildung 49: Verschiebungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

Tabelle 5: Ergebnistabelle  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

Material:	Stahl S550 Q		Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)												
			$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_top\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF*min}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr}$ [mm]			
Fließgrenze $f_y$	=	550	357.50	158.99	451.42	550.00	495.00	237.68	211.26	307.44	2.79	3.52			
Reibungsbeiwert $\mu$	=	0.00													
Sicherheitsfaktor $k_{Seeber}$	=	0.65													
Sicherheitsfaktor $k_{freitr}$	=	0.90													
Innendruck $P_i$	=	11.29													
Rohrradius $R_m$	=	1800													
Wandstärke $t$	=	45.0													
Festsfestigkeit $V_f^*_{max}$	=	25000													
Festsfestigkeit $V_f^*_{min}$	=	2500													
$\sigma_{Rd\_zul\_Seeber}$	=	357.50	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.504	1.692	1.163					
$\sigma_{Rd\_zul\_freitr}$	=	495.00	1.385	3.113	1.097	0.900	1.000	2.083	2.343	1.610					
$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$	=	357.50	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.504	1.692	1.163					
$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$	=	158.99	0.445	1.000	0.352	0.289	0.321	0.669	0.753	0.517					
$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$	=	451.42	1.263	2.839	1.000	0.821	0.912	1.899	2.137	1.468					
$\sigma_{S11\_bottom\_phi=0}$	=	167.51	0.469	1.054	0.371	0.305	0.338	0.705	0.793	0.545					
$\sigma_{S11\_top\_max}$	=	307.44	0.860	1.934	0.681	0.559	0.621	1.293	1.455	1.000					
$\sigma_{SSAVG1\_min}$	=	236.93	0.663	1.490	0.525	0.431	0.479	0.997	1.122	0.771					
$\sigma_{SSAVG1\_max}$	=	237.68	0.665	1.495	0.527	0.432	0.480	1.000	1.125	0.773					
$\sigma_{Mises\_bottom\_phi=0}$	=	148.89	0.416	0.936	0.330	0.271	0.301	0.626	0.705	0.484					
$\sigma_{Mises\_top\_max}$	=	273.26	0.764	1.719	0.605	0.497	0.552	1.150	1.293	0.889					
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	=	210.59	0.589	1.325	0.467	0.383	0.425	0.886	0.997	0.685					
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$	=	211.26	0.591	1.329	0.468	0.384	0.427	0.889	1.000	0.687					
$\sigma_{S22\_bottom\_phi=0}$	=	50.25	0.141	0.316	0.111	0.091	0.102	0.211	0.238	0.163					
$\sigma_{S22\_top\_max}$	=	92.23	0.258	0.580	0.204	0.168	0.186	0.388	0.437	0.300					
$\sigma_{SSAVG2\_min}$	=	71.08	0.199	0.447	0.157	0.129	0.144	0.299	0.336	0.231					
$\sigma_{SSAVG2\_max}$	=	71.31	0.199	0.449	0.158	0.130	0.144	0.300	0.338	0.232					
$U_{r\_analyt\_VF*min}$	=	2.79									1.000	0.792			
$U_{r\_analyt\_VF*max}$	=	1.24									0.445	0.352			
$U_{r\_analyt\_freitr}$	=	3.52									1.263	1.000			
$U_{r\_max}$	=	4.70									1.686	1.335			
$U_{r\_min}$	=	1.06									0.380	0.301			
$U_{r\_phi=180}$	=	1.06									0.380	0.301			
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>															

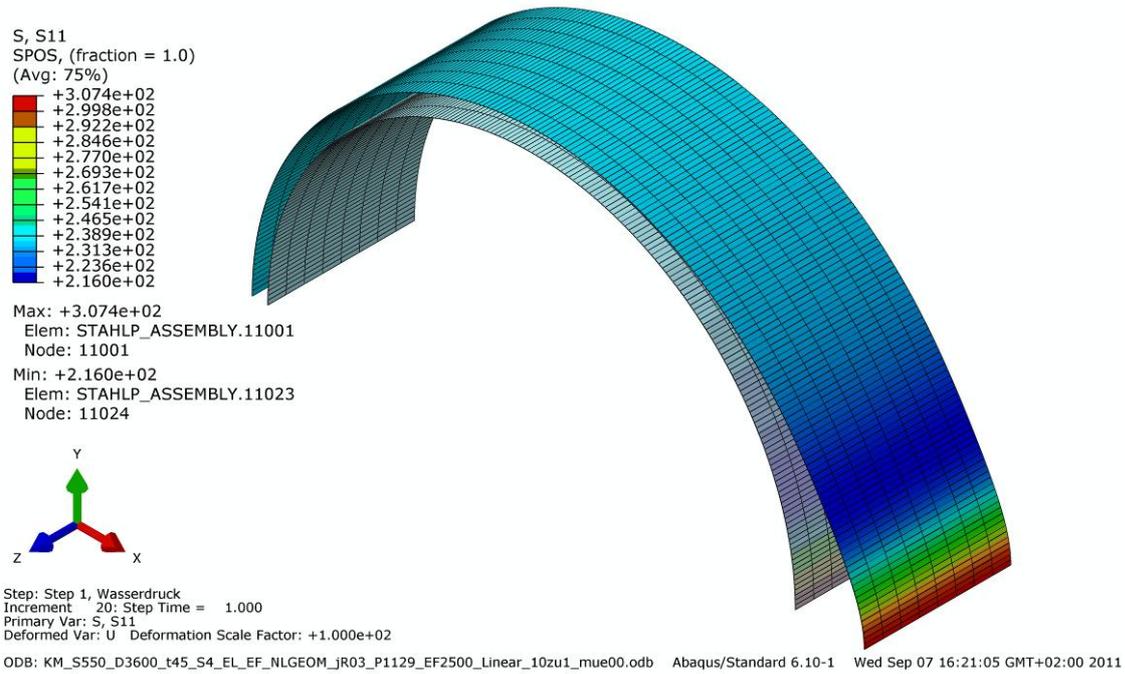


Abbildung 50: Umfangsspannung FE außen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

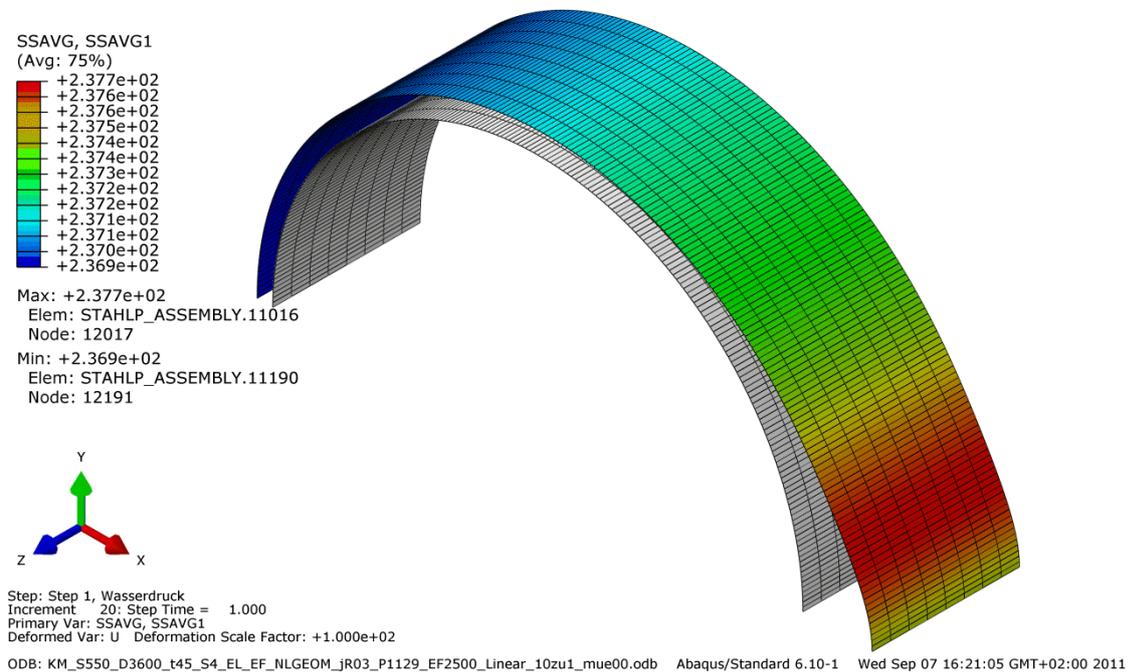


Abbildung 51: Membranspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

#### **6.4.2 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_V F2500\_Linear\_10zu1\_mue03**

Der Einfluss der Reibung wirkt sich wie in Abbildung 52 ersichtlich enorm auf die Spannungsverteilung in der Panzerung aus. Zwischen Panzerung und Gebirgsmantellaubung entstehen durch die Reibung Schubkräfte, welche der Kraft- bzw. Spannungsumlagerung von der „Schwachstelle“ zum restlichen Rohrumfang entgegenwirken. Dadurch ergibt sich eine Spannungs- und Dehnungskonzentration zum Bereich der abgeschwächten Gebirgsmantelfestigkeit hin. In der ungünstigsten Position erhöht sich die Membranspannung um 24,8% im Vergleich zum Ergebnis ohne Reibung. Der Reibungseinfluss bewirkt eine zunehmende Abnahme der Membranspannung in Umfangsrichtung bis zu einem minimalen Wert, der um 25,9% unter dem Vergleichswert ohne Reibung liegt. Die Membranspannung rückt im kritischen Bereich näher zum Bemessungswert nach Seeber heran und somit sinkt der Unterschied der FE- gegenüber der analytischen Berechnung.

Auch die Größe der sekundären Spannungserhöhung der Rohrbiegung (siehe Umfangsspannungen) sinkt mit zunehmendem Reibungsbeiwert.

Das Verschiebungsdiagramm zeigt eine Verkleinerung der maximalen Radialverformung im Bereich der kleinsten Felssteifigkeit. Die Reibung baut einen Widerstand auf und behindert die Verschiebung der Rohrwandung zu diesem Bereich hin. Dadurch fällt jedoch auch die globale Verschiebung des gesamten Rohres geringer aus und der Verschiebungsanteil auf Seite der größten Bettung vergrößert sich dadurch.

Dies wird auch durch den Verlauf der Tangentialverformung ersichtlich. Der tangentielle Anteil der Verschiebung, welcher guten Aufschluss auf die horizontale Verformung des Rohres gibt, sinkt mit zunehmender Reibung. Außerdem ist eine Konzentration auf den gestörten Bereich zu erkennen, was auf die lokale Dehnungszunahme schließen lässt. Durch den reduzierten Anteil der Tangentialverformung schmiegt sich die Radialverformung immer mehr an die Maximalverformung, was wiederum bedeutet dass die Maximalverformung immer mehr den Richtungsvektor der Radialverschiebung annimmt.

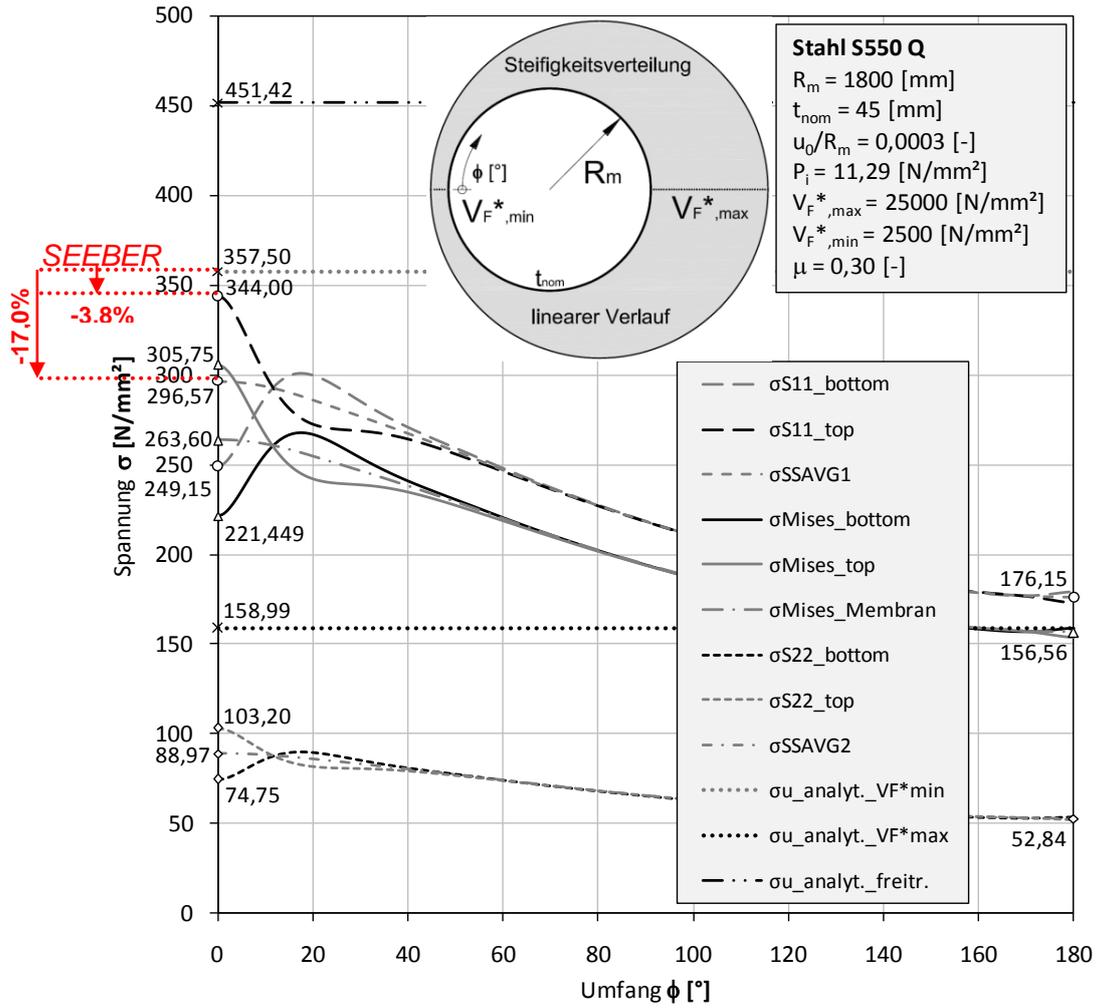


Abbildung 52: Spannungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

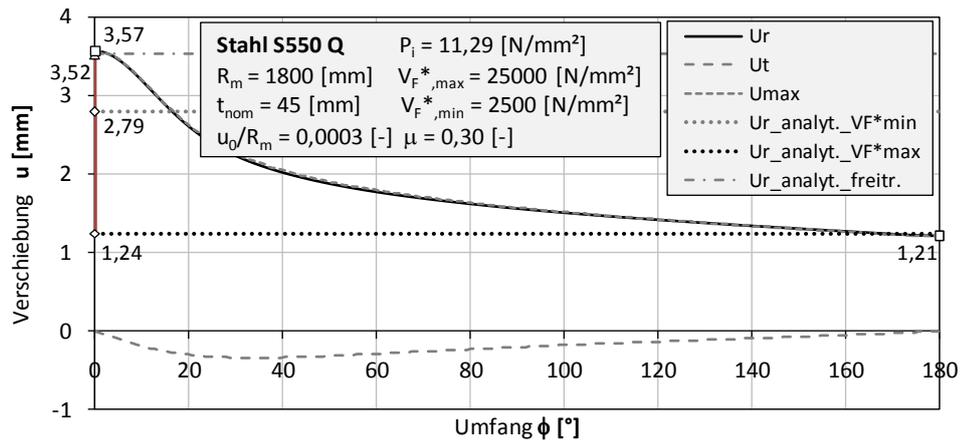


Abbildung 53: Verschiebungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

Tabelle 6: Ergebnistabelle

KM\_S550\_D3600\_145\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

Material:	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)										
	$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_top\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF*min}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr.}$ [mm]	
Stahl S550 Q	357.50	158.99	451.42	550.00	495.00	296.57	263.60	344.00	2.79	3.52	
Fließgrenze $f_y$	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.205	1.356	1.039			
Reibungsbeiwert $\mu$	1.385	3.113	1.097	0.900	1.000	1.669	1.878	1.439			
Sicherheitsfaktor $k_{Seeber}$	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.205	1.356	1.039			
Sicherheitsfaktor $k_{reitr.}$	0.445	1.000	0.352	0.289	0.321	0.536	0.603	0.462			
Innendruck $P_i$	1.263	2.839	1.000	0.821	0.912	1.522	1.713	1.312			
Rohrradius $R_m$	0.697	1.567	0.552	0.453	0.503	0.840	0.945	0.724			
Wandstärke $t$	0.962	2.164	0.762	0.625	0.695	1.160	1.305	1.000			
Felssteifigkeit $V_f^*_{max}$	0.493	1.108	0.390	0.320	0.356	0.594	0.668	0.512			
Felssteifigkeit $V_f^*_{min}$	0.830	1.865	0.657	0.539	0.599	1.000	1.125	0.862			
$\sigma_{Rd\_zul\_Seeber}$	0.619	1.393	0.491	0.403	0.447	0.747	0.840	0.644			
$\sigma_{S11\_bottom\_phi=0}$	0.855	1.923	0.677	0.556	0.618	1.031	1.160	0.889			
$\sigma_{S11\_top\_max}$	0.438	0.985	0.347	0.285	0.316	0.528	0.594	0.455			
$\sigma_{SSAVG1\_min}$	0.737	1.658	0.584	0.479	0.533	0.889	1.000	0.766			
$\sigma_{SSAVG1\_max}$	0.209	0.470	0.166	0.136	0.151	0.252	0.284	0.217			
$\sigma_{Mises\_bottom\_phi=0}$	0.289	0.649	0.229	0.188	0.208	0.348	0.391	0.300			
$\sigma_{Mises\_top\_max}$	0.148	0.332	0.117	0.096	0.107	0.178	0.200	0.154			
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	0.249	0.560	0.197	0.162	0.180	0.300	0.338	0.259			
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$									1.000	0.792	
$\sigma_{S22\_top\_max}$									0.445	0.352	
$\sigma_{SSAVG2\_min}$									1.263	1.000	
$\sigma_{SSAVG2\_max}$									1.279	1.013	
$U_{r\_analyt\_VF*min}$	2.79								0.433	0.343	
$U_{r\_analyt\_VF*max}$	1.24								0.433	0.343	
$U_{r\_analyt\_freitr.}$	3.52										
$U_{r\_max}$	3.57										
$U_{r\_min}$	1.21										
$U_{r\_phi=180}$	1.21										
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>											

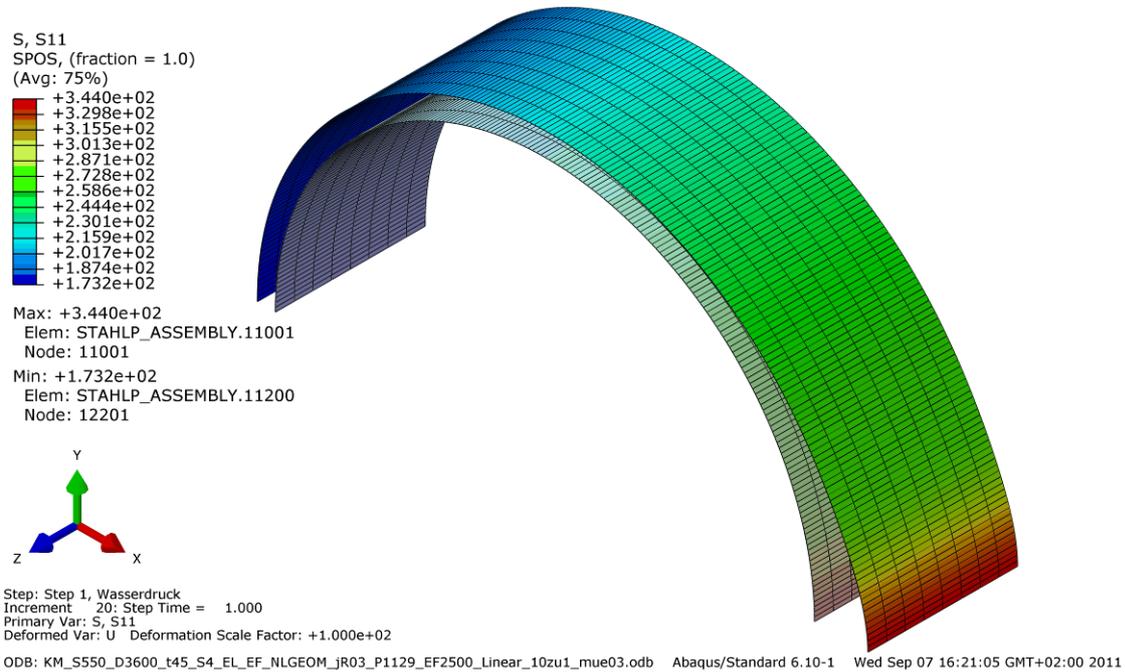


Abbildung 54: Umfangsspannung FE außen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

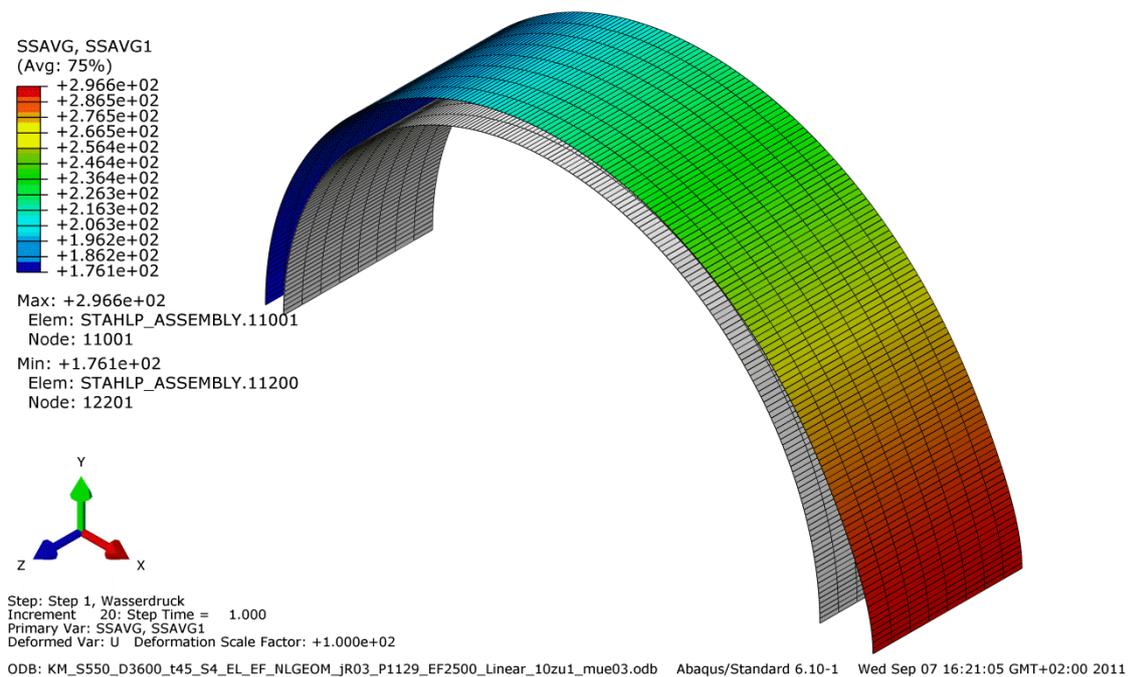


Abbildung 55: Membranspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

### **6.4.3 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_V F2500\_Linear\_10zu1\_mue06**

Mit zunehmendem Reibungsbeiwert erhöht sich der Widerstand gegenüber der Umlagerung auf den restlichen Umfang und es ergibt sich eine fortlaufende Spannungs- und Dehnungskonzentration bzw. Reduktion zu den entsprechenden Bereichen der Festigkeitsminima/Festigkeitsmaxima des Gebirgsmantels. Der Unterschied gegenüber der analytischen Berechnung sinkt mit zunehmender Reibung und liegt bei einem Wert  $\mu=0,60$  bei nur mehr 13,5%.

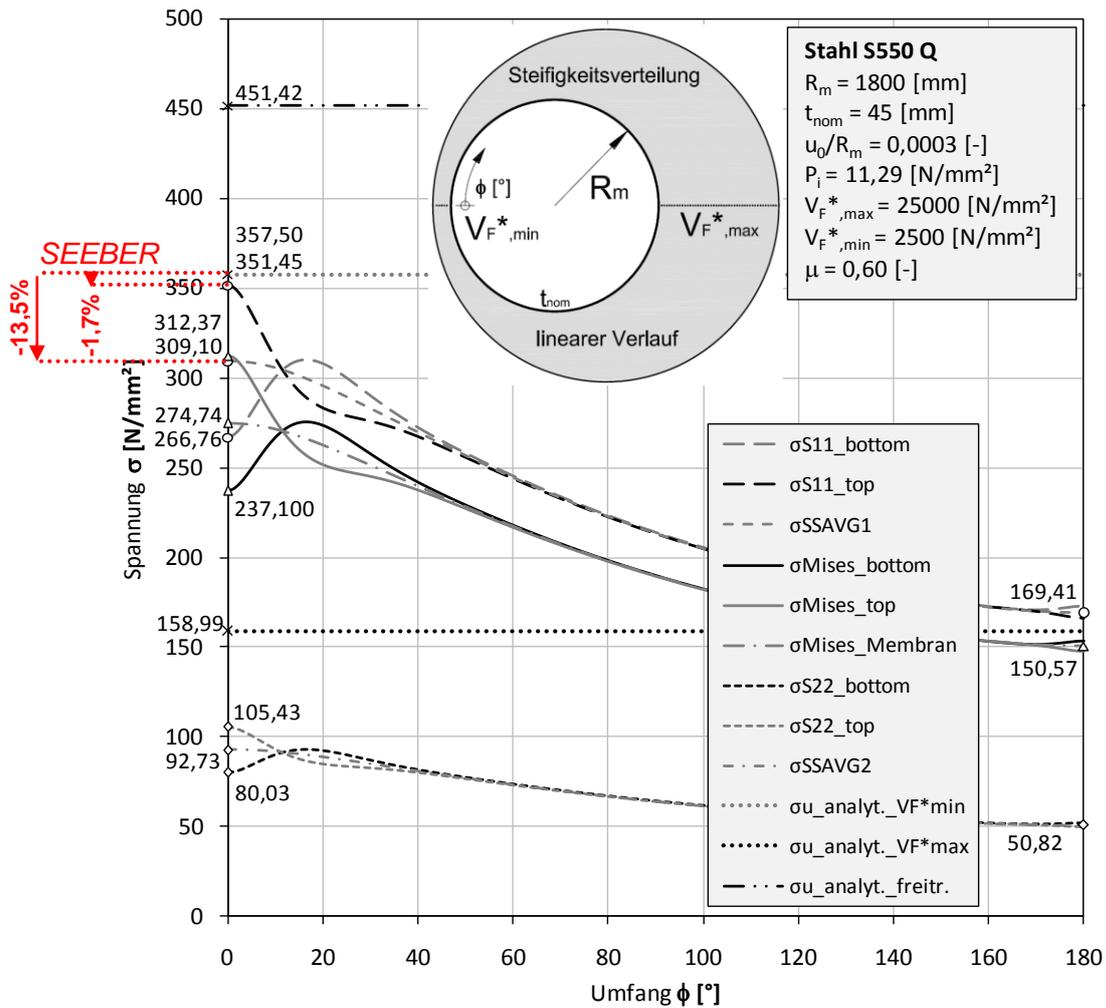


Abbildung 56: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

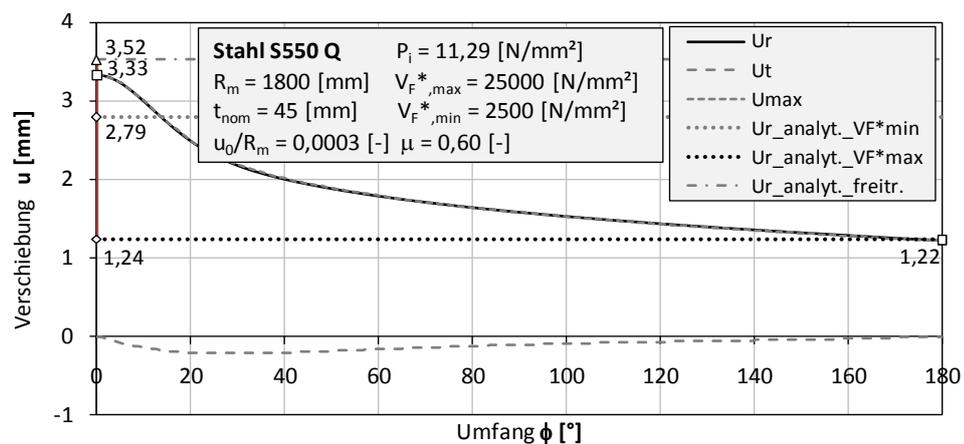


Abbildung 57: Verschiebungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

Tabelle 7: Ergebnistabelle  
 KM\_S550\_D3600\_145\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zul\_mue06

Material:	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)										
	$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_top\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF*min}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr.}$ [mm]	
Stahl S550 Q	357.50	158.99	451.42	550.00	495.00	309.10	274.74	351.45	2.79	3.52	
Fließgrenze $f_y$	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.157	1.301	1.017			
Reibungsbeiwert $\mu$	1.385	3.113	1.097	0.900	1.000	1.601	1.802	1.408			
Sicherheitsfaktor $k_{Seeber}$	1.000	2.249	0.792	0.650	0.722	1.157	1.301	1.017			
Sicherheitsfaktor $k_{reitr.}$	0.445	1.000	0.352	0.289	0.321	0.514	0.579	0.452			
Innendruck $P_i$	1.263	2.839	1.000	0.821	0.912	1.460	1.643	1.284			
Rohrradius $R_m$	0.746	1.678	0.591	0.485	0.539	0.863	0.971	0.759			
Wandstärke $t$	0.983	2.211	0.779	0.639	0.710	1.137	1.279	1.000			
Felssteifigkeit $V_f^*_{max}$	0.474	1.066	0.375	0.308	0.342	0.548	0.617	0.482			
Felssteifigkeit $V_f^*_{min}$	0.865	1.944	0.685	0.562	0.624	1.000	1.125	0.880			
$\sigma_{Rd\_zul\_Seeber}$	0.663	1.491	0.525	0.431	0.479	0.767	0.863	0.675			
$\sigma_{S11\_bottom\_phi=0}$	0.874	1.965	0.692	0.568	0.631	1.011	1.137	0.889			
$\sigma_{S11\_top\_max}$	0.421	0.947	0.334	0.274	0.304	0.487	0.548	0.428			
$\sigma_{SSAVG1\_min}$	0.768	1.728	0.609	0.500	0.555	0.889	1.000	0.782			
$\sigma_{SSAVG1\_max}$	0.224	0.503	0.177	0.146	0.162	0.259	0.291	0.228			
$\sigma_{Mises\_bottom\_phi=0}$	0.295	0.663	0.234	0.192	0.213	0.341	0.384	0.300			
$\sigma_{Mises\_top\_max}$	0.142	0.320	0.113	0.092	0.103	0.164	0.185	0.145			
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	0.259	0.583	0.205	0.169	0.187	0.300	0.338	0.264			
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$									1.000	0.792	
$\sigma_{S22\_bottom\_phi=0}$									0.445	0.352	
$\sigma_{S22\_top\_max}$									1.263	1.000	
$\sigma_{SSAVG2\_min}$									1.194	0.946	
$\sigma_{SSAVG2\_max}$									0.439	0.347	
$U_{r\_analyt\_VF*min}$	2.79								0.439	0.347	
$U_{r\_analyt\_VF*max}$	1.24										
$U_{r\_analyt\_freitr.}$	3.52										
$U_{r\_max}$	3.33										
$U_{r\_min}$	1.22										
$U_{r\_phi=180}$	1.22										

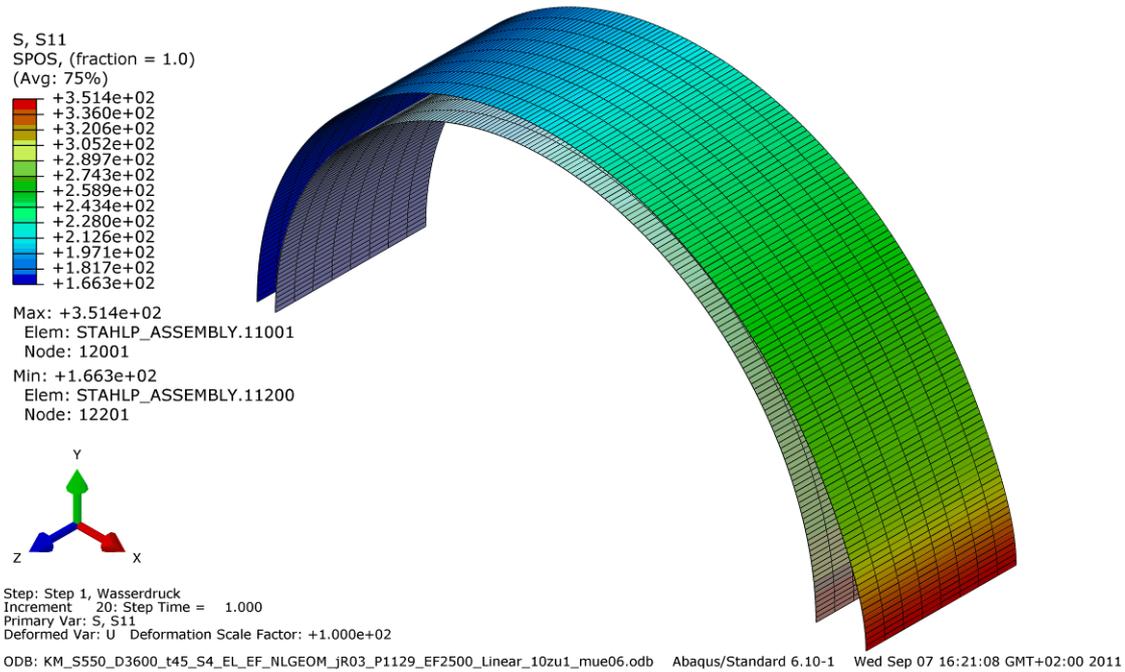


Abbildung 58: Umfangspannung FE außen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

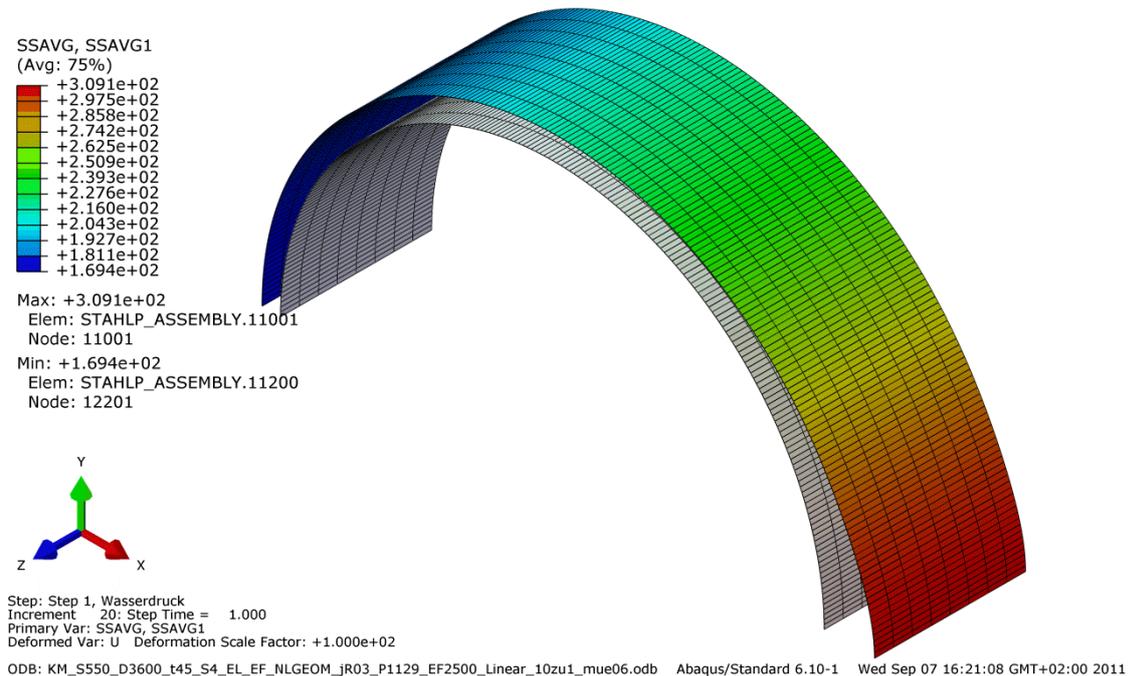


Abbildung 59: Membranspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

## 6.5 Detailauswertung: lokaler Sprung

Die Detailauswertung der Bettungsvariante lokaler Sprung lässt 2 verschiedene Spannungsverläufe erkennen. Die lokalen Biegebeanspruchungen der Störzone fallen durch den sehr abrupten Steifigkeitsabfall allgemein viel höher aus als im linearen Bettungsfall. Das Rohr erfährt eine viel ausgeprägtere Ausbeulung auf begrenztem Raum, was zu einer größeren Krümmung und entsprechender Gegenkrümmung führt. Dies führt zu 2 verschiedenen Spannungsverläufen. Zum einen der unter realistischen Bedingungen am häufigsten auftretende Fall, bei dem die Gegenkrümmung der Ausbeulung deutlich ausgeprägter ausfällt als die Krümmung der Ausbuchtung. Dies liegt daran, dass die Gebirgssteifigkeit an der Gegenkrümmung 10 mal steifer ist als an der Beulenkrümmung. Das Gebirge bietet größeren Widerstand und die Rohrwand hat keine Möglichkeit die lokale Zusatzbeanspruchung durch Biegesteifigkeit umzulagern. Somit ist das Stahlrohr gezwungen sich an die „Felskante“ anzuschmiegen. Anders verhält es sich bei der Bauchkrümmung. Die Felssteifigkeit fällt in diesem Bereich auf einen sehr kleinen Wert, somit bietet der Fels nur wenig Widerstand gegenüber der Verformung der Panzerung. (Die Stahlpanzerung hat größeren Einfluss auf die Verformungsfigur und diese ist unter Innendruck bestrebt eine Kreisform auszubilden.)

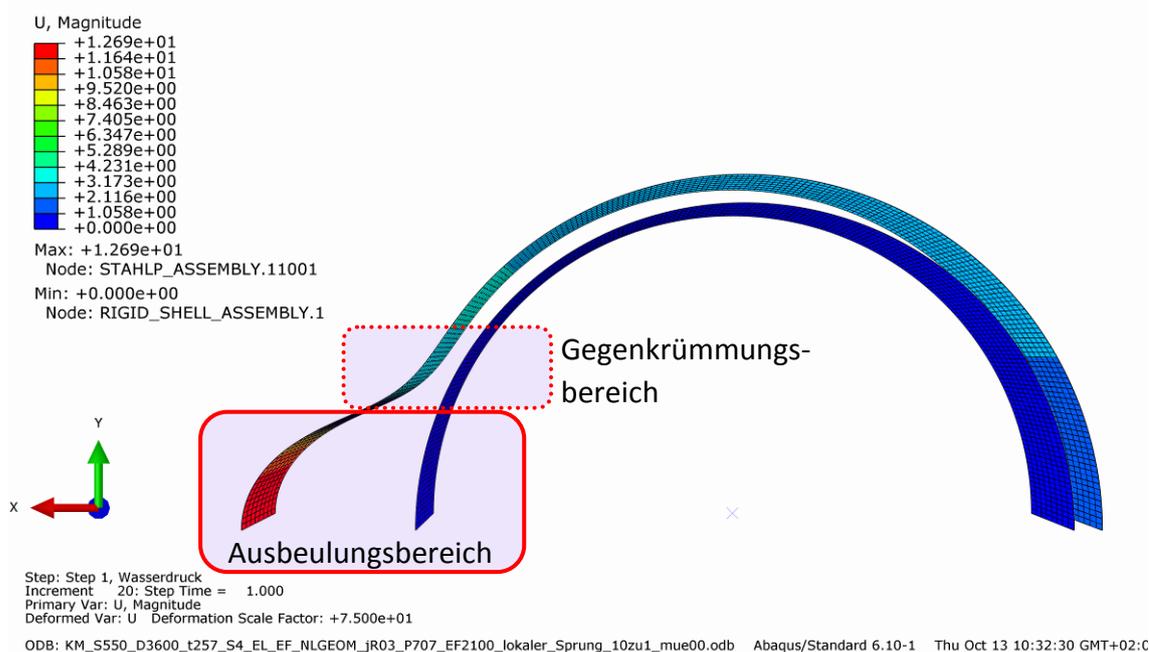


Abbildung 60: Verformungsfigur, Ausbeulungsbereich

Das Verformungsverhalten der Panzerung ist neben dem Verlauf und der Größe der Gebirgsbettung auch von der Biegesteifigkeit der Rohrwandung, also der Rohrwandstärke abhängig.

Bei sehr kleinen Werten der Felssteifigkeit und kleinem Verhältnis  $R_m/t$ , d.h. dicken Rohren mit größerer Biegesteifigkeit, kann auch ein anderer Spannungsverlauf eintreten. Die Krümmung der Ausbeulung wird größer als die der Gegenkrümmung und

die Spannungsspitze wandert an deren Position. Die größte Umfangsspannung liegt in diesem Fall an der Rohraußenseite.

Es sei zu erwähnen dass der Steifigkeitssprung in beiden Bettungsmodellen immer im Verhältnis 10 zu 1 gebildet wird. Dies bedeutet, dass bei größeren Werten der Felssteifigkeit auch der Steifigkeitssprung höher ausfällt. Bei kleineren Felssteifigkeiten wird der Sprung demnach entsprechend kleiner.

### 6.5.1 Fall: Spannungsspitze an Rohrinneiseite ( $\sigma_{11\_bottom\_max}$ )

Die Auswertung erfolgt an dem in Abbildung 61 gekennzeichneten Punkt im Abgrenzungsdiagramm. Das maßgebende Bemessungskriterium ist das des freitragenden Rohres.

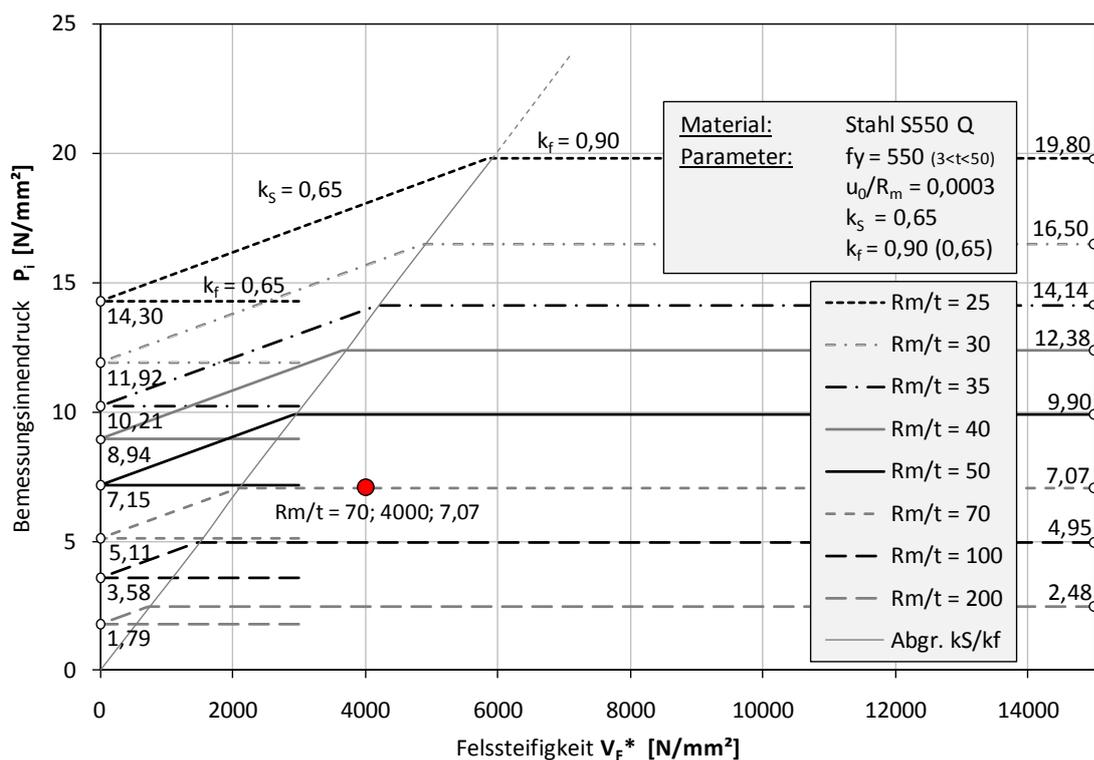


Abbildung 61: Abgrenzungsdiagramm, Bemessungspunkt Detailauswertung Bettungsfall: lokaler Sprung, bottom\_max

Die Bemessungssituation stellt ein „worst-case“-Szenario dar. Die analytische Berechnung erfolgt mit der maximalen Gebirgssteifigkeit des Bettungsmodells (diese entspricht in Realität aber der global schwächsten erkundenden Festigkeit)

radialsymmetrisch. Eine unvorhergesehene Störzone sorgt für einen abrupten lokalen Steifigkeitsabfall und ändert das Bettungsverhalten.

Wie bei den meisten Auswertungen der FE-Berechnungen mit Bettungsfall lokaler Sprung stellt sich auch bei dieser das Spannungsmaximum bei der Gegenkrümmung der Ausbeulung ein.

Das für die maximale Innendruckaufnahme limitierende Bemessungskriterium der analytischen Rechnung ist in diesem Fall das freitragende Rohr. Im Vergleich liegt die Membranspannung der FE-Berechnung bei Reibung  $\mu=0,00$  mit einem Unterschied von 28,5% unter dem analytischen Ergebnis. Die größte Umfangsspannung übersteigt die Grenzspannung  $\sigma_{\text{grenz}} = k_f \cdot f_y = 0,9 \cdot 550 = 495 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  um 2,5%.

Wie bereits in Kapitel 0 erläutert, stellt das freitragende Bemessungskriterium nur eine zusätzliche Anforderung für lokal begrenzte Bereiche (außergewöhnlicher Fall des Gebirgsversagens) dar. Dieses Kriterium gilt es für diese Bereiche zu erfüllen. Die für den Großteil der Panzerung angebrachte analytische Berechnungsmethode ist aber wieder die Berechnung mit Gebirgsmitwirkung nach Seeber. Die Stahlpanzerung wird bei dieser jedoch aufgrund der Limitierung des Druckes aus der freitragenden Berechnung nur zum Teil auf die entsprechende Bemessungsspannung ausgenutzt.

Der Vergleich der FE-Rechnung mit der Seeber-Berechnung ergibt bei Reibung  $\mu=0,00$  eine Überbeanspruchung der realitätsnahen Membranspannung um 21,4%. Das Seeber-Kriterium ist dadurch nicht erfüllt.

Der Einfluss der Reibung wirkt sich in gleicher Weise wie im Fall des linearen Bettungsverlaufes aus. Die Membranspannung steigt im Bereich der niedrigen Felsteifigkeit. Der Effekt der Reibung bewirkt einen Spannungsabfall der Membranspannung mit zunehmender Umfangslänge. Ein höherer Reibungsbeiwert bewirkt eine größere Membranspannung im Störbereich mit einem steileren Membranspannungsabfall. Mit zunehmendem Wert sinkt auch die Größe der zusätzlichen sekundären Biegespannungen. Das Spannungsniveau der maximalen Umfangsspannung bleibt jedoch auf relativ gleichem Niveau, bei zunehmender Reibung wirkt dem Abfall der Biegespannungen ein Anstieg der Membranspannung entgegen.

Wie Abbildung 62 zu erkennen gibt, stellt sich im Bereich der Störzone eine große radiale Verschiebung ein, welche im Bereich der Beulengegenkrümmung auf ein Minimum abfällt. Beide Extremwerte sinken bei steigendem Reibungsbeiwert.

6.5.1.1 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

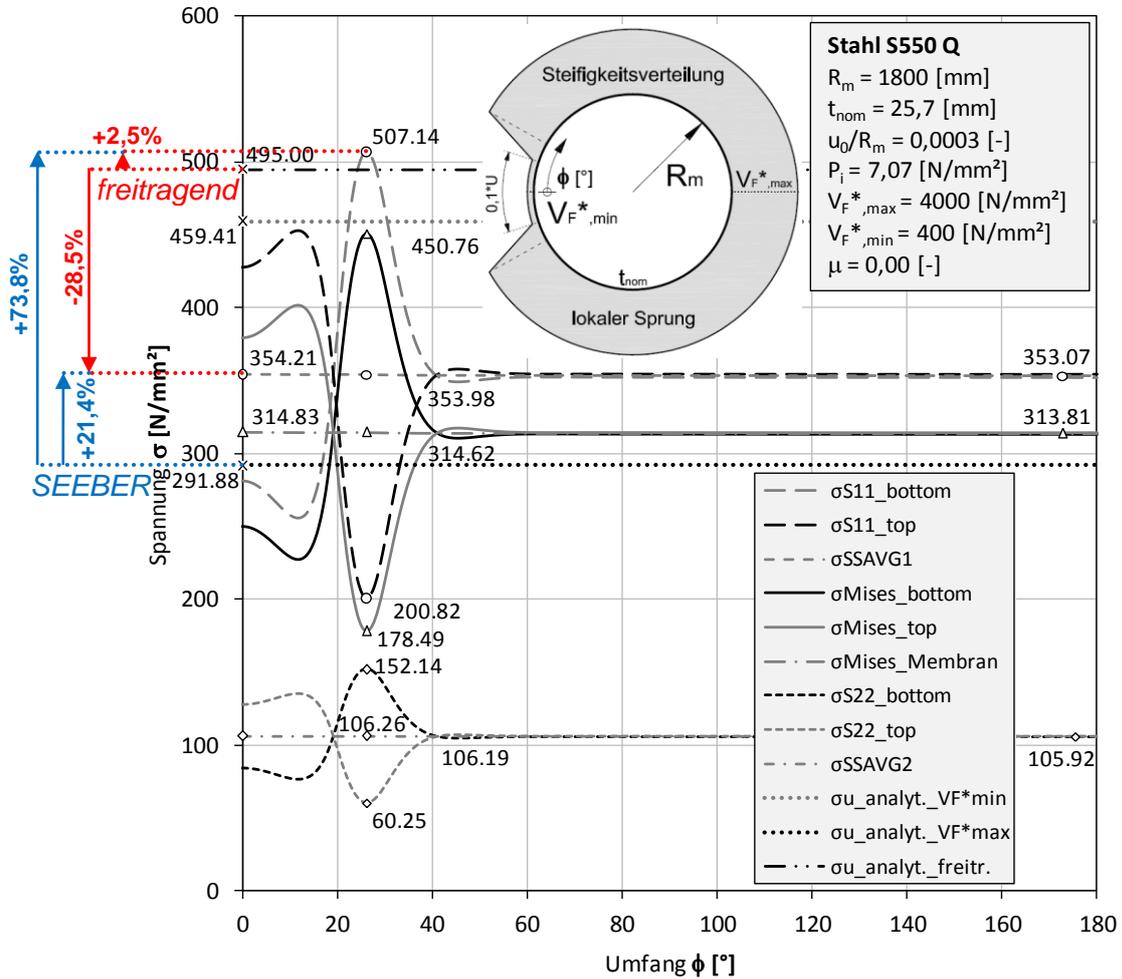


Abbildung 62: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

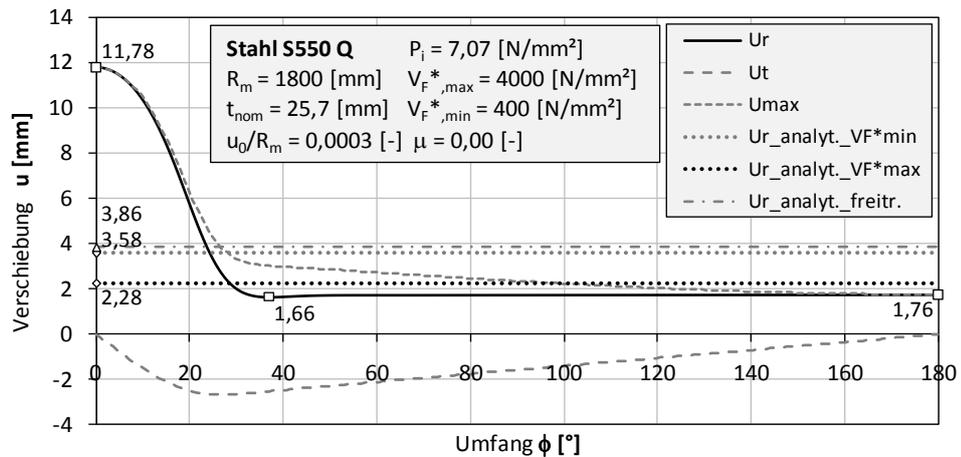


Abbildung 63: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

Tabelle 8: Ergebnistabelle

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zul\_mue00

Material: Stahl S550 Q	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)													
	$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{L\_analyt\_VF*max}$ [mm]	$U_{L\_analyt\_freitr.}$ [mm]				
Fließgrenze $f_y$ =	550			550.00	495.00	495.00	550.00	495.00	495.00	495.00	495.00			
Reibungsbeiwert $\mu$ =	0.00													
Sicherheitsfaktor $k_{Seeber}$ =	0.65													
Sicherheitsfaktor $k_{reitr.}$ =	0.90													
Innendruck $P_i$ =	7.07													
Rohrradius $R_m$ =	1800													
Wandstärke $t$ =	25.7													
Felssteifigkeit $V_{r\_max}$ =	4000													
Felssteifigkeit $V_{r\_min}$ =	400													
$\sigma_{Rd\_zul\_Seeber}$ =	357.50													
$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ =	495.00													
$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ =	459.41													
$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ =	291.88													
$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ =	495.00													
$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ =	507.14													
$\sigma_{S11\_top\_min\_lokal}$ =	200.82													
$\sigma_{SSAVG1\_min}$ =	353.07													
$\sigma_{SSAVG1\_max}$ =	354.21													
$\sigma_{SSAVG1\_lokal}$ =	353.98													
$\sigma_{Mises\_bottom\_max}$ =	450.76													
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal}$ =	178.49													
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$ =	313.81													
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ =	314.83													
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal}$ =	314.62													
$\sigma_{S22\_bottom\_max}$ =	152.14													
$\sigma_{S22\_top\_min\_lokal}$ =	60.25													
$\sigma_{SSAVG2\_min}$ =	105.92													
$\sigma_{SSAVG2\_max}$ =	106.26													
$\sigma_{SSAVG2\_lokal}$ =	106.19													
$U_{L\_analyt\_VF*min}$ =	3.58													
$U_{L\_analyt\_VF*max}$ =	2.28													
$U_{L\_analyt\_freitr.}$ =	3.86													
$U_{r\_max}$ =	11.78													
$U_{r\_min}$ =	1.66													
$U_{r\_phi=180}$ =	1.76													
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>														
	1.225	0.778	0.722	0.650	0.722	1.009	1.136	0.705	2.28	3.86	314.83	507.14	2.28	3.86
	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.397	1.572	0.976						
	1.574	1.000	0.928	0.835	0.928	1.297	1.459	0.906						
	1.000	0.635	0.590	0.531	0.590	0.824	0.927	0.576						
	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.397	1.572	0.976						
	1.737	1.104	1.025	0.922	1.025	1.432	1.611	1.000						
	0.688	0.437	0.406	0.365	0.406	0.567	0.638	0.396						
	1.210	0.769	0.713	0.642	0.713	0.997	1.121	0.696						
	1.214	0.771	0.716	0.644	0.716	1.000	1.125	0.698						
	1.213	0.771	0.715	0.644	0.715	0.999	1.124	0.698						
	1.544	0.981	0.911	0.820	0.911	1.273	1.432	0.889						
	0.612	0.389	0.361	0.325	0.361	0.504	0.567	0.352						
	1.075	0.683	0.634	0.571	0.634	0.886	0.997	0.619						
	1.079	0.685	0.636	0.572	0.636	0.889	1.000	0.621						
	1.078	0.685	0.636	0.572	0.636	0.888	0.999	0.620						
	0.521	0.331	0.307	0.277	0.307	0.430	0.483	0.300						
	0.206	0.131	0.122	0.110	0.122	0.170	0.191	0.119						
	0.363	0.231	0.214	0.193	0.214	0.299	0.336	0.209						
	0.364	0.231	0.215	0.193	0.215	0.300	0.338	0.210						
	0.364	0.231	0.215	0.193	0.215	0.300	0.337	0.209						
									1.574	0.928				
									1.000	0.590				
									1.696	1.000				
									5.174	3.051				
									0.727	0.429				
									0.773	0.456				

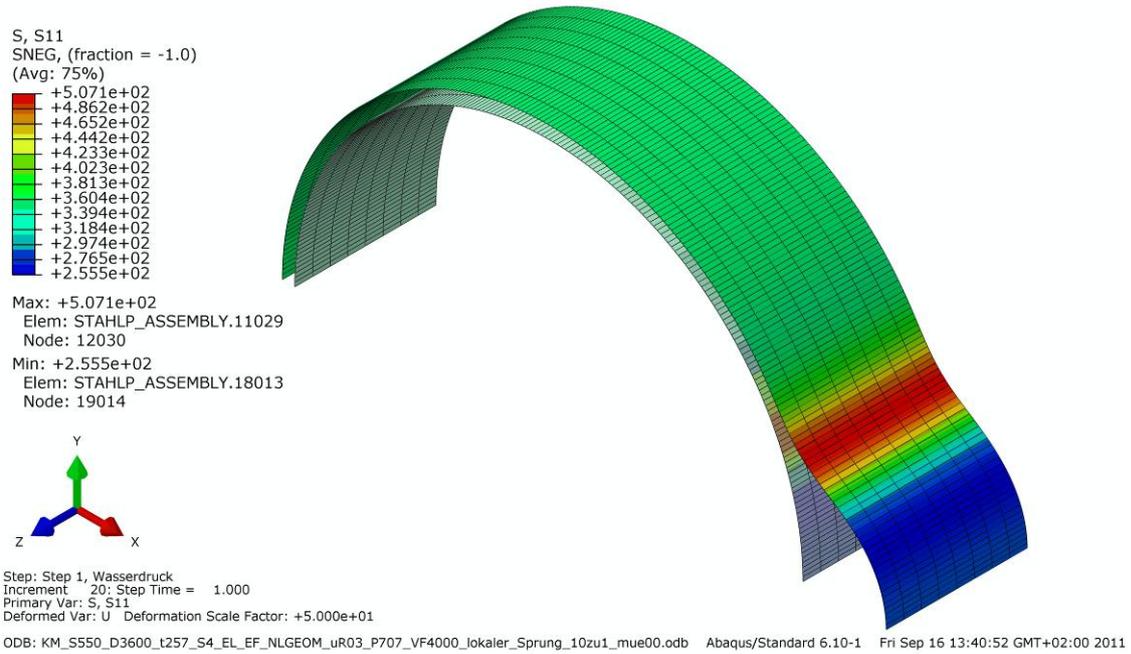


Abbildung 64: Umfangspannung FE innen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

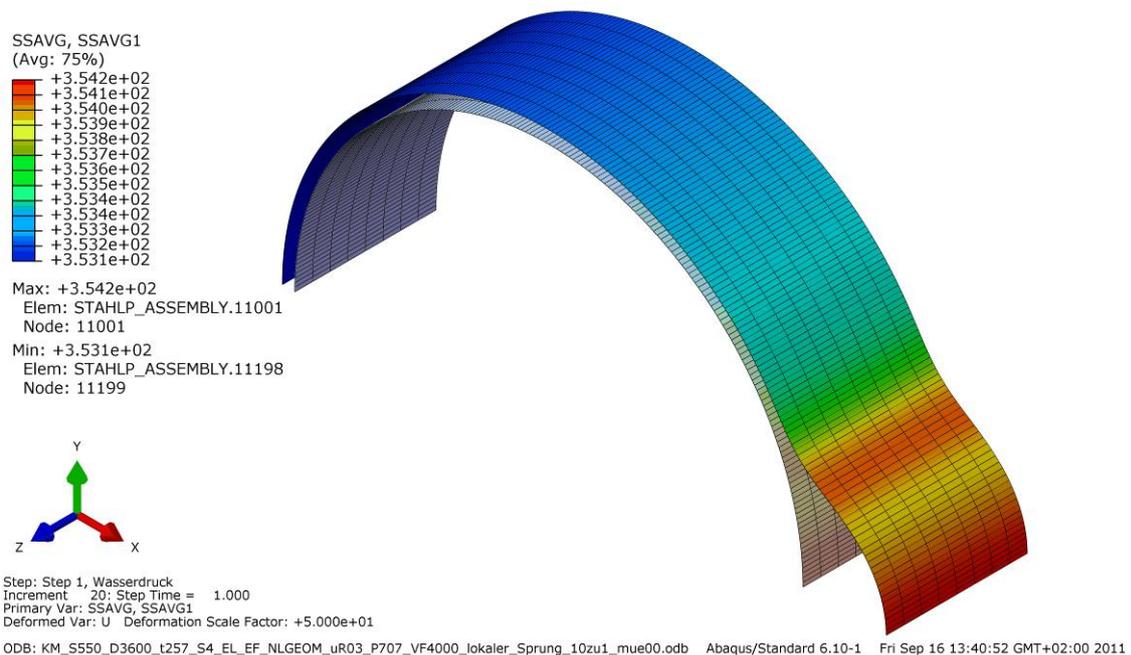


Abbildung 65: Umfangspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

6.5.1.2 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

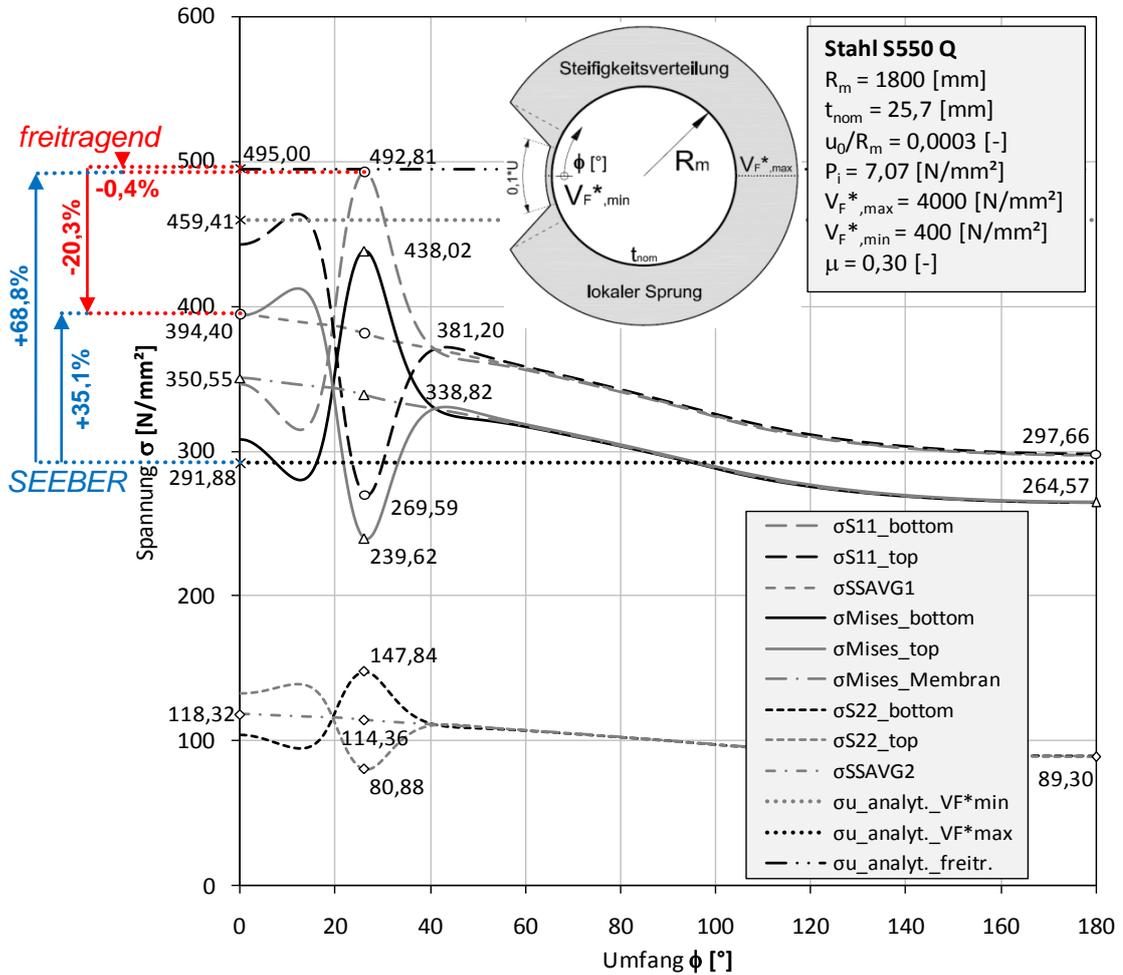


Abbildung 66: Spannungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

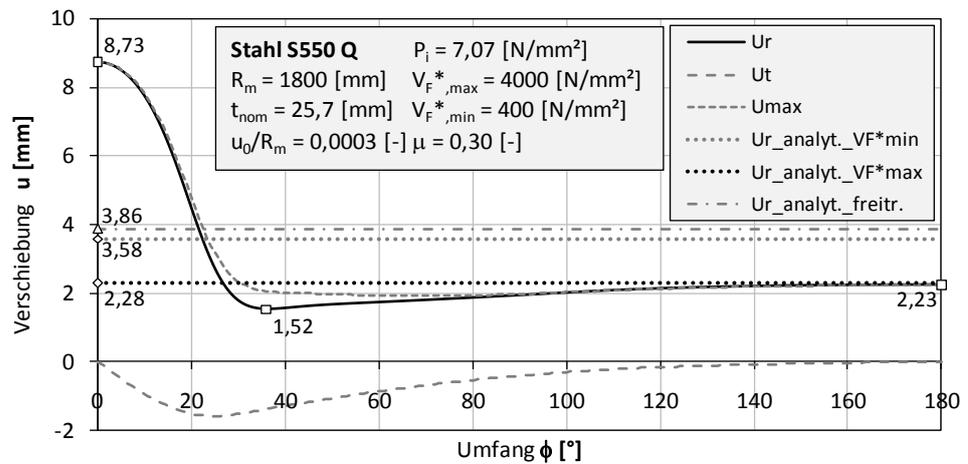


Abbildung 67: Verschiebungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

Tabelle 9: Ergebnistabelle

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

	Material: Stahl S550 Q	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)										
		$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF*max}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr.}$ [mm]	
$f_y$	550	291.88	459.41	495.00	550.00	495.00	394.40	350.55	492.81	2.28	3.86	
Reibungsbeiwert $\mu$	0.30	1.225	0.778	0.722	0.650	0.722	0.906	1.020	0.725			
Sicherheitsfaktor $k_{seiber}$	0.65	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.255	1.412	1.004			
Sicherheitsfaktor $k_{freitr.}$	0.90	1.574	1.000	0.928	0.835	0.928	1.165	1.311	0.932			
Innendruck $P_i$	7.07	1.000	0.635	0.590	0.531	0.590	0.740	0.833	0.592			
Rohrradius $R_m$	1800	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.255	1.412	1.004			
Wandstärke $t$	25.7	1.000	0.635	0.590	0.531	0.590	0.740	0.833	0.592			
Felsfestigkeit $V_f^*_{max}$	4000	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.255	1.412	1.004			
Felsfestigkeit $V_f^*_{min}$	400	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.255	1.412	1.004			
$\sigma_{Rd\_zul\_seiber}$	357.50	1.688	1.073	0.996	0.896	0.996	1.250	1.406	1.000			
$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$	495.00	0.924	0.587	0.545	0.490	0.545	0.684	0.769	0.547			
$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$	459.41	1.020	0.648	0.601	0.541	0.601	0.755	0.849	0.604			
$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$	291.88	1.351	0.859	0.797	0.717	0.797	1.000	1.125	0.800			
$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$	495.00	1.306	0.830	0.770	0.693	0.770	0.967	1.087	0.774			
$\sigma_{S11\_bottom\_max}$	492.81	1.501	0.953	0.885	0.796	0.885	1.111	1.250	0.889			
$\sigma_{S11\_top\_min\_lokal}$	269.59	0.821	0.522	0.484	0.436	0.484	0.608	0.684	0.486			
$\sigma_{SSAVG1\_min}$	297.66	0.906	0.576	0.534	0.481	0.534	0.671	0.755	0.537			
$\sigma_{SSAVG1\_max}$	394.40	1.201	0.763	0.708	0.637	0.708	0.889	1.000	0.711			
$\sigma_{SSAVG1\_lokal}$	381.20	1.161	0.738	0.684	0.616	0.684	0.859	0.967	0.688			
$\sigma_{Mises\_bottom\_max}$	438.02	0.507	0.322	0.299	0.269	0.299	0.375	0.422	0.300			
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal}$	239.62	0.277	0.176	0.163	0.147	0.163	0.205	0.231	0.164			
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	264.57	0.306	0.194	0.180	0.162	0.180	0.226	0.255	0.181			
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$	350.55	0.405	0.258	0.239	0.215	0.239	0.300	0.338	0.240			
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal}$	338.82	0.392	0.249	0.231	0.208	0.231	0.290	0.326	0.232			
$\sigma_{S22\_bottom\_max}$	147.84											
$\sigma_{S22\_top\_min\_lokal}$	80.88											
$\sigma_{SSAVG2\_min}$	89.30											
$\sigma_{SSAVG2\_max}$	118.32											
$\sigma_{SSAVG2\_lokal}$	114.36											
$U_{r\_analyt\_VF*min}$	3.58									1.574	0.928	
$U_{r\_analyt\_VF*max}$	2.28									1.000	0.590	
$U_{r\_analyt\_freitr.}$	3.86									1.696	1.000	
$U_{r\_max}$	8.73									3.837	2.262	
$U_{r\_min}$	1.52									0.669	0.395	
$U_{r\_phi=180}$	2.23									0.981	0.578	
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>												

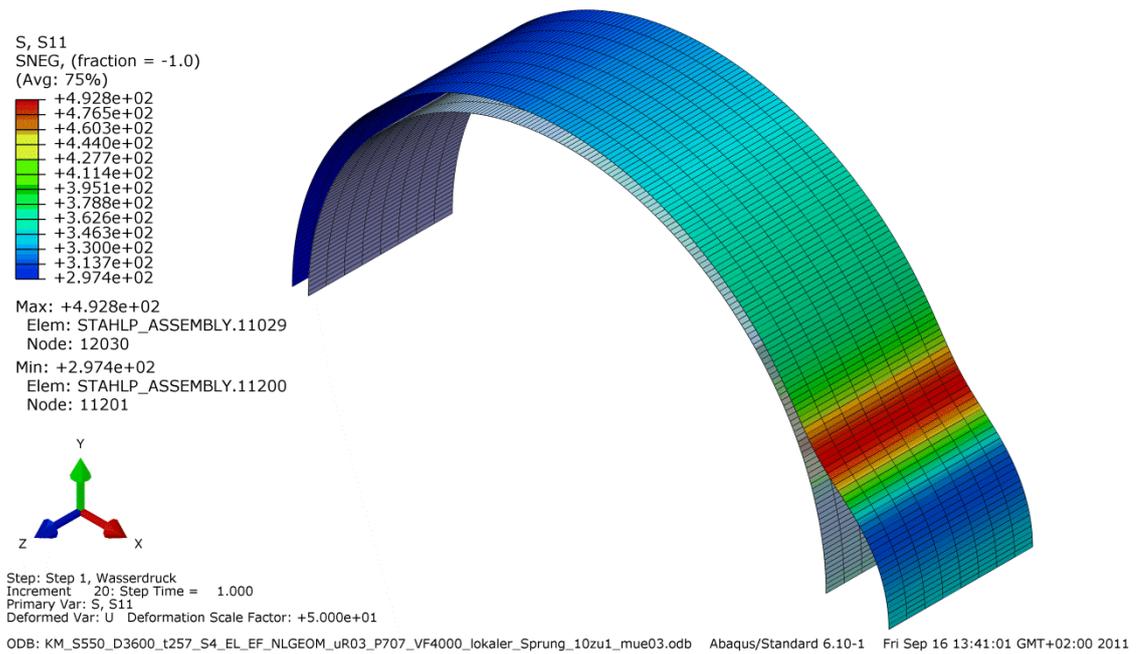


Abbildung 68: Umfangspannung FE innen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

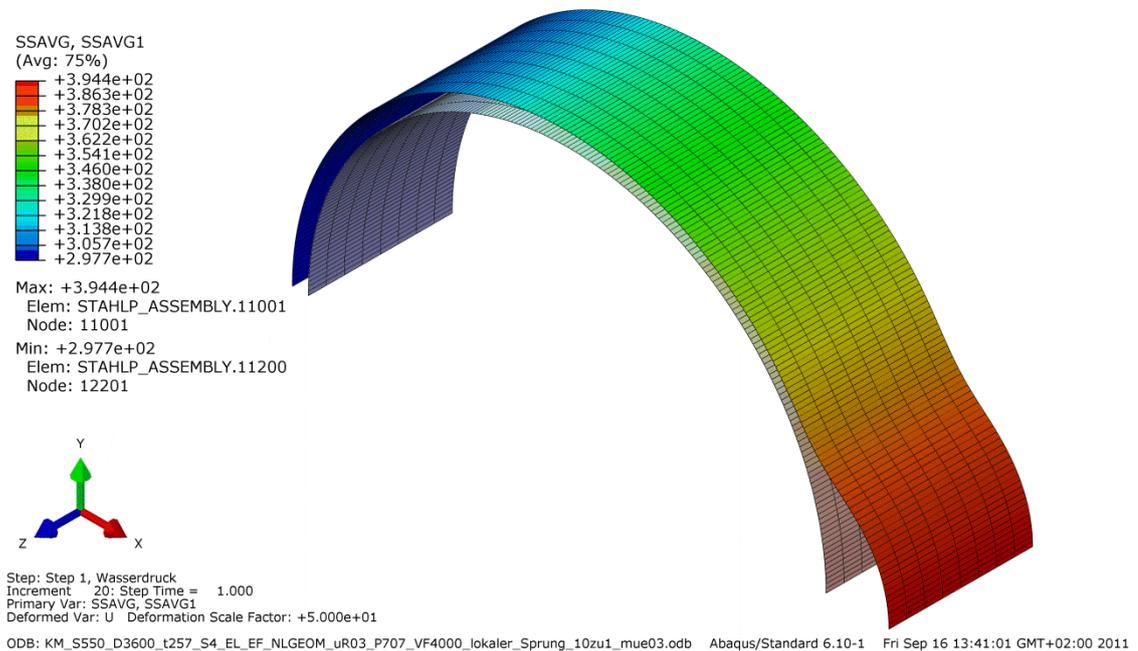


Abbildung 69: Membranpannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

6.5.1.3 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

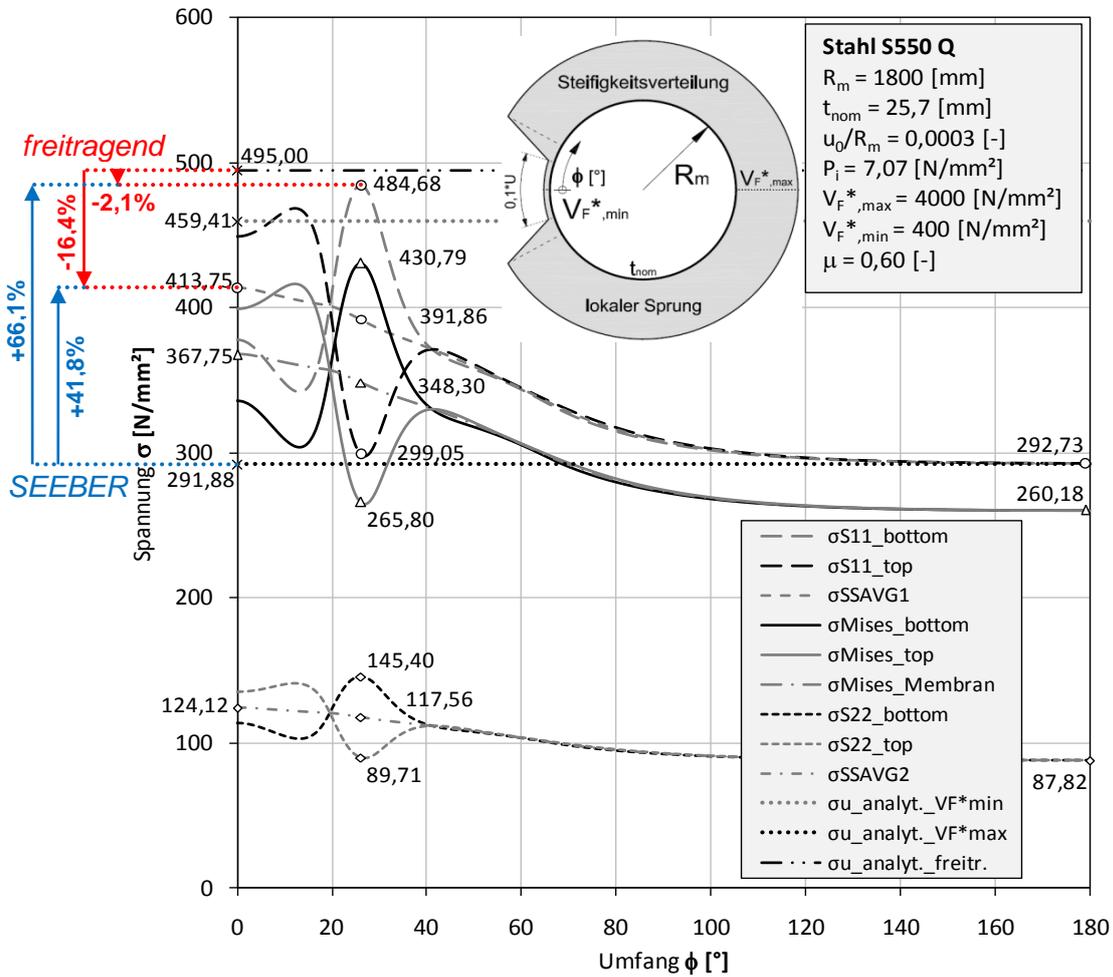


Abbildung 70: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

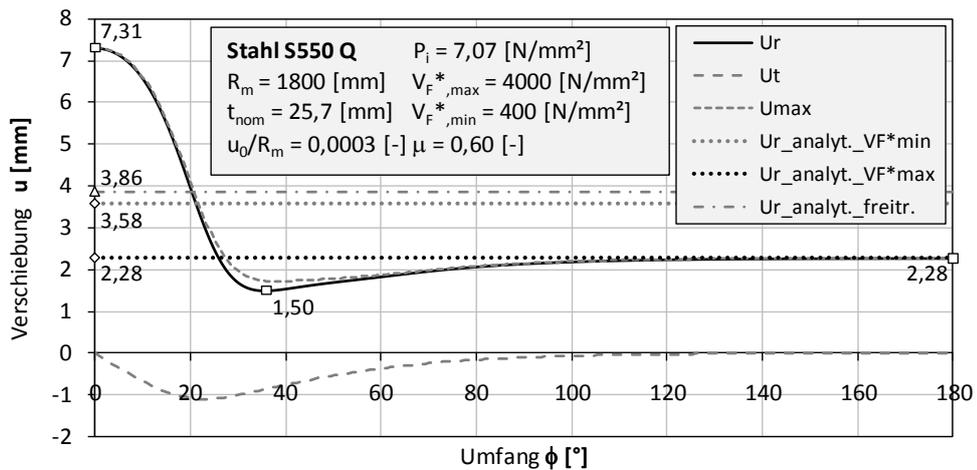


Abbildung 71: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

Tabelle 10: Ergebnistabelle  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

Material: Stahl S550 Q	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)										
	$\sigma_{u\_analyt\_VFmax}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VFmin}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr.}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VFmax}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr.}$ [mm]	
$f_t$ =	291.88	459.41	495.00	550.00	495.00	413.75	367.75	484.68	2.28	3.86	
Reibungsbeiwert $\mu$ =	1.225	0.778	0.722	0.650	0.722	0.864	0.972	0.738			
Sicherheitsfaktor $k_{Seeber}$ =	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.196	1.346	1.021			
Sicherheitsfaktor $k_{freitr.}$ =	1.574	1.000	0.928	0.835	0.928	1.110	1.249	0.948			
Innendruck $P_i$ =	1.000	0.635	0.590	0.531	0.590	0.705	0.794	0.602			
Rohrradius $R_m$ =	1.696	1.077	1.000	0.900	1.000	1.196	1.346	1.021			
Wandstärke $t$ =	1.661	1.055	0.979	0.881	0.979	1.171	1.318	1.000			
Feststoffigkeit $V_f^*_{max}$ =	1.025	0.651	0.604	0.544	0.604	0.723	0.813	0.617			
Feststoffigkeit $V_f^*_{min}$ =	1.003	0.637	0.591	0.532	0.591	0.708	0.796	0.604			
$\sigma_{Rd\_zul\_Seeber}$ =	1.418	0.901	0.836	0.752	0.836	1.000	1.125	0.854			
$\sigma_{u\_analyt\_VFmax}$ =	1.343	0.853	0.792	0.712	0.792	0.947	1.066	0.808			
$\sigma_{u\_analyt\_freitr.}$ =	1.476	0.938	0.870	0.783	0.870	1.041	1.171	0.889			
$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ =	0.911	0.579	0.537	0.483	0.537	0.642	0.723	0.548			
$\sigma_{S11\_top\_min\_lokal}$ =	0.891	0.566	0.526	0.473	0.526	0.629	0.708	0.537			
$\sigma_{SSAVG1\_min}$ =	1.260	0.800	0.743	0.669	0.743	0.889	1.000	0.759			
$\sigma_{SSAVG1\_max}$ =	1.193	0.758	0.704	0.633	0.704	0.842	0.947	0.719			
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal}$ =	0.498	0.317	0.294	0.264	0.294	0.351	0.395	0.300			
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$ =	0.307	0.195	0.181	0.163	0.181	0.217	0.244	0.185			
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ =	0.301	0.191	0.177	0.160	0.177	0.212	0.239	0.181			
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal}$ =	0.425	0.270	0.251	0.226	0.251	0.300	0.338	0.256			
$\sigma_{S22\_top\_min\_lokal}$ =	1.175	0.256	0.237	0.214	0.237	0.284	0.320	0.243			
$\sigma_{S22\_bottom\_max}$ =	3.58								1.574	0.928	
$U_{r\_analyt\_VFmin}$ =	2.28								1.000	0.590	
$U_{r\_analyt\_VFmax}$ =	3.86								1.696	1.000	
$U_{r\_analyt\_freitr.}$ =	7.31								3.209	1.892	
$U_{r\_max}$ =	1.50								0.659	0.389	
$U_{r\_min}$ =	2.28								1.000	0.589	
$U_{r\_phi=180}$ =											
Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)											

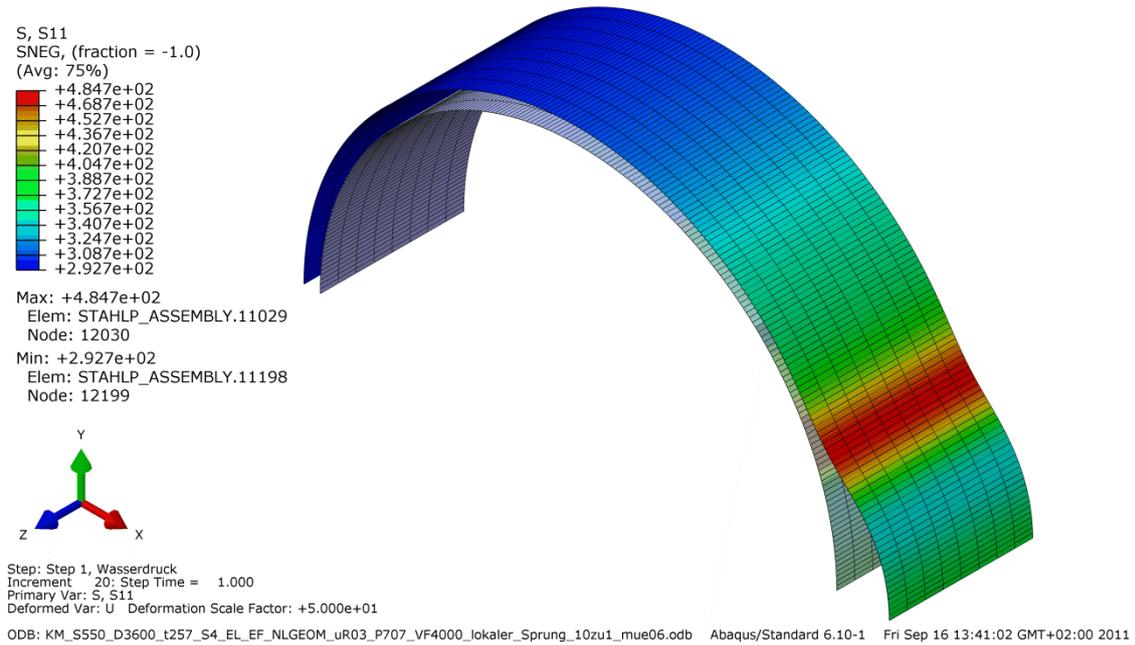


Abbildung 72: Umfangspannung FE innen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

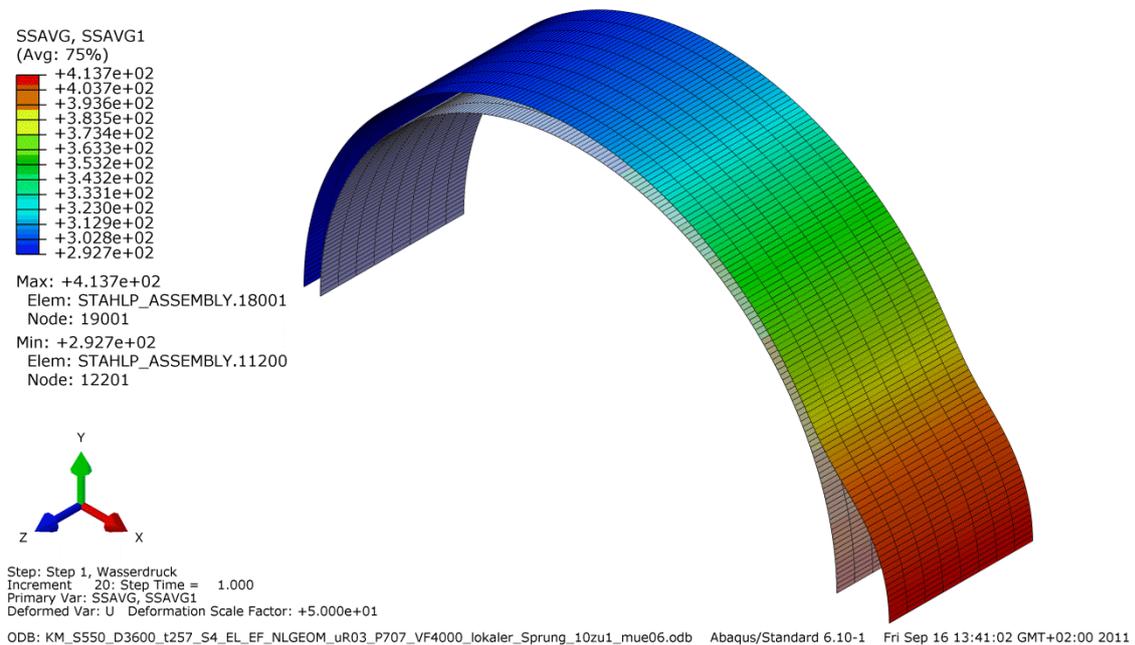


Abbildung 73: Membranspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

### 6.5.2 Fall: Spannungsspitze an Rohraußenseite ( $\sigma_{11\_top\_max}$ )

Abbildung 74 markiert den in diesem Abschnitt untersuchten Bemessungspunkt mit seinen Parametern. Er liegt im maßgebenden Seeber-Kriterium.

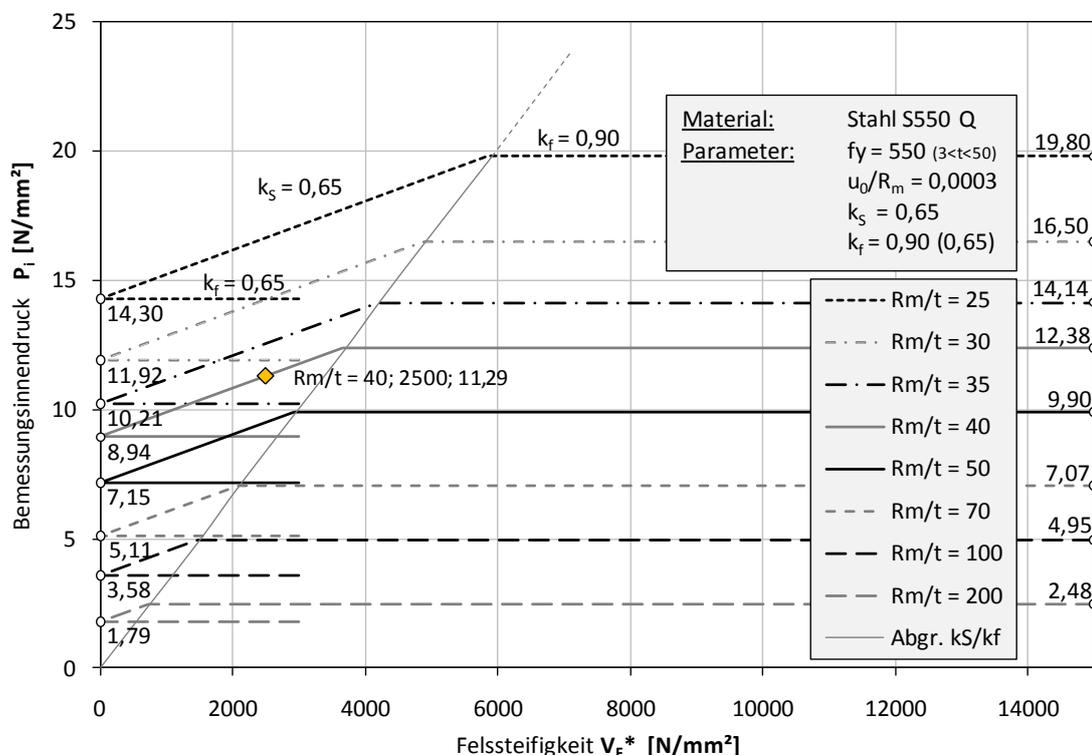


Abbildung 74: Abgrenzungsdiagramm, Bemessungspunkt Detailauswertung Bettungsfall: lokaler Sprung,  $top\_max$

Bei niedriger Felssteifigkeit und kleinerem Verhältnis  $R_m/t$  sowie bei höheren Felssteifigkeiten und wachsendem Verhältnis  $R_m/t$  wandert die Spannungsspitze von der Rohrinneinnenseite wie in Kapitel 5.5.1 gezeigt an die Rohraußenseite im Bereich der Ausbeulung.

Während bei fehlender Reibung die Spannung an der Rohrinneinnenseite des Gegenkrümmungsbereiches noch das Maximum bildet, bekommt bei steigendem Reibungsbeiwert die außenliegende Umfangsspannung im Bereich der Ausbeulung einen verhältnismäßig höheren Spannungszuwachs aus dem Anstieg der Membranspannung. Ab einem gewissen Reibungsbeiwert wird diese zum neuen Spannungsmaximum.

Die maximalen Werte der Umfangsspannung liegen teils deutlich über dem Wert des freitragenden Bemessungsfalles.

6.5.2.1 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

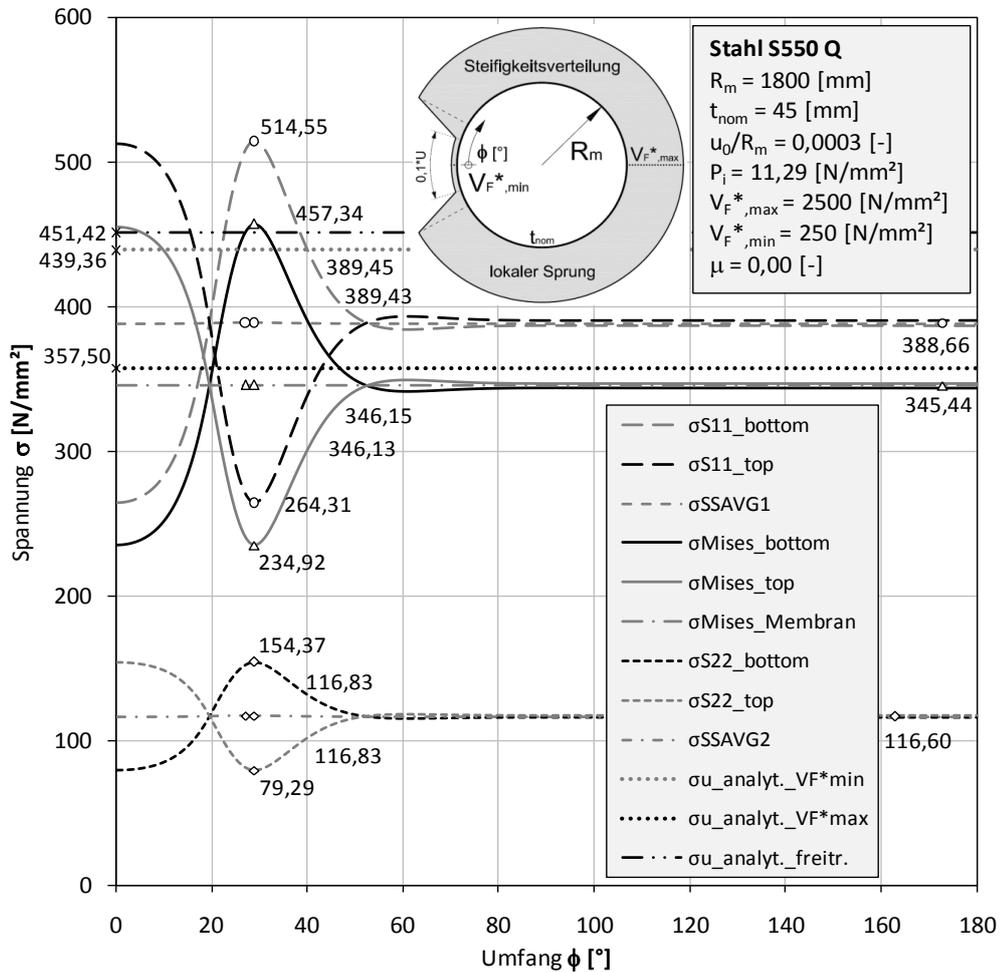


Abbildung 75: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

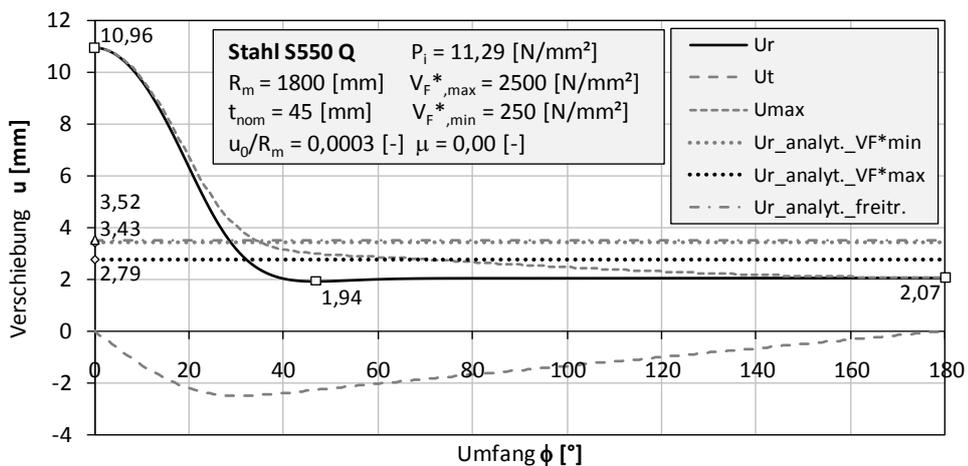


Abbildung 76: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

Tabelle 11: Ergebnistabelle  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zul\_mue00

Material: Stahl S550 Q	Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)									
	$\sigma_{u\_analyt\_VF*max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF*min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{rd\_zul\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_bottom\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF*max}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr}$ [mm]
$f_y =$	550									
Reibungsbeiwert $\mu =$	0.00									
Sicherheitsfaktor $k_{seeber} =$	0.65									
Sicherheitsfaktor $k_{reitr} =$	0.90									
Innendruck $P_i =$	11.29									
Rohrradius $R_m =$	1800									
Wandstärke $t =$	45									
Felssteifigkeit $V_{r\_max} =$	2500									
Felssteifigkeit $V_{r\_min} =$	250									
$\sigma_{rd\_zul\_seeber} =$	357.50	1.000	0.814	0.792	0.650	0.918	1.033	0.695	2.79	3.52
$\sigma_{rd\_zul\_freitr} =$	495.00	1.385	1.127	1.097	0.900	1.271	1.430	0.962		
$\sigma_{u\_analyt\_VF*min} =$	439.36	1.229	1.000	0.973	0.799	1.128	1.269	0.854		
$\sigma_{u\_analyt\_VF*max} =$	357.50	1.000	0.814	0.792	0.650	0.918	1.033	0.695		
$\sigma_{u\_analyt\_freitr} =$	451.42	1.263	1.027	1.000	0.821	1.159	1.304	0.877		
$\sigma_{S11\_bottom\_max} =$	514.55	1.439	1.171	1.140	0.936	1.321	1.486	1.000		
$\sigma_{S11\_top\_min\_lokal} =$	264.31	0.739	0.602	0.586	0.481	0.679	0.764	0.514		
$\sigma_{SSAVG1\_min} =$	388.66	1.087	0.885	0.861	0.707	0.998	1.123	0.755		
$\sigma_{SSAVG1\_max} =$	389.45	1.089	0.886	0.863	0.708	1.000	1.125	0.757		
$\sigma_{SSAVG1\_lokal} =$	389.43	1.089	0.886	0.863	0.708	1.000	1.125	0.757		
$\sigma_{Mises\_bottom\_max} =$	457.34	1.279	1.041	1.013	0.832	1.174	1.321	0.889		
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal} =$	234.92	0.657	0.535	0.520	0.427	0.603	0.679	0.457		
$\sigma_{Mises\_Membran\_min} =$	345.44	0.966	0.786	0.765	0.628	0.887	0.998	0.671		
$\sigma_{Mises\_Membran\_max} =$	346.15	0.968	0.788	0.767	0.629	0.889	1.000	0.673		
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal} =$	346.13	0.968	0.788	0.767	0.629	0.889	1.000	0.673		
$\sigma_{S22\_bottom\_max} =$	154.37	0.432	0.351	0.342	0.281	0.396	0.446	0.300		
$\sigma_{S22\_top\_min\_lokal} =$	79.29	0.222	0.180	0.176	0.144	0.204	0.229	0.154		
$\sigma_{SSAVG2\_min} =$	116.60	0.326	0.265	0.258	0.212	0.299	0.337	0.227		
$\sigma_{SSAVG2\_max} =$	116.83	0.327	0.266	0.259	0.212	0.300	0.338	0.227		
$\sigma_{SSAVG2\_lokal} =$	116.83	0.327	0.266	0.259	0.212	0.300	0.338	0.227		
$U_{r\_analyt\_VF*min} =$	3.43								1.229	0.973
$U_{r\_analyt\_VF*max} =$	2.79								1.000	0.792
$U_{r\_analyt\_freitr} =$	3.52								1.263	1.000
$U_{r\_max} =$	10.96								3.931	3.113
$U_{r\_min} =$	1.94								0.694	0.550
$U_{r\_phi=180} =$	2.07								0.743	0.588
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>										

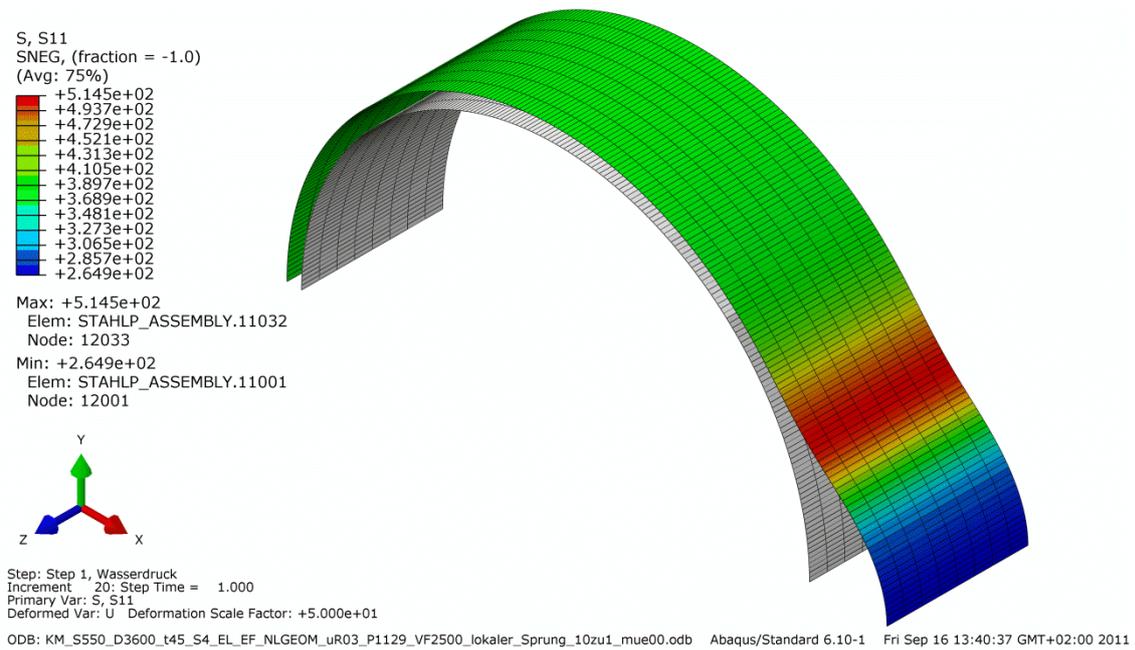


Abbildung 77: Umfangsspannung FE innen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

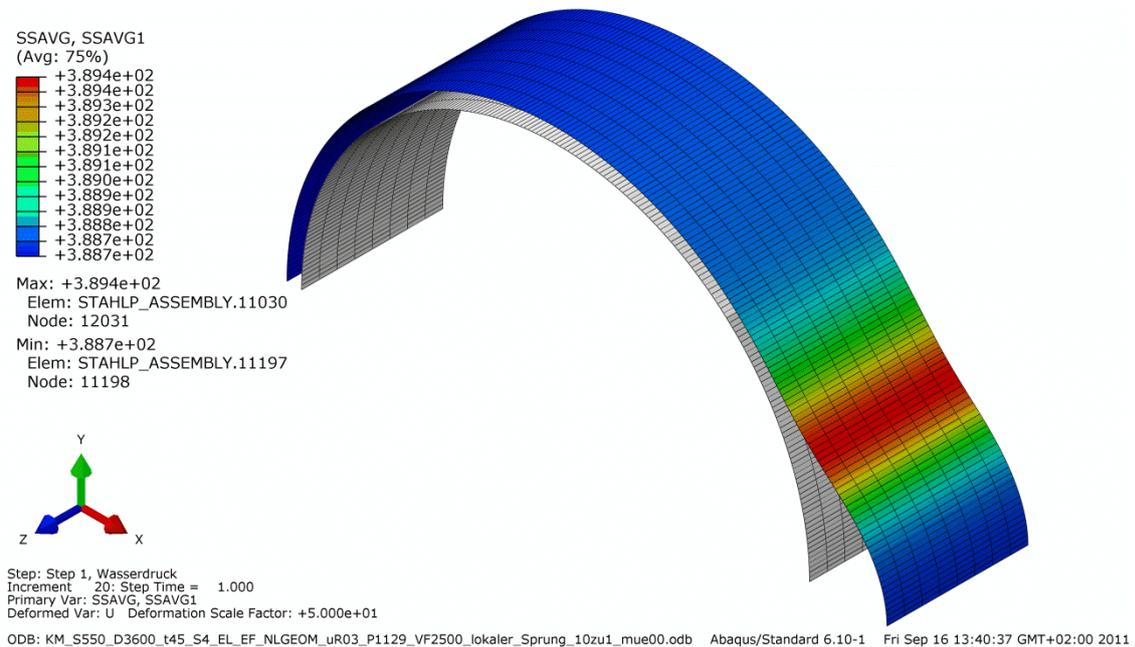


Abbildung 78: Membranspannung  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

6.5.2.2 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

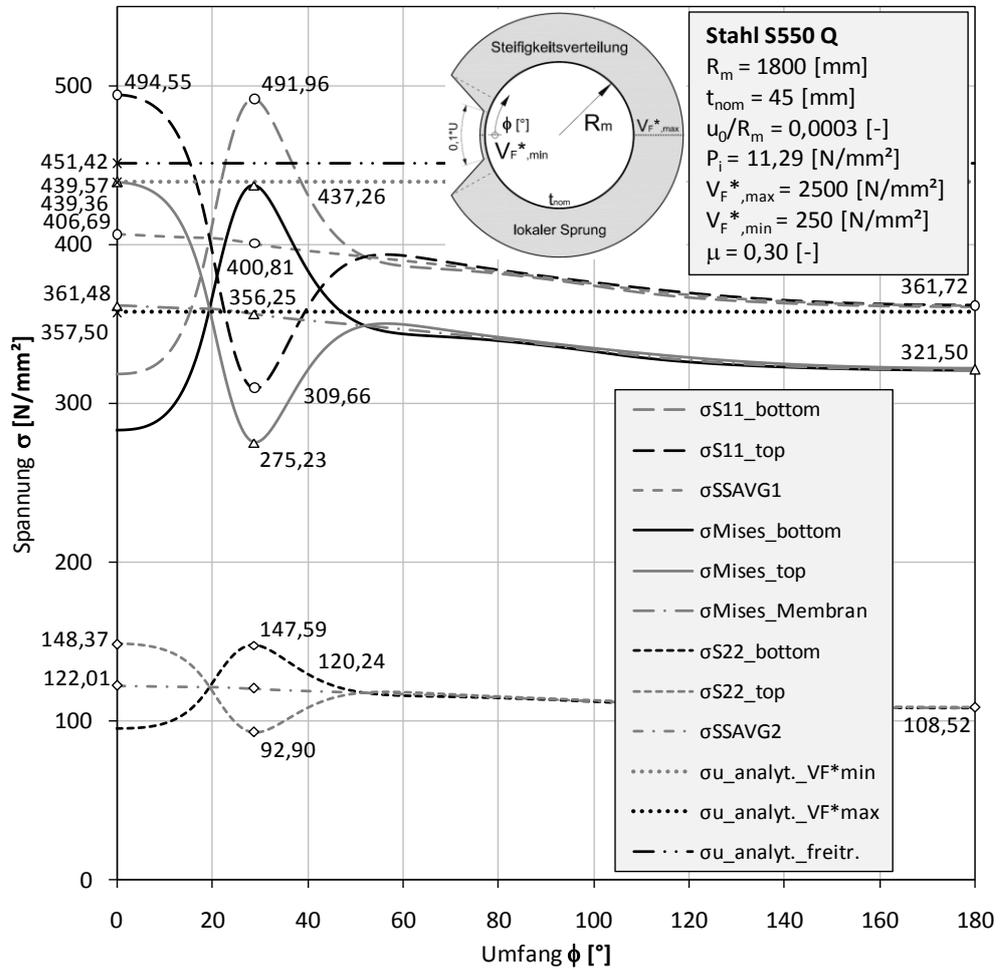


Abbildung 79: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

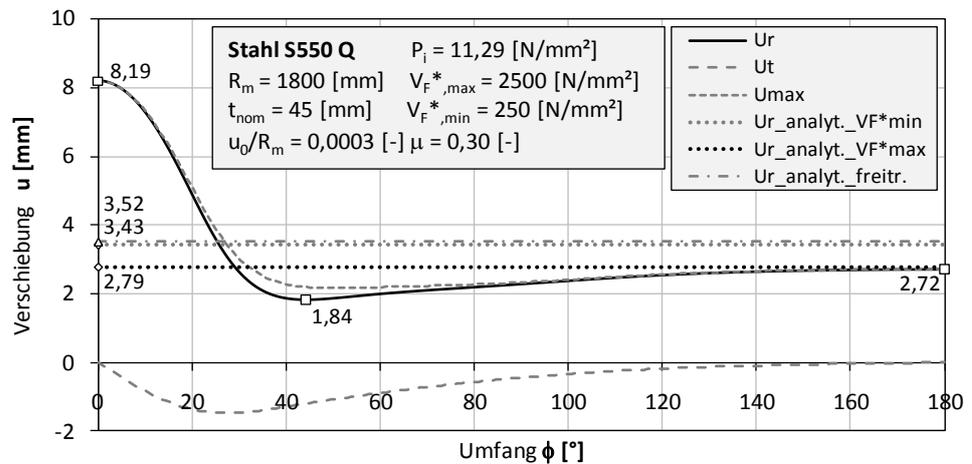


Abbildung 80: Verschiebungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

Tabelle 12: Ergebnistabelle Spannungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

Material: Stahl S550 Q		Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)										
		$\sigma_{u\_analyt\_VFmax}$	$\sigma_{u\_analyt\_VFmin}$	$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$	$f_y$	$\sigma_{rd\_zul\_freitr}$	$\sigma_{SAVG1\_max}$	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$	$\sigma_{s11\_top\_max}$	$U_{r\_analyt\_VFmax}$	$U_{r\_analyt\_freitr}$	
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	
$f_y$	= 550											
Reibungsbeiwert $\mu$	= 0.30											
Sicherheitsfaktor $K_{Seeber}$	= 0.65											
Sicherheitsfaktor $K_{freitr}$	= 0.90											
Innendruck $P_i$	= 11.29											
Rohrradius $R_m$	= 1800											
Wandstärke $t$	= 45											
Felssteifigkeit $V_f^*_{max}$	= 2500											
Felssteifigkeit $V_f^*_{min}$	= 250											
$\sigma_{rd\_zul\_Seeber}$	= 357.50	1.000	0.814	0.792	0.650	0.722	0.879	0.989	0.723	2.79	3.52	
$\sigma_{rd\_zul\_freitr}$	= 495.00	1.385	1.127	1.097	0.900	1.000	1.217	1.369	1.001			
$\sigma_{u\_analyt\_VFmin}$	= 439.36	1.229	1.000	0.973	0.799	0.888	1.080	1.215	0.888			
$\sigma_{u\_analyt\_VFmax}$	= 357.50	1.000	0.814	0.792	0.650	0.722	0.879	0.989	0.723			
$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$	= 451.42	1.263	1.027	1.000	0.821	0.912	1.110	1.249	0.913			
$\sigma_{s11\_bottom\_max}$	= 491.96	1.376	1.120	1.090	0.894	0.994	1.210	1.361	0.995			
$\sigma_{s11\_top\_min\_lokal}$	= 309.66	0.866	0.705	0.686	0.563	0.626	0.761	0.857	0.626			
$\sigma_{s11\_top\_max}$	= 494.55	1.383	1.126	1.096	0.899	0.999	1.216	1.368	1.000			
$\sigma_{SAVG1\_min}$	= 361.72	1.012	0.823	0.801	0.658	0.731	0.889	1.001	0.731			
$\sigma_{SAVG1\_max}$	= 406.69	1.138	0.926	0.901	0.739	0.822	1.000	1.125	0.822			
$\sigma_{SAVG1\_lokal}$	= 400.81	1.121	0.912	0.888	0.729	0.810	0.986	1.109	0.810			
$\sigma_{Mises\_bottom\_max}$	= 437.26	1.223	0.995	0.969	0.795	0.883	1.075	1.210	0.884			
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal}$	= 275.23	0.770	0.626	0.610	0.500	0.556	0.677	0.761	0.557			
$\sigma_{Mises\_top\_max}$	= 439.57	1.230	1.000	0.974	0.799	0.888	1.081	1.216	0.889			
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	= 321.50	0.899	0.732	0.712	0.585	0.649	0.791	0.889	0.650			
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$	= 361.48	1.011	0.823	0.801	0.657	0.730	0.889	1.000	0.731			
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal}$	= 356.25	0.996	0.811	0.789	0.648	0.720	0.876	0.986	0.720			
$\sigma_{s22\_bottom\_max}$	= 147.59	0.413	0.336	0.327	0.268	0.298	0.363	0.408	0.298			
$\sigma_{s22\_top\_min\_lokal}$	= 92.90	0.260	0.211	0.206	0.169	0.188	0.228	0.257	0.188			
$\sigma_{s22\_top\_max}$	= 148.37	0.415	0.338	0.329	0.270	0.300	0.365	0.410	0.300			
$\sigma_{SAVG2\_min}$	= 108.52	0.304	0.247	0.240	0.197	0.219	0.267	0.300	0.219			
$\sigma_{SAVG2\_max}$	= 122.01	0.341	0.278	0.270	0.222	0.246	0.300	0.338	0.247			
$\sigma_{SAVG2\_lokal}$	= 120.24	0.336	0.274	0.266	0.219	0.243	0.296	0.333	0.243			
$U_{r\_analyt\_VFmin}$	= 3.43									1.229	0.973	
$U_{r\_analyt\_VFmax}$	= 2.79									1.000	0.792	
$U_{r\_analyt\_freitr}$	= 3.52									1.263	1.000	
$U_{r\_max}$	= 8.19									2.938	2.326	
$U_{r\_min}$	= 1.84									0.659	0.522	
$U_{r\_phi=180}$	= 2.72									0.974	0.771	
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>												

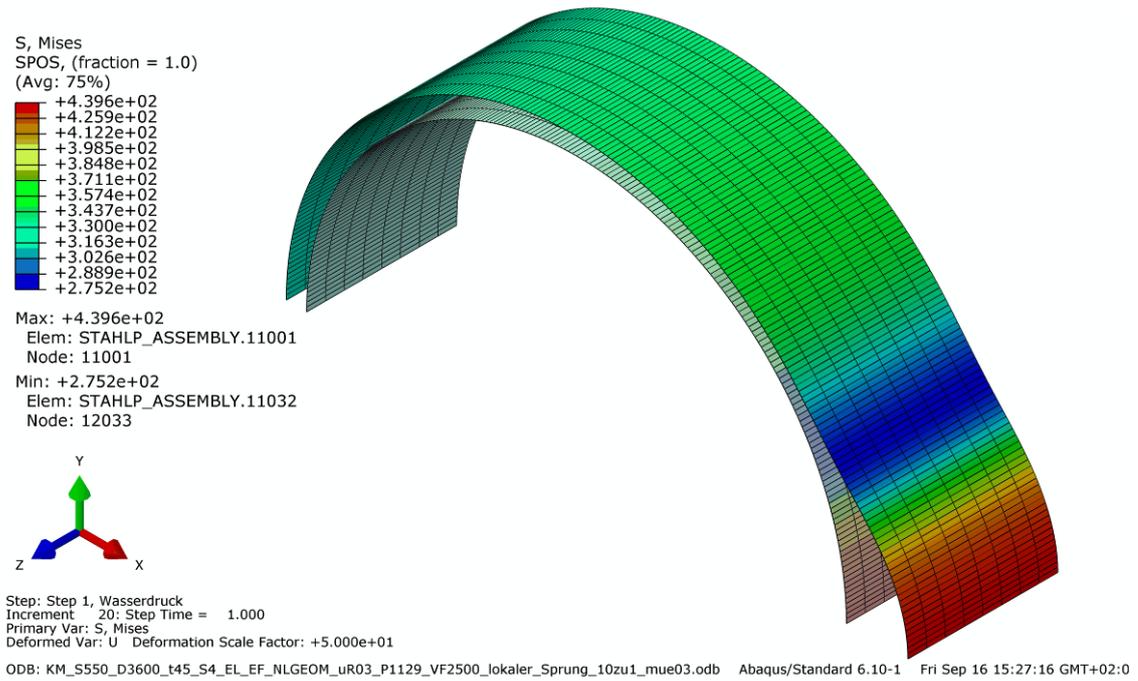


Abbildung 81: Umfangsspannung FE außen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

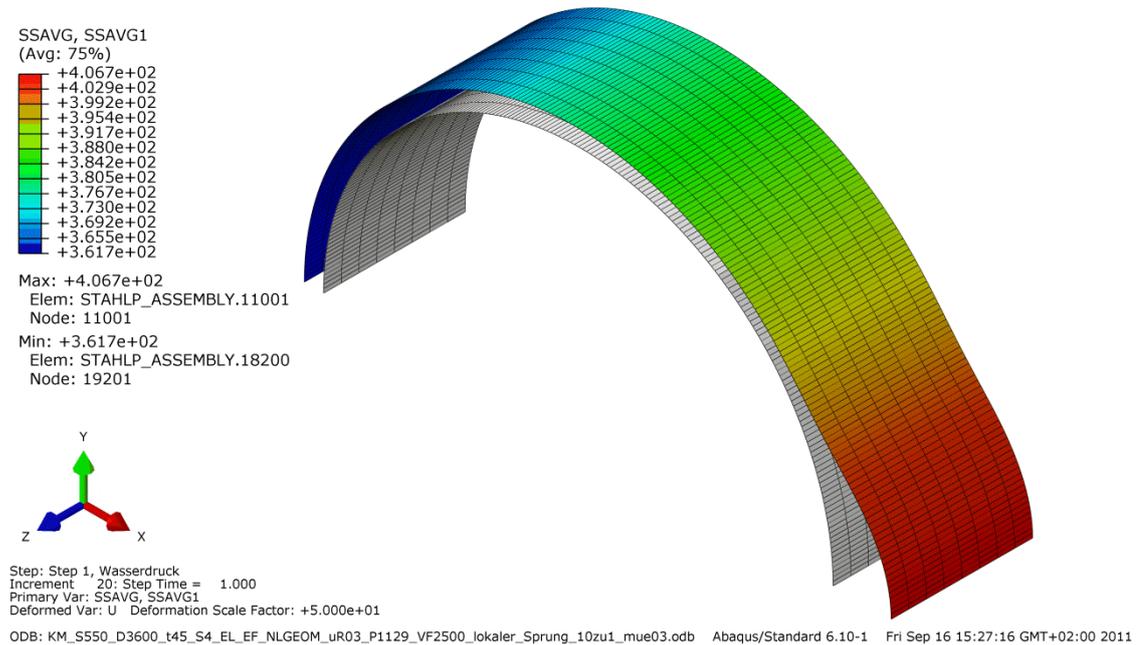


Abbildung 82: Membranspannung FE  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

6.5.2.3 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

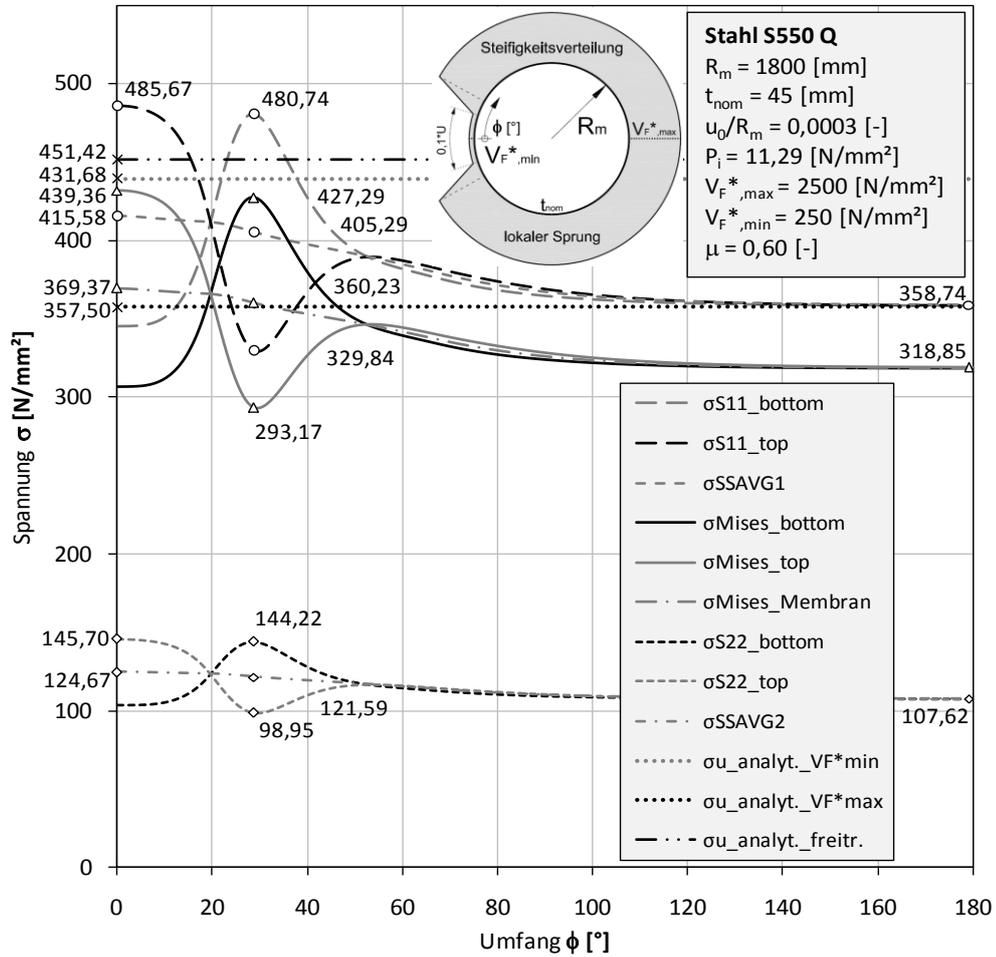


Abbildung 83: Spannungsdiagramm Spannungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

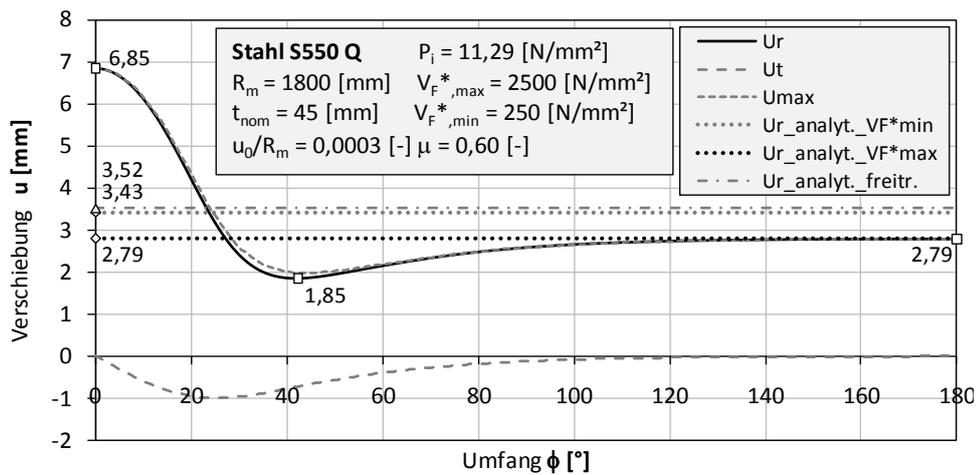


Abbildung 84: Verschiebungsdiagramm  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

Tabelle 13: Ergebnistabelle  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zul\_mue06

Material: Stahl S550 Q		Vergleichswerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)									
		$\sigma_{u\_analyt\_VF\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_VF\_min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Rd\_zul\_freitr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{SSAVG1\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{S11\_top\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$U_{r\_analyt\_VF\_max}$ [mm]	$U_{r\_analyt\_freitr}$ [mm]
$f_y$	550	357.50	1.000	0.814	0.650	0.722	0.860	0.968	0.736	2.79	3.52
Reibungsbeiwert $\mu$	0.60	1.385	1.127	1.097	0.900	1.000	1.191	1.340	1.019		
Sicherheitsfaktor $k_{Seiber}$	0.65	1.229	1.000	0.973	0.799	0.888	1.057	1.189	0.905		
Sicherheitsfaktor $k_{freitr}$	0.90	1.000	0.814	0.792	0.650	0.722	0.860	0.968	0.736		
Innendruck $P_i$	11.29	1.263	1.027	1.000	0.821	0.912	1.086	1.222	0.929		
Rohrradius $R_m$	1800	1.345	1.094	1.065	0.874	0.971	1.157	1.301	0.990		
Wandstärke $t$	45	0.923	0.751	0.731	0.600	0.666	0.794	0.893	0.679		
Felssteifigkeit $V_f^*_{max}$	2500	1.359	1.105	1.076	0.883	0.981	1.169	1.315	1.000		
Felssteifigkeit $V_f^*_{min}$	250	1.003	0.816	0.795	0.652	0.725	0.863	0.971	0.739		
$\sigma_{Rd\_zul\_Seiber}$	357.50	1.162	0.946	0.921	0.756	0.840	1.000	1.125	0.856		
$\sigma_{Rd\_zul\_freitr}$	495.00	1.134	0.922	0.898	0.737	0.819	0.975	1.097	0.834		
$\sigma_{u\_analyt\_VF\_min}$	439.36	1.195	0.973	0.947	0.777	0.863	1.028	1.157	0.880		
$\sigma_{u\_analyt\_VF\_max}$	357.50	0.820	0.667	0.649	0.533	0.592	0.705	0.794	0.604		
$\sigma_{u\_analyt\_freitr}$	451.42	1.207	0.983	0.956	0.785	0.872	1.039	1.169	0.889		
$\sigma_{S11\_bottom\_max}$	480.74	0.892	0.726	0.706	0.580	0.644	0.767	0.863	0.657		
$\sigma_{S11\_top\_min\_lokal}$	329.84	1.033	0.841	0.818	0.672	0.746	0.889	1.000	0.761		
$\sigma_{S11\_top\_max}$	485.67	1.008	0.820	0.798	0.655	0.728	0.867	0.975	0.742		
$\sigma_{SSAVG1\_min}$	358.74	0.403	0.328	0.319	0.262	0.291	0.347	0.390	0.297		
$\sigma_{SSAVG1\_max}$	415.58	0.277	0.225	0.219	0.180	0.200	0.238	0.268	0.204		
$\sigma_{SSAVG1\_lokal}$	405.29	0.408	0.332	0.323	0.265	0.294	0.351	0.394	0.300		
$\sigma_{Mises\_bottom\_max}$	427.29	0.301	0.245	0.238	0.196	0.217	0.259	0.291	0.222		
$\sigma_{Mises\_top\_min\_lokal}$	293.17	0.349	0.284	0.276	0.227	0.252	0.300	0.338	0.257		
$\sigma_{Mises\_top\_max}$	431.68	0.340	0.277	0.269	0.221	0.246	0.293	0.329	0.250		
$\sigma_{Mises\_Membran\_min}$	318.85									1.229	0.973
$\sigma_{Mises\_Membran\_max}$	369.37									1.000	0.792
$\sigma_{Mises\_Membran\_lokal}$	360.23									1.263	1.000
$\sigma_{S22\_bottom\_max}$	144.22									2.456	1.945
$\sigma_{S22\_top\_max}$	98.95									0.664	0.526
$\sigma_{S22\_top\_min\_lokal}$	145.70									1.000	0.792
$\sigma_{SSAVG2\_min}$	107.62										
$\sigma_{SSAVG2\_max}$	124.67										
$\sigma_{SSAVG2\_lokal}$	121.59										
$U_{r\_analyt\_VF\_min}$	3.43										
$U_{r\_analyt\_VF\_max}$	2.79										
$U_{r\_analyt\_freitr}$	3.52										
$U_{r\_max}$	6.85										
$U_{r\_min}$	1.85										
$U_{r\_phi=180}$	2.79										
<b>Grundwerte (Maximal-/Minimal-/Mittelwerte)</b>											

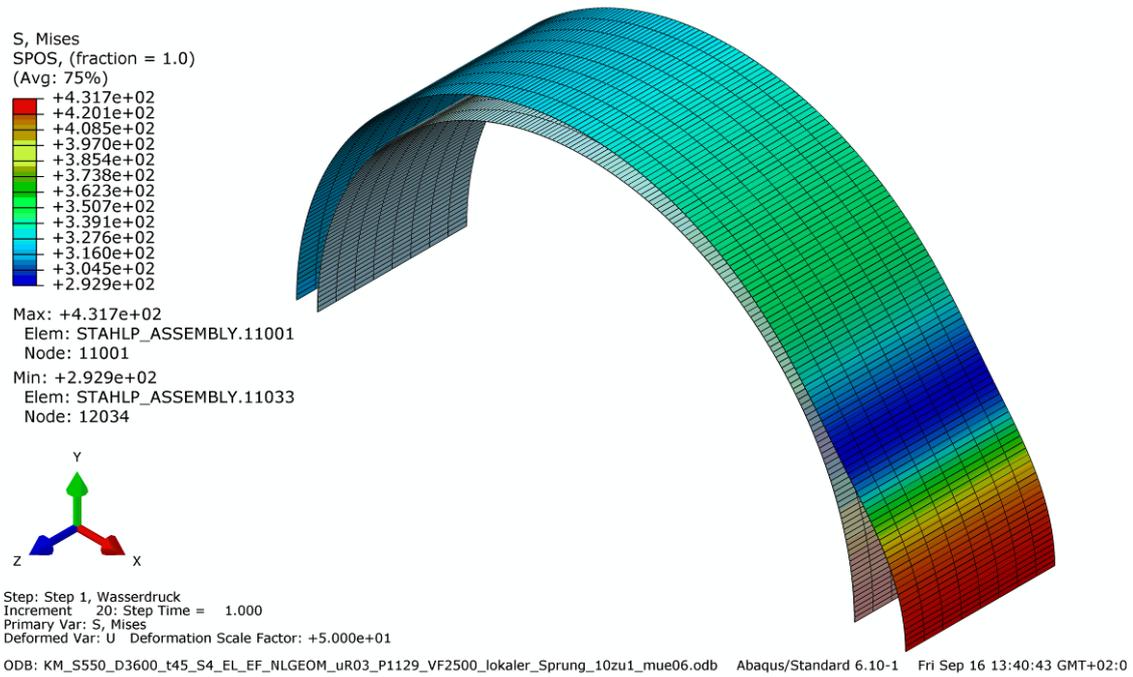


Abbildung 85: Umfangsspannung FE außen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

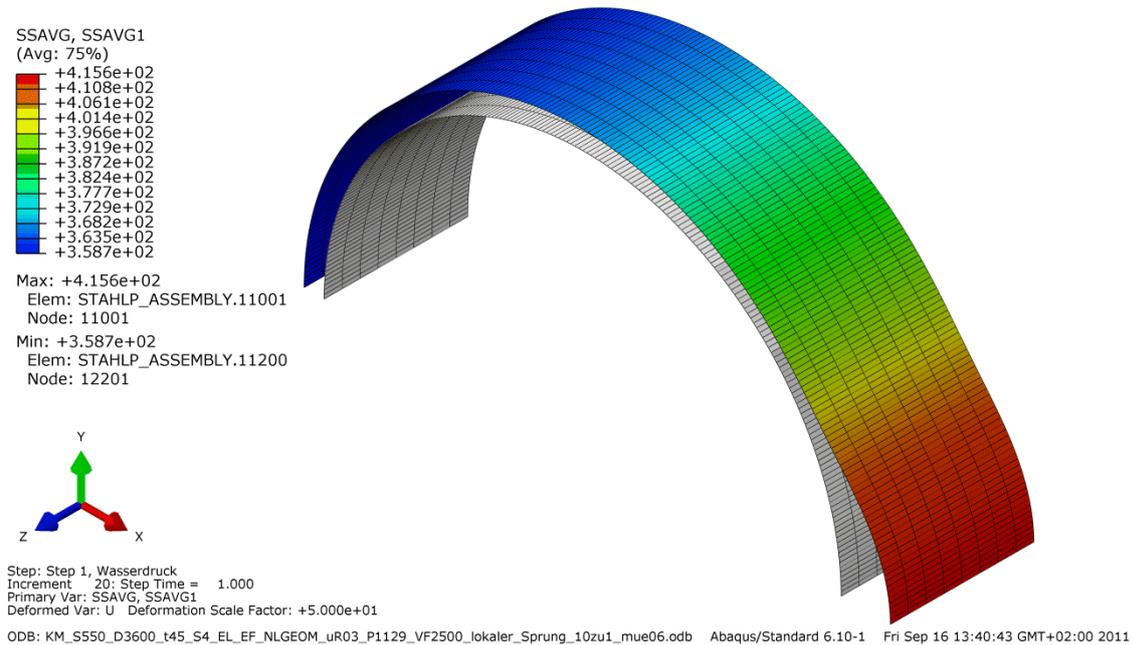


Abbildung 86: Membranspannung FE  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

### 6.5.3 Glättungseffekt - Vergleich NLGEOM zu LGEOM

Bei der gegenseitigen Verifikation der analytischen Berechnung mit den FE-Modellen aus Kapitel 3.4 wurde erstmals ein Vergleich der FE-Berechnung mit LGEOM und NLGEOM unternommen. Die Ergebnisse waren dabei annähernd gleich. Grund dafür ist, dass die FE-Modelle wie die analytische Berechnung mit der Annahme einer radialsymmetrisch konstanten Bettung erfolgten. Durch die Radialsymmetrie erfährt das Rohr keinerlei Biegung und der Glättungseffekt durch das nichtlineare Geometrieverhalten kommt nicht wirklich zum Tragen. Einen anderen Stellenwert bekommt dieser bei unsymmetrischer Bettung, vor allem bei abrupten Steifigkeitsänderungen, wie im Bettungsmodell lokaler Sprung, was sich in großen Krümmungen und Biegemomenten äußert.

Um den Einfluss des Glättungseffektes auf die Spannungsspitzen zu zeigen, wird das in Abbildung 87 markierte Beispiel einmal mit linearem Geometrieverhalten LGEOM sowie mit nicht-linearem Geometrieverhalten NLGEOM durchgerechnet und verglichen.

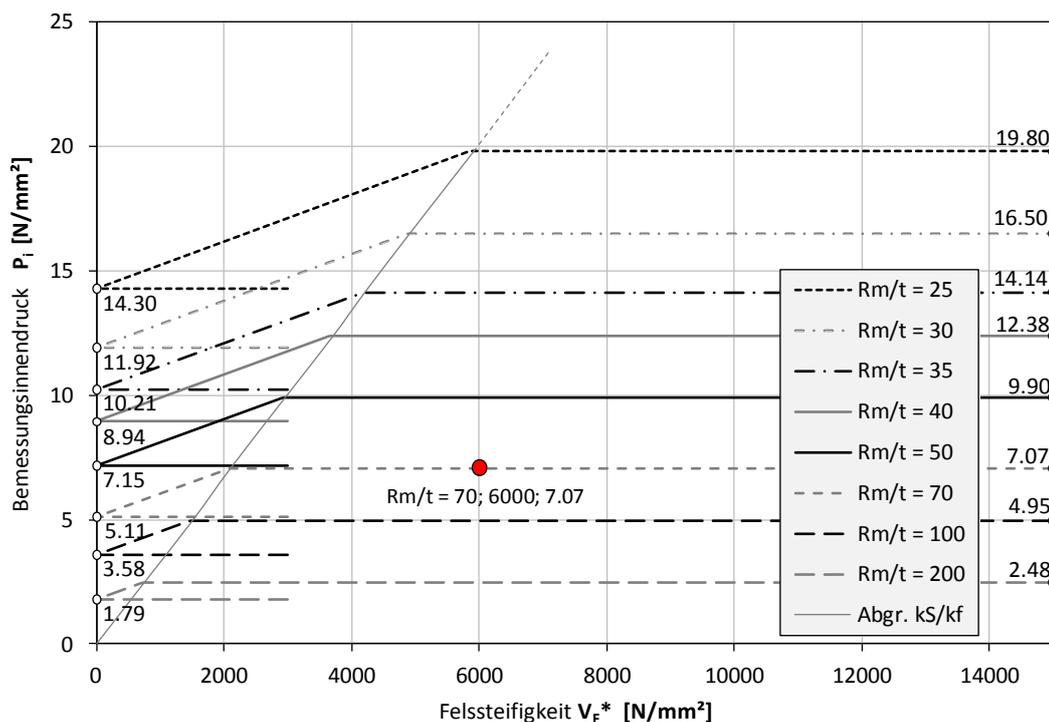


Abbildung 87: Abgrenzungsdiagramm, Vgl. LGEOM zu NLGEOM

Wie erwartet bleibt die Membranspannung wieder relativ unbeeinflusst von dem Unterschied einer Berechnung mit oder ohne NLGEOM. Die sekundären Biegespannungen erfahren jedoch durch die Rechnung mit NLGEOM einen deutlichen Spannungsabfall und somit eine begünstigende Wirkung. Der Spitzenspannungswert reduziert sich von 491,05 mit 24,51 um 5% auf einen Wert von 466,54 [N/mm<sup>2</sup>].

6.5.3.1 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_LGEOM\_uR03\_P707\_V  
F6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

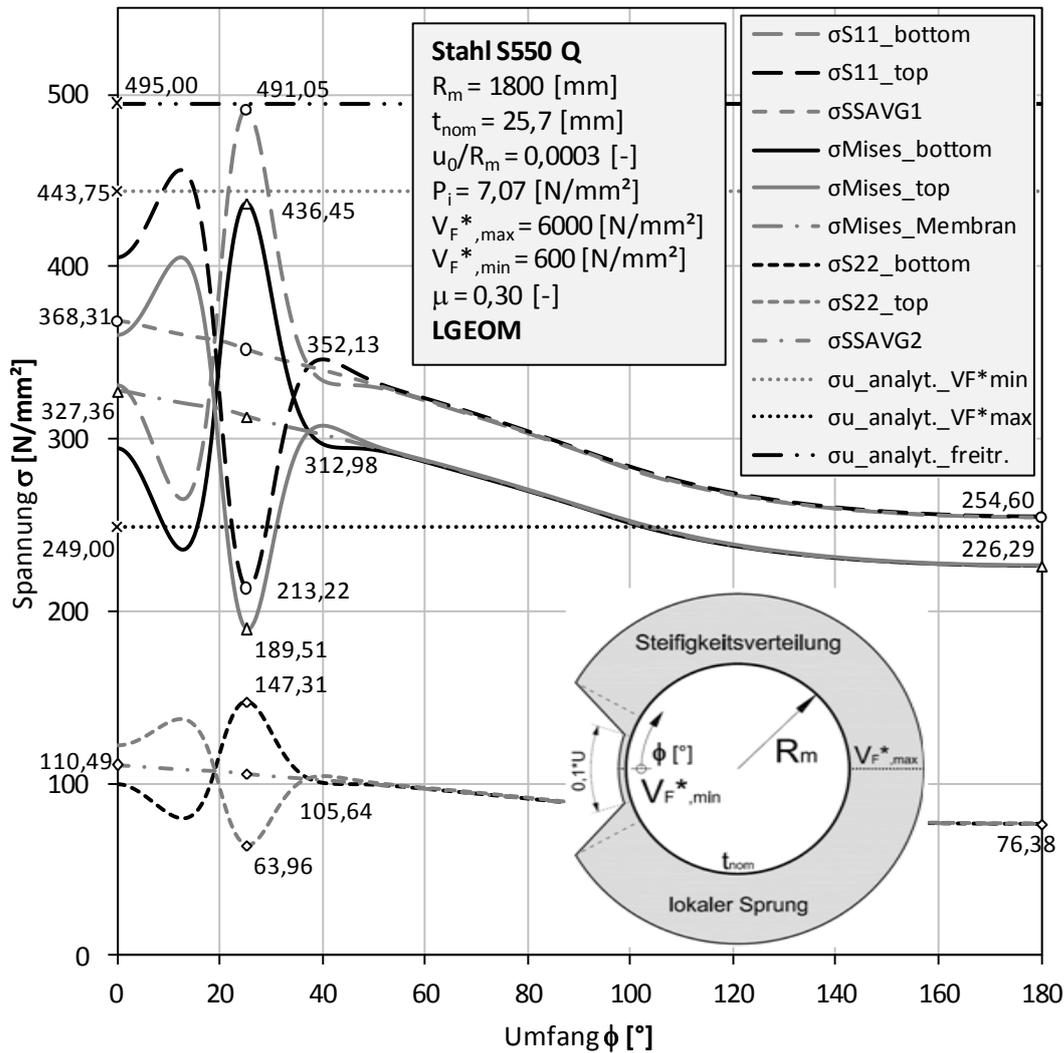


Abbildung 88: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_LGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

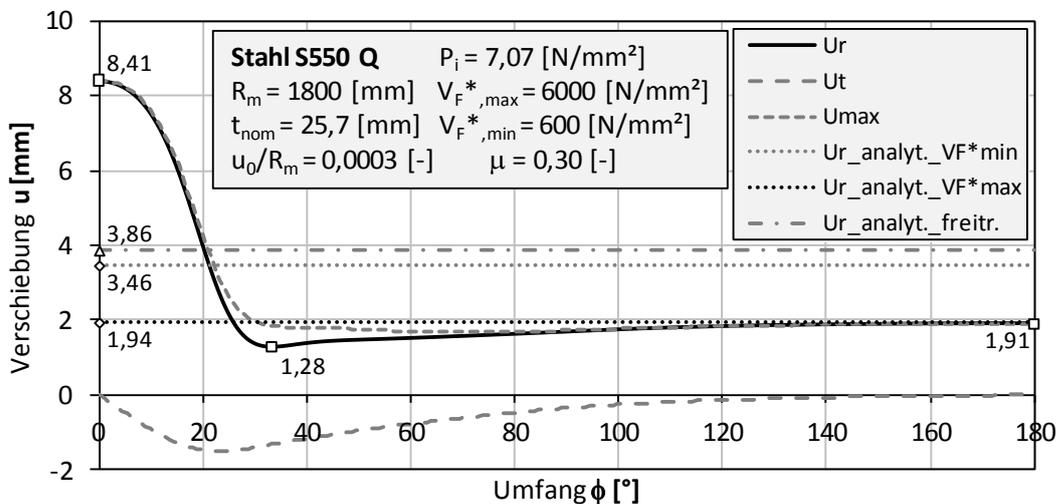


Abbildung 89: Verschiebungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_LGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

6.5.3.2 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

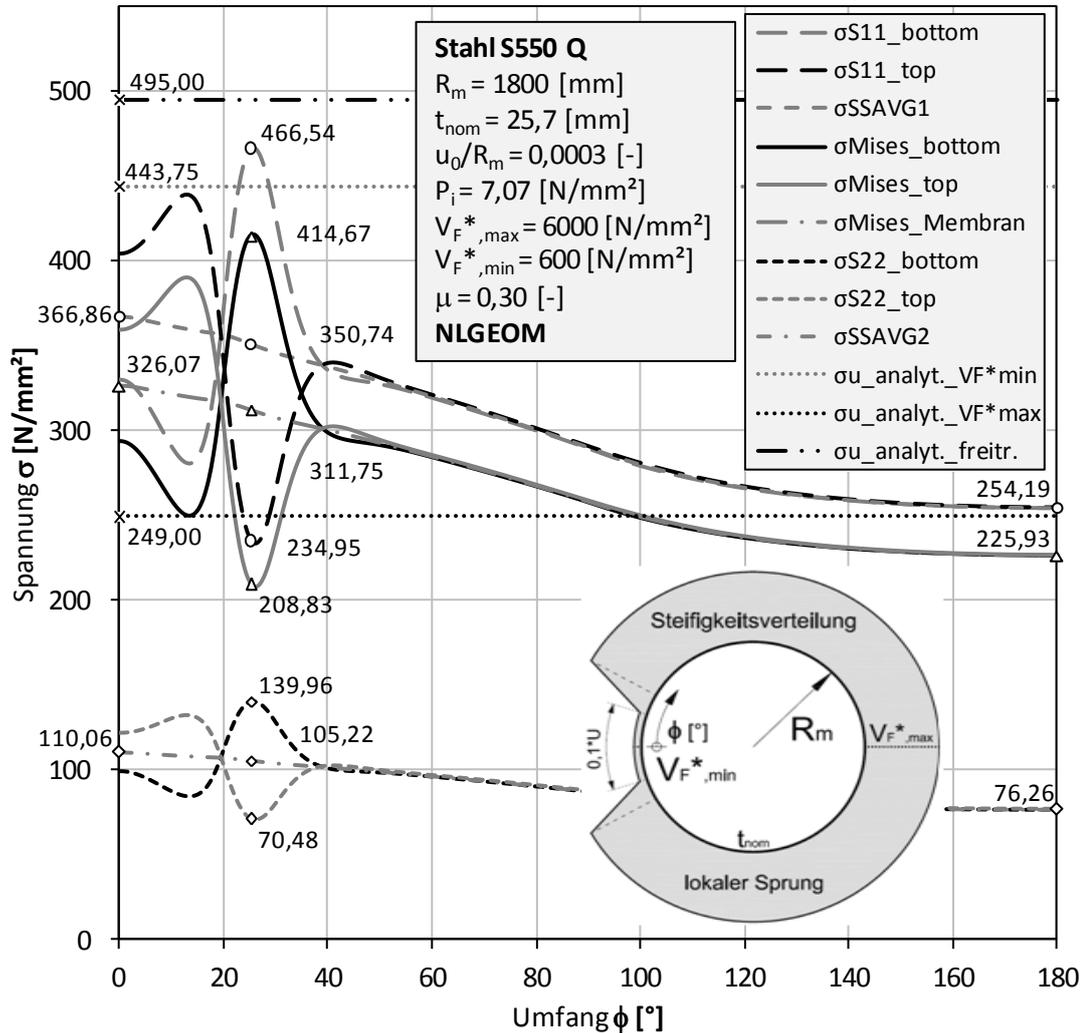


Abbildung 90: Spannungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

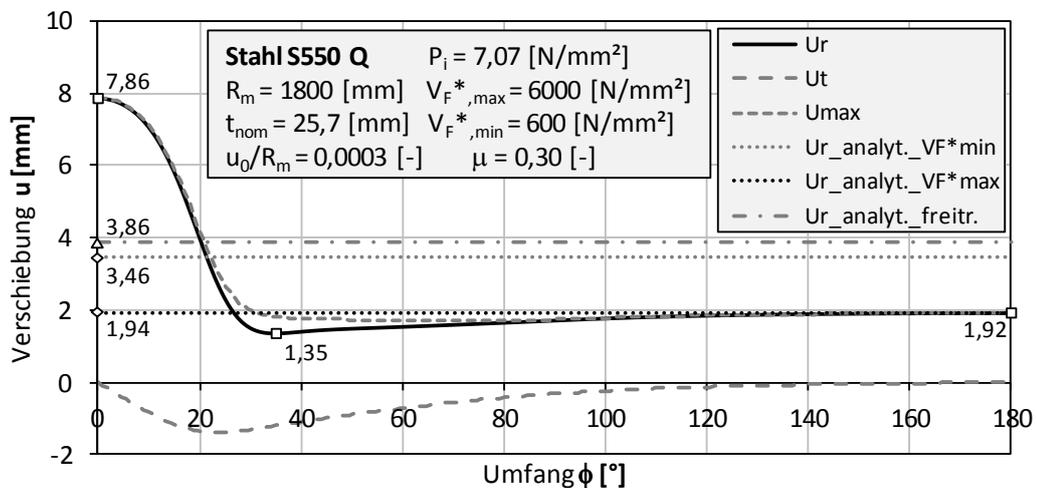


Abbildung 91: Verschiebungsdiagramm

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

## 6.6 Parameterstudie linearer Verlauf

Die Parameterstudie des linearen Verlaufes umfasst die Detailuntersuchung an insgesamt 17 Bemessungspunkten. Diese sind so gewählt einen möglichst großen Bereich um die Übergangsgrenze der beiden Kriterien gut abzudecken, aber dennoch realistische Bemessungsszenarien widerzuspiegeln. Das realistische Bemessungsspektrum von Druckschachtpanzerungen wird durch die Berechnung an 3 repräsentativen geometrischen Verhältnissen  $R_m/t = 200$ ,  $R_m/t = 70$ ,  $R_m/t = 40$  ausgewertet. Jeder Bemessungspunkt wird jeweils mit 3 Reibungsbeiwerten  $\mu = 0.00$ ,  $\mu = 0.30$  und  $\mu = 0.60$  gerechnet. Somit beläuft sich die Parameterstudie des linearen Verlaufs auf insgesamt 51 Berechnungen und Vergleichswerten.

### 6.6.1 Auswertungspunkte im Abgrenzungsdiagramm

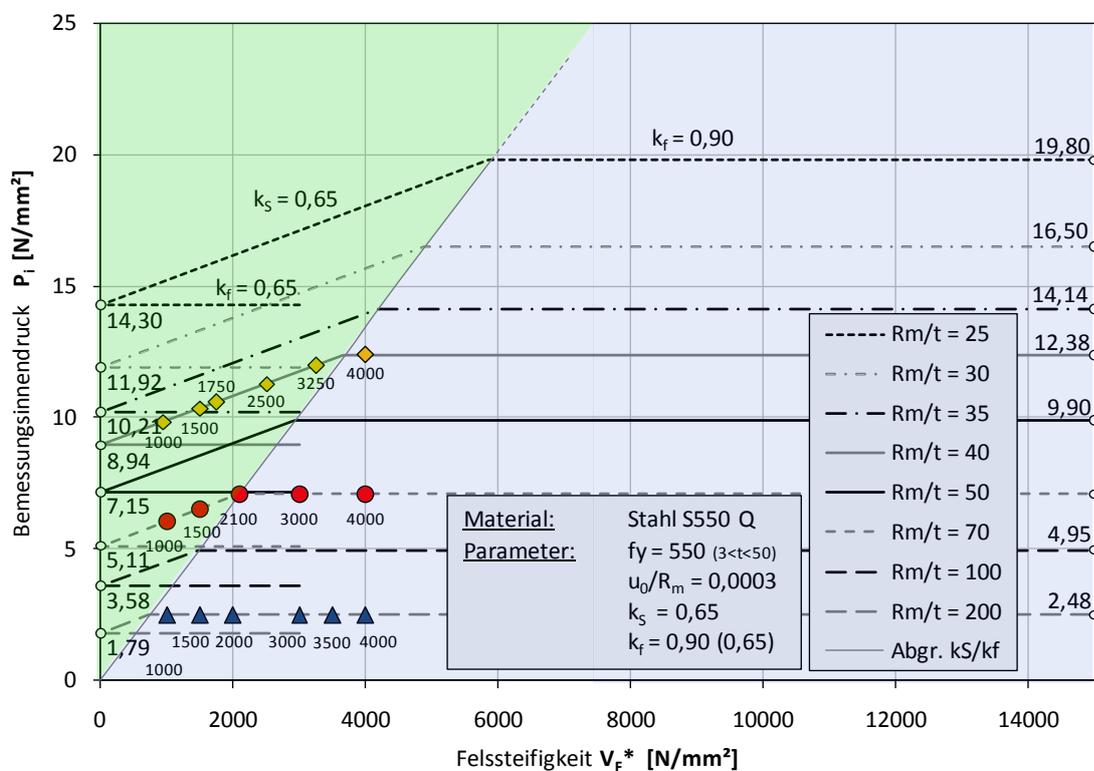


Abbildung 92: Darstellung Auswertungspunkte Parameterstudie linearer Verlauf

Die Bemessungspunkte der Parameterstudie linearer Verlauf sind in Abbildung 92 aufgezeigt.

### 6.6.2 Ergebnisdigrammerläuterung Fall: linearer Verlauf

#### 6.6.2.1 $R_m/t = 200$

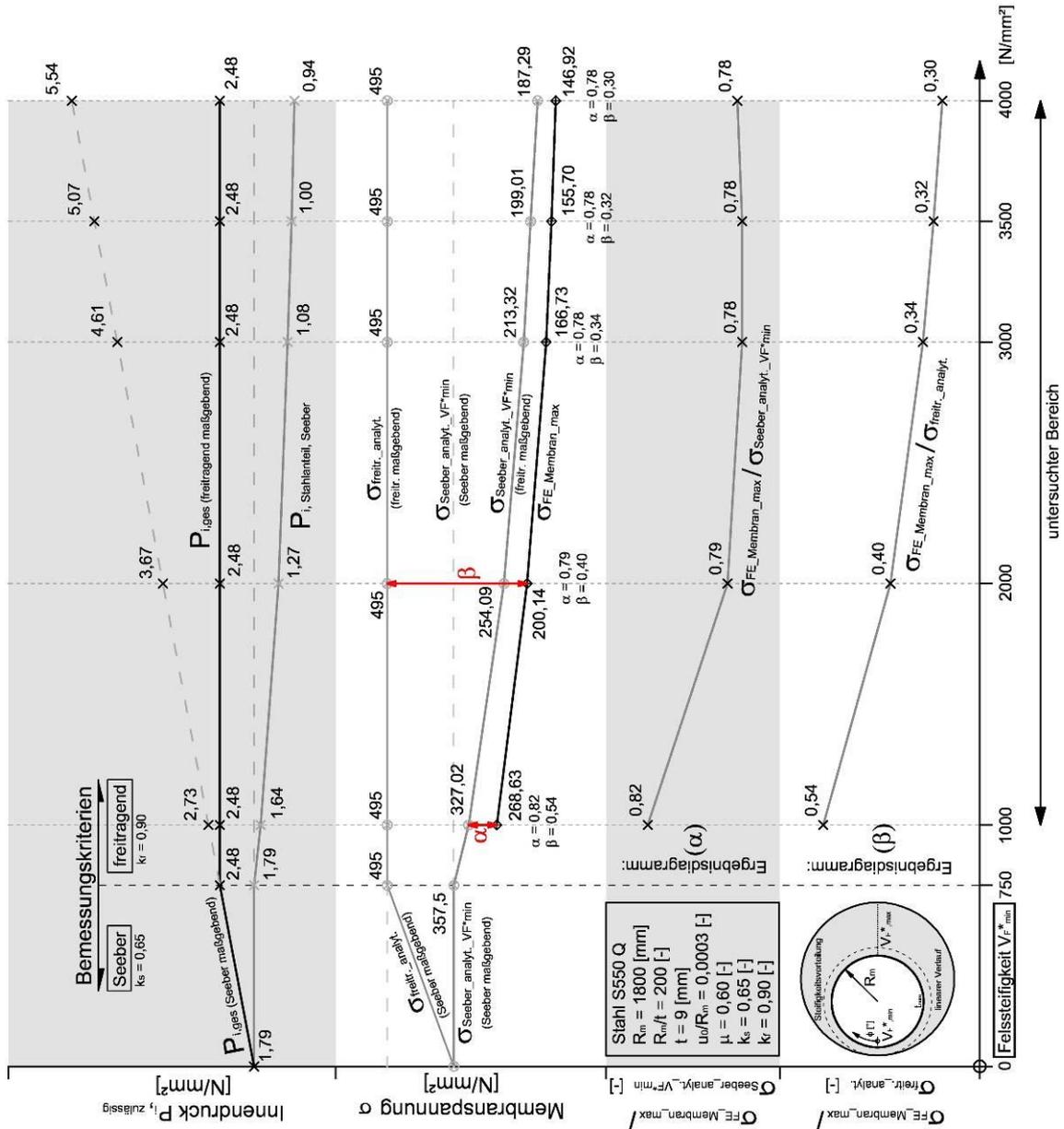


Abbildung 93: Ergebniserläuterungsdiagramm, linearer Verlauf,  $R_m/t = 200$

6.6.2.2  $R_m/t = 40$

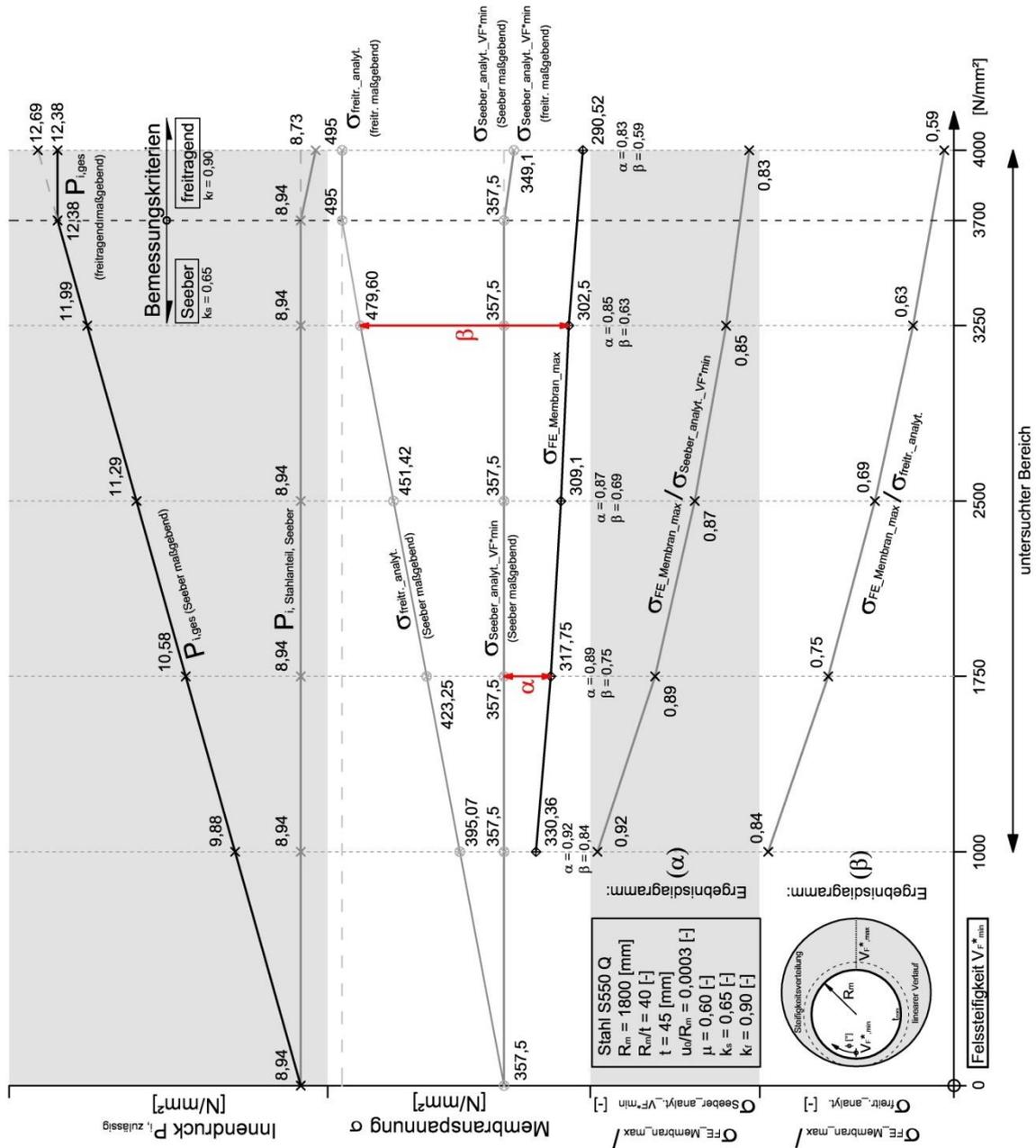


Abbildung 94: Ergebniserläuterungsdiagramm, linearer Verlauf,  $R_m/t = 40$

### 6.6.3 Ergebnisse Parameterstudie linearer Verlauf

Die Form der Ergebnisdarstellung beruht auf Vergleichswertdiagrammen. In den Diagrammen werden jeweils die Verhältnisse aus der FE-Berechnung mit den entsprechenden Werten der analytischen Basisberechnung eingetragen und durch Graphen miteinander verbunden. Die Vergleichswerte geben Aufschluss auf die jeweiligen Ergebnisunterschiede der FE-Berechnung gegenüber der analytischen Basisbemessung bzw. des Widerstandslimits.

Vergleichswerte  $<0$  spiegeln eine Bemessungssicherheit gegenüber der analytischen Bemessung wider, Werte  $>0$  deuten auf eine Überbeanspruchung des numerisch berechneten Bettungsmodells gegenüber der analytischen Bezugsrechnung hin.

Es werden folgende Vergleichswerte abgebildet:

- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min/max}$
- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min/max}$
- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$
- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$
- $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$
- $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

Die Diagramme beinhalten des Weiteren jeweils 3 Balken. Jeder Balken (mit Pfeilen und Beschriftung  $R_m/t$ ) bezieht sich auf einen Bemessungsparameter  $R_m/t$  und deren zugehörigen Kurvenschaar der Reibungsbeiwerte  $\mu=0.00$ ,  $\mu=0.30$  und  $\mu=0.60$ .

- $R_m/t = 200$  → Schwarzer Balken
- $R_m/t = 70$  → Dunkelgrauer Balken
- $R_m/t = 40$  → Hellgrauer Balken

Die Balken markieren den Übergangsbereich der beiden angewandten analytischen Bemessungskriterien. Links vom Balken ist der Bereich des Seeber-Kriteriums maßgebend. Die Position des Bemessungspunktes bezogen auf den Balken (links, rechts) gibt das maßgebende und somit auch das für die FE-Berechnung analytisch Innendrucklimitierende Bemessungskriterium an. Die FE-Berechnung wird mit dem analytisch limitierten Innendruck, je nach maßgebendem Kriterium, durchgeführt.

Bemessungspunkte der jeweiligen Kurvenschaaren im Bereich links der Balken haben das Seeber-Kriterium als maßgebend und sind nur für die Ergebnisdiagramme  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$  aussagekräftig. Die Ergebnisse beziehen sich auf das analytische Seeber-Kriterium bei voller Stahlauslastung mit Sicherheitsfaktor  $k_S$ .

Bemessungspunkte im rechten Bereich des Balkens beziehen sich auf das freitragende Kriterium als Innendrucklimitierend. Da das freitragende Kriterium wie bereits mehrfach erläutert sich als Zusatzkriterium nur lokal bezieht, der Großteil des

Rohres jedoch auch in diesem Bereich durch die Gebirgsmitwirkung unterstützt wird, sind die Bemessungspunkte im rechten Balkenbereich sowohl von den Ergebnisdiagrammen  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  als auch von den Diagrammen  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  je nach Betrachtungsweise informativ.

Anmerkung:

Im Bereich des maßgebenden freitragenden Kriteriums (analytische Innendrucklimitierung) gilt es folgendes zu beachten. Die Vergleiche  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  beziehen sich demnach auf die volle analytische Stahlspannungsausnützung bei Sicherheitsbeiwert  $k_F$ .

Das Innendrucklimitierende freitragende Kriterium bewirkt bei den Vergleichswerten  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  jedoch, dass der Spannungswert der analytischen Seeber-Berechnung nicht auf sein dementsprechendes Bemessungslimit von  $k_S \cdot f_y$  ausgenützt ist. Die hohen Vergleichswerte im Diagramm (große Mehrbeanspruchung) beziehen sich somit nicht auf ein voll ausgelastetes analytisches Berechnungsergebnis sondern nur eines unter Teilauslastung.

Das Übergangskriterium des Bemessungsparameters  $R_m/t = 200$  (schwarzer Balken) positioniert sich an der Stelle einer sehr geringen Felssteifigkeit von  $V_F^* = 750$  [N/mm<sup>2</sup>]. Die realitätsnahen Bemessungspunkte der Parameterstudie befinden sich allesamt in Felssteifigkeitsbereichen über  $V_F^* = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] und somit bietet die Parameterstudie für diesen Bemessungsfall nur Ergebnisse im freitragenden Bemessungskriterium (rechter Balkenbereich) für.

Der Vergleich von  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$ ,  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$ ,  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  ergibt Ausnützungsverhältnisse auf Basis vom Vergleich der vereinfachten analytischen Berechnung und deren konstanten Bettungsmodell mit der numerischen Berechnung mit den komplexeren Bettungsmodellen. Die Ergebnisse sind daher, unter Inkludierung analytischer Sicherheitsbeiwerte, Vergleichswerte der beiden Bemessungsmethoden zueinander.

Die Diagramme, gebildet aus den Quotienten  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$ , stellen die Ausnützung der numerischen Berechnung (deren Berechnungsdruck sich ebenfalls aus der analytischen Bemessung ergibt) auf Widerstandsbasis im Vergleich zu den Materialwiderständen dar.

Die maximale Umfangsspannung wird dabei mit der Fließgrenze  $f_y = 550$  [N/mm<sup>2</sup>] und die maximale Umfangsmembranspannung mit einem möglichen Widerstand von  $0,9 \cdot f_y = 0,9 \cdot 550 = 495$  [N/mm<sup>2</sup>] verglichen.

### 6.6.3.1 Linearer Verlauf $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$

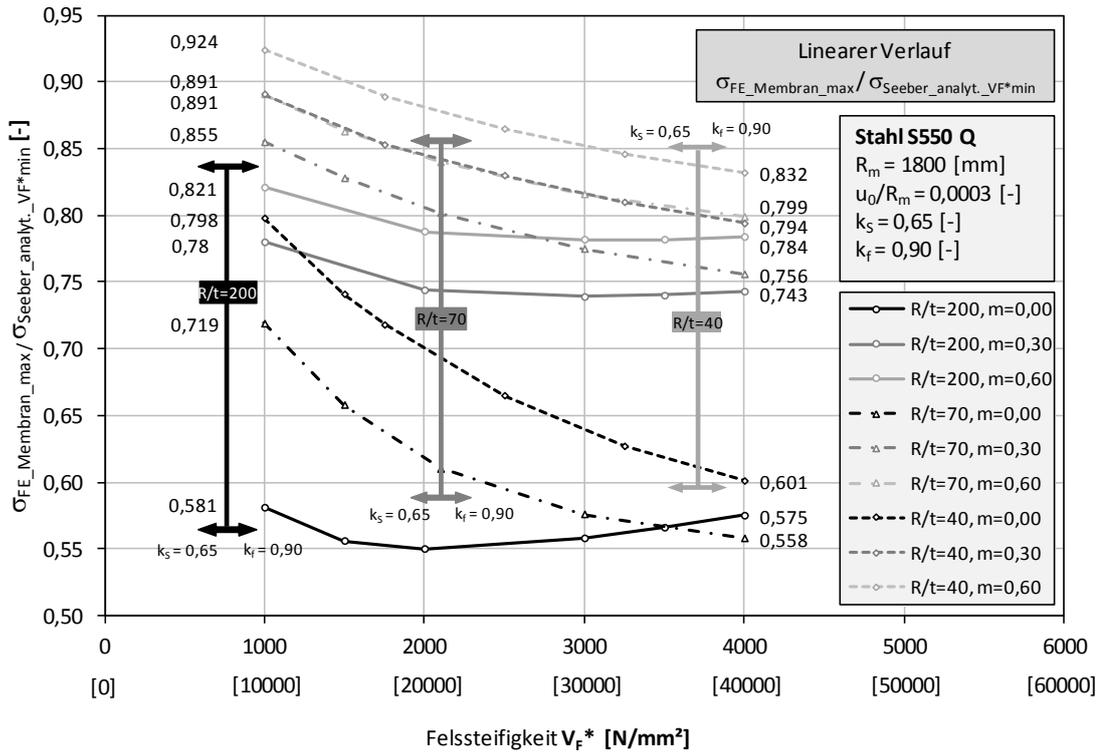


Abbildung 95: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf

$\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$

### 6.6.3.2 Linearer Verlauf $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$

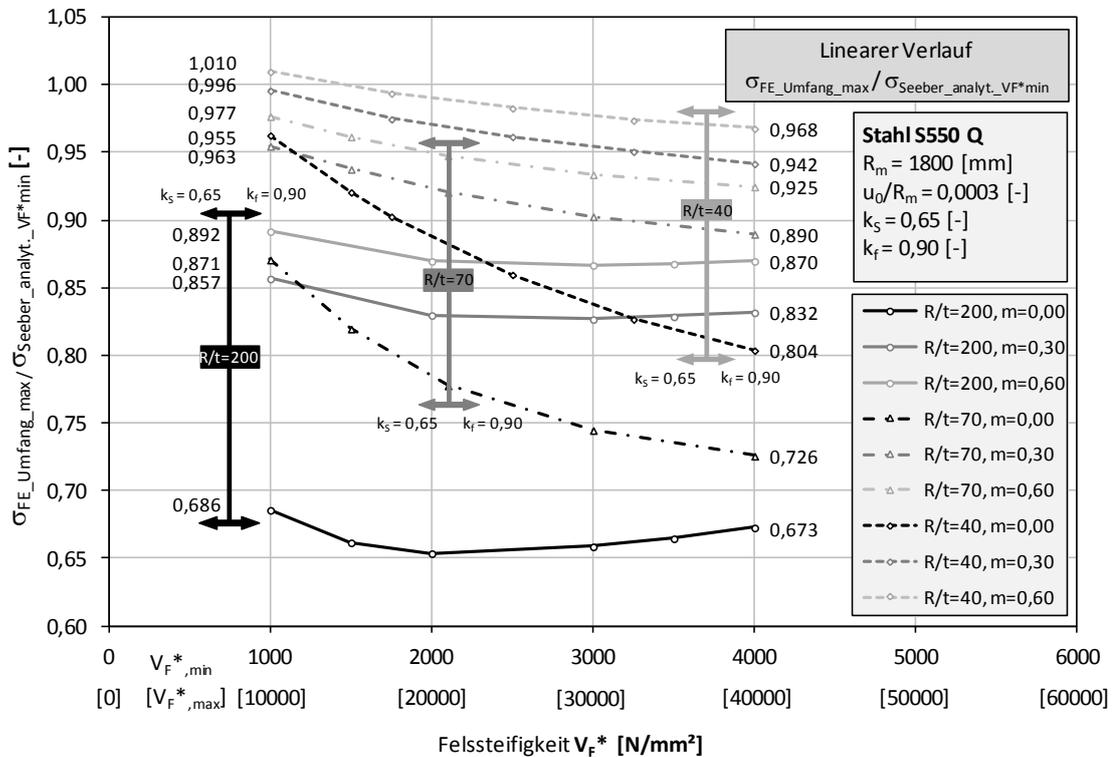
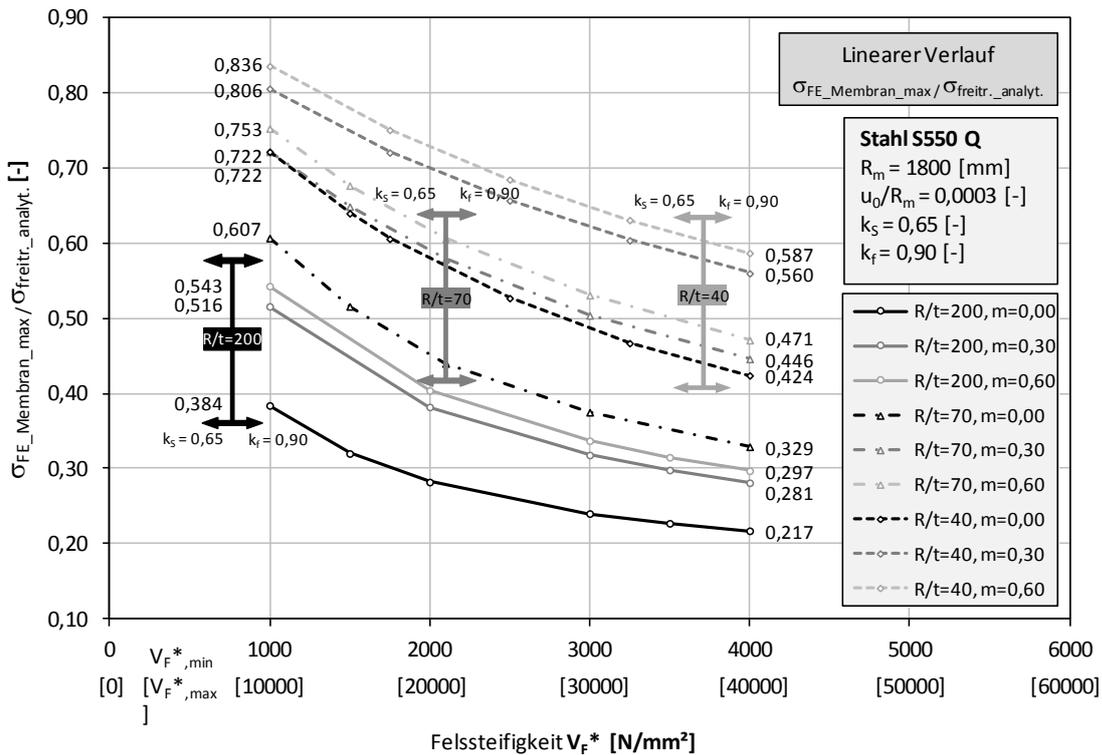
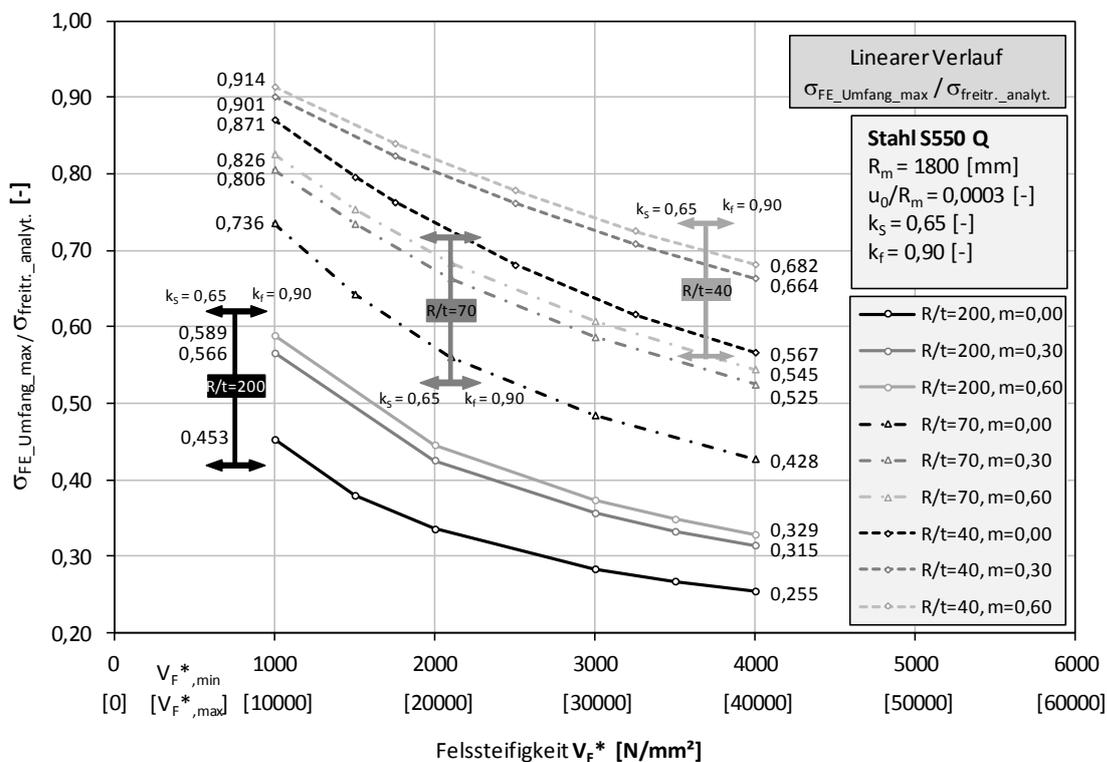


Abbildung 96: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf

$\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF*min}$

6.6.3.3 Linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$ 

 Abbildung 97: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$ 

 6.6.3.4 Linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$ 

 Abbildung 98: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

6.6.3.5 Linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

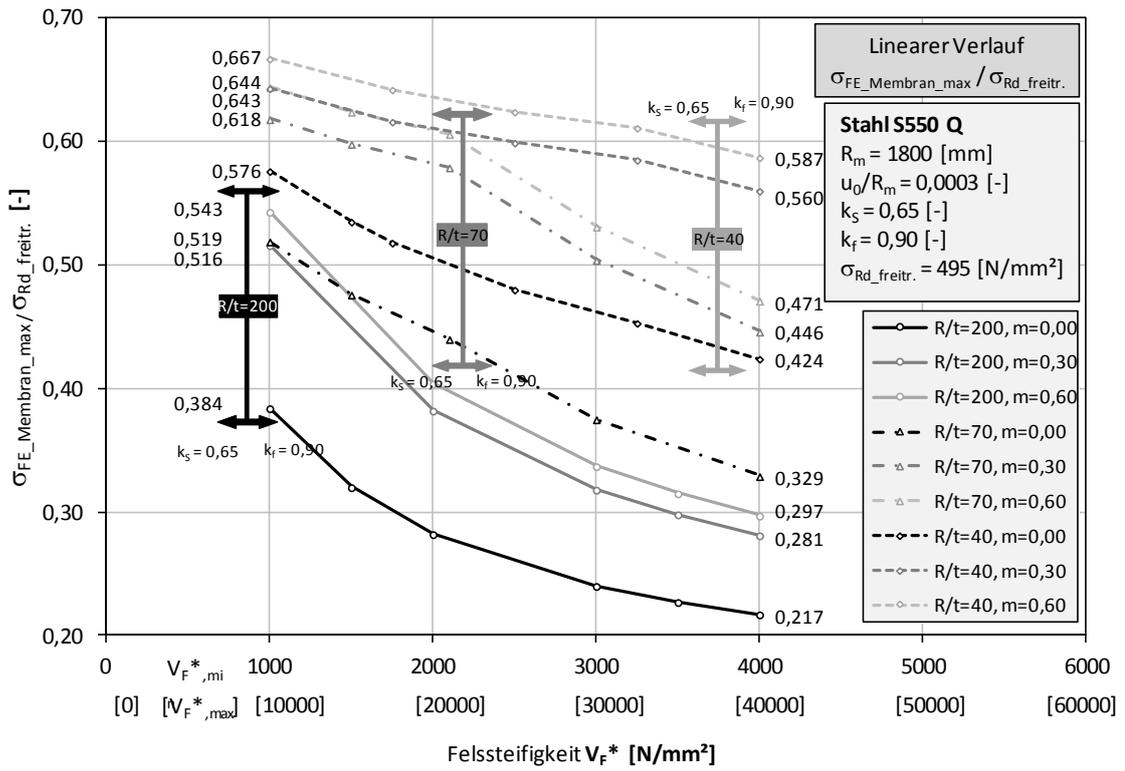


Abbildung 99: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

6.6.3.6 Linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$

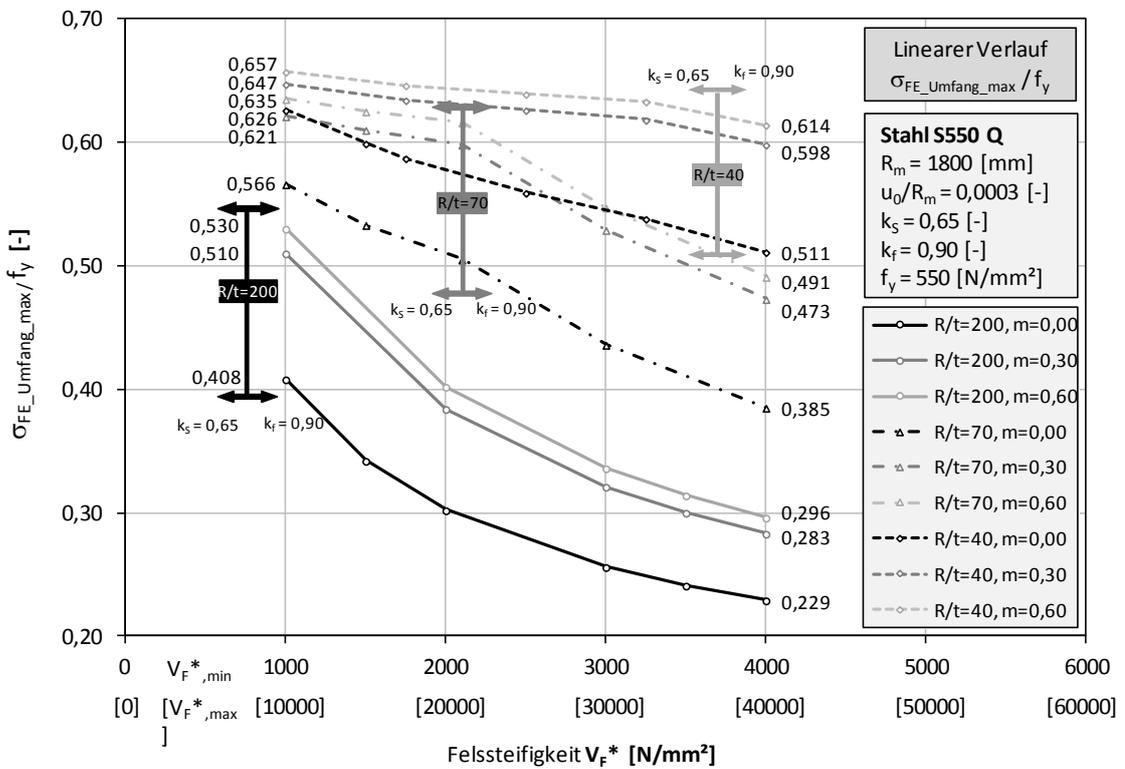


Abbildung 100: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm linearer Verlauf  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$

#### 6.6.4 Ergebnisinterpretation linearer Verlauf

Alle Diagramme weisen ähnliche Charakteristiken auf. Je höher das Bemessungsverhältnis  $R_m/t$  ausfällt, sprich desto dünner die Rohrwandstärke im Verhältnis zum Rohrradius ausgeführt wird, umso größer wird auch die Sicherheit der realitätsgetreueren numerischen Berechnung mit entsprechendem Bettungsmodell im Vergleich zur analytischen Bemessung. Auch mit steigender Felssteifigkeit verringern sich in allen Bemessungsvarianten die maximalen Membranspannungen gegenüber den analytischen Berechnungsannahmen. Bezüglich der Reibung zwischen Stahlpanzerung und dem umliegenden Gebirgsmantel mit Betonhinterfüllung kann folgende Erkenntnis gewonnen werden. Ein zunehmender Reibungsbeiwert hat negative Auswirkung auf die Druckschachtbemessung (Bemessung auf Membranspannung) bei unsymmetrischer Bettungssituation. Dies liegt daran, dass die Reibung die lokalen Spannungsspitzen an der gewünschten entspannenden Systemumlagerung behindert. Die deutlich geringsten Spannungen werden bei der numerischen Berechnung mit keiner Reibung, also einem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,00$  [-] erzielt. Eine lokale Spannungsspitze kann sich ungehindert am ganzen System umlagern und abbauen und es folgt eine konstante Umfangsmembranspannung. Es ist auch zu erkennen, dass der Reibungsbeiwert  $\mu = 0,00$  [-] die deutlichste Spannungsreduktion (Vergleich zur analytischen Berechnung) mit zunehmender Felssteifigkeit  $V_F^*$  verbuchen kann.

Im Ergebnisdiagramm Abbildung 95:  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*min}$  kann man bei einem Verhältnis  $R_m/t = 200$  [-],  $\mu = 0,00$  [-], und einer Felssteifigkeit von  $V_{,min}^* \sim 2000$  [N/mm<sup>2</sup>] z.B. einen Spitzenwert von ca. 0,615 auslesen, was einer Minderbeanspruchung von ca. 38,5% entspricht.

Ergebnisdiagramm Abbildung 97:  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  ergibt bei Parametern  $R_m/t = 200$  [-],  $\mu = 0,00$  [-], und einer Felssteifigkeit von  $V_{,min}^* = 4000$  [N/mm<sup>2</sup>] sogar einen Wert von 0,217, was eine Spannungsreduktion von 78,3% bedeutet.

## 6.7 Parameterstudie lokaler Sprung

Auch die Parameterstudie des Bettungsfalles „lokaler Sprung“ erfolgt in gleicher Vorgangsweise wie die des linearen Verlaufes. Die 15 Bemessungspunkte decken abermals einen großen Bereich der beiden Bemessungskriterien ab. Das realistische Bemessungsspektrum der Druckschachtpanzerungen wird wieder durch die Berechnung an 3 repräsentativen geometrischen Verhältnissen  $R_m/t = 200$ ,  $R_m/t = 70$ ,  $R_m/t = 40$  ausgewertet. Jeder Bemessungspunkt wird jeweils mit 3 Reibungsbeiwerten  $\mu=0.00$ ,  $\mu=0.30$  und  $\mu=0.60$  gerechnet. Somit beläuft sich die Parameterstudie des lokalen Sprunges auf insgesamt 45 Berechnungen und Vergleichswerten.

### 6.7.1 Auswertungspunkte im Abgrenzungsdiagramm

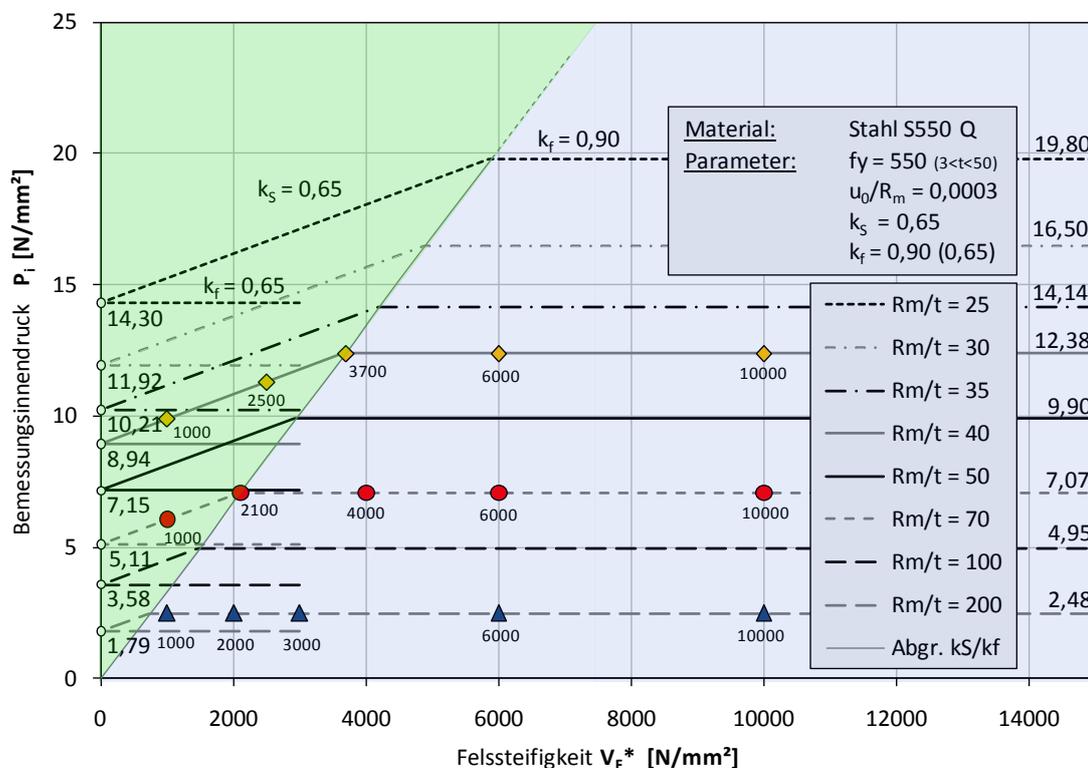


Abbildung 101: Darstellung Auswertungspunkte Parameterstudie lokaler Sprung

Abbildung 101 zeigt eine Übersicht der Bemessungspunkte für die Parameterstudie lokaler Sprung.

### 6.7.2 Ergebnisdigrammerläuterung Fall: lokaler Sprung

#### 6.7.2.1 $R_m/t = 200$

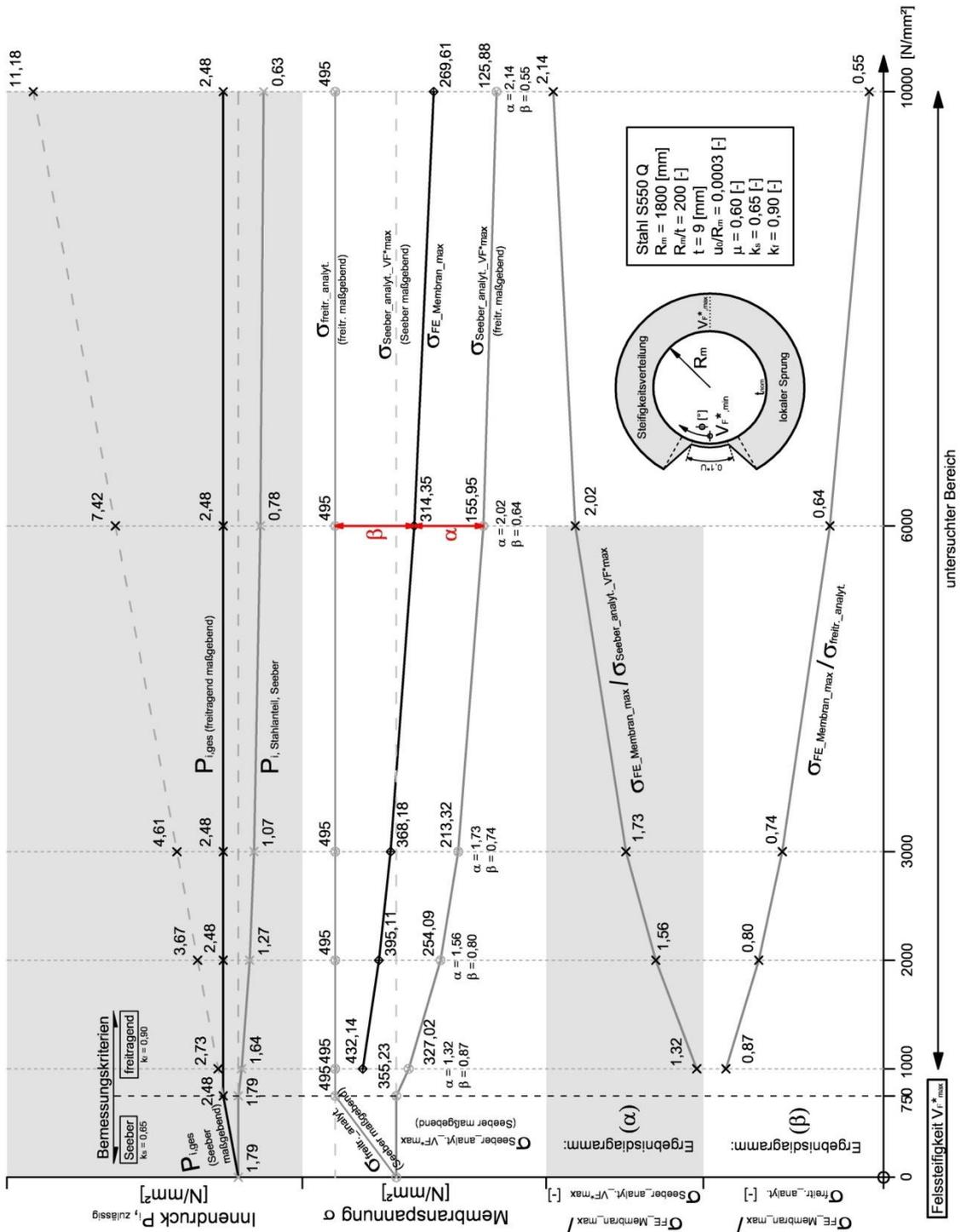


Abbildung 102: Ergebniserläuterungsdiagramm, lokaler Sprung,  $R_m/t = 200$

### 6.7.2.2 $R_m/t = 40$

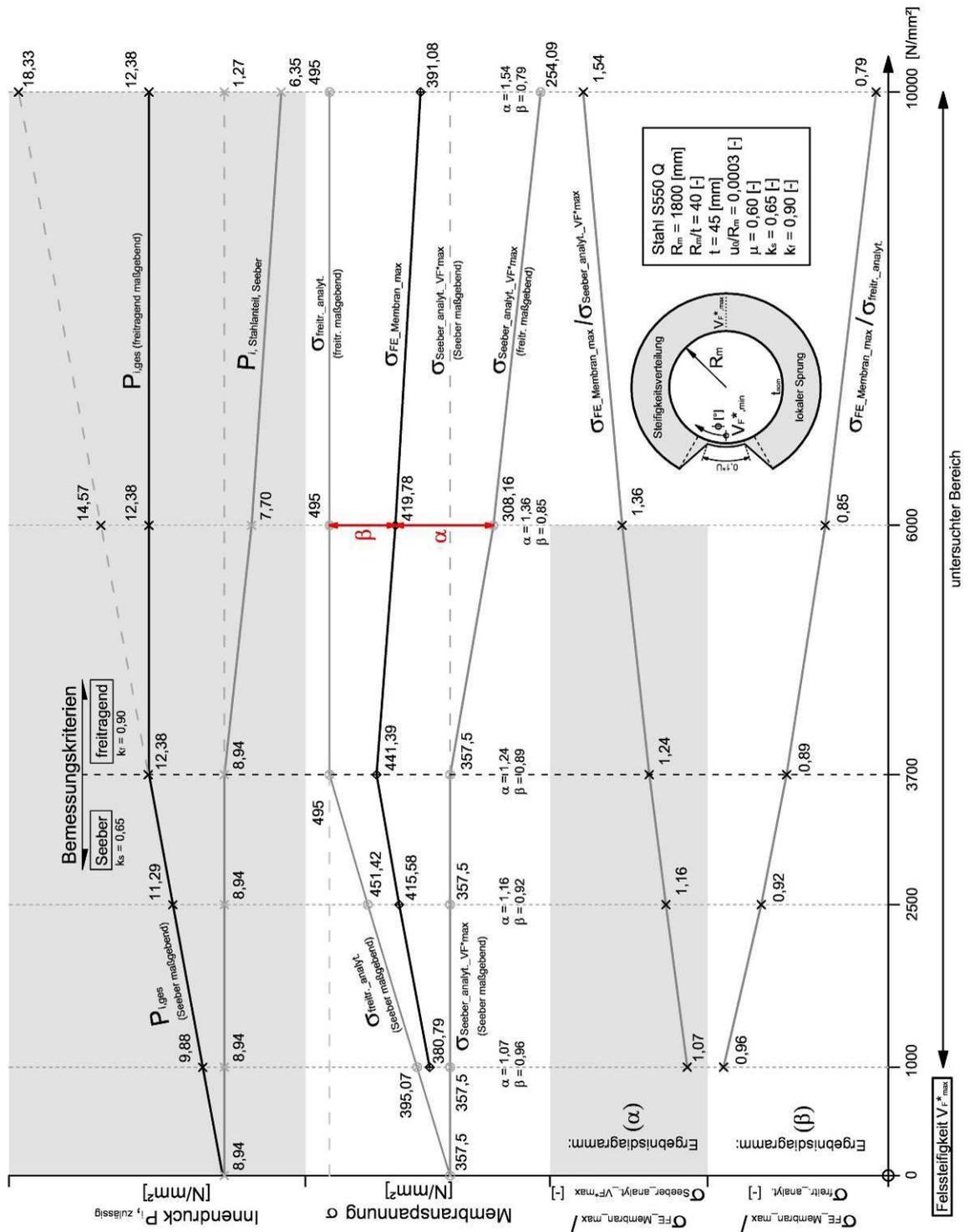


Abbildung 103: Ergebniserläuterungsdiagramm, lokaler Sprung,  $R_m/t = 40$

### 6.7.3 Ergebnisse Parameterstudie lokaler Sprung

Der Aufbau und das Schema der Ergebnisdarstellung erfolgt in gleicher Weise wie das des Bemessungsfalles „linearer Verlauf“. Für Informationen dazu sei der Leser auf Kapitel 6.6.3 verwiesen.

6.7.3.1 Lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$

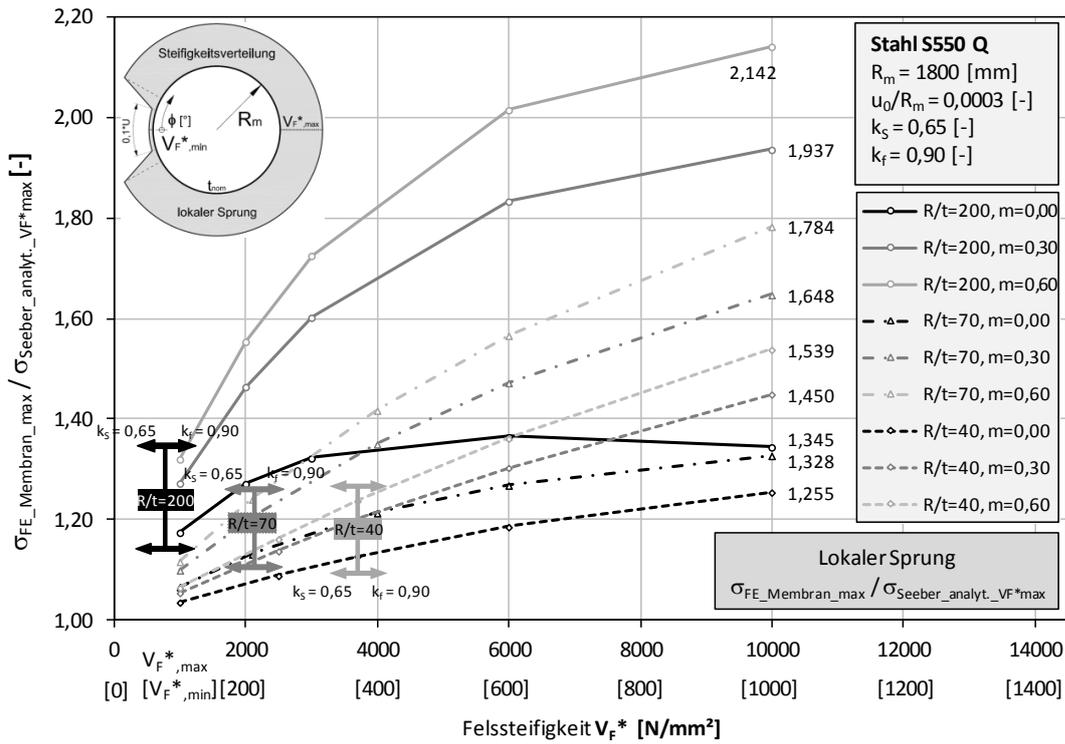


Abbildung 104: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung

$\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$

6.7.3.2 Lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$

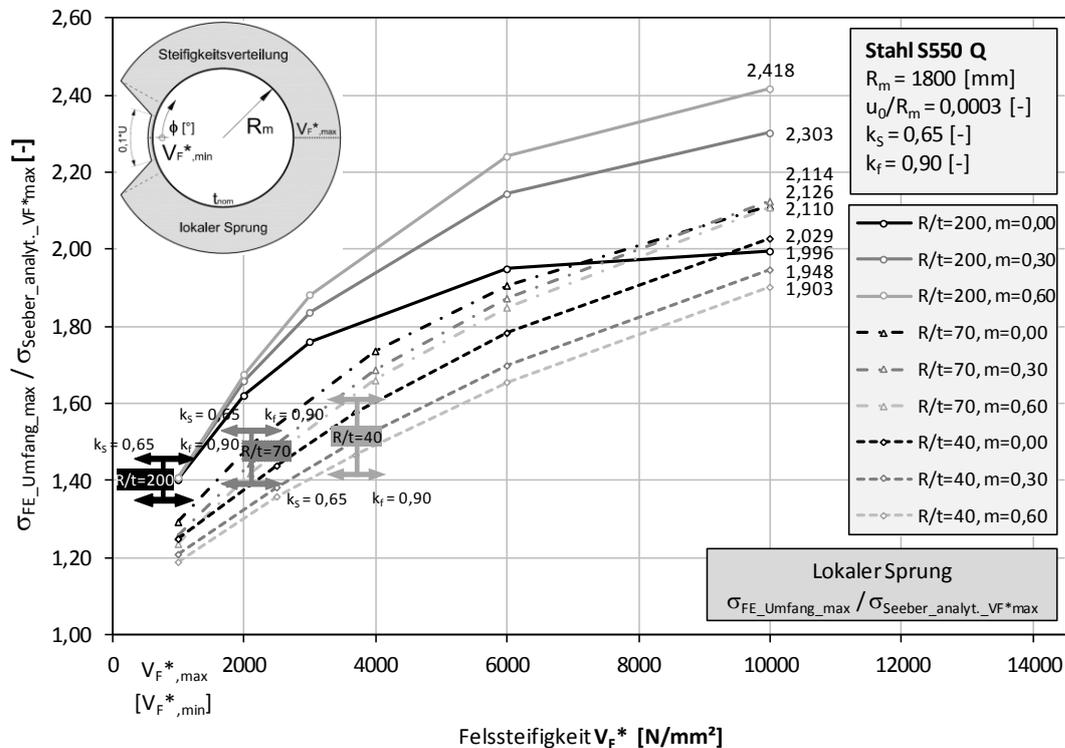


Abbildung 105: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung

$\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$

### 6.7.3.3 Lokaler Sprung $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

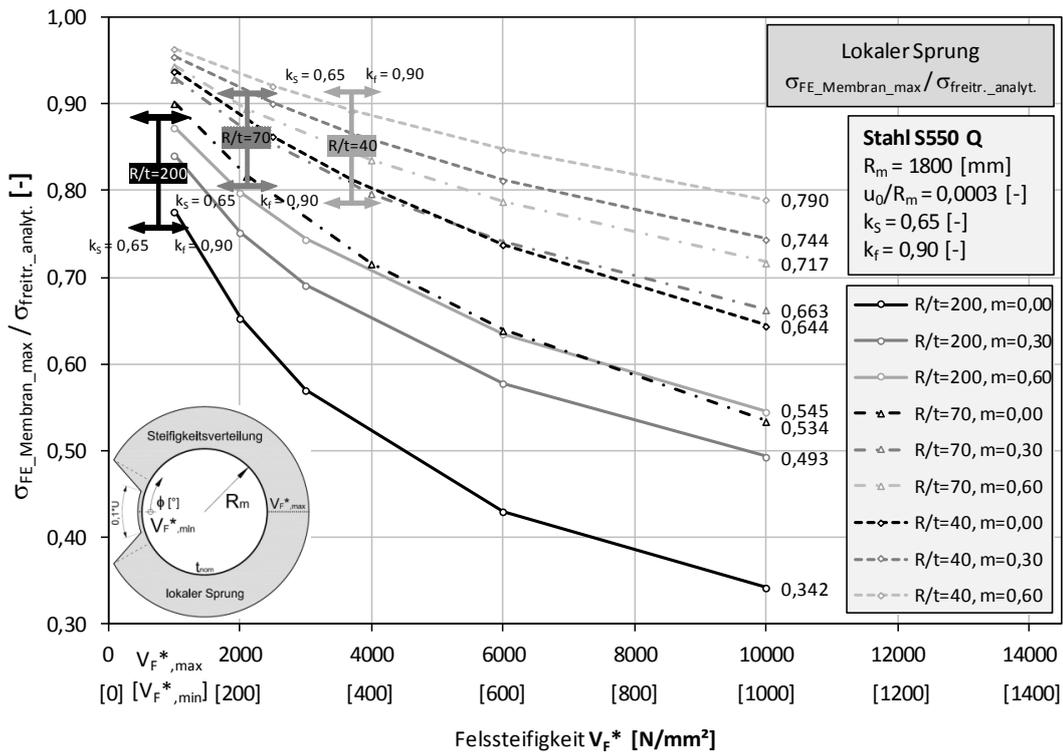


Abbildung 106: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

### 6.7.3.4 Lokaler Sprung $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

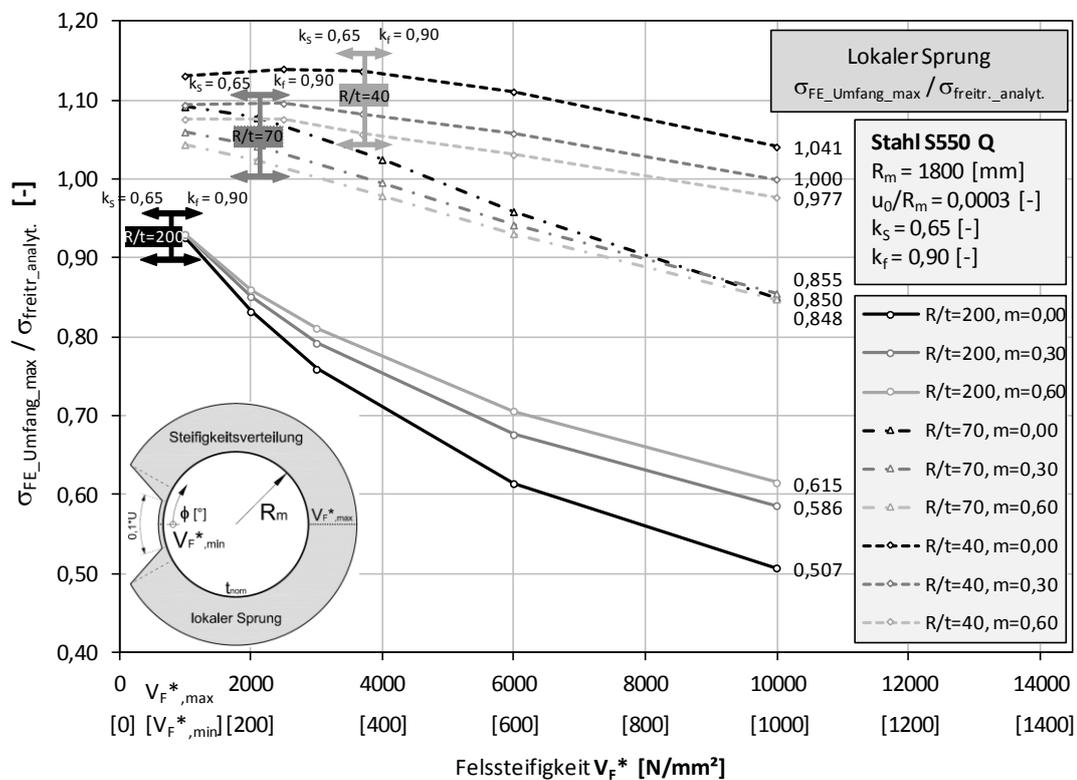


Abbildung 107: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$

6.7.3.5 Lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

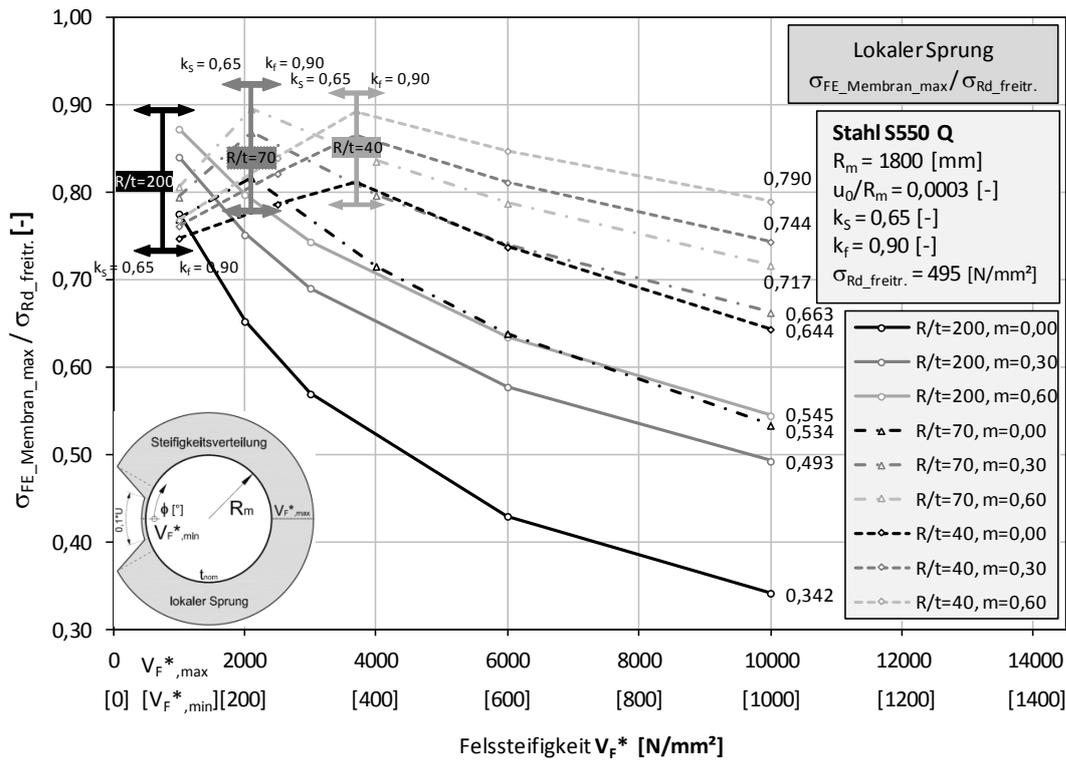


Abbildung 108: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Rd\_freitr.}$

6.7.3.6 Lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$

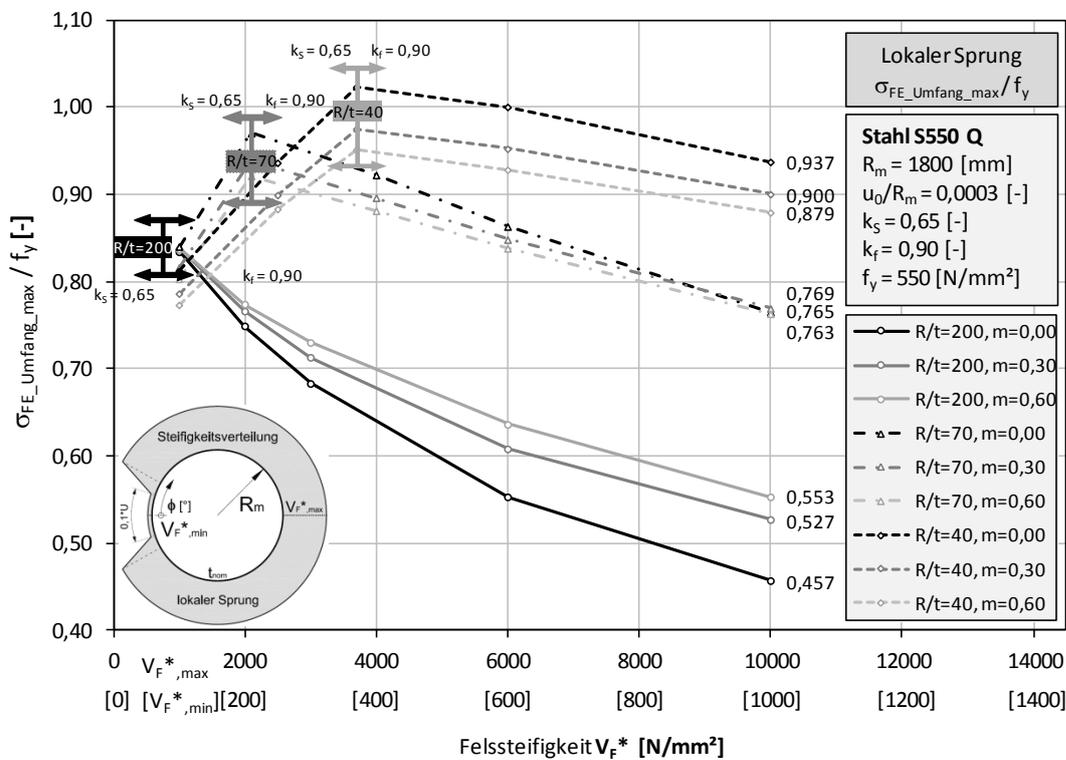


Abbildung 109: Parameterstudie Elastisch, Ergebnisdigramm lokaler Sprung  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / f_y$

### 6.7.4 Ergebnisinterpretation lokaler Sprung

Aus den Ergebnissen  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$  der Abbildung 104 können folgende Erkenntnisse gewonnen werden. Die gesamten Ergebnisse befinden sich im Bereich einer Spannungsüberbeanspruchung der numerischen Berechnung gegenüber dem analytischen Vergleichsmodell. Je größer das Verhältnis  $R_m/t$  ausfällt, desto größer wird auch die Spannungsüberbeanspruchung. Auch die Einflüsse steigender Reibung und einer steigenden Felssteifigkeit erhöhen den Vergleichswert der beiden Modelle zu Lasten der numerischen Berechnung.

Abbildung 105 mit dem Diagrammwerten  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$  zeigt grundsätzlich gleiches Verhalten mit einer Ausnahme. Bei  $R_m/t = 200$  [-] steigt die Auslastung bei größer werdendem Reibungskoeffizienten  $\mu$ . Anderes Verhalten zeigen die Verhältnisse  $R_m/t = 70$  [-] und  $R_m/t = 40$  [-]. Ein größer werdender Reibungseinfluss im Kontakt zwischen Panzerung und Bettung wirkt sich in einer kleineren Überbeanspruchung der numerischen FE-Berechnung aus. Grund dafür ist die Zunahme der Membranspannung durch den Reibungseffekt und eine gegenläufige Sekundärspannungsabnahme mit zunehmendem Reibungskoeffizienten. Bei  $R_m/t = 200$  [-] und bei zunehmendem Reibungskoeffizienten  $\mu$  fällt die Spannungszunahme durch die Membranspannungserhöhung größer als die Sekundärspannungsabnahme aus, was sich in der steigenden Spannungsüberbeanspruchung bei zunehmenden Reibungskoeffizienten äußert. Bei den dickeren Rohren  $R_m/t = 70$  [-] und  $R_m/t = 40$  [-] überwiegt die Sekundärspannungsabnahme der Membranspannungserhöhung, wodurch das Überbeanspruchungsniveau sinkt. Der Vergleich der maximalen Membranspannung mit dem analytisch freitragenden Bemessungskriterium  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  (Abbildung 106) zeigt ein Abfallen des Auslastungsverhältnisses mit steigendem Verhältnis  $R_m/t$ , steigender Felssteifigkeit  $V_F^*$  und sinkendem Reibungskoeffizienten  $\mu$ .

Im rechten Balkenbereich des Ergebnisdiagrammes  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{freitr\_analyt.}$  (Abbildung 107), sprich dem Modellvergleich mit dem freitragendem Kriterium, ist bei  $R_m/t = 70$  [-] und  $R_m/t = 40$  [-] ein Übergang von sinkender Überbeanspruchung zu steigender Minderbeanspruchung des FE-Modelles gegenüber der analytischen Modellbemessung zu erkennen. Mit steigender Felssteifigkeit  $V_F^*$  und größerem Verhältnis  $R_m/t$  bekommt die numerische Rechnung zunehmende „Sicherheit“ gegenüber der analytischen Berechnungsbasis. Im Gegensatz zu den Vergleichen  $\sigma_{FE\_Umfang\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$  und  $\sigma_{FE\_Membran\_max} / \sigma_{Seeber\_analyt\_VF^*max}$  wirkt sich ein größeres Verhältnis  $R_m/t$  darin positiv aus.

Eine weitere Erkenntnis der Parameterstudie bezieht sich auf die Position der Spitzenspannung. Die maximale Sekundärspannung aus Biegung tritt in den meisten Fällen an der Rohrinneenseite der Ausbeulungsgegenkrümmung auf. Bei großen Wandstärken und gleichzeitig niedriger Felssteifigkeit, als auch bei dünnen Rohren und hoher Felssteifigkeit tritt die maximale Sekundärspannung jedoch an der Rohraußenseite im Bereich der Rohrausbeulung auf.



## 7. Parameterstudie PLASTISCH

### 7.1 Allgemein

Die bisherigen Untersuchungen und Berechnungen der Parameterstudie ELASTISCH wurden rein auf Basis elastischer Materialgesetze durchgeführt. Sowohl die Arbeitslinie des Stahles als auch das Modell des Gebirgsmantels zeigen darin ideal elastisches Verhalten. Für die Vergleiche der Parameterstudie ELASTISCH dieser Arbeit, der numerischen mit seiner analytischen Basisberechnung, ist dieses vereinfachte Gesetz ausreichend, da die Spannungen durch die entsprechenden Sicherheitsfaktoren unterhalb der Fließgrenze des Stahles limitiert sind.

Um die eigentliche Grenztragfähigkeit des Verbundsystems Stahlpanzerung-Gebirgsmantel ermitteln zu können, werden komplexere Materialmodelle benötigt. Die Grenztraglast (max. Innendruck) stellt sich nach dem Versagen (und Grenzumlagerung) eines der beiden lastabtragenden Komponenten, der Stahlpanzerung und dem Fels, ein. Während der Stahl ein sehr gut erforschtes und akkurates Materialgesetz bietet, lässt sich ein realitätsnaher Gebirgsmantel nicht so einfach modellieren.

#### a) Panzerung

Bei der Stahlpanzerung wird einerseits auf ein vereinfachtes ideal-bilinear plastisches Arbeitsgesetz zurückgegriffen. Nach Erreichen der Fließspannung fließt der Stahl ideal ohne weitere Spannungserhöhung bis er eine rechnerisch angenommene Grenzdehnung von 20 [%] als Abbruchkriterium erreicht hat.

Weitere Untersuchungen berücksichtigen auch eine Verfestigung des Stahles nach dem Erreichen des Fließniveaus.

In dieser Arbeit werden Druckschachtpanzerungen im überdeckten Kernbereich untersucht. Dadurch ergeben sich Randbedingungen, die den ebenen Formänderungszustand in Rohrlängsrichtung bewirken ( $\varepsilon_l = 0$ ). Mit Aufbringen eines Innendruckes werden durch die damit erreichte Zwangswirkung Rohrlängsspannungen aktiviert ( $\sigma_l \neq 0$ ).

Die Plastizierung des Stahles wird im ebenen Formänderungszustand mit Erreichen der Fließgrenze durch die Mises-Vergleichsspannung aktiviert. Die Mises-Vergleichsspannung stellt ein Modell dar, welches einen komplexen mehrachsigen Spannungszustand als fiktiven einachsigen Spannungszustand wiedergibt.

Vergleichsspannungsformel im ebenen Formänderungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_x^2 - \sigma_u \sigma_x + 3\tau_{ux}^2} \quad [N/mm^2]$$

mit:  $\sigma_u$  ... Umfangsspannung

$\sigma_x$  ... Rohrlängsspannung

Durch die Membrantheorie der dünnwandigen Schale treten keine Schubspannungen auf und der Term  $3\tau_{ux}^2$  fällt weg.

Aufgrund der Längsspannung im ebenen Formänderungszustand wird die Fließgrenze erst bei einer Umfangsspannung größer als die der 1-axialen Fließspannung erreicht.

Untersuchungen zeigen, dass die Umlagerungskapazität der Umfangsspannung durch Zwang vom Materialzustand abhängig ist. Im elastischen Bereich ist eine Querspannungsumlagerung von 30% der Umfangsspannung möglich, bis der Fließzustand, durch Erreichen der Vergleichsspannung auf den Wert  $f_y$ , erreicht wird. Im Fließzustand wächst die Umlagerungskapazität der Umfangsspannung dann allmählich auf maximal 50%.

$$\sigma_x = 0,3 * \sigma_u \quad \dots \text{elastischer Bereich}$$

$$\sigma_x = 0,5 * \sigma_u \quad \dots \text{plastischer Bereich}$$

Aus der Mises-Vergleichsspannungsformel lässt sich die maximale Umfangsspannung bis zum Fließen errechnen.

Elastischer Bereich:

$$\sigma_{u,max,el} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,3^2 - 1 * 0,3}} * f_y = 1,125 * f_y \quad [N/mm^2]$$

Plastischer Bereich:

$$\sigma_{u,max,pl} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,5^2 - 1 * 0,5}} * f_y = 1,155 * f_y \quad [N/mm^2]$$

Die Parameterstudie wird mit der Stahlsorte S550 Q durchgeführt. Die maximalen Umfangsspannungen ergeben sich somit zu:

Mit:

$$f_y = 550 \quad [N/mm^2] \quad \dots \text{einaxiale Fließgrenzspannung}$$

Elastischer Bereich:

$$\sigma_{u,max,el} = 1,125 * 550 = 618,75 \quad [N/mm^2]$$

Plastischer Bereich:

$$\sigma_{u,max,el} = 1,155 * 550 = 635,25 \quad [N/mm^2]$$

### **b) Gebirgsmantel**

Wie bereits erwähnt, ist die realitätsnahe Modellbildung eines lastabtragenden Gebirgsmantels aus Fels eine hoch komplexe Aufgabenstellung und bedarf großer felsmechanischer Erfahrung. Um ein geeignetes Materialmodell entwickeln zu können, müssten weitere tiefgehendere Untersuchungen im Gebiet der Bruchmechanik angestellt werden. Diese Aufgabe würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen. Dadurch beschränken sich die plastischen Untersuchungen dieser Masterarbeit auf das plastische Materialverhalten von einer Komponente des Verbundsystems, dem Stahl der Druckschichtpanzerung. Das Modell der Gebirgsbettung bedient sich weiter elastischem Tragverhalten und wird dem Kapitel der elastischen Parameterstudie entnommen.

Das Tragverhalten des Felsens wird wie in Kapitel 3.2.3.3 beschrieben mit seinem Verformungsmodul  $V_F^*$  bestimmt.

Für eine weitere Untersuchung und Entwicklung eines geeigneten Materialmodells für das Gebirge sei der Leser auf die Unterlagen, insbesondere auf die Veröffentlichung „Action of Force on Rock Mass by Crack Water Pressure“, von Herrn Dipl.-Ing. Guntram Innerhofer verwiesen.

### **7.1.1 Plastische Berechnungsweise**

Die plastische FE-Berechnung erfolgt in folgender Weise. Die Last (Innendruck) wird während der Berechnung in Inkrementen immer weiter bis zur Grenztragfähigkeit gesteigert. Diese stellt sich entweder nach einem Querschnittsversagen durch lokales Erreichen der plastischen Grenzdehnung ein, keine plastische Schnittkraftumlagerung im System mehr möglich ist, oder nachdem die kinematische Fließkette nach Schnittkraftumlagerung voll ausgebildet ist und es zu einem Systemversagen kommt (Stichwort stat. unbestimmt Systeme).

## 7.2 Modellverifikation, plastische Berechnung

### 7.2.1 Untersuchungen mit konstanter Bettung

Es folgt die Verifikation des Kontaktmodells im plastischen Bereich. Um die Plausibilität der Rechenergebnisse mit den Reibungsbeiwerten  $\mu = 0,00$  [-],  $\mu = 0,30$  [-] und  $\mu = 0,60$  [-] überprüfen zu können, werden Untersuchungen am Kontaktmodell mit konstantem Bettungsverlauf durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgen an einem Beispiel mit folgenden Parametern:

(in Kürzelschreibweise, Informationen dazu siehe Kapitel 6.3 - Dateiensystem)

- KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R00\_P3000\_VF2000\_Konstant

Im Fall einer konstanten Bettung treten unabhängig vom Reibungsbeiwert keine tangentialen Relativverschiebungen auf, wodurch auch keine Reibung aktiviert wird. Die Rechenergebnisse müssen dadurch einen identen Ergebnisverlauf bei Innendruck-Laststeigerung zeigen.

In Abbildung 110, Abbildung 111 und Abbildung 112 sind die Vergleichsparameter in Abhängigkeit der Radialverschiebung unter Laststeigerung dargestellt. Die Ergebnislinien zeigen den gleichen Verlauf der Berechnungen mit Reibung  $\mu = 0,00$  [-],  $\mu = 0,30$  [-] und  $\mu = 0,60$  [-].

Es ist auch ersichtlich, dass nicht alle Berechnungen bis zum gleichen Niveau der Radialverschiebung (was indirekt dem Laststeigerungsfaktor entspricht) Ergebnisse liefern. Grund dafür sind numerische Berechnungsschwierigkeiten des verwendeten Finiten Elemente Programmes Abaqus in Kombination mit dem angewandten Kontaktmodell und dem konstanten Bettungsverlauf. Bei Reibung  $\mu = 0,00$  [-] bricht das Programm die Berechnung bereits vor dem Fließniveau ab. Mit steigendem Reibungskoeffizienten läuft die numerische Berechnung immer stabiler und es werden höhere Lastniveaus erreicht. Die Höhe der maximal erreichten Laststeigerung der Bemessungsfälle  $\mu$  spiegelt somit nicht zwingend die maximale Traglast des Systems dar. Sie kann auch aus dem numerischen Berechnungsabbruch resultieren.

Bis zum Abbruch der Berechnung des jeweiligen Bemessungsfalles  $\mu$  zeigen die Ergebnisse jedoch idente Verläufe. Damit kann auf die Korrektheit des Kontaktmodells für die plastische Berechnung geschlossen und das Modell verifiziert werden.

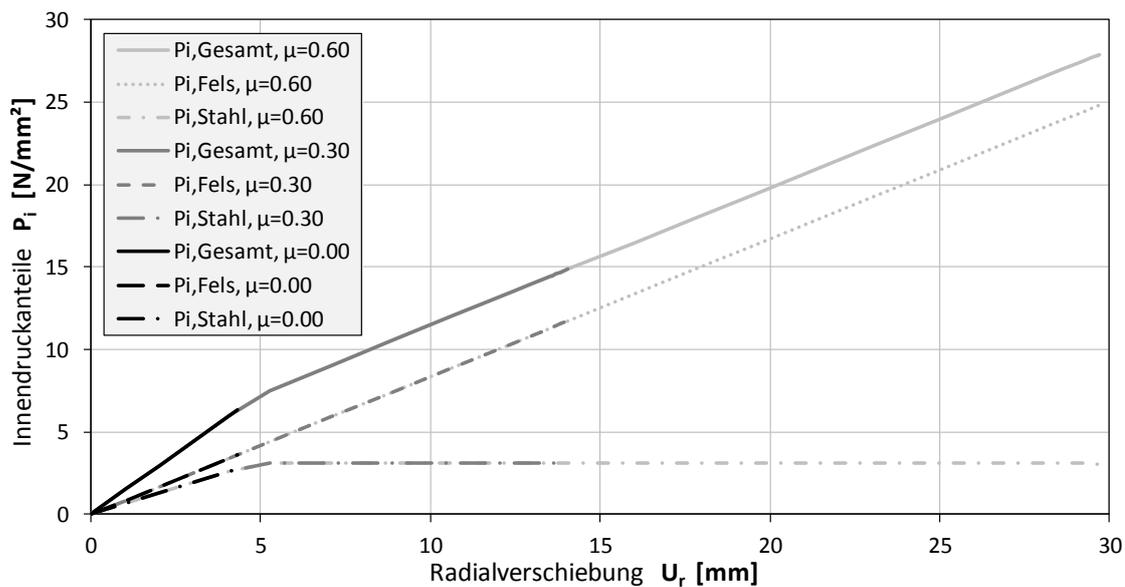


Abbildung 110: Modellverifikation, Innendruckanteile  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R00\_P3000\_VF2000\_Konstant

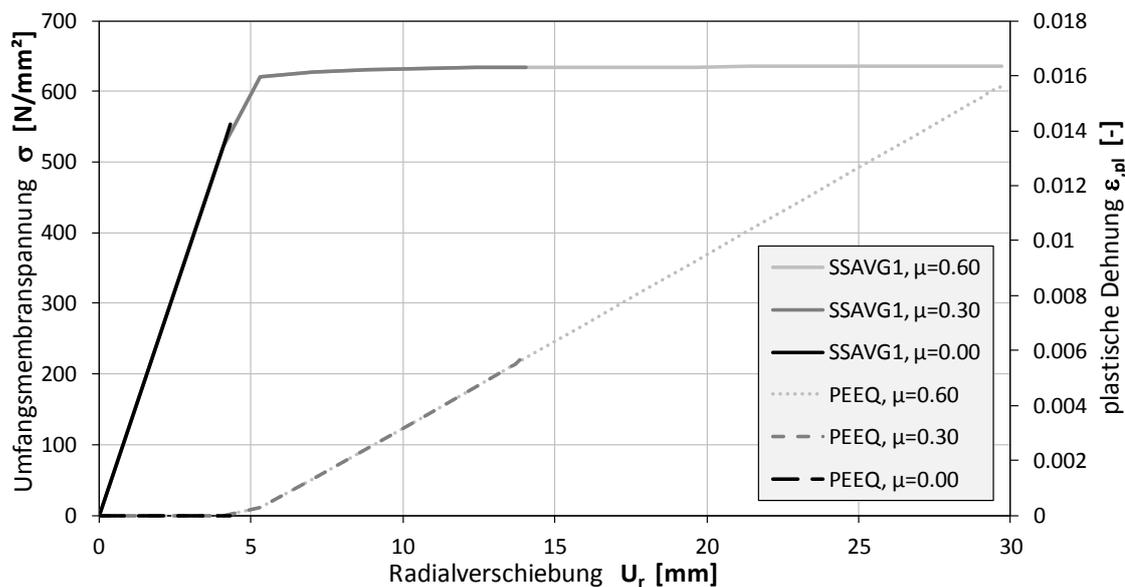


Abbildung 111: Modellverifikation, Membranspannung/plastische Dehnung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R00\_P3000\_VF2000\_Konstant

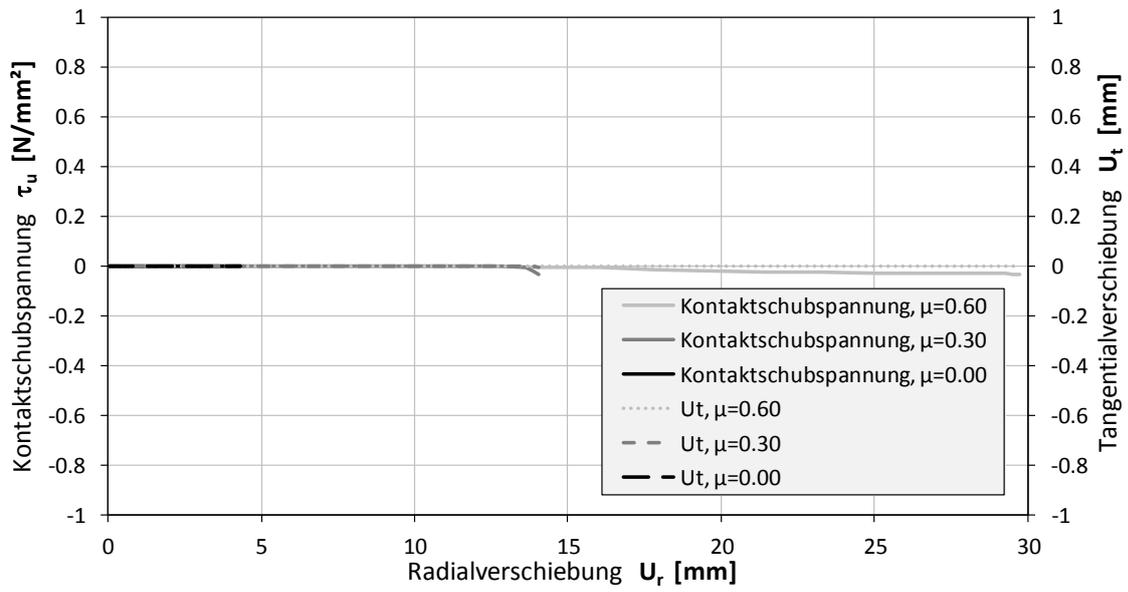


Abbildung 112: Modellverifikation, Kontaktschubspannung/Tangentialverschiebung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R00\_P3000\_VF2000\_Konstant

### 7.2.2 Fall: Konstante Bettung, lokale Materialstörung, ideale Plastizierung

Um das Verhalten der bei Asymmetrie erzeugten Schubspannungen zwischen Panzerung und dem umgebenden Gebirgsmantel darzustellen bzw. zu überprüfen werden weitere Untersuchungen durchgeführt. Die Asymmetrie wird durch eine materielle Störzone in der Panzerung erzeugt. Ein über 2 Elementbreiten in Umfangsrichtung erzeugter Störungstreifen, der sich über die gesamte Rohrlängsrichtung erstreckt, wird dabei mit einer dem Grundmaterial niedrigeren Fließgrenze beaufschlagt (z.B. durch Längsschweißnaht). Die Position der materiellen Störzone ist in Abbildung 118 ersichtlich. Die Bettung weist wieder einen konstant radialsymmetrischen Steifigkeitsverlauf auf. Die Berechnung erfolgt wieder jeweils mit den Reibungsbeiwerten  $\mu = 0,00$  [-],  $\mu = 0,30$  [-] und  $\mu = 0,60$  [-].

Kennwerte:

Rohr:  $f_y=550$  [N/mm<sup>2</sup>], Grenzdehnung=20% [-]

Störzone:  $f_y=500$  [N/mm<sup>2</sup>], Grenzdehnung=20% [-]

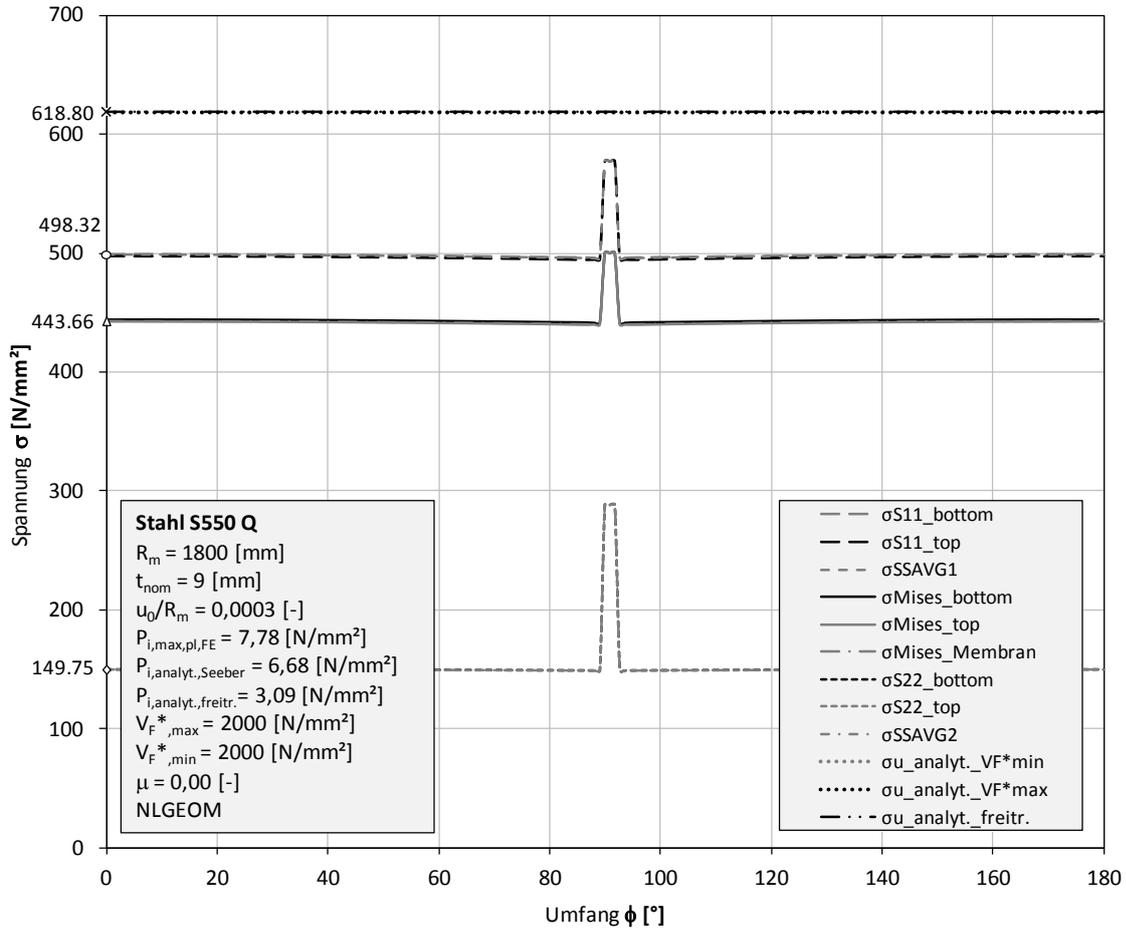
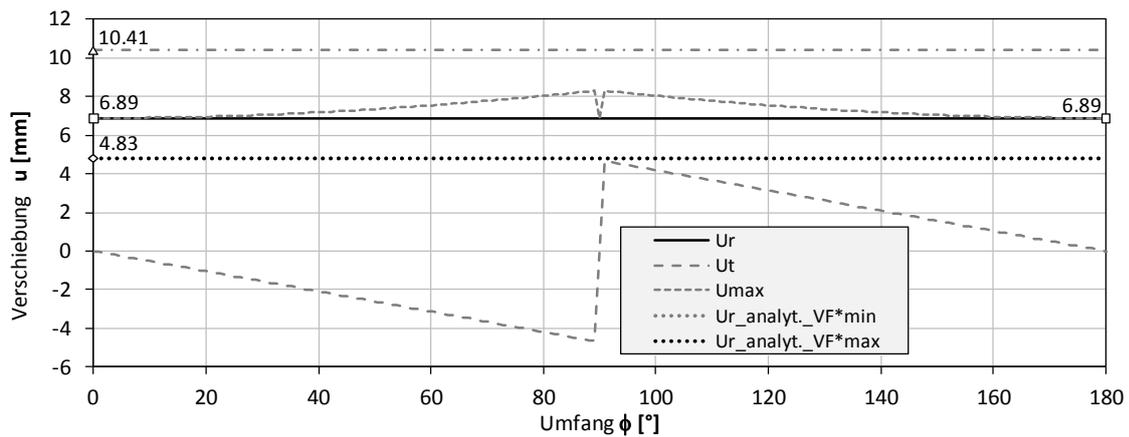
Breite der Störzone:  $b_{\text{Stör}}=56,5$  [mm]

(2 Elementbreiten bei  $R=1800$  [mm])

Anmerkung:

Die Position des Störstreifen liegt genau symmetrisch bei  $\phi=90$  [°]. Demnach müssen auch alle durch die Störzone resultierenden Effekte (Kurvenverläufe) in den Ergebnisdiagrammen symmetrisch um  $\phi=90$  [°] erfolgen. Eine kleine symmetrische Abweichung in den Diagrammen beruht rein auf Darstellungsungenauigkeiten. Die Verläufe sind immer exakt radialsymmetrisch um  $\phi=90$  [°] zu verstehen.

## 7.2.2.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS


 Abbildung 113: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

 Abbildung 114: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

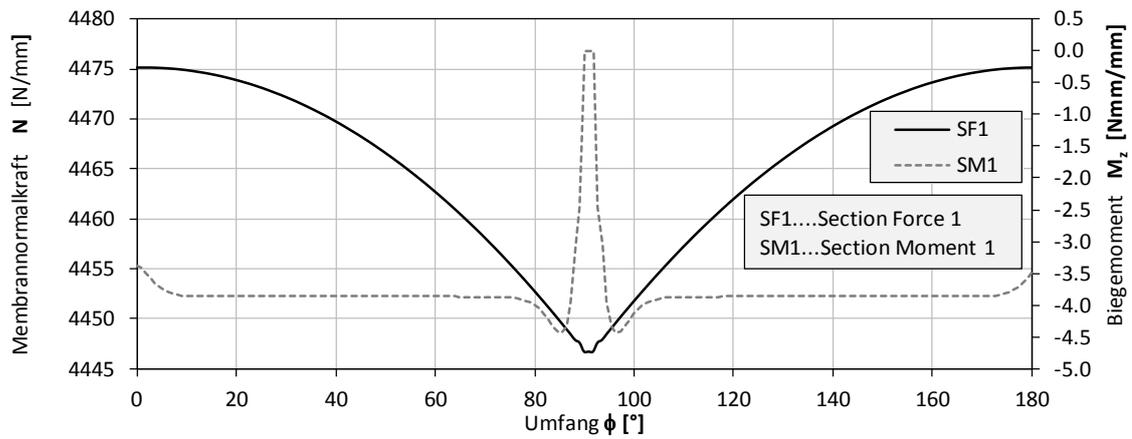


Abbildung 115: Schnittgrößen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

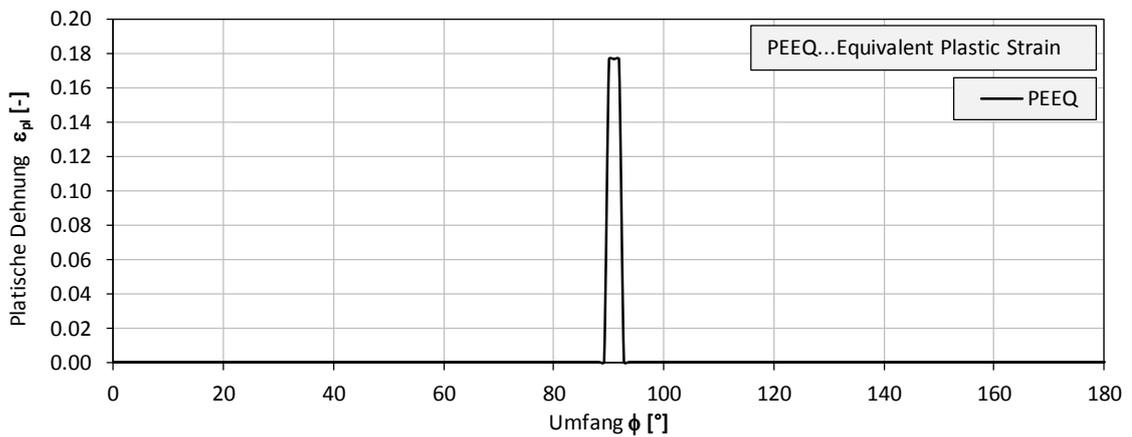


Abbildung 116: Plastische Dehnung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

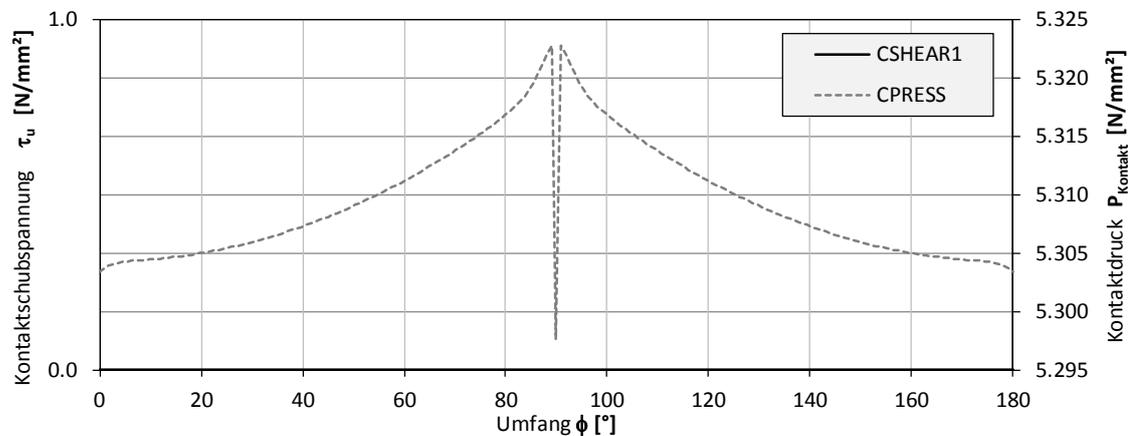


Abbildung 117: Kontaktspannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P778\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

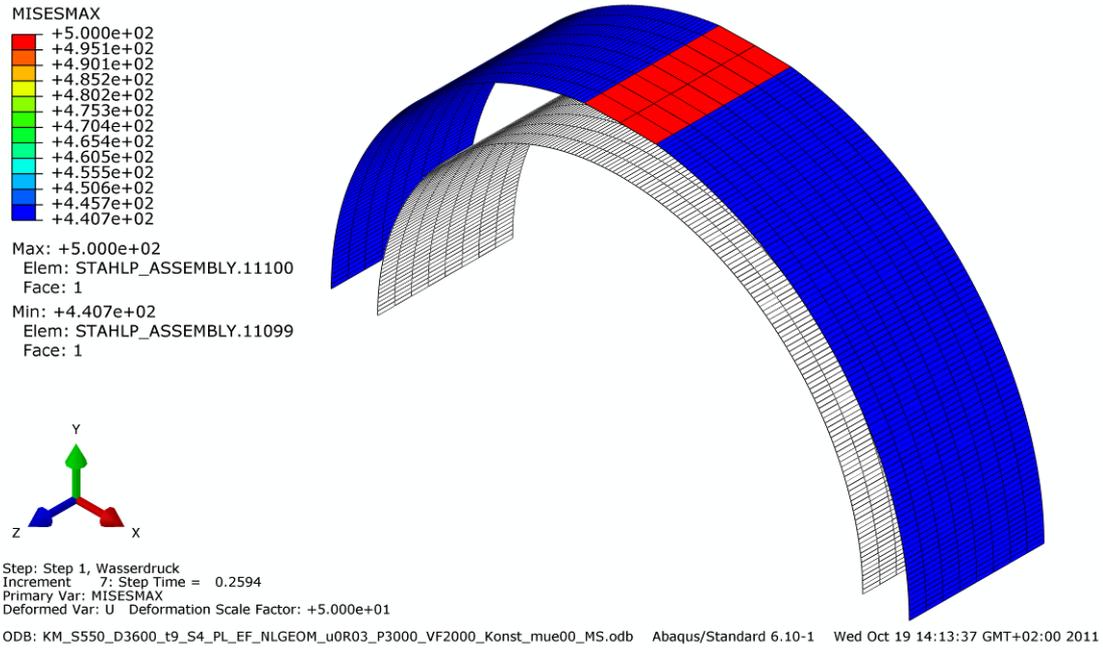


Abbildung 118: Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Konst\_mue00\_MS

7.2.2.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

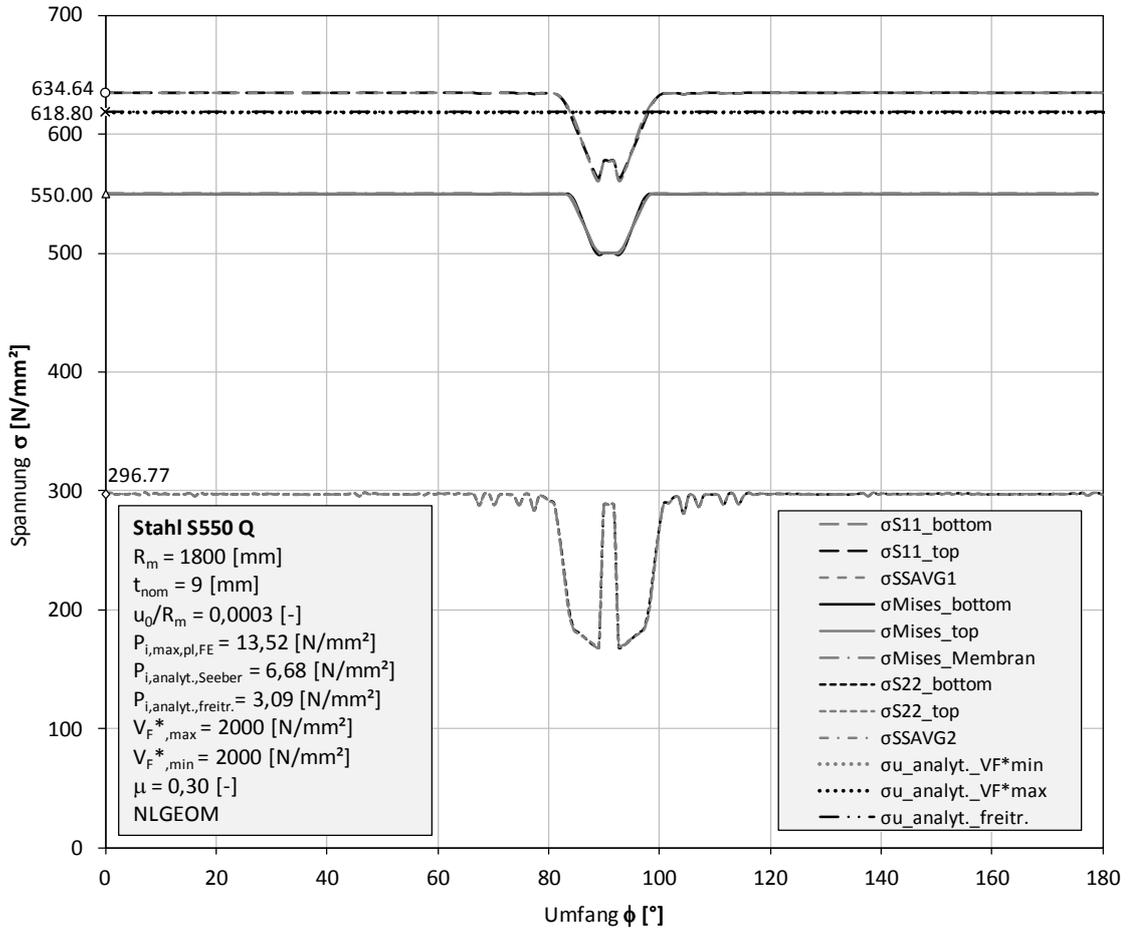


Abbildung 119: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

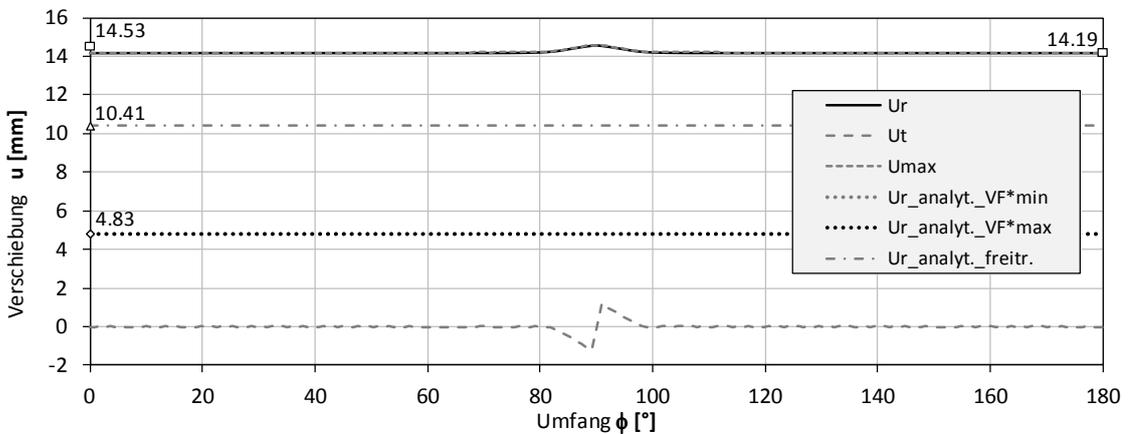


Abbildung 120: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

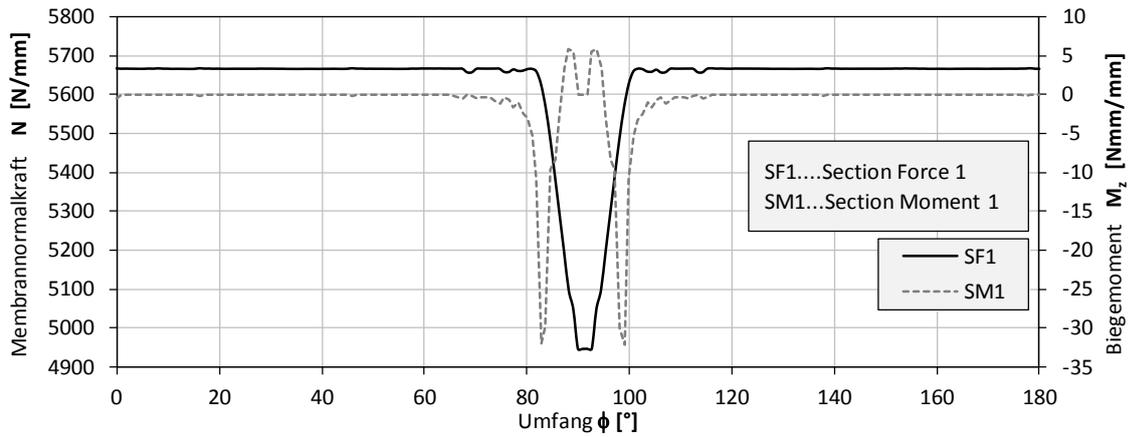


Abbildung 121: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

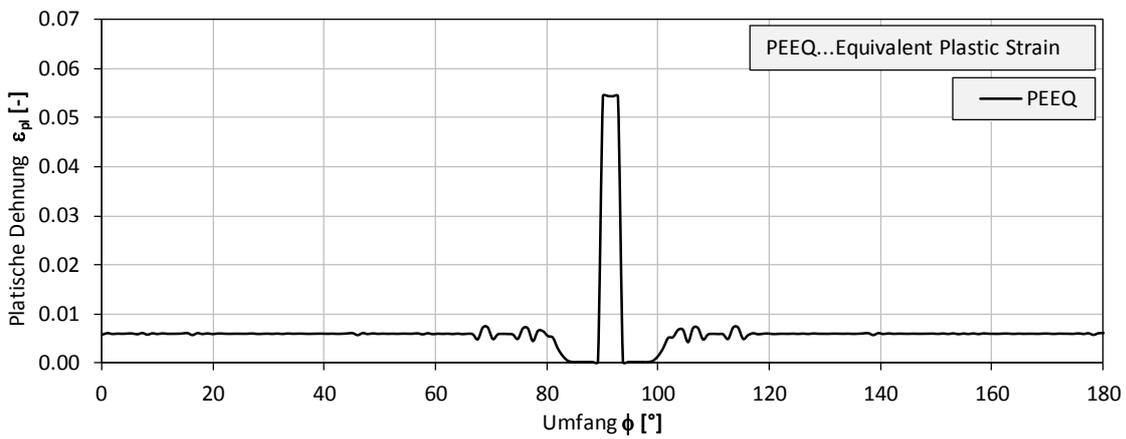


Abbildung 122: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

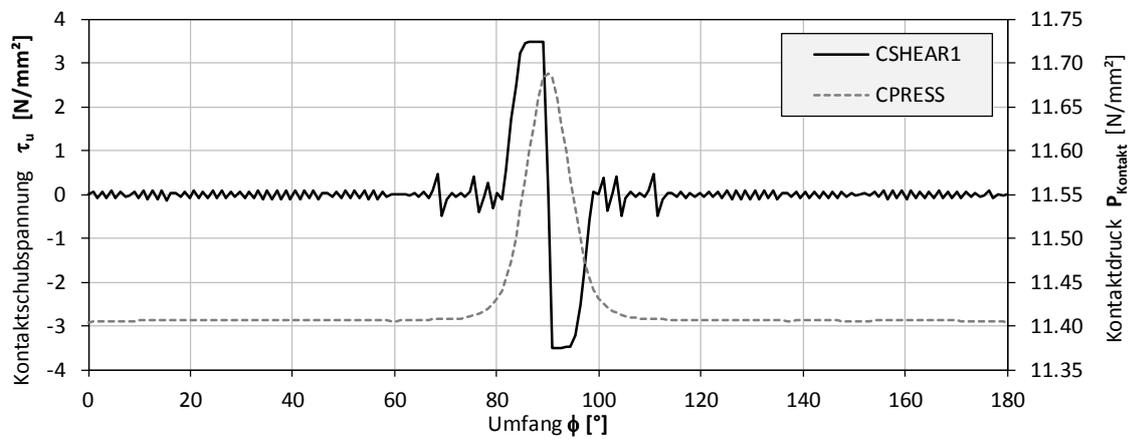


Abbildung 123: Kontaktspannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

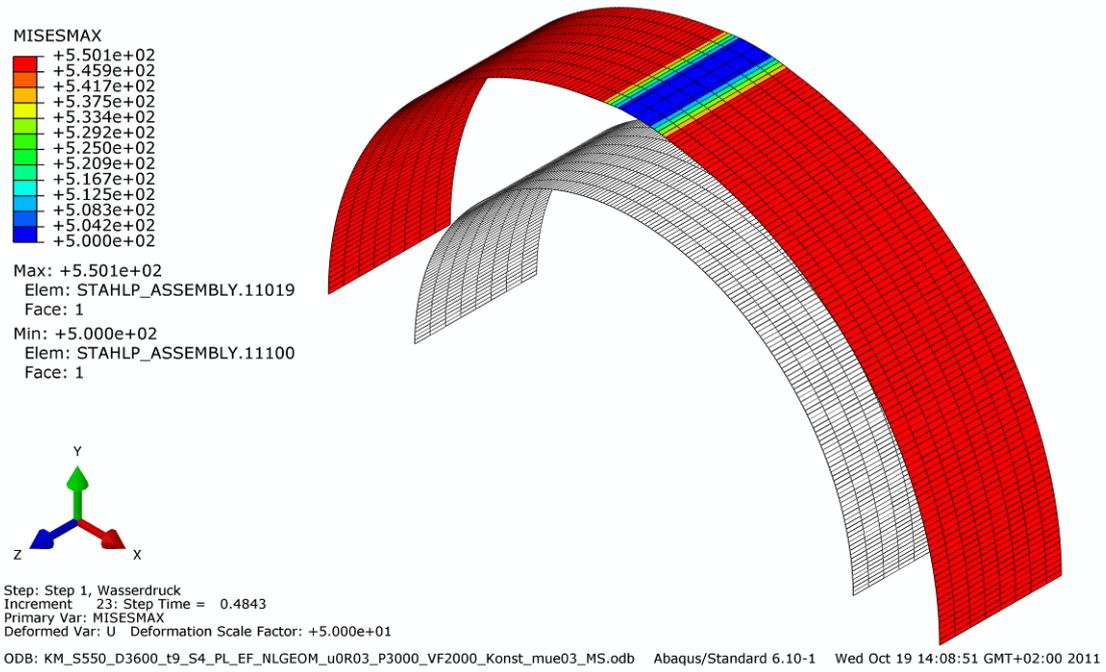


Abbildung 124: Vergleichsspannung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1352\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

## 7.2.2.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

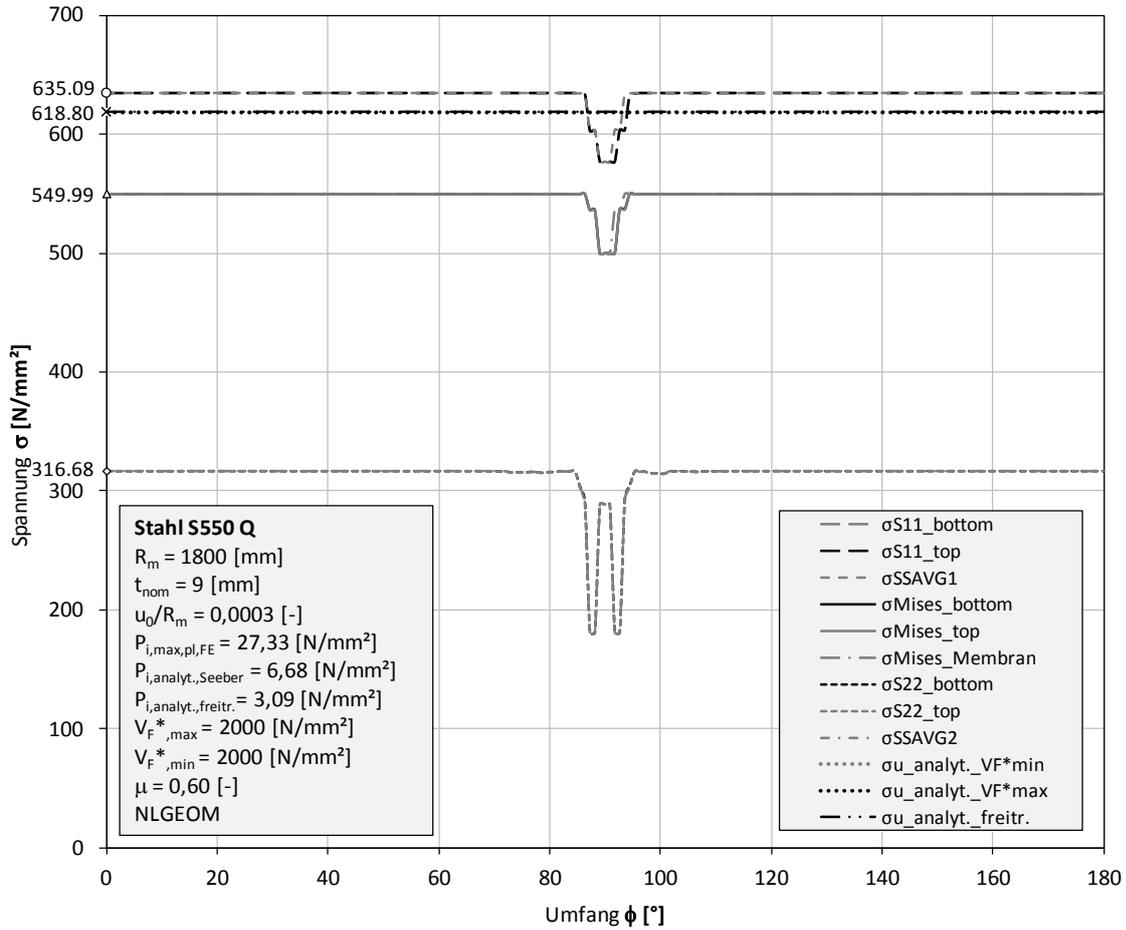


Abbildung 125: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

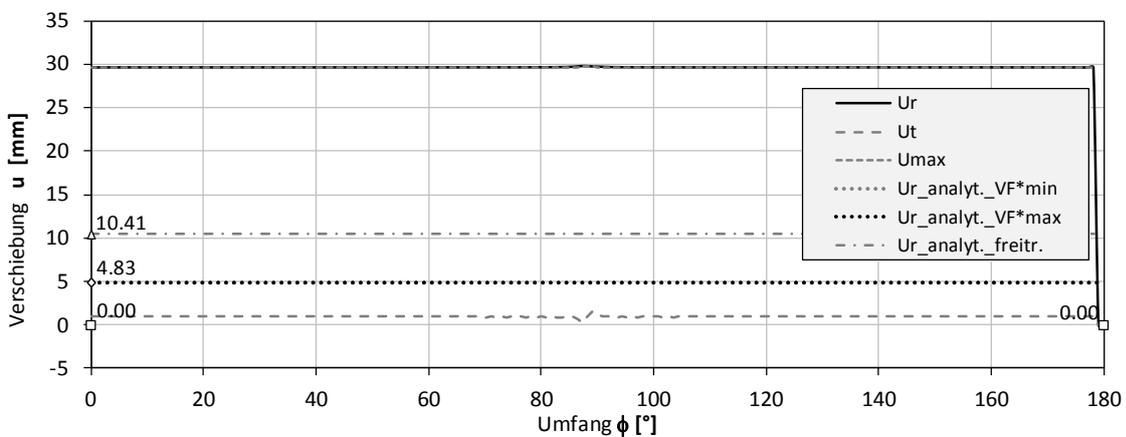


Abbildung 126: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

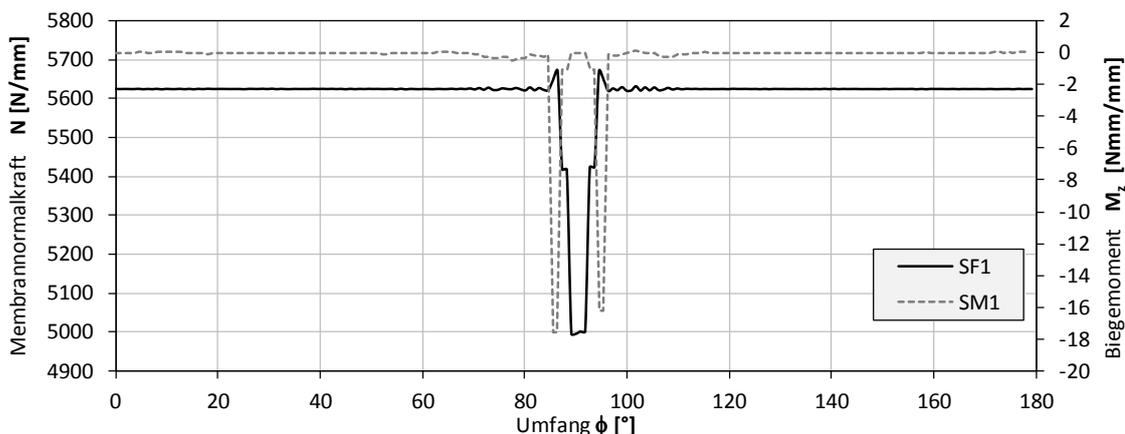


Abbildung 127: Schnittgrößen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

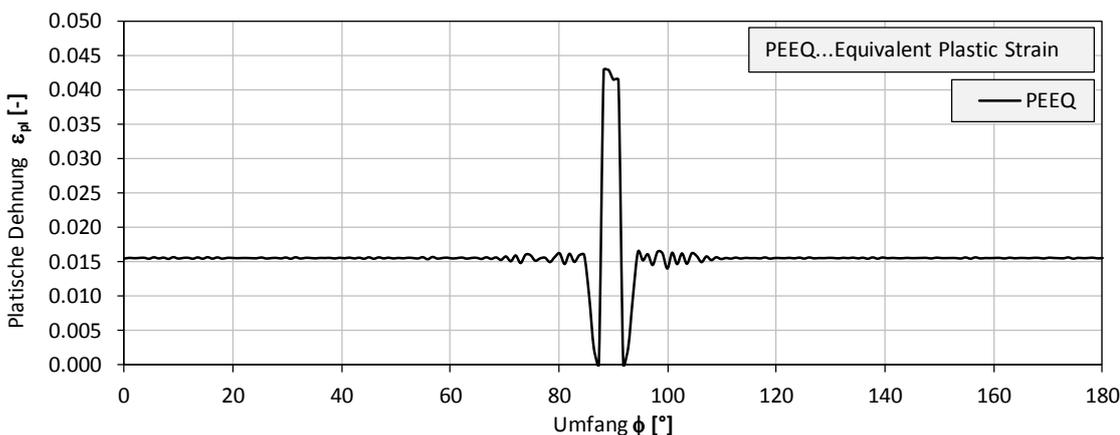


Abbildung 128: Plastische Dehnung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

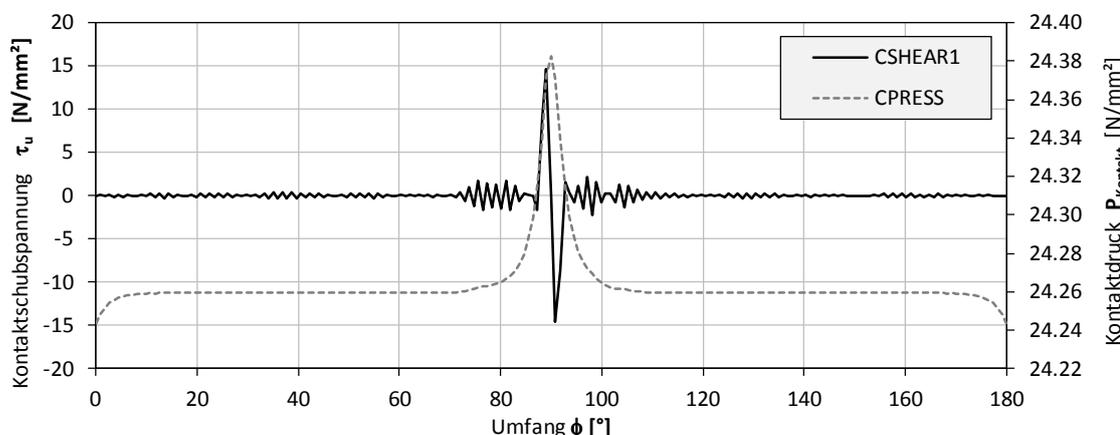


Abbildung 129: Kontaktspannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

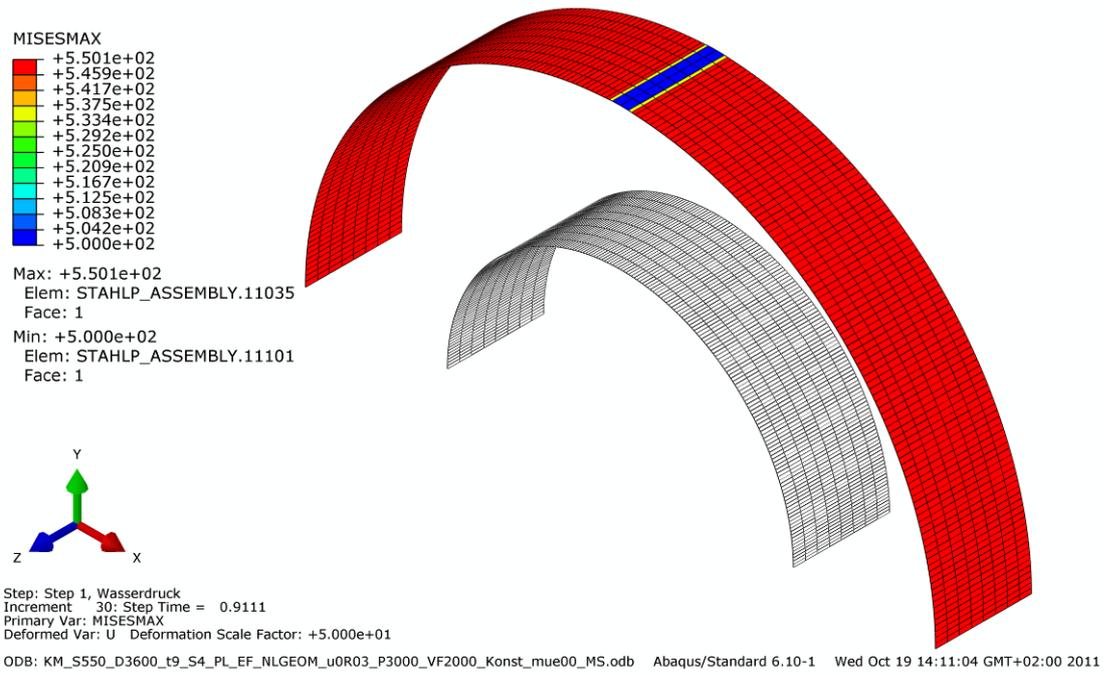


Abbildung 130: Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2733\_VF2000\_Konst\_mue06\_MS

7.2.2.4 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

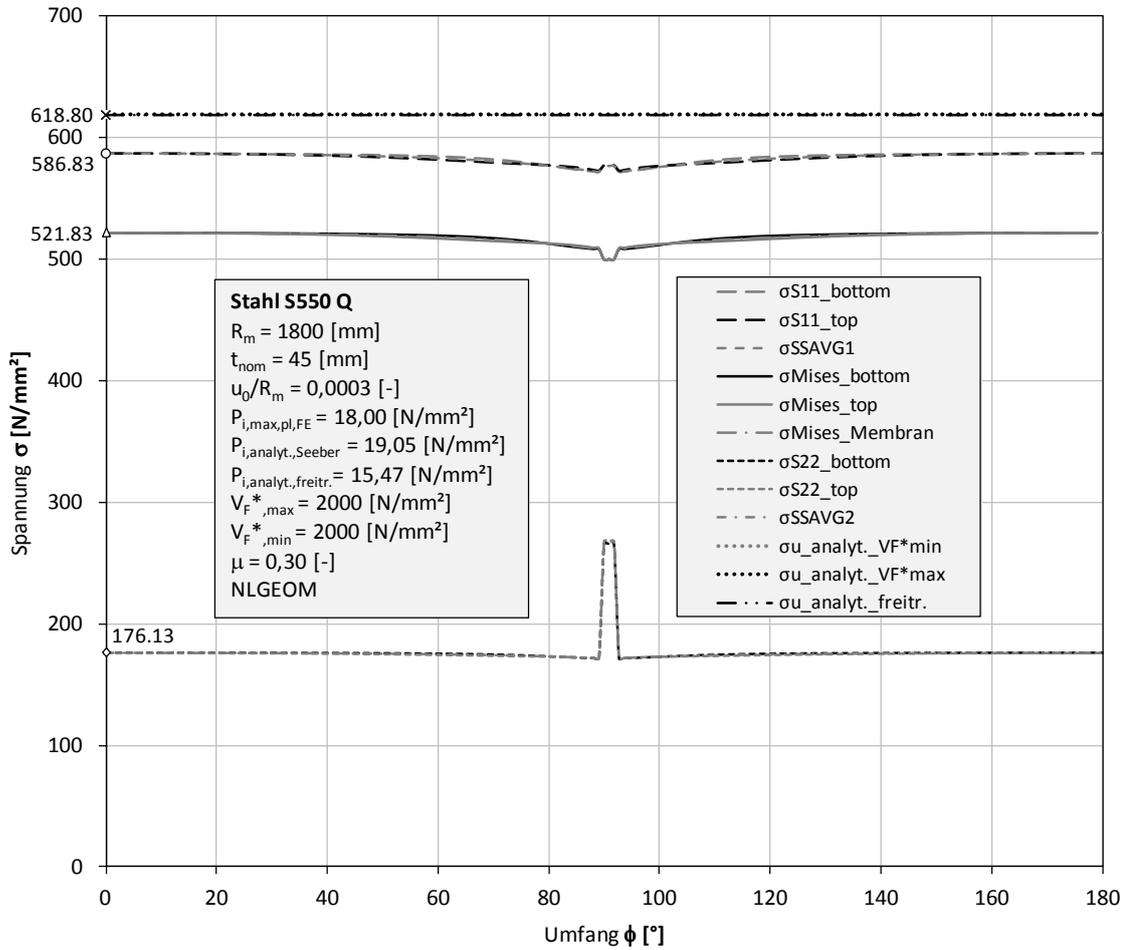


Abbildung 131: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

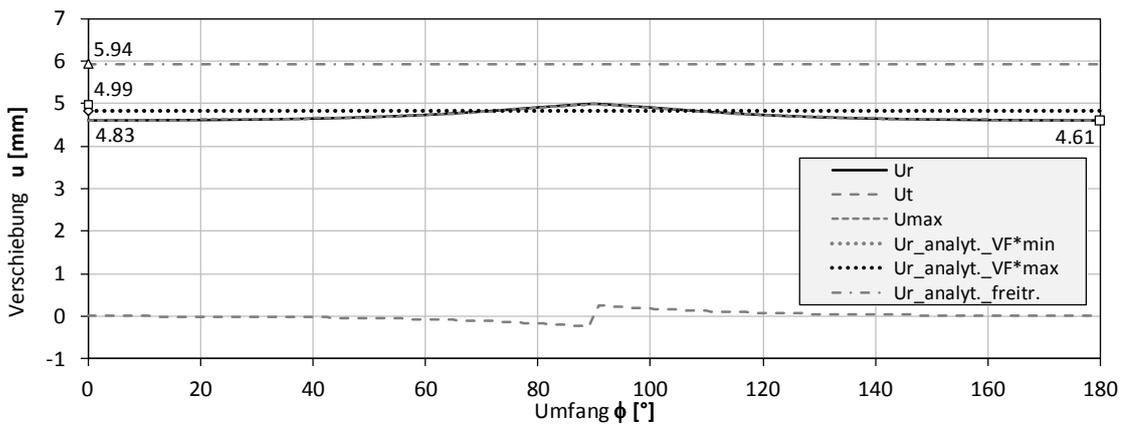


Abbildung 132: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

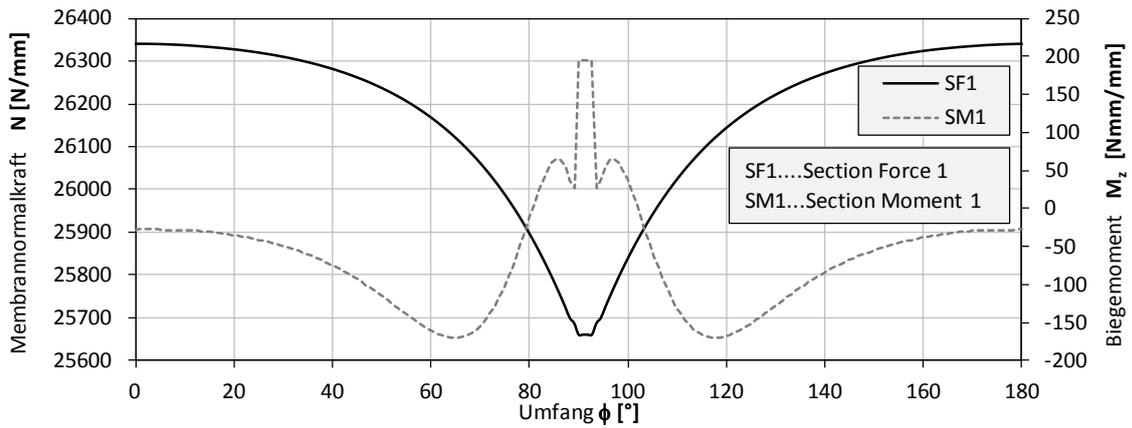


Abbildung 133: Schnittgrößen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

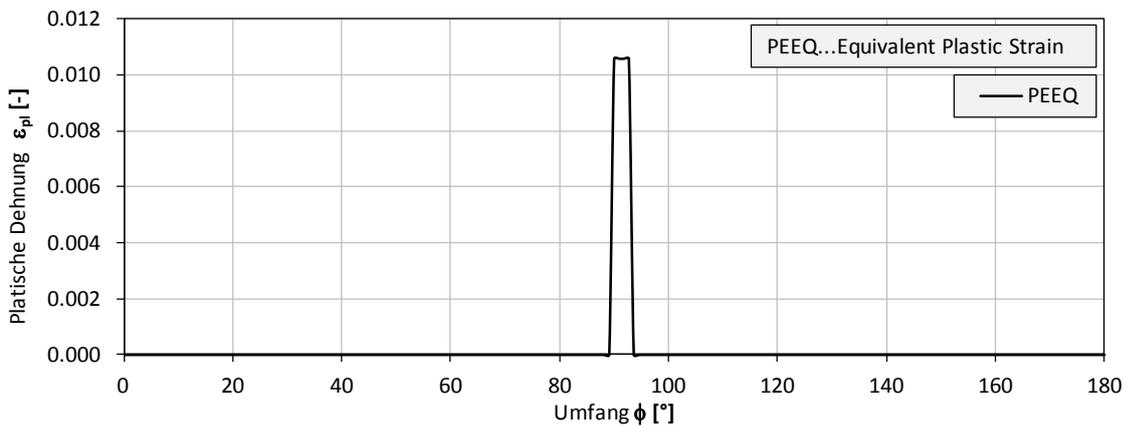


Abbildung 134: Plastische Dehnung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

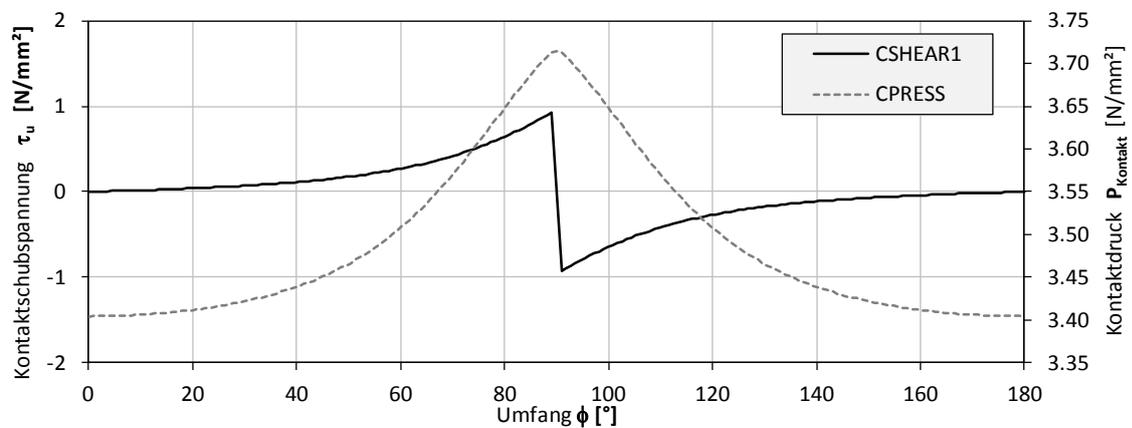


Abbildung 135: Kontaktspannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

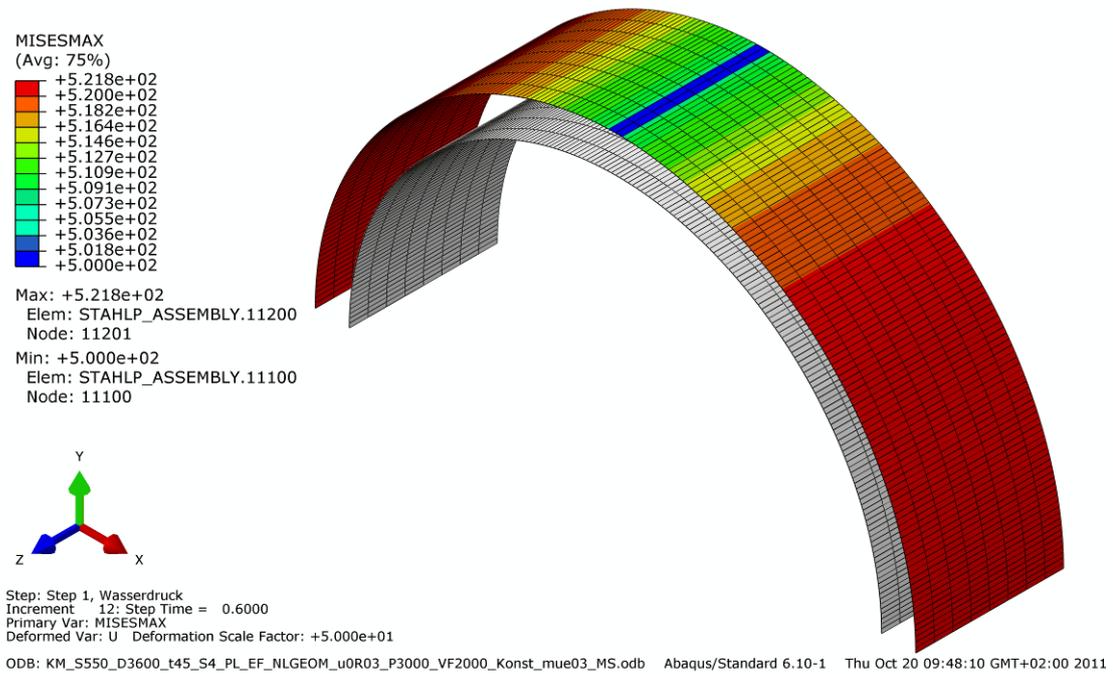


Abbildung 136: Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1800\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS

### 7.2.3 Fall: Konstante Bettung, lokale Materialstörung mit Verfestigung

Zusätzlich wird ein weiterer Fall mit teilweiser Verfestigung untersucht. Während das Grundmaterial der Panzerung weiterhin ideal plastiziert, erfährt die Störstelle eine Verfestigung.

Kennwerte:

Rohr:	$f_y=550$ [N/mm <sup>2</sup> ], Grenzdehnung=20% [-]
Störzone:	$f_y=500$ [N/mm <sup>2</sup> ], Verfestigung auf 600 [N/mm <sup>2</sup> ] bei Grenzdehnung=10% [-]
Länge der Störzone:	$b_{\text{Stör}}=56,5$ [mm] (2 Elementbreiten bei $R=1800$ [mm])

7.2.3.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

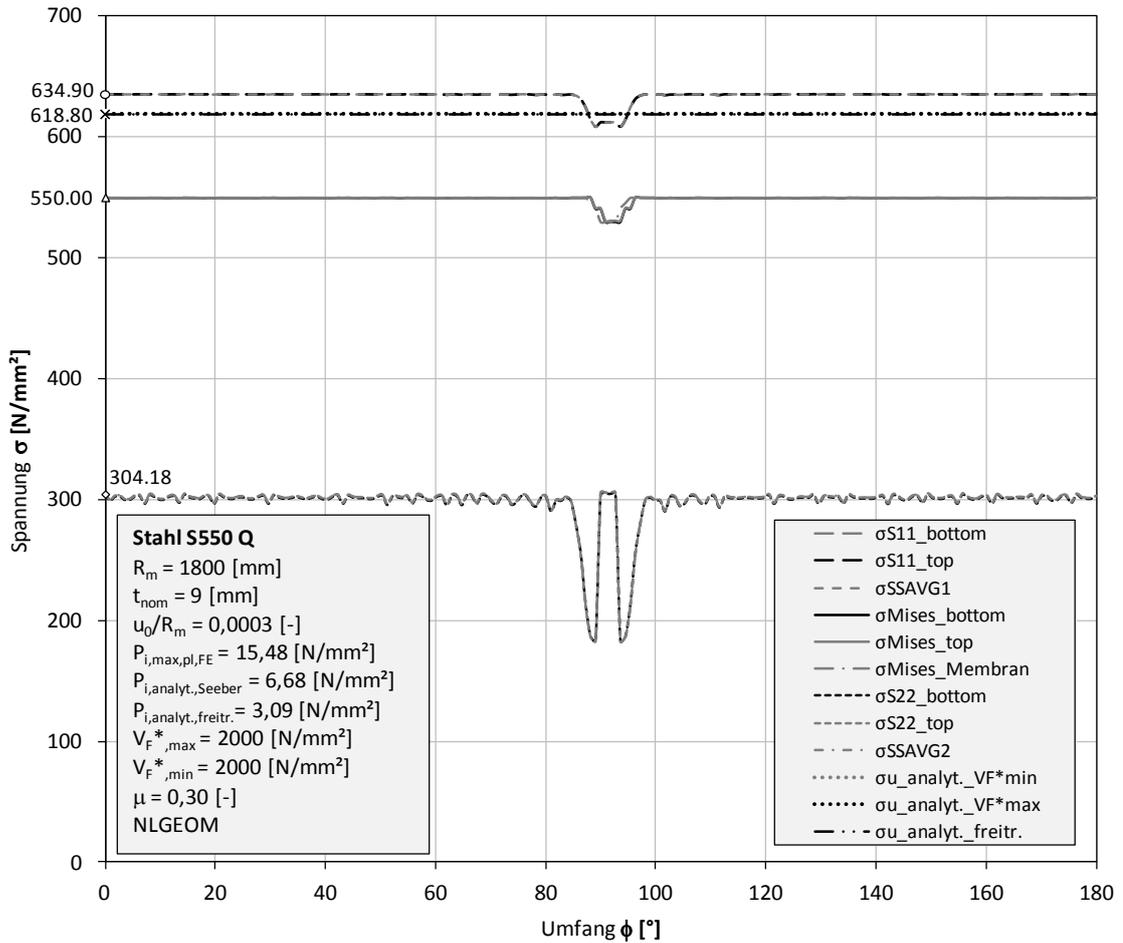


Abbildung 137: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

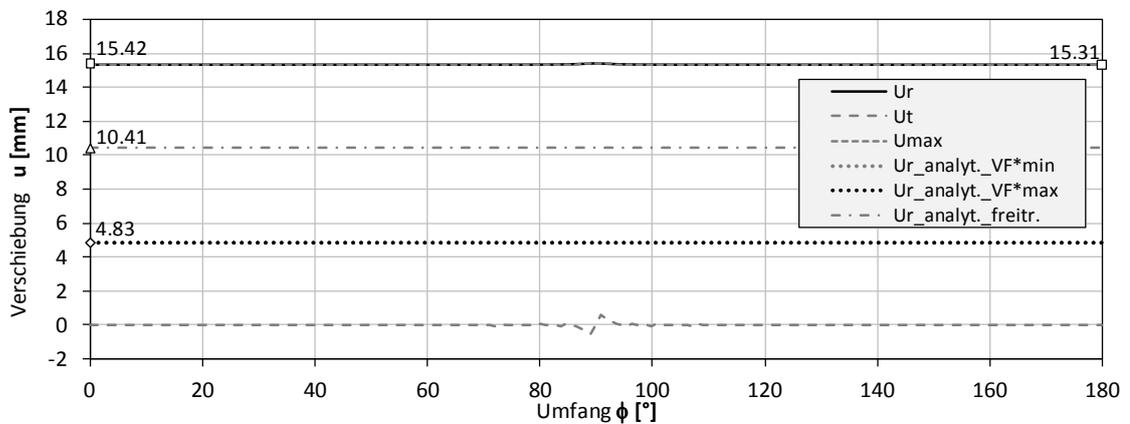


Abbildung 138: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

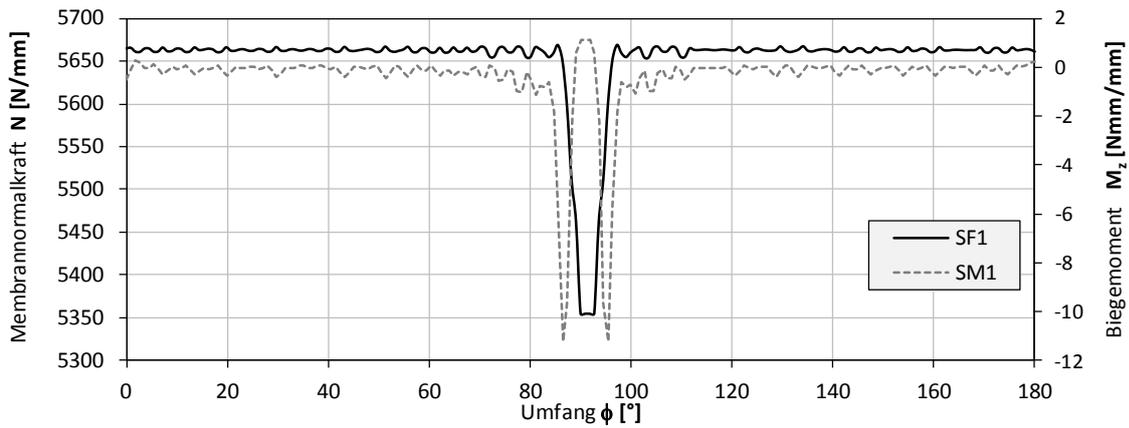


Abbildung 139: Schnittgrößen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

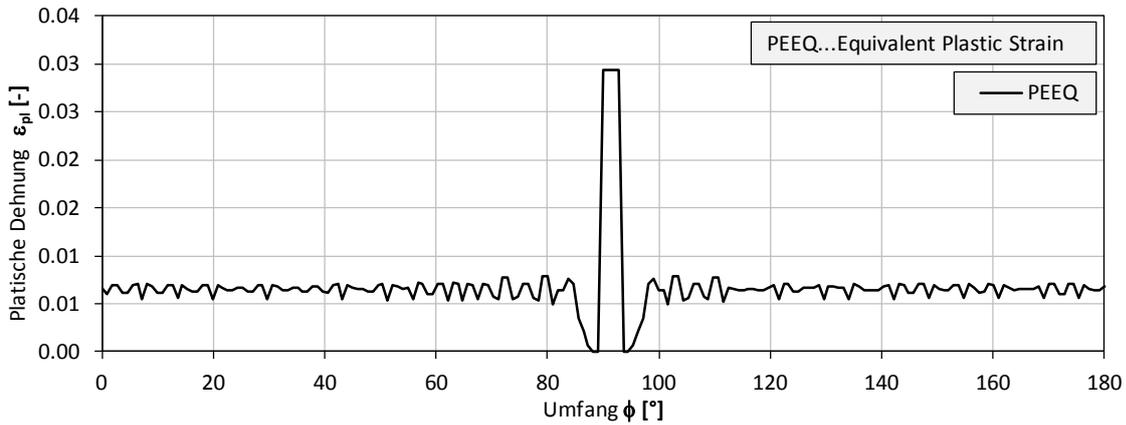


Abbildung 140: Plastische Dehnung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

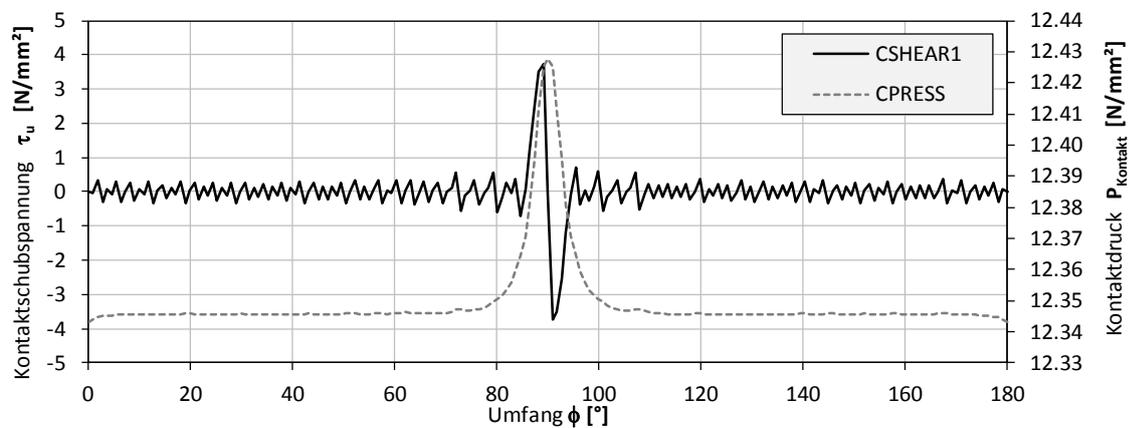


Abbildung 141: Kontaktspannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

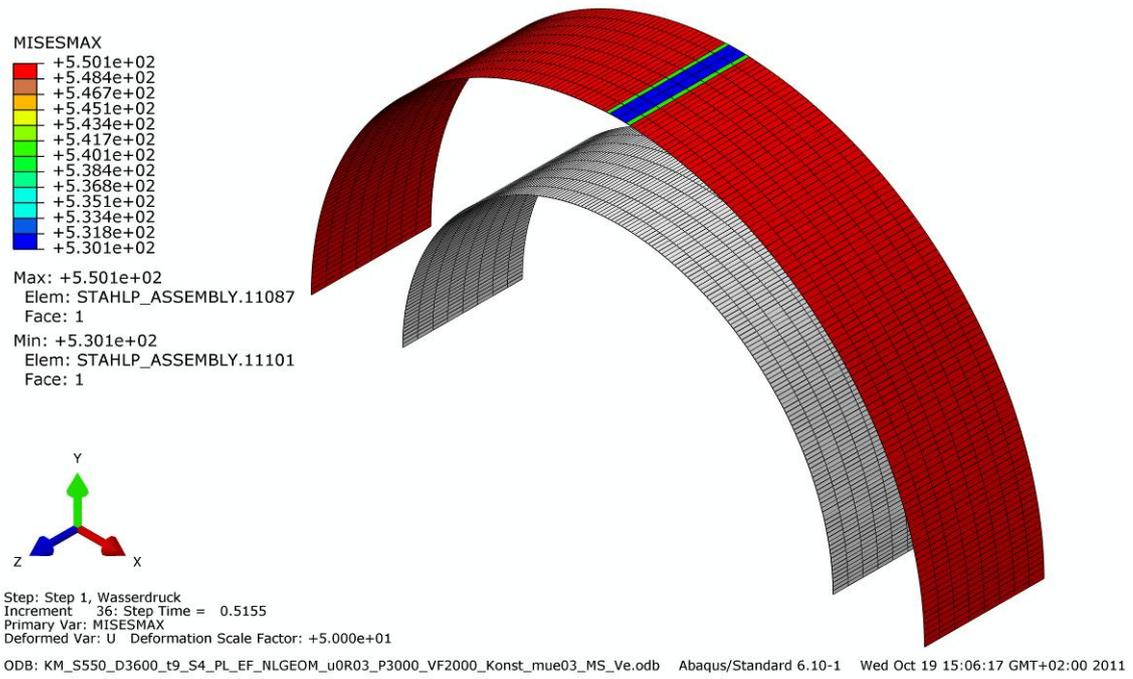


Abbildung 142: Vergleichsspannung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1548\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

## 7.2.3.2 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

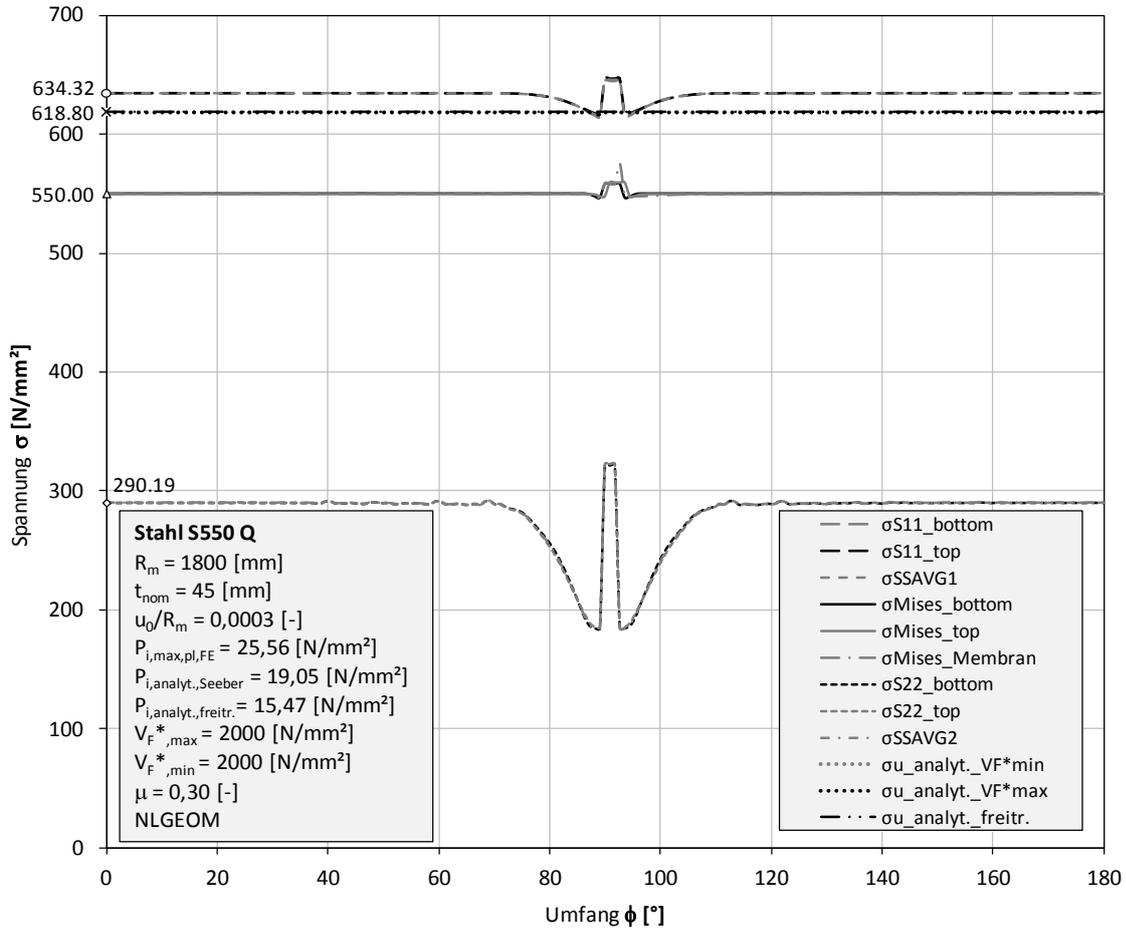


Abbildung 143: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P 2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

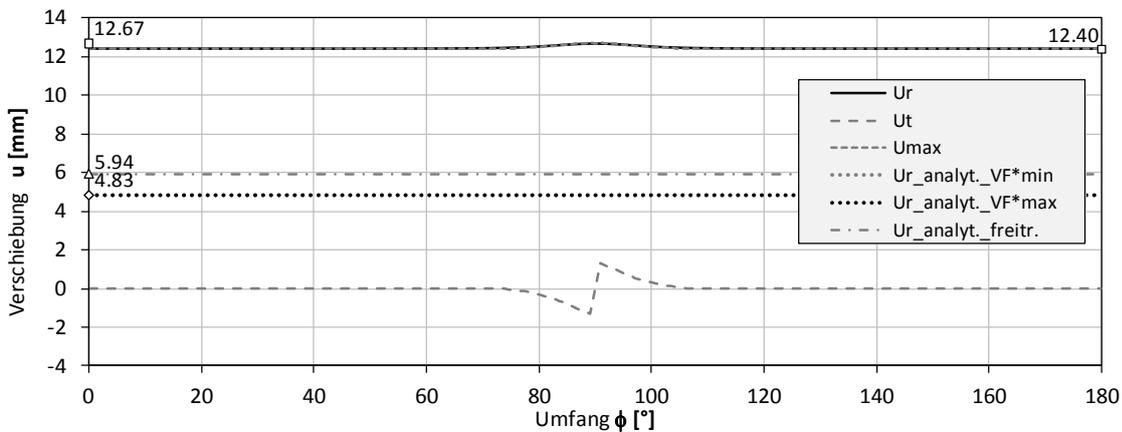


Abbildung 144: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

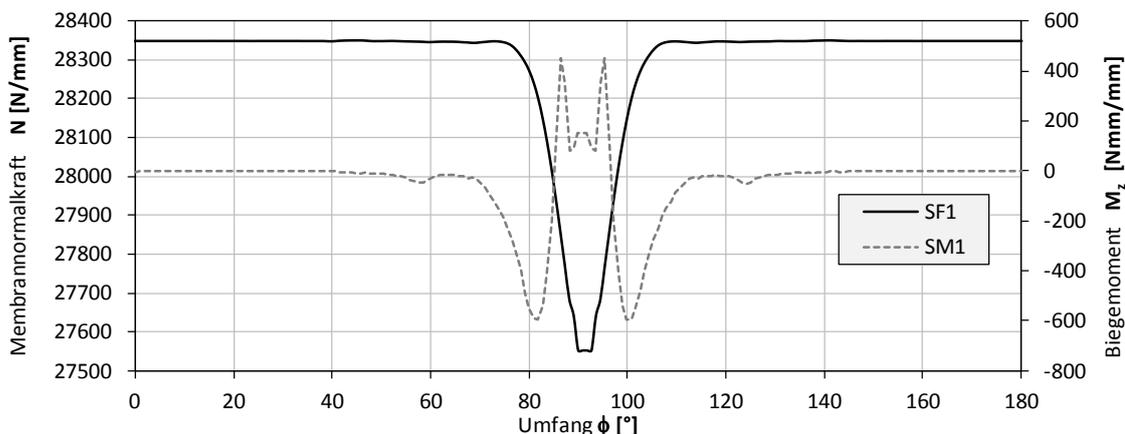


Abbildung 145: Schnittgrößen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

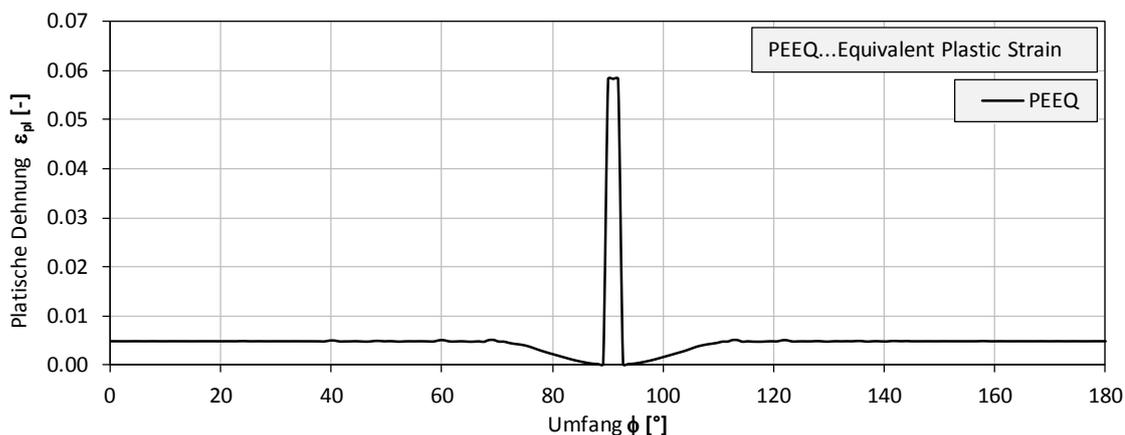


Abbildung 146: Plastische Dehnung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

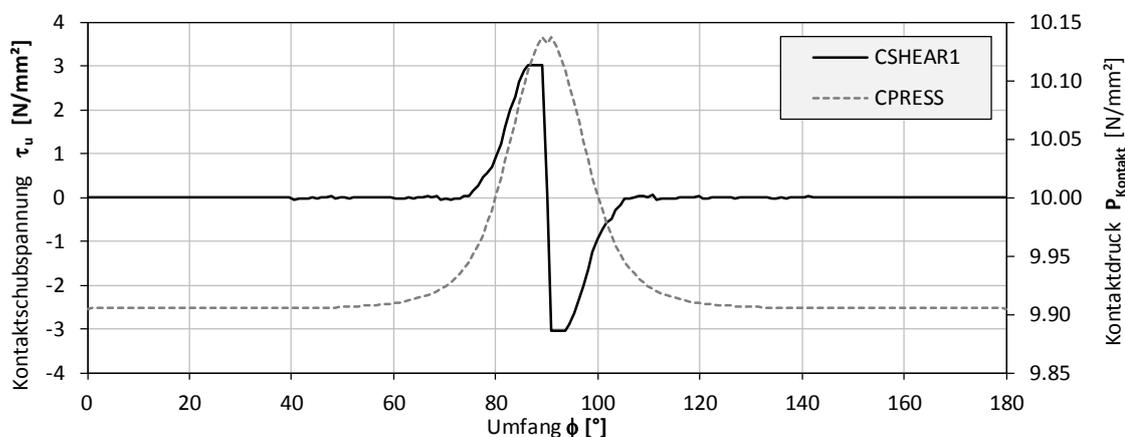


Abbildung 147: Kontaktspannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

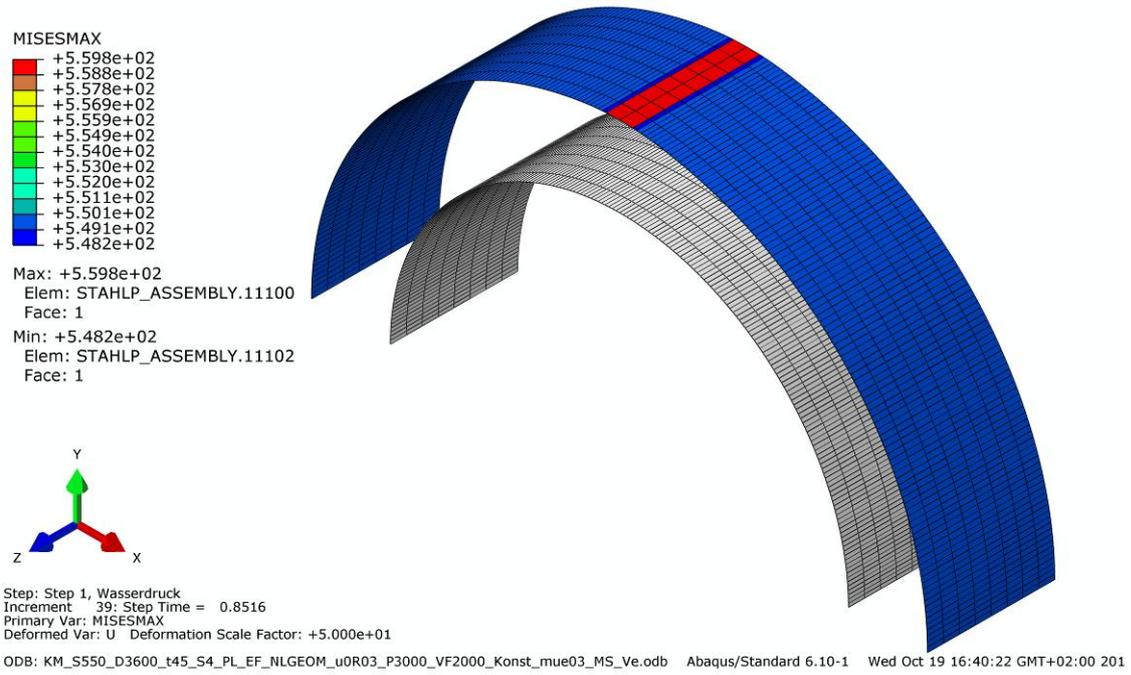


Abbildung 148: Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2556\_VF2000\_Konst\_mue03\_MS\_Ve

## 7.3 Bettungsfall: Linearer Verlauf

Die Untersuchungsergebnisse der plastischen Berechnung des Bettungsfalles „linearer Verlauf“ werden folgendermaßen dargestellt. Als erstes wird im Kapitel 7.3.1 ein repräsentatives Bemessungsbeispiel detailliert ausgewertet und die Ergebnisse dargestellt.

Im weiteren Verlauf folgt die plastische Parameterstudie in Kapitel 7.3.2.

### 7.3.1 Detailauswertung Bettungsfall: Linearer Verlauf

Bei der Detailauswertung des Bettungsfalles: Linearer Verlauf wird ein Bemessungsbeispiel mit den Reibungsbeiwerten  $\mu = 0,00$  [-],  $\mu = 0,30$  [-] und  $\mu = 0,60$  [-] plastisch ausgewertet und die Ergebnisse am jeweilig letzten Inkrement der plastischen Berechnung in Diagrammen angeführt. Die Diagramme beinhalten die Spannungs- und Verschiebungsverläufe entlang des Umfanges wie bereits aus der elastischen Auswertung bekannt. Weiteres werden auch die Schnittkräfte der Normalkraft und des Momentes in Umfangsrichtung wie auch die plastischen Dehnungen entlang des Halbschalenumfanges ausgegeben.

In den Spannungs- und Verschiebungsdiagrammen sind einerseits die Ergebnisse aus der FE-Berechnung zufolge des aus der FE-Berechnung stammenden Innendruckes abgebildet. Weiteres sind auch die maximalen analytischen Spannungen aus den beiden Bemessungskriterien Seeber und freitragendes Rohr eingetragen. Die analytischen Spannungen werden in der plastischen Parameterstudie ohne Sicherheitsfaktoren  $k_s$  und  $k_f$  unter Berücksichtigung des ebenen Formänderungszustandes im elastischen Zustand angegeben.

Die maximale Umfangsspannung im elastischen Zustand ergibt sich somit zu:

Stahl S550Q:

$$\sigma_{u,max,el} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,3^2 - 1 * 0,3}} * f_y = 1,125 * 550 = 618,75 \quad [N/mm^2]$$

Aus dieser Grenzspannung errechnet sich der in den Diagrammen eingetragene maximale analytische Innendruck nach Seeber und der des freitragenden Kriteriums.

7.3.1.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

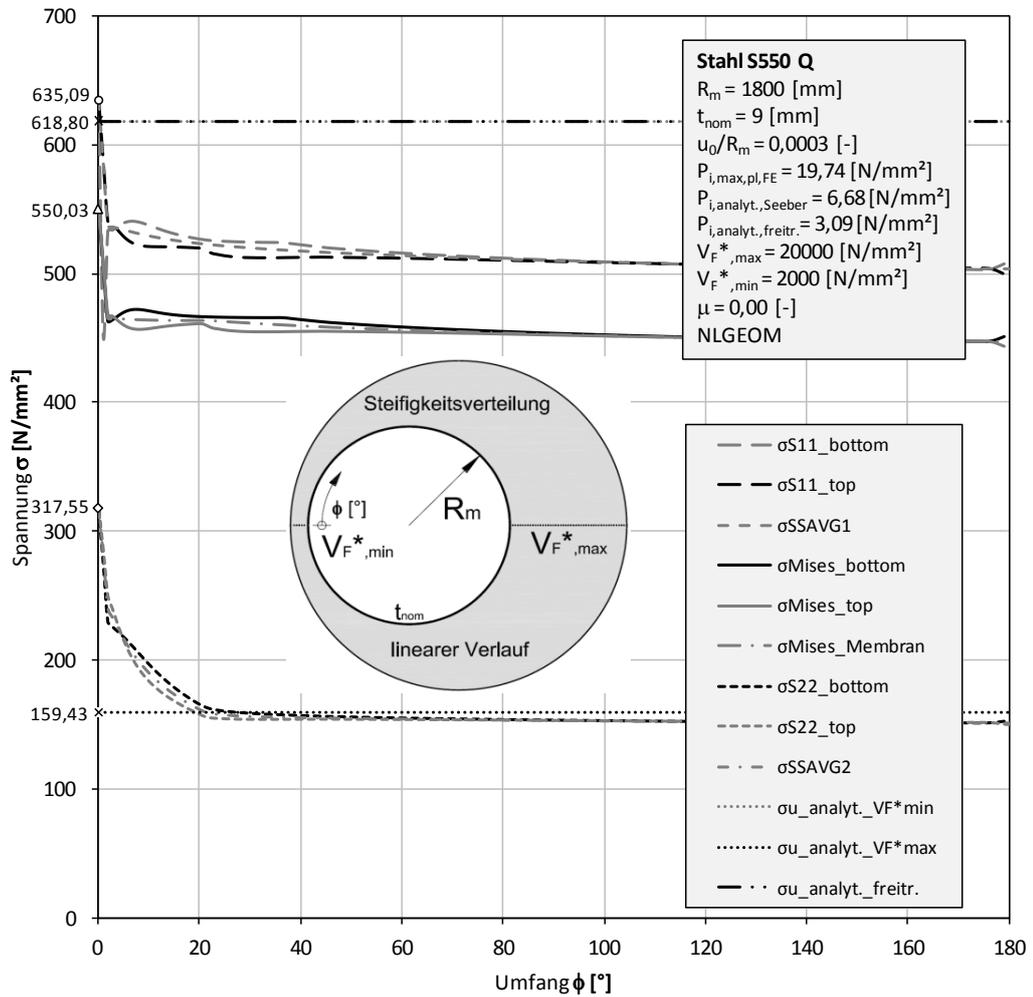


Abbildung 149: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

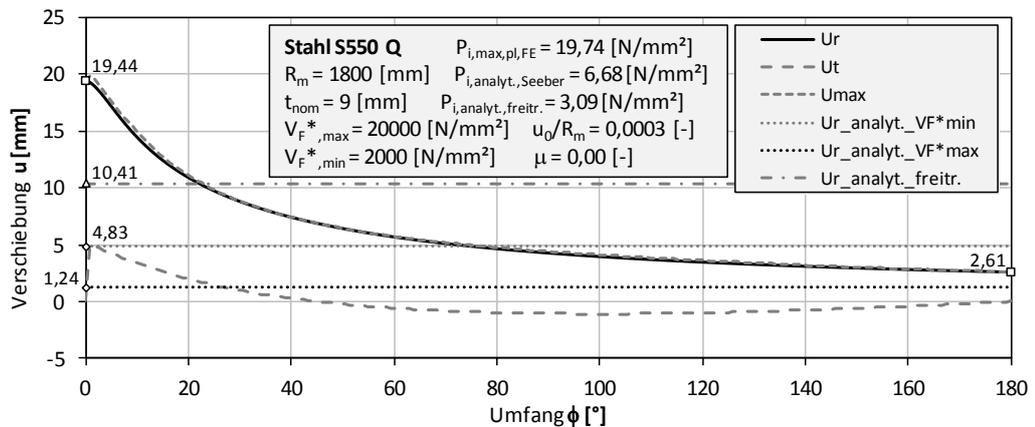


Abbildung 150: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

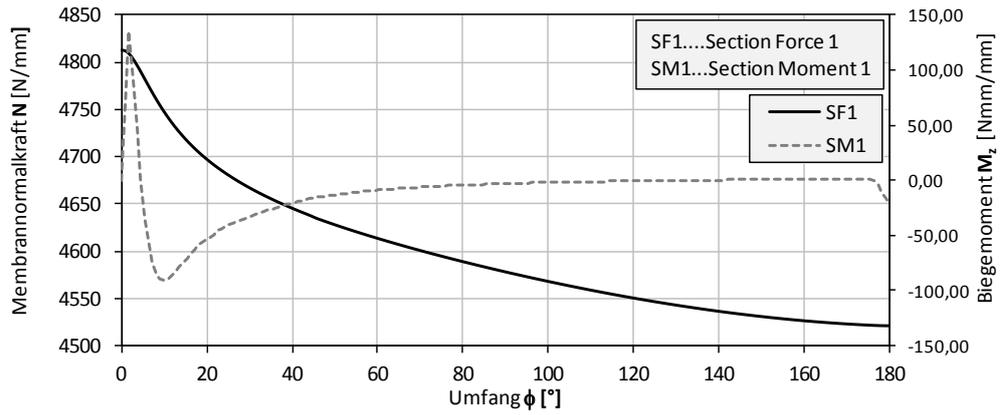


Abbildung 151: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

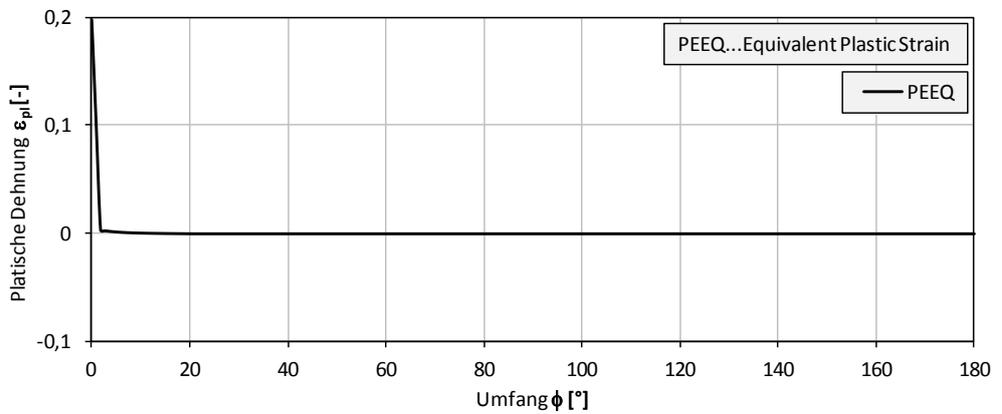


Abbildung 152: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

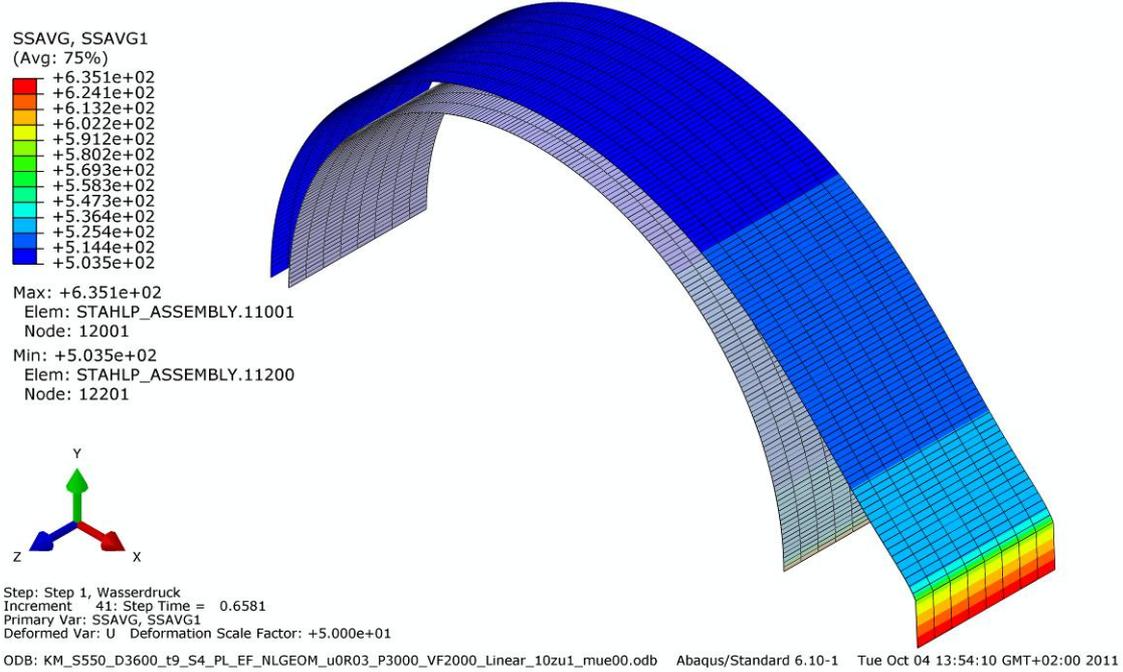


Abbildung 153: Umfangsmembranspannung SSAVG  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

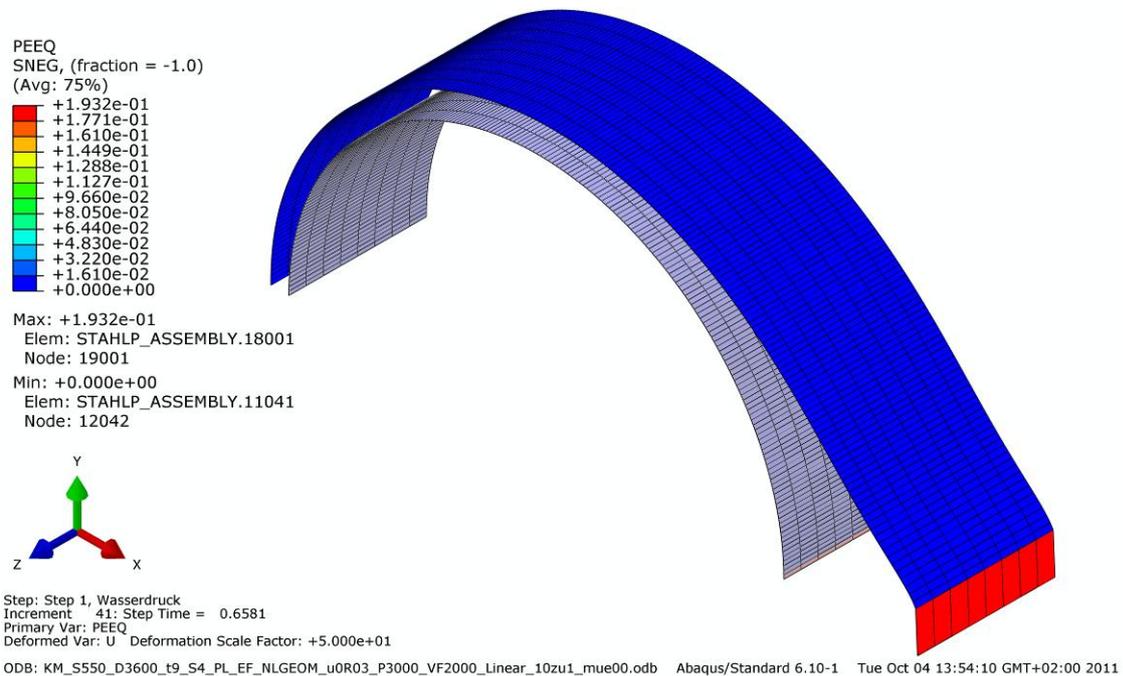


Abbildung 154: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.3.1.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1974\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

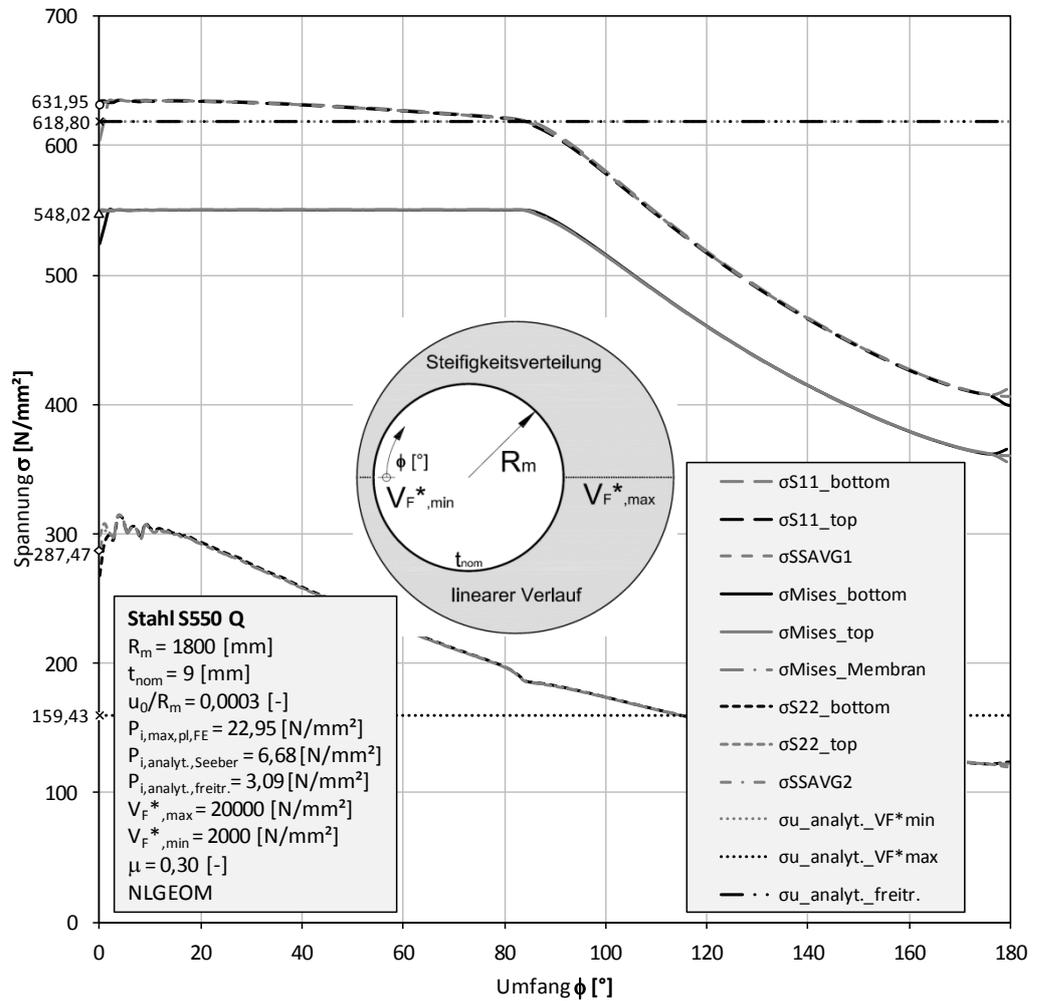


Abbildung 155: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2295\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

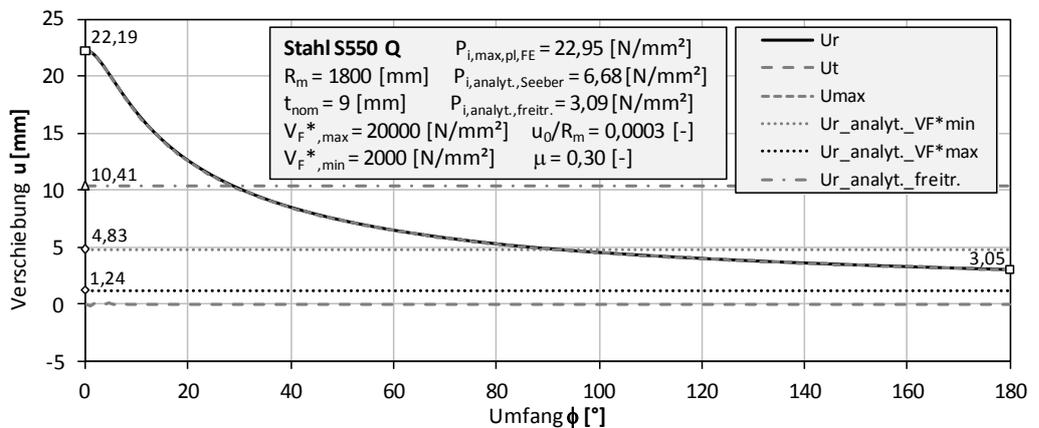


Abbildung 156: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2295\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

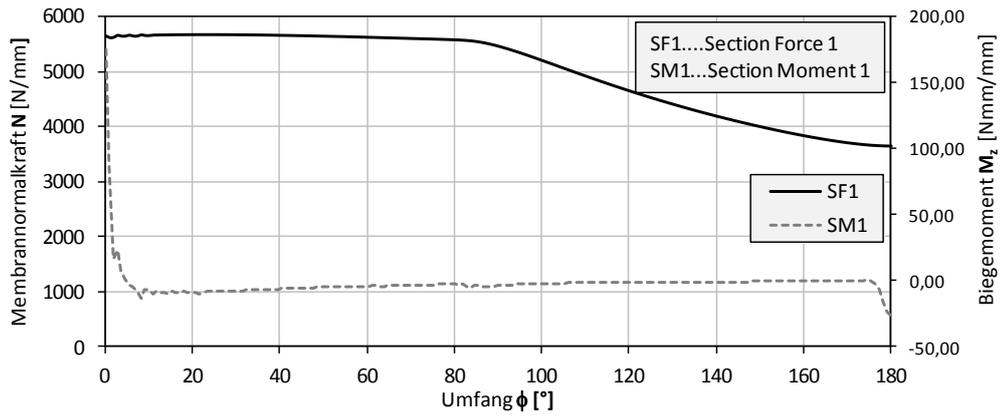


Abbildung 157: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2295\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

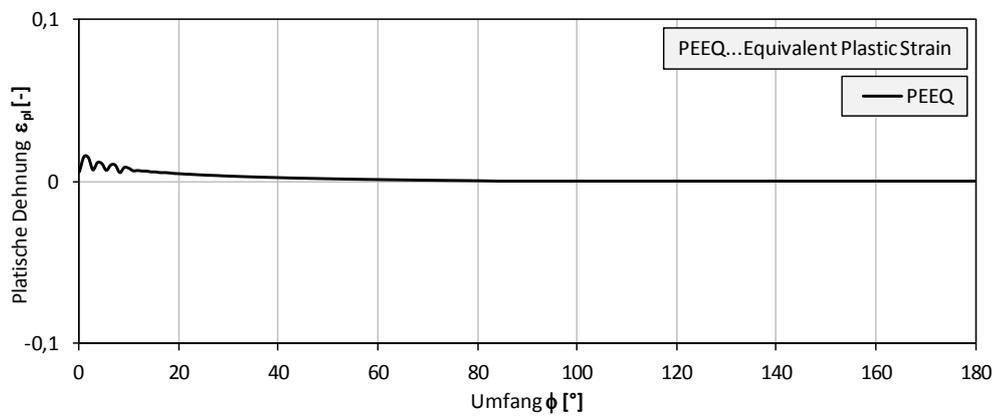


Abbildung 158: Plastischen Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2295\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

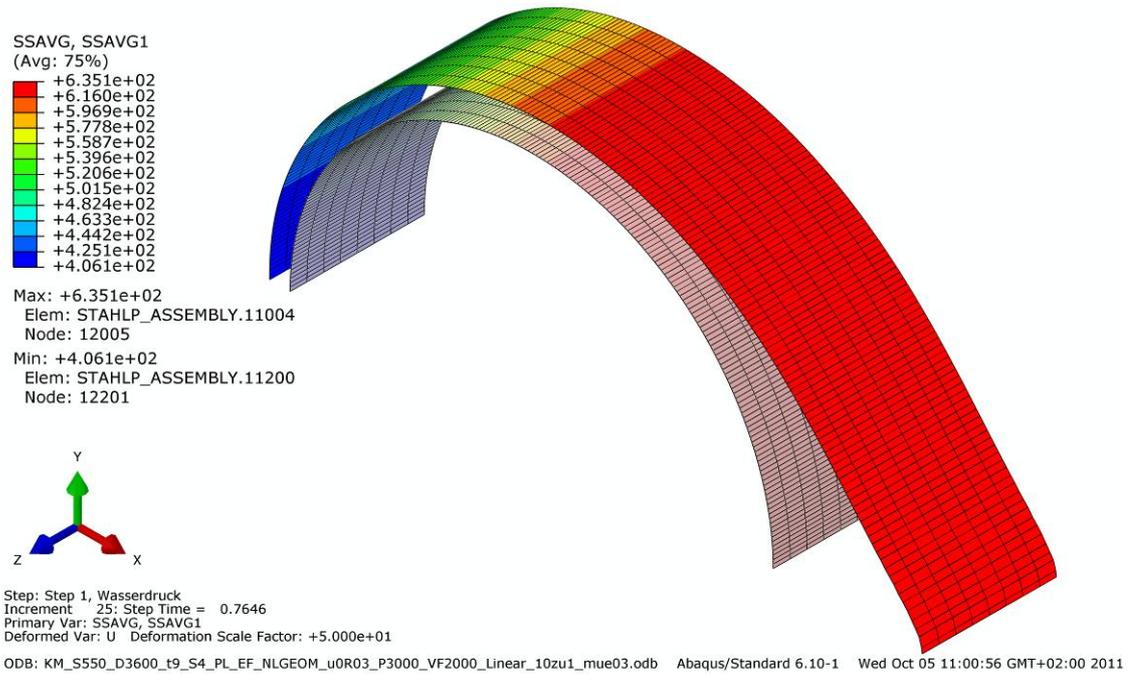


Abbildung 159: Umfangsmembranspannung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

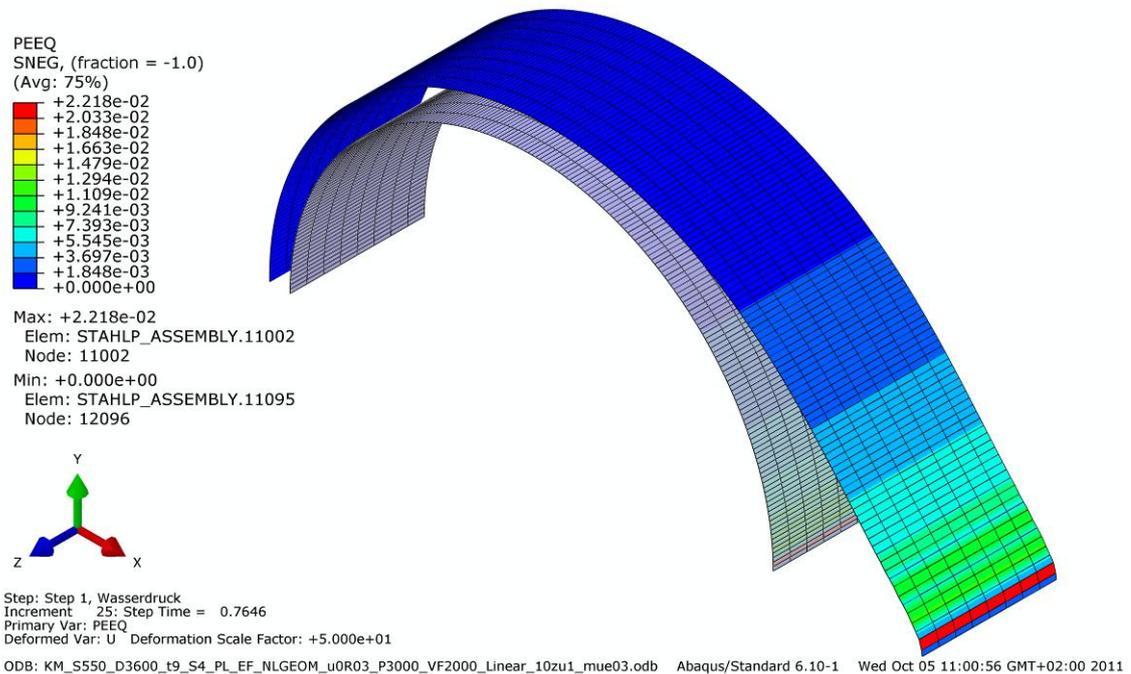


Abbildung 160: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

## 7.3.1.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2979\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

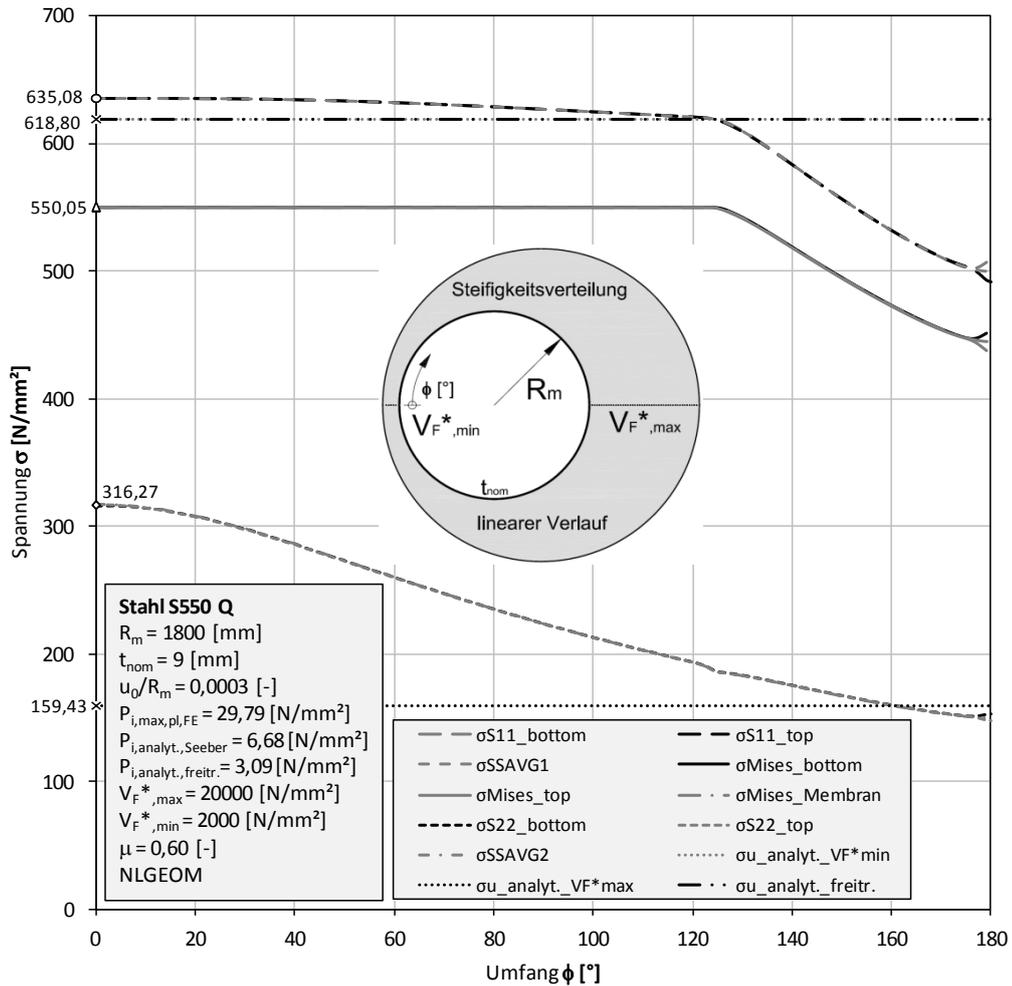


Abbildung 161: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2979\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

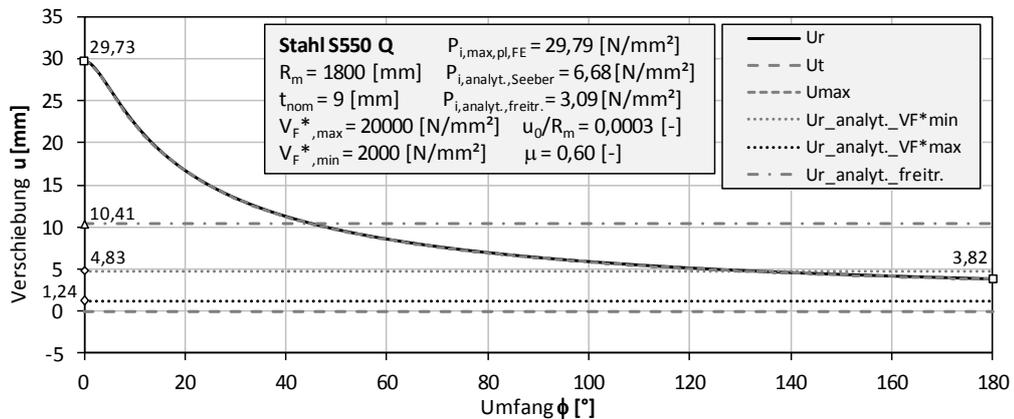


Abbildung 162: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2979\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

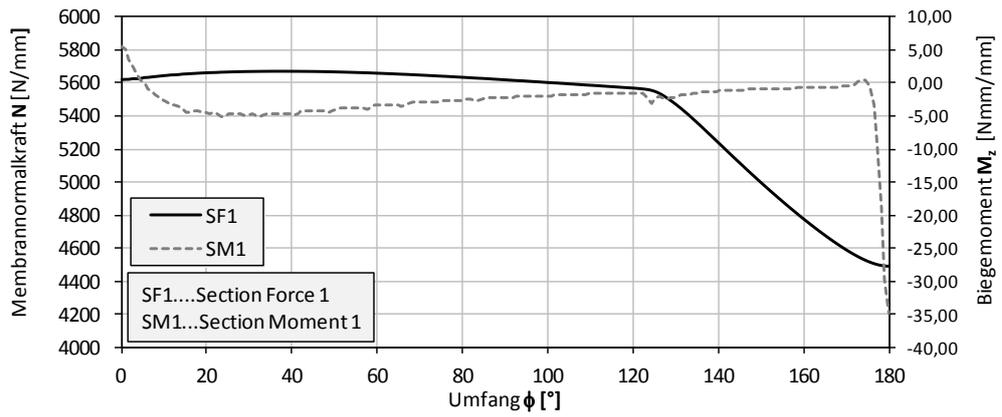


Abbildung 163: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2979\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

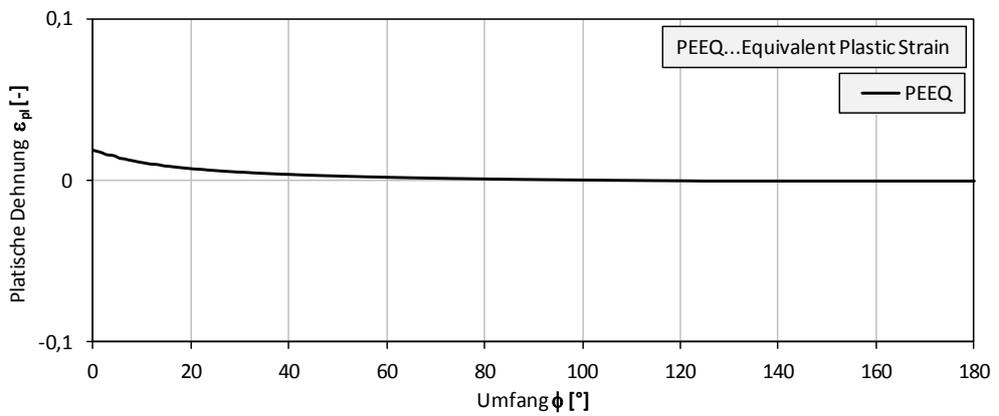


Abbildung 164: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2979\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

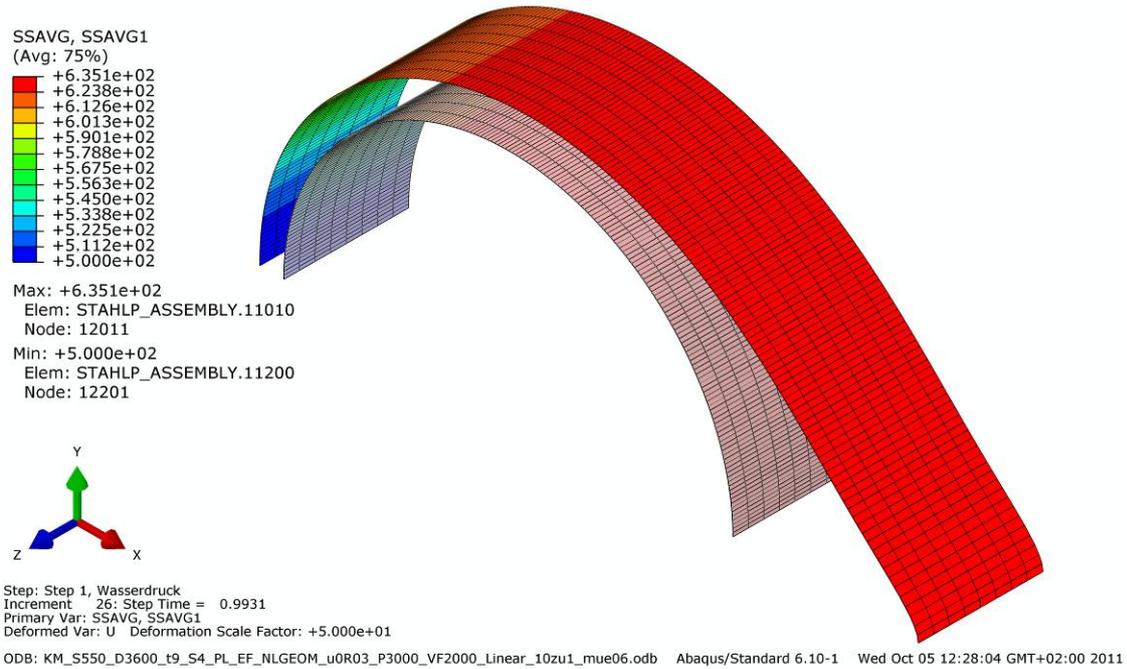


Abbildung 165: Umfangsmembranspannung SSAVG1  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

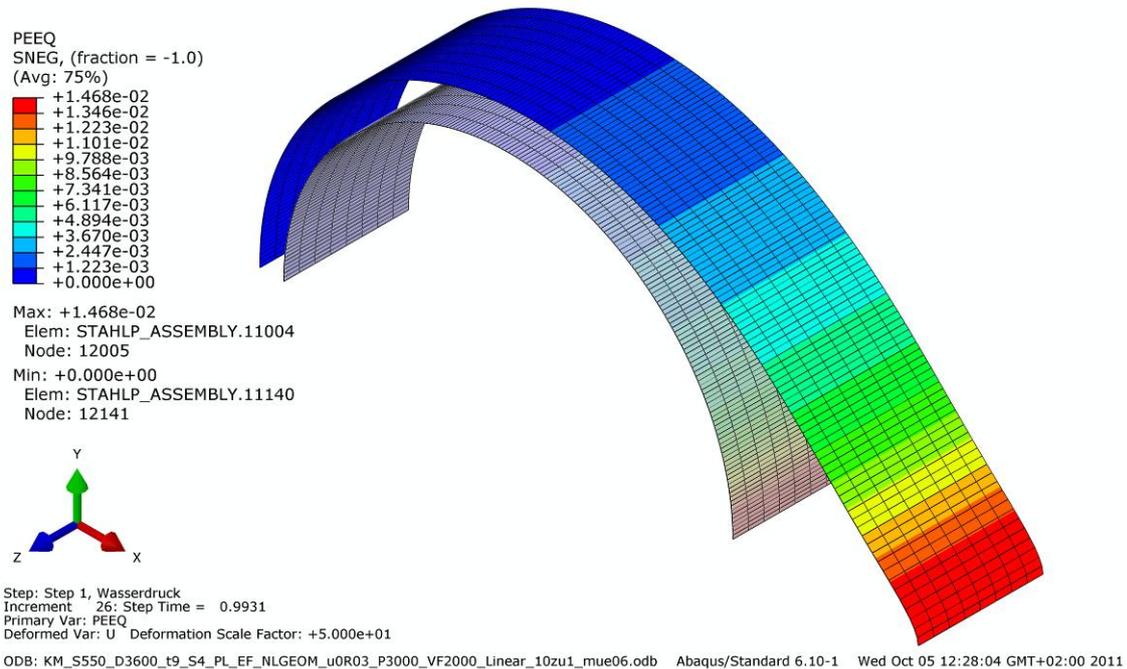


Abbildung 166: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

### 7.3.2 Parameterstudie Bettungsfall: Linearer Verlauf

Die Parameterstudie erfolgt wie in Tabelle 14 dargestellt an den folgenden 18 Bemessungsfällen.

Tabelle 14: Übersicht Auswertungsfälle

<i>Parameterstudie Bettungsfall: Linearer Verlauf</i>				
D=3600		$u_0/R_m = 0.0003 [-]$		[mm]/[-]
$R_m/t = 200, t = 9$	$V_F^* = 1000$	$V_F^* = 2000$	$V_F^* = 4000$	$[-]/[mm]/[N/mm^2]$
$\mu = 0.00$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.30$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.60$	✓	✓	✓	[-]
$R_m/t = 40, t = 45$	$V_F^* = 1000$	$V_F^* = 2000$	$V_F^* = 4000$	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu = 0.00$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.30$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.60$	✓	✓	✓	[-]

Jeder Bemessungsfall der Parameterstudie wird folgendermaßen ausgewertet. Im ersten Diagramm wird die maximale Membranspannung in Umfangs- wie auch in Rohrlängsrichtung in Abhängigkeit der Steigerung des Gesamtinnendruckes (Laststeigerungsfaktor) aufgetragen. Die Ausgabe erfolgt jeweils am maßgebenden Element (Maximalwert). Die Position des maßgebenden Elementes ist aus den Diagrammen nicht direkt ersichtlich und wird durch die der Berechnung zugehörigen FE-Plots veranschaulicht. Es sei zu erwähnen, dass die Position des maßgebenden Elementes während der Laststeigerung der plastischen Berechnung variieren kann. Das dargestellte maßgebende Element der Berechnung muss nicht während des ganzen laststeigernden Berechnungsverlaufes zwingend maßgebend sein.

Der Knick im linken Bereich des Diagrammes zeigt das Ende der Initialspaltüberbrückung mit alleiniger Wirkung der Stahlpanzerung, und den Beginn der Verbundwirkung nach Kontakt.

Auch die Steigerung der Längsspannung durch Zwang (ebener Formänderungszustand) beim Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich lässt sich gut erkennen. Während die Spannungsumlagerung im elastischen Zustand noch 30% der Umfangsspannung beträgt, pendelt sich der Wert nach Fließbeginn allmählich bei 50% ein.

$$\sigma_x = 0,3 * \sigma_u \quad \dots \text{elastischer Bereich}$$

$$\sigma_x = 0,5 * \sigma_u \quad \dots \text{plastischer Bereich}$$

Das zweite Ergebnisdiagramm stellt die Innendruckanteile in Abhängigkeit der maximalen plastischen Dehnungen dar. Der Gesamtinnendruck ergibt sich mit dem Laststeigerungsfaktor direkt aus der FE-Berechnung. Der maximale Stahlanteil vom Innendruck am maßgebenden Element wird durch die Kontaktspannung zwischen der Stahlpanzerung und der rigid surface, mit welcher die Stahlpanzerung durch die Interaktionsbedingung verbunden ist und welche den umliegenden Gebirgsmantel simuliert, rückgerechnet.

Die Ergebnisausgabe im unteren Diagramm ist mit maximal 5% plastischer Dehnung am maßgebenden Element abgegrenzt.

Alle Ergebnisse, so wie auch die maximale plastische Dehnung, werden wie oben beschrieben am maßgebenden Element ausgegeben und deren Position ist den FE-Plots zu entnehmen.

Die FE-Plots wurden aus veranschaulichenden Gründen des Verhaltens der Panzerung unter Laststeigerung nicht immer am letzten Inkrement der Berechnung ausgegeben.



### 7.3.2.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

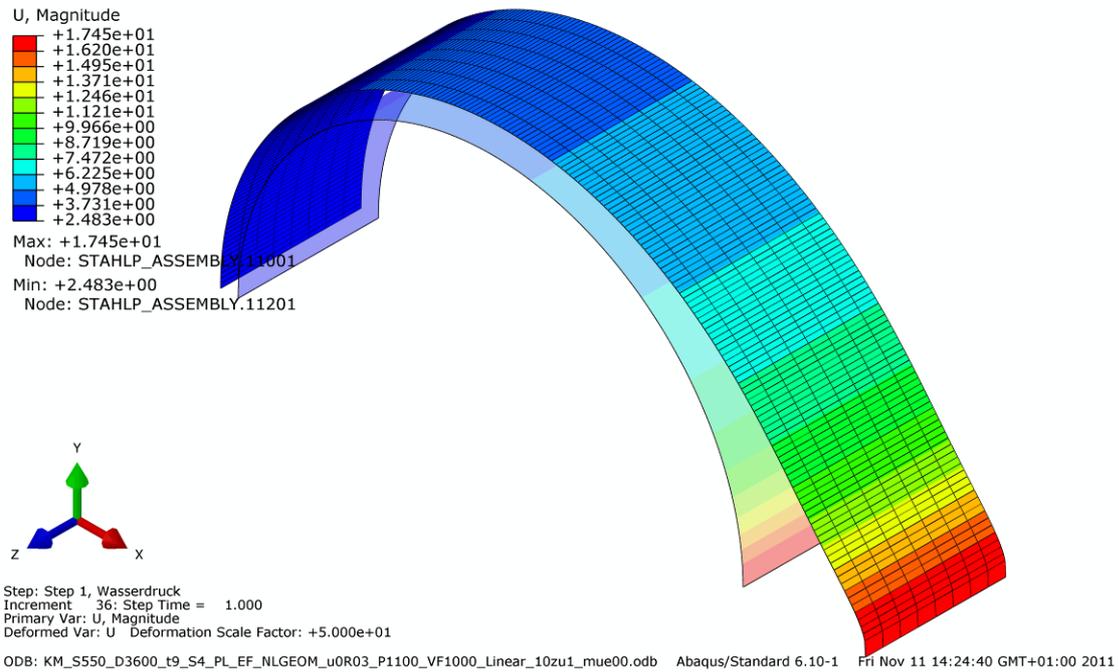


Abbildung 167: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

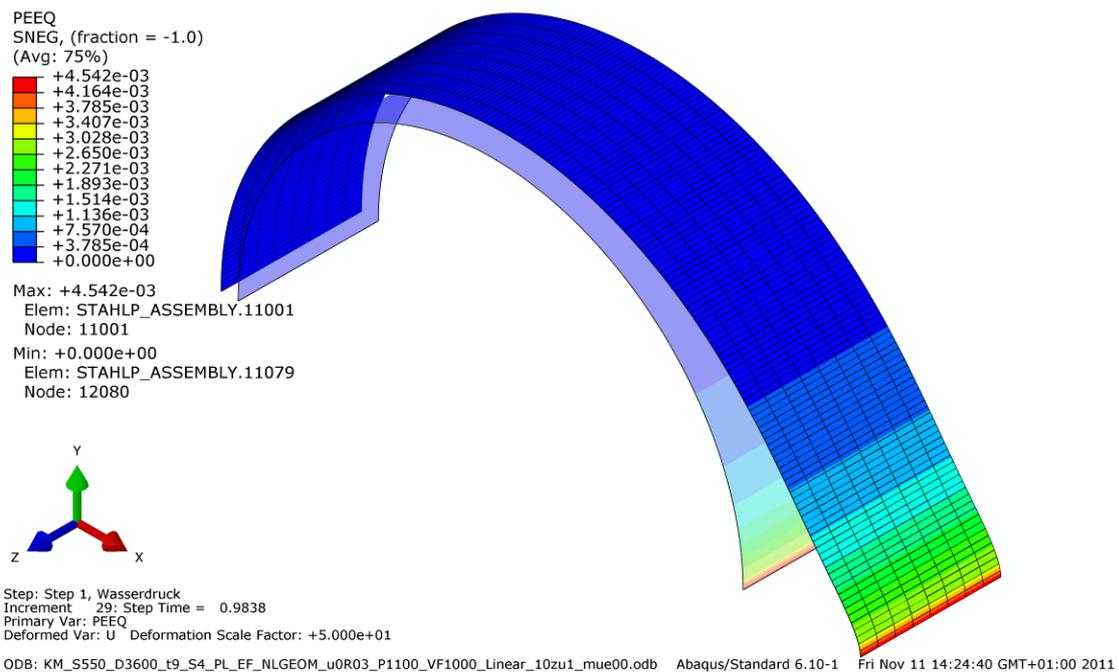


Abbildung 168: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

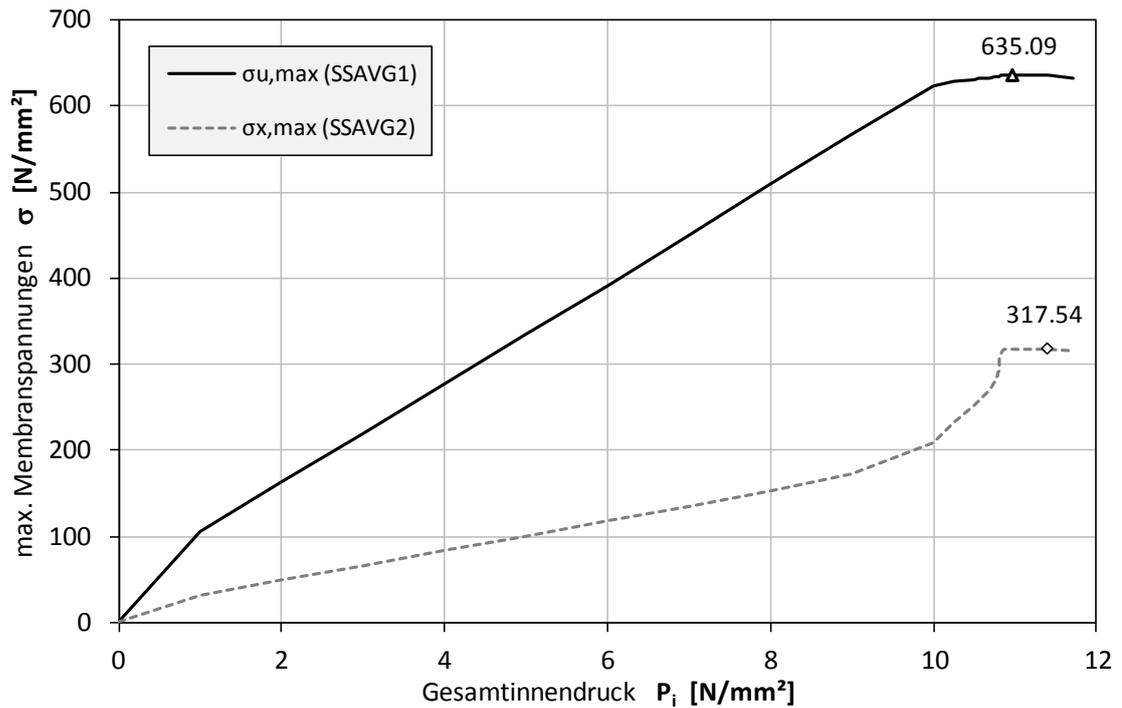


Abbildung 169: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

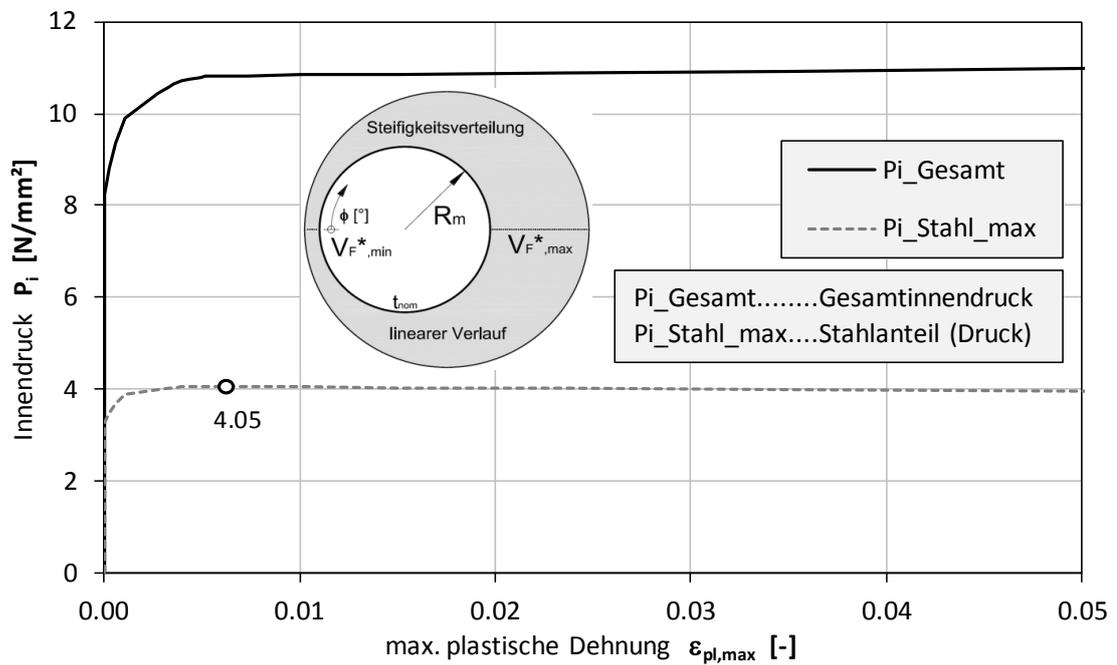


Abbildung 170: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

### 7.3.2.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

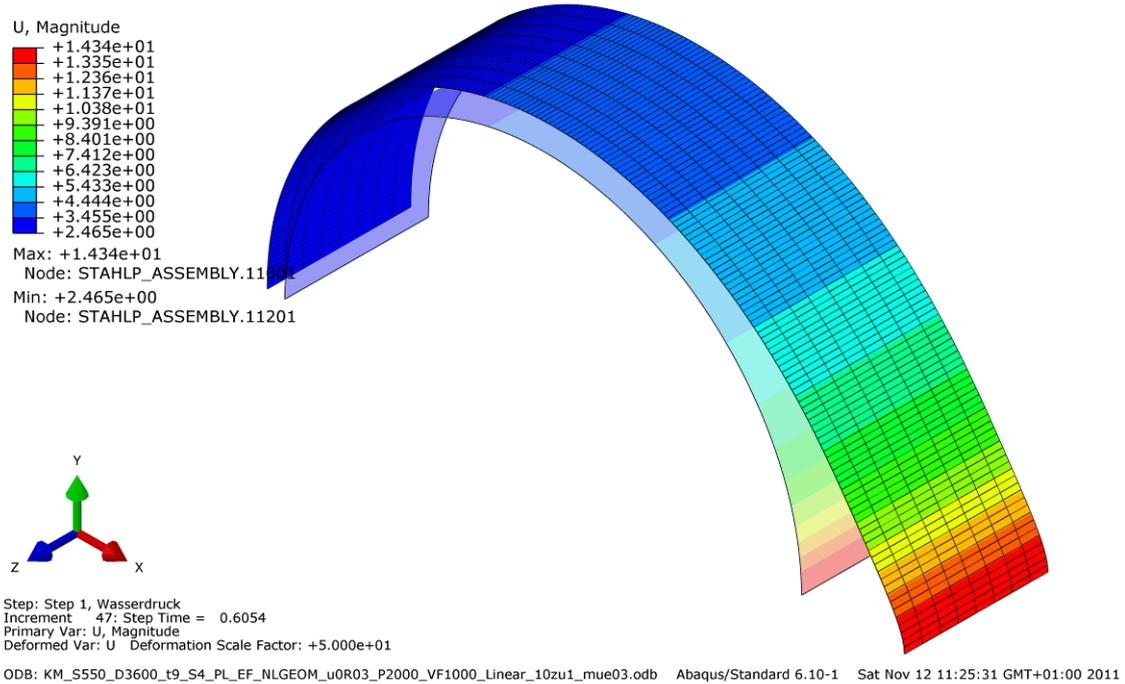


Abbildung 171: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

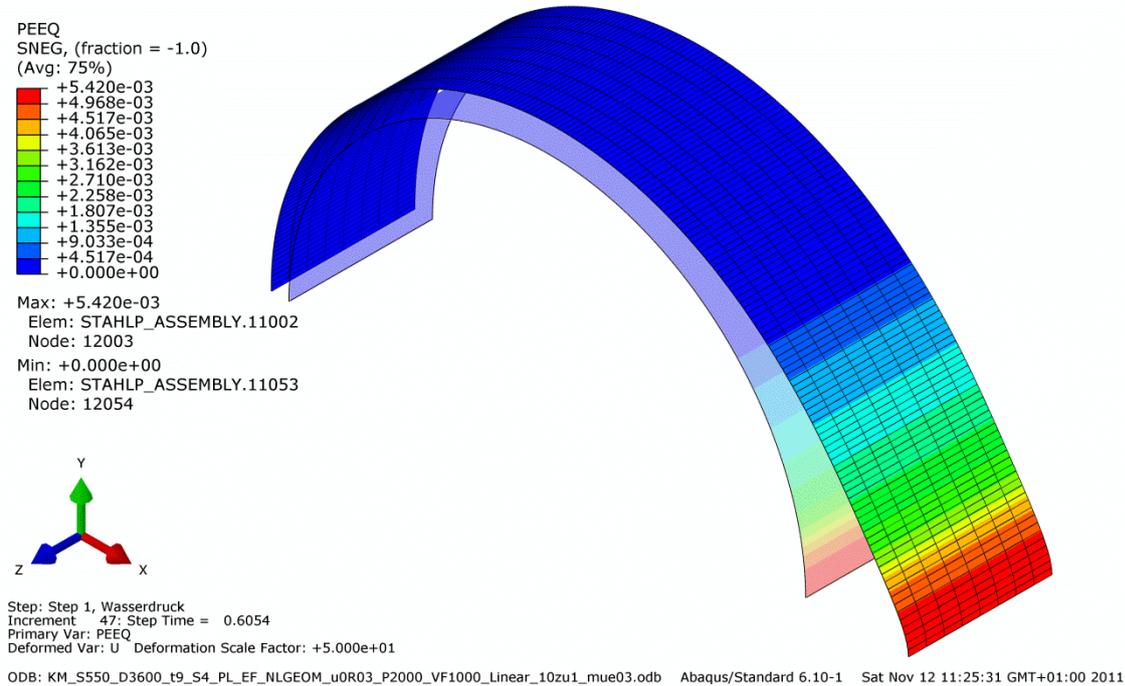


Abbildung 172: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

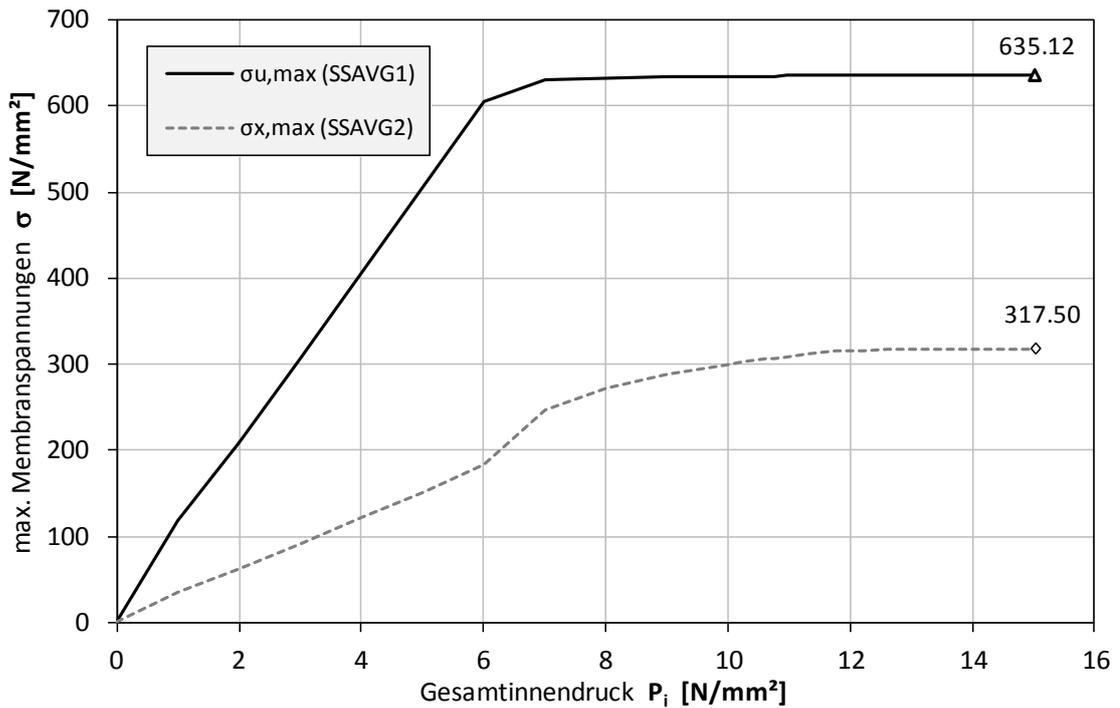


Abbildung 173: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

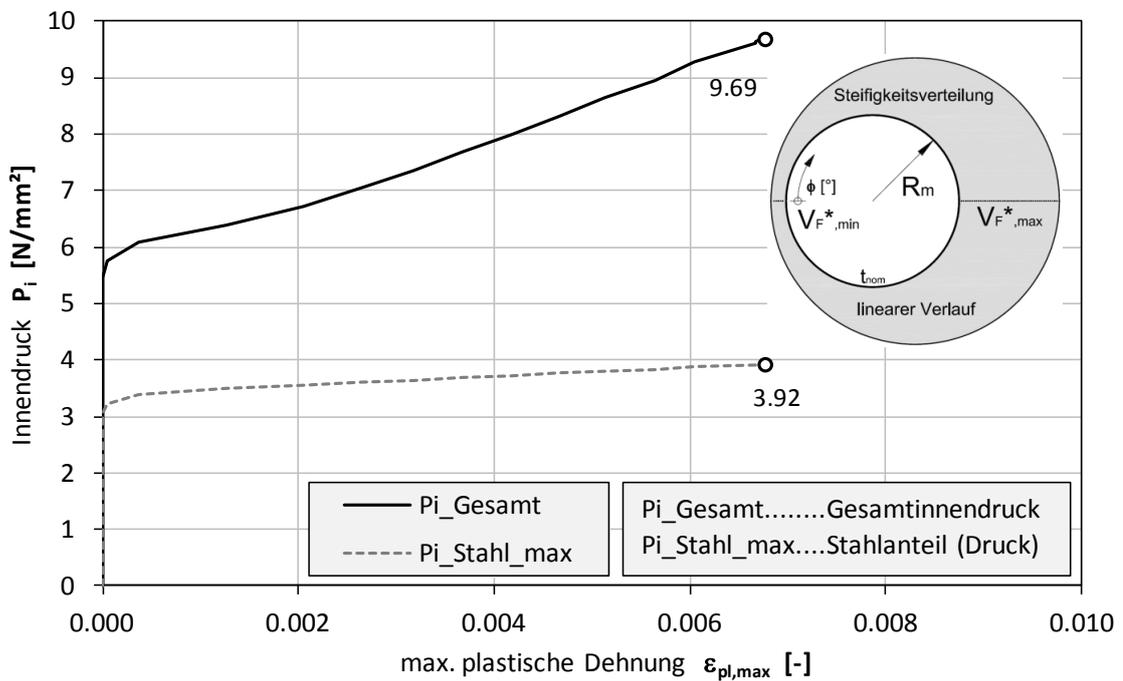


Abbildung 174: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

### 7.3.2.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

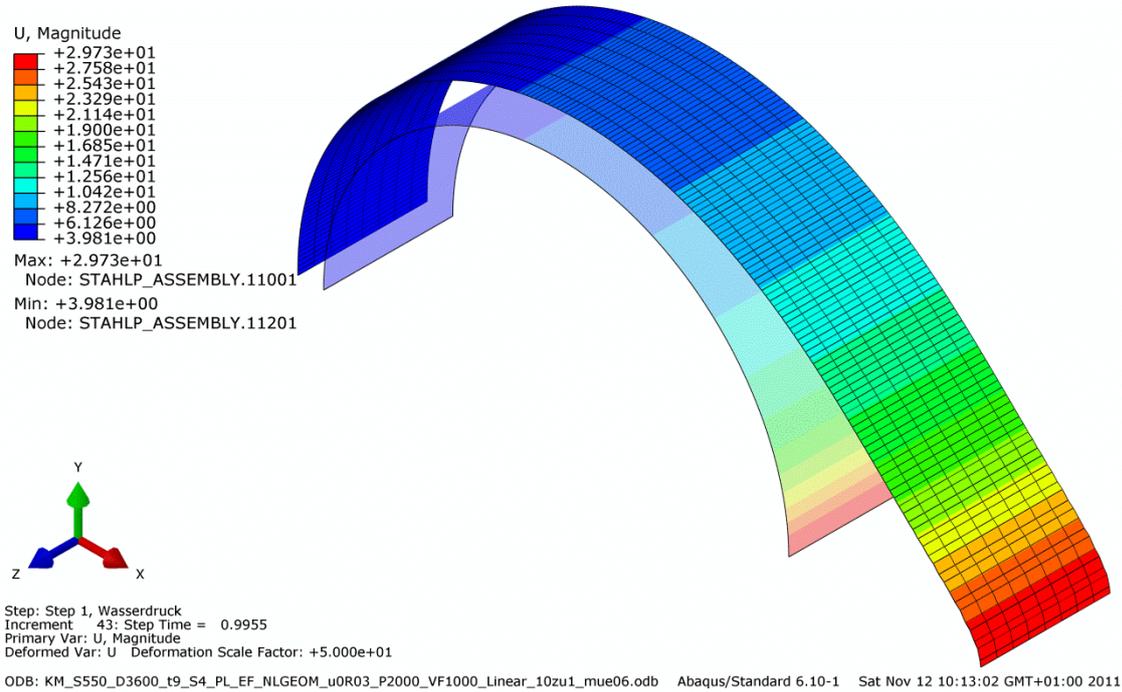


Abbildung 175: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

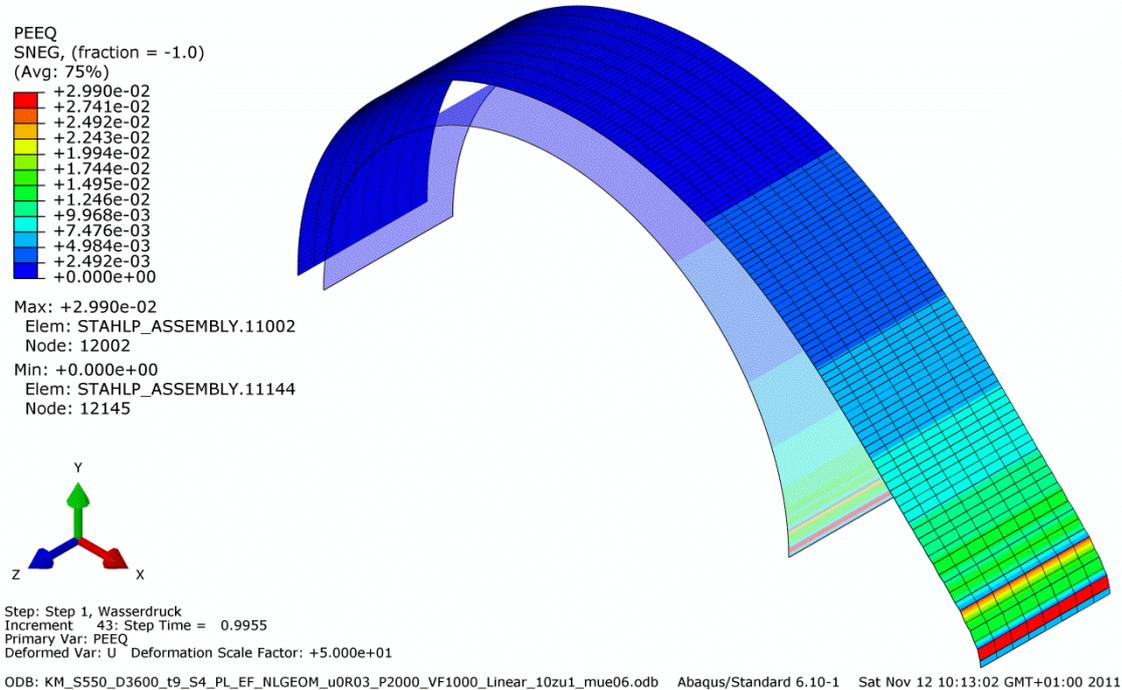


Abbildung 176: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

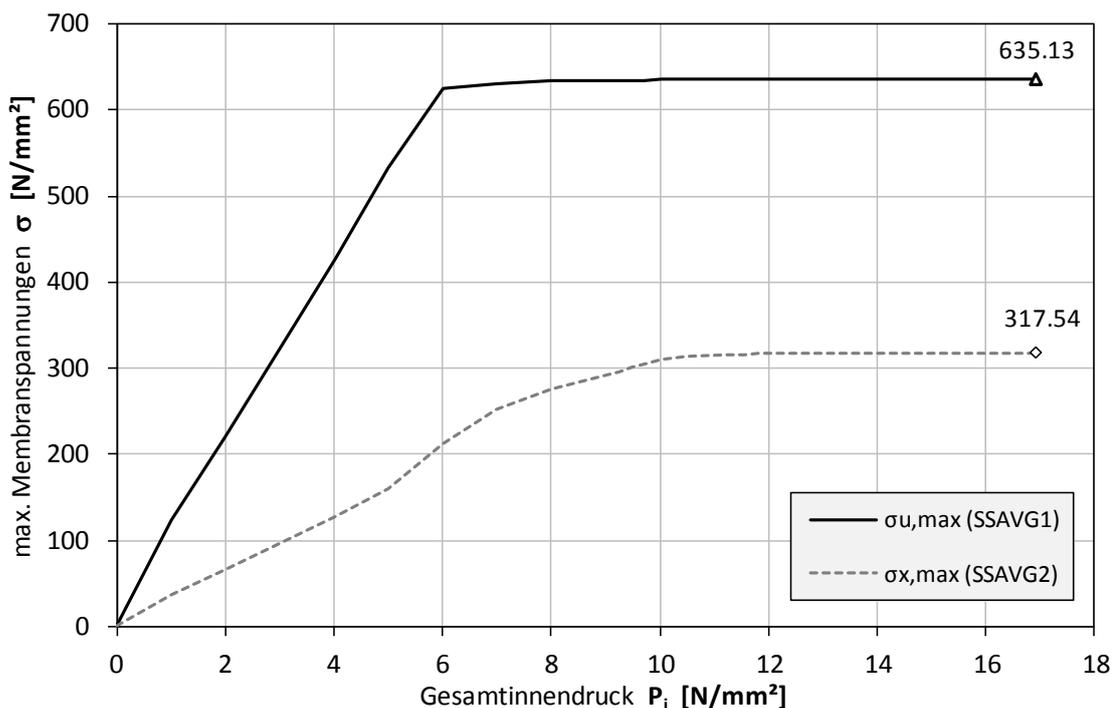


Abbildung 177: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

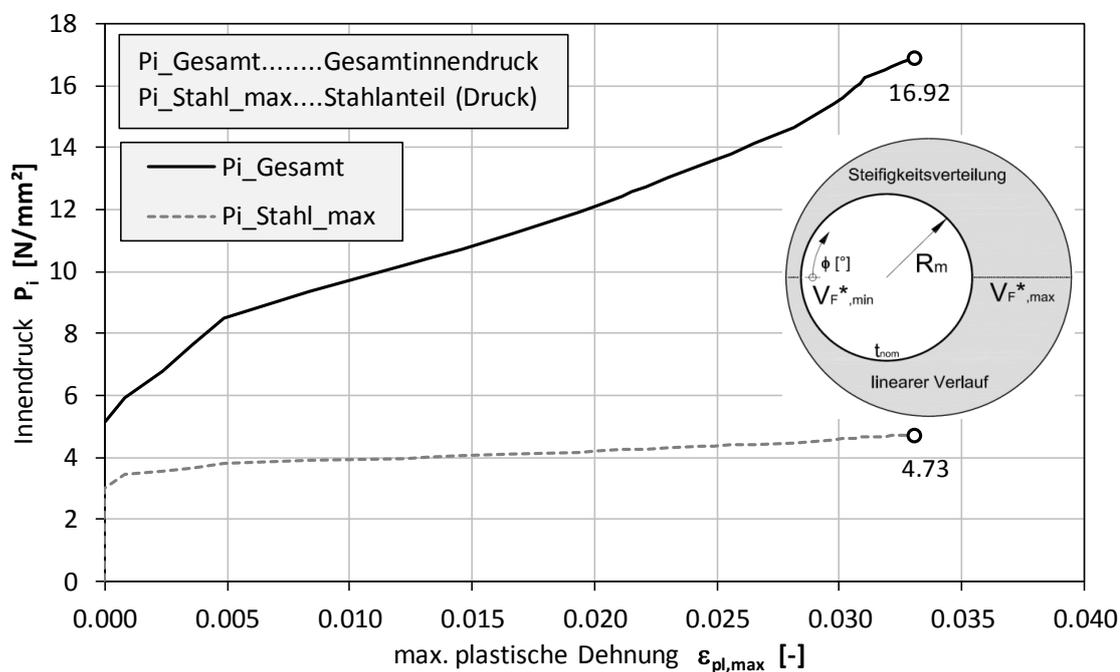


Abbildung 178: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

### 7.3.2.4 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

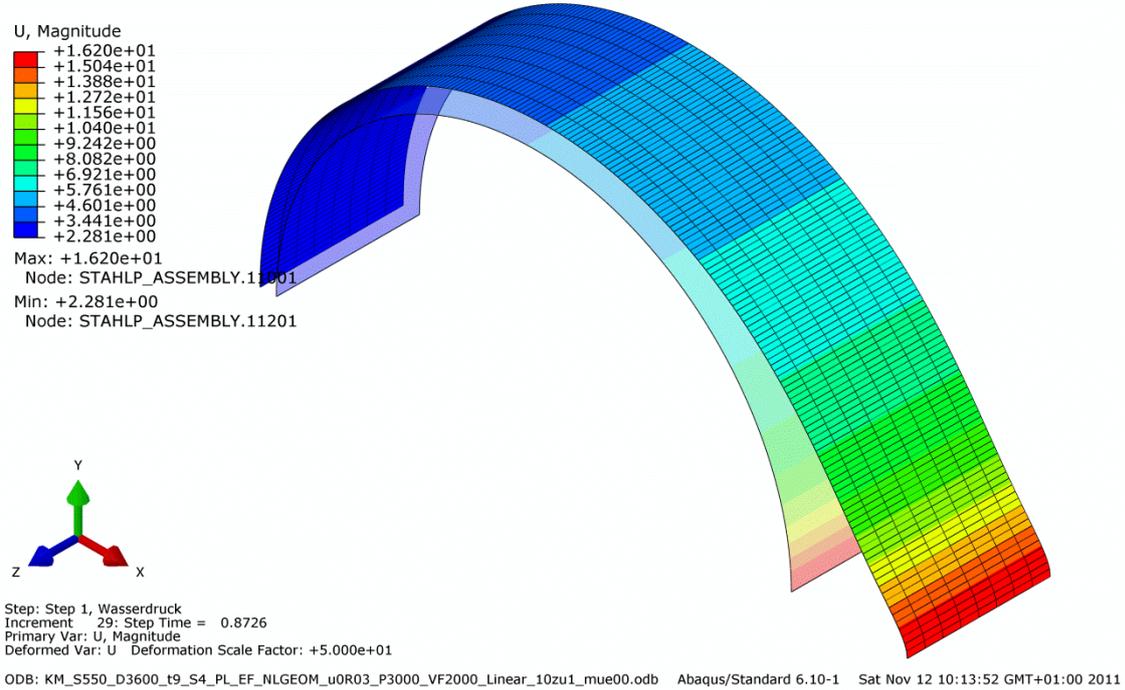


Abbildung 179: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

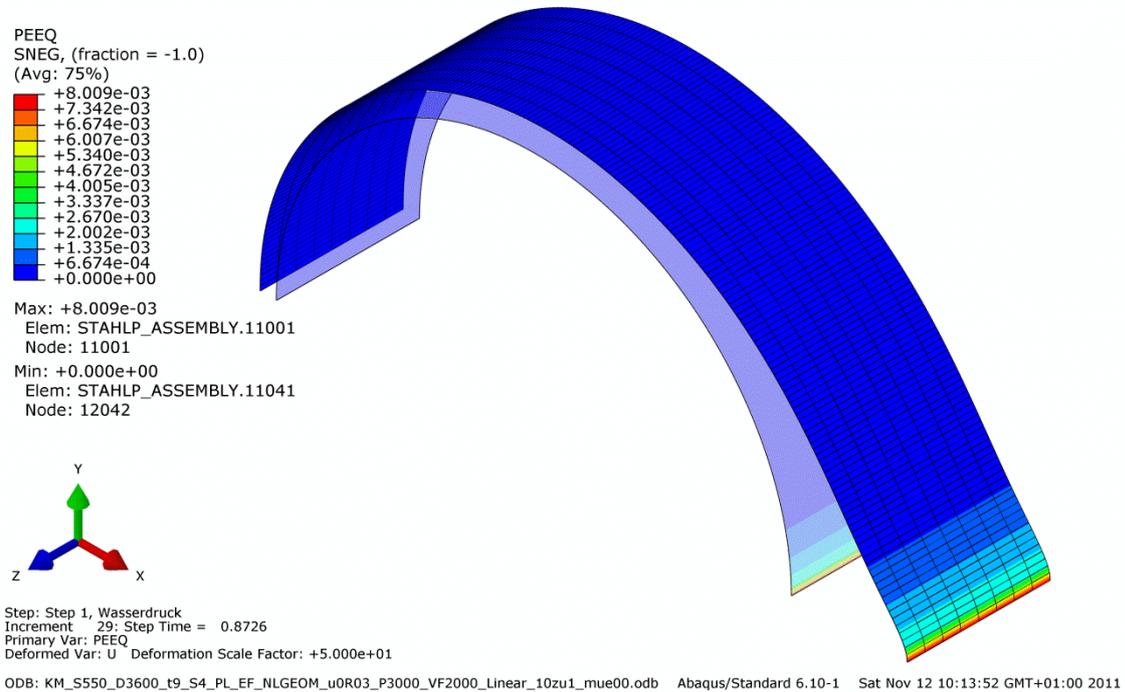


Abbildung 180: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

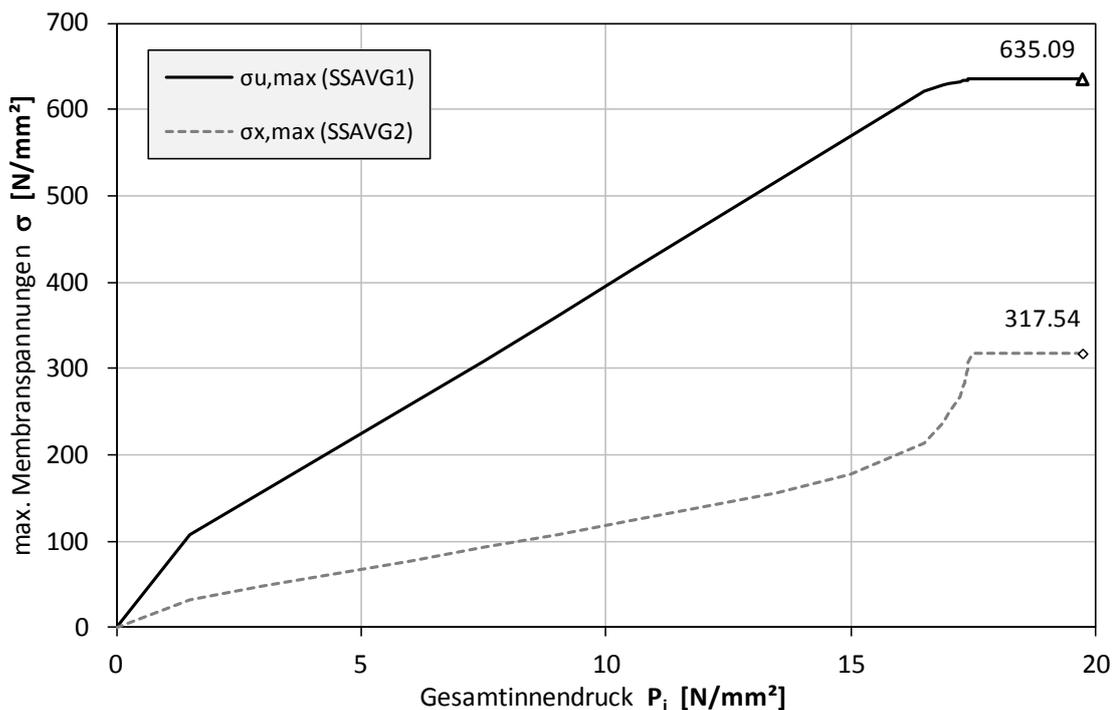


Abbildung 181: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

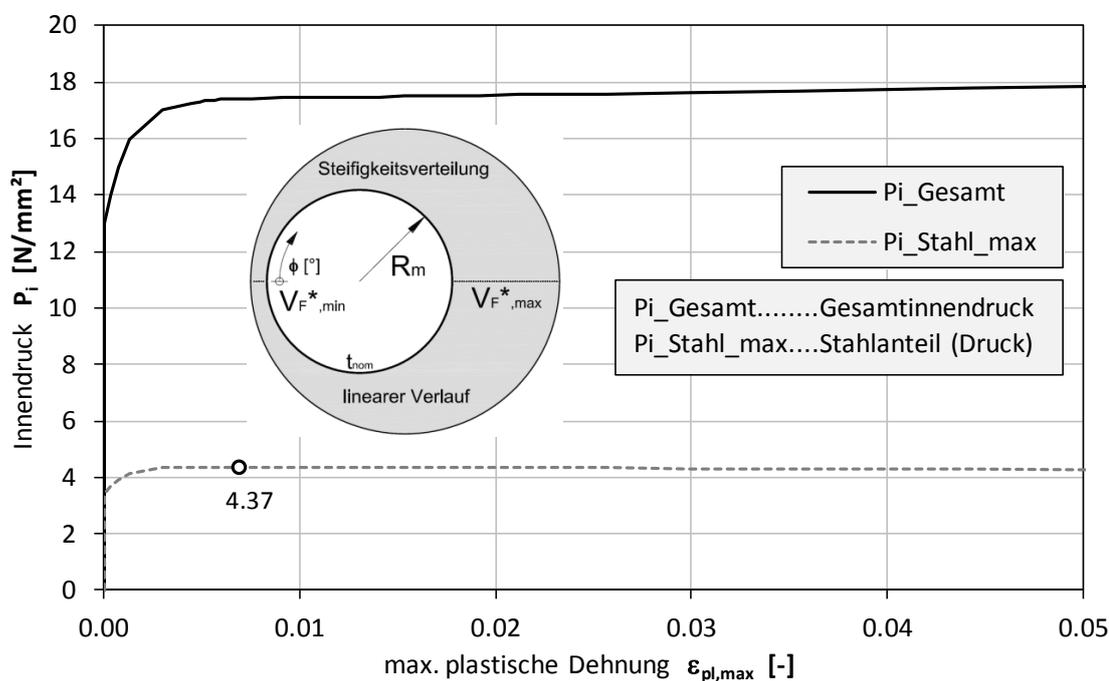


Abbildung 182: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

### 7.3.2.5 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

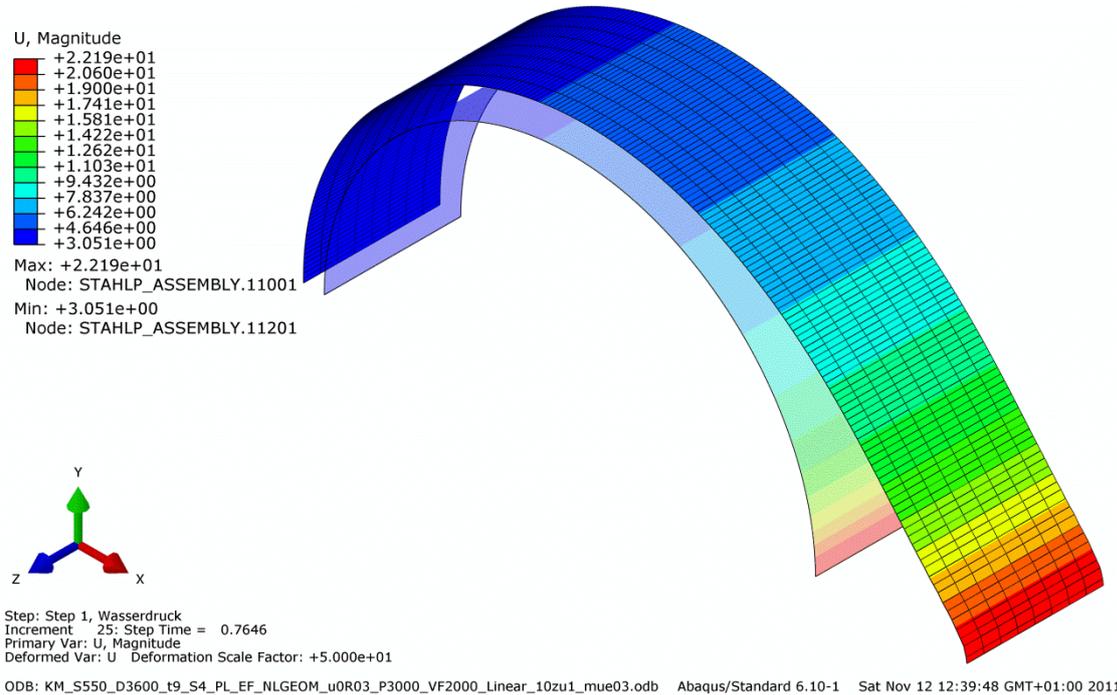


Abbildung 183: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

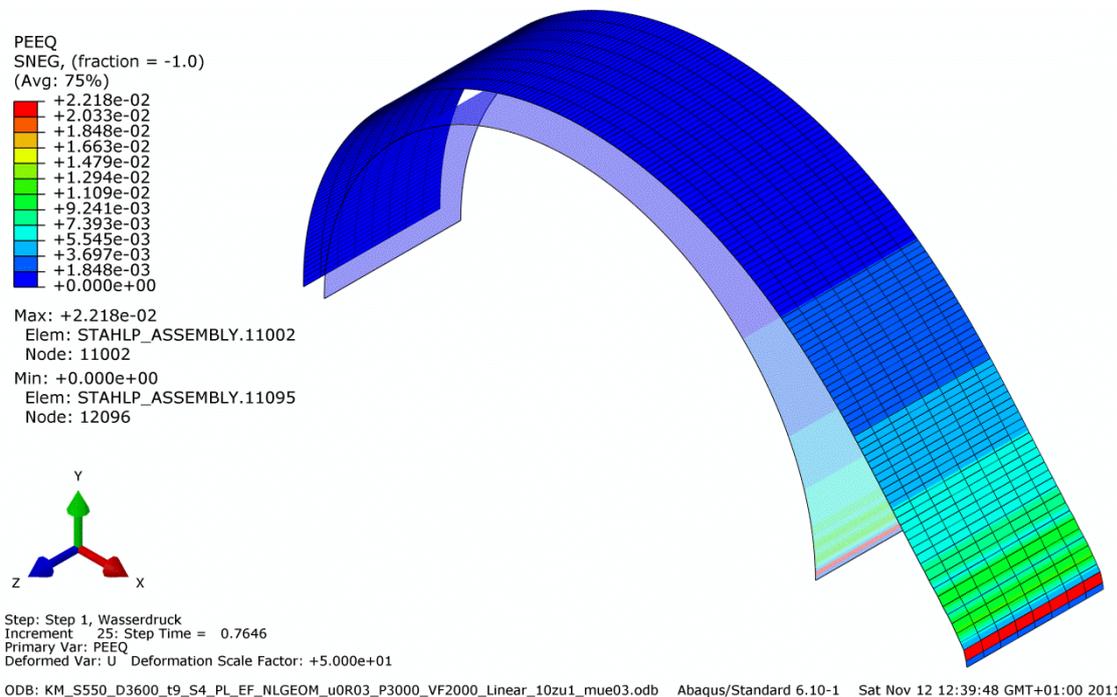


Abbildung 184: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

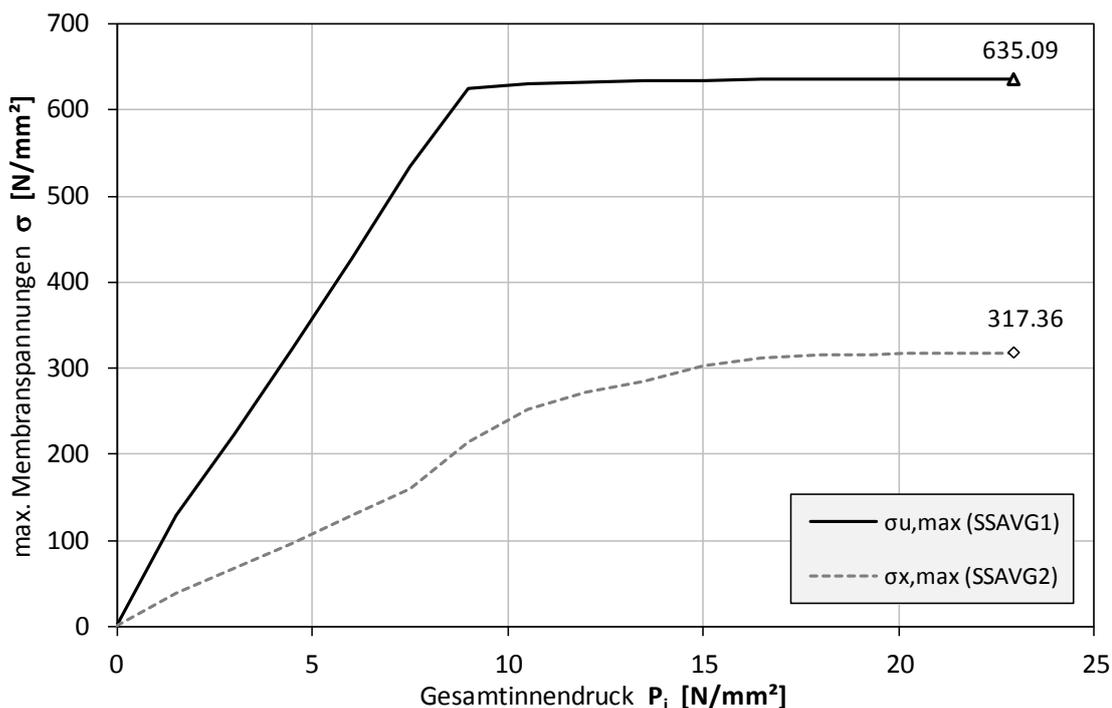


Abbildung 185: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

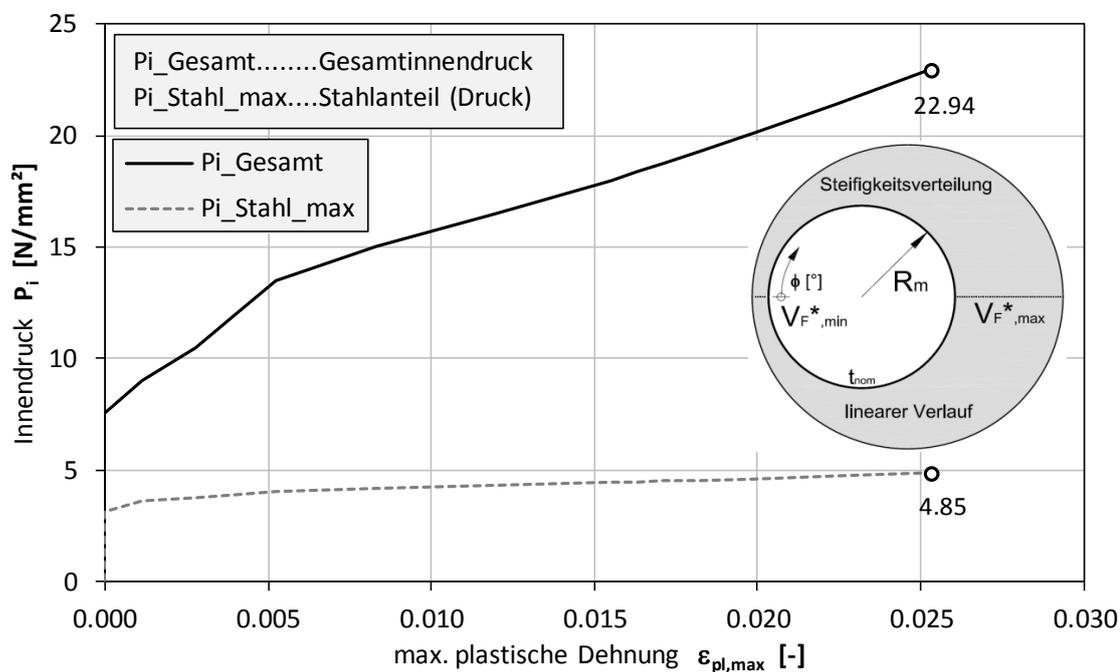


Abbildung 186: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

### 7.3.2.6 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

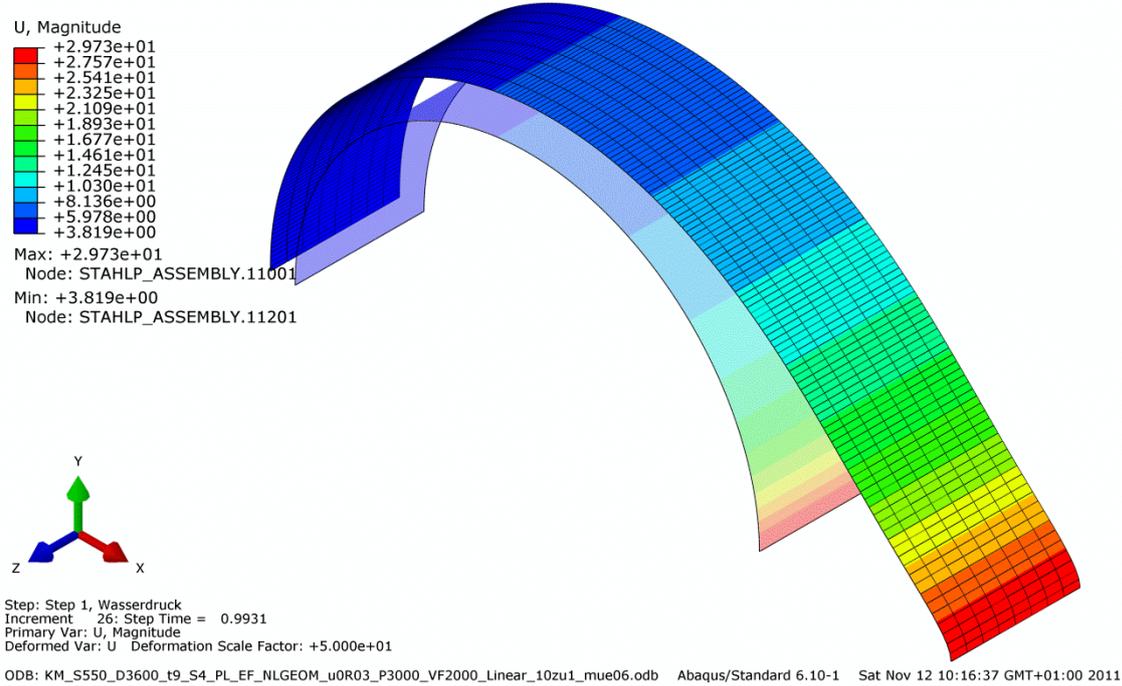


Abbildung 187: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

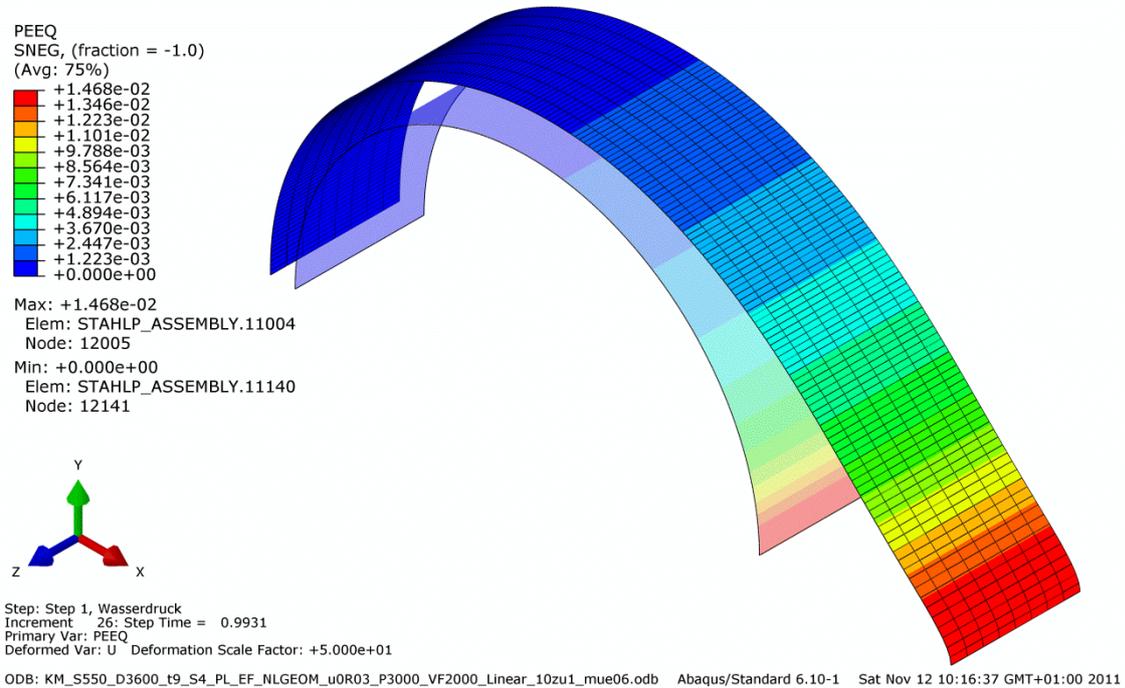


Abbildung 188: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

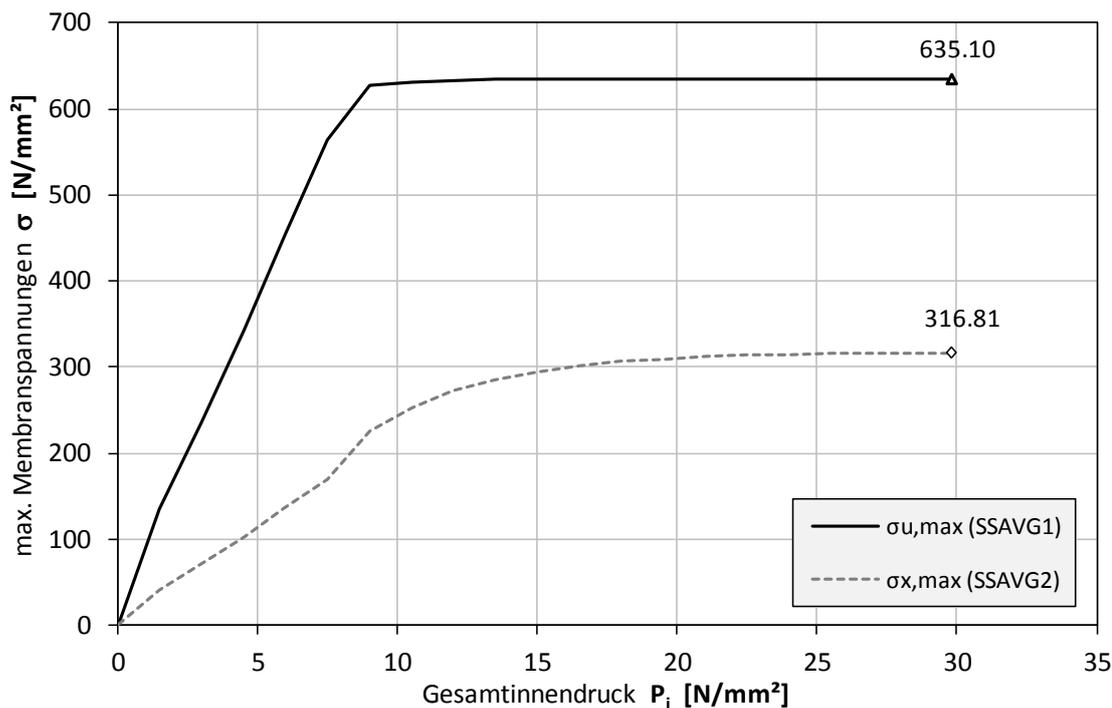


Abbildung 189: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

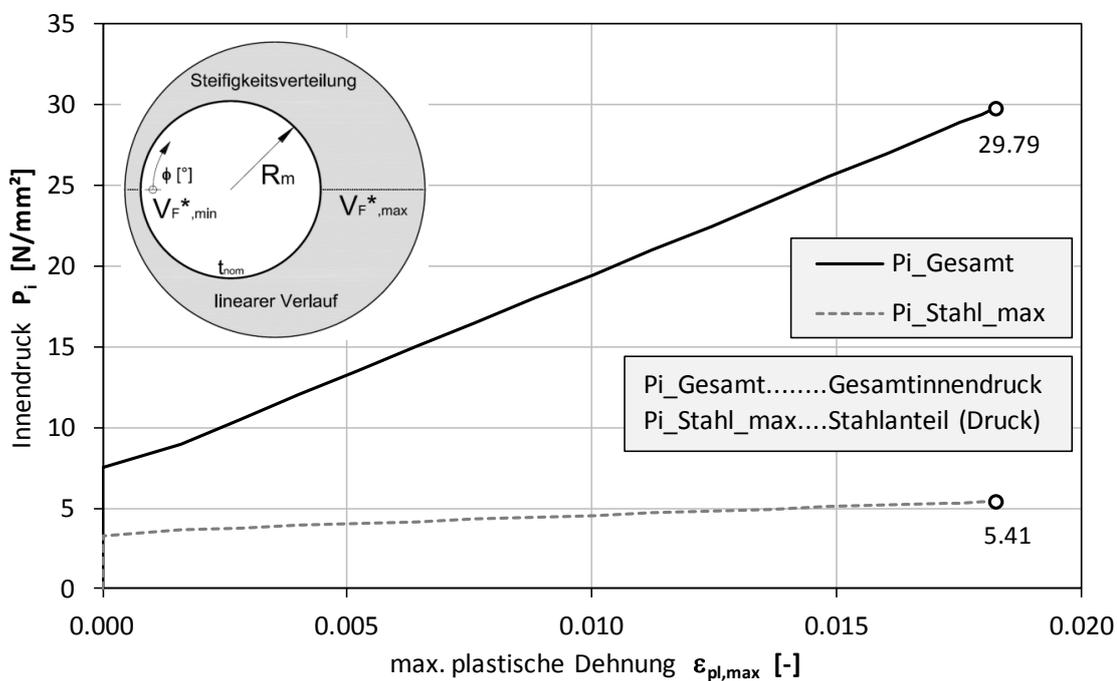


Abbildung 190: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

### 7.3.2.7 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

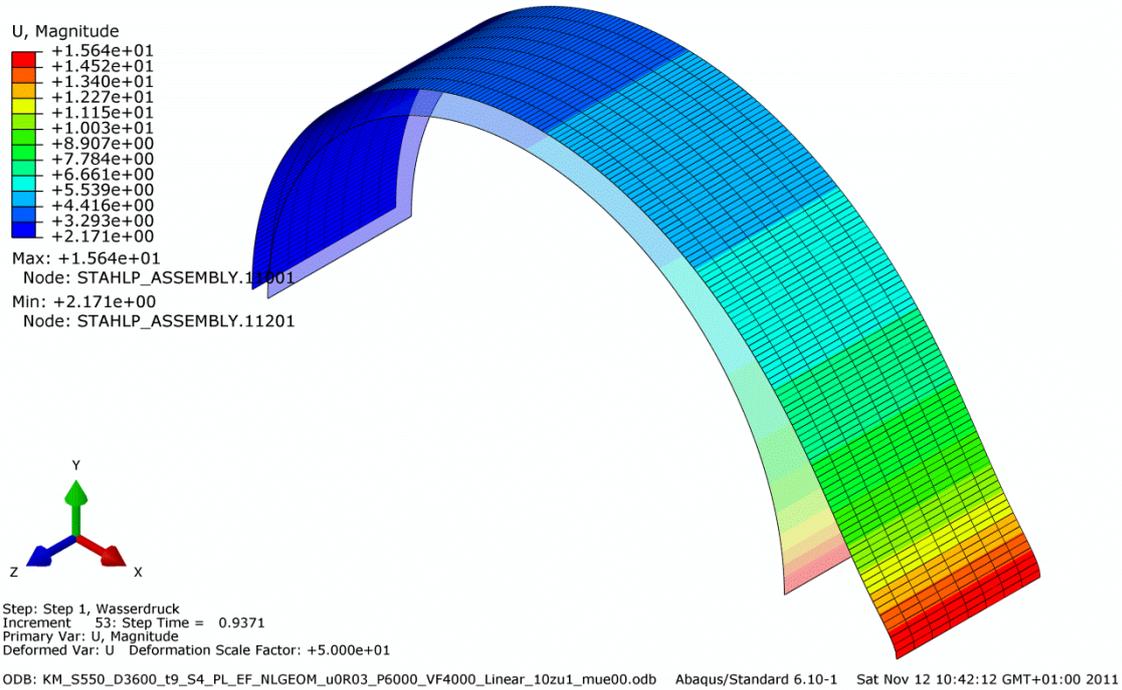


Abbildung 191: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

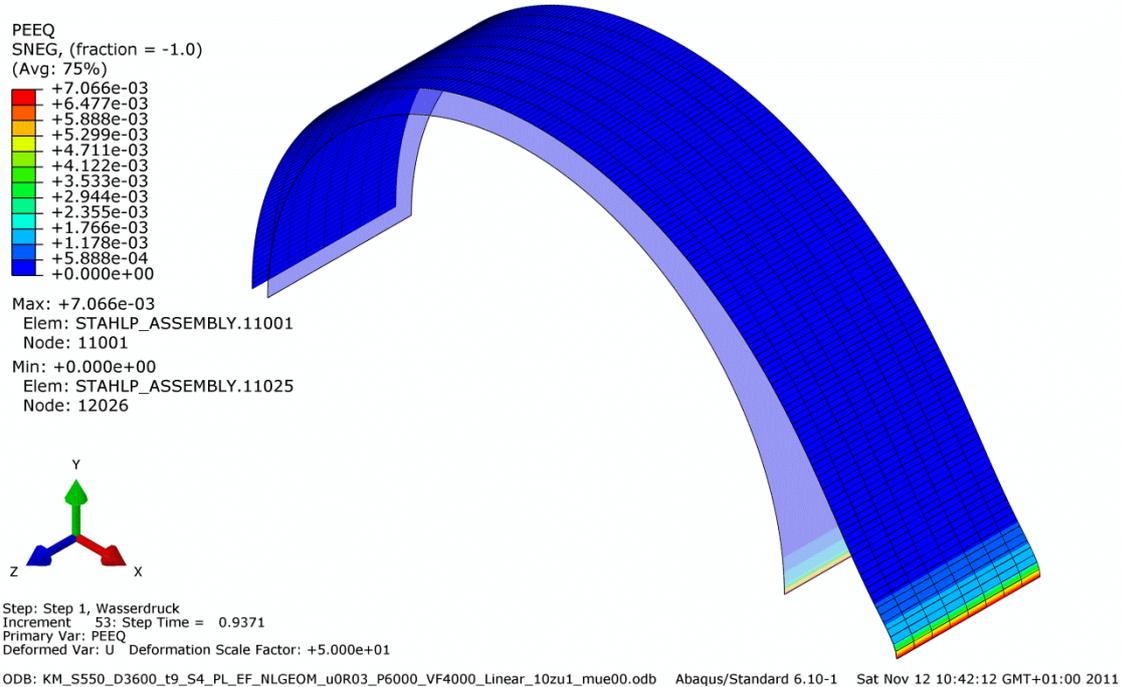


Abbildung 192: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

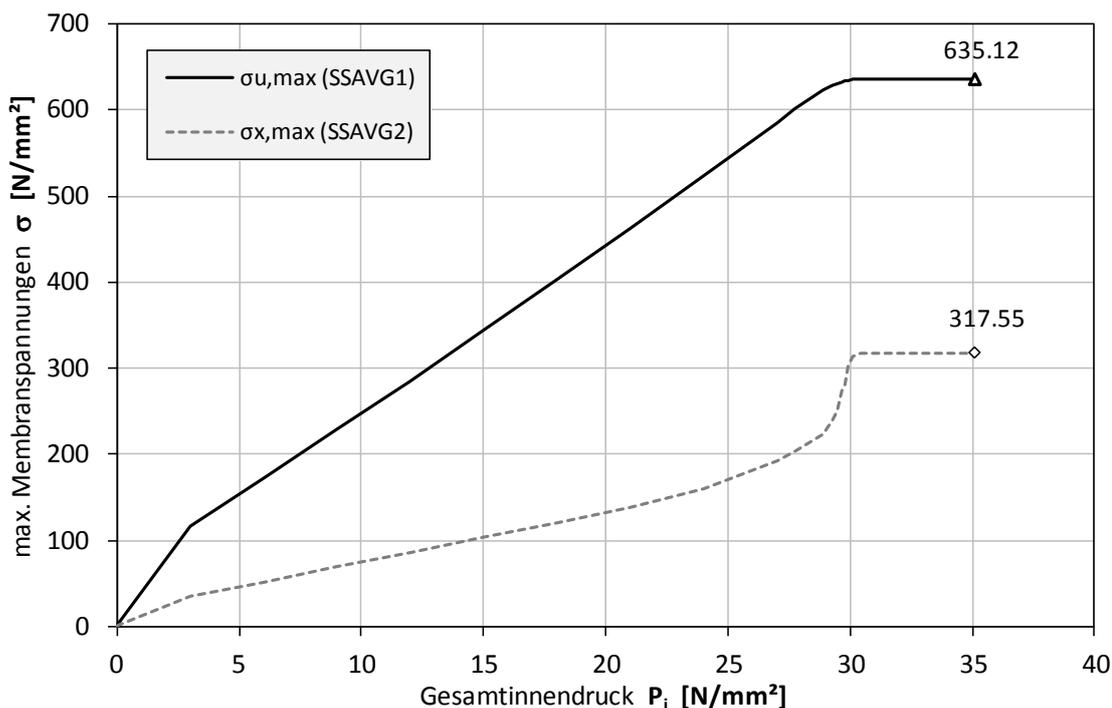


Abbildung 193: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

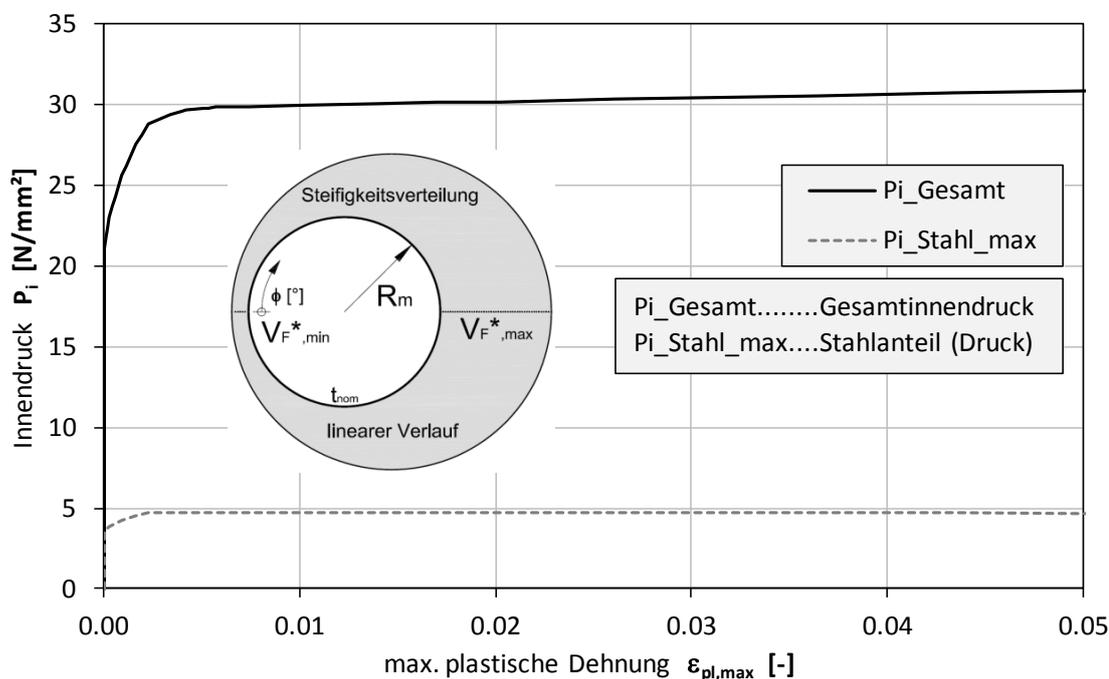


Abbildung 194: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

### 7.3.2.8 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

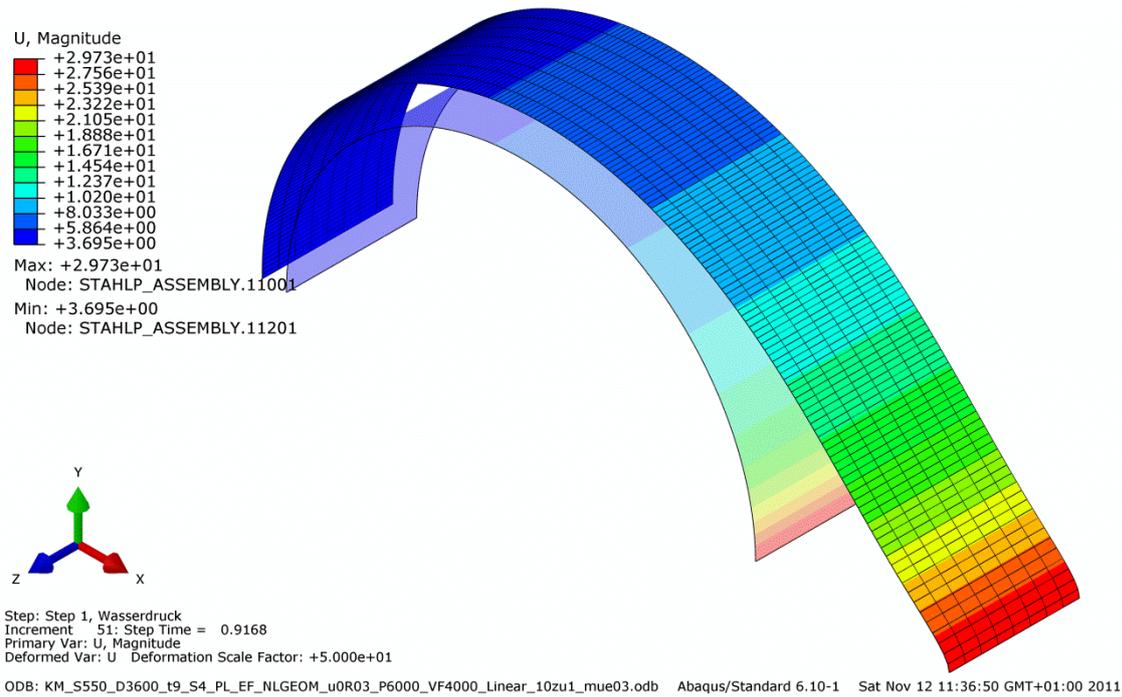


Abbildung 195: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

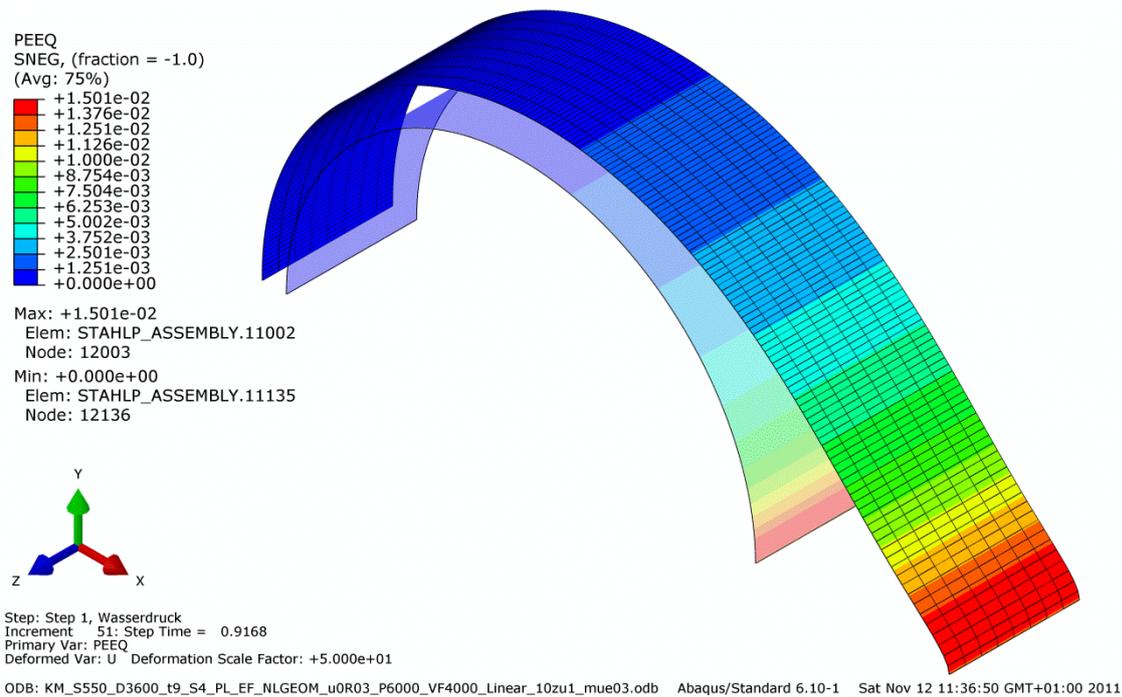


Abbildung 196: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

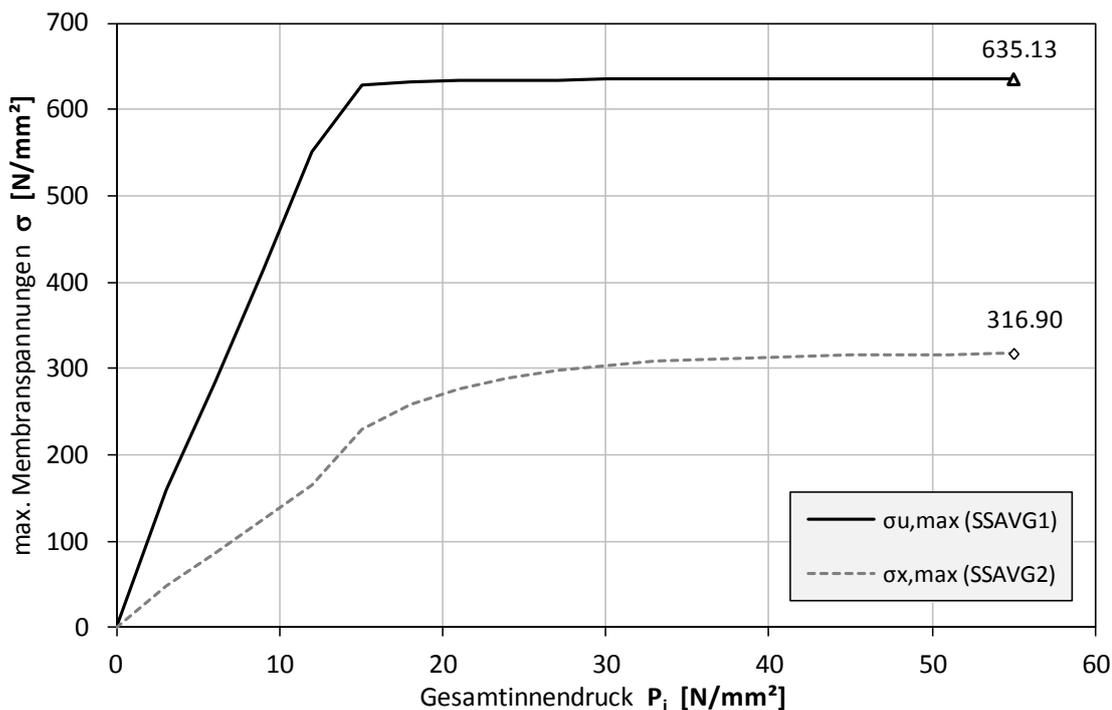


Abbildung 197: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

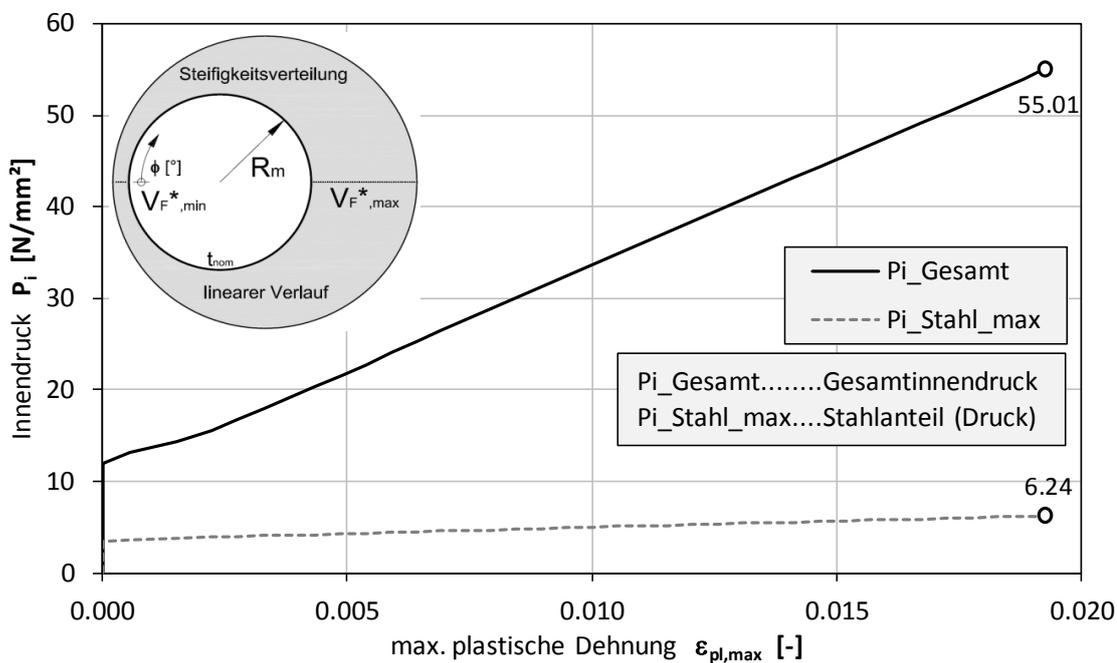


Abbildung 198: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.3.2.9 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

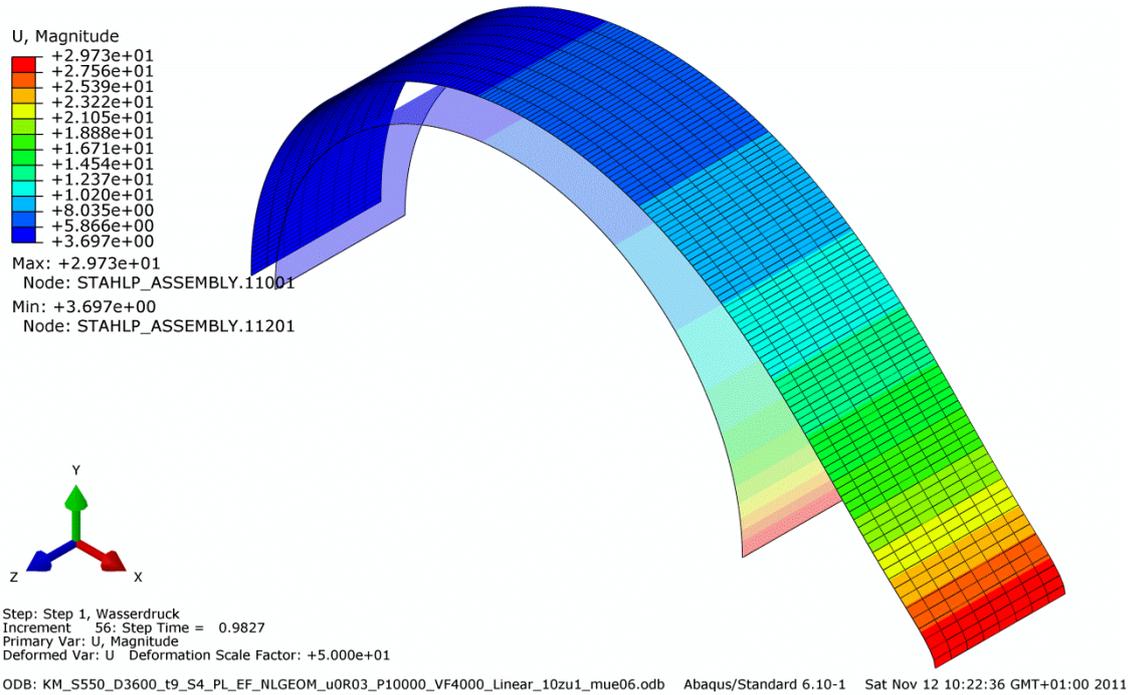


Abbildung 199: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

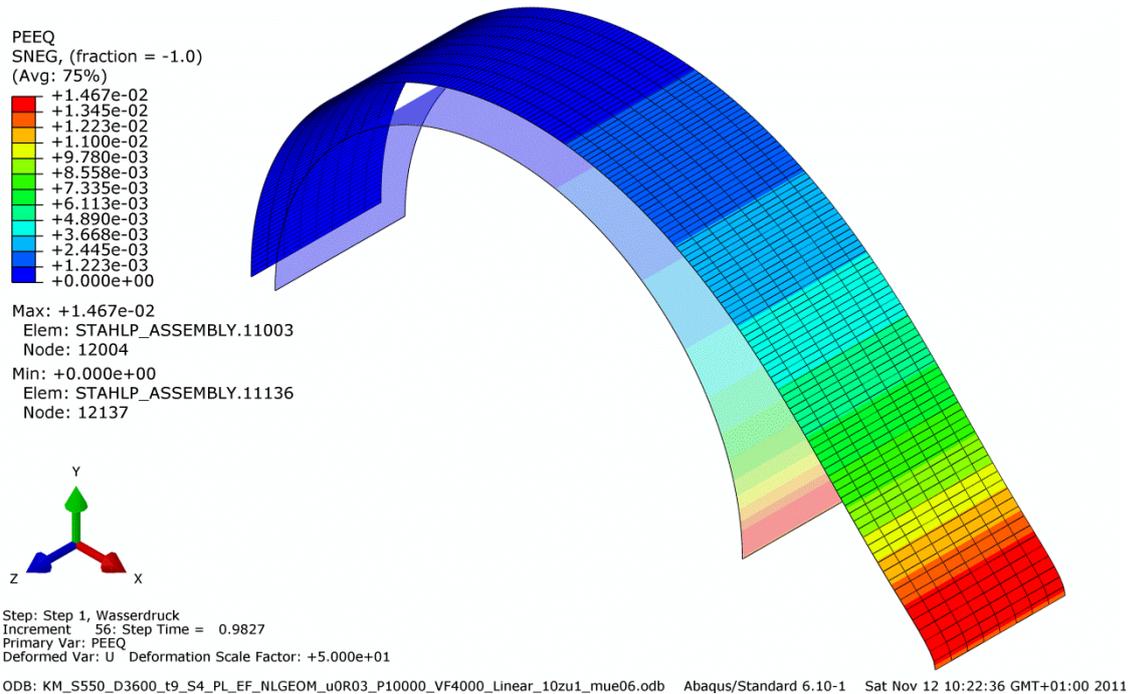


Abbildung 200: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

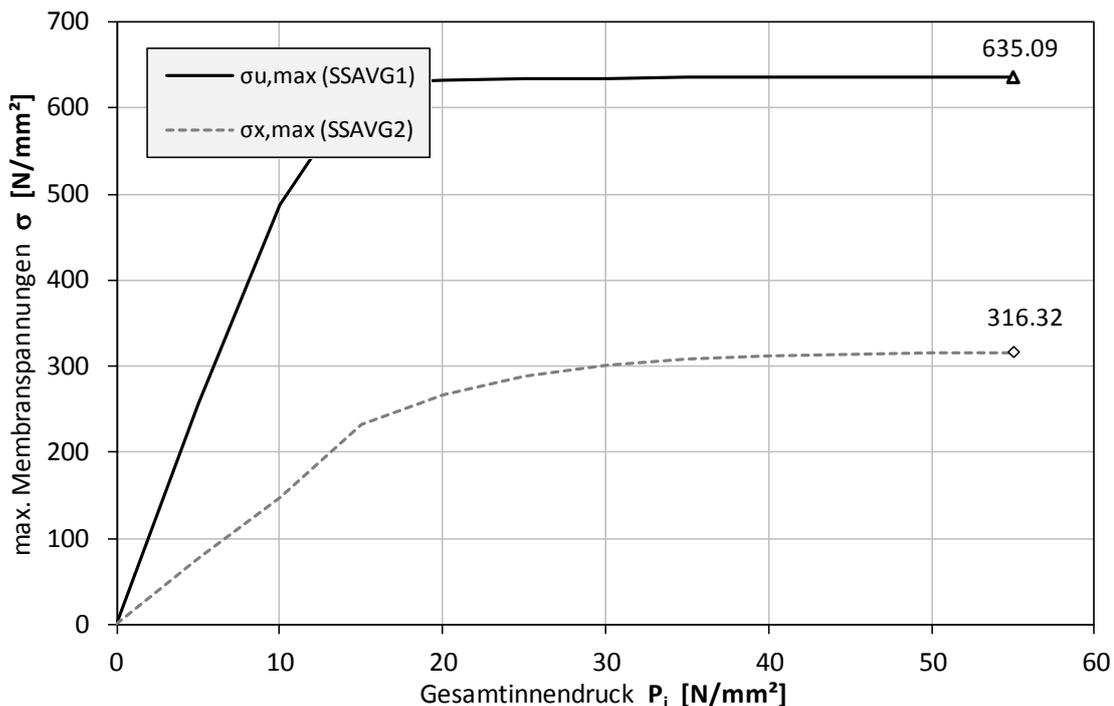


Abbildung 201: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

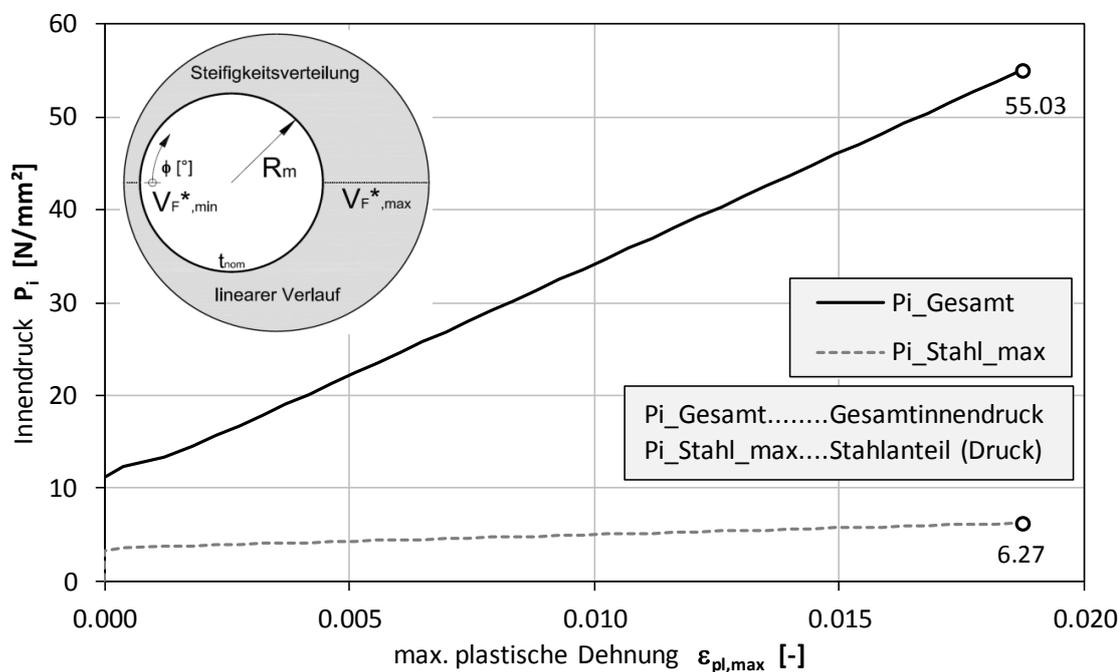


Abbildung 202: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.3.2.10 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

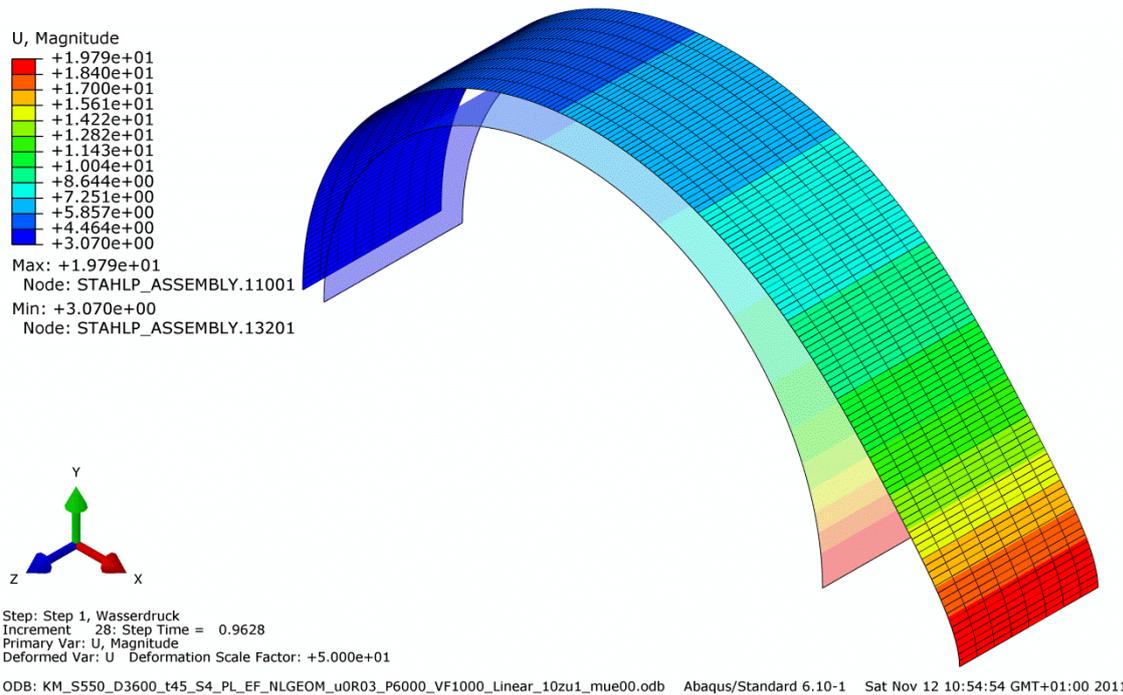


Abbildung 203: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

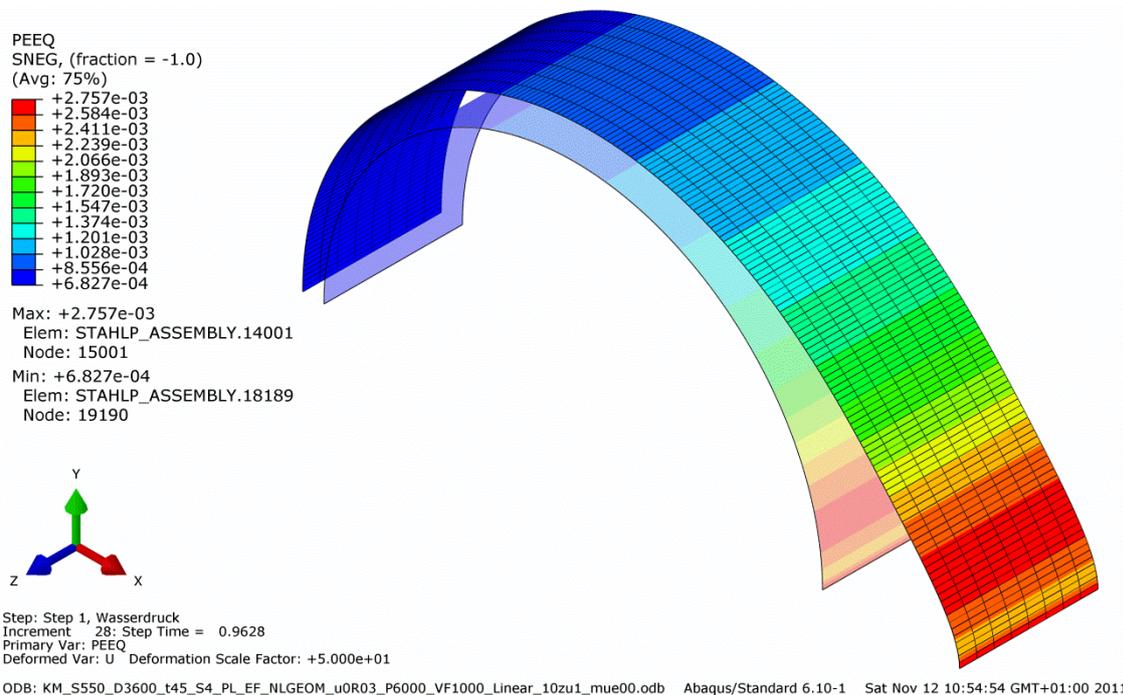


Abbildung 204: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

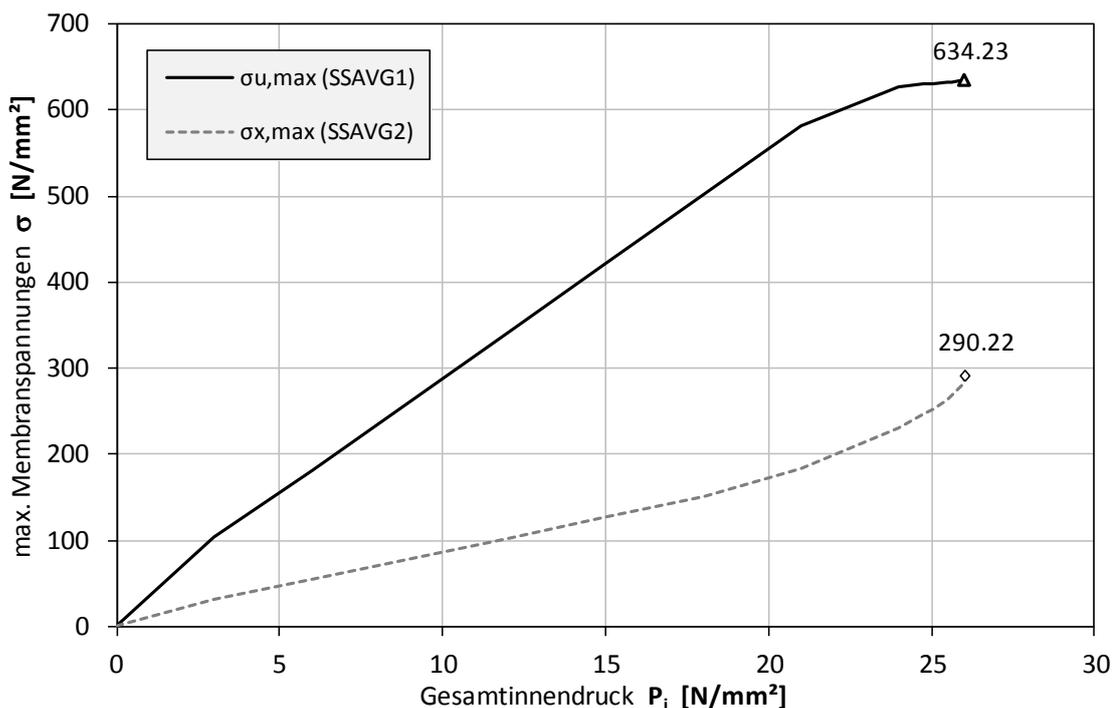


Abbildung 205: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

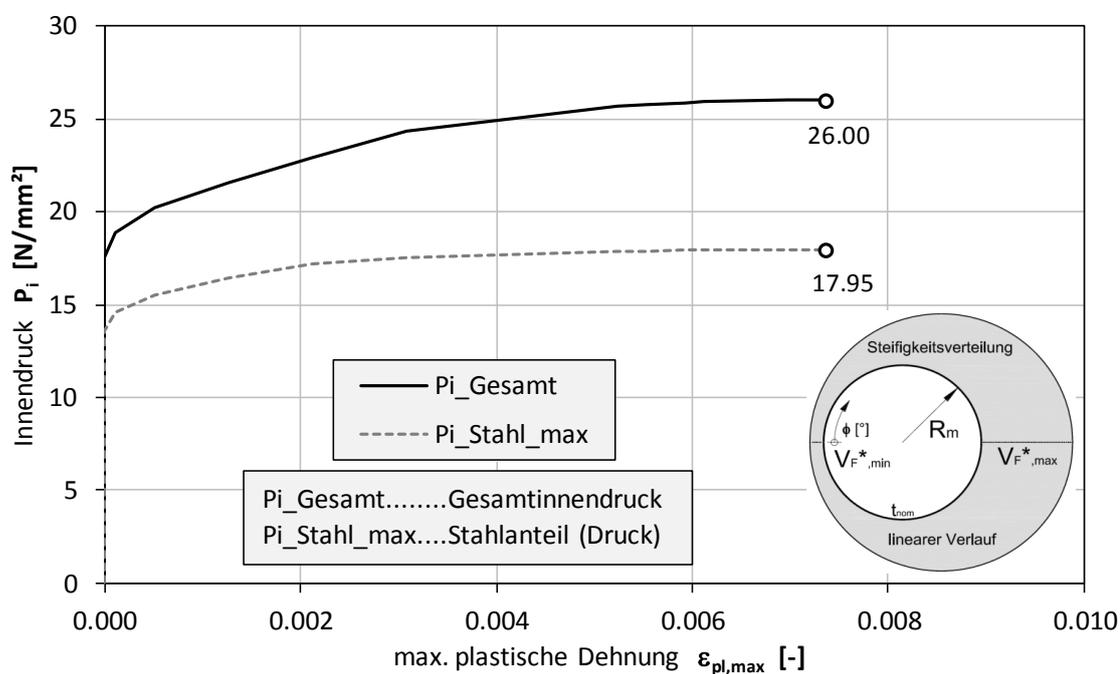


Abbildung 206: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.3.2.11 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

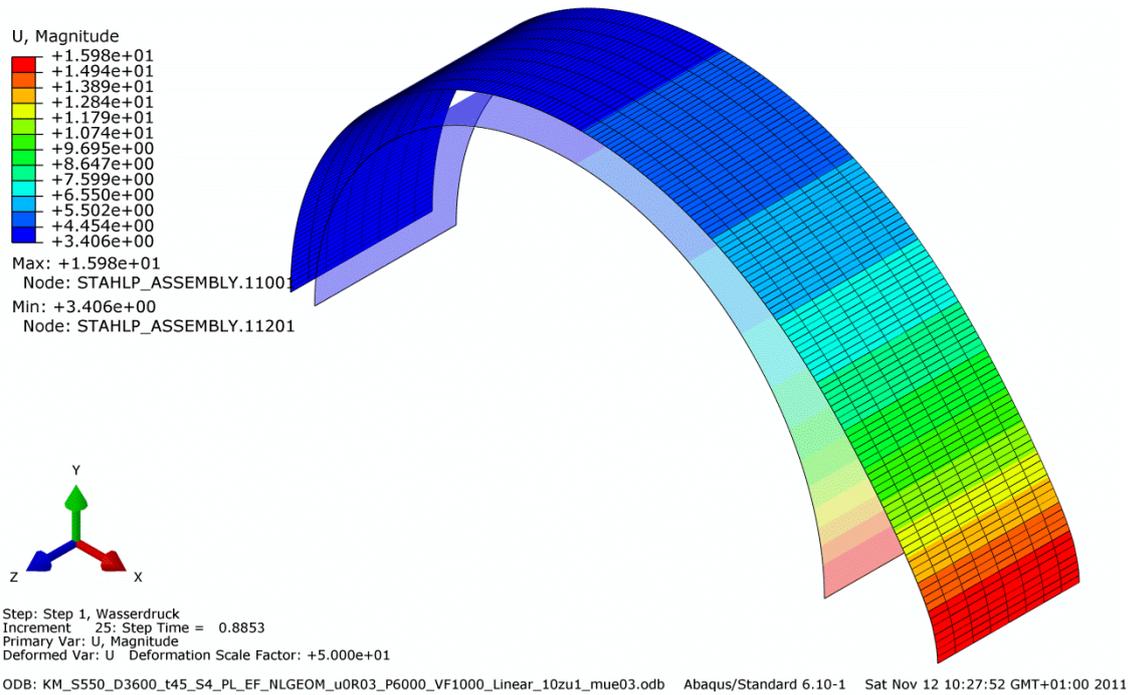


Abbildung 207: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

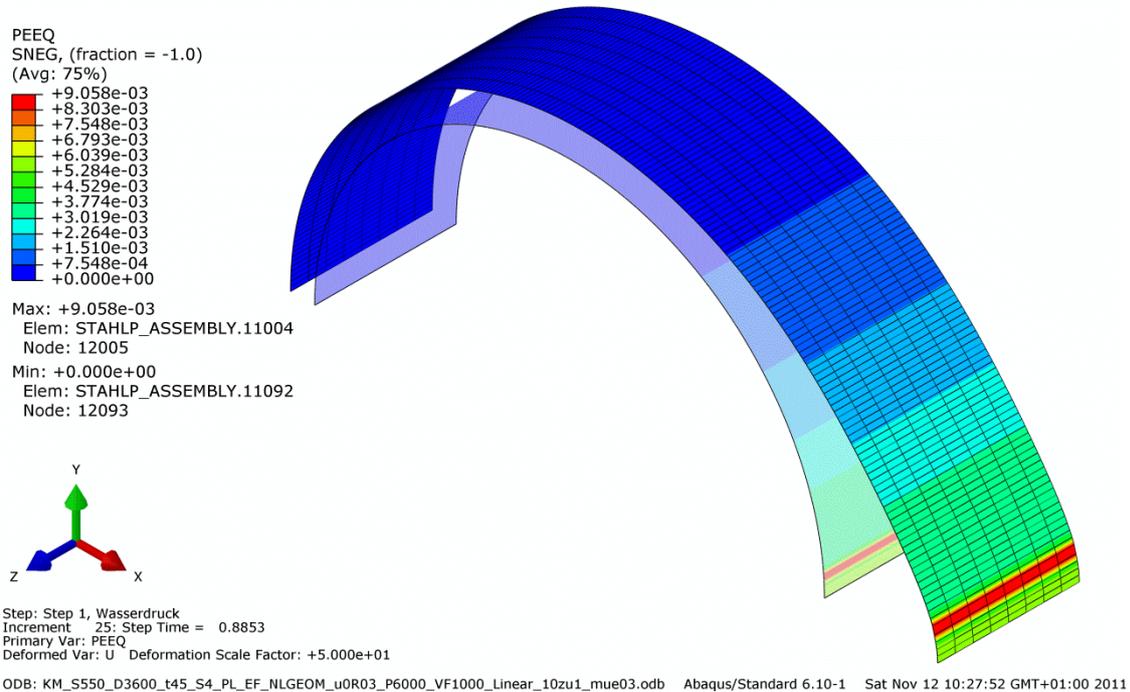


Abbildung 208: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

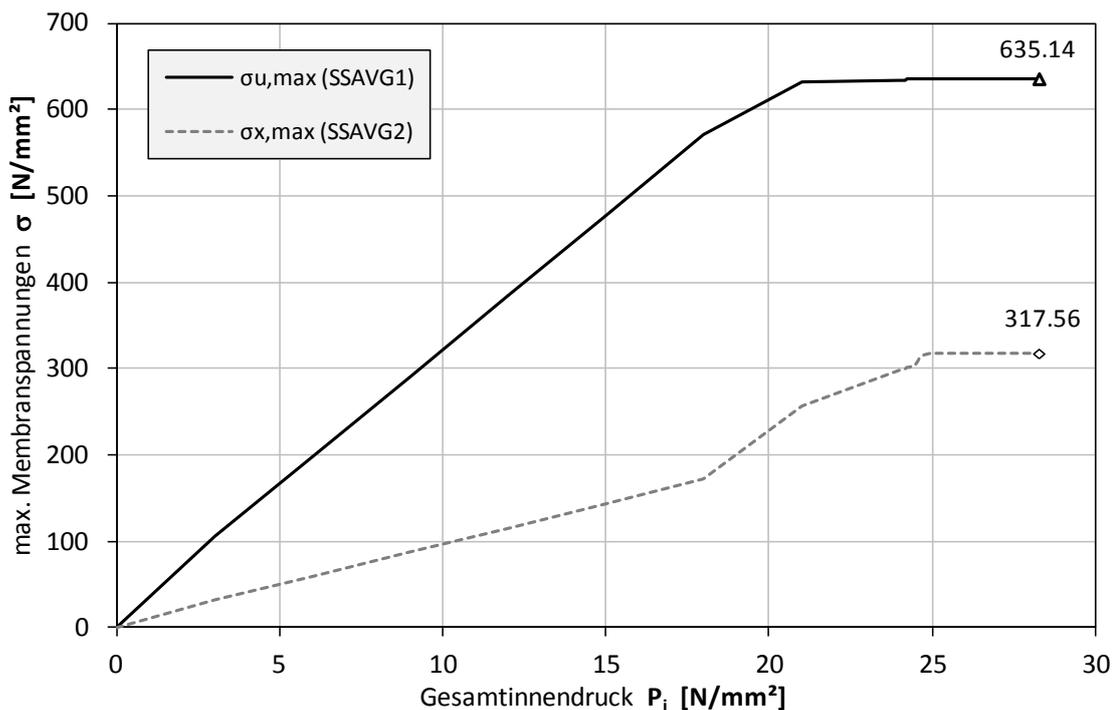


Abbildung 209: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

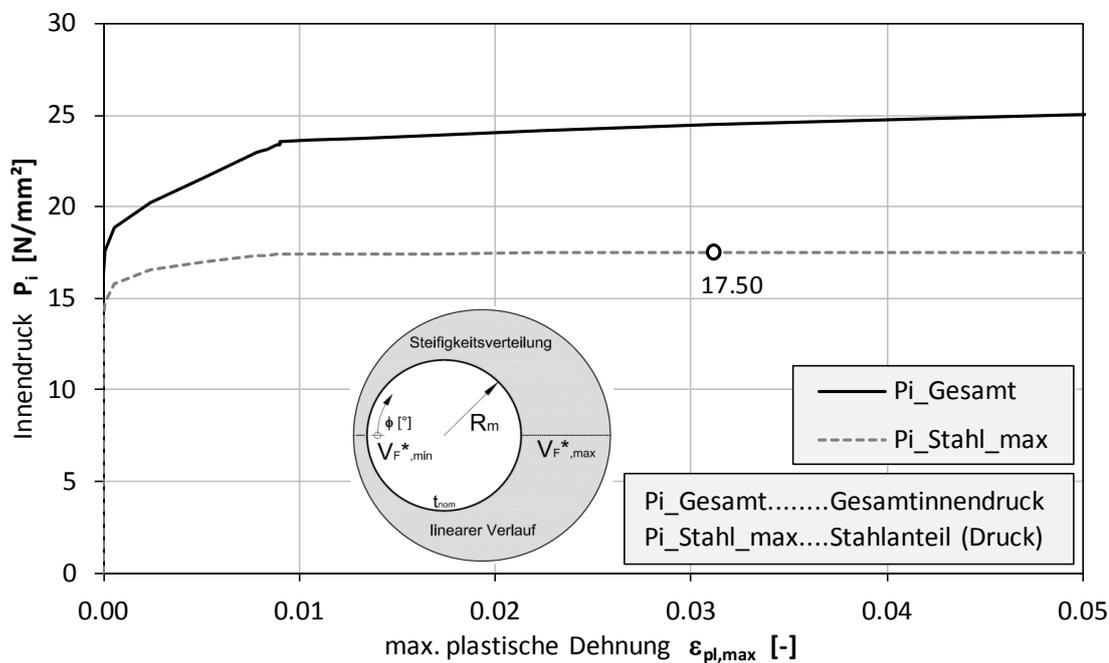


Abbildung 210: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.3.2.12 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

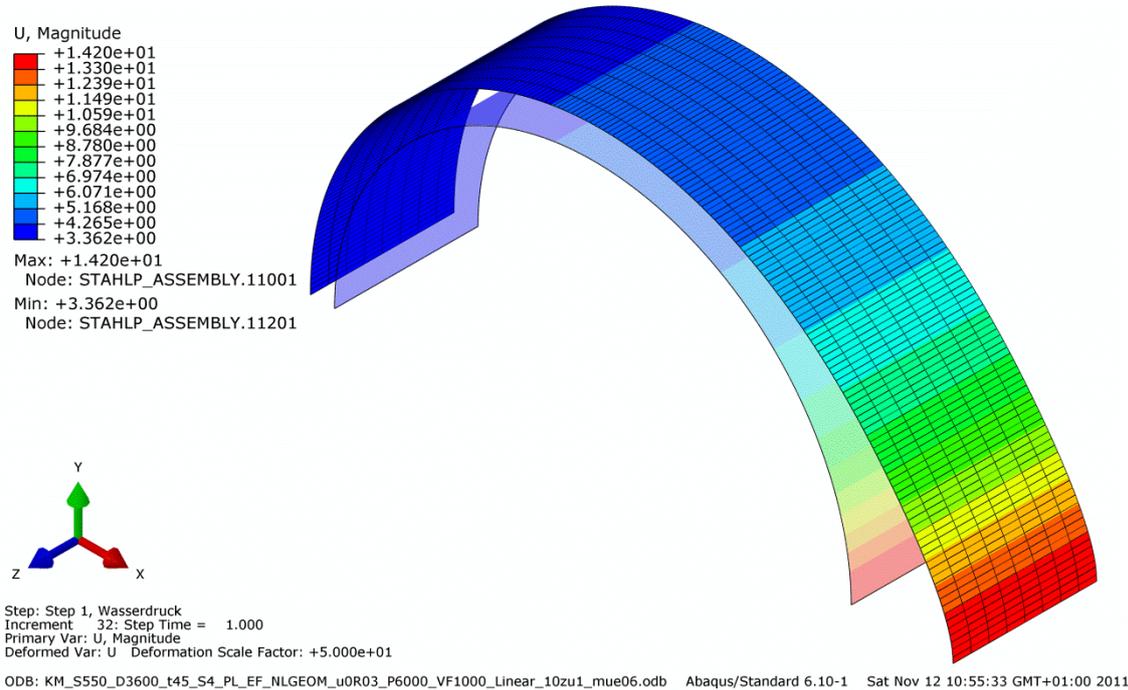


Abbildung 211: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

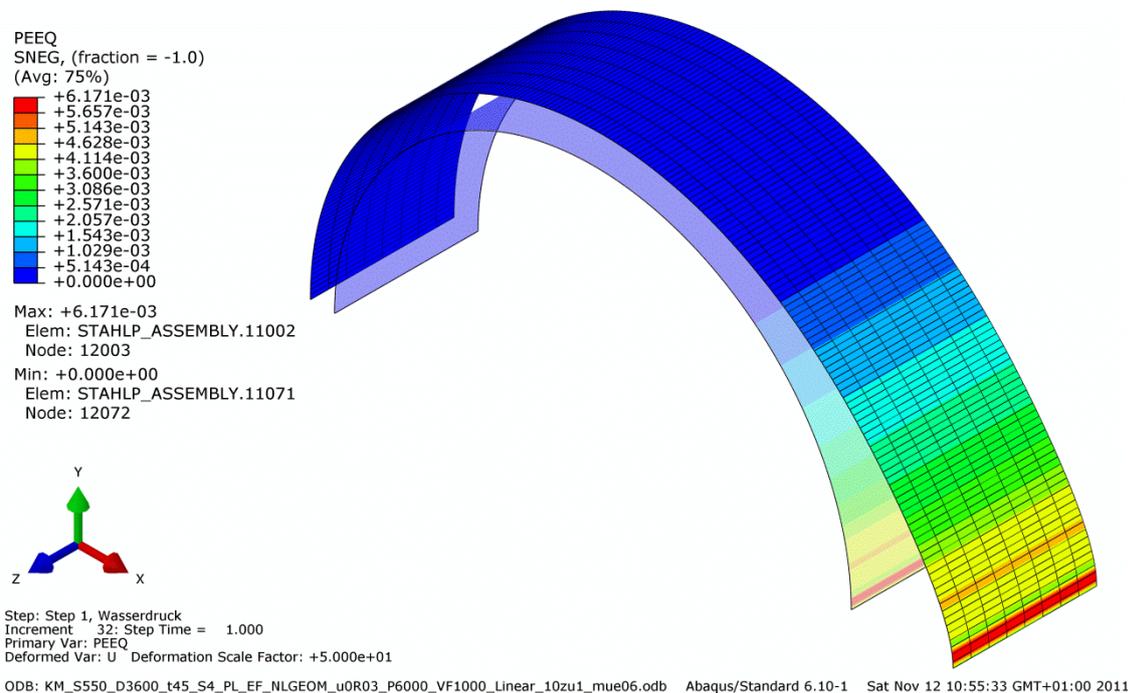


Abbildung 212: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

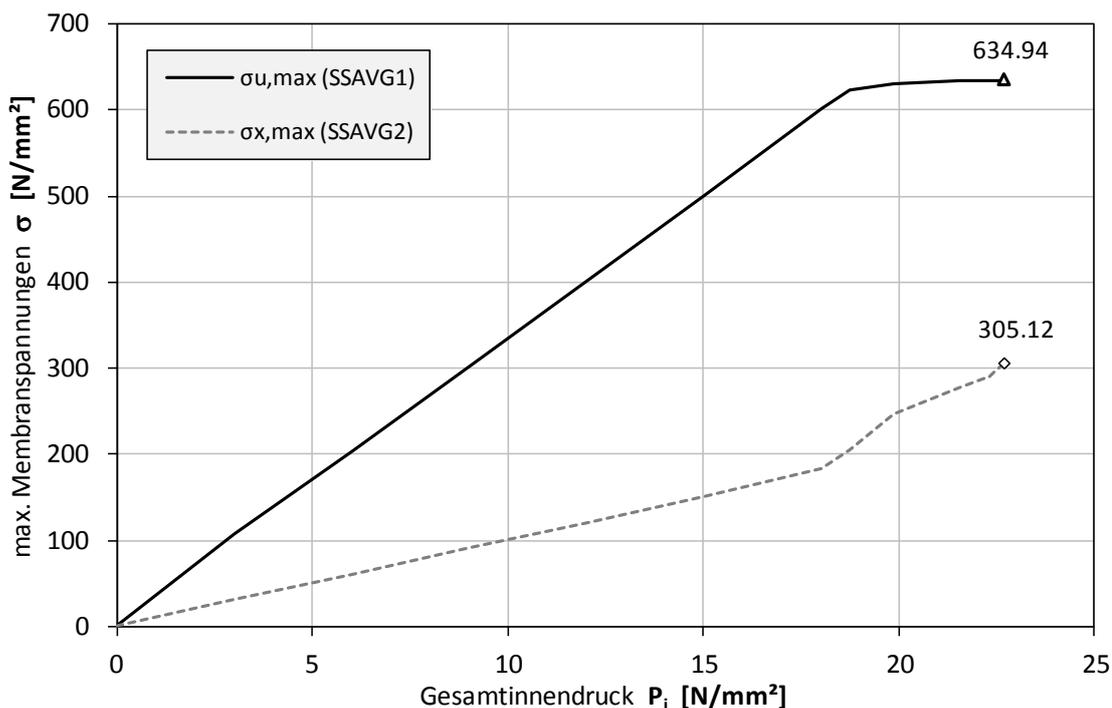


Abbildung 213: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

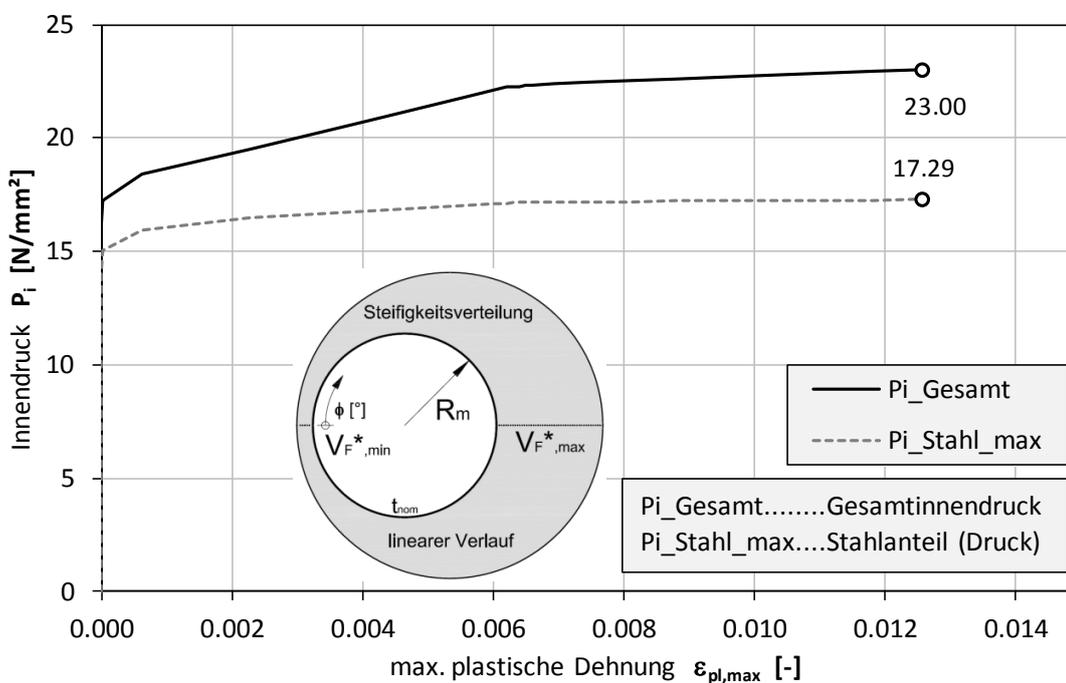


Abbildung 214: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.3.2.13 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

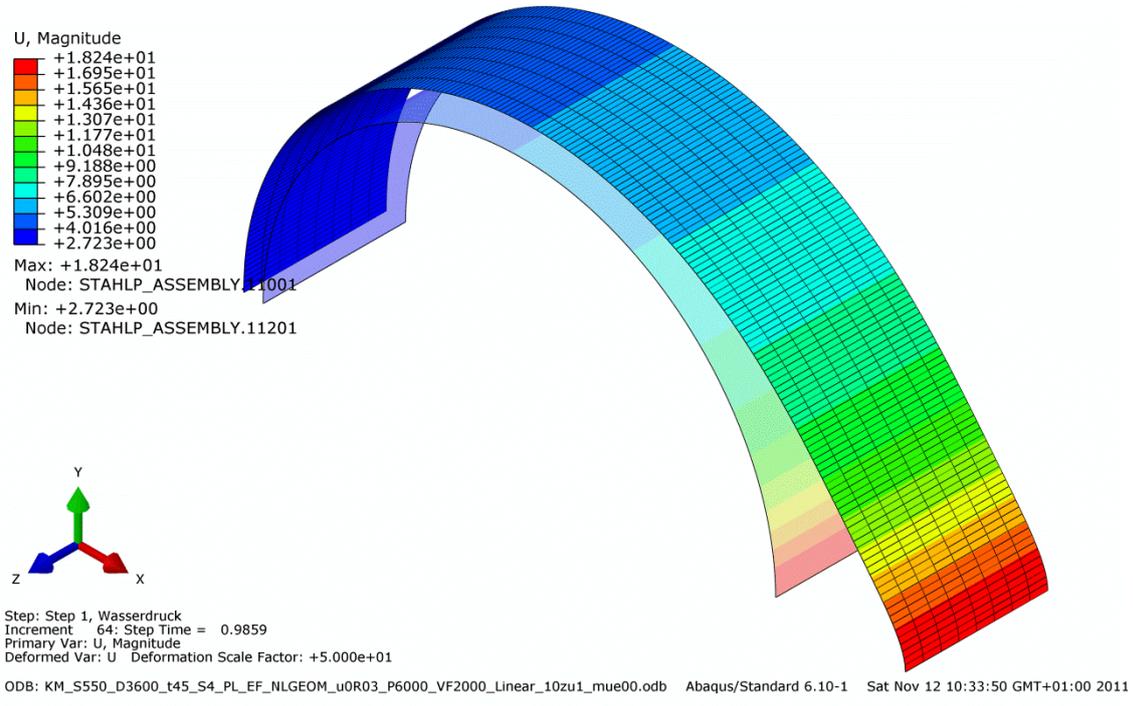


Abbildung 215: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

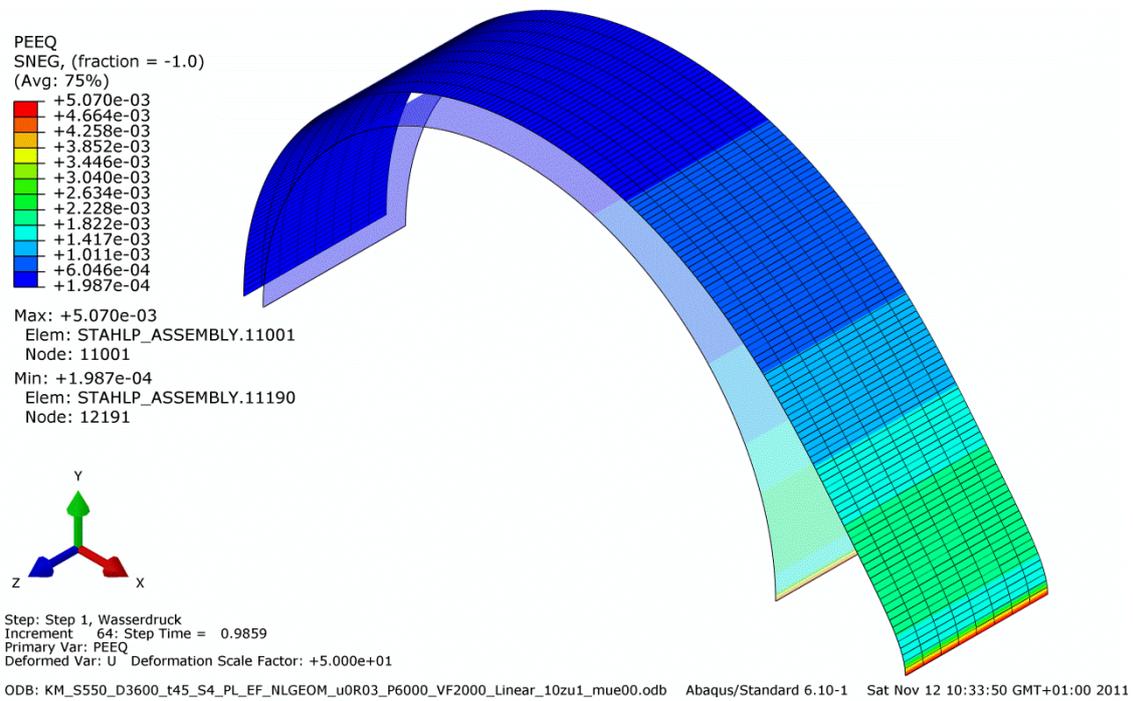


Abbildung 216: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

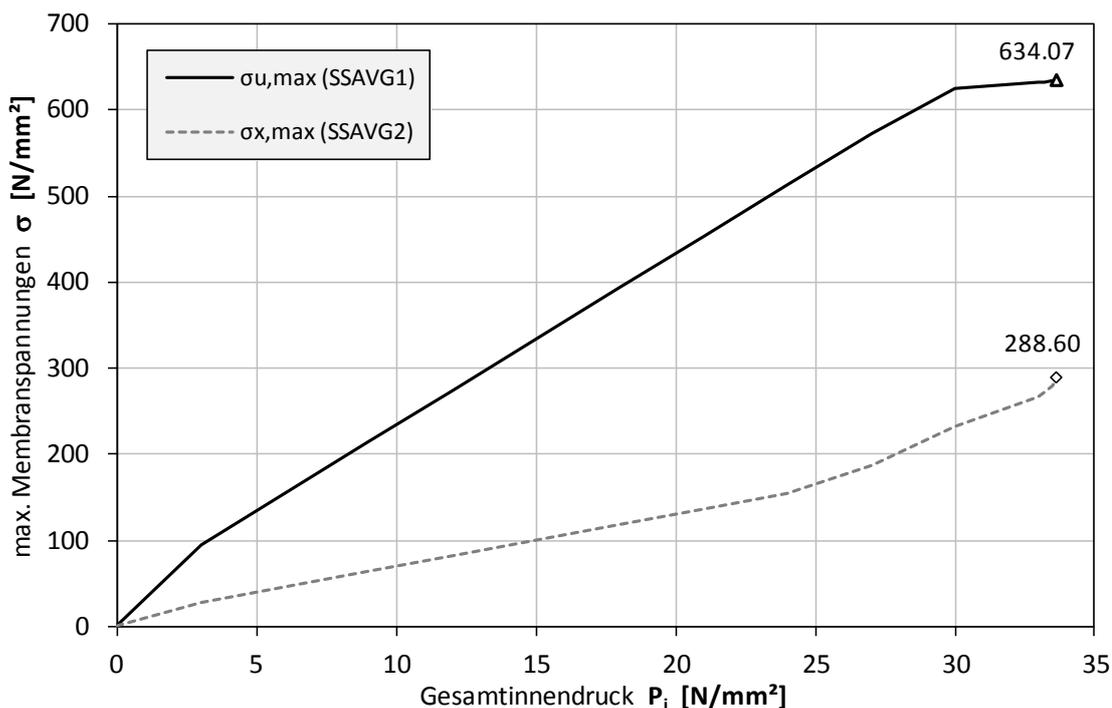


Abbildung 217: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

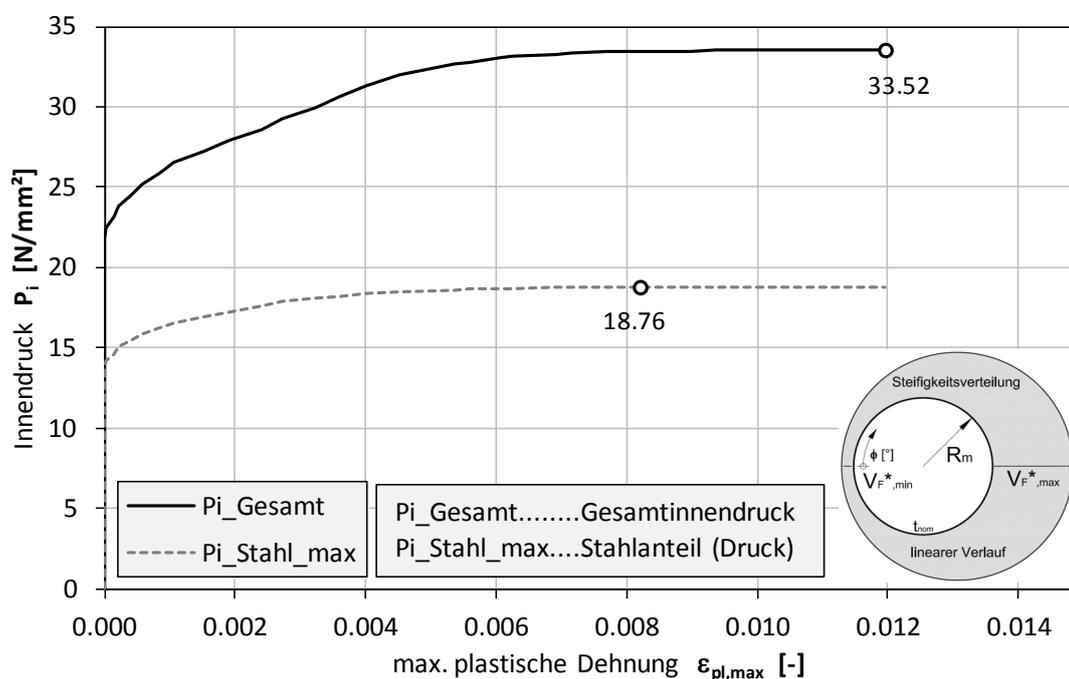


Abbildung 218: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.3.2.14 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

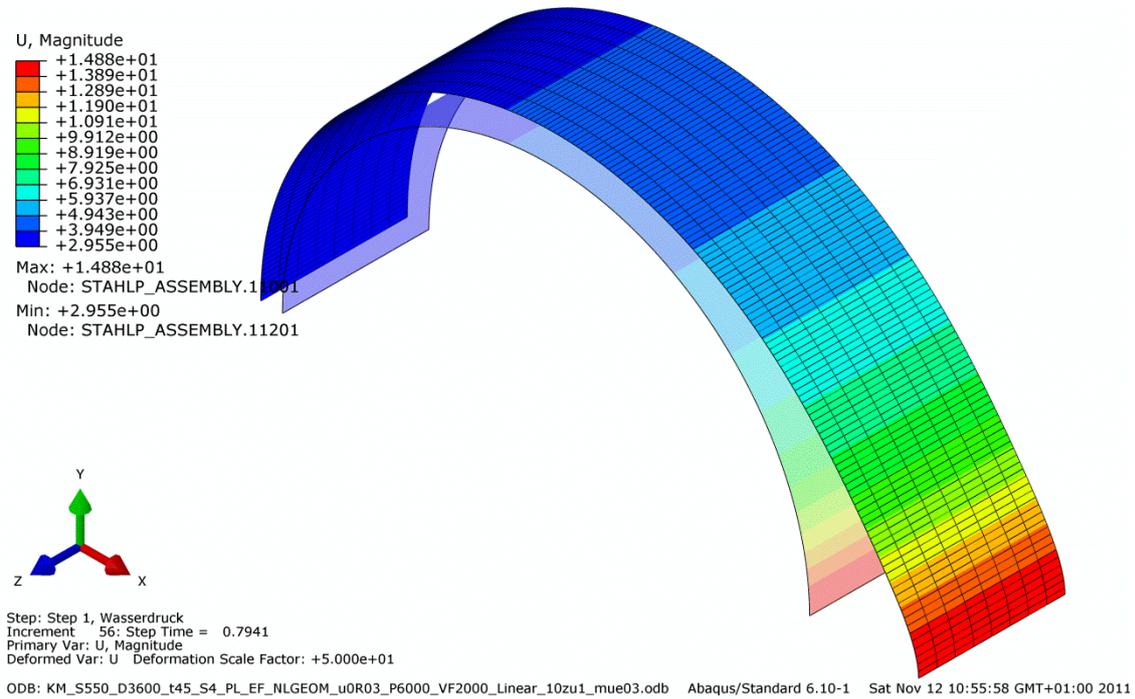


Abbildung 219: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

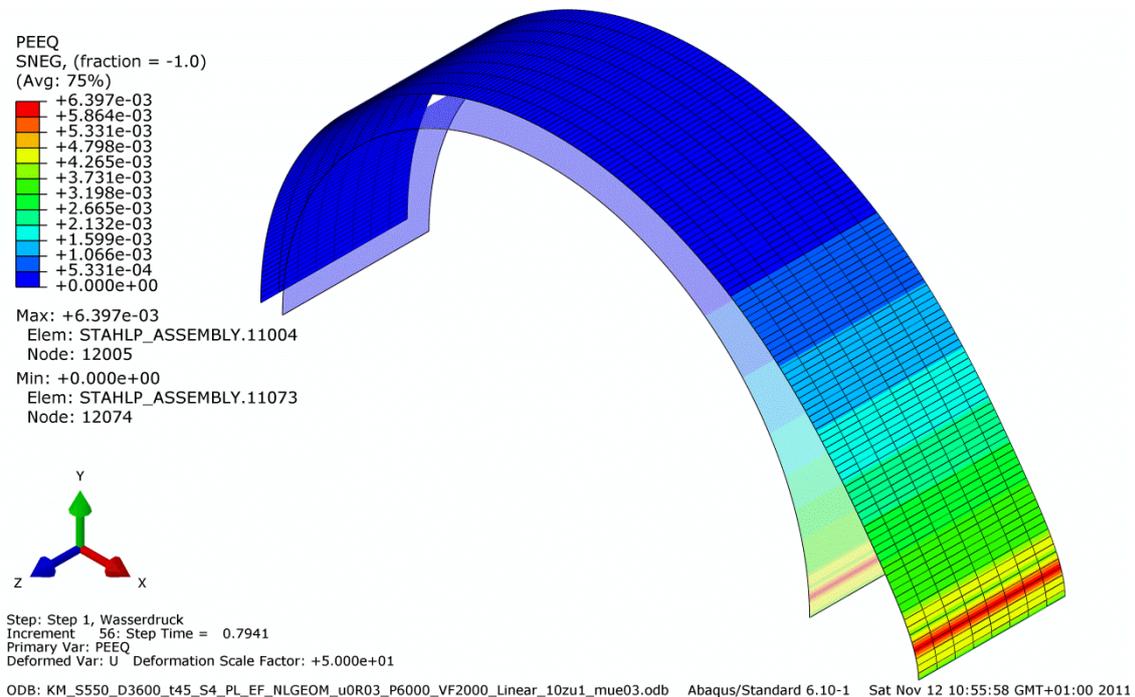


Abbildung 220: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

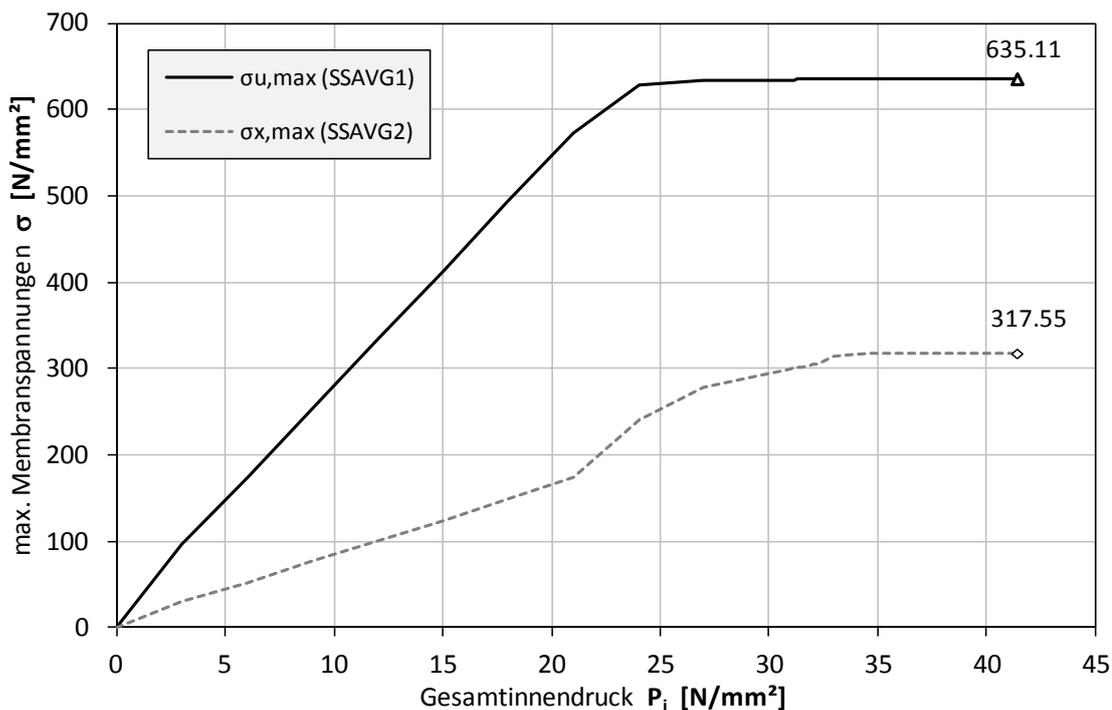


Abbildung 221: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

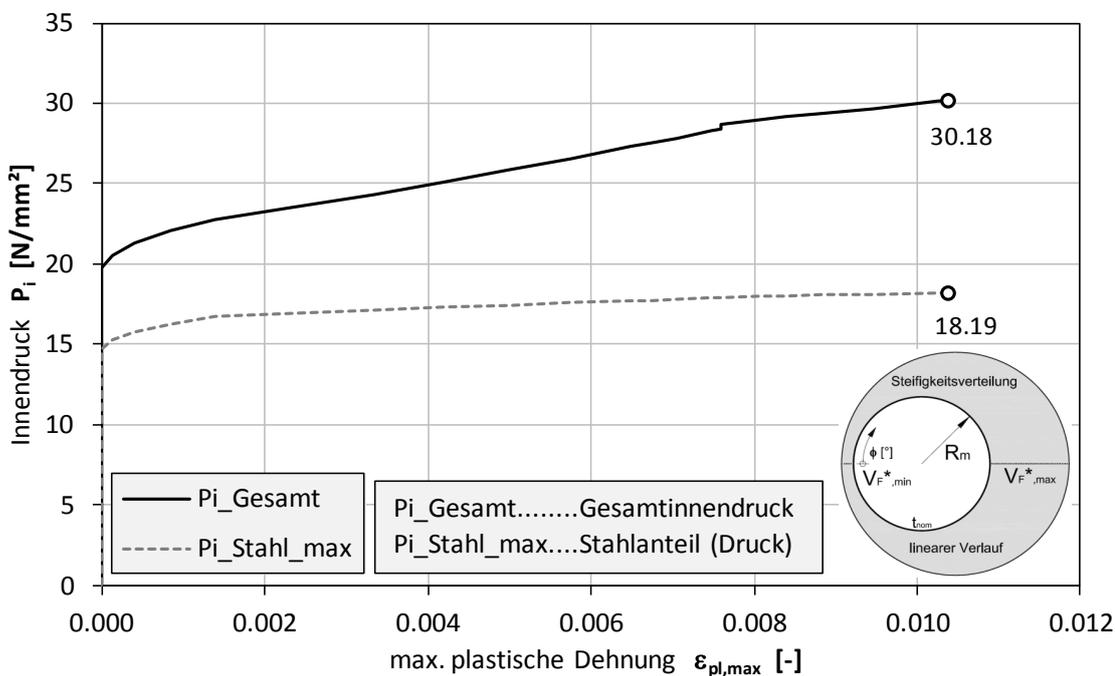


Abbildung 222: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.3.2.15 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

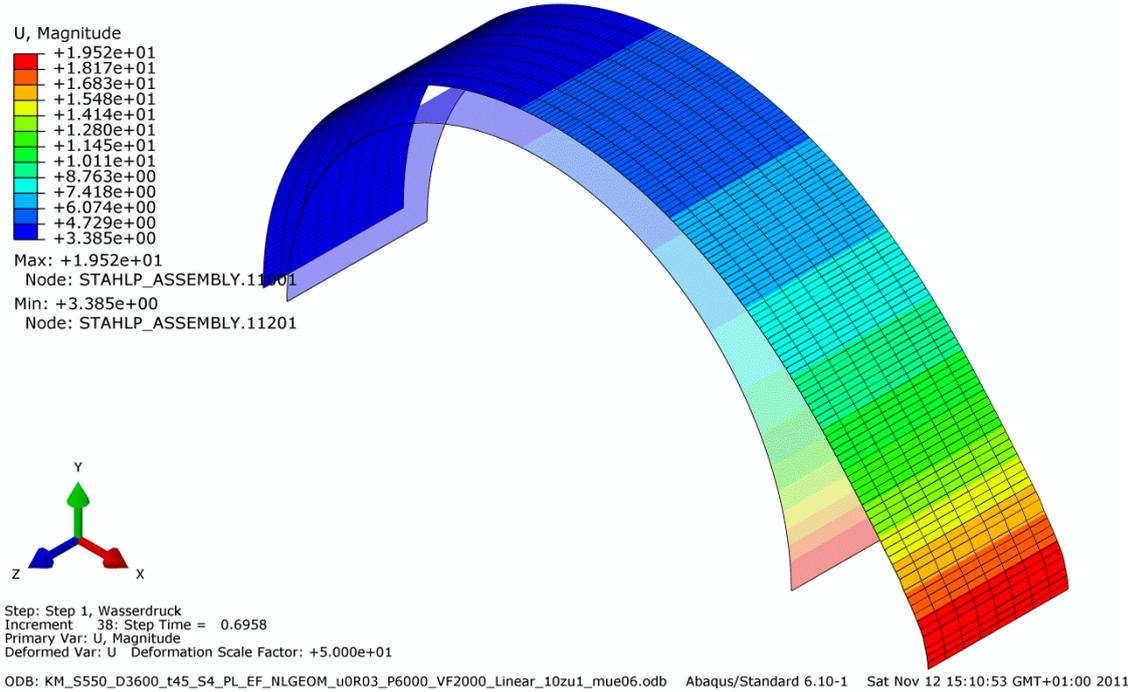


Abbildung 223: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

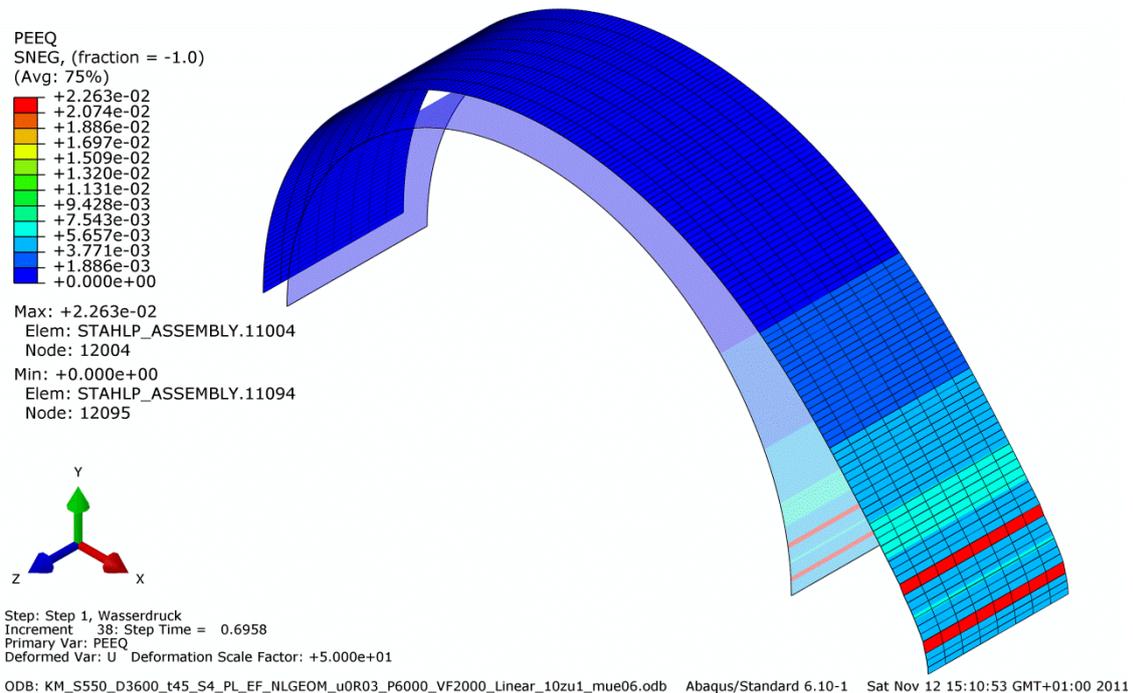


Abbildung 224: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

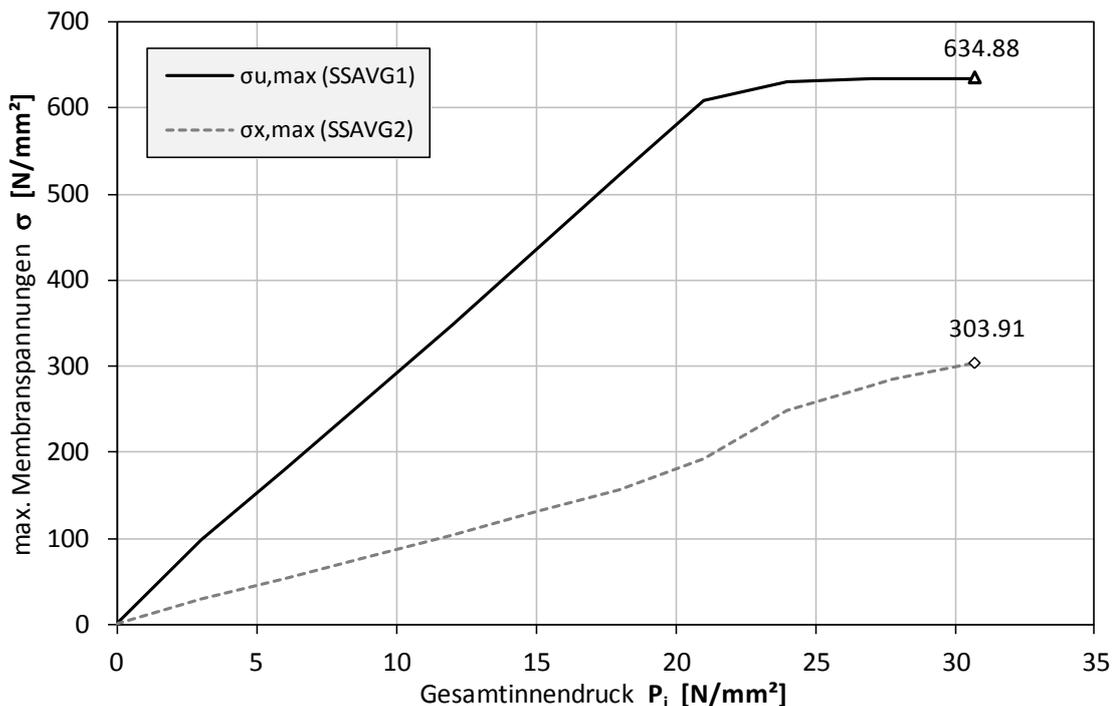


Abbildung 225: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

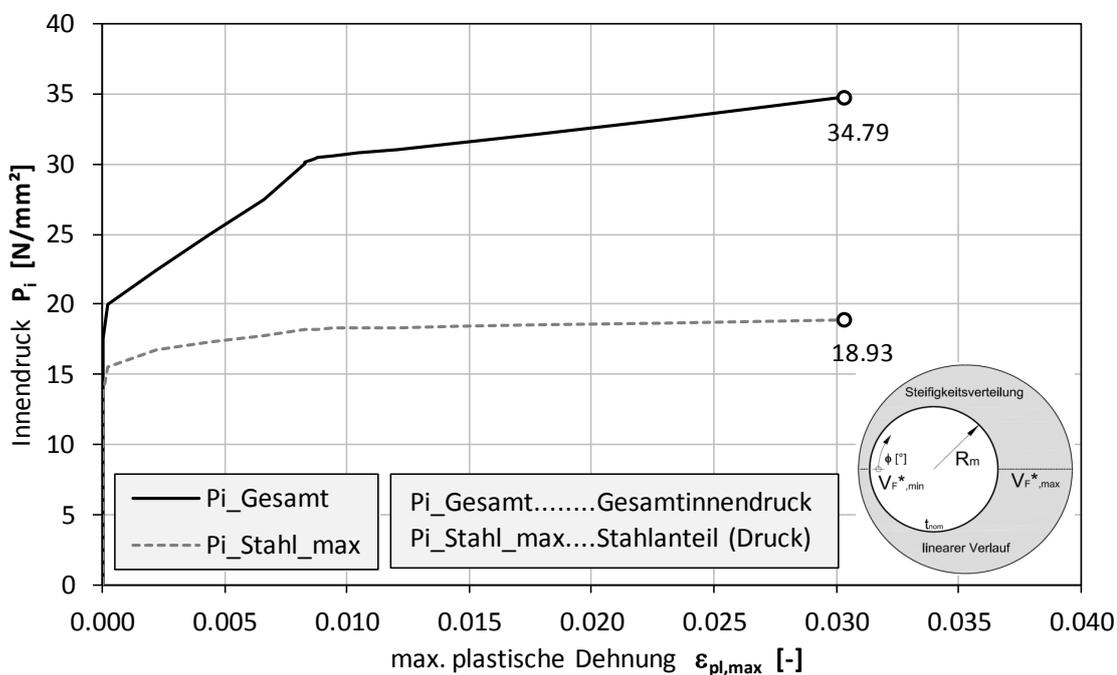


Abbildung 226: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.3.2.16 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

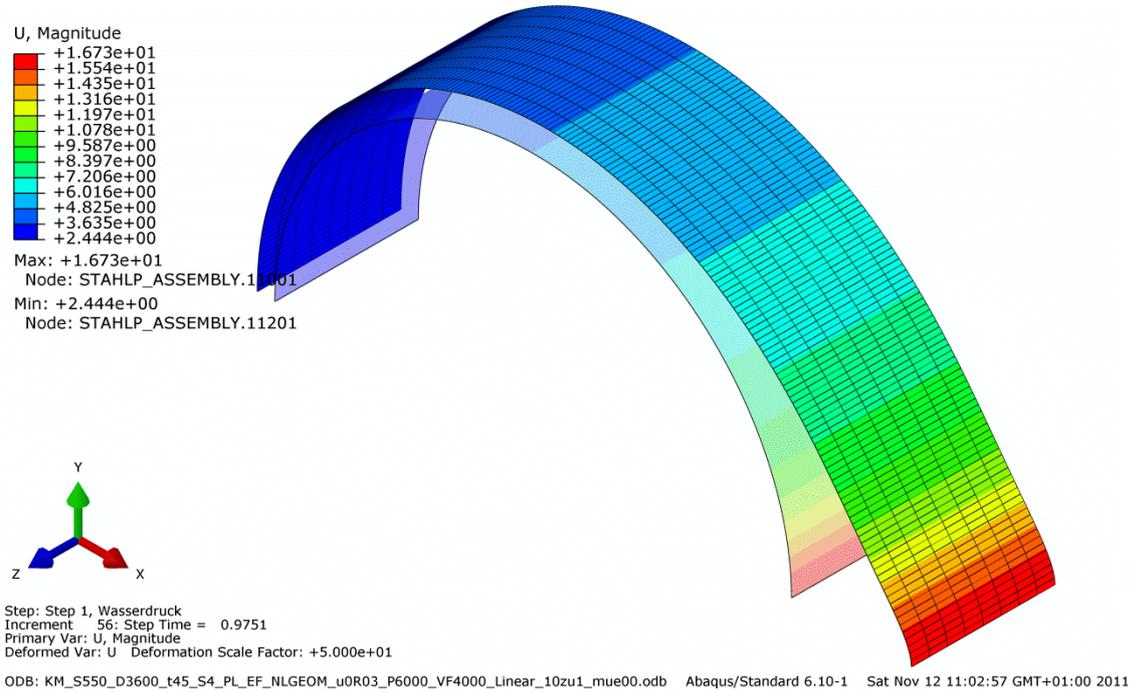


Abbildung 227: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

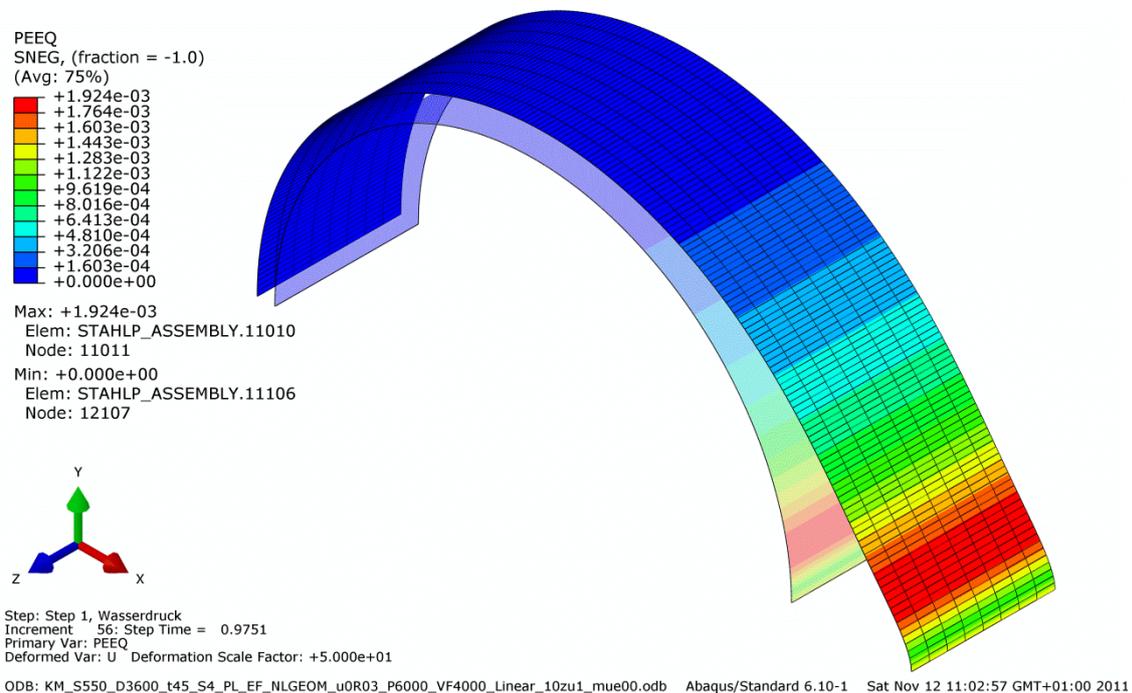


Abbildung 228: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

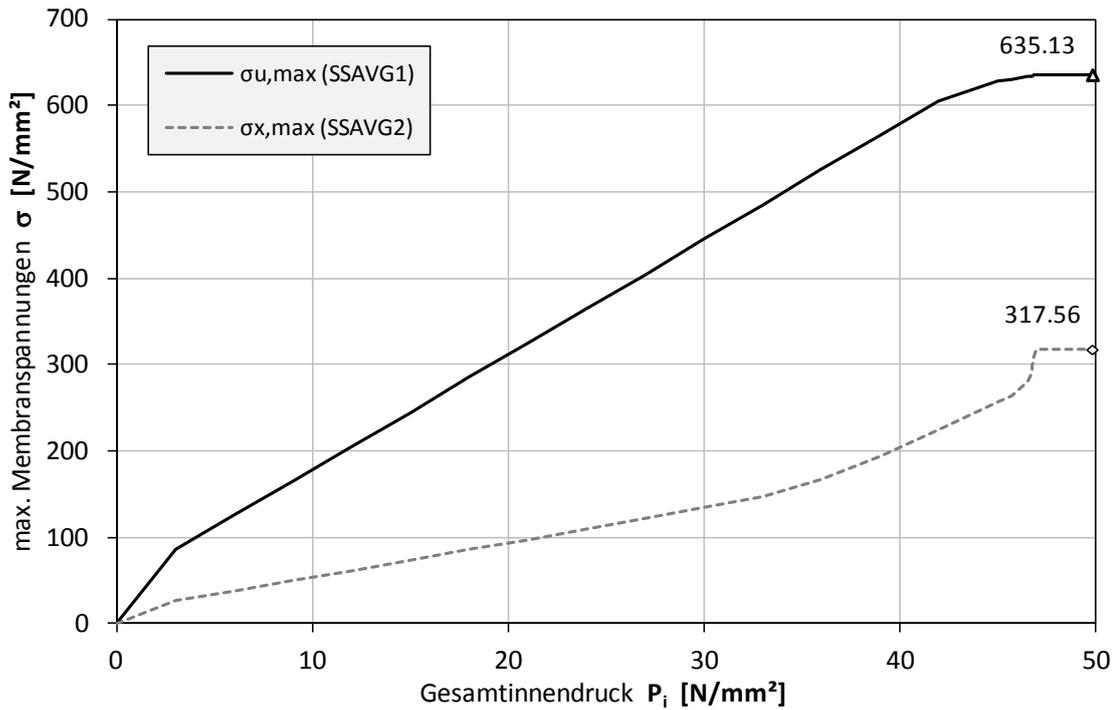


Abbildung 229: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zul\_mue00

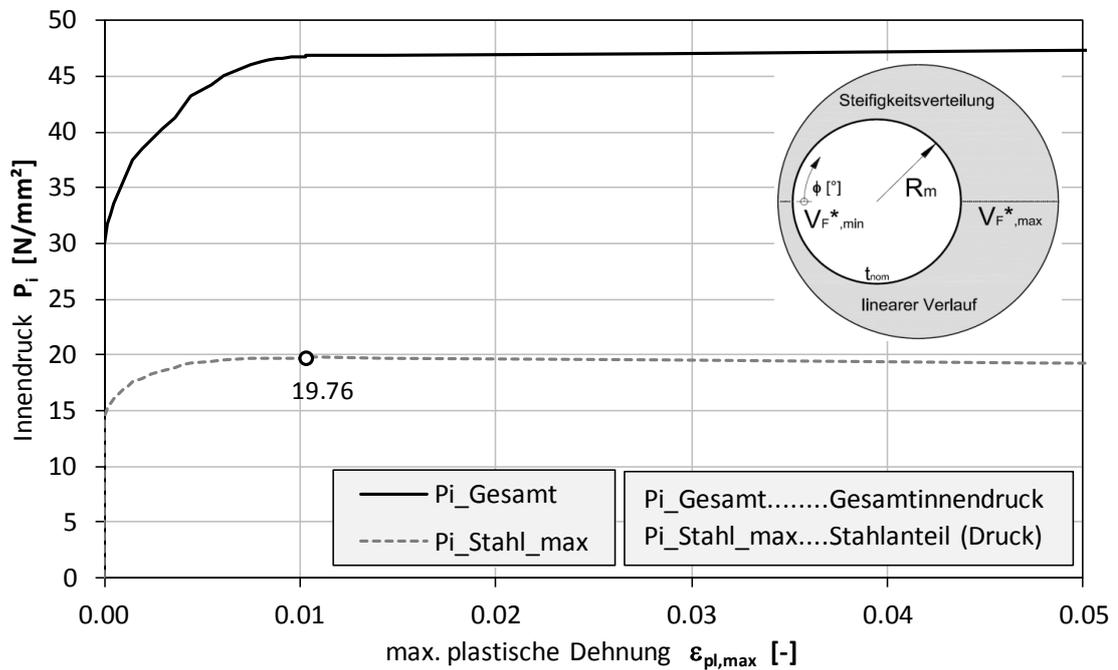


Abbildung 230: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zul\_mue00

7.3.2.17 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

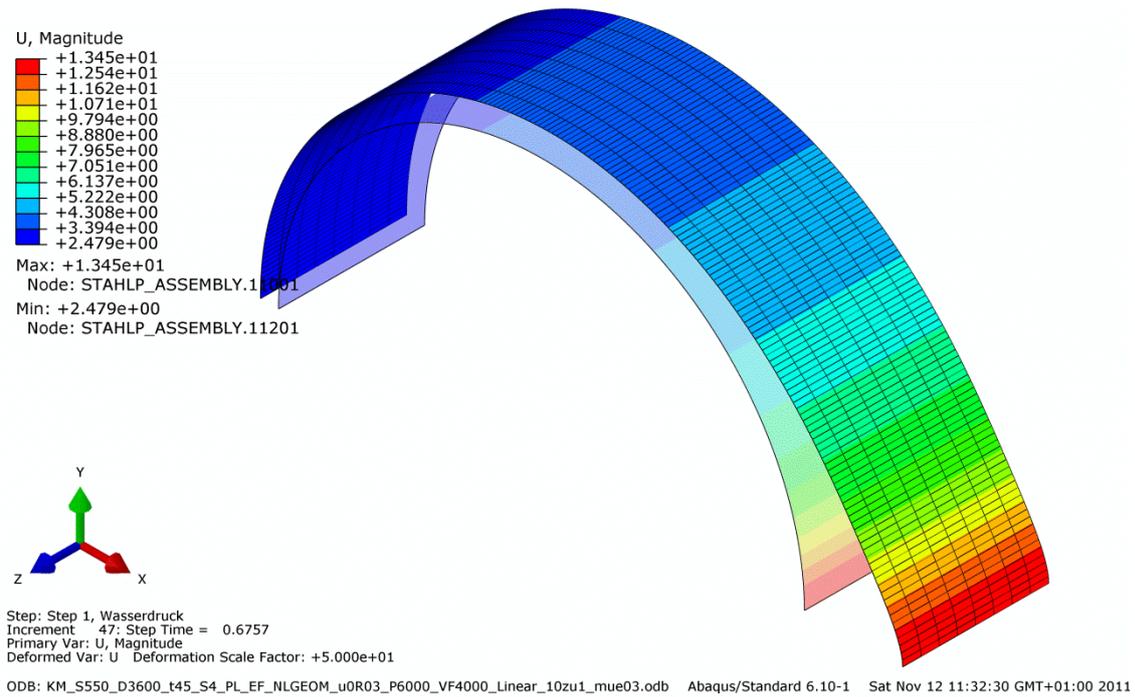


Abbildung 231: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

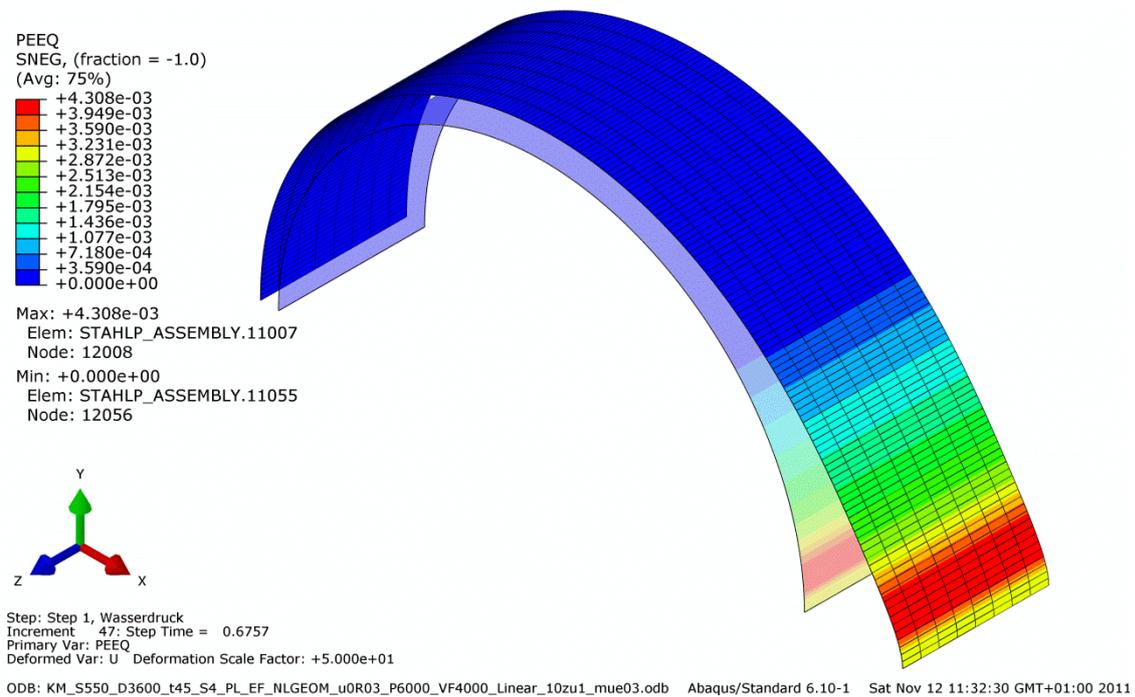


Abbildung 232: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

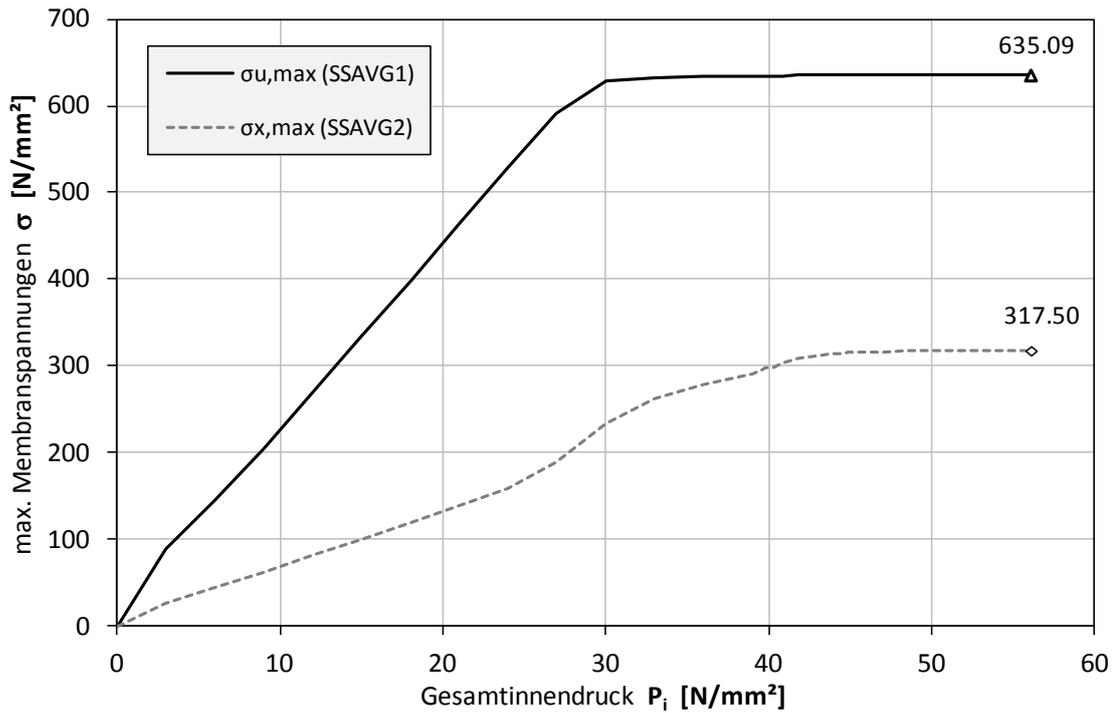


Abbildung 233: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

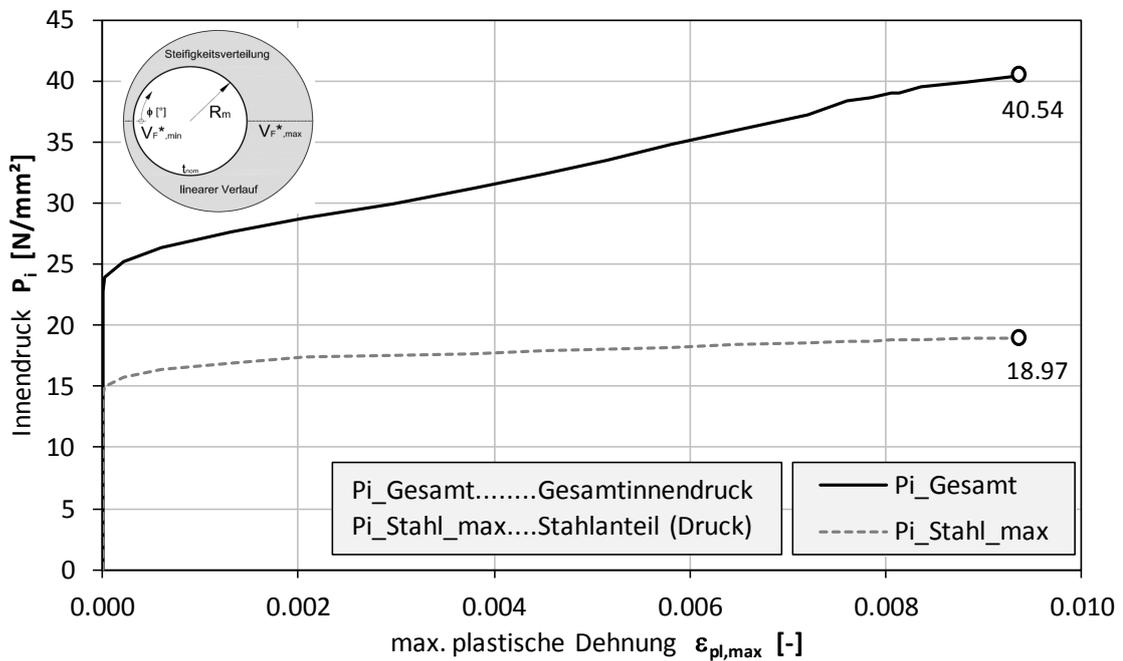


Abbildung 234: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.3.2.18 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

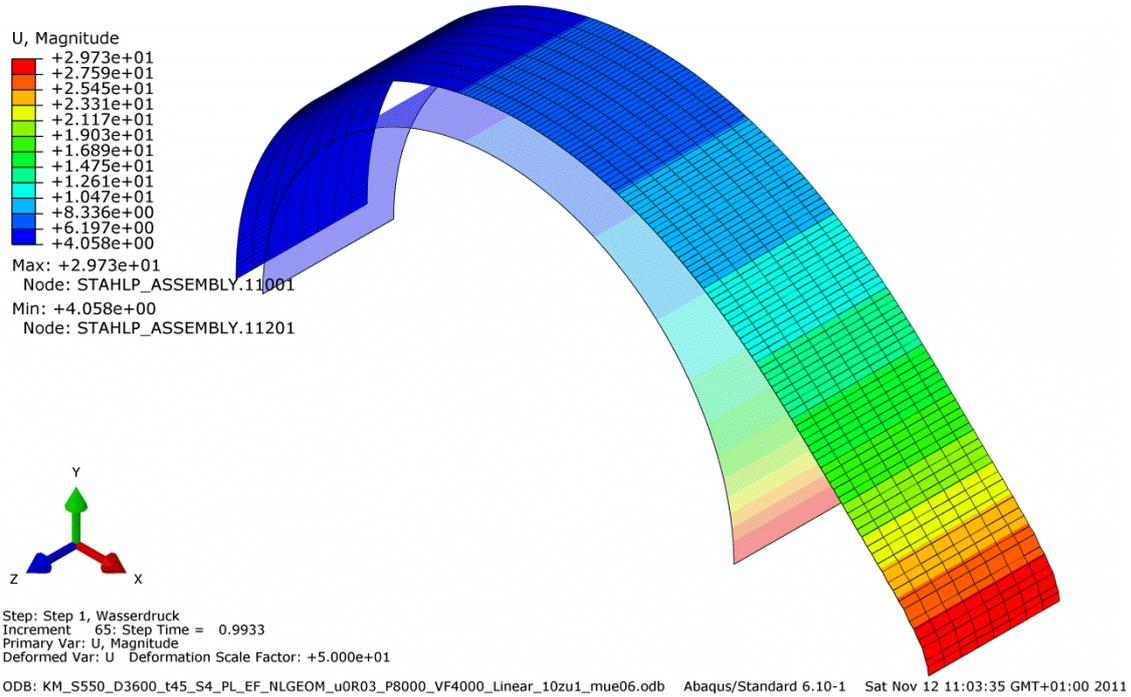


Abbildung 235: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

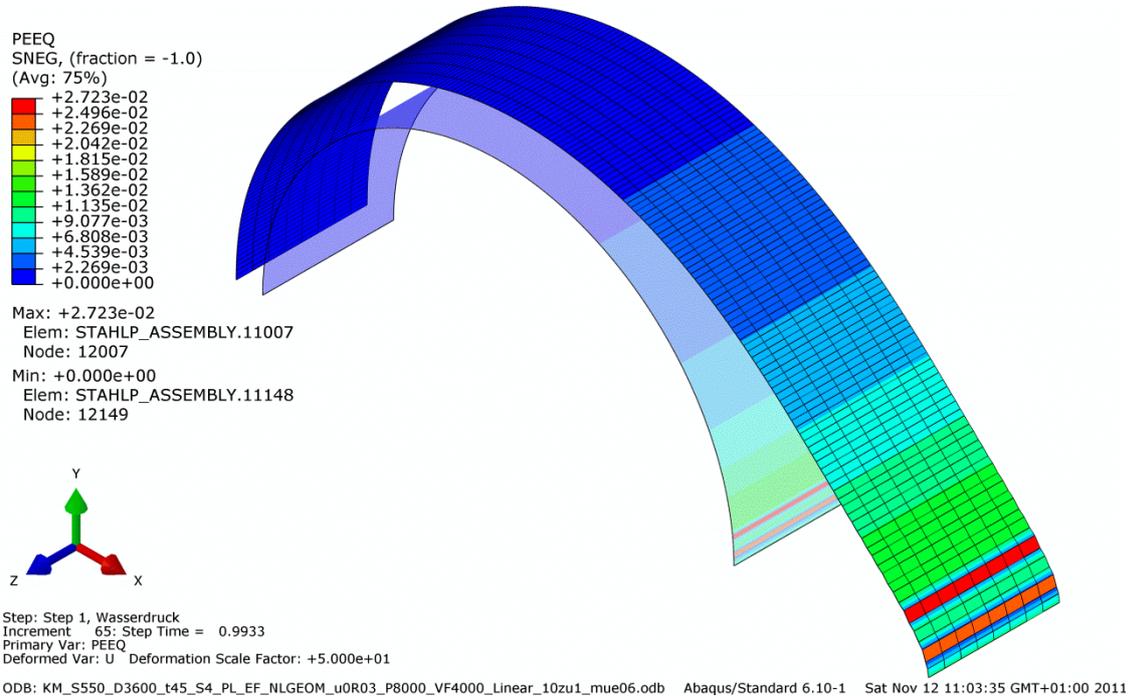


Abbildung 236: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

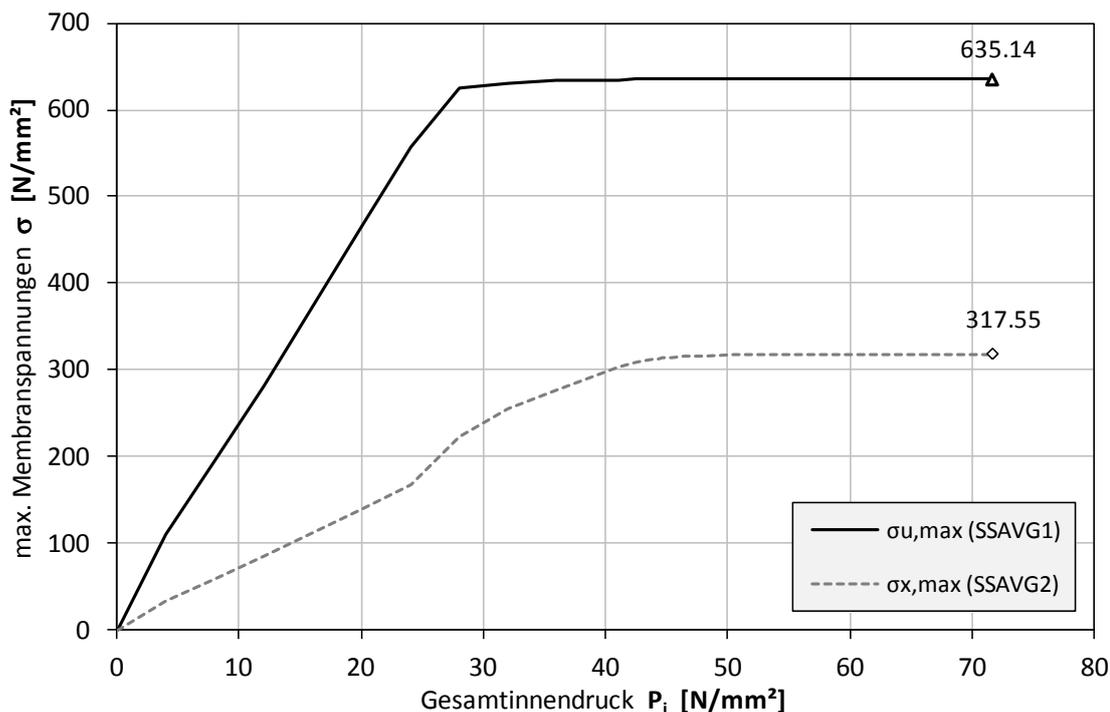


Abbildung 237: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

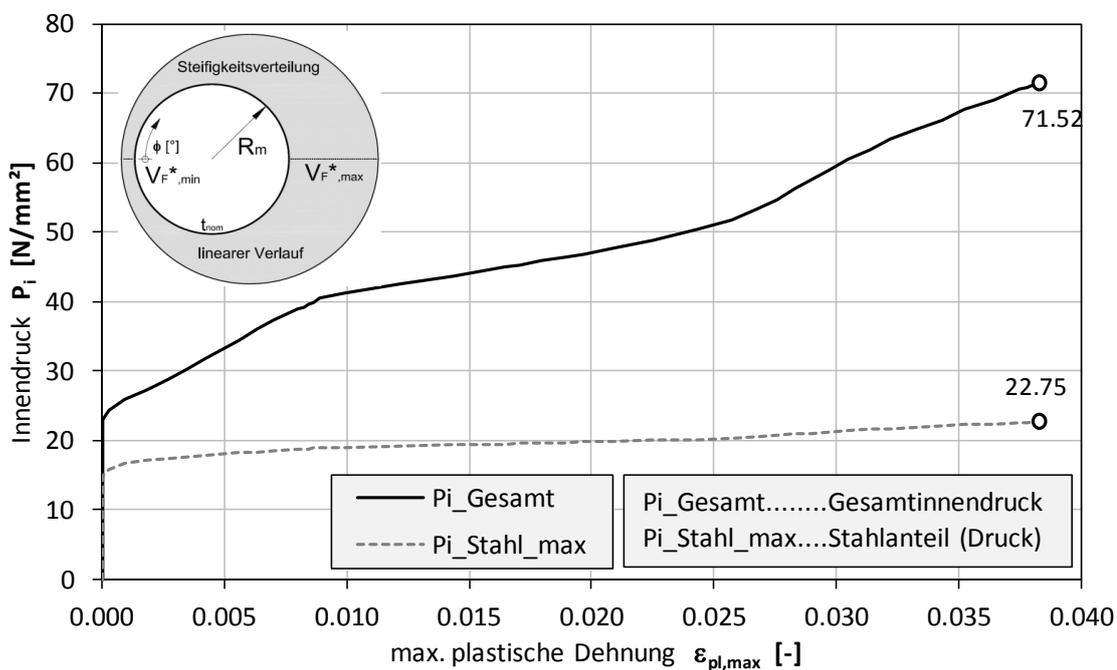


Abbildung 238: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

## 7.4 Bettungsfall: lokaler Sprung

### 7.4.1 *Detailauswertung Bettungsfall: lokaler Sprung*

Die Detailauswertung des Bettungsfalles: lokaler Sprung erfolgt auf gleiche Weise wie die des Bettungsfalles: linearer Verlauf.

Für Informationen und Bestimmungen dazu, sei der Leser auf Kapitel 7.3.1 verwiesen.

7.4.1.1 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2196\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

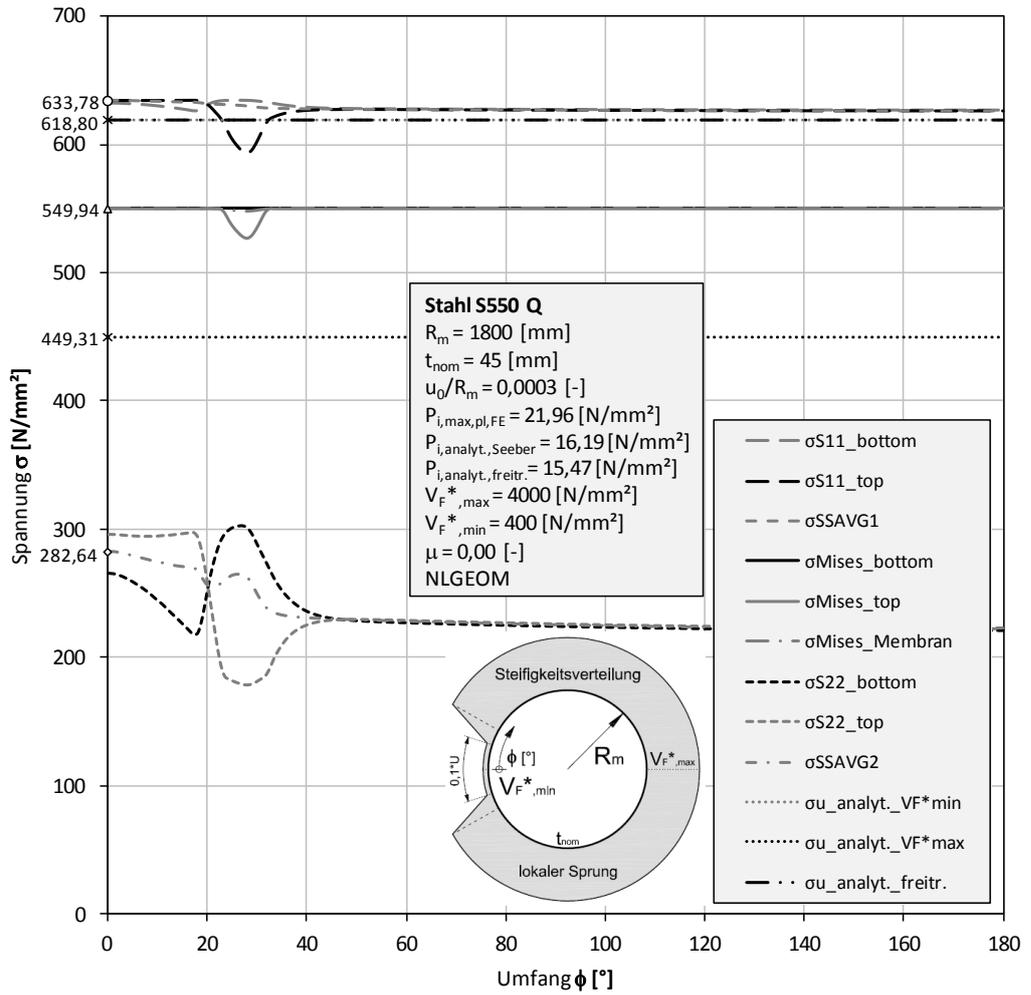


Abbildung 239: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2196\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

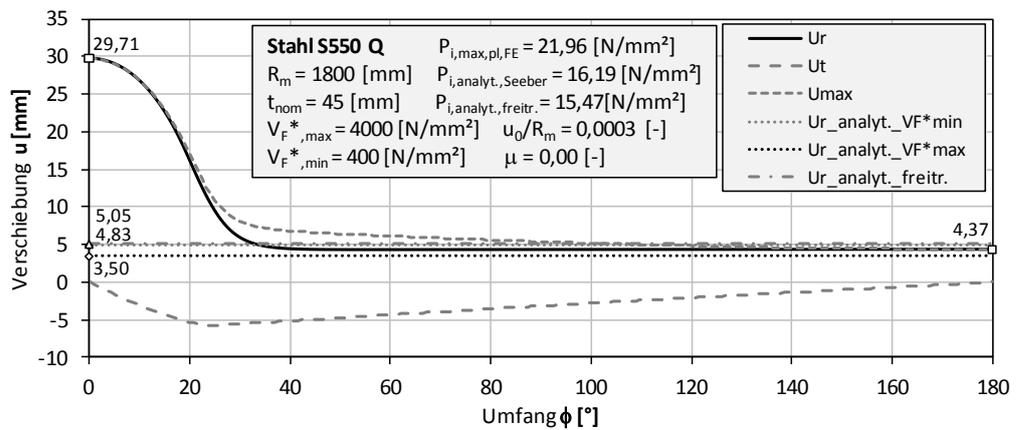


Abbildung 240: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2196\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

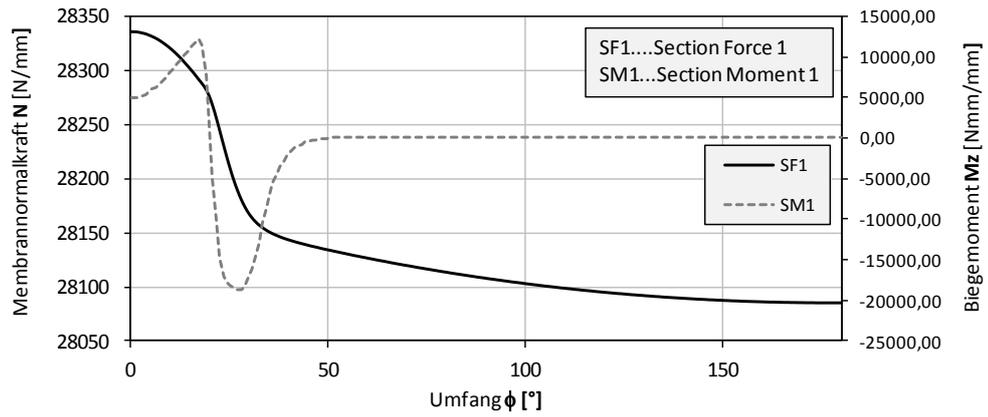


Abbildung 241: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2196\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

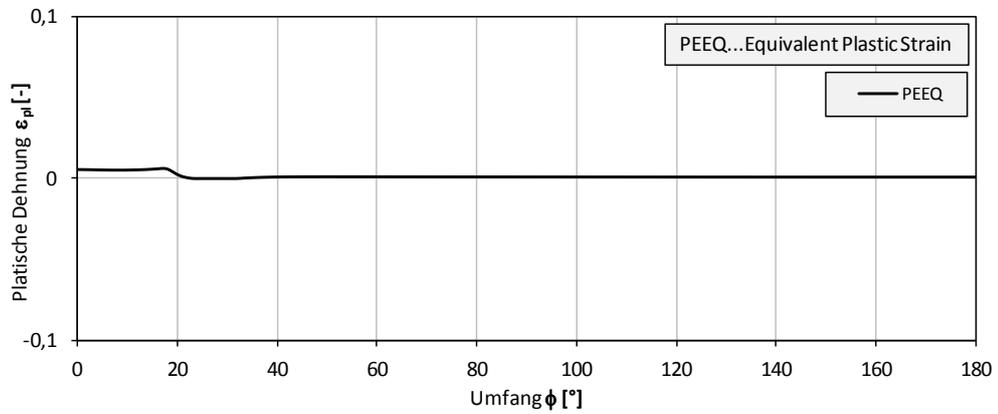


Abbildung 242: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2196\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

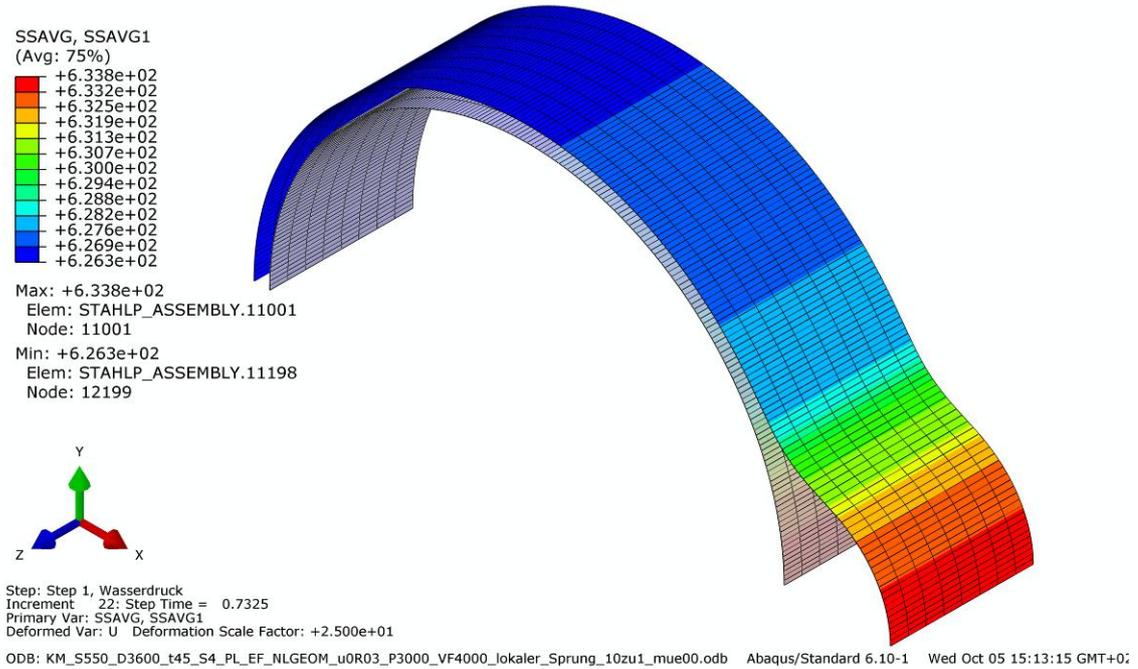


Abbildung 243: Umfangsmembranspannung SSAVG1  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

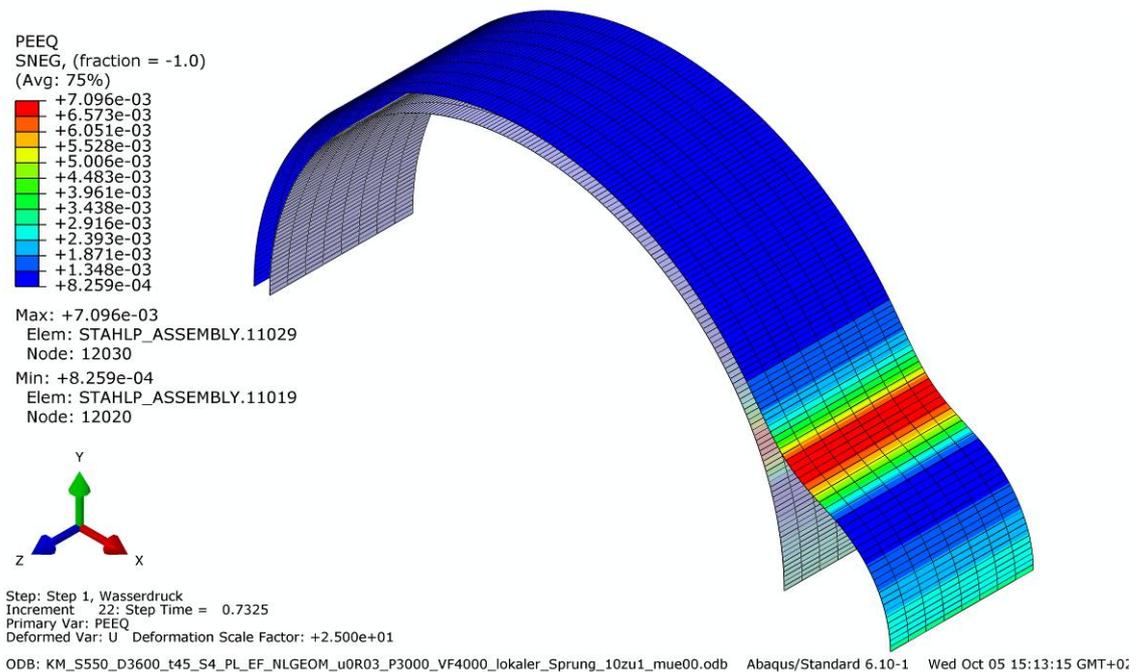


Abbildung 244: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

7.4.1.2 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2094\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

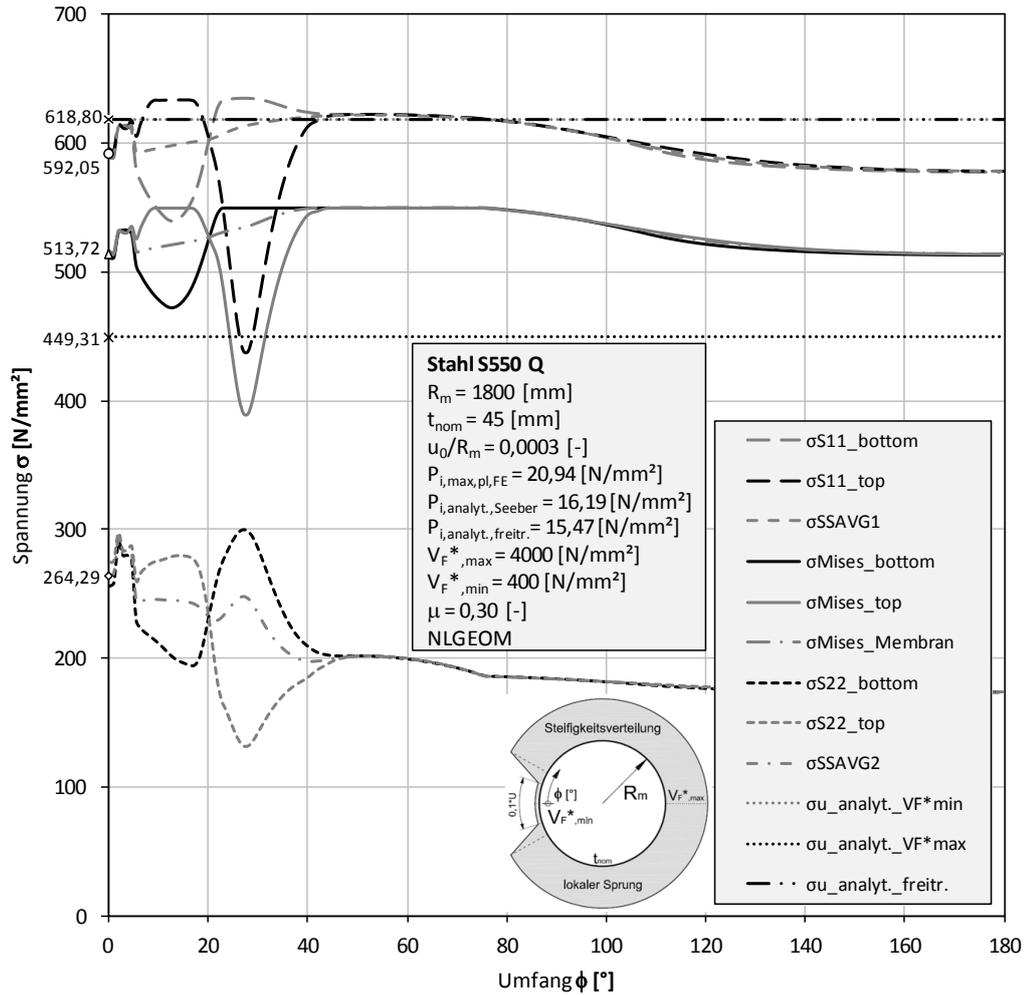


Abbildung 245: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2094\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

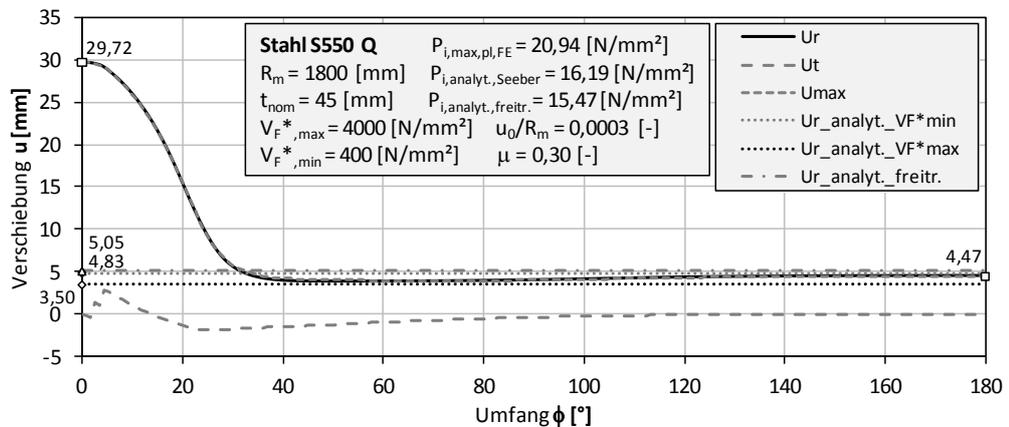


Abbildung 246: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2094\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

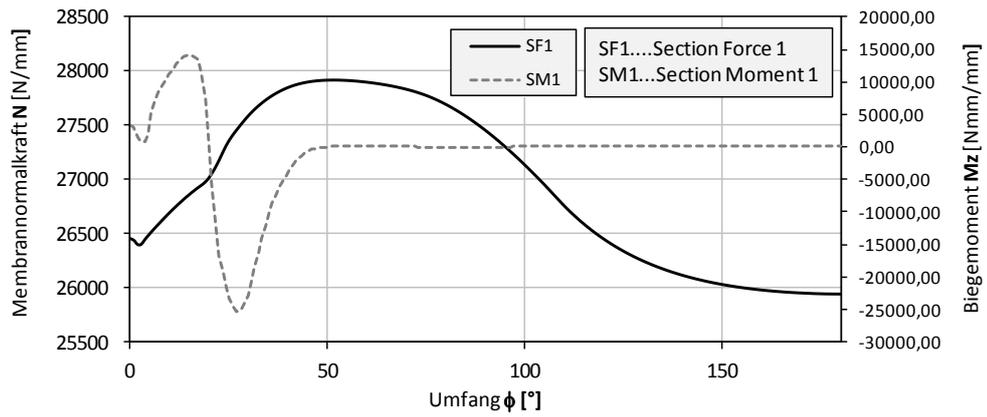


Abbildung 247: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2094\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

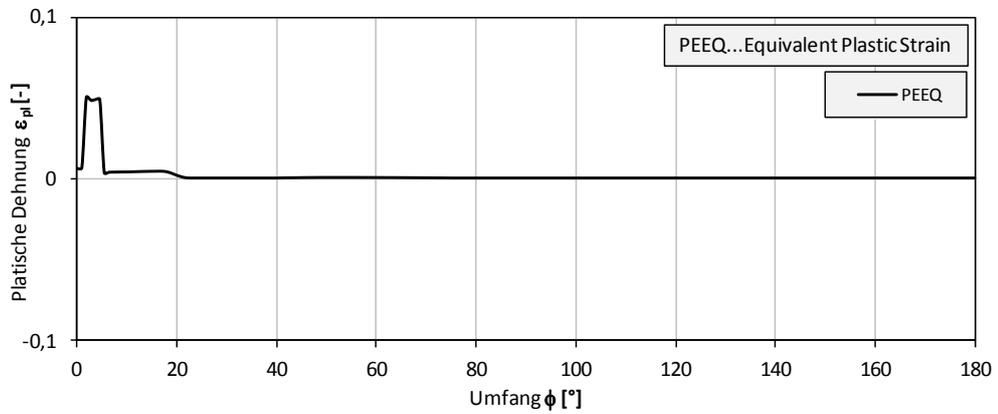


Abbildung 248: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2094\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

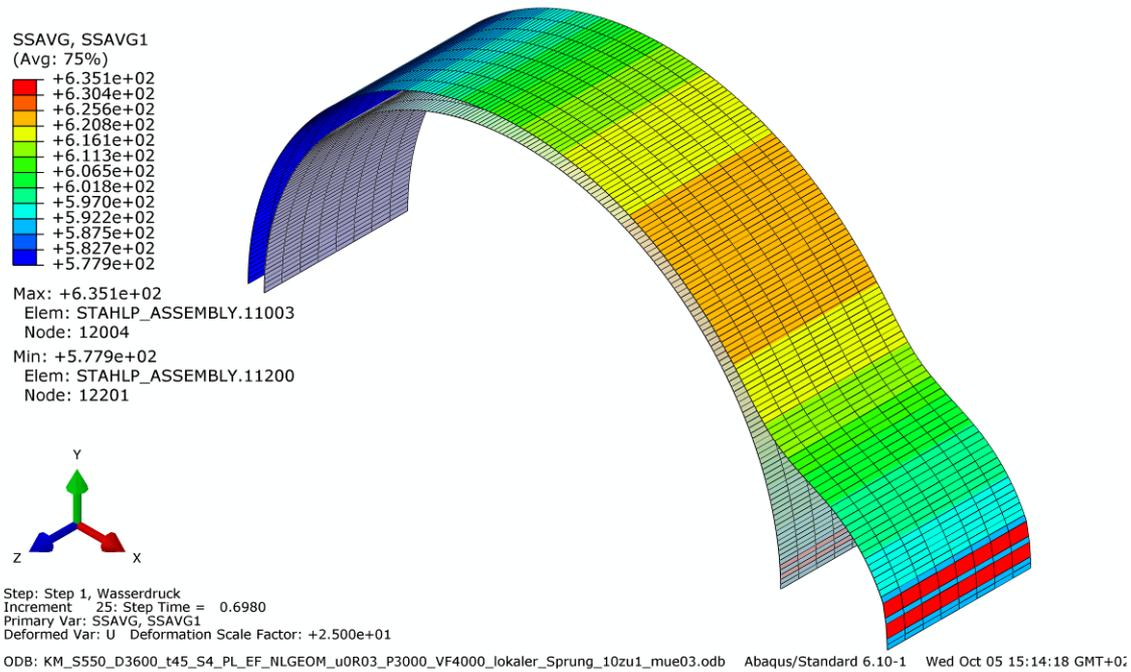


Abbildung 249: Umfangsmembranspannung SSAVG1  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

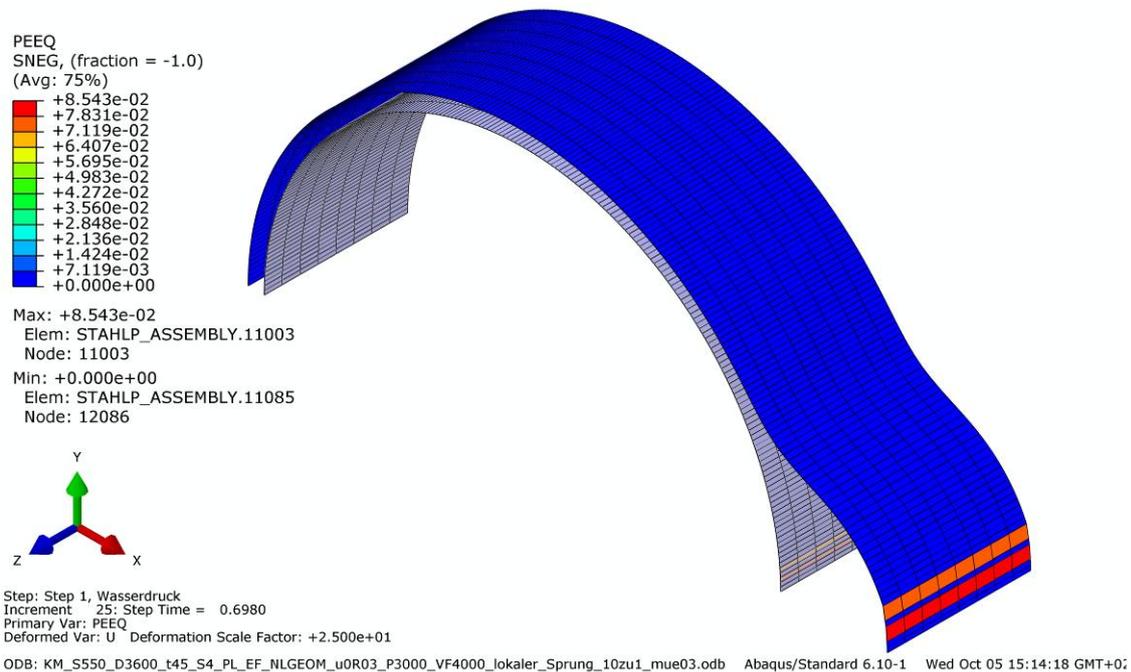


Abbildung 250: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

7.4.1.3 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2091\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

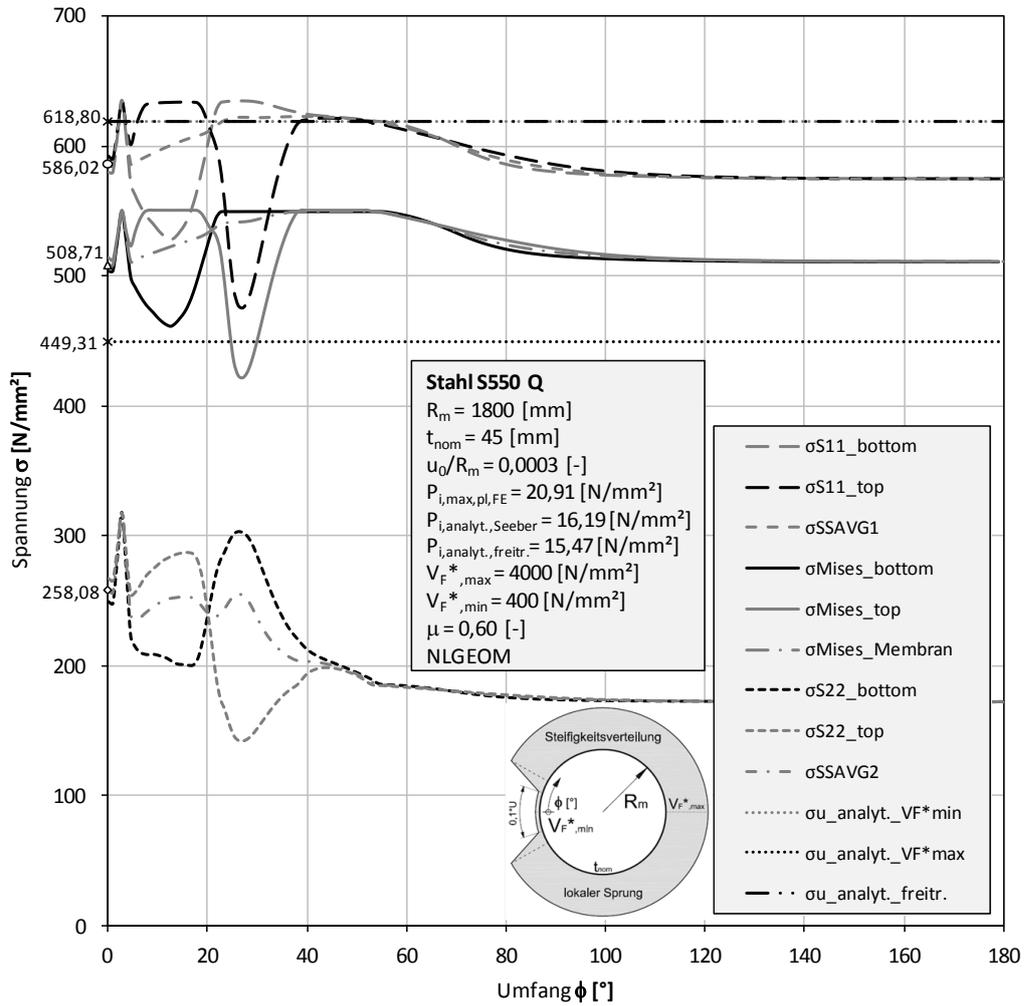


Abbildung 251: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2091\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

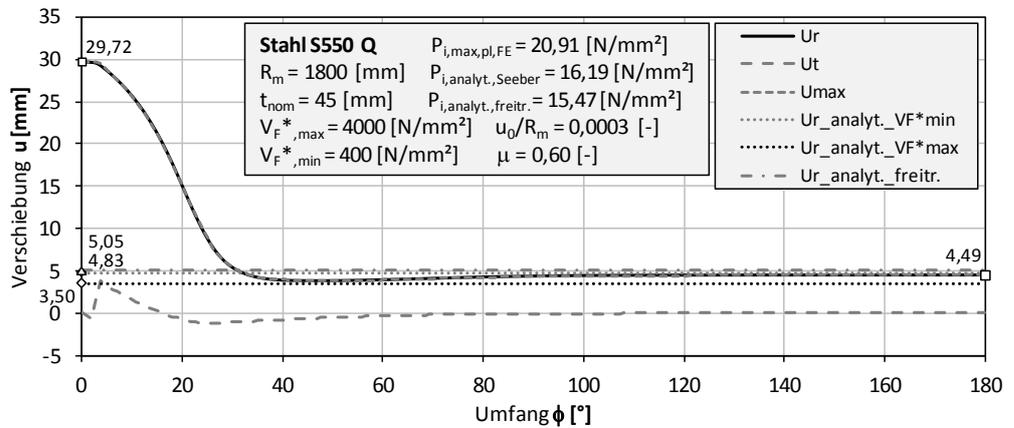


Abbildung 252: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2091\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

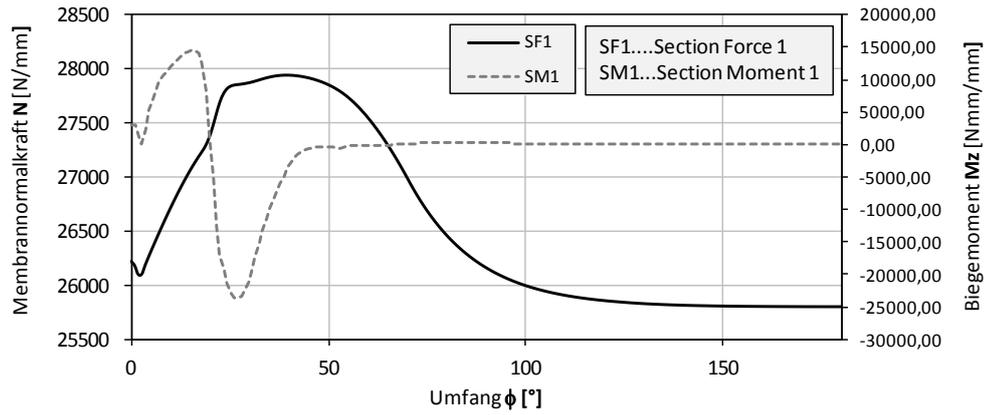


Abbildung 253: Schnittgrößen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2091\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

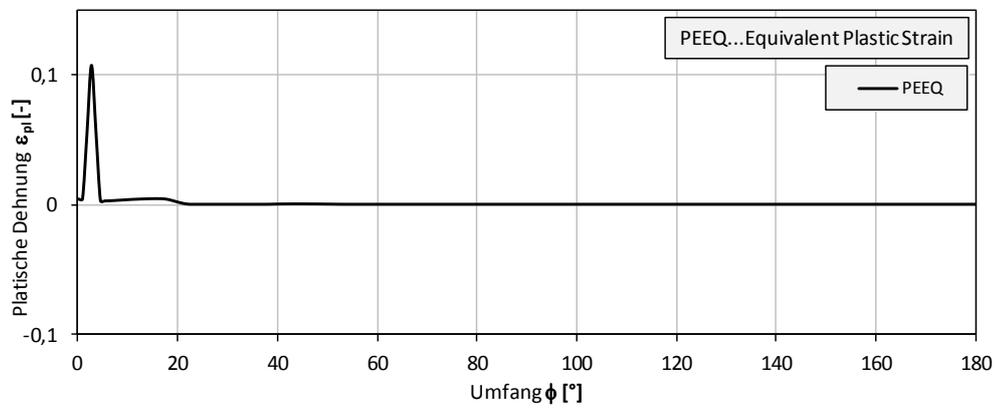


Abbildung 254: Plastische Dehnung

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P2091\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

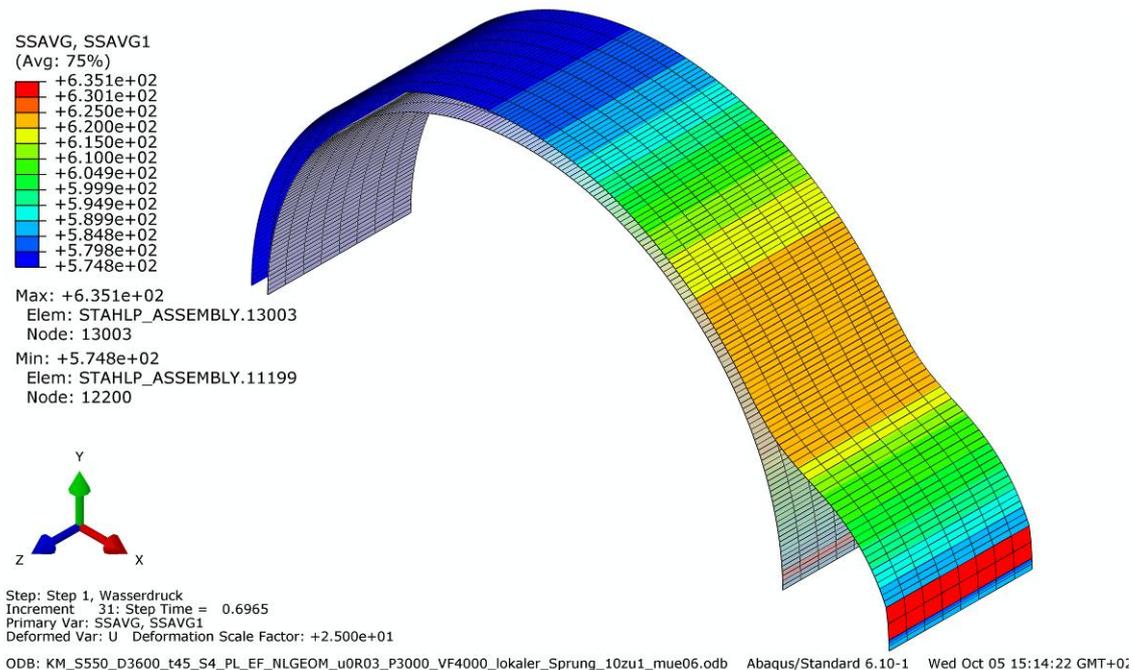


Abbildung 255: Umfangsmembranspannung SSAVG1  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

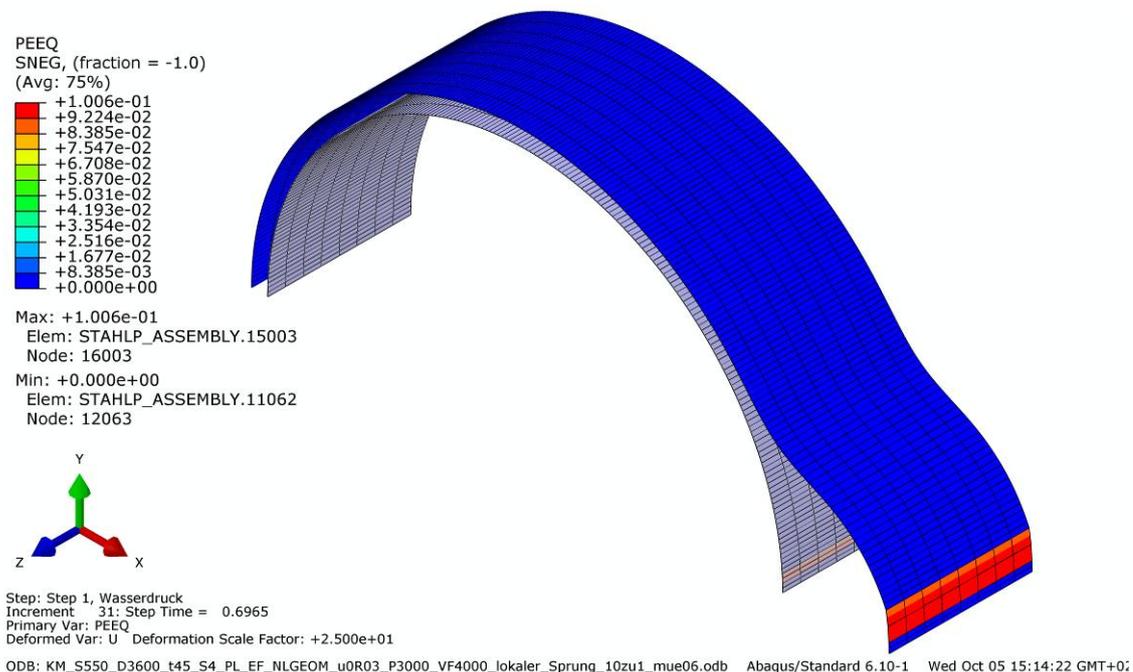


Abbildung 256: Plastische Dehnung PEEQ  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P3000\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

### 7.4.2 Parameterstudie Bettungsfall: lokaler Sprung

Die Parameterstudie erfolgt wie in Tabelle 15 aufgeführt an folgenden Bemessungsfällen.

Tabelle 15: Übersicht Bemessungsfällt, Plastische Parameterstudie

<b>Parameterstudie Bettungsfall: Linearer Verlauf</b>				
D=3600		$u_0/R_m = 0.0003$ [-]		[mm]/[-]
$R_m/t = 200, t = 9$	$V_F^* = 1000$	$V_F^* = 4000$	$V_F^* = 10000$	[-]/[mm]/[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu = 0.00$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.30$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.60$	✓	✓	✓	[-]
$R_m/t = 40, t = 45$	$V_F^* = 1000$	$V_F^* = 4000$	$V_F^* = 10000$	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu = 0.00$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.30$	✓	✓	✓	[-]
$\mu = 0.60$	✓	✓	✓	[-]

Die Parameterstudie des Bettungsfalles: lokaler Sprung erfolgt auf gleiche Weise wie die des Bettungsfalles: linearer Verlauf.

Für Informationen und Bestimmungen dazu, sei der Leser auf Kapitel 7.3.2 verwiesen.



7.4.2.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

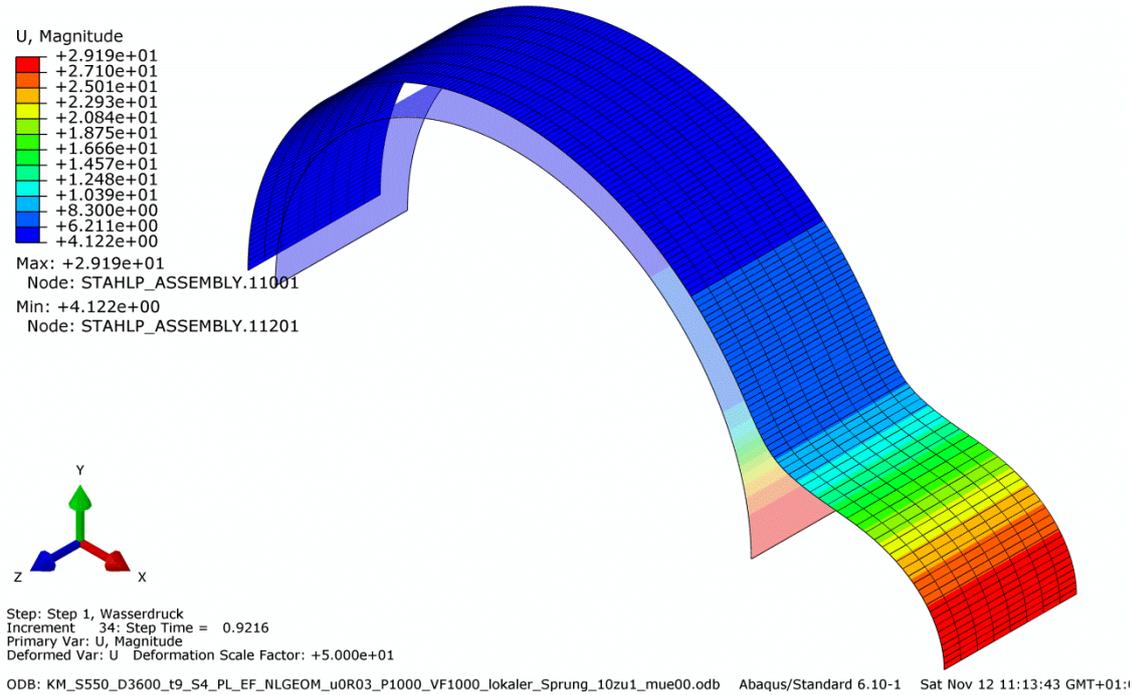


Abbildung 257: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

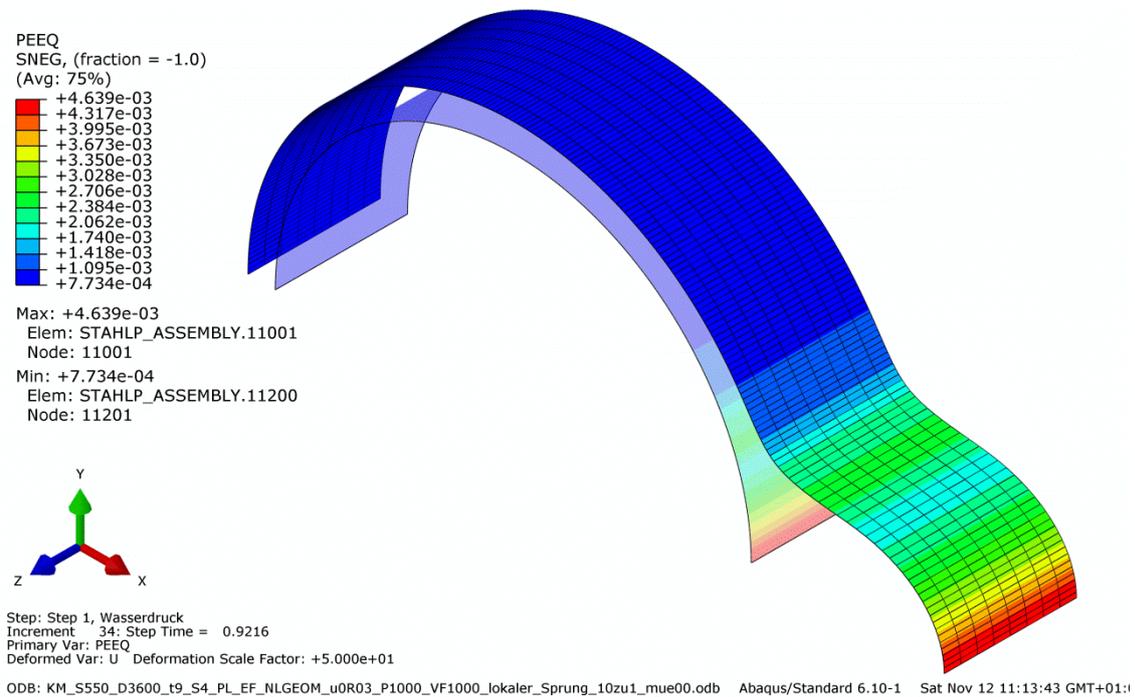


Abbildung 258: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

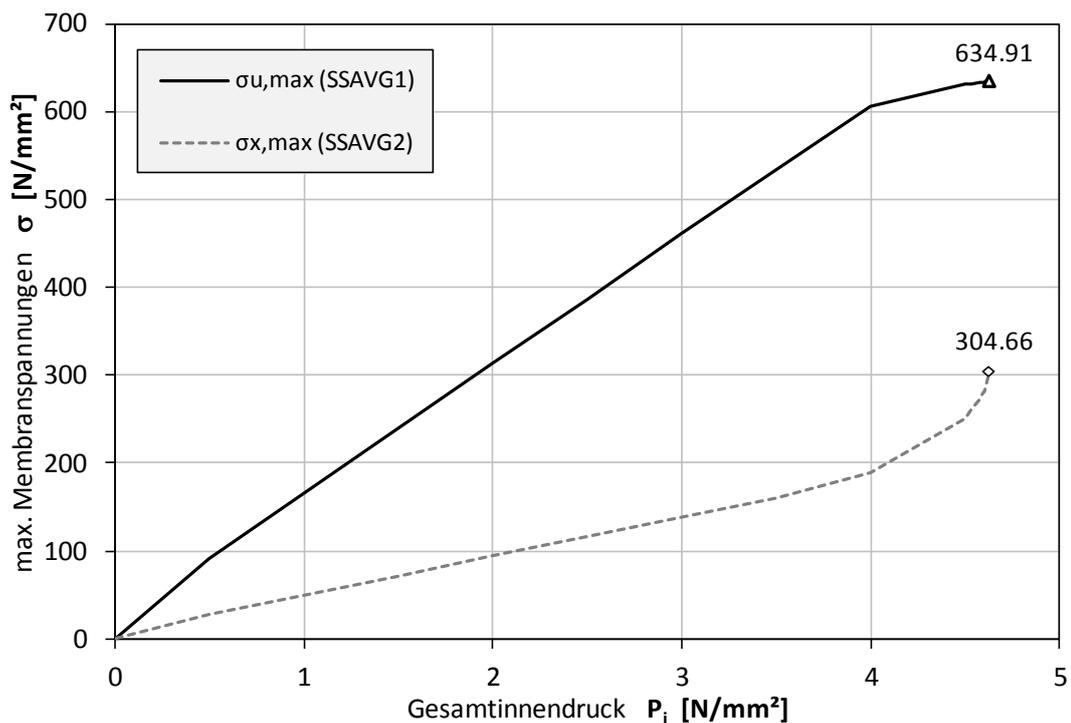


Abbildung 259: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

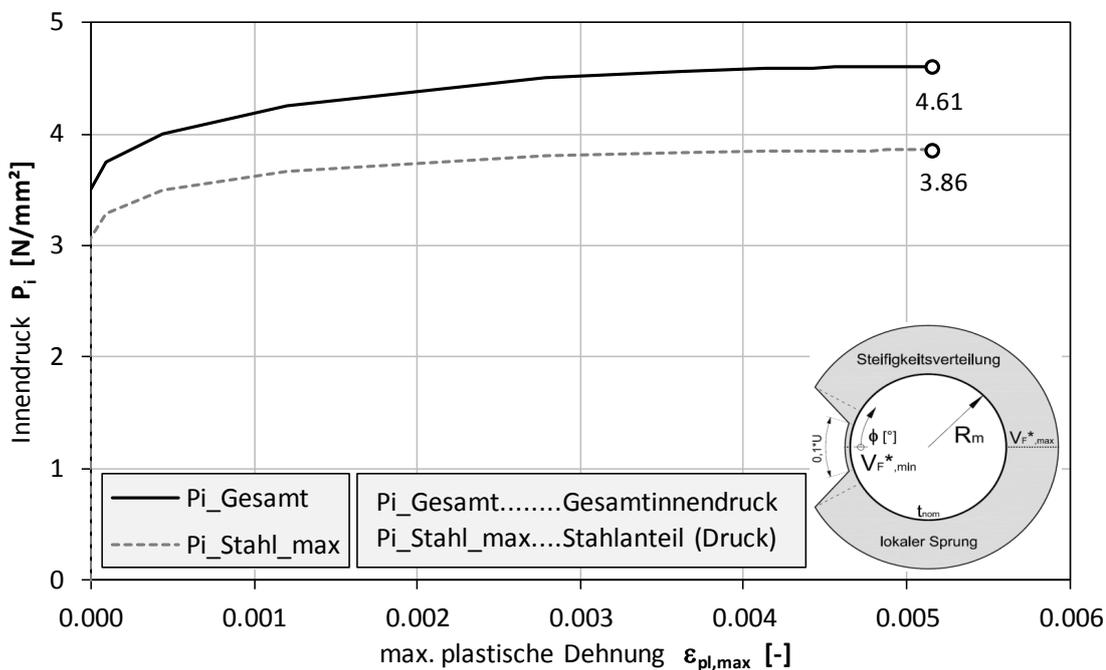


Abbildung 260: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

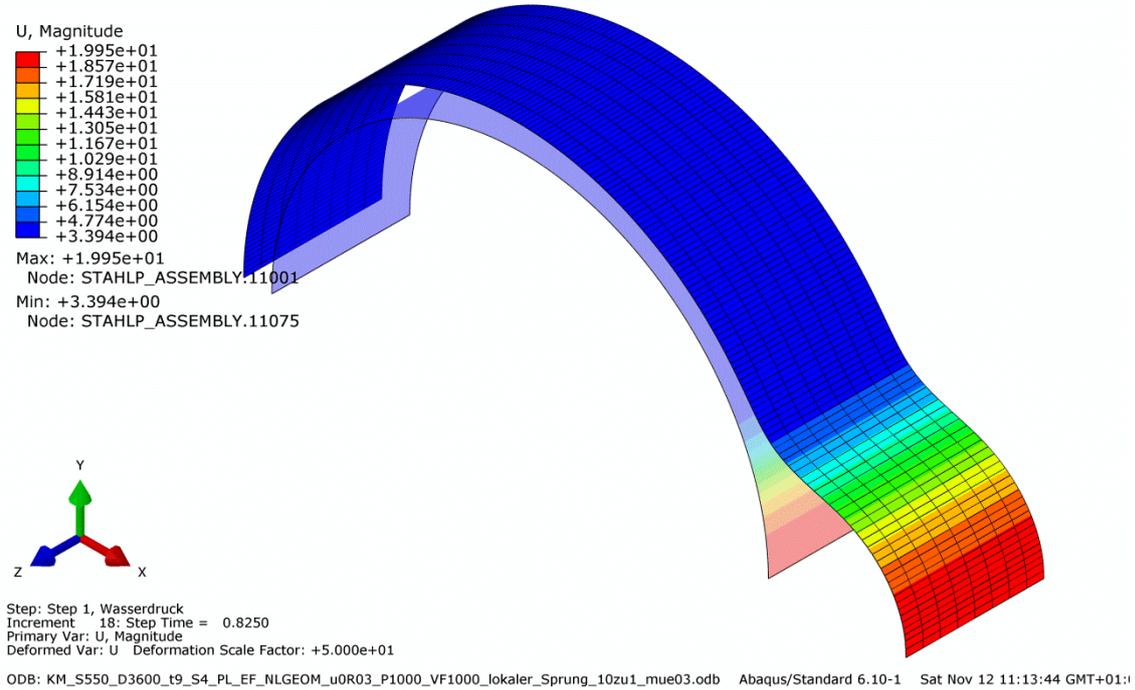


Abbildung 261: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

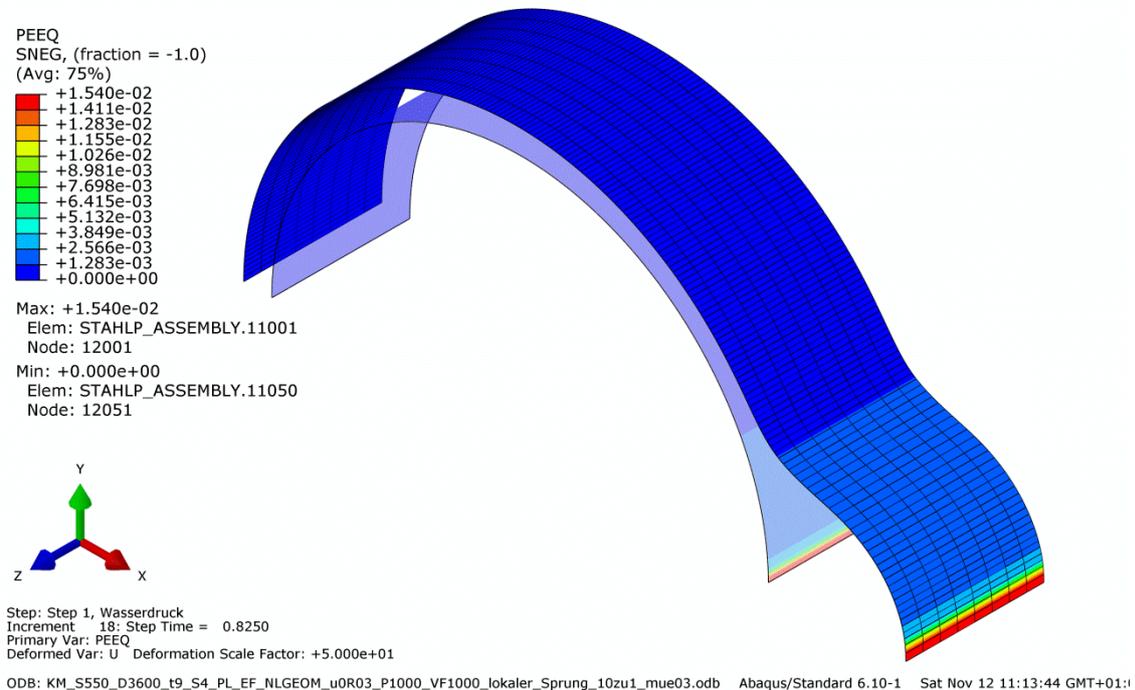


Abbildung 262: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

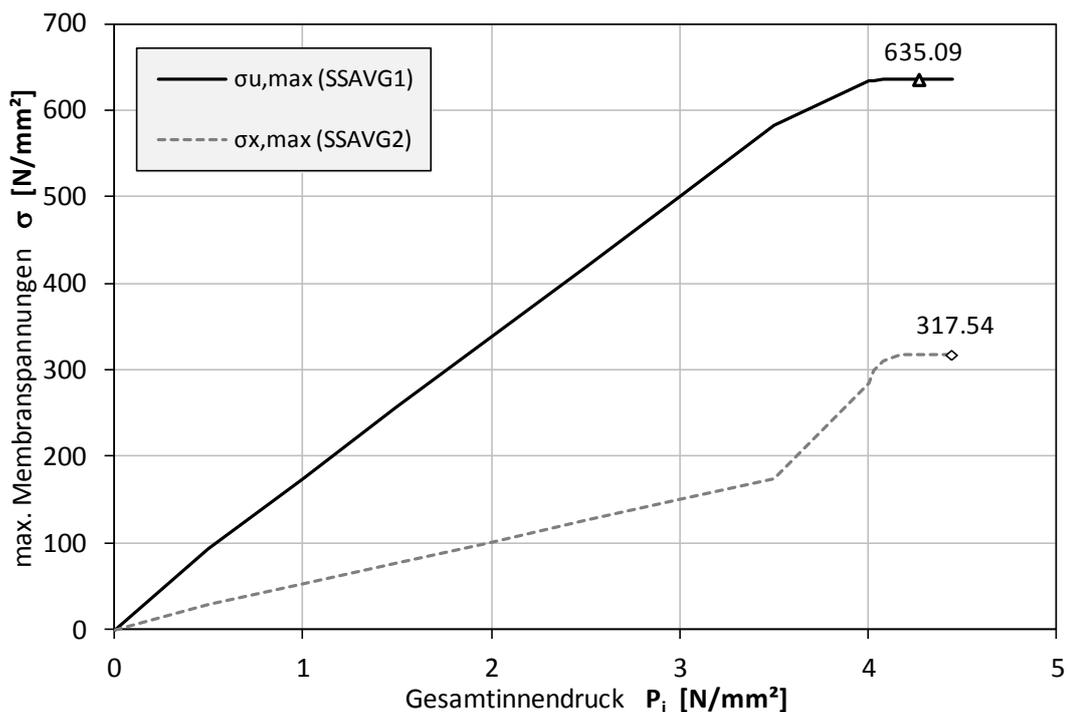


Abbildung 263: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

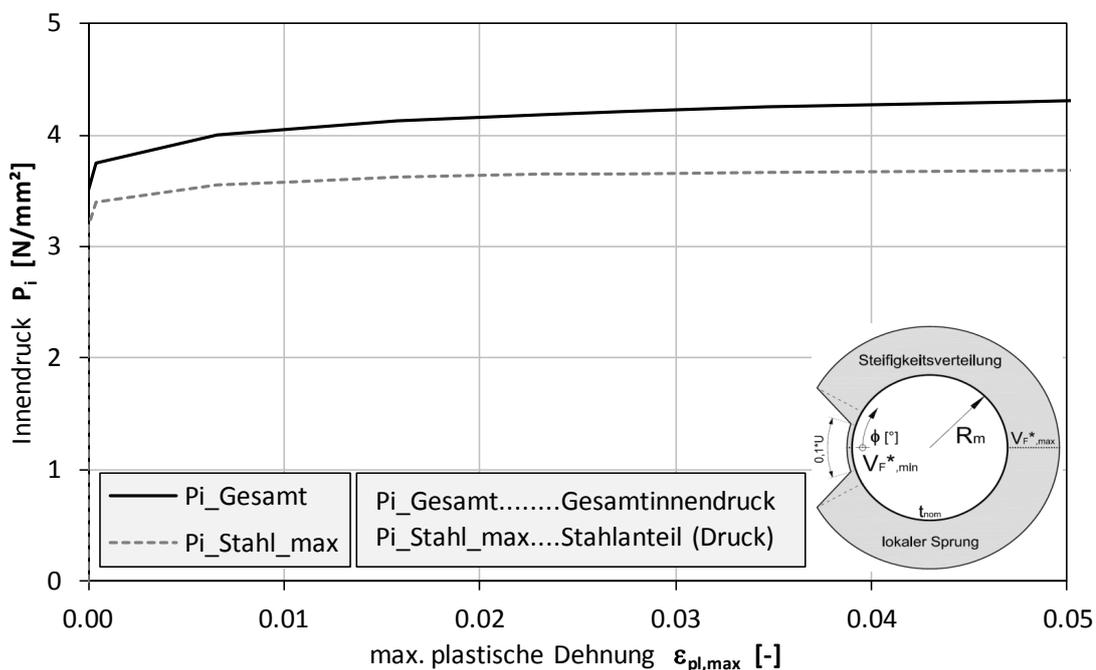


Abbildung 264: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

### 7.4.2.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

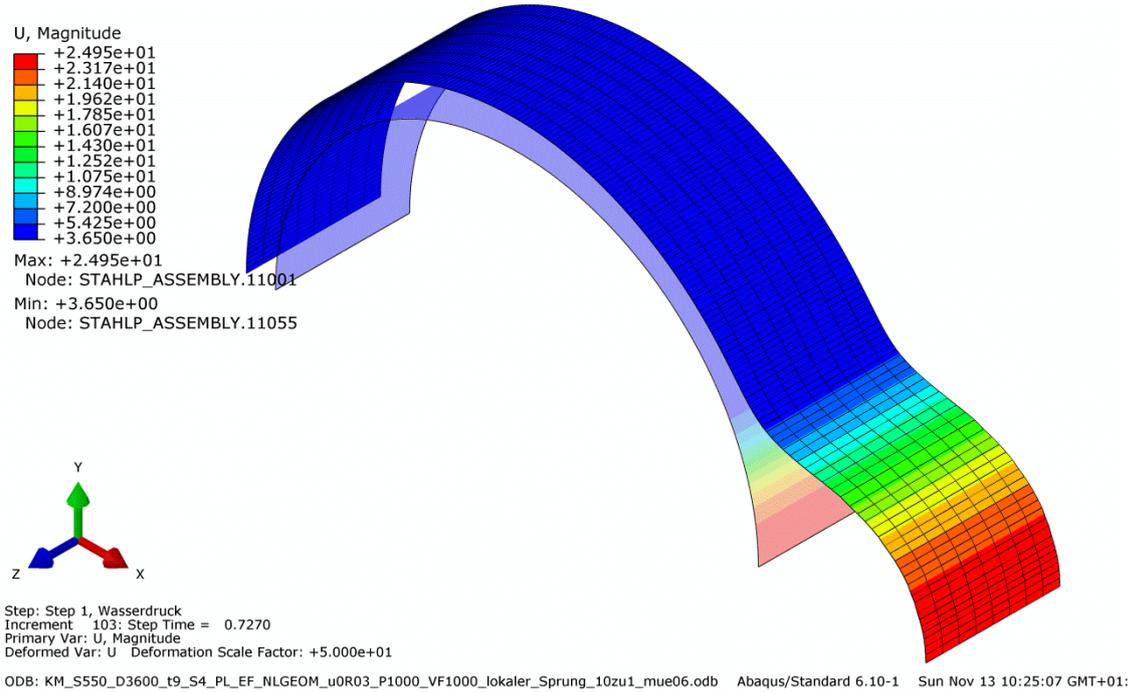


Abbildung 265: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

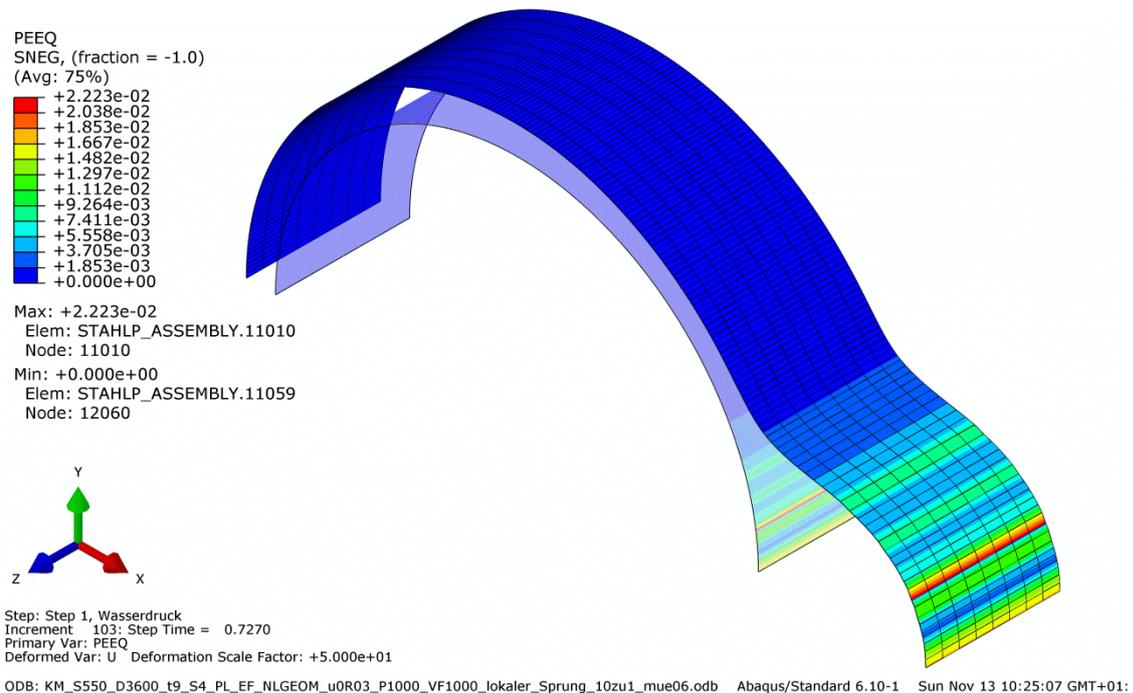


Abbildung 266: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

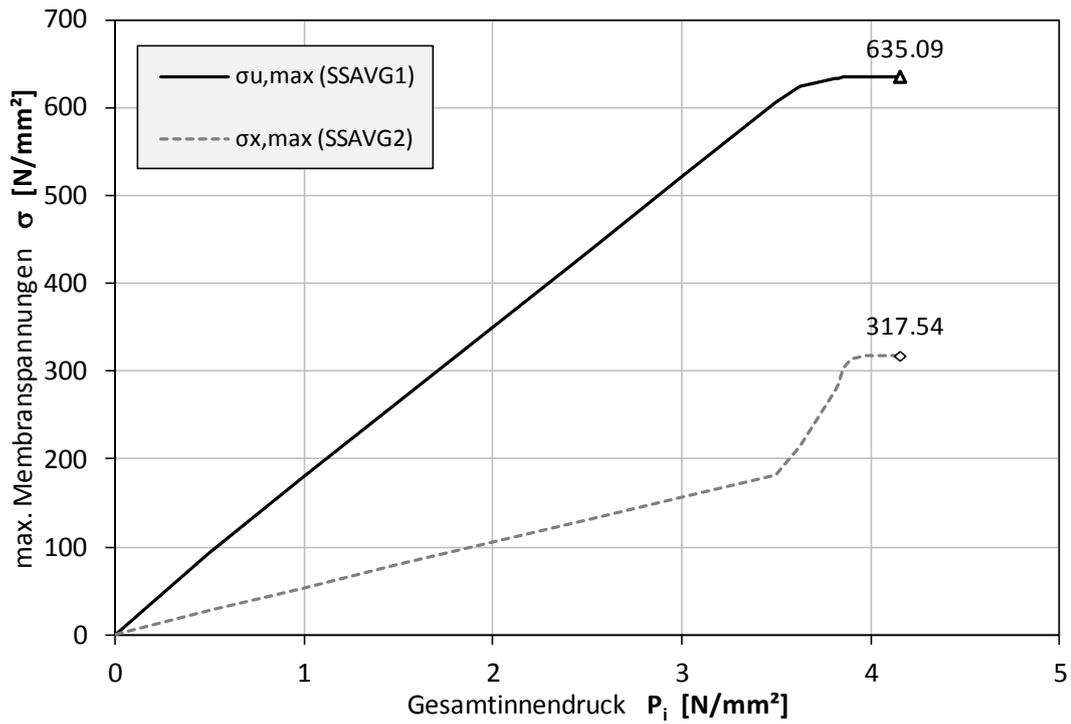


Abbildung 267: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

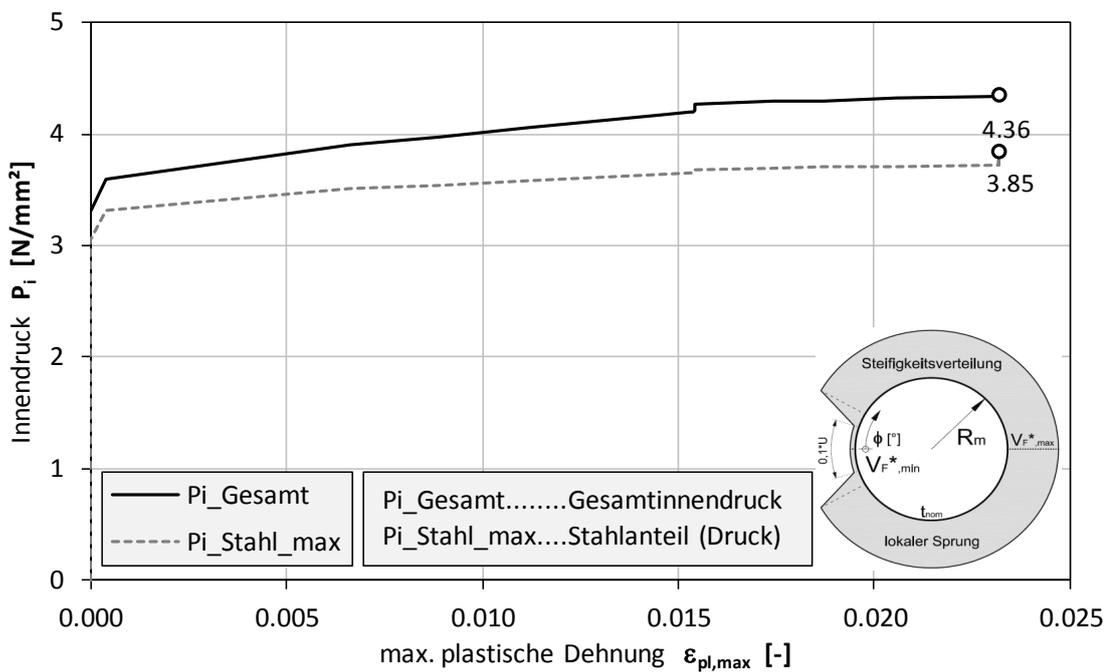


Abbildung 268: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

### 7.4.2.4 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

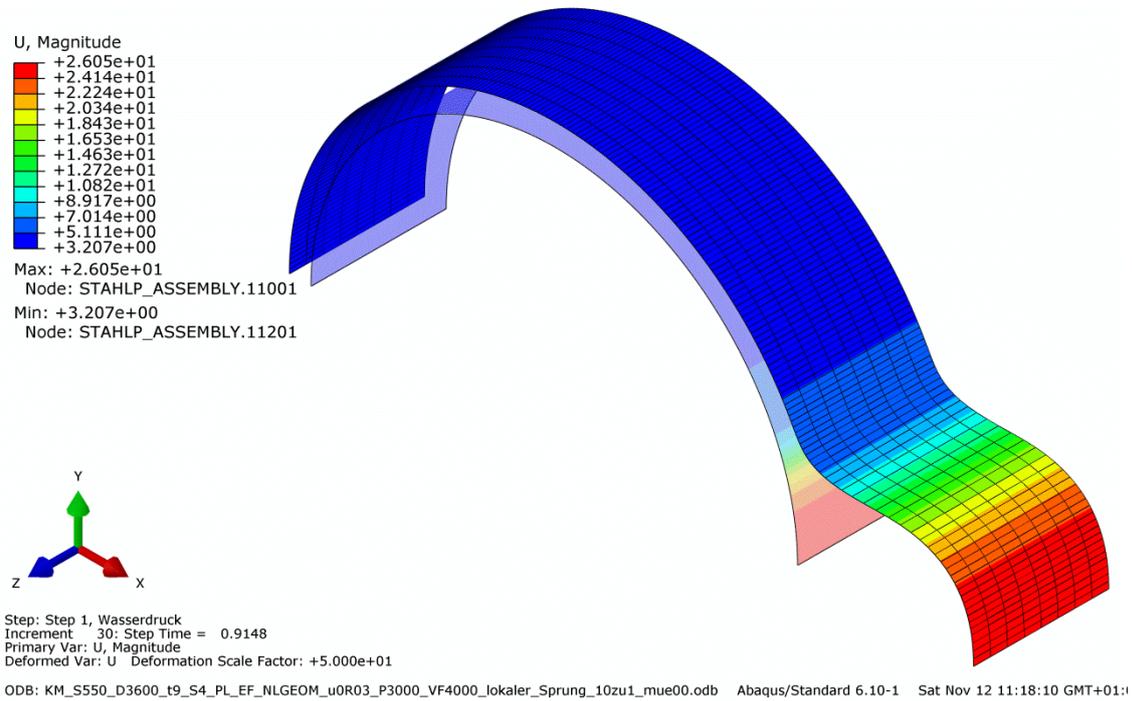


Abbildung 269: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

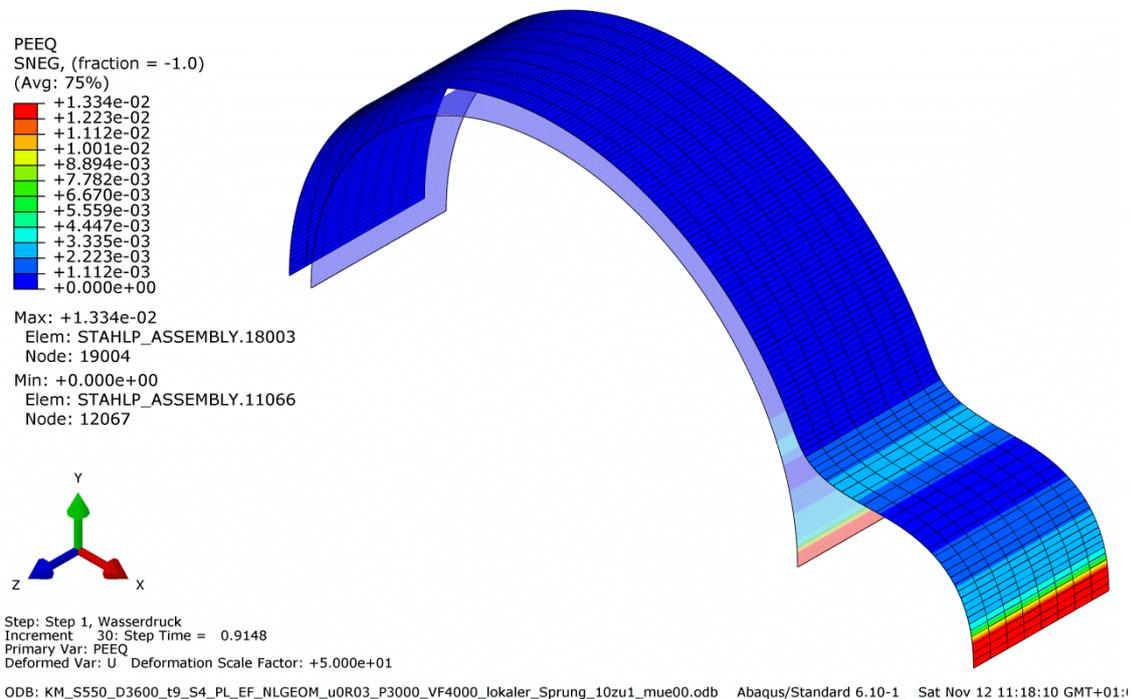


Abbildung 270: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

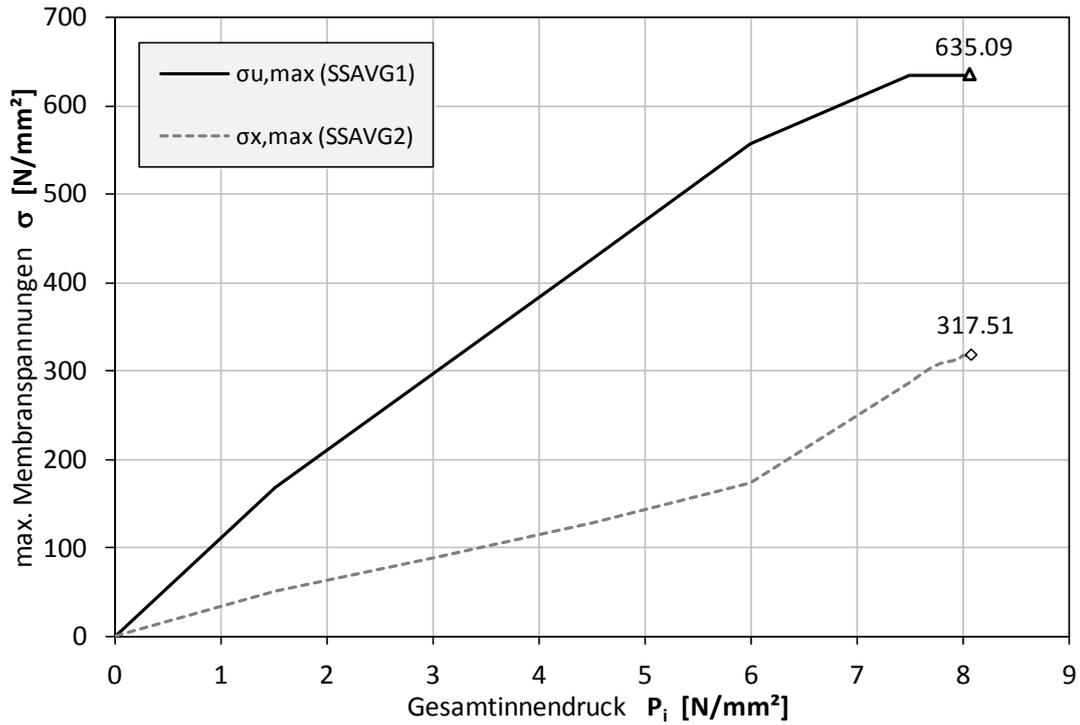


Abbildung 271: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

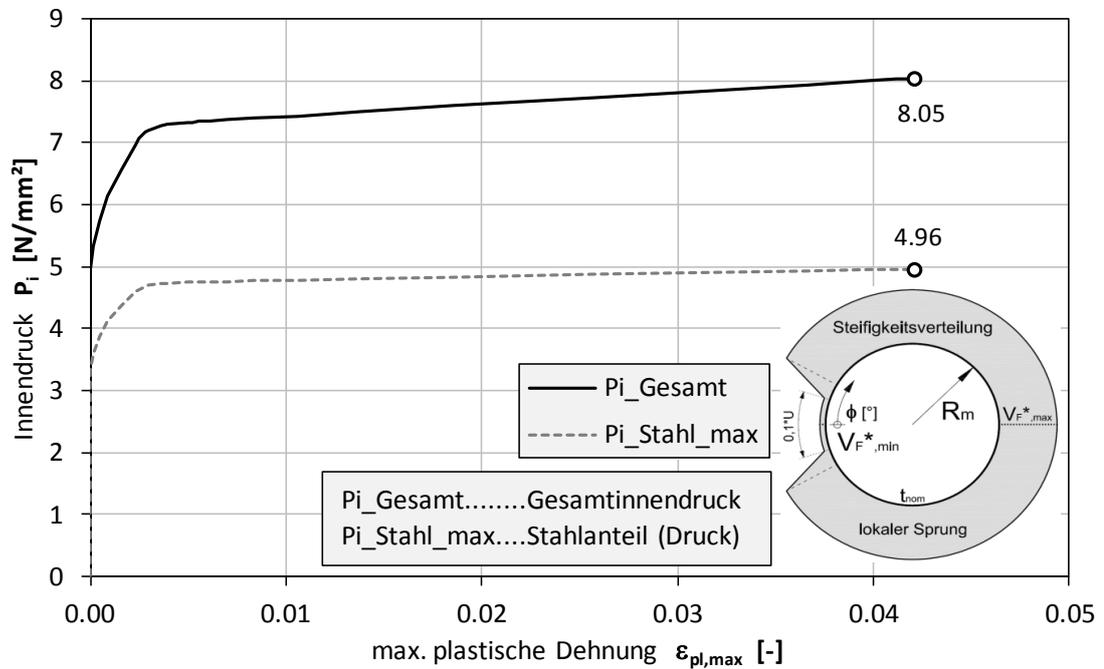


Abbildung 272: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.5 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

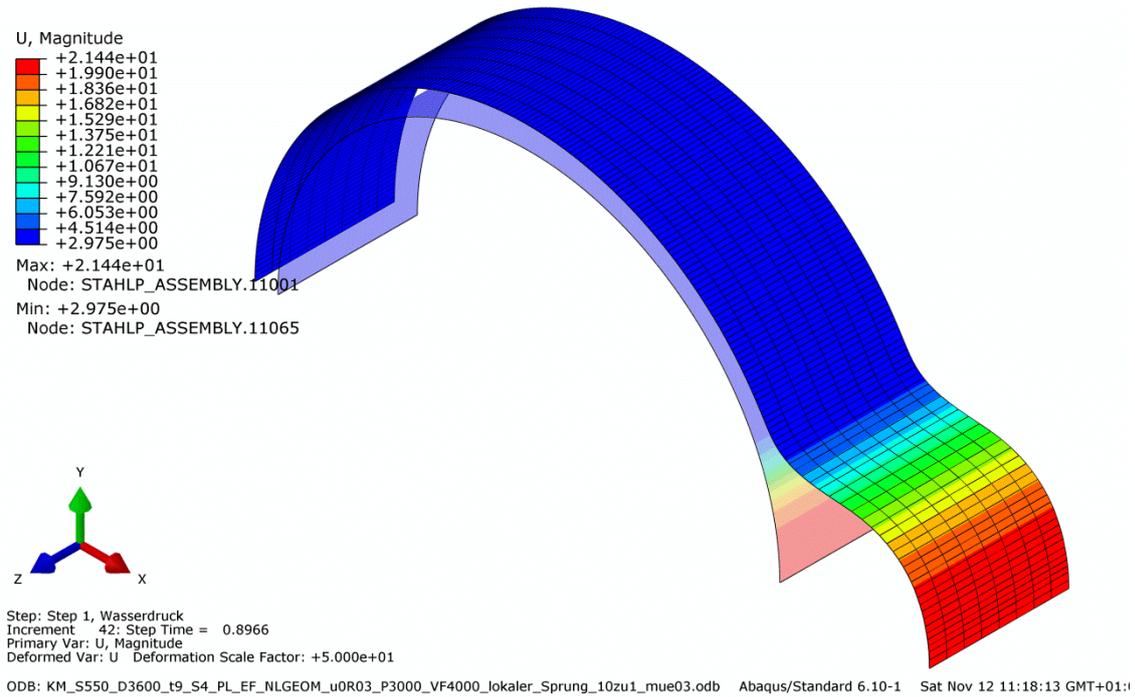


Abbildung 273: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

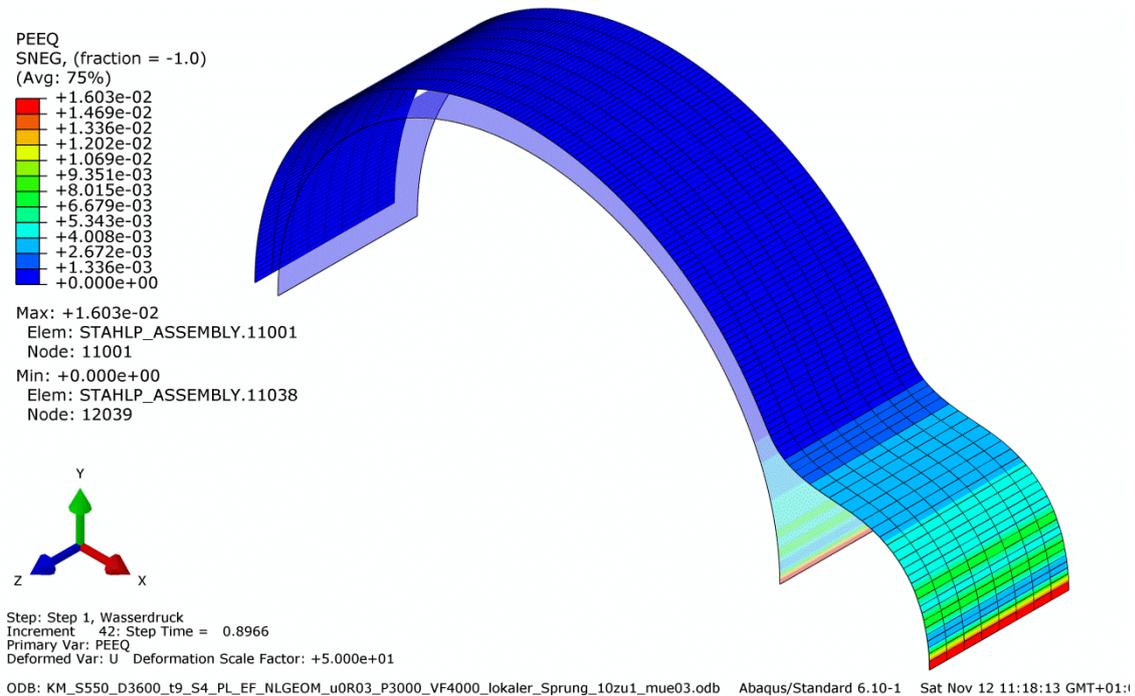


Abbildung 274: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

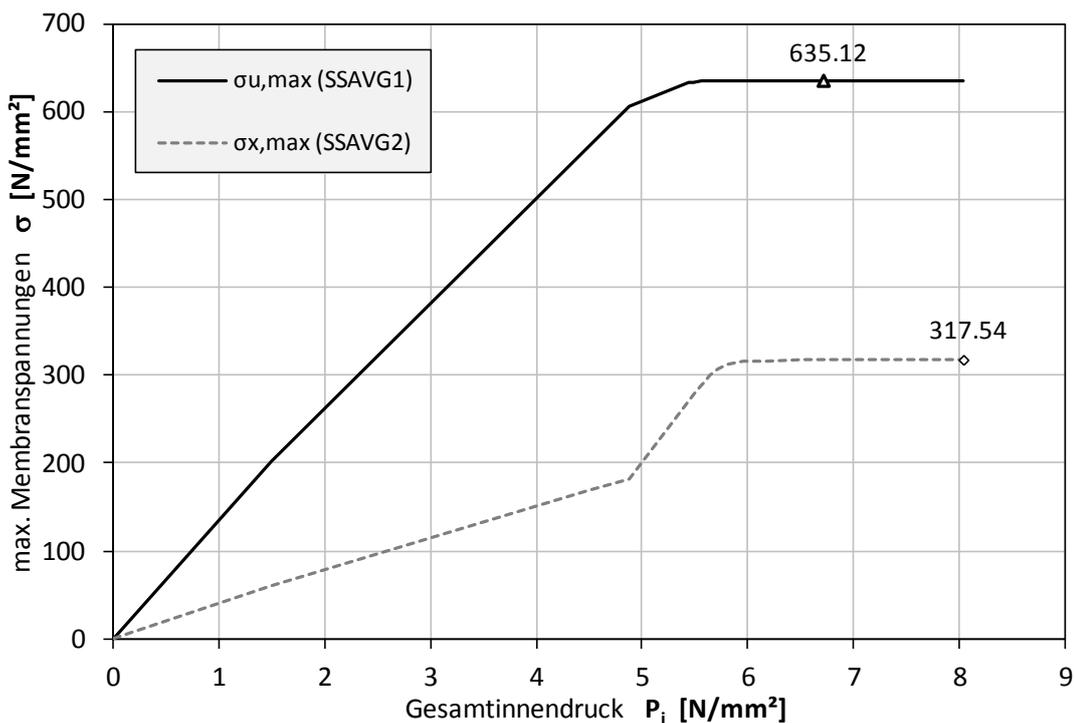


Abbildung 275: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

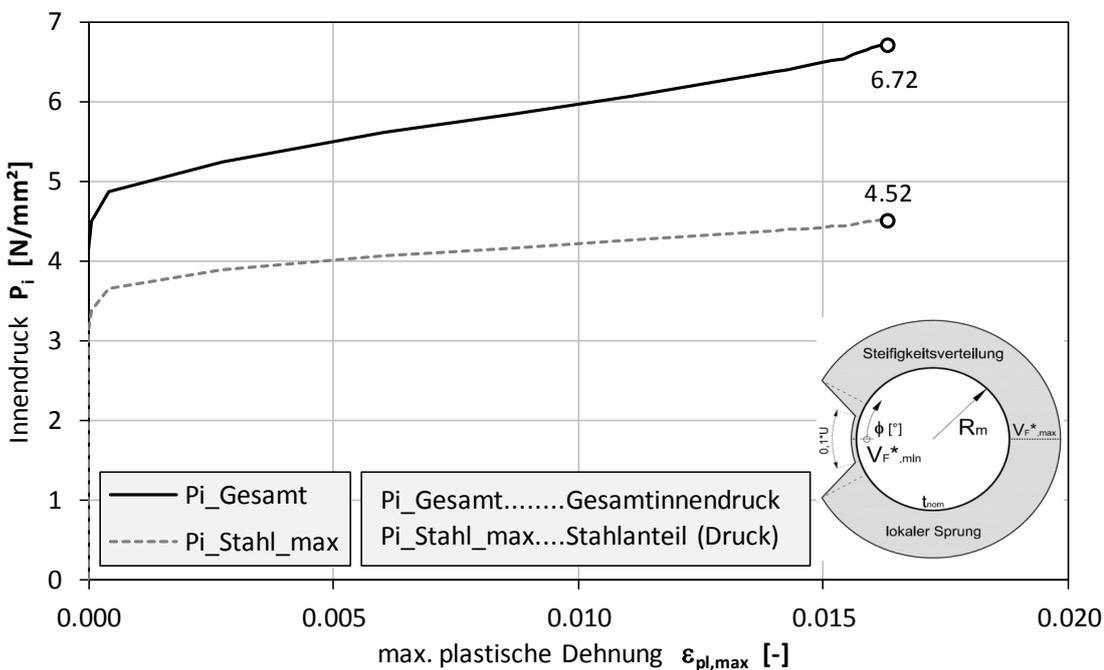


Abbildung 276: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

### 7.4.2.6 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

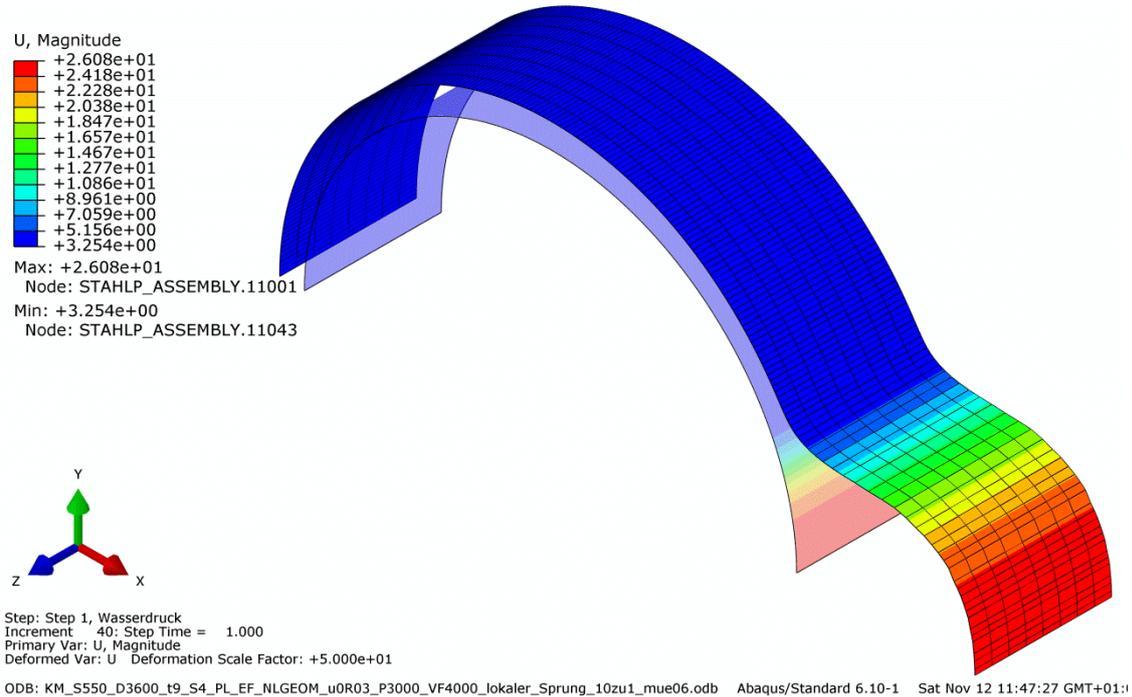


Abbildung 277: FE\_Maximale Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

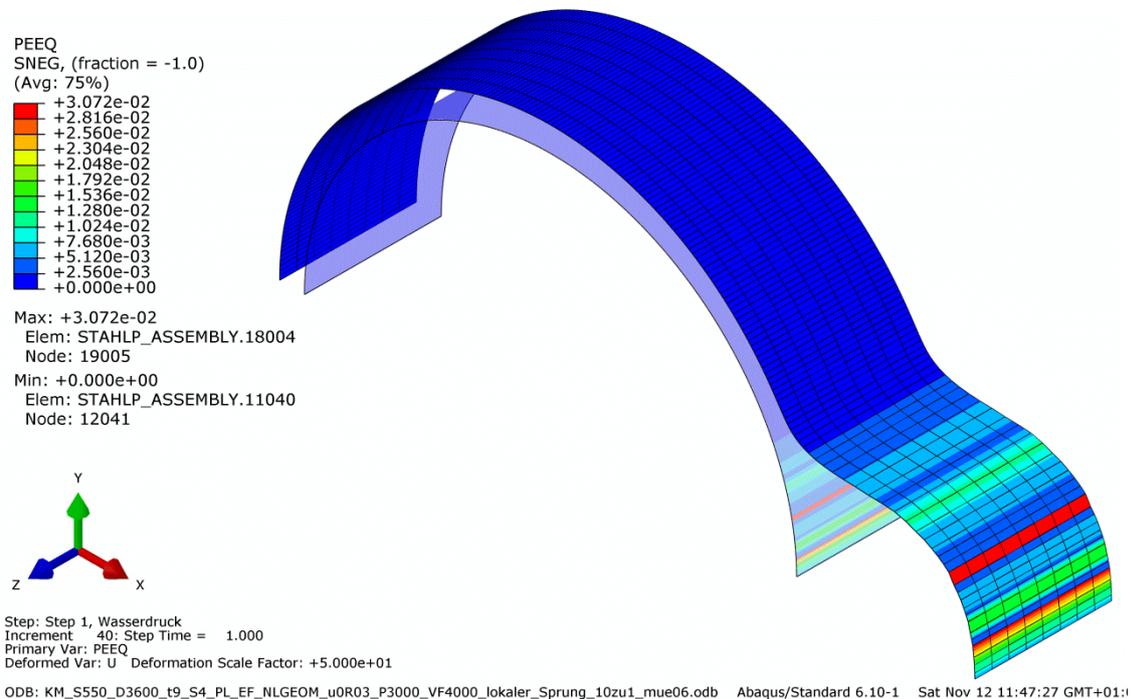


Abbildung 278: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

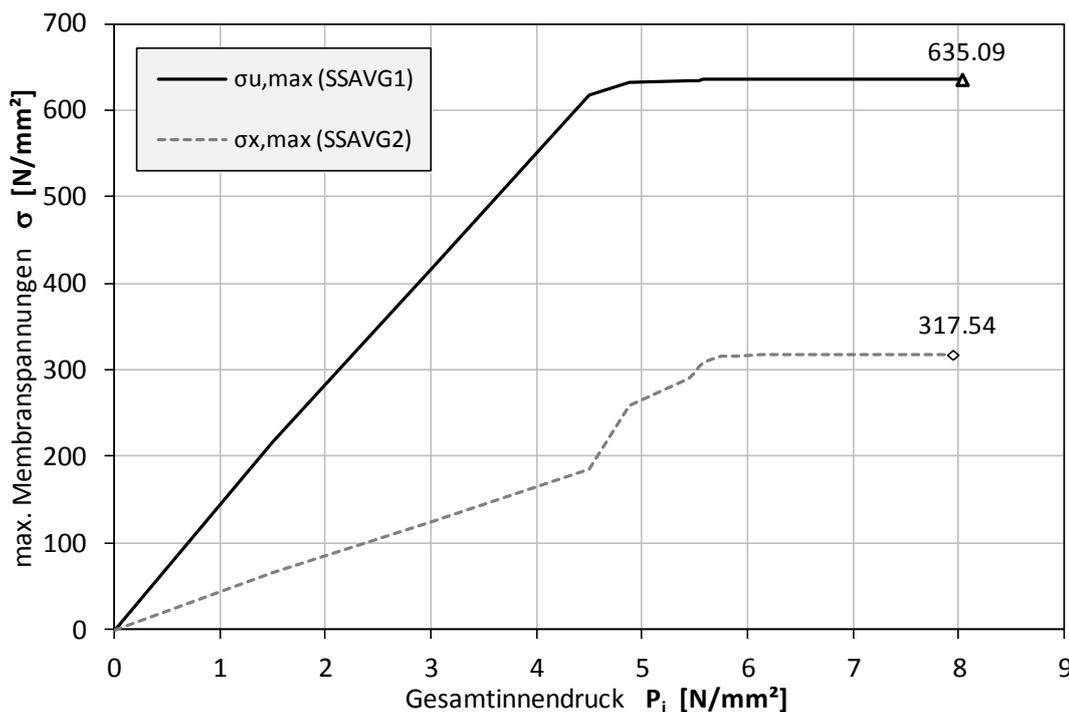


Abbildung 279: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

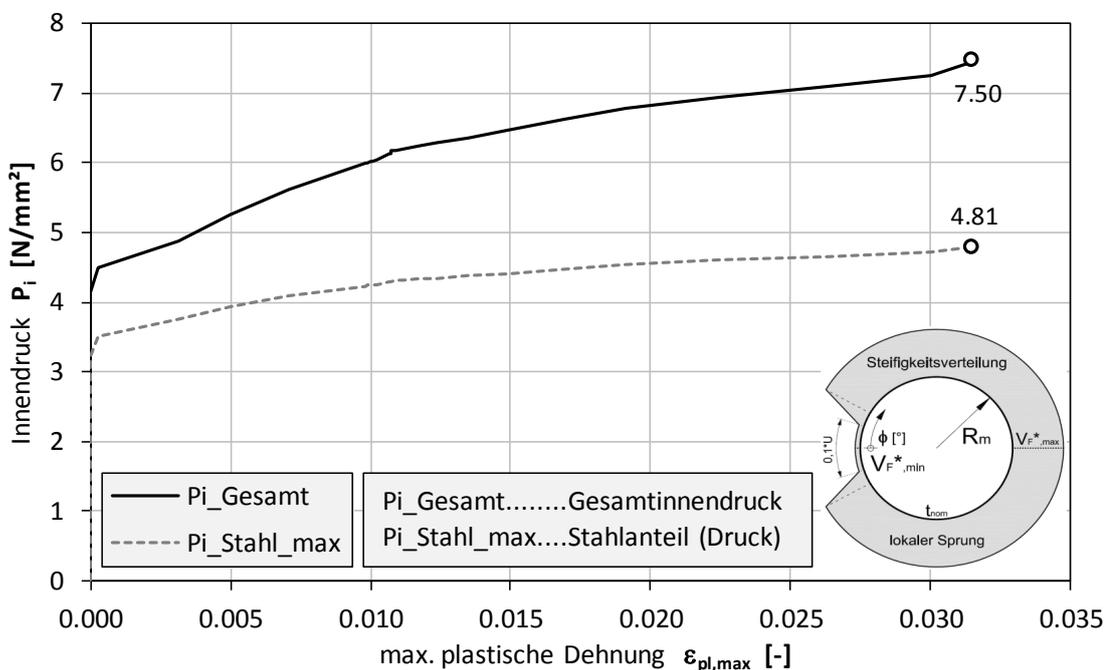


Abbildung 280: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.4.2.7 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

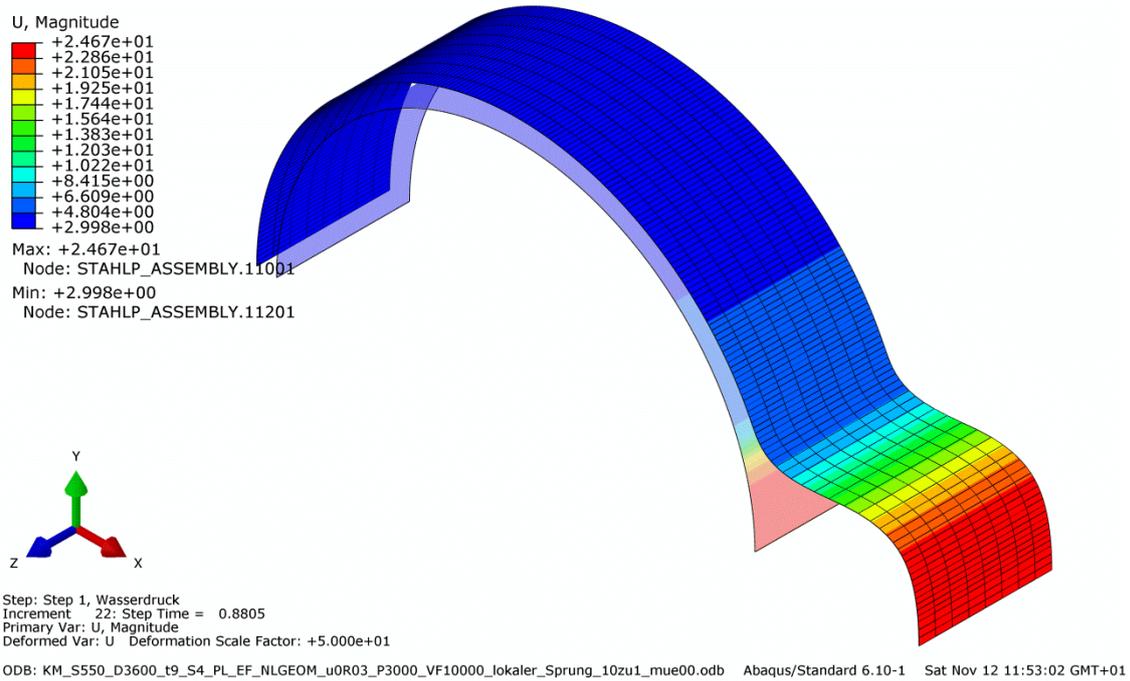


Abbildung 281: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

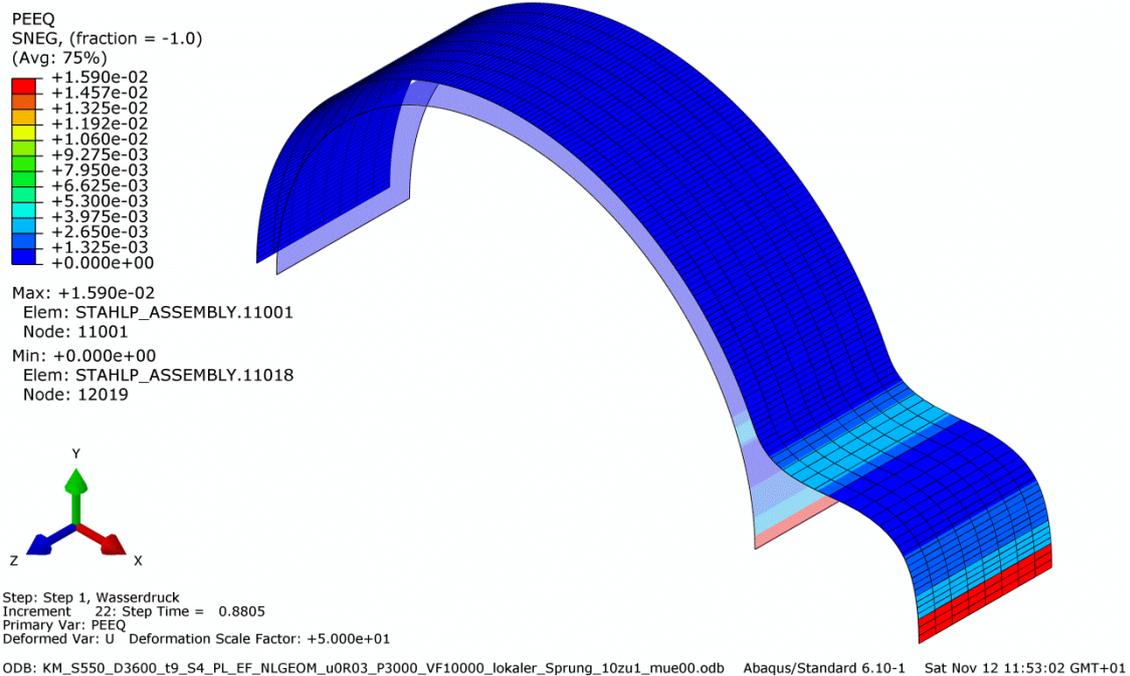


Abbildung 282: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

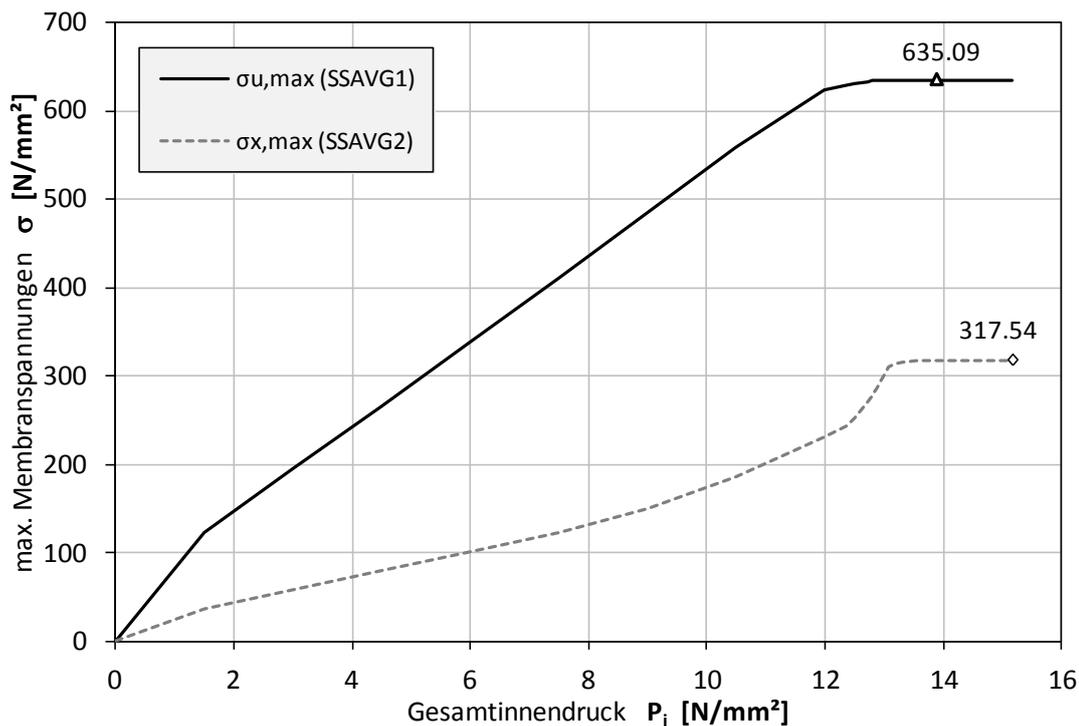


Abbildung 283: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue00

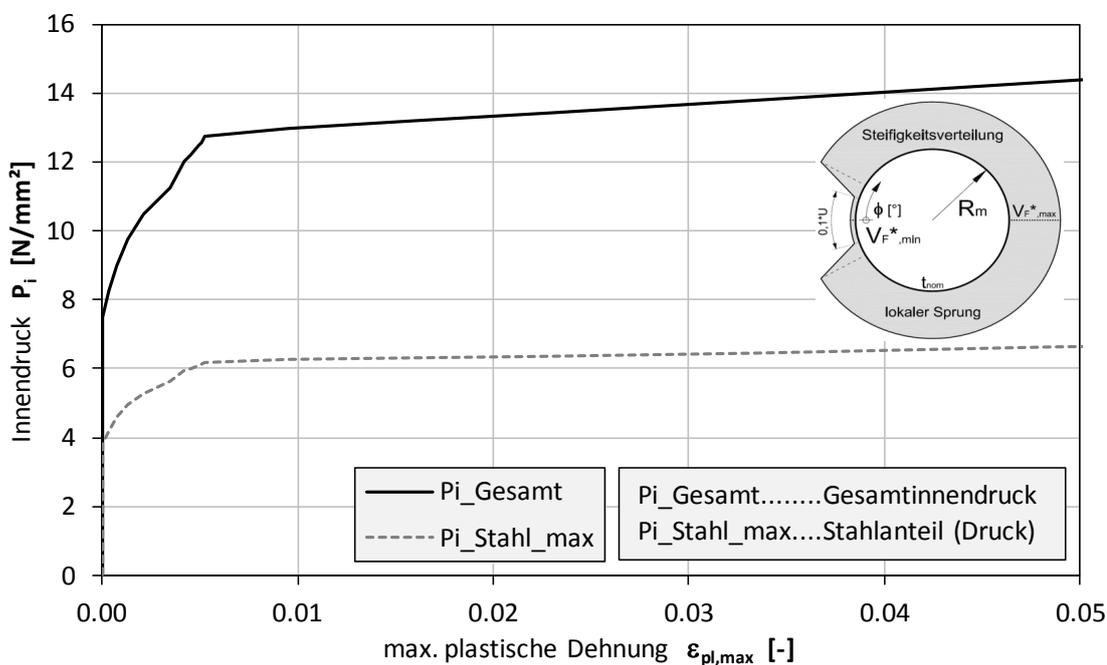


Abbildung 284: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.8 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

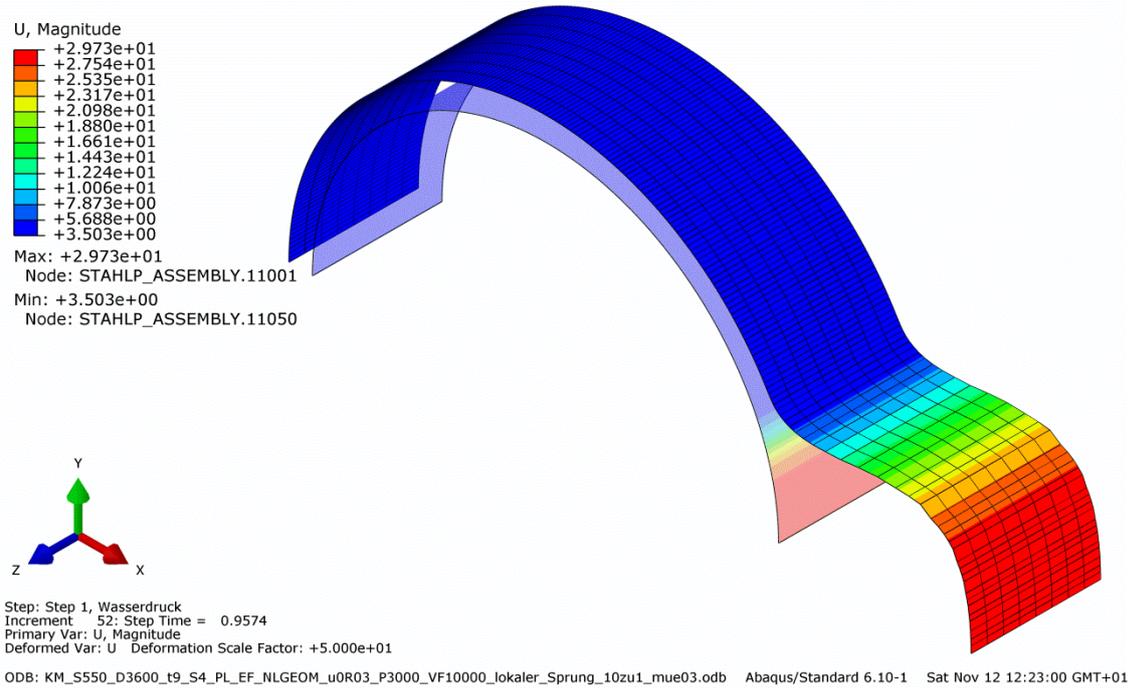


Abbildung 285: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

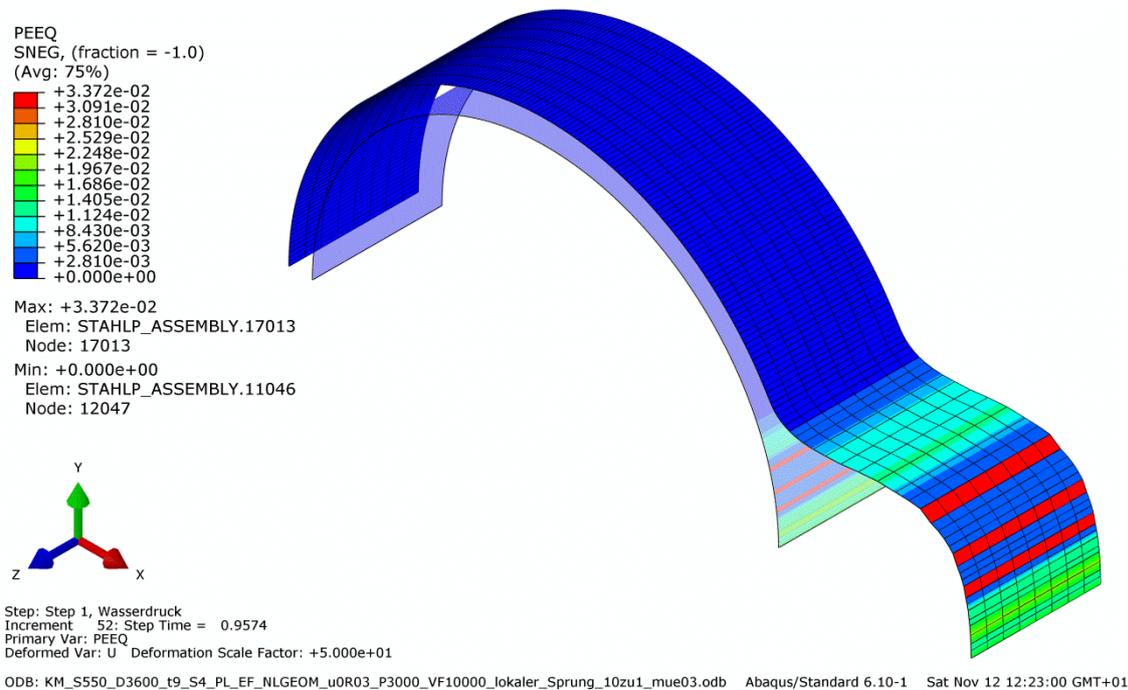


Abbildung 286: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

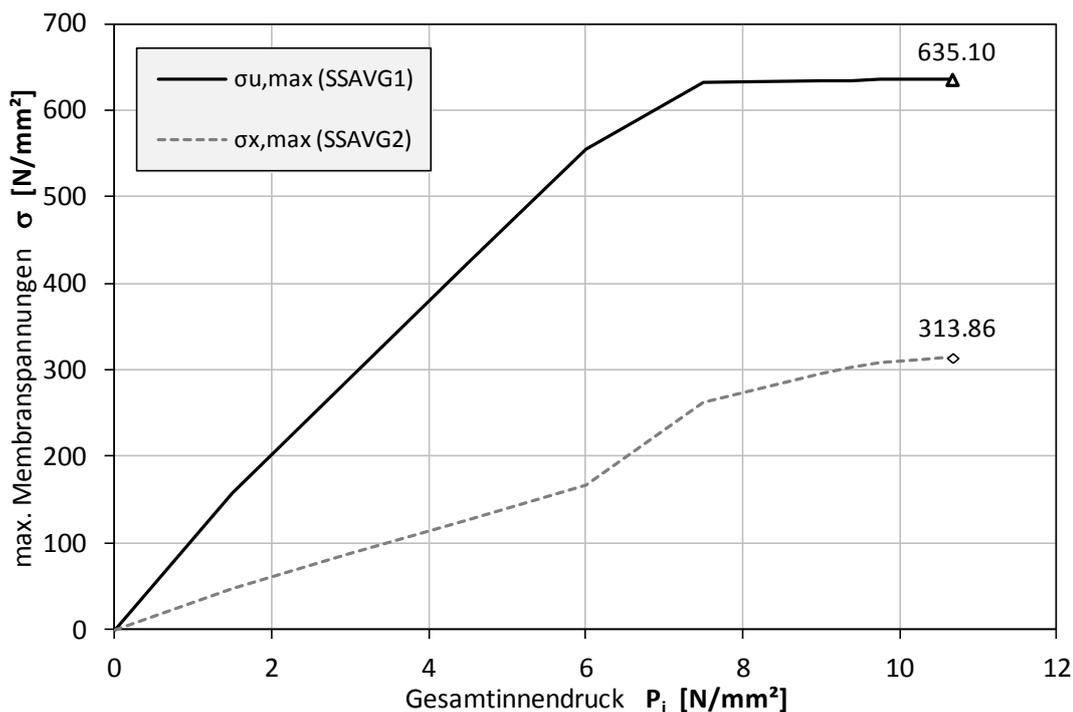


Abbildung 287: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue03

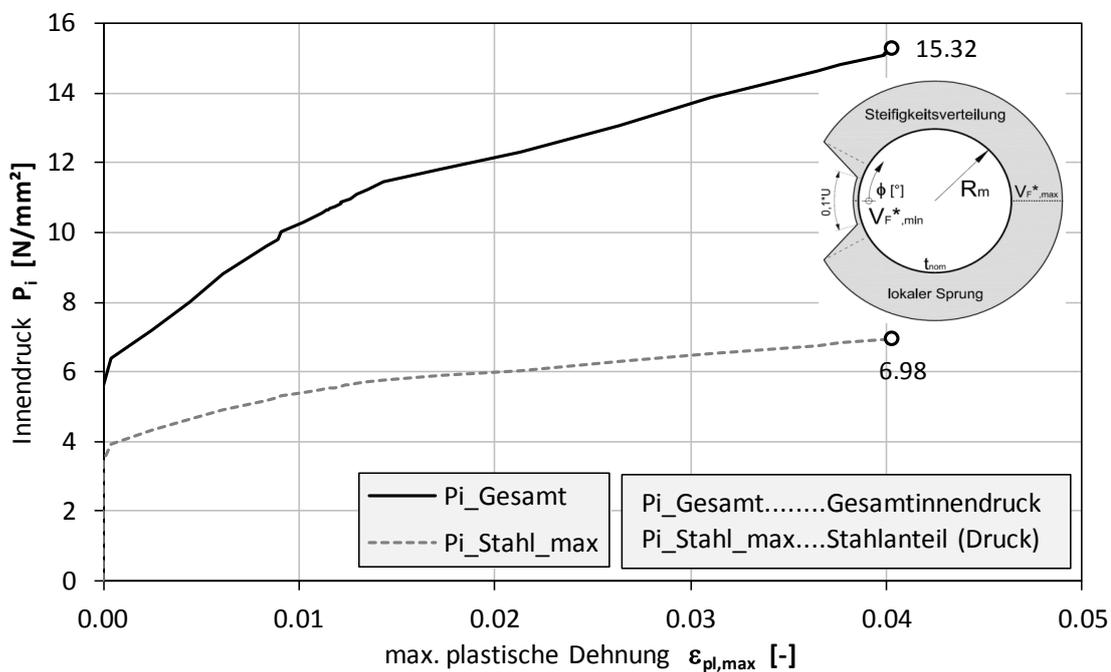


Abbildung 288: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.4.2.9 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

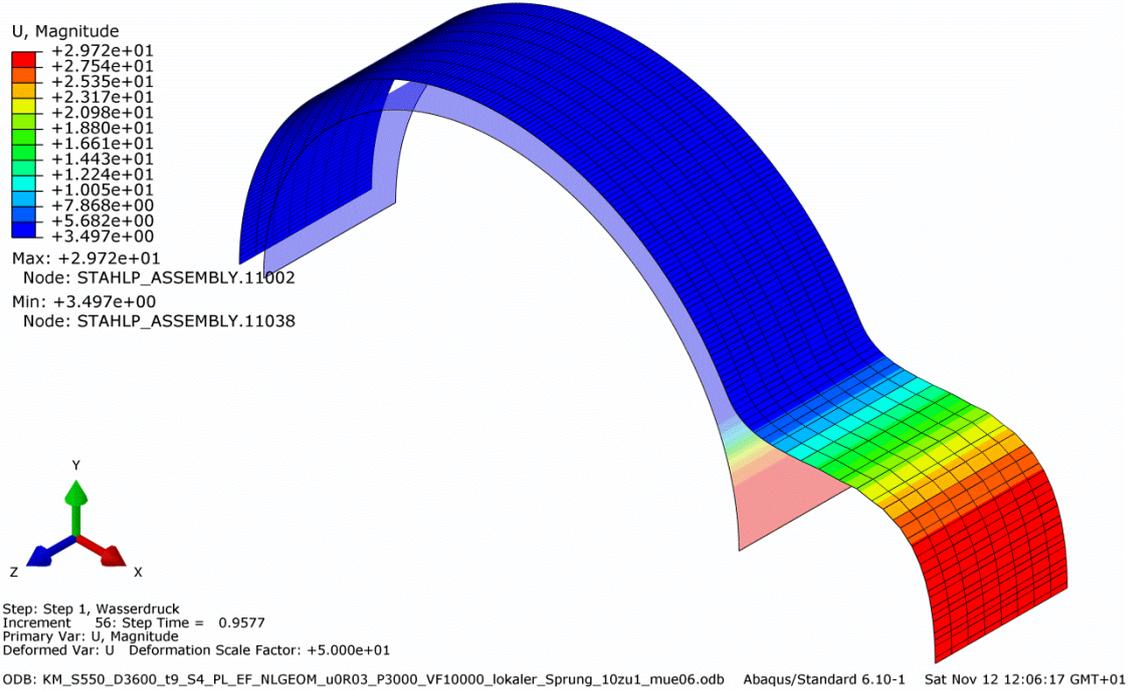


Abbildung 289: FE\_Maximale Vergleichsspannung  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

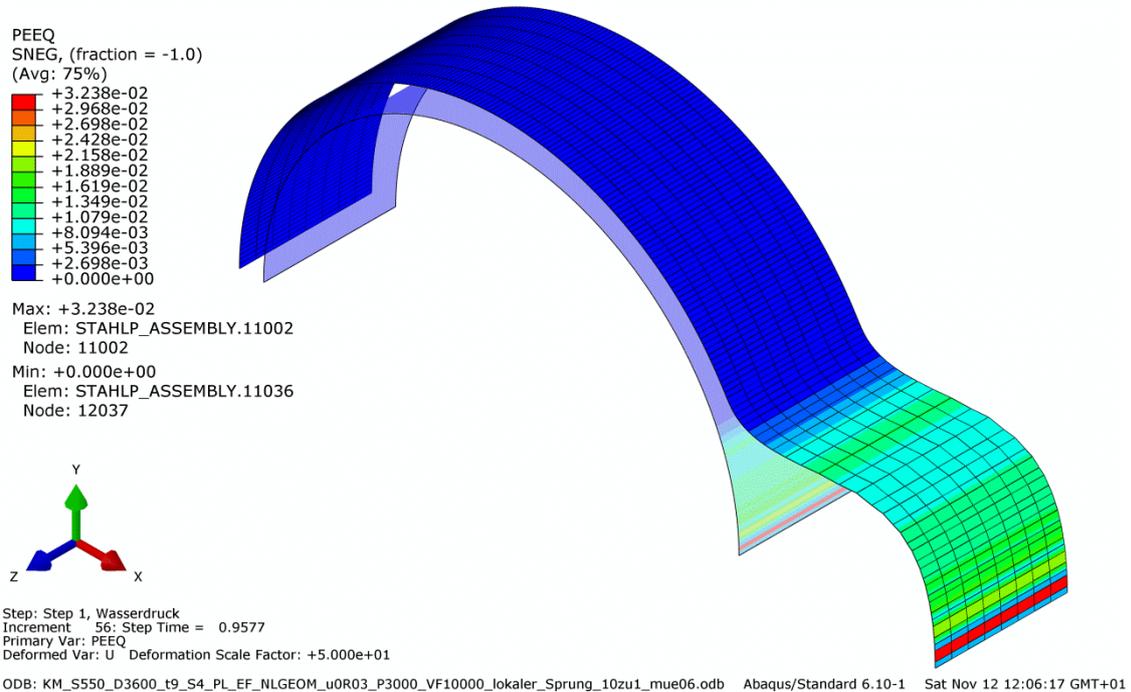


Abbildung 290: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

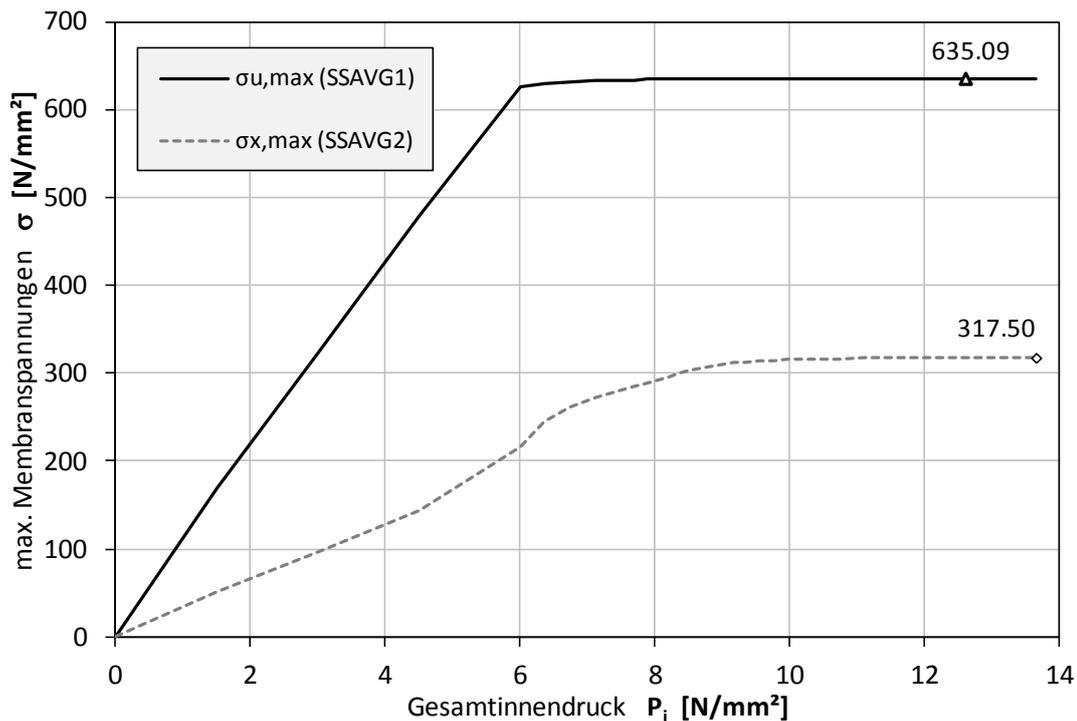


Abbildung 291: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue06

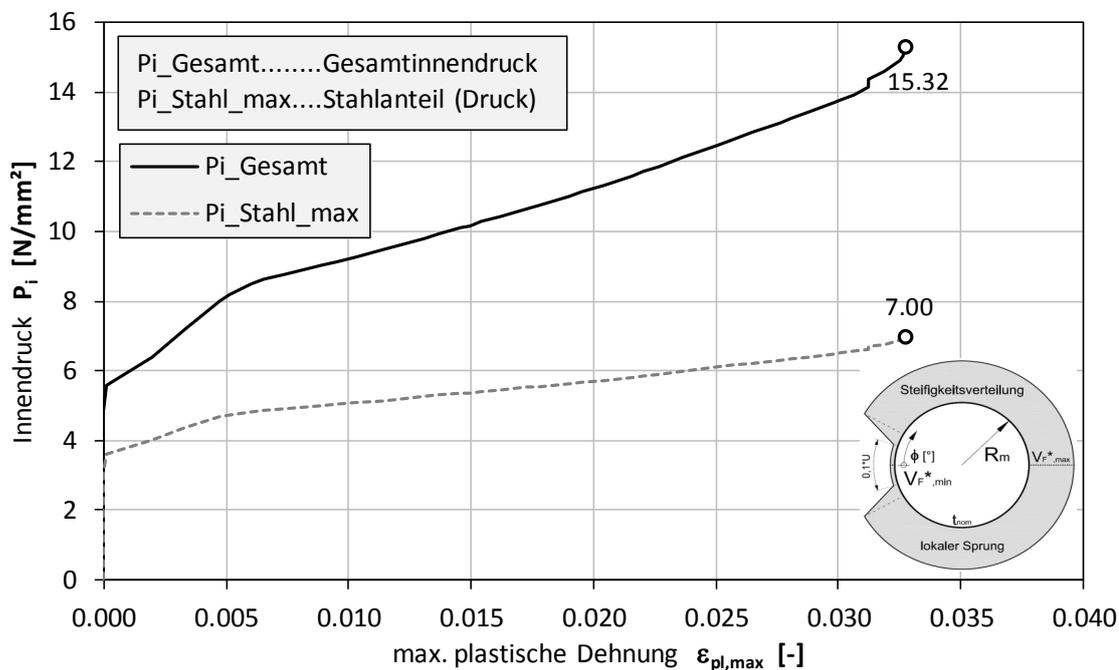


Abbildung 292: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.4.2.10 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

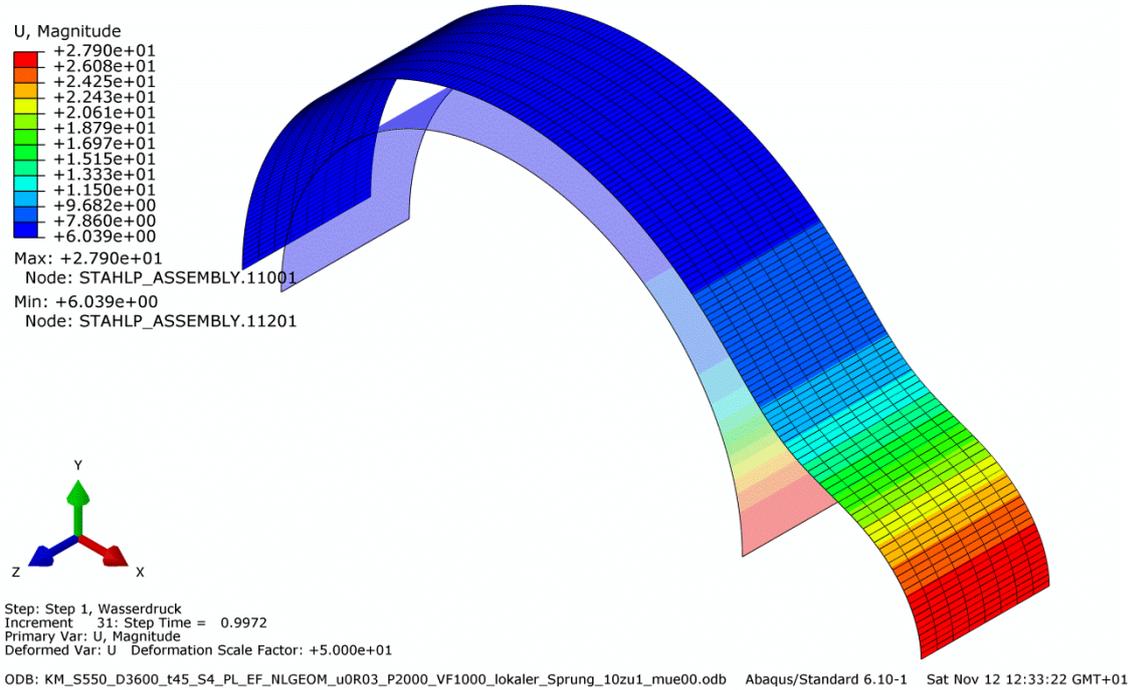


Abbildung 293: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

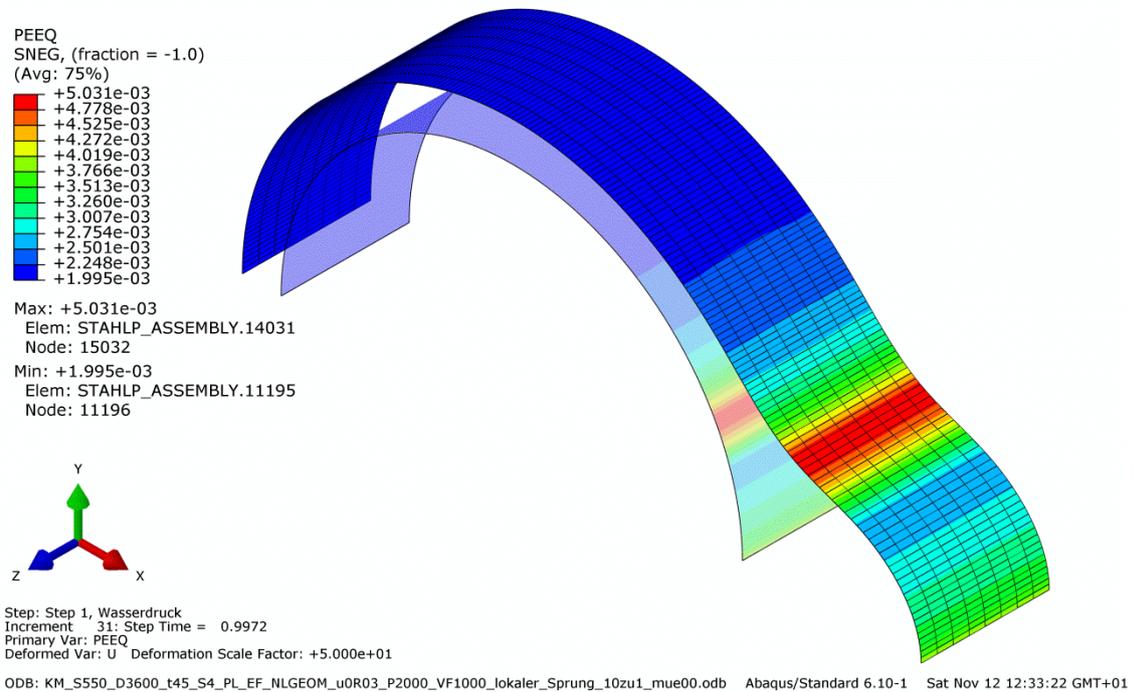


Abbildung 294: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

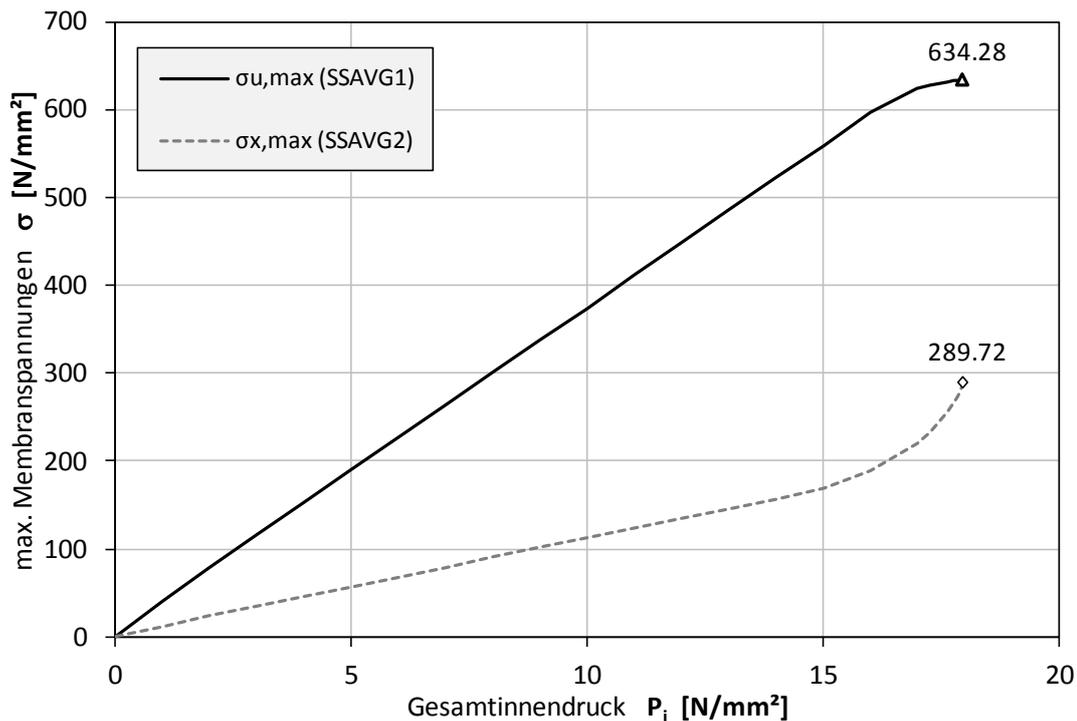


Abbildung 295: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

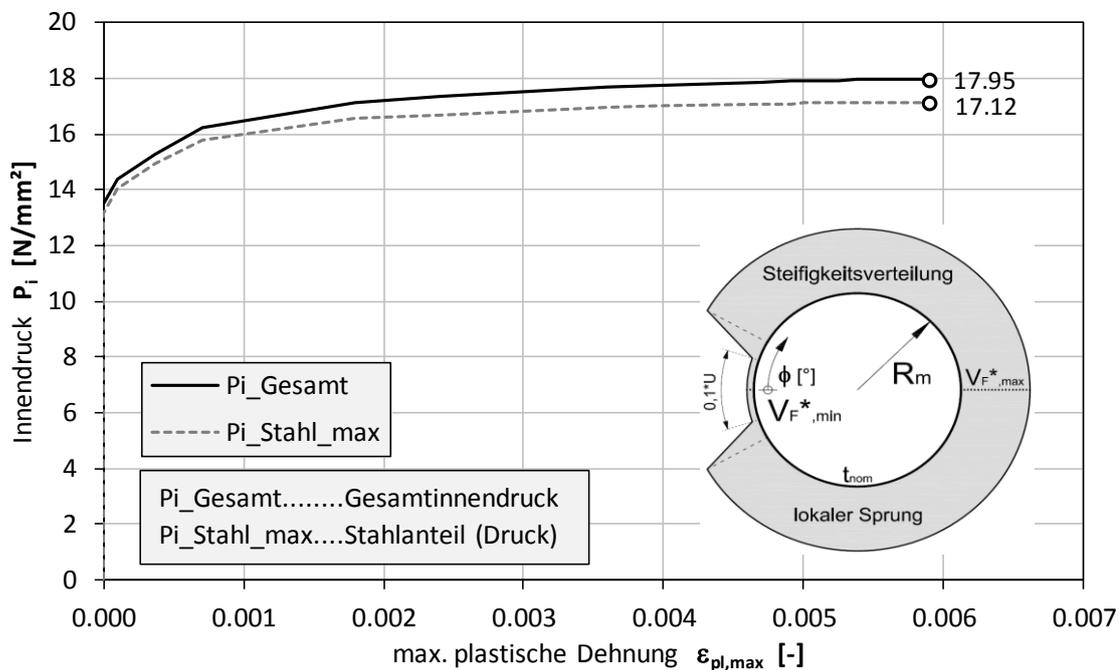


Abbildung 296: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.11 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

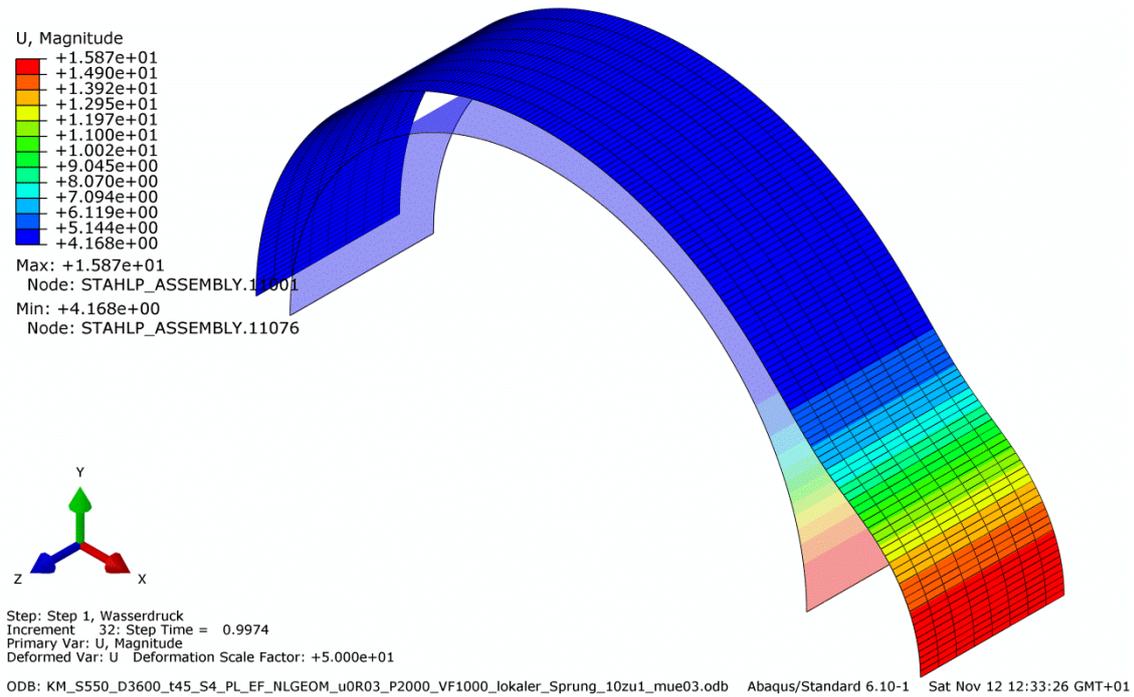


Abbildung 297: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

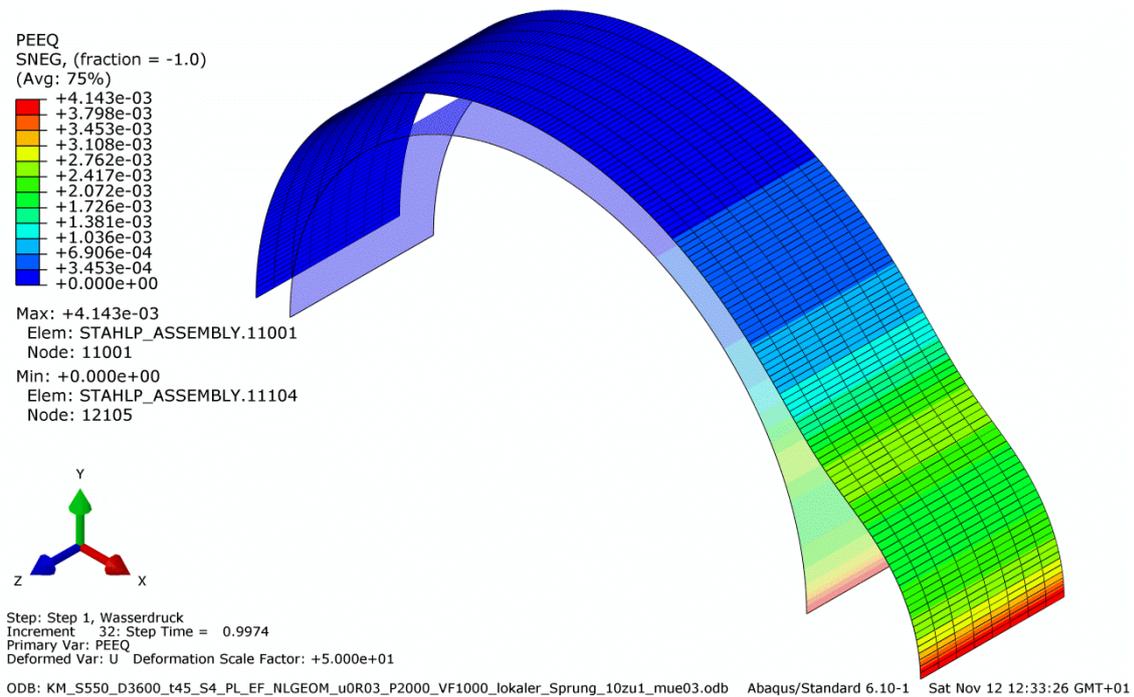


Abbildung 298: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

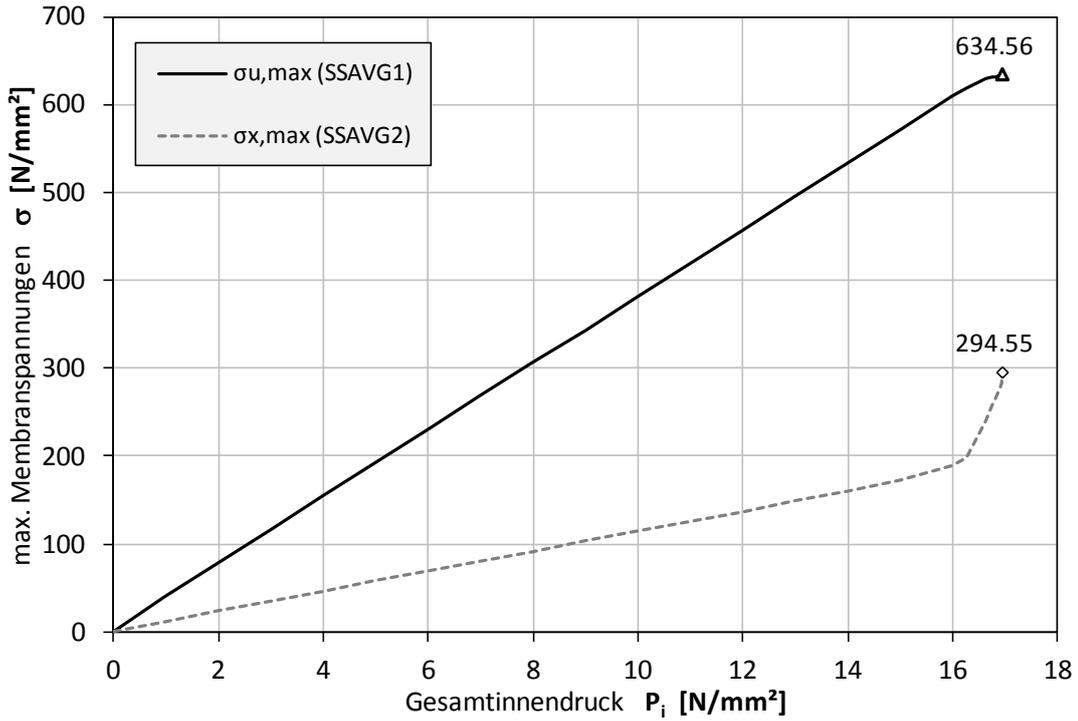


Abbildung 299: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

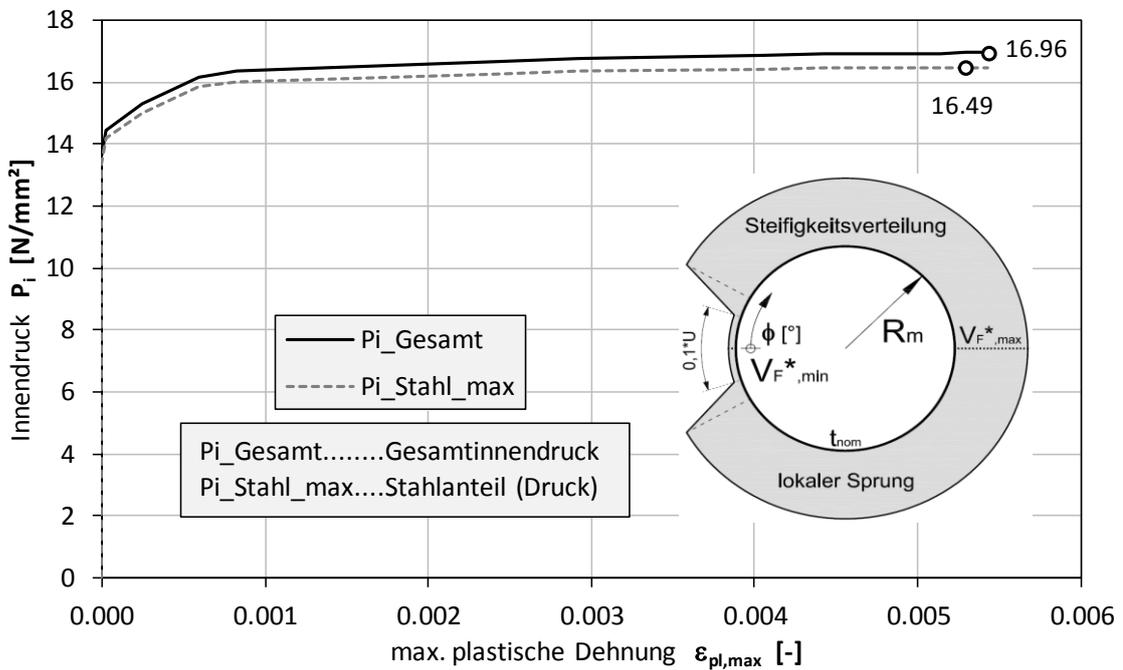


Abbildung 300: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.4.2.12 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

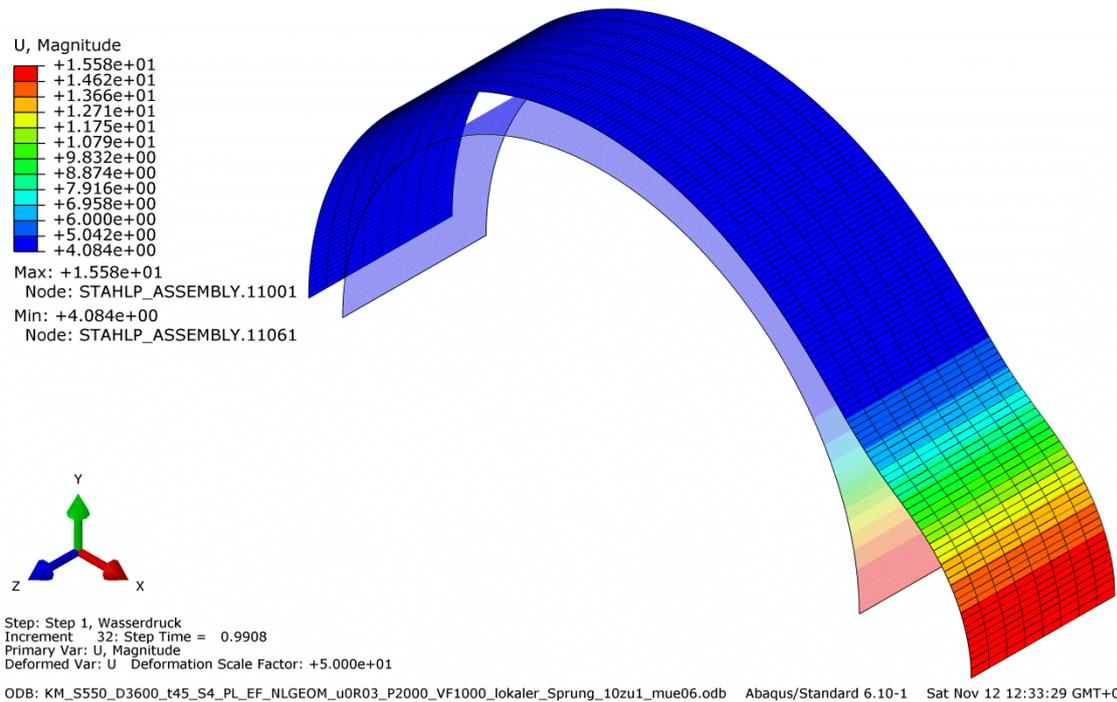


Abbildung 301: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

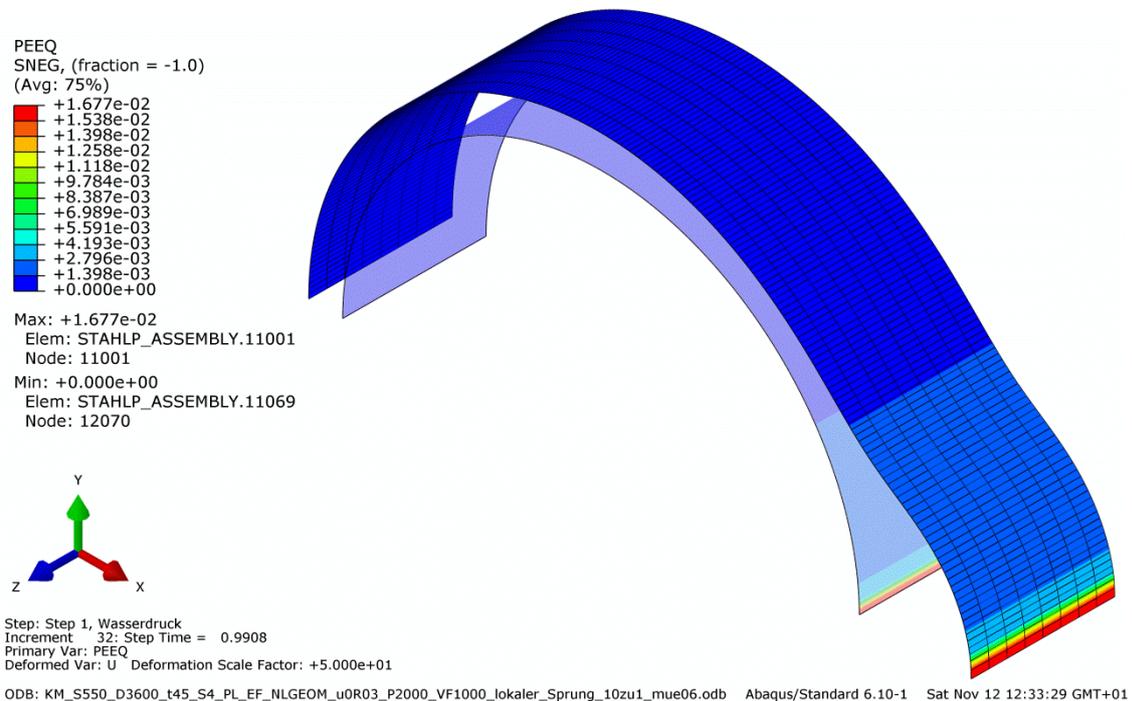


Abbildung 302: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

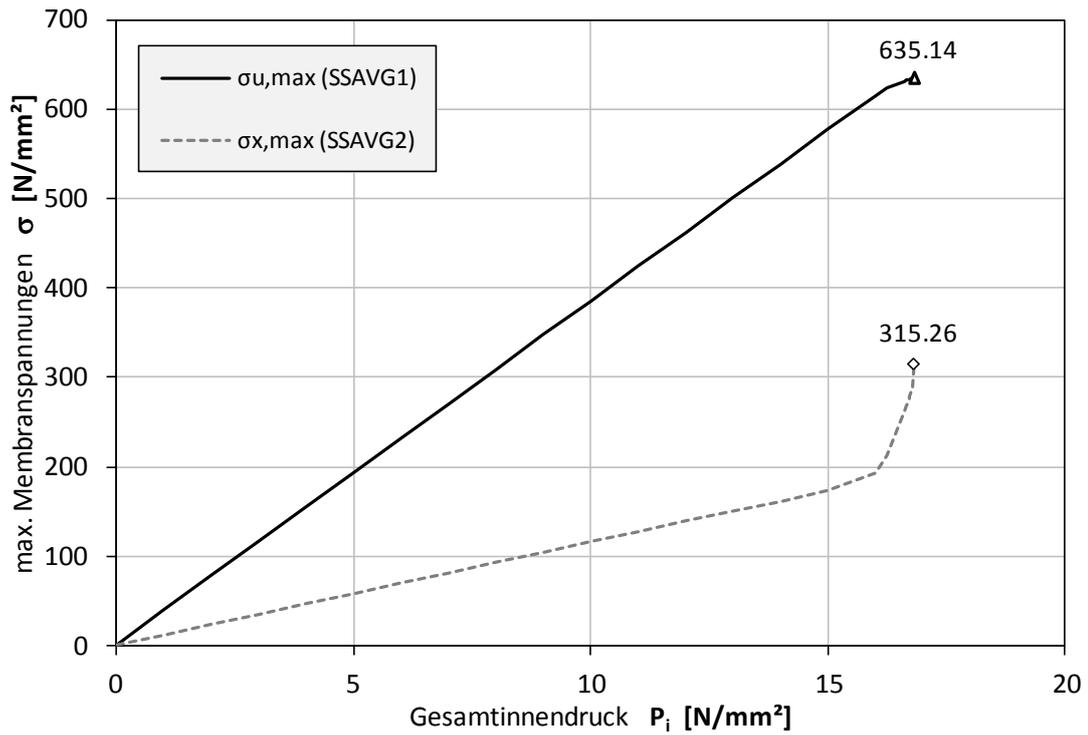


Abbildung 303: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

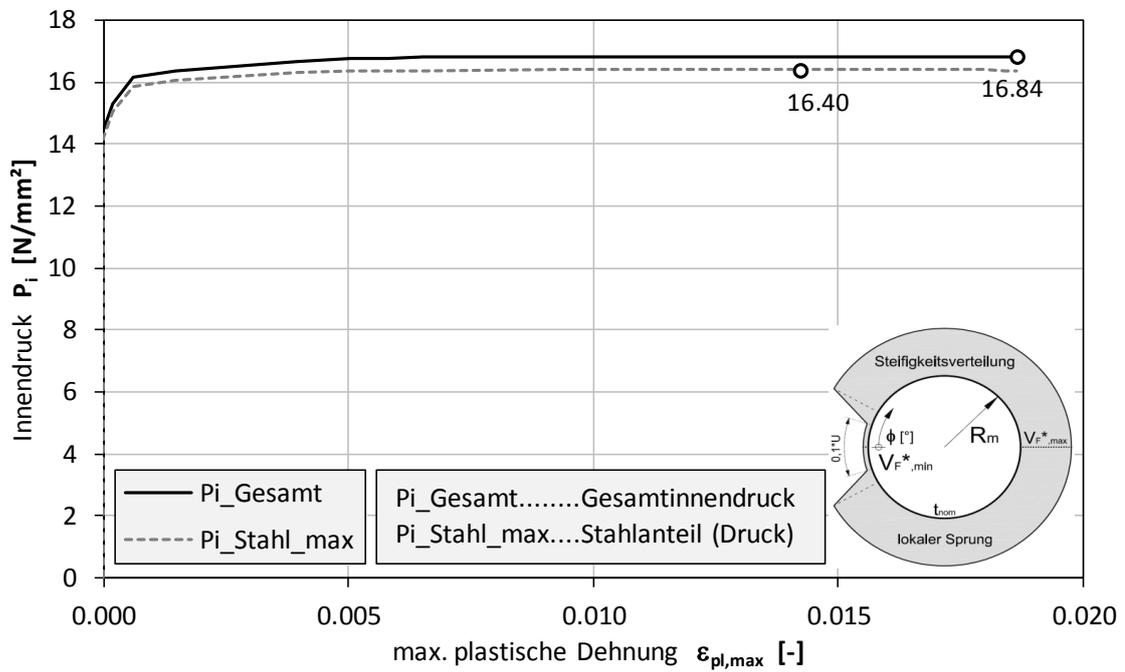


Abbildung 304: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.4.2.13 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

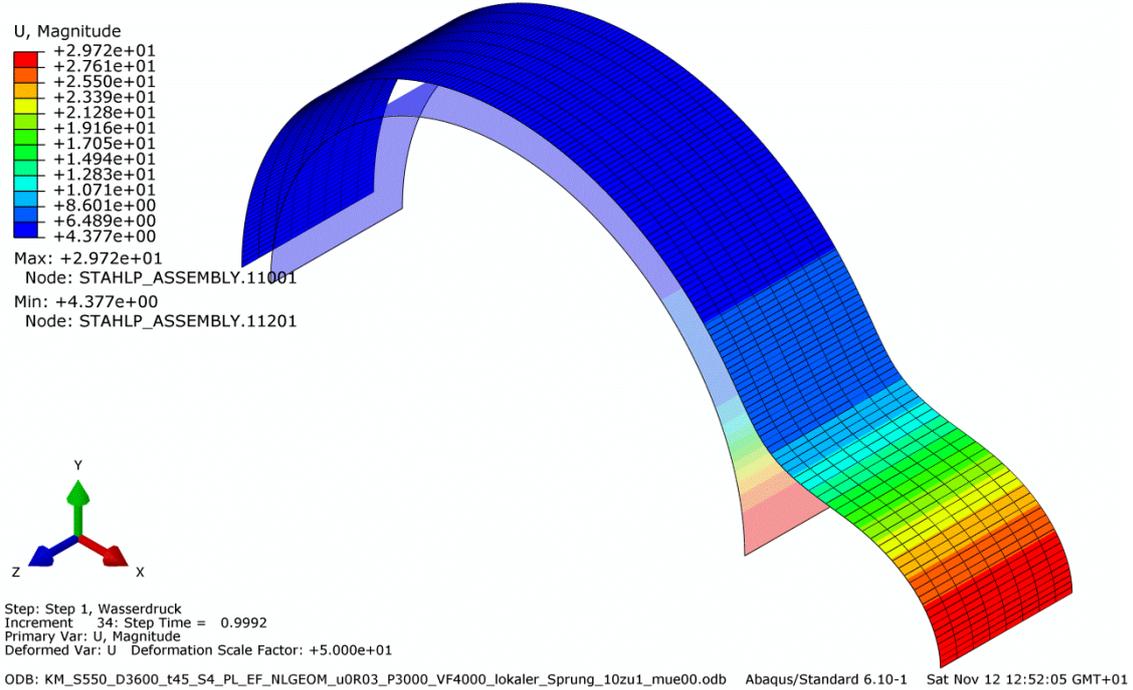


Abbildung 305: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

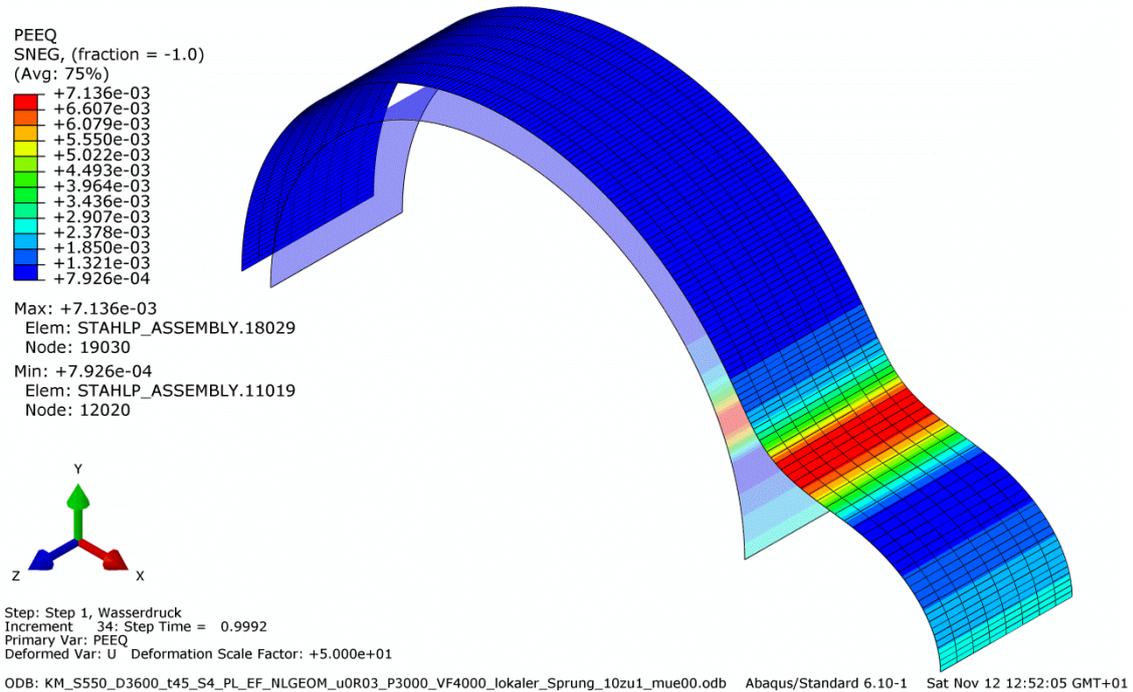


Abbildung 306: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

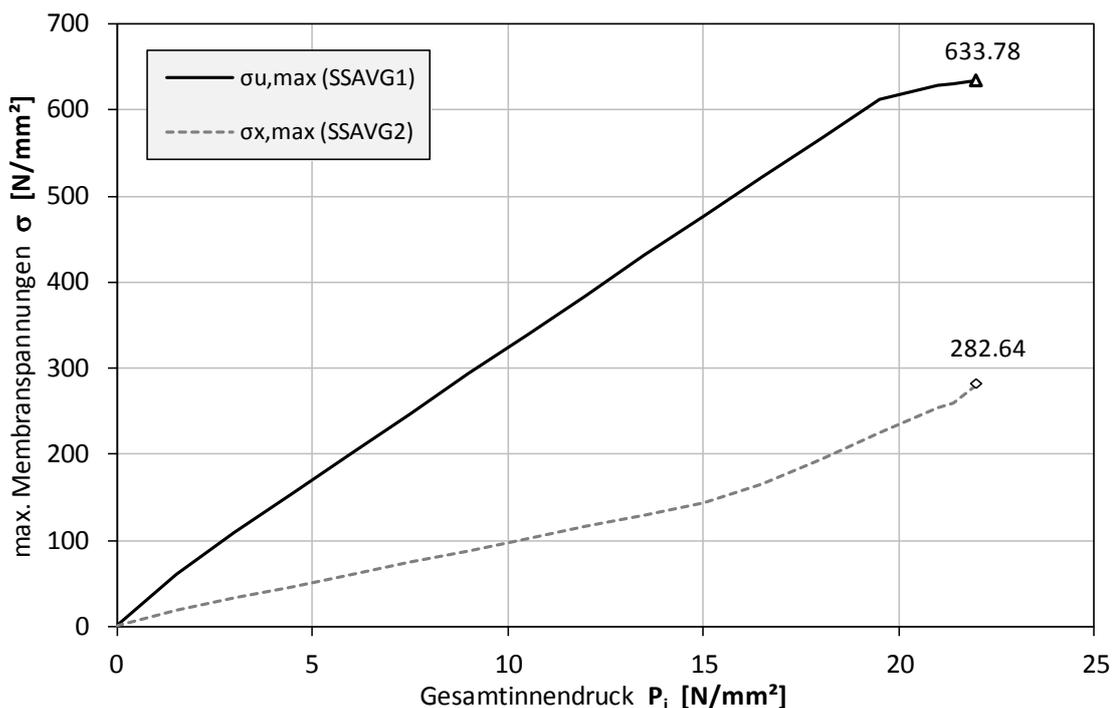


Abbildung 307: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

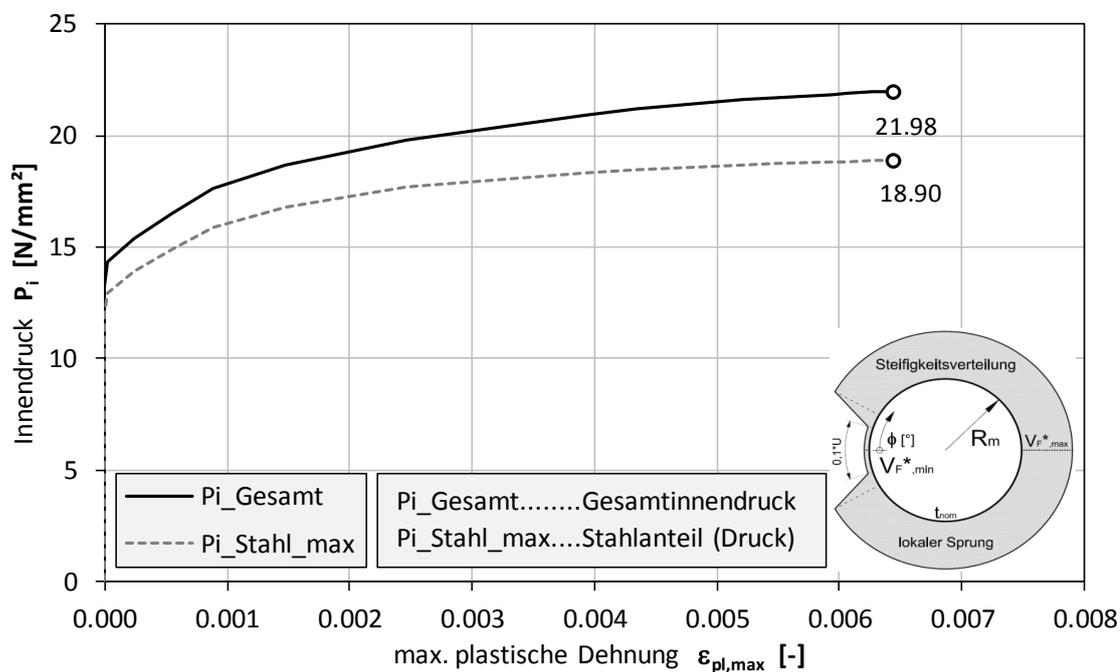


Abbildung 308: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.14 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

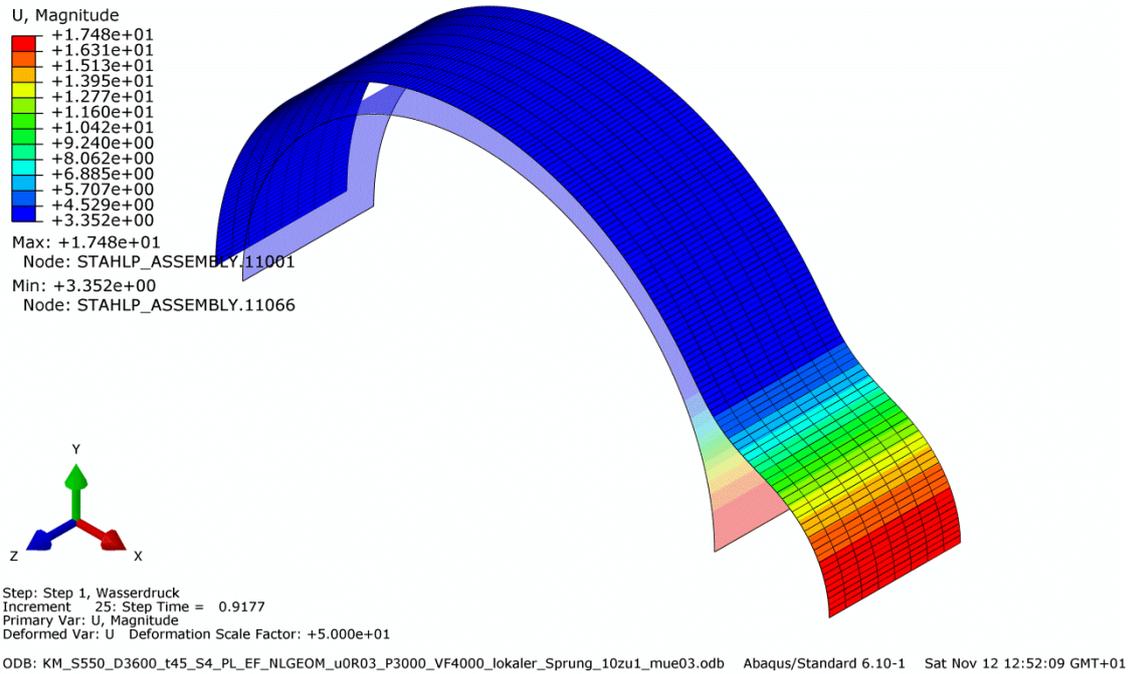


Abbildung 309: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

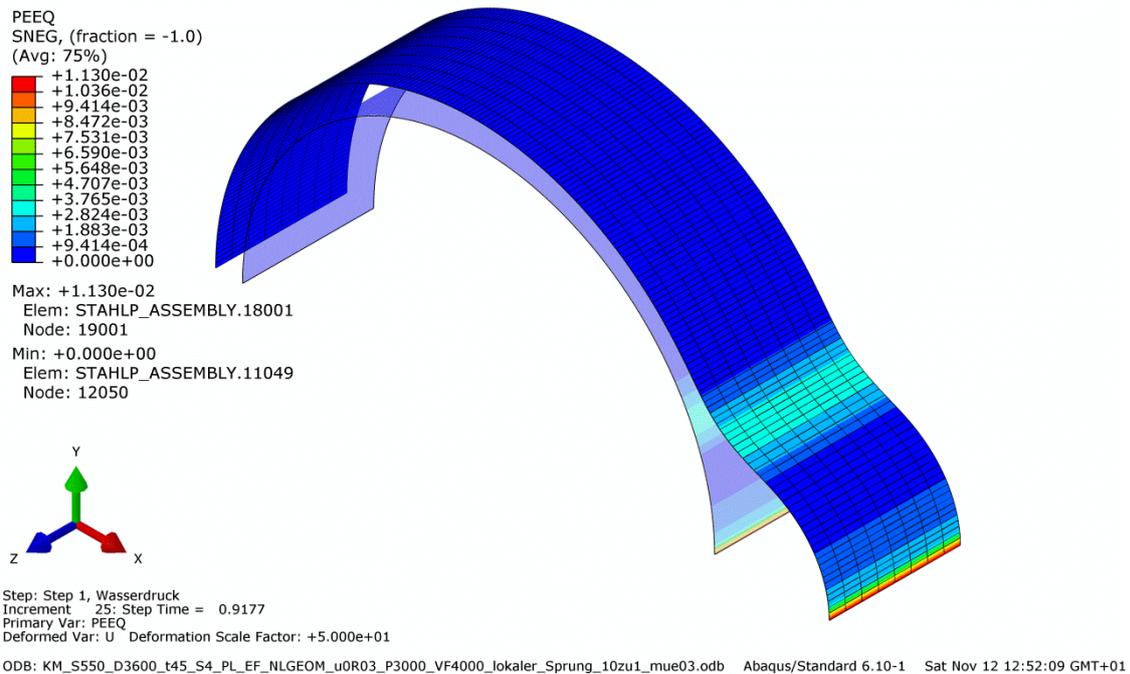


Abbildung 310: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

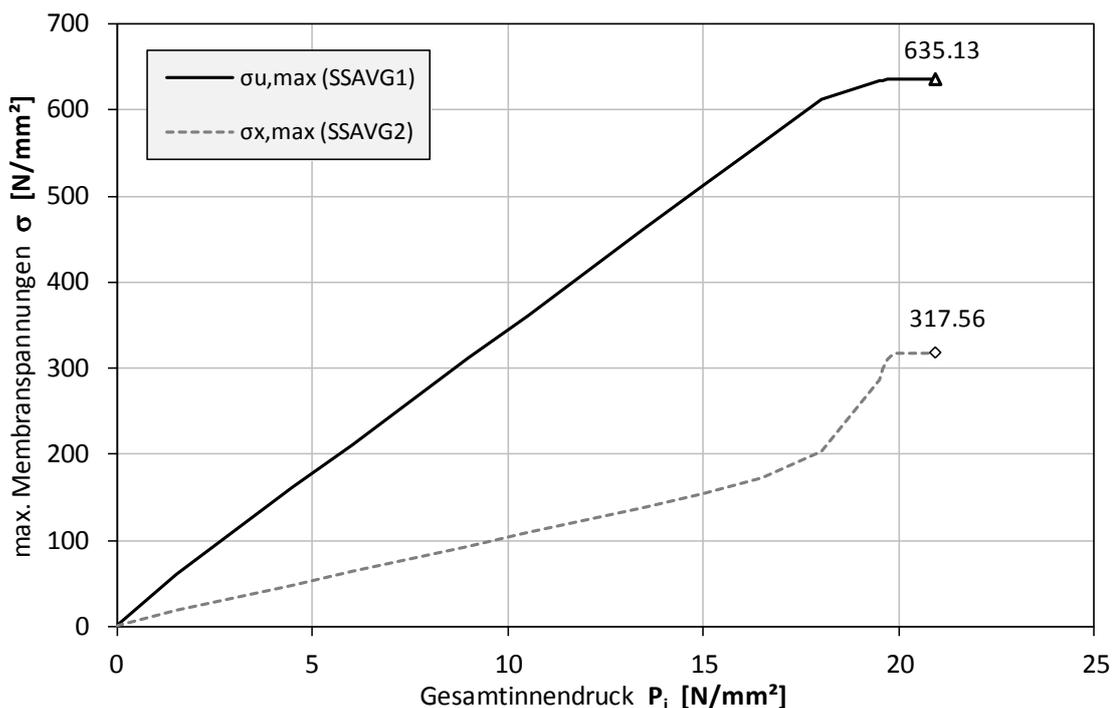


Abbildung 311: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

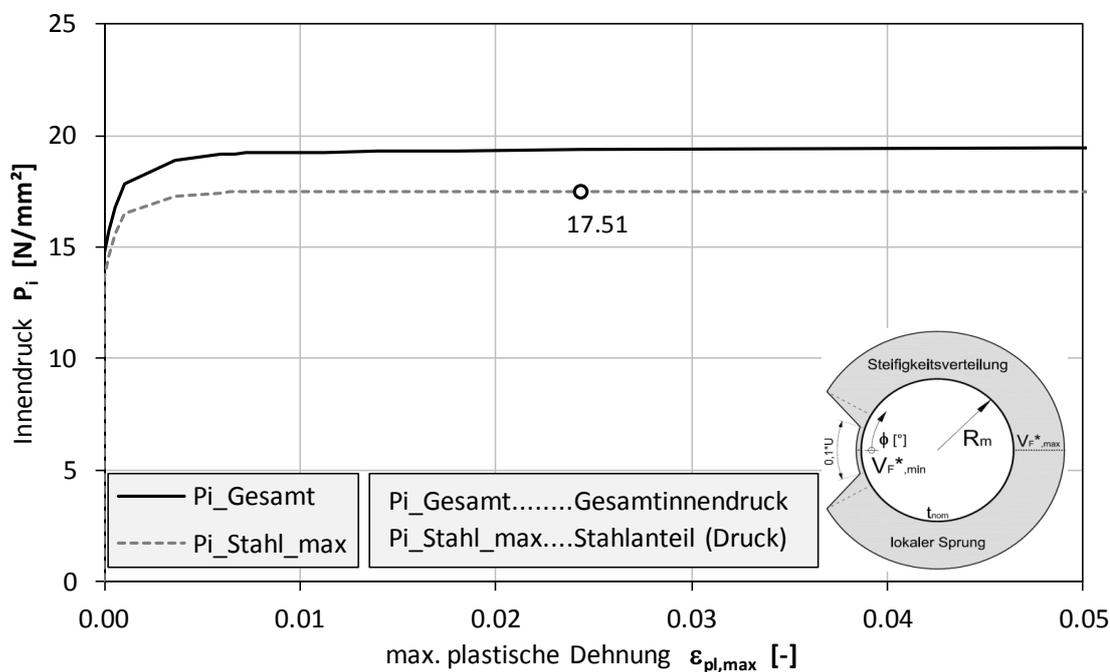


Abbildung 312: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.4.2.15 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

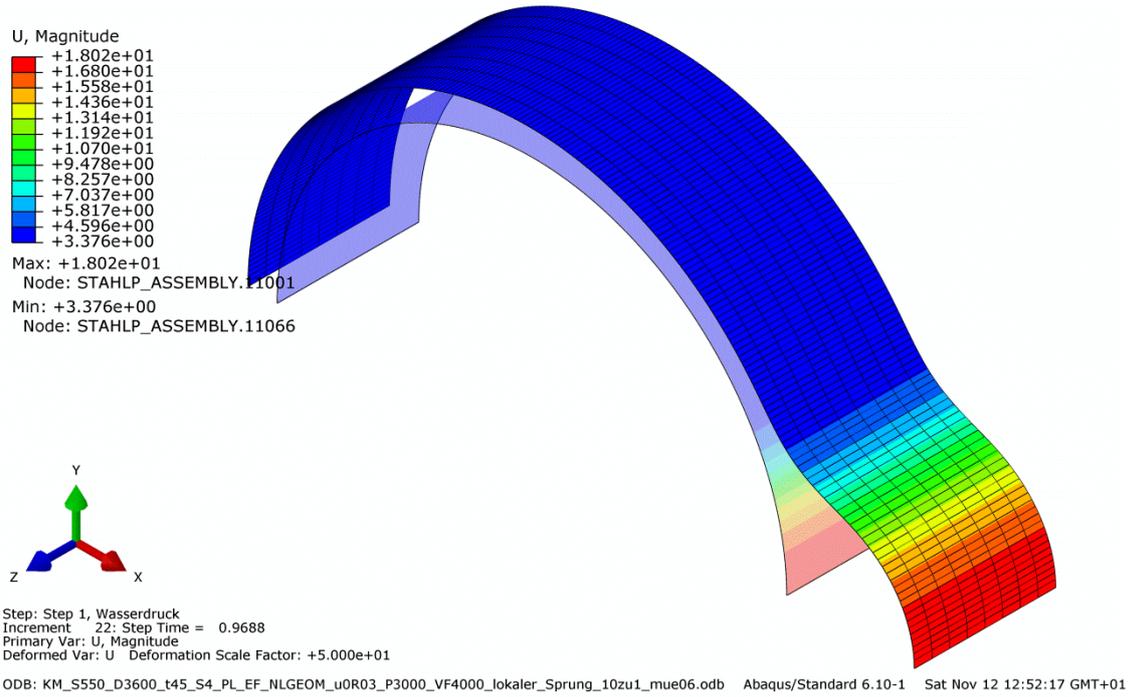


Abbildung 313: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

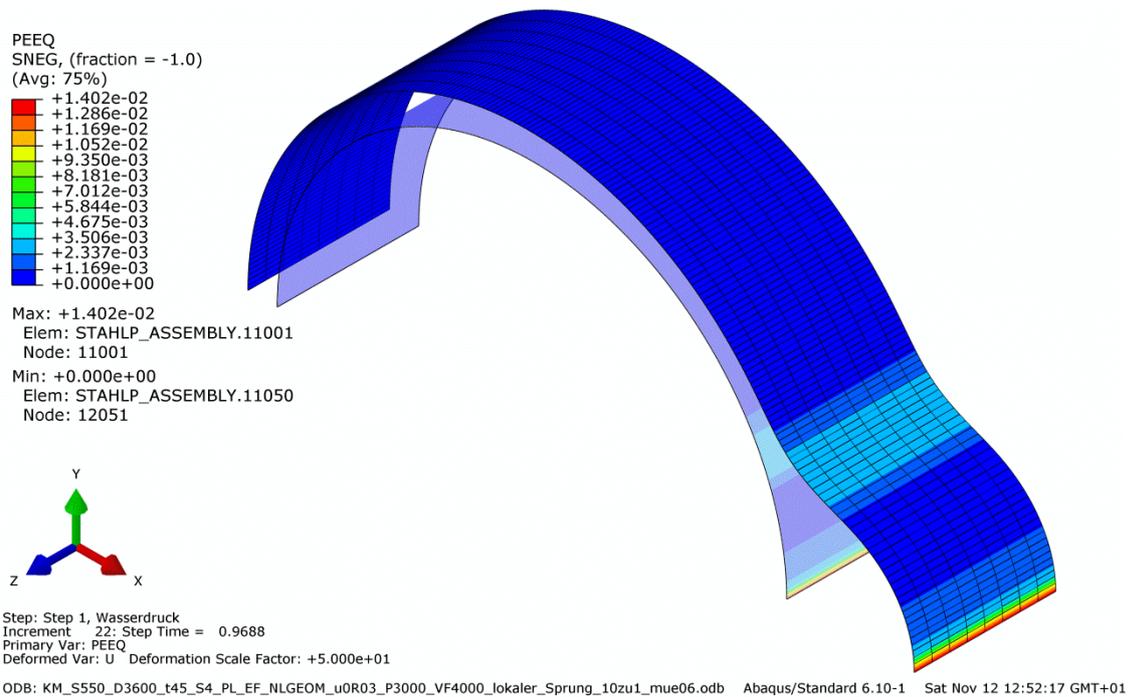


Abbildung 314: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

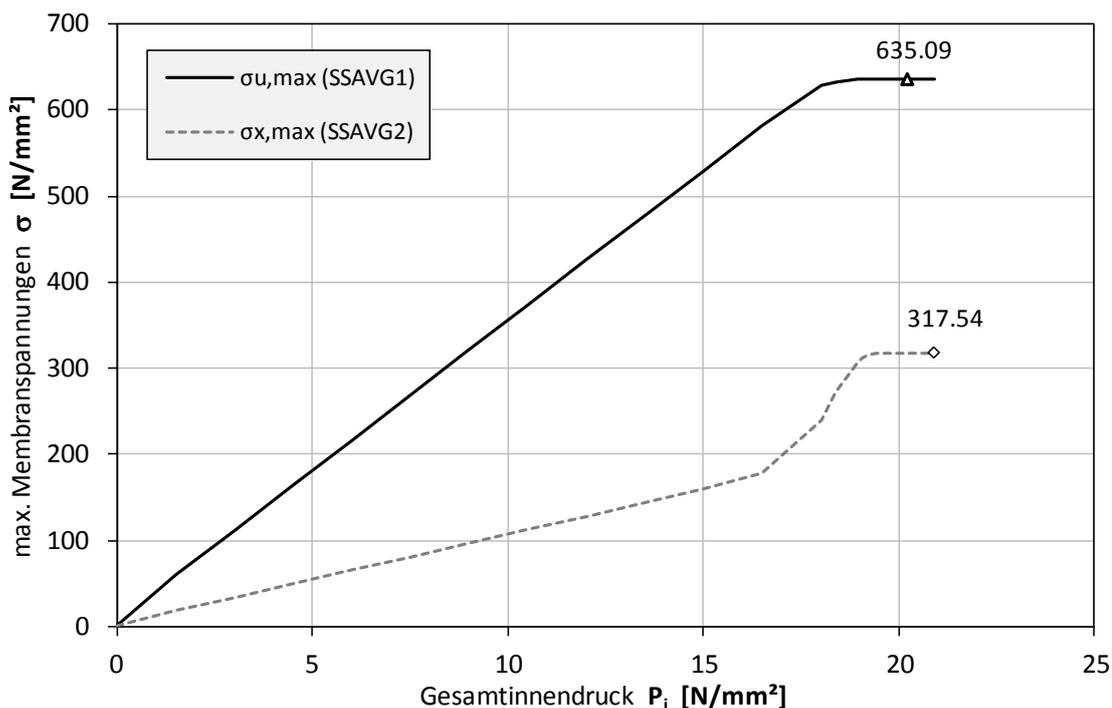


Abbildung 315: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

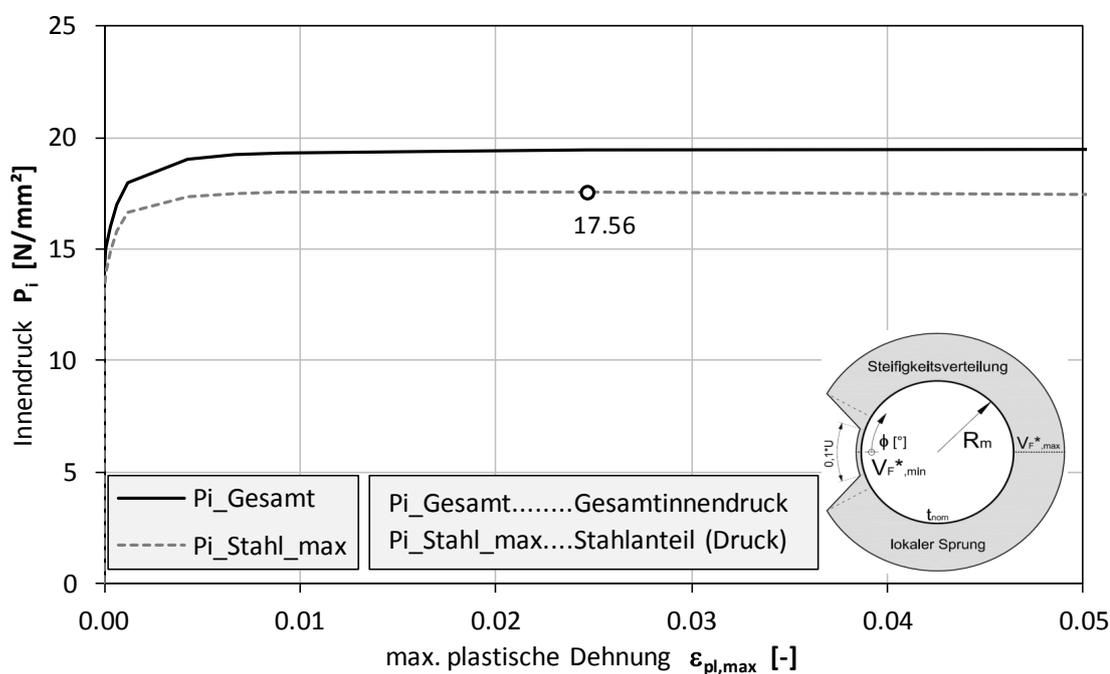


Abbildung 316: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

7.4.2.16 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

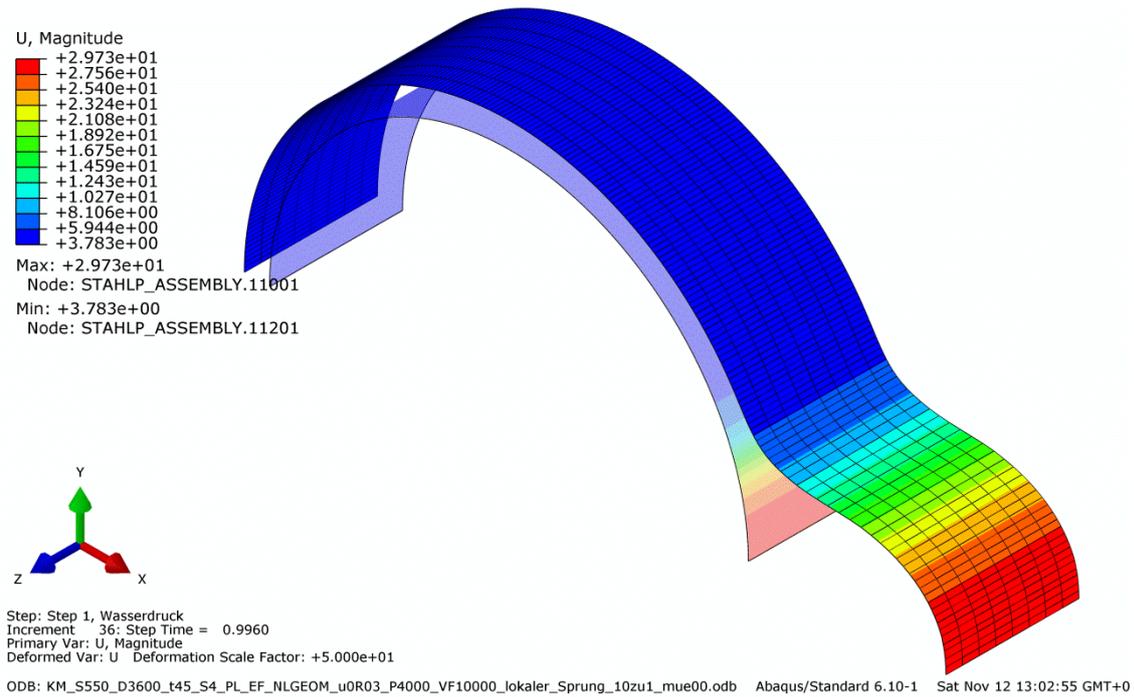


Abbildung 317: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

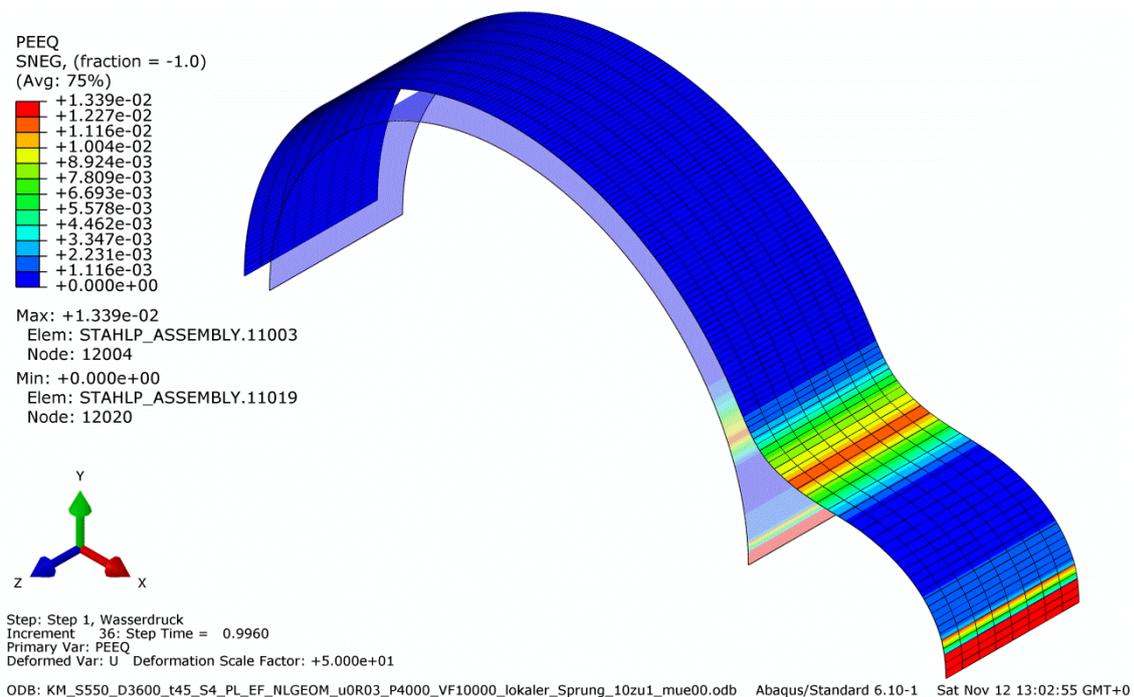


Abbildung 318: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

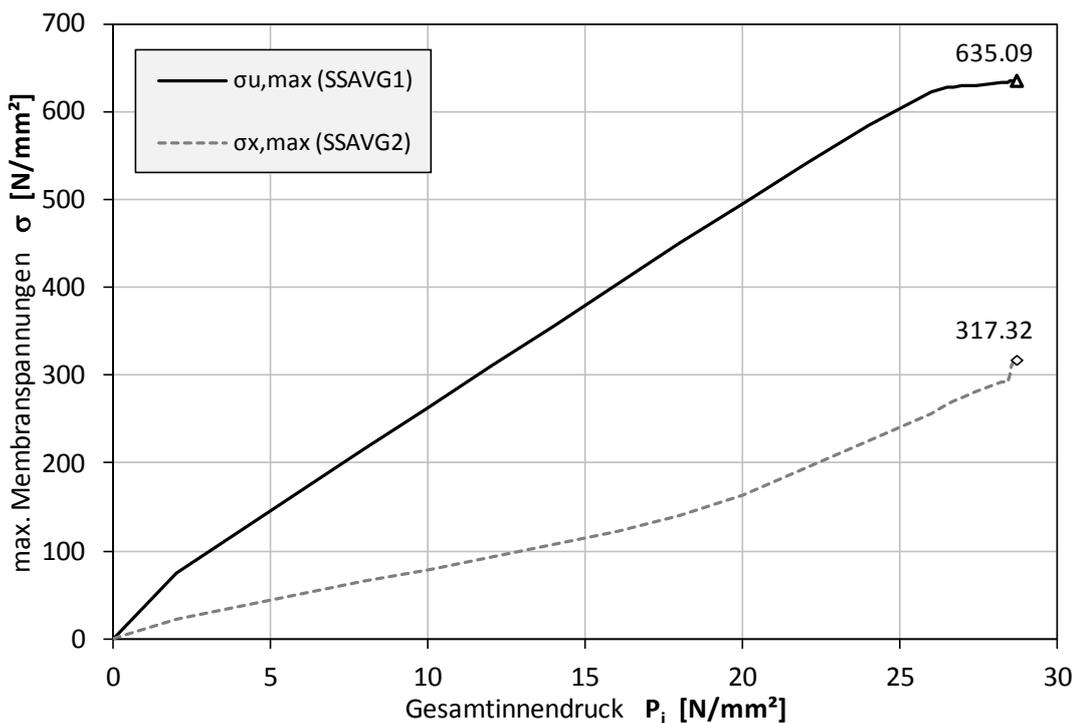


Abbildung 319: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue00

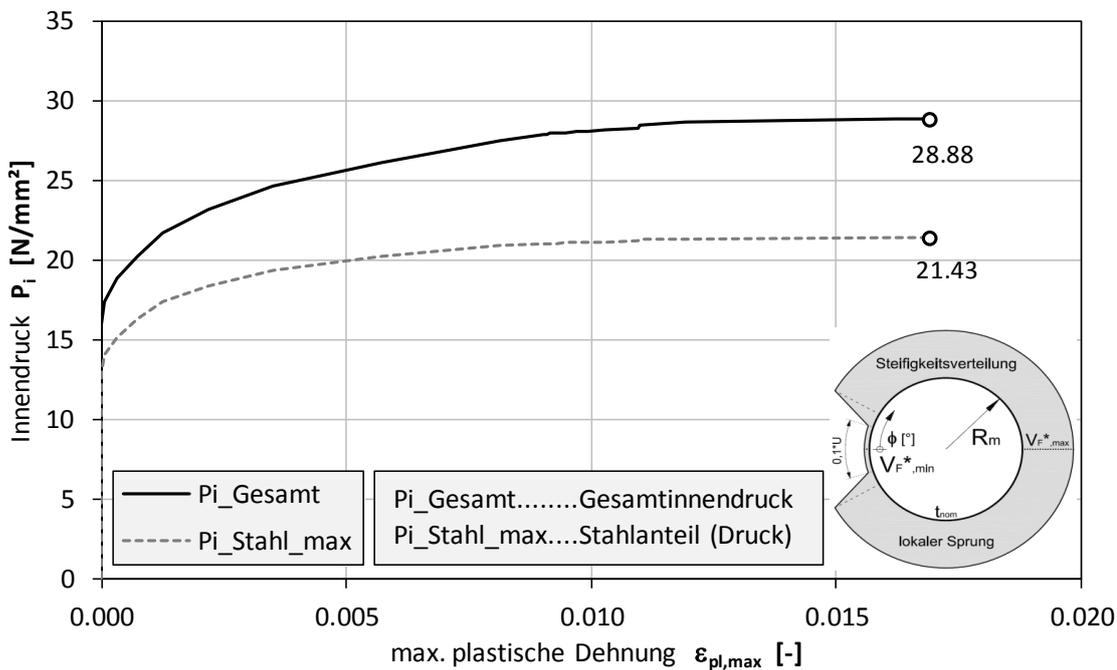


Abbildung 320: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue00

7.4.2.17 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

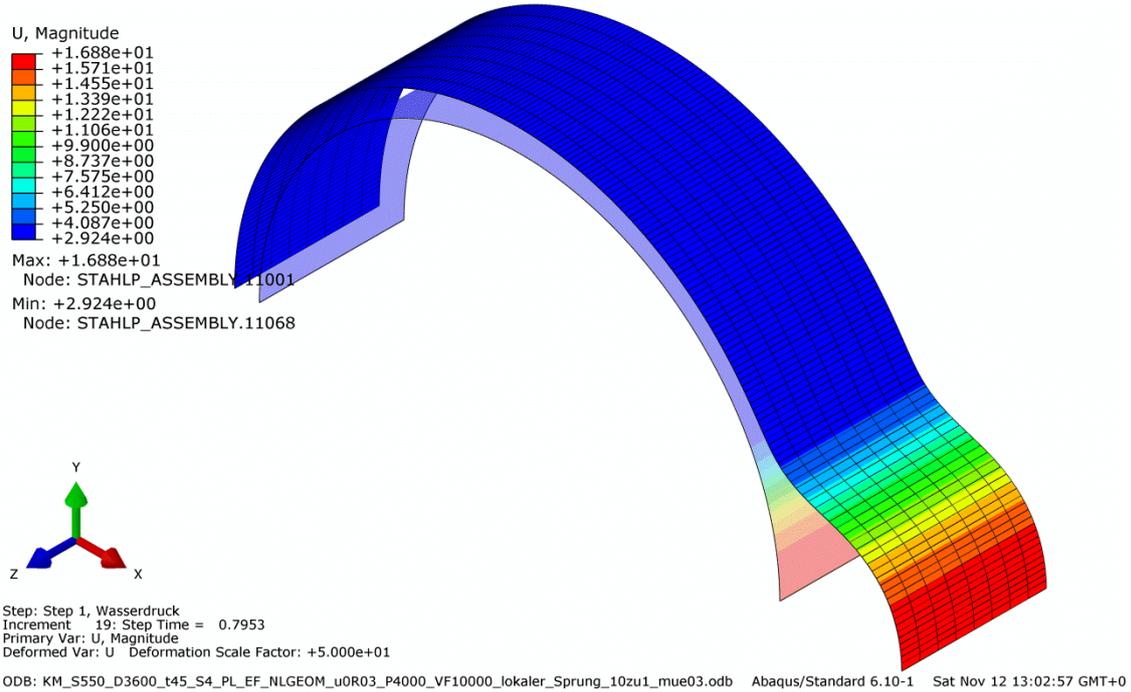


Abbildung 321: FE\_Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

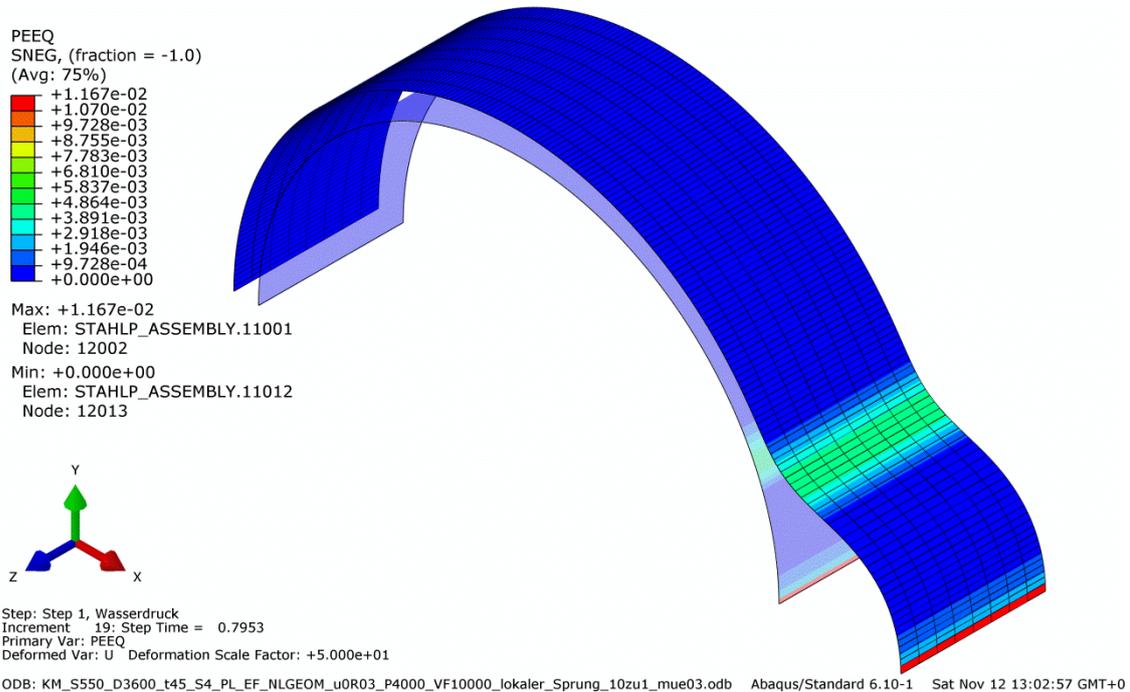


Abbildung 322: FE\_Plastische Dehnungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

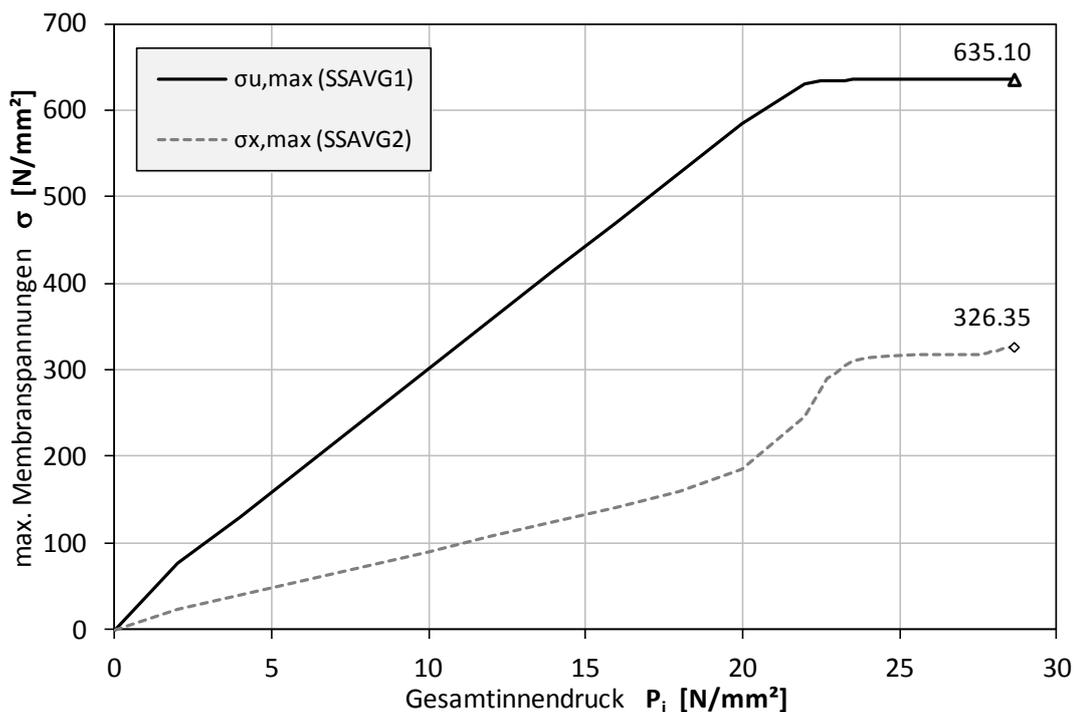


Abbildung 323: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue03

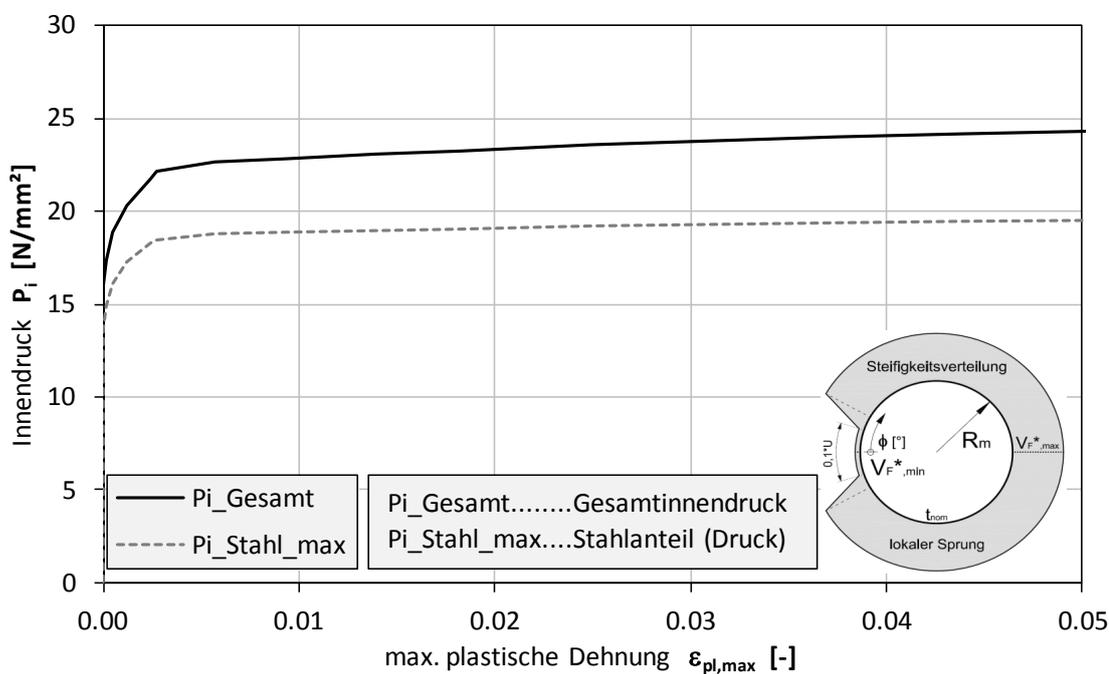


Abbildung 324: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue03

7.4.2.18 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

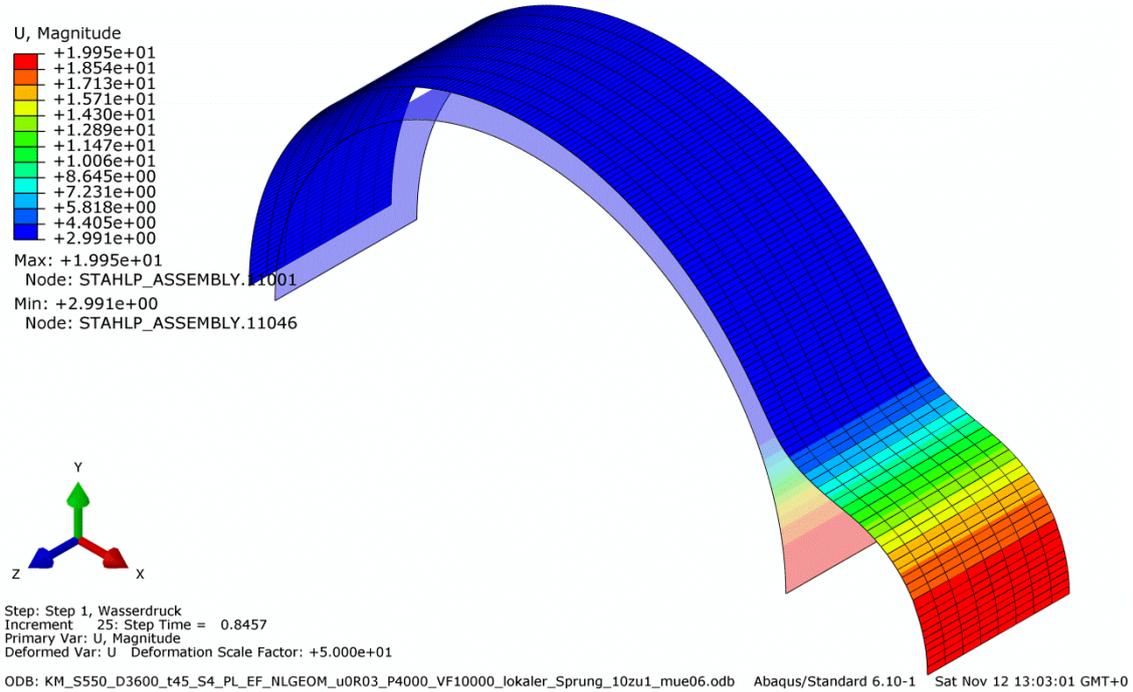


Abbildung 325: FE\_Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

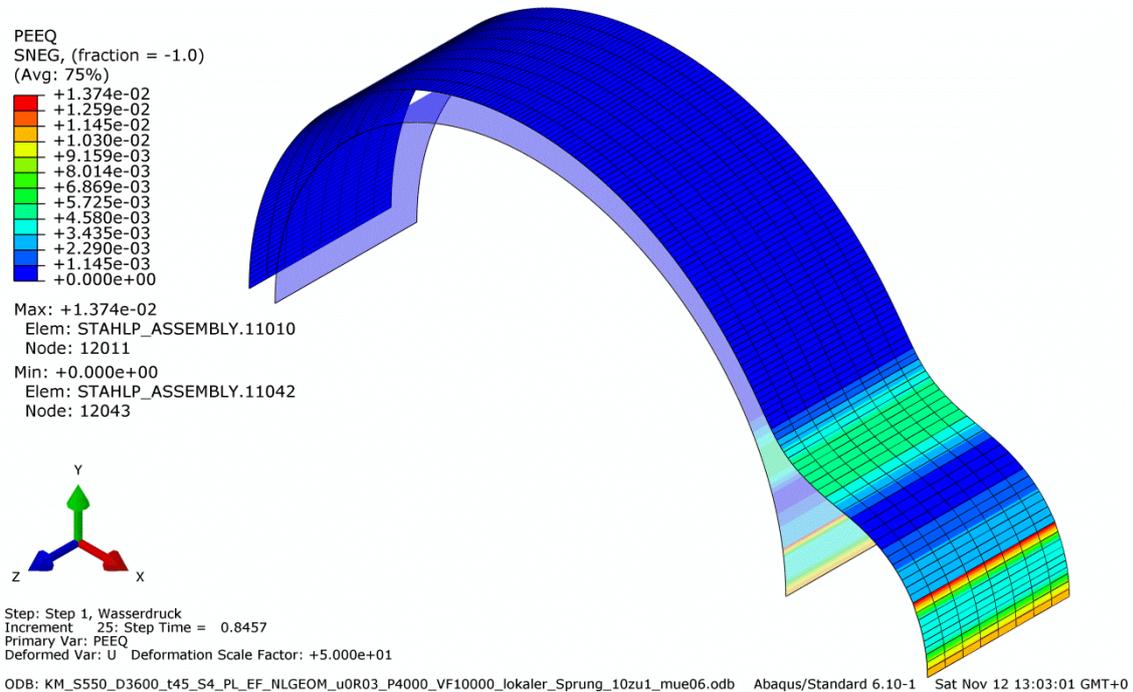


Abbildung 326: FE\_Plastische Dehnungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

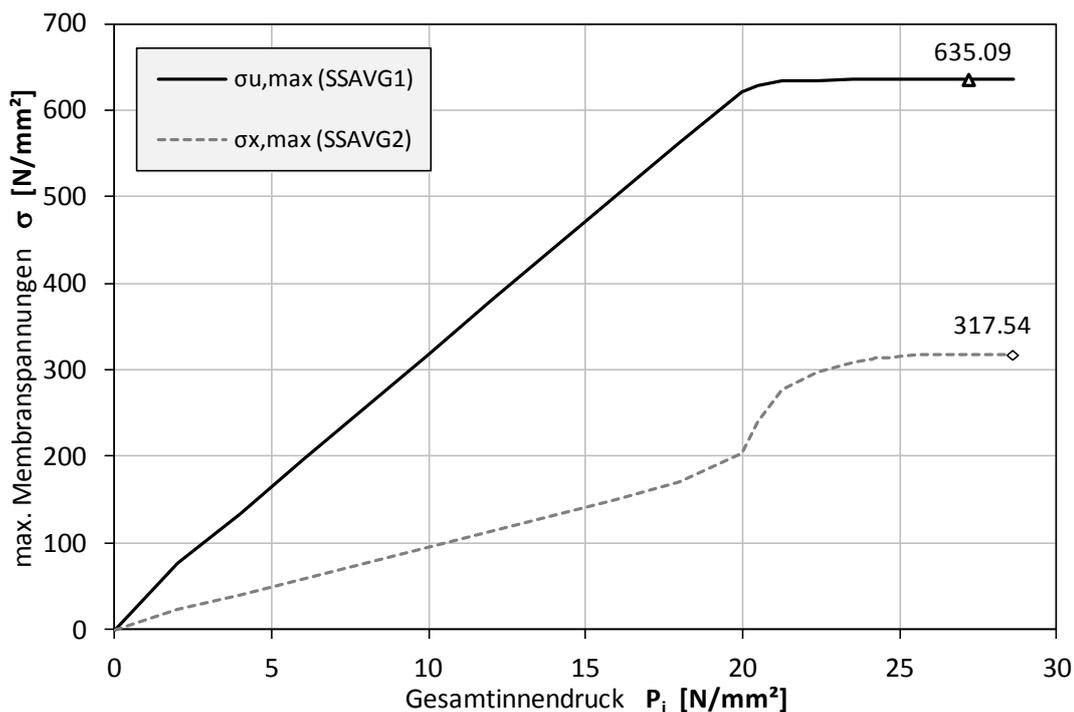


Abbildung 327: Membranspannungen, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue06

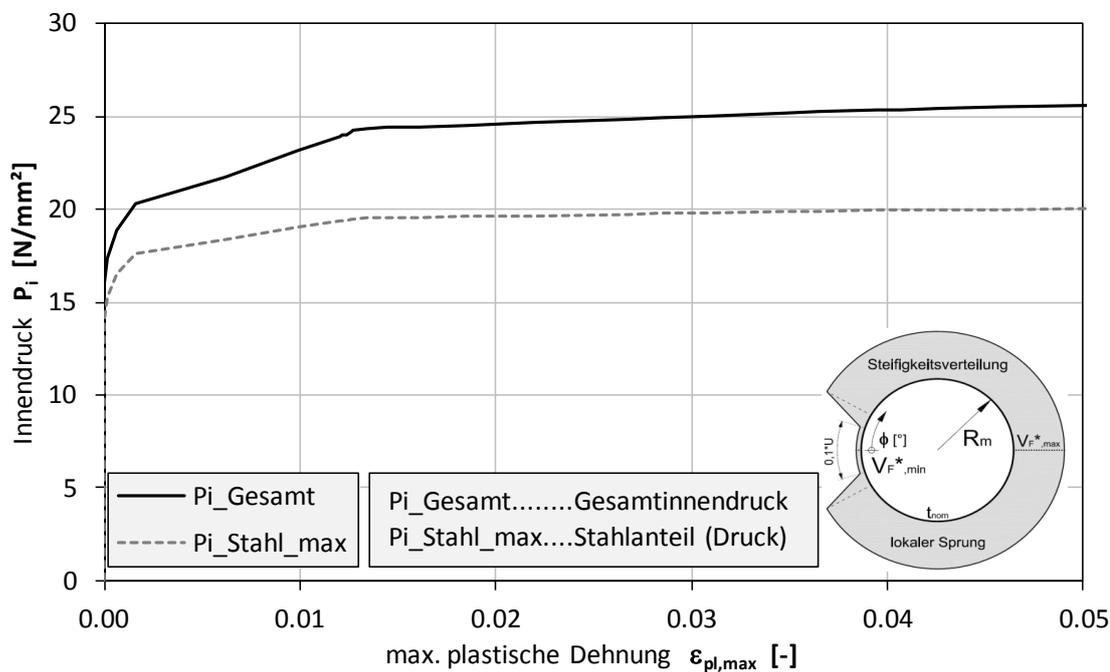


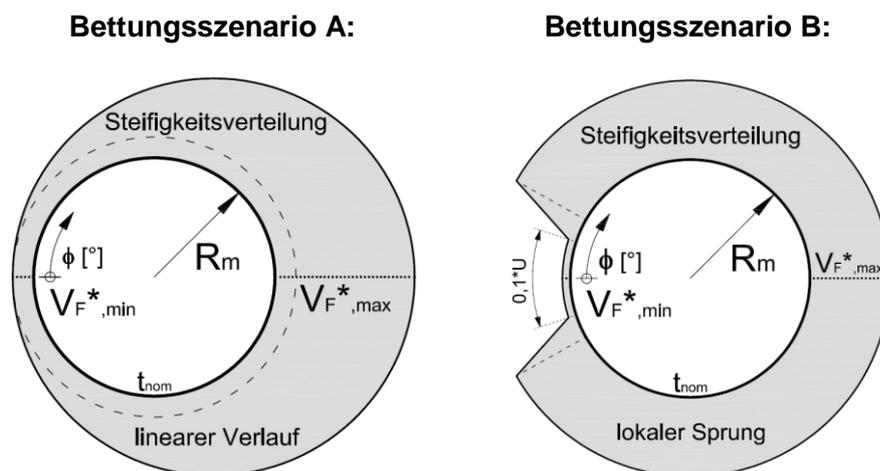
Abbildung 328: Innendruck, Entwicklung über Laststeigerung  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_Pvar\_VF10000\_Linear\_10zu1\_mue06



## 8. Zusammenfassung

### 8.1 Themenstellung der Arbeit

Das Thema dieser Arbeit besteht in der Untersuchung des Tragverhaltens von Stahlpanzerungen mit Gebirgsmitwirkung, bei denen die Ungleichförmigkeit der Bettungsverhältnisse entlang des Umfanges im Mittelpunkt steht. Es werden zwei Bettungsszenarien stellvertretend für die in der Realität meist gegebene Ungleichförmigkeit der Gebirgsverhältnisse näher untersucht. Zum einen ist dies eine stetig veränderliche Unsymmetrie der Bettung, die vom Kleinstwert auf der einen Seite des Rohres bis zum Größtwert (10-facher Wert) auf der anderen Seite anwächst (Bettungsszenario A). Zum anderen ist es eine lokale Ungleichförmigkeit (Abnahme der Bettung auf ein Zehntel des gleichförmigen Wertes), welche allfällige unvorhersehbare Störfälle (Störzone) simulieren soll (Bettungsszenario B).



Die Ergebnisse dieser Berechnung sollen darüber Aufschluss geben, ob bzw. wie weit die Ungleichförmigkeiten der Bettung die gegebene Bemessungsweise von Panzerung mit der idealisierten Modellvorstellung des radialsymmetrischen gebetteten Rohres bzw. des freitragenden Rohres beeinflussen können. Es wird dazu elastisches sowie elasto-plastisches Tragverhalten des Stahlrohres untersucht.

Abbildung 329 zeigt ein Bildbeispiel vom Einbau der Druckschachtpanzerung im Ausbruchsquerschnitt des Druckschachtes.



Abbildung 329: Einbau der Panzerung im Ausbruchquerschnitt [11]

## 8.2 Elastische Berechnung

Die Ergebnisse der elastischen Parameterstudie stellen einen direkten Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse (mit realitätsnäheren Bettungsverlauf und Reibungseinfluss) zu den analytischen Berechnungsverfahren (Berechnung mit Gebirgswirkung nach Seeber bzw. freitragende Berechnung) dar. Ausgegangen wird dabei von dem maximal zulässigen Bemessungsinndruck des maßgebenden analytischen Bemessungskriteriums. Die FE-Berechnung wird ebenfalls mit diesem Druck durchgeführt, und es erfolgt ein Ergebnisvergleich der resultierenden Spannungen.

Einen wesentlichen Einfluss im realitätsnahen Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen hat neben dem variablen unsymmetrischen Bettungsverlauf und dem gewählten Verhältnis  $R_m/t$ , die Reibungswirkung zwischen Panzerung und Betonumhüllung und der dadurch entstehende Schubwiderstand.

Die Bemessung von Druckschachtpanzerungen im Primärzustand erfolgt mit der Membranspannung als bestimmende Größe für den Gleichgewichtszustand. Umfangsspitzenspannungen aus Biegeeffekten können die zulässigen Grenzmembranspannungen bis zur Fließgrenze überschreiten und sind gesondert mit dem Sekundärspannungskriterium zu überprüfen.

### 8.2.1 Bettungsszenario: linearer Verlauf von $V_{F^*_{min}}$ auf $V_{F^*_{max}}$

Dem Bettungsszenario „linearer Verlauf“ liegt eine konservative analytische Vorbemessung mit konstant radialsymmetrischen Bettungsverlauf mit dem Kleinstwert der Felssteifigkeit  $V_{F^*_{min}}$  zugrunde. Das realistischere Bettungsmodell der FE-Berechnung zeigt einen am Halbkreis linearen Bettungssteifigkeitsanstieg auf  $V_{F^*_{max}}$ . Die FE-Berechnung erfährt in diesem Bettungsszenario also einen Bonus in der Stahlauslastung aufgrund des zunehmenden Steifigkeitsverlaufes der Bettung.

Wie in den Ergebnisdiagrammen des Kapitels 6.6.3 ersichtlich, hat ein steigender Reibungskoeffizient eine negative Auswirkung auf das maximale Spannungsniveau im Stahl (in der Schwachzone). Ein steigender Reibungskoeffizient grenzt die aus der Schwachzone resultierenden Spannungsverteilung bzw. Spannungsumlagerung durch Schubwiderstand immer lokaler ein und wirkt sich in einer lokalen Spannungserhöhung aus. Bedingungen mit fehlender Reibung  $\mu=0,00$  wirken sich rechnerisch mit deutlich verminderten Membranspannungen aus, entsprechen jedoch nicht den realen Verbundbedingungen.

Je niedriger das Verhältnis  $R_m/t$  ausfällt, sprich je größer die Wandstärke der Panzerung gegenüber dem Rohrradius wird, desto weniger Auslastungsbonus ergibt die realistischere numerische FE-Berechnung gegenüber den analytischen Berechnungsverfahren nach Seeber und die der freitragenden Berechnung.

Die größte numerische Auslastung in der Parameterstudie ergibt die Berechnung mit den Parametern  $R_m/t = 40$  und  $\mu = 0,60$ . Die Untersuchung im realistischen Bemessungsspektrum der Felssteifigkeit ergibt dabei bei einer Felssteifigkeit von  $V_{F^*_{min}} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] eine maximale Auslastung von 92% gegenüber der analytischen Berechnung. Bei einer Felssteifigkeit von  $V_{F^*_{min}} = 4000$  [N/mm<sup>2</sup>] sinkt die Auslastung auf 83%.

$R_m/t = 200$  und  $\mu = 0,60$  ergibt eine Auslastung der numerischen Berechnung von 82% bei  $V_{F^*_{min}} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] und 78% bei  $V_{F^*_{min}} = 4000$  [N/mm<sup>2</sup>].

Eine genaue Darstellung des Sachverhaltes ist in Kapitel 6.6.2 bzw. Kapitel 6.6.3 gegeben.

### 8.2.2 Bettungsszenario: lokaler Sprung von $V_{F^*_{max}}$ auf $V_{F^*_{min}}$

Das numerische Bettungsmodell „lokaler Sprung“ simuliert einen um den Rohrumfang konstanten Bettungsverlauf mit einer lokalen Störzone, in der die Felssteifigkeit auf einer Länge von 10% des Umfanges auf 10% der Felssteifigkeit ( $V_{F^*_{min}} = 0,1 \cdot V_{F^*_{max}}$ ) abfällt.

Die analytische Bemessung lässt sich hierbei in 2 unterschiedliche Fälle unterscheiden:

1. Die Bemessung erfolgt unter Gebirgsmitwirkung nach Seeber mit konstant radialsymmetrischer Felssteifigkeitsverteilung. Die Störzone wird dabei nicht erfasst und bleibt unberücksichtigt.
2. Die gesamte Umfangslänge der Panzerung wird nach dem freitragenden Kriterium ohne Gebirgsmitwirkung bemessen.

Ad 1.) Der Vergleich der numerischen Spannungsergebnisse zu der analytischen Berechnung mit konstant radialsymmetrischer Gebirgsmitwirkung äußert sich in einer Überbeanspruchung durch die Störstelle. Je kleiner die Rohrwandstärke im Verhältnis zum Rohrradius ausfällt, desto größer wird die Überbeanspruchung. Ein steigender Reibungsbeiwert wirkt sich negativ auf das Spannungsniveau aus. Das Ergebnisdiagramm des Kapitels 6.7.3.2 zeigt bei  $R_m/t = 200$  und  $\mu = 0,60$  eine Überbeanspruchung der numerischen zu analytischen Berechnung von 136% bei  $V_{F^*_{max}} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] und einen Anstieg auf 214% bei  $V_{F^*_{max}} = 4000$  [N/mm<sup>2</sup>].

Ad 2.) Während die analytische Berechnung hier ohne Gebirgsmitwirkung erfolgt, wird die numerische Berechnung bei gleichem Innendruck durch das Bettungsmodell lokaler Sprung unterstützt. Dadurch fällt das Membranspannungsniveau der FE-Berechnung mit steigender Felssteifigkeit  $V_{F^*}$  immer mehr unter das der analytischen freitragenden Bemessung. Wieder wirkt sich ein steigender Reibungskoeffizient und ein kleines Verhältnis  $R_m/t$ , wie in Kapitel 6.7.3.4 ersichtlich, in der numerischen Berechnung spannungserhöhend aus.

Der „worst case“-Bemessungsfall der Parameterstudie ergibt bei  $R_m/t = 40$  und  $\mu = 0,60$  eine Ausnutzung der numerischen Berechnung von 96% bei  $V_{F^*_{max}} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] und 79% bei  $V_{F^*_{max}} = 10000$  [N/mm<sup>2</sup>] im Vergleich zur freitragenden analytischen Bemessung.

### 8.3 Plastische Berechnung

Die plastischen Berechnungen der Parameterstudie werden nur mit ideal-plastischem Werkstoffverhalten der Stahlpanzerung durchgeführt, das Materialverhalten des Gebirges bleibt in der Rechnung linear elastisch. Ab dem Plastifikationsbeginn hält der Stahl seine definierte Fließspannung und es treten bei weiterer Laststeigerung (entsprechend dem System und dessen Umlagerungskapazität und Verformungsverhalten) zunehmende Verformungen zufolge Fließens in der Plastizierungszone auf. Ein kleiner Anteil der steigenden Last wird dabei von dieser Plastizierungszone in Form von Umfangs- und Längsspannungen (Poissoneneffekt, 0,3 (elastisch)  $\rightarrow$  0,5 (plastisch)) aufgenommen. Der wesentliche Teil des steigenden Innendruckes wird direkt dem Gebirgsmantel übertragen.

Durch das elastisch definierte Materialgesetz des Felsens, nimmt der Gebirgsmantel unter Annahme, dass die Stahlpanzerung die entsprechenden plastischen Dehnungen auch aufnehmen kann, enorme Innendrucke in der laststeigernden Berechnung auf.

In Realität erweist sich jedoch einerseits die Felsfestigkeit/Felstragfähigkeit als begrenzt, andererseits weist auch die Stahlpanzerung Störstellen (werkstofftechnischer und geometrischer Natur) auf, welche die Plastizierungsfähigkeit der Panzerung lokal einschränkt und zu einem vorzeitigen lokalen Versagen des Systems führt.

Für die Erfassung der tatsächlichen Grenztragfähigkeit bedarf es, neben dem plastischen Werkstoffgesetz der Stahlpanzerung mit Berücksichtigung geometrischer und materieller Imperfektionen, auch der Limitierung der Felstragfähigkeit mittels geeigneten Materialgesetzes (reale Felstragfähigkeit mit Störstellen, Bruchmechanik) und dessen Abbruchkriterium für eine plastische FE-Berechnung.

Diese Aufgabe sprengt den Rahmen dieser Masterarbeit jedoch bei weitem, und es bedarf weiterer Untersuchungen, wenn eine klare Aussage über das plastische Tragverhalten von Druckschachtpanzerungen gegeben werden soll.

Die Ergebnisse der plastischen Berechnungen dieser Arbeit erreichen wegen des fehlenden Abbruchkriteriums für die Felstragfähigkeit ein Lastniveau (Innendruck), das im Bereich der Höchstwerte nicht der Realität entspricht, und nur im Bereich geringer Plastizierung zur Beurteilung des Tragverhaltens verwendet werden kann.

## 8.4 Veranschaulichung der Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 330 - Abbildung 337) dienen zur Darstellung des grundlegenden gegenseitigen Verhaltensmusters der Berechnungsvarianten unter Laststeigerung im Vergleich zueinander. Die Berechnungsvarianten sind zum einen die analytischen Verfahren nach Seeber und die freitragende Berechnung, zum anderen die numerische FE-Berechnung mit variablem Bettungsmodell. Der Belastungsanstieg erstreckt sich über den gesamten elastischen Bereich bis zu einem begrenzt fortgeschrittenen plastischen Zustand der FE-Berechnung.

Die Untersuchungen beziehen sich dabei wieder auf das Bettungsszenario linearer Verlauf und auf das Bettungsszenario lokaler Sprung.

Die Ergebnisse werden für folgende fixierte Parameter dargestellt:

- Stahlgüte:                    Stahl S550 Q
- Fließgrenze:                 $f_y = 550$  [N/mm<sup>2</sup>]
- Rohrradius:                  $R_m = 1800$  [mm]
- Reibungsbeiwert:          $\mu = 0,60$  [-]
- Initialspalt:                 $u_0/R_m = 0,0003$  [-]

Um die realistische Bemessungsbandbreite abzugrenzen, werden die Untersuchungen an den oberen und unteren Grenzwerten der Verhältnisses  $R_m/t$  und der Gebirgssteifigkeit  $V_F^*$  durchgeführt. Weiteres wird den Untersuchungen ein oberer Grenzwert der Reibung von  $\mu=0,60$  [-] zu Grunde gelegt.

Variable Parameter:

Geometrisches Verhältnis:

- $R_m/t = 200$
- $R_m/t = 40$

Felssteifigkeiten :

- Bettungsfall linearer Verlauf:
  - $V_{F^* \min} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>],     $V_{F^* \max} = 10000$  [N/mm<sup>2</sup>]
  - $V_{F^* \min} = 4000$  [N/mm<sup>2</sup>],     $V_{F^* \max} = 40000$  [N/mm<sup>2</sup>]
- Bettungsfall lokaler Sprung:
  - $V_{F^* \min} = 100$  [N/mm<sup>2</sup>],     $V_{F^* \max} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>]
  - $V_{F^* \min} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>],     $V_{F^* \max} = 10000$  [N/mm<sup>2</sup>]

### 8.4.1 Allgemeines zu den Diagrammen

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt pro ausgewerteten Fall in einem Diagrammpaar. Im oberen Diagramm werden die Membranspannungen der einzelnen Berechnungsverfahren über die Laststeigerung aufgetragen. Diese sind einerseits die 2 analytischen Berechnungsverfahren nach Seeber und die der freitragenden Bemessung. Zum anderen sind die maximalen Umfangs- und Längsmembranspannungen der FE-Berechnung am maßgebenden Element dargestellt. Im zugehörigen darunter angeordneten Diagramm werden die Ausnutzungsverhältnisse der numerischen zu den analytischen Berechnungen aufgetragen. Werte  $>1$  deuten dabei auf eine Mehrauslastung der FE-Berechnung hin, Werte  $<1$  spiegeln einen Auslastungsbonus wider.

Es lassen sich 3 Bereiche erkennen.

#### Bereich 1: Initialspaltüberbrückung

Bis zur Initialspaltüberbrückung übernimmt die Stahlpanzerung die alleinige Innendruckaufnahme. Die Gebirgswirkung ist dabei noch nicht aktiviert. Alle 3 Berechnungsverfahren beschreiben bis dahin den gleichen Spannungsverlauf und das Ausnutzungsverhältnis beträgt 1,0.

#### Bereich 2: Elastischer Bereich nach Kontakt Stahlpanzerung/Beton/Gebirgsmantel

Nach dem Anliegen der Stahlpanzerung an den Hinterfüllbeton bzw. den Gebirgsmantel, wird die Gebirgsmitwirkung an der Lastabtragung aktiviert. Der Stahlspannungsverläufe der Berechnung nach Seeber und der FE-Berechnung beschreiben ab diesem Punkt einen flacheren Anstieg, während die freitragende Bemessung weiterhin den bisherigen Verlauf verfolgt. Im Bettungsszenario linearer Verlauf stellen sich nach Kontakt relativ konstante Werte des Ausnutzungsverhältnisses, sowohl im Vergleich zur analytischen Seeber- als auch zur freitragenden Berechnung, im elastischen Bereich ein. D.h. das Ausnutzungsverhältnis ist einigermaßen unabhängig vom Lastniveau bei elastischem Materialverhalten des Stahles. Im Bettungsszenario lokaler Sprung lässt sich ein Anstieg im Ausnutzungsverhältnis zur Seeberbemessung bei steigendem Lastniveau erkennen. Der Vergleich zur freitragenden Berechnung beschreibt wiederum einen annähernd konstanten Verlauf. Die durch den Poisson-Effekt (ebener Formänderungszustand) erzeugte Rohrlängsspannung erreicht im elastischen Zustand 30% der Rohrumfangsspannung.

**Bereich 3: Plastizierungsbeginn der FE-Berechnung**

Ab einem gewissen Lastniveau beginnt die Plastizierung durch ein entsprechendes Materialgesetz in der FE-Berechnung. Der Fließbeginn und Fließzustand wird im mehrachsigen Spannungszustand durch Erreichen der einachsigen Fließspannung über die Mises-Vergleichsspannung beschrieben. Ab dem Fließbeginn erfährt das System im ebenen Formänderungszustand allmählich eine Vergrößerung in der Umlagerungskapazität der Längsspannungen auf einen Grenzwert von 50% der Umfangsspannungen.

Während die Spannungsgrößen der FE-Berechnung im Fließzustand ein annähernd konstantes Niveau bei Laststeigerung halten, nehmen die analytischen Berechnungsverfahren mit rein elastischem Werkstoffgesetz ohne Spannungsbegrenzung weiterhin an Spannung auf. Dies führt zu dem Abfall in den Ausnutzungsdiagrammen. Die analytischen Berechnungen erfahren unter der Laststeigerung, aufgrund des rein elastisch definierten Materialgesetzes, sehr hohe Spannungsgrößen und müssen dadurch durch eine entsprechende „zulässige“ Spannung abgegrenzt werden.

Anmerkung: Die Kurvenverläufe der Ausnutzungsdiagramme, besonders im Bereich des Überganges von der Initialspaltüberbrückung zum Bereich der Gebirgsmitwirkung, sind nur als angenähert zu verstehen, da durch die durchgeführte FE-Berechnung nur begrenzte, grob abgestufte Berechnungsergebnisse im Laststeigerungsverlauf vorhanden sind. Für eine genauere Untersuchung muss eine feinere Inkrementierung der Berechnung gewählt werden.

Für die weiteren Untersuchungen dazu, vor allem in Bezug auf das Verhalten bei veränderlicher Gebirgssteifigkeit, sei der Leser auf das gesamte Kapitel 0:

Parameterstudie ELASTISCH, im speziellen auf die Teilkapitel 6.6 und 6.7 verwiesen.

### 8.4.2 Bettungsfall linearer Verlauf

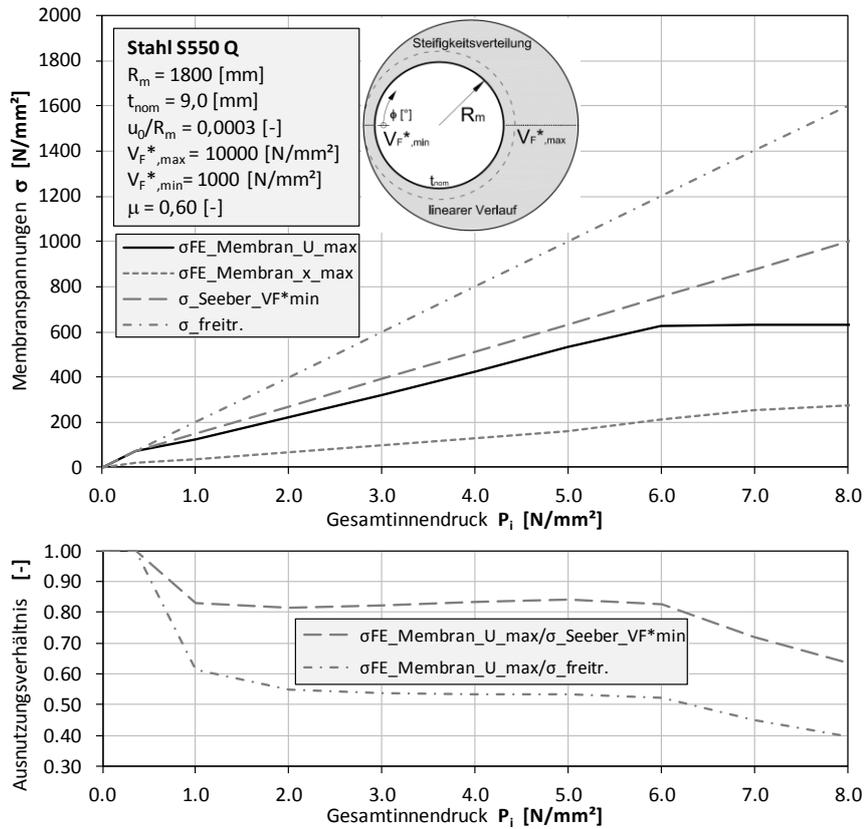


Abbildung 330: Berechnungsvergleich, linearer Verlauf,  $R_m/t = 200$ ,  $V_{F^*,min} = 1000$

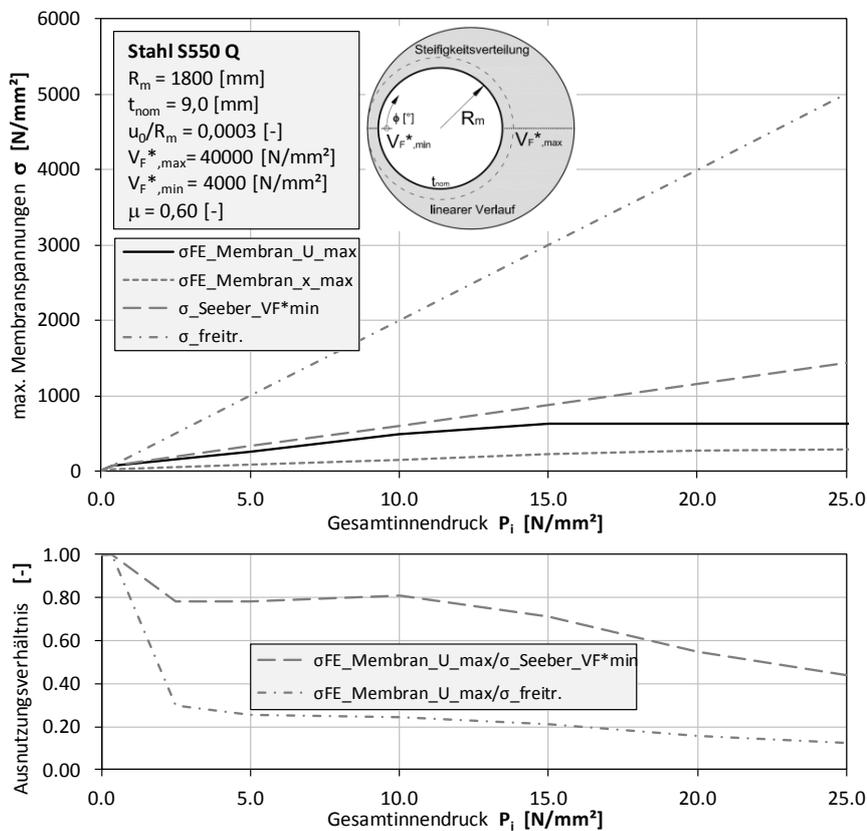


Abbildung 331: Berechnungsvergleich, linearer Verlauf,  $R_m/t = 200$ ,  $V_{F^*,min} = 4000$

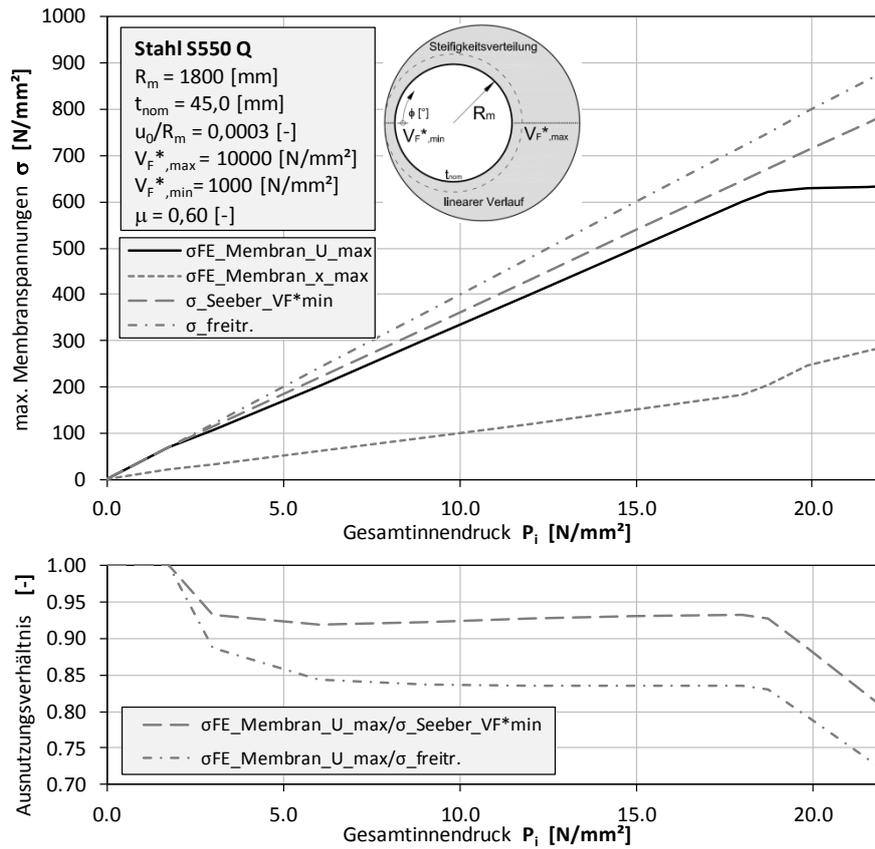


Abbildung 332: Berechnungsvergleich, linearer Verlauf,  $R_m/t=40$ ,  $V_F^*min = 1000$

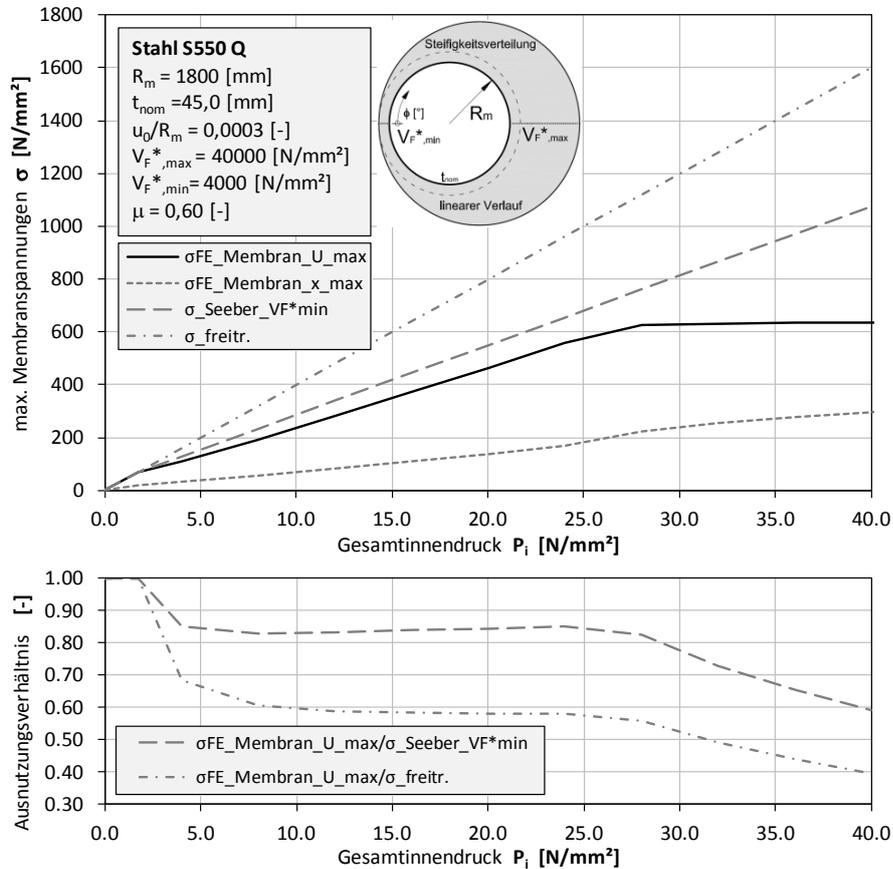


Abbildung 333: Berechnungsvergleich, linearer Verlauf,  $R_m/t = 40$ ,  $V_F^*min = 4000$

### 8.4.3 Bettungsfall lokaler Sprung

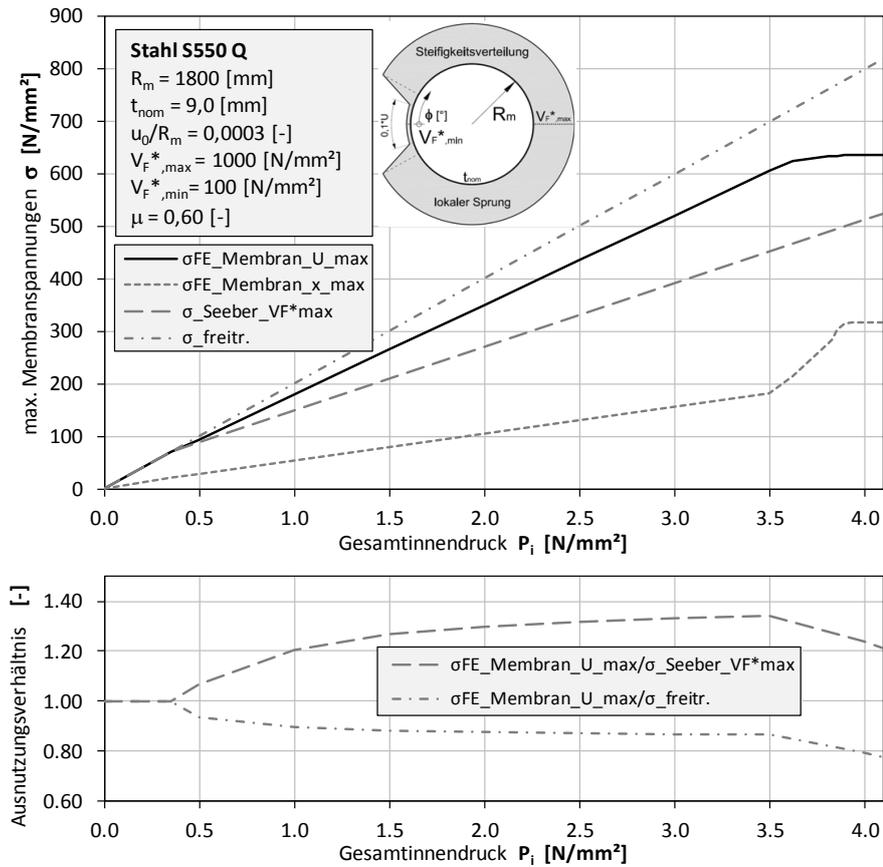


Abbildung 334: Berechnungsvergleich, lokaler Sprung,  $R_m/t = 200$ ,  $V_{F^*max} = 1000$

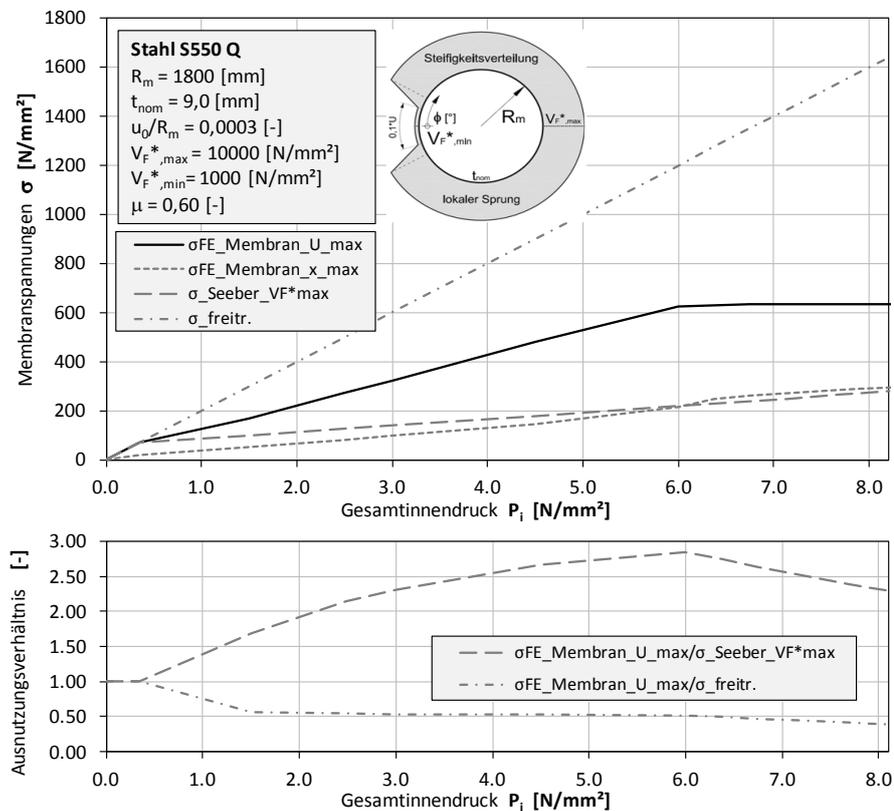


Abbildung 335: Berechnungsvergleich, lokaler Sprung,  $R_m/t = 200$ ,  $V_{F^*max} = 10000$

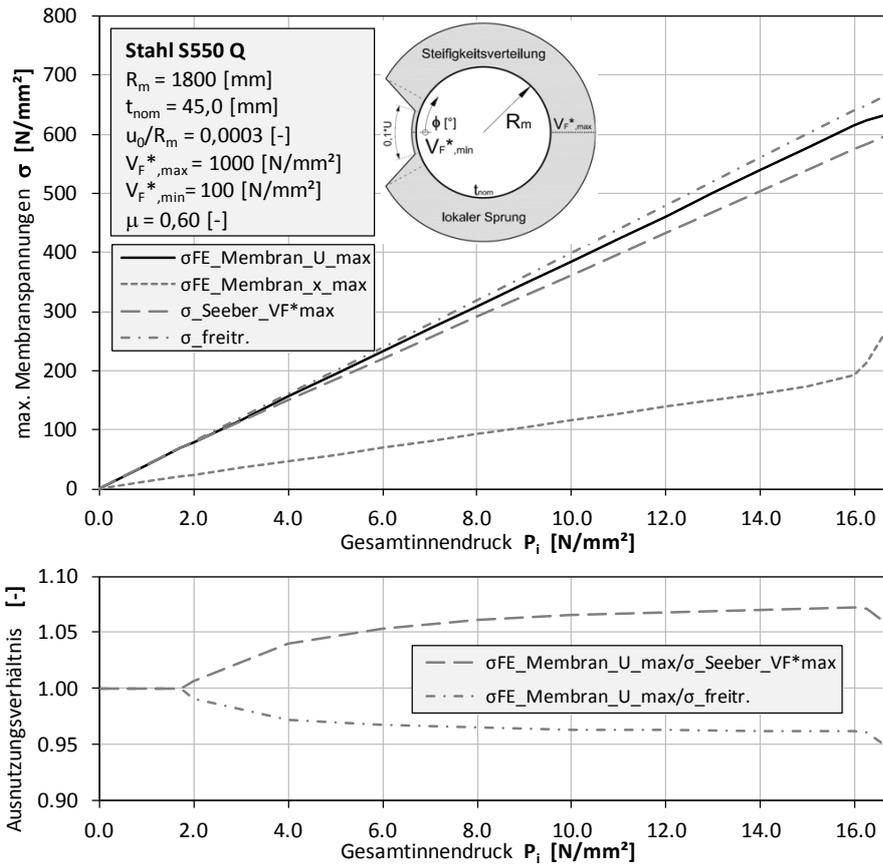


Abbildung 336: Berechnungsvergleich, lokaler Sprung,  $R_m/t = 40$ ,  $V_F^*_{max} = 1000$

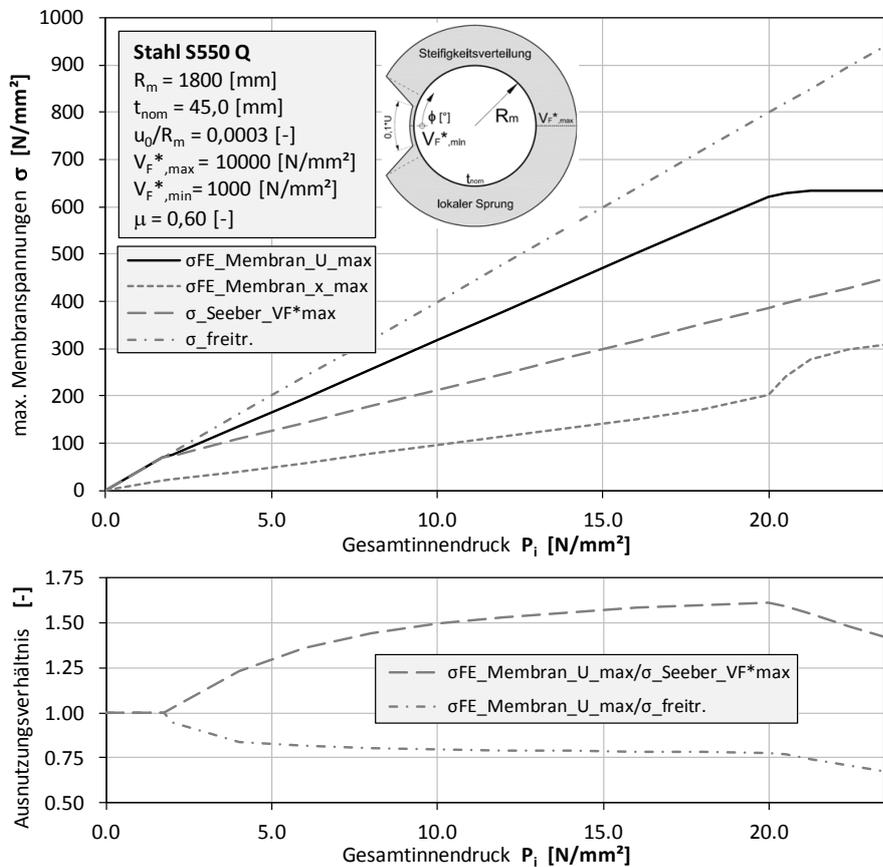


Abbildung 337: Berechnungsvergleich, lokaler Sprung,  $R_m/t = 40$ ,  $V_F^*_{max} = 10000$

## 8.5 Relevanz der Ergebnisse für die stahlbauliche Bemessung

Die stahlbauliche Bemessung unterscheidet die Spannungsgrößen nach den Kategorien der Primärspannungen, Sekundärspannungen und Spannungsdifferenzen für den Betriebsfestigkeitsnachweis (siehe EN 1993-1-6).

Die Primärspannungen sind jene Größen, die zur Herstellung des Gleichgewichts erforderlich sind. Bei den vorliegenden Rohren können diese durch die Membranspannungen repräsentiert werden. Dabei kann auch plastisches Tragverhalten mit berücksichtigt werden. Ihre Begrenzung erfolgt durch „zulässige“ Spannungen.

Die Sekundärspannungen sind zur Herstellung der Verträglichkeit der Verformung erforderlich und können bei Vergrößerung der Spannungen durch Fließen abgebaut werden. Sie werden durch die Gesamtspannungen aus Membran- und Biegewirkung einer elastischen Berechnung dargestellt. Ihre Begrenzung erfolgt durch das „Shake-Down“ Kriterium, d.h. durch etwa die 2-fache Fließgrenze.

Die Spannungsgrößen zum Nachweis der Betriebsfestigkeit nach dem Wöhler-Linien-Konzept folgen ebenfalls aus den Sekundärspannungsgrößen durch Umrechnung entsprechend der ermüdungswirksamen Spannungsschwankungen.

Die vorliegenden Berechnungen gehen auf diese beiden Spannungsarten durchwegs ein. Die Primärspannungen, als Hauptteil der Untersuchungen dieser Masterarbeit, sind in erster Linie näher behandelt und dargestellt worden. Zudem interessiert jedoch auch die prozentuelle Erhöhung der Sekundärspannungen. Auf diese wird hier kurz näher eingegangen.

Die folgenden Diagramme (Abbildung 338 und Abbildung 339) zeigen die prozentuelle Spannungserhöhung der Sekundärspannung. Es wird ein Initialspalt von  $u_0/R_m$  von 0,0003 [-] und der obere Grenzfall eines Reibungsbeiwertes  $\mu=0,60$  [-] berücksichtigt. Der Bemessungsinnendruck ist wieder durch das maßgebende analytische Bemessungskriterium begrenzt, und die Berechnung erfolgt dadurch im rein elastischen Bereich.

Die Spannungserhöhung der Sekundärspannung beträgt dabei bei einem sehr dicken Rohr mit großer Felssteifigkeit und dem ungünstigen Bettungsszenarios einer lokalen Störzone bei Reibungsbeiwert  $\mu=0,60$  [-] maximal 23,6 % gegenüber der Membranspannung.

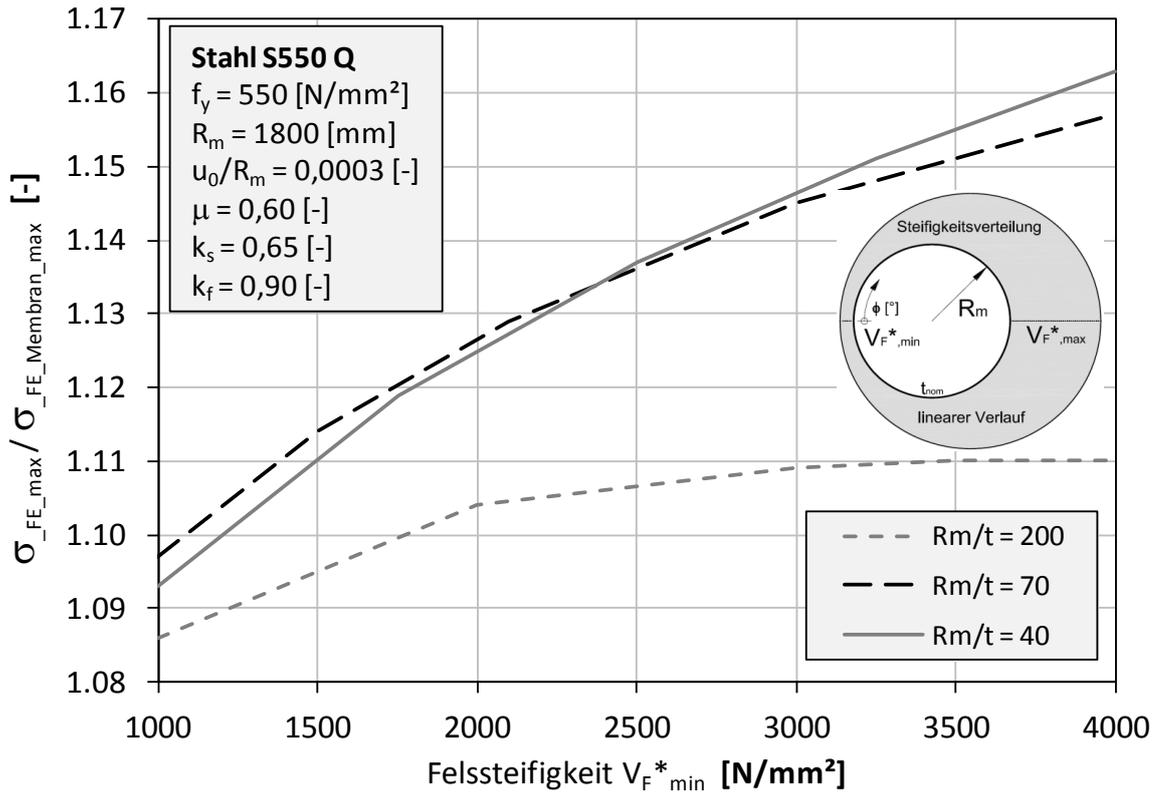


Abbildung 338: Spannungserhöhung Sekundärspannung, linearer Verlauf,  $\mu=0,60$

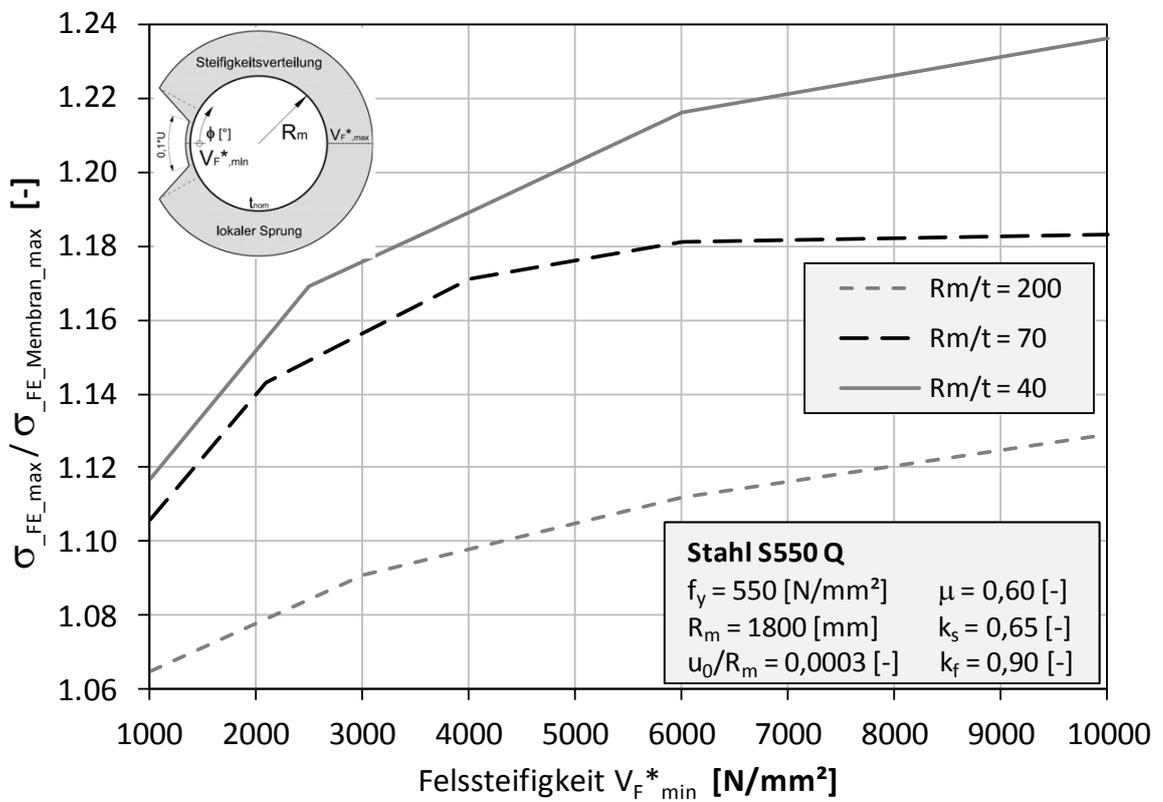


Abbildung 339: Spannungserhöhung Sekundärspannung, lokaler Sprung,  $\mu=0,60$

Es gilt jedoch zu beachten, dass das Spannungsniveau und das Spannungsverhältnis sehr sensibel von der Rohrwandstärke, dem Bettungsverlauf und der Größe der vorhandenen Reibungswirkung abhängen.

#### Bettungsfall: linearer Verlauf

Beim Bettungsfall „linearer Verlauf“ ergibt die Berechnung mit dünnen als auch mit dicken Rohren, dass bei abnehmenden Reibungsbeiwerten die maximalen Spannungsgrößen der Primär- und auch der Sekundärspannung niedriger ausfallen, die Spannungserhöhung der Sekundärspannung im Verhältnis zur Primärspannung jedoch größer wird als in Abbildung 338. Der Größtwert der Parameterstudie kann im ungünstigsten Fall bei Reibung  $\mu = 0,00$  [-], einer Felssteifigkeit  $V_F^*_{min} = 1000$  [N/mm<sup>2</sup>] und  $R_m/t = 40$  [-] den Faktor 1,338 [-] annehmen.

#### Bettungsfall: lokaler Sprung

Anders Verhalten zeigt sich beim Bettungsfall „lokaler Sprung“. Durch die abrupte Steifigkeitsänderung erfährt die Panzerung große lokale Rohrkrümmungen. Die Rohrwandstärke und die damit verbundene Biegesteifigkeit haben einen großen Einfluss auf die Spannungsverteilung im Querschnitt.

- Bei dünnen Rohren steigen bei zunehmendem Reibungsbeiwert sowohl die Primär- als auch die Sekundärspannungen. Das Spannungsverhältnis von Sekundär- zu Primärspannung erhöht sich mit abnehmender Reibungswirkung (siehe Abbildung 340)
- Dicke Rohre reagieren bei lokalen Störstellen unter abnehmendem Reibungsbeiwert mit einem Anstieg der Sekundärspannung, während die Primärspannung mit abnehmendem Reibungsbeiwert sinkt. Dies kann wie in Abbildung 340 gezeigt, bei den ungünstigen Grenzbedingungen einer hohen Felssteifigkeit von  $V_F^*_{max} = 10000$  [N/mm<sup>2</sup>], einem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,00$  [-] und einem Verhältnis  $R_m/t = 40$  [-] zu einem hohen Spannungsverhältnis der Sekundär- zur Primärspannung von 1,617 [-] führen.

Es sei angemerkt, dass bei einer Berechnung mit zunehmendem Reibungseinfluss die Maximalwerte der Primärspannung als auch der Sekundärspannung nicht an der gleichen Stelle am Umfang auftreten müssen. Wie in Abbildung 341 und Abbildung 342 dargestellt, neigen die meisten Rohre bei mittleren Felssteifigkeiten dazu, die maximale Membranspannung im größten Ausbeulungsbereich aufzuweisen, wobei die maximale Gesamtspannung aus Membran- und Biegespannung im

Gegenkrümmungsbereich auftritt. Gleiches Verhalten zeigen dicke Rohre mit hohen Felssteifigkeiten als auch dünne Rohre mit niedrigen Felssteifigkeiten.

Im Gegensatz dazu, treten bei dünnen Panzerungsrohren und hoher Felssteifigkeit, sowie bei dicken Rohren mit niedrigen Felssteifigkeitswerten, sowohl die maximale Primärspannung als auch die maximale Sekundärspannung zusammen im Ausbeulungsbereich auf.

Eine genaue Darstellung der Ergebnisse für jeden in der Parameterstudie berechneten Bemessungsfall (wie in Abbildung 342) kann im Anhang A: Parameterstudie ELATSTISCH nachgeschlagen werden.

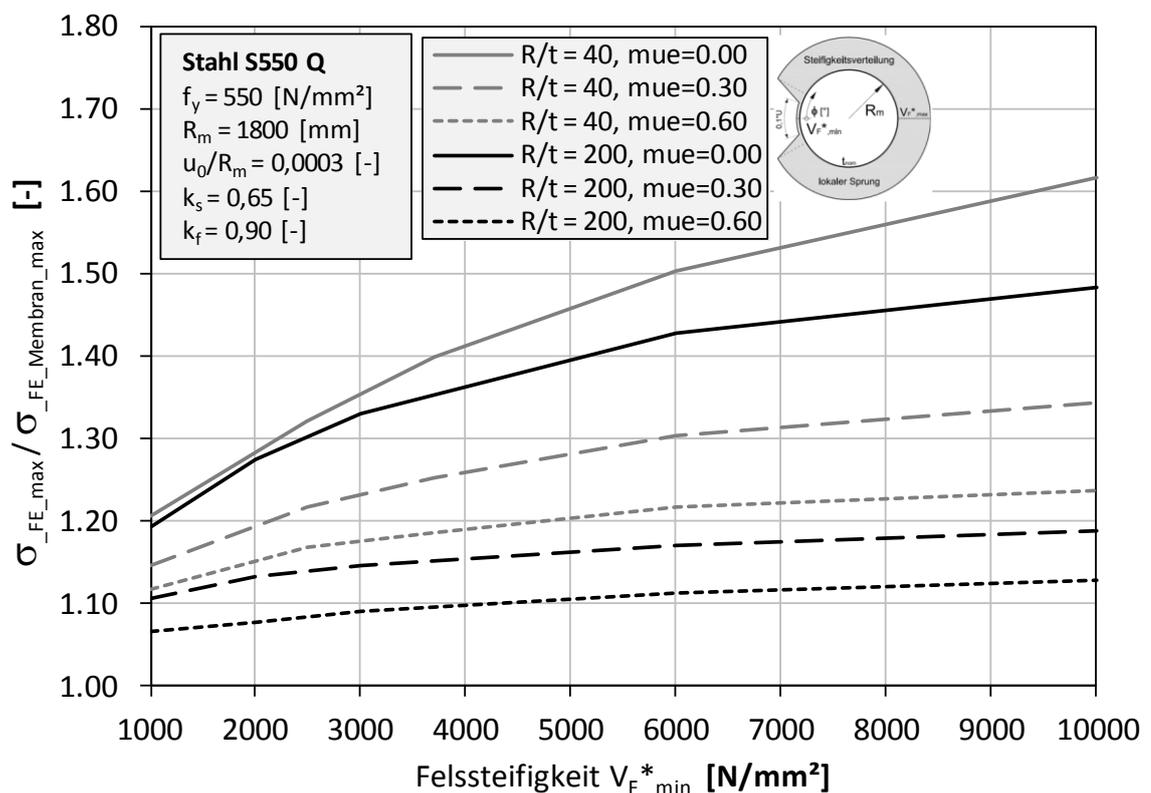


Abbildung 340: Spannungserhöhung Sekundärspannung, lokaler Sprung

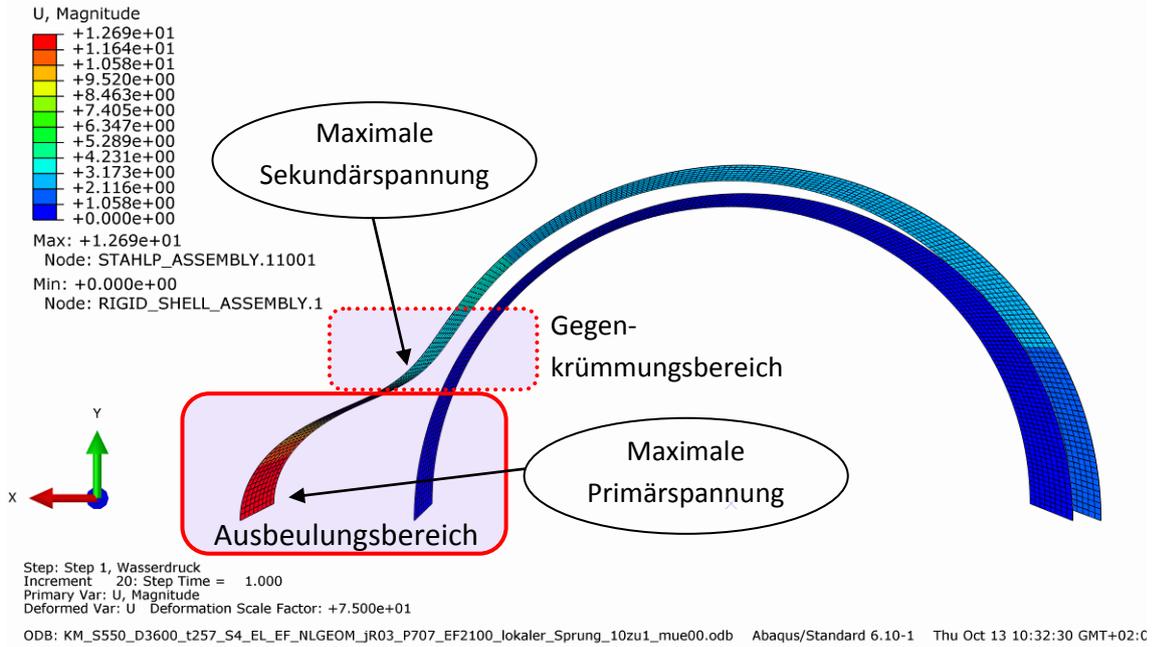


Abbildung 341: Verformungsfigur, Position der Spannungsgrößen, lokaler Sprung

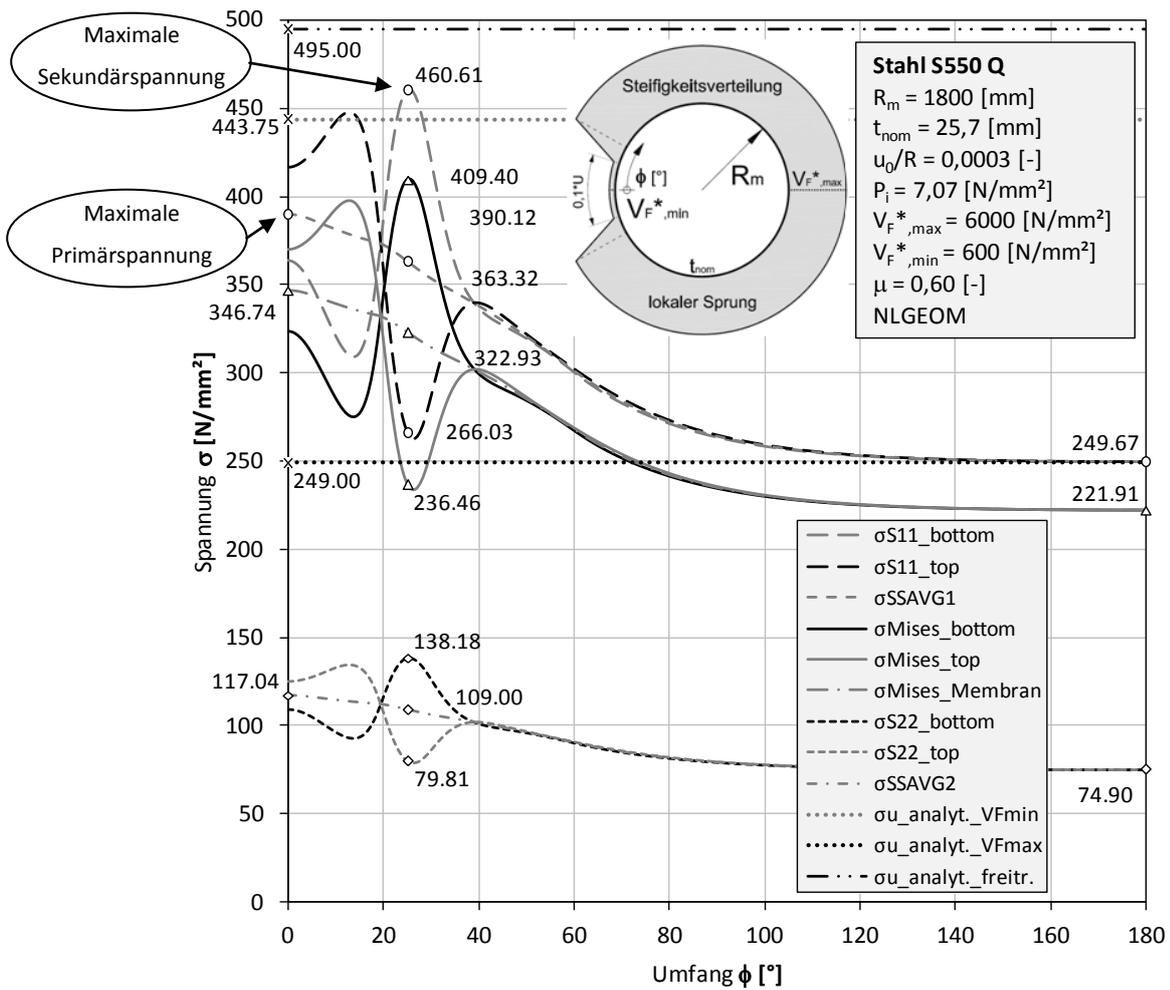


Abbildung 342: Spannungsverlauf  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

## 9. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen zeigen die wesentlichen Unterschiede im Tragverhalten von Panzerungsrohren mit ungleichförmigen Bettungsverhältnissen gegenüber der idealisierten Annahme radialsymmetrischer Bettungsbedingungen.

Sie zeigen jedoch ebenso die Bedeutung der einzelnen Einflussgrößen für eine realitätsnahe Beurteilung des Tragverhaltens. Besondere Bedeutung hat einerseits die Größe des Reibungsbeiwertes zwischen Stahlrohr und Umgebungsbeton, welcher mit zunehmender Größe zu größeren Beanspruchungen der Panzerung führt. Andererseits wird deutlich, dass die Grenztragfähigkeit des umgebenden Gebirges ein wesentliches Kriterium darstellt, wenn es bei höheren Bettungssteifigkeiten oder bei Ausnutzung des plastischen Tragverhaltens der Stahlpanzerung zu einer steigenden Umlagerung auf das Gebirge kommt.

Wenn die Grenztragfähigkeit des Verbundsystems aus Stahlrohr und mitwirkendem Gebirge bestimmt werden soll, ist die Kenntnis dieser beiden Größen notwendig. Es ist vom Gebirgsverhalten her daher nicht nur die Steifigkeit des Gebirges („Bettungsmodul“) von Bedeutung, sondern in noch höherem Maße ein zutreffendes Kriterium zur Bestimmung seiner Grenztragfähigkeit vor dem endgültigen Versagenszustand durch Rissbildung und Gleichgewichtsverlust.



## 10. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Druckstollen und Druckschächte: Bemessung-Konstruktion-Ausführung, Gerhard Seeber unter Mitarb. von R. Friedrich, Stuttgart; New York: ENKE im Georg Thieme Verlag, 1999*
- [2] *Skriptum: Rohrleitungsbau Teil 1, Prof. Richard Greiner, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, TU Graz, S-5-24/2009*
- [3] *Rohrleitungen - Theorie und Praxis, Siegfried Schwaigerer, Springer-Verlag, Berlin, Auflage: Nachdr. (November 1986)*
- [4] *Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb, Jürgen Giesecke / Emil Mosonyi, Springer-Verlag, Berlin, Auflage: 4 (Mai 2005)*
- [5] *ABAQUS 6.10 Online Documentation (© Dassault Systèmes 2010, Generated: Wed April 28. 2010)*
- [6] *ÖNORM EN 10025-3, Ausgabe 2005-02-01*
- [7] *ÖNORM EN 10025-6, Ausgabe 2005-02-01*
- [8] *Skriptum: Felsmechanik und Tunnelbau, TU Graz, Stand 20.02.2007*
- [9] *<http://www.naturpur.cms4people.de/schema-pumpspeicherkraftwerk-0.jpg>, (12.10.2001)*
- [10] *EN 1993-1-6:2007 (D)*
- [11] *Bildarchiv VERBUND-Austrian Hydro Power AG (AHP)*



## 11. ANHANG



## 11.1 ANHANG A: Einzelergebnisdarstellung Parameterstudie ELASTSICH

Anmerkung zum Anhang:

Gewisse Bezeichnungen in den Diagrammen und der Dateibenennung weichen im Anhang von denen der in der Arbeit verwendeten ab.

In den Diagrammen des Anhanges seien folgende Kürzel zu berichtigen:

$$j/R \rightarrow U_o/R_m$$

$$E_F \rightarrow V_F^*$$

Bei der Kurzschreibweise der Dateibenennungen sind gilt:

$$jR \rightarrow uR \text{ bzw. } u0R$$

$$EF \rightarrow VF$$

Alle Berechnungen beziehen sich auf die Sicherheitsbeiwerte:

- $k_S=0,65$  [-]      und
- $k_f=0,90$  [-]

### 11.1.1 Fall: Linearer Verlauf

#### 11.1.1.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

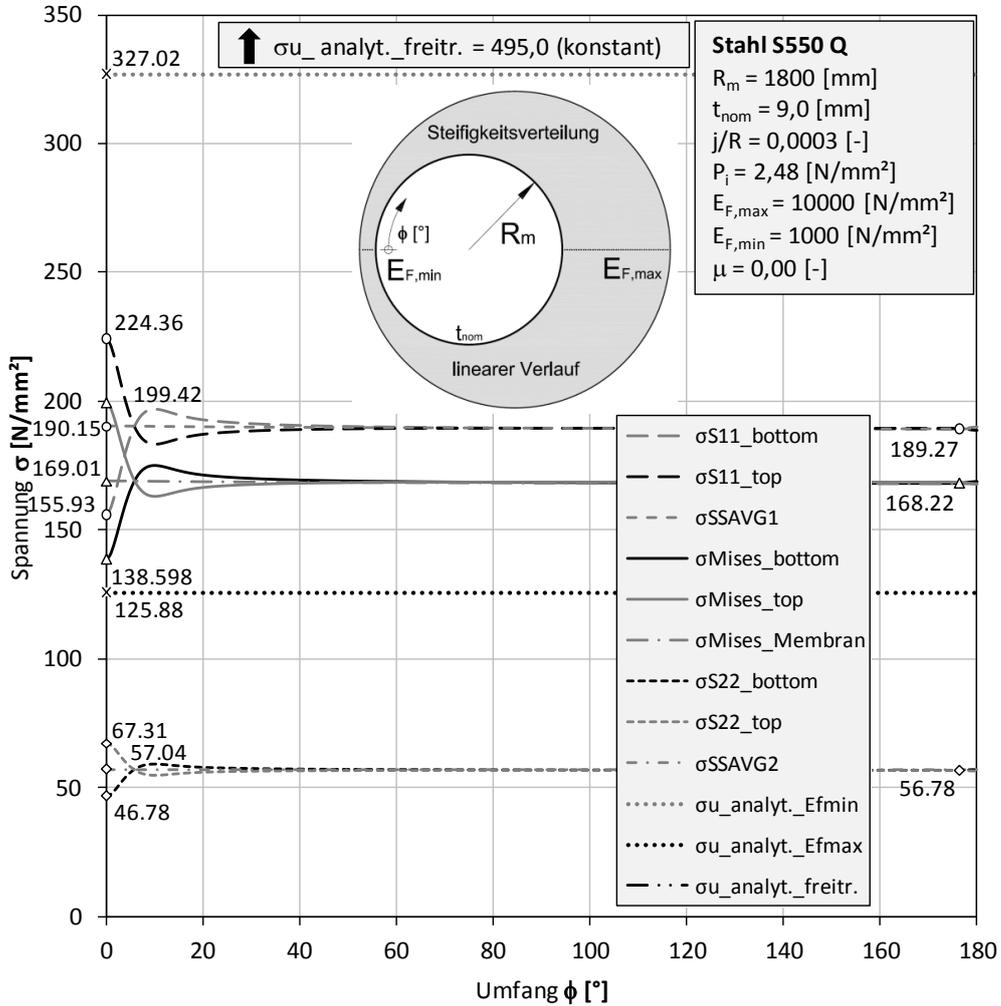


Abbildung 1A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

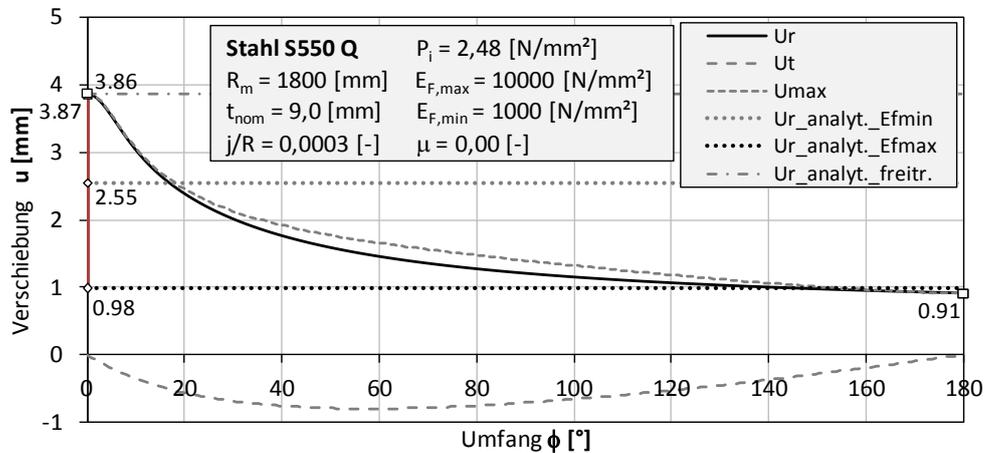


Abbildung 2A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

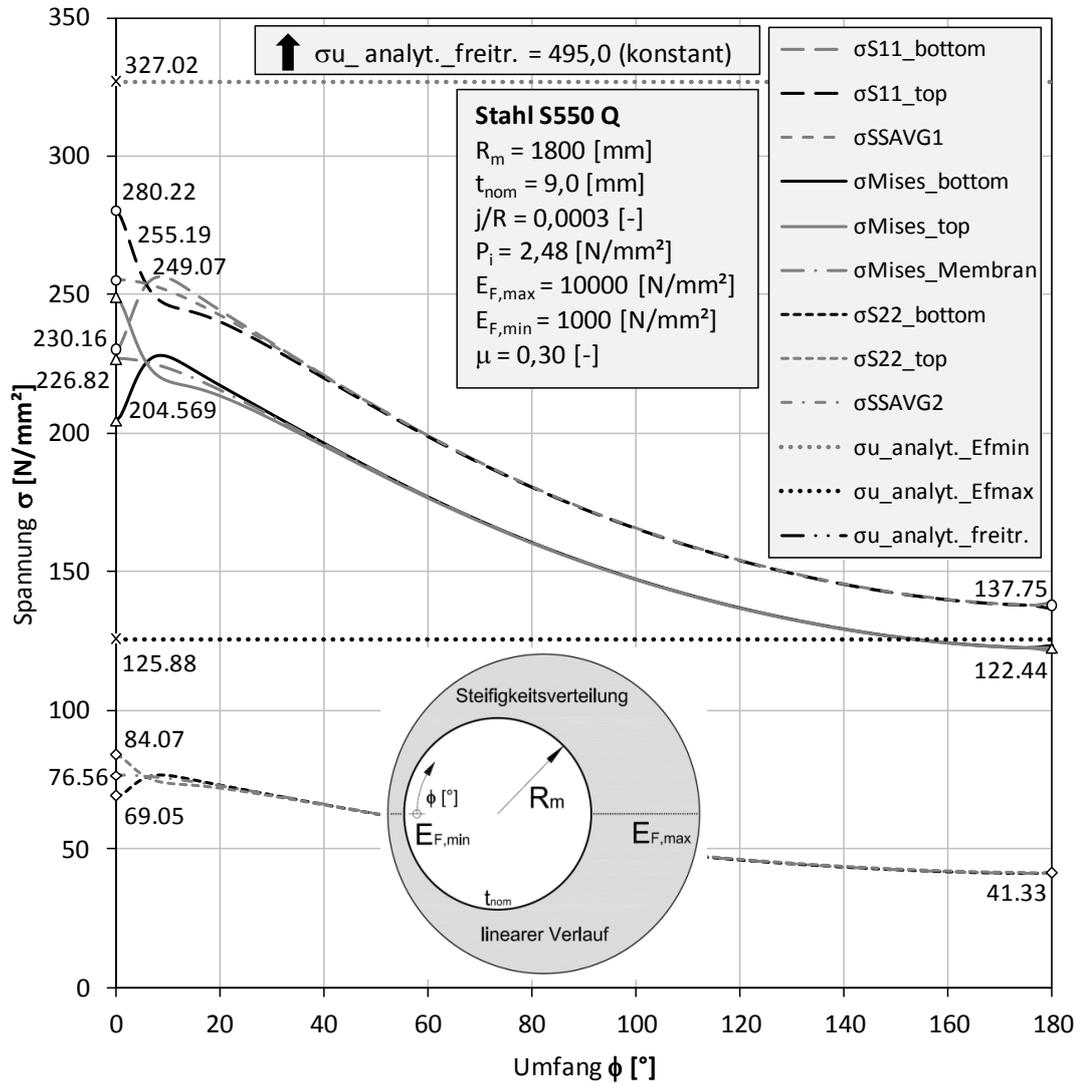


Abbildung 3A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

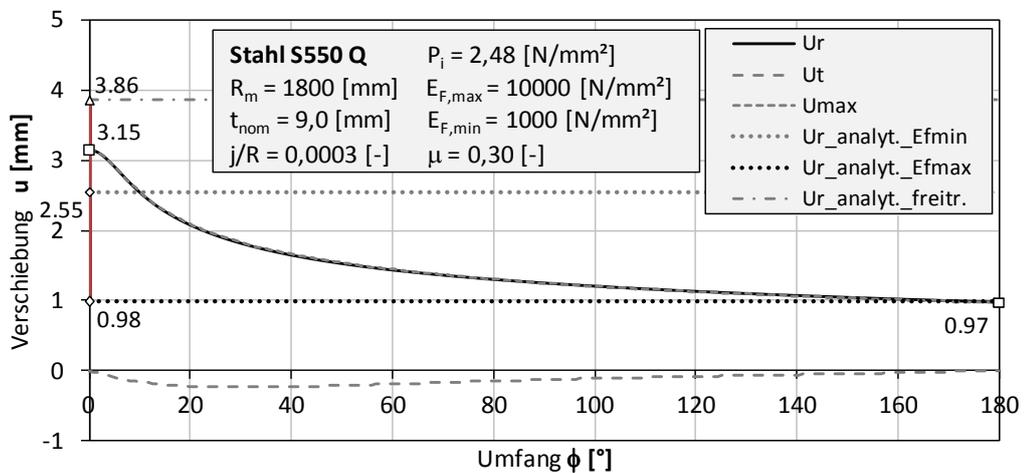


Abbildung 4A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

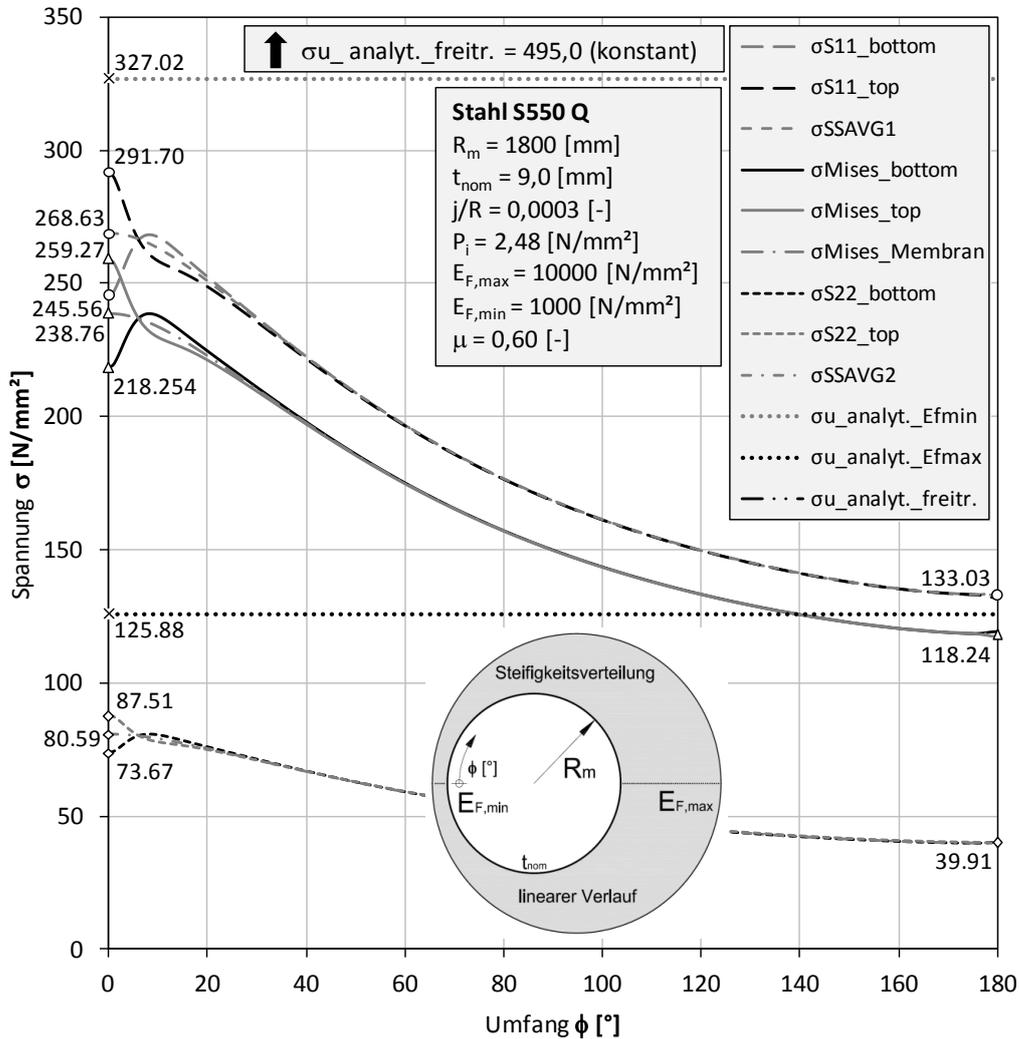


Abbildung 5A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

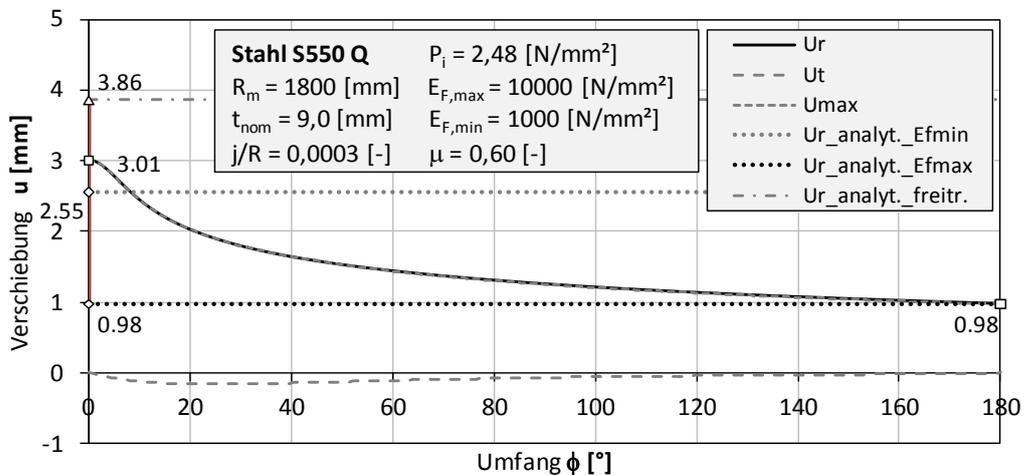


Abbildung 6A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.4 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1  
500\_Linear\_10zu1\_mue00

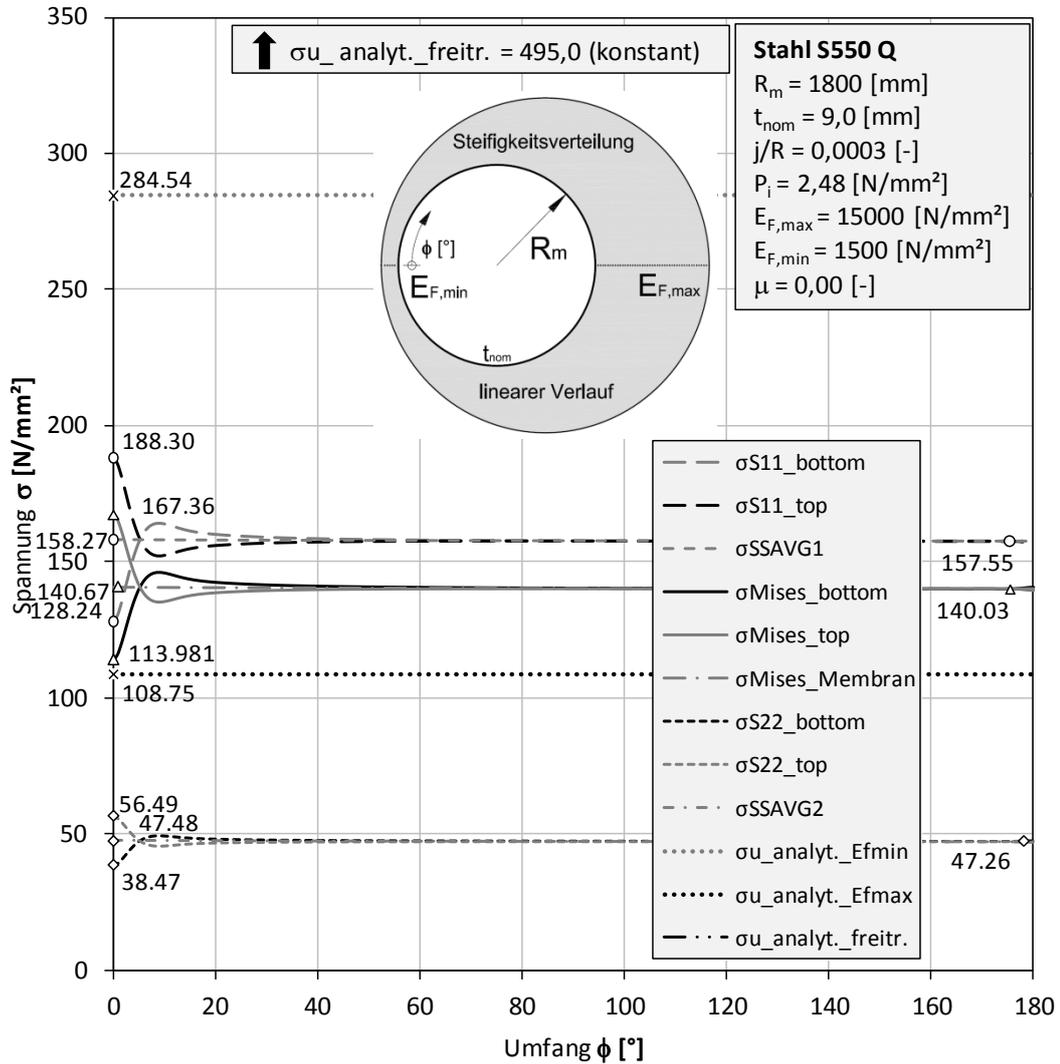


Abbildung 7A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

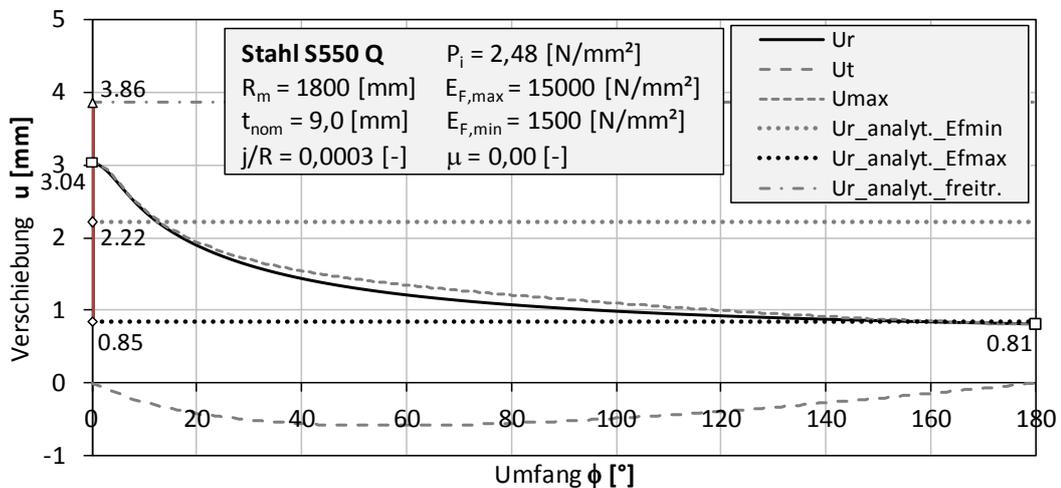


Abbildung 8A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

## 11.1.1.5 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

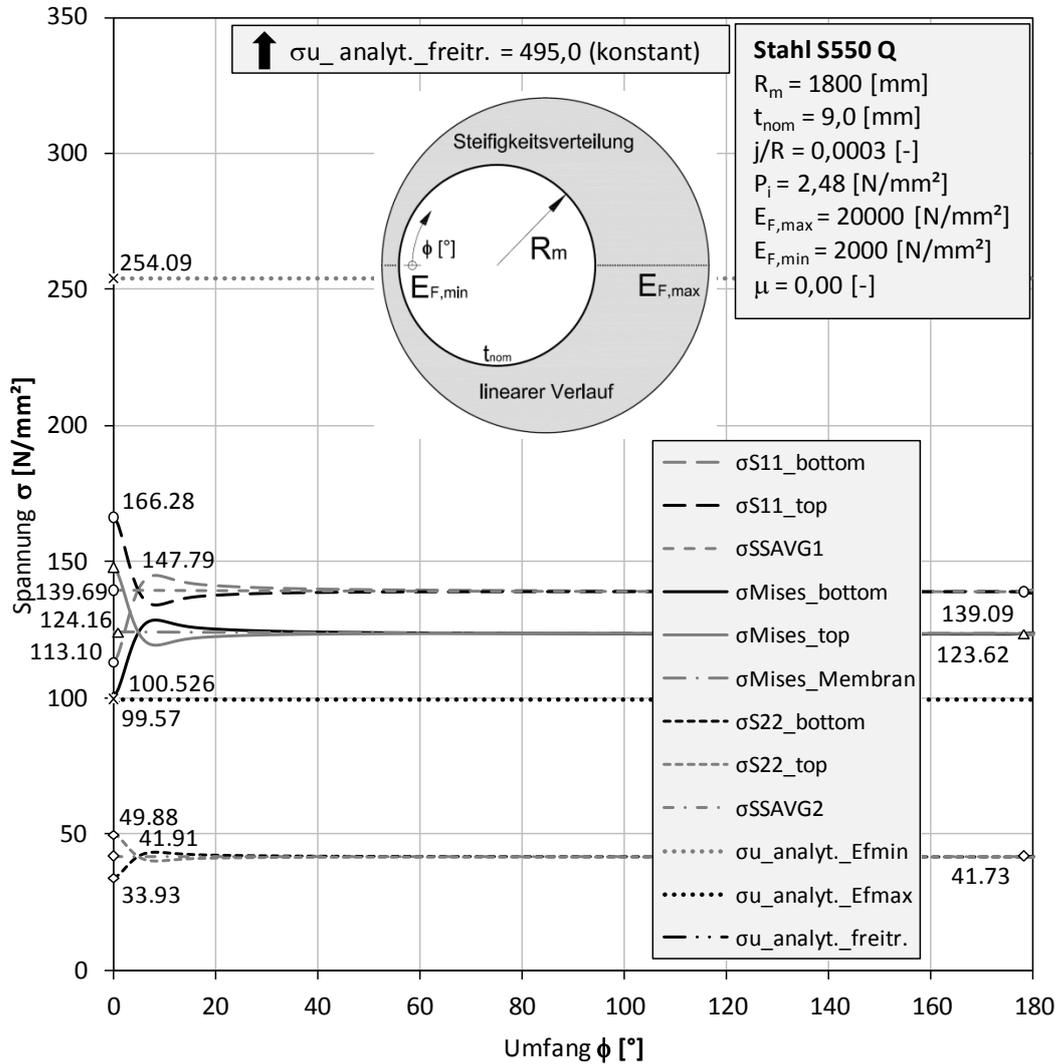


Abbildung 9A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

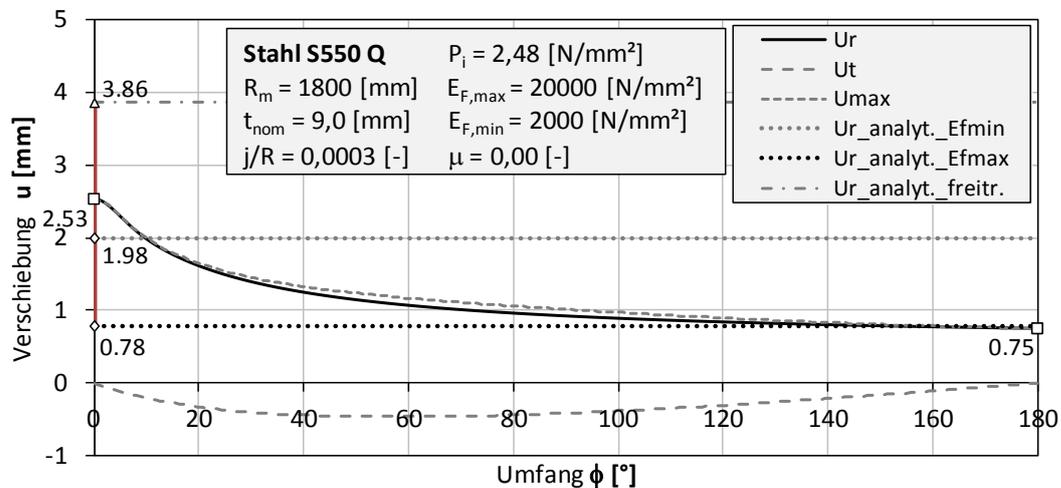


Abbildung 10A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.6 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

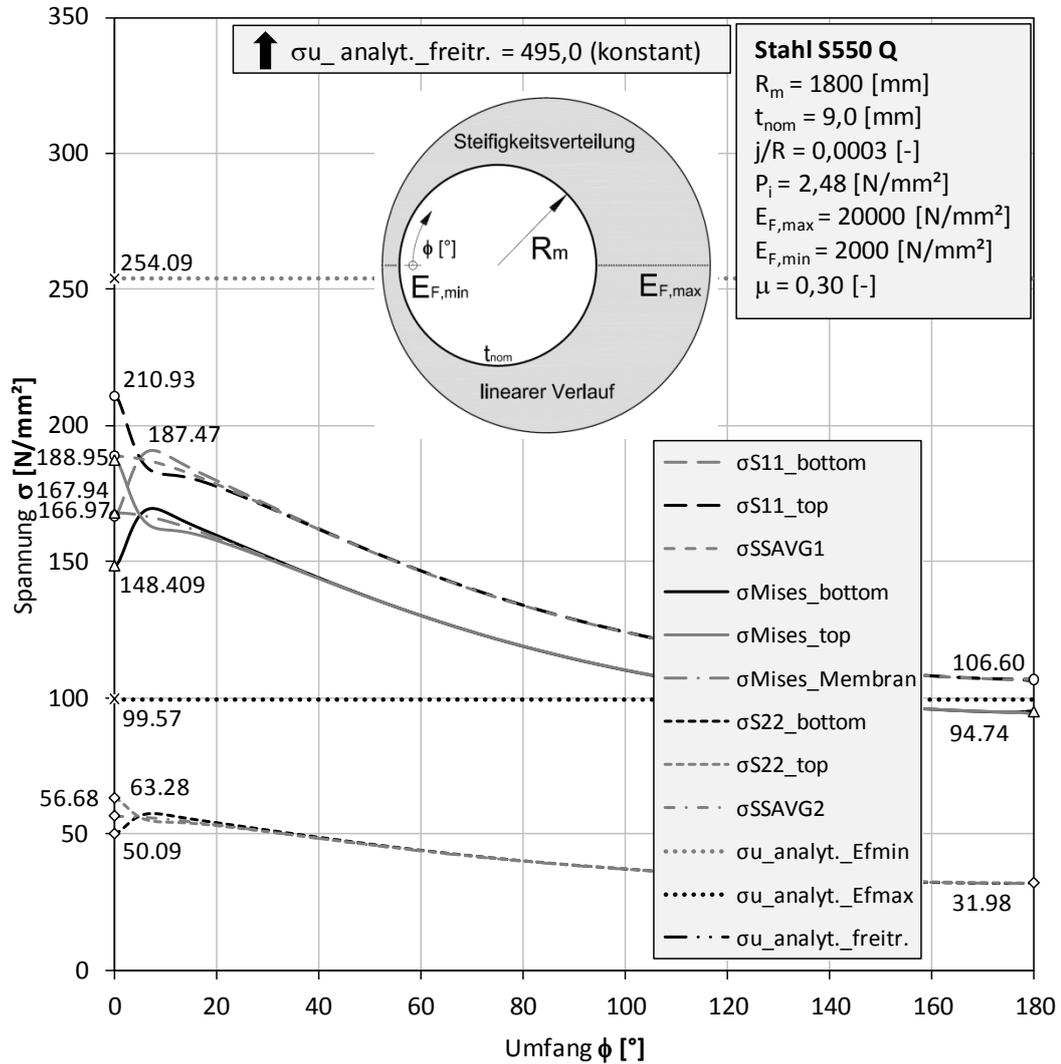


Abbildung 11A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

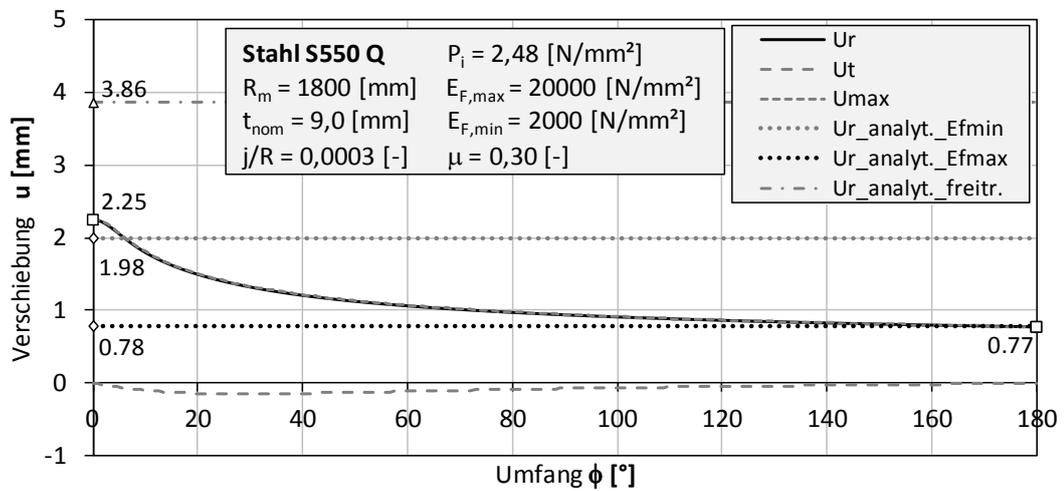


Abbildung 12A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.7 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

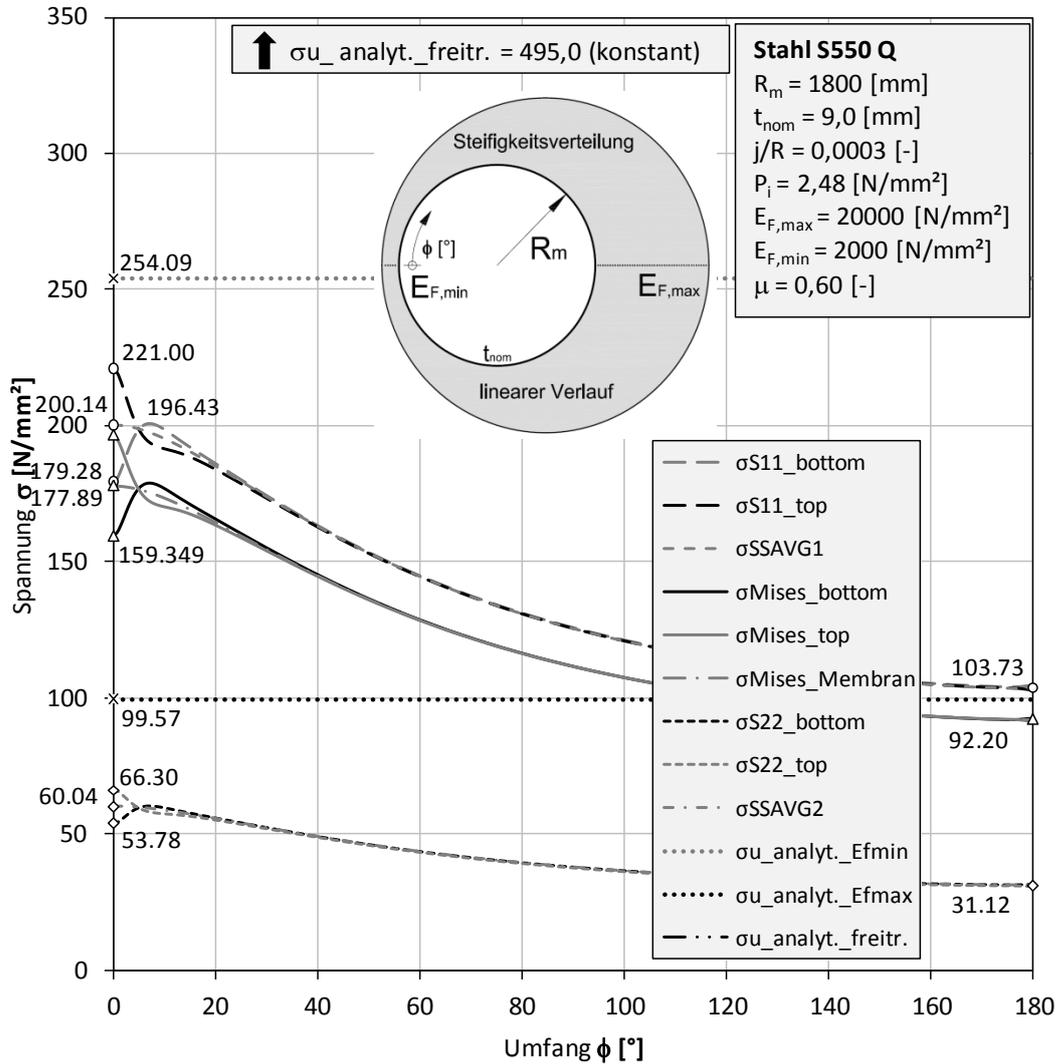


Abbildung 13A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

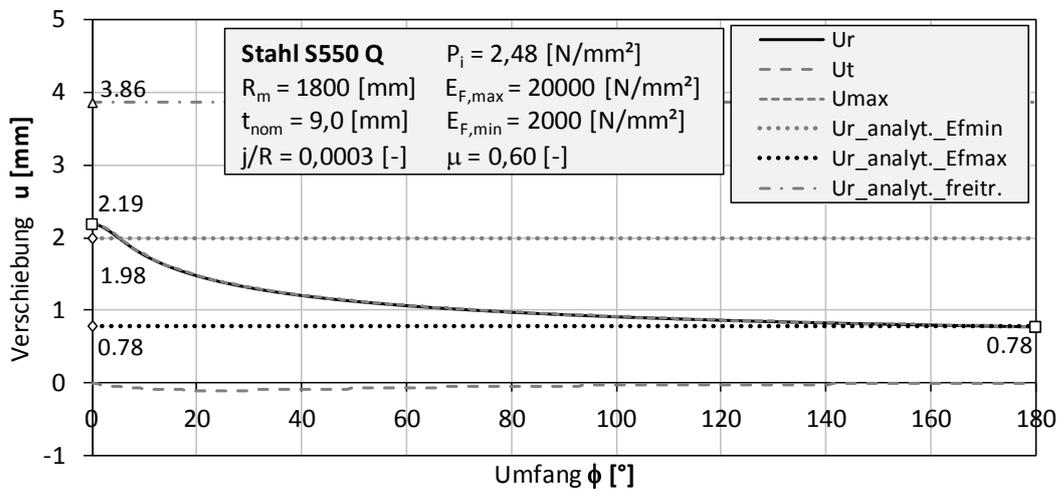


Abbildung 14A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.8 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

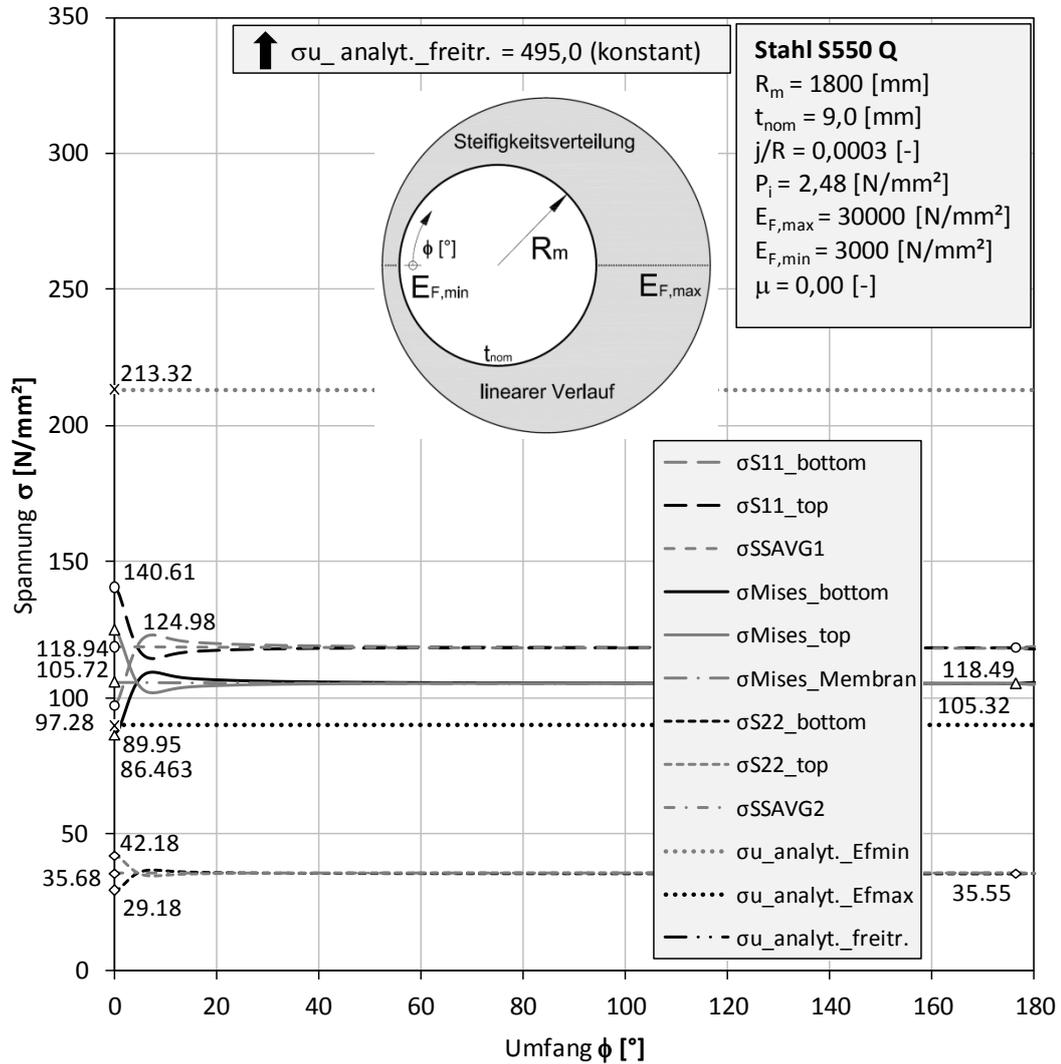


Abbildung 15A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

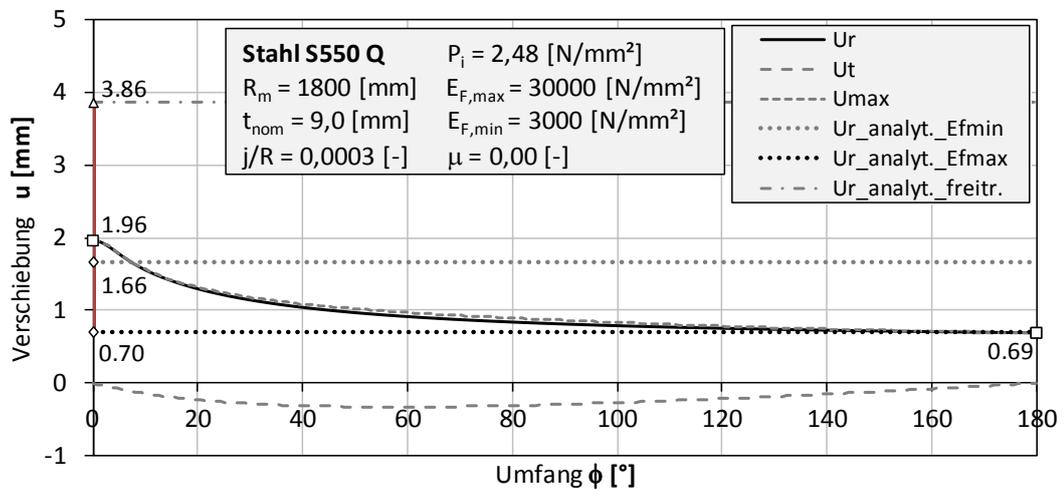


Abbildung 16A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.9 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

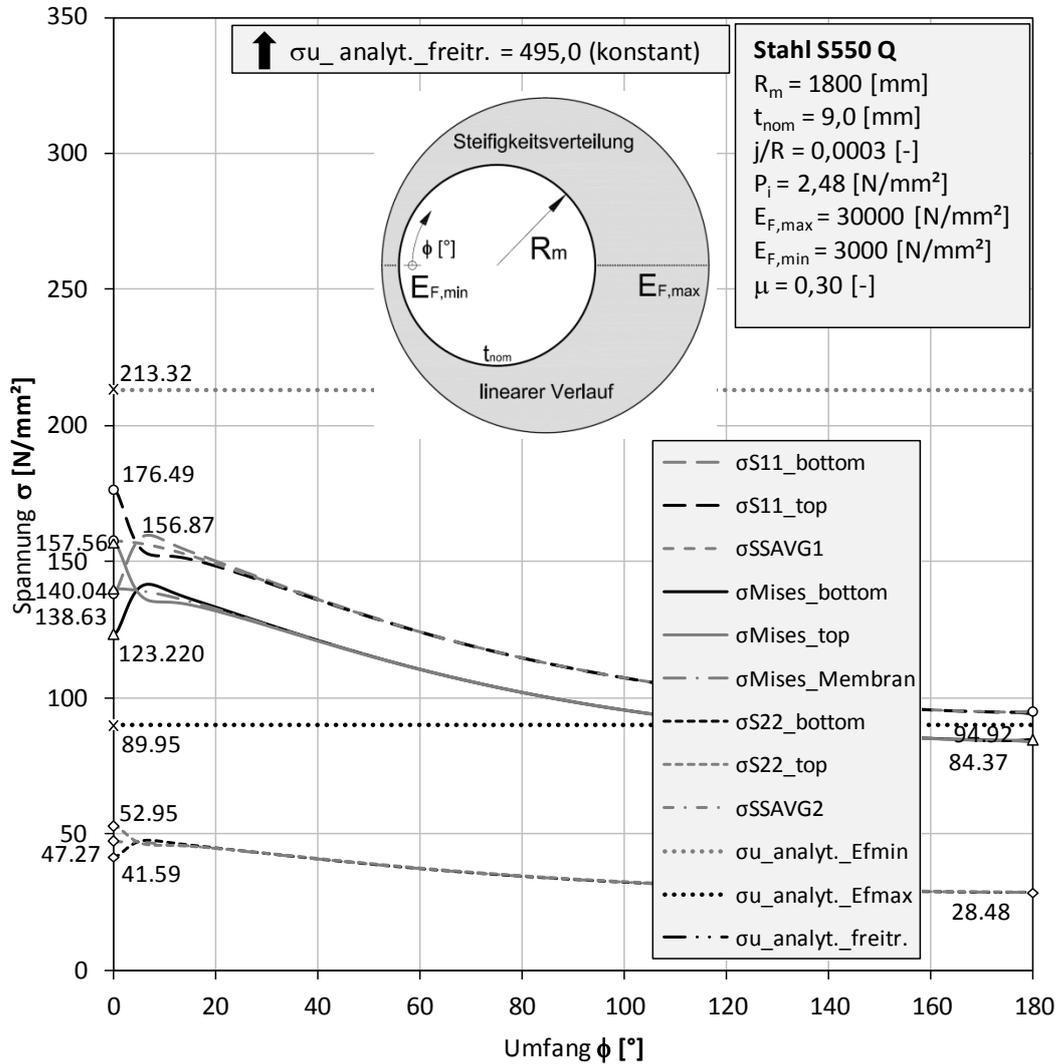


Abbildung 17A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

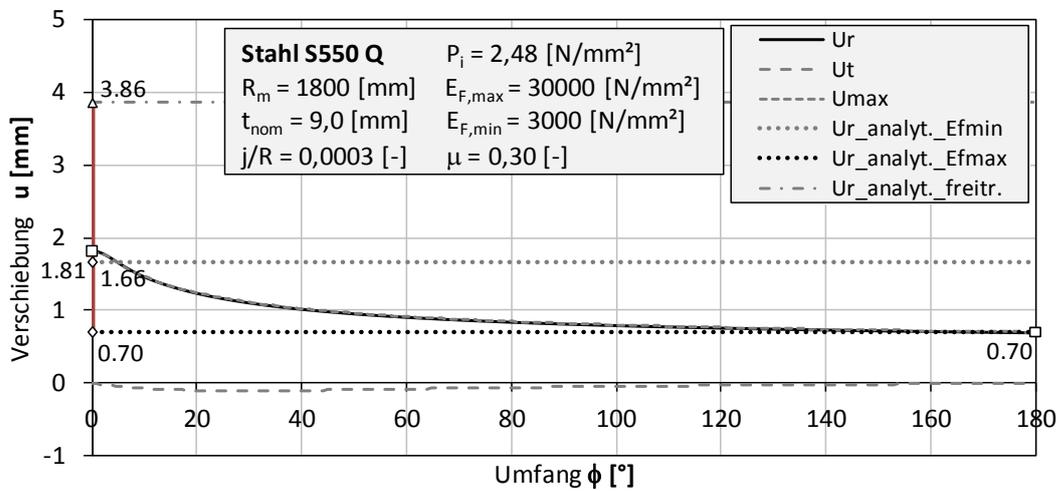


Abbildung 18A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.10 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
3000\_Linear\_10zu1\_mue06

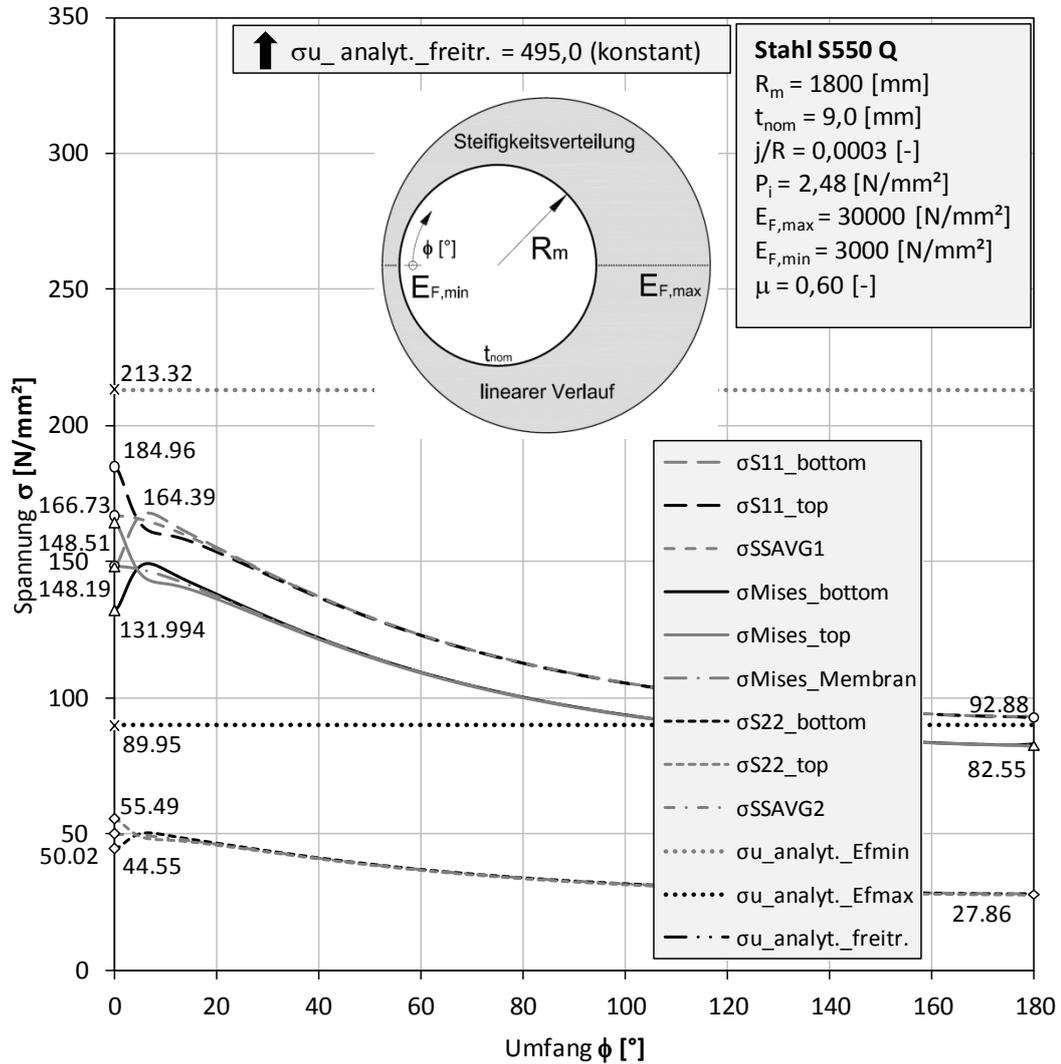


Abbildung 19A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue06

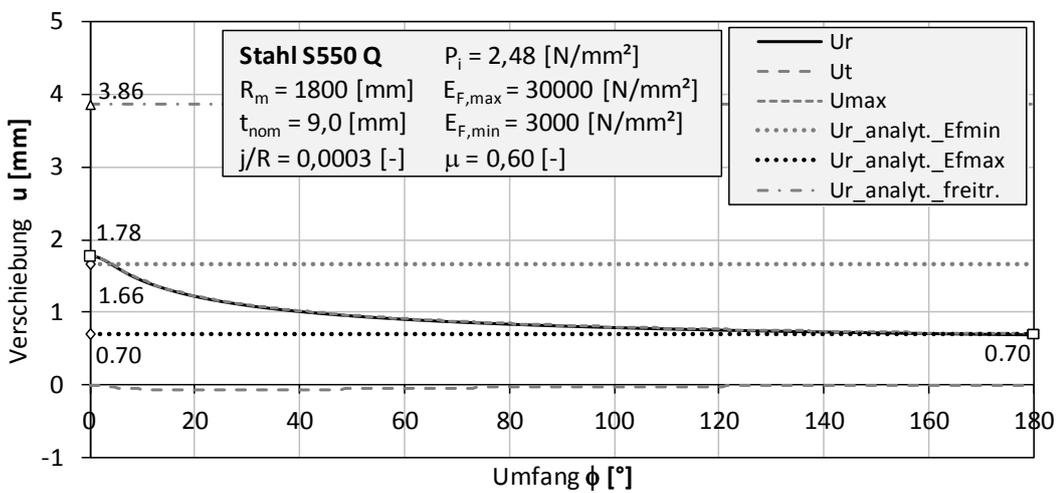


Abbildung 20A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.11 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
3500\_Linear\_10zu1\_mue00

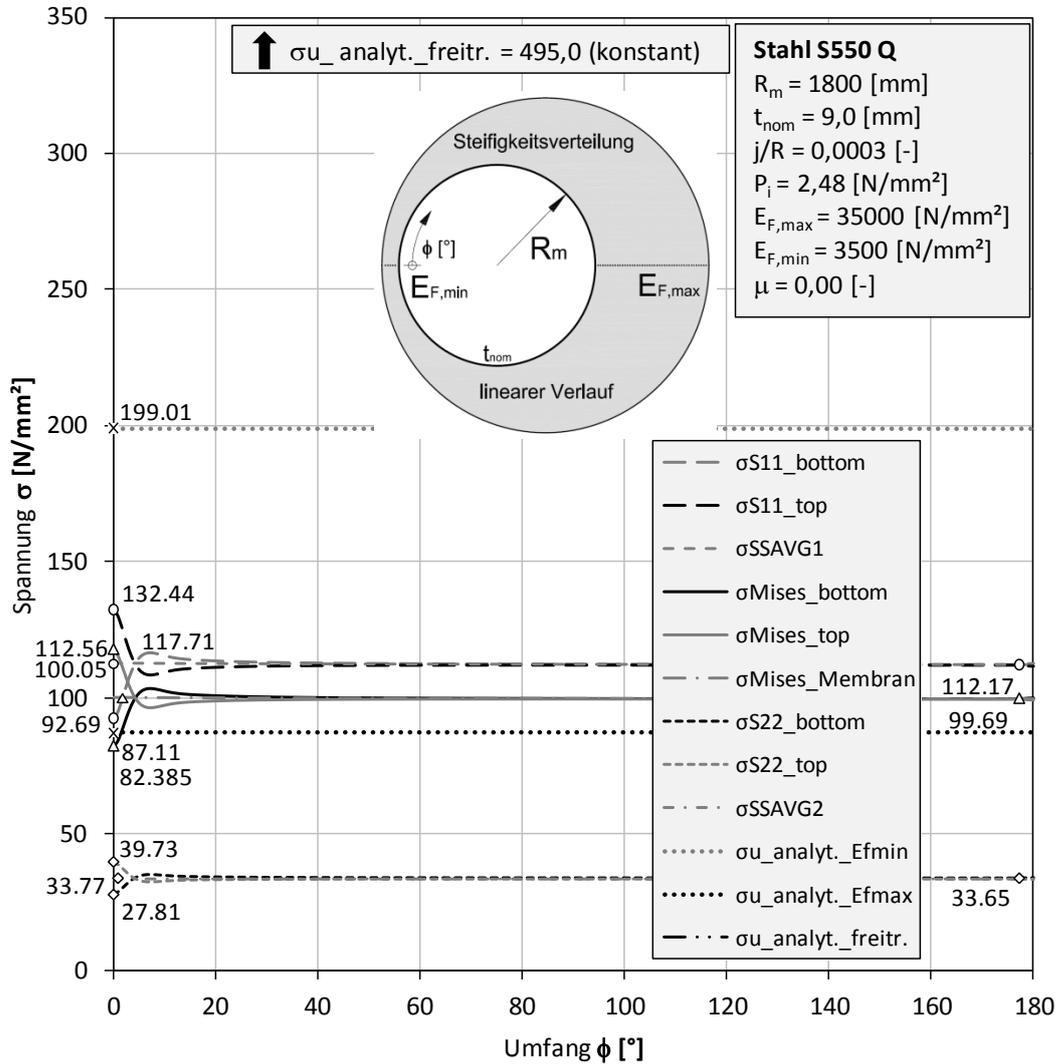


Abbildung 21A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue00

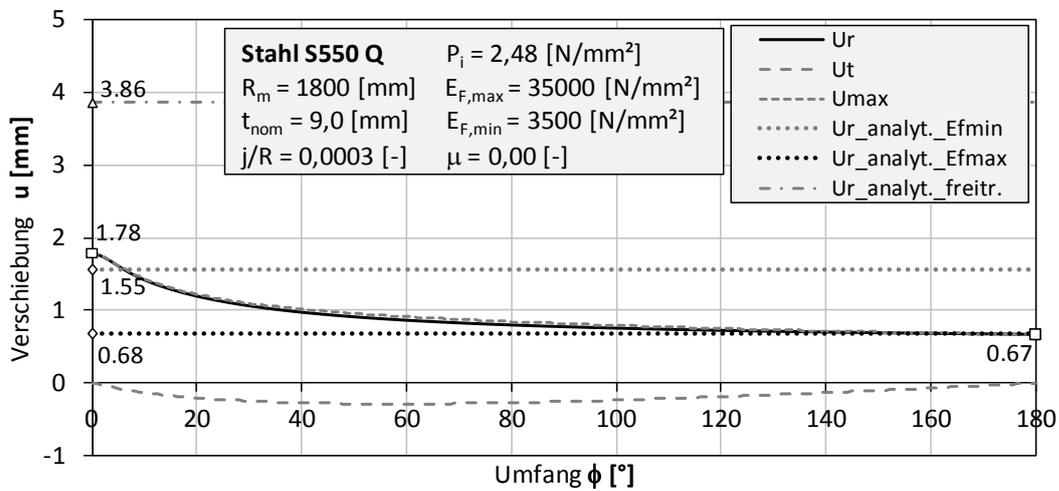


Abbildung 22A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.12 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
3500\_Linear\_10zu1\_mue03

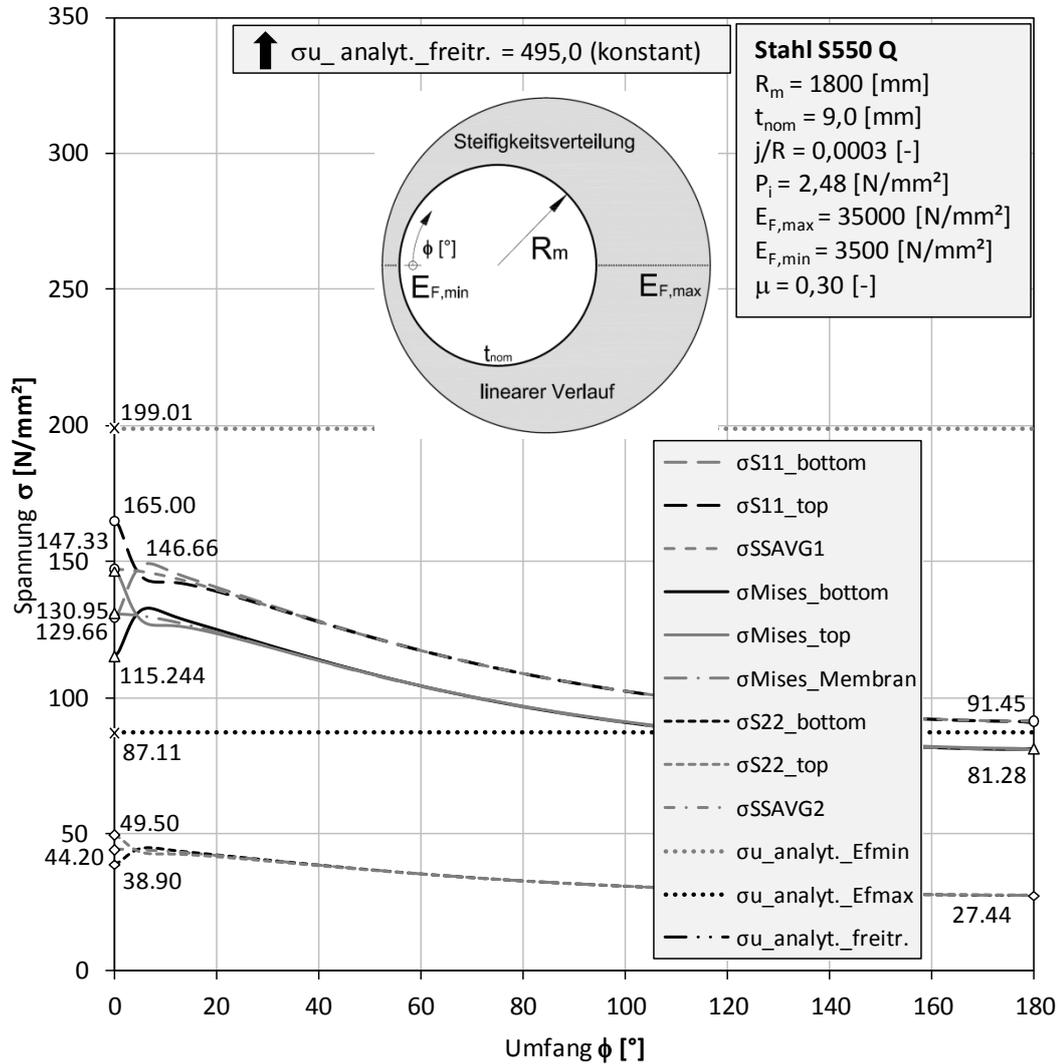


Abbildung 23A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue03

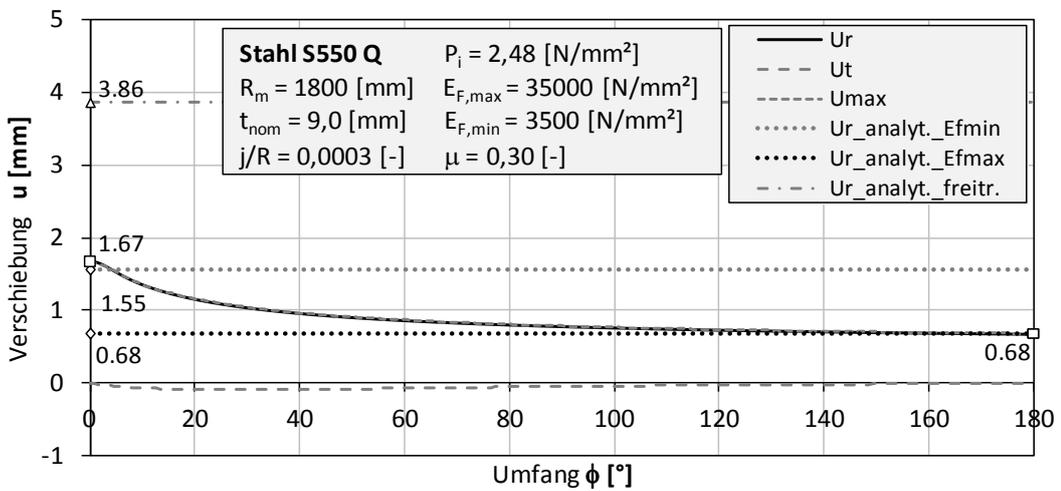


Abbildung 24A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.13 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
3500\_Linear\_10zu1\_mue06

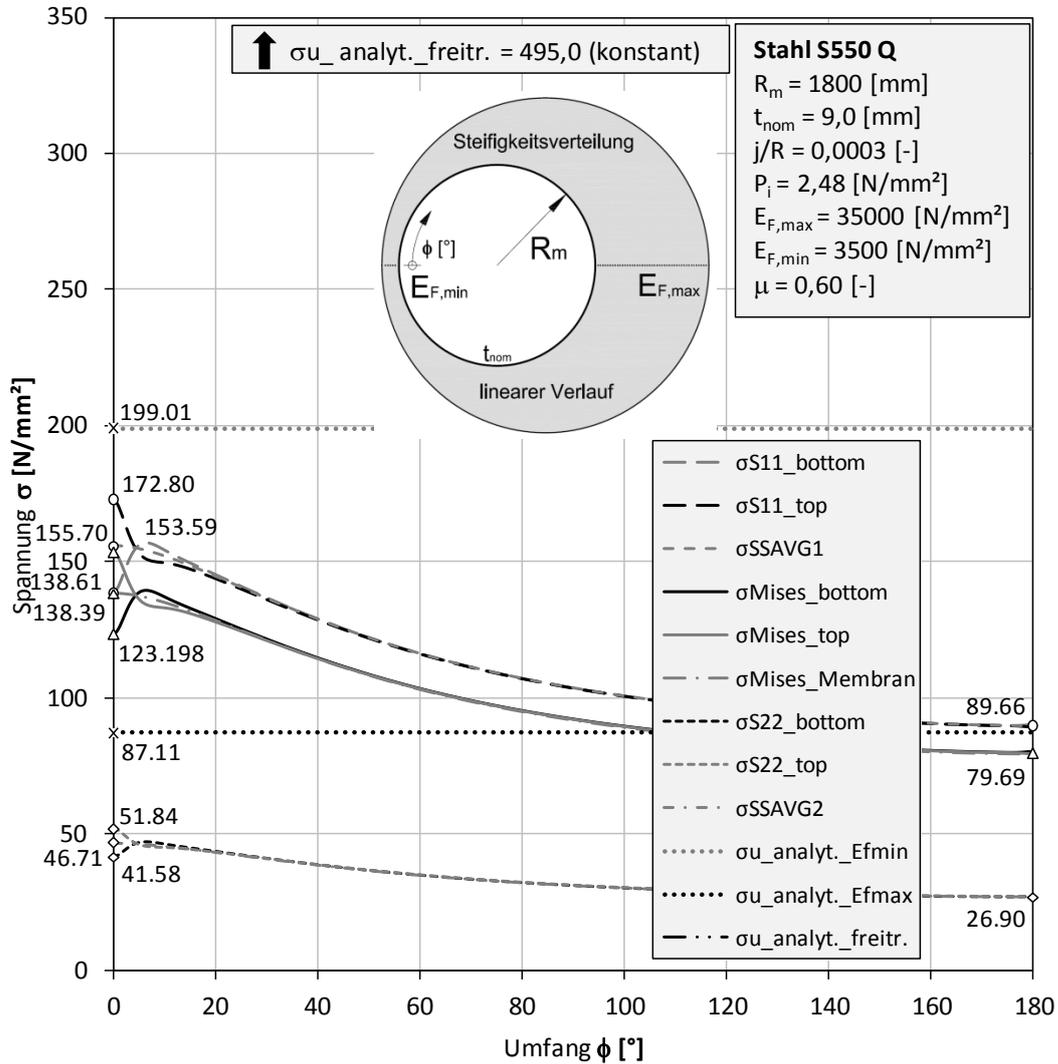


Abbildung 25A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue06

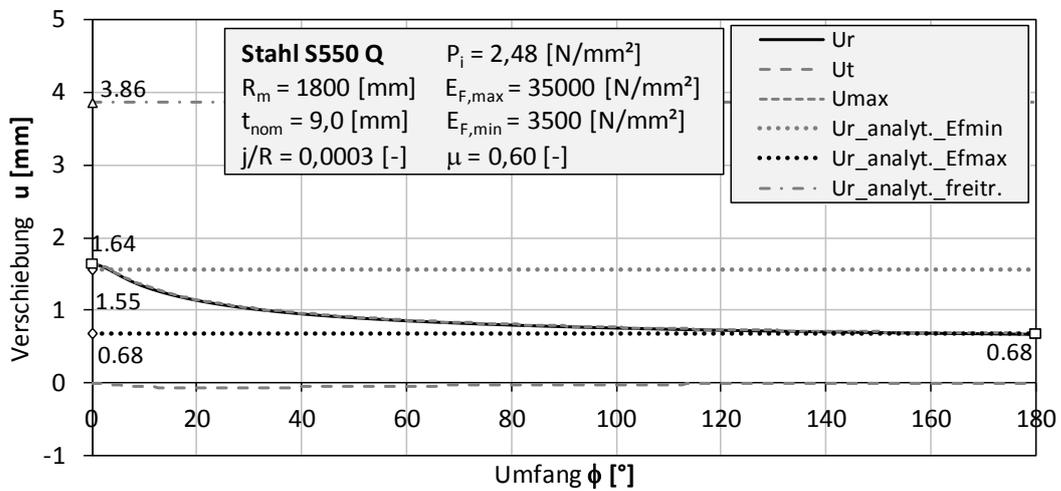


Abbildung 26A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3500\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.14 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
4000\_Linear\_10zu1\_mue00

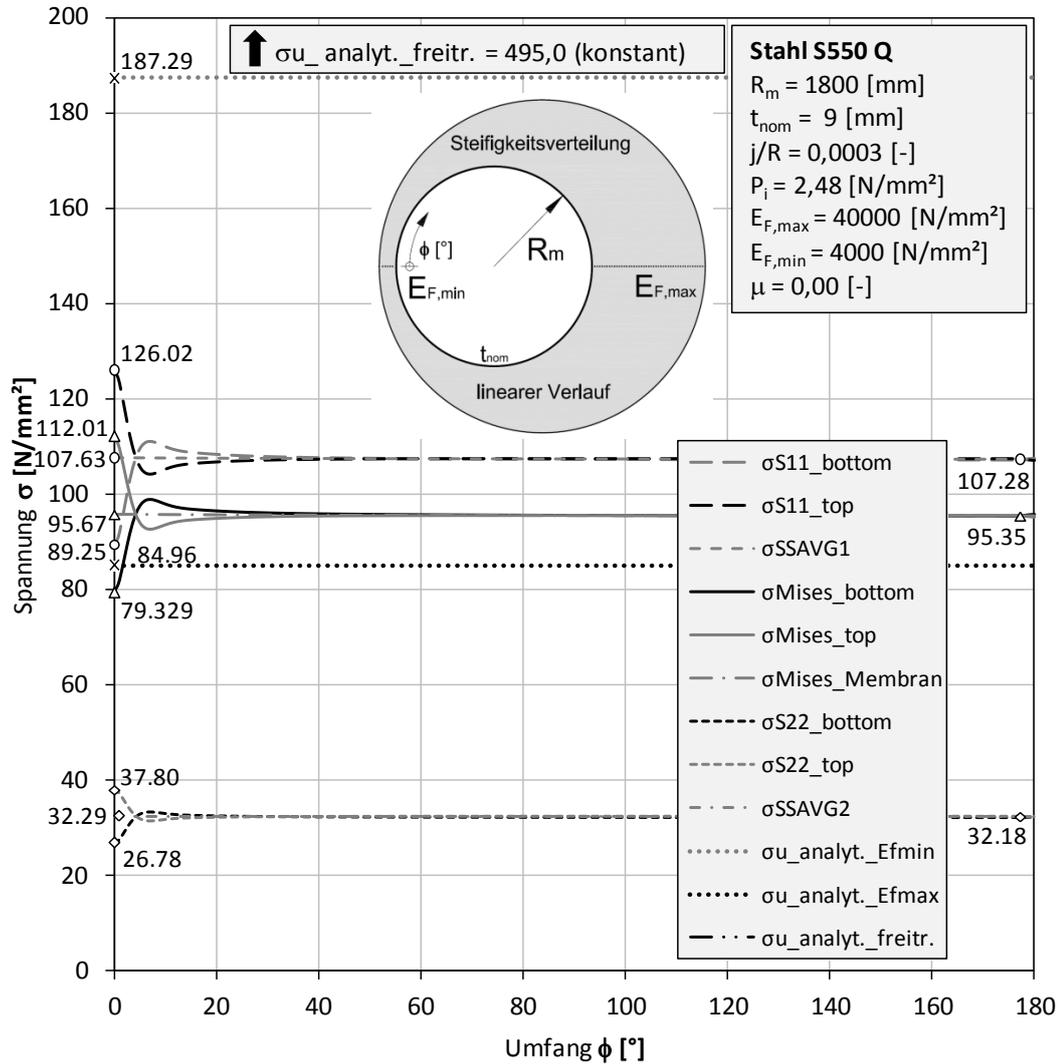


Abbildung 27A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

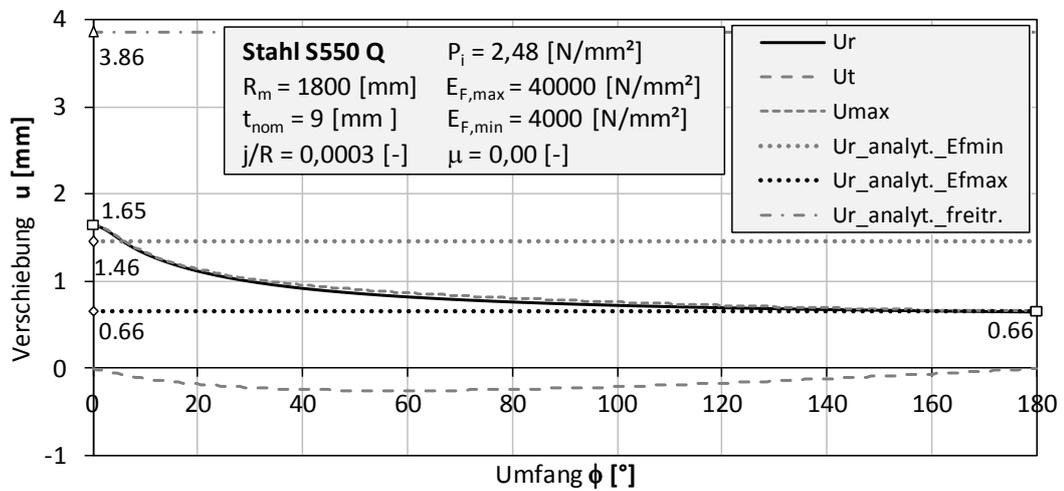


Abbildung 28A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.15 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
4000\_Linear\_10zu1\_mue03

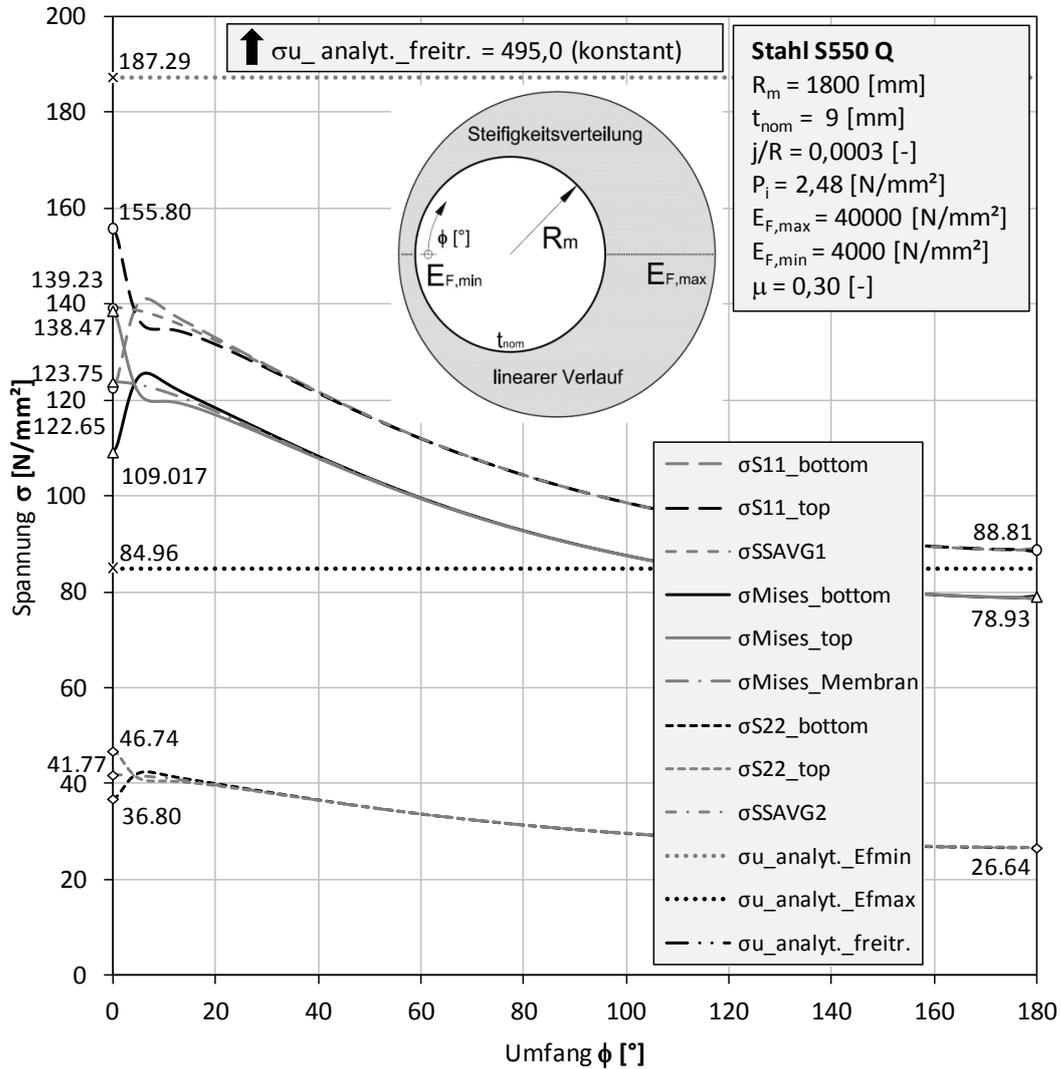


Abbildung 29A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

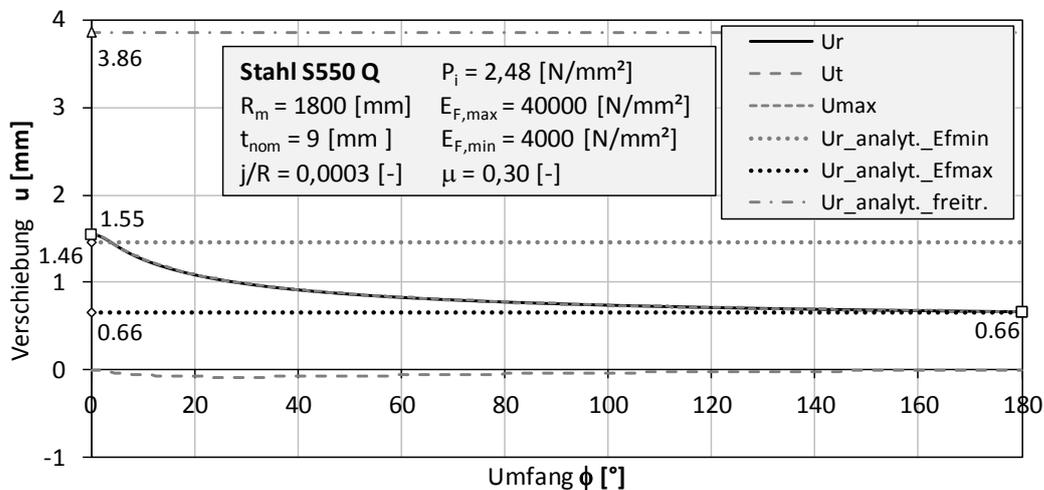


Abbildung 30A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.16 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
4000\_Linear\_10zu1\_mue06

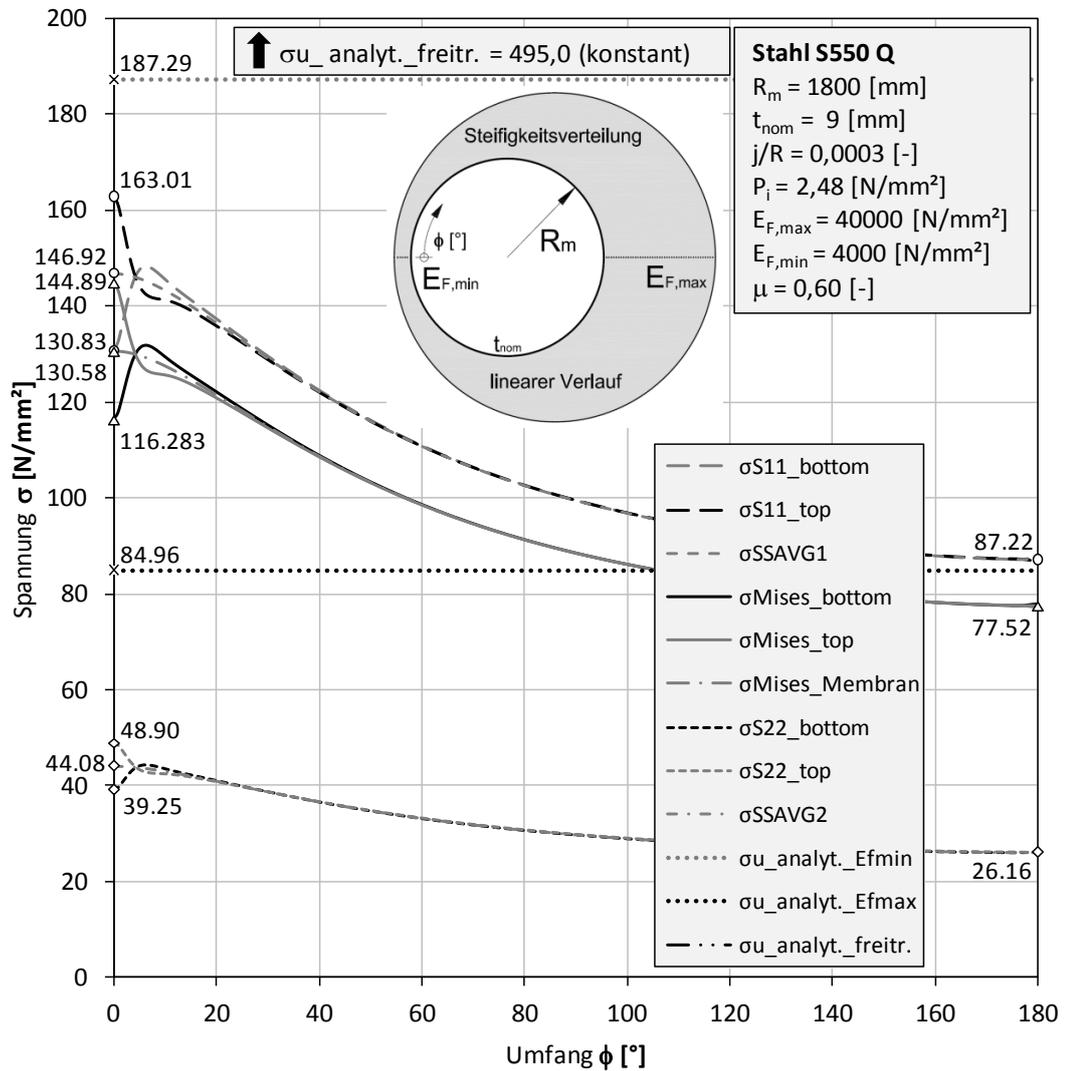


Abbildung 31A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

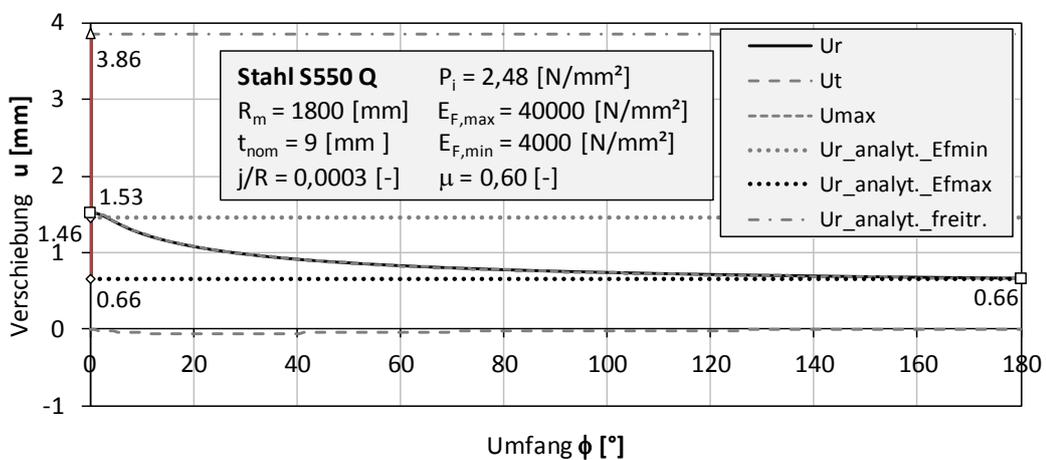


Abbildung 32A:  
Verschiebungen KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.17 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

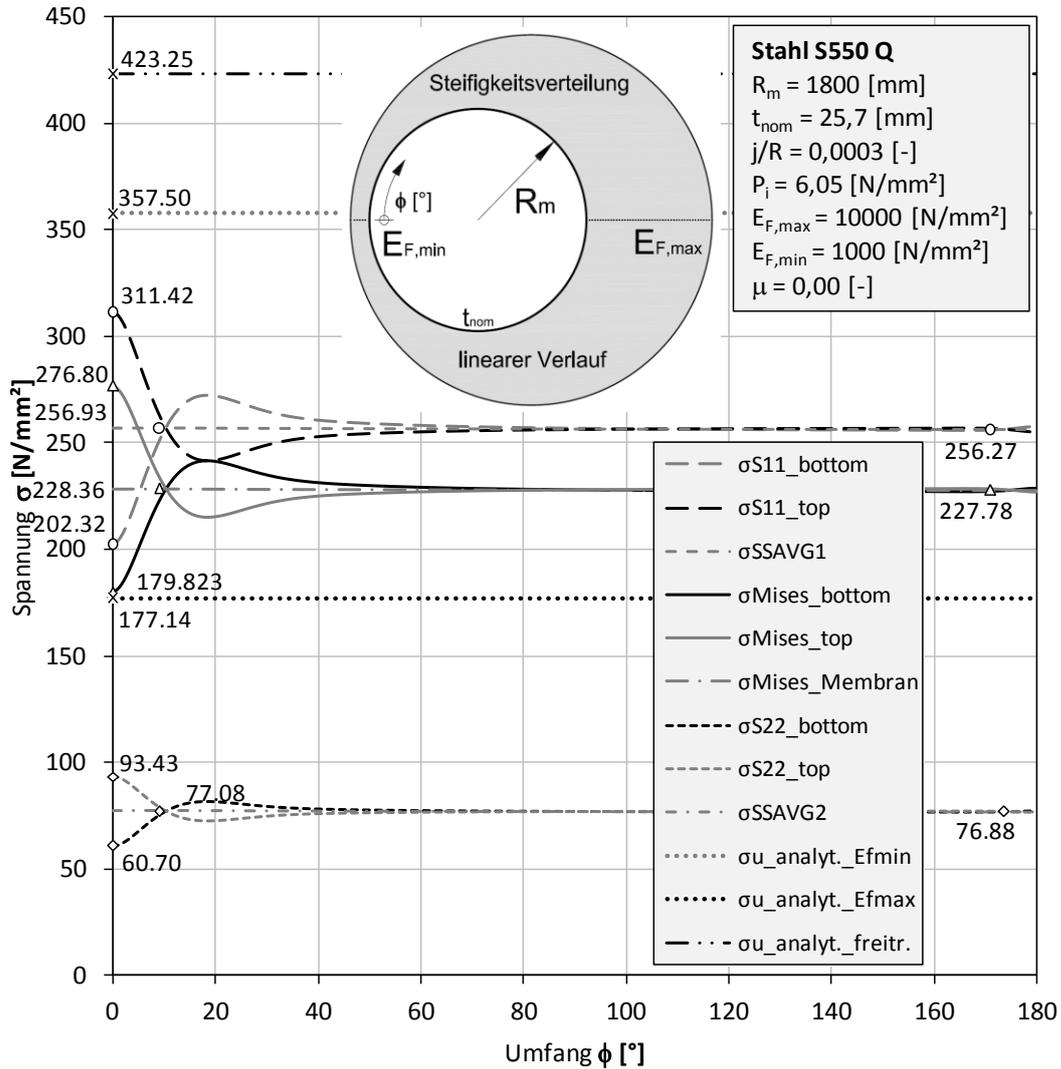


Abbildung 33A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

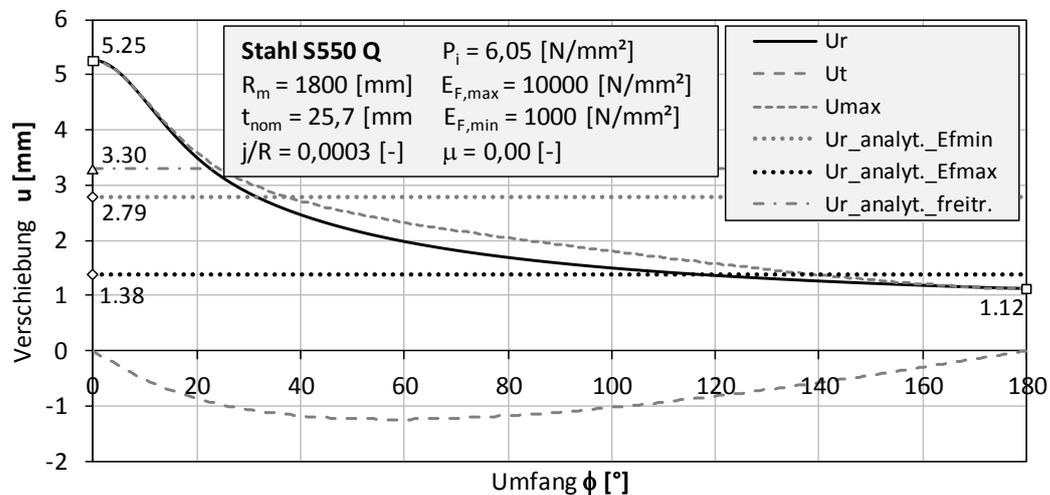


Abbildung 34A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.18 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

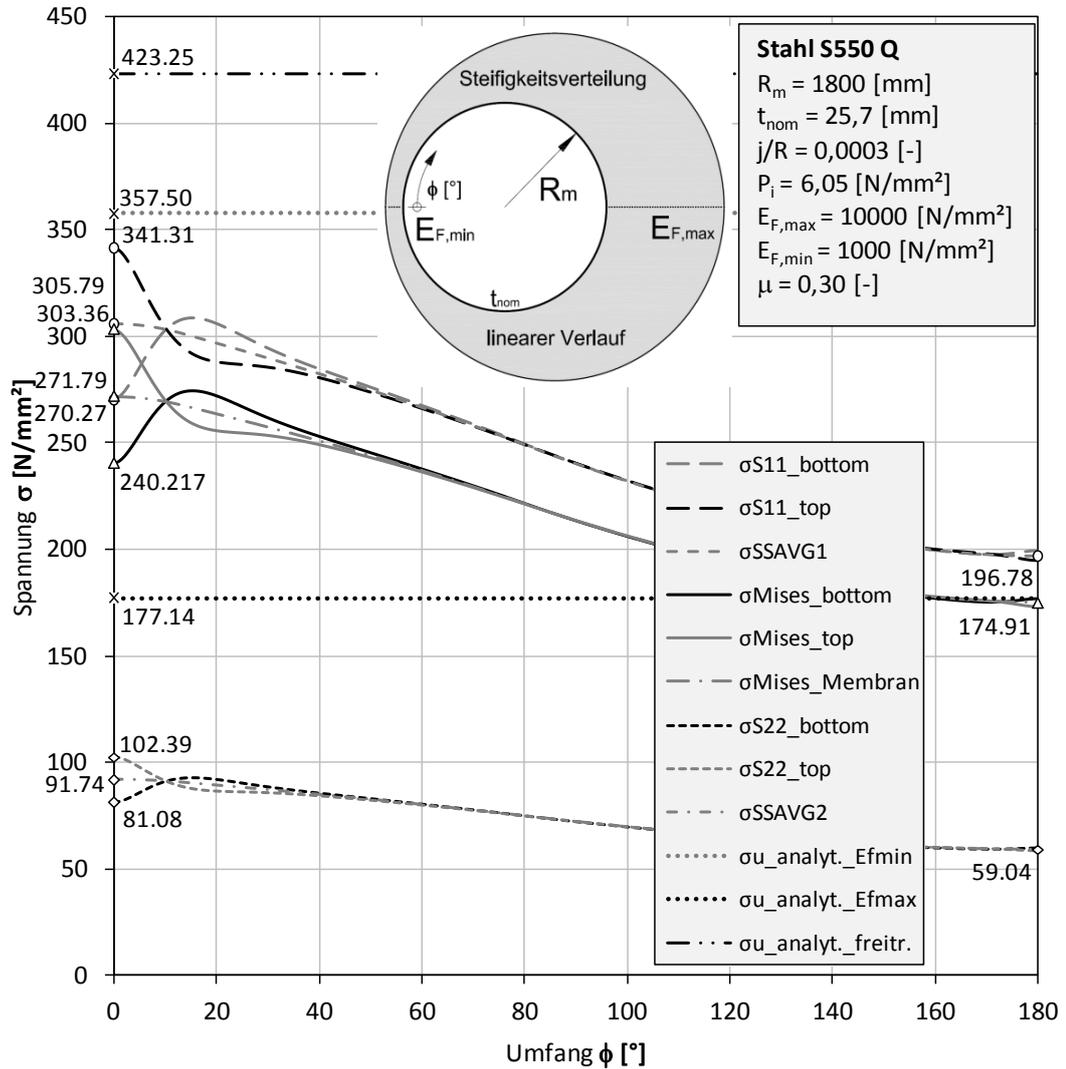


Abbildung 35A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

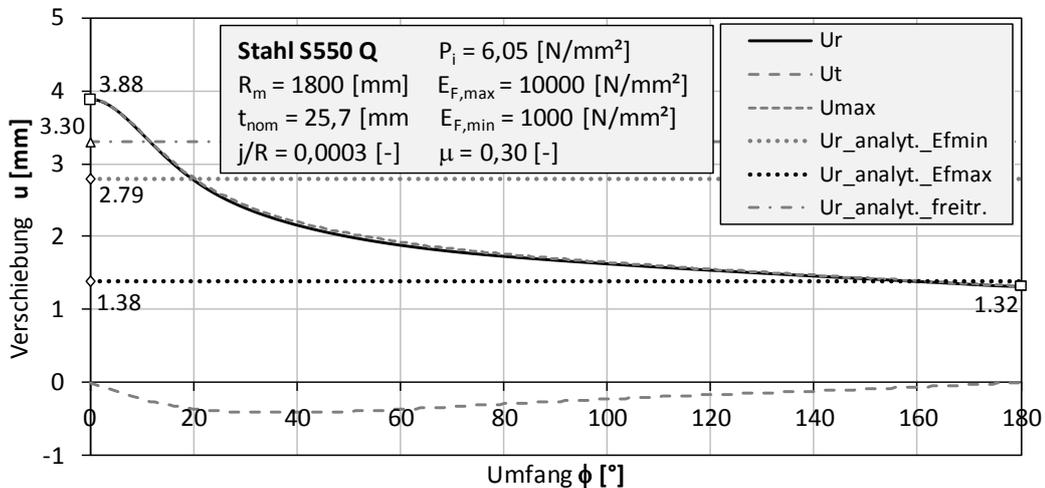


Abbildung 36A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.19 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

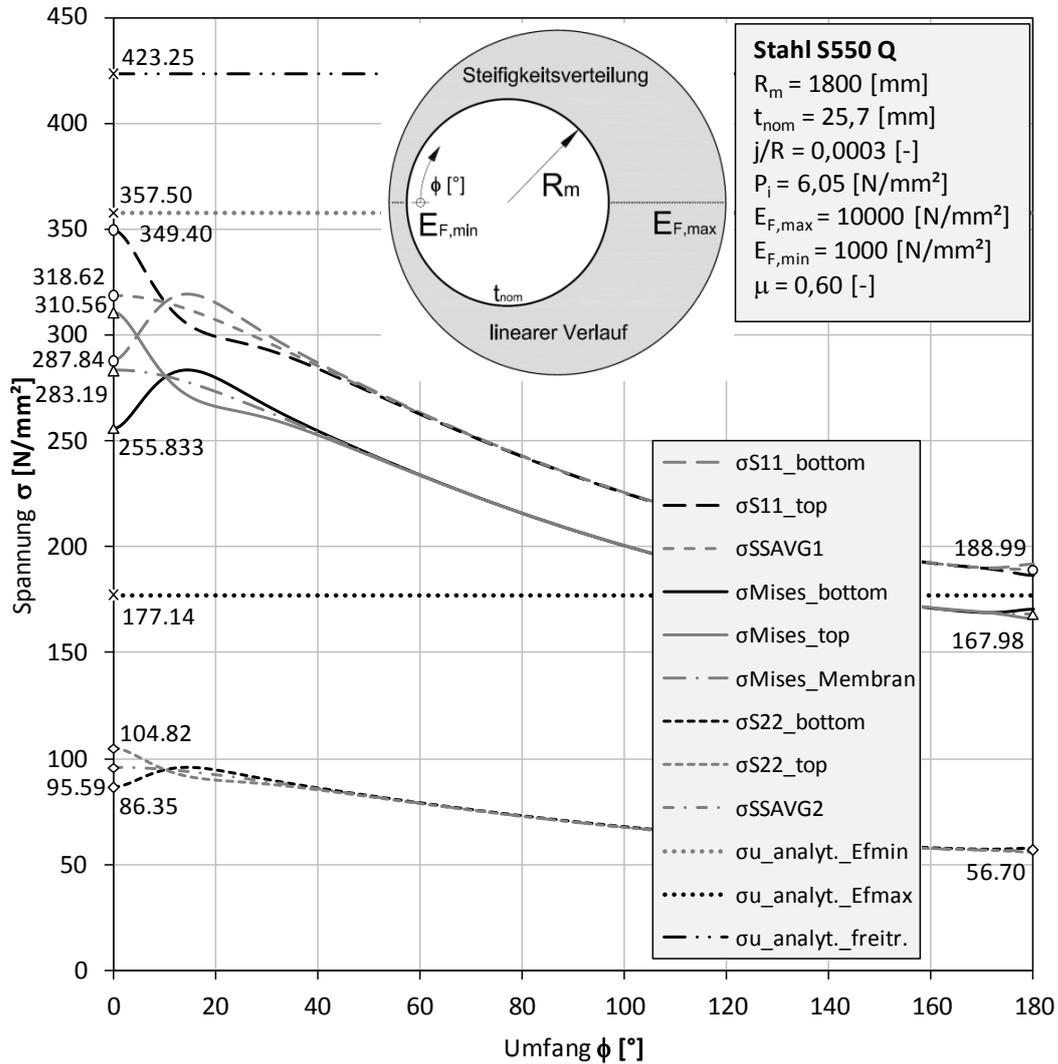


Abbildung 37A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

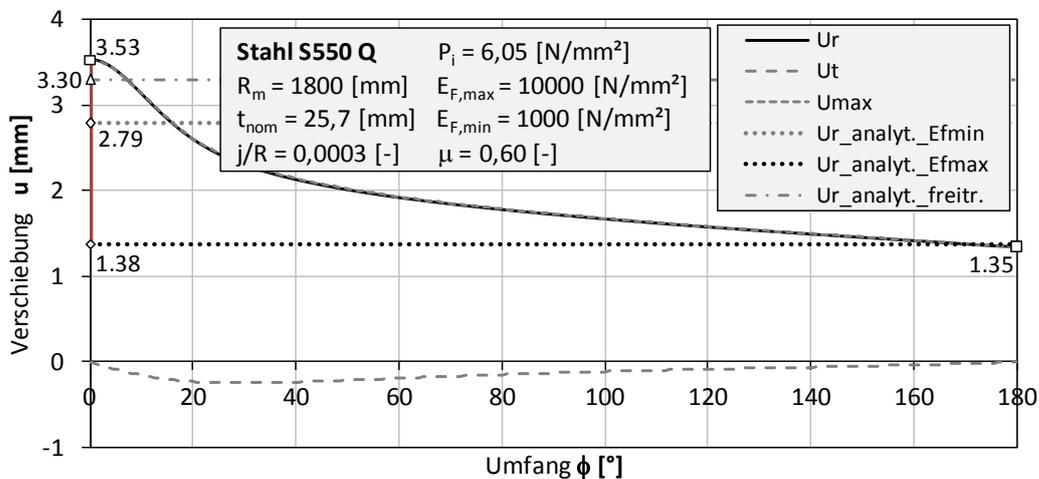


Abbildung 38A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.20 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

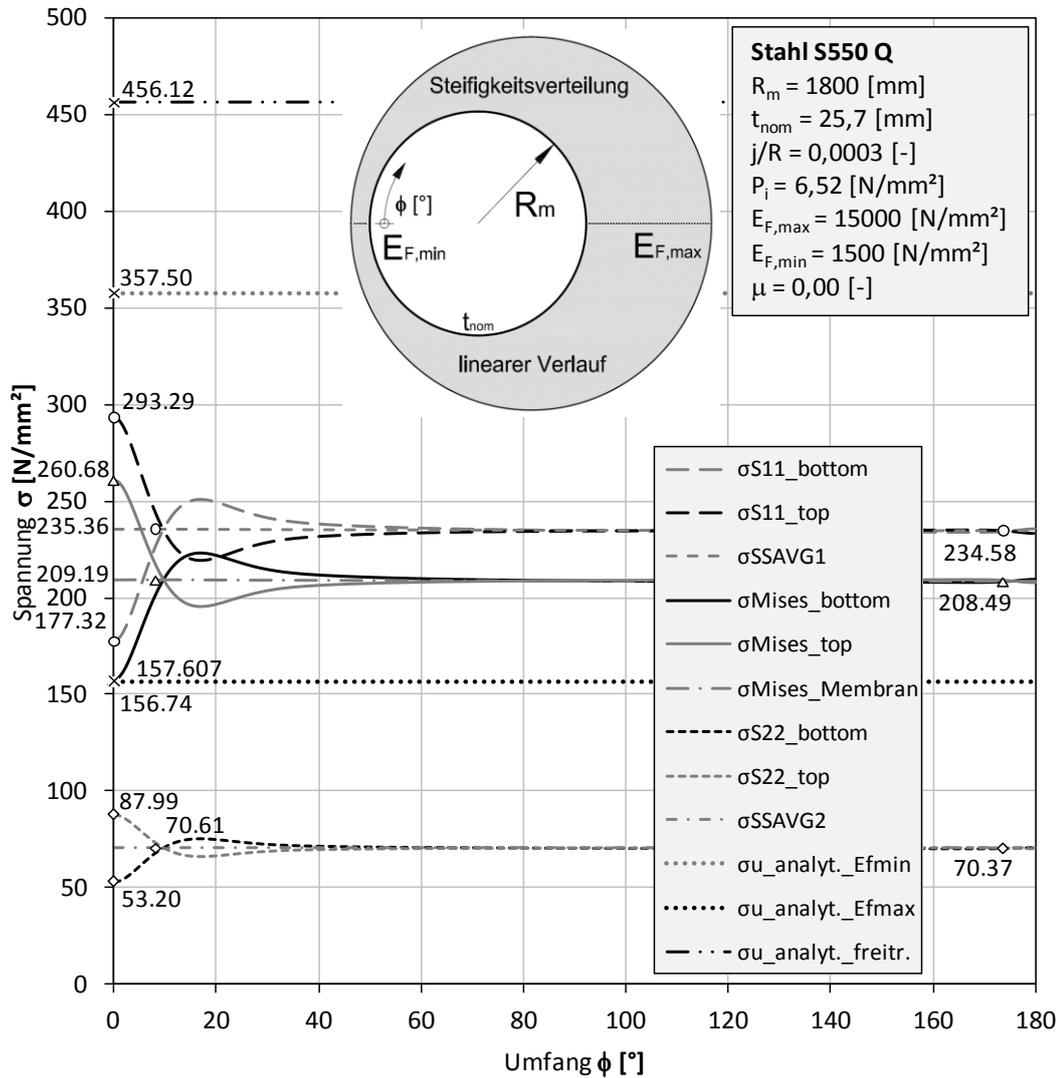


Abbildung 39A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

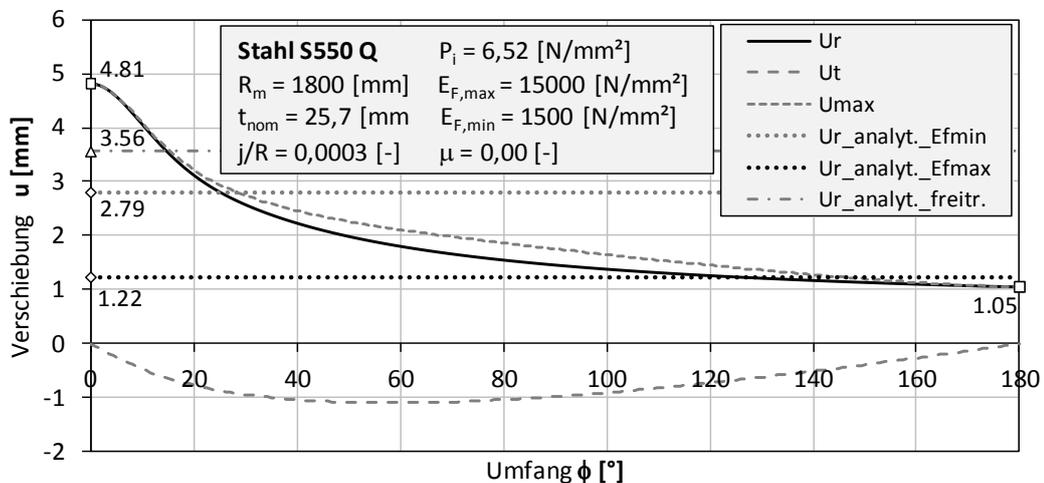


Abbildung 40A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.21 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue03

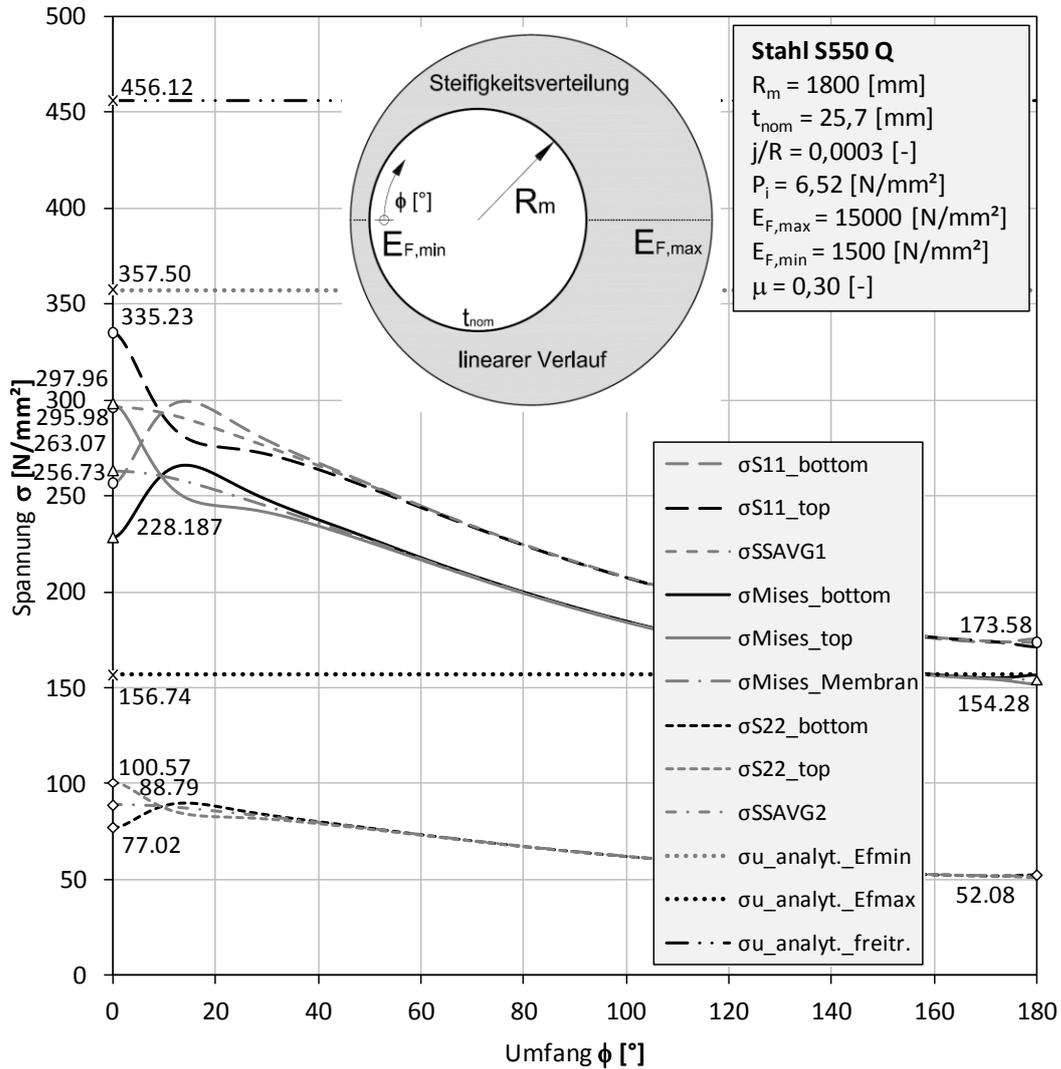


Abbildung 41A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue03

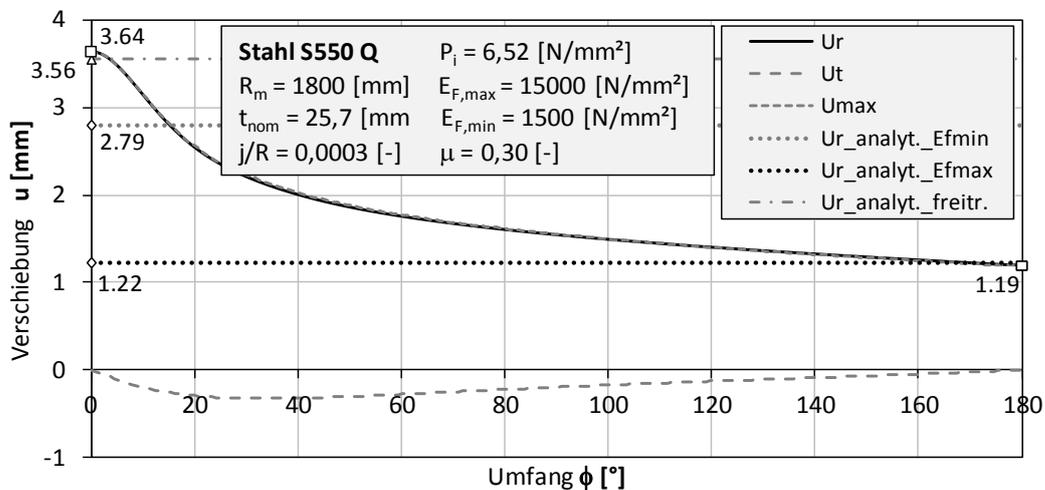


Abbildung 42A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.22 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue06

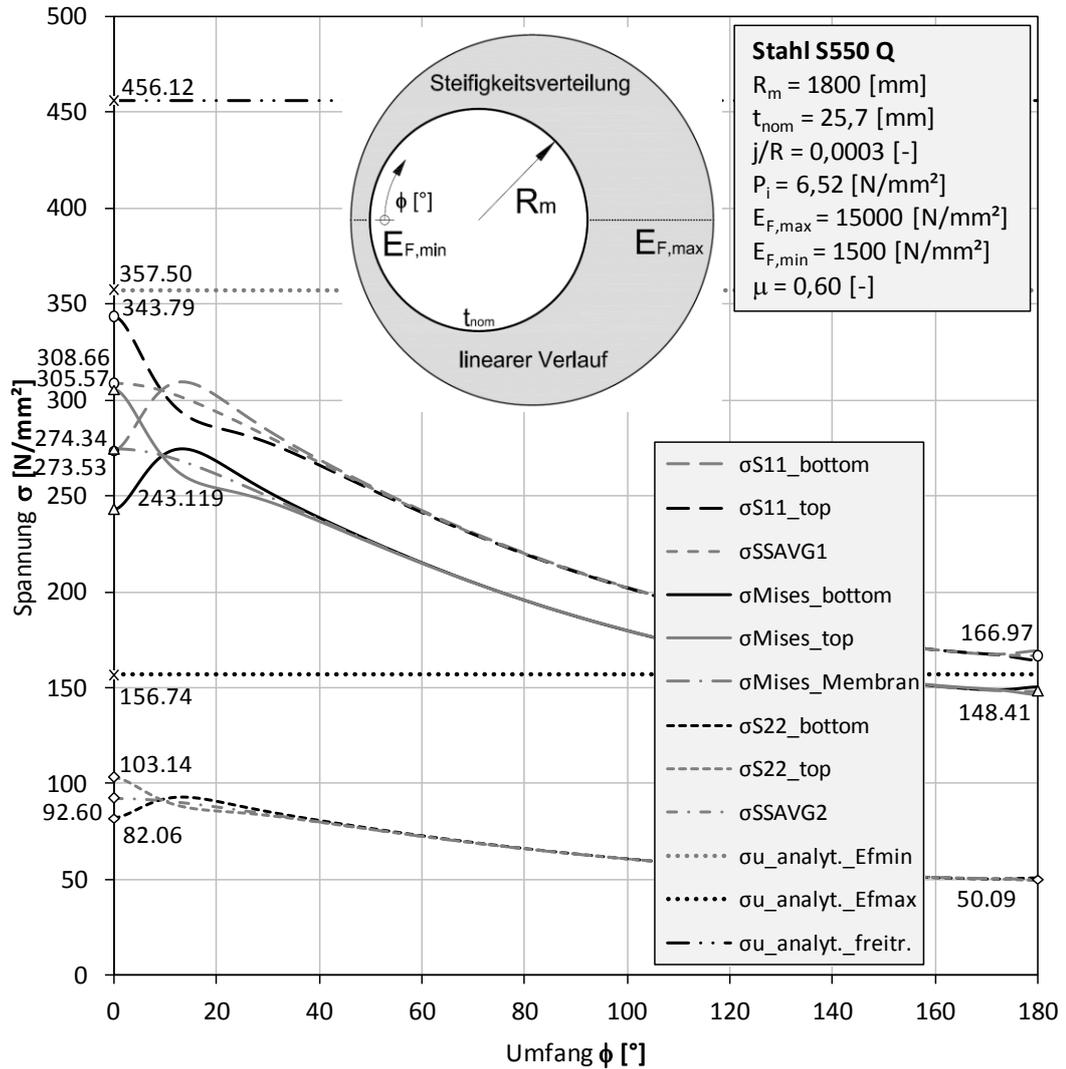


Abbildung 43A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue06

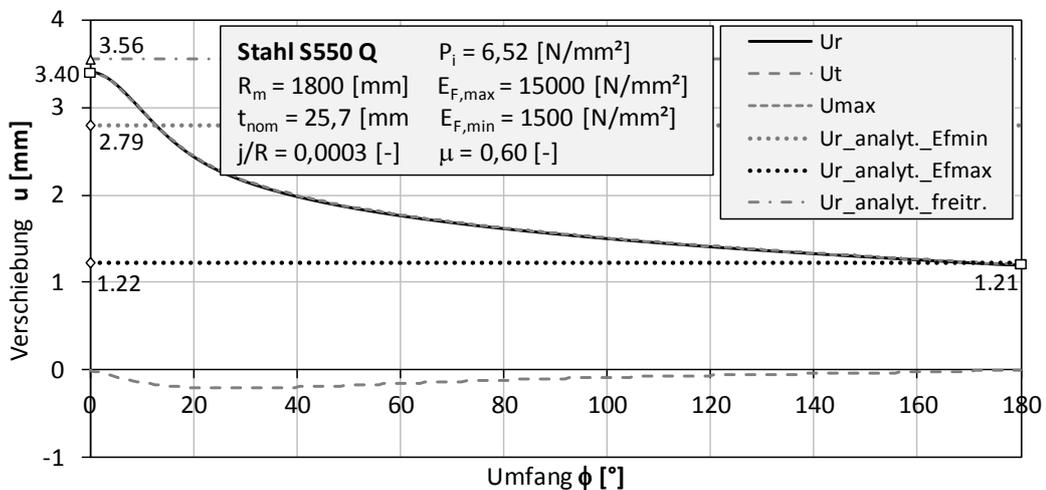


Abbildung 44A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P652\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.23 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue00

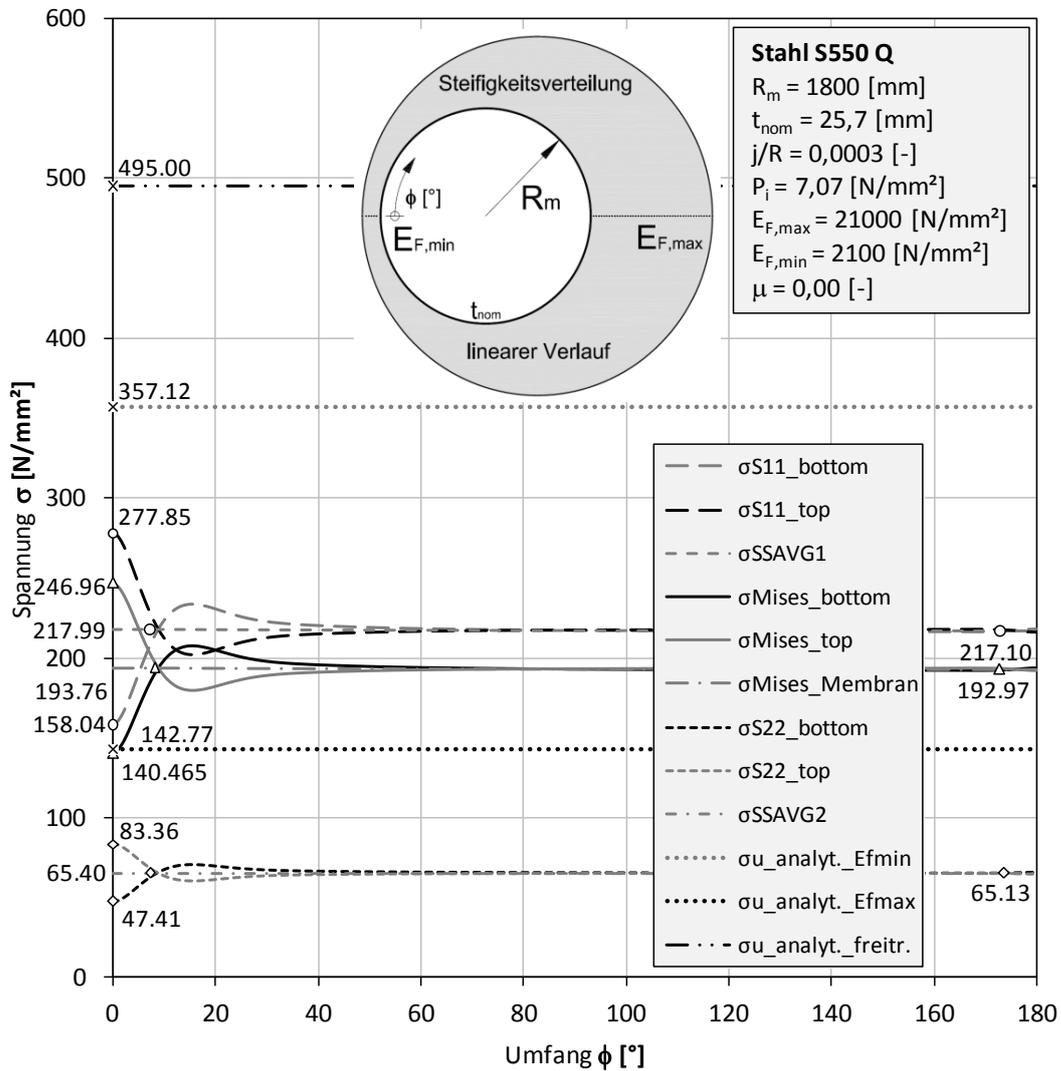


Abbildung 45A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue00

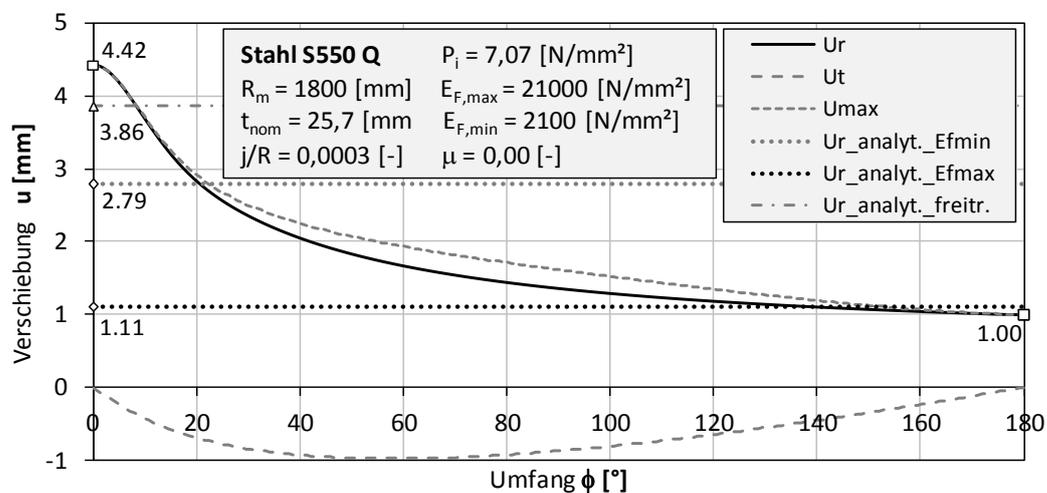


Abbildung 46A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.24 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue03

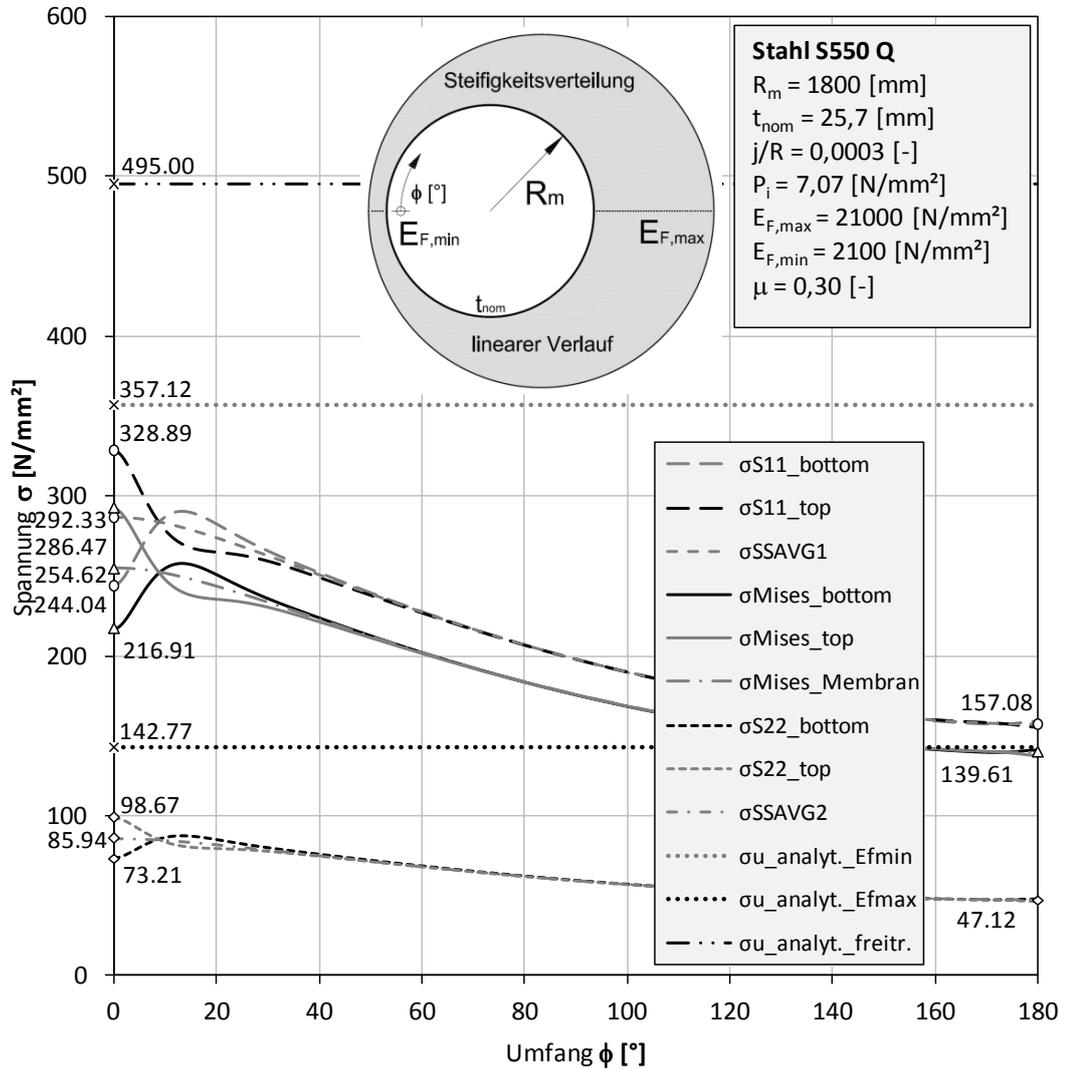


Abbildung 47A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue03

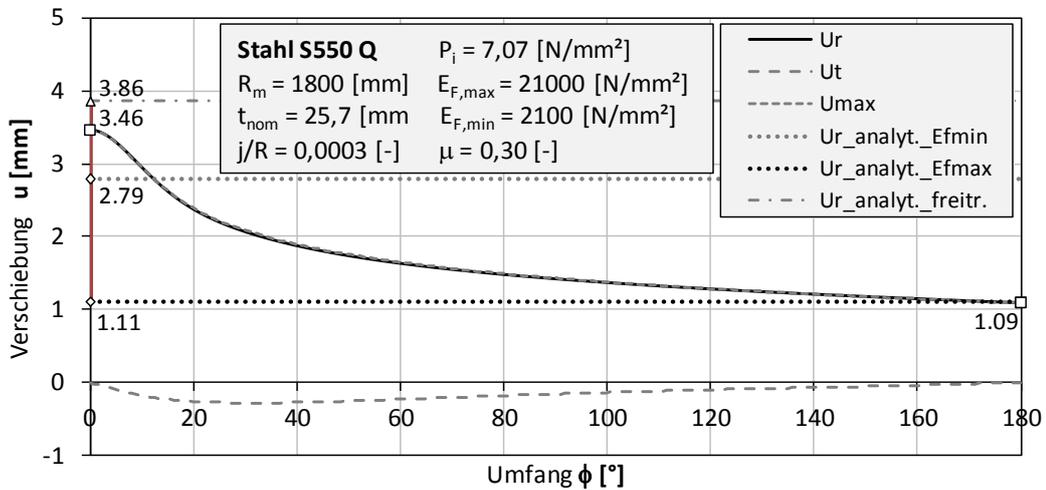


Abbildung 48A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.25 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue06

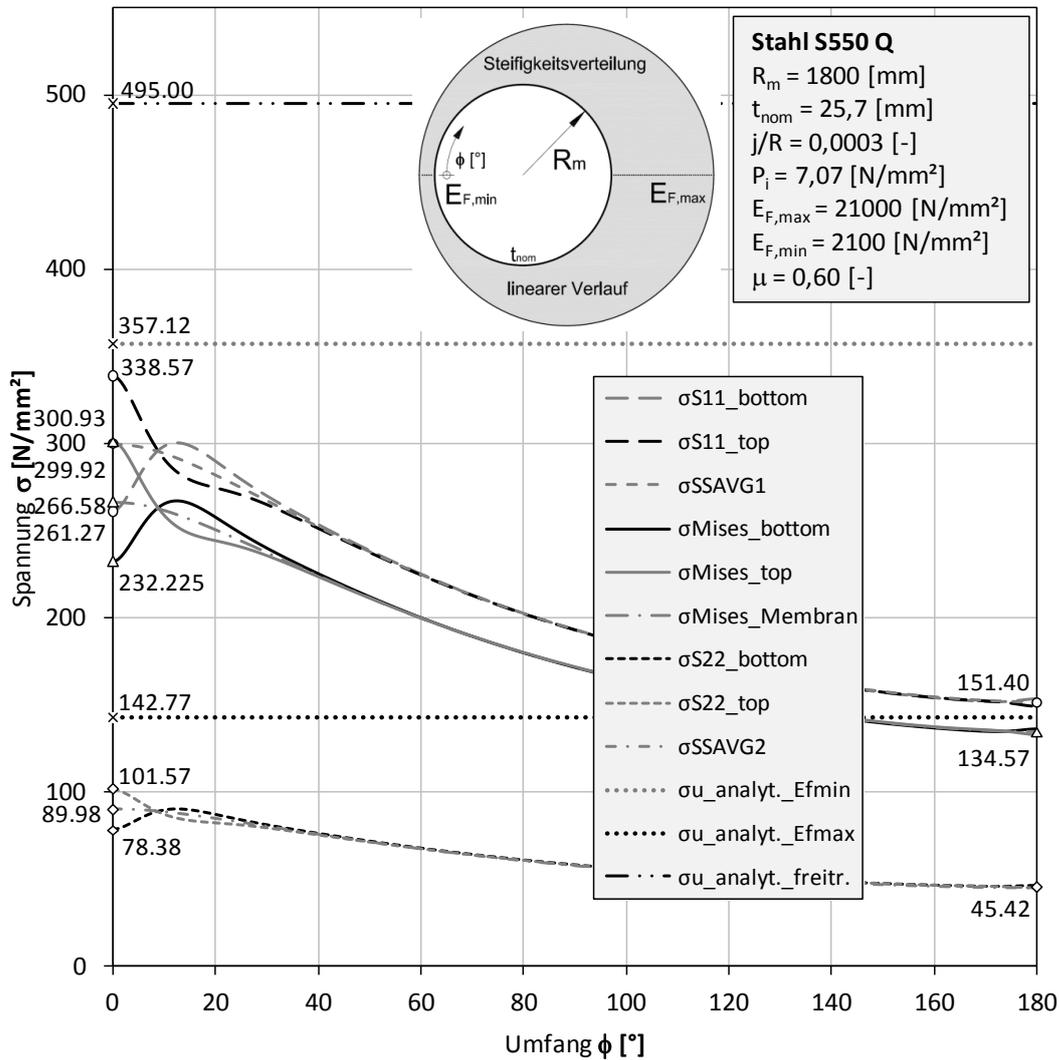


Abbildung 49A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue06

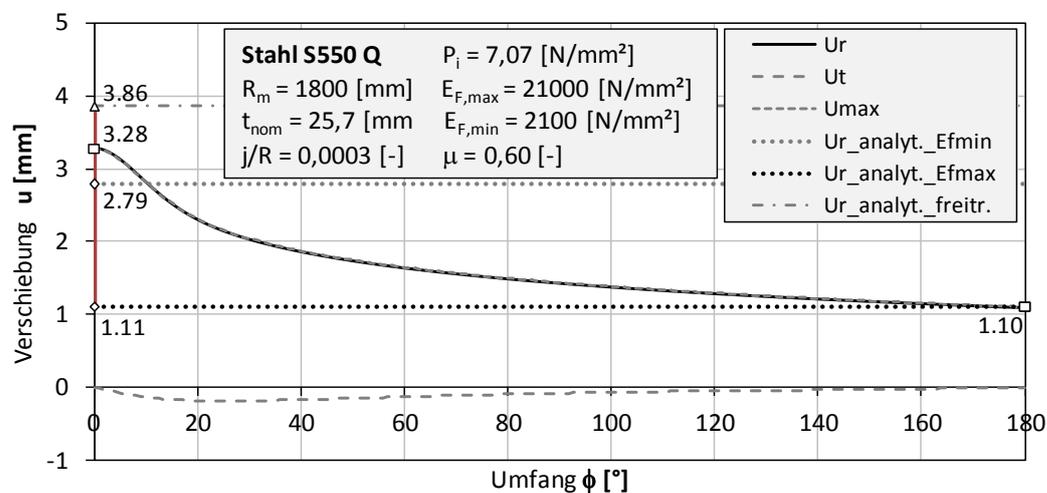


Abbildung 50A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.26 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

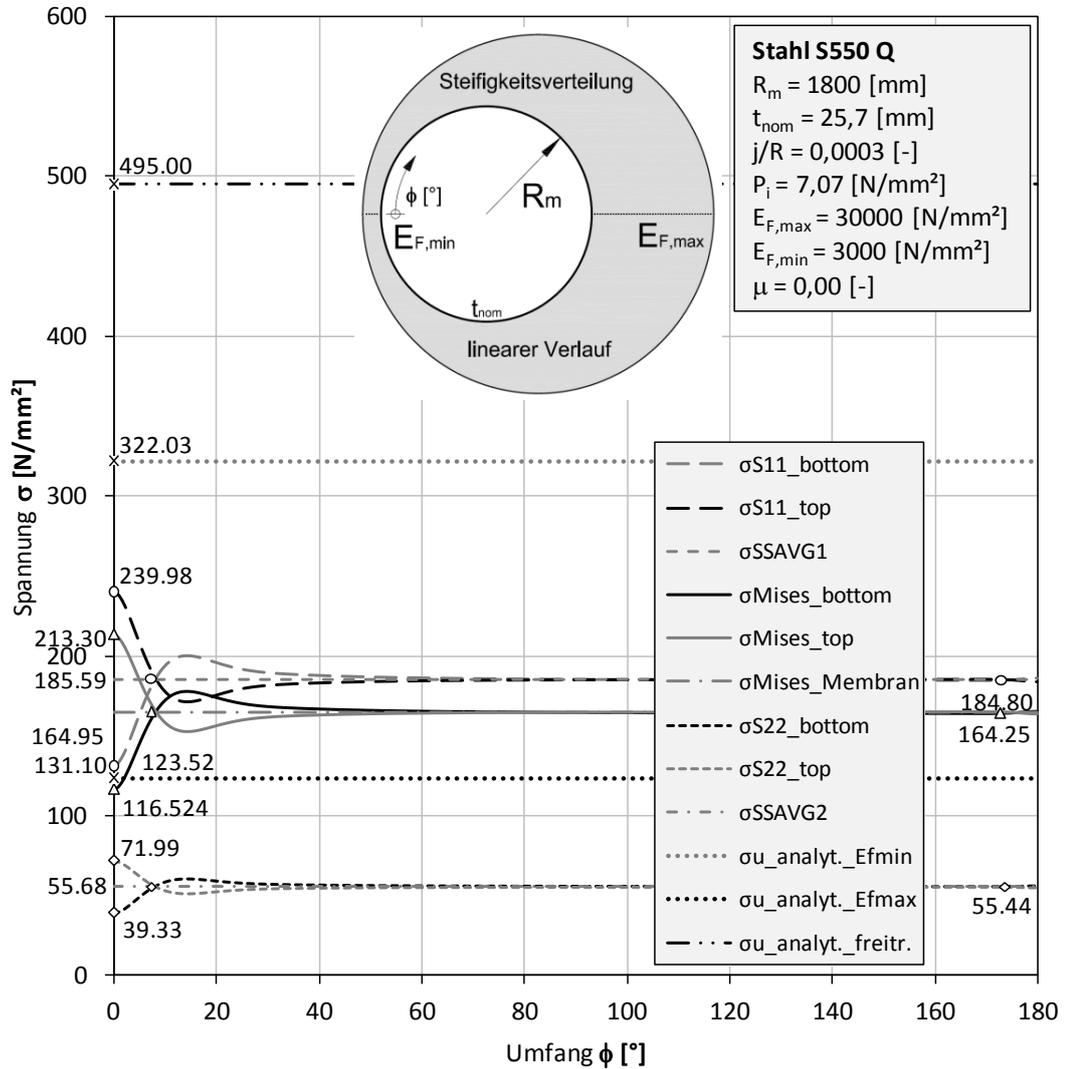


Abbildung 51A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

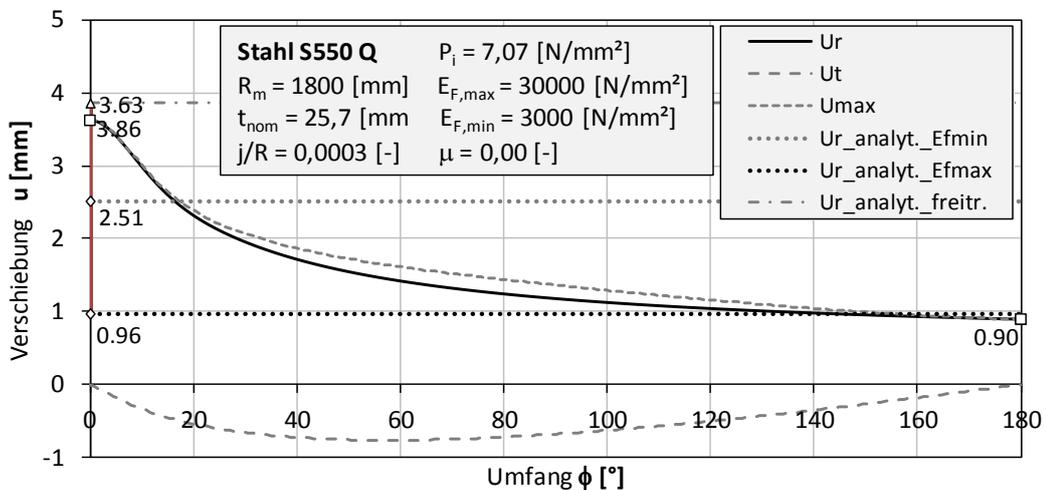


Abbildung 52A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.27 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

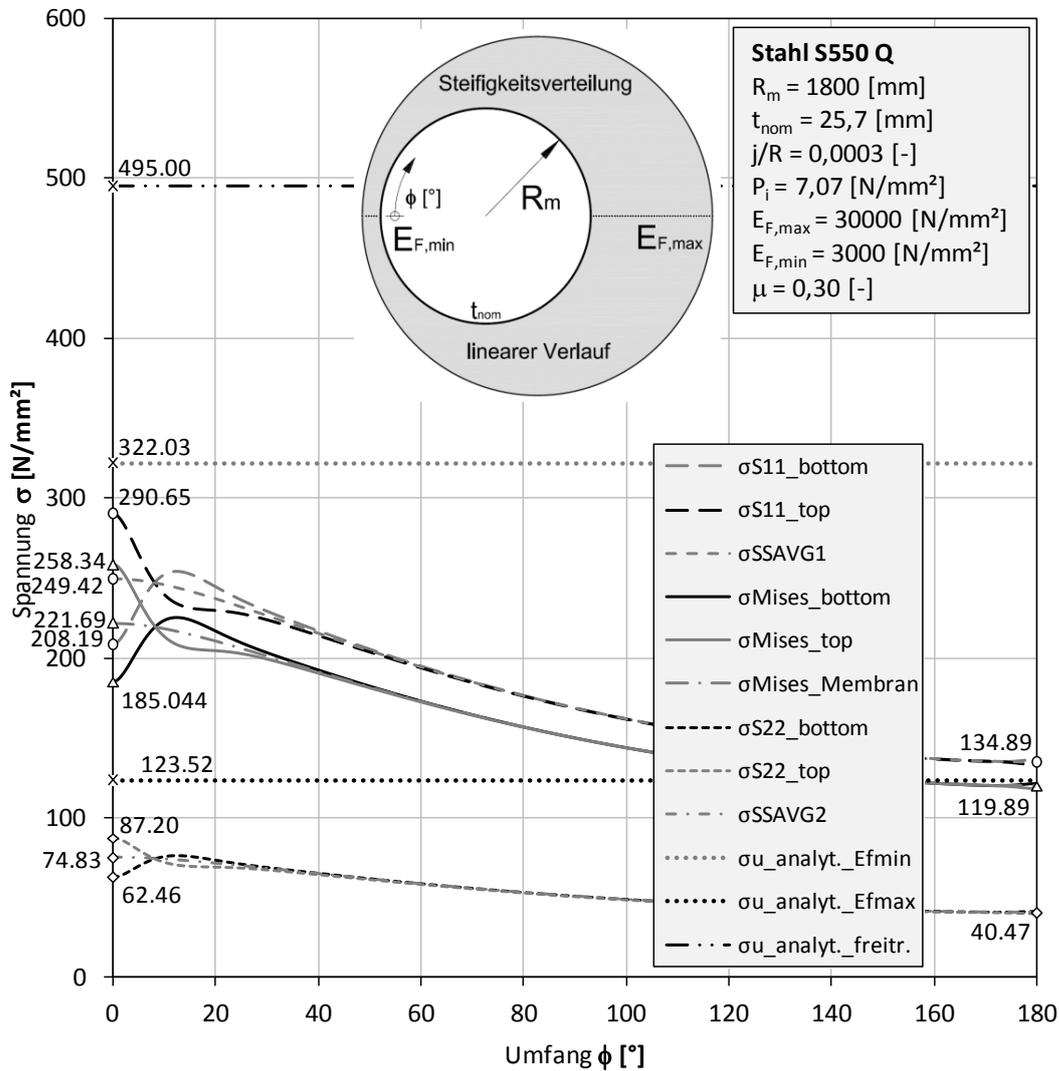


Abbildung 53A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

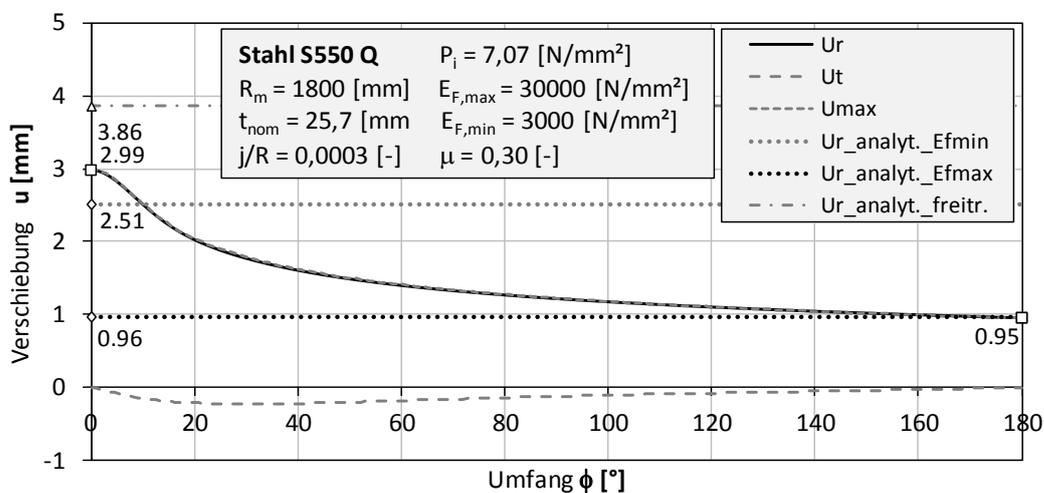


Abbildung 54A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.28 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue06

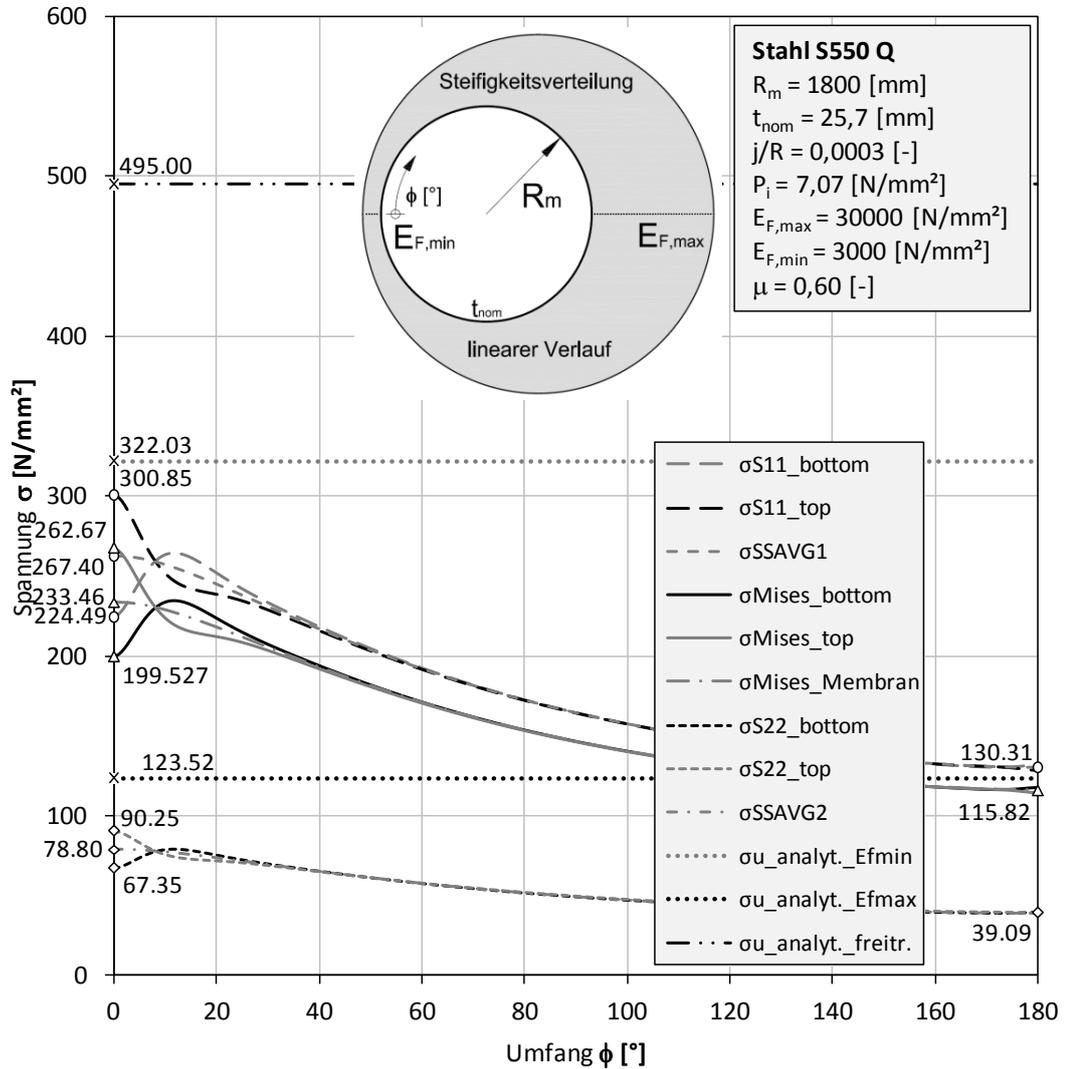


Abbildung 55A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue06

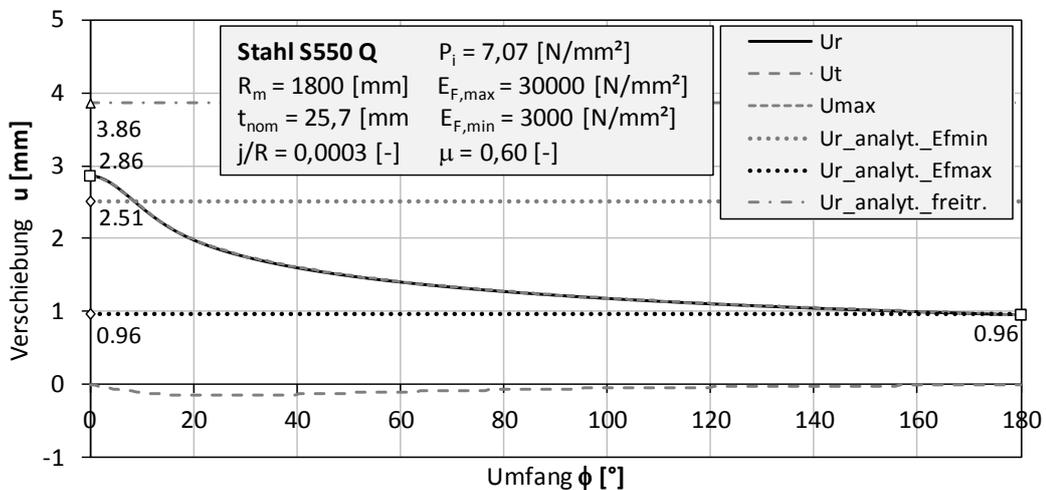


Abbildung 56A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF3000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.29 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

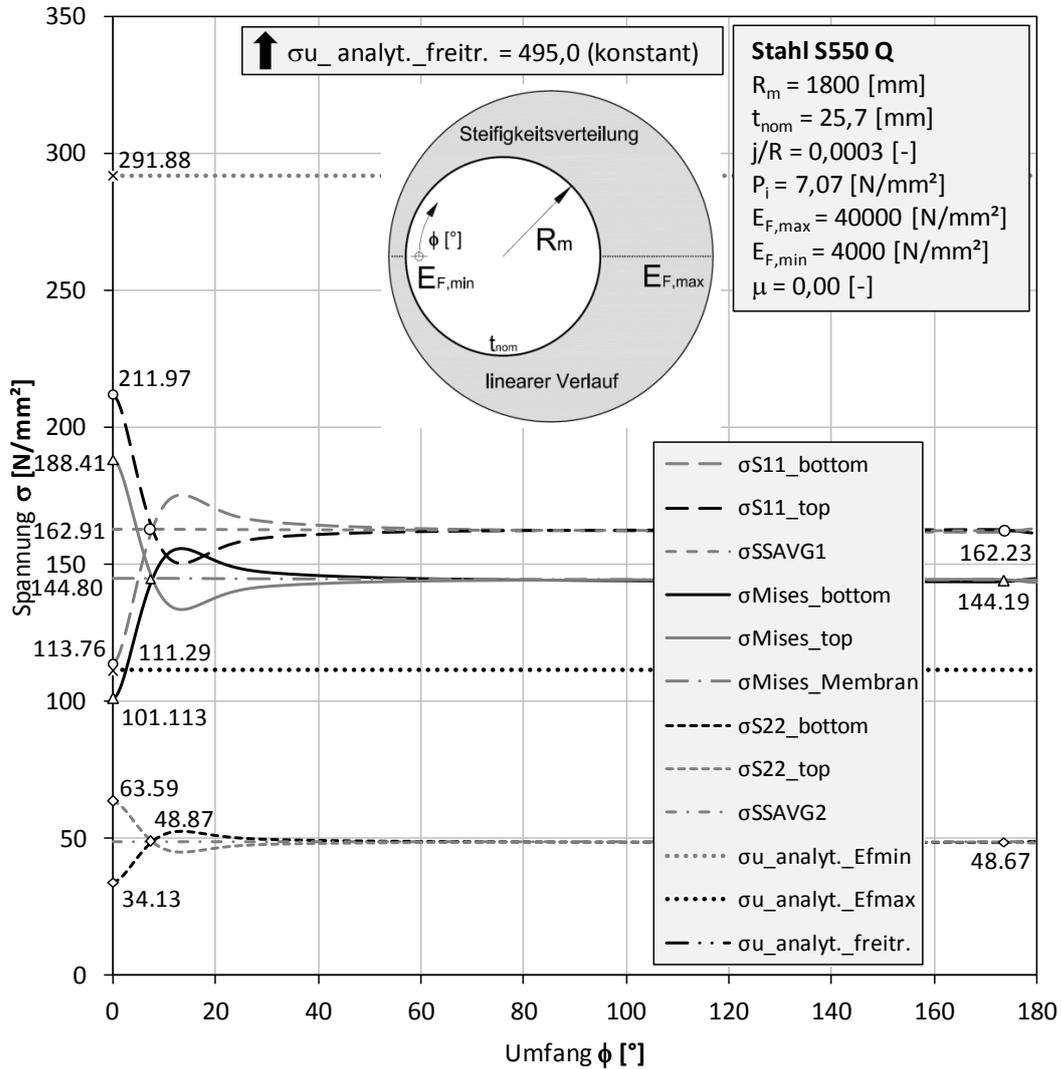


Abbildung 57A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

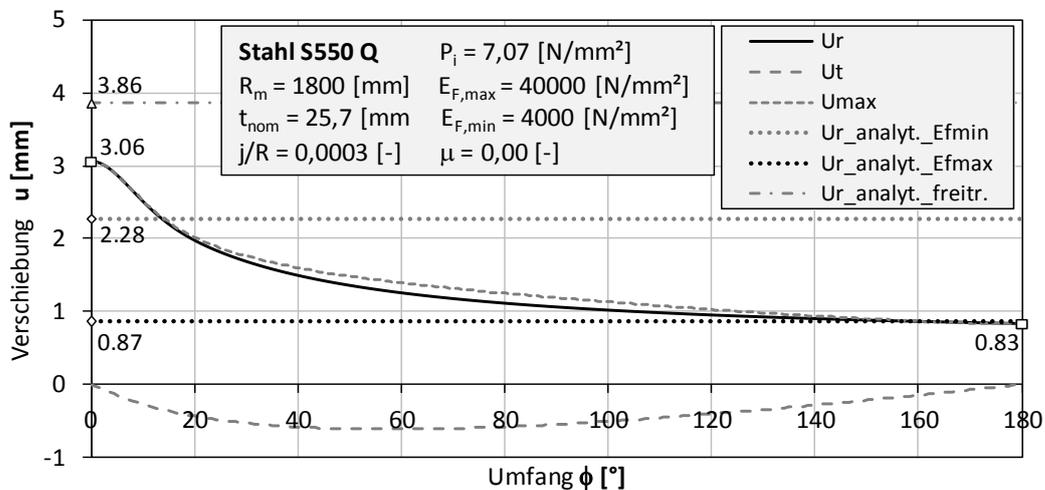


Abbildung 58A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.30 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

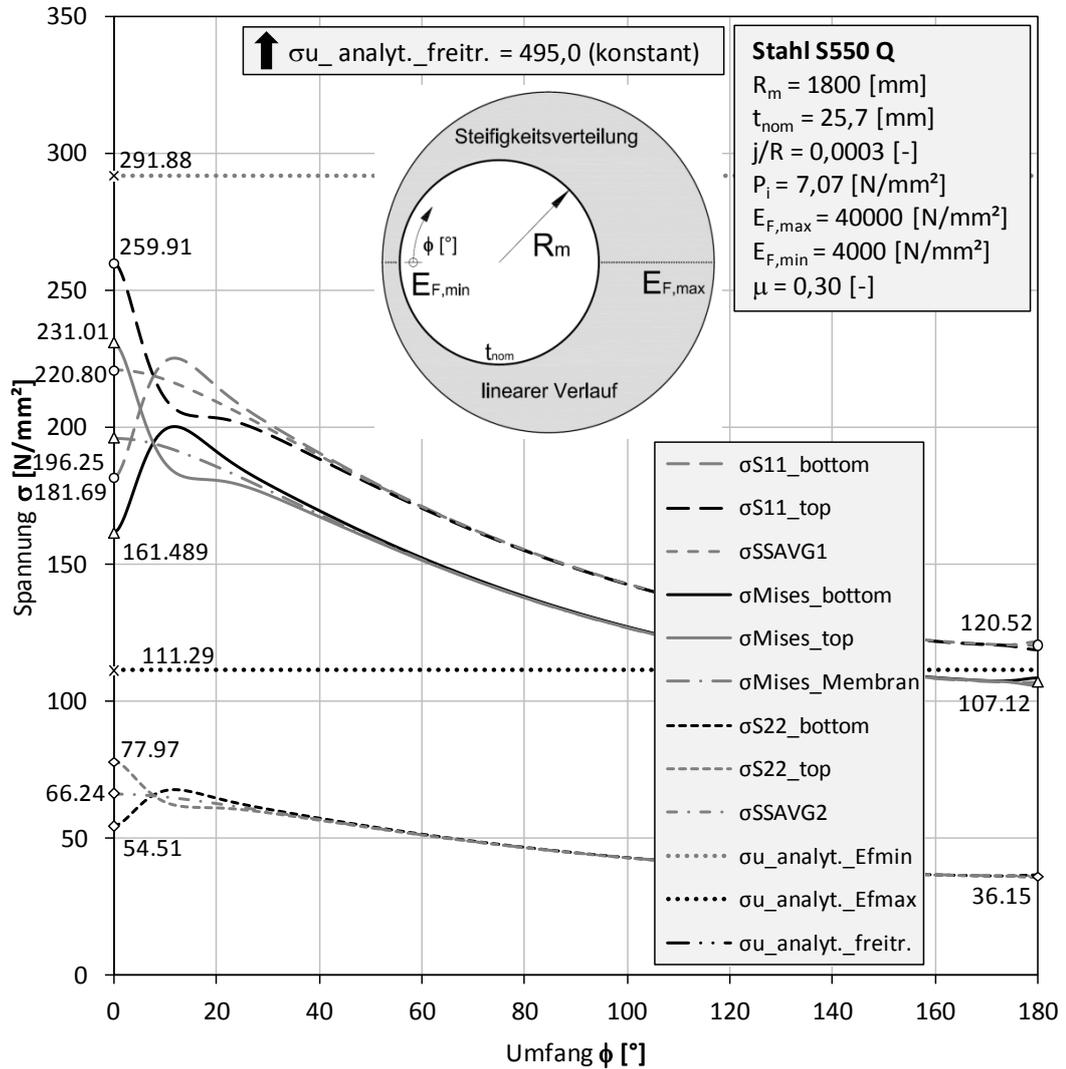


Abbildung 59A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

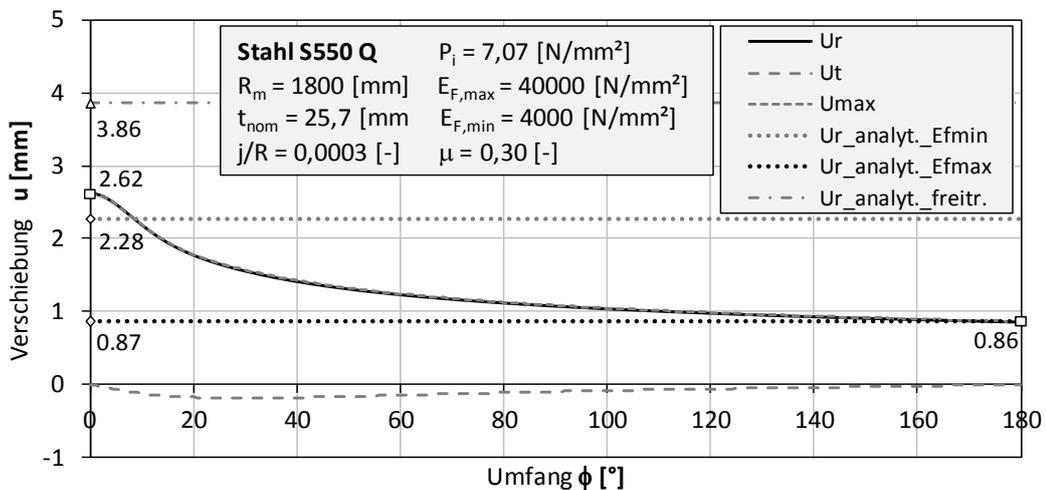


Abbildung 60A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.31 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

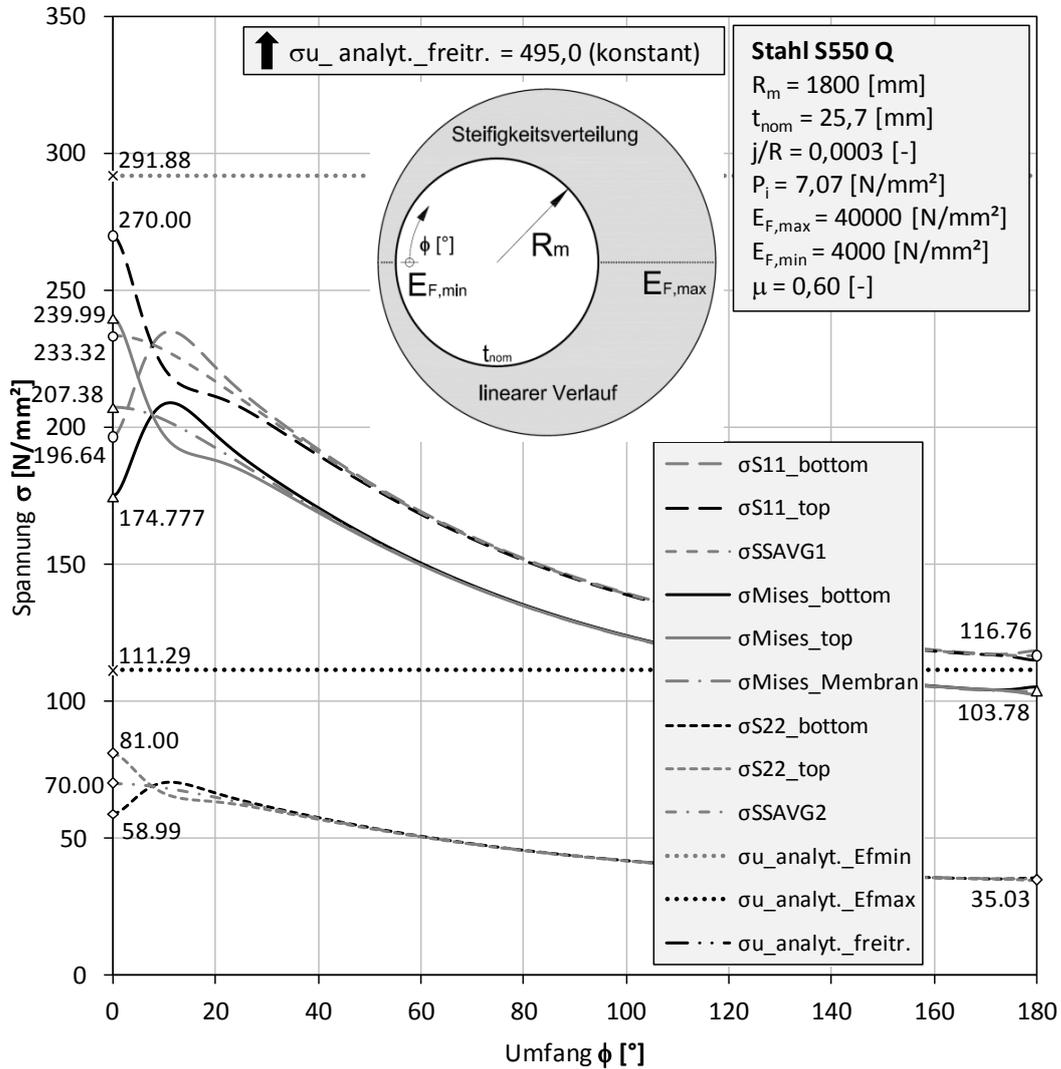


Abbildung 61A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

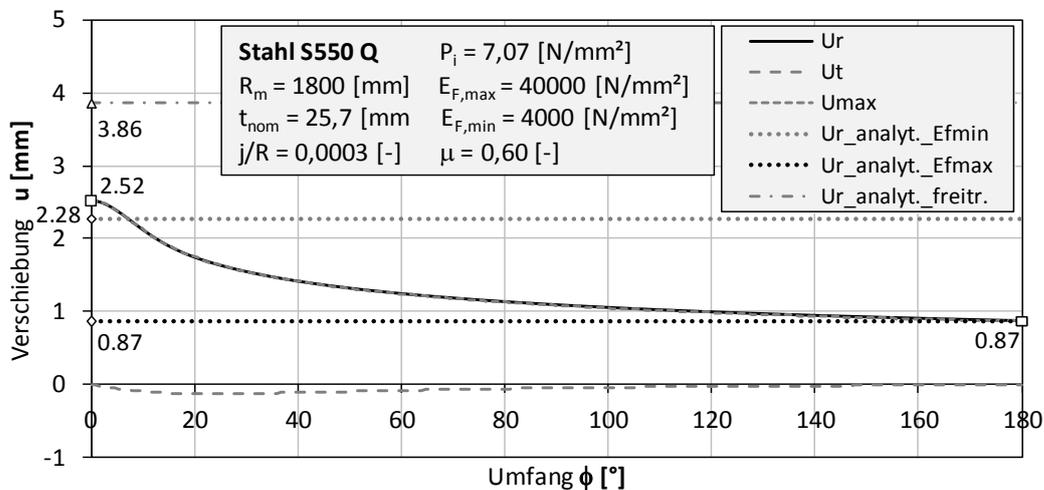


Abbildung 62A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.32 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_Linear\_10zu1\_mue00

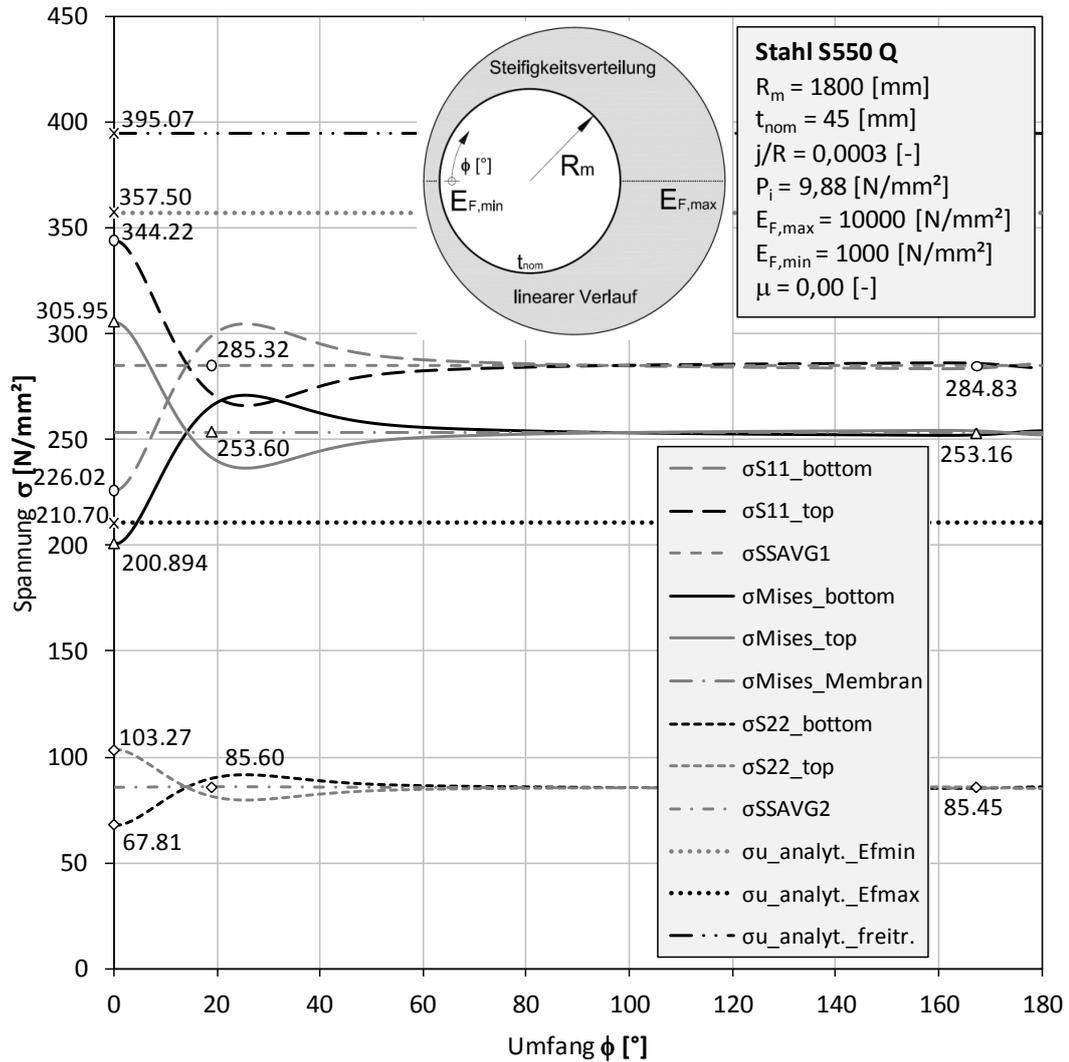


Abbildung 63A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

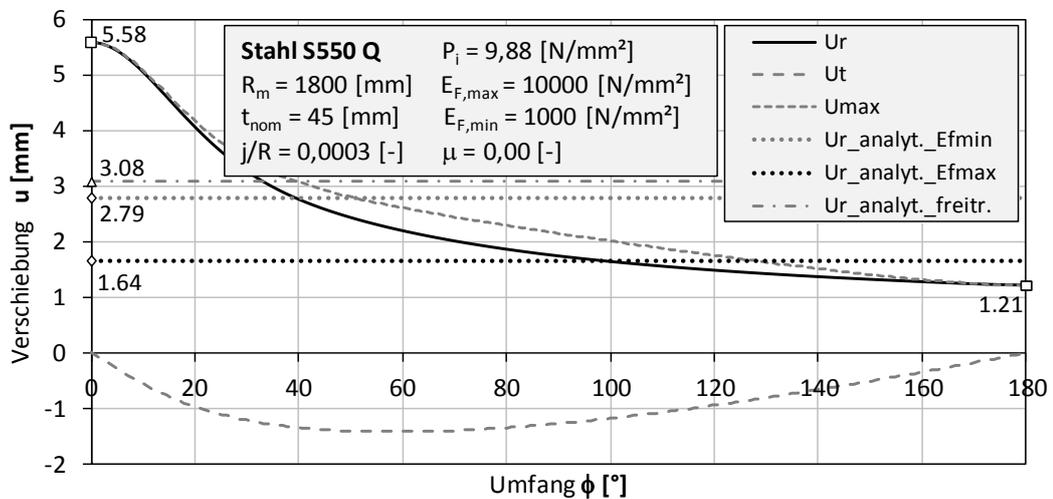


Abbildung 64A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.33 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_Linear\_10zu1\_mue03

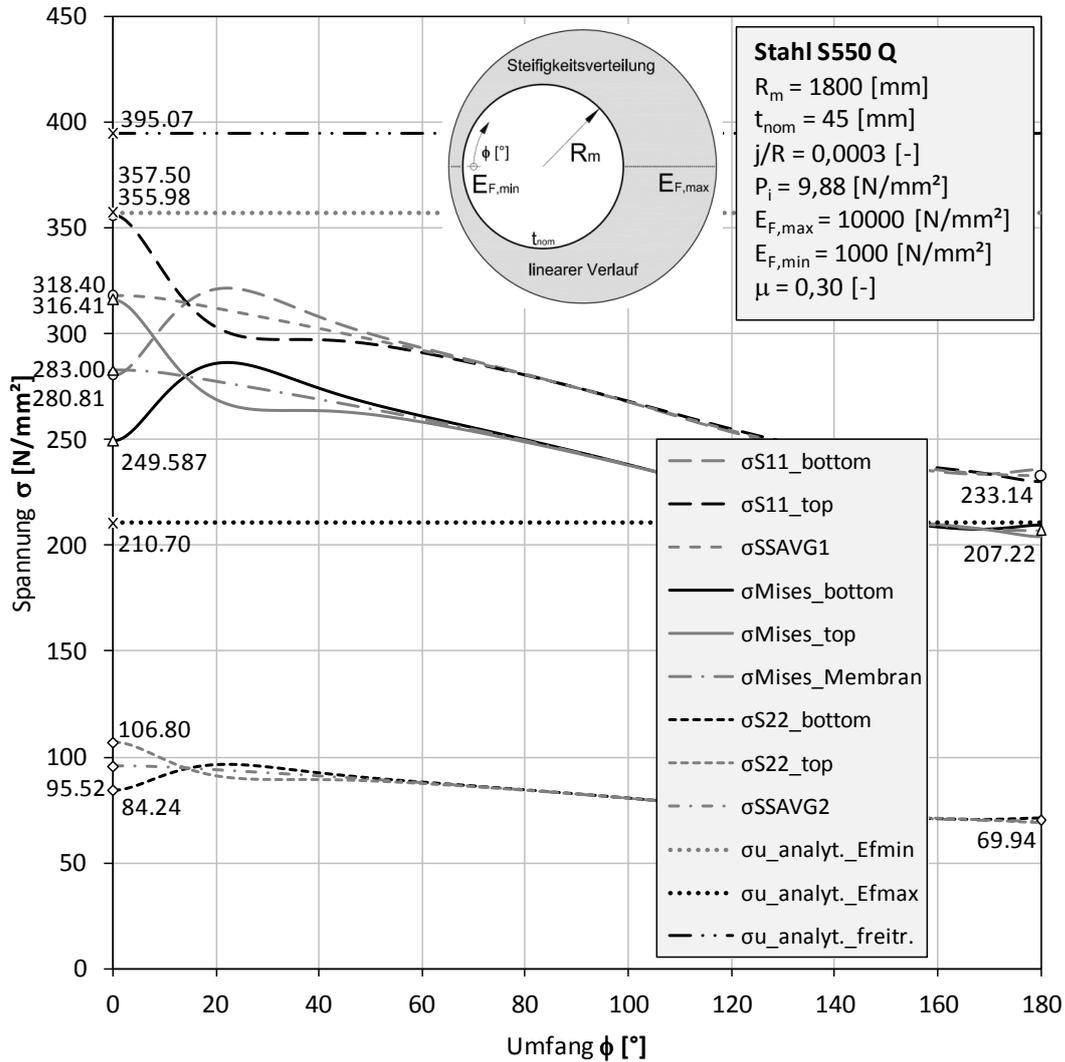


Abbildung 65A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

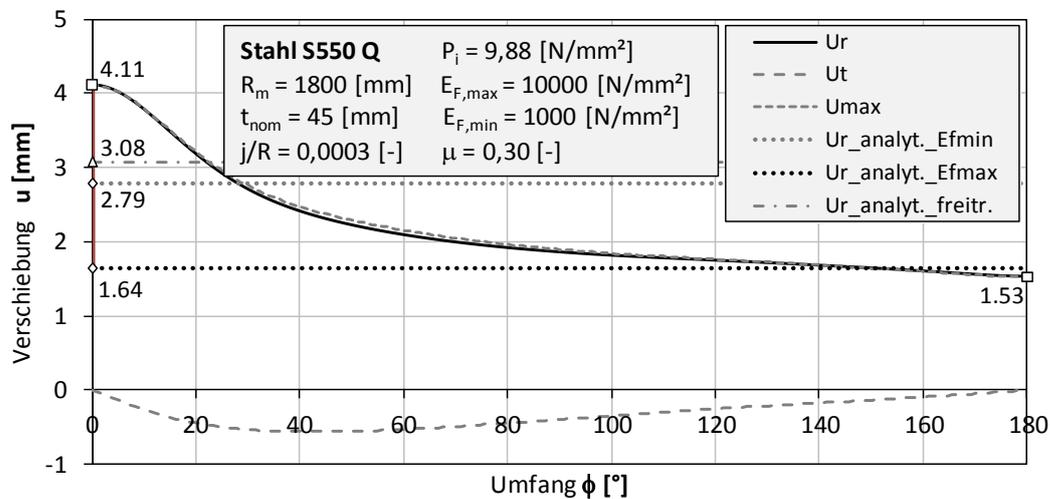


Abbildung 66A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.34 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_Linear\_10zu1\_mue06

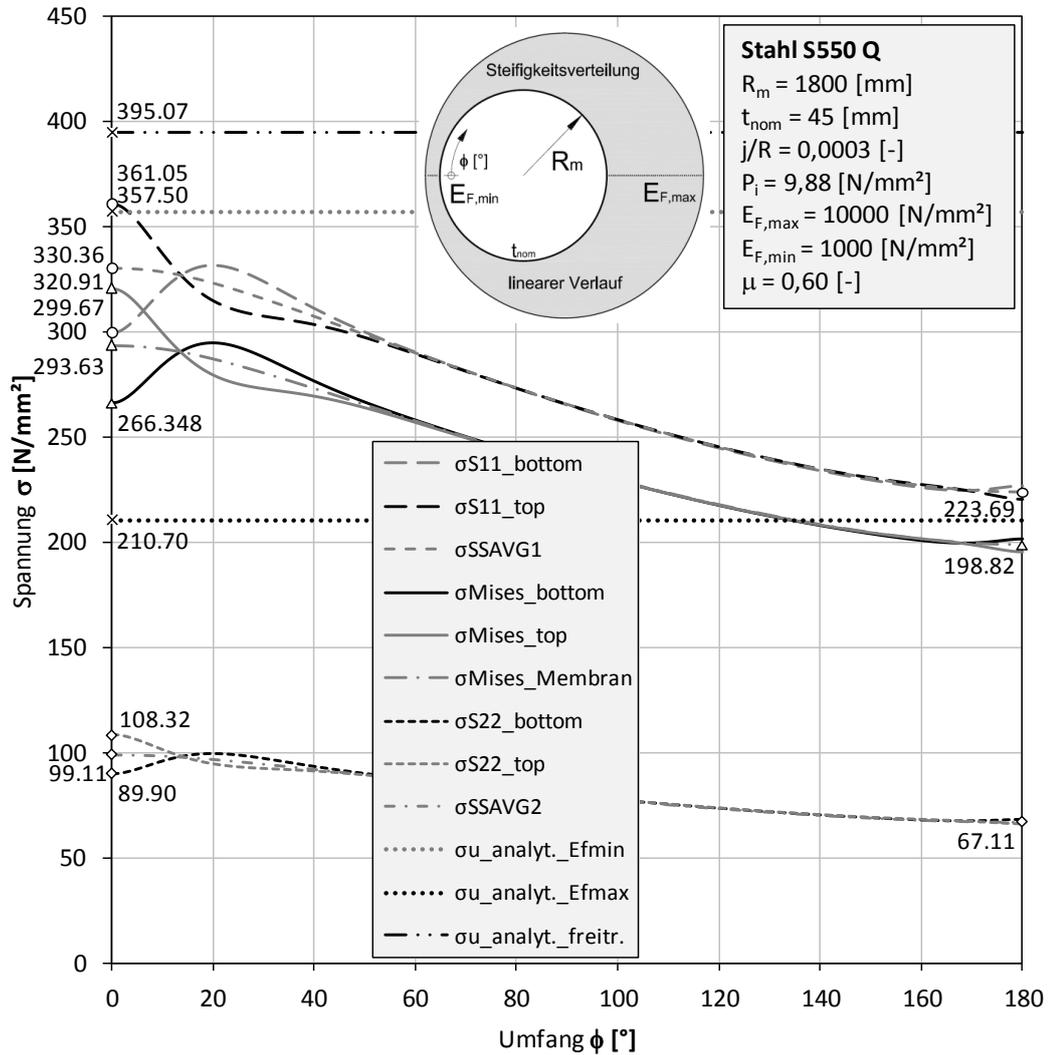


Abbildung 67A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

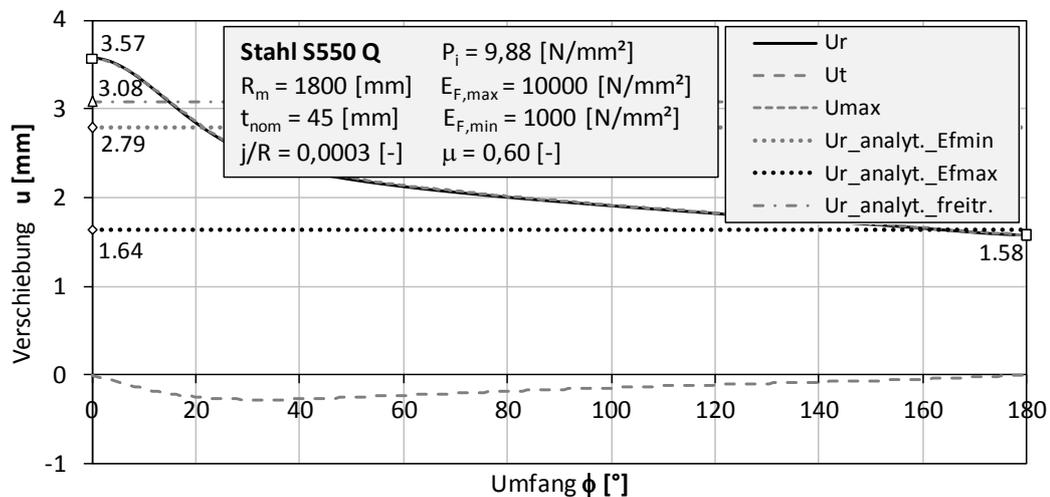


Abbildung 68A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.35 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1035\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

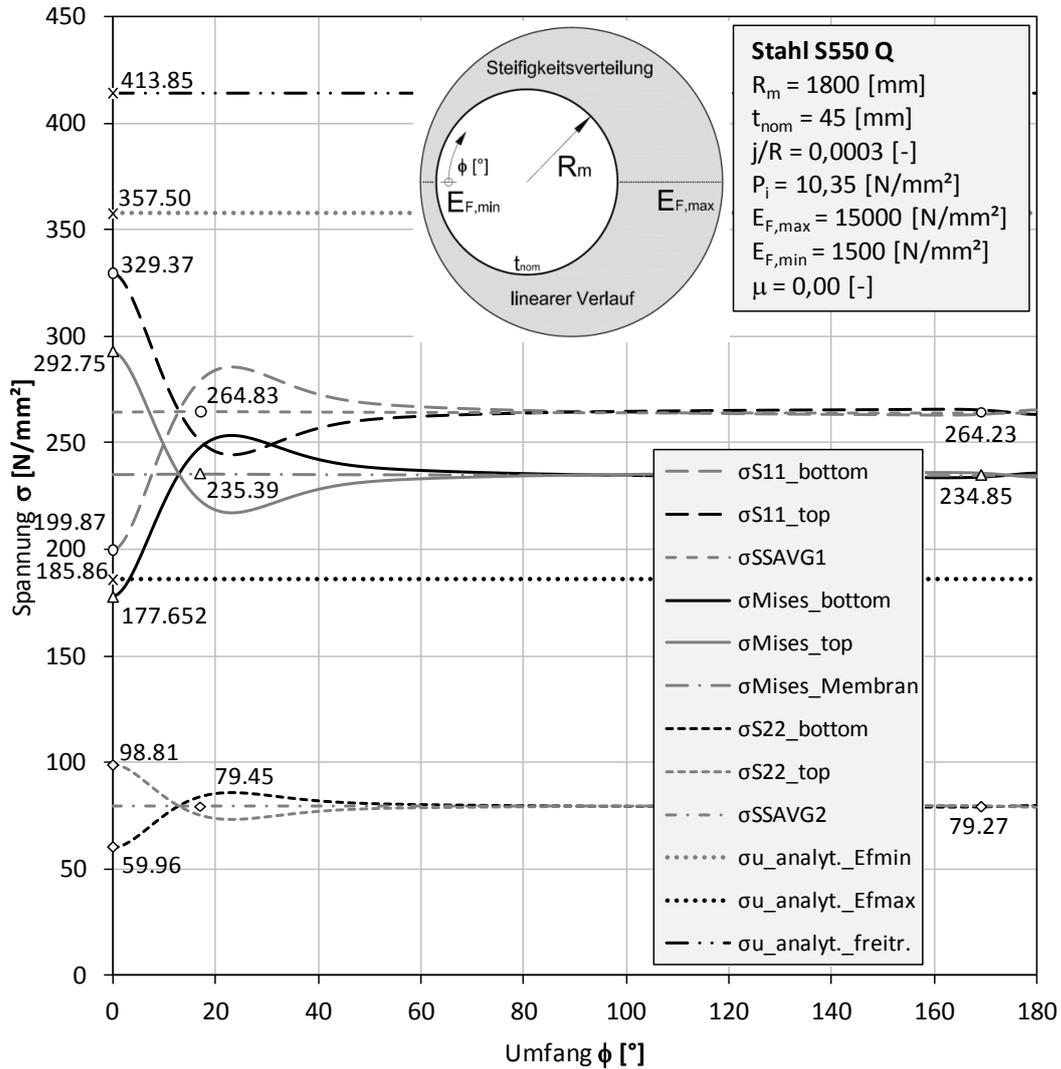


Abbildung 69A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1035\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

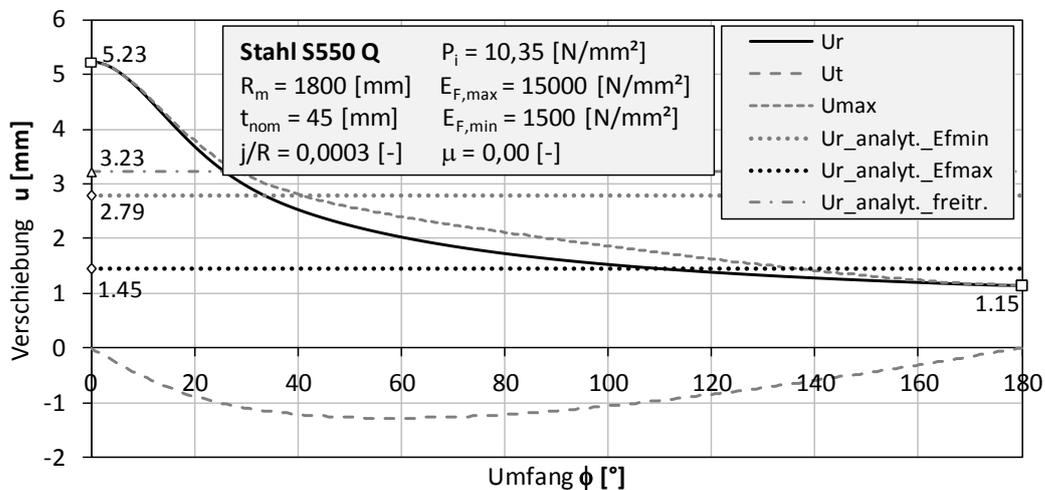


Abbildung 70A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1035\_EF1500\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.36 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue00

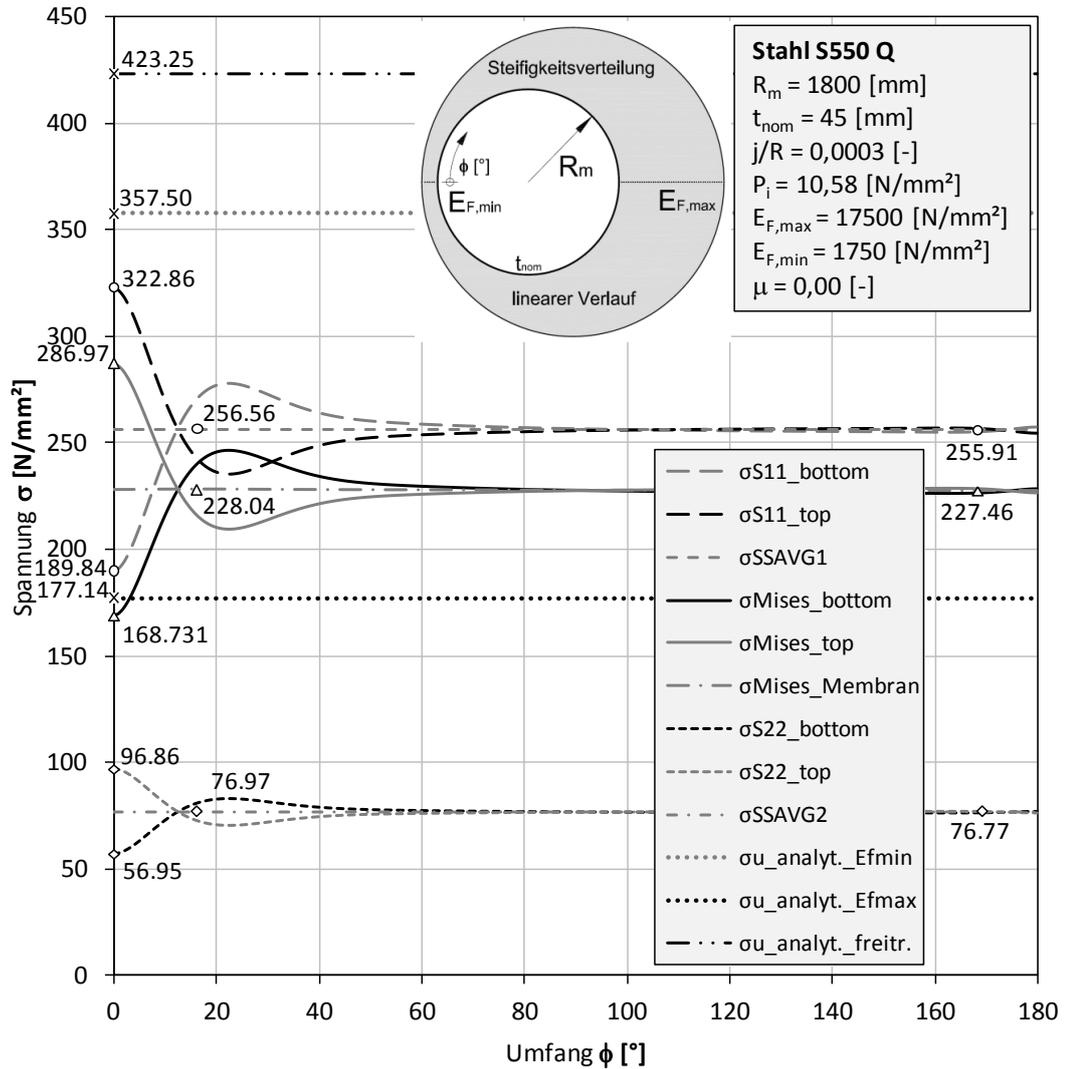


Abbildung 71A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue00

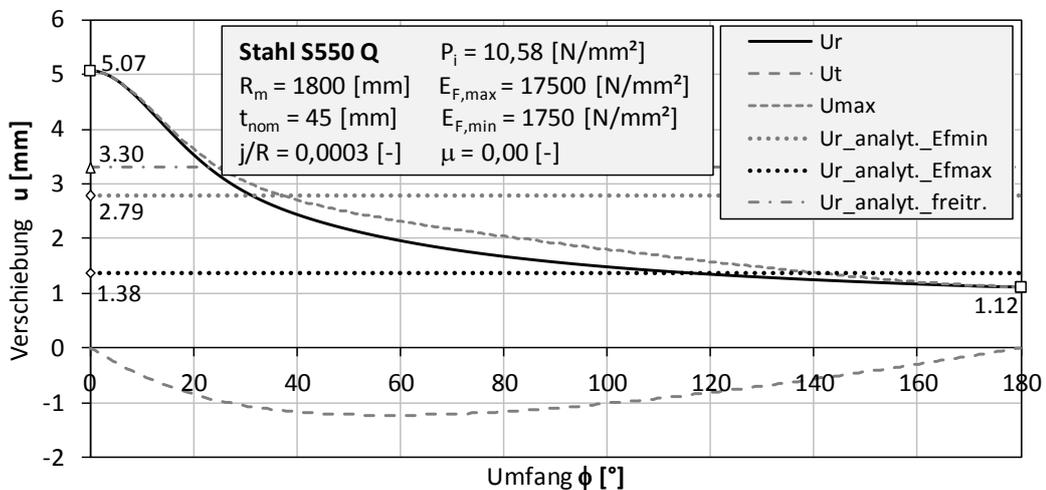


Abbildung 72A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.37 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue03

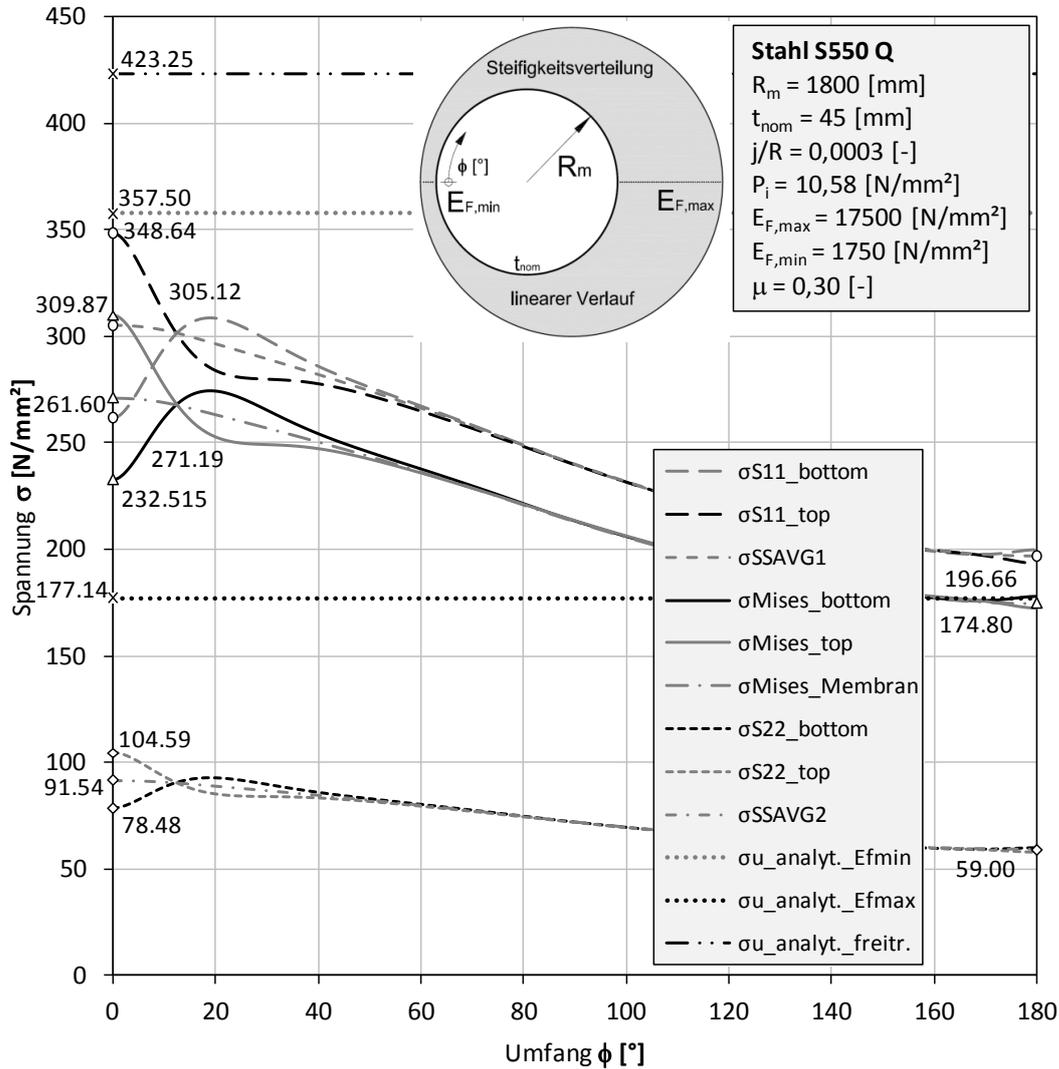


Abbildung 73A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue03

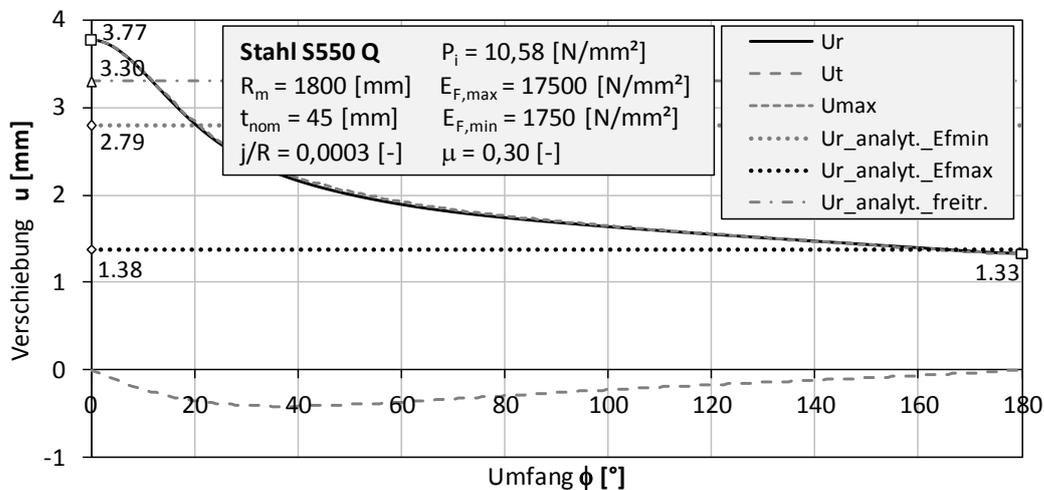


Abbildung 74A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.38 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue06

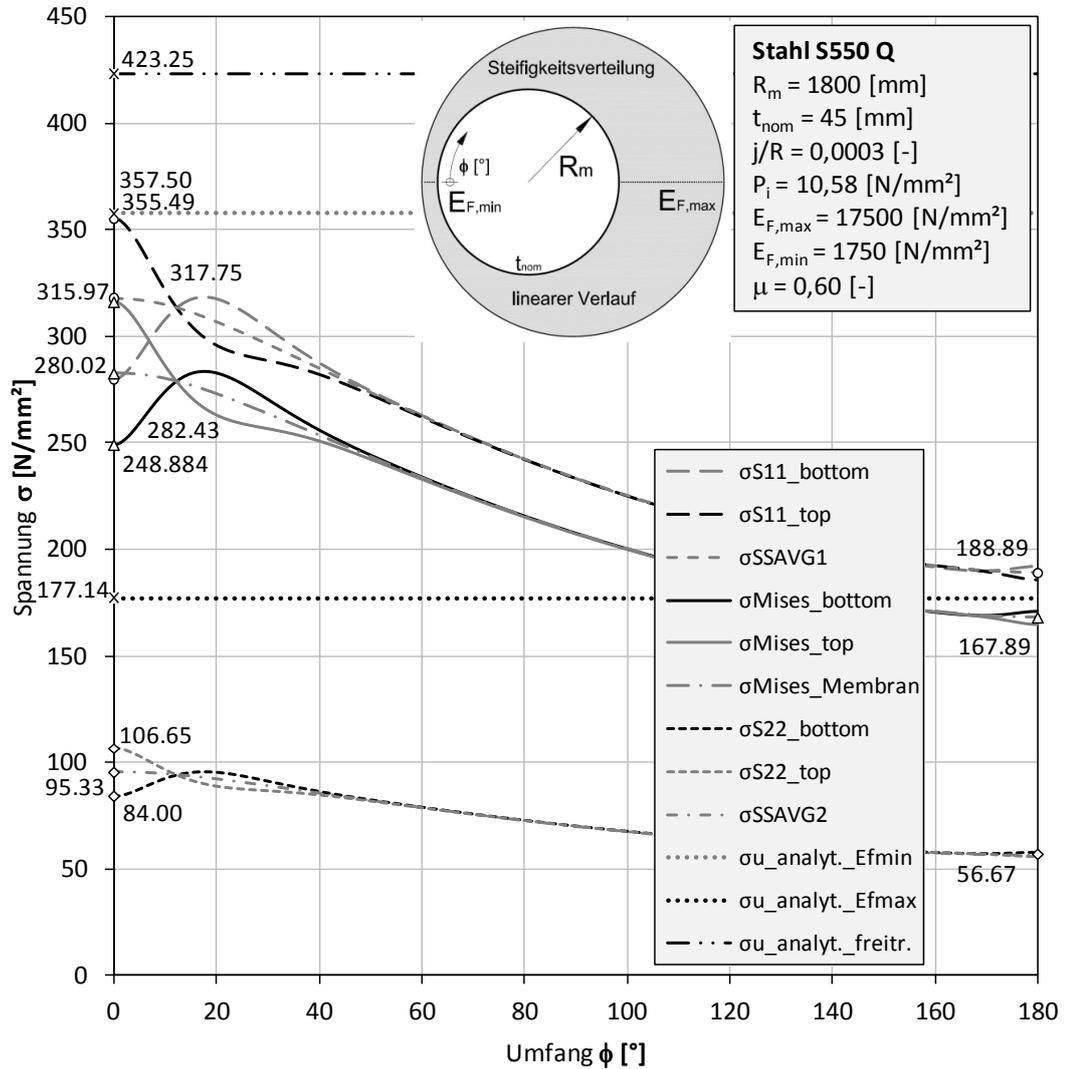


Abbildung 75A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue06

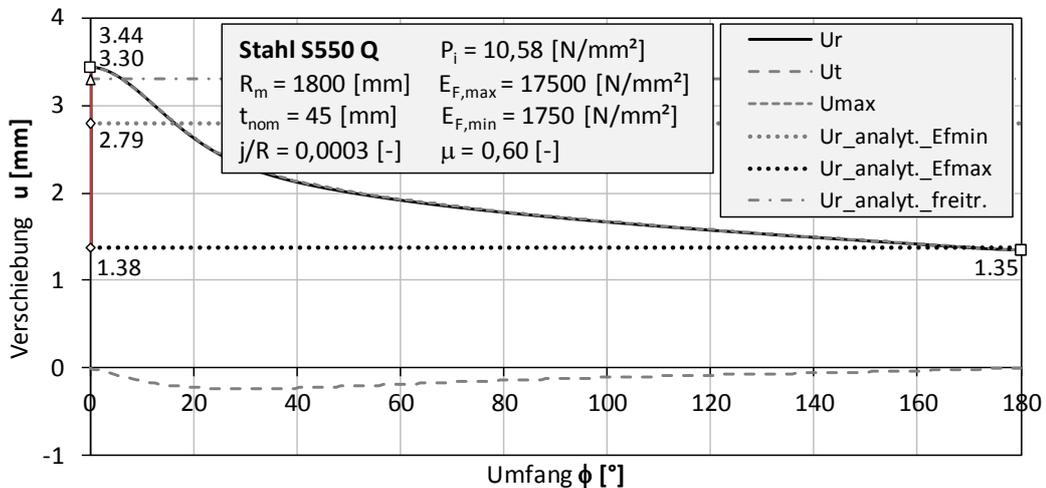


Abbildung 76A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1058\_EF1750\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.39 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue00

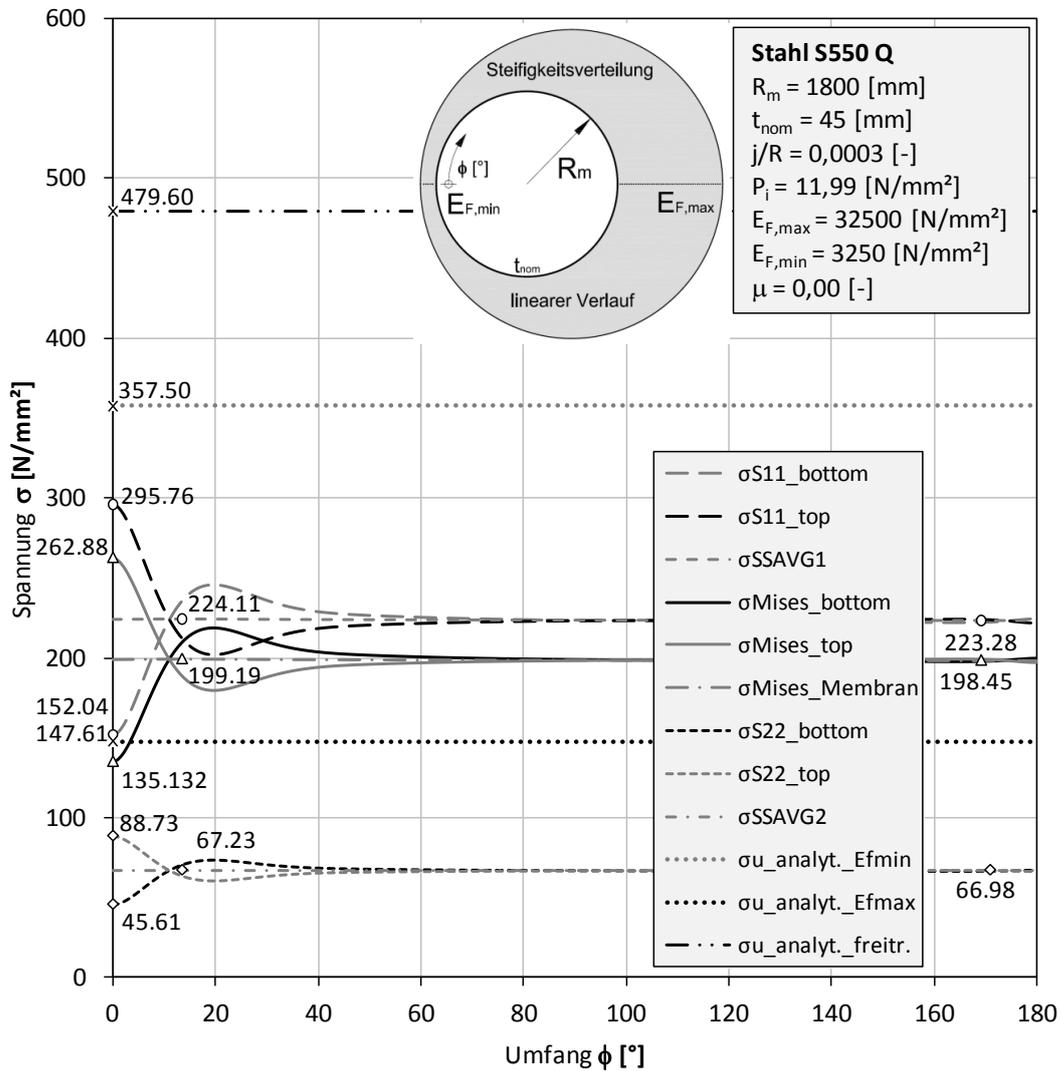


Abbildung 77A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue00

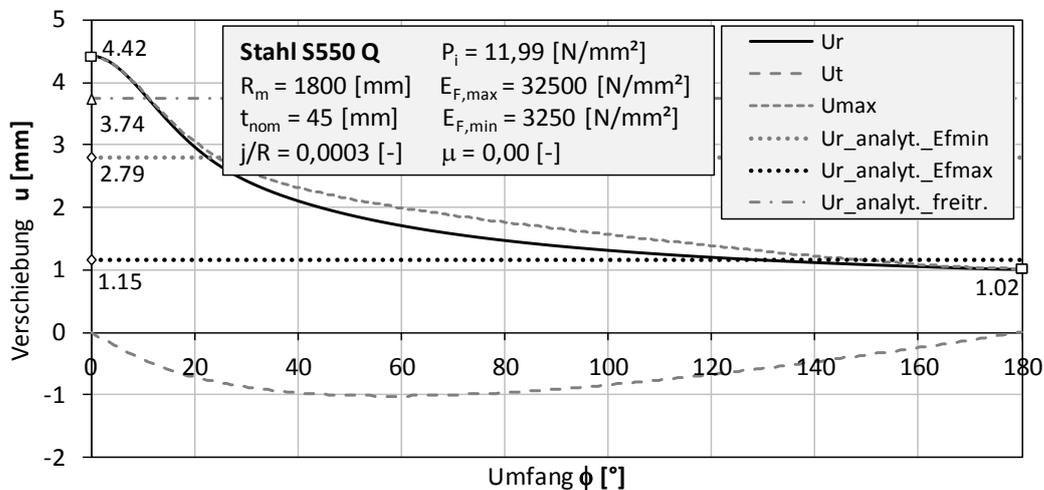


Abbildung 78A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.40 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue03

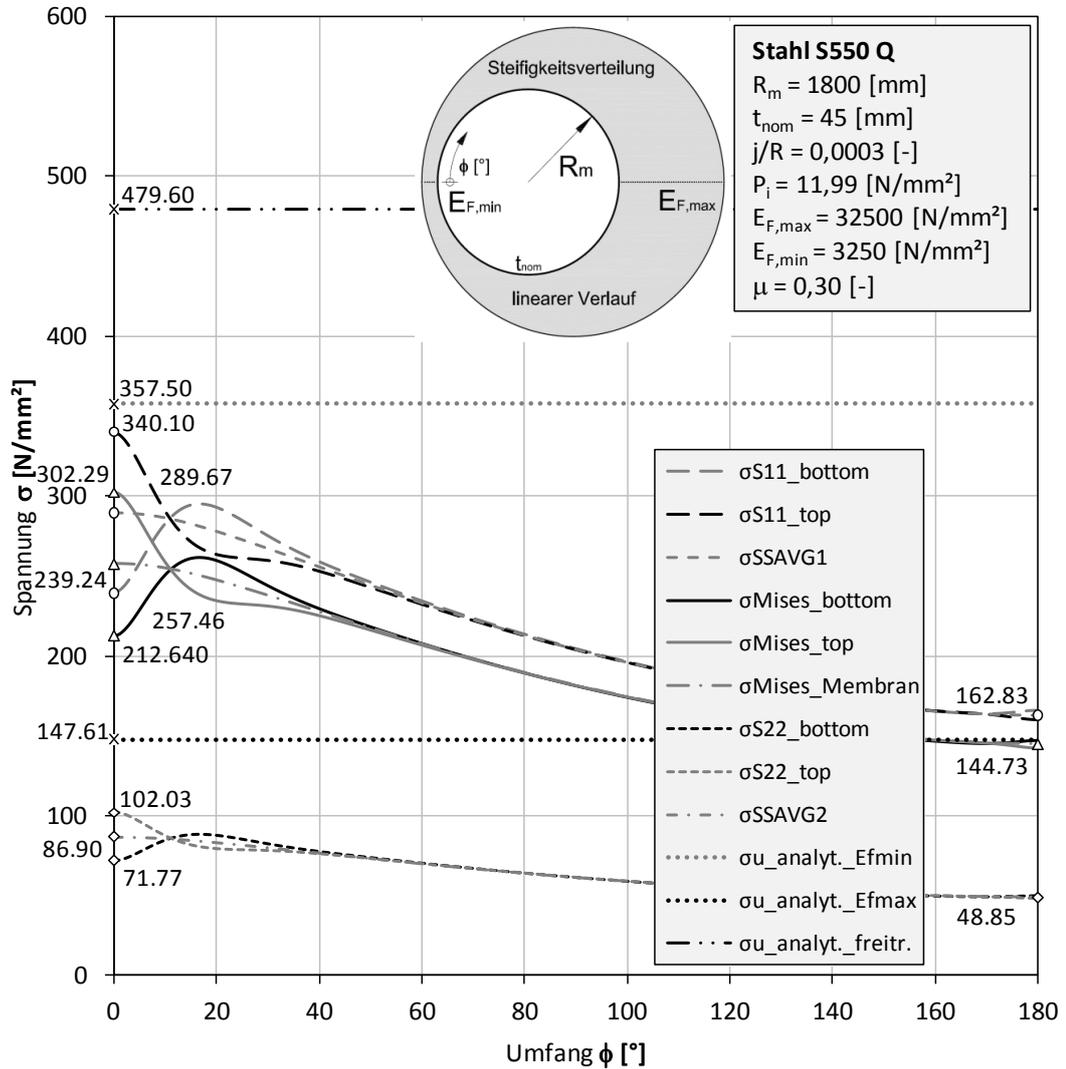


Abbildung 79A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue03

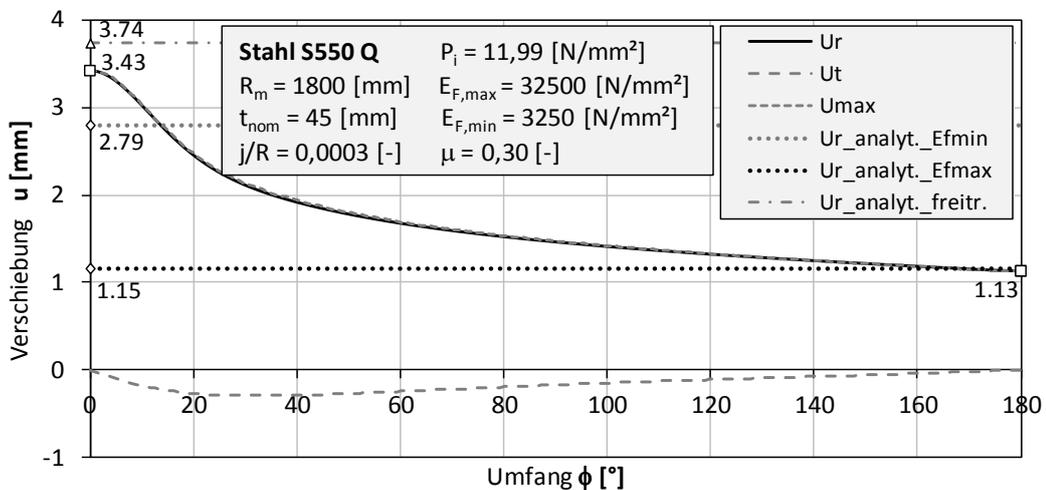


Abbildung 80A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.41 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue06

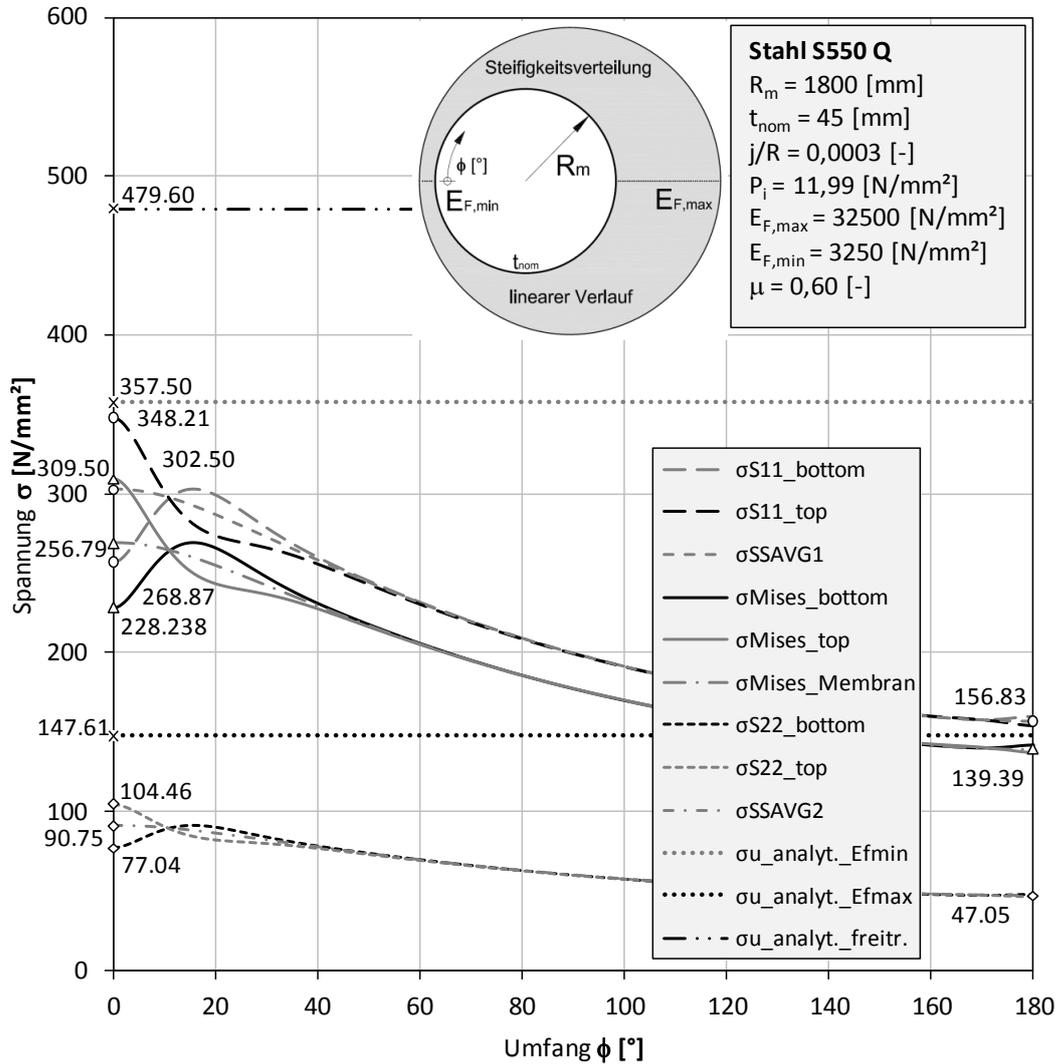


Abbildung 81A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue06

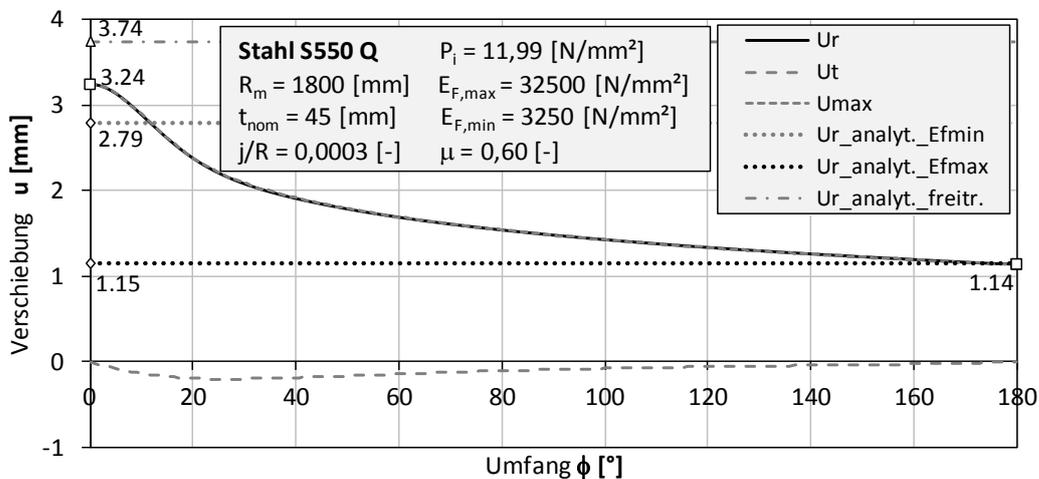


Abbildung 82A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1199\_EF3250\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.42 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

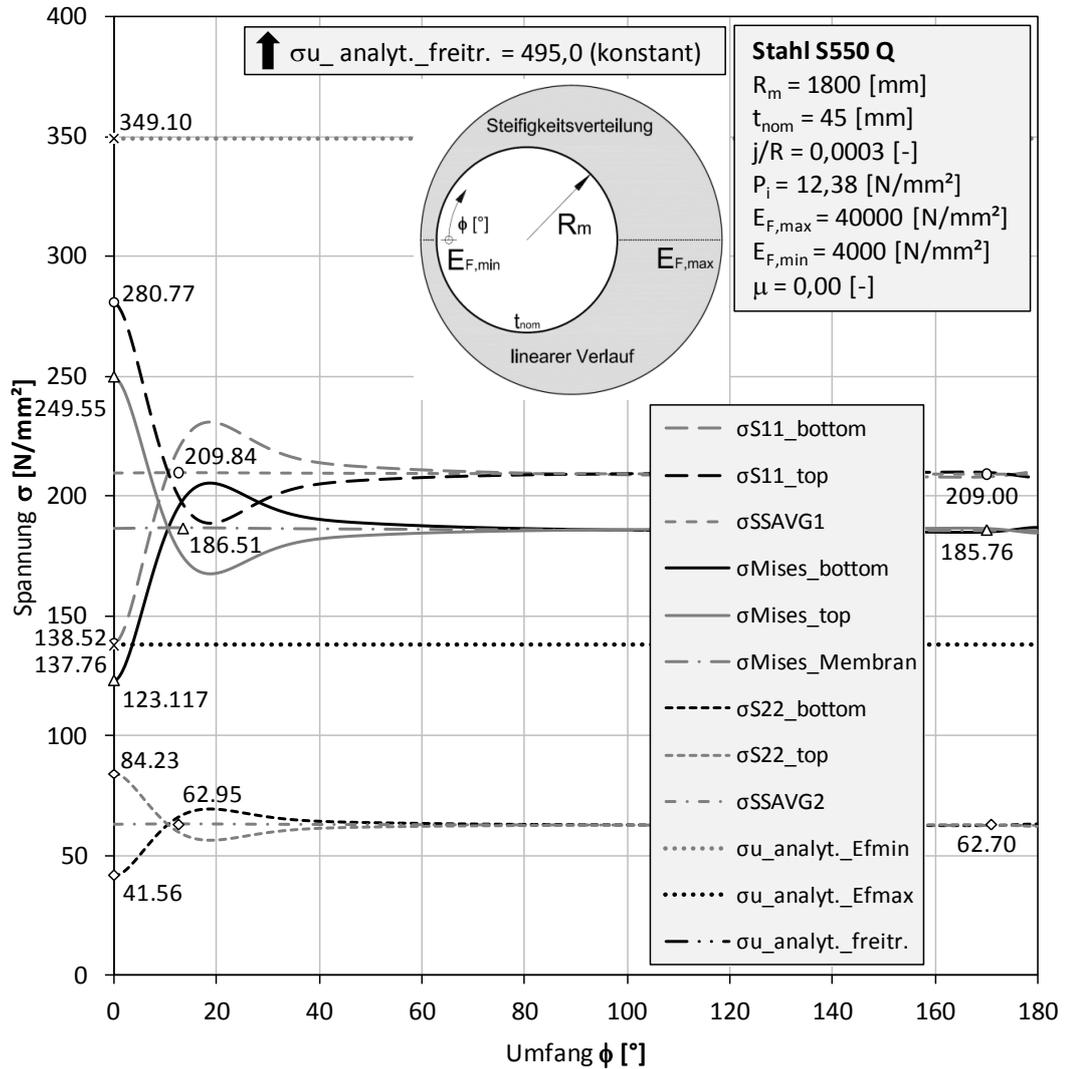


Abbildung 83A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

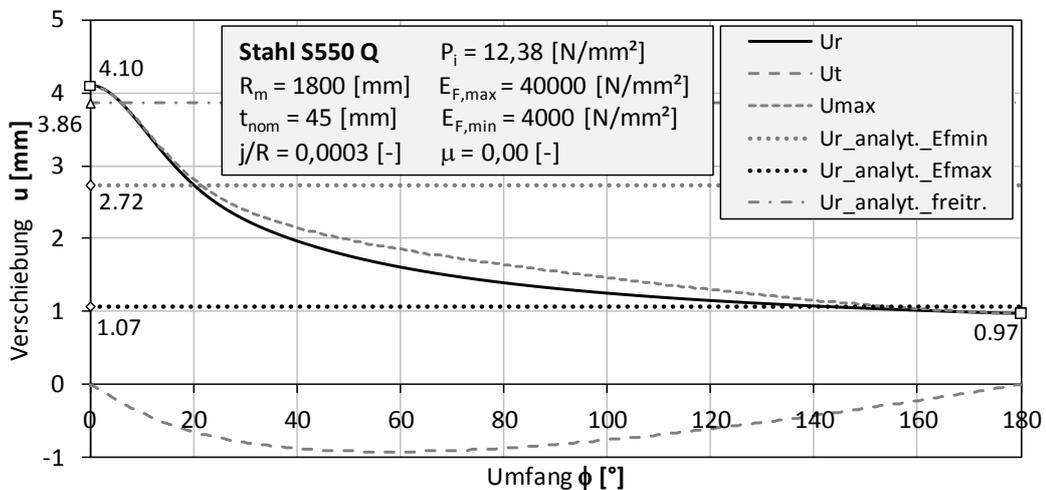


Abbildung 84A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.43 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

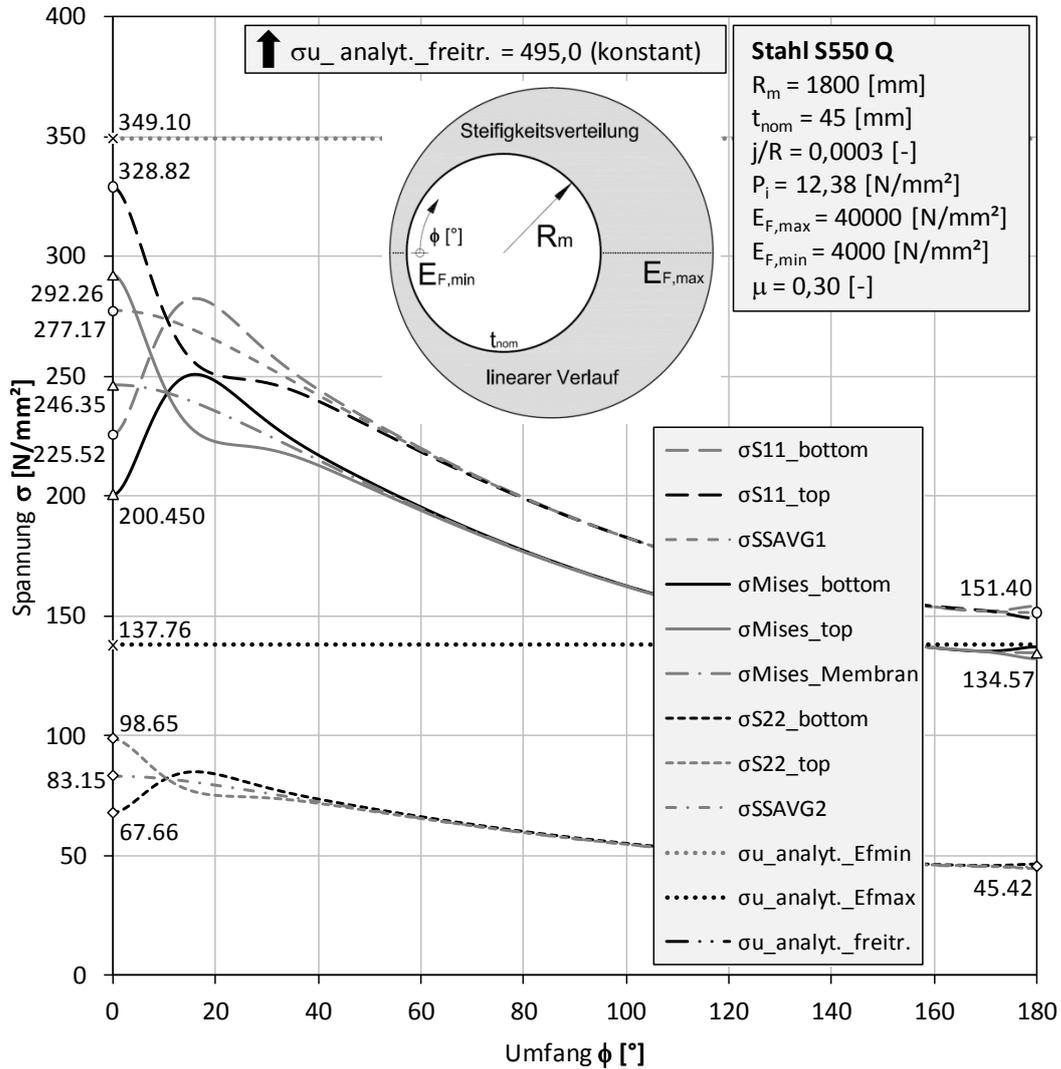


Abbildung 85A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

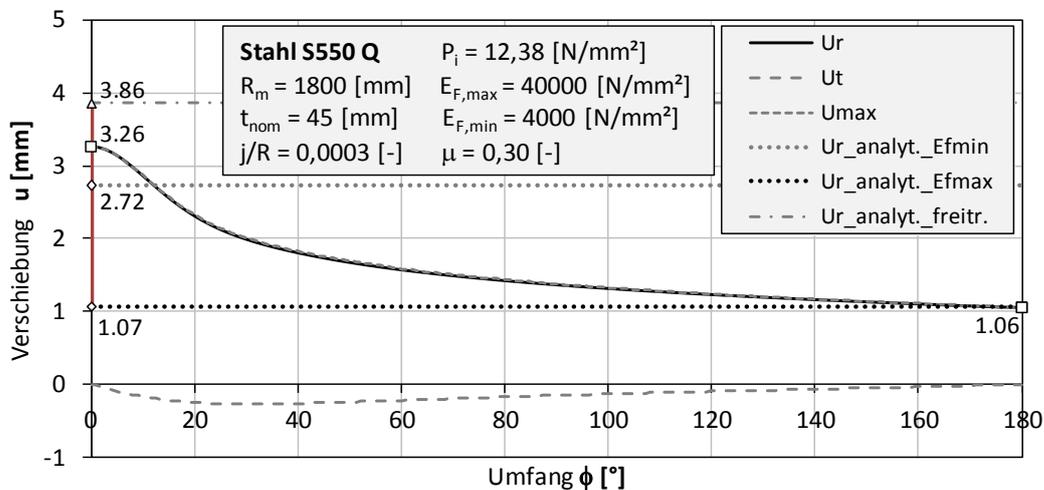


Abbildung 86A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.44 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

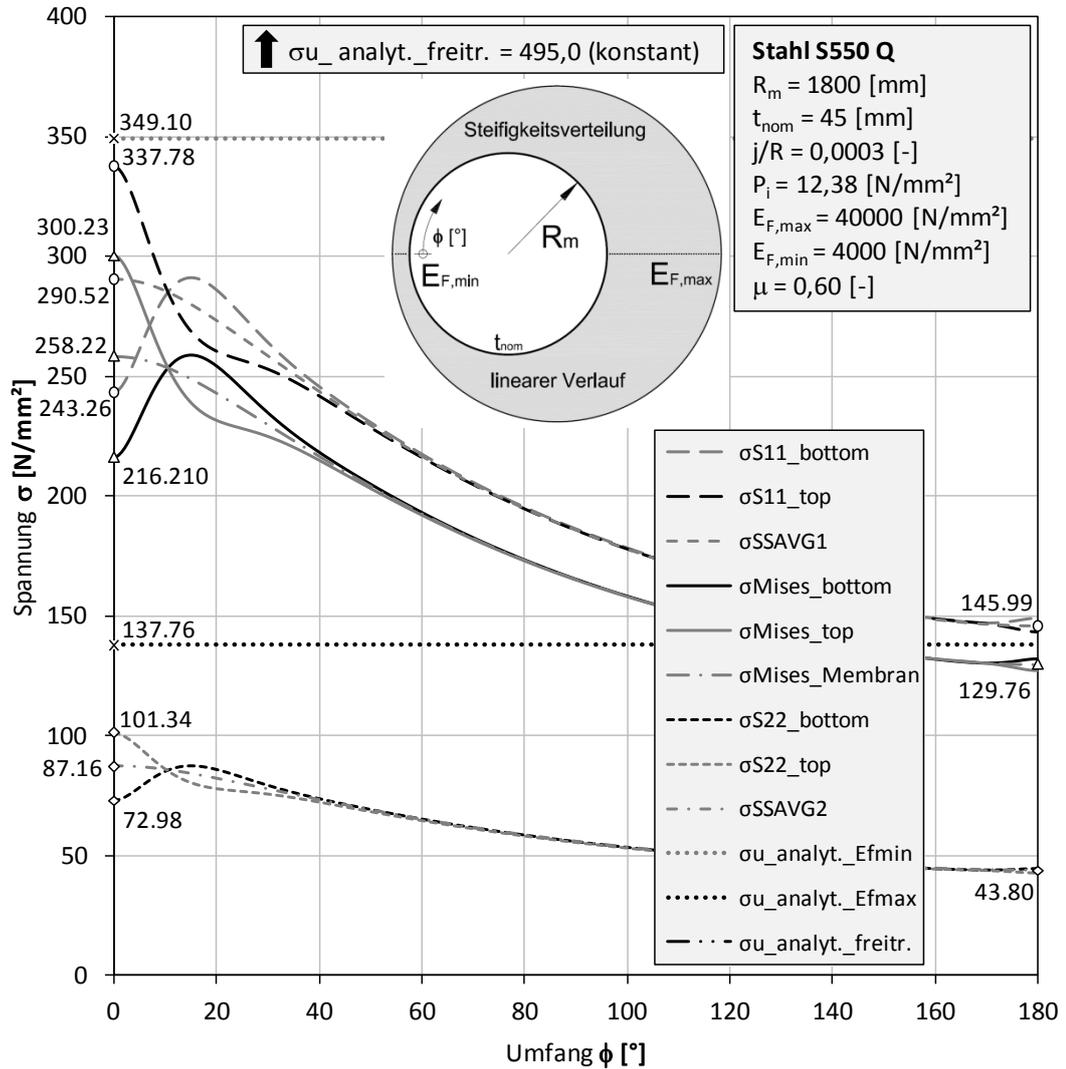


Abbildung 87A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

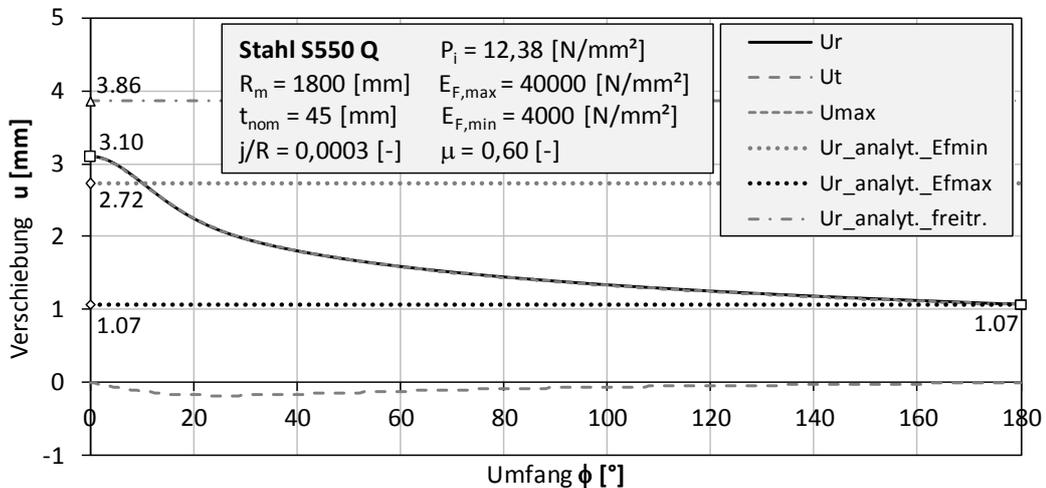


Abbildung 88A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF4000\_Linear\_10zu1\_mue06

11.1.1.45 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

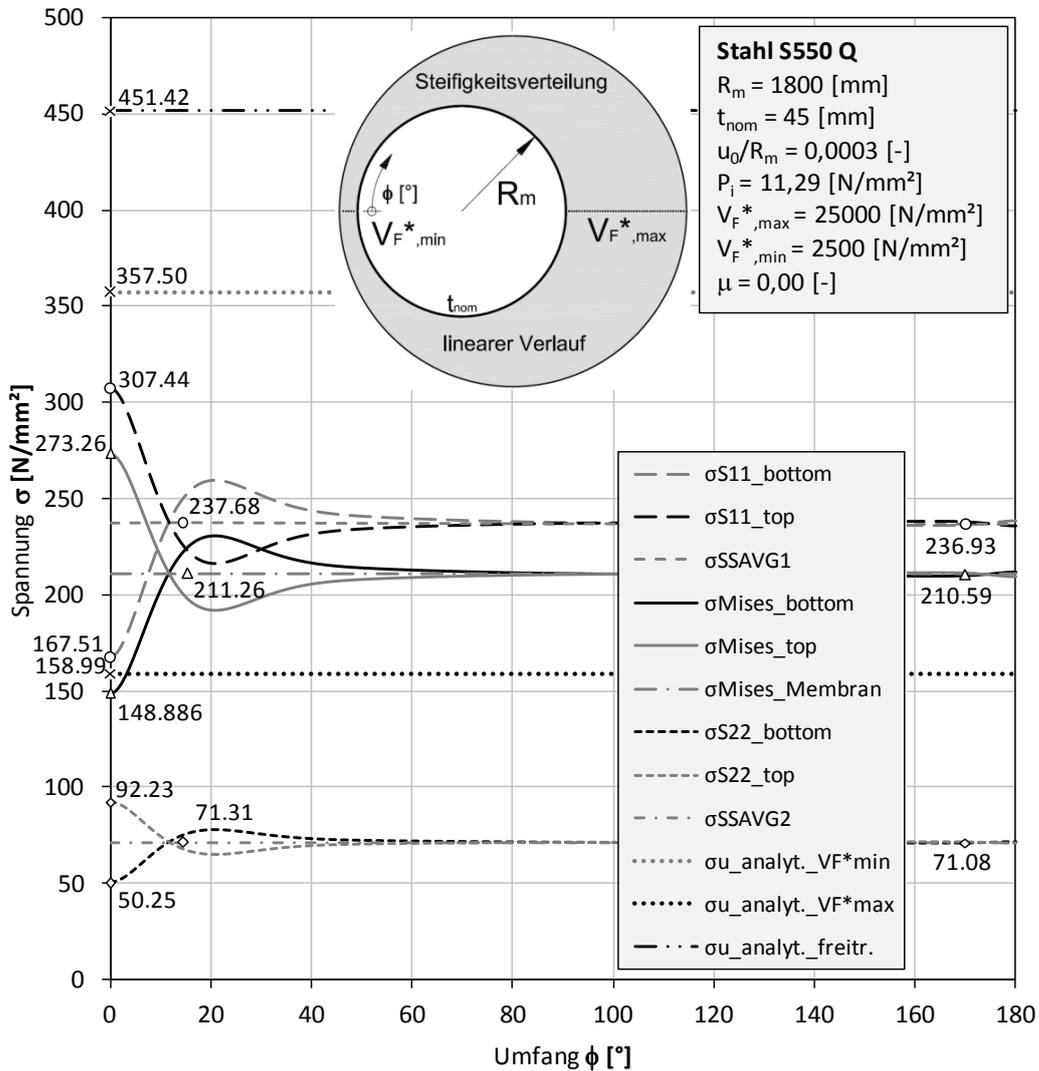


Abbildung 89A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

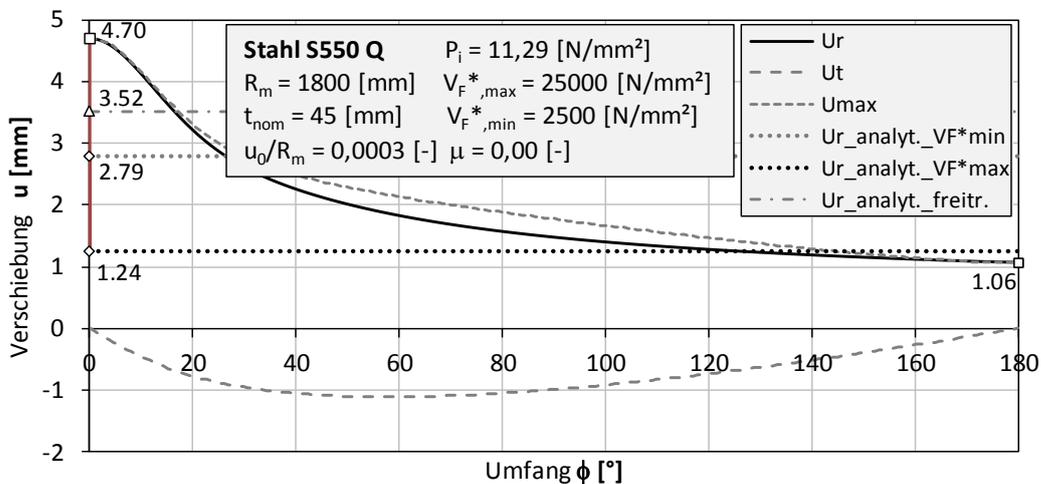


Abbildung 90A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue00

11.1.1.46 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

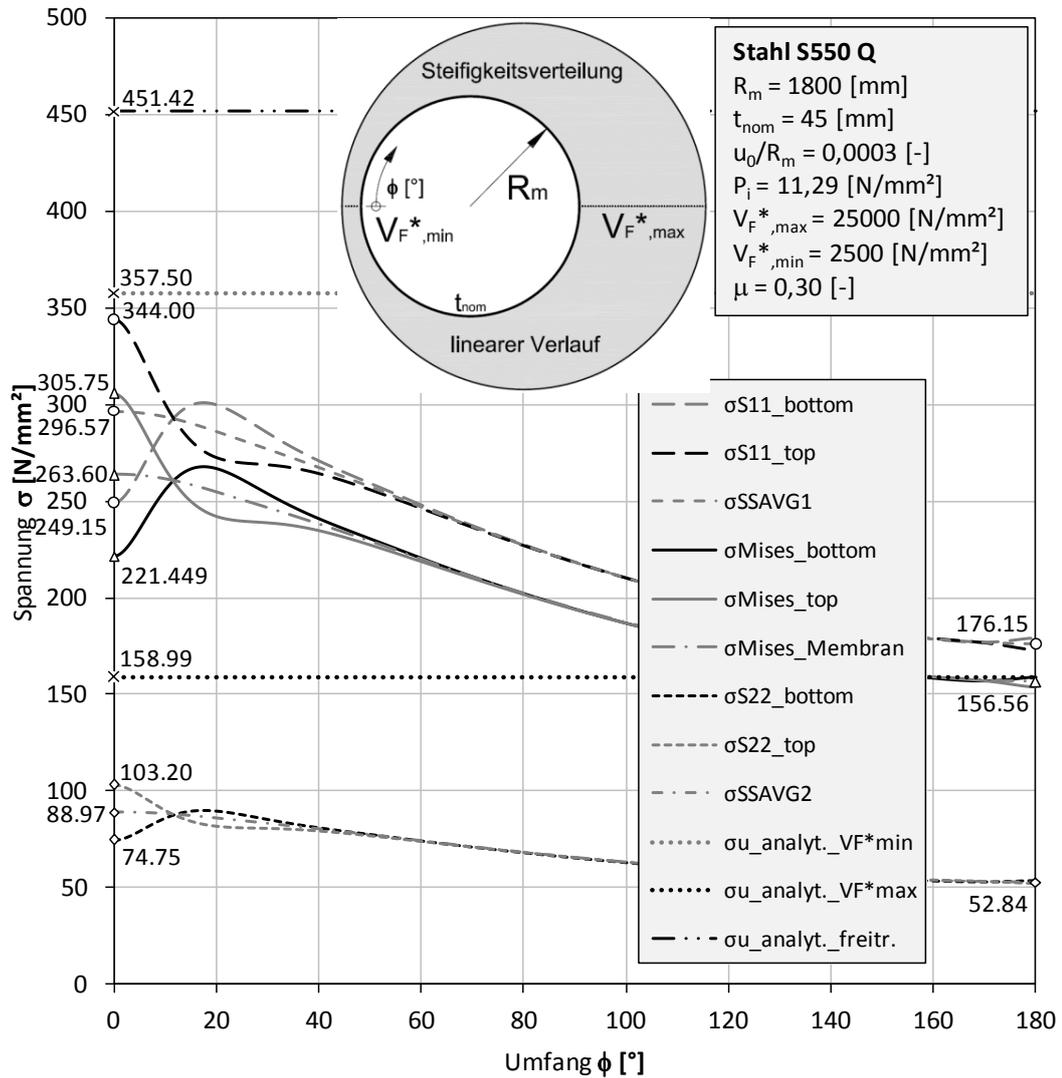


Abbildung 91A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

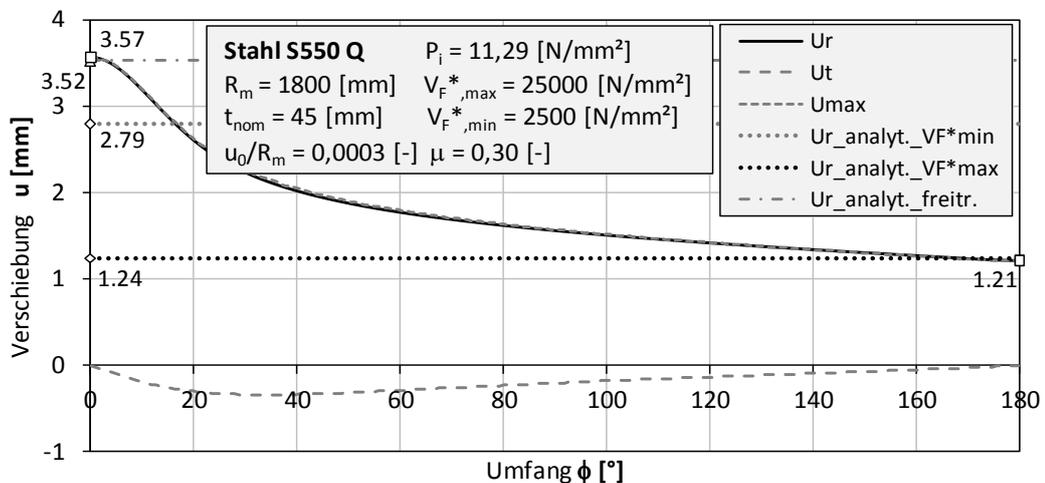


Abbildung 92A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue03

11.1.1.47 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

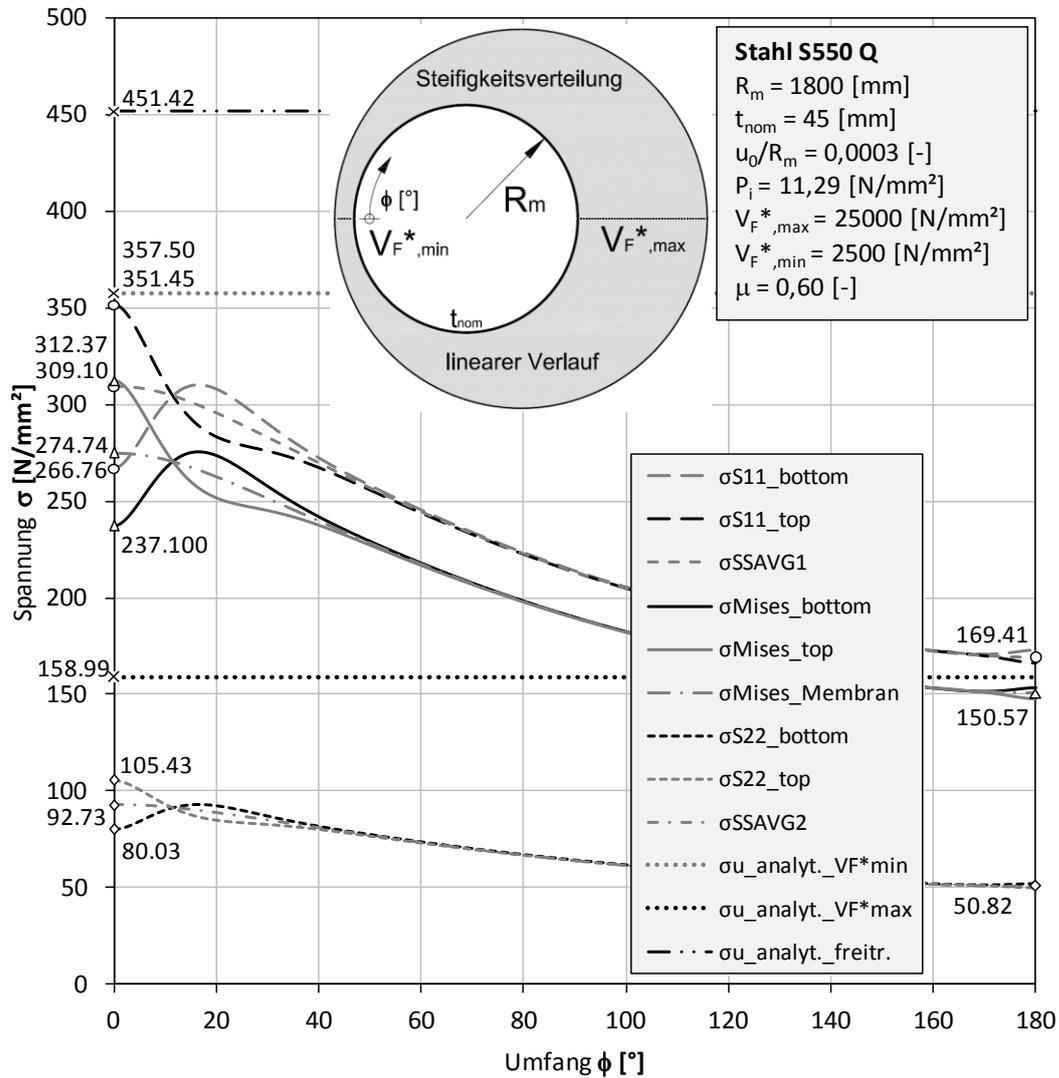


Abbildung 93A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

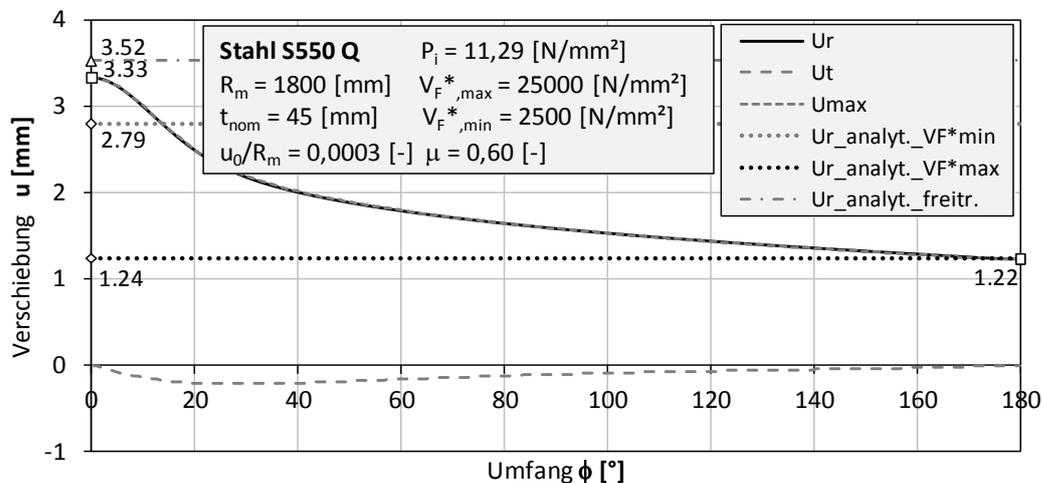


Abbildung 94A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P1129\_VF2500\_Linear\_10zu1\_mue06

### 11.1.2 Fall: lokaler Sprung

#### 11.1.2.1 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

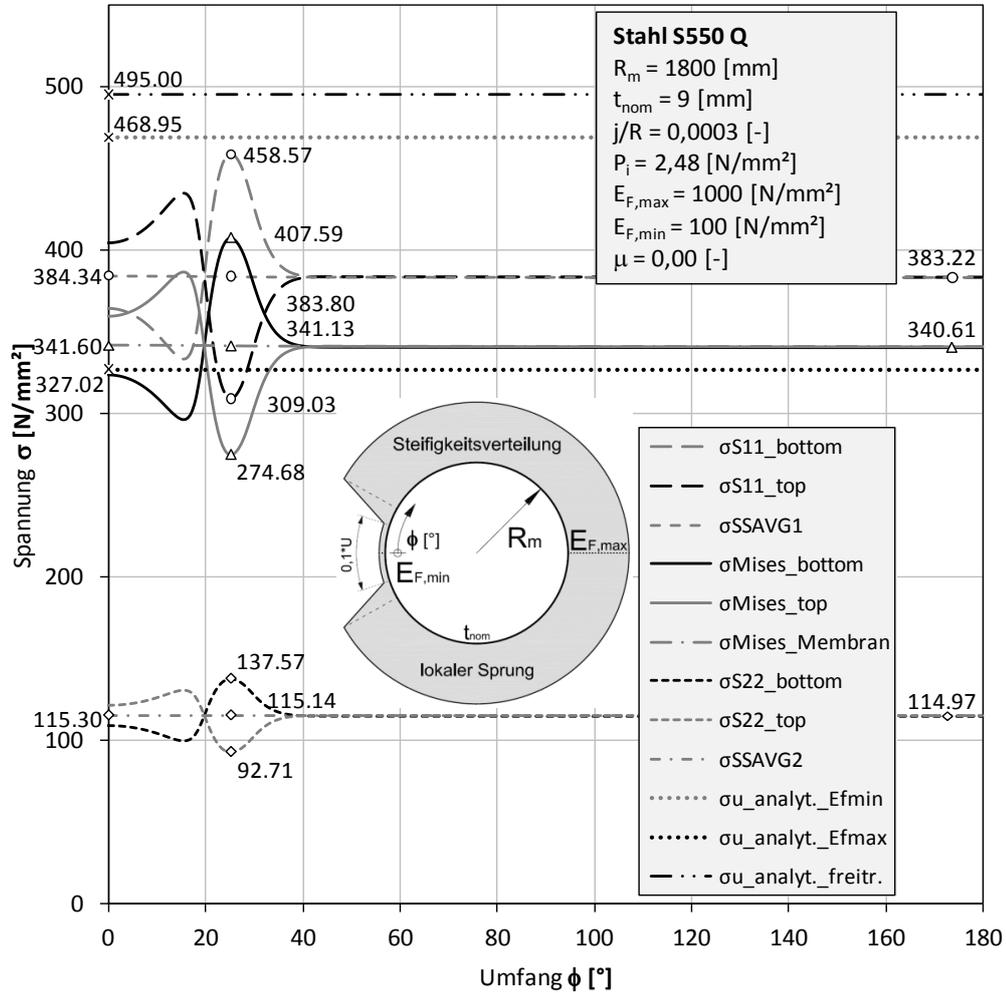


Abbildung 95A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

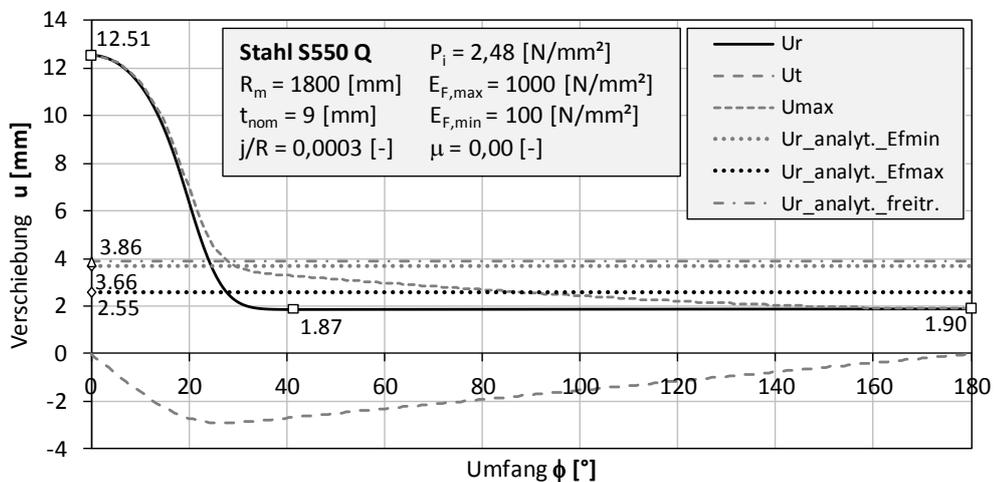


Abbildung 96A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.2 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

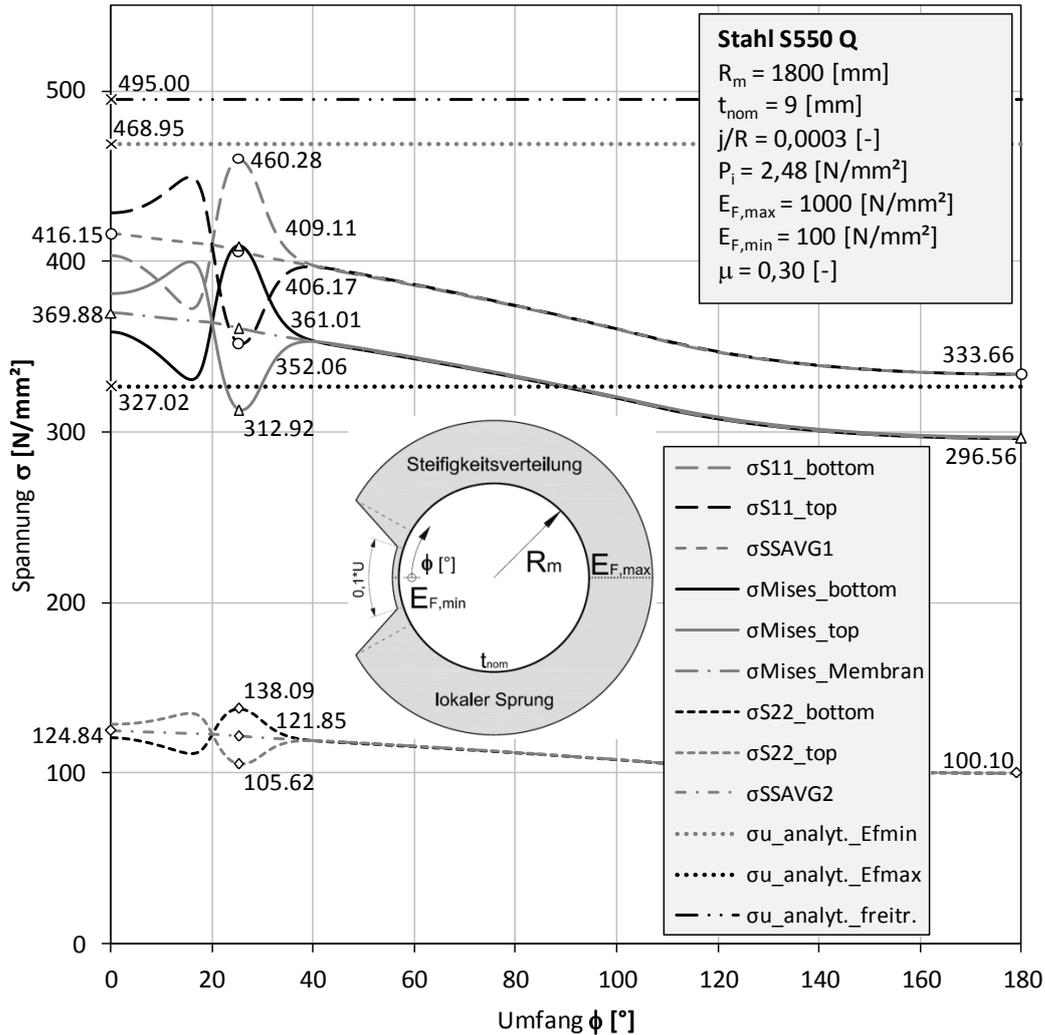


Abbildung 97A: Spannungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

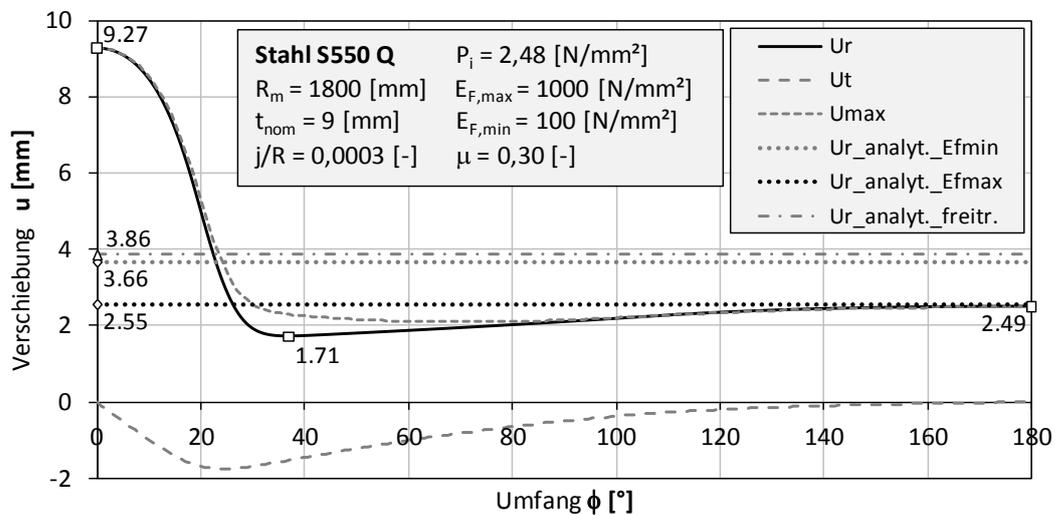


Abbildung 98A: Verschiebungen  
 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.3 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

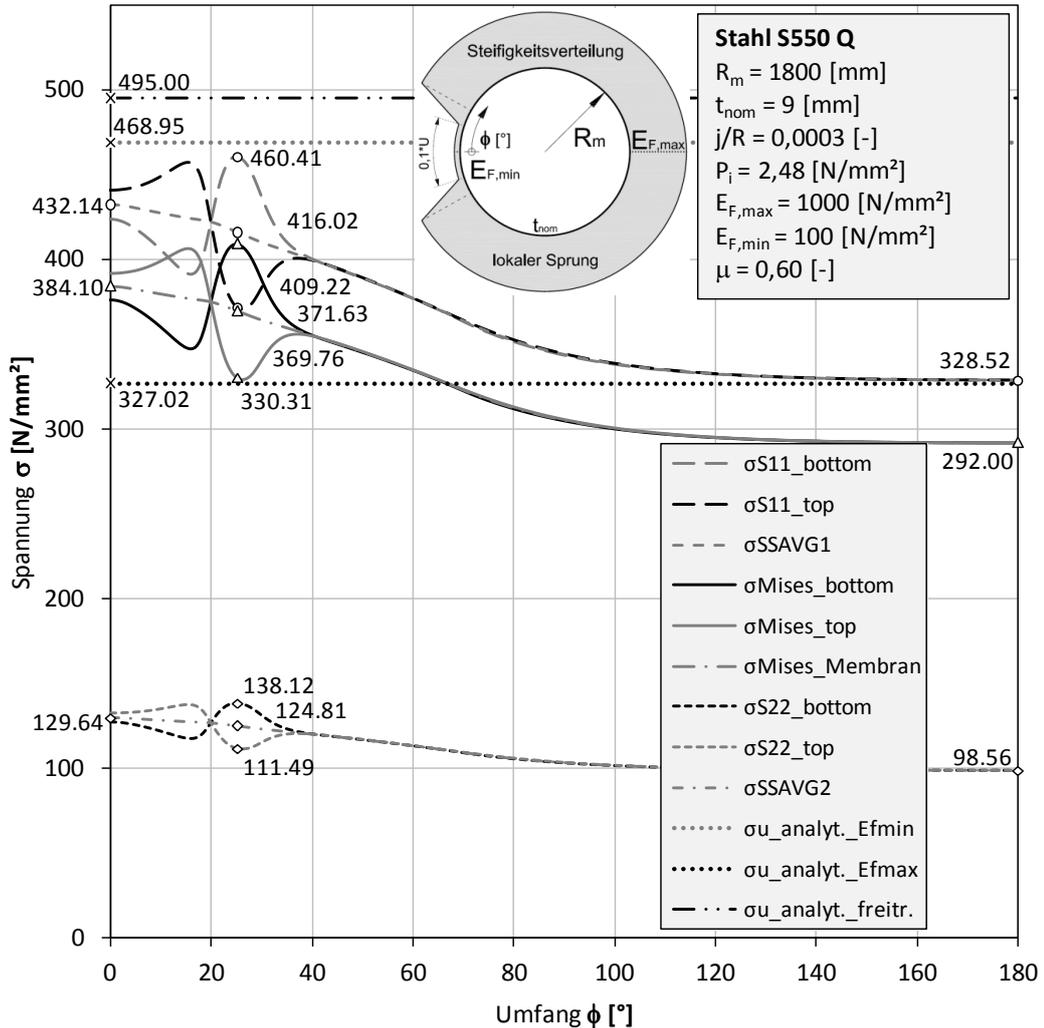


Abbildung 99A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

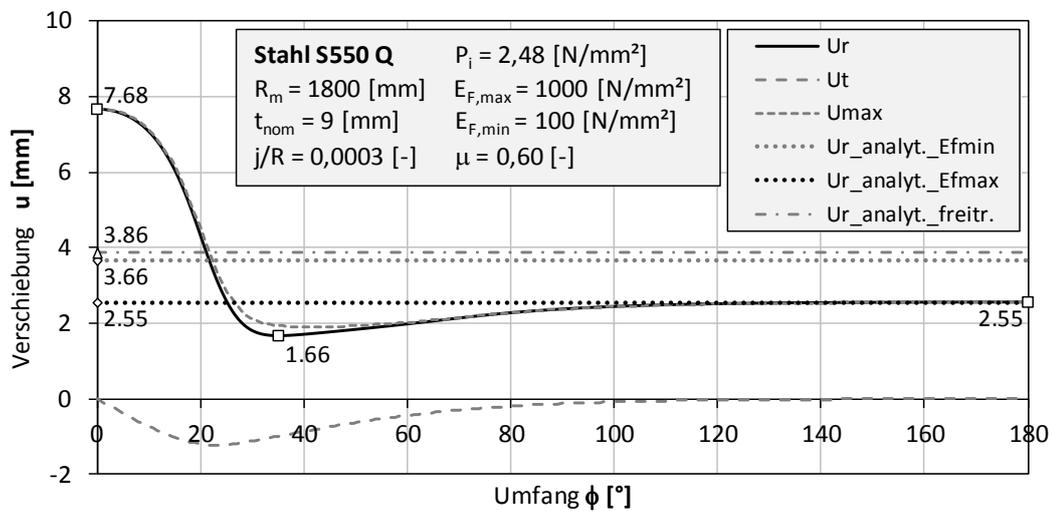


Abbildung 100A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.4 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

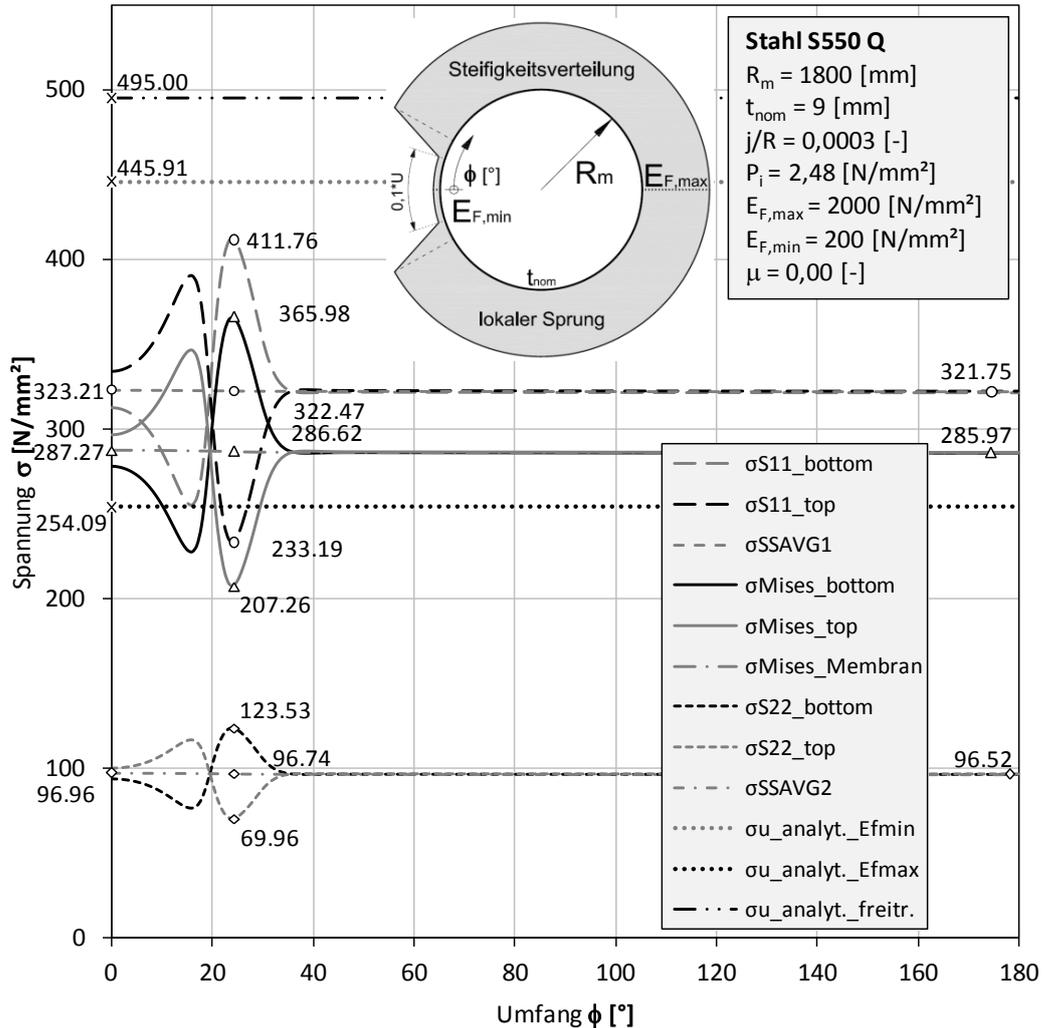


Abbildung 101A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

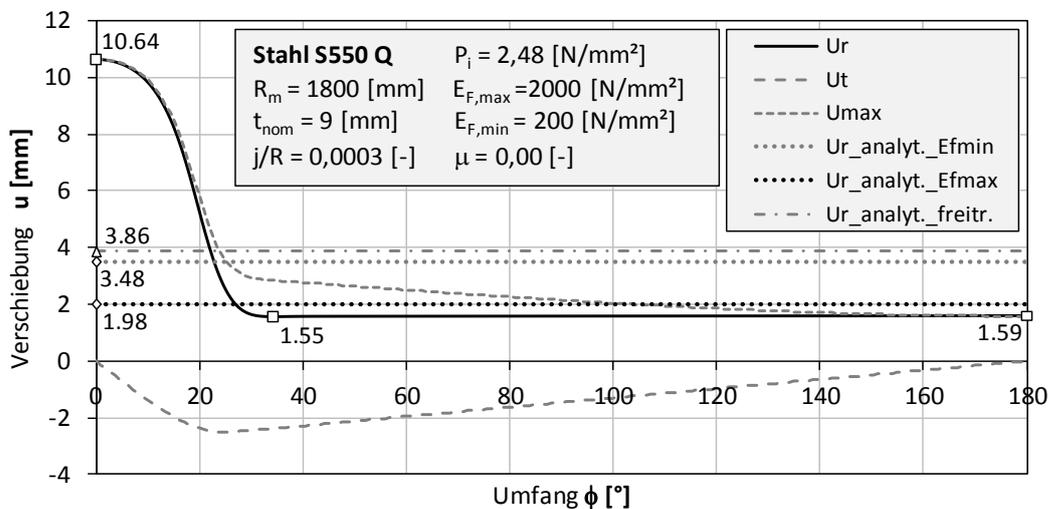


Abbildung 102A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.5 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

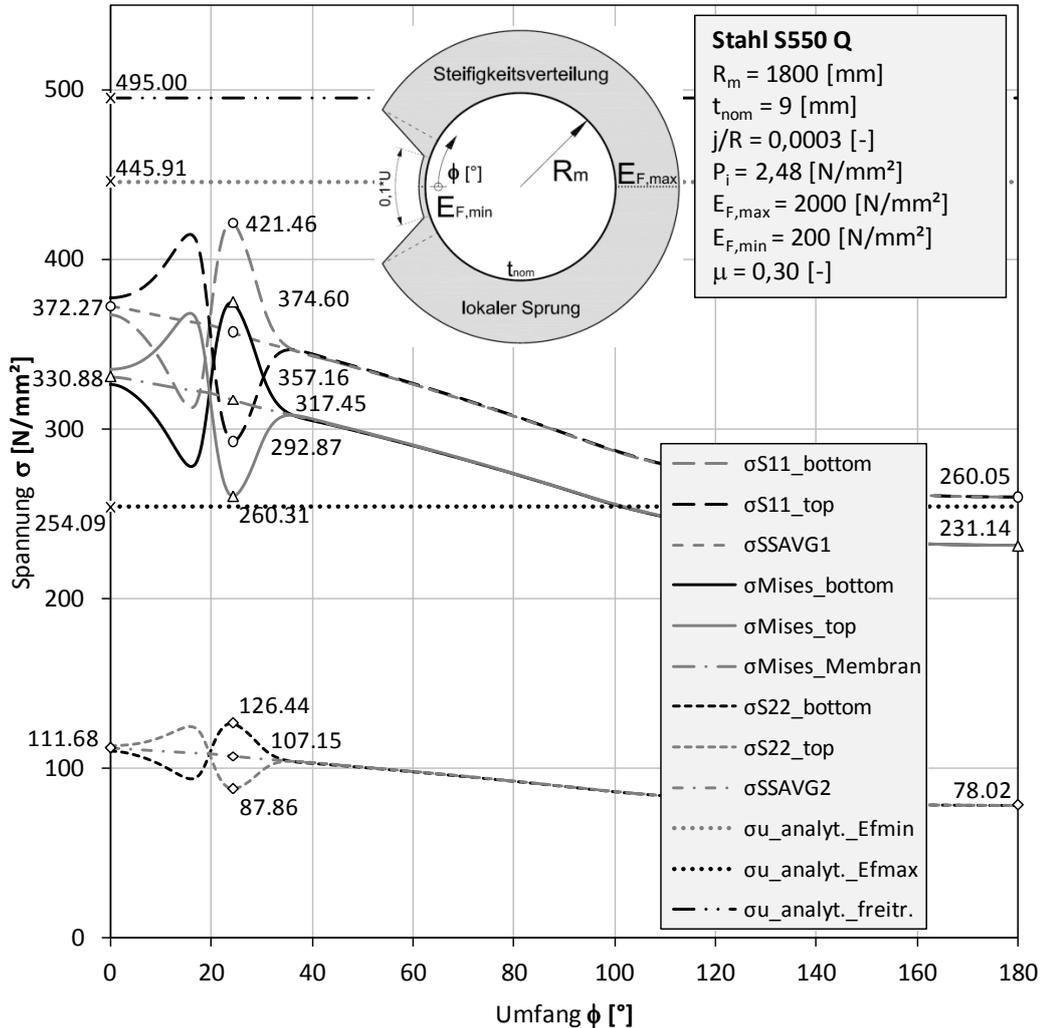


Abbildung 103A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

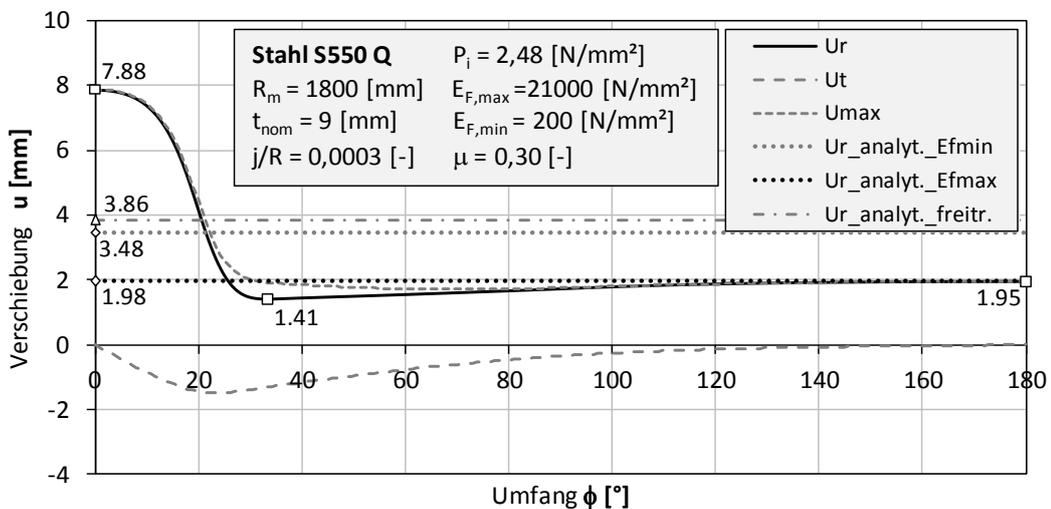


Abbildung 104A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.6 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

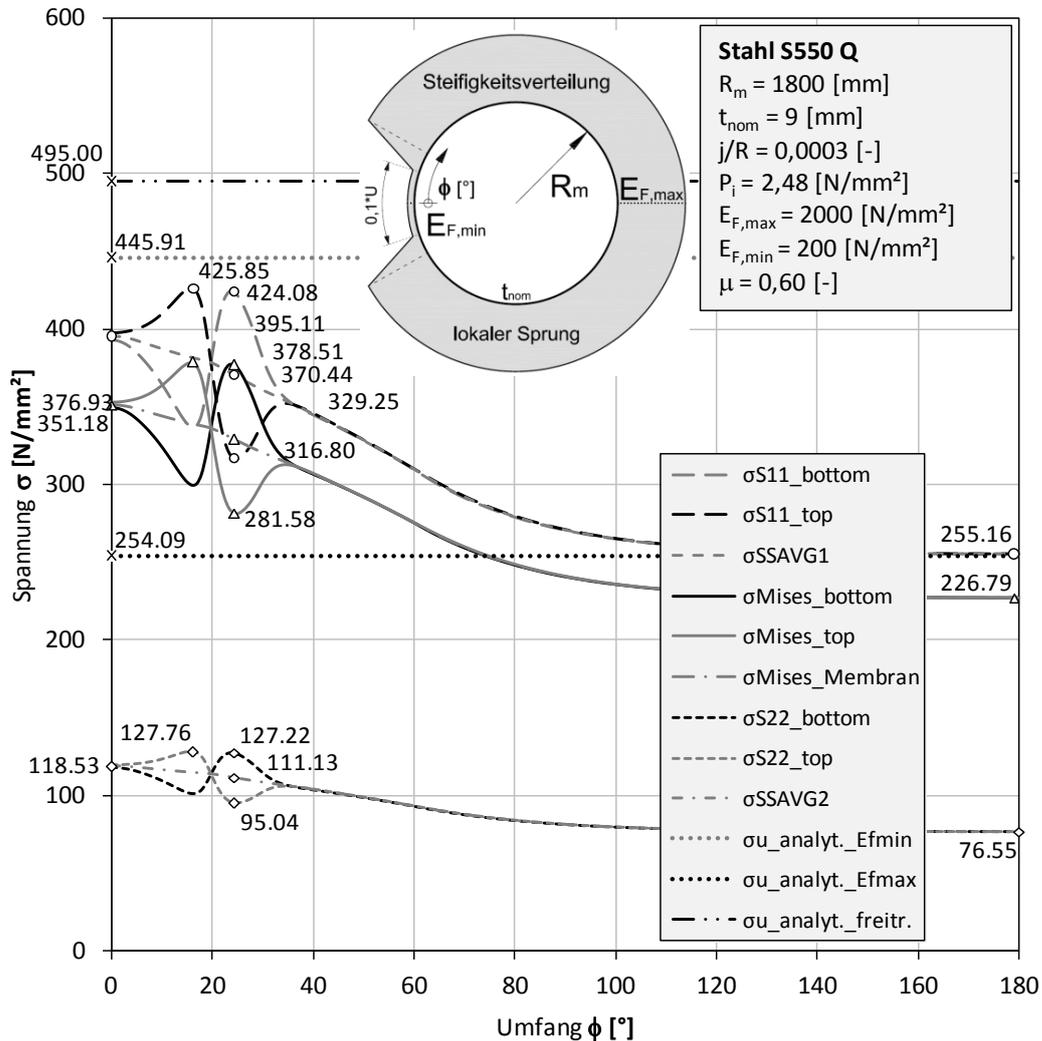


Abbildung 105A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

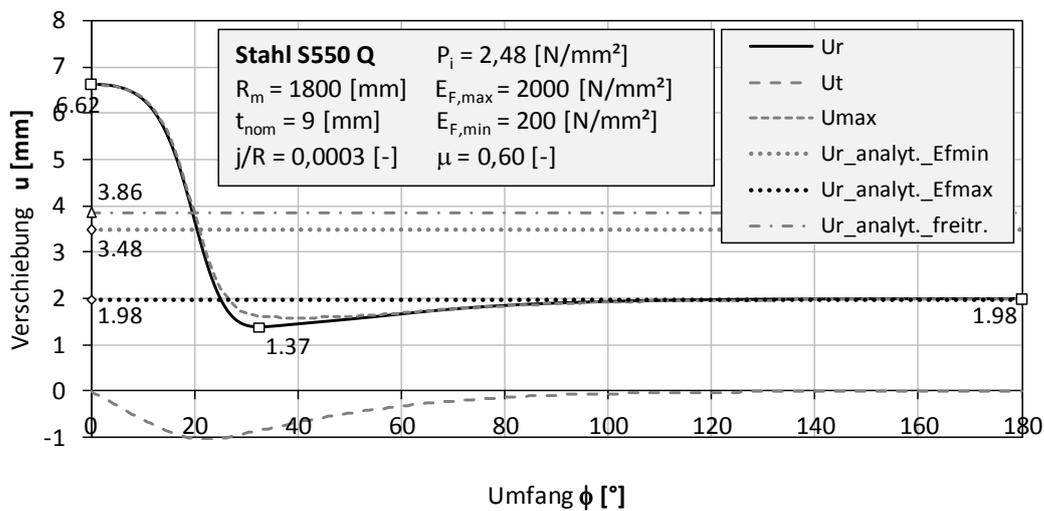


Abbildung 106A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF2000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.7 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

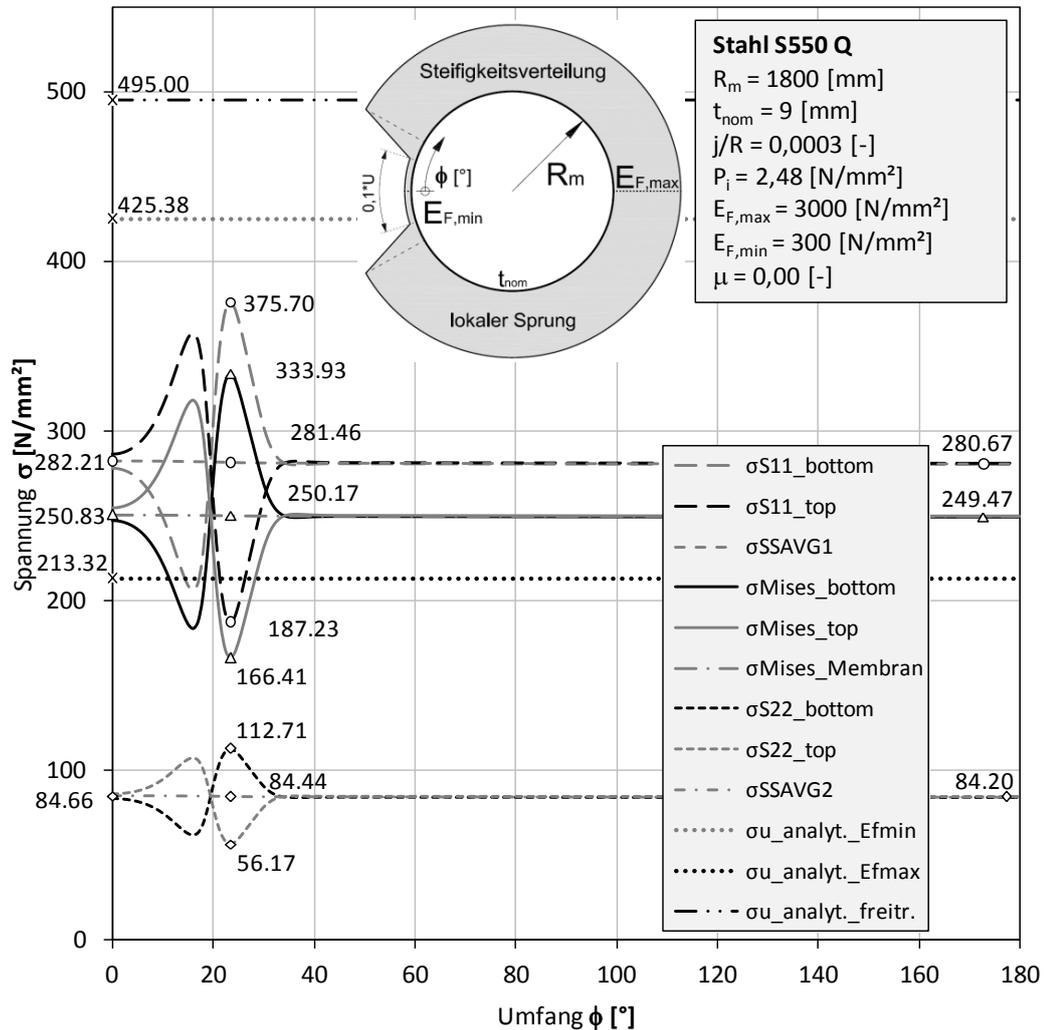


Abbildung 107A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

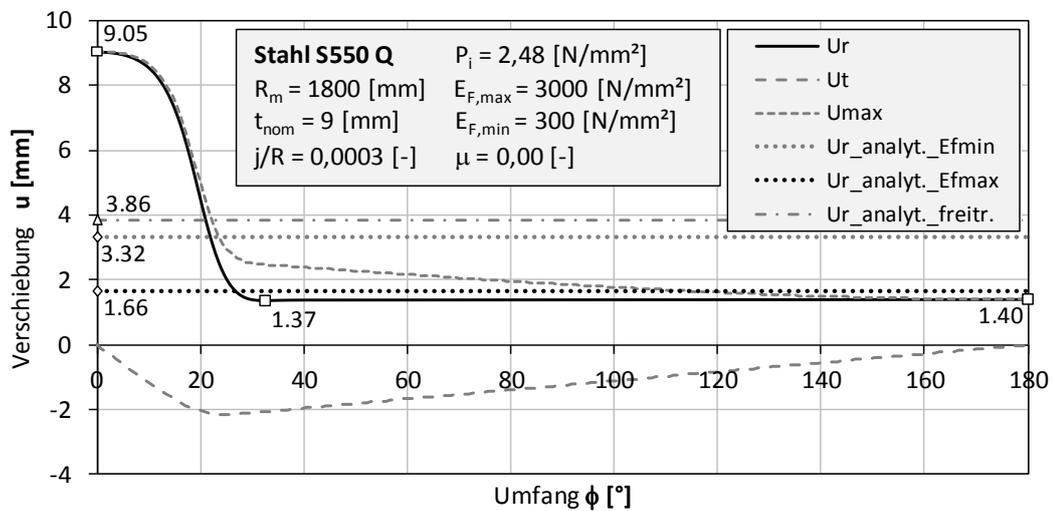


Abbildung 108A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.8 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

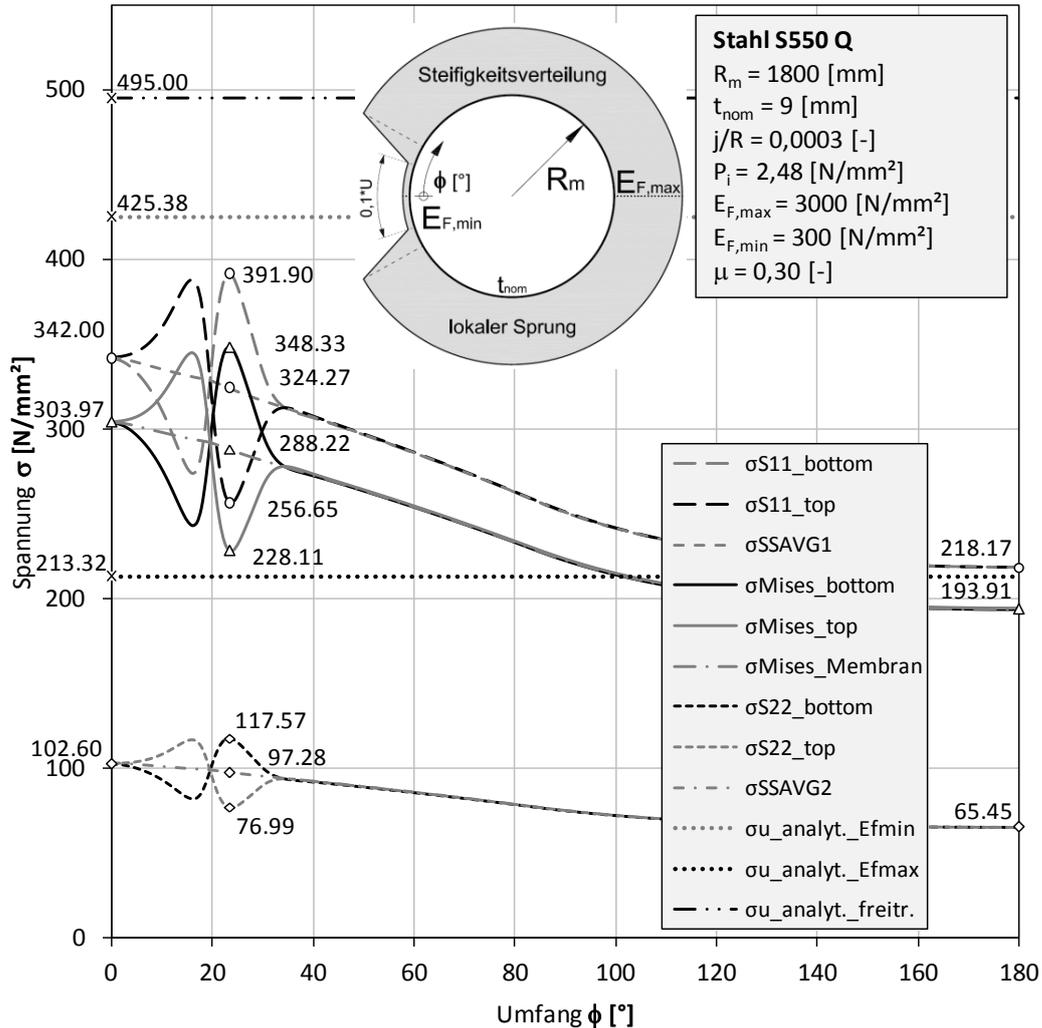


Abbildung 109A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

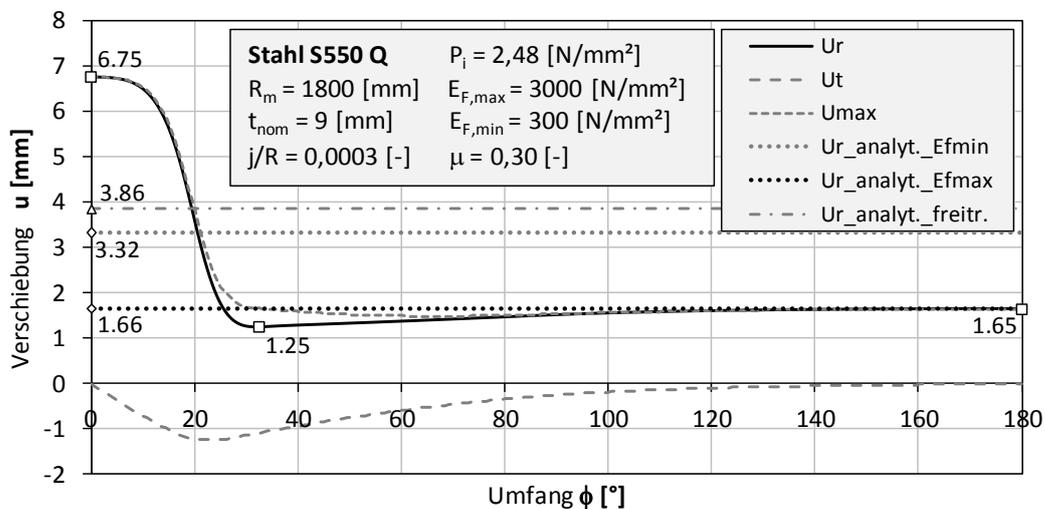


Abbildung 110A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.9 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

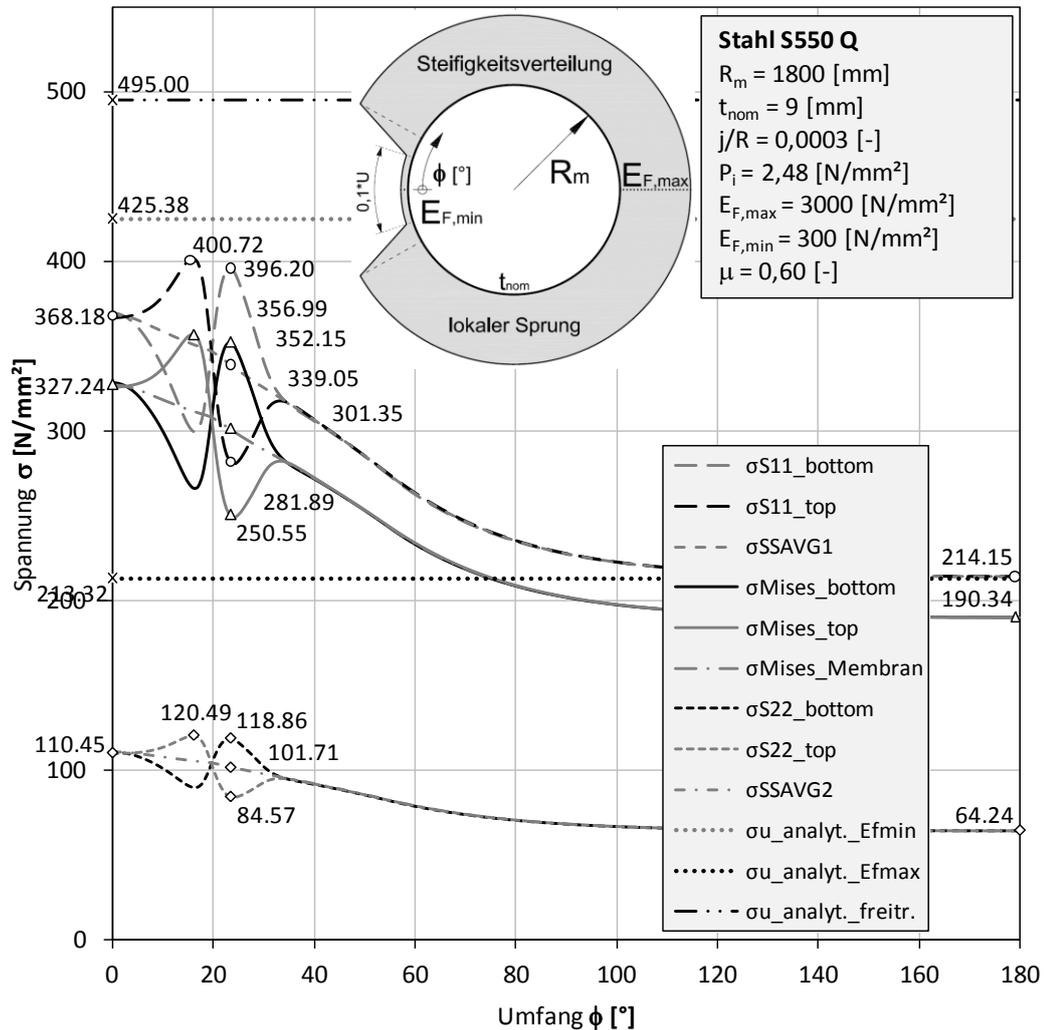


Abbildung 111A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

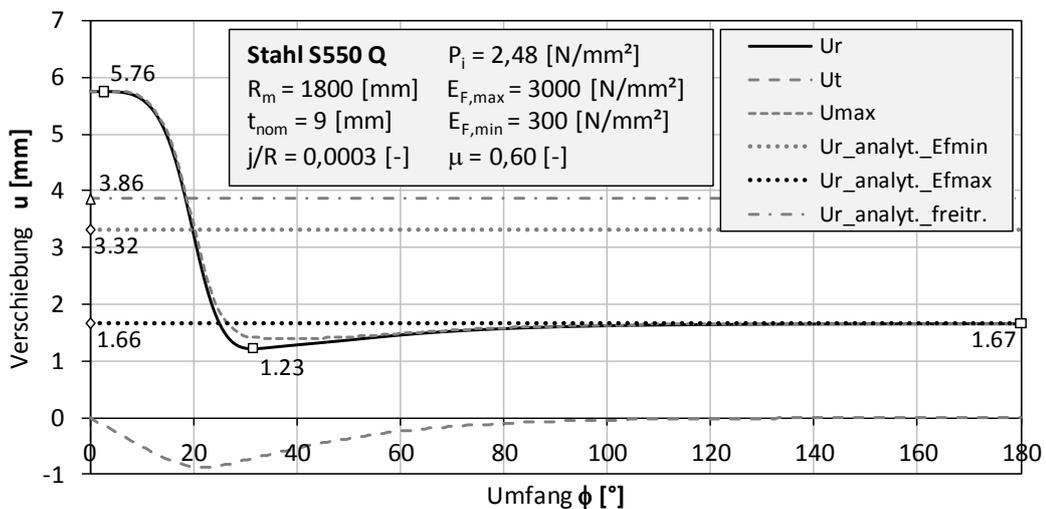


Abbildung 112A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF3000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.10 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

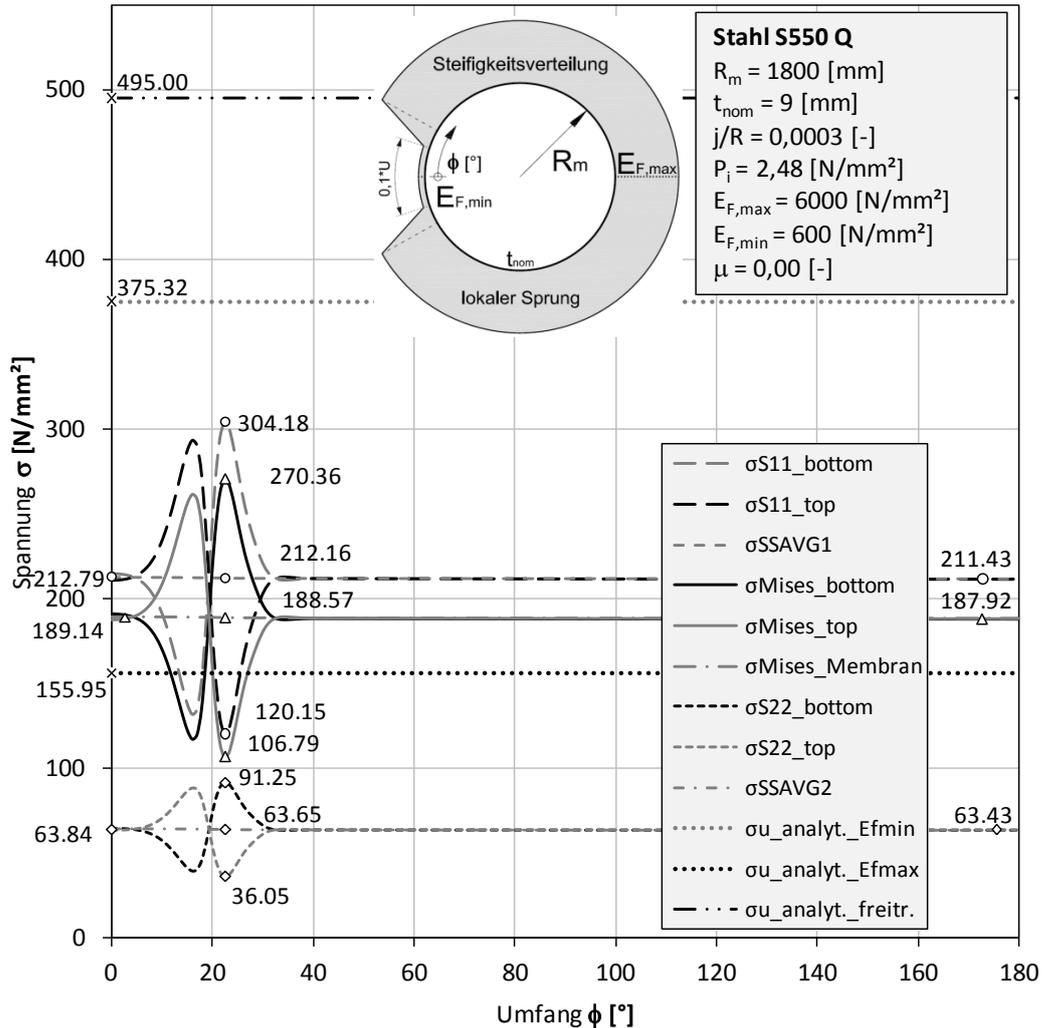


Abbildung 113A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

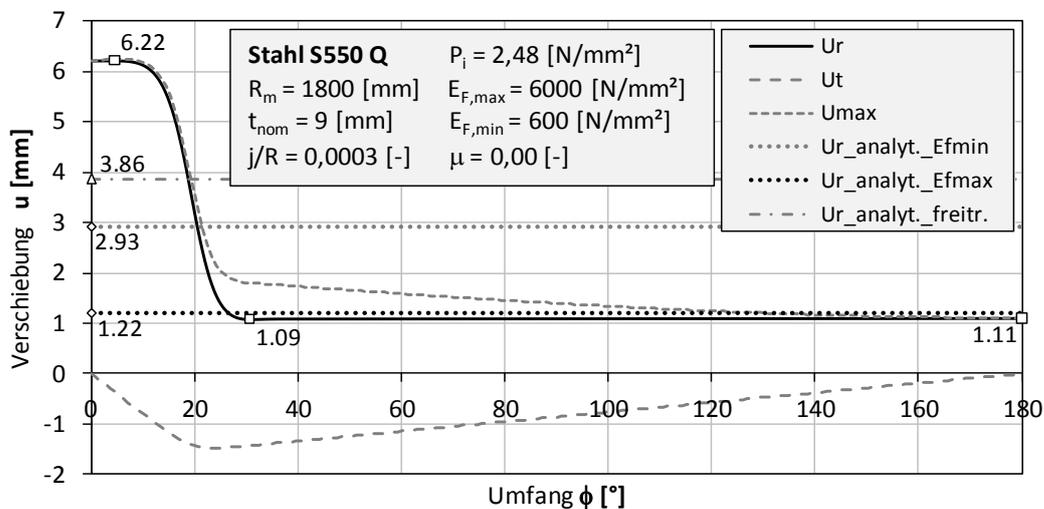


Abbildung 114A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.11 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

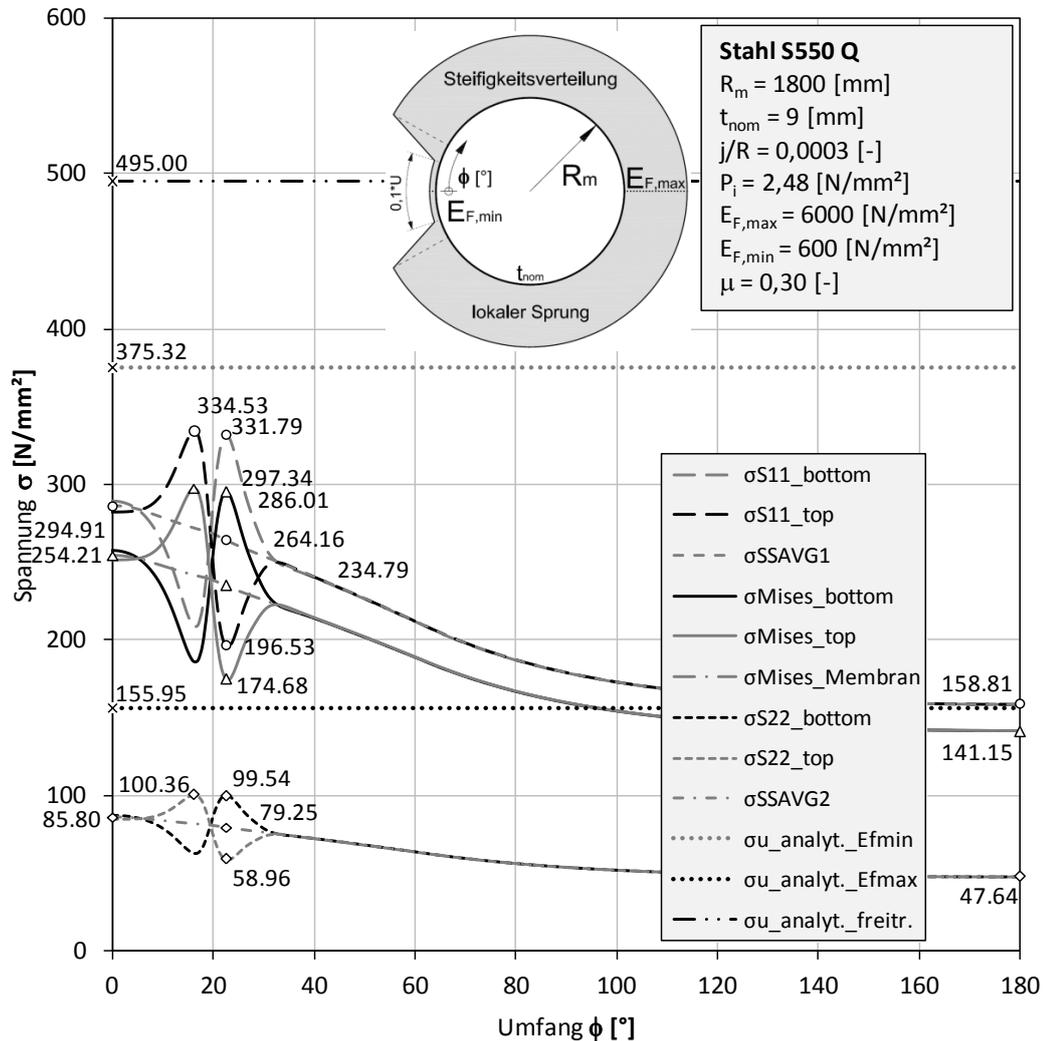


Abbildung 115A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

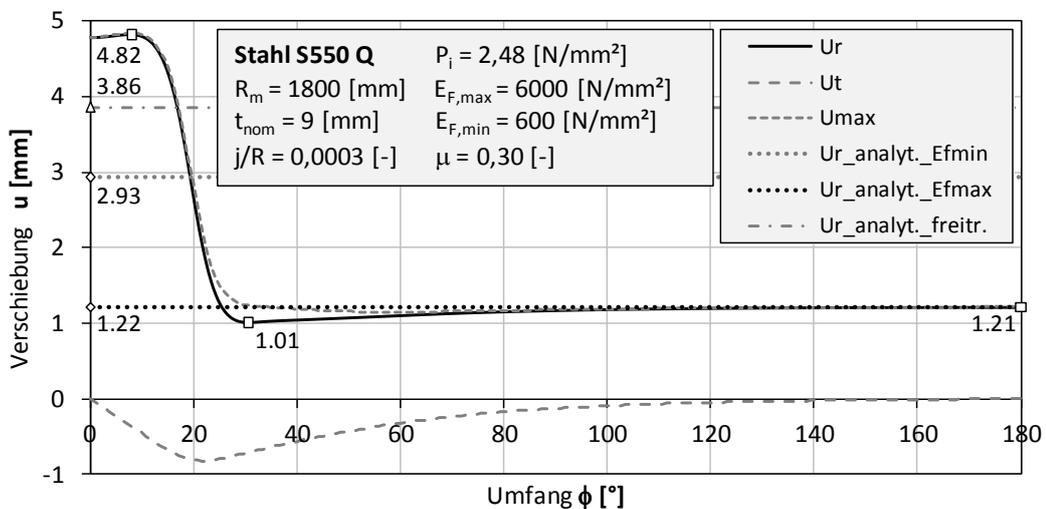


Abbildung 116A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.12 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

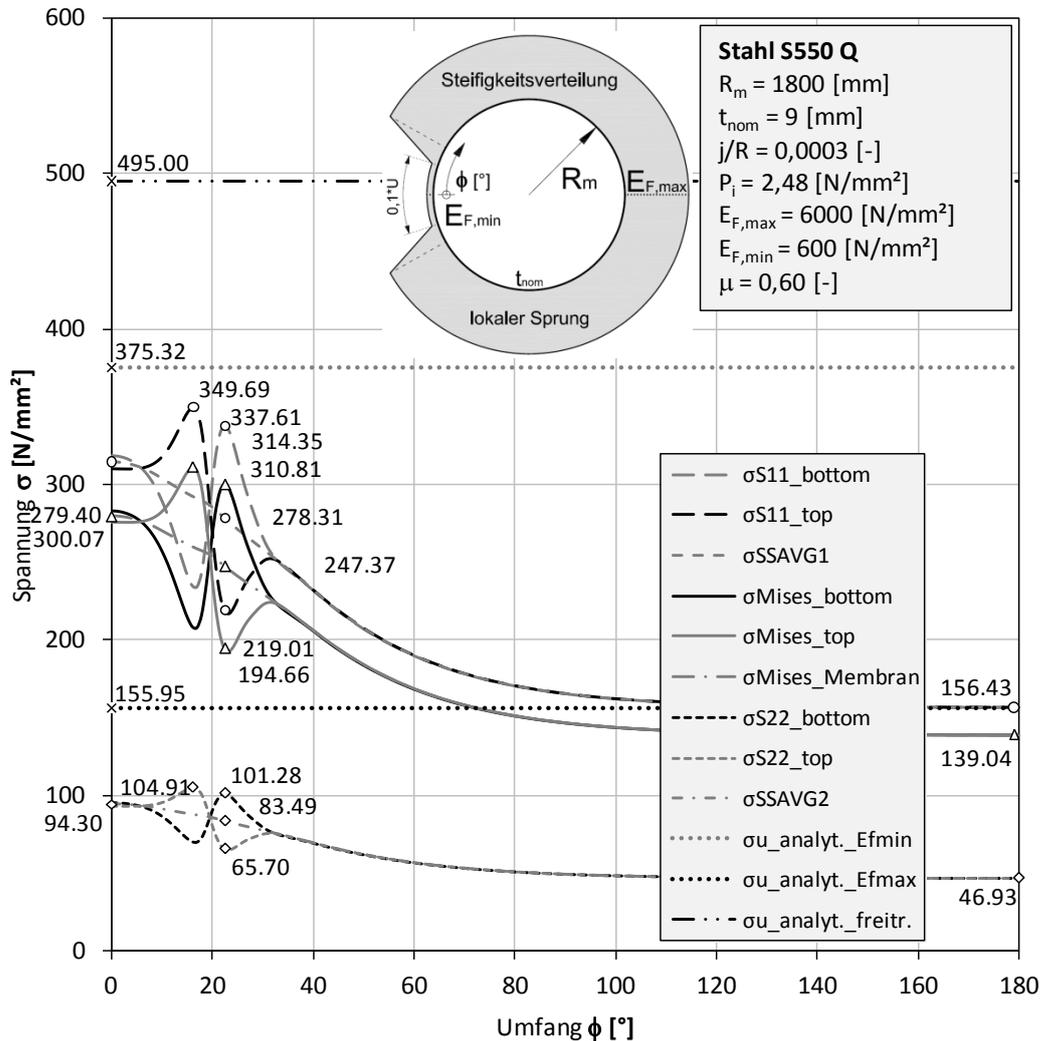


Abbildung 117A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

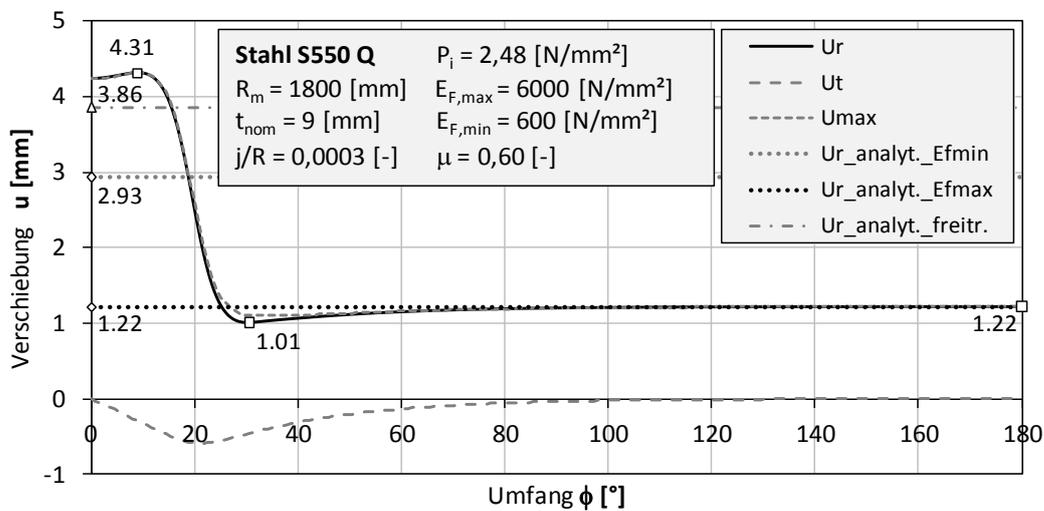


Abbildung 118A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.13 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

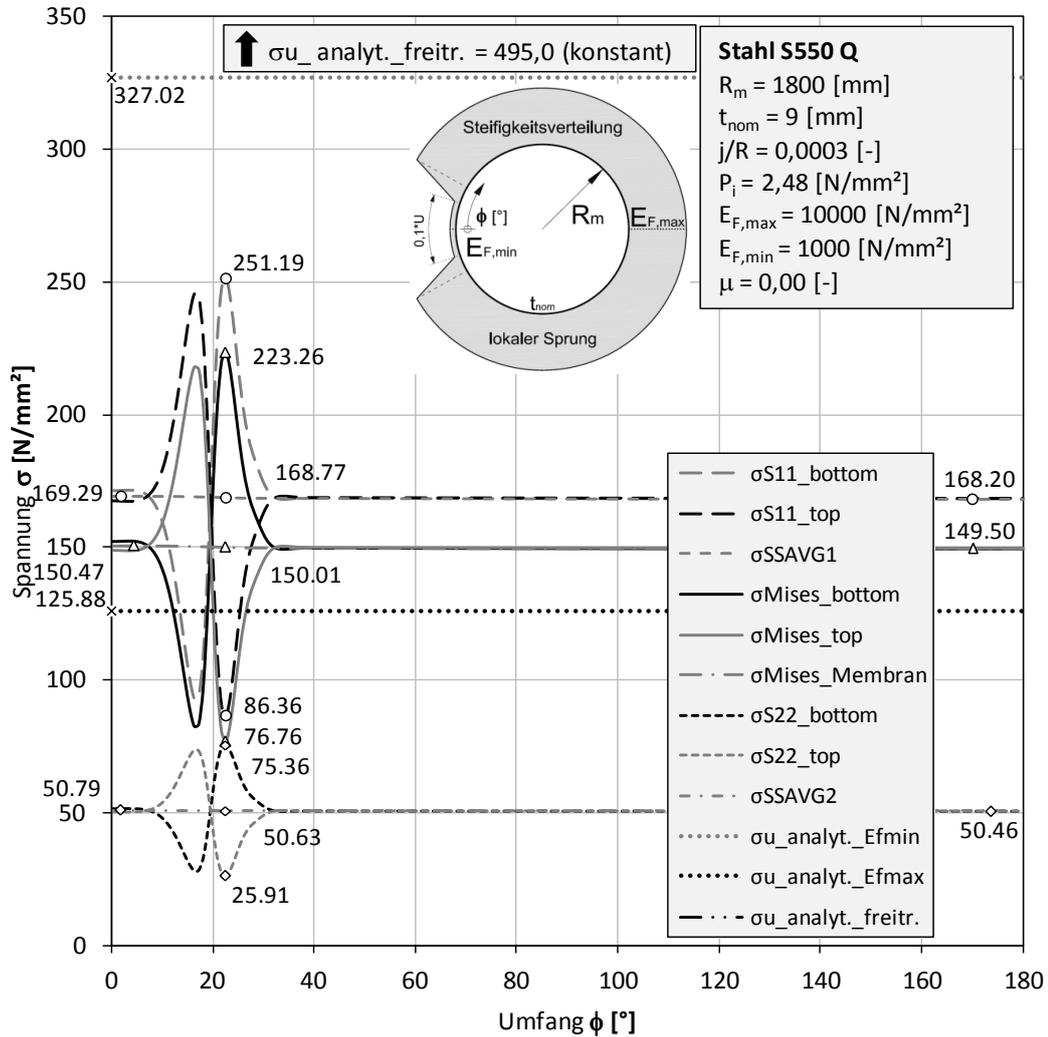


Abbildung 119A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

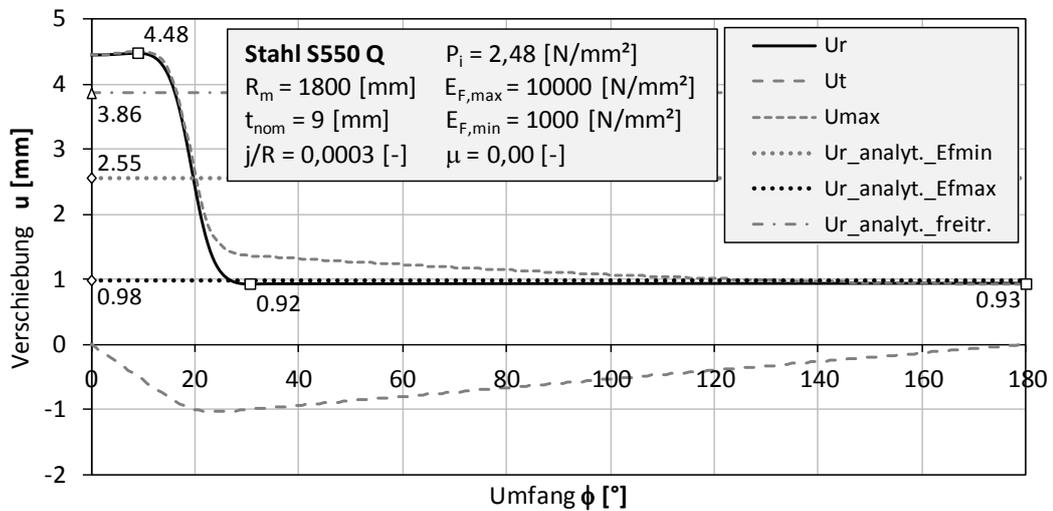


Abbildung 120A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.14 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

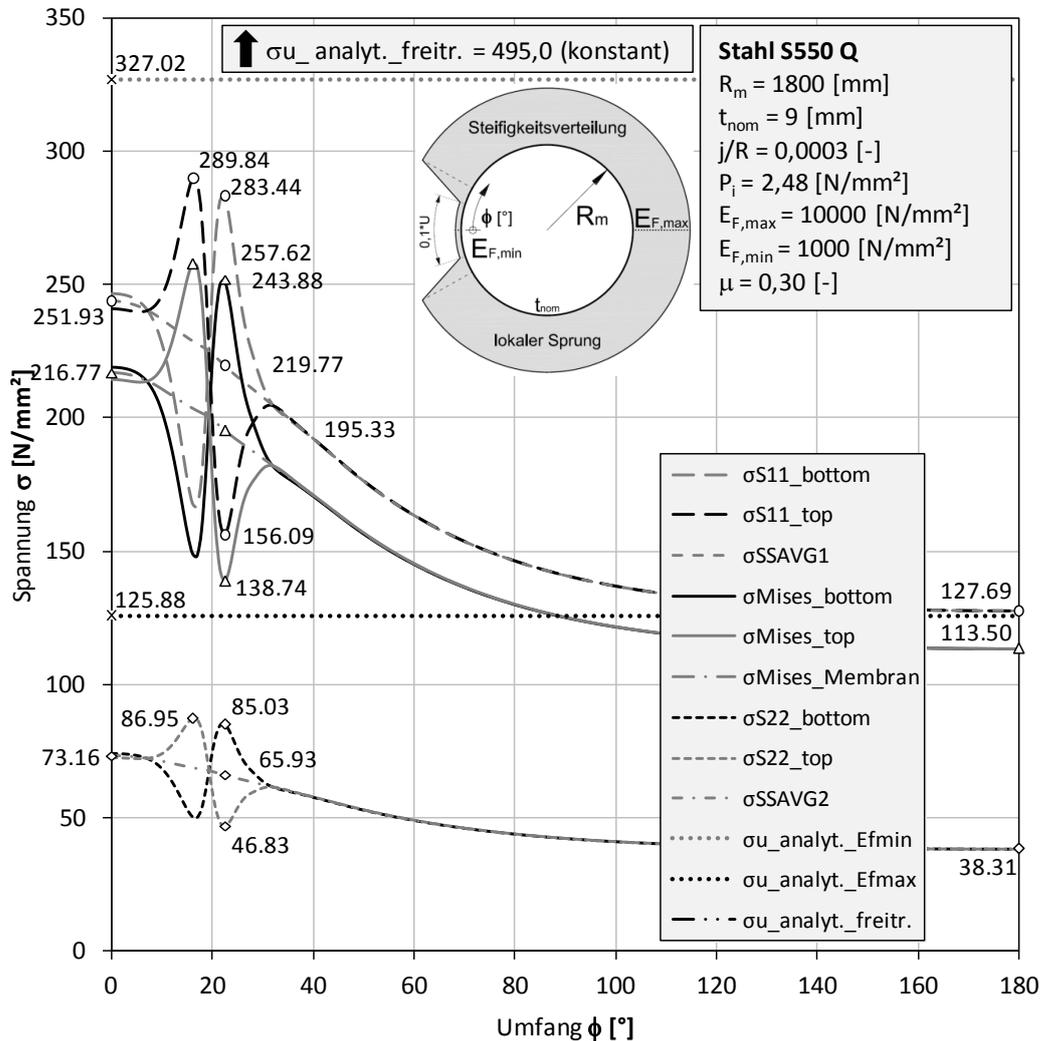


Abbildung 121A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

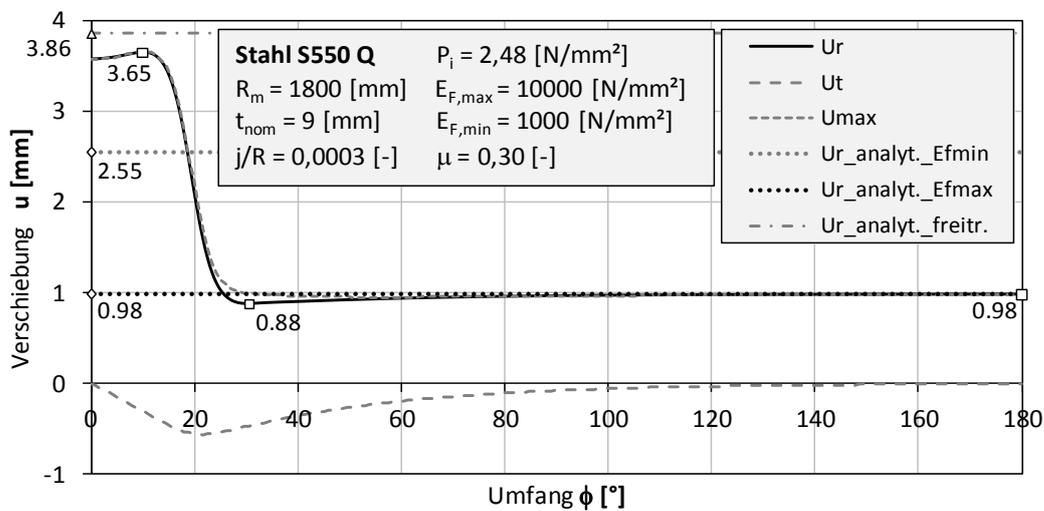


Abbildung 122A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.15 KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF  
10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

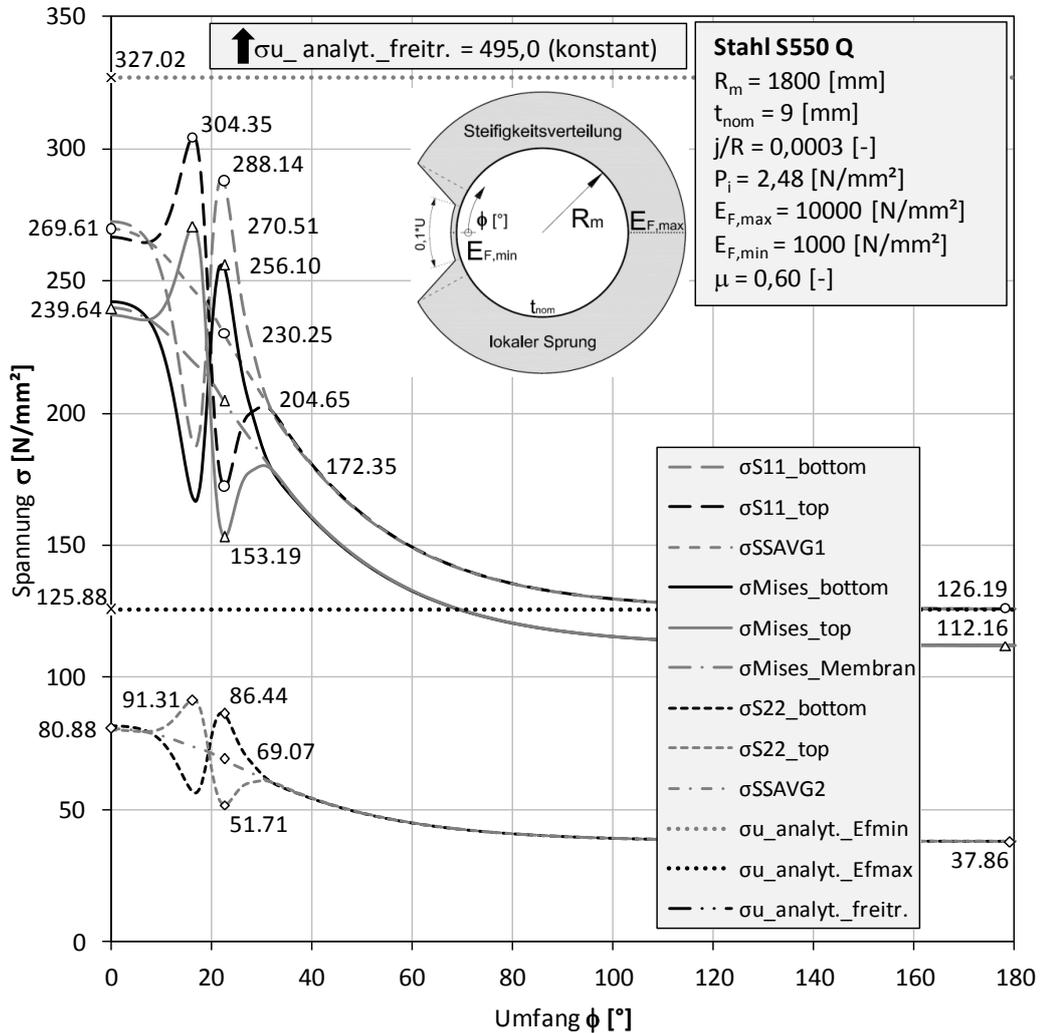


Abbildung 123A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

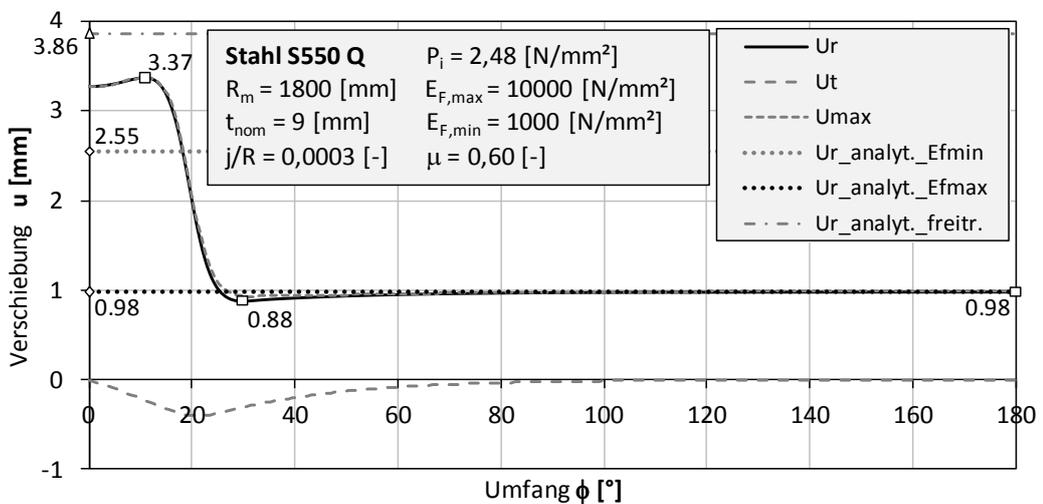


Abbildung 124A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P248\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.16 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

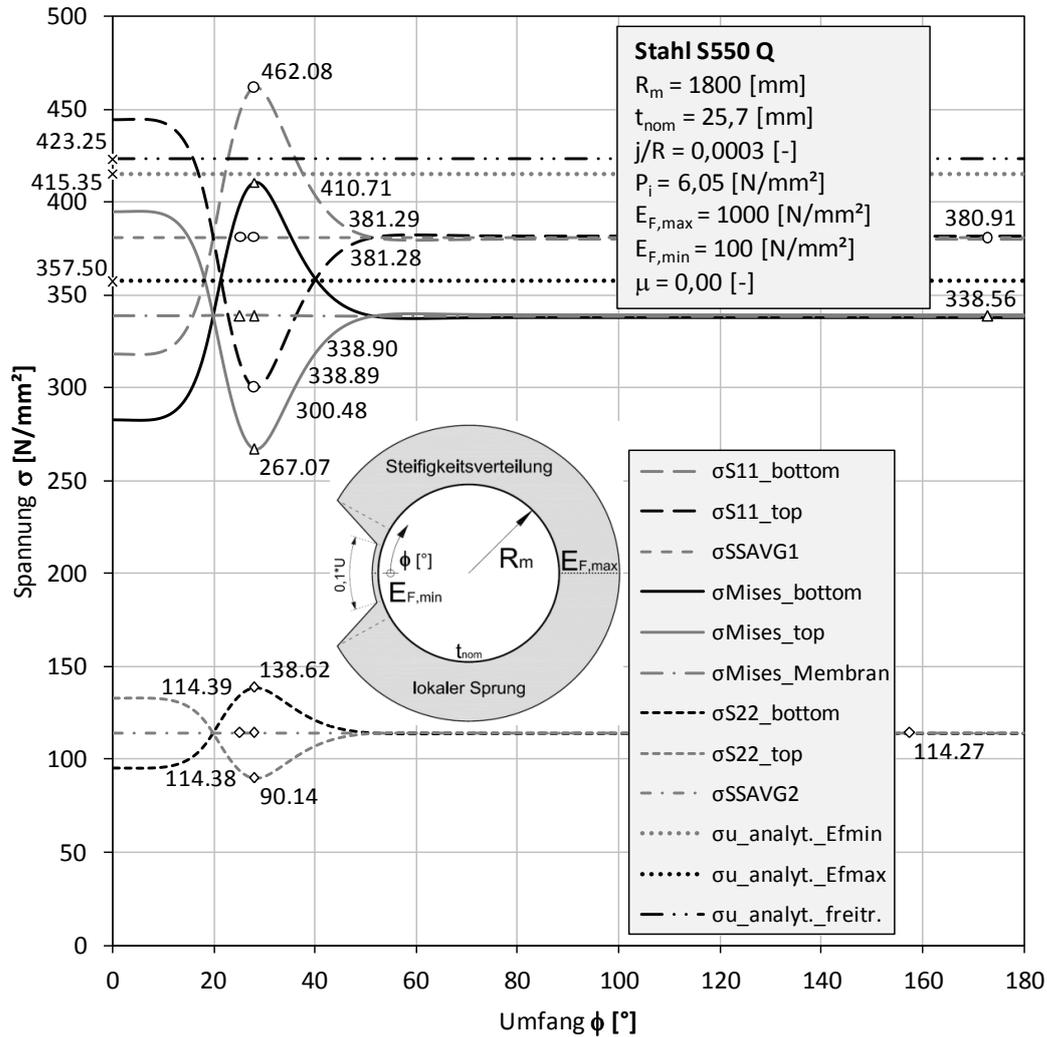


Abbildung I25A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

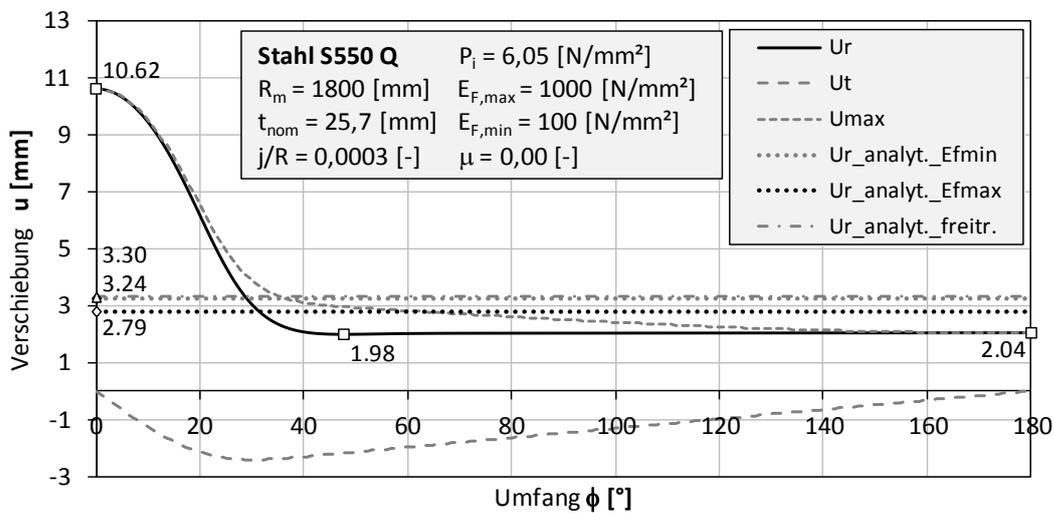


Abbildung I26A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.17 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

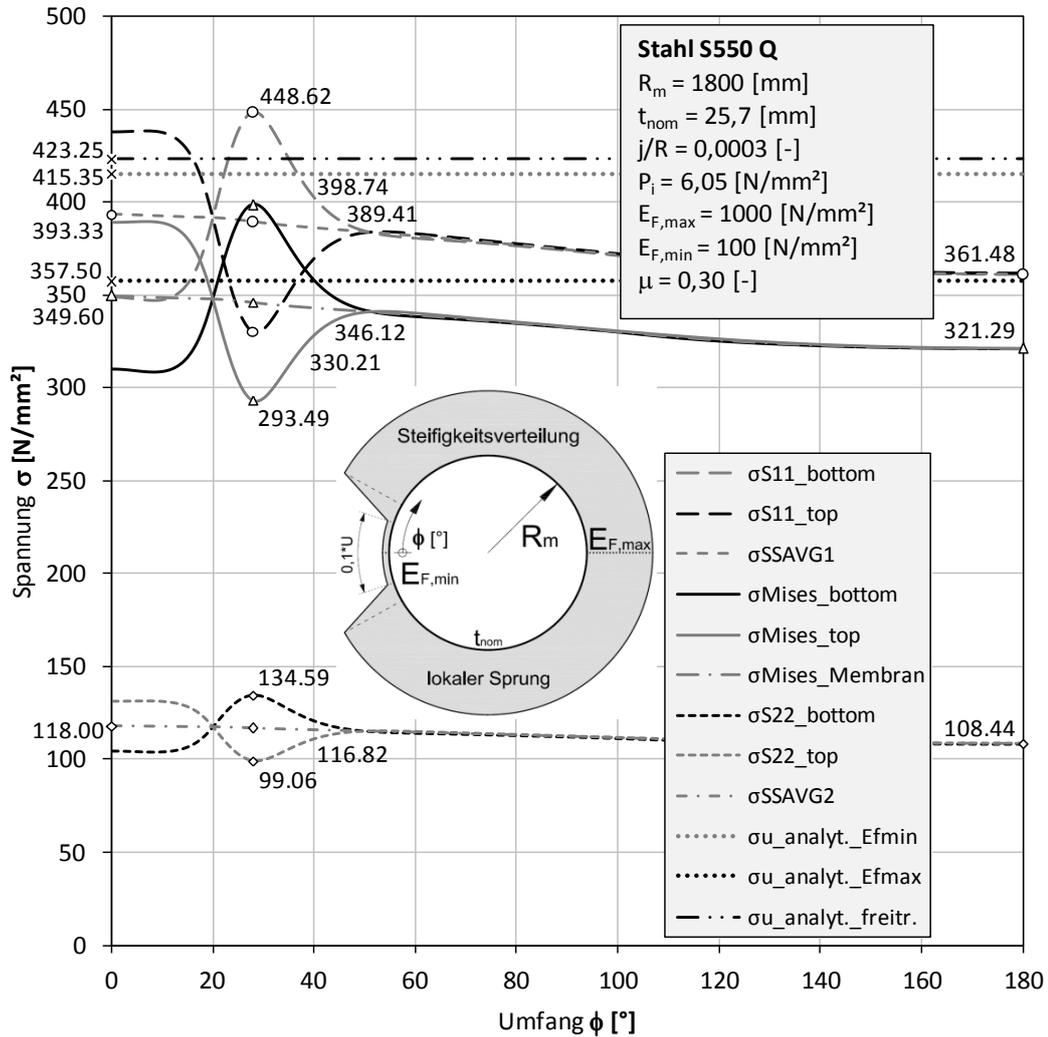


Abbildung 127A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

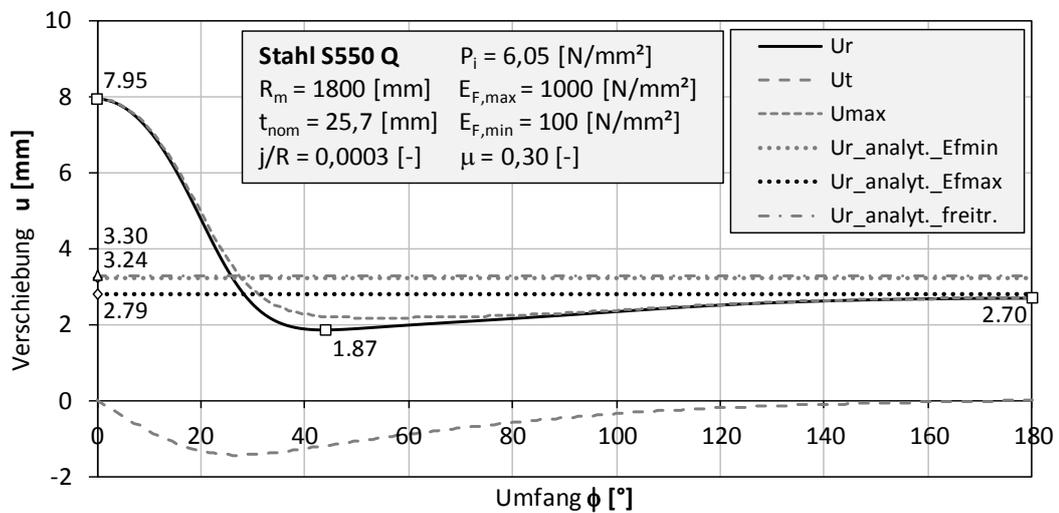


Abbildung 128A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.18 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

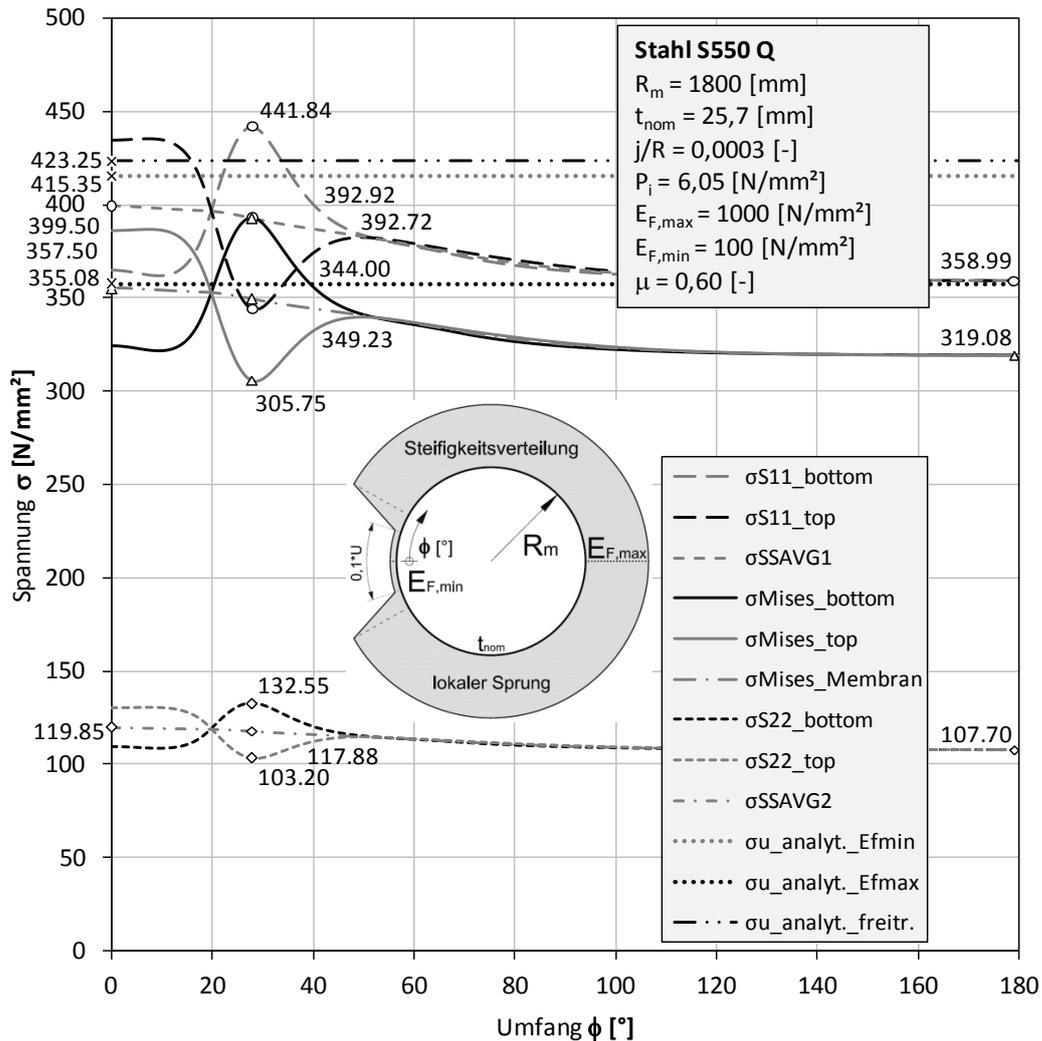


Abbildung 129A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

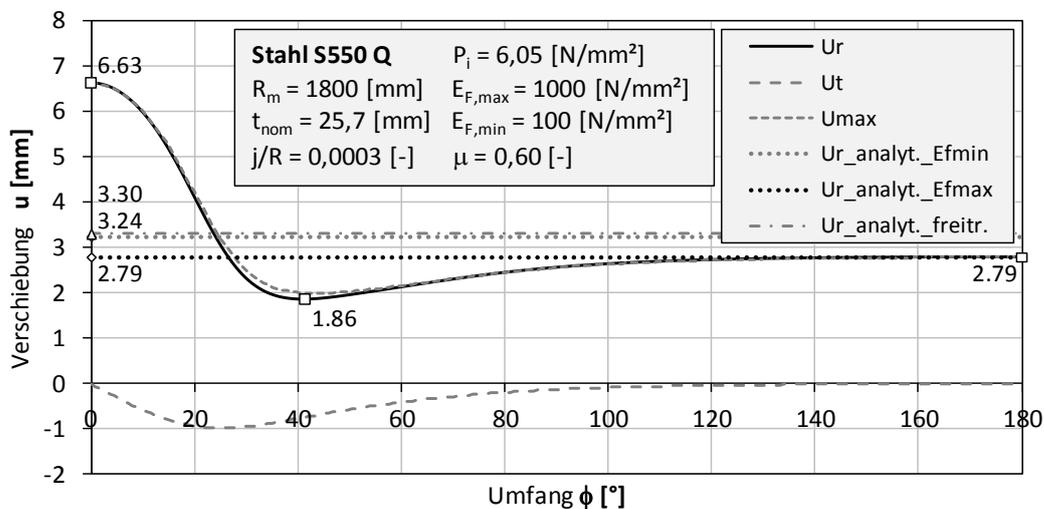


Abbildung 130A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P605\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.19 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

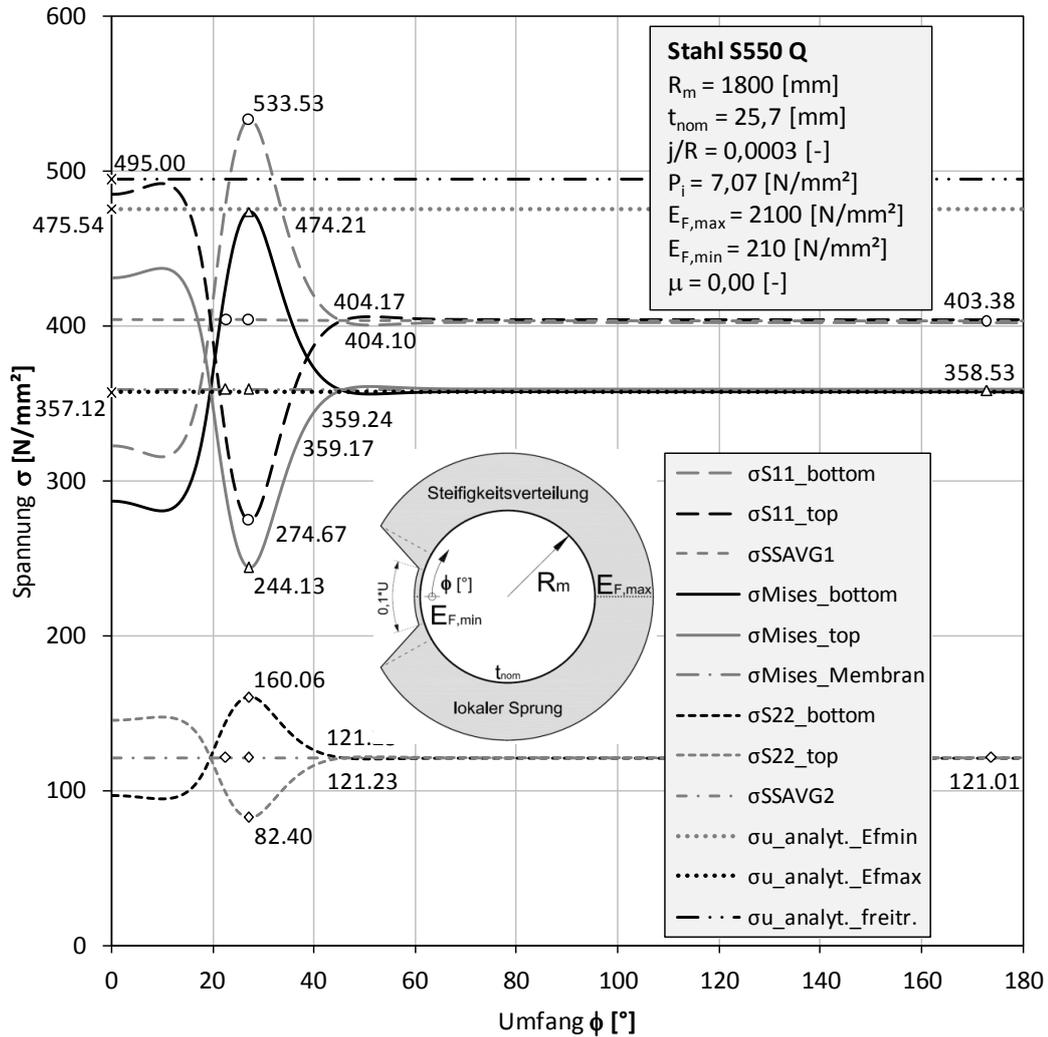


Abbildung 131A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

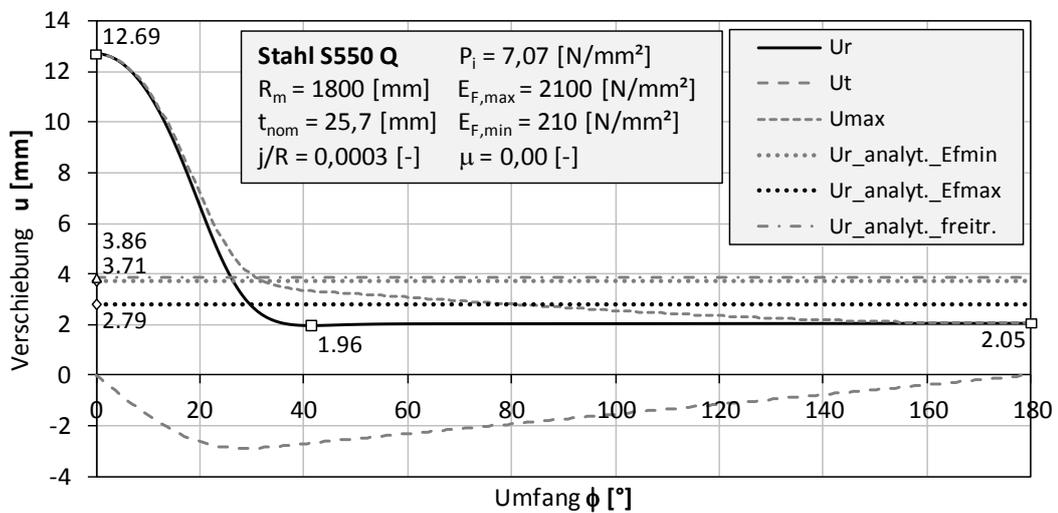


Abbildung 132A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.20 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

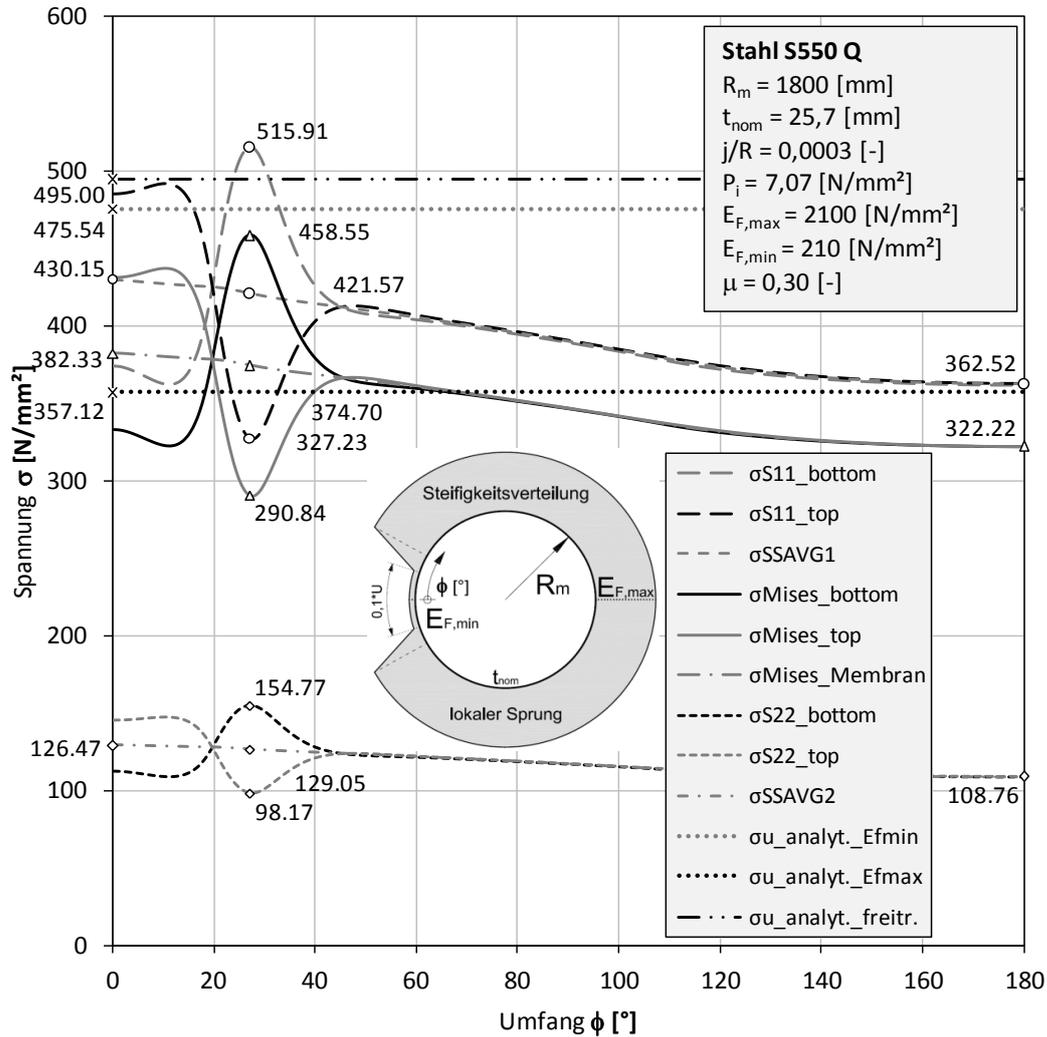


Abbildung 133A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

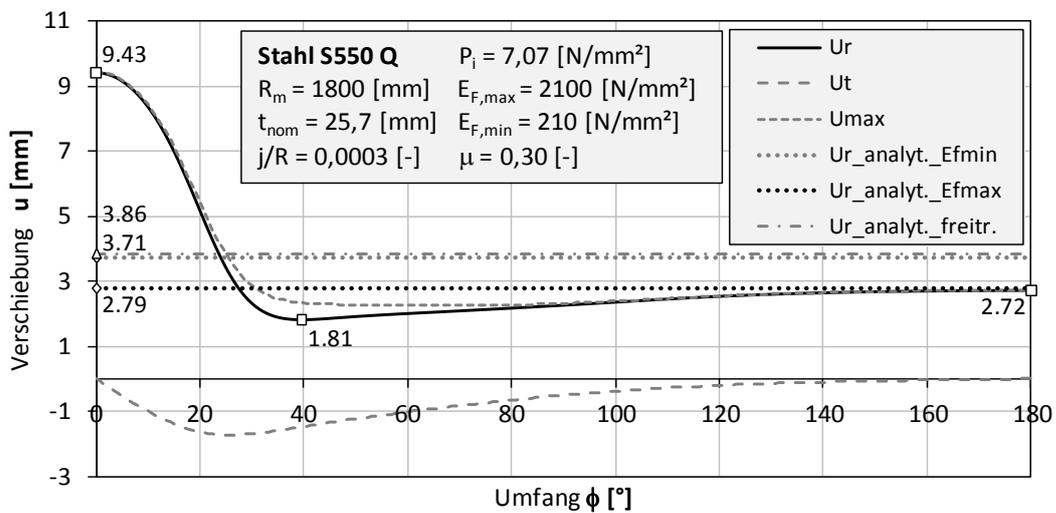


Abbildung 134A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.21 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

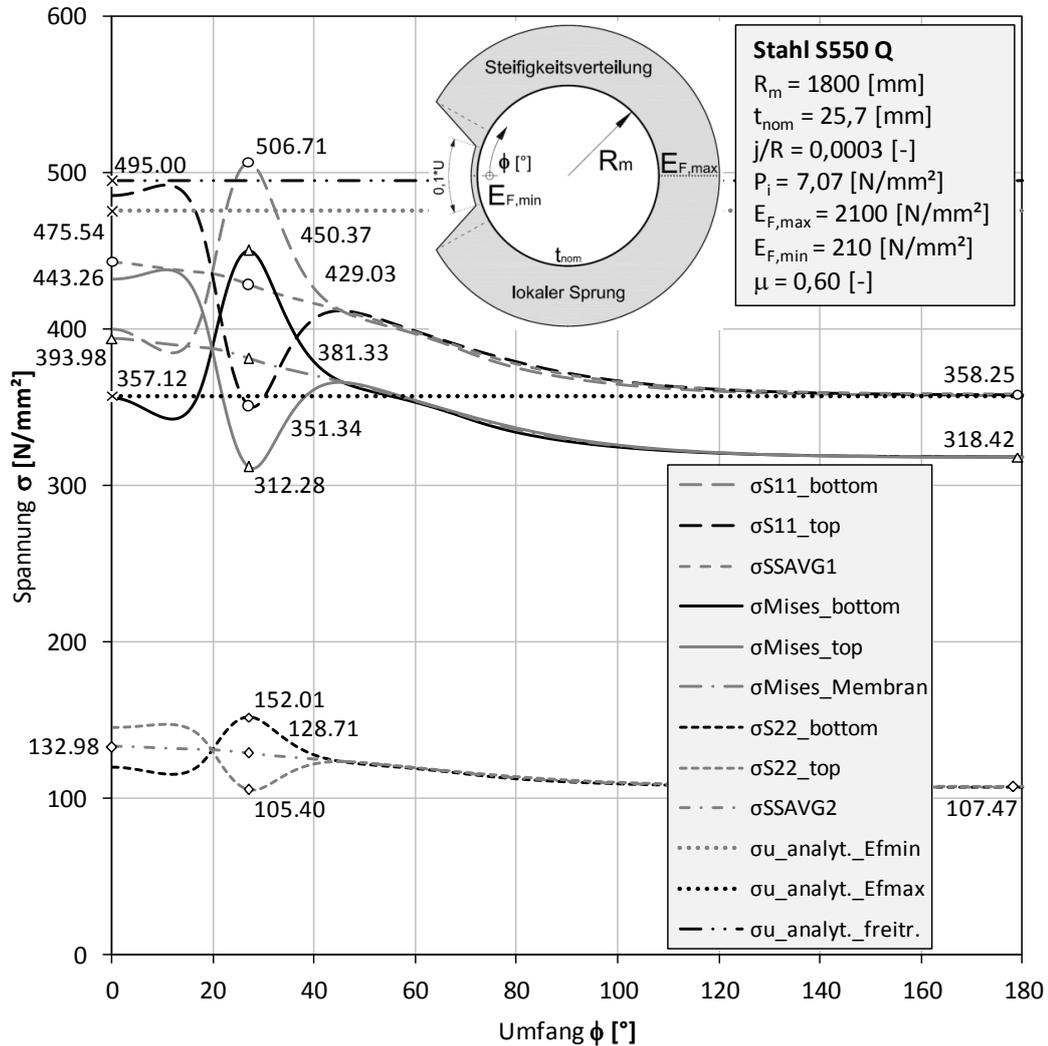


Abbildung 135A: Spannungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

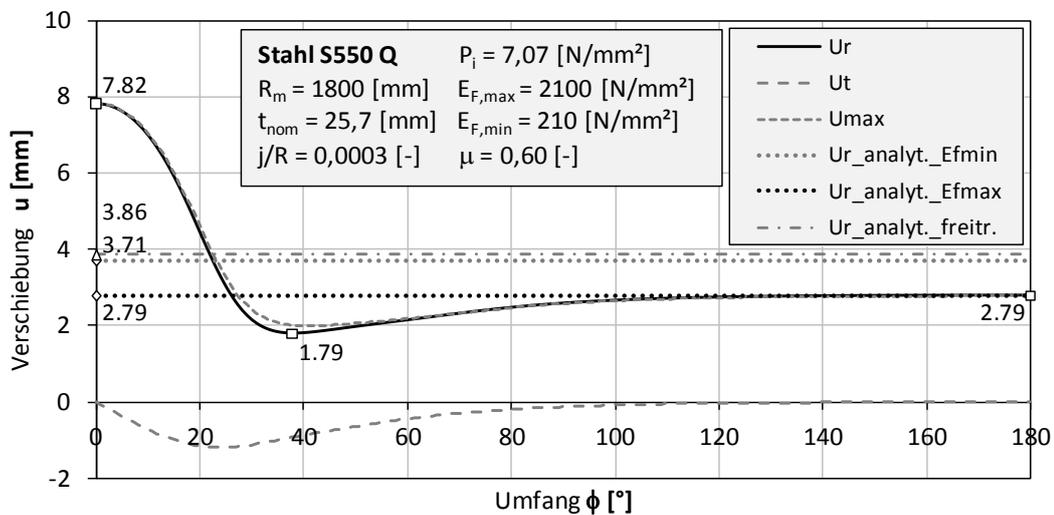


Abbildung 136A: Verschiebungen  
KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF2100\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.22 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

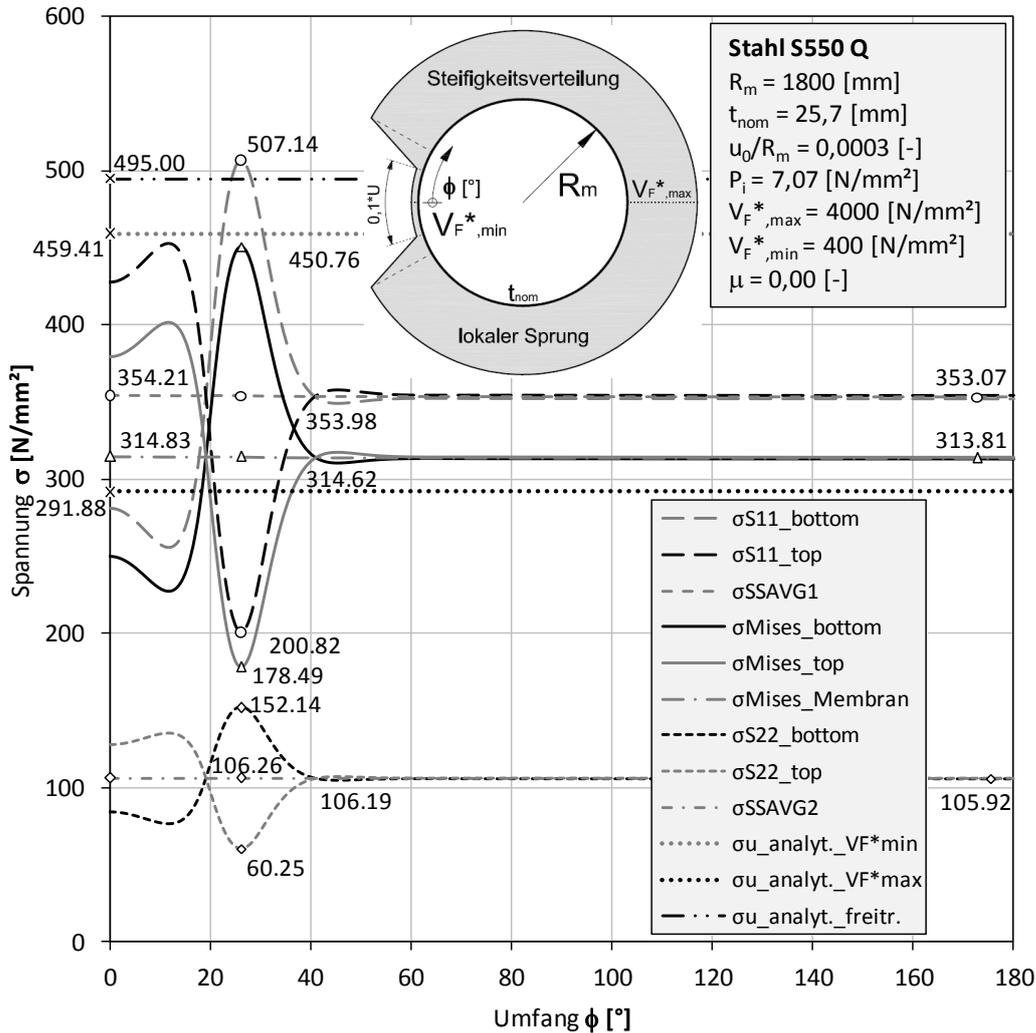


Abbildung 137A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

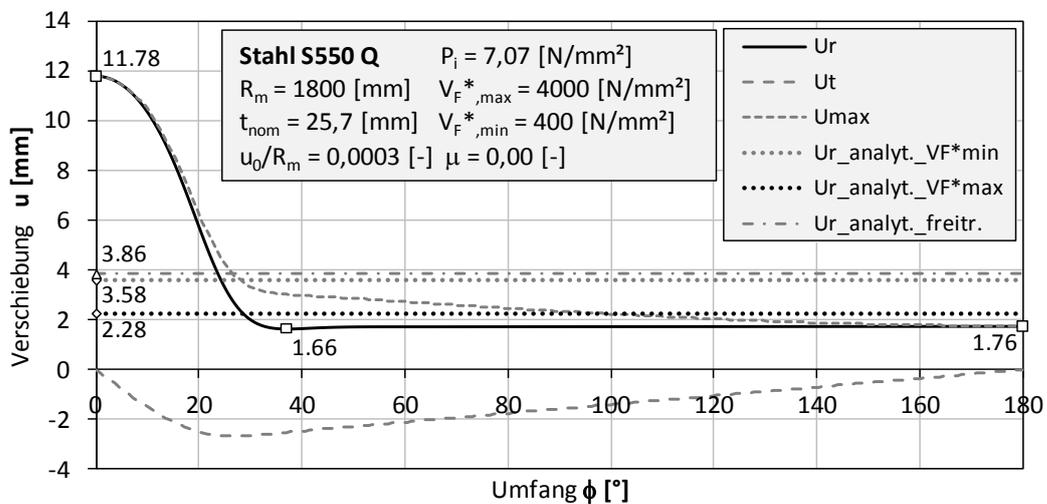


Abbildung 138A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.23 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

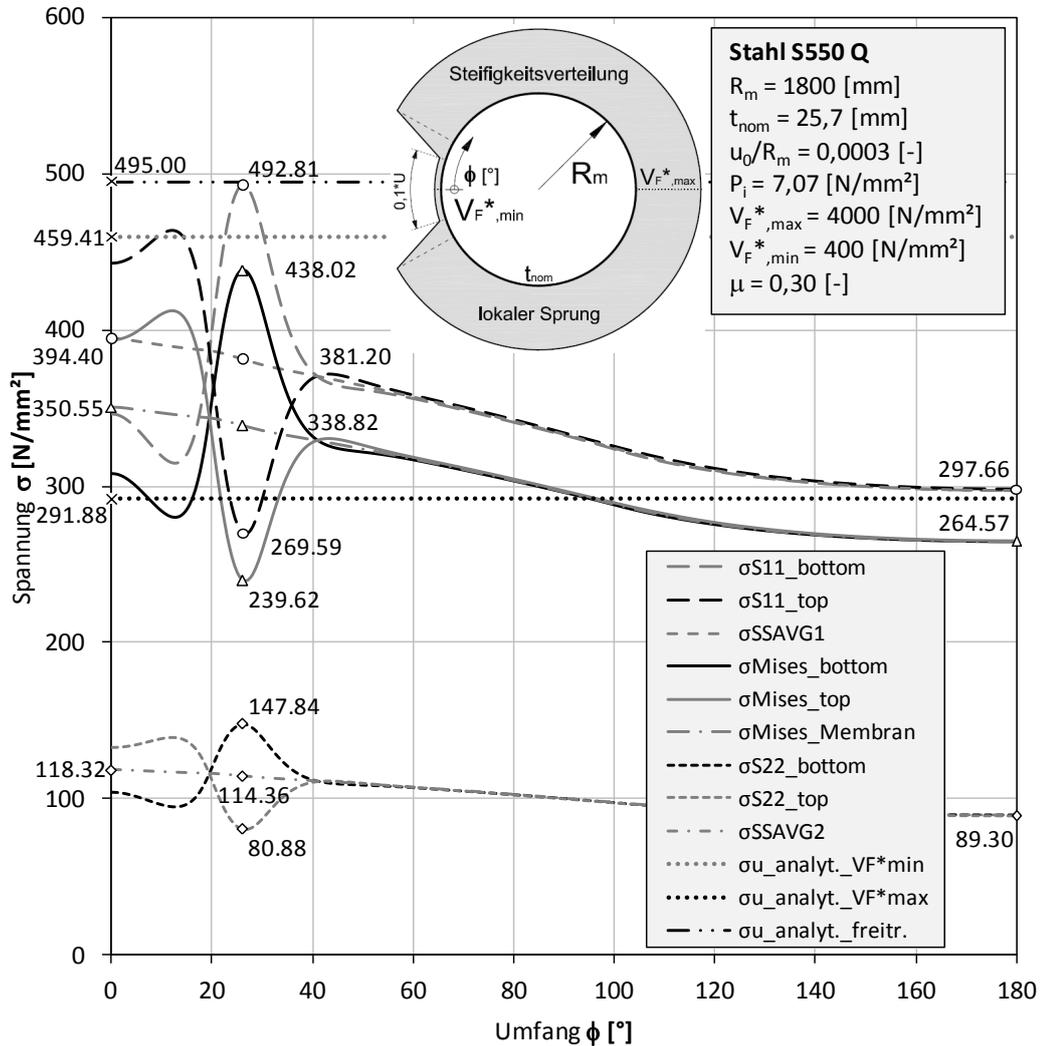


Abbildung 139A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

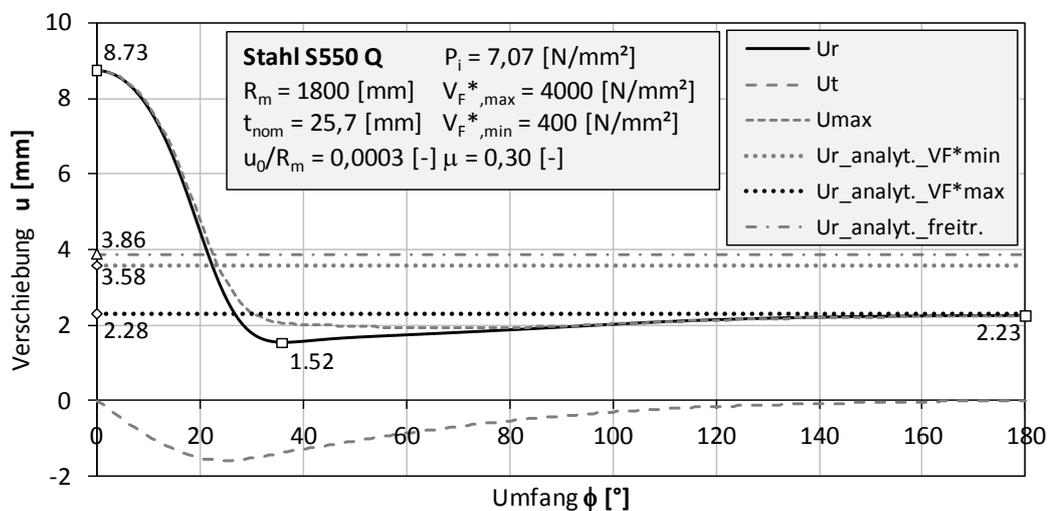


Abbildung 140A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.24 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

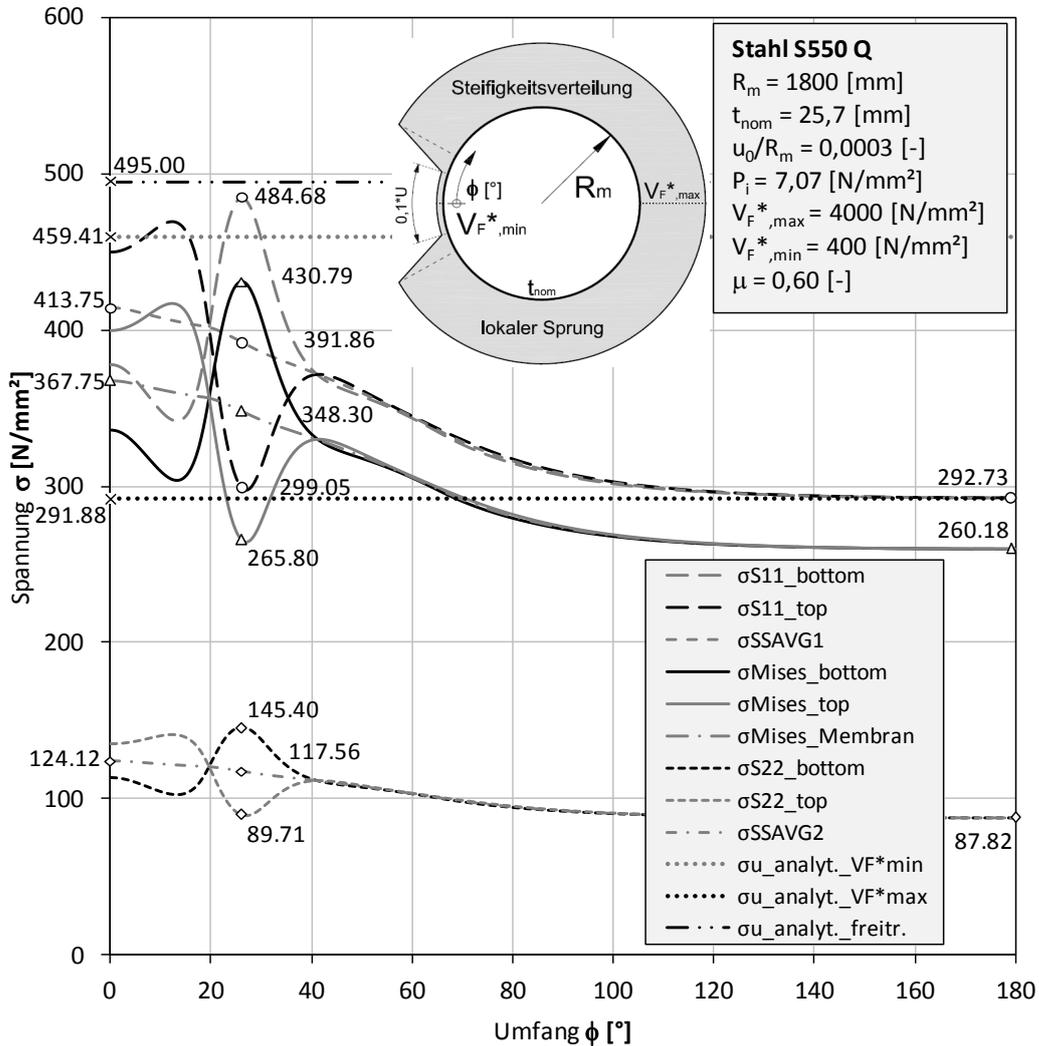


Abbildung 141A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

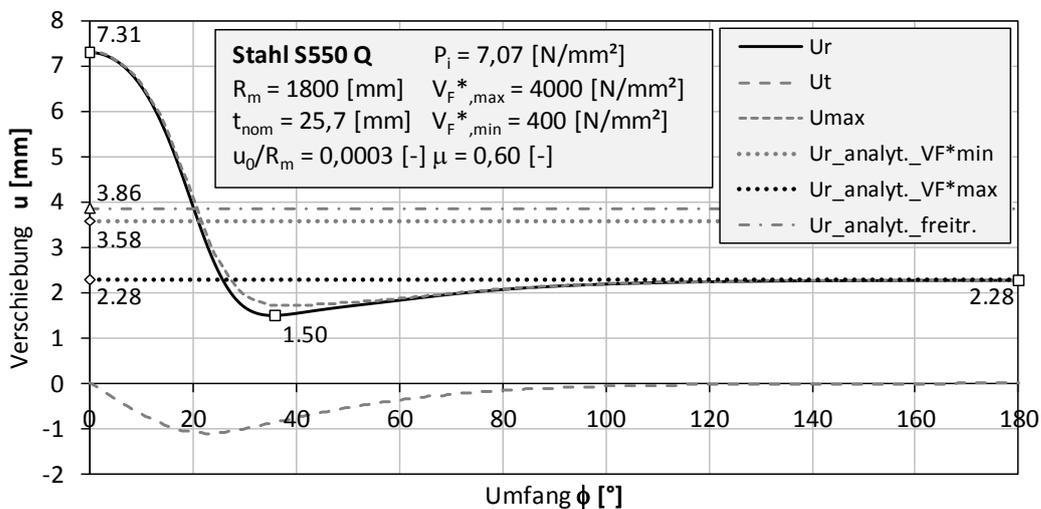


Abbildung 142A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P707\_VF4000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.25 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

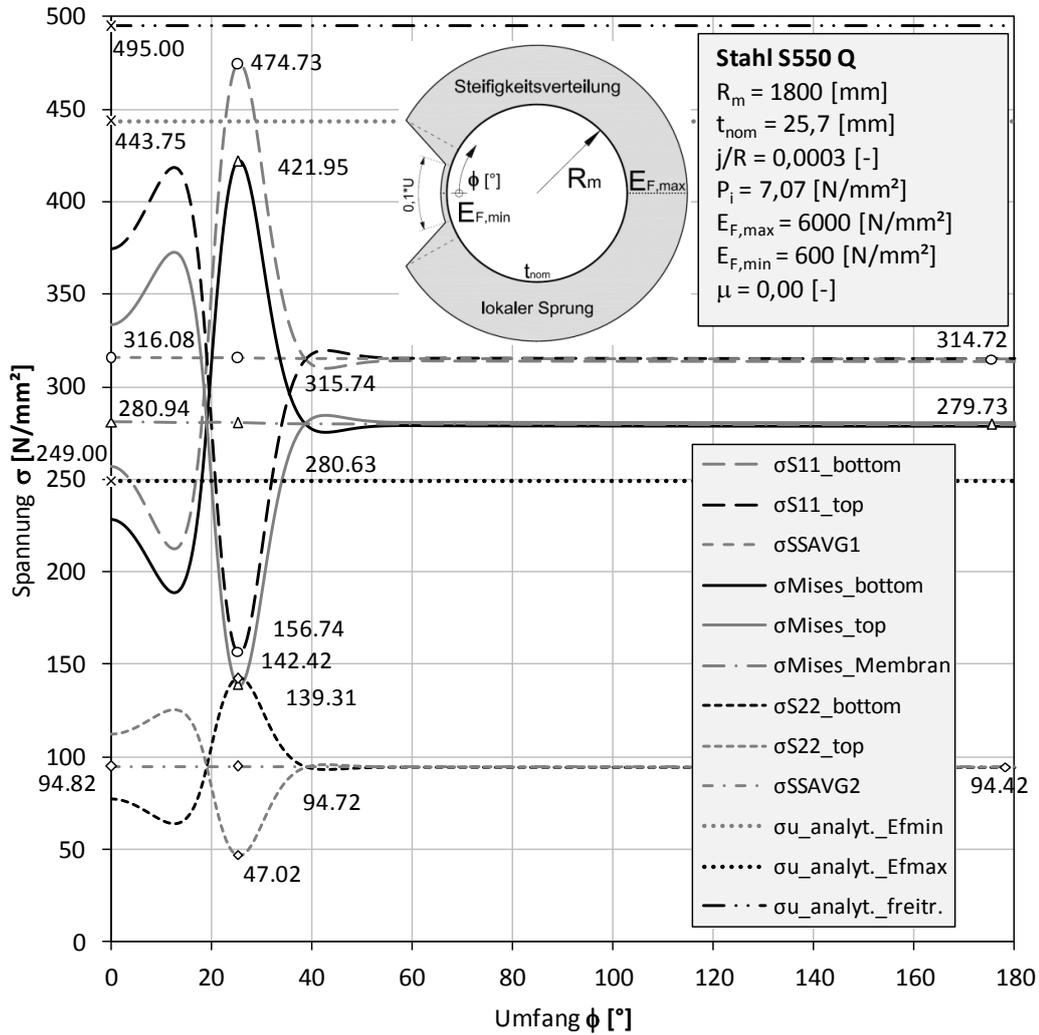


Abbildung 143A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

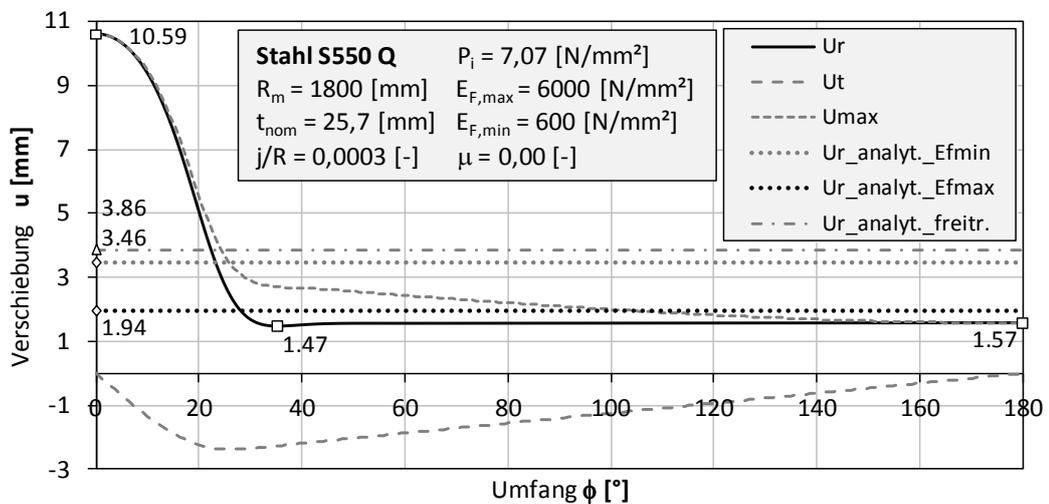


Abbildung 144A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.26 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

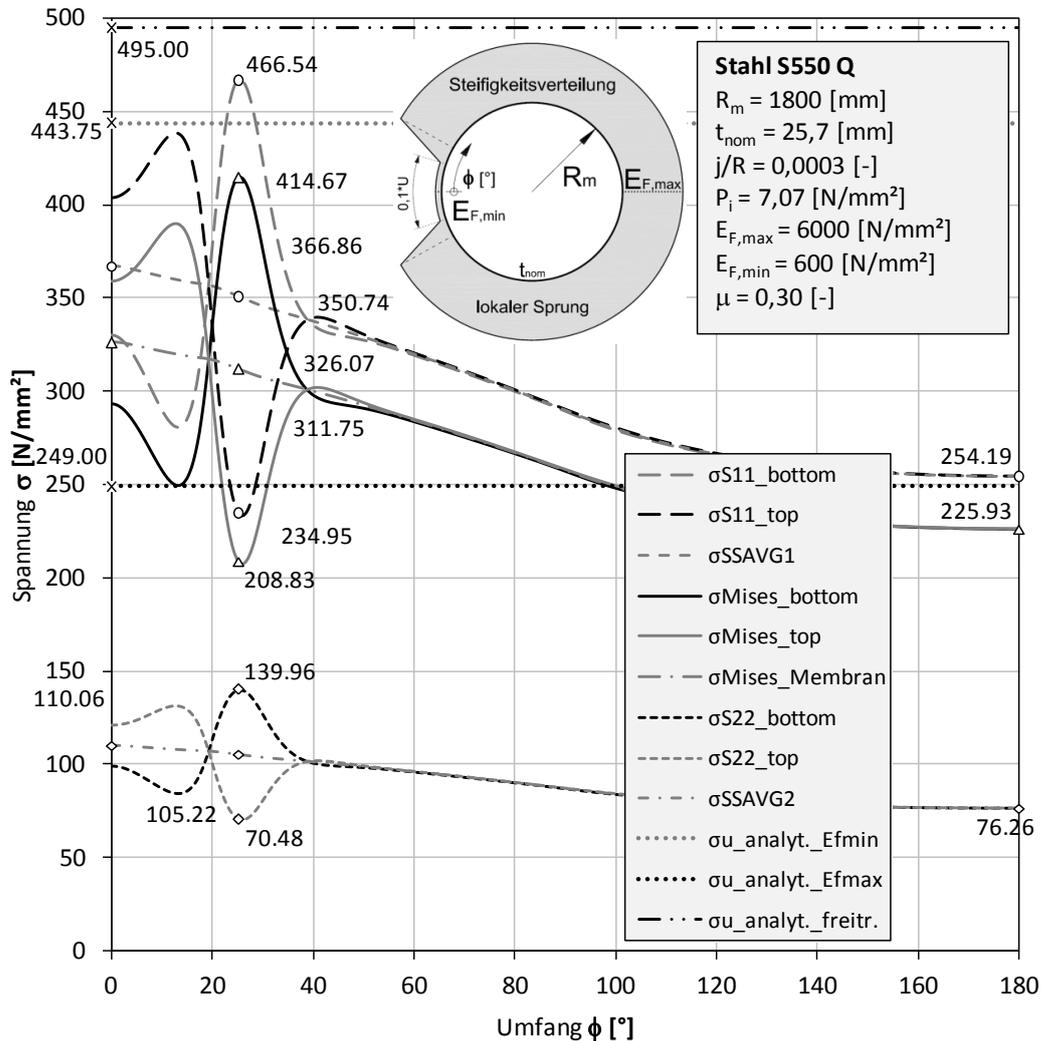


Abbildung 145A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

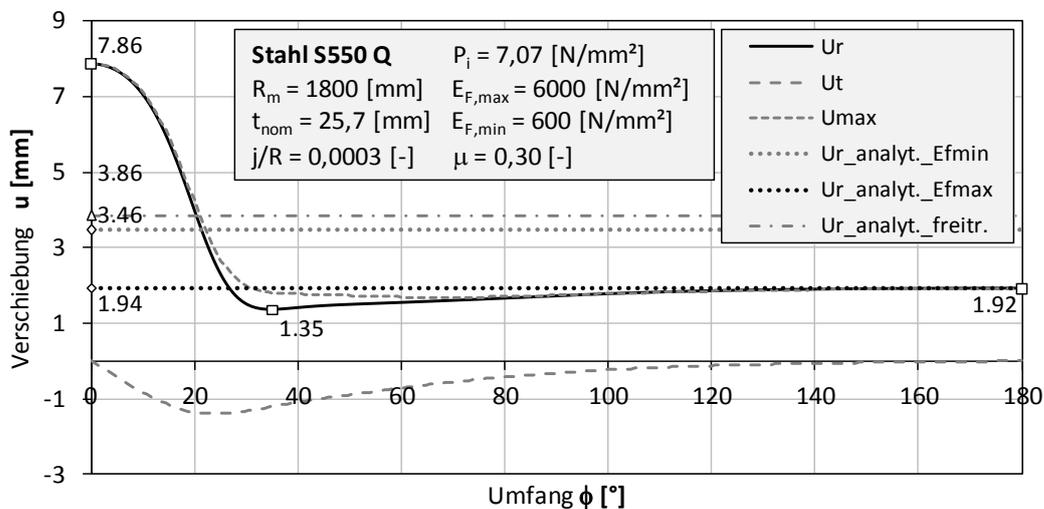


Abbildung 146A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.27 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

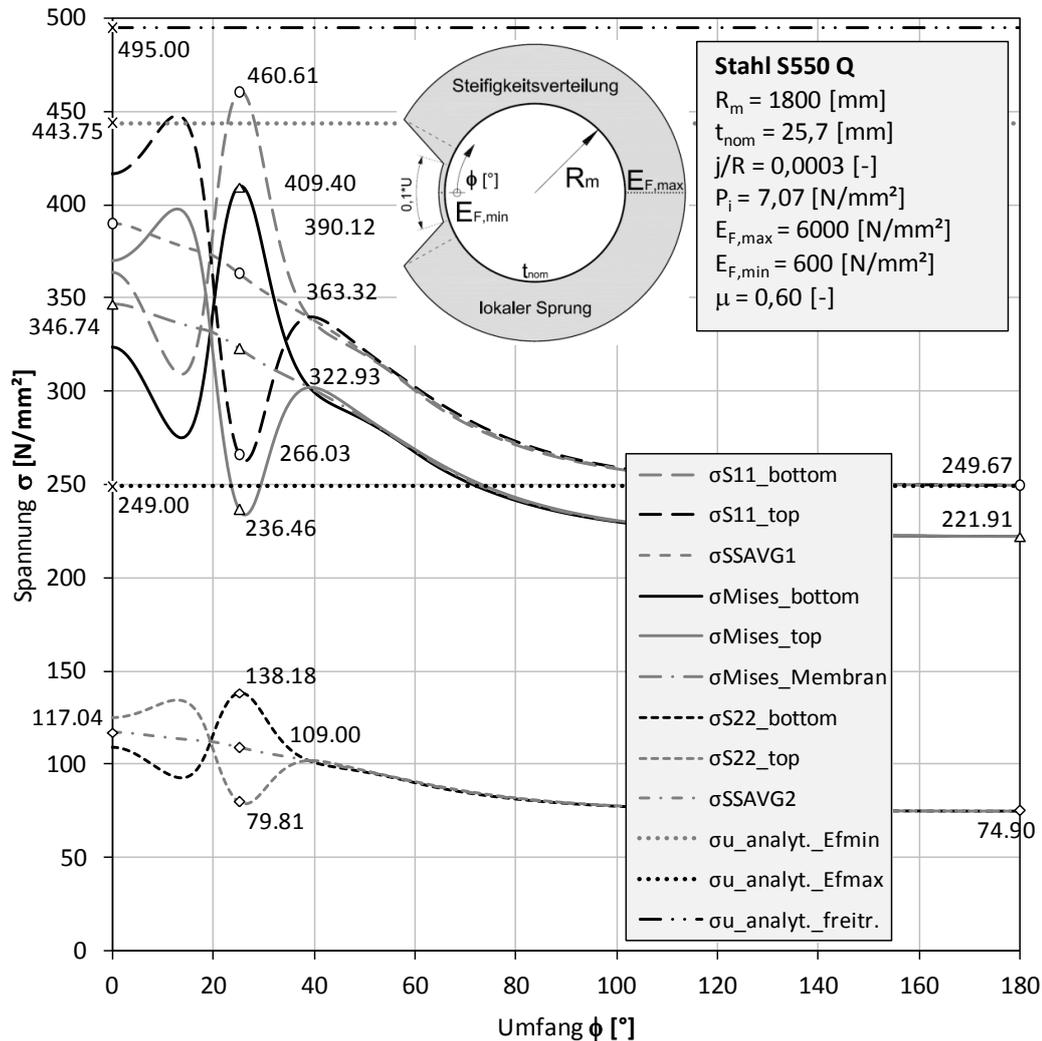


Abbildung 147A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

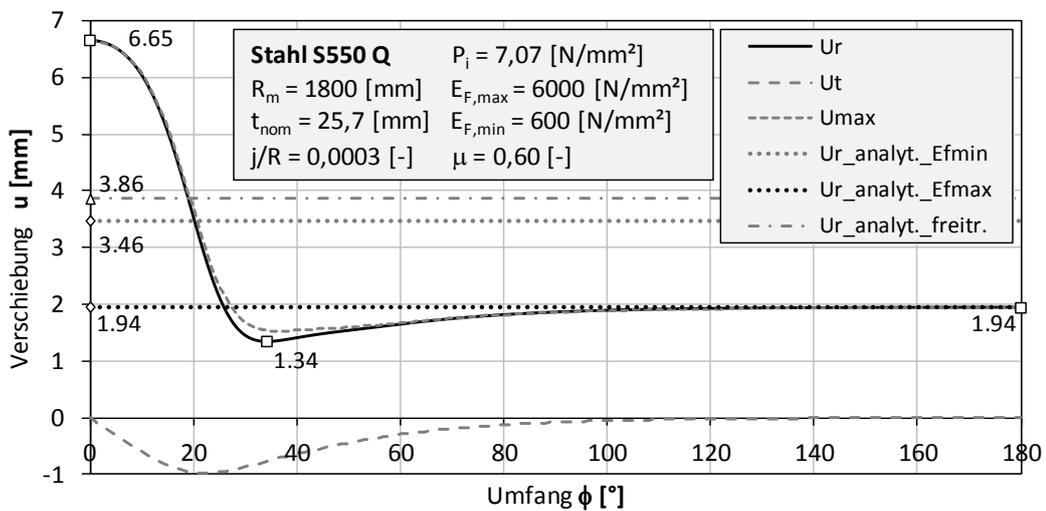


Abbildung 148A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.28 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

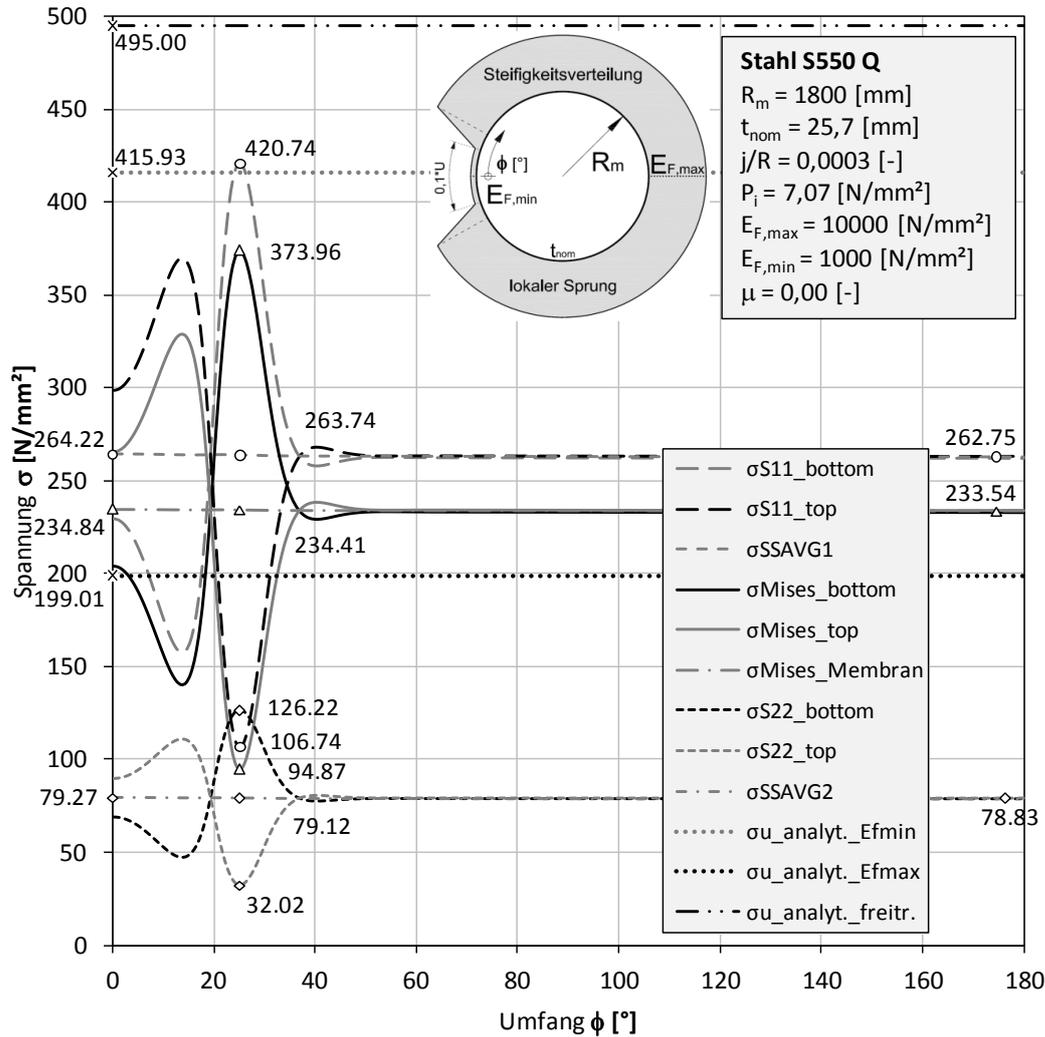


Abbildung 149A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

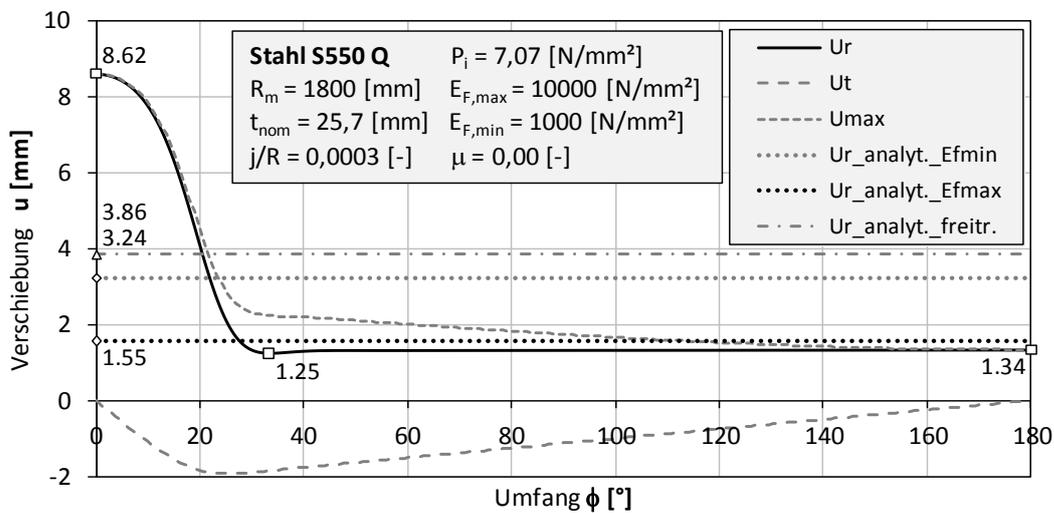


Abbildung 150A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.29 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

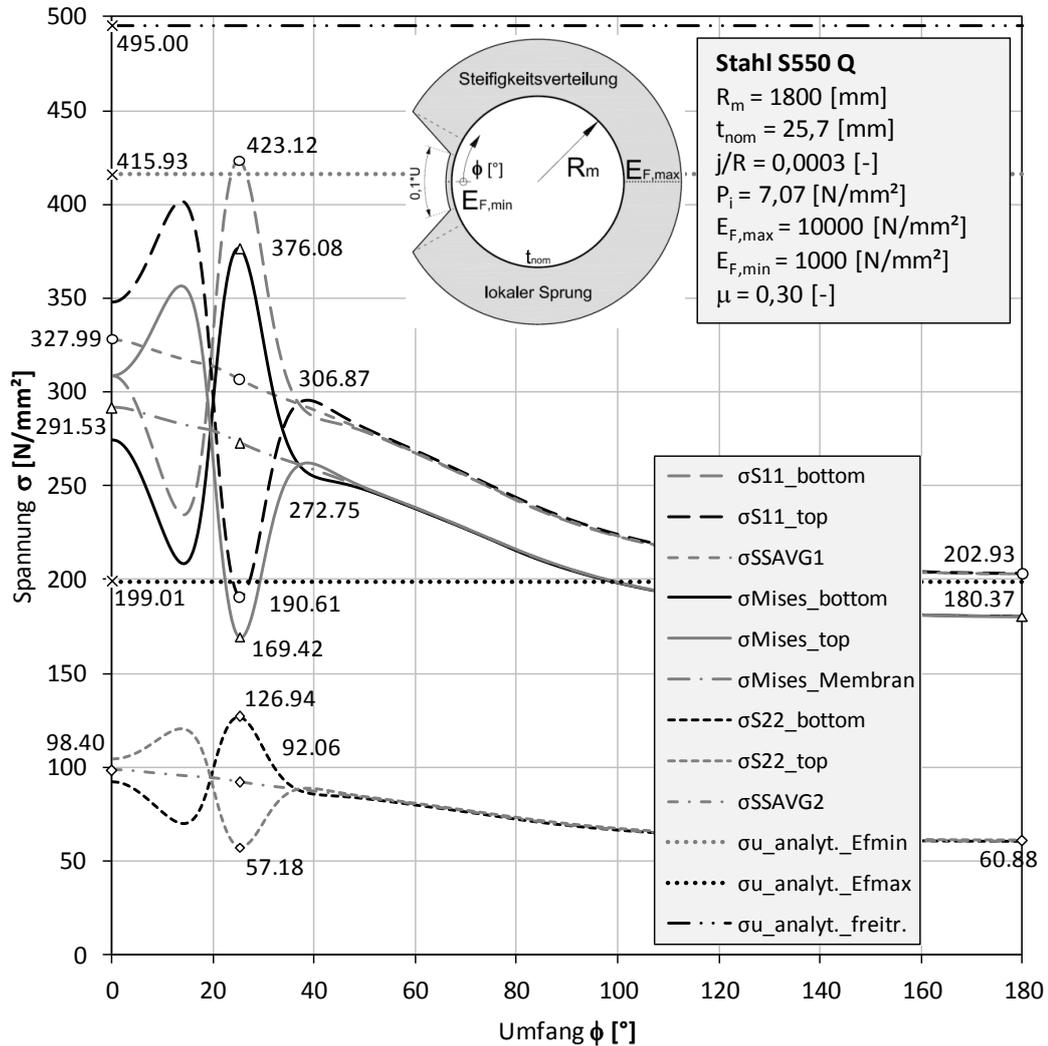


Abbildung 151A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

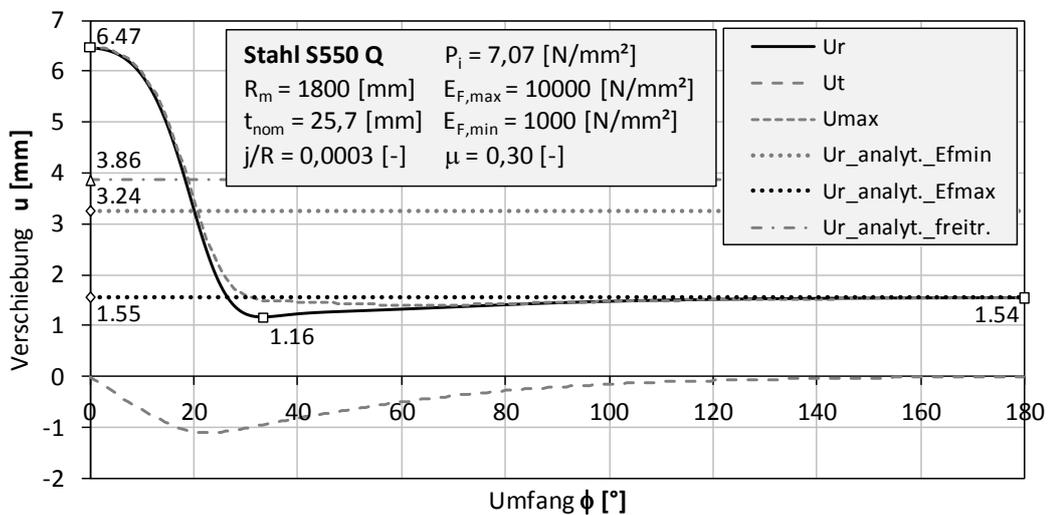


Abbildung 152A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.30 KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

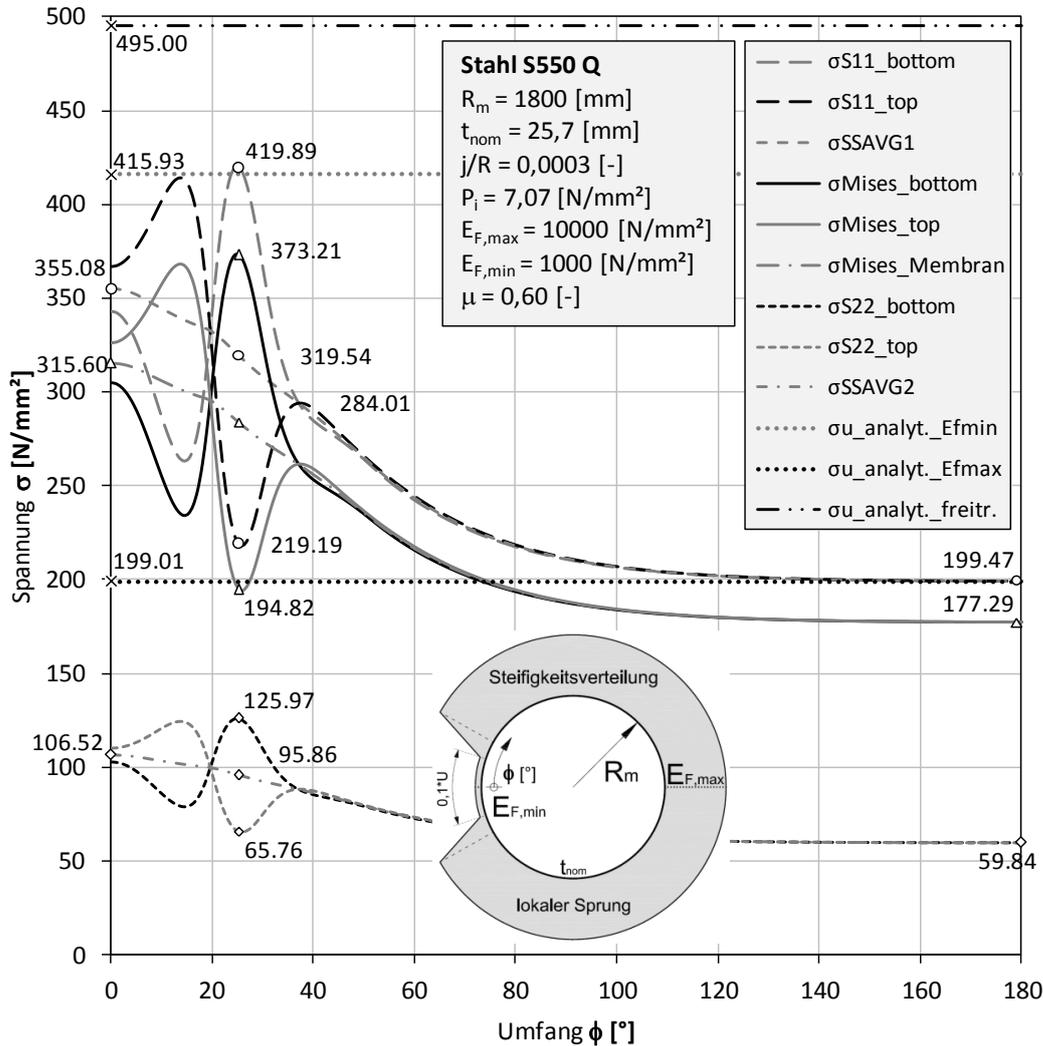


Abbildung 153A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

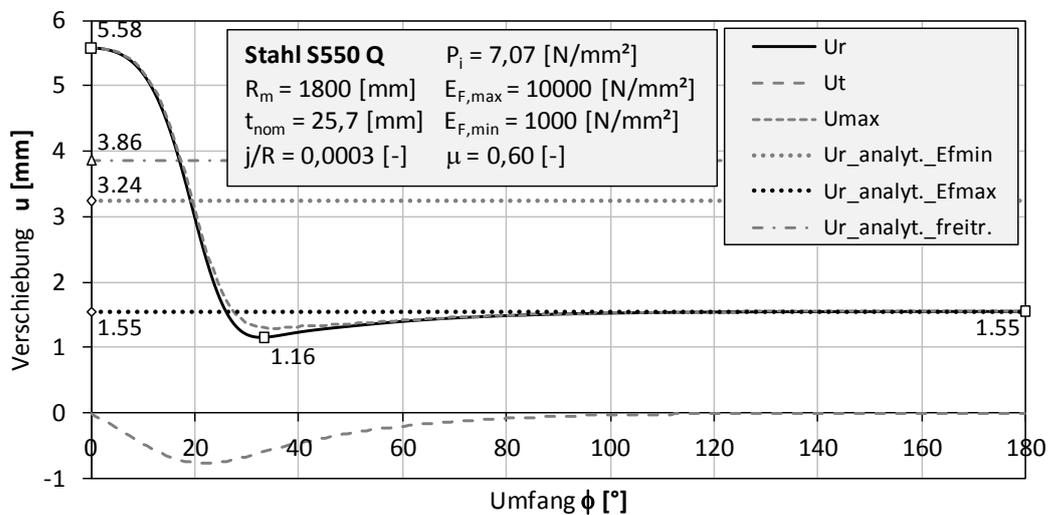


Abbildung 154A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t257\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P707\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.31 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

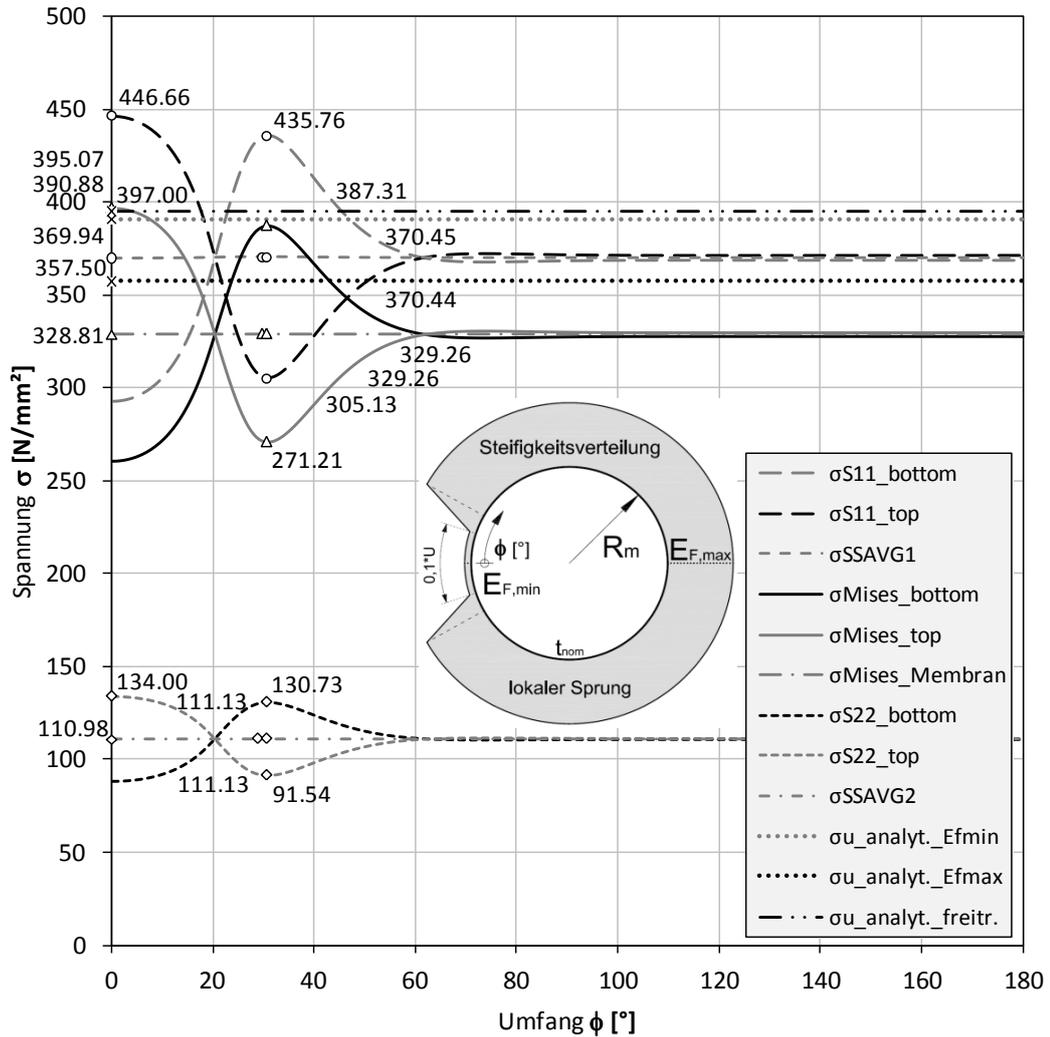


Abbildung 155A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

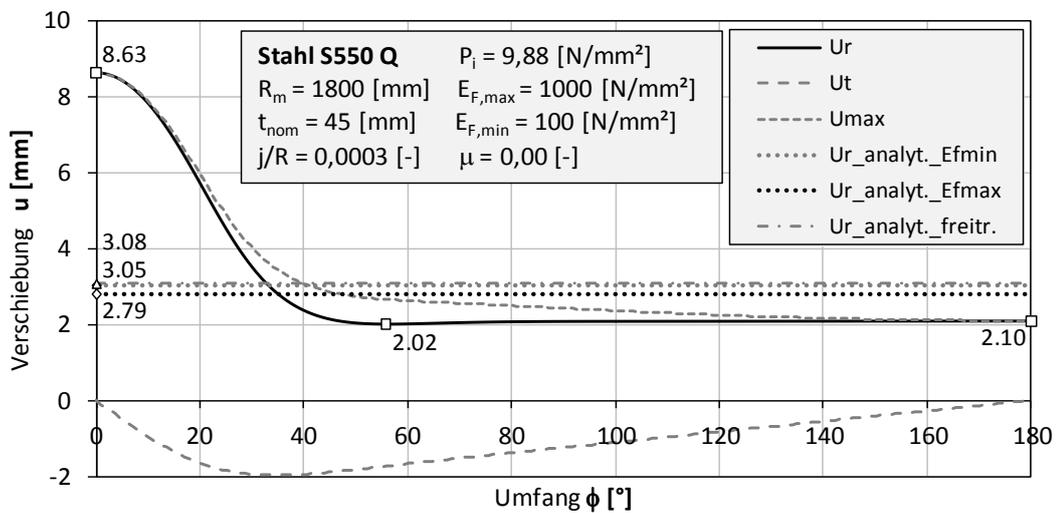


Abbildung 156A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.32 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

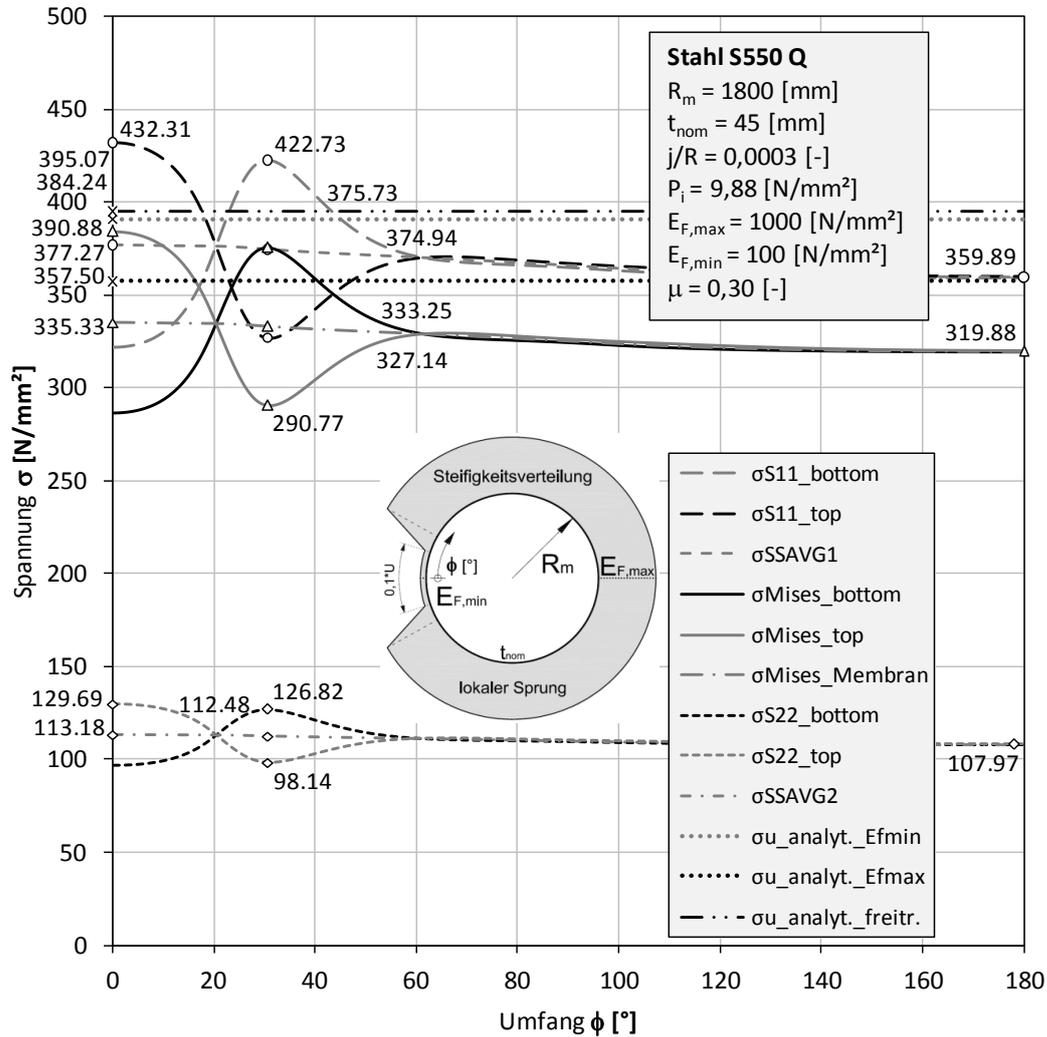


Abbildung 157A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

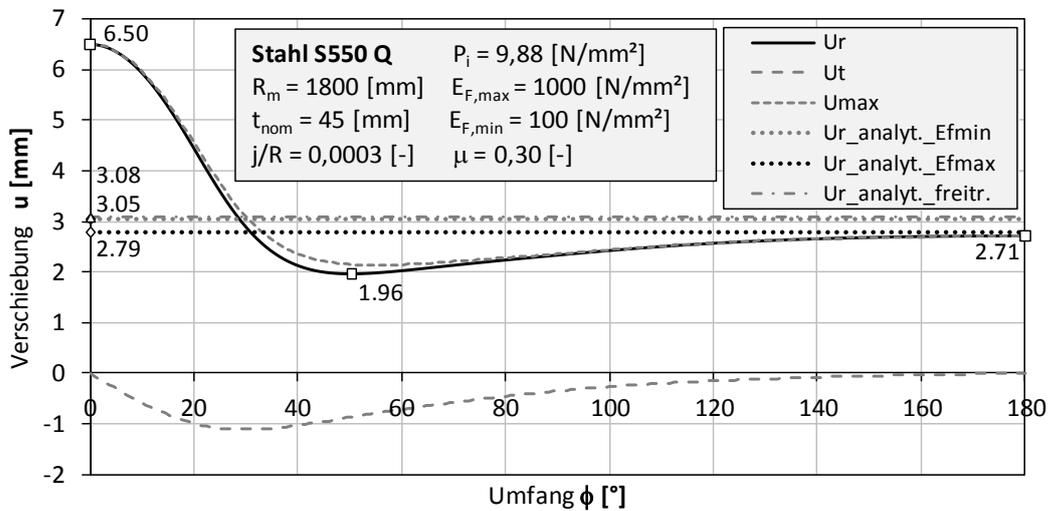


Abbildung 158A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.33 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_E  
F1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

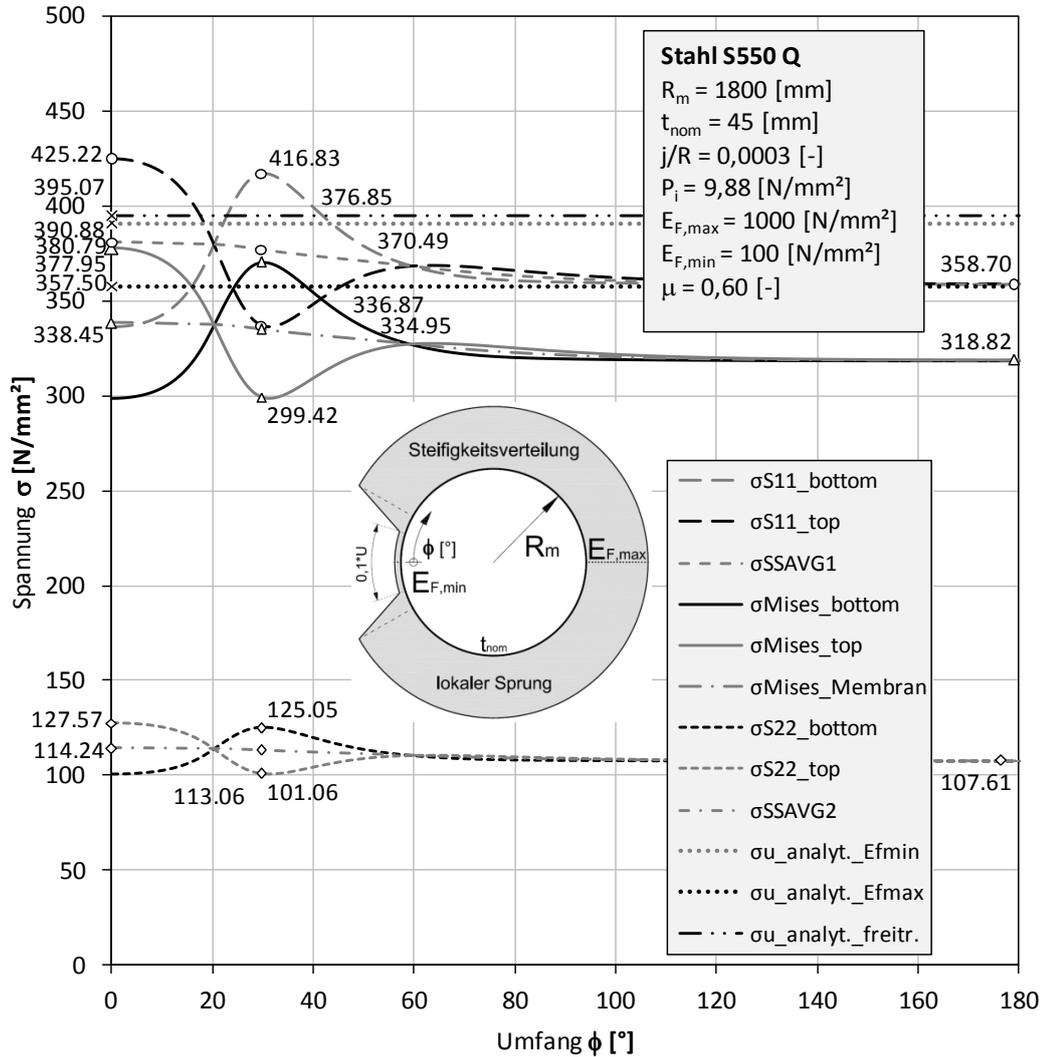


Abbildung 159A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

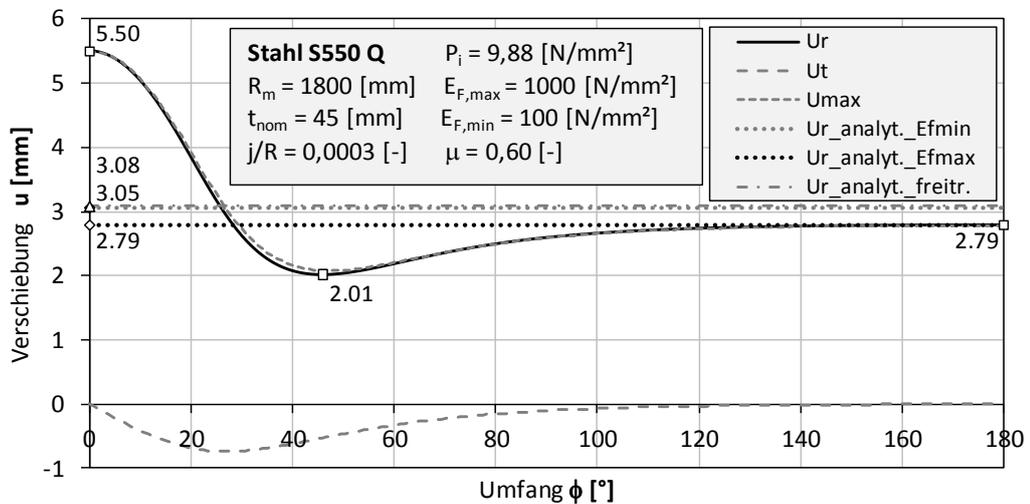


Abbildung 160A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P988\_EF1000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.34 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

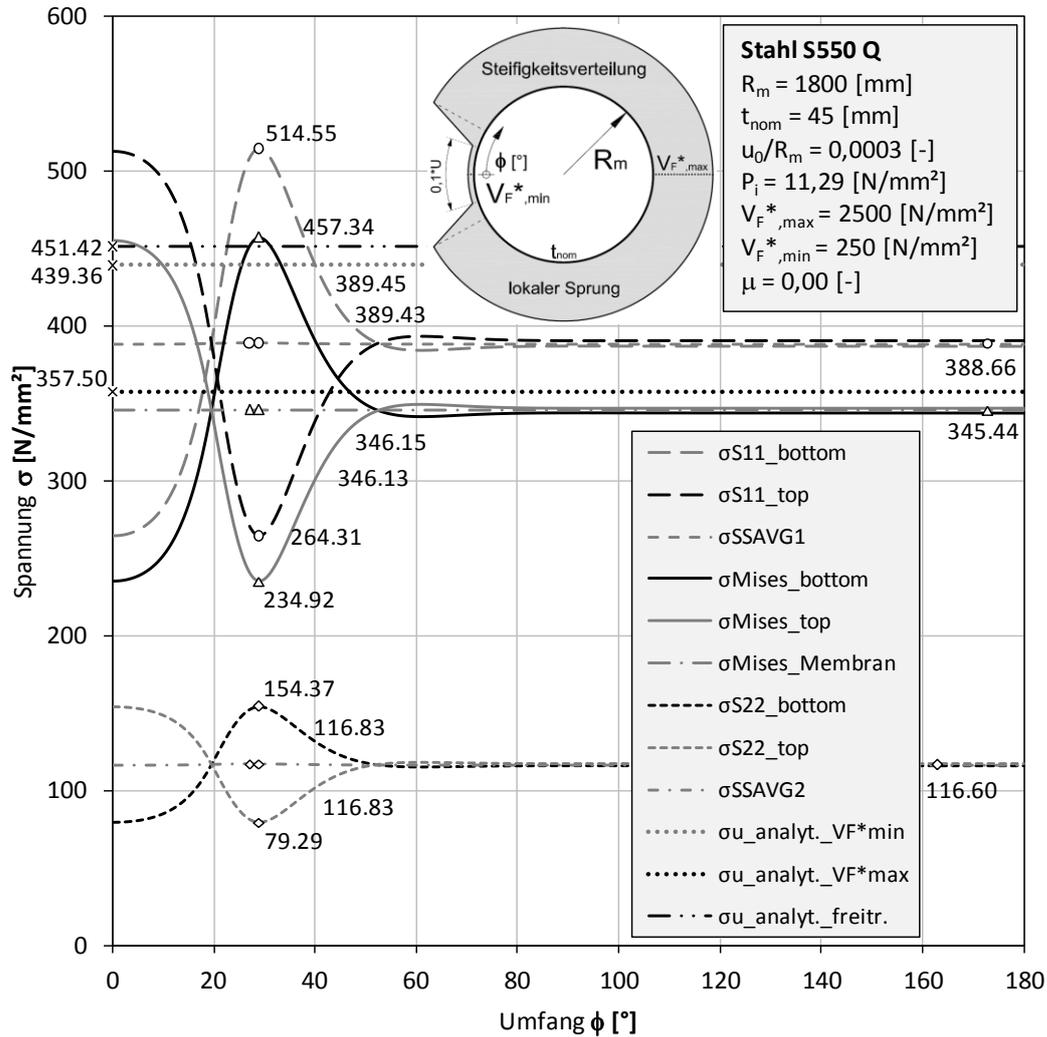


Abbildung 161A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

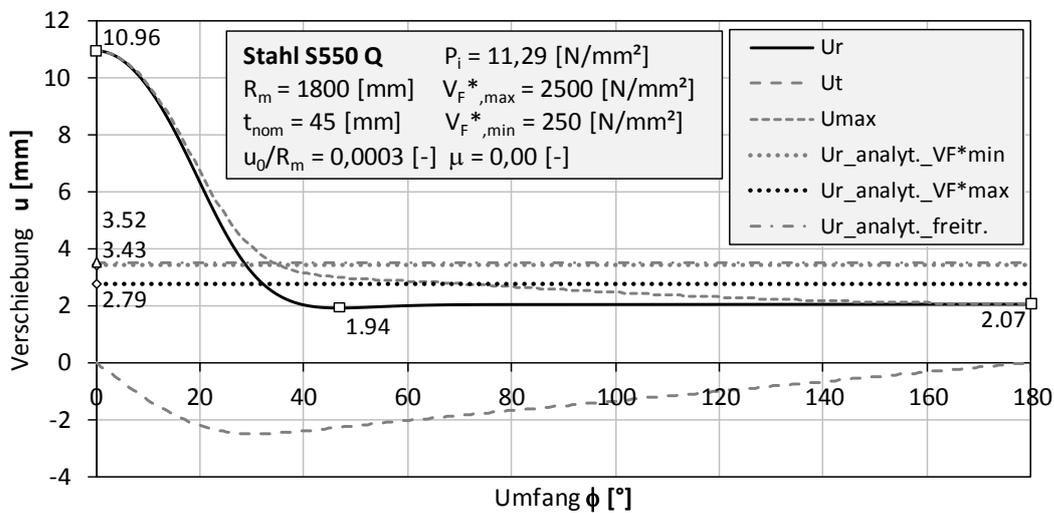


Abbildung 162A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.35 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

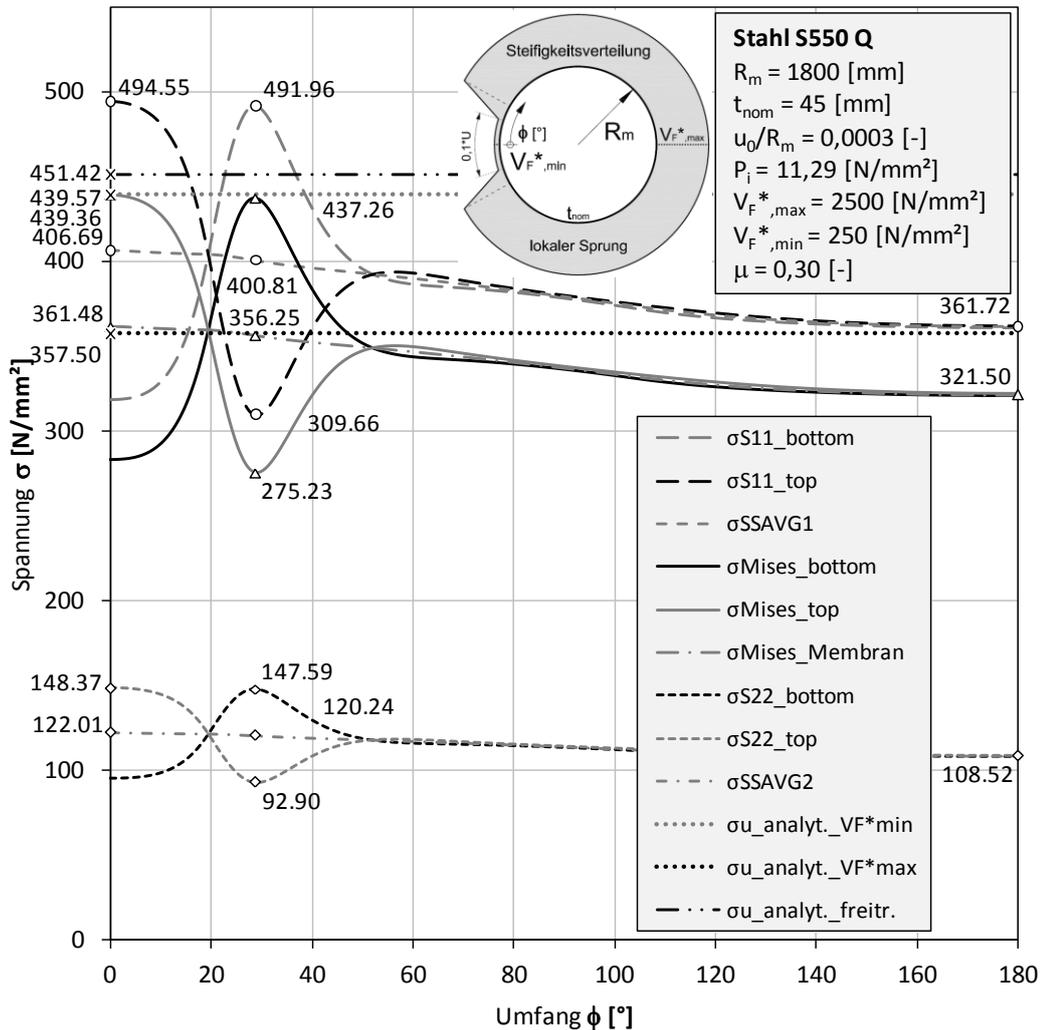


Abbildung 163A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

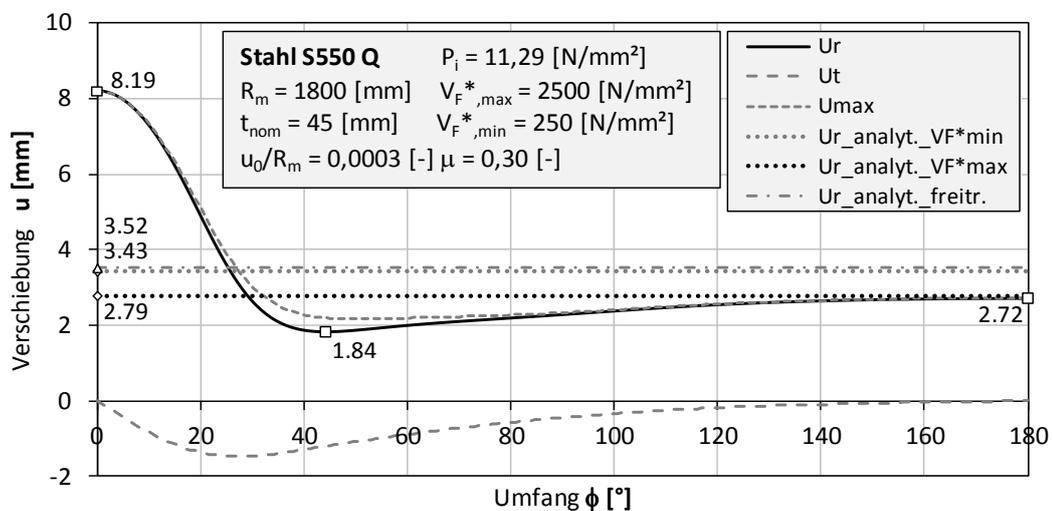


Abbildung 164A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.36 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

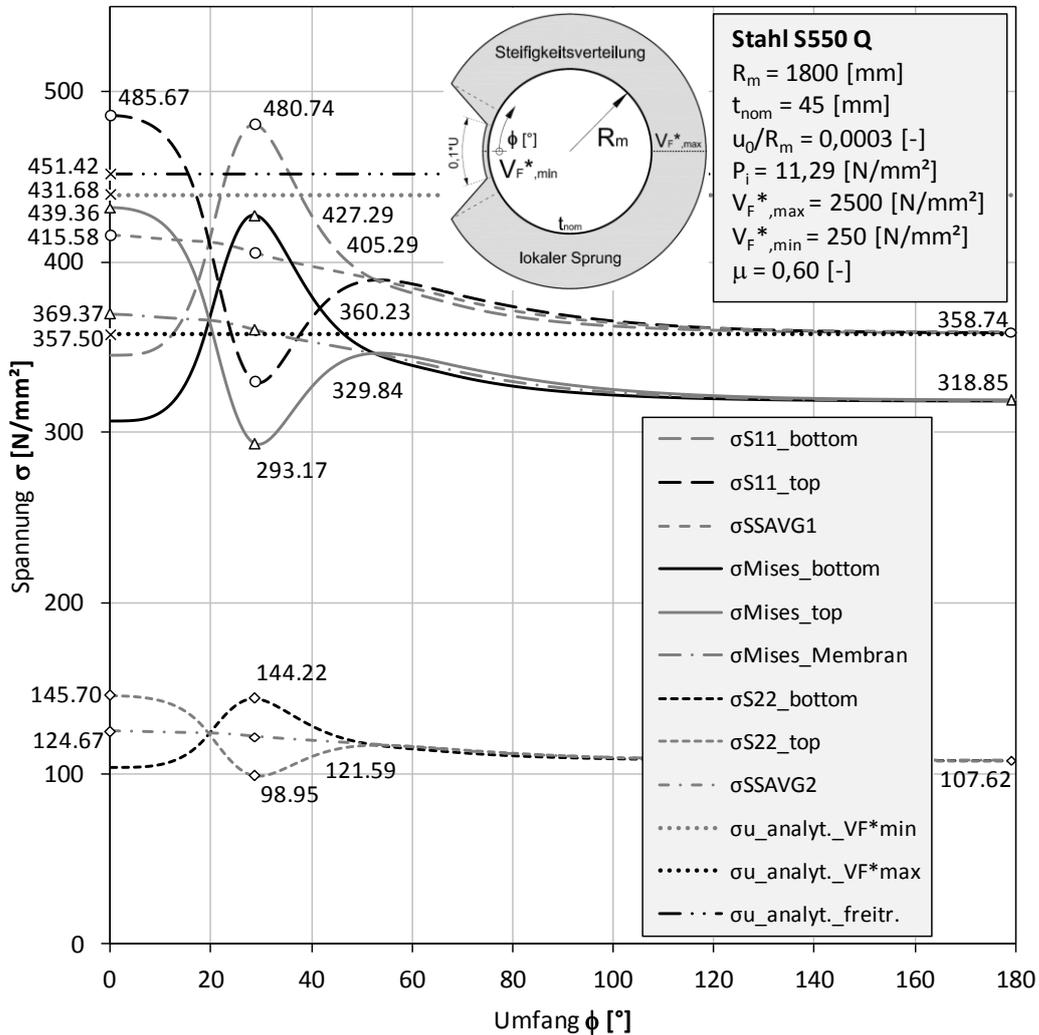


Abbildung 165A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

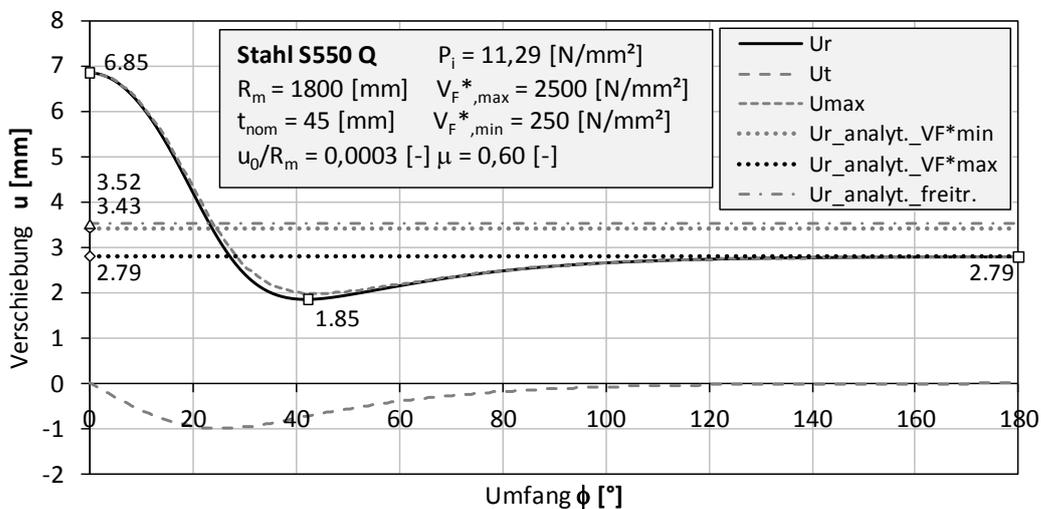


Abbildung 166A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR03\_P1129\_VF2500\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.37KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

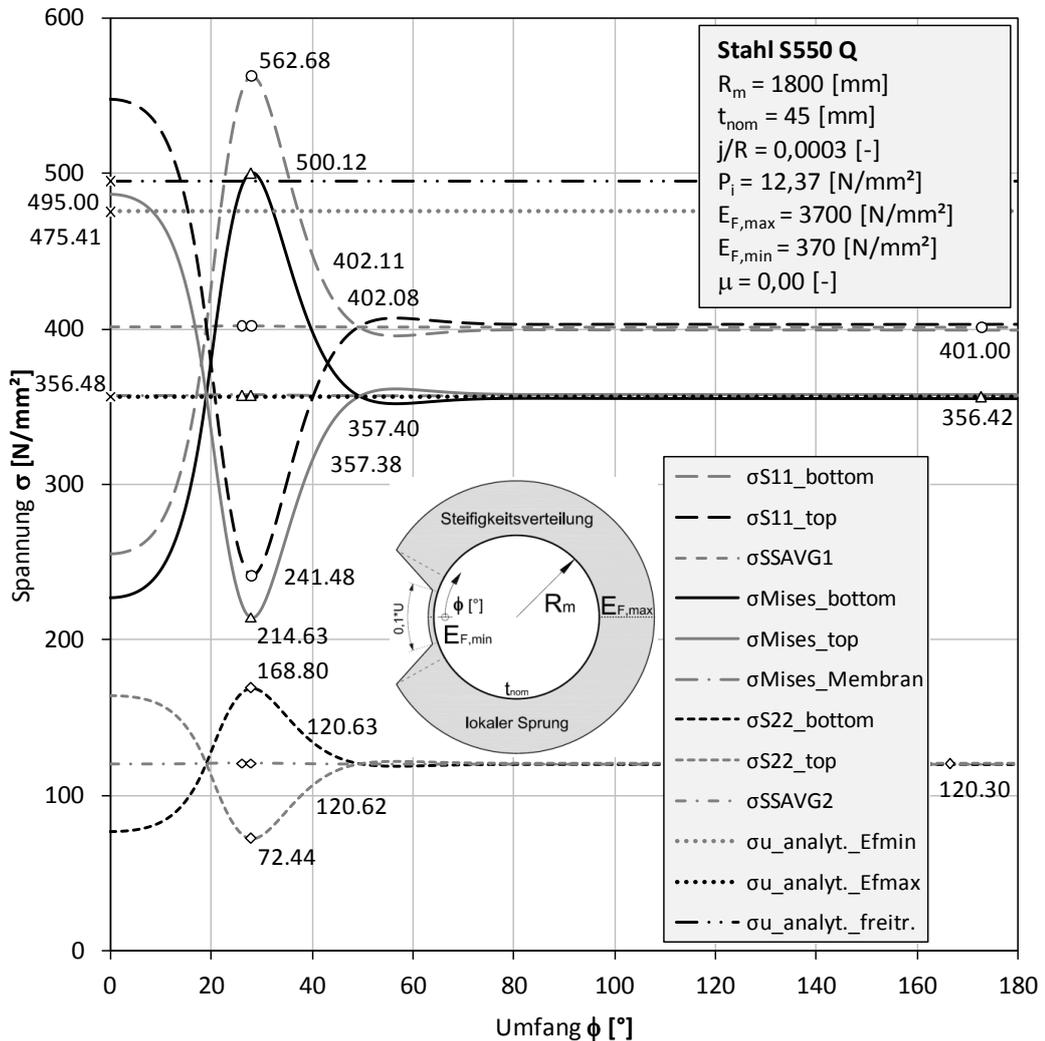


Abbildung 167A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

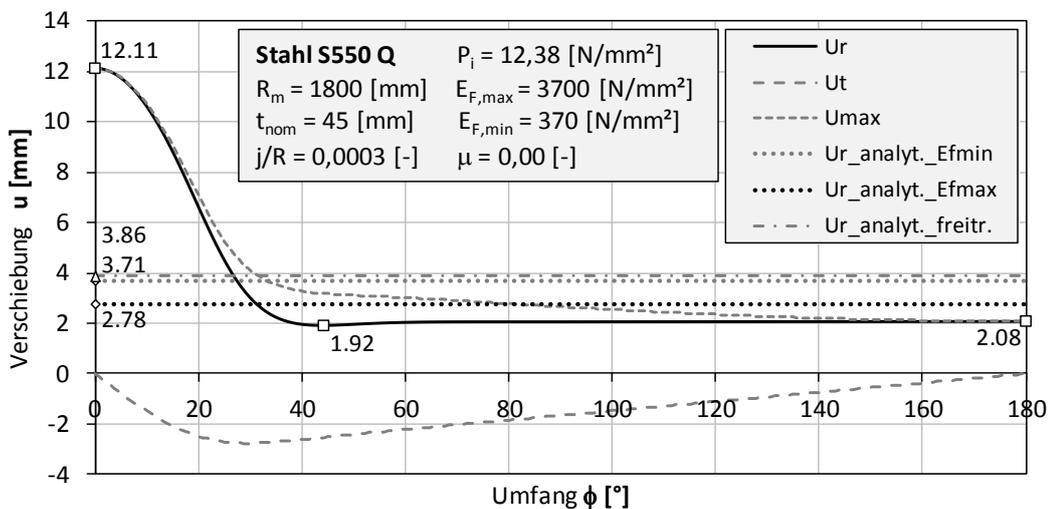


Abbildung 168A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.38 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

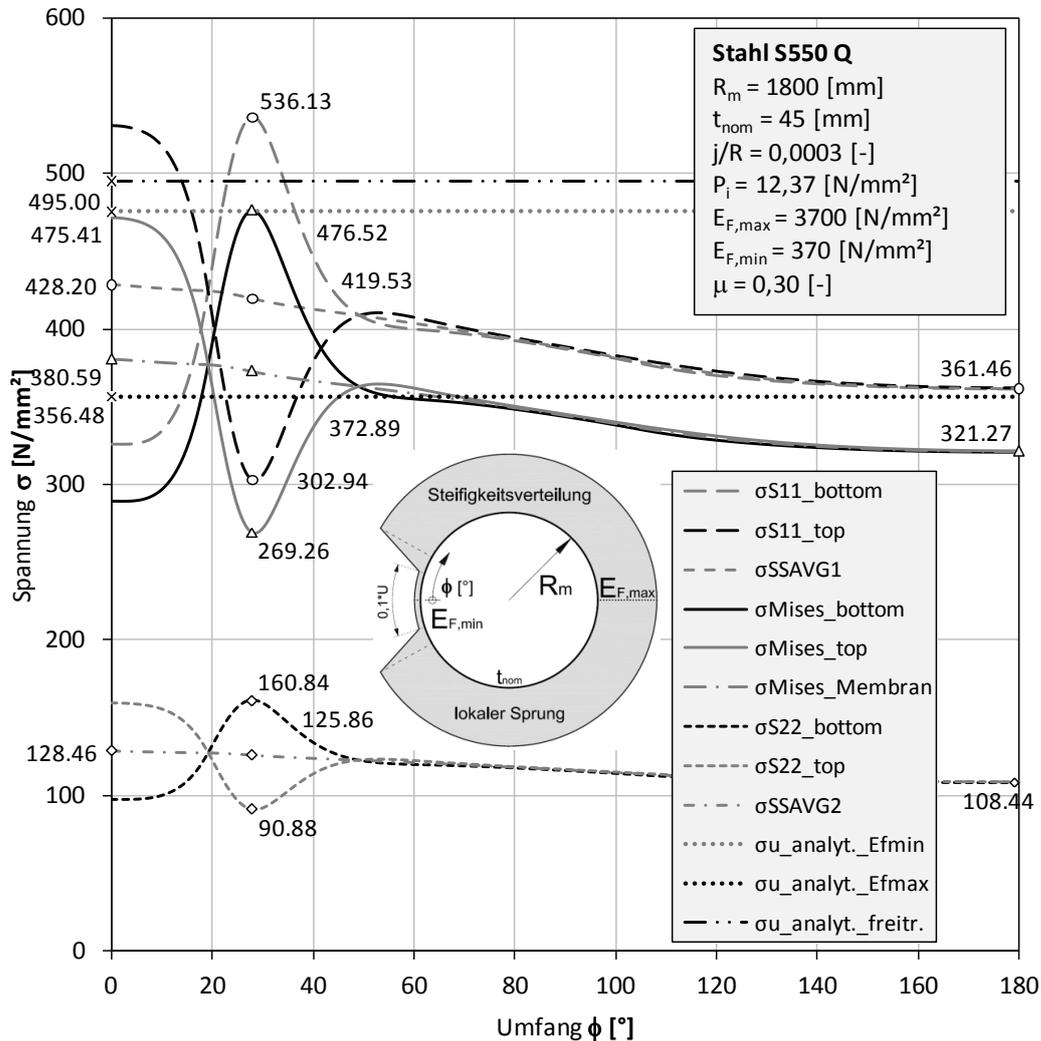


Abbildung 169A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

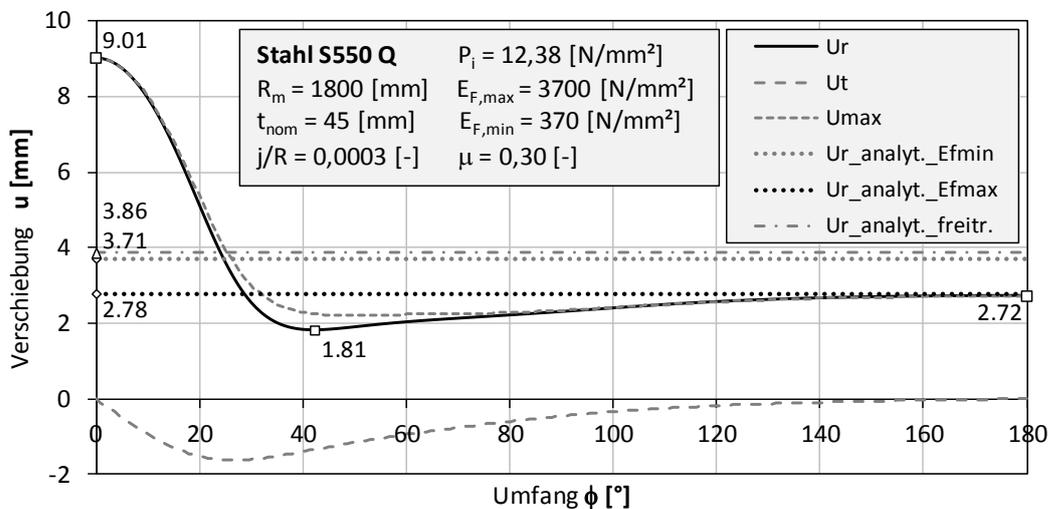


Abbildung 170A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.39 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

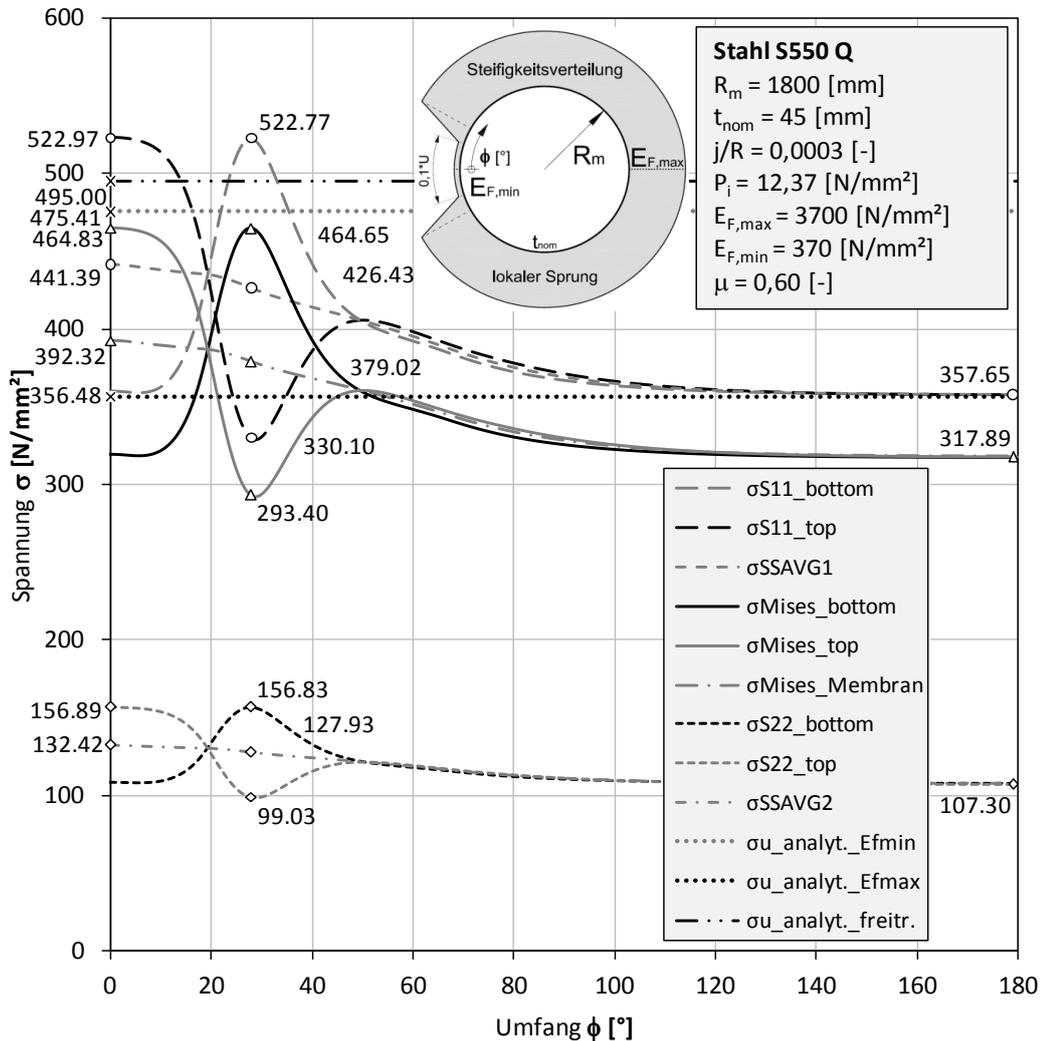


Abbildung 171A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

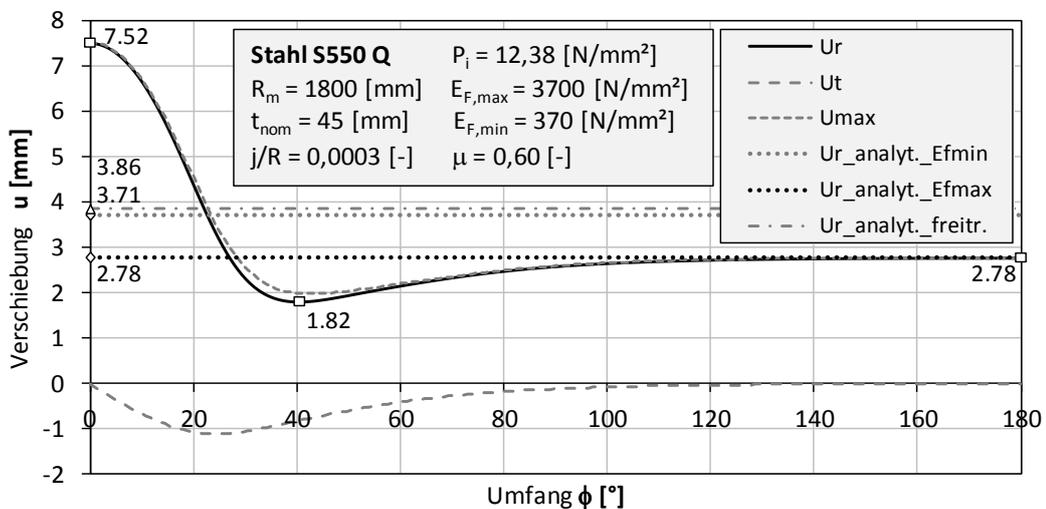


Abbildung 172A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF3700\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.40 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

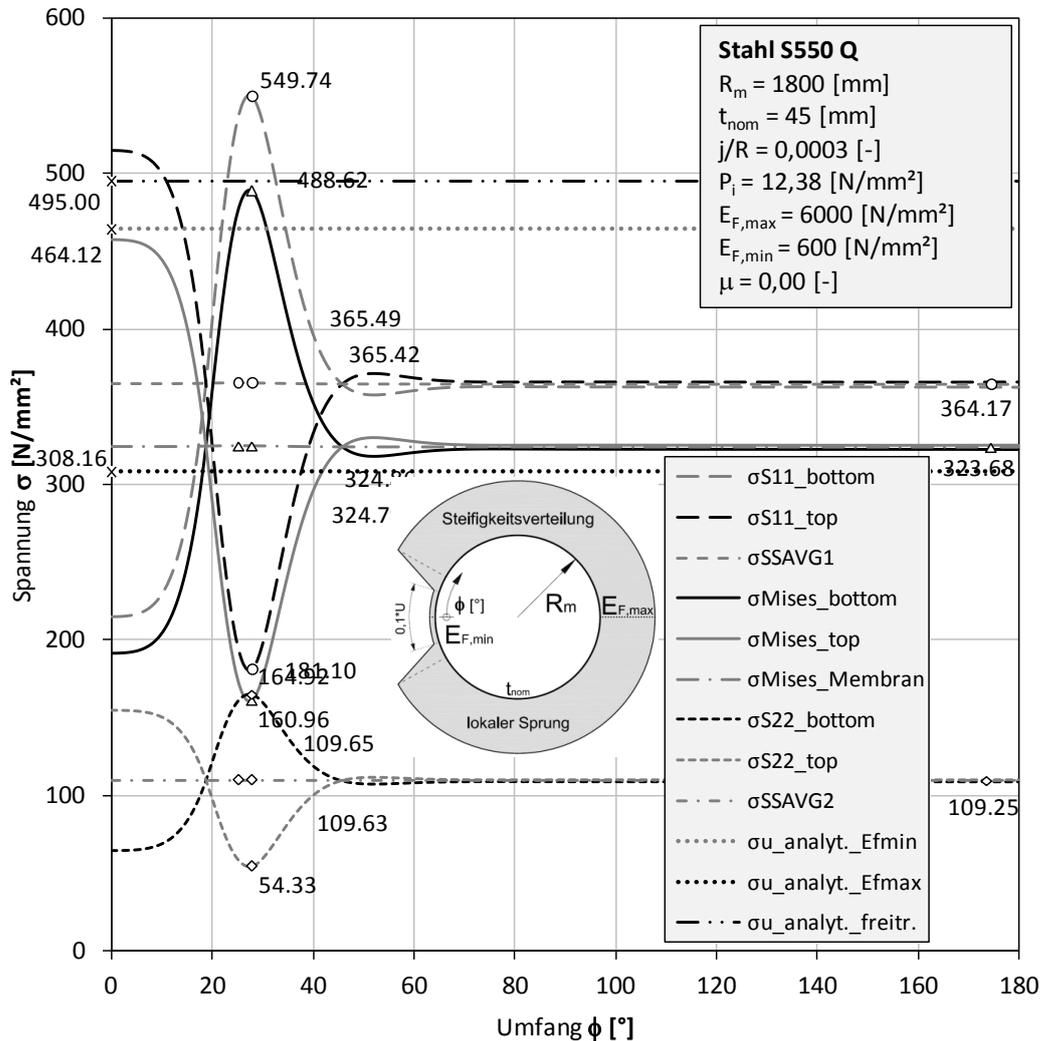


Abbildung 173A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

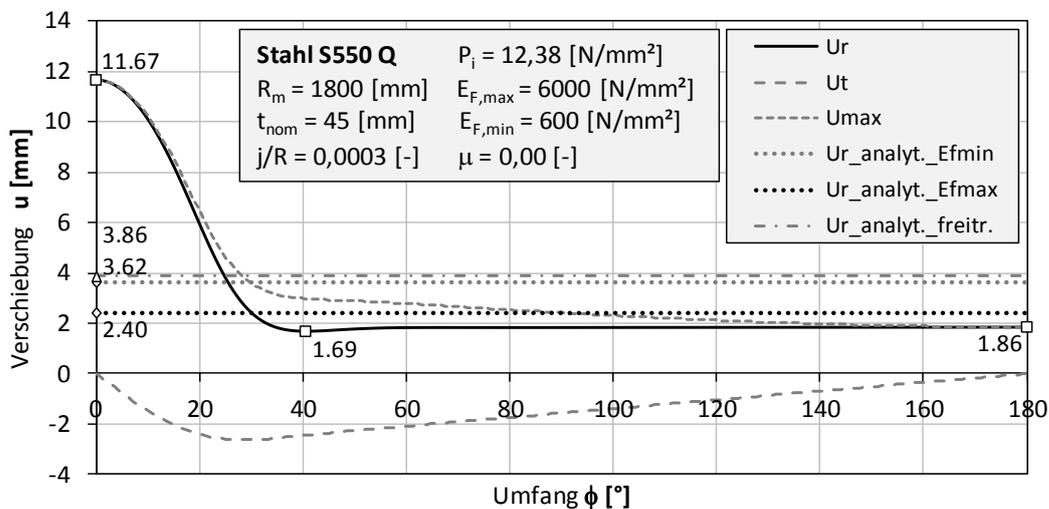


Abbildung 174A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.41 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

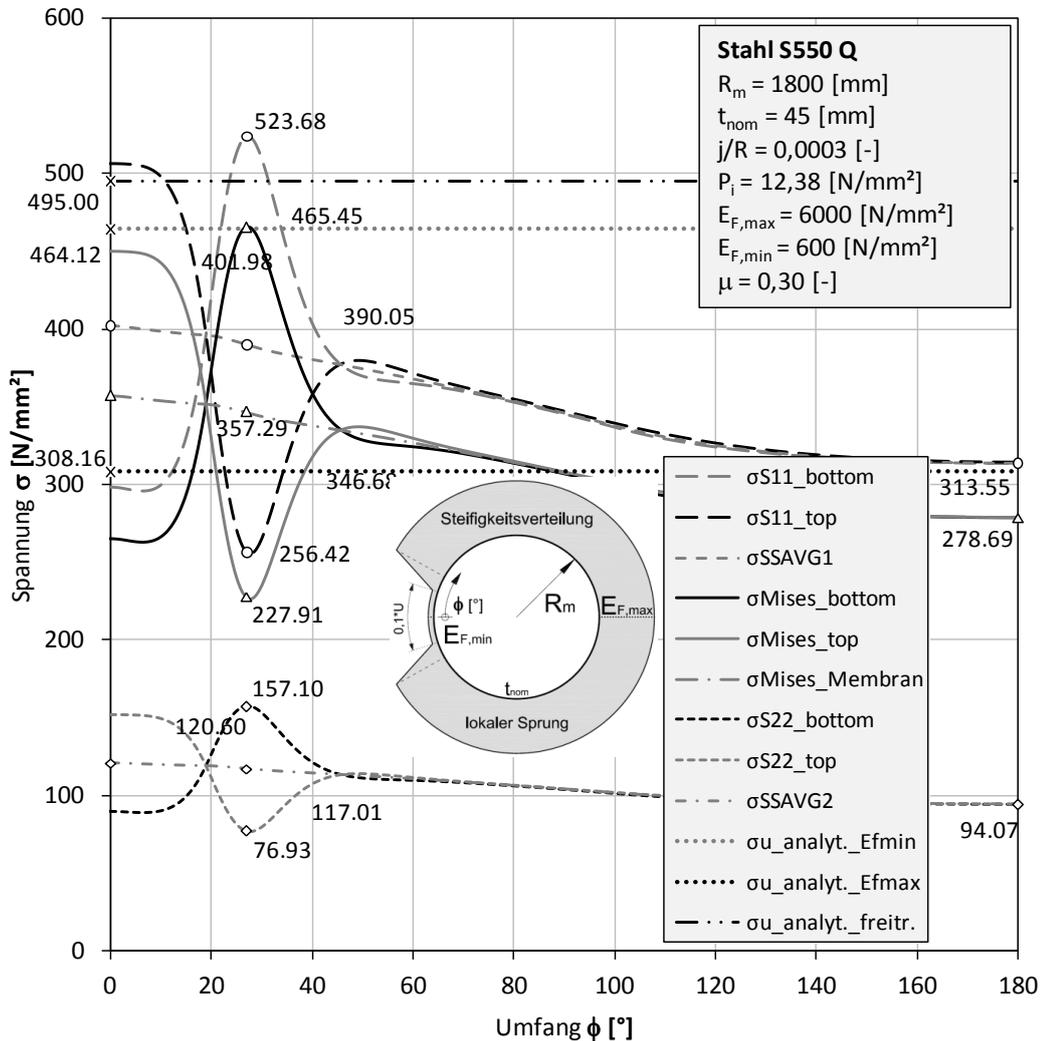


Abbildung 175A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

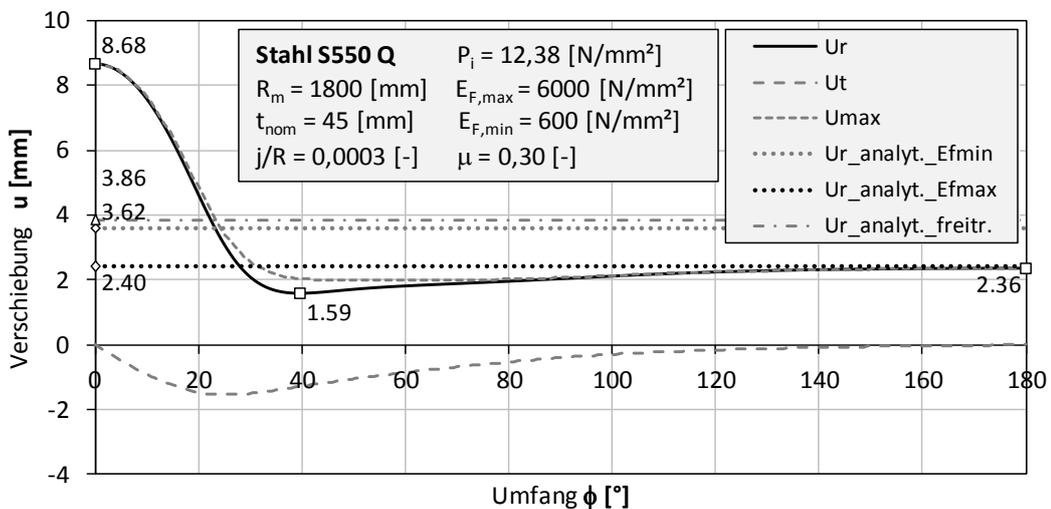


Abbildung 176A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.42 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

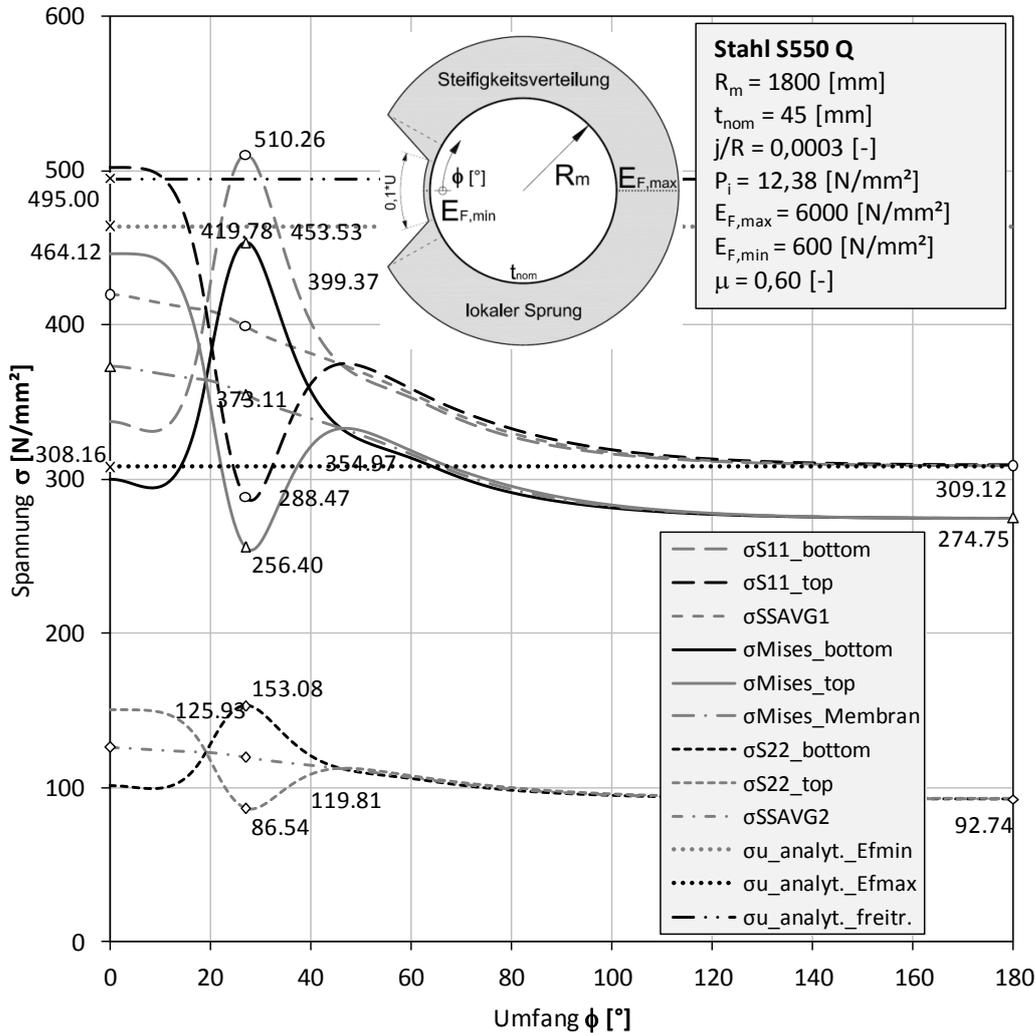


Abbildung 177A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

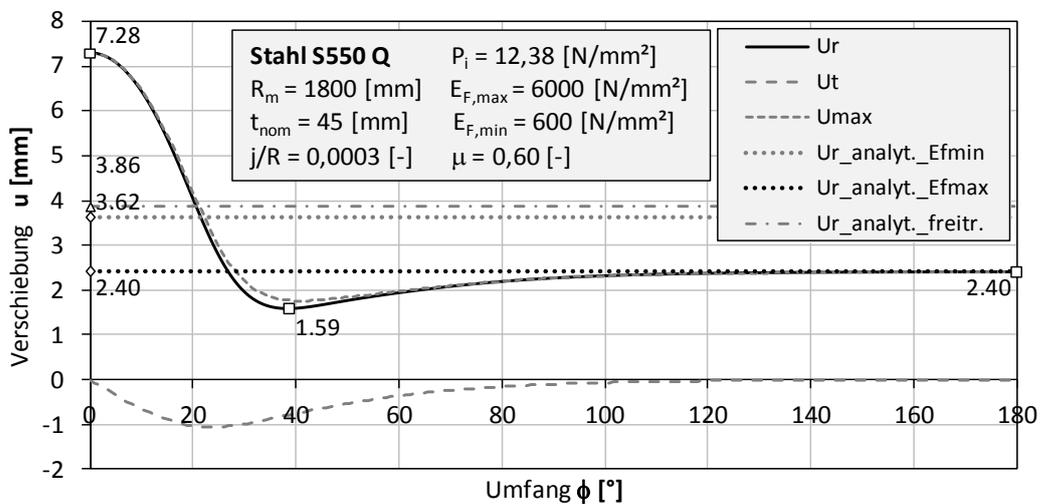


Abbildung 178A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF6000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

11.1.2.43 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

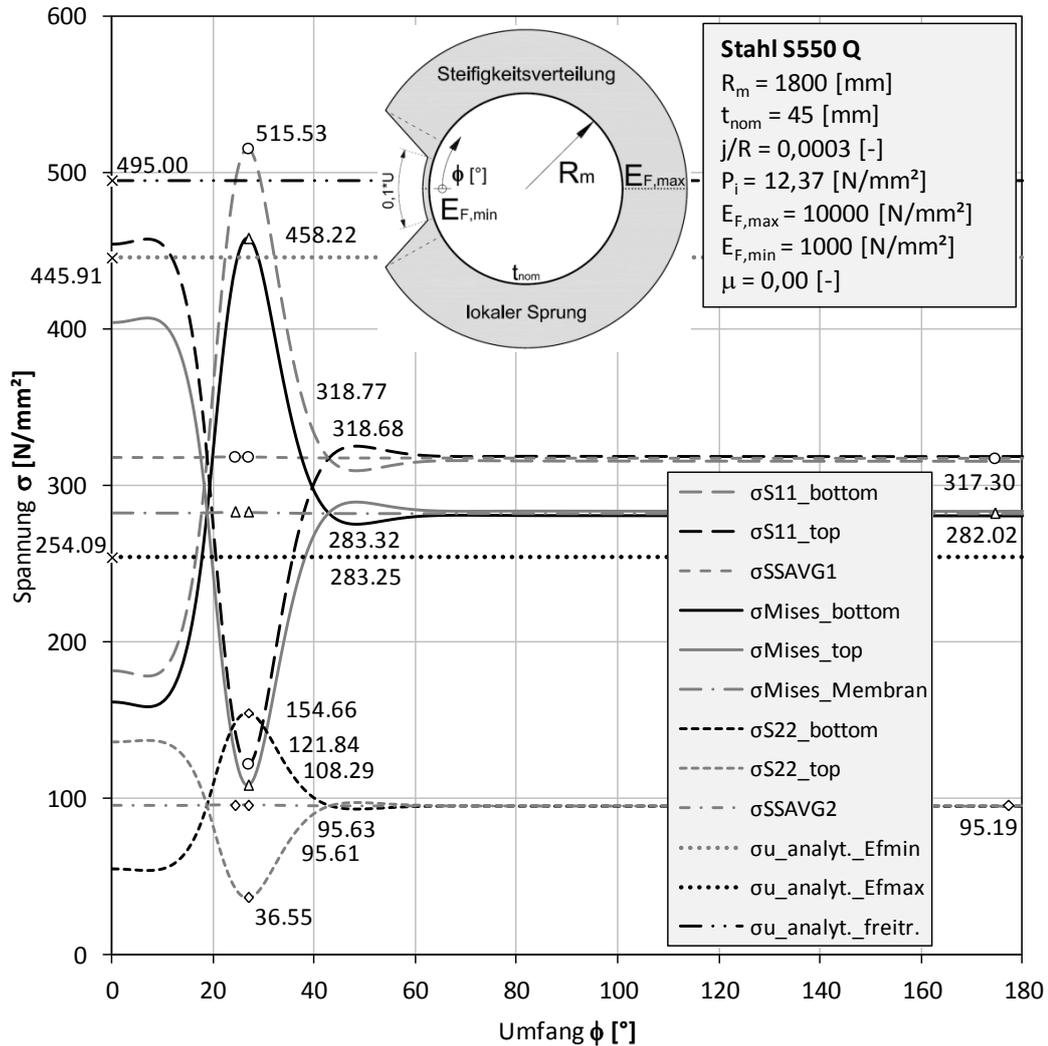


Abbildung 179A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

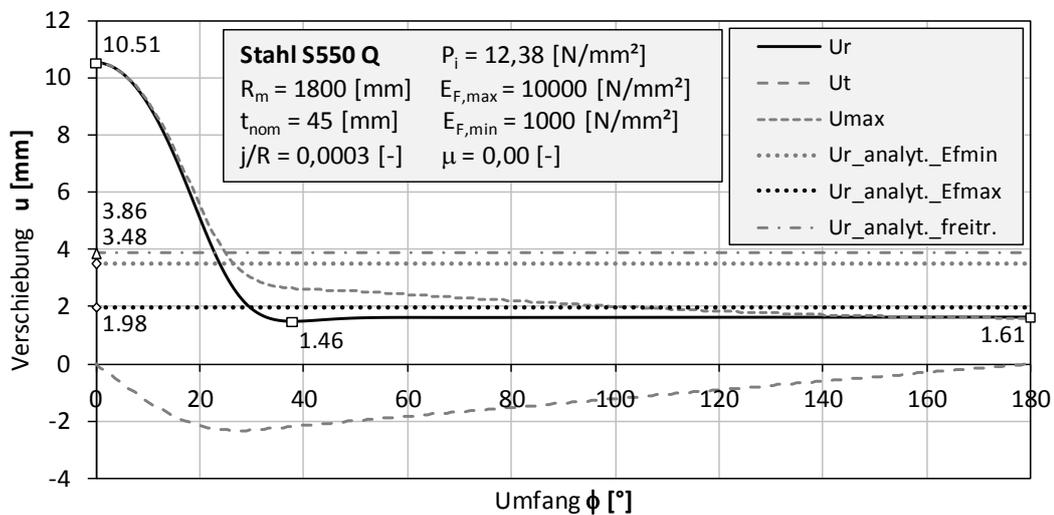


Abbildung 180A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue00

11.1.2.44 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

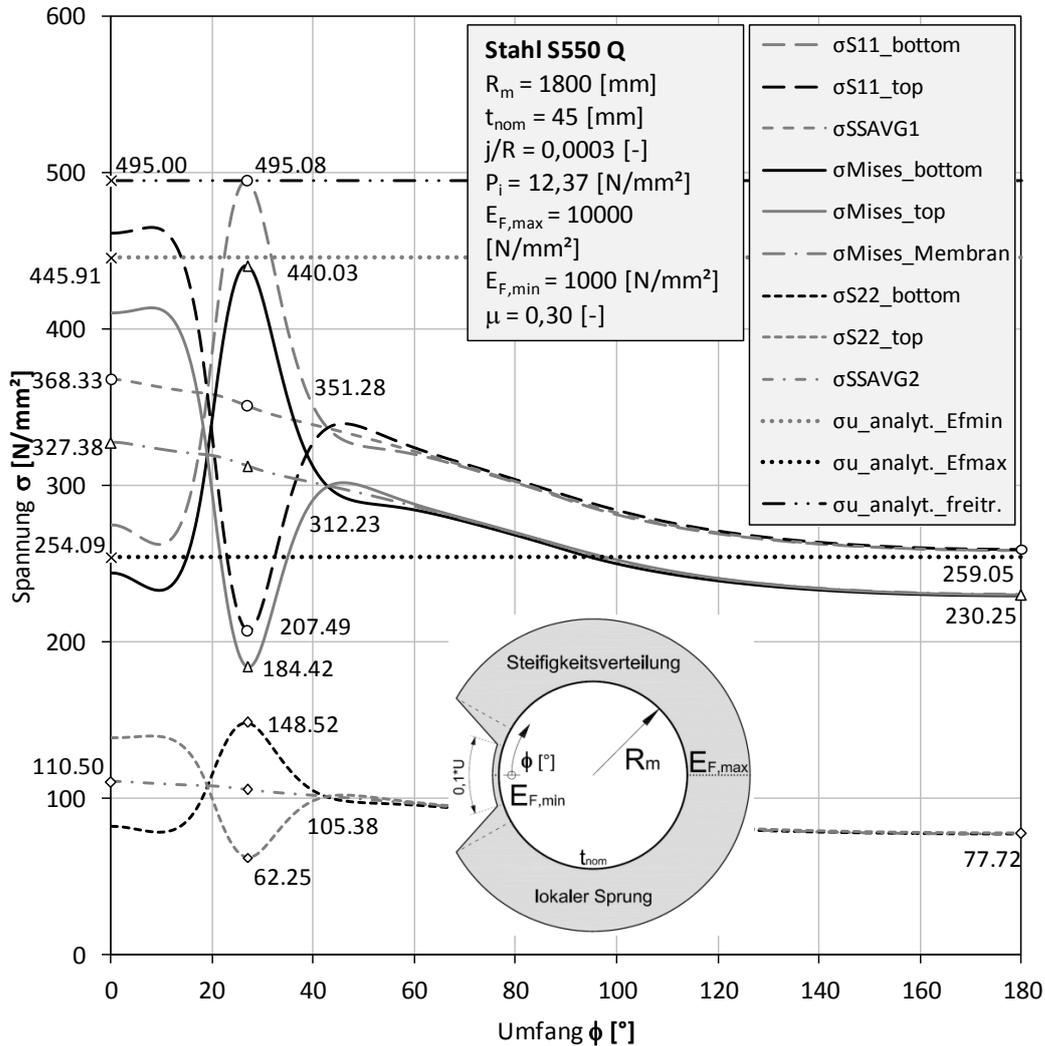


Abbildung 181A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

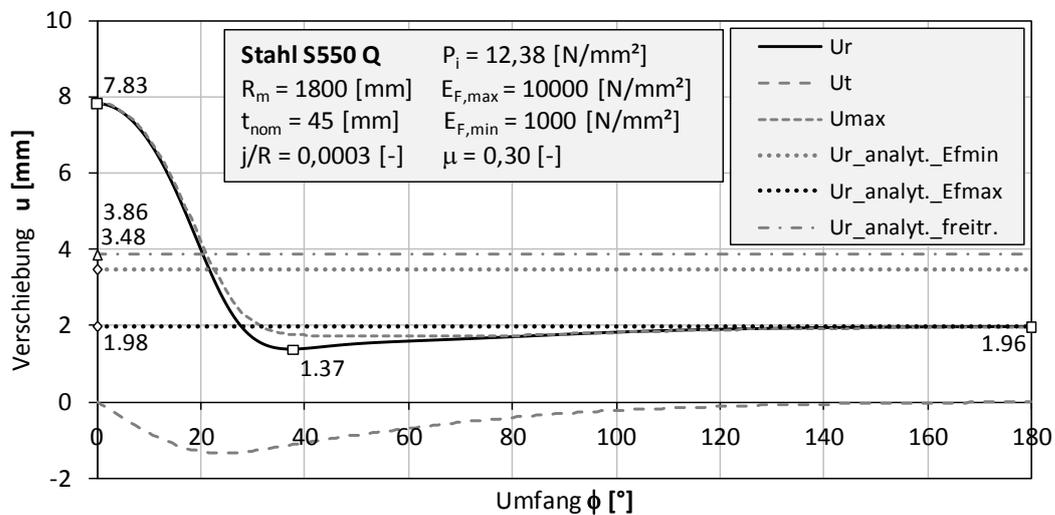


Abbildung 182A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue03

11.1.2.45 KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

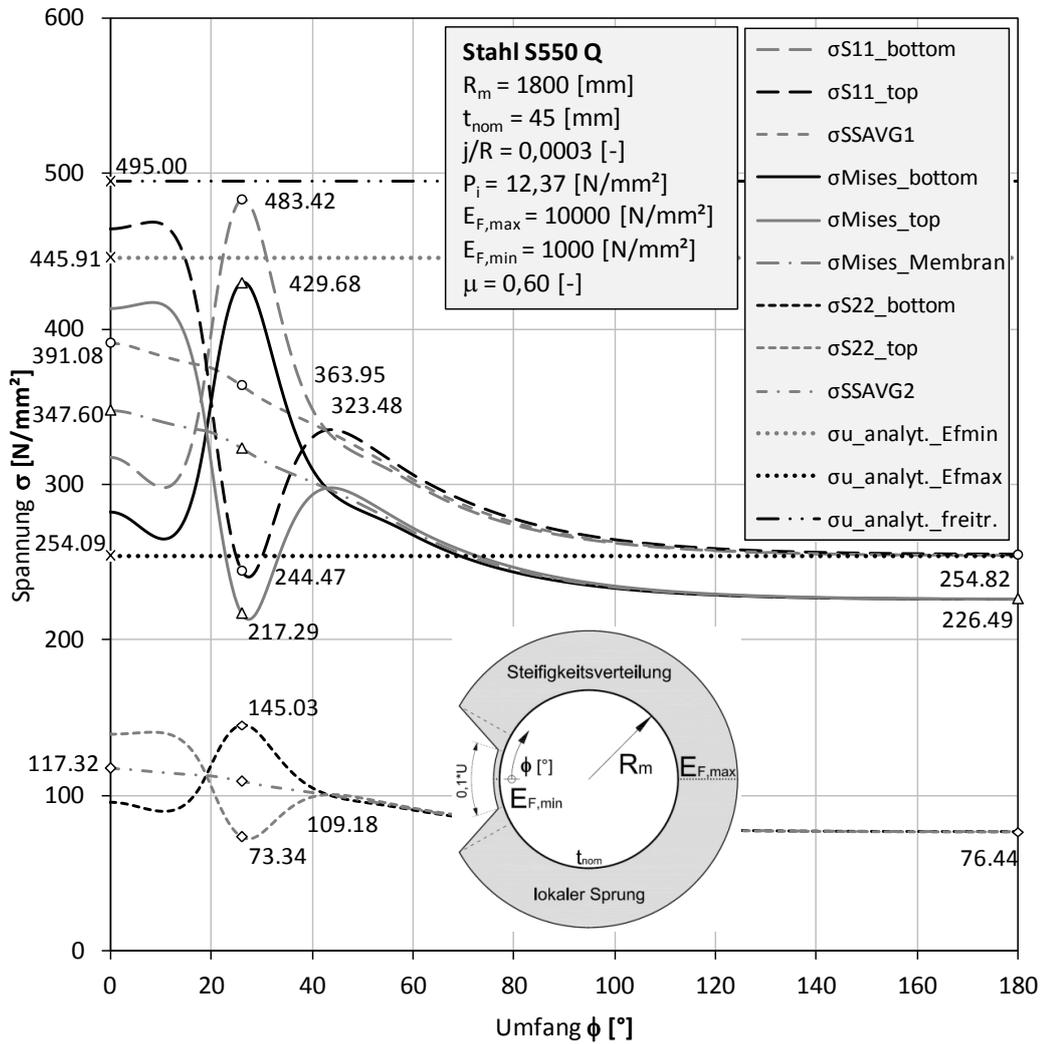


Abbildung 183A: Spannungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06

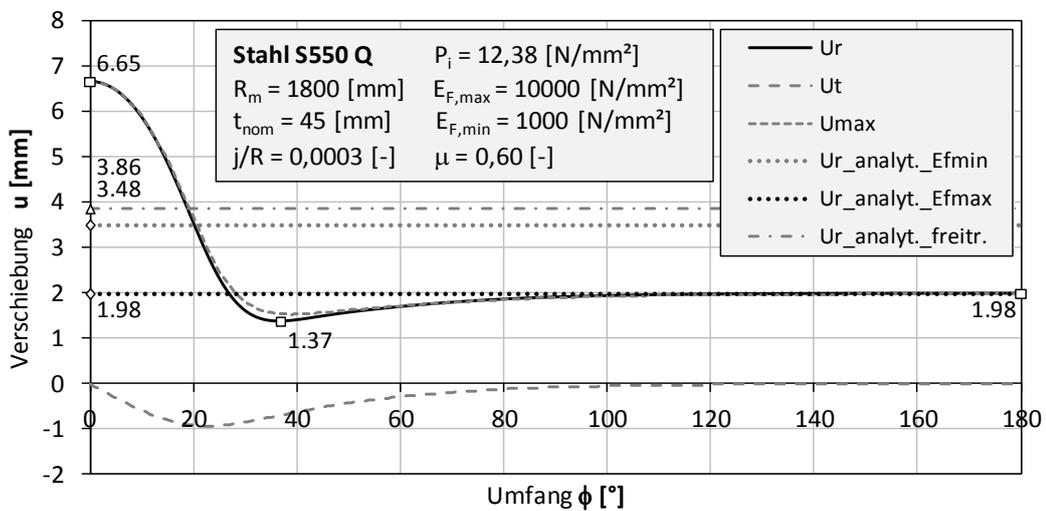


Abbildung 184A: Verschiebungen

KM\_S550\_D3600\_t45\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_jR03\_P1238\_EF10000\_lokaler\_Sprung\_10zu1\_mue06



## 11.2 ANHANG B: Abgrenzungsdiagramme Seeber/freitragend, $k_s = 0,60$ , $k_f = 0,90$

Abgrenzungsdiagramme Seeber/freitragend mit Sicherheitsbeiwerte:

Seeber:  $k_s = 0,60$  [-]

Freitragend:  $k_f = 0,90$  (0,60) [-]

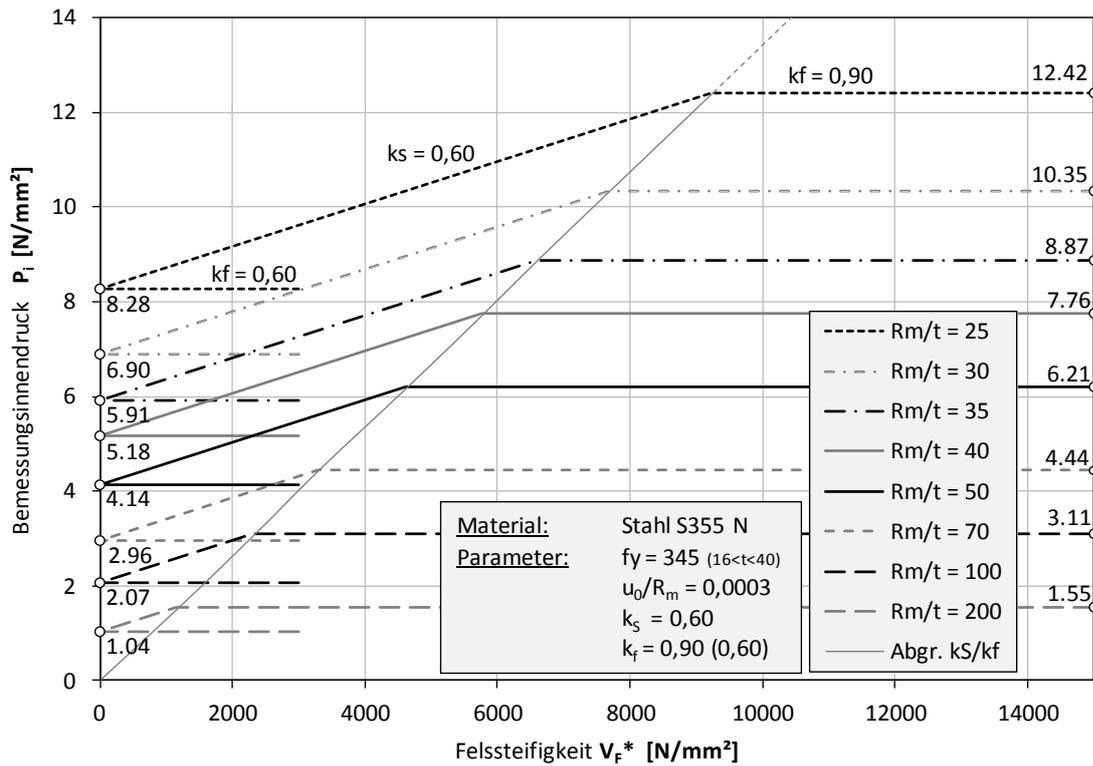


Abbildung 185B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

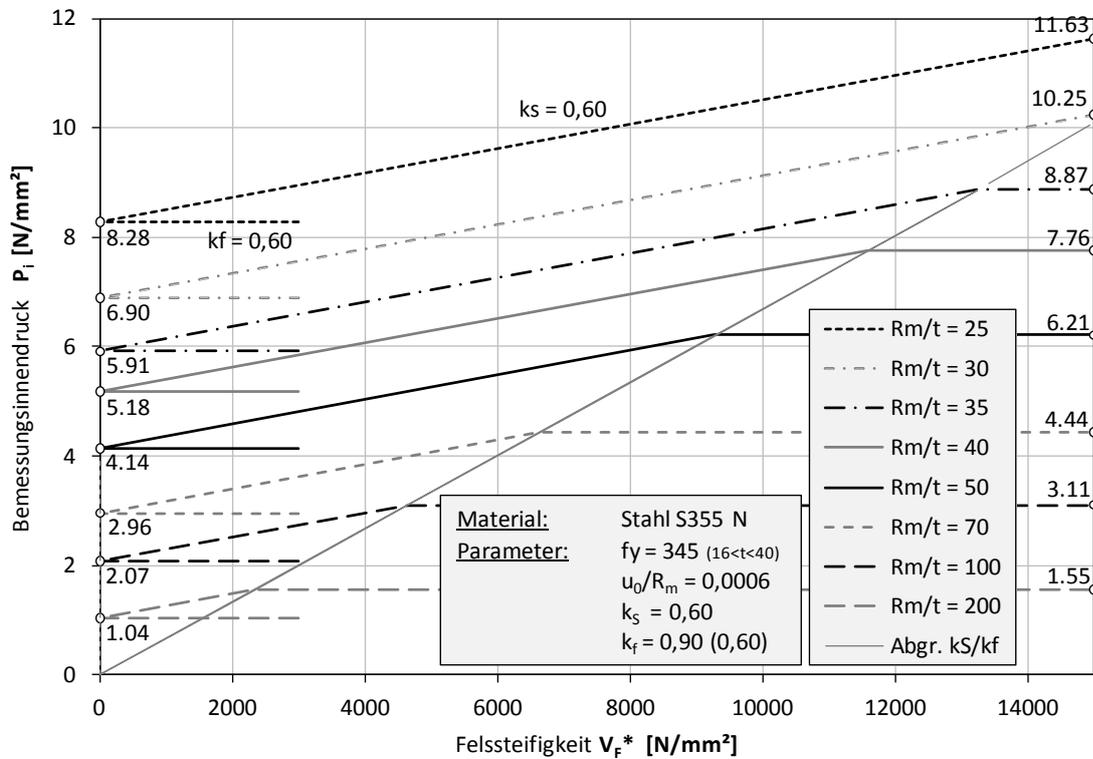


Abbildung 186B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

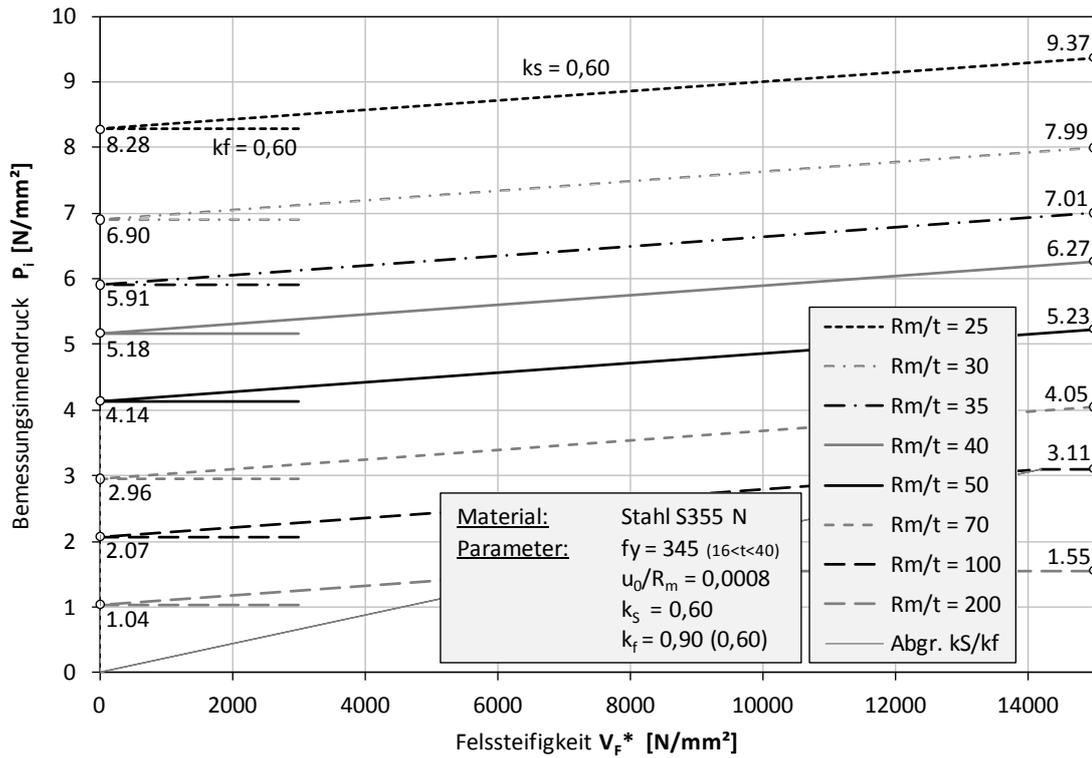


Abbildung 187B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S355 N,  $u_0/R_m = 0,0008$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

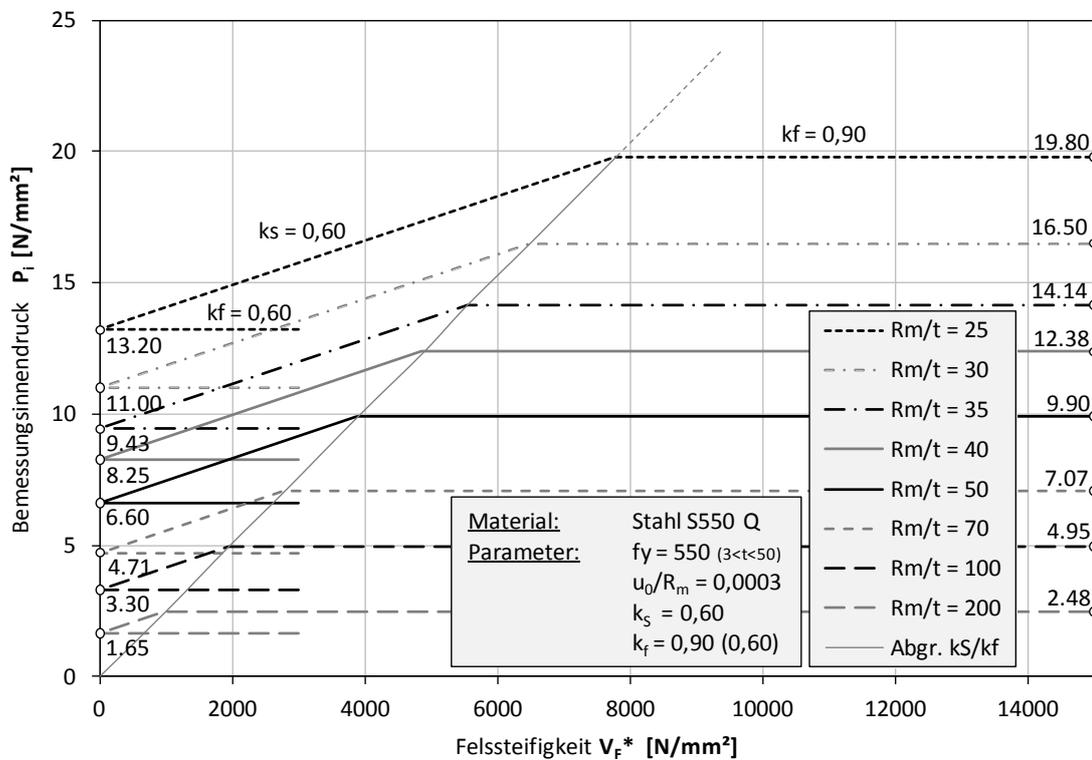


Abbildung 188B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

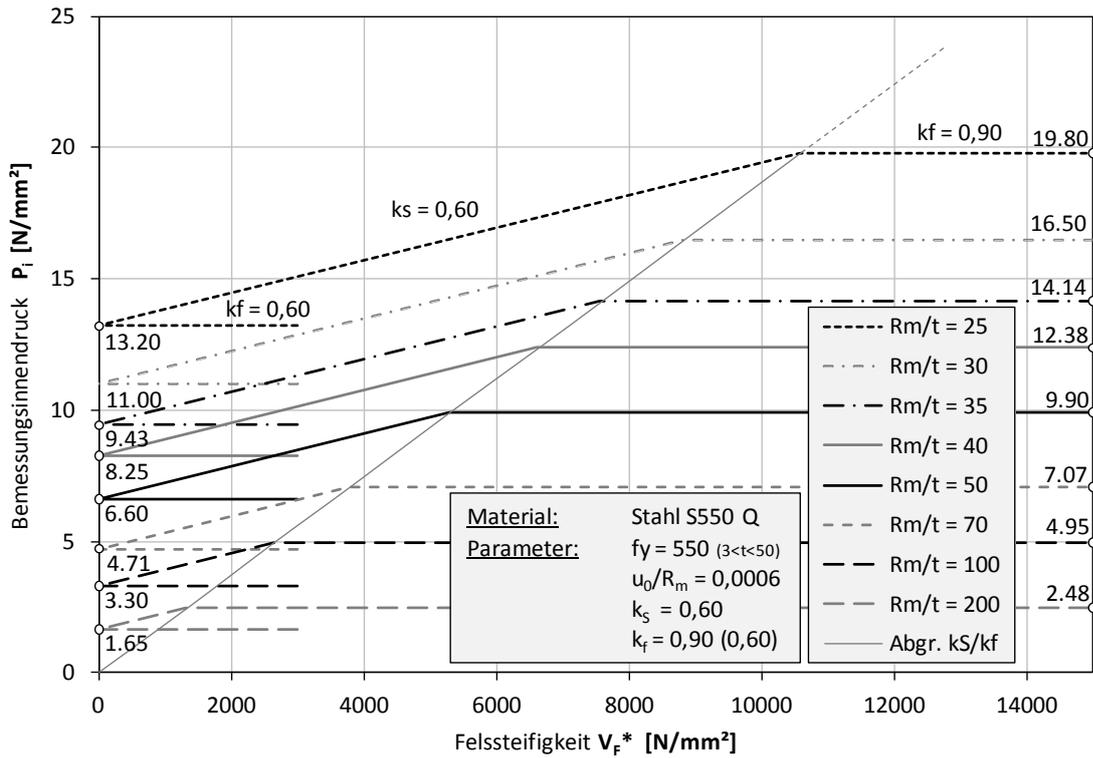


Abbildung 189B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_s=0,60$ ,  $k_f=0,90$

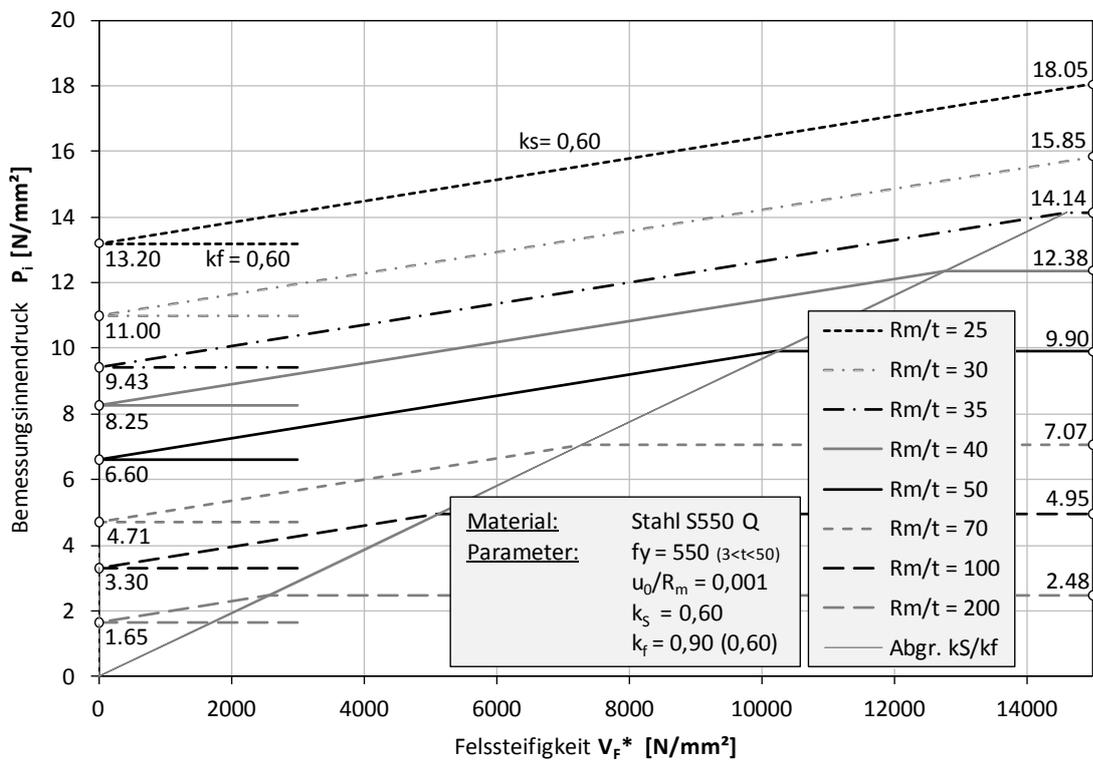


Abbildung 190B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S550 Q,  $u_0/R_m = 0,001$ ,  $k_s=0,60$ ,  $k_f=0,90$

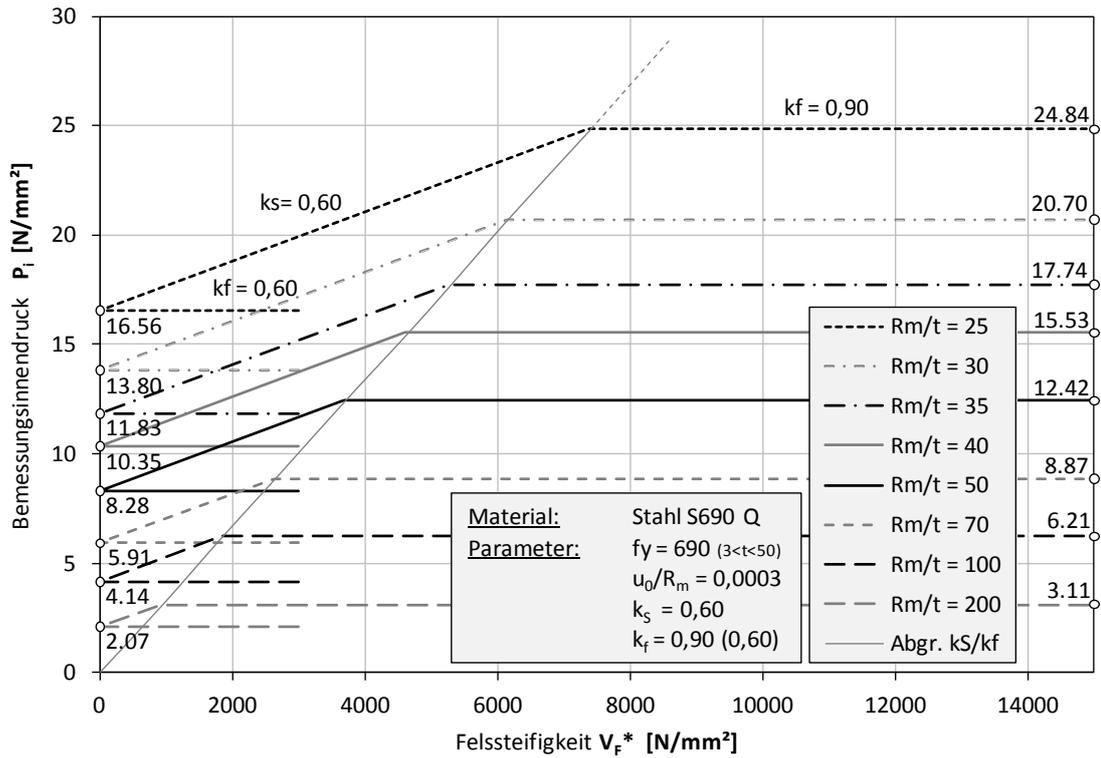


Abbildung 191B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,0003$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

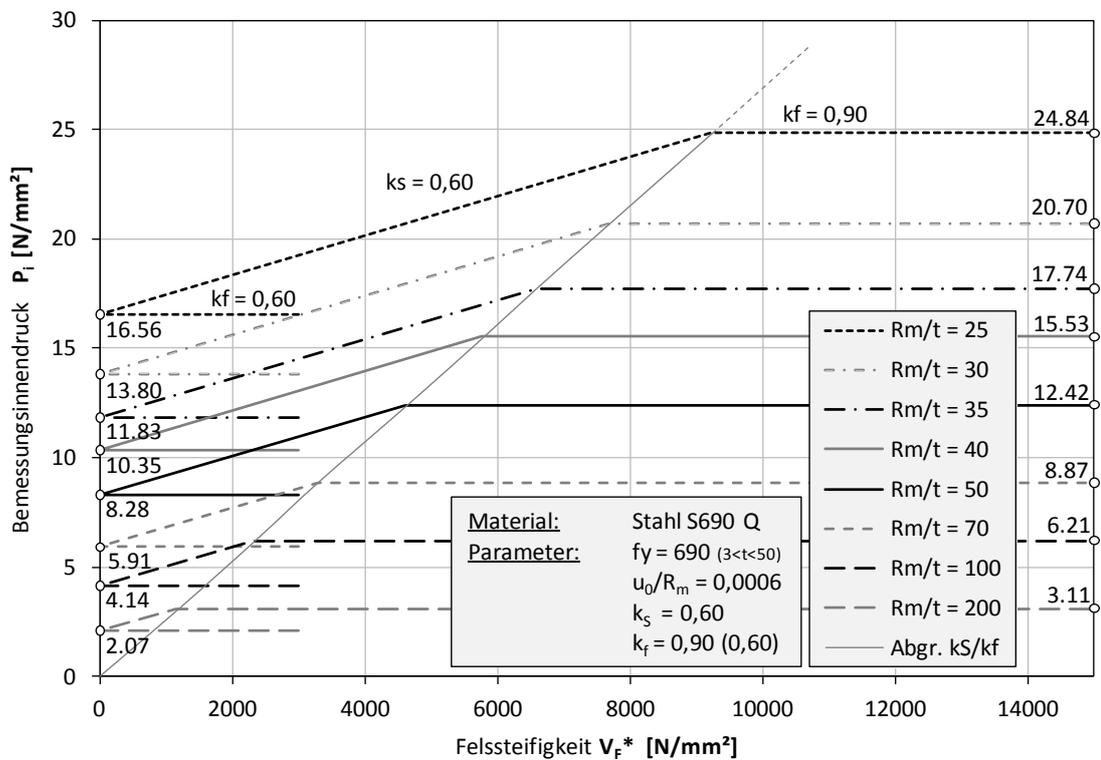


Abbildung 192B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,0006$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

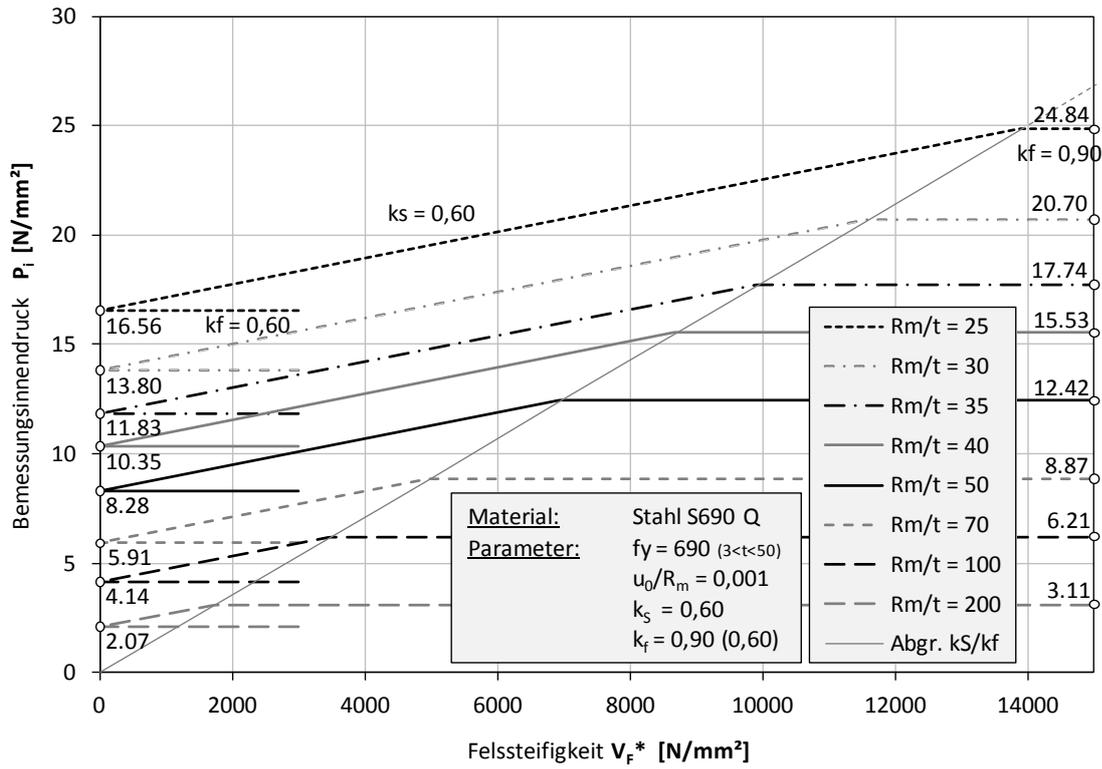


Abbildung 193B: Abgrenzungsdiagramm, Stahl S690 Q,  $u_0/R_m = 0,001$ ,  $k_s = 0,60$ ,  $k_f = 0,90$

## 11.3 ANHANG C: ABAQUS 6.10 Eingabeschemen

Anmerkung:

Wegen der 200 einzeln definierten Elementreihen und deren variabler Zuweisung der Eigenschaften wiederholen sich viele Eingabebefehle sehr oft, was die Eingabefiles sehr umfangreich macht. Aus Platzgründen werden solche Eingabeschemas im Anhang durch drei Zeilen mit jeweils drei Punkten in eckiger Klammer ([...]) zwischen den sich wiederholenden Eingabebefehlsblöcken abgekürzt. Dieser Platzhalter wird zwischen dem zweiten und dem vorletzten Teil des sich wiederholenden Befehles gesetzt und repräsentiert die entsprechenden Eingabebefehle dazwischen.

### 11.3.1 Federmodell

Das Eingabeschema des Federmodells wird an folgendem Beispiel gezeigt:

- S550\_D3600\_t20\_S4\_EL\_EF\_NLGEOM\_uR54\_P867\_VF5000\_lokaler\_Sprung\_10zu1

```
*Heading
** Job name: Halbschale name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
*Preprint, echo=NO, model=YES, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=StahlP
*NODE, System=C
1001, 1800., 0., 0.
1201, 1800., 180., 0.
1, 0., 0., 0.
*NGEN, Line=C, System=C, Nset=NsetHS1
1001, 1201, 1, 1, , , ,0., 0., 1.
*NCOPY, Old set=NsetHS1, New set=NsetHS9, Change number=8000, Shift
0., 0., -1000.
, , , , , ,
*NFILL
NsetHS1, NsetHS9, 8, 1000
*ELEMENT, type=S4
```

```

1001, 1001, 2001, 2002, 1002
*ELGEN, Elset=El_S4
1001, 200, 1, 1, 8, 1000, 1000, 1, ,
*Nset, nset=Nset_Mer0, generate
2001, 8001, 1000
*Nset, nset=Nset_Mer180, generate
2201, 8201, 1000
*Nset, nset=Nset_circl_z+, generate
1002, 1200, 1
*Nset, nset=Nset_circl_z-, generate
9002, 9200, 1
*Nset, nset=Nset_Ecken
1001, 1201, 9001, 9201
*Elset, elset=El_S4_all, generate
1001, 1201, 1
2001, 2201, 1
3001, 3201, 1
4001, 4201, 1
5001, 5201, 1
6001, 6201, 1
7001, 7201, 1
8001, 8201, 1
9001, 9201, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=Panzerung_Innenseite
El_S4_all, SNEG
** Section: Stahlp_Shell
*Shell Section, elset=El_S4_all, material="Stahl S550 EE"
20., 7
*End Part
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=StahIP_Assembly, part=StahIP
*End Instance
**
*Orientation, name="Datum csys-1", system=CYLINDRICAL
0., 0., 0., 0., 0., 1.
1, 0.
**
**-----
**

```

## \*PARAMETER

\*\*

u0 = 0.54  
u0p = 1000.54  
C1 = 369078.08  
C2 = 738156.17  
[...]  
[...]  
[...]  
C200 = 7381561.69  
C201 = 3690780.84  
RC1 = 184539.04  
RC2 = 369078.08  
[...]  
[...]  
[...]  
RC200 = 3690780.84  
RC201 = 1845390.42

\*\*

\*\*-----

\*\*

\*Element, type=Spring1, elset="ZE"

999998 , StahIP\_Assembly.1100

999999 , StahIP\_Assembly.9100

\*Spring, elset="ZE", orientation="Datum csys-1"

2

0.01

\*Element, type=Spring1, elset="RE1"

100101 , StahIP\_Assembly.1001

100109 , StahIP\_Assembly.9001

\*Element, type=Spring1, elset="E1"

100102 , StahIP\_Assembly.2001

100103 , StahIP\_Assembly.3001

100104 , StahIP\_Assembly.4001

100105 , StahIP\_Assembly.5001

100106 , StahIP\_Assembly.6001

100107 , StahIP\_Assembly.7001

100108 , StahIP\_Assembly.8001

\*Spring, elset="RE1", orientation="Datum csys-1", nonlinear

1

0 , 0

0 , &lt;u0&gt;

&lt;RC1&gt;, &lt;u0p&gt;

```

*Spring, elset="E1", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<C1>, <u0p>
*Element, type=Spring1, elset="RE2"
100201      , StahlP_Assembly.1002
100209      , StahlP_Assembly.9002
*Element, type=Spring1, elset="E2"
100202      , StahlP_Assembly.2002
100203      , StahlP_Assembly.3002
100204      , StahlP_Assembly.4002
100205      , StahlP_Assembly.5002
100206      , StahlP_Assembly.6002
100207      , StahlP_Assembly.7002
100208      , StahlP_Assembly.8002
*Spring, elset="RE2", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<RC2>, <u0p>
*Spring, elset="E2", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<C2>, <u0p>
[...]
[...]
[...]
*Element, type=Spring1, elset="RE200"
120001      , StahlP_Assembly.1200
120009      , StahlP_Assembly.9200
*Element, type=Spring1, elset="E200"
120002      , StahlP_Assembly.2200
120003      , StahlP_Assembly.3200
120004      , StahlP_Assembly.4200
120005      , StahlP_Assembly.5200
120006      , StahlP_Assembly.6200
120007      , StahlP_Assembly.7200
120008      , StahlP_Assembly.8200
*Spring, elset="RE200", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0

```

```

0          ,          <u0>
<RC200>,          <u0p>
*Spring, elset="E200", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<C200>,<u0p>
*Element, type=Spring1, elset="RE201"
120101     , StahIP_Assembly.1201
120109     , StahIP_Assembly.9201
*Element, type=Spring1, elset="E201"
120102     , StahIP_Assembly.2201
120103     , StahIP_Assembly.3201
120104     , StahIP_Assembly.4201
120105     , StahIP_Assembly.5201
120106     , StahIP_Assembly.6201
120107     , StahIP_Assembly.7201
120108     , StahIP_Assembly.8201
*Spring, elset="RE201", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<RC201>,          <u0p>
*Spring, elset="E201", orientation="Datum csys-1", nonlinear
1
0          ,          0
0          ,          <u0>
<C201>,<u0p>
*End Assembly
**
** -----
**
** MATERIALS
**
*Material, name="Stahl S550 EE"
*Elastic
210000., 0.3
*Material, name="Stahl S550 EP"
*Elastic
210000., 0.3
*Plastic
540.,0.
**

```

```

** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_circl_z+, ZSYMM
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Mer0, YSYMM
** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Mer180, YSYMM
** Name: BC-4 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_circl_z-, ZSYMM
** Name: BC-5 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Ecken, 2, 2
StahIP_Assembly.Nset_Ecken, 3, 3
StahIP_Assembly.Nset_Ecken, 4, 4
StahIP_Assembly.Nset_Ecken, 5, 5
StahIP_Assembly.Nset_Ecken, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step 1
**
*Step, name="Step 1", nlgeom=YES
Wasserdruck
*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.05
**
** LOADS
**
** Name: Wasserdruck Type: Pressure
*Dload
StahIP_Assembly.Panzerung_Innenseite, P, 8.67
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field

```

\*Node Output

RF, U

\*Element Output, directions=YES

MISESMAX, PEEQ, S, SSAVG

\*\*

\*End Step

### 11.3.1 Kontaktmodell

Das Eingabeschema des Kontaktmodells wird anhand einer plastischen Rechnung an folgendem Beispiel gezeigt:

- KM\_S550\_D3600\_t9\_S4\_PL\_EF\_NLGEOM\_u0R03\_P6000\_VF4000\_Linear\_1  
0zu1\_mue03

\*Heading

\*\* Job name: Panzerung\_Reibung name: Model-1

\*\* Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1

\*Preprint, echo=NO, model=YES, history=NO, contact=NO

\*\*

\*\* PARTS

\*\*

\*Part, name=StahlP

\*NODE, System=C

11001, 1800., 0., 0.

11201, 1800., 180., 0.

1, 0., 0., 0.

\*NGEN, Line=C, System=C, Nset=NsetHS1\_P

11001, 11201, 1, 1, , , ,0., 0., 1.

\*NCOPY, Old set=NsetHS1\_P, New set=NsetHS9\_P, Change number=8000, Shift

0., 0., -1000.

, , , , , , ,

\*NFILL

NsetHS1\_P, NsetHS9\_P, 8, 1000

\*ELEMENT, type=S4

11001, 11001, 12001, 12002, 11002

\*ELGEN, Elset=El\_S4

11001, 200, 1, 1, 8, 1000, 1000, 1, ,

\*Nset, nset=Nset\_Mer0\_P, generate

12001, 18001, 1000

\*Nset, nset=Nset\_Mer180\_P, generate

12201, 18201, 1000

\*Nset, nset=Nset\_circl\_z+\_P, generate

11002, 11200, 1

\*Nset, nset=Nset\_circl\_z-\_P, generate

19002, 19200, 1

\*Nset, nset=Nset\_Ecken\_P

11001, 11201, 19001, 19201

\*Nset, nset=Auflagerknoten\_mittig

15001, 15201

```
**
** Elementreihen_Setdefinition
**
*Elset, elset=El_pl_Ausgabe_50El, generate
14001, 14050, 1
*Elset, elset=Auflagerelemente_Reihe4
14001, 14200
*Elset, elset="Elementreihe4_Output", generate
14001 ,      14200 ,      1
**
*Elset, elset=El_S4_all, generate
11001, 18200, 1
**
*Elset, elset="E1", generate
11001 ,      18001 ,      1000
*Elset, elset="E2", generate
11002 ,      18002 ,      1000
[...]
[...]
[...]
*Elset, elset="E199", generate
11199 ,      18199 ,      1000
*Elset, elset="E200", generate
11200 ,      18200 ,      1000
*Surface, type=ELEMENT, name="SE1"
"E1", SPOS
*Surface, type=ELEMENT, name="SE2"
"E2", SPOS
[...]
[...]
[...]
*Surface, type=ELEMENT, name="SE199"
"E199", SPOS
*Surface, type=ELEMENT, name="SE200"
"E200", SPOS
** Section: Stahlp_Shell
*Shell Section, elset=El_S4_all, material="Stahl S550 EP"
9., 7
**
*End Part
**
*Part, name=Rigid_Shell
*Node
```



```
[...]  
[...]  
CfE199 =      16632.87  
CfE200 =      16708.44  
mueE1=0.30  
mueE2=0.30  
[...]  
[...]  
[...]  
mueE199=      0.30  
mueE200=      0.30  
PE1   =      60.00  
PE2   =      60.00  
[...]  
[...]  
[...]  
PE199 =      60.00  
PE200 =      60.00  
**  
*Rigid Body, ref node=Rigid_Shell_Assembly.Refpoint_rigid, elset=Rigid_Shell_Assembly.El_R3D4_all  
**  
*End Assembly  
**  
** -----  
**  
** MATERIALS  
**  
*Material, name="Stahl S550 EP"  
*Elastic  
210000., 0.3  
*Plastic  
550., 0.  
550., 0.1974  
0.1, 0.2074  
**  
** INTERACTION PROPERTIES  
**  
*Surface interaction, name="SIPE1"  
1.,  
*Friction, slip tolerance=0.005  
<mueE1>  
*Surface Behavior, Pressure-Overclosure=TABULAR  
0., -1000.
```

```

0.001, <u0>
<CfE1>, <u0p>
*Surface interaction, name="SIPE2"
1.,
*Friction, slip tolerance=0.005
<mueE2>
*Surface Behavior, Pressure-Overclosure=TABULAR
0., -1000
0.001, <u0>
<CfE2>, <u0p>
[...]
[...]
[...]
*Surface interaction, name="SIPE199"
1.,
*Friction, slip tolerance=0.005
<mueE199>
*Surface Behavior, Pressure-Overclosure=TABULAR
0., -1000
0.001, <u0>
<CfE199>, <u0p>
*Surface interaction, name="SIPE200"
1.,
*Friction, slip tolerance=0.005
<mueE200>
*Surface Behavior, Pressure-Overclosure=TABULAR
0., -1000
0.001, <u0>
<CfE200>, <u0p>
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**Panzerung
**
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_circl_z+_P, ZSYMM
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Mer0_P, YSYMM
** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Mer180_P, YSYMM

```

```
** Name: BC-4 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_circl_z-_P, ZSYMM
** Name: BC-5 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
StahIP_Assembly.Nset_Ecken_P, 2, 2
StahIP_Assembly.Nset_Ecken_P, 3, 3
StahIP_Assembly.Nset_Ecken_P, 4, 4
StahIP_Assembly.Nset_Ecken_P, 5, 5
StahIP_Assembly.Nset_Ecken_P, 6, 6
** Name: RefPoint_Encaste Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
Rigid_Shell_Assembly.Refpoint_rigid, ENCASTRE
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Contact
**
*Contact Pair, interaction="SIPE1", type=NODE TO SURFACE
StahIP_Assembly."SE1", Rigid_Shell_Assembly.Rigid_Surface
*Contact Pair, interaction="SIPE2", type=NODE TO SURFACE
StahIP_Assembly."SE2", Rigid_Shell_Assembly.Rigid_Surface
[...]
[...]
[...]
*Contact Pair, interaction="SIPE199", type=NODE TO SURFACE
StahIP_Assembly."SE199", Rigid_Shell_Assembly.Rigid_Surface
*Contact Pair, interaction="SIPE200", type=NODE TO SURFACE
StahIP_Assembly."SE200", Rigid_Shell_Assembly.Rigid_Surface
**
** -----
**
** STEP: Step 1
**
*Step, name="Step 1", nlgeom=YES, INC=150
Wasserdruck
*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.05
**
** LOADS
**
** Name: Wasserdruck Type: Pressure
*Dload
```

```
StahIP_Assembly."E1", P, <PE1>
*Dload
StahIP_Assembly."E2", P, <PE2>
[...]
[...]
[...]
*Dload
StahIP_Assembly."E199", P, <PE199>
*Dload
StahIP_Assembly."E200", P, <PE200>
**
** OUTPUT REQUESTS
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
U, UR, UT
*Element Output
MISESMAX, S, SSAVG, SF, PEEQ
*Node print, nset=StahIP_Assembly.Auflagerknoten_mittig
RF
*El print, elset=StahIP_Assembly.Auflagerelemente_Reihe4
SF
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, History
*Node Output, nset=StahIP_Assembly.Auflagerknoten_mittig
U, RF
*Element Output, elset=StahIP_Assembly.El_pl_Ausgabe_50El
PEEQ, SSAVG
*Element Output, elset=StahIP_Assembly.Auflagerelemente_Reihe4
SF
**
*End Step
```

Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte  
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl