



Hochschule Ruhr West

Institut Bauingenieurwesen

Schlankkeitsabhängige Ersatzimperfektion beim Plattenbeulen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades Bachelor of Science

Eingereicht von:

Inga Eschenberg
Schlehenhag2
46537 Dinslaken
inga.eschenberg@mailbox.org
01722115998

Studiengang:

Bauingenieurwesen
12. Fachsemester
Matrikelnummer: 10010689

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Christian Ludwig
Hochschule Ruhr West

Zweitgutachter:

M. Sc. Larissa Schönfeld
Hochschule Ruhr West

Bearbeitungszeitraum:

07.06.2022 – 30.08.2022

Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

für: Inga Eschenberg
Matr.-Nr.: 10010689

Schlankkeitsabhängige Ersatzimperfectionen beim Plattenbeulen

Das Tragverhalten von dünnwandigen plattenförmigen Bauteilen wird maßgeblich durch das Stabilitätsversagen Beulen bestimmt. Längs- und Schubspannungen haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit des Beulfeldes. Der Nachweis von unausgesteiften beulgefährdeten plattenförmigen Bauteilen ist in DIN EN 1993-1-5 geregelt. Dabei sind u. a. Imperfectionen und Effekte infolge überkritischen Tragreserven zu beachten.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind die geometrischen Ersatzimperfectionen angepasst an die Winter-Kurve in Abhängigkeit von bezogener Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ zu ermitteln. Dabei liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf dem Tragverhalten von unausgesteiften vierseitig gelagerten Platten im überkritischen Tragreservenbereich. Die Ergebnisse für den vorgegebenen Parameterbereich dieser Untersuchungen sind mittels numerischer Simulation mit der Software ANSYS zu bestimmen, darzustellen und zu bewerten.

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Vorstellung und Erläuterung der überkritischen Traglastreserven
- Analytische (nach DIN EN 1993-1-5) und numerische Bestimmung der angepassten geometrischen Ersatzimperfectionen unter Berücksichtigung folgender Parameter:
 - o Software: ANSYS
 - o Einachsige Druckbelastung ($\psi = 1$)
 - o Schubbeanspruchung τ
 - o Seitenverhältnis $\alpha = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,75; \sqrt{2}; 2; \sqrt{6}; 3$
- Darstellung von angepassten geometrischen Ersatzimperfectionen an die Winter-Kurve in Abhängigkeit von bezogener Plattenschlankheit (Übersichtliche Darstellung und Vergleiche in Form von Tabellen, Bildern und/oder Diagrammen)
- Gegenüberstellung und Bewertung (Abweichungen) von angepassten geometrischen Ersatzimperfectionen
- Erläuterung auftretender Effekte

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Formelzeichen.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Methodischer Ansatz.....	2
1.3 Herangehensweise	3
2. Grundlagen und Definitionen.....	4
2.1 Plattenbeulen	4
2.2 Überkritische Traglastreserven.....	5
2.3 Geometrische Ersatzimperfectionen.....	6
2.4 Winter-Kurve	8
3. Analytische und numerische Bestimmung	9
3.1 Nachweis des Stabilitätsversagen Plattenbeulen	9
3.2 Programm- und Rechnungsvorstellung	10
3.2.1 Newton-Raphson-Verfahren.....	12
4. Darstellung der geometrischen Ersatzimperfectionen.....	14
4.1 Vorstellung des Berechnungsablaufs	14
4.1.1 Druckbelastung	16
4.1.2 Schubbelastung	16
4.2 Vorstellung der Tabellen	17
4.3 Vorstellung der Diagramme.....	21
4.3.1 Druckbelastung	21
4.3.2 Schubbelastung	23
5. Bewertung und Gegenüberstellung	25
5.1 Erläuterung der auftretenden Effekte.....	25
5.1.1 Druckbelastung	26
5.1.2 Schubbelastung	29
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	31
Literaturverzeichnis	32

Anhang.....	34
Anhang 1 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$	34
Anhang 2 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,30$	36
Anhang 3 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$	38
Anhang 4 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$	40
Anhang 5 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$	42
Anhang 6 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$	44
Anhang 7 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$	46
Anhang 8 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$	48
Anhang 9 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$	50
Anhang 10 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$	52
Anhang 11 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,30$	56
Anhang 12 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$	60
Anhang 13 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$	64
Anhang 14 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$	68
Anhang 15 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$	72
Anhang 16 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$	76
Anhang 17 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$	80
Anhang 18 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$	84
Eidesstattliche Erklärung.....	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lokales Plattenbeulen [R1]	1
Abbildung 2: Beulen in Folge von Druck- und Schubspannungen [K1]	5
Abbildung 3: Vergleich der Lastverformungskurven für (i) Knickstäbe und (ii) druckbeanspruchte beulgefährdete Platten [K2]	6
Abbildung 4: Die Winter-Kurve	8
Abbildung 5: Beulwert k_{σ_x} für rechteckige Platten mit konstanten Randspannungen σ_x [K1]	11
Abbildung 6: Verschiedene Randbedingungen für die Berechnung von Schubspannung τ	12
Abbildung 7: Das Newton-Raphson-Verfahren [A3]	13
Abbildung 8: Der Strukturbaum des FEM Programms ANSYS	14
Abbildung 9: Eine, durch das FEM Programm ANSYS generierte, Lösung	15
Abbildung 10: Das Kopfteil der Druckspannungstabelle	17
Abbildung 11: Der Anfang der Druckspannungstabelle, $\alpha = 1,00$	20
Abbildung 12: Der Anfang der Schubspannungstabelle, $\alpha = 1,00$	21
Abbildung 13: Druckbelastung mit Seitenverhältnisses $\alpha = \sqrt{2}$	22
Abbildung 14: Schubbelastung mit Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$ und der zweiten Variante	24
Abbildung 15: links: Diagramm mit Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$ rechts: Diagramm mit Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$	27
Abbildung 16: Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$	28
Abbildung 17: Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$	28
Abbildung 18: erste Variante mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$ und dem Verzweigungslastfaktor α_{cr}	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterscheidung verschiedener Beulfelder	4
Tabelle 2: Berechnung der geometrischen Ersatzimperfektion	7
Tabelle 3: Vergleich der errechneten Kräfte über die Schlankheit bei Druckbelastung	25
Tabelle 4: Vergleich der errechneten Kräfte über die Schlankheit bei Schubbelastung.....	25

Formelzeichen

a	Länge
b	Breite
e_0	Ersatzimperfektion nach DIN EN 1993-1-5
$e_{0,erf}$	ermittelte Ersatzimperfektion
F	Kraft
F_{lr}	Kraft links / Kraft rechts
F_{ou}	Kraft oben / Kraft unten
k_σ	Beulwert Druckspannung
k_τ	Beulwert Schubbelastung
m	Halbwellenzahl
N	Kraft
S	Stahlgüte
t	Dicke
u	Verschiebung
α	Seitenverhältnis
$\alpha_{cr,\tau}$	Verzweigungslastfaktor Schubbelastung
$\alpha_{cr,x}$	Verzweigungslastfaktor Druckspannung
$\bar{\lambda}_p$	bezogene Schlankheit
λ_w	Schlankheitsgrad Schubbelastung
ρ	Abminderungsfaktor
ρ_{ANSYS}	ρ -Wert nach der von ANSYS errechneten Kraft
ρ_{Winter}	ρ -Wert nach der Winter-Kurve
σ	Druckspannung
$\sigma_{cr,x}$	Ideale Beulspannung Druckspannung
σ_e	Bezugsspannung
σ_x	Druckspannung in x-Richtung
τ	Schubspannung
τ_{cr}	Ideale Beulspannung Schubbelastung
χ_w	χ -Vergleichswert
$\chi_{w,ANSYS}$	χ -Wert nach der von ANSYS berechneten Kraft
ψ	Spannungsverhältnis

Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
bzw.	beziehungsweise
bspw.	beispielsweise
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Normen
etc.	et cetera
ext.	extern
FEM	Finite Elemente Methode
ggf.	gegebenenfalls
i. d. R.	In der Regel
insb.	insbesondere
max.	Maximum
min.	Minimum
o.g.	oben genannt
u.a.	unter anderem
u.g.	unten genannt
V 1, 2, 3, 4	Variante 1, 2, 3, 4

1. Einleitung

Stahlsorten mit hohen Festigkeiten und guten Schweiß Eigenschaften dienen als ideale Grundlage für dünnwandige plattenförmige Bauteile. Sie werden in einer Vielzahl von unterschiedlichen Bauwerken eingesetzt. Besonders im Brückenbau kommen diese Bauteile vermehrt zum Einsatz [P1]. Dort werden diese Verbindungen gerne vor Ort geschweißt, wobei Imperfektionen in den Bauteilen entstehen.

Daher muss für die richtige Dimensionierung dünnwandiger plattenförmiger Bauteile der Tragsicherheitsnachweise Plattenbeulen berücksichtigt werden, da bei Bauteilen die druck- und/oder schubbeansprucht werden die Versagensart Plattenbeulen auftreten kann [L1].

Bei der Rechenmethode der effektiven Querschnitte wird mit der Winter-Kurve gearbeitet. Auf dieses Thema wird in Kapitel 2.4 näher eingegangen. Die Winter-Kurve ist durch eine Vielzahl von Versuchen verifiziert und in der Fachwelt anerkannt. Jedoch zeigte die Untersuchung im Paper „Slenderness-dependent Equivalent Imperfections in Plate Buckling“ [S2], dass größere bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ zu Unsicherheiten führen können, da sie oberhalb der Winter-Kurve liegen. Auf diesem Paper aufbauend, werden in dieser Arbeit weitere dünnwandige, plattenförmige Bauteile mit unterschiedlichen Ausmaßen in Hinblick auf die Winter-Kurve untersucht.

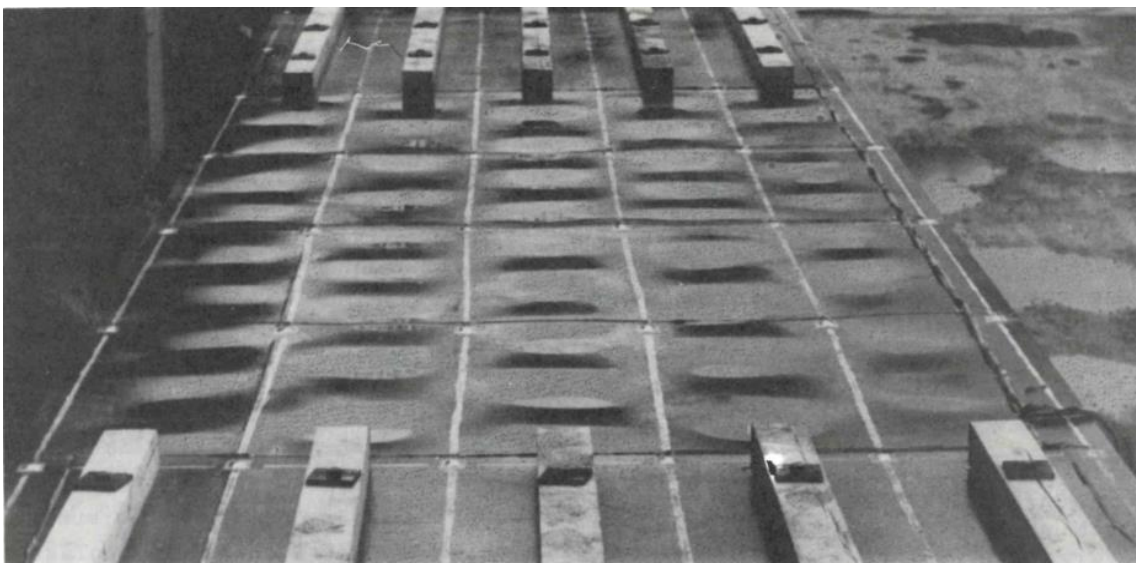


Abbildung 1: Lokales Plattenbeulen [R1]

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Ausarbeitung von einem von vielen Schritten, zu einer wirtschaftlicheren und sichereren Berechnung des Stabilitätsversagen Plattenbeulen.

Durch die Untersuchungen im Paper „Slenderness-dependent Equivalent Imperfections in Plate Buckling“ [S2] hat sich herausgestellt, dass noch einige Fragen zu den Randbedingungen der Berechnungen des Plattenbeulens offen sind.

So hat sich gezeigt, dass im Hinblick auf die geometrischen Ersatzimperfektionen mehr Potential vorhanden wäre, gerade was die überkritische Traglastreserve betrifft. Auch für die Wirtschaftlichkeit bei der Dimensionierung der Querschnitte ist eine Ausnutzung der überkritischen Traglastreserve von Vorteil.

Außerdem wurde festgestellt, dass bei größeren, bezogenen Schlankheiten die Traglasten infolge der geometrischen Ersatzimperfektionen unsicherer sind, da sie oberhalb der Winter-Kurve liegen.

Gerade diese Unsicherheiten im Bezug zur Winterkurve sind der Grund dieser Arbeit.

1.2 Methodischer Ansatz

In Anhang C der DIN EN 1993-1-5 [D1] wird der genaue Einfluss der strukturellen und geometrischen Imperfektionen nicht abschließend geklärt. Es werden keine konkreten Angaben zu dem Einfluss der einzelnen Imperfektionen oder ihrer Kombination gemacht. Auch ein Einspannmodell wird nicht empfohlen, wodurch automatisch Unterschiede in den einzelnen Rechenmodellen entstehen. Dies war Ausgangspunkt der Untersuchungen des Papers „Slenderness-dependent Equivalent Imperfections in Plate Buckling“ [S2]. Bei einer Vielzahl der Traglasten bei größeren, bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ weist das Paper daraufhin, dass es zu Unsicherheiten führen könnte. Ausschlaggebend ist die Tatsache, dass einige Werte oberhalb der Winter-Kurve liegen. Im Hinblick auf die Winter-Kurve werden weitere dünnwandige, plattenförmige Bauteile mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen untersucht. Im Zuge dieser Arbeit wird dafür das FEM Programm ANSYS genutzt. Die Druckspannungen σ_x oder σ_y (bzw. σ_z) und Schubspannungen τ werden getrennt voneinander untersucht. Dabei werden mit unausgesteiften, gelenkig gelagerten Platten gerechnet.

1.3 Herangehensweise

Diese Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Sie beginnt mit einer Einleitung und der Erläuterung der Zielsetzung.

In *Kapitel zwei*, werden die Grundlagen und Grundbegriffe definiert, die den Ausgangspunkt dieser Arbeit festlegen.

Im *dritten Kapitel* wird genauer auf das Verfahren eingegangen, welches zum Lösen des Ausgangsproblems angewandt wird. Hier liegt der Schwerpunkt besonders auf dem FEM Programm ANSYS. Mithilfe des Software Programms ANSYS werden bei verschiedenen geometrischen Ersatzimperfectionen die Lasten ermittelt. Diese werden dann indirekt mit den Werten der Winter-Kurve verglichen. Dabei wird zwischen Drucklasten und Schublasten unterschieden.

Das *vierte Kapitel* beschreibt den Ablauf der Berechnungen. Es werden, durch das FEM Programm ANSYS geometrische Ersatzimperfectionen ermittelt. Durch den Eintrag in eine vorbereitete Tabelle können sie indirekt mit der Winter-Kurve verglichen werden. Auch hier gibt es einen Unterschied zwischen Druck- und Schublasten.

Im *fünften Kapitel* werden die erlangten Ergebnisse interpretiert. Dabei wird das Augenmerk auf die Diagramme gelegt, welche mit Hilfe der Ergebnisse des FEM Programms ANSYS und der Tabelle erstellt wurden. Diese Diagramme wurden jeweils für Druck- und Schublasten getrennt erstellt.

Die Arbeit schließt mit *Kapitel sechs*, in dem darauf aufmerksam gemacht wird, dass noch weitere Untersuchungen sinnvoll wären. Daran anschließend befindet sich der Anhang mit den Tabellen und das Literaturverzeichnis.

2. Grundlagen und Definitionen

2.1 Plattenbeulen

Um dünnwandige, plattenförmige Bauteile handelt es sich, wenn die Dicke t signifikant kleiner ist als die Länge und Breite. Bei diesen Bauteilen kann das Stabilitätsversagen Plattenbeulen auftreten, wenn sie druck- und/oder schubbeansprucht sind [L2]. Gerade im Brückenbau werden viele dünnwandige Querschnitte verbaut. Auch im Hoch- und Industriebau sind diese Bauteile sehr beliebt [K2]. Durch eine Beanspruchung in Scheibenrichtung entsteht eine Verformung senkrecht zur Platte. Wenn in den Beulflächen Verformungen auftreten, die den Durchbiegungen der Platten entsprechen, wird von Plattenbeulen gesprochen. Plattenbeulen kann auch bei versteiften Bauteilen auftreten. Bei diesen muss der Nachweis dann sowohl bei den Einzelfeldern, als auch bei Teil- und Gesamtfeldern geführt werden [K1]. Hierbei werden die Beulfelder wie in Tabelle 1 [D2] beschrieben:

Beulfeld	Beschreibung	Abbildung
Einzelfelder	werden die unversteiften Beulfelder zwischen Steifen genannt	
Teilfelder	sind unversteifte oder längsversteifte Beulfelder zwischen Querstreifen	
Gesamtfelder	sind versteifte oder unversteifte Beulfelder zwischen Längs- und Querrändern	

Tabelle 1: Unterscheidung verschiedener Beulfelder

Diese Versagensart tritt nur bei Druckspannungen σ_x oder σ_y (bzw. σ_z) oder Schubspannungen τ auf. Es kann auch bei einer Kombination dieser Spannungen ausgelöst werden [K2]. Die unterschiedlichen typischen Verformungen einer Platte infolge a) Druckspannungen σ_x oder σ_y (bzw. σ_z) bzw. b) Schubspannungen τ sind in Abbildung 2 zu erkennen.

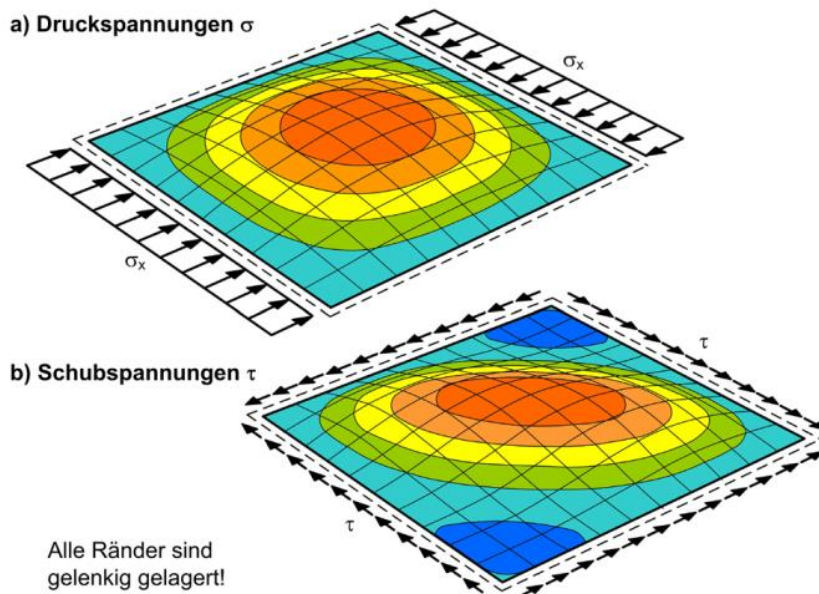


Abbildung 2: Beulen in Folge von Druck- und Schubspannungen [K1]

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit unausgesteiften, gelenkig gelagerten Platten. Dabei werden die Druckspannungen σ_x oder σ_y (bzw. σ_z) und Schubspannungen τ getrennt voneinander betrachtet.

2.2 Überkritische Traglastreserven

Schlanke Platten haben ein überkritisches Traglastverhalten. Das könnte dazu führen, dass die Grenzbeulspannungen größer sind als die idealen Beulspannungen. Spannungen, die weit über der Verzweigungslast liegen, können für Platten zugelassen sein. Dieses Verhalten ist, im Vergleich zum Knicken von Stäben, ungewöhnlich, aber aus Versuchen hinlänglich bekannt und mittlerweile auch rechnerisch nachgewiesen [K1]. Dabei hat sich gezeigt, dass die Platte im ausgebeulten Zustand die Spannungen an die wesentlich steiferen Randbereiche verlagert. Es bildet sich eine doppelte Krümmung aufgrund der Stützwirkung der Längsränder und im Randbereich eine versteifende Wirkung. Durch dieses Verhalten versagt die Platte erst bei Beanspruchung, die ein Vielfaches von der elastischen kritischen Beulspannung beträgt. Das Stabilitätsverhalten vom Plattenbeulen geht, mit abnehmender Stützwirkung, zum Stabknicken über. Die überkritische Traglastreserve geht verloren, die Platte hat ein knickstabähnliches Verhalten [K2].

In Abbildung 3 wird die Lastverformungskurve eines zentrisch gedrückten, schlanken Stabens und einer zentrisch gedrückten, schlanken Platte nebeneinandergestellt. Der schlanke Stab erreicht, im Gegensatz zur Platte, seine Grenze der Beanspruchbarkeit bei der elastischen Knicklast [K2].

Ein ähnliches Verhalten in Bezug auf die überkritische Traglast ist auch bei schubbeanspruchten Platten zu beobachten. Die Beulen bilden sich schräg aus und es entstehen gerichtete Zugkräfte. Die Abtragung der Schubspannungen erfolgt fachwerkartig [K1].

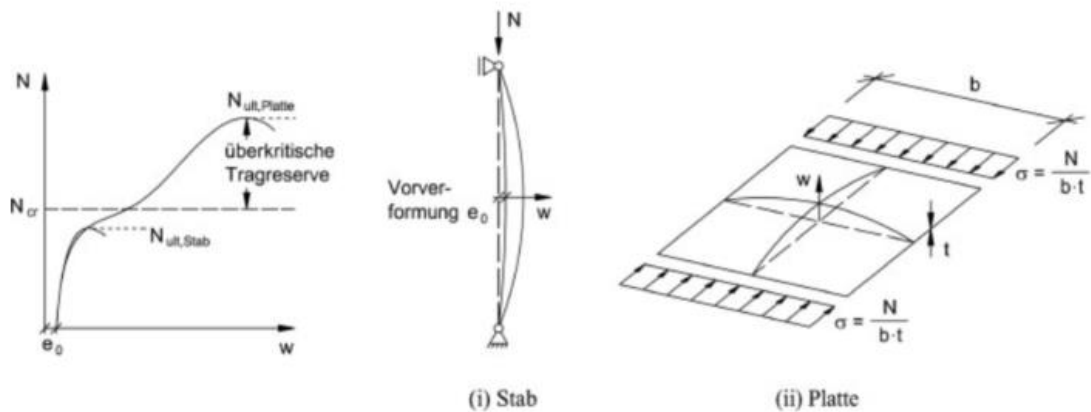


Abbildung 3: Vergleich der Lastverformungskurven für (i) Knickstäbe und (ii) druckbeanspruchte, beulgefährdete Platten [K2]

2.3 Geometrische Ersatzimperfektionen

Schon bei der Herstellung des Stahls, aber vor allem auch bei seiner Weiterverarbeitung, entstehen Imperfektionen. Diese Imperfektionen sind unerwünschte Abweichungen in den Bauteilen. Sie sind meist nicht von außen erkennbar. Es können unregelmäßige Verteilungen von Festigkeitseigenschaften sein, aber auch eingeprägte Spannungen. Die meisten Imperfektionen sind Eigenspannungen, welche entstehen können, wenn der Werkstoff unregelmäßig abkühlt. Dies tritt häufig beim Walzen oder Schweißen auf [S2].

Die Imperfektionen sind entscheidend, da sich der ideale Sollzustand nicht realisieren lässt. Daher machen die Imperfektionen einen erheblichen Unterschied bei den rechnerischen Traglasten aus [K2].

Das Tragverhalten des Stahls ist entscheidend beeinflusst von diesen Imperfektionen. Gerade im Hinblick auf die Versagensart Plattenbeulen.

In der DIN EN 1993-1-5 [D1] wird bei den Imperfektionen unterschieden zwischen:

- strukturellen Imperfektionen
- geometrischen Imperfektionen
- geometrischen Ersatzimperfektionen

Strukturelle Imperfektionen lassen sich im Herstellungsprozess nicht vermeiden. Dabei üben die Eigenspannungen in der Regel den größten Einfluss aus. Eigenspannungen stehen mit sich selbst im Gleichgewicht. Daher sind diese Imperfektionen von außen nicht zu erkennen [K2].

Geometrische Imperfektionen hingegen sind typischerweise Maßabweichungen infolge der Herstellung. Auch Vorbeulen zählt zu den geometrischen Imperfektionen [K2].

Geometrische Ersatzimperfektionen kommen zum Einsatz, wenn keine genauen getrennten Ansätze von strukturellen und geometrischen Imperfektionen möglich sind. In den geometrischen Ersatzimperfektionen kommen sowohl Anteile der strukturellen als auch der geometrischen Imperfektionen vor. Sie werden laut der DIN EN 1993-1-5 Tabelle C.2 [D1] einheitlich berechnet. Der für diese Arbeit relevante Teil der Tabelle C.2 ist als Tabelle 2 eingefügt. Vor allem für numerisch Untersuchungen werden diese geometrischen Ersatzimperfektionen genutzt.

Imperfektionsansatz	Bauteil	Form	Amplitude
lokal	Teilfeld oder Einzelfeld mit kurzer Länge a oder b	Beulform	$e_0 = \min. \begin{cases} \frac{a}{200} \\ \frac{b}{200} \end{cases}$
lokal, Teilfeld oder Einzelfeld			

Tabelle 2: Berechnung der geometrischen Ersatzimperfektion

Diese Arbeit behandelt die geometrischen Ersatzimperfektionen. Die strukturellen und geometrischen Imperfektionen werden nicht weiter ausgearbeitet.

2.4 Winter-Kurve

Die Winter-Kurve ist auf Beobachtungen von Herrn George Winter zurückzuführen. Mittlerweile wurden diese Beobachtungen und die daraus erfolgte Gleichung

$$\rho_{\text{Winter}} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p^2}$$

in einer Vielzahl von Versuchen verifiziert [S1]. Die Gleichung ist allgemein akzeptiert und wurde immer weiterentwickelt. So ist sie in der heutigen Form Teil des Rechenverfahrens der effektiven Querschnitte. Um die Gleichung auch für andere Randbedingungen nutzen zu können, wurde sie weiterentwickelt. In der DIN EN 1993-1-5 [D1] wird z.B. unterschieden zwischen beidseitig und einseitig gestützten Querschnittsteilen und den dafür passenden, modifizierten Gleichungen auf Grundlage der Winter-Kurve.

Da diese Arbeit mit beidseitig gestützten Querschnittsteilen und einer konstanten Spannungsverteilung ($\psi = 1$) rechnet, wird im Folgenden nur zu diesem Fall Weiteres erläutert. Ein wesentlicher Bestandteil der Berechnung der Winter-Kurve ist die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_p$. Mithilfe der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ lassen sich viele Versuche, die in der Geschichte des Stahlbaus zum Thema Plattenbeulen durchgeführt wurden, optimal vergleichen [S1]. Die bezogene Schlankheit wird mit der Formel

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 * \epsilon * \sqrt{k_\sigma}}$$

berechnet. Dabei ist für die Winter-Kurve festgelegt, dass bei bezogenen Schlankheiten von $\bar{\lambda}_p < 0,673$ der Wert $\rho_{\text{Winter}} = 1$ wird. Mit der Berechnung der bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ lässt sich die Winter-Kurve darstellen (Abbildung 4).

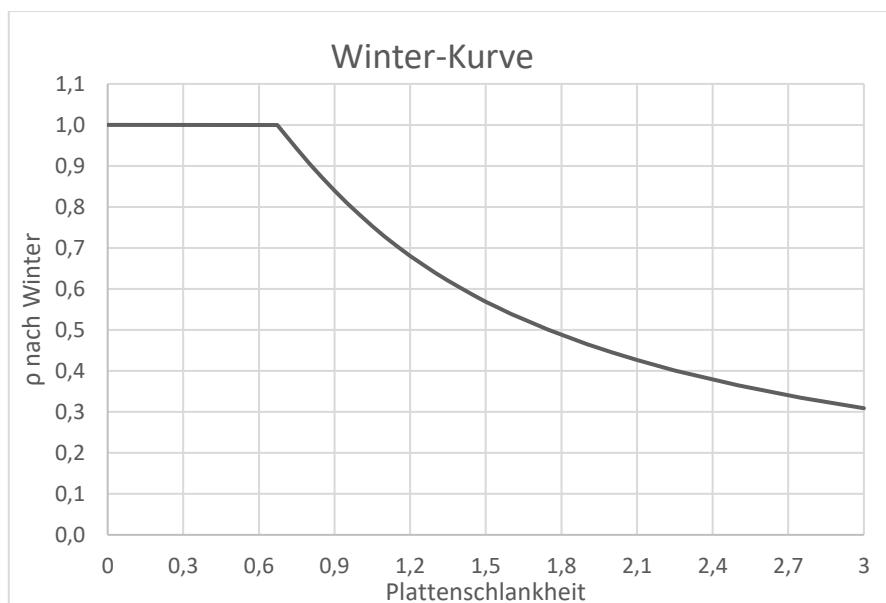


Abbildung 4: Die Winter-Kurve

3. Analytische und numerische Bestimmung

3.1 Nachweis des Stabilitätsversagen Plattenbeulen

Aktuell gibt es drei Verfahren, mit denen das Stabilitätsversagen Plattenbeulen nachgewiesen werden kann. Sie unterscheiden sich auf Grund von Berechnungsaufwand, aber auch hinsichtlich auf die Ausnutzung im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

1. Methode der reduzierten Spannung
2. Methode der effektiven Querschnitte
3. Berechnung mit der Finiten Elemente Methode

Die Methode der reduzierten Spannung wird im Kapitel 10 der DIN EN 1993-1-5 [D1] genauer beschrieben. Sie kann bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechfeldern eines Querschnittes genutzt werden. Außerdem ist sie auch für die Berechnung von Bauteilen mit veränderlichen Lasten oder Trägern mit Stegausschnitt eine wirksame Methode. Sie ist ein Verfahren, welches für Handrechnungen geeignet ist. Jedoch liegt die Stärke dieser Methode in der Möglichkeit, auch numerisch gestützte Berechnungen zu benutzen. Dies eignet sich besonders bei der Berechnung von α_{cr} [K2]. Da bei dieser Methode keine Spannungsumlagerungen angenommen werden, bestimmt das schwächste Querschnittsteil die Tragfähigkeit [D1].

Die Methode der effektiven Querschnitte wird in den Kapiteln 4 bis 7 in der DIN EN 1993-1-5 [D1] definiert. Sie berücksichtigt sowohl das lokale Ausbeulen als auch das globale Beulverhalten. Es ist für I- und Kastenquerschnitte gut geeignet. Es müssen jedoch einige Bedingungen erfüllt sein, auf die hier nicht näher eingegangen wird [K3]. Bei dieser Methode wird versucht, mit Handrechnungen die Tragfähigkeit möglichst genau abzubilden. In Einzelnachweisen wird das jeweilige überkritische Tragverhalten systematisch und sehr genau berücksichtigt. Zum Schluss werden die Einzelnachweise zusammengeführt [K2].

Die Finite Elemente Methode ist im Anhang C der DIN EN 1993-1-5 [D1] zu finden. Es handelt sich hierbei um ein numerisches Verfahren. Die FEM ist, durch den hohen Berechnungsaufwand, bei Fällen zweckmäßig, in denen die Berechnung mit der Methode der reduzierten Spannungen und die Methode der effektiven Querschnitte nicht oder nur unzureichend möglich ist [K2]. Die computerbasierte Methode der Finiten Elemente erfordert einige Erfahrung. Dabei ist die Wahl des geeigneten Programms zu beachten. Auch die Modellierungen des Bauteils und seiner Randbedingungen, sowie die richtigen Lasten und Werkstoffeigenschaften, sind mit Sorgfalt zu erstellen. Ein weiterer Schwerpunkt, den die DIN EN 1993-1-5 [D1] macht, ist der Ansatz der Imperfektion. Diese Imperfektionen werden bei der Methode der reduzierten Spannungen und der Methode der effektiven Querschnitte als Abminderungsfaktoren berücksichtigt.

3.2 Programm- und Rechnungsvorstellung

Durch die Zunahme leistungsstarker Rechentechnik werden mehr Untersuchungen mithilfe FEM vorgenommen. Diese Programme und ihre Simulationen sind für verschiedene Bereiche u.a. im Rennsport oder bei den Erneuerbaren Energien mittlerweile nicht mehr wegzudenken. Sie bilden immer genauer die Realität ab und mit ihrer Hilfe werden die verschiedensten Probleme gelöst [H1].

Diese Arbeit nutzt das FEM Programm ANSYS. Diese Software hat John Swanson schon 1970 entwickelt. Aktuell wird die Software von der Firma ANSYS Inc. vertrieben und weiterentwickelt. Mit Hilfe dieser Software können die unterschiedlichsten Berechnungen vorgenommen werden. Dabei wirbt die Firma damit, dass ihre Software lineare und nichtlineare Probleme, zum Beispiel aus der Fluidmechanik, Akustik, Elektronik und Photonik, lösen kann. Auch eine Kombination der Problemstellungen ist möglich. Dabei können diese Rechnungen 1-, 2- oder 3-dimensional gelöst werden [A2].

Für diese Arbeit werden folgende Werte zur Modellierung in ANSYS verwendet:

- Stahlgüte S 355 – bilineares Materialverhalten
(linear elastisch – plastisch mit $E / 10\,000$)
- Schalenelement SHELL 181
- Geometrische Imperfektionen und Ersatzimperfektionen
gemäß skaliertes Eigenform
- Strukturelle Imperfektionen durch eingepprägten Spannungszustand
- Vierseitig gelenkig gelagert mit Seitenverhältnissen
 $\alpha = 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; \sqrt{2}; 2,00; \sqrt{6}; 3,00$
- Beanspruchung konstanter Druck σ ($\psi = 1$) oder Schub (τ)
- Berechnungsverfahren Newton-Raphson + Stabilisierungsenergie

Es wird bei dieser Arbeit ein Segment eines Trägers numerisch simuliert. Dafür wird das zu untersuchende Segment als senkrecht zur Ebene unverschieblich und gelenkig gelagert angenommen. An den Querrändern werden die Elemente in der Plattenebene gekoppelt.

Da auch unterschiedliche Seitenverhältnisse untersucht werden sollen, müssen diese vorher eingegrenzt werden. Auffällig sind die sogenannten Beulgirlanden (Abbildung 5) Diese stellen sich durch den Beulwert $k_{\sigma x}$ dar. Der Beulwert $k_{\sigma x}$ errechnet sich mit den Halbwellenzahlen $m = 1$ bis $m = 5$ und dem Seitenverhältnis α . Diese Beulgirlanden zeigen Auffälligkeiten an den Stellen $\alpha = 1,00, \sqrt{2}, 2,00, \sqrt{6}$ und $3,00$. Der Bereich $\alpha < 1,00$ soll ebenfalls abgedeckt werden. Daher werden auch $\alpha = 0,15, 0,30, 0,45, 0,60$ und $0,75$ mit untersucht.

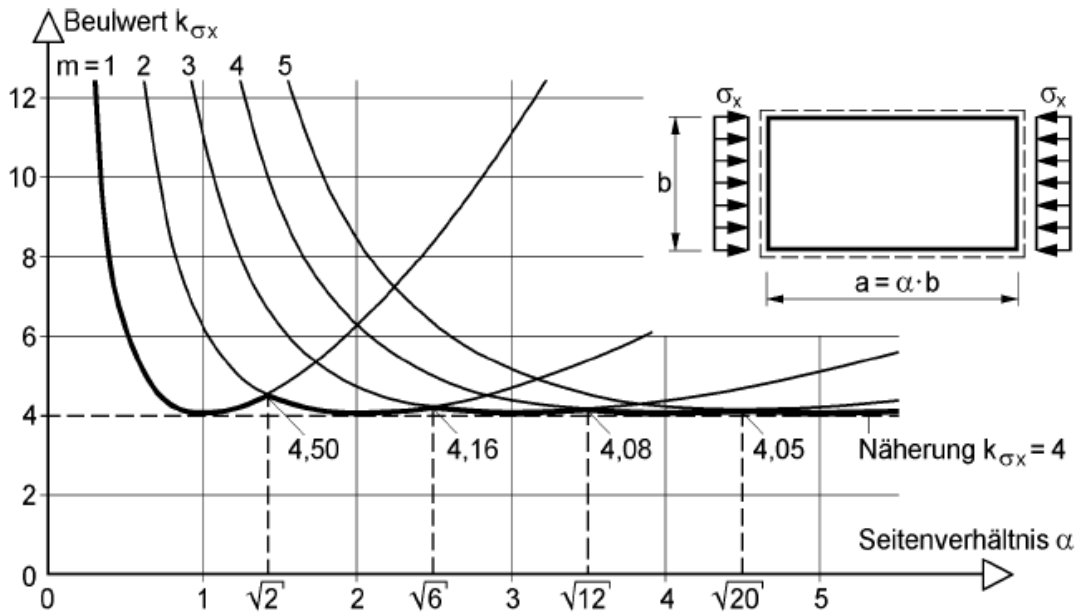


Abbildung 5: Beulwert k_{σ_x} für rechteckige Platten mit konstanten Randspannungen σ_x [K1]

Für die erste Berechnungsreihe wird mit einer konstanten Druckbeanspruchung σ ($\psi = 1$) gearbeitet, damit eine gleichmäßige Verformung in Plattenebene sichergestellt werden kann. Es wird untersucht, welche Veränderungen sich bei veränderten Seitenverhältnissen einstellen. Für jedes Seitenverhältnis, beginnend bei $\alpha = 0,15$ bis $\alpha = 3,00$, wird die Berechnung für unterschiedliche Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Berechnung des FEM Programms werden in eine vorbereitete Tabelle eingetragen. Mit Hilfe dieser Tabellen lassen sich die generierten Ergebnisse mit der Winter-Kurve abgleichen.

Bei der zweiten Berechnungsreihe wird das Bauteil schubbeansprucht τ . Um einen ähnlichen Umfang wie bei der ersten Berechnungsreihe zu generieren, werden bei der zweiten weniger Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ untersucht, da es mehr Randbedingungen gibt. Die gekoppelten Ränder wurden für die Schubbeanspruchung noch nicht ausreichend erforscht. Daher wird bei dieser Arbeit sowohl die Kopplung der Ränder in y-Richtung als auch in z-Richtung genauer betrachtet. Neben den zwei verschiedenen Lagerungen werden noch zwei verschiedene numerische Kraftarten τ untersucht. Daraus ergeben sich vier Variationen, die berechnet werden. In Abbildung 6 werden die Varianten dargestellt.

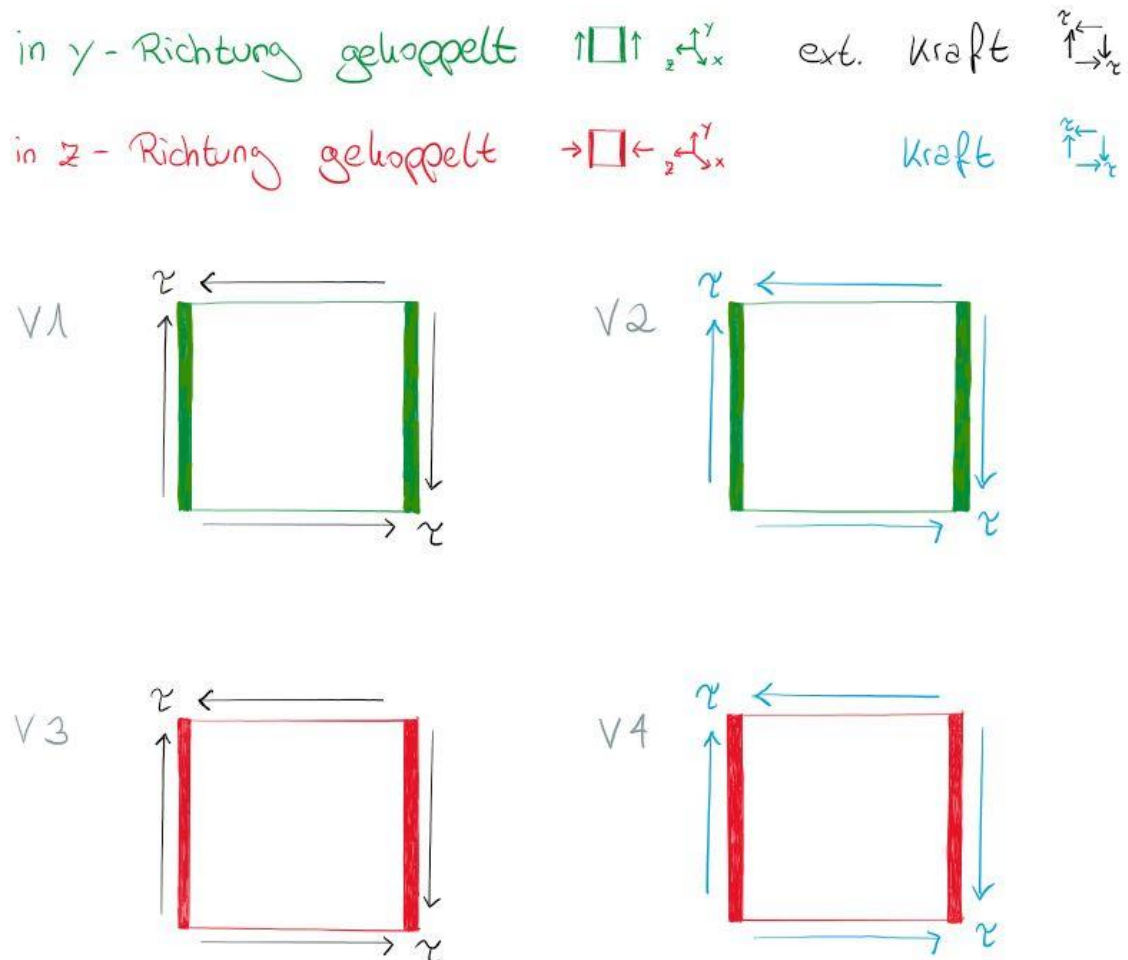


Abbildung 6: Verschiedene Randbedingungen für die Berechnung von Schubspannung τ

- V1) In y -Richtung gekoppelt mit einer externen Kraft die angreift
- V2) In y -Richtung gekoppelt mit einer Kraft die angreift
- V3) In z -Richtung gekoppelt mit einer externen Kraft die angreift
- V4) In z -Richtung gekoppelt mit einer Kraft die angreift.

3.2.1 Newton-Raphson-Verfahren

Namensgebend für das Newton-Raphson-Verfahren sind Isaac Newton und Joseph Raphson. Dieses Verfahren ist ein Iterationsverfahren für nichtlineare Gleichungen. Dadurch ist es ein sehr gebräuchliches Verfahren für das Lösen von Modellen, die mit FEM Software erstellt werden.

Gerade die Firma des FEM Programms ANSYS bietet eigene Hilfestellungen zum Nutzen des Newton-Raphson-Verfahrens. Aus einer dieser Hilfestellungen [A3] stammt das Beispiel, an welchem das Verfahren im Folgenden verkürzt erläutert wird.

Eine Verschiebung u soll mit aufgebrachtener Kraft F_a berechnet werden. Dafür wird mit einer angelegten Kraft F_a und keiner Anfangsverschiebung begonnen. Das Programm beginnt die Verschiebung u_1 zu berechnen. Mithilfe dieser Verschiebung u_1 berechnet das Programm die Kraft F_1 . Wenn die berechnete Verschiebung nicht korrekt ist, also sich das System nicht im Gleichgewicht befindet, zeigt sich, dass $F_a \neq F_1$ ist. Daraufhin berechnet das Programm eine neue Verschiebung u_2 . Mit der Kraft F_2 , welche mit u_2 berechnet wird, erfolgt erneut die Prüfung, ob das System im Gleichgewicht ist. Ist dies nicht der Fall, geht die Iteration weiter bis mit $F_n = F_a$, das System im Gleichgewicht ist.

Da es, trotz leistungsstarker Rechentechnik, unendlich viele Iterationen bräuchte, um den exakten Wert F_n zu bestimmen, wird eine Toleranz definiert. Sobald die Differenz zwischen der aufgegebenen Kraft F_a und der errechneten Kraft F_n kleiner als die Toleranz ist, wird die weitere Rechnung gestoppt und F_n als konvergente Lösung ausgegeben. Entscheidend ist auch welche Kraft vorgegeben wird. Sie sollte möglichst nahe an der Lösung liegen, da sonst zu große Abweichungen ausgegeben werden können. Dies ist eine stark vereinfachte Erklärung und soll nur den Kern der Rechenart darlegen. In Abbildung 7 ist das Verhältnis von F und u zu sehen.

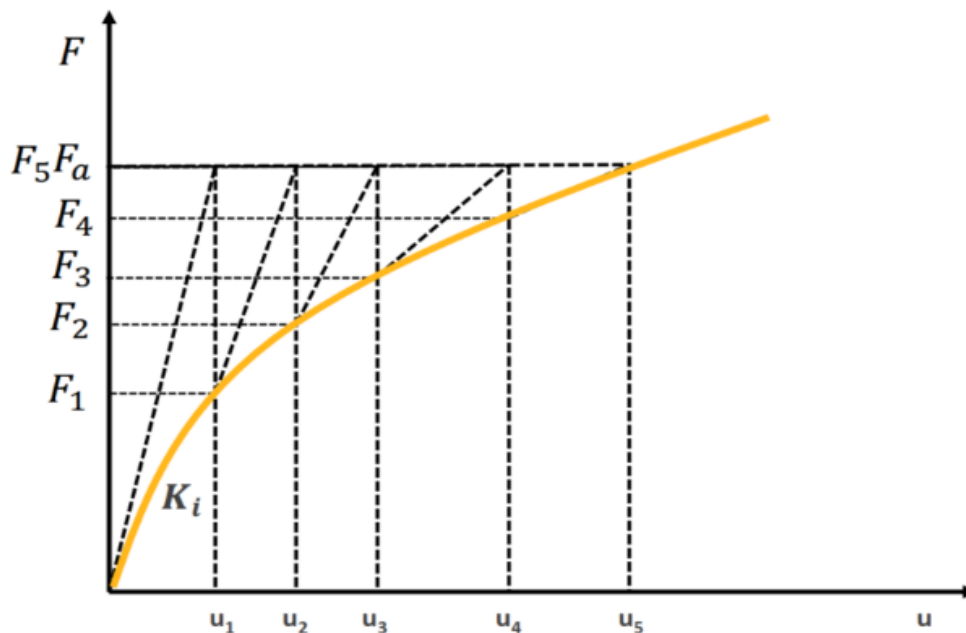


Abbildung 7: Das Newton-Raphson-Verfahren [A3]

4. Darstellung der geometrischen Ersatzimperfektionen

4.1 Vorstellung des Berechnungsablaufs

Die Grundlage der Berechnungen sind Untersuchungen im Paper „Slenderness-dependent Equivalent Imperfections in Plate Buckling“ [S2]. In diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die geometrischen Ersatzimperfektionen auch für andere Seitenverhältnisse untersucht werden sollten. Ebenfalls interessant wirken auch die Untersuchungen auf Schubbelastung.

Auf Grund des hohen Rechenaufwandes, werden die Berechnungen mit zwei Workstations parallel durchgeführt. Der Arbeitsablauf für die Berechnungen stellt sich folgendermaßen dar:

Im ersten Schritt werden zwei Tabellen angelegt, um automatisch die errechneten Werte indirekt mit der Winter-Kurve zu vergleichen. Das Ziel ist die geometrische Ersatzimperfektion zu finden, welche sich zu 100,00% an die Winter-Kurve annähert. Die nähere Erläuterung dieser Tabellen erfolgt im Kapitel 4.2.

Im zweiten Schritt werden die unterschiedlichen Dateien angelegt. Dabei wird bei jedem Seitenverhältnis, $\alpha = 0,15$ bis $\alpha = 3,00$, für die unterschiedlichen Schlankheiten, $\bar{\lambda}_p = 0,673$ bis $\bar{\lambda}_p = 3,000$, eine eigene Datei generiert. Dazu werden die technischen Daten eingepflegt, die Geometrie eingestellt und die Platten modelliert.

Im dritten Schritt wird in dem Strukturbaum (Abbildung 8) des FEM Programms ANSYS die zu erwartende geometrische Ersatzimperfektion als Skalierungsfaktor eingegeben. Dies geschieht im Bereich der Eigenwert-Beulanalyse. Das System muss aktualisiert und die Modellansicht geöffnet werden.

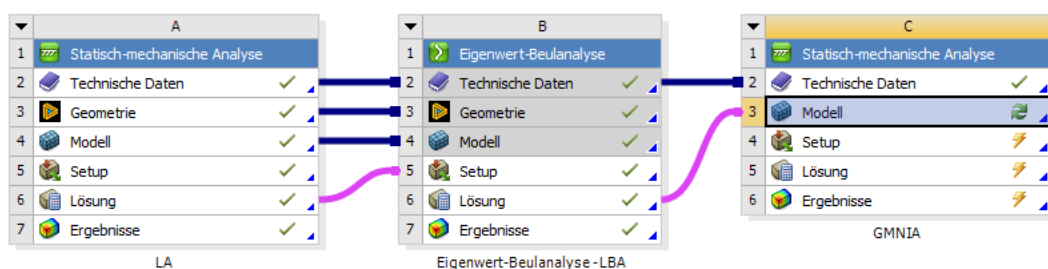


Abbildung 8: Der Strukturbaum des FEM Programms ANSYS

Im vierten Schritt unterscheidet sich das Vorgehen zwischen der Druck- und der Schubbelastung. Auf die Unterschiede wird in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 näher eingegangen. Unabhängig von den Unterschieden wird am Ende des Schrittes die Berechnung gestartet. In Abbildung 9 ist eine durch das FEM Programm ANSYS berechnete Lösung abgebildet. Die für diese Arbeit relevante errechnete Kraft ist markiert. Das Seitenverhältnis α ist in diesem Beispiel $\sqrt{2}$ und die Schlankheit $\bar{\lambda}_p = 1,300$. Die simulierte Platte mit Beule und die errechnete Kraft sind gut zu erkennen. Obwohl die modernen Workstations eine hohe Rechenleistung aufweisen, werden trotzdem einige Minuten für die Berechnung benötigt.

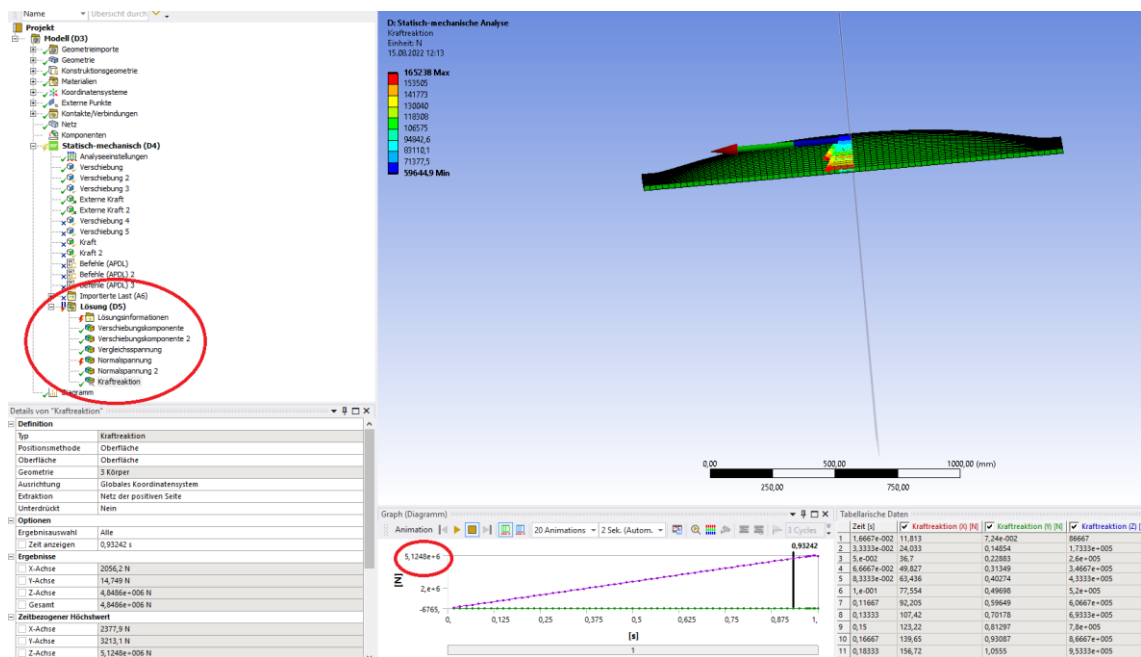


Abbildung 9: Eine durch das FEM Programm ANSYS generierte Lösung

Im fünften Schritt wird die errechnete Kraft in die Tabelle eingetragen. Daraufhin werden die prozentualen Abweichungen automatisch generiert. Sobald die Abweichung keine 100,00% beträgt, muss mit einem anderen Skalierungsfaktor die Berechnung erneut gestartet werden. Es wird mit Schritt drei wieder begonnen. Im Idealfall wird die 100,00% erreicht. In einigen Fällen ist es nicht möglich die 100,00% zu erreichen, da der Skalierungsfaktor nur bis zwei Stellen nach dem Komma eingegeben wird. Es wird nach Möglichkeit der Kippunkt gesucht, bei dem die Prozentzahl von über 100,00 auf unter 100,00 abweicht. Ist es nicht möglich mit diesem die 100,00% zu generieren, wird das Ergebnis genommen, welches am nächsten an die 100,00% heranreicht. Die Größe der Abweichung von 100,00% ist ein guter Hinweisgeber, um den neuen Skalierungsfaktor zu wählen. Ebenfalls einen guten Hinweis, liefern die schon erreichten Skalierungsfaktoren der kleineren Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ bei gleichem Seitenverhältnis α .

Im sechsten Schritt, bei Erreichung eines zufriedenstellenden Ergebnisses von Schritt fünf, wird die nächste Datei geöffnet. Mit dieser Datei wird wieder bei Schritt eins begonnen. Eine Ausnahme bildet da die Berechnung der Schubbeanspruchung. Dort wird erst eine neue Datei geöffnet, wenn alle vier Durchläufe zufriedenstellende Ergebnisse geliefert haben.

4.1.1 Druckbelastung

Bei der Druckbelastung wird in der Modellansicht die Rechnung gestartet. Neben dem Skalierungsfaktor werden bei diesen Rechnungen nur die Kräfte angepasst. Dabei ist zu beachten, dass beide Kräfte gleich groß, aber unterschiedlich gerichtet sind. Dies geschieht, damit die Kräfte möglichst nahe an der vom Programm errechneten maximalen Kraft liegen. Das Newton-Raphson-Verfahren würde sonst zu große Abweichungen ausgeben. Sobald der Skalierungsfaktor angepasst wurde, müssen auch die Kräfte überprüft werden. Bei zu großen Sprüngen im Skalierungsfaktor müssen die Kräfte gegebenenfalls verändert werden. Als nächstes sind die Abläufe in Schritt fünf (Kapitel 4.1) auszuführen.

4.1.2 Schubbelastung

Durch die vier Varianten, die bei der Schubbelastung untersucht werden, ändert sich das Vorgehen im Bezug zur Druckbelastung. Sobald die Modellansicht geöffnet ist, werden die gekoppelten Punkte überprüft.

Für den ersten Durchlauf sollten die Punkte in y-Richtung gekoppelt sein. Auch die angreifenden Kräfte werden überprüft. Es sollten die ext. Kräfte aktiviert und die Kräfte deaktiviert werden. Gegebenenfalls müssen die Kräfte angepasst werden. Dies geschieht, im Gegensatz zur Druckbeanspruchung, mit Hilfe einer Formel, damit die vier Kräfte im Gleichgewicht sind. Wobei die beiden Kräfte links und rechts gleich groß, aber unterschiedlich gerichtet sein sollen. Gleiches gilt für das Kräftepaar oben und unten. Die Formeln lauten wie folgt:

$$F_{lr} = b * t * \sigma$$

$$F_{ou} = a * t * \sigma$$

Dabei ist a die Länge [mm], b die Breite [mm] und t die Dicke [mm] der Platten. Der Wert σ [N/mm²] wird frei gewählt, um der vom Programm errechneten maximalen Kraft so nahe wie möglich zu kommen. Auch hier ist zu beachten, dass das Ändern des Skalierungsfaktors gegebenenfalls ein Ändern der Kräfte nach sich zieht. Dies gilt für alle vier Durchläufe. Mit dem Ergebnis des ersten Durchlaufs wird mit Schritt fünf (Kapitel 4.1) weiter verfahren.

Im zweiten Durchlauf bleiben die Punkte in y-Richtung gekoppelt. Die ext. Kräfte werden deaktiviert und die Kräfte aktiviert. Die Werte der ext. Kräfte werden auf die Kräfte übertragen und die Rechnung gestartet.

Im dritten Durchlauf werden die gekoppelten Punkte von der y-Richtung in die z-Richtung geändert. Die Kräfte bleiben aktiviert.

Im vierten Durchlauf bleiben die gekoppelten Punkte gleich, die Kräfte werden deaktiviert und die ext. Kräfte werden aktiviert.

4.2 Vorstellung der Tabellen

Der Aufbau der Tabellen wird exemplarisch an der Druckbeanspruchung dargelegt. Die Unterschiede zur Schubbelastung werden am Ende erläutert. Um die errechneten Werte indirekt mit der Winter-Kurve vergleichen zu können, sind die Tabellen wie folgt aufgebaut.

Im Kopfteil (Abbildung 10) sind die Stahlgüte S, die Druckspannung σ_x [N/mm²] der Beulwert k_σ und das Seitenverhältnis α definiert. Die Werte sind durch die Randbedingungen festgelegt und werden als feste Werte eingetragen. Nur das Seitenverhältnis wird berechnet, dabei werden die Länge a [mm] und Breite b [mm] der Platte zur Berechnung genutzt. Die Formel zur Berechnung ist

$$\alpha = \frac{a}{b}.$$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C			
S	355		
σ_x	100		
k_σ	4		$\alpha = 1$

Abbildung 10: Das Kopfteil der Druckspannungstabelle

In Spalte E und F sind die Ausmaße der Platte eingetragen. Dabei ist in Spalte E die Länge a [mm] und in Spalte F die Breite b [mm] notiert. Die Breite b [mm] ändert sich in keiner Tabelle. Die Länge a [mm] wird zum gewählten Seitenverhältnis α angepasst, bleibt aber für die einzelnen Tabellen konstant.

In Spalte G ist die Dicke t [mm] hinterlegt. Diese wird infolge der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ rückwärts gerechnet, damit die passenden Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ gegeben sind.

In Spalte D wird die Druckspannung σ_x [N/mm²] zu einer Kraft N [N] umgerechnet. Dafür wird die Druckspannung σ_x [N/mm²] mit der Breite b [mm] und der Dicke t [mm] multipliziert. Das stellt sich in der Formel

$$N = \sigma_x * b * t$$

dar.

In der Spalte C wird die Bezugsspannung σ_e [N/mm²] berechnet. Für die Berechnung wird die Breite b [mm] und die Dicke t [mm] in folgender Formel genutzt:

$$\sigma_e = 189800 * \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

In Spalte A, aufbauend auf die Bezugsspannung σ_e [N/mm²] mit dem Beulwert k_σ , wird die ideale Beulspannung $\sigma_{cr,x}$ [N/mm²] durch die Formel

$$\sigma_{cr,x} = k_\sigma * \sigma_e$$

errechnet.

In Spalte B wird mit Hilfe der idealen Beulspannung $\sigma_{cr,x}$ [N/mm²] und der Druckspannung σ_x [N/mm²] der Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,x}$ berechnet. Dazu wird die Formel

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_x}$$

genutzt.

In Spalte H ist die Plattenschlankheit $\overline{\lambda p}$ notiert. Sie setzt sich aus dem Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,x}$, der Stahlgüte S und der Druckspannung σ_x [N/mm²] in der Formel

$$\overline{\lambda p} = \sqrt{\frac{S}{\frac{\sigma_x}{\alpha_{cr,x}}}}$$

zusammen.

In Spalte I ist der ρ -Wert nach den Berechnungen der Winter-Kurve aufgeführt, im Folgenden $\rho_{Winter,t}$, genannt. Für die Berechnung wird die Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ in der Formel,

$$\rho_{Winter,t} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} * \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right),$$

eingesetzt.

In den Spalten J und K werden die Ergebnisse der Berechnung des FEM Programms ANSYS eingetragen. Dabei wird in die Spalte K die Kraft F [kN], die durch ANSYS errechnet wird und in Spalte J die zur Kraft F [kN] gehörende Imperfection $e_{0,erf}$ eingetragen.

In Spalte L wird die von ANSYS errechnete Kraft F [kN] in eine Spannung σ [N/mm²] umgerechnet. Dafür wird die Breite b [mm] und die Dicke t [mm] für folgende Formel

$$\sigma = \frac{F}{t * b} * 1000$$

genutzt.

In Spalte M wird ein ρ -Wert generiert, im Folgenden ρ_{ANSYS} genannt, um die eingetragenen Werte mit den Werten $\rho_{Winter,t}$ vergleichen zu können. Dafür fließen in folgender Formel

$$\rho_{ANSYS} = \frac{S}{\sigma}$$

die Stahlgüte S und die Spannung σ [N/mm²] aus Spalte L ein.

In Spalte N errechnet sich die prozentuale Abweichung von ρ_{ANSYS} zu $\rho_{Winter,t}$. Dies geschieht mit der Formel

$$Abweichung = \frac{\rho_{ANSYS}}{\rho_{Winter,t}}.$$

Diese Abweichung [%] ist der entscheidende Anteil der Tabellen. Er sollte so nahe wie möglich an 100,00% liegen.

In Spalte O wird der Verzweigungslastfaktor α_{cr} mit der ideale Beulspannung $\sigma_{cr,x}$ [N/mm²] und der Spannung σ [N/mm²] aus Spalte L errechnet. Die Formel

$$\alpha_{cr} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma}$$

wird zur Errechnung genutzt.

In Spalte P wird der Verhältnissfaktor zur originalen Ersatzimperfektion bestimmt. Dieser vergleicht die Länge a [mm] oder die Breite b [mm] mit der eingetragenen Imperfektion $e_{0,erf}$. Der kleinere Wert ist dabei ausschlaggebend. Dafür wird die Formel

$$\text{Verhältnissfaktor} = \text{Min} \begin{cases} \frac{a}{e_{0,erf}} \\ \frac{b}{e_{0,erf}} \end{cases}$$

genutzt. Mit diesem Verhältnissfaktor wird mit der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ zusammen ein Diagramm gebildet. Im Kapitel 4.3 wird näher auf die Diagramme eingegangen.

In Abbildung 11 und 12 sind die Anfänge der Tabellen für die Druck- und Schubbelastung zu sehen. Die vollständigen Tabellen befinden sich im Anhang.

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C										e ₀ = Angepasst					
		S	355												
		σ _y	100												
		k _σ	4												
σ _{cr,x}	α _{cr,x}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	α = 1	λ _p	p nach Winter	benötigte Imperfektion	ext. Kraft+ext. Pkt gekoppelt	p nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} = σ _{cr} / σ	Verhältnissfaktor zu original Ersatzimpf.
783,788	7,838	195,947	4626832	1200	1200	38,56	0,673	1,00	2,30 mm	16364,0	353,676	0,996	99,6%	2,2161	522
704,225	7,042	176,056	4385712	1200	1200	36,55	0,710	0,97	3,40 mm	15159,0	345,645	0,974	100,2%	2,0374	353
666,166	6,662	166,542	4265556	1200	1200	35,55	0,730	0,96	3,90 mm	14502,0	339,979	0,958	100,1%	1,9504	308

Abbildung 11: Der Anfang der Druckspannungstabelle, α = 1,00

Der wesentliche Unterschied der Tabellen zur Schubbeanspruchung, gegenüber den Tabellen zur Druckbeanspruchung, liegt an den vier Varianten, die mit der Schubbeanspruchung untersucht werden. Durch die Aufstellung mit den vier Varianten sind die Zeilen der Tabelle zur Schubbeanspruchung anders benannt. Im Kopfteil der Tabelle ist statt der Druckspannung σ_x [N/mm²] die Schubspannung τ eingetragen. Es ändern sich bei dem Beulwert k_{τ} , der idealen Beulspannung τ_{cr} und dem Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,\tau}$ im Grunde nur ihre Bezeichnungen. Die Grundberechnungen sind identisch zu den Berechnungen mit der Druckspannung σ_x [N/mm²].

Der Schlankheitsgrad λ_w der Schubbelastung ändert sich in seiner Berechnung durch die Formel

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{S}{\alpha_{cr,t} \frac{\sqrt{3}}{t}}}$$

Teile der Formel sind die Stahlgüte S, die Dicke t [mm] und der Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,t}$.

Die Werte, die in den Tabellen der Schubbelastung verglichen werden sind χ_w und $\chi_{w,ANSYS}$. Die Berechnung von $\chi_{w,ANSYS}$ ist identisch mit der Berechnung von ρ_{ANSYS} . Bei der Berechnung von χ_w wird für folgende Formel der Schlankheitsgrad λ_w genutzt:

$$\lambda_w < 0,83 \rightarrow \chi_w = 1$$

$$\lambda_w > 0,83 \rightarrow \chi_w = \frac{0,83}{\lambda_w}$$

Der Faktor η hat bei den Untersuchungen dieser Arbeit die Größe 1.

Die Diagramme von der Berechnung mit Schubbelastung werden mit dem Verhältnissfaktor, ähnlich wie bei der Druckbelastung und dem Schlankheitsgrad λ_w , gebildet.

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve										Angepasst durch Regression					
S 355										nach EC3-1-6					
										ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt					
t_w	$\alpha_{cr,t}$	α_c	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ_w	χ_w mit $\eta=1,0$	χ_w nach ANSYS	benötigte Verformung	F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	Abweichung	$\alpha_w = \sigma_w / \sigma$	Verhältnissfaktor zu original Ersatzimpf.
320,249	5,547	34,288	1117440	1200	1200	16,13	0,800	1,00	0,947	1,00 mm	3756,0	194,062	94,68%	1,6502	1200
301,134	5,216	32,241	1083578	1200	1200	15,64	0,825	1,00	0,948	1,00 mm	3648,0	194,372	94,83%	1,5493	1200
283,681	4,913	30,373	1051708	1200	1200	15,18	0,850	0,98	0,929	1,00 mm	3468,0	190,436	95,15%	1,4886	1200

Abbildung 12: Der Anfang der Schubspannungstabelle, $\alpha = 1,00$

4.3 Vorstellung der Diagramme

Die Diagramme von der Druck- und der Schubbelastung werden mit dem jeweiligen Verhältnissfaktor und der jeweiligen Schlankheit gebildet. Auf Grund der unterschiedlichen Berechnungen von Druck- und Schubbelastungen stellen sich die Diagramme unterschiedlich dar.

4.3.1 Druckbelastung

Bei der Druckbelastung werden 10 Diagramme erstellt. Auf der x-Achse der Diagramme ist die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und auf der y-Achse der Verhältnissfaktor verzeichnet. Die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist bei allen Diagrammen festgelegt in den Grenzen $\bar{\lambda}_p = 0,673$ bis $\bar{\lambda}_p = 3,000$. Die Achse, mit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$, beginnt bei dem Wert 0,0 und geht bis zum Wert 3,0. Der Verhältnissfaktor wird für jedes Diagramm eigens errechnet.

Die Formel ist in Kapitel 4.2 zu finden. Auch diese Achse beginnt bei dem Wert 0,0. Bei den Seitenverhältnissen $\alpha > 1,00$ gehen die Achsen bis maximal 1.000, bei $\alpha < 1,00$ bis maximal 38.400. Die Abbildung 13 zeigt exemplarisch das Diagramm des Seitenverhältnisses $\alpha = \sqrt{2}$.

Vom Startwert ausgehend fallen alle Kurven der 10 Diagramme ab. Dabei ist auffällig, dass bei den Seitenverhältnissen $\alpha = 0,15$ bis $\alpha = 0,45$ die Kurve weniger fällt als bei den anderen Diagrammen. Am stärksten fallen sie bei den Seitenverhältnissen $\alpha = 2,45$ und $\alpha = 3,00$. Nachdem der Tiefpunkt erreicht wird, steigen alle Kurven an. Der Tiefpunkt liegt bei allen Diagrammen zwischen $\bar{\lambda}_p = 0,80$ und $\bar{\lambda}_p = 1,00$. Der Hochpunkt wird bei allen Diagrammen bei unterschiedlichen $\bar{\lambda}_p$ Größen erreicht. Auffällig ist, dass bei den Seitenverhältnissen $\alpha = 0,15$ bis $\alpha = 0,45$, in dem gewählten Bereich, kein klarer Hochpunkt erreicht wird. Beim beobachteten Bereich hören die drei Kurven an ihren höchsten Stellen auf. Bei den anderen Diagrammen ist zu sehen, dass die Kurven abfallen.

Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$, zeigt ungewöhnlich viele Sprünge. Der grobe Verlauf ist den Diagrammen mit dem Seitenverhältnis $\alpha > 1,00$ sehr ähnlich.

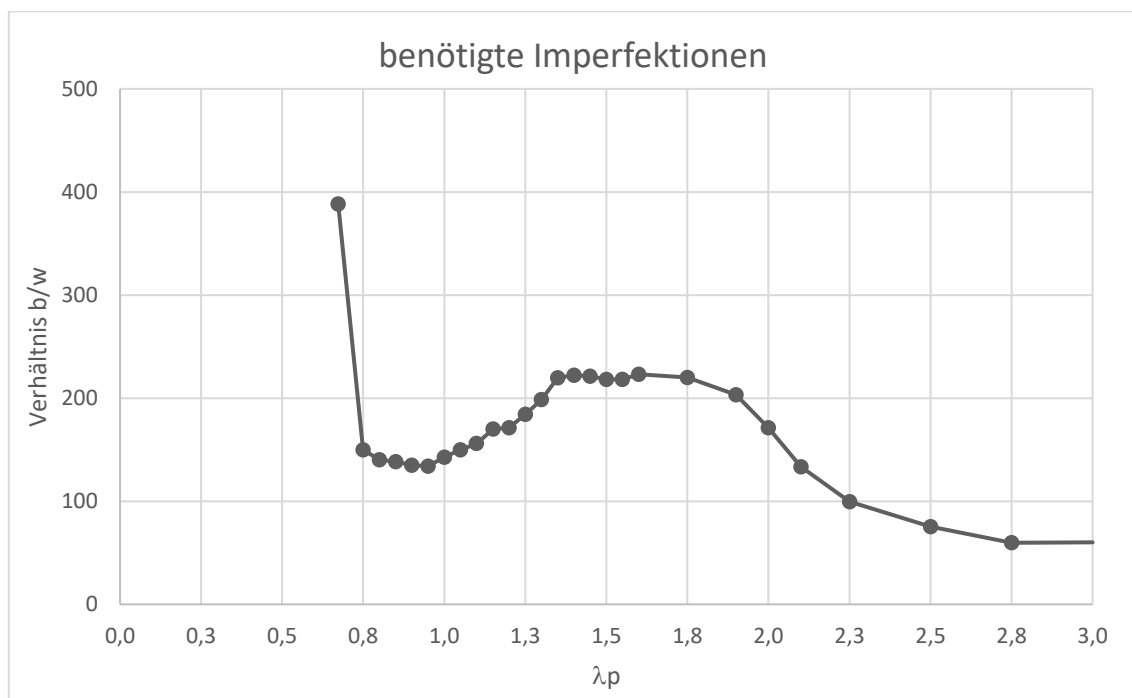


Abbildung 13: Druckbelastung mit Seitenverhältnisses $\alpha = \sqrt{2}$.

4.3.2 Schubbelastung

Bei der Schubbelastung werden 37 Diagramme erstellt. Auf der x-Achse der Diagramme ist die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und auf der y-Achse der Verhältnissfaktor verzeichnet. Die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist bei allen Diagrammen festgelegt in den Grenzen $\bar{\lambda}_p = 0,800$ bis $\bar{\lambda}_p = 3,000$. Die Achse, mit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$, beginnt bei dem Wert 0,0 und geht bis zum Wert 3,0. Der Verhältnissfaktor wird für jedes Diagramm eigens errechnet.

Die Formel ist in Kapitel 4.2 zu finden. Auch die y-Achse beginnt bei dem Wert 0,0. Sie geht bis zum maximalen Wert von 1.300. Die Abbildung 14 zeigt exemplarisch das Diagramm des Seitenverhältnisses $\alpha = 0,75$ der zweiten Variante.

Bei den zehn Diagrammen der ersten Variante zeigt sich ein Unterschied zwischen den Diagrammen mit dem Seitenverhältnis $\alpha > \sqrt{2}$ und den Diagrammen mit dem Seitenverhältnis $\alpha < \sqrt{2}$. Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$ bis $\alpha = 3,00$ fallen direkt am Anfang ab, steigen aber schnell wieder an und bleiben dann als zur x-Achse parallele Linie bei 1.200 stehen. Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$ fällt ebenfalls am Anfang ab, steigt dann etwas an und fällt dann in einer Kurve ab. Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$ und $\alpha = 0,60$ fallen am Anfang stark ab und gehen dann in eine flachere Kurve über. Ähnlich sieht es auch mit den restlichen Diagrammen der ersten Variante aus, jedoch bleiben die Werte erst bei 1.200, bevor sie stark fallen und dann abflachen.

Bei den neun Diagrammen der zweiten Variante zeigt sich der Unterschied zwischen den Diagrammen bei dem Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$. Bei den Seitenverhältnissen $\alpha = \sqrt{6}$ und $\alpha = 3,00$ stellt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der ersten Variante ein. Der Unterschied besteht darin, dass das Abfallen stärker ausfällt, bis die Kurven wieder steigen und bei 1.200 verbleiben. Das Diagramm des Seitenverhältnisses $\alpha = 2,00$ fällt am Anfang ebenfalls stark ab, steigt dann etwas an und fällt zum Schluss wieder ab. Das Diagramm des Seitenverhältnisses $\alpha = 0,15$, verhält sich ähnlich wie das Diagramm der ersten Variante mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$. Die restlichen Diagramme der zweiten Variante fallen am Anfang stark und flachen dann ab.

Bei den neun Diagrammen der dritten Variante verlaufen die Linien als Parallelen zur x-Achse auf Höhe von 1.200.

Bei den neun Diagrammen der vierten Variante zeigt sich der Unterschied der Diagramme zwischen den Seitenverhältnissen $\alpha \geq 2,00$ und $\alpha < 2,00$. Die Diagramme mit den Seitenverhältnissen $\alpha \geq 2,00$ fallen, wie schon bei den Varianten eins und zwei, am Anfang ab und steigen dann zügig wieder an, bis sie bei 1.200 bleiben. Auch das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$ verhält sich ähnlich zu seinen Varianten eins und zwei. Die restlichen Diagramme fallen, wie die Varianten eins und zwei auch, erst zügig und flachen dann ab.

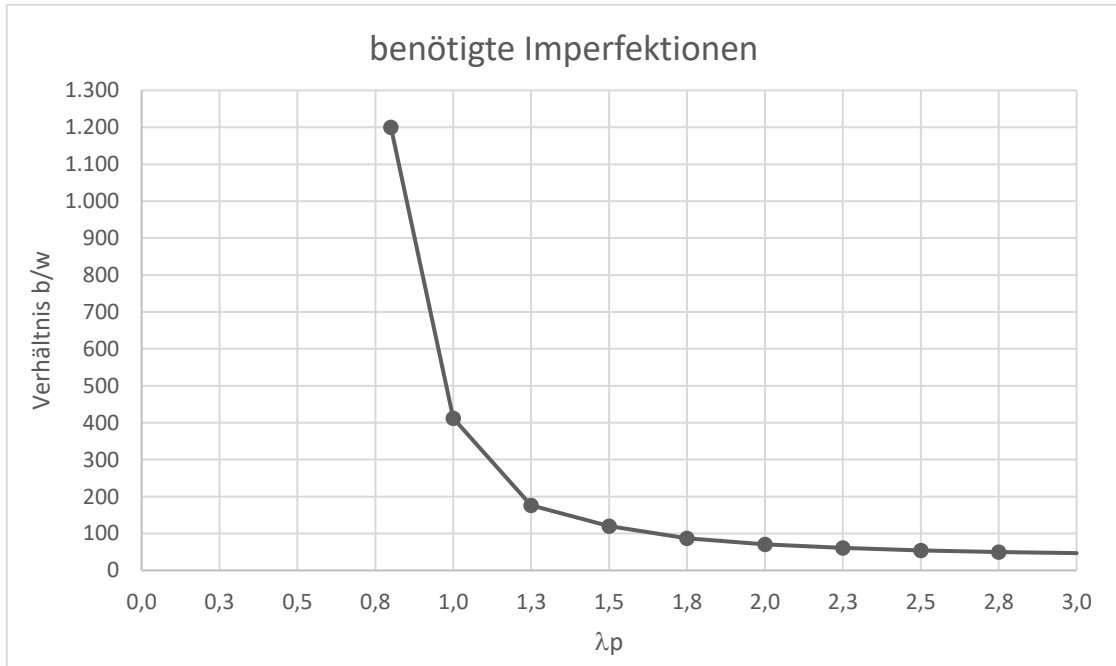


Abbildung 14: Schubbelastung mit Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$ und der zweiten Variante

5. Bewertung und Gegenüberstellung

5.1 Erläuterung der auftretenden Effekte

Zu beobachten ist, dass mit größer werdender Ersatzimperfektion die errechnete Kraft abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Bauteil ohne Imperfektionen, also ein perfektes Bauteil, mit mehr Kraft belastet werden kann, als ein realistisches Bauteil mit Imperfektionen.

Auch eine größer werdende Schlankheit führt zu einer Abnahme der errechneten Kraft. Wenn die errechneten Kräfte der kleinsten bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p = 0,673$ und der größten bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p = 3,000$ verglichen werden, lässt sich die Abnahme der errechneten Kraft gut erkennen. Dies wird in Tabelle 3 für Druckbelastung und in Tabelle 4 für Schubbelastung verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass dickere Platten mit größeren Kräften beansprucht werden können, als dünnere Platten mit den gleichen Seitenverhältnissen.

α	F [kN] bei $\bar{\lambda}_p = 0,673$	F in [kN] bei $\bar{\lambda}_p = 3,000$
0,15	4780,8	250,5
0,30	9017,0	617,4
0,45	12314,0	862,3
0,60	14478,0	1002,1
0,75	15674,0	1094,1
1,00	16364,0	1137,6
$\sqrt{2}$	15467,0	1072,6
2,00	16441,0	1138,3
$\sqrt{6}$	16094,0	1116,2
3,00	16419,0	1138,3

Tabelle 3: Vergleich der errechneten Kräfte über die Schlankheit bei Druckbelastung

α	F [kN] bei $\lambda_w = 0,800$				F in [kN] bei $\lambda_w = 3,000$			
	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
0,15	704,5	722,0	34,9	722,0	57,5	57,5	3,3	57,4
0,30	1386,7	1469,3	97,6	1444,4	111,6	111,6	11,6	111,5
0,45	2007,9	2104,1	140,8	2074,1	160,8	160,8	6,7	161,1
0,60	2628,9	2767,0	174,6	2726,4	205,4	205,4	10,8	205,5
0,75	3157,1	3279,5	135,5	3240,0	245,6	245,4	6,1	245,4
1,00	3756,0				291,7			
$\sqrt{2}$	4256,6	4486,2	185,2	4423,3	331,9	331,8	21,7	331,9
2,00	4558,7	4735,7	101,4	4597,1	340,7	349,6	27,1	334,4
$\sqrt{6}$	4706,1	4885,7	115,3	4801,9	343,7	356,5	30,8	340,2
3,00	4757,0	4996,6	227,4	4906,2	329,4	349,1	51,0	329,5

Tabelle 4: Vergleich der errechneten Kräfte über die Schlankheit bei Schubbelastung

Beim Betrachten der Tabelle 3 ist deutlich zu sehen, dass die Kräfte insgesamt zunehmen. Jedoch fallen zwei Einbrüche auf. Auch scheint die Zunahme der Kraft ab dem Seitenverhältnis $\alpha > 1,00$ langsam zu stagnieren. Aus diesem Grund sollten ab einer gewissen Größe der Platte Versteifungen genutzt werden.

Bei Tabelle 4 fällt auf, dass die Werte der dritten Variante von den Werten der anderen Varianten (V1, V2 und V4) stark abweichen. Dies scheint ein numerisches Problem zu sein. Um etwaige Fehler ausschließen zu können, sollte es erneut untersucht werden. Jedoch übersteigt das den Umfang dieser Arbeit. Ebenfalls auffällig ist das Ergebnis der Zeile $\alpha = 1,00$. Für diese Berechnungsreihe wurden anhand von dem Seitenverhältnis $\alpha = 1,00$ mehrere Voruntersuchungen vorgenommen. Dabei wurde festgestellt, dass zwei verschiedene Kopplungsarten der Ränder, sowie zwei verschiedene numerische Kraftarten untersucht werden sollten.

5.1.1 Druckbelastung

Im Folgenden wird an zwei Verläufen exemplarisch beschrieben, wo die Unterschiede der geometrischen Ersatzimperfektionen e_0 nach DIN EN 1993-1-5 [D1] und der ermittelten geometrischen Ersatzimperfektion $e_{0,erf}$ liegen. Weiterhin wird versucht einen Ausgangspunkt für die bessere Nutzung der Ersatzimperfektion zu finden. Am Ende wird, an einem Seitenverhältnis, die ermittelte geometrische Ersatzimperfektion $e_{0,erf}$ mit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ ins Verhältnis gesetzt.

Bisher erfolgt die Berechnung der geometrischen Ersatzimperfektion e_0 nach DIN EN 1993-1-5 [D1], nach der Formel:

$$e_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{200} \\ \frac{b}{200} \end{array} \right.$$

Die so berechnete geometrische Ersatzimperfektion ist unabhängig von der Schlankheit der Platte. Dieser konstante Wert wird im Folgenden indirekt mit den Diagrammen verglichen, was über den Verhältnisfaktor erfolgt. Es hat sich gezeigt, dass ein großer Teil der Kurven oberhalb von e_0 liegt. Das bedeutet, dass diese Bereiche sehr viele Möglichkeiten bieten, um wirtschaftlicher planen zu können. Bei den Bereichen, welche unterhalb von e_0 liegen, sollten die Werte angepasst werden, um die Unsicherheiten zu vermeiden.

In Abbildung 15 sind die Diagramme mit den Seitenverhältnissen $\alpha = 0,60$ links und $\alpha = \sqrt{6}$ rechts abgebildet. Ebenfalls verzeichnet ist, als orangene Linie, die errechnete geometrische Ersatzimperfektion e_0 nach DIN EN 1993-1-5 [D1]. Bei der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass die verschiedenen Seitenverhältnisse in unterschiedlicher Relation zu e_0 stehen.

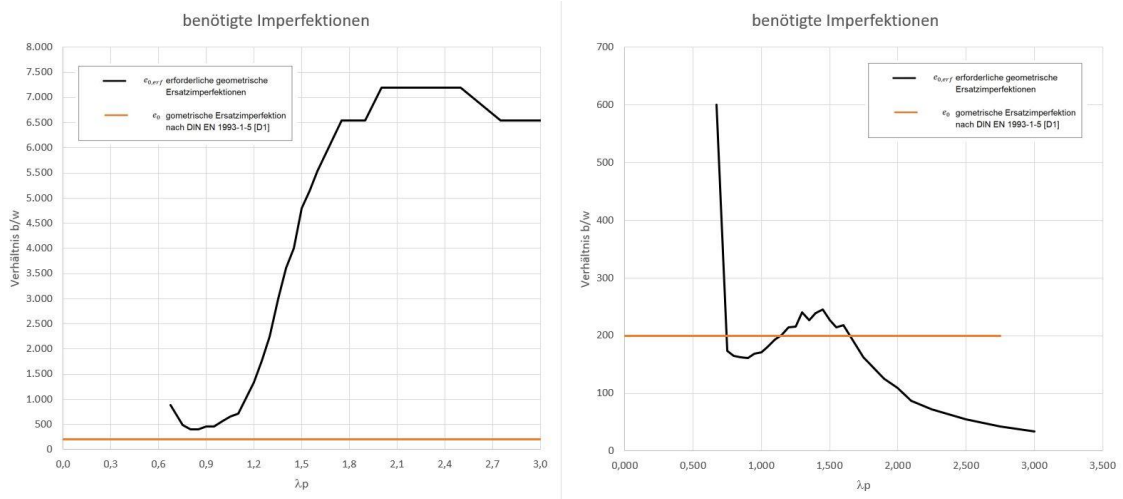


Abbildung 15: links: Diagramm mit Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$ rechts: Diagramm mit Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$

Bei beiden Kurven ist ein Tiefpunkt zu erkennen. Danach steigt die Kurve wieder an. Die Tiefpunkte liegen zwischen $\bar{\lambda}_p = 0,800$ und $\bar{\lambda}_p = 0,900$. Beim Vergleich mit den übrigen Diagrammen zeigt sich, dass die Tiefpunkte bei allen in einem ähnlichen Bereich liegen. Bei dem Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$ wird das Ende der Steigung bei $\bar{\lambda}_p = 1,450$ erreicht. Bei der Kurve mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$ ist das Ende der Steigung nicht ersichtlich.

Auch bei den Diagrammen mit den Seitenverhältnissen $\alpha < 0,60$ ist aufgefallen, dass der Hochpunkt nicht erreicht, bzw. überschritten wird. Es ist wahrscheinlich, dass die Enden der Steigungen außerhalb des beobachteten Bereichs liegen. Die Verläufe der anderen Diagramme lassen diesen Schluss zu. Um dieses Verhalten zu verifizieren, müssten weitere Untersuchungen mit den Schlankheiten $\bar{\lambda}_p > 3,000$ vorgenommen werden.

Der Anstieg der Kurven hängt mit dem überkritischen Traglastverhalten der Platten zusammen. Das überkritische Traglastverhalten ist gegeben, wenn der Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr} < 1$ ist. Daher ist die Stelle $\alpha_{cr} = 1$ interessant. Sie stellt sich bei allen Diagrammen etwa bei $\bar{\lambda}_p = 1,200$ ein. Das überkritische Traglastverhalten sollte unbedingt genutzt werden, um wirtschaftlicher planen zu können. Dabei stellt der jeweilige Tiefpunkt eine Art Startwert dar. Dies führt zu der Annahme, dass auch bei anderen, nicht untersuchten Seitenverhältnissen, im Bereich zwischen $\bar{\lambda}_p = 0,800$ und $\bar{\lambda}_p = 0,950$ eine Art Steigung und ein globaler Startbereich liegt.

Wichtig ist zu erwähnen, dass die Werte bei den Seitenverhältnissen $\alpha < 0,60$ nicht ganz aussagekräftig sind, da in manchen Fällen nicht die gewünschten 100,00% erreicht werden konnten. Die benötigten Ersatzimperfektionen liegen dort im sehr kleinen Bereich, bis 0,01 mm. Die Differenz ergibt sich daraus, dass der Skalierungsfaktor nur bis zu zwei Stellen nach dem Komma eingegeben wurde.

Ebenfalls erwähnenswert ist, dass bei der Erstellung der Daten mehrere Werte beim Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$ auffielen. Es handelt sich um Werte, die zwischen $\bar{\lambda}_p = 1,050$ und $\bar{\lambda}_p = 1,450$ liegen. Die Auffälligkeiten bestehen in den Abweichungen der Ersatzimperfectionen. Diese sind als große Sprünge im Diagramm (Abbildung 16) zu erkennen. Auch nach mehrmaliger Überprüfung blieben sie bestehen. Dieses Seitenverhältnis sollte erneut untersucht werden, um etwaige Fehler ausschließen zu können. Für diese Arbeit werden die auffälligen Werte als Ausreißer betrachtet.

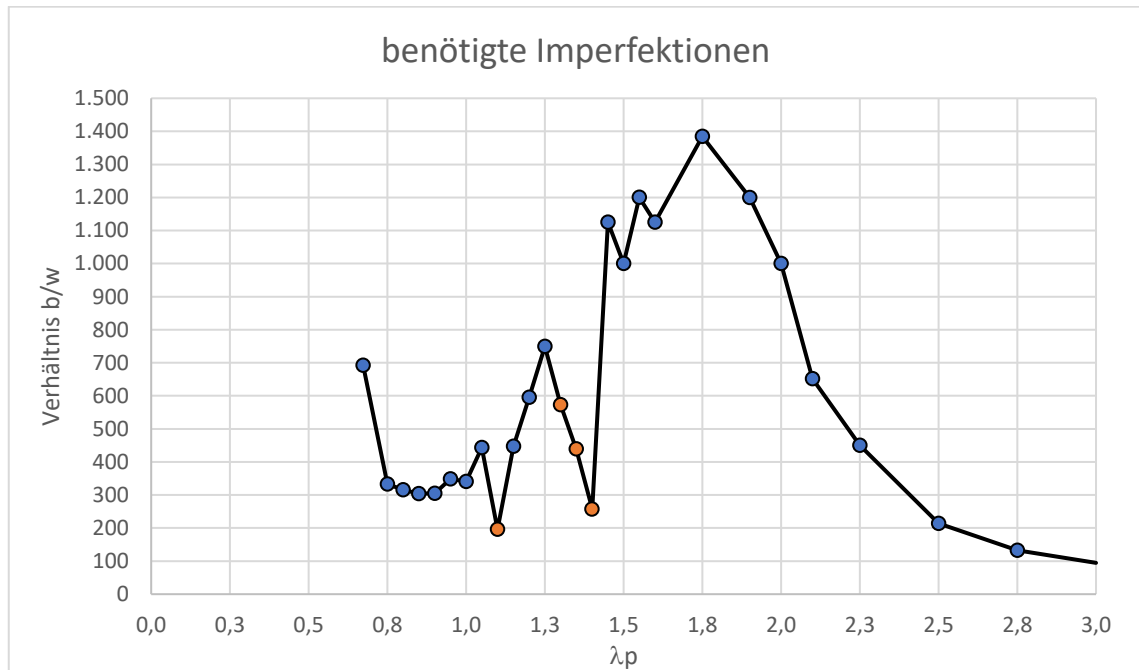


Abbildung 16: Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$

Bei der Abbildung 17 ist das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$ zu sehen. Dort wird die ermittelte geometrische Ersatzimperfection $e_{0,erf}$ im Verhältnis zu der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ dargestellt.

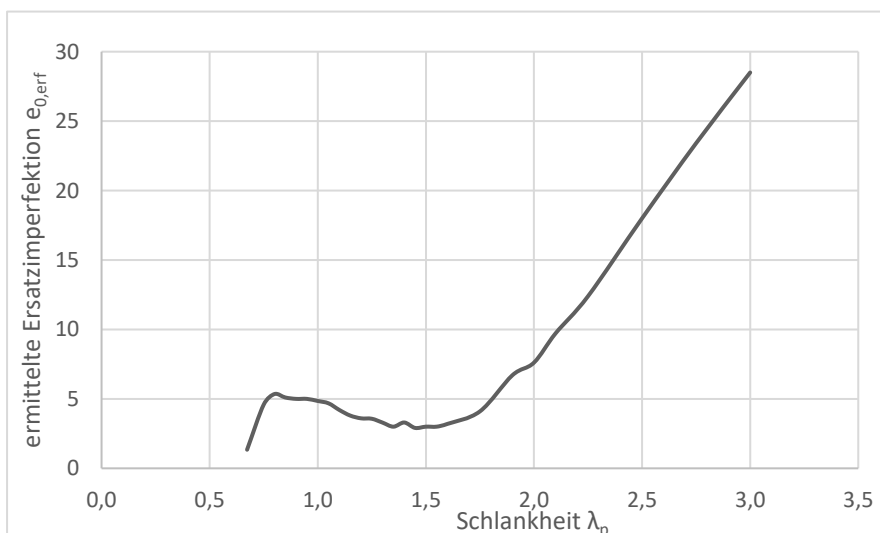


Abbildung 17: Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$

Auffällig ist, dass die ermittelte geometrische Ersatzimperfektion $e_{0,erf}$, nicht wie erwartet stetig mit der Schlankheit steigt. Am Anfang der Kurve befindet sich ein Hochpunkt. Anschließend fällt die Kurve bis zum Tiefpunkt ab, um danach wieder anzusteigen. Die ermittelte Ersatzimperfektion $e_{0,erf}$ wird, trotz Zunahme der Schlankheit, kleiner. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Bereich der Bereich der überkritischen Traglastreserve ist.

5.1.2 Schubbelastung

Der größte Unterschied im Vorgehen zur Druckbelastung liegt bei der Schubbelastung in den vier verschiedenen Durchläufen. Diese unterscheiden sich in der Kopplung der Ränder und in den aufgebracht Kraftarten. Beim Betrachten der Diagramme fällt auf, dass die Ergebnisse der dritten Variante eine unrealistische Abweichung aufweisen. Die Diagramme verlaufen alle parallel und die Werte erscheinen zu klein. Da es ein numerisches Problem zu sein scheint, fließt die gesamte dritte Variante nicht in die folgenden Untersuchungen mit ein.

Die Kurven der Seitenverhältnisse $\alpha > 1,00$ zeigen einen zusätzlichen Anstieg, im Gegensatz zu den anderen Kurven. Diese Steigung befindet sich im Bereich der kleineren Schlankheiten. Daher wird in diesem Bereich die überkritische Traglastreserve vermutet.

Am Beispiel der ersten Variante des Seitenverhältnisses $\alpha = \sqrt{2}$ (Abbildung18) ist zu erkennen, dass der eingezeichnete Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr} = 1$ etwa bei $\lambda_w = 1,250$, also in der Mitte der Steigung liegt. Der Bereich der überkritischen Traglastreserven liegt um den Verzweigungslastfaktor herum. Das Ziel ist es, diesen Bereich umfassend zu nutzen.

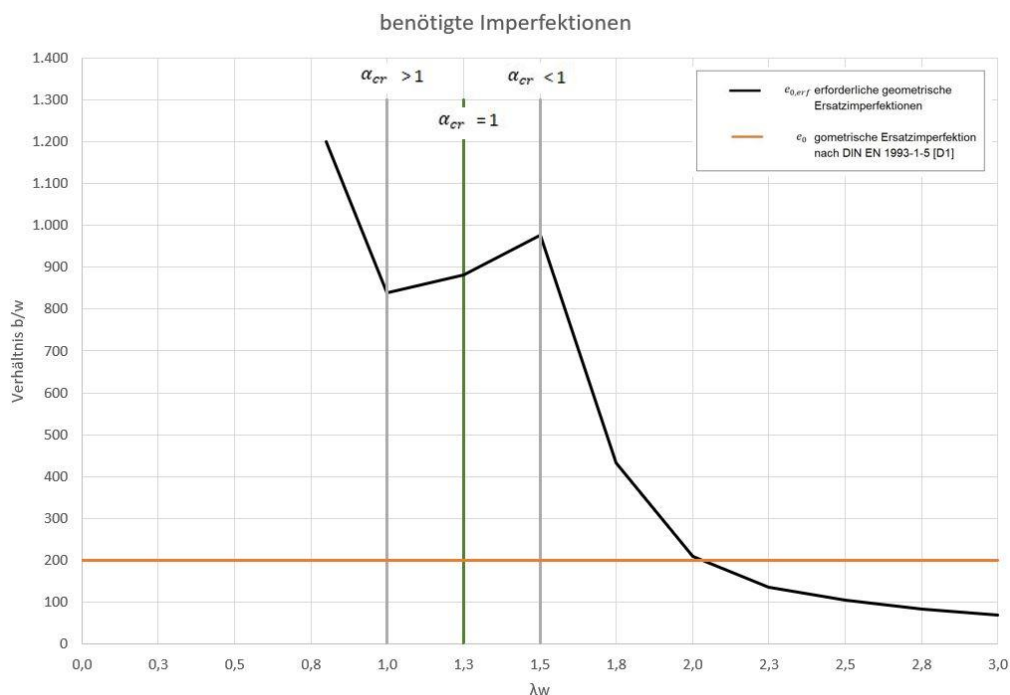


Abbildung 18:erste Variante mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$ und dem Verzweigungslastfaktor α_{cr}

Die erste Variante mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$ fällt, wie alle anderen, am Anfang stark ab. Jedoch steigt die Kurve rasch wieder an. Der weitere Verlauf ist parallel. Die Abweichungen befinden sich im parallel verlaufenden Bereich bei unter 100,00%, da die ermittelten Ersatzimperfectionen nicht unter 1,00 mm untersucht wurden. Die Abweichungen von den 100,00% sind ein eindeutiger Hinweis darauf, dass der weitere Verlauf nicht parallel ist, sondern zunächst weiter ansteigt. Bei der Schlankheit $\lambda_w = 2,250$ steigen die Prozentzahlen wieder an. Dies lässt vermuten, dass die Kurve ab dieser Stelle wieder sinkt.

Die Diagramme mit den Seitenverhältnissen $\alpha < \sqrt{6}$ haben einen ähnlichen Verlauf. Auch die Abweichungen stellen sich ähnlich dar. Daher können die gleichen Überlegungen zum weiteren Verlauf vorausgesetzt werden.

Abschließend ist festzustellen, dass die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha < 1,00$ einen ähnlichen Verlauf haben. Bei den Diagrammen mit dem Seitenverhältnis $\alpha > 1,00$ scheint eine Art Umbruch zu erfolgen. Die gleichmäßig abfallenden Kurven ändern sich und beginnen zu steigen. Bei Durchsicht aller Diagramme scheint die Variante zwei den Umbruch am besten darzustellen. Daher eignet sich diese Variante für weitere Untersuchungen.

Zwischen den Verläufen der Varianten eins und zwei zu den Verläufen der Varianten drei und vier wurde ein Unterschied vermutet. Die jeweilige Kopplung der Ränder führte zu diesen Annahmen. Beim Auswerten der Diagramme zeigte sich, dass sich die Erwartung zumindest für die Seitenverhältnisse $\alpha < 1,00$ erfüllt hat. Dagegen haben, bei den Seitenverhältnissen $\alpha > 1,00$ die Varianten zwei und vier, mehr Ähnlichkeiten aufgezeigt. Die Variante drei konnte für die Vergleiche nicht genutzt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Arbeitsziel umfasste eine Untersuchung der geometrischen Ersatzimperfektion im Verhältnis zu den sich ändernden bezogenen Schlankheiten. Dabei wurden auch verschiedene Seitenverhältnisse miteinbezogen. Für die Seitenverhältnisse von $\alpha = 0,15$ bis $\alpha = 3,00$ wurden, bei verschiedenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_p = 0,673$ bis $\bar{\lambda}_p = 3,000$, die geometrischen Ersatzimperfektionen ermittelt. Die Ermittlung der Ersatzimperfektion und den dazugehörigen Kräften erfolgte mit Hilfe des FEM Programms ANSYS. Die so erstellten Ergebnisse wurden mit Hilfe einer Tabelle indirekt mit der Winter-Kurve verglichen und ausgewertet.

Die Erhebung erfolgte sowohl für Druckbelastung als auch für Schubbelastung. Die Abläufe ähnelten sich, der einzige wesentliche Unterschied bestand darin, dass bei der Schubbelastung vier Varianten untersucht wurden. Die Druckbelastung benötigte nur eine Variante. Auf Grund der ausreichenden Untersuchungen der Randbedingungen bei Druckbelastungen wurde dort der Fokus auf die verschiedenen Schlankheiten gelegt. Bei der Schubbelastung wurden mehr die Randbedingungen in den Mittelpunkt der Untersuchungen gesetzt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es bei Druck- und Schubbelastung noch viel Potential im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit gibt. Die Unsicherheiten in manchen Bereichen dürfen nicht vernachlässigt werden. Diese Untersuchungen stellen nur einen geringen Teil einer Möglichkeit dar, um die Berechnungen der geometrischen Ersatzimperfektion zu optimieren.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass diese Untersuchung sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Berechnungen auswirken könnte. Durch die Anpassung der geometrischen Ersatzimperfektionen, in Bezug auf die Schlankheiten, können einige Platten höhere Kräfte aufnehmen. Dadurch ist eine Materialeinsparung möglich. Dies ist besonders in der heutigen Zeit wichtig, um Ressourcen und Energie einzusparen. Dabei fast noch wichtiger sind die unsicheren Bereiche.

Es wäre vorstellbar, dass aufgrund der Untersuchungen, eine Anpassung der Rechenmethode der geometrischen Ersatzimperfektionen nach DIN EN 1993-1-5 [D1] erfolgt.

Literaturverzeichnis

- [A1] ANSYS (Version R1 2022) FEM Programm system, Mechanical & Space Claim 2020 R2, Copyright 2008-2022 ANSYS Inc.
- [A2] ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania,
(Zugriff am: 15.08.2022, 18:47 Uhr). Verfügbar unter:
<https://www.ansys.com/de-de>
- [A3] ANSYS courses Newton Raphson Method
https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2019/05/3.3.3-Newton_Raphson_Method_New_Template_Master_without_Animation_Slide.pdf
- [D1] DIN EN 1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, Beuth Verlag, Berlin 2019
- [D2] DIN 18800-3: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Plattenbeulen. Normenausschuss Bauwesen im DIN (NABau), November 2008
- [H1] Hermann, M.: Mathematik: Band 1, Algebraische Probleme. 4. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin und Boston 2020
- [J1] Jungbluth, O.; Friemann, H.; Kubsch, G.: 14/1985 Berichte aus Forschung und Entwicklung – Experimentelle und theoretische Ermittlungen der Beullasten unversteifter Stahlbleche unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Eigenspannungen, Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Köln, 1985
- [K1] Kindmann, R.: Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie 2. Ordnung, Verlag Ernst & Sohn, 4. Auflage, 2008
- [K2] Kuhlmann U.: Stahlbau Kalender 2009, Verlag Ernst & Sohn, 2009 DIN EN 1993-1-5 (10/2019), Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; nationaler Anhang NA (11/2018)
- [K3] Kuhlmann, U.; Schmidt-Rasche, C., Fricke, J., Pourostad, V.: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Heft B 140, Bergisch Gladbach 2017
- [L1] Lohse, W.; Laumann, J.; Wolf, C.: Stahlbau 1: Bemessung von Stahlbauten nach Eurocode mit zahlreichen Beispielen, 25., überarb. und akt. Auflage 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (2016)
- [L2] Lohse, W.; Laumann, J.; Wolf, C.: Stahlbau 2, 21. überarb. und akt. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
- [P1] Petersen, C.: Stahlbau – Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, 4. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2013

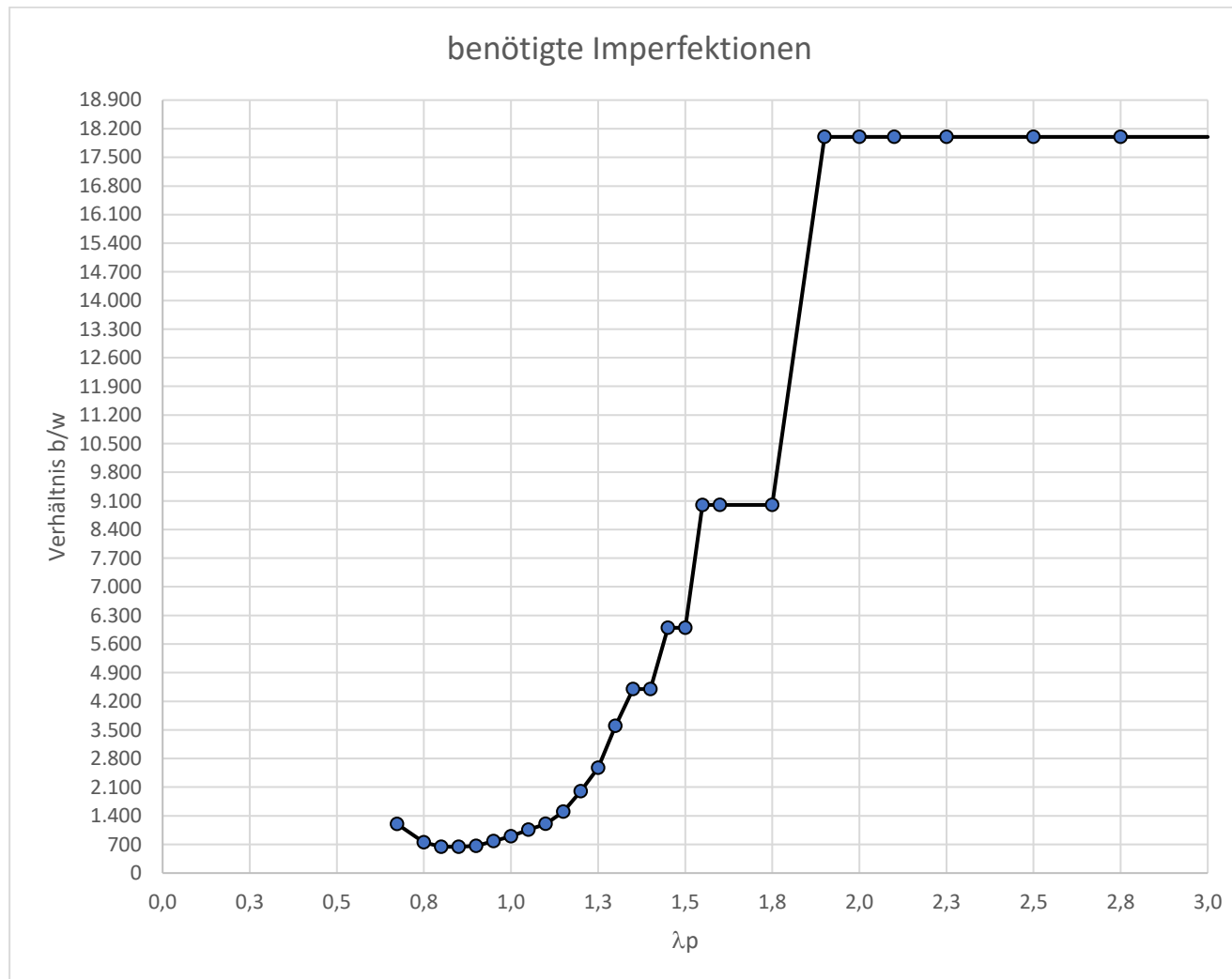
- [P2] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1982.
- [R1] Roik, K., Kindmann, R., Schaumann, P.: Plattenbeulen – 8 Großversuche mit längs- und querausgesteiften Blechfeldern. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Köln 1982
- [S1] Scheer; Pfeil; Fuchs: Auswertung von internationalen Veröffentlichungen, Versuchsberichten, Kommissionspapieren u. ä. auf dem Gebiet des Beulens von Platten aus Stahl. Bericht 6095 des Institutes für Stahlbau, TU Braunschweig. 1987
- [S2] Schönfeld, L.; Naujoks, B.; Ludwig, C.: Slenderness-dependent Equivalent Imperfections in Plate Buckling, The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS 2022 Portugal, Ernst & Sohn, 2022 [prPaper]

Anhang

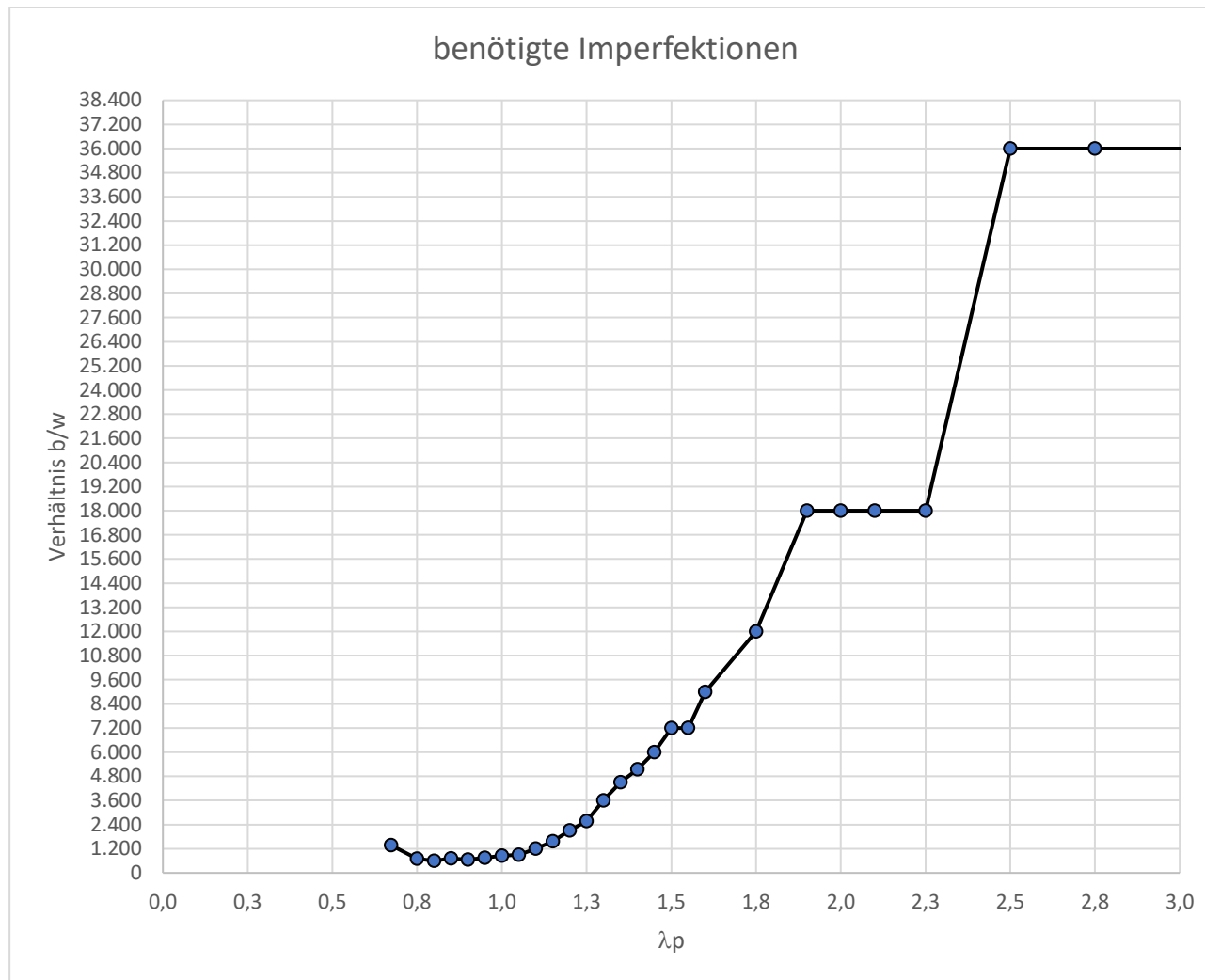
Anhang 1 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C									e ₀ = Angepasst						
				S	355										
				σ_x	100,0 N/mm ²										
				k _σ	46,467		$\alpha = 0,15$								
$\sigma_{cr,x}$	$\alpha_{cr,x}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ_p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnifaktor zu original Ersatzimpf.
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	ρ nach ANSYS			
783,787	7,838	16,868	1357505	180	1200	11,31	0,673	1,00	0,15 mm	4780,8	352,176	0,992	99,21%	2,2256	1200
631,111	6,311	13,582	1218134	180	1200	10,15	0,750	0,94	0,24 mm	4081,3	335,045	0,944	100,2%	1,8837	750
554,688	5,547	11,937	1142001	180	1200	9,52	0,800	0,91	0,28 mm	3669,2	321,296	0,905	99,9%	1,7264	643
491,350	4,913	10,574	1074825	180	1200	8,96	0,850	0,872	0,28 mm	3313,2	308,255	0,868	99,6%	1,5940	643
438,271	4,383	9,432	1015112	180	1200	8,46	0,900	0,840	0,27 mm	3026,2	298,115	0,840	100,0%	1,4701	667
393,352	3,934	8,465	961685	180	1200	8,01	0,950	0,81	0,23 mm	2754,0	286,372	0,807	99,7%	1,3736	783
355,000	3,550	7,640	913601	180	1200	7,61	1,000	0,78	0,20 mm	2520,7	275,908	0,777	99,6%	1,2867	900
321,995	3,220	6,930	870096	180	1200	7,25	1,050	0,75	0,17 mm	2333,4	268,177	0,755	100,3%	1,2007	1059
293,388	2,934	6,314	830546	180	1200	6,92	1,100	0,73	0,15 mm	2145,1	258,276	0,728	100,0%	1,1359	1200
268,431	2,684	5,777	794435	180	1200	6,62	1,150	0,70	0,12 mm	1988,8	250,341	0,705	100,3%	1,0723	1500
246,528	2,465	5,305	761334	180	1200	6,34	1,200	0,68	0,09 mm	1829,4	240,289	0,677	99,5%	1,0260	2000
227,200	2,272	4,889	730881	180	1200	6,09	1,250	0,66	0,07 mm	1708,9	233,814	0,659	99,9%	0,9717	2571
210,059	2,101	4,521	702770	180	1200	5,86	1,300	0,64	0,05 mm	1610,9	229,222	0,646	101,04%	0,9164	3600
194,787	1,948	4,192	676741	180	1200	5,64	1,350	0,62	0,04 mm	1485,8	219,552	0,618	99,7%	0,8872	4500
181,122	1,811	3,898	652572	180	1200	5,44	1,400	0,60	0,04 mm	1370,6	210,030	0,592	98,3%	0,8624	4500
168,847	1,688	3,634	630069	180	1200	5,25	1,450	0,59	0,03 mm	1307,6	207,533	0,585	99,9%	0,8136	6000
157,778	1,578	3,395	609067	180	1200	5,08	1,500	0,57	0,03 mm	1191,1	195,561	0,551	96,8%	0,8068	6000
147,763	1,478	3,180	589420	180	1200	4,91	1,550	0,55	0,02 mm	1173,1	199,026	0,561	101,3%	0,7424	9000
138,672	1,387	2,984	571000	180	1200	4,76	1,600	0,54	0,02 mm	1084,9	190,000	0,535	99,3%	0,7299	9000
115,918	1,159	2,495	522058	180	1200	4,35	1,750	0,50	0,02 mm	863,3	165,369	0,466	93,2%	0,7010	9000
98,338	0,983	2,116	480843	180	1200	4,01	1,900	0,47	0,01 mm	829,8	172,566	0,486	104,5%	0,5699	18000
88,750	0,887	1,910	456800	180	1200	3,81	2,000	0,44	0,01 mm	728,0	159,378	0,449	100,9%	0,5569	18000
80,499	0,805	1,732	435048	180	1200	3,63	2,100	0,43	0,01 mm	641,4	147,432	0,415	97,4%	0,5460	18000
70,123	0,701	1,509	406045	180	1200	3,38	2,250	0,40	0,01 mm	535,2	131,811	0,371	92,6%	0,5320	18000
56,800	0,568	1,222	365440	180	1200	3,05	2,500	0,36	0,01 mm	408,1	111,671	0,315	86,2%	0,5086	18000
46,942	0,469	1,010	332218	180	1200	2,77	2,750	0,33	0,01 mm	314,8	94,742	0,267	79,8%	0,4955	18000
39,444	0,394	0,849	304534	180	1200	2,54	3,000	0,31	0,01 mm	250,5	82,260	0,232	75,0%	0,4795	18000

Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$



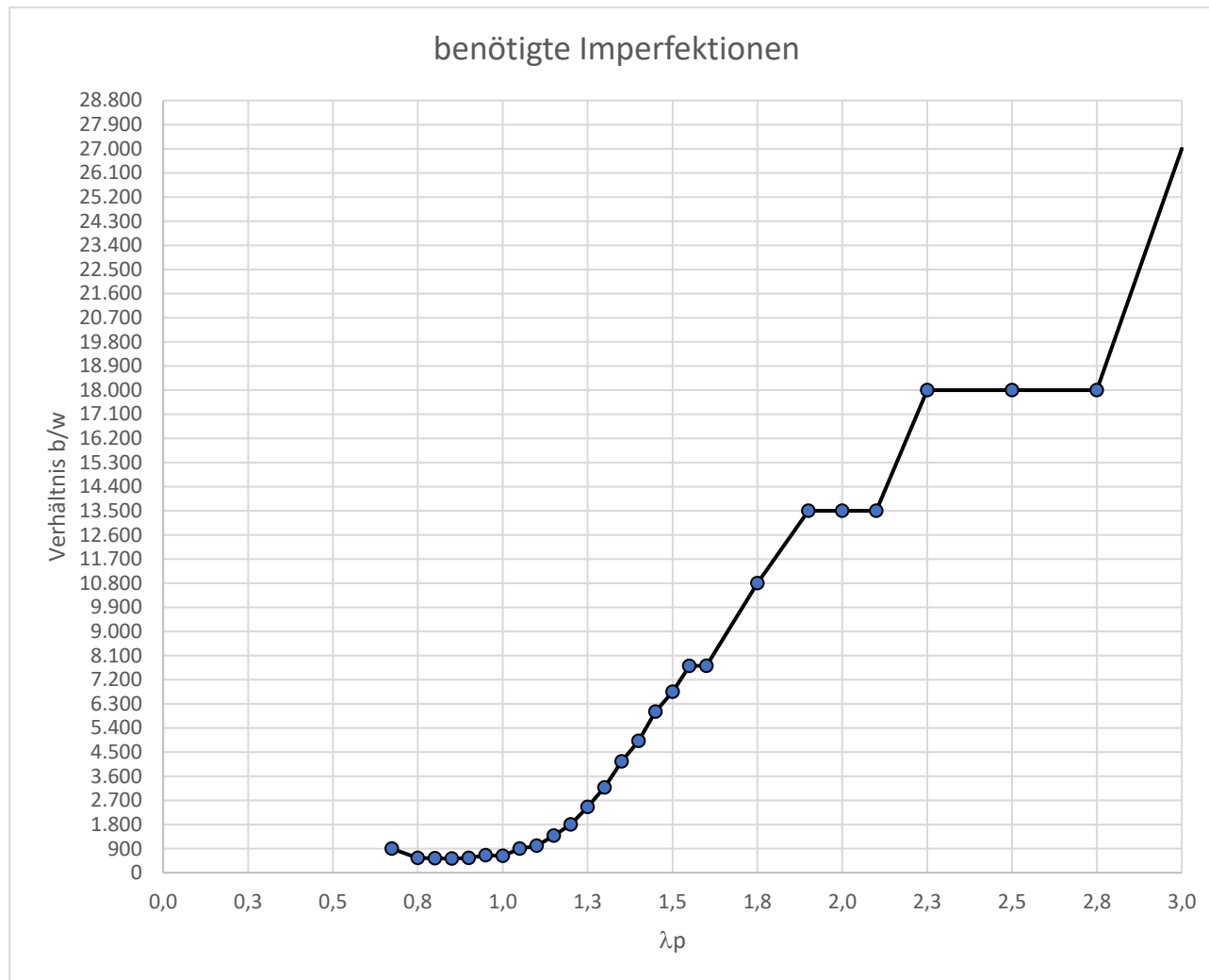
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,30$



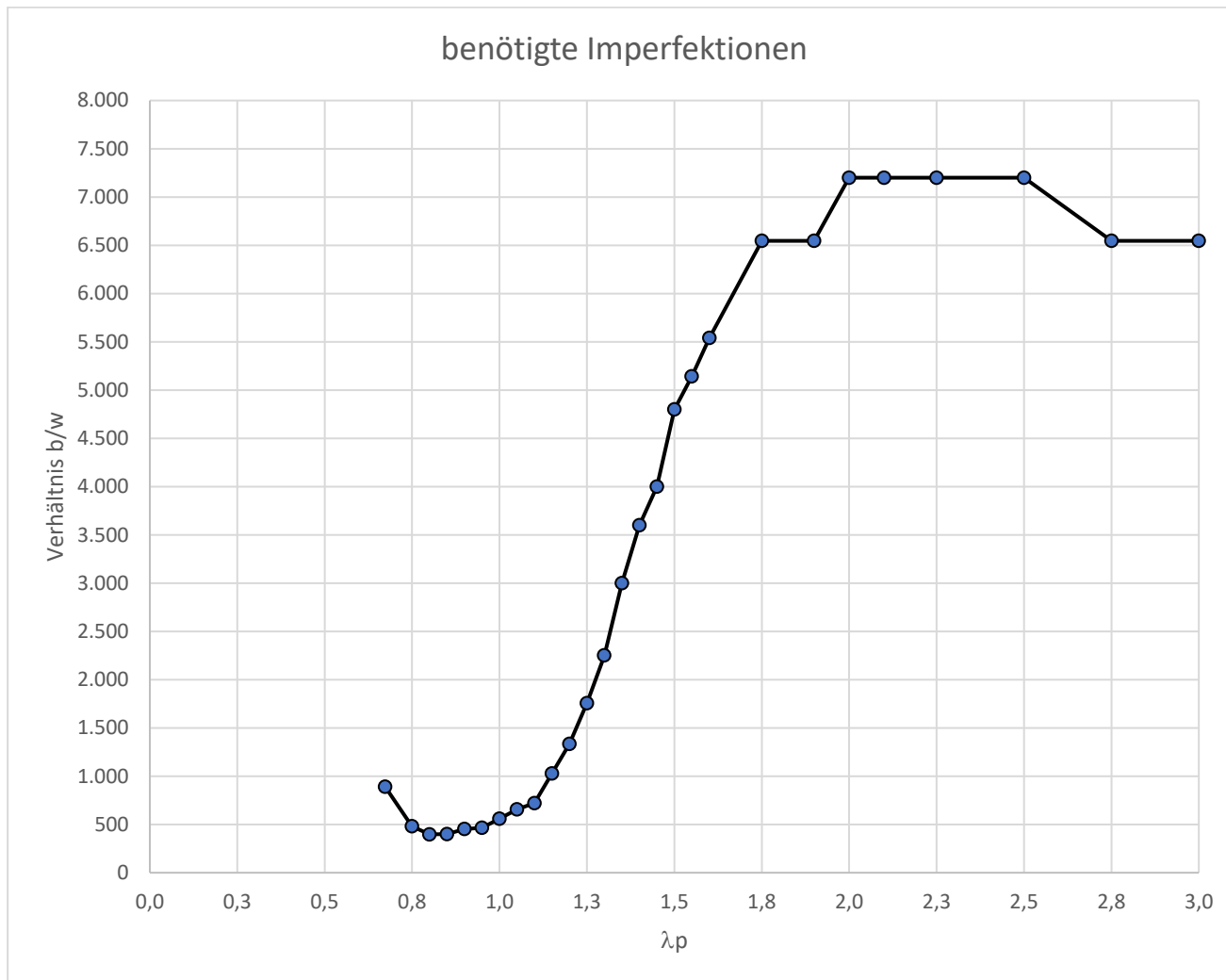
Anhang 3 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C									e ₀ = Angepasst						
S 355															
σ_x 100,0 N/mm ²															
k _σ 7,141 α = 0,45															
$\sigma_{cr,x}$	$\alpha_{cr,x}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ_p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnissfaktor zu original Ersatzimpf.
										F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	ρ nach ANSYS			
783,786	7,838	109,762	3462905	540	1200	28,86	0,673	1,00	0,60 mm	12314,0	355,597	1,002	100,2%	2,2041	900
631,110	6,311	88,381	3107380	540	1200	25,89	0,750	0,94	0,99 mm	10401,0	334,719	0,943	100,1%	1,8855	545
554,688	5,547	77,679	2913173	540	1200	24,28	0,800	0,91	1,00 mm	9387,3	322,236	0,908	100,2%	1,7214	540
491,349	4,913	68,809	2741807	540	1200	22,85	0,850	0,872	1,03 mm	8485,9	309,500	0,872	100,0%	1,5876	524
438,271	4,383	61,376	2589484	540	1200	21,58	0,900	0,840	0,98 mm	7716,5	297,994	0,839	100,0%	1,4707	551
393,352	3,934	55,085	2453197	540	1200	20,44	0,950	0,81	0,83 mm	7020,0	286,157	0,806	99,7%	1,3746	651
354,999	3,550	49,714	2330535	540	1200	19,42	1,000	0,78	0,86 mm	6480,0	278,048	0,783	100,4%	1,2768	628
321,996	3,220	45,093	2219560	540	1200	18,50	1,050	0,75	0,60 mm	5949,8	268,062	0,755	100,3%	1,2012	900
293,388	2,934	41,086	2118668	540	1200	17,66	1,100	0,73	0,54 mm	5492,3	259,234	0,730	100,4%	1,1318	1000
268,431	2,684	37,591	2026552	540	1200	16,89	1,150	0,70	0,39 mm	5059,3	249,651	0,703	100,0%	1,0752	1385
246,527	2,465	34,524	1942113	540	1200	16,18	1,200	0,68	0,30 mm	4695,1	241,752	0,681	100,1%	1,0198	1800
227,200	2,272	31,817	1864428	540	1200	15,54	1,250	0,66	0,22 mm	4359,1	233,804	0,659	99,9%	0,9718	2455
210,059	2,101	29,417	1792719	540	1200	14,94	1,300	0,64	0,17 mm	4061,1	226,533	0,638	99,9%	0,9273	3176
194,787	1,948	27,278	1726323	540	1200	14,39	1,350	0,62	0,13 mm	3802,3	220,254	0,620	100,1%	0,8844	4154
181,122	1,811	25,365	1664668	540	1200	13,87	1,400	0,60	0,11 mm	3563,5	214,067	0,603	100,2%	0,8461	4909
168,846	1,688	23,645	1607266	540	1200	13,39	1,450	0,59	0,09 mm	3358,3	208,945	0,589	100,6%	0,8081	6000
157,778	1,578	22,095	1553690	540	1200	12,95	1,500	0,57	0,08 mm	3144,8	202,408	0,570	100,2%	0,7795	6750
147,763	1,478	20,693	1503572	540	1200	12,53	1,550	0,55	0,07 mm	2962,6	197,037	0,555	100,3%	0,7499	7714
138,672	1,387	19,420	1456585	540	1200	12,14	1,600	0,54	0,07 mm	2768,0	190,034	0,535	99,3%	0,7297	7714
115,918	1,159	16,233	1331734	540	1200	11,10	1,750	0,50	0,05 mm	2367,0	177,738	0,501	100,2%	0,6522	10800
98,338	0,983	13,771	1226599	540	1200	10,22	1,900	0,47	0,04 mm	2045,9	166,795	0,470	100,96%	0,5896	13500
88,750	0,887	12,429	1165268	540	1200	9,71	2,000	0,44	0,04 mm	1852,6	158,985	0,448	100,6%	0,5582	13500
80,499	0,805	11,273	1109780	540	1200	9,25	2,100	0,43	0,04 mm	1667,4	150,246	0,423	99,3%	0,5358	13500
70,123	0,701	9,820	1035793	540	1200	8,63	2,250	0,40	0,03 mm	1488,7	143,726	0,405	100,97%	0,4879	18000
56,800	0,568	7,954	932214	540	1200	7,77	2,500	0,36	0,03 mm	1203,0	129,048	0,364	99,6%	0,4401	18000
46,942	0,469	6,574	847467	540	1200	7,06	2,750	0,33	0,03 mm	989,1	116,710	0,329	98,27%	0,4022	18000
39,444	0,394	5,524	776845	540	1200	6,47	3,000	0,31	0,02 mm	862,3	110,998	0,313	101,22%	0,3554	27000

Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$



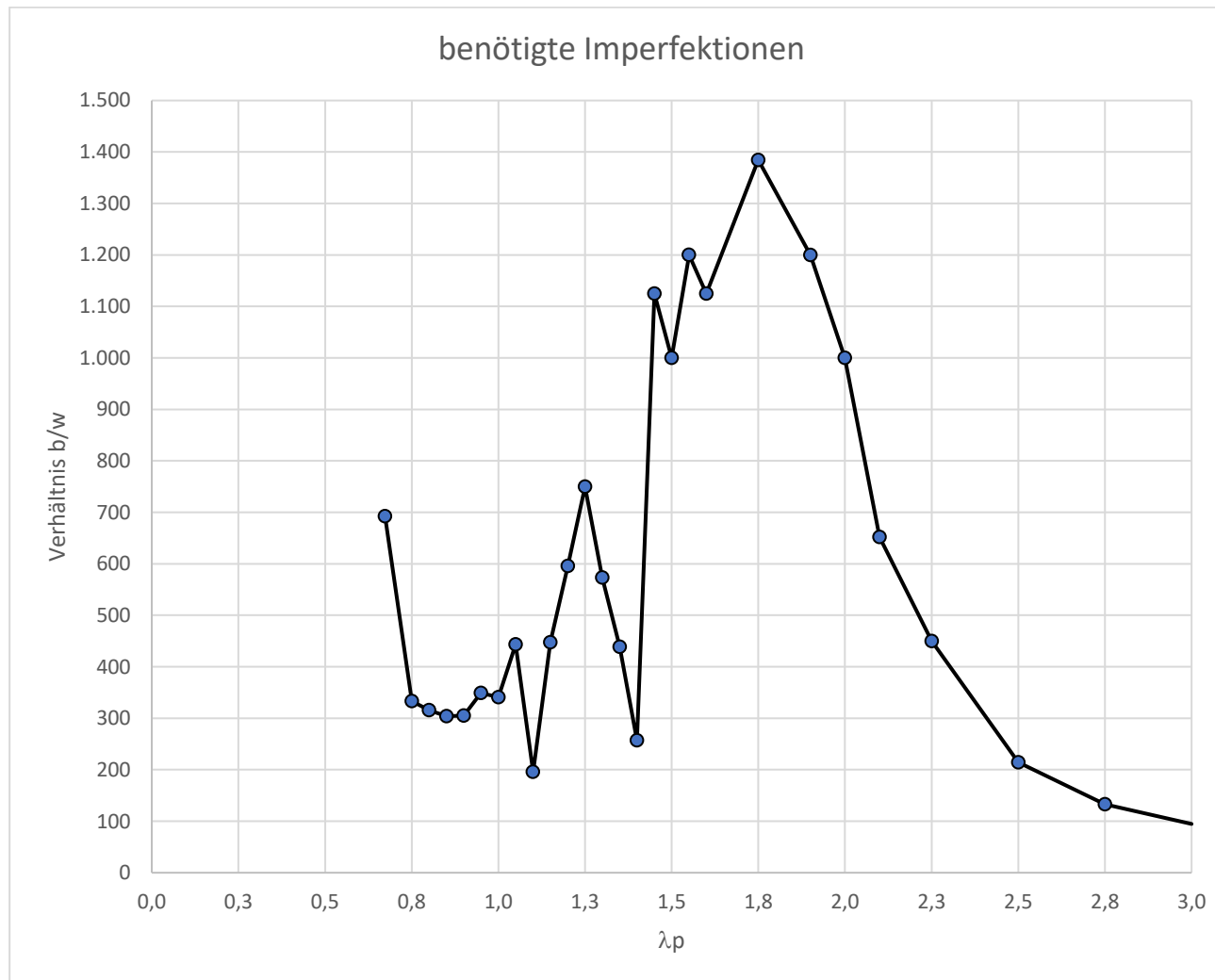
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$



Anhang 5 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C									e ₀ = Angepasst						
S 355															
σ_x 100,0 N/mm ²															
k _σ 4,340 $\alpha = 0,75$															
$\sigma_{cr,x}$	$\alpha_{cr,x}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ_p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnissfaktor zu original Ersatzimpf.	
							0	1,00		F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]				ρ nach ANSYS
783,787	7,838	180,584	4441755	900	1200	37,01	0,673	1,00	1,30 mm	15674,0	352,879	0,994	99,4%	2,2211	692
631,111	6,311	145,408	3985735	900	1200	33,21	0,750	0,94	2,70 mm	13350,0	334,944	0,944	100,1%	1,8842	333
554,688	5,547	127,800	3736629	900	1200	31,14	0,800	0,91	2,85 mm	12011,0	321,439	0,905	99,9%	1,7256	316
491,350	4,914	113,207	3516829	900	1200	29,31	0,850	0,872	2,96 mm	10846,0	308,403	0,869	99,6%	1,5932	304
438,271	4,383	100,978	3321446	900	1200	27,68	0,900	0,840	2,95 mm	9880,1	297,464	0,838	99,8%	1,4734	305
393,352	3,934	90,628	3146633	900	1200	26,22	0,950	0,81	2,58 mm	9038,6	287,247	0,809	100,0%	1,3694	349
355,000	3,550	81,792	2989301	900	1200	24,91	1,000	0,78	2,64 mm	8251,3	276,028	0,778	99,7%	1,2861	341
321,995	3,220	74,188	2846954	900	1200	23,72	1,050	0,75	2,03 mm	7606,9	267,194	0,753	100,0%	1,2051	443
293,388	2,934	67,597	2717547	900	1200	22,65	1,100	0,73	4,60 mm	7002,9	257,692	0,726	99,8%	1,1385	196
268,431	2,684	61,846	2599392	900	1200	21,66	1,150	0,70	2,01 mm	6505,2	250,258	0,705	100,2%	1,0726	448
246,528	2,465	56,800	2491084	900	1200	20,76	1,200	0,68	1,51 mm	6043,8	242,617	0,683	100,4%	1,0161	596
227,200	2,272	52,347	2391441	900	1200	19,93	1,250	0,66	1,20 mm	5592,8	233,867	0,659	99,9%	0,9715	750
210,059	2,101	48,398	2299463	900	1200	19,16	1,300	0,64	1,57 mm	5195,6	225,948	0,636	99,6%	0,9297	573
194,787	1,948	44,879	2214297	900	1200	18,45	1,350	0,62	2,05 mm	4844,8	218,796	0,616	99,4%	0,8903	439
181,122	1,811	41,731	2135215	900	1200	17,79	1,400	0,60	3,50 mm	4572,7	214,156	0,603	100,2%	0,8457	257
168,847	1,688	38,902	2061587	900	1200	17,18	1,450	0,59	0,80 mm	4276,1	207,418	0,584	99,9%	0,8140	1125
157,778	1,578	36,352	1992868	900	1200	16,61	1,500	0,57	0,90 mm	3998,7	200,651	0,565	99,4%	0,7863	1000
147,763	1,478	34,045	1928582	900	1200	16,07	1,550	0,55	0,75 mm	3795,3	196,792	0,554	100,1%	0,7509	1200
138,672	1,387	31,950	1868315	900	1200	15,57	1,600	0,54	0,80 mm	3563,2	190,717	0,537	99,7%	0,7271	1125
115,918	1,159	26,708	1708173	900	1200	14,23	1,750	0,50	0,65 mm	3029,1	177,330	0,500	100,0%	0,6537	1385
98,338	0,983	22,657	1573318	900	1200	13,11	1,900	0,47	0,75 mm	2599,2	165,205	0,465	100,0%	0,5952	1200
88,750	0,887	20,448	1494651	900	1200	12,46	2,000	0,44	0,90 mm	2366,0	158,298	0,446	100,2%	0,5607	1000
80,499	0,805	18,547	1423477	900	1200	11,86	2,100	0,43	1,38 mm	2156,4	151,488	0,427	100,1%	0,5314	652
70,123	0,701	16,156	1328578	900	1200	11,07	2,250	0,40	2,00 mm	1891,8	142,393	0,401	100,0%	0,4925	450
56,800	0,568	13,087	1195721	900	1200	9,96	2,500	0,36	4,20 mm	1548,5	129,504	0,365	100,0%	0,4386	214
46,942	0,469	10,815	1087019	900	1200	9,06	2,750	0,33	6,77 mm	1291,3	118,793	0,335	100,0%	0,3952	133
39,444	0,394	9,088	996434	900	1200	8,30	3,000	0,31	9,50 mm	1094,1	109,802	0,309	100,1%	0,3592	95

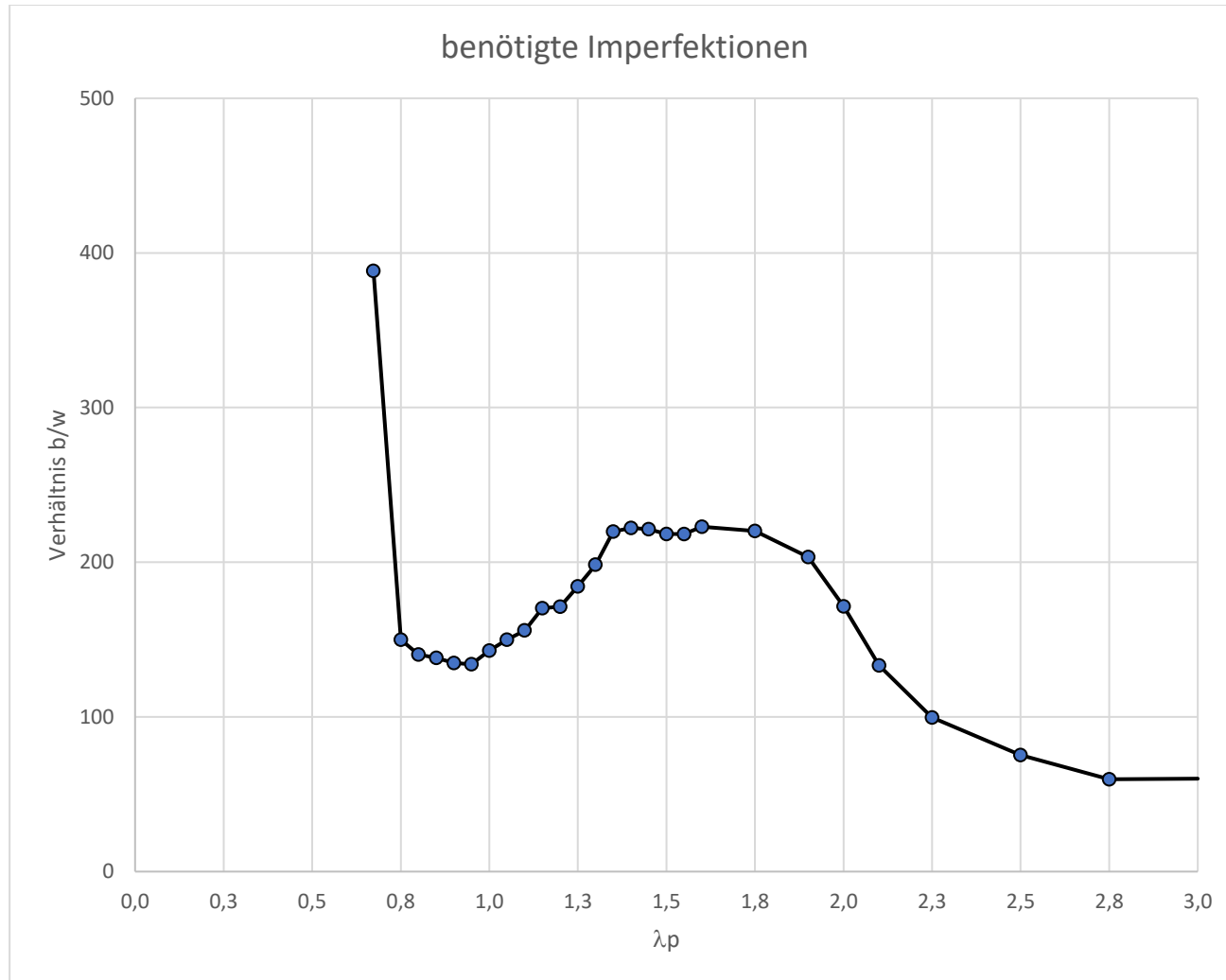
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$



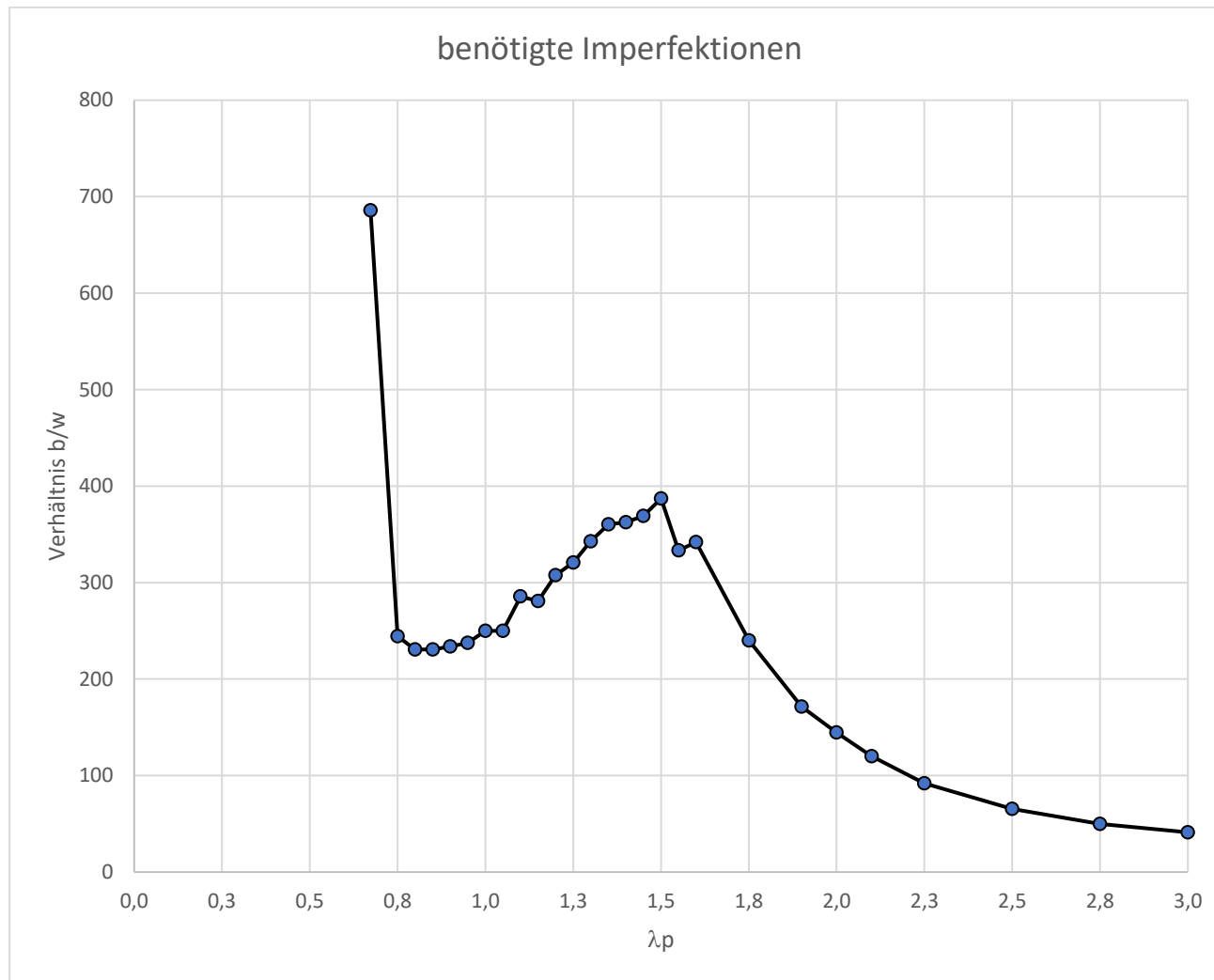
Anhang 6 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C									e ₀ = Angepasst						
S 355															
σ _x 100,0 N/mm ²															
k _σ 4,500															
α = 1,41															
σ _{cr,x}	α _{cr,x}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnissfaktor zu original Ersatzimpf.
							0	1,00		F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	ρ nach ANSYS			
783,786	7,838	174,175	4362214	1692	1200	36,35	0,673	1,00	3,09 mm	15467,0	354,568	0,999	99,9%	2,2105	388
631,110	6,311	140,247	3914360	1692	1200	32,62	0,750	0,94	8,00 mm	13087,0	334,333	0,942	100,0%	1,8877	150
554,688	5,547	123,264	3669717	1692	1200	30,58	0,800	0,91	8,55 mm	11822,0	322,150	0,907	100,1%	1,7218	140
491,349	4,913	109,189	3453847	1692	1200	28,78	0,850	0,872	8,68 mm	10701,0	309,828	0,873	100,1%	1,5859	138
438,271	4,383	97,394	3261967	1692	1200	27,18	0,900	0,840	8,90 mm	9717,6	297,906	0,839	100,0%	1,4712	135
393,351	3,934	87,411	3090284	1692	1200	25,75	0,950	0,81	8,95 mm	8864,4	286,847	0,808	99,9%	1,3713	134
355,000	3,550	78,889	2935770	1692	1200	24,46	1,000	0,78	8,40 mm	8138,3	277,212	0,781	100,1%	1,2806	143
321,996	3,220	71,555	2795975	1692	1200	23,30	1,050	0,75	8,00 mm	7473,5	267,295	0,753	100,0%	1,2046	150
293,388	2,934	65,197	2668882	1692	1200	22,24	1,100	0,73	7,70 mm	6893,8	258,303	0,728	100,0%	1,1358	156
268,431	2,684	59,651	2552843	1692	1200	21,27	1,150	0,70	7,05 mm	6376,2	249,769	0,704	100,1%	1,0747	170
246,527	2,465	54,784	2446475	1692	1200	20,39	1,200	0,68	7,01 mm	5897,4	241,057	0,679	99,8%	1,0227	171
227,200	2,272	50,489	2348616	1692	1200	19,57	1,250	0,66	6,51 mm	5502,3	234,278	0,660	100,1%	0,9698	184
210,059	2,101	46,680	2258285	1692	1200	18,82	1,300	0,64	6,05 mm	5124,8	226,933	0,639	100,0%	0,9256	198
194,787	1,948	43,286	2174645	1692	1200	18,12	1,350	0,62	5,46 mm	4784,1	219,994	0,620	99,9%	0,8854	220
181,122	1,811	40,249	2096979	1692	1200	17,47	1,400	0,60	5,40 mm	4480,7	213,674	0,602	100,0%	0,8477	222
168,846	1,688	37,521	2024669	1692	1200	16,87	1,450	0,59	5,42 mm	4210,7	207,970	0,586	100,1%	0,8119	221
157,778	1,578	35,062	1957180	1692	1200	16,31	1,500	0,57	5,50 mm	3954,6	202,056	0,569	100,0%	0,7809	218
147,763	1,478	32,836	1894046	1692	1200	15,78	1,550	0,55	5,50 mm	3720,5	196,431	0,553	100,0%	0,7522	218
138,672	1,387	30,816	1834858	1692	1200	15,29	1,600	0,54	5,38 mm	3515,1	191,573	0,540	100,1%	0,7239	223
115,918	1,159	25,760	1677584	1692	1200	13,98	1,750	0,50	5,45 mm	2971,9	177,154	0,499	99,9%	0,6543	220
98,338	0,983	21,853	1545144	1692	1200	12,88	1,900	0,47	5,90 mm	2558,7	165,596	0,466	100,2%	0,5938	203
88,750	0,887	19,722	1467885	1692	1200	12,23	2,000	0,44	7,00 mm	2321,7	158,166	0,446	100,1%	0,5611	171
80,499	0,805	17,889	1397986	1692	1200	11,65	2,100	0,43	9,00 mm	2112,8	151,132	0,426	99,9%	0,5326	133
70,123	0,701	15,583	1304787	1692	1200	10,87	2,250	0,40	12,05 mm	1857,3	142,345	0,401	100,0%	0,4926	100
56,800	0,568	12,622	1174308	1692	1200	9,79	2,500	0,36	15,92 mm	1521,0	129,523	0,365	100,0%	0,4385	75
46,942	0,469	10,432	1067553	1692	1200	8,90	2,750	0,33	20,10 mm	1267,4	118,720	0,334	100,0%	0,3954	60
39,444	0,394	8,765	978590	1692	1200	8,15	3,000	0,31	20,00 mm	1072,6	109,607	0,309	100,0%	0,3599	60

Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$



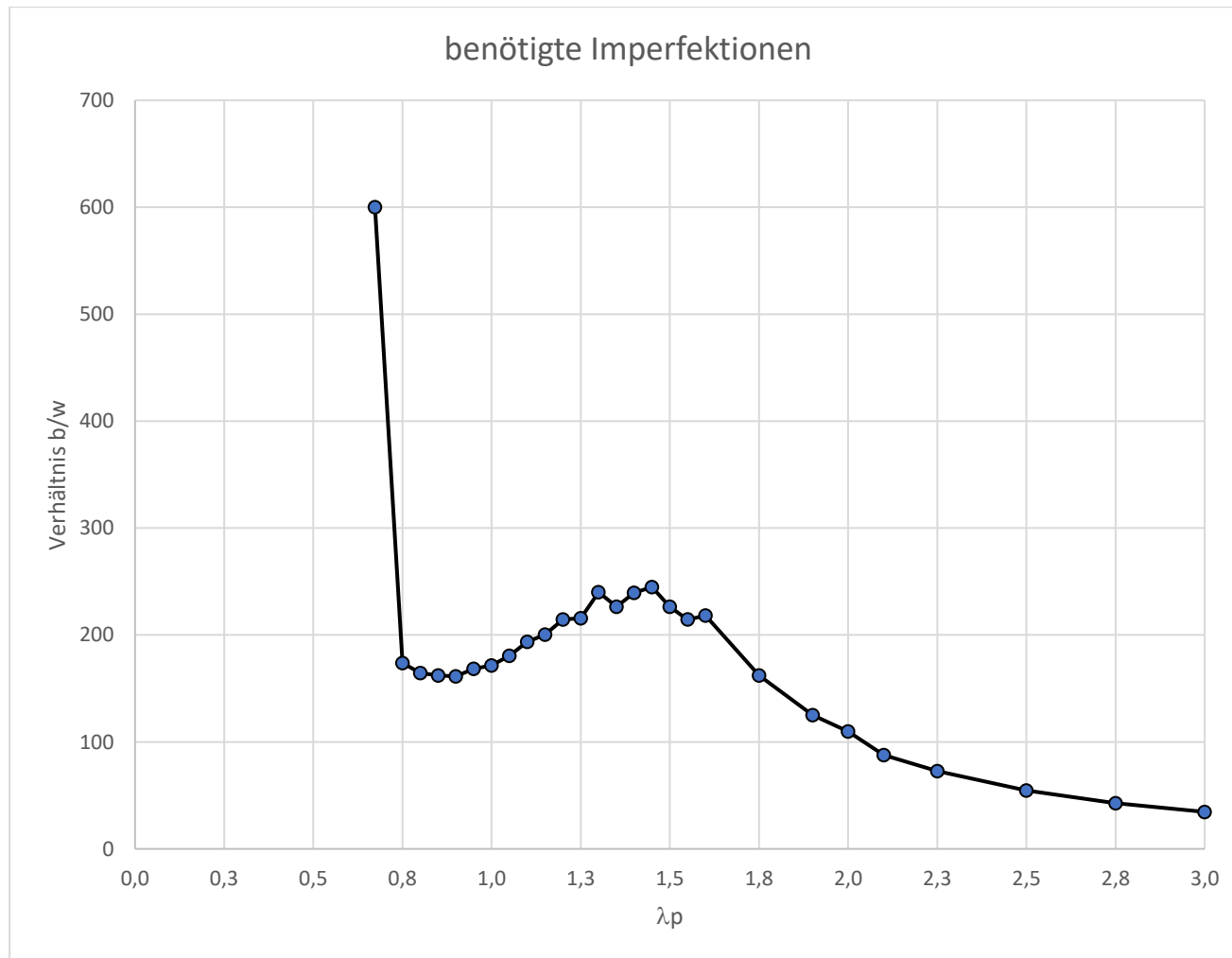
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$



Anhang 8 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C										e ₀ = Angepasst							
		S		355													
		σ_x		100,0 N/mm ²													
		k _{cr}		4,160		$\alpha = 2,45$											
$\sigma_{cr,x}$	$\alpha_{cr,x}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ_p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.		
										F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	ρ nach ANSYS					
							0	1,00									
783,789	7,838	188,411	4536984	2934	1200	37,81	0,673	1,00	2,00 mm	16094,0	354,729	0,999	99,9%	2,2095	600		
631,111	6,311	151,709	4071182	2934	1200	33,93	0,750	0,94	6,90 mm	13634,0	334,890	0,943	100,1%	1,8845	174		
554,688	5,547	133,339	3816737	2934	1200	31,81	0,800	0,91	7,30 mm	12275,0	321,610	0,906	100,0%	1,7247	164		
491,350	4,914	118,113	3592223	2934	1200	29,94	0,850	0,872	7,40 mm	11119,0	309,530	0,872	100,0%	1,5874	162		
438,271	4,383	105,354	3392651	2934	1200	28,27	0,900	0,840	7,44 mm	10118,0	298,233	0,840	100,1%	1,4696	161		
393,352	3,934	94,556	3214093	2934	1200	26,78	0,950	0,81	7,12 mm	9224,4	286,999	0,808	99,9%	1,3706	169		
355,000	3,550	85,336	3053386	2934	1200	25,44	1,000	0,78	7,00 mm	8454,2	276,879	0,780	100,0%	1,2821	171		
321,996	3,220	77,403	2907990	2934	1200	24,23	1,050	0,75	6,65 mm	7777,3	267,446	0,753	100,1%	1,2040	180		
293,389	2,934	70,526	2775807	2934	1200	23,13	1,100	0,73	6,20 mm	7169,2	258,274	0,728	100,0%	1,1360	194		
268,431	2,684	64,527	2655120	2934	1200	22,13	1,150	0,70	5,99 mm	6630,1	249,710	0,703	100,0%	1,0750	200		
246,528	2,465	59,262	2544490	2934	1200	21,20	1,200	0,68	5,59 mm	6147,0	241,581	0,681	100,0%	1,0205	215		
227,200	2,272	54,615	2442708	2934	1200	20,36	1,250	0,66	5,56 mm	5717,8	234,076	0,659	100,0%	0,9706	216		
210,059	2,101	50,495	2348758	2934	1200	19,57	1,300	0,64	5,00 mm	5328,1	226,848	0,639	100,0%	0,9260	240		
194,788	1,948	46,824	2261770	2934	1200	18,85	1,350	0,62	5,30 mm	4978,0	220,093	0,620	100,0%	0,8850	226		
181,123	1,811	43,539	2180993	2934	1200	18,17	1,400	0,60	5,01 mm	4662,8	213,793	0,602	100,0%	0,8472	240		
168,847	1,688	40,588	2105784	2934	1200	17,55	1,450	0,59	4,90 mm	4372,4	207,638	0,585	100,0%	0,8132	245		
157,778	1,578	37,927	2035591	2934	1200	16,96	1,500	0,57	5,30 mm	4111,5	201,981	0,569	100,0%	0,7812	226		
147,763	1,478	35,520	1969927	2934	1200	16,42	1,550	0,55	5,60 mm	3869,7	196,439	0,553	100,0%	0,7522	214		
138,672	1,387	33,335	1908369	2934	1200	15,90	1,600	0,54	5,50 mm	3647,7	191,142	0,538	99,9%	0,7255	218		
115,919	1,159	27,865	1744794	2934	1200	14,54	1,750	0,50	7,40 mm	3095,1	177,391	0,500	100,0%	0,6535	162		
98,338	0,983	23,639	1607047	2934	1200	13,39	1,900	0,47	9,60 mm	2656,0	165,272	0,466	100,0%	0,5950	125		
88,750	0,888	21,334	1526695	2934	1200	12,72	2,000	0,45	10,94 mm	2412,8	158,041	0,445	100,0%	0,5616	110		
80,499	0,805	19,351	1453994	2934	1200	12,12	2,100	0,43	13,70 mm	2200,8	151,362	0,426	100,0%	0,5318	88		
70,123	0,701	16,857	1357060	2934	1200	11,31	2,250	0,40	16,48 mm	1931,7	142,344	0,401	100,0%	0,4926	73		
56,800	0,568	13,654	1221355	2934	1200	10,18	2,500	0,36	22,00 mm	1581,7	129,504	0,365	100,0%	0,4386	55		
46,942	0,469	11,284	1110323	2934	1200	9,25	2,750	0,33	28,00 mm	1319,1	118,803	0,335	100,0%	0,3951	43		
39,444	0,394	9,482	1017796	2934	1200	8,48	3,000	0,31	34,70 mm	1116,2	109,668	0,309	100,0%	0,3597	35		

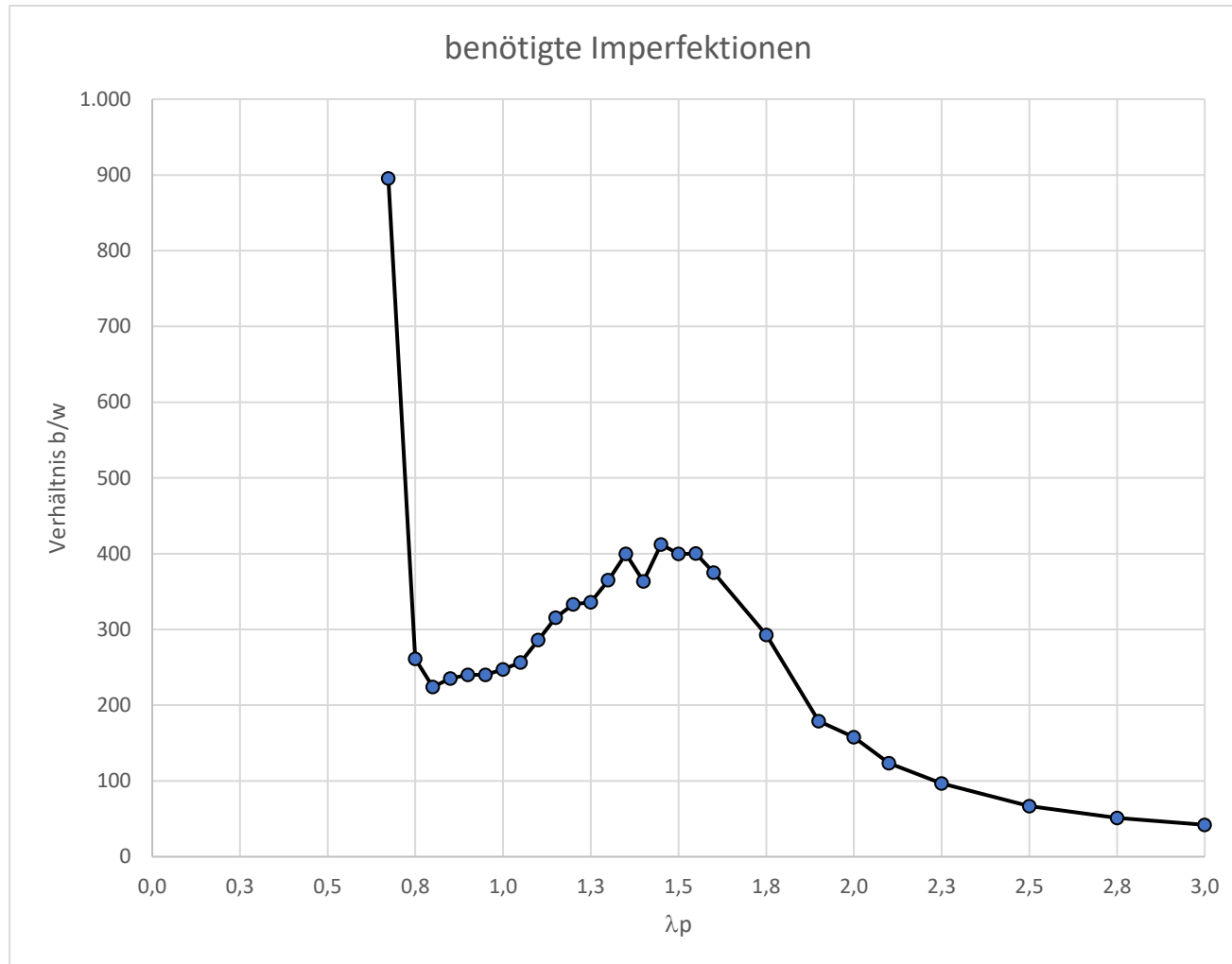
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$



Anhang 9 Druckbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$

Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 C									e ₀ = Angepasst						
S 355															
σ_x 100,0 N/mm ²															
k _σ 4,000 α = 3															
σ _{cr,x}	α _{cr,x}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _p	ρ nach Wint	benötigte Imperfektion	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.
										F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	ρ nach ANSYS			
							0	1,00							
783,788	7,838	195,947	4626832	3600	1200	38,56	0,673	1,00	1,34 mm	16419,0	354,865	1,000	100,0%	2,2087	896
631,112	6,311	157,778	4151811	3600	1200	34,60	0,750	0,94	4,59 mm	13881,0	334,336	0,942	100,0%	1,8877	261
554,688	5,547	138,672	3892323	3600	1200	32,44	0,800	0,91	5,35 mm	12532,0	321,967	0,907	100,1%	1,7228	224
491,349	4,913	122,837	3663358	3600	1200	30,53	0,850	0,872	5,10 mm	11348,0	309,770	0,873	100,1%	1,5862	235
438,271	4,383	109,568	3459839	3600	1200	28,83	0,900	0,840	5,00 mm	10314,0	298,106	0,840	100,0%	1,4702	240
393,352	3,934	98,338	3277743	3600	1200	27,31	0,950	0,81	5,00 mm	9413,5	287,195	0,809	100,0%	1,3696	240
355,000	3,550	88,750	3113858	3600	1200	25,95	1,000	0,78	4,85 mm	8616,0	276,699	0,779	99,9%	1,2830	247
321,995	3,220	80,499	2965576	3600	1200	24,71	1,050	0,75	4,68 mm	7932,2	267,476	0,753	100,1%	1,2038	256
293,389	2,934	73,347	2830781	3600	1200	23,59	1,100	0,73	4,20 mm	7322,6	258,678	0,729	100,2%	1,1342	286
268,431	2,684	67,108	2707700	3600	1200	22,56	1,150	0,70	3,80 mm	6769,4	250,005	0,704	100,1%	1,0737	316
246,528	2,465	61,632	2594882	3600	1200	21,62	1,200	0,68	3,60 mm	6266,2	241,483	0,680	100,0%	1,0209	333
227,200	2,272	56,800	2491086	3600	1200	20,76	1,250	0,66	3,57 mm	5836,3	234,287	0,660	100,1%	0,9698	336
210,059	2,101	52,515	2395273	3600	1200	19,96	1,300	0,64	3,29 mm	5441,2	227,164	0,640	100,1%	0,9247	365
194,788	1,948	48,697	2306562	3600	1200	19,22	1,350	0,62	3,00 mm	5076,4	220,085	0,620	100,0%	0,8851	400
181,123	1,811	45,281	2224183	3600	1200	18,53	1,400	0,60	3,30 mm	4751,9	213,647	0,602	100,0%	0,8478	364
168,847	1,688	42,212	2147487	3600	1200	17,90	1,450	0,59	2,91 mm	4463,2	207,834	0,585	100,1%	0,8124	412
157,778	1,578	39,444	2075905	3600	1200	17,30	1,500	0,57	3,00 mm	4187,1	201,700	0,568	99,9%	0,7822	400
147,763	1,478	36,941	2008939	3600	1200	16,74	1,550	0,55	3,00 mm	3947,4	196,492	0,553	100,0%	0,7520	400
138,672	1,387	34,668	1946162	3600	1200	16,22	1,600	0,54	3,20 mm	3724,9	191,397	0,539	100,0%	0,7245	375
115,918	1,159	28,980	1779347	3600	1200	14,83	1,750	0,50	4,10 mm	3154,7	177,295	0,499	100,0%	0,6538	293
98,338	0,983	24,585	1638872	3600	1200	13,66	1,900	0,47	6,70 mm	2707,8	165,223	0,465	100,0%	0,5952	179
88,750	0,888	22,188	1556929	3600	1200	12,97	2,000	0,45	7,61 mm	2458,5	157,907	0,445	100,0%	0,5620	158
80,499	0,805	20,125	1482789	3600	1200	12,36	2,100	0,43	9,72 mm	2242,0	151,202	0,426	99,9%	0,5324	123
70,124	0,701	17,531	1383937	3600	1200	11,53	2,250	0,40	12,39 mm	1972,1	142,499	0,401	100,1%	0,4921	97
56,800	0,568	14,200	1245543	3600	1200	10,38	2,500	0,36	18,00 mm	1612,6	129,470	0,365	100,0%	0,4387	67
46,942	0,469	11,736	1132312	3600	1200	9,44	2,750	0,33	23,41 mm	1345,2	118,801	0,335	100,0%	0,3951	51
39,444	0,394	9,861	1037953	3600	1200	8,65	3,000	0,31	28,50 mm	1138,3	109,668	0,309	100,0%	0,3597	42

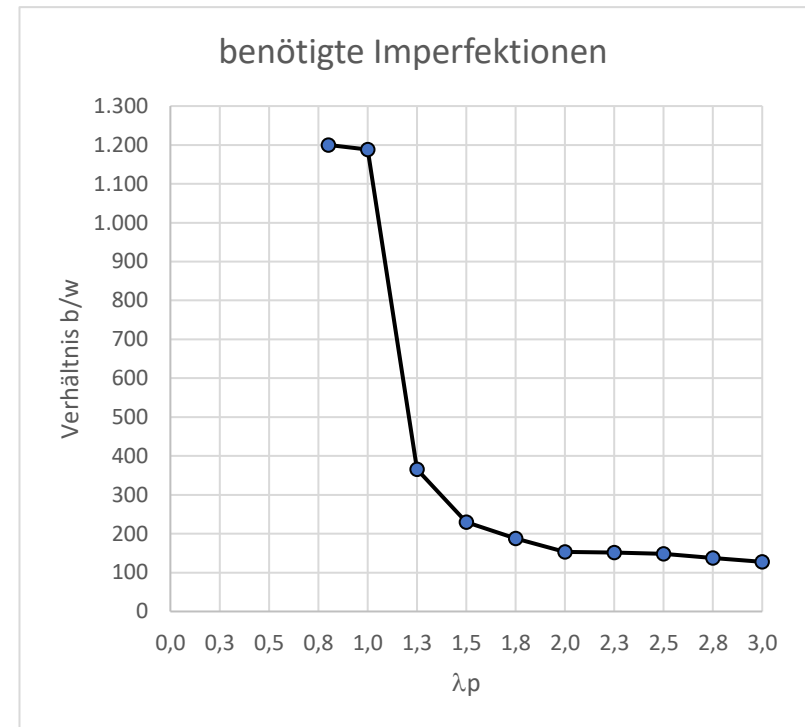
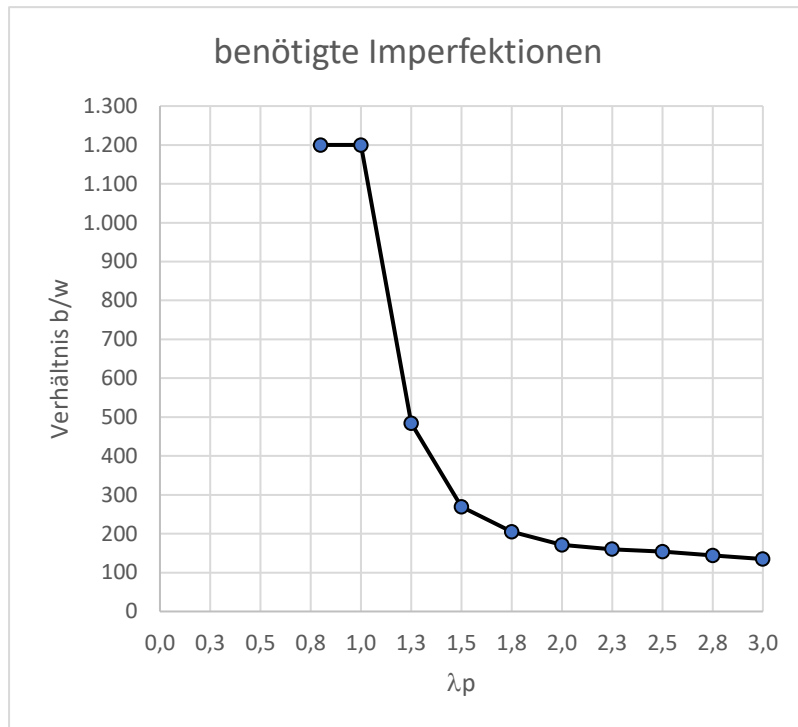
Das Diagramm mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$



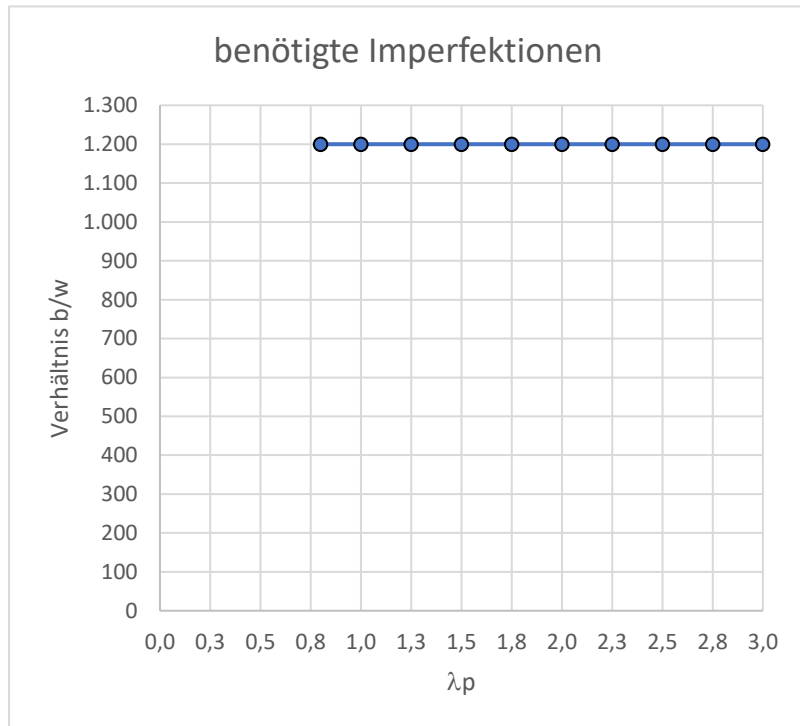
Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,15$

V 1

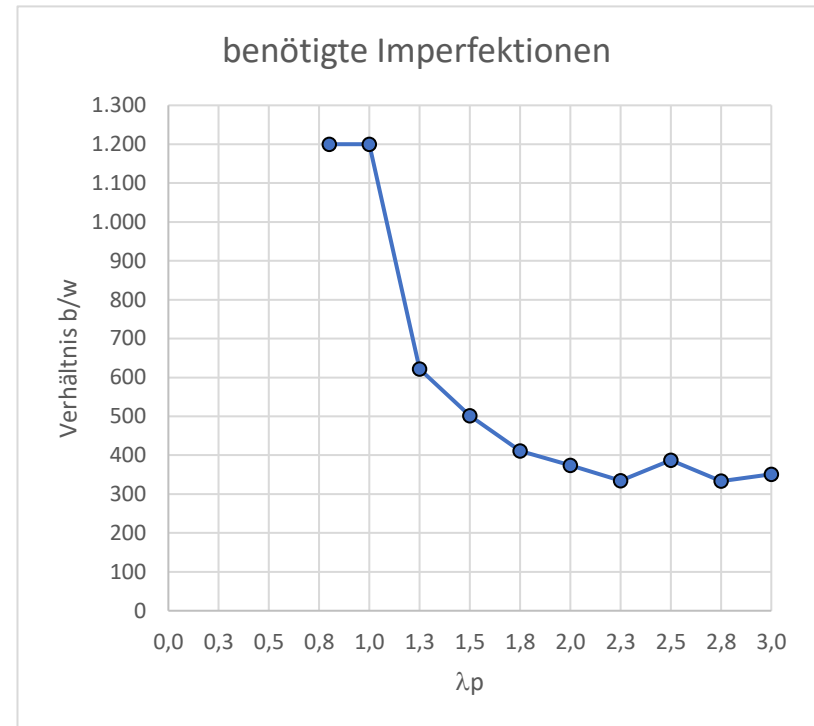
V 2



V 3



V 4



Anhang 11 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,30$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve									
										S 355									
										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 64,308									
										α = 0,3									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
										benötigte Verformung									
										ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt									
										F [kN] ANSYS									
										σ [N/mm ²]									
										χ _w nach ANSYS									
										Abweichung									
										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
										Verhältnis aktor zu original Ersatzimpf.									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnis aktor zu original Ersatzimpf.		
320,249	5,547	4,980	425858	360	1200	6,15	0,800	1,00	1,00	1,00 mm	1386,7	188,000	0,917	91,73%	1,7035	1200			
204,959	3,550	3,187	340686	360	1200	4,92	1,000	0,83	0,83	1,00 mm	996,1	168,808	0,824	99,23%	1,2142	1200			
131,174	2,272	2,040	272549	360	1200	3,93	1,250	0,66	0,66	2,50 mm	642,5	136,095	0,664	100,00%	0,9638	480			
91,093	1,578	1,417	227124	360	1200	3,28	1,500	0,55	0,55	4,56 mm	446,6	113,513	0,554	100,09%	0,8025	263			
66,925	1,159	1,041	194678	360	1200	2,81	1,750	0,47	0,47	6,15 mm	327,8	97,200	0,474	99,99%	0,6885	195			
51,240	0,887	0,797	170343	360	1200	2,46	2,000	0,41	0,41	7,38 mm	250,8	84,994	0,415	99,93%	0,6029	163			
40,486	0,701	0,630	151416	360	1200	2,19	2,250	0,37	0,37	8,34 mm	198,1	75,536	0,369	99,91%	0,5360	144			
32,793	0,568	0,510	136275	360	1200	1,97	2,500	0,33	0,33	9,27 mm	160,2	67,876	0,331	99,75%	0,4831	129			
27,102	0,469	0,421	123886	360	1200	1,79	2,750	0,30	0,30	9,88 mm	132,5	61,768	0,301	99,85%	0,4388	121			
22,773	0,394	0,354	113562	360	1200	1,64	3,000	0,28	0,28	10,50 mm	111,6	56,712	0,277	100,01%	0,4016	114			

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve									
										S 355									
										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 30,955									
										α = 0,3									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
										benötigte Verformung									
										ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt									
										F [kN] ANSYS									
										σ [N/mm ²]									
										χ _w nach ANSYS									
										Abweichung									
										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
										Verhältnis aktor zu original Ersatzimpf.									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnis aktor zu original Ersatzimpf.		
320,249	5,547	4,980	425858	360	1200	6,15	0,800	1,00	1,00	1,00 mm	1469,3	199,198	0,972	97,19%	1,6077	1200			
204,959	3,550	3,187	340686	360	1200	4,92	1,000	0,83	0,83	1,70 mm	1005,7	170,433	0,832	100,19%	1,2026	706			
131,174	2,272	2,040	272549	360	1200	3,93	1,250	0,66	0,66	4,05 mm	642,4	136,090	0,664	100,00%	0,9639	296			
91,093	1,578	1,417	227124	360	1200	3,28	1,500	0,55	0,55	6,51 mm	447,5	113,747	0,555	100,30%	0,8008	184			
66,925	1,159	1,041	194678	360	1200	2,81	1,750	0,47	0,47	8,20 mm	327,9	97,241	0,474	100,03%	0,6882	146			
51,240	0,887	0,797	170343	360	1200	2,46	2,000	0,41	0,41	9,20 mm	251,0	85,069	0,415	100,01%	0,6023	130			
40,486	0,701	0,630	151416	360	1200	2,19	2,250	0,37	0,37	10,05 mm	198,5	75,680	0,369	100,10%	0,5350	119			
32,793	0,568	0,510	136275	360	1200	1,97	2,500	0,33	0,33	10,50 mm	160,5	68,011	0,332	99,95%	0,4822	114			
27,102	0,469	0,421	123886	360	1200	1,79	2,750	0,30	0,30	10,98 mm	132,7	61,847	0,302	99,98%	0,4382	109			
22,773	0,394	0,354	113562	360	1200	1,64	3,000	0,28	0,28	11,60 mm	111,6	56,722	0,277	100,03%	0,4015	103			

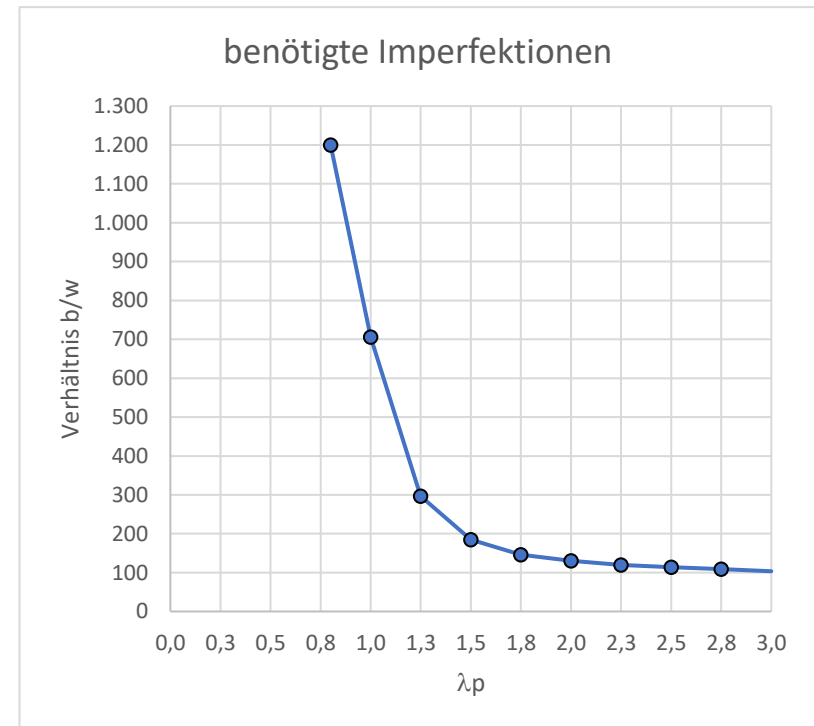
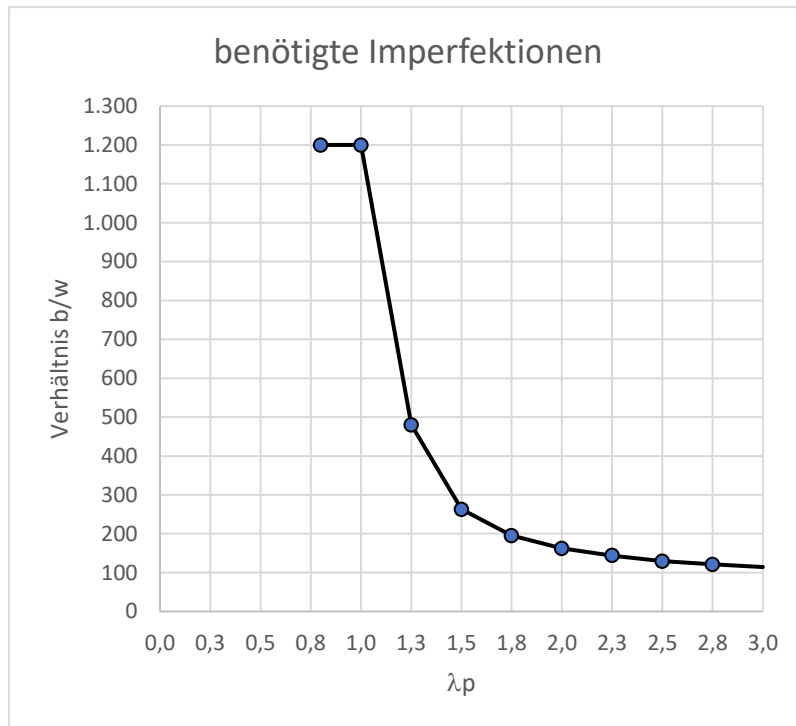
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft			
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft			
V3										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve							
										S 355				e ₀ = Angepasst durch Regression			
										τ = 57,74							
										k _τ = 30,955				α = 0,3			
										nach EC3-1-6				ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			
										χ _w mit η=1,0				benötigte Verformung			
										λ _w				F [kN] ANSYS			
										t [mm]				σ [N/mm ²]			
										a [mm]				χ _w nach ANSYS			
										b [mm]				Abweichung			
										σ _e				α _{cr} =σ _{cr} /σ			
										N [N]				Verhältnis			
										τ _{cr}				aktor zu			
										α _{cr,τ}				original			
										σ _e				Ersatzimpf.			
320,249	5,547	4,980	425858	360	1200	6,15	0,800	1,00	1,00	1,00 mm	97,6	13,226	0,065	6,45%	24,2134	1200	
204,959	3,550	3,187	340686	360	1200	4,92	1,000	0,83	0,83	1,00 mm	65,4	11,087	0,054	6,52%	18,4867	1200	
131,174	2,272	2,040	272549	360	1200	3,93	1,250	0,66	0,66	1,00 mm	46,9	9,928	0,048	7,29%	13,2131	1200	
91,093	1,578	1,417	227124	360	1200	3,28	1,500	0,55	0,55	1,00 mm	34,6	8,804	0,043	7,76%	10,3465	1200	
66,925	1,159	1,041	194678	360	1200	2,81	1,750	0,47	0,47	1,00 mm	29,5	8,734	0,043	8,98%	7,6625	1200	
51,240	0,887	0,797	170343	360	1200	2,46	2,000	0,41	0,41	1,00 mm	18,2	6,157	0,030	7,24%	8,3217	1200	
40,486	0,701	0,630	151416	360	1200	2,19	2,250	0,37	0,37	1,00 mm	21,5	8,188	0,040	10,83%	4,9445	1200	
32,793	0,568	0,510	136275	360	1200	1,97	2,500	0,33	0,33	1,00 mm	18,3	7,772	0,038	11,42%	4,2196	1200	
27,102	0,469	0,421	123886	360	1200	1,79	2,750	0,30	0,30	1,00 mm	14,6	6,794	0,033	10,98%	3,9892	1200	
22,773	0,394	0,354	113562	360	1200	1,64	3,000	0,28	0,28	1,00 mm	11,6	5,878	0,029	10,37%	3,8742	1200	

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft			
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft			
V4										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve							
										S 355				e ₀ = Angepasst durch Regression			
										τ = 57,74							
										k _τ = 30,955				α = 0,3			
										nach EC3-1-6				ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt			
										χ _w mit η=1,0				benötigte Verformung			
										λ _w				F [kN] ANSYS			
										t [mm]				σ [N/mm ²]			
										a [mm]				χ _w nach ANSYS			
										b [mm]				Abweichung			
										σ _e				α _{cr} =σ _{cr} /σ			
										N [N]				Verhältnis			
										τ _{cr}				aktor zu			
										α _{cr,τ}				original			
										σ _e				Ersatzimpf.			
320,249	5,547	4,980	425858	360	1200	6,15	0,800	1,00	1,00	1,00 mm	1444,4	195,822	0,955	95,54%	1,6354	1200	
204,959	3,550	3,187	340686	360	1200	4,92	1,000	0,83	0,83	3,08 mm	1003,6	170,077	0,830	99,98%	1,2051	390	
131,174	2,272	2,040	272549	360	1200	3,93	1,250	0,66	0,66	5,92 mm	642,3	136,067	0,664	99,98%	0,9640	203	
91,093	1,578	1,417	227124	360	1200	3,28	1,500	0,55	0,55	7,19 mm	446,3	113,437	0,553	100,02%	0,8030	167	
66,925	1,159	1,041	194678	360	1200	2,81	1,750	0,47	0,47	7,45 mm	327,8	97,223	0,474	100,01%	0,6884	161	
51,240	0,887	0,797	170343	360	1200	2,46	2,000	0,41	0,41	7,39 mm	251,0	85,072	0,415	100,02%	0,6023	162	
40,486	0,701	0,630	151416	360	1200	2,19	2,250	0,37	0,37	7,10 mm	198,3	75,627	0,369	100,03%	0,5353	169	
32,793	0,568	0,510	136275	360	1200	1,97	2,500	0,33	0,33	6,50 mm	160,6	68,058	0,332	100,02%	0,4818	185	
27,102	0,469	0,421	123886	360	1200	1,79	2,750	0,30	0,30	5,73 mm	132,6	61,815	0,302	99,93%	0,4384	209	
22,773	0,394	0,354	113562	360	1200	1,64	3,000	0,28	0,28	5,40 mm	111,5	56,702	0,277	99,99%	0,4016	222	

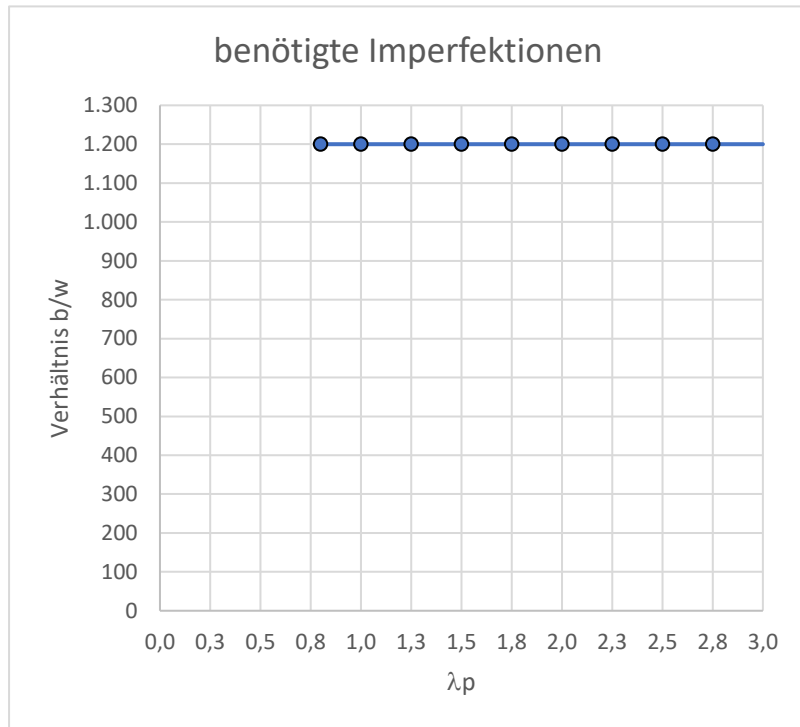
Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,30$

V 1

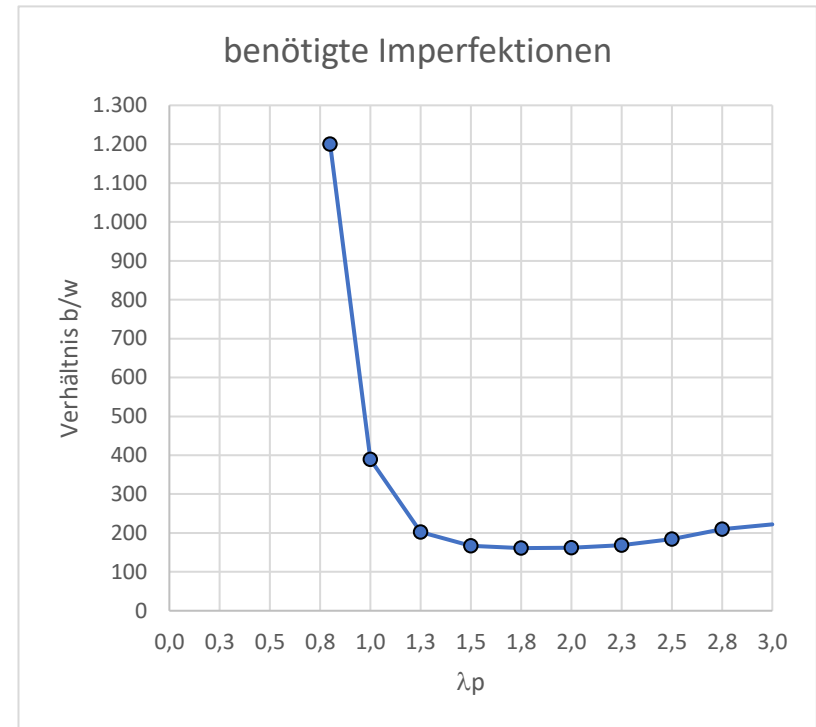
V 2



V 3



V 4



Anhang 12 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 30,955										α = 0,45 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS							
320,249	5,547	10,346	613808	540	1200	8,86	0,800	1,00	1,00 mm	2007,9	188,864	0,921	92,15%	1,6957	1200				
204,959	3,550	6,621	491046	540	1200	7,09	1,000	0,83	1,00 mm	1421,9	167,181	0,816	98,27%	1,2260	1200				
131,174	2,272	4,238	392837	540	1200	5,67	1,250	0,66	2,03 mm	925,5	136,016	0,664	99,94%	0,9644	591				
91,093	1,578	2,943	327364	540	1200	4,73	1,500	0,55	4,00 mm	645,8	113,887	0,556	100,42%	0,7999	300				
66,926	1,159	2,162	280598	540	1200	4,05	1,750	0,47	5,30 mm	472,7	97,259	0,475	100,05%	0,6881	226				
51,240	0,888	1,655	245523	540	1200	3,54	2,000	0,42	6,08 mm	361,8	85,080	0,415	100,03%	0,6023	197				
40,486	0,701	1,308	218243	540	1200	3,15	2,250	0,37	7,10 mm	285,8	75,607	0,369	100,00%	0,5355	169				
32,794	0,568	1,059	196418	540	1200	2,84	2,500	0,33	8,24 mm	231,5	68,050	0,332	100,00%	0,4819	146				
27,102	0,469	0,876	178562	540	1200	2,58	2,750	0,30	8,90 mm	191,6	61,934	0,302	100,12%	0,4376	135				
22,773	0,394	0,736	163682	540	1200	2,36	3,000	0,28	9,46 mm	160,8	56,729	0,277	100,04%	0,4014	127				

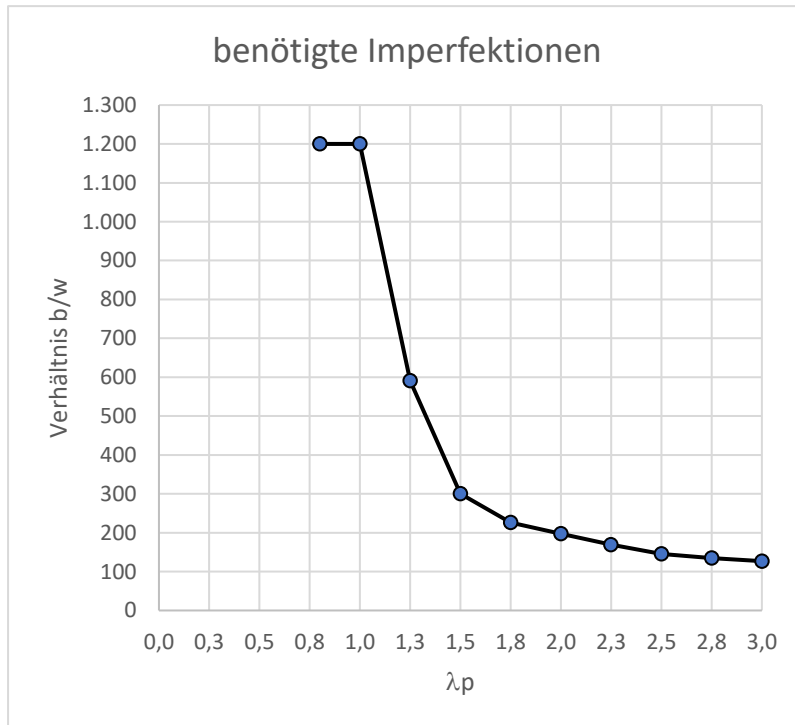
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 30,955										α = 0,45 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS							
320,249	5,547	10,346	613808	540	1200	8,86	0,800	1,00	1,00 mm	2104,1	197,913	0,966	96,56%	1,6181	1200				
204,959	3,550	6,621	491046	540	1200	7,09	1,000	0,83	1,48 mm	1446,8	170,108	0,830	100,00%	1,2049	811				
131,174	2,272	4,238	392837	540	1200	5,67	1,250	0,66	3,77 mm	926,2	136,120	0,664	100,02%	0,9637	318				
91,093	1,578	2,943	327364	540	1200	4,73	1,500	0,55	6,10 mm	642,4	113,299	0,553	99,90%	0,8040	197				
66,926	1,159	2,162	280598	540	1200	4,05	1,750	0,47	7,49 mm	472,5	97,216	0,474	100,01%	0,6884	160				
51,240	0,888	1,655	245523	540	1200	3,54	2,000	0,42	8,80 mm	361,8	85,087	0,415	100,03%	0,6022	136				
40,486	0,701	1,308	218243	540	1200	3,15	2,250	0,37	9,90 mm	285,8	75,615	0,369	100,01%	0,5354	121				
32,794	0,568	1,059	196418	540	1200	2,84	2,500	0,33	10,80 mm	231,8	68,132	0,332	100,13%	0,4813	111				
27,102	0,469	0,876	178562	540	1200	2,58	2,750	0,30	11,40 mm	191,4	61,889	0,302	100,05%	0,4379	105				
22,773	0,394	0,736	163682	540	1200	2,36	3,000	0,28	11,98 mm	160,8	56,733	0,277	100,05%	0,4014	100				

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft -> Belastung mit externer Kraft		
V3	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =				Angepasst durch Regression					
	τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _{co} mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS				
							0	1,00								
320,249	5,547	10,346	613808	540	1200	8,86	0,800	1,00	1,00 mm	140,8	13,246	0,065	6,46%	24,1778	1200	
204,959	3,550	6,621	491046	540	1200	7,09	1,000	0,83	1,00 mm	91,7	10,785	0,053	6,34%	19,0048	1200	
131,174	2,272	4,238	392837	540	1200	5,67	1,250	0,66	1,00 mm	61,2	8,999	0,044	6,61%	14,5759	1200	
91,093	1,578	2,943	327364	540	1200	4,73	1,500	0,55	1,00 mm	41,5	7,326	0,036	6,46%	12,4334	1200	
66,926	1,159	2,162	280598	540	1200	4,05	1,750	0,47	1,00 mm	28,7	5,905	0,029	6,07%	11,3333	1200	
51,240	0,888	1,655	245523	540	1200	3,54	2,000	0,42	1,00 mm	22,2	5,210	0,025	6,12%	9,8353	1200	
40,486	0,701	1,308	218243	540	1200	3,15	2,250	0,37	1,00 mm	18,8	4,972	0,024	6,58%	8,1430	1200	
32,794	0,568	1,059	196418	540	1200	2,84	2,500	0,33	1,00 mm	12,9	3,786	0,018	5,56%	8,6626	1200	
27,102	0,469	0,876	178562	540	1200	2,58	2,750	0,30	1,00 mm	9,3	3,005	0,015	4,86%	9,0179	1200	
22,773	0,394	0,736	163682	540	1200	2,36	3,000	0,28	1,00 mm	6,7	2,357	0,011	4,16%	9,6624	1200	

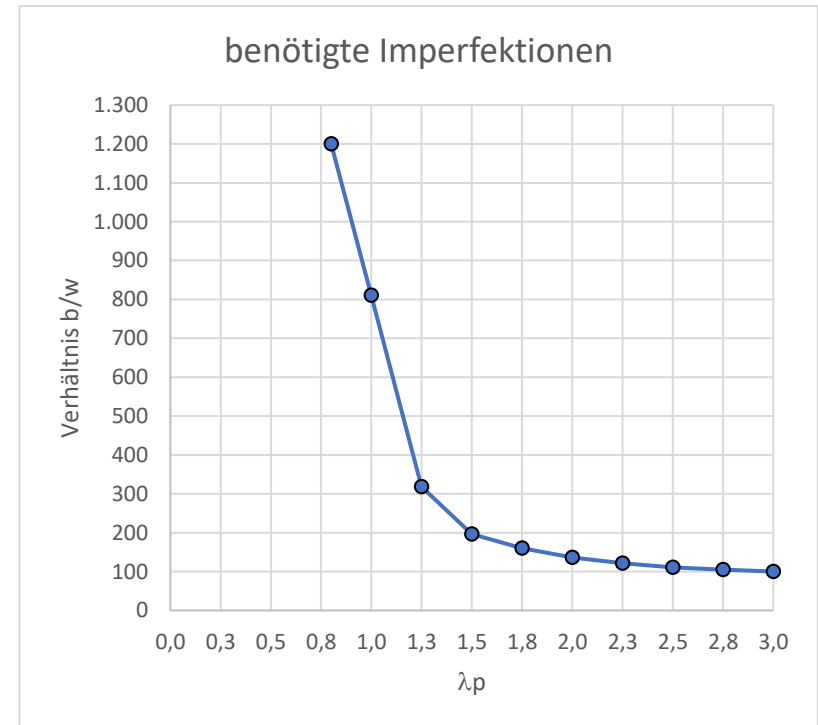
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft -> Belastung mit Kraft		
V4	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =				Angepasst durch Regression					
	τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _{co} mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS				
							0	1,00								
320,249	5,547	10,346	613808	540	1200	8,86	0,800	1,00	1,00 mm	2074,1	195,091	0,952	95,19%	1,6415	1200	
204,959	3,550	6,621	491046	540	1200	7,09	1,000	0,83	1,40 mm	1447,6	170,202	0,830	100,05%	1,2042	857	
131,174	2,272	4,238	392837	540	1200	5,67	1,250	0,66	3,25 mm	925,5	136,014	0,664	99,94%	0,9644	369	
91,093	1,578	2,943	327364	540	1200	4,73	1,500	0,55	4,65 mm	643,4	113,463	0,554	100,05%	0,8028	258	
66,926	1,159	2,162	280598	540	1200	4,05	1,750	0,47	5,45 mm	472,2	97,161	0,474	99,95%	0,6888	220	
51,240	0,888	1,655	245523	540	1200	3,54	2,000	0,42	5,75 mm	361,8	85,068	0,415	100,01%	0,6023	209	
40,486	0,701	1,308	218243	540	1200	3,15	2,250	0,37	5,88 mm	285,6	75,559	0,369	99,94%	0,5358	204	
32,794	0,568	1,059	196418	540	1200	2,84	2,500	0,33	6,05 mm	231,5	68,044	0,332	100,00%	0,4819	198	
27,102	0,469	0,876	178562	540	1200	2,58	2,750	0,30	5,50 mm	191,4	61,879	0,302	100,03%	0,4380	218	
22,773	0,394	0,736	163682	540	1200	2,36	3,000	0,28	4,80 mm	161,1	56,807	0,277	100,18%	0,4009	250	

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,45$

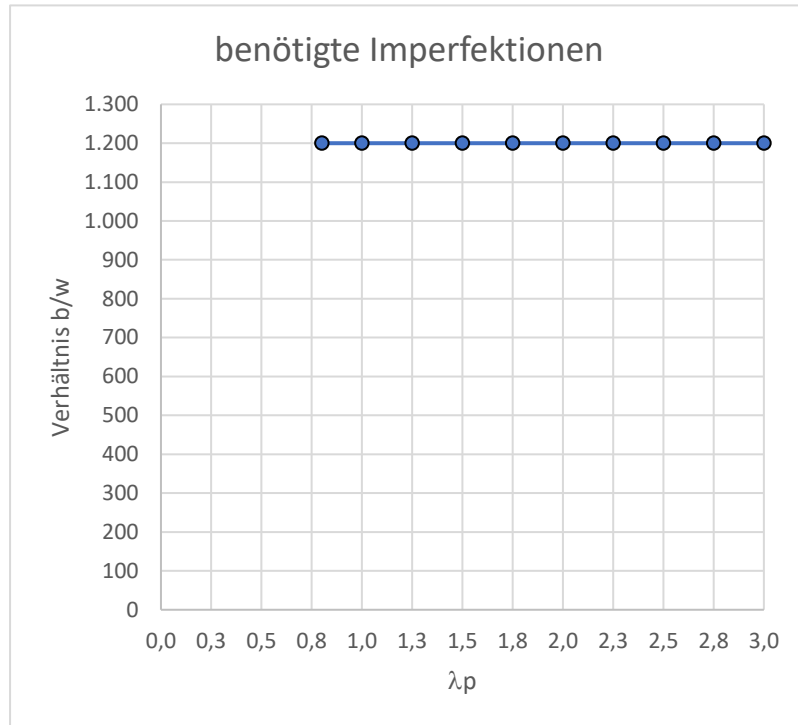
V 1



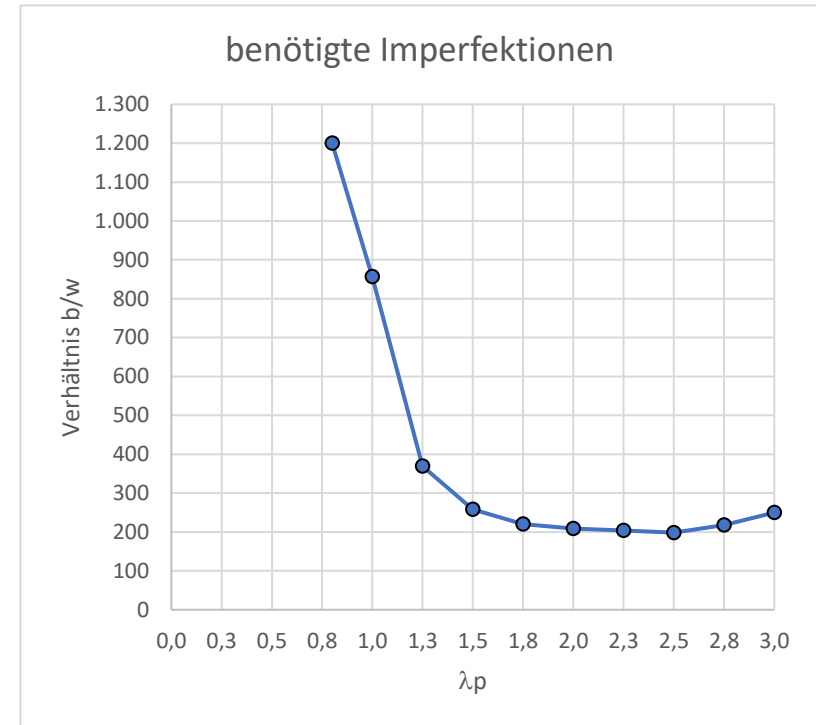
V 2



V 3



V 4



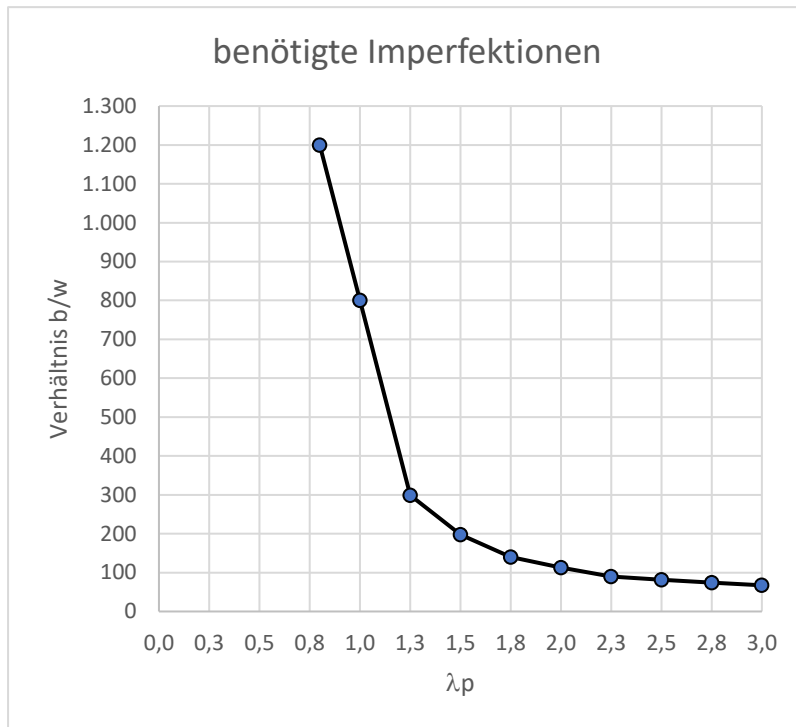
Anhang 13 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 18,949										α = 0,6 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
								benötigte Verformung	F [kN]	ANSYS	σ [N/mm²]	χ _w nach ANSYS							
320,249	5,547	16,901	784521	720	1200	11,32	0,800	1,00	1,00 mm	2628,9	193,468	0,944	94,39%	1,6553	1200				
204,959	3,550	10,816	627616	720	1200	9,06	1,000	0,83	1,50 mm	1848,0	169,999	0,829	99,93%	1,2056	800				
131,174	2,272	6,922	502094	720	1200	7,25	1,250	0,66	4,01 mm	1180,4	135,733	0,662	99,74%	0,9664	299				
91,093	1,578	4,807	418411	720	1200	6,04	1,500	0,55	6,08 mm	822,2	113,448	0,554	100,03%	0,8029	197				
66,926	1,159	3,532	358638	720	1200	5,18	1,750	0,47	8,55 mm	603,7	97,189	0,474	99,98%	0,6886	140				
51,240	0,888	2,704	313808	720	1200	4,53	2,000	0,42	10,61 mm	462,3	85,055	0,415	100,00%	0,6024	113				
40,486	0,701	2,137	278941	720	1200	4,03	2,250	0,37	13,40 mm	365,3	75,616	0,369	100,01%	0,5354	90				
32,794	0,568	1,731	251047	720	1200	3,62	2,500	0,33	14,70 mm	295,3	67,905	0,331	99,79%	0,4829	82				
27,102	0,469	1,430	228224	720	1200	3,29	2,750	0,30	16,20 mm	244,3	61,797	0,302	99,90%	0,4386	74				
22,773	0,394	1,202	209206	720	1200	3,02	3,000	0,28	17,82 mm	205,4	56,685	0,277	99,96%	0,4018	67				

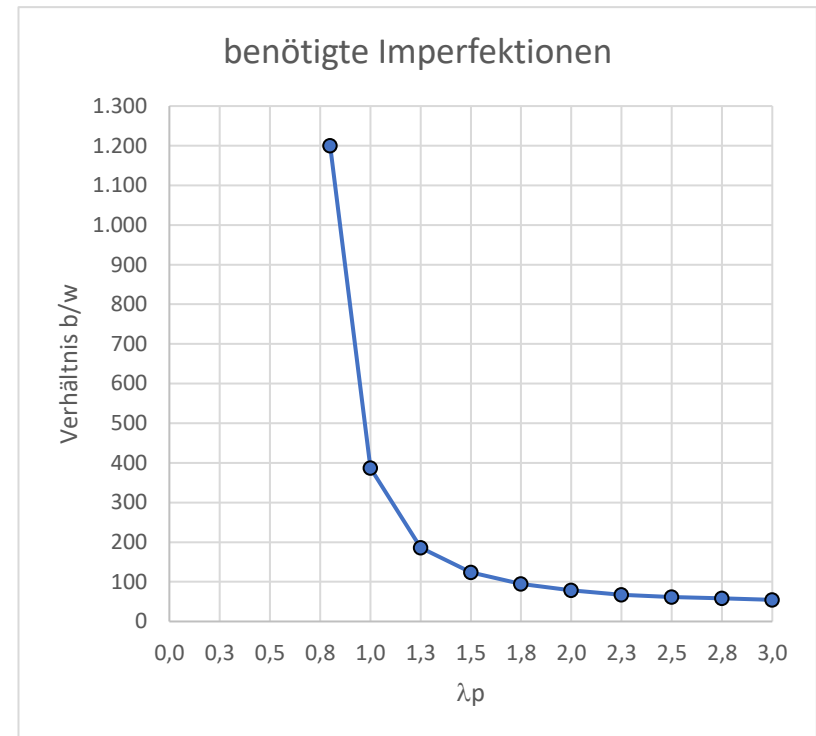
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 18,949										α = 0,6 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
								benötigte Verformung	F [kN]	ANSYS	σ [N/mm²]	χ _w nach ANSYS							
320,249	5,547	16,901	784521	720	1200	11,32	0,800	1,00	1,00 mm	2767,0	203,631	0,994	99,35%	1,5727	1200				
204,959	3,550	10,816	627616	720	1200	9,06	1,000	0,83	3,10 mm	1843,7	169,604	0,827	99,70%	1,2085	387				
131,174	2,272	6,922	502094	720	1200	7,25	1,250	0,66	6,45 mm	1185,0	136,261	0,665	100,12%	0,9627	186				
91,093	1,578	4,807	418411	720	1200	6,04	1,500	0,55	9,70 mm	820,4	113,205	0,552	99,82%	0,8047	124				
66,926	1,159	3,532	358638	720	1200	5,18	1,750	0,47	12,71 mm	603,5	97,157	0,474	99,95%	0,6888	94				
51,240	0,888	2,704	313808	720	1200	4,53	2,000	0,42	15,30 mm	462,5	85,097	0,415	100,05%	0,6021	78				
40,486	0,701	2,137	278941	720	1200	4,03	2,250	0,37	17,90 mm	365,3	75,599	0,369	99,99%	0,5355	67				
32,794	0,568	1,731	251047	720	1200	3,62	2,500	0,33	19,35 mm	295,6	67,990	0,332	99,92%	0,4823	62				
27,102	0,469	1,430	228224	720	1200	3,29	2,750	0,30	20,60 mm	244,4	61,837	0,302	99,96%	0,4383	58				
22,773	0,394	1,202	209206	720	1200	3,02	3,000	0,28	22,00 mm	205,4	56,685	0,277	99,96%	0,4018	55				

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,60$

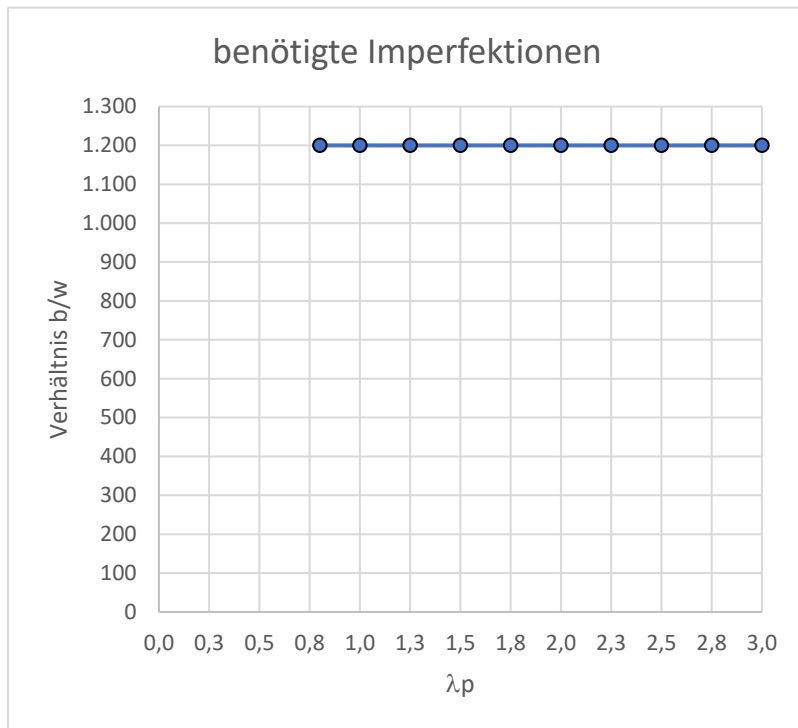
V 1



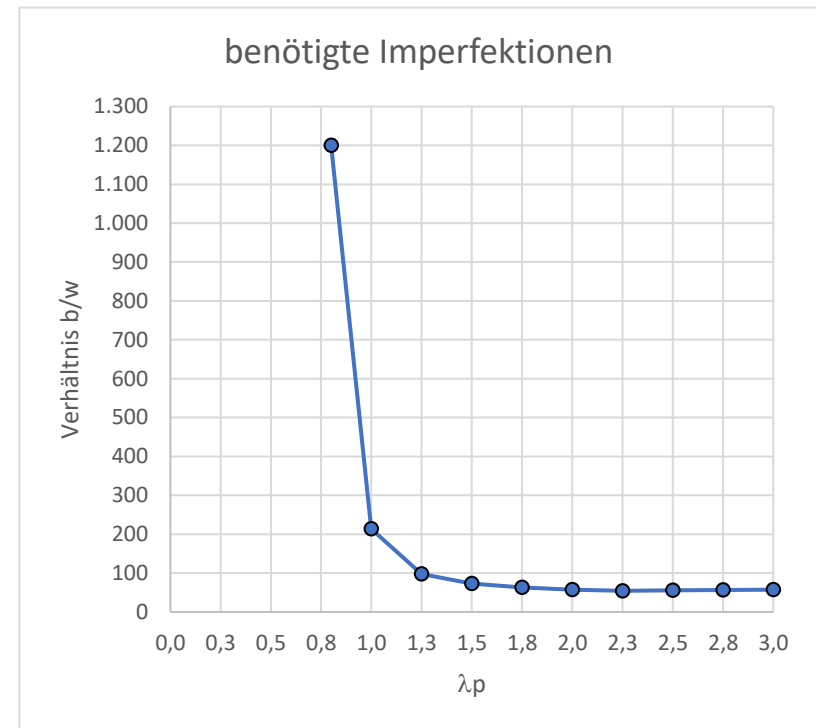
V 2



V 3



V 4



Anhang 14 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft		
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft		
V1	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =			Angepasst durch Regression						
	τ_{cr}	$\alpha_{cr,\tau}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	nach EC3-1-6 χ_{w0} mit $\eta=1,0$	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ_w nach ANSYS				
								0	1,00							
320,249	5,547	24,104	936916	900	1200	13,52	0,800	1,00	1,00 mm	3157,1	194,548	0,949	94,92%	1,6461	1200	
204,959	3,550	15,427	749532	900	1200	10,82	1,000	0,83	1,55 mm	2215,4	170,648	0,833	100,31%	1,2011	774	
131,174	2,272	9,873	599626	900	1200	8,65	1,250	0,66	3,65 mm	1417,2	136,455	0,666	100,27%	0,9613	329	
91,093	1,578	6,856	499688	900	1200	7,21	1,500	0,55	7,00 mm	984,2	113,711	0,555	100,26%	0,8011	171	
66,925	1,159	5,037	428304	900	1200	6,18	1,750	0,47	9,49 mm	721,5	97,262	0,475	100,05%	0,6881	126	
51,240	0,887	3,857	374766	900	1200	5,41	2,000	0,41	12,20 mm	552,2	85,073	0,415	100,02%	0,6023	98	
40,486	0,701	3,047	333125	900	1200	4,81	2,250	0,37	15,03 mm	436,2	75,599	0,369	99,99%	0,5355	80	
32,793	0,568	2,468	299813	900	1200	4,33	2,500	0,33	17,50 mm	353,3	68,037	0,332	99,99%	0,4820	69	
27,102	0,469	2,040	272557	900	1200	3,93	2,750	0,30	19,26 mm	292,2	61,896	0,302	100,06%	0,4379	62	
22,773	0,394	1,714	249844	900	1200	3,61	3,000	0,28	21,13 mm	245,6	56,747	0,277	100,07%	0,4013	57	

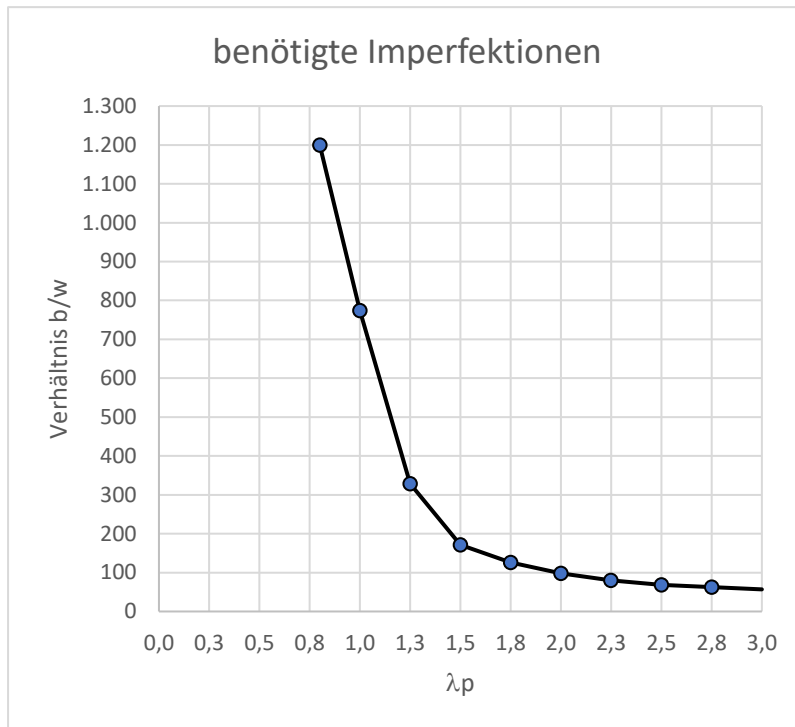
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft		
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft		
V2	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =			Angepasst durch Regression						
	τ_{cr}	$\alpha_{cr,\tau}$	σ_e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	nach EC3-1-6 χ_{w0} mit $\eta=1,0$	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	$\alpha_{cr}=\sigma_{cr}/\sigma$	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.
									F [kN]	ANSYS	σ [N/mm ²]	χ_w nach ANSYS				
								0	1,00							
320,249	5,547	24,104	936916	900	1200	13,52	0,800	1,00	1,00 mm	3279,5	202,091	0,986	98,60%	1,5847	1200	
204,959	3,550	15,427	749532	900	1200	10,82	1,000	0,83	2,91 mm	2207,0	170,001	0,829	99,93%	1,2056	412	
131,174	2,272	9,873	599626	900	1200	8,65	1,250	0,66	6,80 mm	1413,3	136,080	0,664	99,99%	0,9639	176	
91,093	1,578	6,856	499688	900	1200	7,21	1,500	0,55	10,00 mm	982,7	113,546	0,554	100,12%	0,8023	120	
66,925	1,159	5,037	428304	900	1200	6,18	1,750	0,47	13,73 mm	720,9	97,182	0,474	99,97%	0,6887	87	
51,240	0,887	3,857	374766	900	1200	5,41	2,000	0,41	17,03 mm	551,8	85,013	0,415	99,95%	0,6027	70	
40,486	0,701	3,047	333125	900	1200	4,81	2,250	0,37	19,60 mm	436,5	75,648	0,369	100,05%	0,5352	61	
32,793	0,568	2,468	299813	900	1200	4,33	2,500	0,33	22,00 mm	353,3	68,033	0,332	99,98%	0,4820	55	
27,102	0,469	2,040	272557	900	1200	3,93	2,750	0,30	23,85 mm	292,3	61,909	0,302	100,08%	0,4378	50	
22,773	0,394	1,714	249844	900	1200	3,61	3,000	0,28	25,55 mm	245,4	56,703	0,277	100,00%	0,4016	47	

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt		-> Belastung mit externer Kraft				
										Längsränder mit externe Punkte verformbar		-> Belastung mit externer Kraft				
V3	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =			Angepasst durch Regression						
			τ	57,74												
		k _c	13,286		α = 0,75			nach EC3-1-6								
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.	
										F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ		
							0	1,00								
320,249	5,547	24,104	936916	900	1200	13,52	0,800	1,00	1,00 mm	135,5	8,350	0,041	4,07%	38,3511	1200	
204,959	3,550	15,427	749532	900	1200	10,82	1,000	0,83	1,00 mm	101,2	7,795	0,038	4,58%	26,2929	1200	
131,174	2,272	9,873	599626	900	1200	8,65	1,250	0,66	1,00 mm	69,8	6,721	0,033	4,94%	19,5179	1200	
91,093	1,578	6,856	499688	900	1200	7,21	1,500	0,55	1,00 mm	48,7	5,627	0,027	4,96%	16,1888	1200	
66,925	1,159	5,037	428304	900	1200	6,18	1,750	0,47	1,00 mm	34,9	4,704	0,023	4,84%	14,2259	1200	
51,240	0,887	3,857	374766	900	1200	5,41	2,000	0,41	1,00 mm	24,6	3,790	0,018	4,46%	13,5205	1200	
40,486	0,701	3,047	333125	900	1200	4,81	2,250	0,37	1,00 mm	16,3	2,833	0,014	3,75%	14,2918	1200	
32,793	0,568	2,468	299813	900	1200	4,33	2,500	0,33	1,00 mm	11,8	2,273	0,011	3,34%	14,4268	1200	
27,102	0,469	2,040	272557	900	1200	3,93	2,750	0,30	1,00 mm	8,5	1,796	0,009	2,90%	15,0877	1200	
22,773	0,394	1,714	249844	900	1200	3,61	3,000	0,28	1,00 mm	6,1	1,407	0,007	2,48%	16,1875	1200	

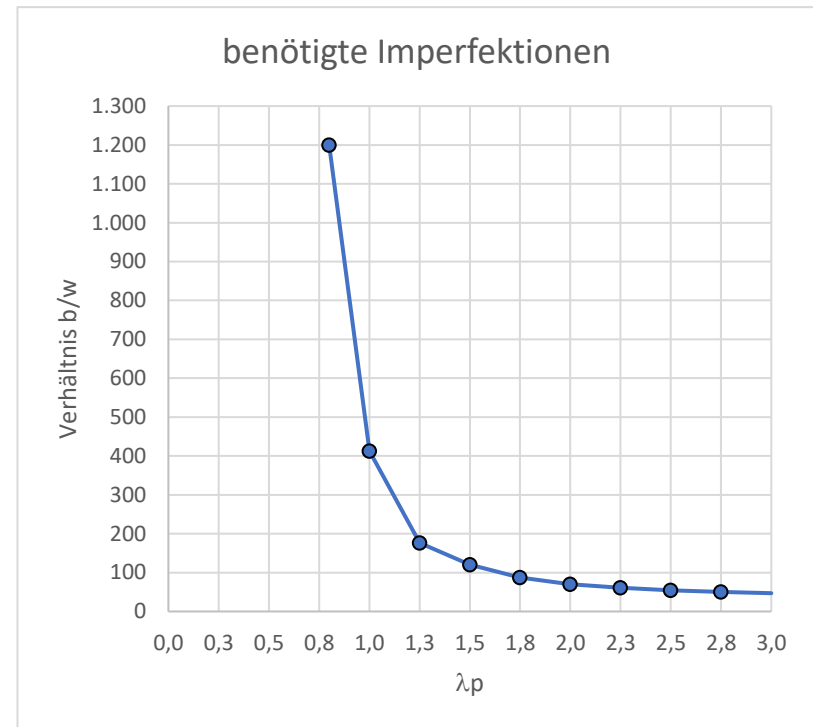
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt		-> Belastung mit Kraft				
										Längsränder mit externe Punkte verformbar		-> Belastung mit Kraft				
V4	Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve															
	S 355						e ₀ =			Angepasst durch Regression						
			τ	57,74												
		k _c	13,286		α = 0,75			nach EC3-1-6								
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.	
										F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ		
							0	1,00								
320,249	5,547	24,104	936916	900	1200	13,52	0,800	1,00	1,00 mm	3240,0	199,657	0,974	97,41%	1,6040	1200	
204,959	3,550	15,427	749532	900	1200	10,82	1,000	0,83	3,80 mm	2209,0	170,155	0,830	100,02%	1,2045	316	
131,174	2,272	9,873	599626	900	1200	8,65	1,250	0,66	9,80 mm	1413,8	136,128	0,664	100,03%	0,9636	122	
91,093	1,578	6,856	499688	900	1200	7,21	1,500	0,55	14,40 mm	981,4	113,390	0,553	99,98%	0,8034	83	
66,925	1,159	5,037	428304	900	1200	6,18	1,750	0,47	18,20 mm	720,9	97,171	0,474	99,96%	0,6887	66	
51,240	0,887	3,857	374766	900	1200	5,41	2,000	0,41	21,32 mm	552,2	85,068	0,415	100,01%	0,6023	56	
40,486	0,701	3,047	333125	900	1200	4,81	2,250	0,37	23,90 mm	436,3	75,613	0,369	100,01%	0,5354	50	
32,793	0,568	2,468	299813	900	1200	4,33	2,500	0,33	25,93 mm	353,3	68,037	0,332	99,99%	0,4820	46	
27,102	0,469	2,040	272557	900	1200	3,93	2,750	0,30	25,69 mm	292,0	61,858	0,302	100,00%	0,4381	47	
22,773	0,394	1,714	249844	900	1200	3,61	3,000	0,28	27,40 mm	245,4	56,703	0,277	100,00%	0,4016	44	

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 0,75$

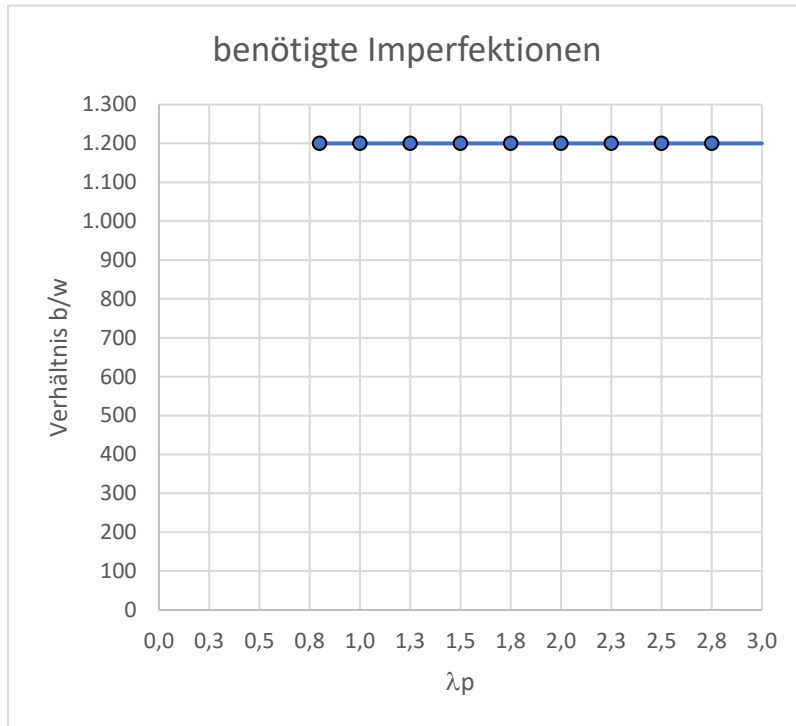
V 1



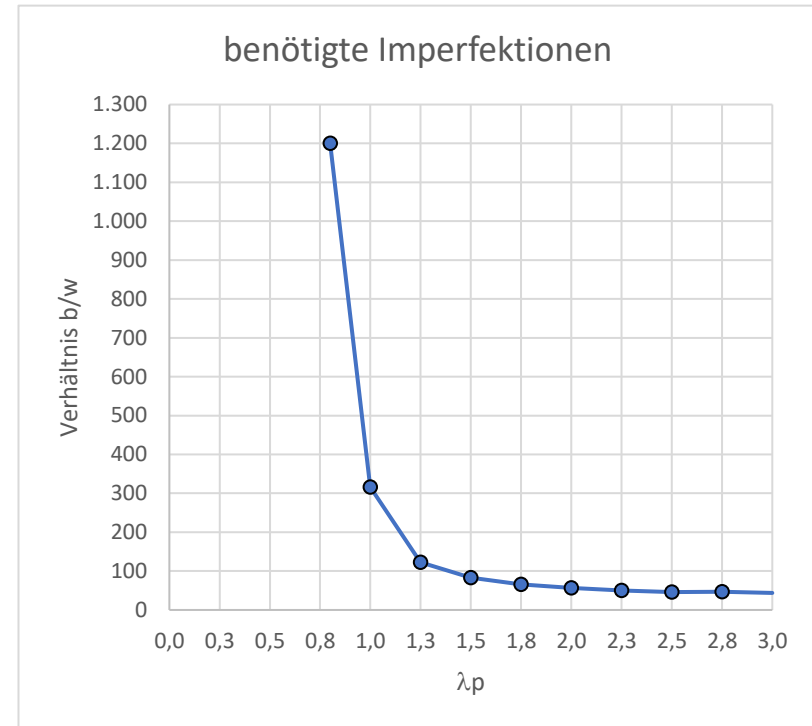
V 2



V 3

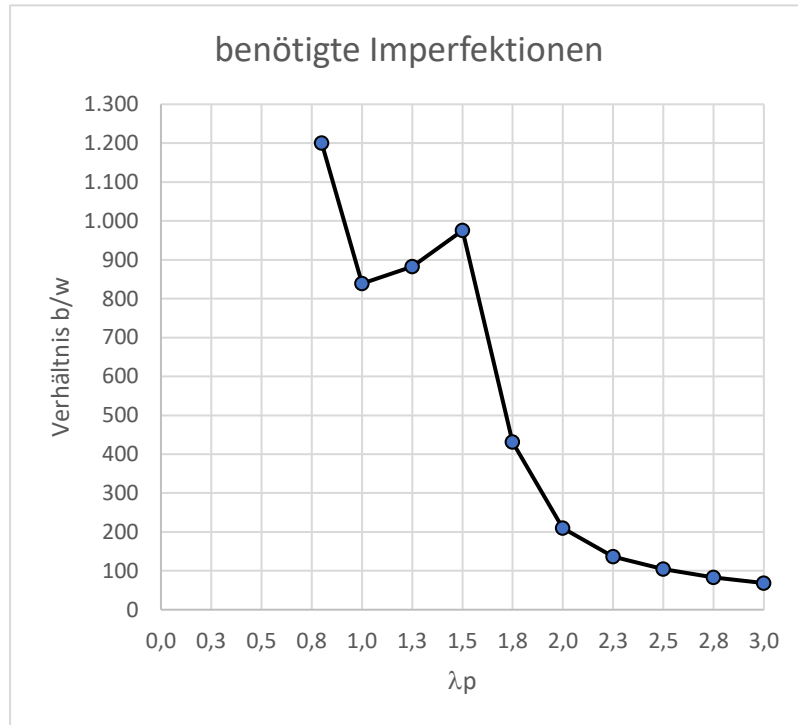


V 4

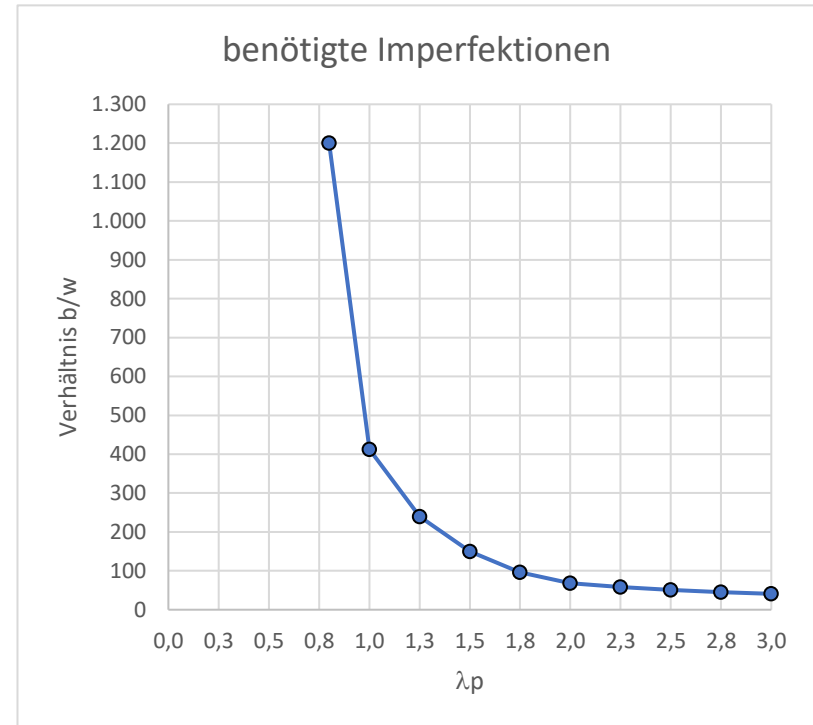


Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{2}$

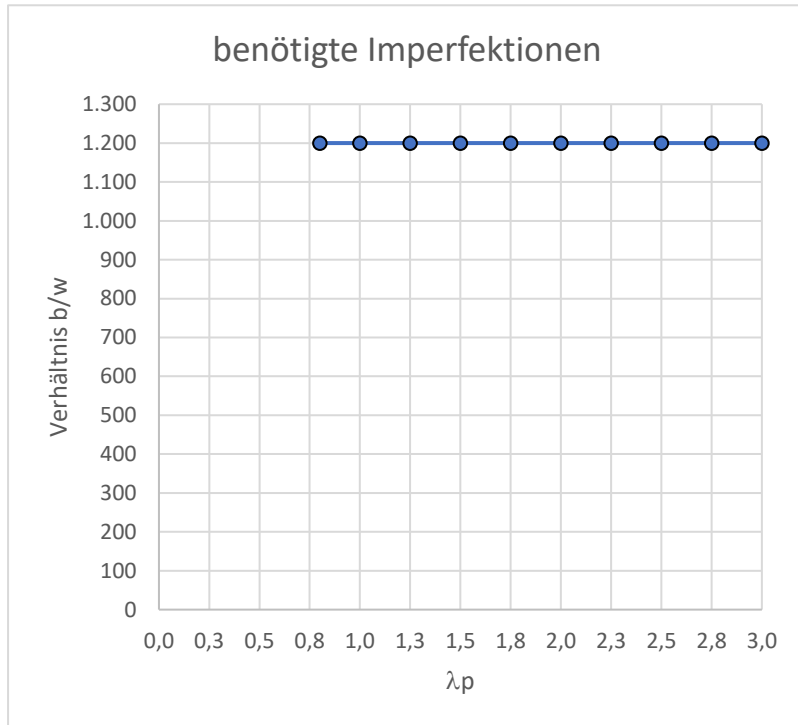
V 1



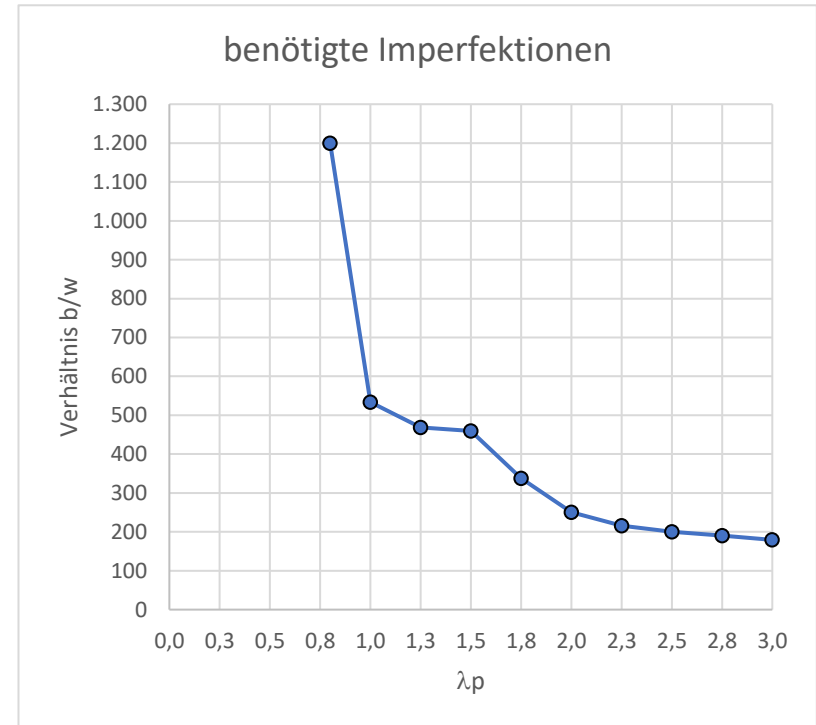
V 2



V 3



V 4



Anhang 16 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 6,546									
										α = 2									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw			benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.			
										F [kN] ANSYS		σ [N/mm ²]		χ _w nach ANSYS		Abweichung		α _{cr} =σ _{cr} /σ	
							0	1,00											
320,249	5,547	48,923	1334781	2400	1200	19,27	0,800	1,00		1,00 mm	4558,7	197,183	0,962	96,21%	1,6241	1200			
204,960	3,550	31,311	1067824	2400	1200	15,41	1,000	0,83		1,99 mm	3153,4	170,498	0,832	100,22%	1,2021	603			
131,174	2,272	20,039	854259	2400	1200	12,33	1,250	0,66		1,27 mm	2013,9	136,109	0,664	100,01%	0,9637	945			
91,093	1,578	13,916	711883	2400	1200	10,28	1,500	0,55		1,00 mm	1370,5	111,150	0,542	98,01%	0,8196	1200			
66,926	1,159	10,224	610185	2400	1200	8,81	1,750	0,47		1,00 mm	993,1	93,966	0,458	96,66%	0,7122	1200			
51,240	0,888	7,828	533912	2400	1200	7,71	2,000	0,42		1,00 mm	758,2	81,987	0,400	96,39%	0,6250	1200			
40,486	0,701	6,185	474588	2400	1200	6,85	2,250	0,37		1,00 mm	599,6	72,943	0,356	96,48%	0,5550	1200			
32,794	0,568	5,010	427130	2400	1200	6,17	2,500	0,33		1,00 mm	488,2	65,987	0,322	96,97%	0,4970	1200			
27,102	0,469	4,140	388300	2400	1200	5,60	2,750	0,30		1,00 mm	403,2	59,955	0,293	96,92%	0,4520	1200			
22,773	0,394	3,479	355941	2400	1200	5,14	3,000	0,28		1,00 mm	340,7	55,260	0,270	97,45%	0,4121	1200			

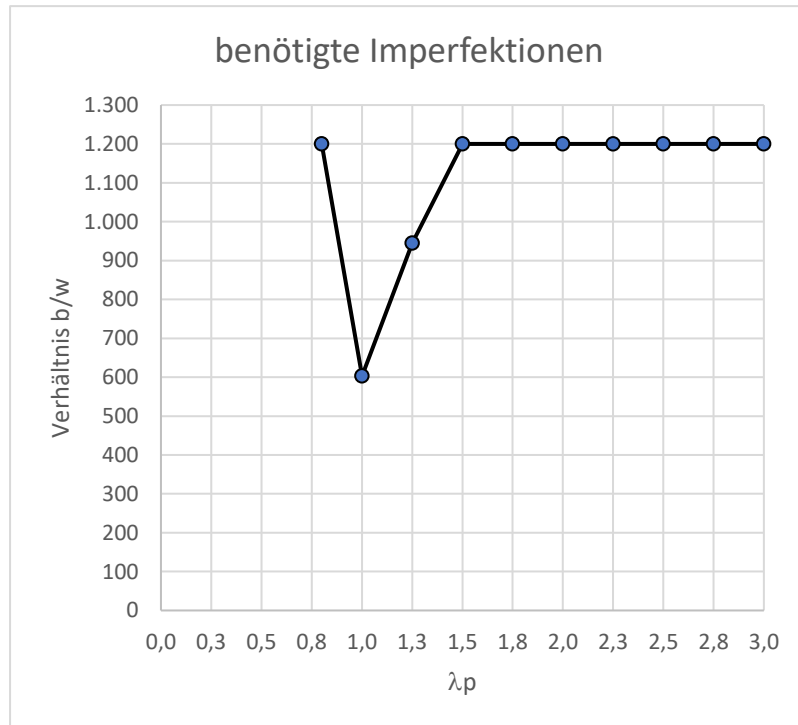
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 6,546									
										α = 2									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw			benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.			
										F [kN] ANSYS		σ [N/mm ²]		χ _w nach ANSYS		Abweichung		α _{cr} =σ _{cr} /σ	
							0	1,00											
320,249	5,547	48,923	1334781	2400	1200	19,27	0,800	1,00		1,00 mm	4735,7	204,839	0,999	99,94%	1,5634	1200			
204,960	3,550	31,311	1067824	2400	1200	15,41	1,000	0,83		3,50 mm	3152,0	170,422	0,831	100,18%	1,2027	343			
131,174	2,272	20,039	854259	2400	1200	12,33	1,250	0,66		3,10 mm	2016,2	136,265	0,665	100,13%	0,9626	387			
91,093	1,578	13,916	711883	2400	1200	10,28	1,500	0,55		2,47 mm	1398,1	113,389	0,553	99,98%	0,8034	486			
66,926	1,159	10,224	610185	2400	1200	8,81	1,750	0,47		1,89 mm	1027,4	97,211	0,474	100,00%	0,6885	635			
51,240	0,888	7,828	533912	2400	1200	7,71	2,000	0,42		2,22 mm	786,7	85,065	0,415	100,01%	0,6024	541			
40,486	0,701	6,185	474588	2400	1200	6,85	2,250	0,37		3,18 mm	621,5	75,604	0,369	100,00%	0,5355	377			
32,794	0,568	5,010	427130	2400	1200	6,17	2,500	0,33		5,50 mm	503,4	68,047	0,332	100,00%	0,4819	218			
27,102	0,469	4,140	388300	2400	1200	5,60	2,750	0,30		6,30 mm	416,1	61,867	0,302	100,01%	0,4381	190			
22,773	0,394	3,479	355941	2400	1200	5,14	3,000	0,28		10,13 mm	349,6	56,708	0,277	100,00%	0,4016	118			

								Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft -> Belastung mit externer Kraft				
V3		Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve														
		S 355					e ₀ =		Angepasst durch Regression							
				τ	57,74											
				k _τ	6,546		α = 2		nach EC3-1-6		ext. Kraft+ext. Pkt gekoppelt					
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.	
320,249	5,547	48,923	1334781	2400	1200	19,27	0,800	1,00	1,00 mm	101,4	4,386	0,021	2,14%	73,0237	1200	
204,960	3,550	31,311	1067824	2400	1200	15,41	1,000	0,83	1,00 mm	81,1	4,387	0,021	2,58%	46,7248	1200	
131,174	2,272	20,039	854259	2400	1200	12,33	1,250	0,66	1,00 mm	64,9	4,386	0,021	3,22%	29,9057	1200	
91,093	1,578	13,916	711883	2400	1200	10,28	1,500	0,55	1,00 mm	54,8	4,445	0,022	3,92%	20,4918	1200	
66,926	1,159	10,224	610185	2400	1200	8,81	1,750	0,47	1,00 mm	54,6	5,166	0,025	5,31%	12,9545	1200	
51,240	0,888	7,828	533912	2400	1200	7,71	2,000	0,42	1,00 mm	65,1	7,040	0,034	8,28%	7,2788	1200	
40,486	0,701	6,185	474588	2400	1200	6,85	2,250	0,37	1,00 mm	44,6	5,426	0,026	7,18%	7,4618	1200	
32,794	0,568	5,010	427130	2400	1200	6,17	2,500	0,33	1,00 mm	40,7	5,498	0,027	8,08%	5,9644	1200	
27,102	0,469	4,140	388300	2400	1200	5,60	2,750	0,30	1,00 mm	35,0	5,204	0,025	8,41%	5,2080	1200	
22,773	0,394	3,479	355941	2400	1200	5,14	3,000	0,28	1,00 mm	27,1	4,395	0,021	7,75%	5,1821	1200	

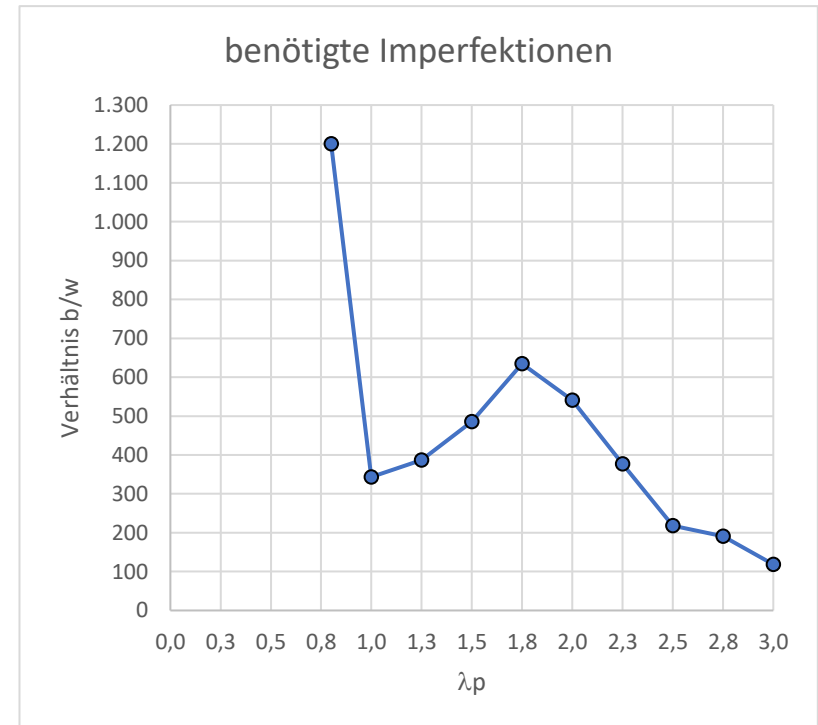
								Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft -> Belastung mit Kraft				
V4		Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve														
		S 355					e ₀ =		Angepasst durch Regression							
				τ	57,74											
				k _τ	6,546		α = 2		nach EC3-1-6		ext. Kraft+ext. Pkt gekoppelt					
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.	
320,249	5,547	48,923	1334781	2400	1200	19,27	0,800	1,00	1,00 mm	4597,1	198,844	0,970	97,02%	1,6106	1200	
204,960	3,550	31,311	1067824	2400	1200	15,41	1,000	0,83	3,00 mm	3146,2	170,108	0,830	100,00%	1,2049	400	
131,174	2,272	20,039	854259	2400	1200	12,33	1,250	0,66	2,92 mm	2013,8	136,102	0,664	100,01%	0,9638	411	
91,093	1,578	13,916	711883	2400	1200	10,28	1,500	0,55	1,90 mm	1399,3	113,486	0,554	100,07%	0,8027	632	
66,926	1,159	10,224	610185	2400	1200	8,81	1,750	0,47	1,00 mm	1024,7	96,956	0,473	99,74%	0,6903	1200	
51,240	0,888	7,828	533912	2400	1200	7,71	2,000	0,42	1,00 mm	778,6	84,190	0,411	98,98%	0,6086	1200	
40,486	0,701	6,185	474588	2400	1200	6,85	2,250	0,37	1,00 mm	604,9	73,583	0,359	97,32%	0,5502	1200	
32,794	0,568	5,010	427130	2400	1200	6,17	2,500	0,33	1,00 mm	486,8	65,802	0,321	96,70%	0,4984	1200	
27,102	0,469	4,140	388300	2400	1200	5,60	2,750	0,30	1,00 mm	398,6	59,262	0,289	95,80%	0,4573	1200	
22,773	0,394	3,479	355941	2400	1200	5,14	3,000	0,28	1,00 mm	334,4	54,233	0,265	95,64%	0,4199	1200	

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 2,00$

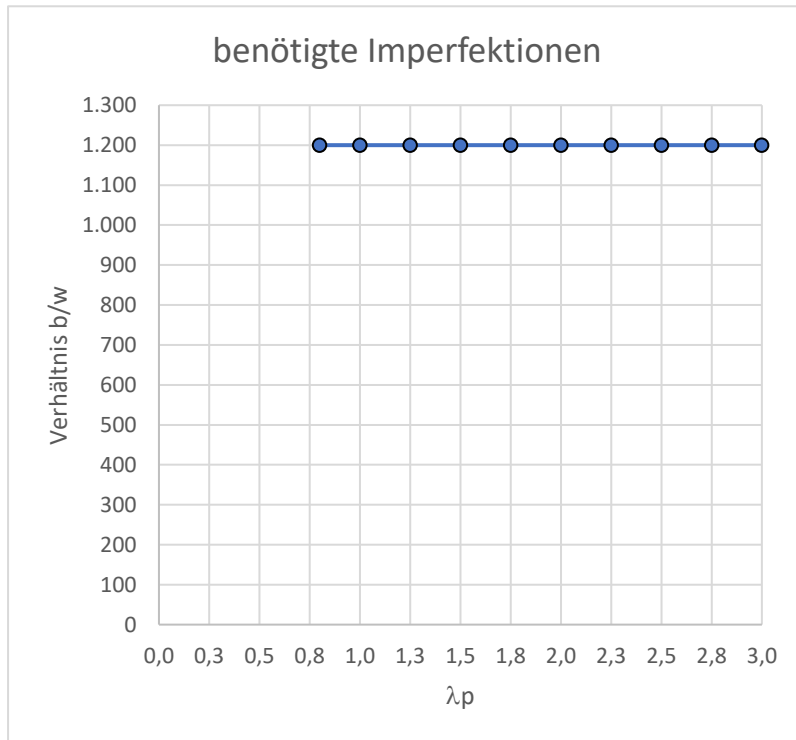
V 1



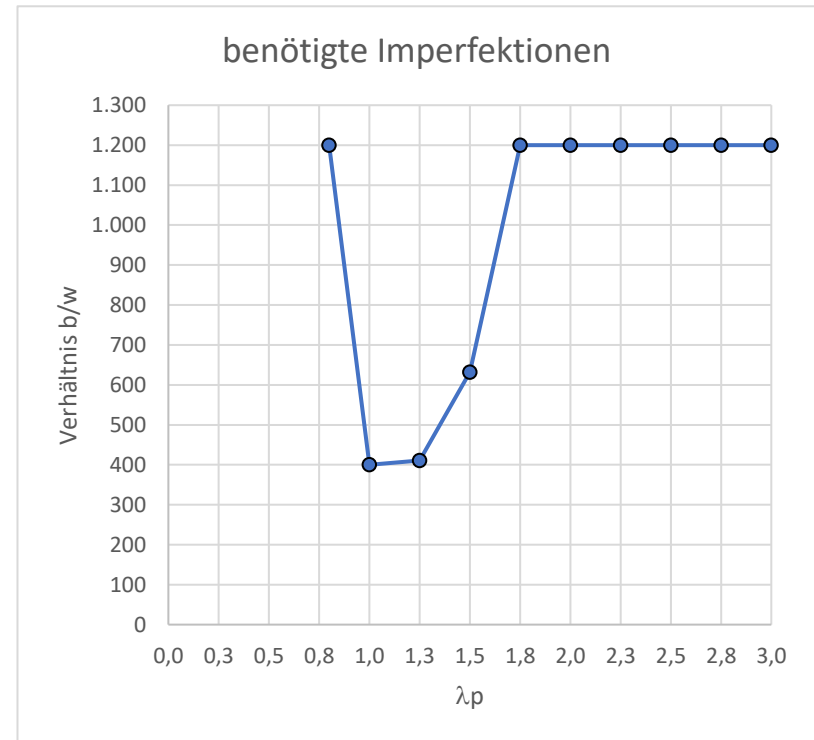
V 2



V 3



V 4



Anhang 17 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 6,07									
										α = 2,445 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _{co} mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
										F [kN] ANSYS		σ [N/mm ²]		χ _w nach ANSYS		Abweichung α _{cr} =σ _{cr} /σ			
							0	1,00											
320,249	5,547	52,759	1386128	2934	1200	20,01	0,800	1,00	1,00 mm	4706,1	196,019	0,956	95,64%	1,6338	1200				
204,959	3,550	33,766	1108902	2934	1200	16,01	1,000	0,83	1,28 mm	3266,6	170,076	0,830	99,98%	1,2051	938				
131,174	2,272	21,610	887122	2934	1200	12,80	1,250	0,66	1,00 mm	2046,5	133,189	0,650	97,87%	0,9849	1200				
91,093	1,578	15,007	739268	2934	1200	10,67	1,500	0,55	1,00 mm	1388,6	108,446	0,529	95,62%	0,8400	1200				
66,926	1,159	11,026	633659	2934	1200	9,15	1,750	0,47	1,00 mm	1014,4	92,426	0,451	95,08%	0,7241	1200				
51,240	0,888	8,441	554451	2934	1200	8,00	2,000	0,42	1,00 mm	775,3	80,731	0,394	94,91%	0,6347	1200				
40,486	0,701	6,670	492846	2934	1200	7,11	2,250	0,37	1,00 mm	613,1	71,817	0,350	94,99%	0,5637	1200				
32,793	0,568	5,403	443561	2934	1200	6,40	2,500	0,33	1,00 mm	495,2	64,454	0,314	94,72%	0,5088	1200				
27,102	0,469	4,465	403237	2934	1200	5,82	2,750	0,30	1,00 mm	408,9	58,540	0,286	94,63%	0,4630	1200				
22,773	0,394	3,752	369634	2934	1200	5,34	3,000	0,28	1,00 mm	343,7	53,683	0,262	94,67%	0,4242	1200				

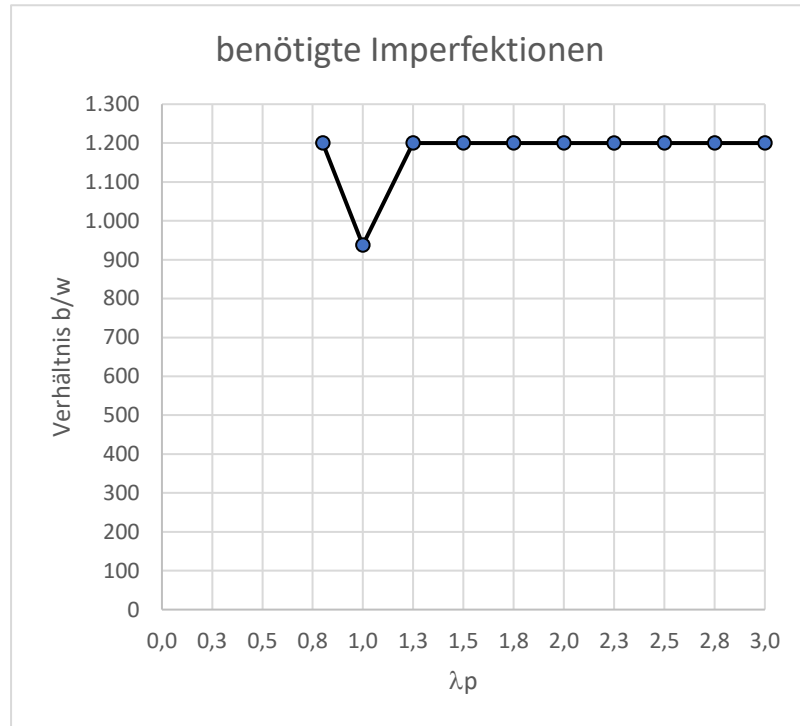
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 6,07									
										α = 2,445 nach EC3-1-6									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _{co} mit η=1,0	benötigte Verformung		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt				Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
										F [kN] ANSYS		σ [N/mm ²]		χ _w nach ANSYS		Abweichung α _{cr} =σ _{cr} /σ			
							0	1,00											
320,249	5,547	52,759	1386128	2934	1200	20,01	0,800	1,00	1,00 mm	4885,7	203,499	0,993	99,29%	1,5737	1200				
204,959	3,550	33,766	1108902	2934	1200	16,01	1,000	0,83	1,80 mm	3268,7	170,185	0,830	100,04%	1,2043	667				
131,174	2,272	21,610	887122	2934	1200	12,80	1,250	0,66	1,20 mm	2090,8	136,072	0,664	99,98%	0,9640	1000				
91,093	1,578	15,007	739268	2934	1200	10,67	1,500	0,55	1,00 mm	1435,0	112,070	0,547	98,82%	0,8128	1200				
66,926	1,159	11,026	633659	2934	1200	9,15	1,750	0,47	1,00 mm	1050,5	95,715	0,467	98,46%	0,6992	1200				
51,240	0,888	8,441	554451	2934	1200	8,00	2,000	0,42	1,00 mm	802,6	83,571	0,408	98,25%	0,6131	1200				
40,486	0,701	6,670	492846	2934	1200	7,11	2,250	0,37	1,00 mm	634,4	74,321	0,363	98,30%	0,5447	1200				
32,793	0,568	5,403	443561	2934	1200	6,40	2,500	0,33	1,00 mm	513,2	66,801	0,326	98,17%	0,4909	1200				
27,102	0,469	4,465	403237	2934	1200	5,82	2,750	0,30	1,00 mm	425,0	60,845	0,297	98,36%	0,4454	1200				
22,773	0,394	3,752	369634	2934	1200	5,34	3,000	0,28	1,00 mm	356,5	55,685	0,272	98,20%	0,4090	1200				

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt		-> Belastung mit externer Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar		-> Belastung mit externer Kraft					
V3										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve							
										S 355		e ₀ =		Angepasst durch Regression			
										τ 57,74							
										k _τ 6,07		α = 2,445		nach EC3-1-6			
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung F [kN] ANSYS		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.		
												σ [N/mm ²] ANSYS					
							0	1,00	1,00 mm	115,3	4,803	0,023	2,34%	66,6726	1200		
320,249	5,547	52,759	1386128	2934	1200	20,01	0,800	1,00	1,00 mm	92,3	4,806	0,023	2,83%	42,6441	1200		
204,959	3,550	33,766	1108902	2934	1200	16,01	1,000	0,83	1,00 mm	73,7	4,799	0,023	3,53%	27,3323	1200		
131,174	2,272	21,610	887122	2934	1200	12,80	1,250	0,66	1,00 mm	61,5	4,802	0,023	4,23%	18,9683	1200		
91,093	1,578	15,007	739268	2934	1200	10,67	1,500	0,55	1,00 mm	52,7	4,806	0,023	4,94%	13,9249	1200		
66,926	1,159	11,026	633659	2934	1200	9,15	1,750	0,47	1,00 mm	46,1	4,801	0,023	5,64%	10,6725	1200		
51,240	0,888	8,441	554451	2934	1200	8,00	2,000	0,42	1,00 mm	41,0	4,801	0,023	6,35%	8,4334	1200		
40,486	0,701	6,670	492846	2934	1200	7,11	2,250	0,37	1,00 mm	36,9	4,803	0,023	7,06%	6,8281	1200		
32,793	0,568	5,403	443561	2934	1200	6,40	2,500	0,33	1,00 mm	33,6	4,804	0,023	7,77%	5,6411	1200		
27,102	0,469	4,465	403237	2934	1200	5,82	2,750	0,30	1,00 mm	30,8	4,809	0,023	8,48%	4,7356	1200		
22,773	0,394	3,752	369634	2934	1200	5,34	3,000	0,28	1,00 mm								

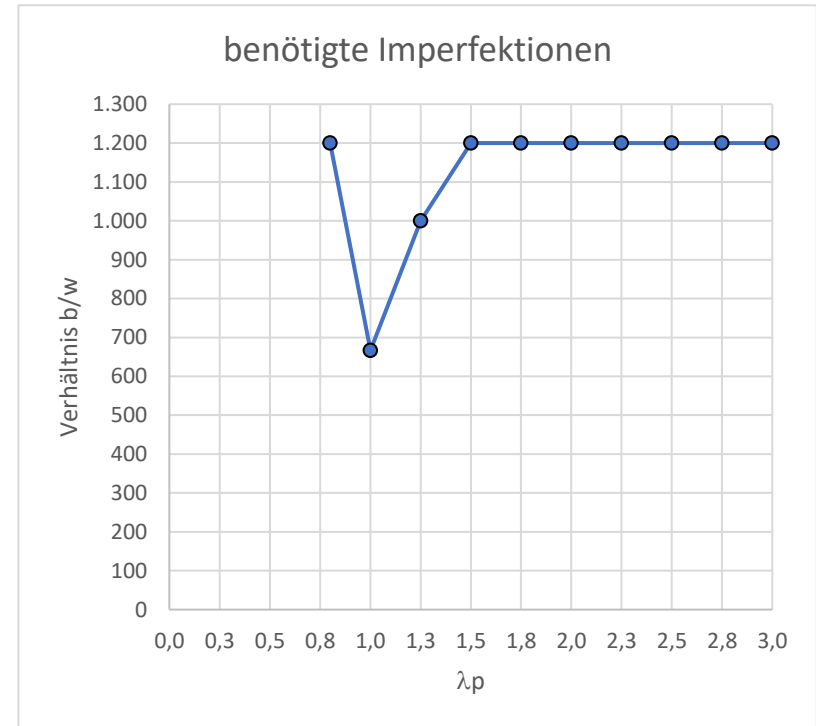
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt		-> Belastung mit Kraft					
										Längsränder mit externe Punkte verformbar		-> Belastung mit Kraft					
V4										Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve							
										S 355		e ₀ =		Angepasst durch Regression			
										τ 57,74							
										k _τ 6,07		α = 2,445		nach EC3-1-6			
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λ _w	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung F [kN] ANSYS		ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt		Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.		
												σ [N/mm ²] ANSYS					
							0	1,00	1,00 mm	4801,9	200,009	0,976	97,58%	1,6012	1200		
320,249	5,547	52,759	1386128	2934	1200	20,01	0,800	1,00	1,78 mm	3268,1	170,154	0,830	100,02%	1,2046	674		
204,959	3,550	33,766	1108902	2934	1200	16,01	1,000	0,83	1,16 mm	2091,2	136,098	0,664	100,00%	0,9638	1034		
131,174	2,272	21,610	887122	2934	1200	12,80	1,250	0,66	1,00 mm	1425,6	111,336	0,543	98,17%	0,8182	1200		
91,093	1,578	15,007	739268	2934	1200	10,67	1,500	0,55	1,00 mm	1047,4	95,433	0,466	98,17%	0,7013	1200		
66,926	1,159	11,026	633659	2934	1200	9,15	1,750	0,47	1,00 mm	786,2	81,863	0,399	96,24%	0,6259	1200		
51,240	0,888	8,441	554451	2934	1200	8,00	2,000	0,42	1,00 mm	617,0	72,276	0,353	95,59%	0,5602	1200		
40,486	0,701	6,670	492846	2934	1200	7,11	2,250	0,37	1,00 mm	496,4	64,617	0,315	94,96%	0,5075	1200		
32,793	0,568	5,403	443561	2934	1200	6,40	2,500	0,33	1,00 mm	407,4	58,324	0,285	94,28%	0,4647	1200		
27,102	0,469	4,465	403237	2934	1200	5,82	2,750	0,30	1,00 mm	340,2	53,138	0,259	93,71%	0,4286	1200		
22,773	0,394	3,752	369634	2934	1200	5,34	3,000	0,28	1,00 mm								

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = \sqrt{6}$

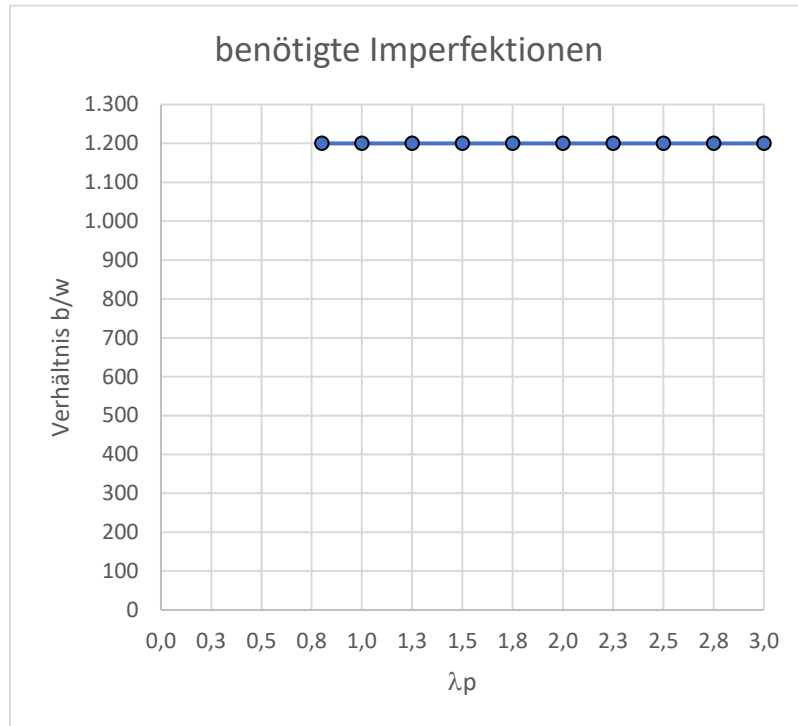
V 1



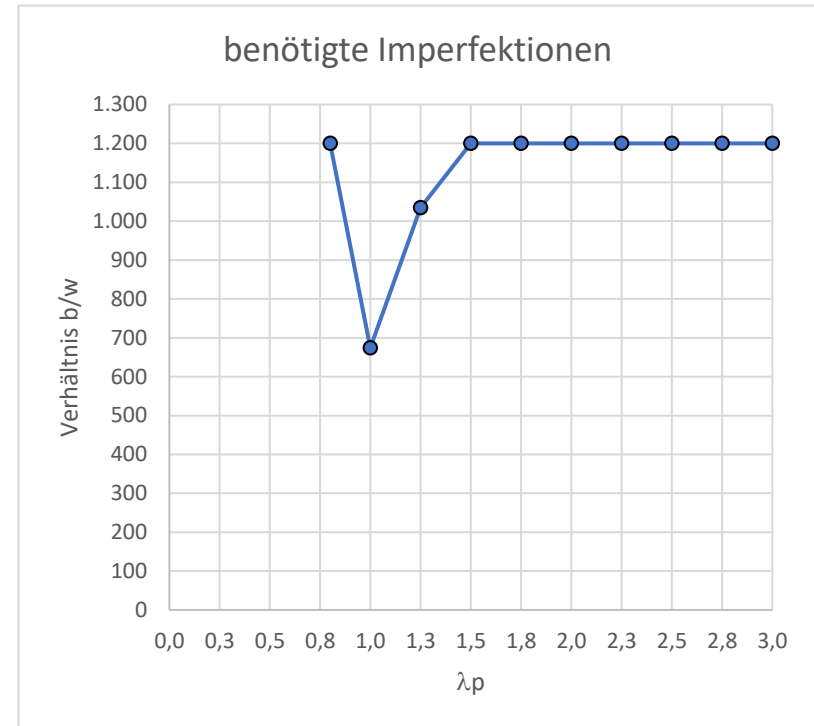
V 2



V 3



V 4



Anhang 18 Schubbelastung Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V1																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 5,84									
										α = 3									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
										ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt									
										benötigte Verformung									
										F [kN] ANSYS									
										σ [N/mm ²]									
										χ _w nach ANSYS									
										Abweichung									
										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
										Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
320,249	5,547	54,837	1413160	3600	1200	20,40	0,800	1,00	1,00 mm	4757,0	194,349	0,948	94,82%	1,6478	1200				
204,960	3,550	35,096	1130528	3600	1200	16,32	1,000	0,83	1,22 mm	3333,4	170,234	0,831	100,07%	1,2040	984				
131,174	2,272	22,461	904423	3600	1200	13,05	1,250	0,66	1,00 mm	2042,7	130,399	0,636	95,82%	1,0059	1200				
91,093	1,578	15,598	753685	3600	1200	10,88	1,500	0,55	1,00 mm	1363,8	104,472	0,510	92,12%	0,8719	1200				
66,926	1,159	11,460	646016	3600	1200	9,32	1,750	0,47	1,00 mm	984,8	88,014	0,429	90,54%	0,7604	1200				
51,240	0,888	8,774	565264	3600	1200	8,16	2,000	0,42	1,00 mm	771,6	78,810	0,385	92,65%	0,6502	1200				
40,486	0,701	6,933	502457	3600	1200	7,25	2,250	0,37	1,00 mm	646,4	74,270	0,362	98,23%	0,5451	1200				
32,794	0,568	5,615	452211	3600	1200	6,53	2,500	0,33	1,00 mm	527,1	67,294	0,328	98,89%	0,4873	1200				
27,102	0,469	4,641	411101	3600	1200	5,93	2,750	0,30	1,00 mm	391,7	55,009	0,268	88,92%	0,4927	1200				
22,773	0,394	3,900	376843	3600	1200	5,44	3,000	0,28	1,00 mm	329,4	50,462	0,246	88,99%	0,4513	1200				

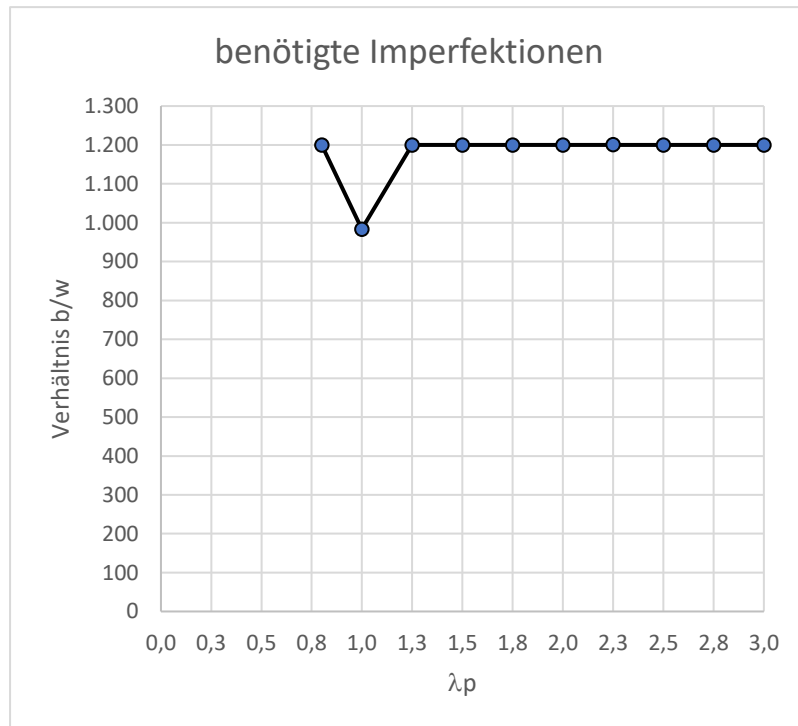
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (y-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V2																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
										τ 57,74									
										k _τ 5,84									
										α = 3									
										nach EC3-1-6									
										χ _w mit η=1,0									
										ext.Kraft+ext.Pkt gekoppelt									
										benötigte Verformung									
										F [kN] ANSYS									
										σ [N/mm ²]									
										χ _w nach ANSYS									
										Abweichung									
										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
										Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.									
τ _{cr}	α _{cr,τ}	σ _e	N [N]	a [mm]	b [mm]	t [mm]	λw	χ _w mit η=1,0	benötigte Verformung	F [kN] ANSYS	σ [N/mm ²]	χ _w nach ANSYS	Abweichung	α _{cr} =σ _{cr} /σ	Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.				
320,249	5,547	54,837	1413160	3600	1200	20,40	0,800	1,00	1,00 mm	4996,6	204,137	0,996	99,60%	1,5688	1200				
204,960	3,550	35,096	1130528	3600	1200	16,32	1,000	0,83	2,04 mm	3333,0	170,213	0,830	100,06%	1,2041	588				
131,174	2,272	22,461	904423	3600	1200	13,05	1,250	0,66	1,17 mm	2131,7	136,080	0,664	99,99%	0,9639	1026				
91,093	1,578	15,598	753685	3600	1200	10,88	1,500	0,55	1,00 mm	1444,9	110,685	0,540	97,60%	0,8230	1200				
66,926	1,159	11,460	646016	3600	1200	9,32	1,750	0,47	1,00 mm	1041,7	93,098	0,454	95,77%	0,7189	1200				
51,240	0,888	8,774	565264	3600	1200	8,16	2,000	0,42	1,00 mm	797,3	81,439	0,397	95,74%	0,6292	1200				
40,486	0,701	6,933	502457	3600	1200	7,25	2,250	0,37	1,00 mm	620,8	71,330	0,348	94,34%	0,5676	1200				
32,794	0,568	5,615	452211	3600	1200	6,53	2,500	0,33	1,00 mm	503,5	64,278	0,314	94,46%	0,5102	1200				
27,102	0,469	4,641	411101	3600	1200	5,93	2,750	0,30	1,00 mm	415,2	58,304	0,284	94,25%	0,4648	1200				
22,773	0,394	3,900	376843	3600	1200	5,44	3,000	0,28	1,00 mm	349,1	53,483	0,261	94,32%	0,4258	1200				

										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit externer Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit externer Kraft					
V3																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 5,84										α = 3									
										nach EC3-1-6									
τ _{cr}										χ _w mit η=1,0									
α _{cr,τ}										benötigte Verformung									
σ _e										ext. Kraft+ext. Pkt gekoppelt									
N [N]										F [kN] ANSYS									
a [mm]										σ [N/mm ²]									
b [mm]										χ _w nach ANSYS									
t [mm]										Abweichung									
λ _w										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
0										Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.									
1,00																			
320,249	5,547	54,837	1413160	3600	1200	20,40	0,800	1,00	1,00 mm	227,4	9,292	0,045	4,53%	34,4661	1200				
204,960	3,550	35,096	1130528	3600	1200	16,32	1,000	0,83	1,00 mm	153,3	7,828	0,038	4,60%	26,1816	1200				
131,174	2,272	22,461	904423	3600	1200	13,05	1,250	0,66	1,00 mm	178,5	11,394	0,056	8,37%	11,5131	1200				
91,093	1,578	15,598	753685	3600	1200	10,88	1,500	0,55	1,00 mm	169,8	13,008	0,063	11,47%	7,0028	1200				
66,926	1,159	11,460	646016	3600	1200	9,32	1,750	0,47	1,00 mm	87,4	7,810	0,038	8,03%	8,5692	1200				
51,240	0,888	8,774	565264	3600	1200	8,16	2,000	0,42	1,00 mm	116,9	11,939	0,058	14,04%	4,2918	1200				
40,486	0,701	6,933	502457	3600	1200	7,25	2,250	0,37	1,00 mm	83,0	9,538	0,047	12,62%	4,2447	1200				
32,794	0,568	5,615	452211	3600	1200	6,53	2,500	0,33	1,00 mm	65,0	8,294	0,040	12,19%	3,9537	1200				
27,102	0,469	4,641	411101	3600	1200	5,93	2,750	0,30	1,00 mm	55,6	7,813	0,038	12,63%	3,4689	1200				
22,773	0,394	3,900	376843	3600	1200	5,44	3,000	0,28	1,00 mm	51,0	7,819	0,038	13,79%	2,9125	1200				

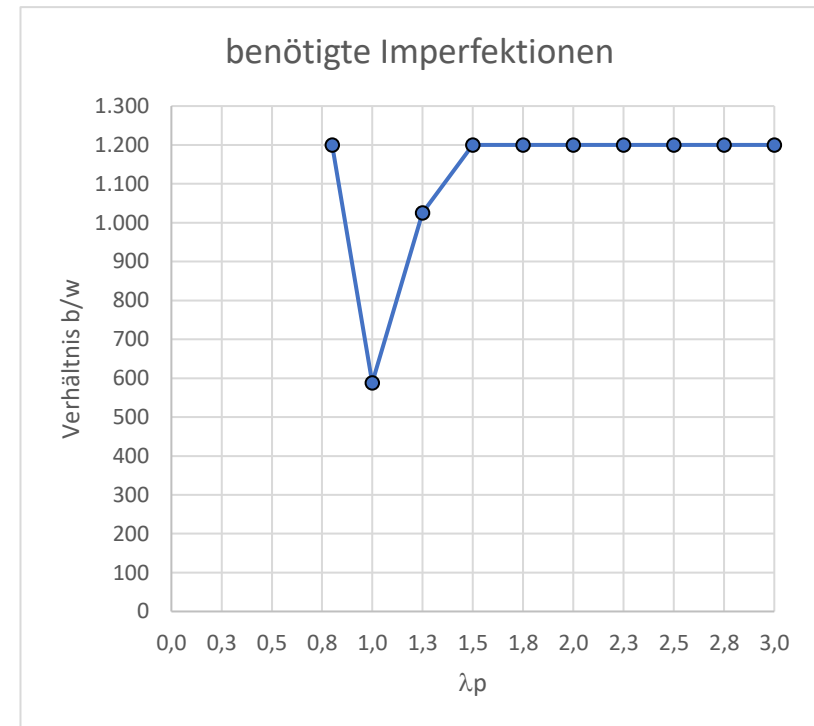
										Querränder mit externe Punkte in b-Richtung (z-Ri) gekoppelt				-> Belastung mit Kraft					
										Längstränder mit externe Punkte verformbar				-> Belastung mit Kraft					
V4																			
Angepasste Ersatzimpf. EC3-1-5 Anhang C an die Winter-Kurve																			
S 355										e ₀ = Angepasst durch Regression									
τ 57,74																			
k _τ 5,84										α = 3									
										nach EC3-1-6									
τ _{cr}										χ _w mit η=1,0									
α _{cr,τ}										benötigte Verformung									
σ _e										ext. Kraft+ext. Pkt gekoppelt									
N [N]										F [kN] ANSYS									
a [mm]										σ [N/mm ²]									
b [mm]										χ _w nach ANSYS									
t [mm]										Abweichung									
λ _w										α _{cr} =σ _{cr} /σ									
0										Verhältnisfaktor zu original Ersatzimpf.									
1,00																			
320,249	5,547	54,837	1413160	3600	1200	20,40	0,800	1,00	1,00 mm	4906,2	200,444	0,978	97,80%	1,5977	1200				
204,960	3,550	35,096	1130528	3600	1200	16,32	1,000	0,83	2,05 mm	3329,3	170,024	0,830	99,95%	1,2055	585				
131,174	2,272	22,461	904423	3600	1200	13,05	1,250	0,66	1,24 mm	2131,7	136,080	0,664	99,99%	0,9639	968				
91,093	1,578	15,598	753685	3600	1200	10,88	1,500	0,55	1,00 mm	1428,8	109,451	0,534	96,51%	0,8323	1200				
66,926	1,159	11,460	646016	3600	1200	9,32	1,750	0,47	1,00 mm	1006,7	89,970	0,439	92,55%	0,7439	1200				
51,240	0,888	8,774	565264	3600	1200	8,16	2,000	0,42	1,00 mm	757,8	77,400	0,378	91,00%	0,6620	1200				
40,486	0,701	6,933	502457	3600	1200	7,25	2,250	0,37	1,00 mm	591,5	67,965	0,332	89,89%	0,5957	1200				
32,794	0,568	5,615	452211	3600	1200	6,53	2,500	0,33	1,00 mm	474,2	60,546	0,295	88,98%	0,5416	1200				
27,102	0,469	4,641	411101	3600	1200	5,93	2,750	0,30	1,00 mm	388,7	54,585	0,266	88,24%	0,4965	1200				
22,773	0,394	3,900	376843	3600	1200	5,44	3,000	0,28	1,00 mm	329,5	50,474	0,246	89,01%	0,4512	1200				

Die Diagramme mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 3,00$

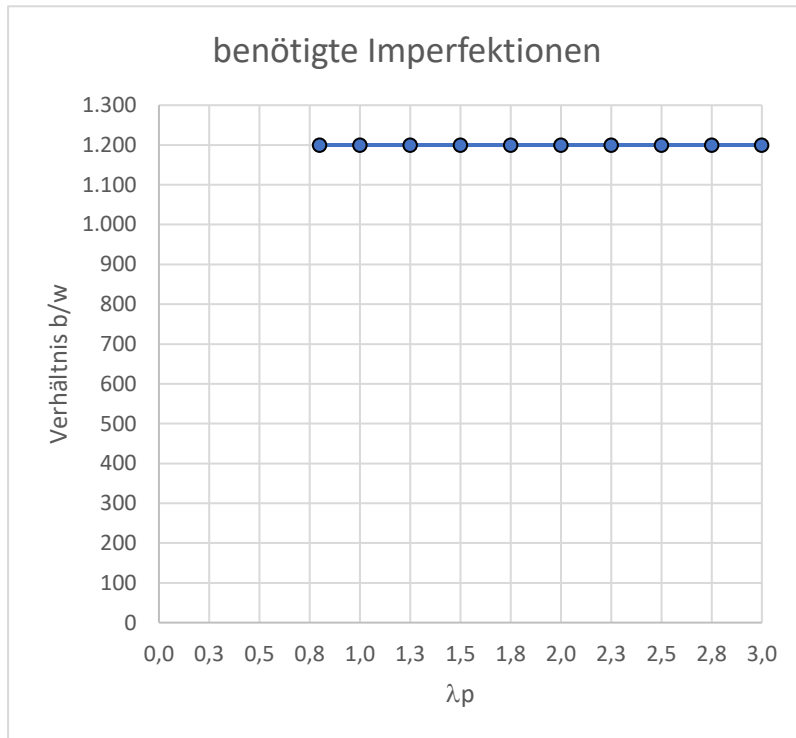
V 1



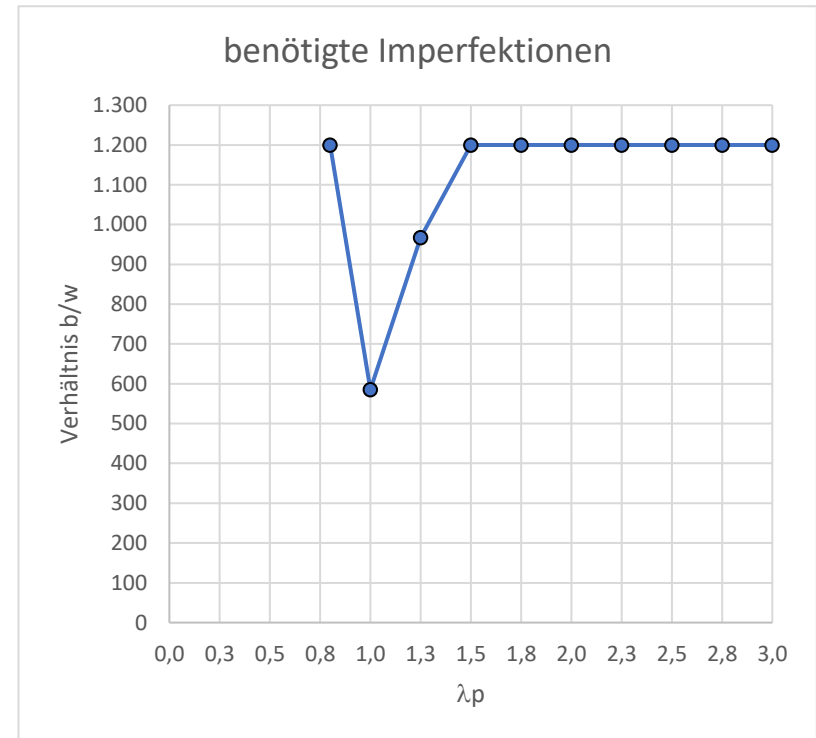
V 2



V 3



V 4



Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und an allen Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, mich auch keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Des Weiteren hat die Arbeit in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Dinslaken, den 29.08.2022

Unterschrift 
