



Stefan Weirer, BSc
Simon Hilgartner, BSc

**Mittelgroßer Modellversuch
für integrale Brückenwiderlager**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Technische Universität Graz

Graz, Juni 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Wir erklären an Eides statt, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht haben. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

We declare that we have authored this thesis independently, that we have not used other than the declared sources/resources, and that we have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master`s thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir allen Personen danken, die uns während unserer Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanken wir uns bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte und Herrn Dipl.-Ing. Michael Havinga.

Besonderer Dank gebührt unseren Familien und Freunden, die uns die gesamte Ausbildungszeit unterstützten.

Abstract

The aim of the present work was to simulate the earth pressure development in abutments of integral bridges in a laboratory model experiment and to compare them with the theoretical approaches from the literature. For this purpose, a test facility was constructed and several experiments under different conditions were made. To understand the circumstances of an integral bridge abutment, the test material was exposed to a cyclic load. The deformation behavior and the horizontally occurring forces were measured. The results were interpreted in the different chapters of this thesis. The results show that Vogt's theory gives the best approximation to the test results from the model experiment.

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Erddruckentwicklung bei Widerlagern von integralen Brücken in einem Labor-Modell-Versuch zu simulieren und mit den theoretischen Ansätzen aus der Literatur zu vergleichen. Dazu wurde eine Versuchseinrichtung konstruiert und mehrere Versuche unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Damit die Verhältnisse bei einem Widerlager einer integralen Brücke erfasst werden konnte, wurde das Versuchsmaterial einer zyklischen Belastung ausgesetzt. Das Verformungsverhalten und die horizontal auftretenden Kräfte wurden gemessen. Die Resultate wurden in den verschiedenen Kapiteln dieser Arbeit interpretiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Theorie nach Vogt die beste Näherung an die Messergebnisse aus dem Modellversuch ergibt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	1
1.2	Allgemeines	2
1.3	Beispiele integraler Brücken.....	3
1.3.1	Steinbachbrücke.....	3
1.3.2	Brücke über den Liebochbach.....	6
2	Theorie	9
2.1	Erddruck allgemein	9
2.1.1	Definition	9
2.2	Erdruchdruck	11
2.3	Betrachtung des Erddruckes im Mohr`schen Spannungskreis.....	12
2.4	Aktiver Erddruck.....	14
2.4.1	Aktiver Erddruck nach RANKINE (1856)	15
2.4.2	Aktiver Erddruck nach COULOMB (1776)	15
2.5	Passiver Erddruck	16
2.5.1	Passiver Erddruck nach RANKINE	17
2.5.2	Passiver Erddruck nach COULOMB.....	18
2.6	Ansatz von Vogt.....	19
2.7	Ansatz nach Besler	20
2.8	Ansatz nach Bartl	21
2.9	Vergleich verschiedener Ansätze	22
2.10	Deutschsprachige Normen	25
2.10.1	ASTRA 12004	25
2.10.2	RVS 15.02.12.....	25
2.10.3	ÖNORM B4434	25
2.10.4	Din 408526	
3	Versuchseinrichtung	27
3.1	Versuchsbehälter	27
3.2	Messeinrichtungen	29
4	Versuchsmaterial	37

5	Versuchsdurchführung	42
5.1	Befüllung	42
5.2	Verdichtung	43
5.3	Oberfläche ebnen.....	45
5.4	Oberflächenmessung	45
5.5	Ausbau.....	45
5.6	Variationsbeschreibung.....	46
5.6.1	Durchgeführte Variationen.....	47
6	Ergebnisse	49
6.1	Ergebnisse des Verformungsverhaltens	49
6.1.1	Versuch 1	50
6.1.2	Versuch 2	50
6.1.3	Versuch 3	51
6.1.4	Versuch 4	52
6.1.5	Versuch 5	53
6.1.6	Versuch 6	54
6.1.7	Versuch 7	55
6.1.8	Versuch 8	55
6.1.9	Versuch 9	56
6.1.10	Versuch 10	56
6.1.11	Versuch 11	57
6.1.12	Versuch 12	58
6.1.13	Versuch 13	59
6.2	Ergebnisse der Kräfteverläufe	59
6.2.1	Kräfteverläufe Versuch 1	60
6.2.2	Kräfteverläufe Versuch 7	67
6.3	Vergleich Kräfte zyklusweise.....	74
6.3.1	Vergleich der Rotationsversuche im oberen Auflager	75
6.3.2	Vergleich der Rotationsversuche im unteren Auflager	79
6.3.3	Vergleich der Versuche Translation und Rotation im oberen Auflager.....	83
6.3.4	Vergleich der Versuche Translation und Rotation im unteren Auflager.....	87
6.4	Änderung der Dichte	92
7	Erkenntnisse	93
7.1	Erkenntnisse Verformungsverhalten.....	93
7.2	Erkenntnisse Kräfteverläufe	94
7.3	Vergleich der Messungen mit theoretischen Ansätzen	97

8 Zusammenfassung und Ausblick	105
8.1 Zusammenfassung.....	105
8.2 Ausblick.....	105
Literatur	106
Anhang	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Brückenwiderlagers in Sommer- und Winterstellung (Szczyrba, 2013)	3
Abbildung 2: Orthofoto Steinbachbrücke.....	4
Abbildung 3: Steinbachbrücke; rechts integrale links konventionelle Ausführung.....	5
Abbildung 4: Steinbachbrücke mit Durchfahrt und Steinbach.....	5
Abbildung 5: Orthofoto Brücke über den Liebochbach	6
Abbildung 6: Brücke über Liebochbach vor Sanierung, (Moser, 2017).....	7
Abbildung 7: Detailansicht Gerbergelenk der Brücke über den Liebochbach vor Sanierung, (Moser, 2017)	7
Abbildung 8: Brücke über den Liebochbach nach Sanierung, (Moser, 2017)	8
Abbildung 9: Verhalten von Feststoff und Boden	9
Abbildung 10: Darstellung Erddruck E und Angriffswinkel δ	10
Abbildung 11: Erdruhedruck und aktiver Erddruck im Mohr'schen Diagramm. Oben ohne Kohäsion, unten mit Kohäsion	13
Abbildung 12: Erddruck in Abhängigkeit der Verschiebung und der Lagerung	13
Abbildung 13: Links Flächenbruch, rechts Linienbruch	14
Abbildung 14: Winkeldefinition des aktiven Erddruckes	15
Abbildung 15: Erddruck nach COULOMB	16
Abbildung 16: Aktiver, passiver und Erdruhedruck im Mohr'schen Spannungskreis	17
Abbildung 17: Winkeldefinition des passiven Erddrucks.....	17
Abbildung 18: Passiver Erddruck bei geradliniger Bruchfläche	18
Abbildung 19: Vergleich verschiedener Ansätze für den mobilisierten Erddruckbeiwert ...	22
Abbildung 20: Erddruckansatz nach (BA 42/96, 2003).....	23
Abbildung 21: Beispiel zur Verteilung des normierten Erddrucks nach Vogt und BA 42/96 (UK)	24
Abbildung 22: Versuchsanlage mittelgroßer Modellversuch (Klement Walter GmbH, 2015)	27

Abbildung 23: Statisches System mittelgroßer Modellversuch	28
Abbildung 24: Vertikales Auflager der Modellwiderlagerwand, a) 3D-Grafik (Klement Walter GmbH, 2015), b) real	29
Abbildung 25: 3D-Modell der Widerlagerwand (Klement Walter GmbH, 2015).....	30
Abbildung 26: Messebenen der Modellwiderlagerwand	31
Abbildung 27: Bedienfeld der Motorensteuerung	32
Abbildung 28: Messraster der Oberflächenmessung.....	33
Abbildung 29: Lasermesssystem	34
Abbildung 30: Versuchsverlauf	35
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bewegungsschemata	36
Abbildung 32: Kornverteilungslinie.....	37
Abbildung 33: Ergebnisse der Lagerung des Versuchsmaterials (1/2)	38
Abbildung 34: Ergebnisse der Lagerung des Versuchsmaterials (2/2)	39
Abbildung 35: Ergebnis direkter Scherversuch.....	40
Abbildung 36: Versuchsmaterial	41
Abbildung 37: Befüllung mit Big Bag	43
Abbildung 38: Rüttelplatte	44
Abbildung 39: Rüttelplatte beim Verdichten der ersten Lage.....	44
Abbildung 40: Abziehhilfe	45
Abbildung 41: Ausbau des Materials.....	46
Abbildung 42: 3D - Setzungsmulde.....	49
Abbildung 43: Gemittelte Setzungslinien Versuch 1	50
Abbildung 44: Gemittelte Setzungslinien Versuch 2.....	51
Abbildung 45: Gemittelte Setzungslinien Versuch 3.....	52
Abbildung 46: Gemittelte Setzungslinien Versuch 4.....	53
Abbildung 47: Gemittelte Setzungslinien Versuch 5.....	54
Abbildung 48: Gemittelte Setzungslinien Versuch 6.....	54
Abbildung 49: Gemittelte Setzungslinien Versuch 7.....	55

Abbildung 50: Gemittelte Setzungslinien Versuch 8	56
Abbildung 51: Gemittelte Setzungslinien Versuch 9	57
Abbildung 52: Gemittelte Setzungslinien Versuch 11	57
Abbildung 53: Gemittelte Setzungslinien Versuch 12	58
Abbildung 54: Gemittelte Setzungslinien Versuch 13	59
Abbildung 55: Kräfteverlauf Auflager oben Versuch 1	61
Abbildung 56: Kräfteverlauf Auflager unten Versuch 1	62
Abbildung 57: Kräfteverlauf Wandachse oben Versuch 1	63
Abbildung 58: Kräfteverlauf Wandachse Mitte Versuch 1	64
Abbildung 59: Kräfteverlauf Wandachse unten Versuch 1	65
Abbildung 60: Kräfteverlauf Rückwand oben Versuch 1	66
Abbildung 61: Kräfteverlauf Rückwand unten Versuch 1	67
Abbildung 62: Kräfteverlauf Auflager oben Versuch 7	68
Abbildung 63: Kräfteverlauf Auflager unten Versuch 7	69
Abbildung 64: Kräfteverlauf Wandachse 1 Versuch 7	70
Abbildung 65: Kräfteverlauf Wandachse 2 Versuch 7	71
Abbildung 66: Kräfteverlauf Wandachse 3 Versuch 7	72
Abbildung 67: Kräfteverlauf Rückwand oben Versuch 7	73
Abbildung 68: Kräfteverlauf Rückwand unten Versuch 7	74
Abbildung 69: Ablesepunkte Kräfteverlauf	75
Abbildung 70: Vergleich Rotationsversuche Minimalkräfteaktiv zyklusweise Auflager oben	76
Abbildung 71: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang passiv Auflager oben	77
Abbildung 72: Vergleich Rotationsversuche Maximalkräfte passiv zyklusweise Auflager oben	78
Abbildung 73: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang aktiv Auflager oben	79
Abbildung 74: Vergleich Rotationsversuche Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager unten	80
Abbildung 75: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager unten	

.....	81
Abbildung 76: Vergleich Rotationsversuche Maximalkräfte passiv zyklusweise Auflager unten	82
Abbildung 77: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang aktiv zyklusweise Auflager unten	83
Abbildung 78: Vergleich Versuche Translation und Rotation Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager oben	84
Abbildung 79: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager oben.....	85
Abbildung 80: Vergleich Versuche Translation und Rotation Maximalwerte passiv zyklusweise Auflager oben.....	86
Abbildung 81: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang aktiv zyklusweise Auflager oben	87
Abbildung 82: Vergleich Versuche Translation und Rotation Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager unten	88
Abbildung 83: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager unten.....	89
Abbildung 84: Vergleich Versuche Translation und Rotation Maximalwerte passiv zyklusweise Auflager unten.....	90
Abbildung 85: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang aktiv zyklusweise Auflager unten	91
Abbildung 86: Vergleich Setzungslinien Versuch 2, 4, 7 und 8 nach 20 Zyklen.....	93
Abbildung 87: Vergleich Versuche 1 bis 13 horizontale Auflagerkraft Gesamt	95
Abbildung 88: Rotationsversuche Wandachsen Vergleich nach 20 Zyklen	96
Abbildung 89: Kombinierte Versuche Wandachsen Vergleich.....	97
Abbildung 90: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Rotation.....	98
Abbildung 91: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Rotation und Parallelverschiebung.....	99
Abbildung 92: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Parallelverschiebung	100
Abbildung 93: Vergleich analytische Ansätze mit gesamter horizontaler Auflagerkraft ...	101

Abbildung 94: Vergleich analytische Ansätze mit gesamter horizontaler Auflagerkraft ohne passiven Erddruck nach Coulomb.....	101
Abbildung 95: Auflagerkraft horizontal zyklusweise Versuch 12.....	102
Abbildung 96: Extrapolation Gesamt-Auflagerkraft Versuch 12 logarithmische Darstellung	102
Abbildung 97: Auflagerkraft horizontal zyklusweise Versuch 13.....	103
Abbildung 98: Extrapolation Gesamt-Auflagerkraft Versuch 13 logarithmische Darstellung	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiebungsgrößen u_B für den Bruchzustand in Prozent der Wandhöhe h entnommen aus (ÖNORM B 4434: 1993 01 01)	26
Tabelle 2: Übersicht der Versuche	47
Tabelle 3: Änderung der Lagerungsdichte	92

Symbole

δ	.....	Angriffswinkel oder Erddruckneigungswinkel
E	.....	Erddruck
E_a	.....	aktiver Erddruck
E_p	.....	passiver Erddruck
E_{ph}	.....	horizontaler passiver Erddruck
E_0	.....	Erdruhedruck
$E_{a, erh}$	.....	erhöhter aktiver Erddruck
$E_{p, mob}$	.....	mobilisierter passiver Erddruck
φ	.....	Reibungswinkel
φ_{mob}	.....	mobilisierter Reibungswinkel
σ_v	.....	Eigengewichtsspannung
γ	.....	Wichte
σ_1	.....	Hauptnormalspannung
σ_3	.....	Hauptnormalspannung
σ_{xx}	.....	Normalspannung in x Ebene
σ_{yy}	.....	Normalspannung in y Ebene
σ_{zz}	.....	Normalspannung in z Ebene
z	.....	Tiefe
K_0	.....	Erdruhedruckbeiwert
K_a	.....	Erddruckbeiwert für aktiven Erddruck
K_p	.....	Erddruckbeiwert für passiven Erddruck
K_{ah}	.....	horizontaler aktiver Erddruckbeiwert
$K_{ph, mob}$	.....	mobilisierter horizontaler Erddruckbeiwert
K_{ph}	.....	Beiwert für passiven horizontalen Erddruck
ν	.....	Querdehnzahl
β	.....	Geländeneigung
α	.....	Wandneigung
δ_a	.....	Wandreibungswinkel für aktiven Erddruck
δ_p	.....	Wandreibungswinkel für passiven Erddruck
ϑ	.....	Gleitflächenwinkel
ϑ_a	.....	Gleitflächenwinkel für den aktiven Erddruck
ϑ_p	.....	Gleitflächenwinkel für den passiven Erddruck
G	.....	Gewichtskraft
Q	.....	Reaktionskraft

ξ	.....	vorhandene auf die Bruchverschiebung bezogene Wandverschiebung
ξ_G	.....	bei halbem Grenzerdverstand auf die Bruchverschiebung bezogene Wandverschiebung
χ_R	.....	Mobilisierungsgrad
λ_R	.....	Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung
s	.....	horizontale Verschiebung an der Wandoberkante
s_p	.....	horizontale Verschiebung an der Wandoberkante im Bruchzustand
s_h	.....	horizontale Verschiebung an der Wandoberkante
h	.....	Wandhöhe
e_{0gh}	.....	Horizontale
e_{pgh}	.....	voll passiver Erddruck
e'_{ph}	.....	mobilisierter horizontaler Erddruck über die gesamte Wandhöhe
e_{0h}	.....	horizontaler Erdruhedruck über die gesamte Wandhöhe
e_{ph}	.....	passiver horizontaler Erddruck über die gesamte Wandhöhe
u	.....	tatsächliche Wandverschiebung
u_B	.....	Verschiebung zur Erzeugung von e_{ph}

1 Einleitung

Aufgrund des aufwendigen Versuchsprogrammes wurde diese Masterarbeit von zwei Personen verfasst und als eine Arbeit eingereicht. Die Versuche im Labor wurden gemeinsam durchgeführt. Die Auswertung der Versuche beschränkte sich bei Simon Hilgarter auf die Versuche 1, 2, 3, 4, 11 und 12 und bei Stefan Weirer auf die Versuche 5, 6, 7, 8, 9 und 13.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit besteht darin, in einem 1g-Modellversuch ein Widerlager einer integralen Brücke zu simulieren. Zu diesem Zweck wurde am Institut für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz eine Versuchseinrichtung gebaut und mit einem granularen Schüttmedium befüllt. Diese Einrichtung wurde in einem mittelgroßen Maßstab ($L = 3,00 \text{ m}$, $B = 1,01 \text{ m}$, $H = 1,50 \text{ m}$) ausgeführt. Die Versuchsergebnisse sollen besseres Verständnis für die Erddruckentwicklung hinter der Widerlagerwand geben und die Übertragbarkeit auf tatsächliche Gegebenheiten aufzeigen. Durch eine zyklische Rotations- und eine Translationsbewegung sollte die Entwicklung des Erddruckes aufgezeigt werden. Des Weiteren sollen die gewonnenen Erkenntnisse mit bestehenden Ansätzen aus der Literatur verglichen werden.

Die Problematik ist, dass bei 1g-Modellversuchen Modellfehler auftreten. Diese Fehler sind auf das geringe Spannungsniveau und die nicht maßstabsgetreue Abbildung der Korngröße des Bodens zurückzuführen. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse nicht direkt in die Realität übertragbar. Dennoch liefern kleinmaßstäbliche bodenmechanische Modellversuche wertvolle Erkenntnisse, die erdstatische Zusammenhänge erklären. (Walz, 2006)

Im gegenständlichen Modellversuch wird ein Brückenwiderlager geometrisch verkleinert und vereinfacht hergestellt. Für die Versuche werden Kräfte und Verformungen aufgeprägt und die Interaktion zwischen einer Widerlagerwand und dem Boden erfasst. Durch Messeinrichtungen können die gewünschten Kräfte und Setzungen aufgezeichnet werden.

1.2 Allgemeines

Unter dem Begriff einer „integralen Brücke“ versteht man eine Brückenbauweise, die eine direkte, monolithische Verbindung der einzelnen Bauteile (Überbau, Unterbauten und Widerlager) mit sich bringt. Durch die lager- und fugenlose Bauweise können Unterbauten viel schneller und filigraner ausgeführt werden. Dadurch ergeben sich mehrere Vorteile gegenüber einer konventionellen Brückenbauweise, die in den letzten Jahrzehnten vorrangig zur Anwendung kam. Mit dieser Ausführungsart wurden die Temperaturdehnungen durch die verschieblich gelagerte Konstruktion nicht behindert. In Großbritannien und den USA werden seit den 80er Jahren vermehrt integrale Brücken ausgeführt und zur Regelbauweise bei Spannweiten bis zu 60 m erhoben. (Lock, 2002)

Die Vorteile der integralen Brückenbauweise sind:

- Entfall von Verschleißbauten (Übergangskonstruktionen und Lager)
- Höherer Fahrkomfort und Reduzierung der Lärmentwicklung (innerstädtischer Bereich)
- Geringere Instandhaltungskosten (kein Taumittelzutritt)
- Geringere Bauteilabmessungen
- Kompensation abhebender Kräfte (Stützweiten beliebig wählbar)

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Höhere Anforderungen an das geotechnische Entwurfsprogramm
- Erfassung der relevanten Parameter
- Aufwendigere Berechnung (Interaktion Bauwerk-Boden)

Durch den Entfall der Lager und Dehnungsfugen müssen Kräfte, die durch die Jahreszeiten bedingte Ausdehnung und Kontraktion der Bauteile entstehen, über die Widerlager abgeleitet werden.

Daraus ergeben sich zwei wichtige Faktoren, auf die besonders geachtet werden muss.

1. Die saisonalen und täglichen Zyklen der Verformung, infolge der Temperaturänderung, können zu einem erhöhten Erddruck hinter der Widerlagerwand führen. Dabei ergeben sich horizontale Erddruckkräfte auf die Widerlager, die bei konventionellen Brücken nicht auftreten und besonders beachtet werden müssen. Diese erhöhten Kräfte stellen ein potenzielles Problem bei der Langzeitbetrachtung von integralen Brücken dar.
2. Die Verformungen des Bodens hinter dem Widerlager. Durch die zyklischen Bewegungen sind Setzungen hinter der Widerlagerwand zu erwarten.

Darstellung der Verformung des Widerlagers:

Die vereinfachte Darstellung des Brückenwiderlagers bei integralen Brücken zeigt Abbildung 1. Dargestellt wird in dieser Grafik die Winterstellung in Blau und die Sommerstellung in Rot durch die Dehnung des Brückenoberbaues in den Sommermonaten. Hierbei ist die Verschiebung des Widerlagers aufgrund des Entfalls der Lager und Fugen ersichtlich.

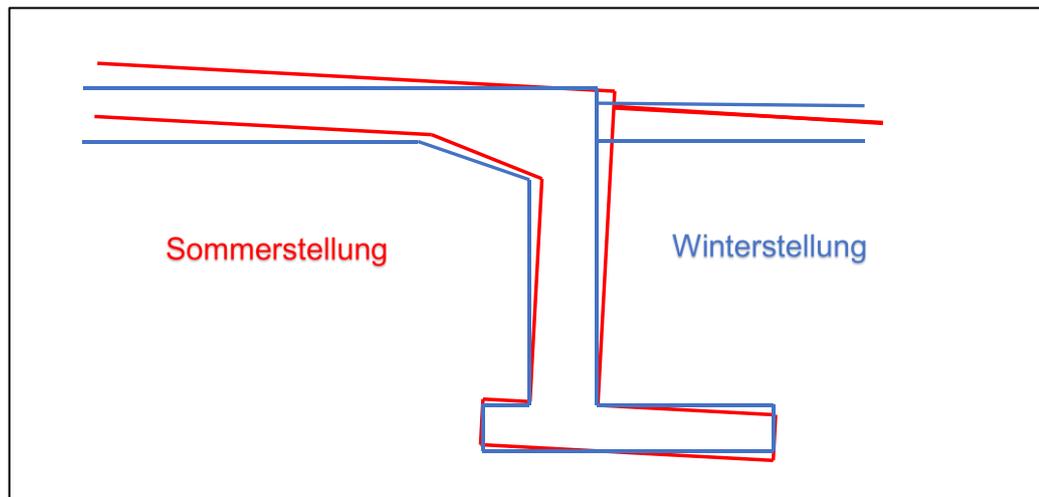


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Brückenwiderlagers in Sommer- und Winterstellung (Szczyrba, 2013)

1.3 Beispiele integraler Brücken

In diesem Kapitel werden beispielhaft zwei integrale Brücken vorgestellt. Bei zwei dieser Brücken handelte es sich um konventionelle Brücken, die auf eine Rahmenbrücke (integrale Brücke) umgebaut wurden. Als Beispiele sind hier die Steinbachbrücke bei Müzzzuschlag Ost auf der Schnellstraße S6 und die Autobahnbrücke über den Liebochbach bei Mooskirchen auf der A2 angegeben.

1.3.1 Steinbachbrücke

Die Steinbachbrücke befindet sich auf der S6 km 37,9 bis 38. Abbildung 2 zeigt diese Brücke (durch den roten Kreis markiert). Rechts im Bildausschnitt befindet sich die Schnellstraßenauffahrt Müzzzuschlag Ost. Unter der Brücke verlaufen der Steinbach (Namensgeber der Brücke) sowie eine Gemeindestraße.



Abbildung 2: Orthofoto Steinbachbrücke

[http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(juxlzquznm1vdagdpwacace\)\)/init.aspx?Karte=basis_gdi&cms=da](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(juxlzquznm1vdagdpwacace))/init.aspx?Karte=basis_gdi&cms=da) Stand: 01.06.2017 17:03

Im Zuge der Sanierungsarbeiten 2013 wurde die Brücke in Fahrtrichtung Bruck an der Mauer in eine Rahmenbrücke umgebaut. Die Brücke in Fahrtrichtung Wien wurde hingegen als konventionelle Brücke beibehalten. Sehr schön zeigt Abbildung 3 die beiden unterschiedlichen Bauweisen. Links im Bild kann man die Lager und Fugen deutlich erkennen, hingegen ist der rechte Brückenteil starr mit den Widerlagern verbunden.



Abbildung 3: Steinbachbrücke; rechts integrale links konventionelle Ausführung



Abbildung 4: Steinbachbrücke mit Durchfahrt und Steinbach

1.3.2 Brücke über den Liebochbach

Die Brücke über den Liebochbach befindet sich auf der A2 Süd Autobahn bei km 195,138. Der genaue Standort ist mit einem roten Kreis in Abbildung 5 eingefangen. Des Weiteren zeigt das Orthofoto den Ast Lieboch im unteren Teil des Bildes.



Abbildung 5: Orthofoto Brücke über den Liebochbach

[http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(ijndpuyvsc4fppugupnqzpqqs\)\)/init.aspx?Karte=basis_gdi&cms=da](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(ijndpuyvsc4fppugupnqzpqqs))/init.aspx?Karte=basis_gdi&cms=da) Stand: 02.06.2017 16:33

Im Zuge der Sanierungsarbeiten wurde auch diese Brücke in eine Rahmenbrücke umgebaut. Das Gerbergelenk, Abbildung 6 und Detailansicht Abbildung 7, wurde entfernt. Das Mittelfeld wurde dabei abgebrochen und durch eine durchgängige Betonkonstruktion ersetzt. Abbildung 8 zeigt die Brücke nach den Sanierungsarbeiten.



Abbildung 6: Brücke über Liebochbach vor Sanierung, (Moser, 2017)



Abbildung 7: Detailansicht Gerbergelenk der Brücke über den Liebochbach vor Sanierung, (Moser, 2017)



Abbildung 8: Brücke über den Liebochbach nach Sanierung, (Moser, 2017)

2 Theorie

In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten Erddruckansätze aufgrund von Verformungen in der Literatur eingegangen und näher erklärt. Speziell sind dies die Ansätze von VOGT, BESLER und BARTL. Zu Beginn wird der Erddruck allgemein behandelt.

2.1 Erddruck allgemein

2.1.1 Definition

Durch das Eigengewicht und mögliche Auflasten auf der Geländeoberfläche entstehen neben den Vertikalspannungen auch Horizontalspannungen senkrecht zur Richtungswirkung der Last. Bei seitlicher Stützung unterscheidet sich ein Boden nicht von einem Feststoff. Die behinderte Querdehnung führt zu einer Seitenkraft und wird im Boden Erdruhedruck genannt. Wird die seitliche Stützung entzogen, verbleibt der Feststoff aufgrund seiner Zugfestigkeit stabil. Im Gegensatz dazu weicht der Boden bei Entfall der seitlichen Stützung aus (aktiver Erddruck), da keine oder nur sehr geringe Zugkräfte vom Boden aufgenommen werden können. Abbildung 9 zeigt links eine Probe mit seitlicher Stützung, in der Mitte einen Feststoff und rechts eine Bodenprobe ohne Stützung.

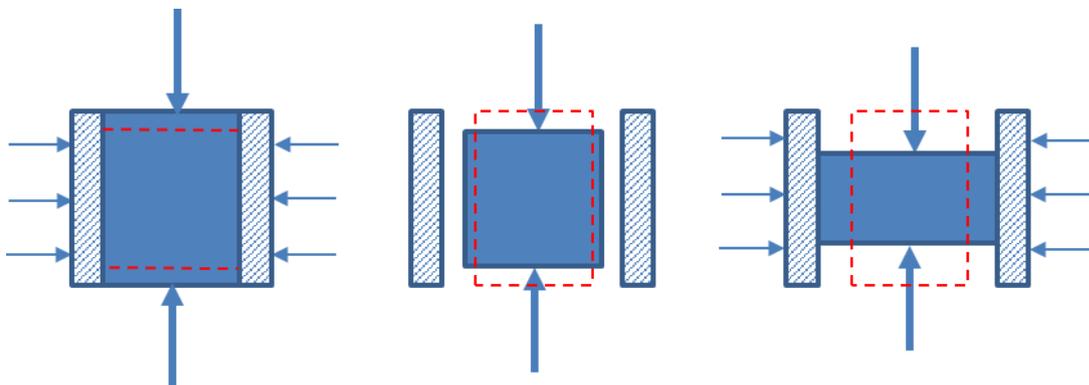


Abbildung 9: Verhalten von Feststoff und Boden

Vergleicht man eine Bodenprobe mit einer Flüssigkeit, üben beide Druck auf die seitliche Stützung aus. Flüssigkeiten können jedoch keine Scherspannungen aufnehmen, was bedeutet, dass die Spannungen in alle Richtungen gleich groß sind (hydrostatischer Spannungszustand).

Die Kraft zwischen einer Wandfläche und dem anstehenden Boden wird Erddruckkraft oder einfach Erddruck (E) genannt. Die Größe des Erddruckes ist davon abhängig, welche Verformungen zwischen dem Boden und der Stützwand aufgetreten sind. Wurde der Boden

gegen die Wand (oder umgekehrt) bewegt, ist der Erddruck größer, als wenn sich der Boden von der Wand wegbewegt hätte.

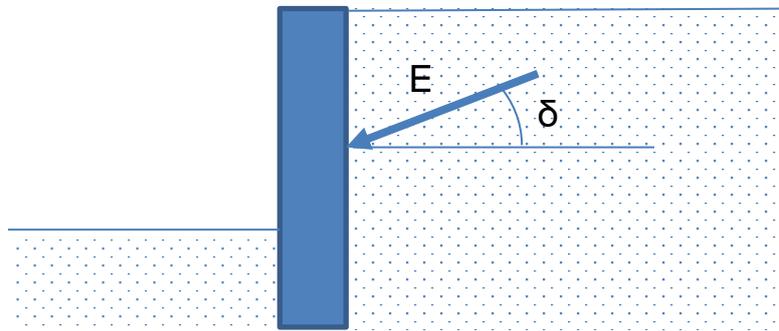


Abbildung 10: Darstellung Erddruck E und Angriffswinkel δ

Der Erddruck (seitlicher Druck) in Böden hängt also von der Scherfestigkeit des Materials und der Relativbewegung zwischen Wand und Erdreich ab. Die Erddruckkraft E ist das Integral der Erddruckspannungen e zwischen Wand und Boden.

Wichtigste Begriffe:

- **aktiver Erddruck E_a** : Minimalkraft des Erddrucks (mit Ausnahme des Silodruckes); Aktionskraft bei nachgebender Stützfläche. Durch die Bewegung der Wand weg vom Boden entspannt sich dieser.
- **passiver Erddruck E_p** : Maximalkraft des Erddrucks bei Bewegung der Wand zum Boden. Reaktionskraft durch Zusammendrücken des Bodens. Wird auch als Erdwiderstand bezeichnet.
- **Erdruhedruck E_0** : Erddruckkraft eines ungestörten Bodens.

Weitere Begriffe:

- **erhöhter aktiver Erddruck $E_{a, erh}$** : Erddruck zwischen aktivem Erddruck und dem Erdruhedruck bei unvollständiger Entspannung des Bodens.
- **mobilisierter passiver Erddruck $E_{p, mob}$** : Erddruck zwischen dem Erdruhedruck und dem passiven Erddruck bei begrenzter Verformung einer Wand gegen den Boden.
- **Verdichtungserddruck**: wird der Boden hinter einer Wand zusätzlich verdichtet, verspannt sich dieser zwischen der Wand und dem anstehenden Boden. Der Erddruck kann in diesem Fall oberhalb des Erdruhedrucks liegen.
- **Siloerddruck**: durch die beengten Verhältnisse in einem Silo beeinflussen Wandreibungskräfte die Abtragung vertikaler Kräfte, was zu reduzierten Erddruckkräften führt.

Die verschiedenen Erddrücke wirken nicht senkrecht auf eine Stützfläche, sondern bilden mit der Flächennormalen einen Erddruckneigungswinkel δ . Abbildung 10 zeigt diesen Zusammenhang. Bei optimaler Verzahnung des Bodens mit der Wand kann δ maximal den Reibungswinkel φ des Bodenmaterials annehmen.

2.2 Erdruhedruck

In einem geologisch ungestörten Korngefüge oder einem Boden, der natürlich oder künstlich in dünnen horizontalen Lagen und Oberflächen abgelagert wird, entsteht in vertikaler Richtung die Eigengewichtsspannung σ_v :

$$\sigma_v = \sigma_1 = \gamma * z \quad (2.1)$$

Durch die Annahme, dass die Bruchsicherheit des ungestörten Bodens über die Tiefe z konstant ist, wird diese als Erdruhedruckbeiwert K_0 bezeichnet und wie folgt dargestellt:

$$K_0 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (2.2)$$

Der Erdruhedruckbeiwert gibt somit das Verhältnis der beiden Hauptnormalspannungen σ_3 und σ_1 an oder anders ausgedrückt den Faktor zur Umrechnung der vertikalen zur horizontalen Spannung im Boden. K_0 kann auf zwei Arten berechnet werden:

1. Elastizitätstheorie: Über die Materialbedingung $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^{el} + \varepsilon_{xx}^{pl} = 0$ und der Annahme, dass der Boden durch den Elastizitätsparameter E und die Querdehnzahl ν beschrieben werden kann, gilt:

$$\varepsilon_{xx}^{el} = 0 = \frac{\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{E} \quad (2.3)$$

Und daraus ergibt sich:

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (2.4)$$

Jedoch steht die Querdehnzahl ν zur Ermittlung von K_0 nicht zur Verfügung und somit spielt die Elastizitätstheorie in der Erddrucktheorie eine untergeordnete Rolle.

2. Ansatz von JAKY: Da bei der Sedimentation der Einzelkörner bereits Reibung zwischen den einzelnen Partikeln auftritt und die erforderliche seitliche Stützung reduziert, liegt nahe, dass ein Zusammenhang zwischen dem Reibungswinkel φ und dem Erdruhedruckbeiwert K_0 besteht. Aus Laborversuchen mit einer Dreiaxialzelle, bei denen der Seitendruck $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ parallel mit der Steigerung der Hauptnormalspannung σ_{zz} gesteuert wird, lässt sich der Zusammenhang mit dem

Reibungswinkel feststellen. Die Steuerung muss garantieren, dass keine seitlichen Dehnungen auftreten ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$). Dann lässt sich über das Verhältnis $K_0 = \sigma_x / \sigma_z$ die empirische Beziehung von JAKY zwischen dem Reibungswinkel und dem Erdruchdruck darstellen:

$$K_0 = \left(1 + \frac{2}{3} \sin \varphi\right) * \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.5)$$

$$K_0 \approx 1 - \sin \varphi \quad (2.6)$$

Da sich diese Aussagen auf das Korngerüst beziehen, muss K_0 mit effektiven Spannungen definiert werden.

Im Grundbau wird davon ausgegangen, dass der Erddruck, der auf eine unverschiebliche Wand wirkt, dem Erdruchdruck entspricht. Wird das Material einer hinterfüllten Wand eines praktisch starr gegründeten Bauwerks nicht verdichtet, wird der Erdruchdruck angesetzt. (Adam, 2016)

2.3 Betrachtung des Erddruckes im Mohr'schen Spannungskreis

Betrachtet man ein Bodenteilchen hinter einer Stützwand, so hat die Vertikalspannung den Wert σ_{zz} und im Ruhezustand die dazugehörige Horizontalspannung $\sigma_{xx} = K_0 * \sigma_{zz}$. Bewegt sich die Wand in horizontaler Richtung, erhöht oder verringert sich σ_{xx} . Abbildung 11 zeigt die Verminderung bis zum aktiven Erddruck, der durch den Reibungswinkel und gegebenenfalls die Kohäsion definierte Mohr-Coulomb'sche Grenzgerade begrenzt ist.

Die Spannungskreise, die durch Verformungen diese Grenzgerade erreichen, bilden die Zustände des aktiven und passiven Erddruckes ab. Im Mohr'schen Diagramm wird deutlich, dass alle Zwischenzustände bis zur Bruchgeraden möglich sind.

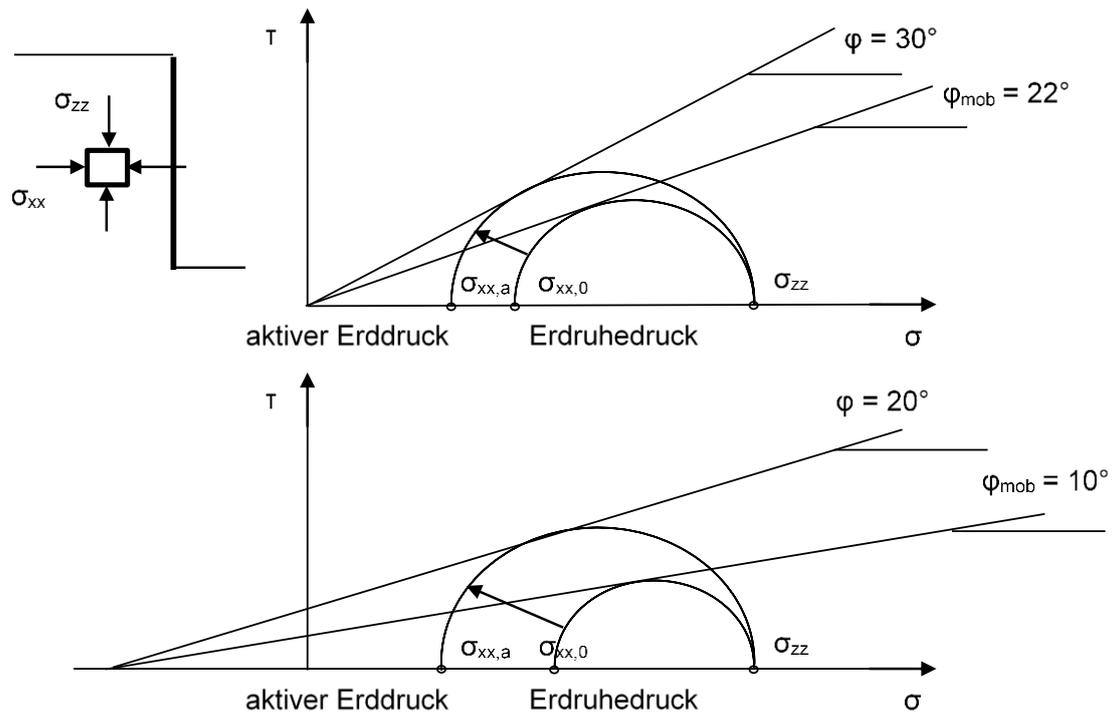


Abbildung 11: Erdruhedruck und aktiver Erddruck im Mohr'schen Diagramm. Oben ohne Kohäsion, unten mit Kohäsion

Der voll mobilisierte passive Erddruck E_p wird nur bei sehr großen Verformungen erreicht. So treten bei einer Bewegung der Wand gegen das Erdreich teilmobilisierte Zustände auf. Hingegen tritt der aktive Erddruck E_a schon bei geringen Verschiebungen auf, wie in Abbildung 12 zu sehen ist. (Adam, 2016)

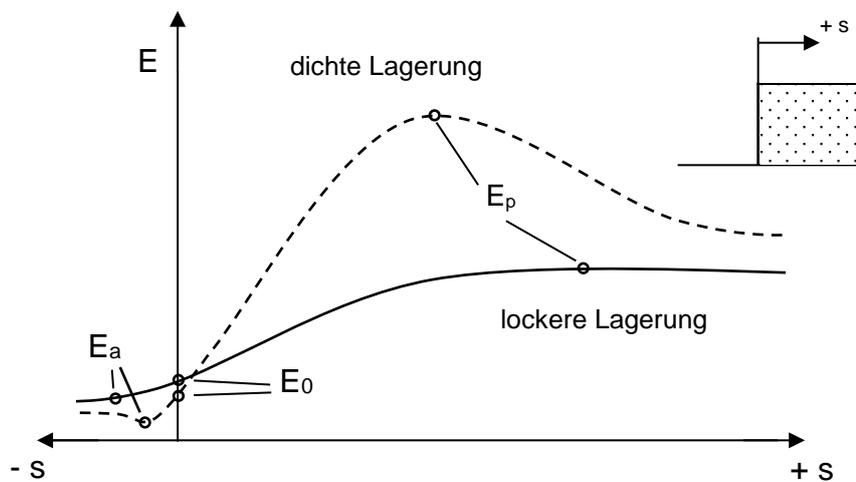


Abbildung 12: Erddruck in Abhängigkeit der Verschiebung und der Lagerung

2.4 Aktiver Erddruck

Bei einer nachgebenden Stützwand lagern sich die Bodenteilchen um und innere Reibung wird mobilisiert. Dabei sinkt der Erddruckbeiwert K ab, denn die erforderliche Stützkraft nimmt ab. Ist die Verformung ausreichend groß, wird der Grenzwert des aktiven Erddruckes E_a erreicht, siehe Abbildung 12. Sollte es in diesem Zustand zu weiterer Verformung der Stützwand kommen, ist mit einem Versagen durch Bruch zu rechnen. Das Versagen kann auf zwei Arten eintreten:

- **Linienbruch:** dabei entwickelt sich im Inneren des Bodens eine Bruchfuge, die sich bis zur Oberfläche erstreckt. Ein monolithischer Bruchkörper gleitet auf dem Restkörper ab. (Erddrucktheorie nach COULOMB)
- **Flächen- oder Zonenbruch:** hierbei entsteht ein vollständig plastifizierter Bruchkörper. (Erddrucktheorie nach RANKINE)

Die möglichen Versagensarten sind analog denen eines Probekörpers in einem Triaxialversuch. Abbildung 13 zeigt links einen Flächenbruch und rechts einen Keilkörper, der abrutscht (Linienbruch). (Adam, 2016)

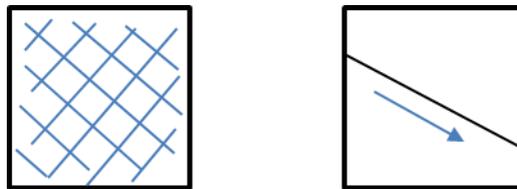


Abbildung 13: Links Flächenbruch, rechts Linienbruch

Winkeldefinition nach (ÖNORM B 4434: 1993 01 01):

Die Winkeldefinition zur Ermittlung des Erddrucks für geneigte Stützflächen und geneigtem Gelände zeigt Abbildung 14.

- **Geländeneigung:** $\beta > 0$ bei steigendem Gelände. Je größer die Neigung desto größer der Erddruckbeiwert
- **Wandneigung:** $\alpha > 0$, wenn sich die Wand zum Boden neigt. Bei größerem α wird der Erddruck kleiner.
- **Wandreibung:** $\delta_a > 0$, wenn die Erddruckkraft den abrutschenden Keil stützt (Keil gleitet an der Wand nach unten).
- **Gleitflächenwinkel:** ϑ_a Gleitflächenwinkel für den aktiven Erddruck

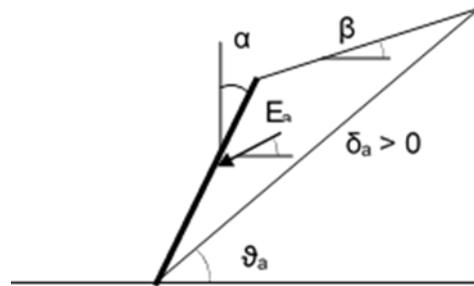


Abbildung 14: Winkeldefinition des aktiven Erddruckes

2.4.1 Aktiver Erddruck nach RANKINE (1856)

Die Erddrucktheorie nach RANKINE besagt, dass der gesamte Bruchkörper hinter einer Wand plastifiziert. In anderen Worten, an jeder Stelle ist die Bruchbedingung des ebenen Verformungszustandes erreicht. Dabei wird der Erddruckbeiwert K_a als Verhältnis der kritischen Hauptspannungen definiert. Vorausgesetzt wird, dass die Geländeneigung, die Neigung der Wand und die Wandreibung null sind ($\alpha = \beta = \delta = 0$). Für Böden ohne Kohäsion ($c = 0$) lautet die Formel daher:

$$K_a = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.7)$$

Die charakteristischen Flächen, bei denen das Verhältnis kritisch wird, haben die Neigung ϑ :

$$\vartheta_{1,2} = 90^\circ \mp \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.8)$$

Diese kritischen Richtungen werden als „Gleitrichtungen“ bezeichnet, können aber durch die Dilatanz zu veränderten Winkeln führen. Die Verteilung der Erddruckspannung ist mit der Tiefe linear zunehmend.

2.4.2 Aktiver Erddruck nach COULOMB (1776)

Zum Unterschied der RANKINE'schen Theorie (Sonderfall des Erddrucks mit homogenem Spannungszustand) erfüllt man die Gleichgewichtsbedingung nicht an jedem Volumenelement, sondern im Mittel über das Gesamtvolumen. Durch die Parallelverschiebung der Wand kann man das Versagen des Bruchkörpers entlang einer Fuge annehmen (siehe Abbildung 15). Durch Variation der Bruchfugeneigung findet sich ein Maximum. Der mit dieser Neigung ermittelte Erddruck ist der physikalisch minimale Erddruck E_a . In einem kohäsionslosen Boden ergibt sich die Bruchfuge unter einem Winkel

$\vartheta_a = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$. Im allgemeinen Fall lässt sich der horizontale aktive Erddruckbeiwert K_{ah} wie folgt berechnen:

$$K_{ah} = \frac{\cos^2(\varphi + \alpha)}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta_a) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta_a) \cdot \cos(\alpha + \beta)}}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (2.9)$$

Betrachtet man auch bei COULOMB den Sonderfall $\alpha = \beta = \delta = 0$ ergibt sich:

$$K_{ah} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.10)$$

und somit der gleiche Erddruckbeiwert wie nach RANKINE, was nicht verwundert, da die Voraussetzungen gleich sind. Bei COULOMB jedoch bremsst die Stützwand den abrutschenden Keil und somit kann auch die Wandreibung miteinbezogen werden. (RANKINE: $\delta = 0$, Keil rutscht reibungsfrei an der Wand ab). (Adam, 2016)

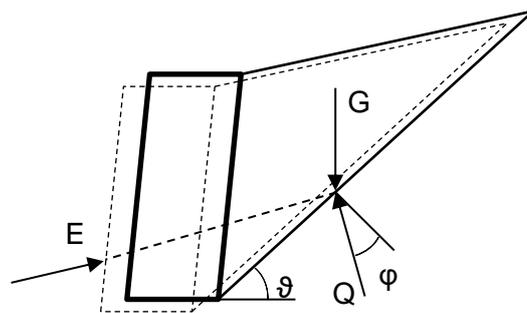


Abbildung 15: Erddruck nach COULOMB

2.5 Passiver Erddruck

Wird eine Stützwand gegen den Boden gedrückt, steigt der Erddruck bis auf ein Maximum - den passiven Erddruck (oder Erdwiderstand) E_p - wie Abbildung 12 zeigt. Die Steigerung vom Erddruck zum passiven Erddruck ist mit erheblichen Kornumlagerungen verbunden, da sich die Richtung der 1. Hauptnormalspannung von vertikaler Richtung in horizontale Richtung dreht. Dies ist im Mohr'schen Spannungskreis in Abbildung 16 deutlich erkennbar. Deswegen ist das Erreichen des passiven Erddruckes mit deutlich größeren Wandverschiebungen verbunden, als die Entspannung auf den aktiven Erddruck. In der Regel müssen Verformungen von bis zu 10% der Wandhöhe auftreten um E_p zu mobilisieren.

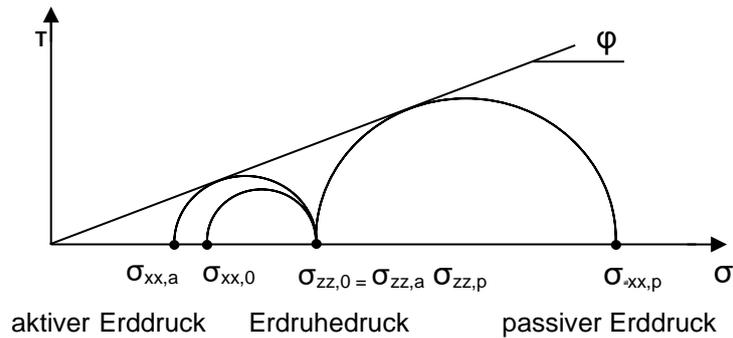


Abbildung 16: Aktiver, passiver und Erdruchdruck im Mohr'schen Spannungskreis

Die Winkeldefinition nach (ÖNORM B 4434: 1993 01 01) ist analog zu denen beim aktiven Erdruchdruck hinsichtlich Geländeneigung β und der Neigung der Stützwand α . Allerdings ist der Wandreibungswinkel δ_p anders definiert und dann positiv, wenn die Wand in den Boden hineingedrückt wird (Bruchkörper am Aufgleiten hindert), siehe Abbildung 17. Es sei darauf hingewiesen, dass sich in der Literatur auch andere Vorzeichendefinitionen finden. (Adam, 2016)

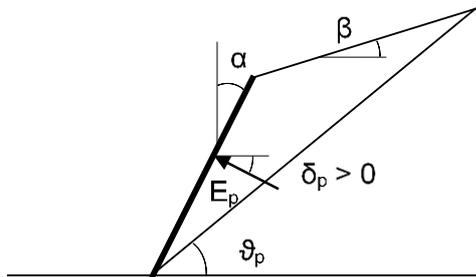


Abbildung 17: Winkeldefinition des passiven Erdruchdrucks

Wie bei dem aktiven Erdruchdruck wird auch beim Erdwiderstand zwischen Flächenbruch und Linienbruch unterschieden, wobei ersterer nur bei speziellen Verschiebungsrandbedingungen auftritt.

2.5.1 Passiver Erdruchdruck nach RANKINE

Wie beim aktiven Flächenbruch beschrieben, ist die RANKINE'sche Theorie ein Sonderfall der allgemeinen Bruchtheorie. Wie in Abbildung 11 gezeigt wird, gibt es für einen gegebenen Spannungszustand zwei Grenzzustände (Kreise berühren die Bruchgerade). Der passive Flächenbruch ist der zum aktiven Flächenbruch korrespondierende Fall und man erhält die Lösung, wenn man in den Gleichungen φ durch $-\varphi$ ersetzt.

2.5.2 Passiver Erddruck nach COULOMB

Wie zuvor liefert auch die Berechnung von COULOMB einen zweiten Extremwert, den passiven Erddruck E_p . In Abbildung 18 zeigt sich die zugehörige Bruchfläche. Ihre horizontale Komponente ist bei unbelasteter Oberfläche:

$$E_{ph} = \frac{1}{2} * K_{ph} * H^2 * \gamma \quad (2.11)$$

und der dazugehörige Erddruckbeiwert

$$K_{ph} = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta_p) * \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\alpha + \delta_p) * \cos(\alpha + \beta)}}\right)^2 * \cos^2 \alpha} \quad (2.12)$$

Die maßgebende Bruchfuge stellt sich bei COULOMB unter dem Winkel $\vartheta_p = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ gegen die Horizontale ein. (Adam, 2016)

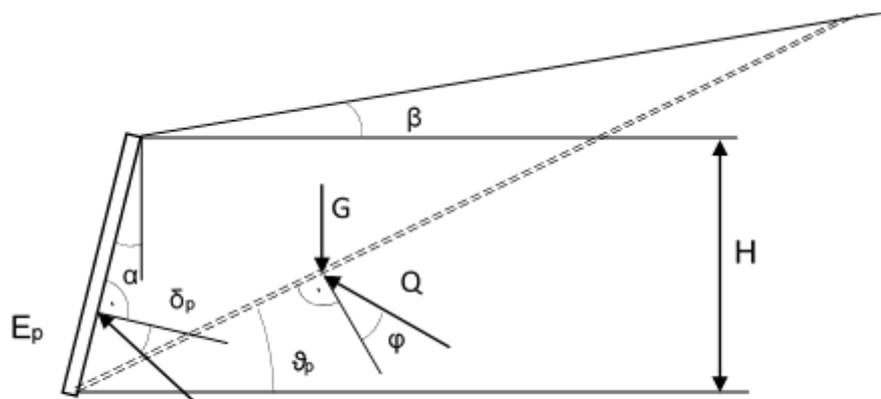


Abbildung 18: Passiver Erddruck bei geradliniger Bruchfläche

Die Theorie nach COULOMB variiert beim passiven Erddruck die Neigung einer geradlinigen Bruchfuge und daraus ergibt sich das Maximum der Erddruckkraft. Eine Variation der Bruchform hat keine nennenswerten Auswirkungen. Im Gegensatz zum aktiven Erddruck muss auch die Form der Gleitlinie untersucht werden, da dies zu deutlichen Unterschieden und somit maßgebenden Erddruckbeiwerten führen kann.

Erwähnung sollten hierbei die Bruchflächen nach KREY, der von einem Kreisbogen als Bruchfläche ausgeht, und die Bruchflächen nach GUDEHUS, bei dem der rutschende Keil unterteilt wird, finden.

2.6 Ansatz von Vogt

Aufbauend auf Messungen von HILMER führte VOGT weitere Messungen an zwei Schleusenkammern durch, um die zyklische Mobilisierung des Erddruckes zu erfassen. Zusätzlich wurden umfangreiche Laborversuche und numerische Berechnungen sowie zwei Modellversuche ausgeführt. Dabei handelte es sich um einen großmaßstäblichen und einen kleinmaßstäblichen Versuch. Beim großmaßstäblichen Versuch mit einer 4 m hohen und 9 m langen Wand wurde die Wand gegen die Hinterfüllung (erdfeuchter, lagenweise verdichteter Sand) zyklisch bewegt. Die Bewegung erfolgte mit hydraulischen Pressen und wurde um den Fußpunkt gedreht. Beim kleinmaßstäblichen Versuch wurde mit einer Hinterfüllung mit Kohlestäbchen (Länge 48 mm, Durchmesser 4 mm und 6 mm) gearbeitet. Mit der verschieblichen Wand (50 cm x 5 cm) konnten Parallelverschiebungen sowie Kopf- und Fußdrehungen durchgeführt werden. (Vogt, 1984)

In der Auswertung der Versuche zeigte sich deutlich, dass sich der Spannungszustand im Boden während der passiven Wandverschiebung nicht gleichmäßig ausbreitet. Die Reibung wird zuerst nahe der Oberfläche und erst bei zunehmender Verschiebung in größerer Tiefe mobilisiert.

Formel des Erddruckbeiwertes:

$$K = \frac{\sigma_h}{\gamma * z} \quad (2.13)$$

K.....Erddruckbeiwert
 σ_hHorizontalspannung
 γ Wichte des Bodens
 z Tiefe

Um die Eigenschaft der Lagerungsdichte des Bodens zu erfassen, da zur Mobilisierung in locker gelagertem Sand größere Verschiebungen nötig sind als in dicht gelagertem Boden, führte VOGT einen Parameter a ein.

Als Ergebnis wurde ein hyperbolischer Ansatz für die Mobilisierung des Erddruckes in Abhängigkeit der Horizontalverschiebungen $s_h(z)$ in der dazugehörigen Tiefe z angenommen:

$$K_{ph,mob}(z) = K_0 + (K_{ph} - K_0) * \frac{\frac{s_h(z)}{z}}{a + \frac{s_h(z)}{z}} \quad (2.14)$$

$K_{ph, mob}$mobilisierter horizontaler Erddruckbeiwert in der Tiefe z
 K_0Beiwert für den Erdrudruck

K_{ph} Beiwert für passiven horizontalen Erddruck

$s_h(z)$ horizontale Verschiebung in der Tiefe z

z Tiefe

a Beiwert für die Lagerung

Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass für jede Tiefe z die dazugehörige Erddruckeinwirkung berechnet werden kann. Somit kann mit einer berechneten Biegelinie direkt auf den erwarteten Erddruck geschlossen werden.

Der Parameter a dient somit der Berücksichtigung der Lagerungsdichte des Materials. Die großmaßstäblichen Versuche konnte VOGT mit $a = 0,03$ und jene mit Kohlestäbchen mit $a = 0,04$ abbilden. Wobei für locker gelagerten Sand ein Beiwert von $a = 0,11$ und für dicht gelagerten Sand $a = 0,01$ angegeben wird.

2.7 Ansatz nach Besler

Um die Verformungen von Baugrubenwänden abzubilden führte BESLER Modellversuche mit trockenem Sand und verschiedenen Lagerungsdichten durch. Der dadurch entstehende Erddruck und der mobilisierte Erdwiderstand werden durch einen nichtlinearen Bettungsansatz abgebildet. Der resultierende Erddruck wird über die gesamte Wandhöhe betrachtet und über eine dreiecksförmige Verteilung über die Höhe angenommen:

$$K_{ph,mob}(\xi) = A + \frac{B}{C + \frac{s}{s_B}} \quad (2.15)$$

Mit den Konstanten A , B und C , die sich wie folgt ergeben:

$$C = -\frac{K_{ph} \cdot \xi_G}{2 \cdot (K_{ph} - K_0) \cdot \xi_G + 2 \cdot K_0 - K_{ph}} \quad (2.16)$$

$$A = K_{ph} + C \cdot (K_{ph} - K_0) \quad (2.17)$$

$$B = -(C + C^2) \cdot (K_{ph} - K_0) \quad (2.18)$$

$K_{ph, mob}(\xi)$ mobilisierter horizontaler Erddruckbeiwert

K_0 Beiwert für den Erdruchdruck

K_{ph} Beiwert für passiven horizontalen Erddruck

$\xi = \frac{s}{s_B}$ vorhandene auf die Bruchverschiebung bezogene Wandverschiebung

$\xi_G = \frac{s_G}{s_B}$ bei halbem Grenzerdrunderstand auf die Bruchverschiebung bezogene

Wandverschiebung

Durch die Konstanten A, B und C werden die Einflüsse der Lagerungsdichte, negativer Wandreibung, Einfluss des Grundwassers und der Faktor der relativen Wandverschiebung berücksichtigt.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass der Ansatz von BESLER für vorbelastete Böden erweitert wurde, aber nicht näher in dieser Arbeit darauf eingegangen wird.

2.8 Ansatz nach Bartl

Weitere Untersuchungen zur Mobilisierung des Erddrucks führte Bartl mittels eines 1,8 m langen Versuchskastens durch. Die verschiebliche Wand hatte eine Breite von 1,0 m und war 0,58 m hoch. Als Versuchsmaterial wurde ein trockener, enggestufter Sand verwendet. Dabei wurden unterschiedliche Lagerungsdichten ausgeführt. Neben diesen 1g-Versuchen wurden Zentrifugen-Versuche ausgeführt.

Nach diesen Untersuchungen lässt sich der Mobilisierungsgrad χ_R in Abhängigkeit des Mobilisierungsgrads der Grenzverschiebung λ_R und den aus Versuchen resultierenden Beiwerten b und c mit nachstehender Formel beschreiben:

$$\chi_R = (1 - (1 - \lambda_R)^b)^c \quad (2.19)$$

Dabei ist der Mobilisierungsgrad χ_R definiert zu

$$\chi_R = \frac{E - E_0}{E_p - E_0} = \frac{K - K_0}{K_p - K_0} \quad (2.20)$$

Der Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung λ_R lässt sich aus dem Verhältnis der Wandverschiebung s zur erforderlichen Grenzverschiebung s_p zur maximalen Mobilisierung des Erdwiderstandes ermitteln zu:

$$\lambda_R = \frac{s}{s_p} \quad (2.21)$$

Somit ergibt sich der Erddruckbeiwert K:

$$K_{ph,mob} = (K_{ph} - K_0) * \left(1 - \left(1 - \frac{s}{s_p}\right)^b\right)^c + K_0 \quad (2.22)$$

$K_{ph, mob}$ mobilisierter horizontaler Erddruckbeiwert

K_0 Beiwert für den Erdrudruck

K_{ph} Beiwert für passiven horizontalen Erddruck

shorizontale Verschiebung an der Wandoberkante

s_p horizontale Verschiebung an der Wandoberkante im Bruchzustand

b, c.....Parameter in Abhängigkeit von der Art der Wandverschiebung

$c = 0,7$; Fußpunktdrehung: $b = 1,06$; Parallelverschiebung: $b = 1,45$

2.9 Vergleich verschiedener Ansätze

Die Ansätze von Besler und Bartl wurden vorwiegend für die Mobilisierung des stützenden, passiven Erdwiderstandes im Fußbereich von Baugrubenwänden aufgestellt. In diesen Fällen treten Verformungen auf, die nur bei integralen Brücken mit hohen Spannweiten erreicht werden.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 19 den Beiwert für den mobilisierten Erddruck K_{mob} über die gesamte Wandhöhe mit den zuvor vorgestellten Ansätzen. Dabei wird ein Beispiel mit einer Fußpunktdrehung und folgenden Eingangswerten gewählt:

- Reibungswinkel des Bodenmaterials im Hinterfüllungsbereich $\varphi = 35^\circ$
- Beiwert Erdrudruck $K_0 = 0,426$
- Beiwert für passiven Erddruck $K_{ph} = 9,15$
- Grenzverschiebung für passiven Erddruck $s_B = 0,64$ m

Wie ersichtlich treten bei Besler und Bartl bei kleineren Verschiebungen kleinere Werte als beim Ansatz von Vogt auf. Aufgrund dieser Tatsache können bei geringen Verformungen, die bei integralen Brücken auftreten, mittels des Ansatzes von Vogt die Einwirkungen des Erddruckes auf der vorsichtigeren Seite ermittelt werden, da die Einwirkungen infolge des Erddruckes größer sind als bei den Ansätzen nach Besler und Bartl.

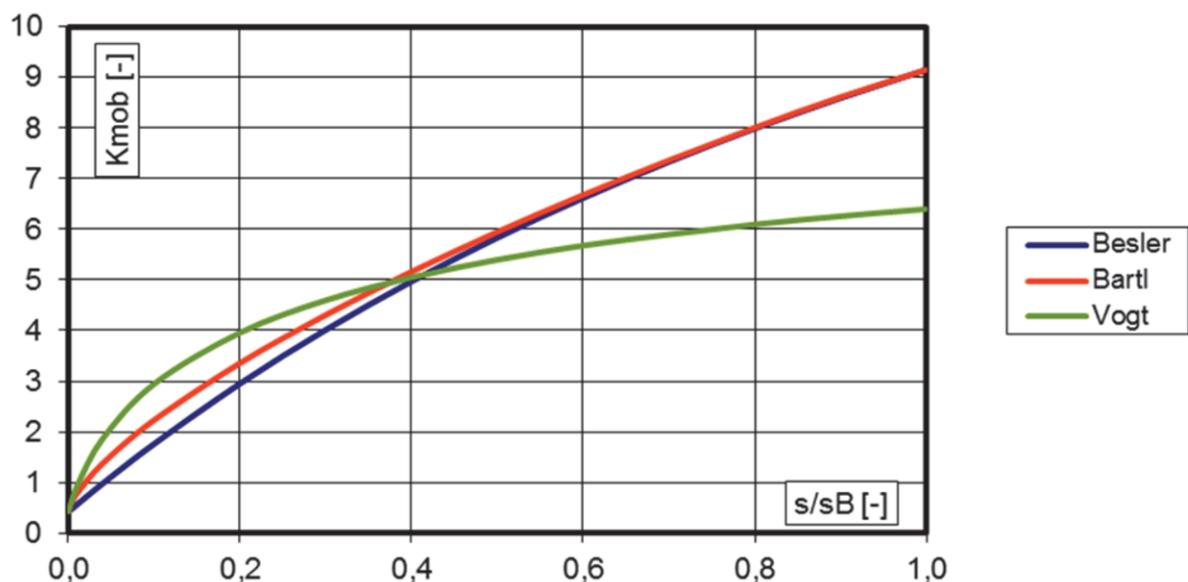


Abbildung 19: Vergleich verschiedener Ansätze für den mobilisierten Erddruckbeiwert

In den USA werden die Widerlager integraler Brücken häufig in den Dammbereich zurückgesetzt und über Pfähle tief gegründet. Aufgrund der dadurch geringen Widerlagerhöhe wird in diesen Fällen mit wenigen Ausnahmen auf den vollen passiven Erddruck bemessen. (Szczyrba, 2013)

In Großbritannien werden auch Widerlager in voller Höhe des Lichtraumes ausgeführt und nach BA 42/96 bemessen. Hierbei wird bis in eine Tiefe der halben Widerlagerhöhe der Erddruck mit einem Beiwert K_{mob} nach nachstehender Gleichung ermittelt und anschließend konstant gehalten bis der Erdruchdruck erreicht wird (siehe Abbildung 20). (Szczyrba, 2013)

$$K_{mob} = K_0 + (s_h/0,03h)^{0,6} * K_{ph} \quad (2.23)$$

K_{mob}mobilisierter horizontaler Erddruckbeiwert

K_0Beiwert für den Erdruchdruck

K_{ph}Beiwert für passiven horizontalen Erddruck

s_hhorizontale Verschiebung an der Wandoberkante

hWandhöhe

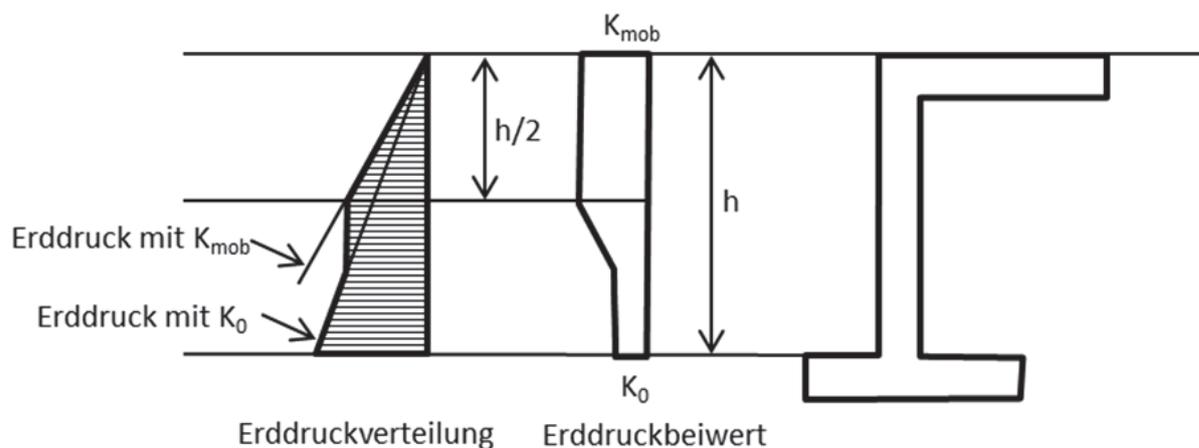


Abbildung 20: Erddruckansatz nach (BA 42/96, 2003)

In Abbildung 21 sind die Unterschiede der Erddruckverteilung nach der britischen BA 42/96 und dem Ansatz von Vogt für eine Fußpunktverdrehung aufgezeigt. Dabei wurde eine Wandhöhe von 7 m und eine horizontale Verschiebung von 7 mm sowie die erforderlichen Erddruckbeiwerte $K_0 = 0,426$ und $K_{ph} = 9,15$ angenommen.

Der Ansatz von Vogt zeigt bei einer Fußpunktverdrehung den Rückgang des Erddruckes am Fußpunkt auf den Erdruchdruck. Was durchaus logisch erscheint, da in diesem Bereich keine Verformungen auftreten. Hingegen wird nach BA 46/96 der Erddruckbeiwert und somit der normierte Erddruck ab halber Wandhöhe konstant gehalten und weist in diesem

Bereich deutlich höhere Werte auf. Im oberen Bereich der Wand (größte Verformungen), in diesem Beispiel bis in eine Tiefe z von $0,4 h$, tritt ein gegenläufiger Trend ein.

Ebenso zeigt die nachfolgende Abbildung den jeweils normierten Erdrudruck e_{0gh} und vollen passiven Erddruck e_{pgh} .

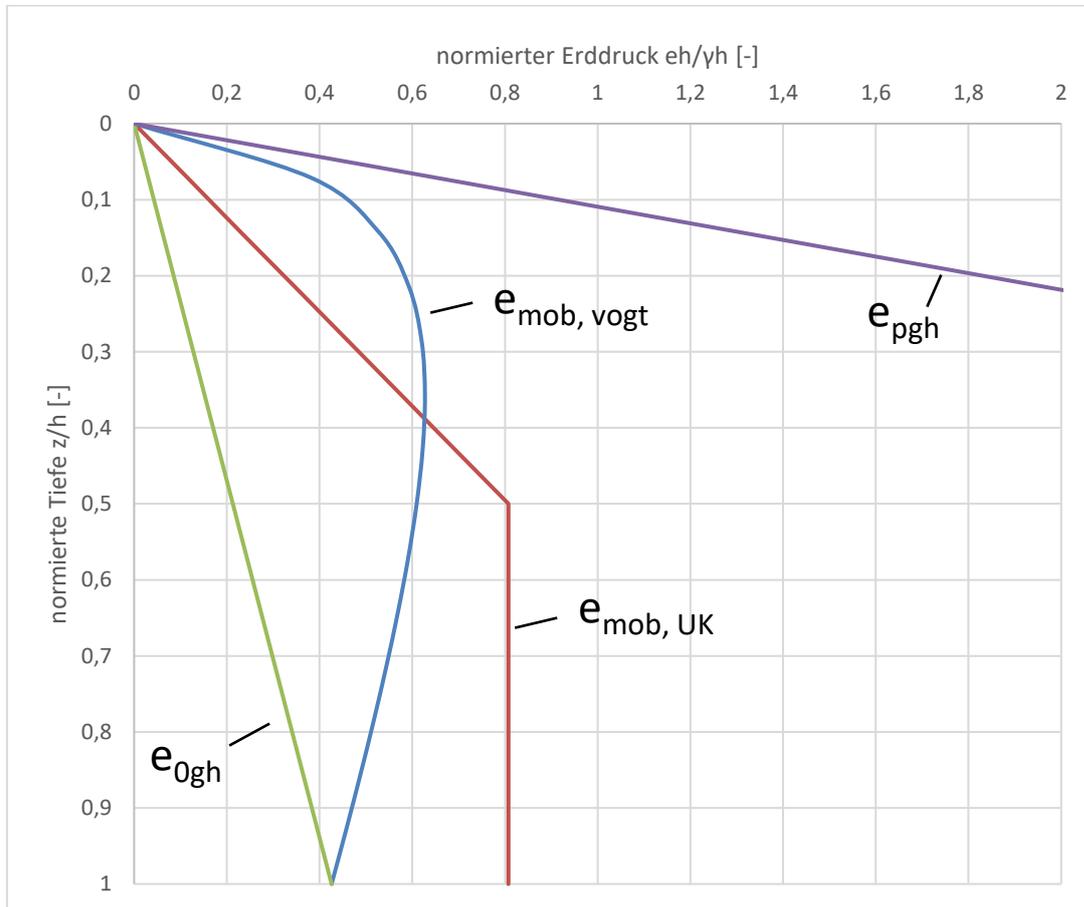


Abbildung 21: Beispiel zur Verteilung des normierten Erddrucks nach Vogt und BA 42/96 (UK)

2.10 Deutschsprachige Normen

2.10.1 ASTRA 12004

Die Schweizer Richtlinie *ASTRA 12004 konstruktive Einzelheiten von Brücken (Brückenende)* basiert auf der in Großbritannien gültigen Norm für integrale Brücken.

Der Erddruck, zufolge der Schweizer Richtlinie, folgt aber im Unterschied zum großbritannischen Regelwerk einem anderen Erddruckverlauf und erweitert den Erddruck bis zur Unterkante des Fundamentes bzw. bis zum Drehpunkt bei Tiefgründung. Für kleine Werte der zyklischen Verschiebungen liefert dieser Ansatz sehr große Werte. Daher darf für Brückenenden mit einer Bewegungslänge von weniger als 15 m der Erdruehdruck anstelle des erhöhten Erddruckes angesetzt werden.

Bei der Ermittlung des erhöhten Erddruckes wird grundsätzlich zwischen der Rotation um einen Fußpunkt und einer Translation eines Elements unterschieden. (ASTRA 12004, 2011)

2.10.2 RVS 15.02.12

Die RVS 15.02.12 bietet für integrale Brücken mit einer Länge von weniger als 50 m unabhängig von sonstigen Einflüssen den Ansatz, einen oberen Grenzwert des 1,5-fachen des Erdruehdruckes oberhalb der Fundamentunterkante zu verwenden. Als unterer Grenzwert des Erddruckes wird der aktive Erddruck bzw. 0 für eigenstandsichere Hinterfüllungen angegeben. (RVS 15.02.12, 2012)

2.10.3 ÖNORM B 4434

Bezüglich der Ermittlung des verminderten bzw. mobilisierten passiven Erddruckes zufolge einer Verformung bzw. einer zyklischen Verformung gibt es derzeit folgende Vorgaben in den existierenden österreichischen Richtlinien nach FRANKE. Der mobilisierte Erddruck hinter einer Widerlagerwand zufolge einer Ausdehnung lässt sich mit der unten angeführten Tabelle 1 aus der ÖNORM B 4434 abschätzen. Formel zur Berechnung aus ÖNORM B4434 (1993):

$$e_{ph} = e_{0h} + (e_{ph} - e_{0h}) * \left[1 - \left(1 - \frac{u}{u_B} \right)^{2,7} \right] \quad (2.24)$$

e_{ph}mobilisierter horizontaler Erddruck über die gesamte Wandhöhe

e_{0h}horizontaler Erdruehdruck über die gesamte Wandhöhe

e_{ph}passiver horizontaler Erddruck über die gesamte Wandhöhe

u tatsächliche Wandverschiebung

u_BVerschiebung zur Erzeugung von e_{ph}

Tabelle 1: Verschiebungsgrößen u_B für den Bruchzustand in Prozent der Wandhöhe h
entnommen aus (ÖNORM B 4434: 1993 01 01)

Bewegungsart	Aktiver Erddruck		Passiver Erddruck	
	lockere Lagerung	dichte Lagerung	lockere Lagerung	dichte Lagerung
Fußpunktdrehung	0,4 bis 0,5	0,1 bis 0,2	30	10
Parallelverschiebung	0,2	0,005 bis 0,1	10	5
Kopfpunktdrehung	0,8 bis 1,0	0,2 bis 0,5	15	5
Durchbiegung	0,4 bis 0,5	0,1 bis 0,2		

2.10.4 Din 4085

In der aktuellen DIN 4085 wird der Mobilisierungsansatz nach BARTL übernommen. Im Vergleich mit dem bereits vorgestellten Ansatz der ÖNORM nach FRANKE wurde die Variable „ b “ der Mobilisierungsfunktion (FRANKE $b = 2$) abweichend vorgegeben. (DIN 4085, 2017)

3 Versuchseinrichtung

Im folgenden Kapitel wird auf die Versuchseinrichtung des gegenständlichen Versuchs näher eingegangen. Dabei werden die verschiedenen Bauteile und die verwendete Messeinrichtung beschrieben.

3.1 Versuchsbehälter

Für den mittelgroßen Modellversuch wurde ein Modellbehälter aus Stahl mit den Abmessungen 3,00 x 1,01 x 1,50 m (L x B x H) errichtet. Dieser Behälter wurde einseitig von einer beweglichen Modell-Widerlagerwand geschlossen und ist in Abbildung 22 dargestellt. Um die hohen Kräfte aufnehmen zu können, wurde der Modellbehälter von zehn Stahlrahmen gestützt. Auf diesen wurden sowohl die Bodenplatte als auch die beiden Seitenwände befestigt. Den dritten Teil der Versuchseinrichtung bildete der Antriebsblock, welcher über die Widerlagerwand die Belastung auf das Probematerial aufbrachte. Als Widerlager für die horizontal auftretenden Kräfte wurde die Anlage auf der Rückseite des Antriebsblockes mit der Betonwand der Versuchsgrube fest verbunden.

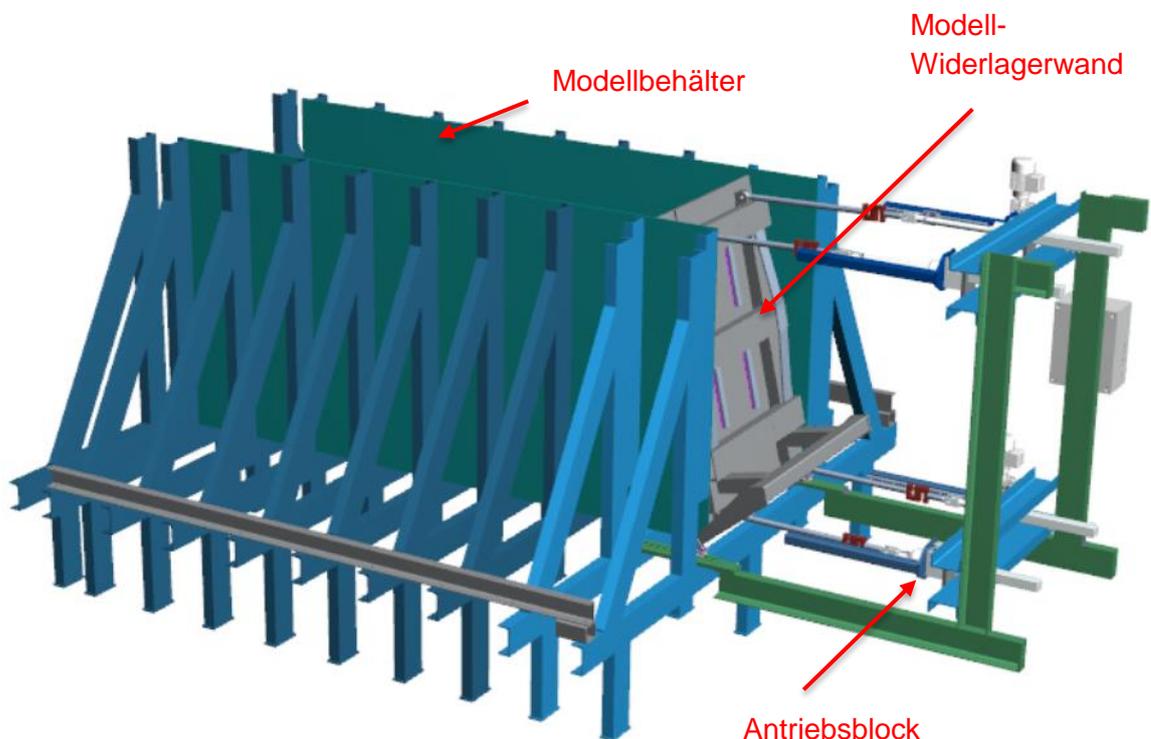


Abbildung 22: Versuchsanlage mittelgroßer Modellversuch (Klement Walter GmbH, 2015)

In Abbildung 23 wird das vereinfachte statische System der Modell-Widerlagerwand dargestellt.

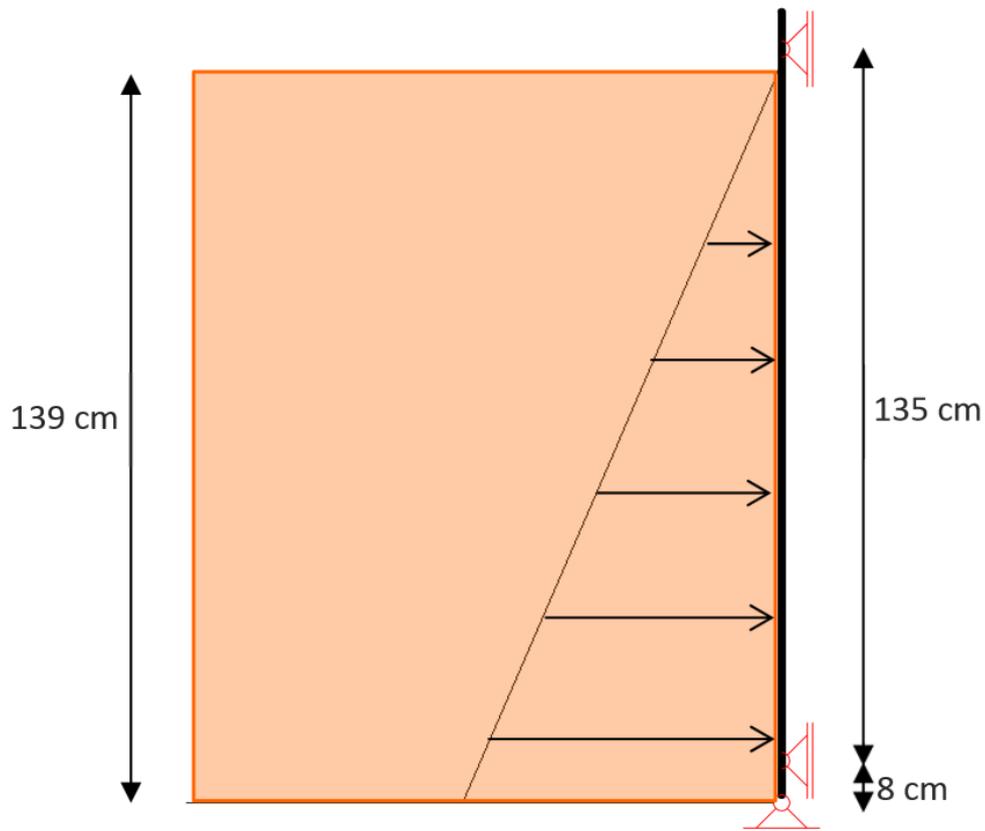


Abbildung 23: Statisches System mittelgroßer Modellversuch

Bei der Auflagerkonstruktion befand sich der Rotationspunkt an der unteren Behälterbegrenzung (siehe Abbildung 24). Dieser Punkt war horizontal verschieblich und wurde außerhalb des Behälters geführt. Durch diese spezielle Auflagerkonstruktion konnte von der Widerlagerwand eine Rotations-, eine Translations- und eine kombinierte Bewegung auf das Versuchsmaterial aufgebracht werden. Die maximal mögliche Verschiebung in diesem Punkt betrug 300 mm. Die vertikalen Belastungen vom Eigengewicht der Widerlagerwand und der vertikalen Last durch den Erddruck wurden nicht gemessen.

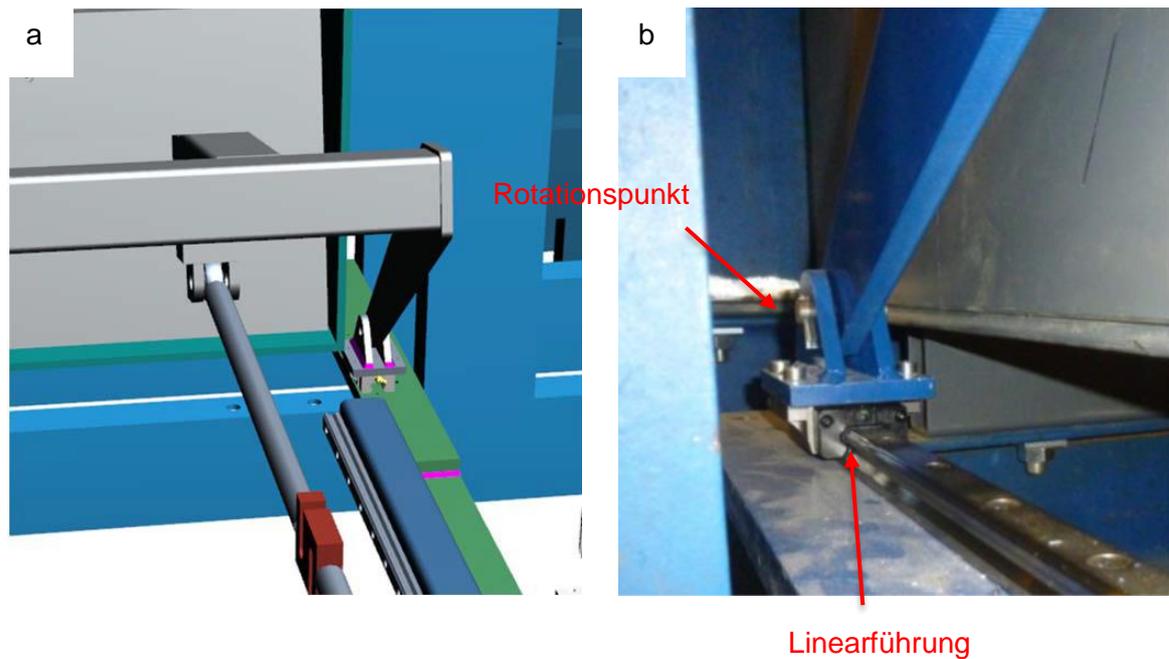


Abbildung 24: Vertikales Auflager der Modellwiderlagerwand, a) 3D-Grafik (Klement Walter GmbH, 2015), b) real

Damit keine Zwängungen zwischen Bodenplatte und der Modellwiderlagerwand entstehen, wurde ein Abstand von ca. 1 mm eingehalten. An der Widerlagerwand wurde die Verschiebung durch vier Auflagerpunkte gewährleistet. Jeder dieser Auflagerpunkte wurde über ein Spindelhubgetriebe angetrieben. Jedes dieser Getriebe konnte eine Kraft von maximal 25 kN aufbringen. Jede Achse wurde über zwei Spindelhubgetriebe angetrieben, wodurch sich eine maximale Achskraft von 50 kN ergab.

3.2 Messeinrichtungen

Die Messung der aufgebrachten Kräfte erfolgte über S-förmige Wägezellen, welche sich zwischen dem Spindelhubgetriebe und der Widerlagerwand befanden. Die Messung des Weges der Widerlagerwand erfolgte über einen induktiven Wegaufnehmer. In Abbildung 25 werden die Bauteile der Widerlagerwand dreidimensional dargestellt.

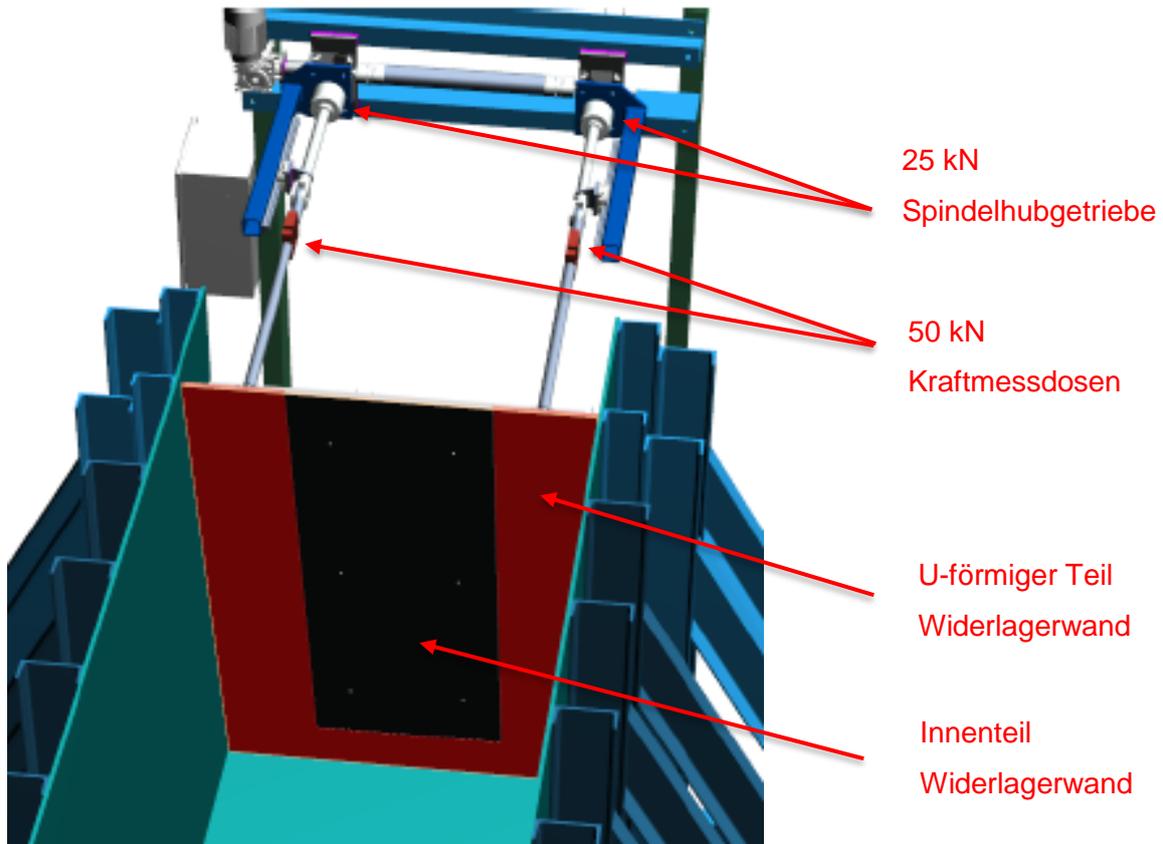


Abbildung 25: 3D-Modell der Widerlagerwand (Klement Walter GmbH, 2015)

Die Widerlagerwand bestand aus zwei Stahlplatten. Einem U-förmigen Teil, auf welchem die Auflagerachsen angebracht wurden und einem Innenteil, welcher über 6 Bolzen über Stahlprofile auf der Luftseite verbunden war. Dieser Aufbau war in dieser Weise notwendig, damit die Kräfte auf der Widerlagerwand bei den Bolzen mittels Ringkraftmessdosen gemessen werden konnten. Diese Ringkraftmessdosen wurden als Abstandhalter verwendet. Die maximale Nennlast belief sich auf 30 kN. Für eine Messachse, welche als Wandachse bezeichnet wird, werden immer zwei Messdosen kombiniert. Somit ergaben sich drei Wandachsen. In Abbildung 26 werden die Wandachsen bildlich dargestellt.

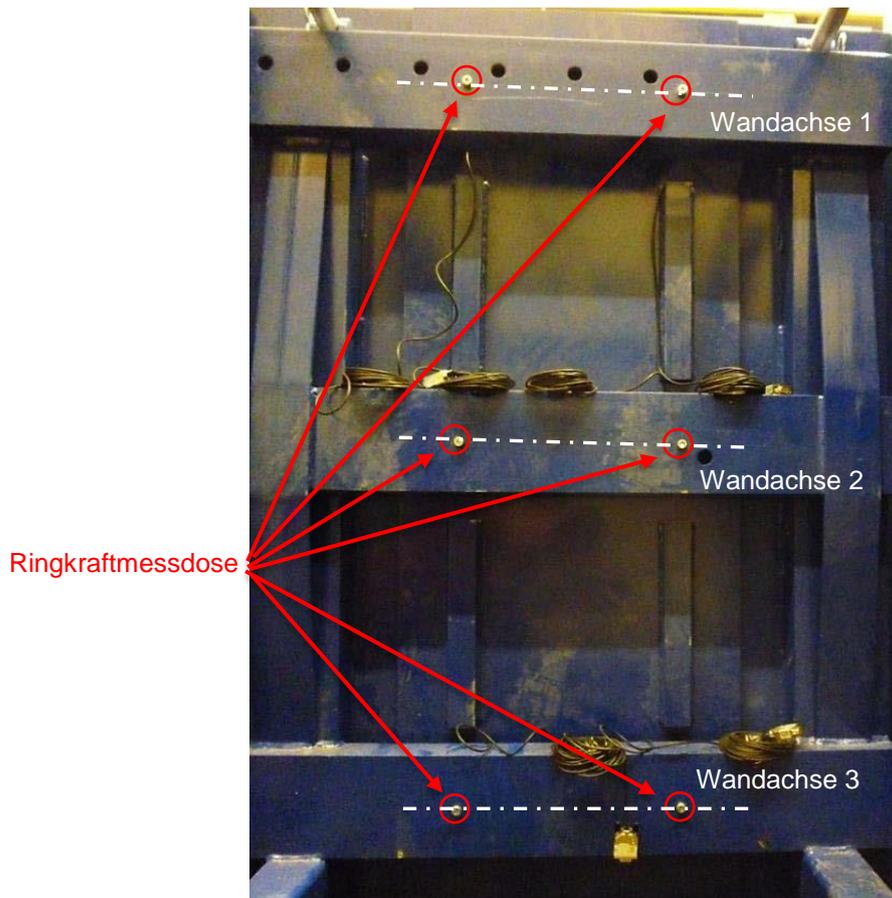


Abbildung 26: Messebenen der Modellwiderlagerwand

Diese konstruktive Lösung ermöglichte eine Messung des Erddruckes, welcher von Randeinflüssen wie der Wandreibung weniger beeinflusst war. Die Abstände der drei Wandachsen zum Rotationspunkt der Widerlagerwand betragen dabei für die Wandachse 1 1334 mm, für Wandachse 2 834,5 mm und für die Wandachse 3 330 mm. Damit die Wandreibung zusätzlich verringert wurde, wurde der Modellbehälter mit einer Teflonfolie ausgekleidet. Für den Antrieb sorgten zwei handelsübliche Drehstrommotoren. Gesteuert wurden diese über eine Bretzel PS52 Steuerungseinheit. In Abbildung 27 wird das Bedienfeld der Steuerungseinheit dargestellt.



Abbildung 27: Bedienfeld der Motorensteuerung

Zum Beginn jedes Versuches musste ein Programm geschrieben werden, welches die maximale Auslenkung, die Geschwindigkeit und die Startrichtung definiert. An der Y-Achse (oben) wurde eine Geschwindigkeit von 0,36 mm/min festgelegt. Der Wert der Geschwindigkeit der X-Achse (unten) wurde dabei linear interpoliert. Dadurch wurden die Endpunkte der zu fahrenden Wege von beiden Achsen immer zeitgleich erreicht. Die Steuereinheit konnte in allen Programmen zusammen maximal 1000 Sätze speichern. Sämtliche Sensoren wurden über zwei Messkraftverstärker Quantum XMX840A der Firma Hottinger& Baldwin Messtechnik GmbH ausgelesen und die Daten durch die Software Catman Easy AP, Version 3.5, desselben Herstellers am PC dargestellt und gespeichert. Um die Setzungen an der Oberfläche des Granulates zu messen, wurde ein Lasergerät auf zwei Metallschienen an der Oberkante des Modellbehälters angebracht. Mittels dieses Lasergerätes konnte die Oberfläche dann nach einem vorgegebenen Raster nach den jeweiligen Zyklen abgetastet werden. Abbildung 28 zeigt das Raster, welches bei jedem Versuch abgetastet wurde.

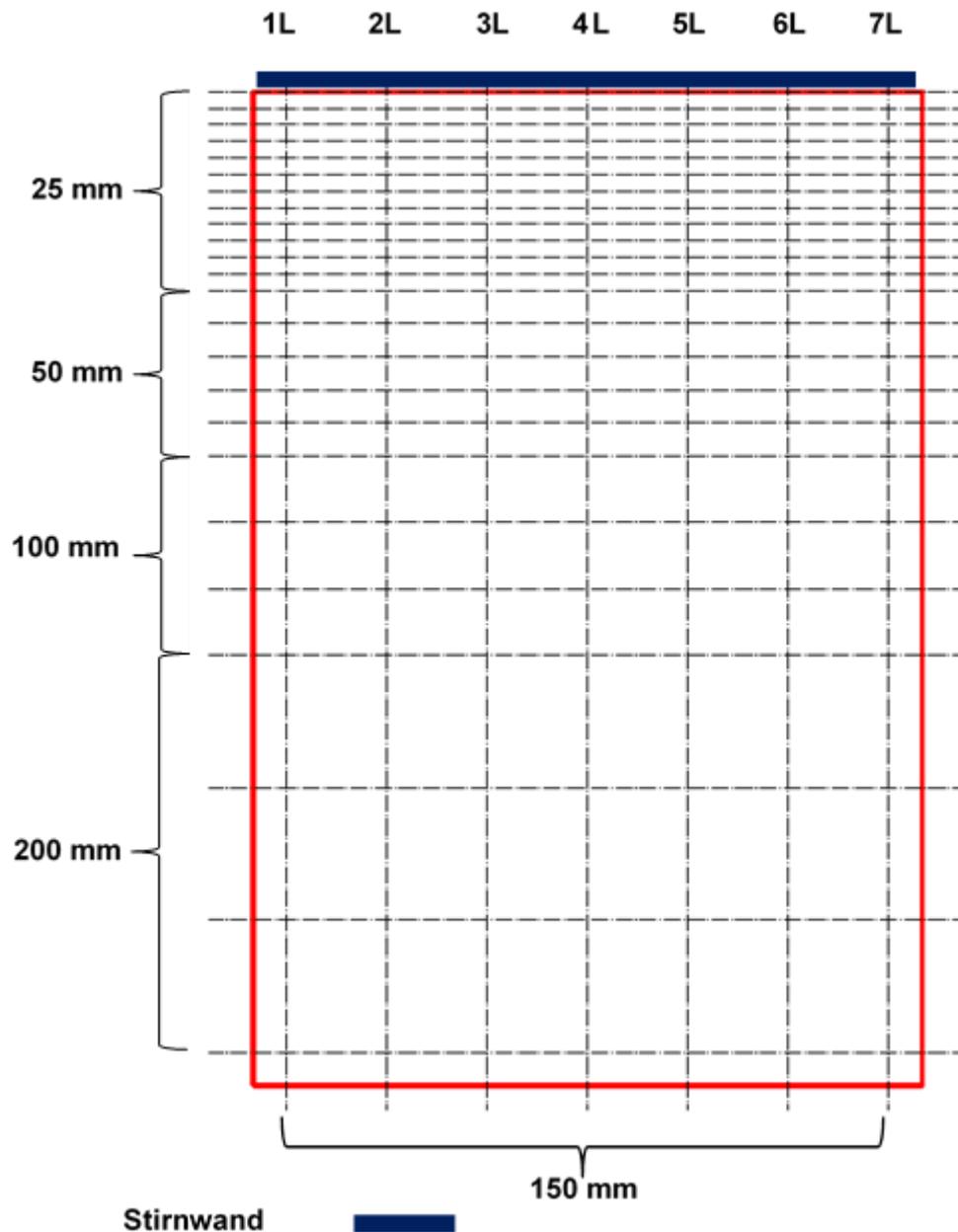


Abbildung 28: Messraster der Oberflächenmessung

Die 7 Längs- und 24 Querachsen ergeben insgesamt 168 Schnittpunkte, die einzeln vermessen wurden. Da die größten Setzungen nahe der Widerlagerwand zu erwarten waren, wurde im Nahbereich ein dichteres Raster angelegt. Mit steigender Entfernung zur Widerlagerwand werden auch die Rasterabstände in y-Richtung größer.

Um das Raster bei jedem Versuch exakt zu halten, wurden zur Abstandsmessung Seilzugwegaufnehmer eingesetzt. Abbildung 29 zeigt das Lasergerät, die Schienen und die Seilzugwegaufnehmer. Die gemessenen Daten wurden in einer Excel-Datei eingetragen und gespeichert.



Abbildung 29: Lasermesssystem

Da die Setzungen aufgrund der Lagerung zu Beginn der Versuche am größten zu erwarten waren, wurde am Versuchsanfang bereits nach 2 Zyklen die Oberfläche gemessen. Nach Zyklus 5 wurde alle 5 Zyklen eine Messung der Setzungen durchgeführt. In Abbildung 30 wird der Versuchsverlauf mit den Messzeitpunkten dargestellt. Dabei wird der Versuch in die passive Richtung gestartet.

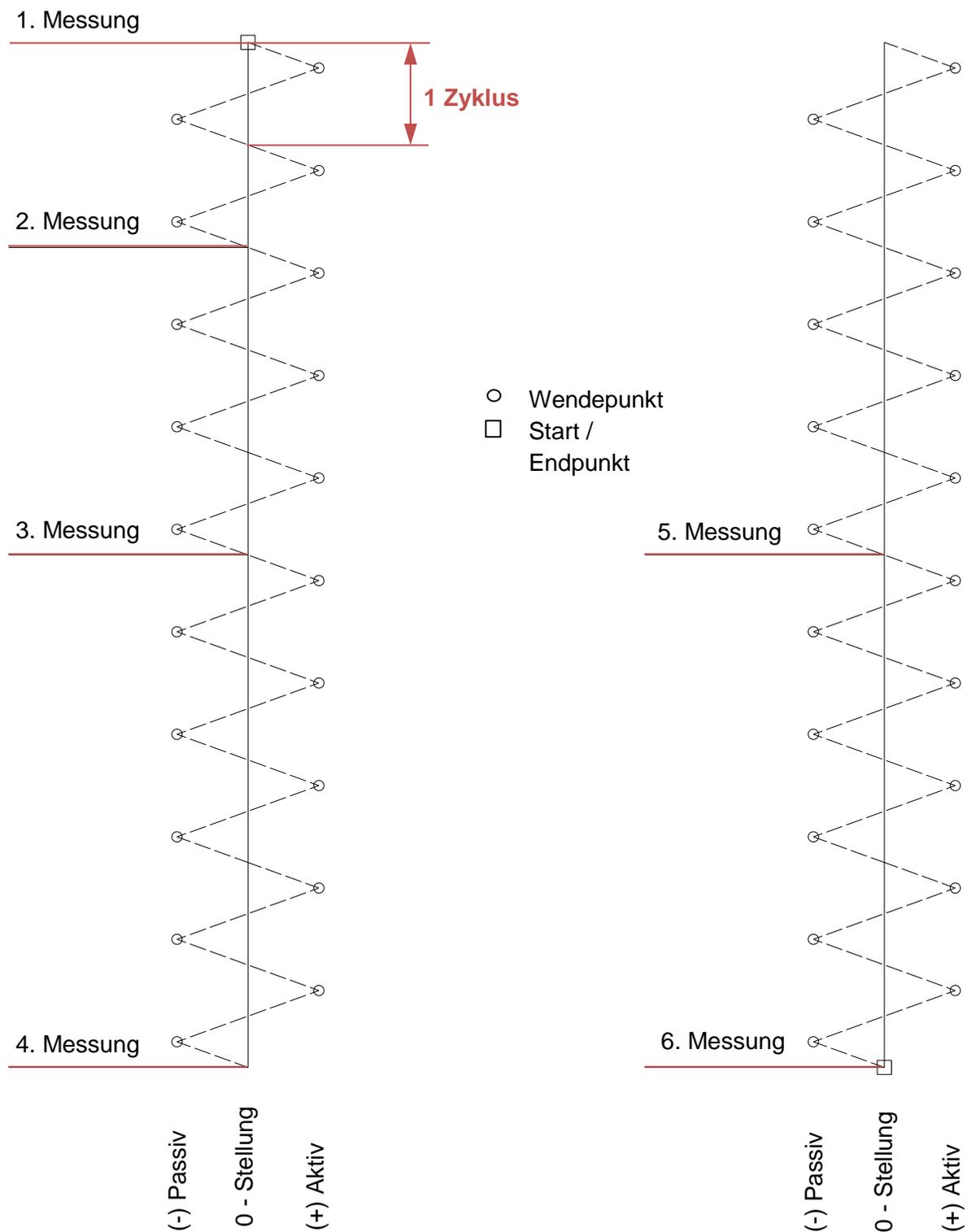


Abbildung 30: Versuchsverlauf

Die Versuche wurden mit reiner Rotation und mit einer Kombination aus Rotation und Translation durchgeführt. Abbildung 31 zeigt eine schematische Darstellung dieser beiden Formen der Bewegung der Widerlagerwand. Unterschieden wird außerdem noch die Startrichtung der Widerlagerwand.

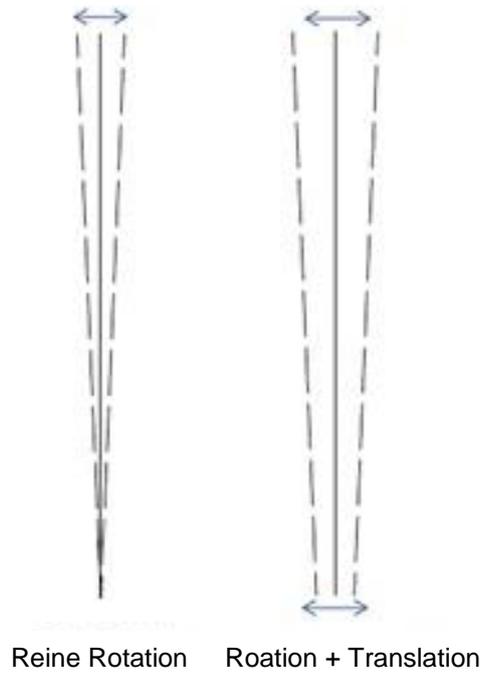


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bewegungsschemata

4 Versuchsmaterial

Als granulares Medium wurde für den mittelgroßen Versuch gewaschener Kies mit der Kornklasse 4/8 verwendet. Bei diesem Material handelte es sich um Rundkorn. Im Bodenmechaniklabor der Technischen Universität Graz wurde eine Kornverteilungskurve ermittelt. In Abbildung 32 ist das Ergebnis dieser Prüfung graphisch dargestellt.

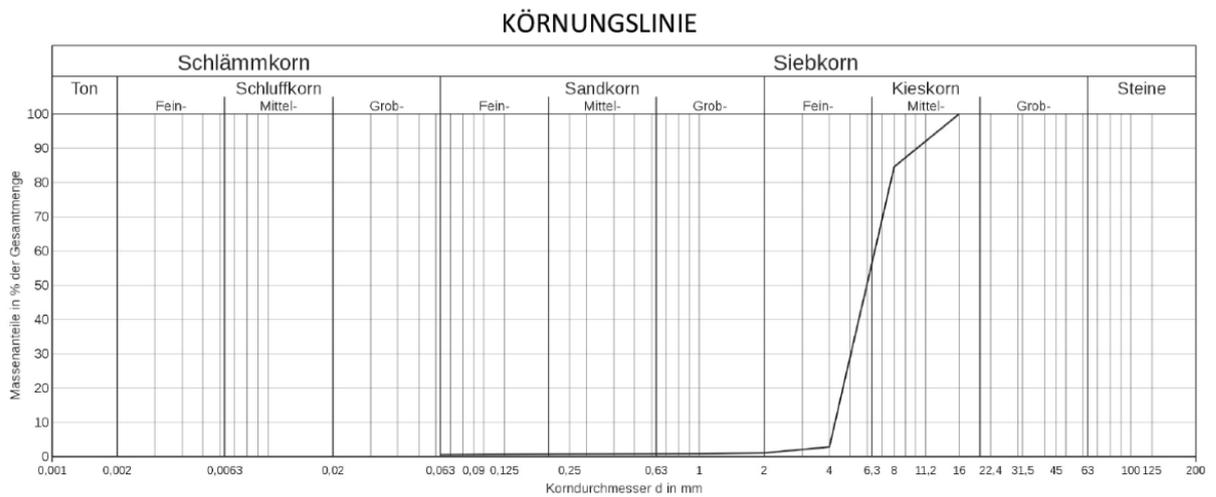


Abbildung 32: Kornverteilungslinie

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind die Ergebnisse der Prüfung zur Lagerungsdichte dargestellt.

	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA Tel.: +43(0)316 / 873-6237 Fax: +43(0)316 / 873-6238		 IBG
	AUFTRAGGEBER: PROJEKT: FP Integrale Brücken		

Lockerste und dichteste Lagerung

LABORNUMMER					
BEZEICHNUNG	Locker 1	Locker 2	Fallhöhe 10 cm 1	Fallhöhe 10 cm 2	Fallhöhe 10 cm 3
TIEFE					
BODENART	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies

d	cm					
A	cm ²					
h	cm					
V	cm ³	3343,4	3343,4	3343,4	3343,4	3343,4
m+m _B	g	6076,1	6070,7	6261,9	6177,5	6174,1
m _d +m _B	g					
m _B	g	1005,9	1005,9	1005,9	1005,9	1005,9
m	g					
m _d	g	5071,3	5064,8	5256,0	5171,6	5168,2
w	%					
ρ _B	g/cm ³					
n	%					
e ₀	1					
S _r	%					
ρ	g/cm ³					
ρ _d	g/cm ³	1,52	1,52	1,57	1,55	1,55

Abbildung 33: Ergebnisse der Lagerung des Versuchsmaterials (1/2)

	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR <small>A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA Tel.: +43(0)316 / 873-6237 Fax: +43(0)316 / 873-6238</small>		 IBG
	AUFTRAGGEBER: PROJEKT: FP Integrale Brücken		
BEZEICHNUNG: BEARBEITER: HAV		LABORNUMMER: AUFTRAGSNUMMER: DATUM: 05.11.2015	

Lockerste und dichteste Lagerung

LABORNUMMER					
BEZEICHNUNG	Fallh. 130 cm 1	Fallh. 130 cm 2	Fallh. 130 cm 2	Dichteste 1	Dichteste 2
TIEFE					
BODENART	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies	4/8 Kies

d	cm					
A	cm ²					
h	cm					
V	cm ³	3343,4	3343,4	3343,4	2963,9	2987,8
m+m _B	g	6258,5	6316,6	6321,2	6258,5	6174,1
m _d +m _B	g					
m _B	g	1005,9	1005,9	1005,9	1005,9	1005,9
m	g					
m _d	g	5252,6	5310,7	5315,3	5064,8	5168,2
w	%					
ρ _B	g/cm ³					
n	%					
e ₀	1					
S _r	%					
ρ	g/cm ³					
ρ _d	g/cm ³	1,57	1,59	1,59	1,71	1,73

Abbildung 34: Ergebnisse der Lagerung des Versuchsmaterials (2/2)

Das Testmaterial bestand aus 98,9% Kies und nur einem sehr geringen Anteil von ca. 0,6% aus Korngrößen im sandigen Bereich. Anteile, die geringer als 0,063 mm sind, machen nur ca. 0,5% der Masse aus. Der Korndurchmesser bei 10% Masseanteil beträgt 4,25 mm, bei 30% Masseanteil ca. 5 mm und bei 60 % Masseanteil rund 6,5 mm. Der Wassergehalt nach Lieferung betrug 1,6%. Es ergab sich für das Material die lockerste Lagerung mit $\rho_d = 1,52 \text{ g/cm}^3$, sowie die dichteste Lagerung mit $\rho_d = 1,72 \text{ g/cm}^3$. Die Einbaudichte bei einer Fallhöhe von 10 cm betrug $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$ und bei einer Fallhöhe von 130 cm betrug

die Einbaudichte $\rho_d = 1,58 \text{ g/cm}^3$. Ein durchschnittlicher Schüttwinkel von 27° wurde mittels eines gezogenen Zylinders bestimmt. Der Reibungswinkel φ' von 43° wurde mit Hilfe eines direkten Scherversuches bestimmt. In Abbildung 35 wird das Ergebnis des Scherversuches dargestellt.

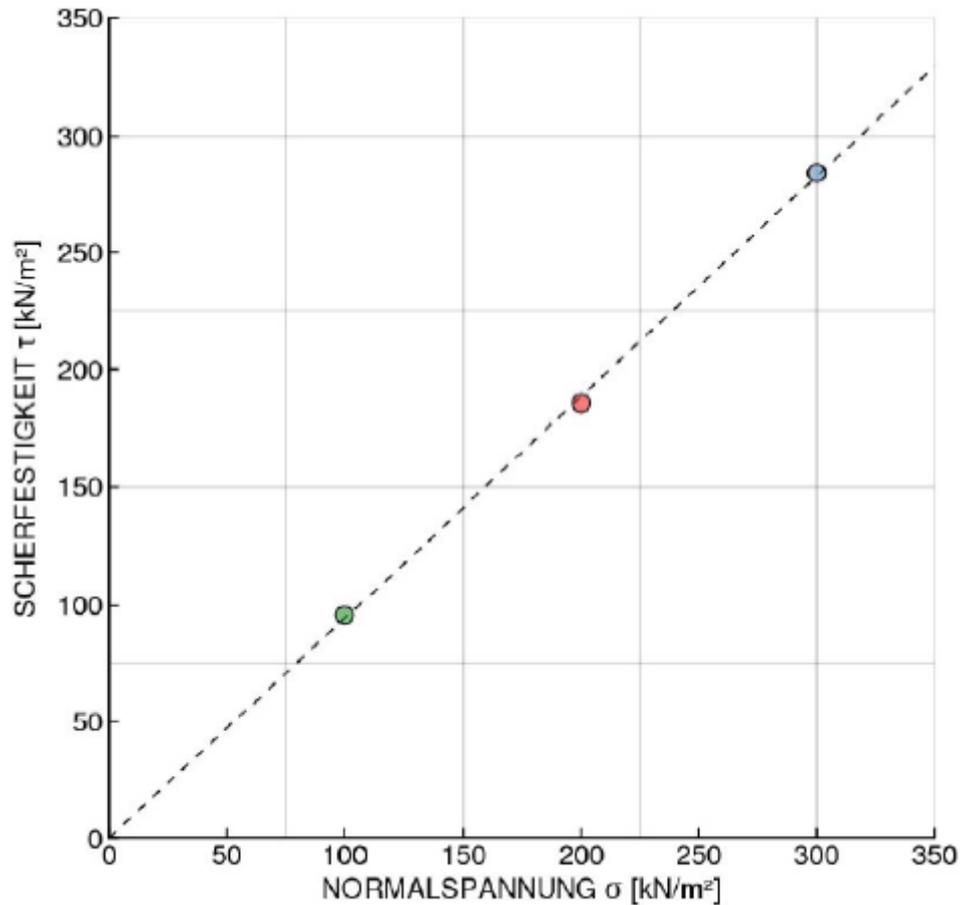


Abbildung 35: Ergebnis direkter Scherversuch

Da der Kies bei der Lieferung gewaschen angeliefert wurde, musste eine Trocknung vor Ort durchgeführt werden. Das war notwendig, um bei jedem Versuch die gleiche Granulateigenschaften sicherzustellen. Für dieses Vorhaben wurde eine Konstruktion entwickelt, welche den Kies auf einem Lochblech von unten mit einer Gasflamme trocknete. Abbildung 36 zeigt das verwendete und getrocknete Versuchsmaterial.



Abbildung 36: Versuchsmaterial

5 Versuchsdurchführung

Bevor der erste Versuch gestartet werden konnte, mussten sämtliche Parameter in das Steuerungsprogramm eingegeben und gespeichert werden. Damit die gemessenen Daten verwertbar sind, musste vor jedem Versuch eine Leerfahrt durchgeführt werden. Die Messwerte, die dabei aufgezeichnet wurden, dienten nach Abschluss des Versuches zur Korrektur der gemessenen Werte. In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte in der Reihenfolge der Tätigkeiten aufgezeigt. Anschließend wird auf das durchgeführte Versuchsprogramm eingegangen.

5.1 Befüllung

Der erste Schritt bestand in der Befüllung des Modellbehälters mit dem Versuchsmaterial. Dies wurde über Big Bags bewerkstelligt (siehe Abbildung 37). Jeder Big Bag wurde in die Krananlage gehängt und dann aus einer Höhe von ca. 1 m in den Behälter geschüttet. Durch diese Einfüllhöhe wurde eine erste Verdichtung erreicht. Um die Lagerungsdichte zu bestimmen, wurde beim ersten Versuch jeder Big Bag über eine 20 kN Kraftmessdose gewogen. Da unterschiedliche Verdichtungsmethoden angewendet wurden, mussten Mengen ergänzt und das zusätzliche Gewicht aufgezeichnet werden. Die Einbauhöhe des Versuchsmaterials betrug 140 cm. Bei einer Länge von 263,6 cm und einer Breite von 101 cm der Box, ergab sich ein Volumen von 3,73 m³ eingebautem Material.



Abbildung 37: Befüllung mit Big Bag

5.2 Verdichtung

Um eine möglichst dichte Lagerung bei einigen Versuchen zu erreichen, wurde das Material lagenweise eingebaut und Schicht für Schicht mit einer Rüttelplatte verdichtet. Dadurch wurde eine Einbaudichte von ca. $1,59 \text{ g/cm}^3$ bzw. $1,64 \text{ g/cm}^3$ erreicht, im Gegensatz zum unverdichteten Einbau mit ca. $1,55 \text{ g/cm}^3$. Abbildung 38 zeigt die Rüttelplatte und Abbildung 39 die Rüttelplatte beim Verdichten der ersten Lage.



Abbildung 38: Rüttelplatte



Abbildung 39: Rüttelplatte beim Verdichten der ersten Lage

5.3 Oberfläche ebnen

Um eine möglichst ebene Oberfläche zu Beginn des Versuches zu erhalten, musste diese abgezogen werden. Dafür wurde eigens ein Wagen auf die Kanten der Seitenplatten des Modellbehälters aufgesetzt wie Abbildung 40 zeigt. Auf beiden Seiten des Wagens wurden Holzplatten montiert, welche die vorgegebene Höhe von 140 cm Befüllung garantierten. Mit dieser Methode konnte ein regelmäßiges ebenes Planum hergestellt werden.



Abbildung 40: Abziehhilfe

5.4 Oberflächenmessung

Nachdem die Oberfläche abgezogen wurde, musste eine Nullmessung an der Oberfläche gemacht werden. Dafür wurde das 3D-Messsystem nach dem definierten Raster verwendet. Diese Werte wurden dann allen weiteren Oberflächenmessungen gegenübergestellt und verglichen. Die Distanz, die vom Laser gemessen wurde, wurde dann händisch in eine Excel-Tabelle eingegeben. Danach konnte das Programm gestartet bzw. fortgesetzt werden.

5.5 Ausbau

Nach Abschluss des Versuchsdurchgangs wurde das Versuchsmaterial händisch ausgebaut. Dabei wurden die Big Bags mit der Big-Bag-Traverse von der Krananlage in den Modellbehälter geführt und der Kies zurückgeschaufelt, wie Abbildung 41 zeigt. Die Big Bags wurden dann im Labor gelagert, während die nächste Leerfahrt durchgeführt wurde.



Abbildung 41: Ausbau des Materials

5.6 Variationsbeschreibung

Für die Versuchsreihe wurden verschiedene Variationen von Verschiebung, Verdichtung und Zyklenanzahl durchgeführt. In Tabelle 2 werden die unterschiedlichen Versuche aufgelistet. Bei den rot hinterlegten Versuchen wurde die Widerlagerwand nur in Rotation versetzt. Die grau hinterlegten Zeilen zeigen die Versuche, welche sowohl mit Rotation als auch mit Translation gefahren wurden. Bei den kombinierten Versuchen werden die Verschiebewege von X- und Y-Achse getrennt dargestellt. Aufgrund eines Fehlers der Steuereinheit wurde Versuch 3 bereits nach 15 Zyklen beendet. Versuch 5 wurde ebenfalls nach 15 Zyklen abgebrochen, weil es zu einer Überlastung und folglich zu einem Schaden an der Versuchsanlage kam. Versuch 10 wurde nicht durchgeführt. In weiterer Folge werden die Ergebnisse auf der aktiven Seite der Widerlagerwand mit einem positiven Vorzeichen und die passiven Werte mit einem negativen Vorzeichen dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Versuche

	Rotation	Translation + Rotation	Weg [mm]	Startrichtung	Zyklusanzahl [-]	Wichten [g/cm ³]
Versuch 1	x		15	aktiv	20	1,54
Versuch 2	x		15	aktiv	20	1,55
Versuch 3	x		15	passiv	15	1,55
Versuch 4	x		15	aktiv	20	1,59
Versuch 5		x	15 & 5	aktiv	15	1,59
Versuch 6		x	10 & 2	aktiv	20	1,60
Versuch 7		x	10 & 2	aktiv	25	1,59
Versuch 8		x	10 & 2	aktiv	20	1,64
Versuch 9		x	10 & 2	aktiv	20	1,64
Versuch 10					nicht vorhanden	
Versuch 11	x		10	aktiv	20	1,64
Versuch 12	x		10	aktiv	30	1,66
Versuch 13		x	15 & 2	aktiv	30	1,65

Die Versuche unterscheiden sich, um Daten für unterschiedliche Randbedingungen zu simulieren. Einige Versuche unterscheiden sich sowohl in der Bewegungsart als auch in der Weglänge. Eine Variation der Wichten entstand durch die unterschiedliche Verdichtung beim Einbau. Auch die Startrichtung ist nicht bei jedem Versuch identisch. Bei zwei Versuchen wurde bis 30 Zyklen gefahren, um die mögliche Kräftesteigerung für eine höhere Anzahl von Zyklen festzustellen.

5.6.1 Durchgeführte Variationen

Versuch 1 wurde mit reiner Rotation gefahren. Der Verschiebungsweg betrug dabei 15 mm. Eine Verdichtung wurde nicht vorgenommen. Um die Ergebnisse aus Versuch 1 zu bestätigen, wurde der Versuch 2 gleich durchgeführt. Bei Versuch 3 wurde in die passive Richtung gestartet, um herauszufinden welchen Einfluss die Änderung der Startrichtung auf die gemessenen Kräfte hat. Beim vierten Versuch wurde zum ersten Mal mit höherer Verdichtung gearbeitet. In dem Fall kam die Rüttelplatte zum Einsatz. Die Rotationsversuche 11 und 12 wurden mit geringerer Verschiebung gefahren. Diese wurde auf 10 mm reduziert. Da bei dieser Bewegung die Verdichtung in 15 bzw. 30 cm Schichten erfolgte, konnte eine höhere Wichte erreicht werden. Diese Eigenschaft spiegelt sich auch in den gemessenen Kräften wider.

Die Versuche 5-9 und 13 wurden mit einer Kombination aus Rotation und Translation durchgeführt. Die größte Auslenkung wurde dabei bei Versuch 5 aufgebracht. Mit 15 mm am oberen Auflager und einem Weg von 5 mm am unteren, überstieg diese Belastung die

Stabilität der Anlage und führte zu einer Beschädigung. Aufgrund dieses Zwischenfalles wurden die kombinierten Versuche nur noch mit 2 mm Weg an der unteren Achse durchgeführt. Versuch 6 und 7 wurden unter gleichen Bedingungen gefahren. Der einzige Unterschied lag in der Zyklenzahl. Bei Versuch 8 und 9 wurden die Verdichtungsmaßnahmen noch intensiviert. Versuch 13 unterschied sich durch den Verschiebeweg in der Y-Achse. Dieser betrug 15 mm. Auch die Zyklenzahl wurde erhöht, damit eine später durchgeführte Extrapolation genauer möglich gemacht werden konnte.

6 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der durchgeführten Versuche präsentiert. Dabei wird auf die Verformung und die Entwicklung der horizontalen Kräfte über die Zyklen eingegangen. Hierbei wird jedoch erwähnt, dass die gemessenen Kräfte auf Grund der Modellgesetze nicht einfach hochskaliert werden dürfen.

6.1 Ergebnisse des Verformungsverhaltens

In diesem Kapitel wird das Verformungsverhalten der Versuche 1 bis 13 gezeigt. Dabei wurden die einzelnen Längenschnitte 2L bis 6L ausgewertet. Zur besseren Darstellung und um die Einflüsse der punktuellen Messung der Oberfläche zu minimieren, wurde diese als gemittelte Setzungsmulde zusammengefasst. Die Randlängenschnitte 1L und 7L wurden vernachlässigt, um Randsetzungen bzw. Einflüsse der Modell-Seitenwände zu verringern. Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abbildung 42 die dreidimensionale Setzungsmulde von Versuch 1. Die Abbildung wird überhöht dargestellt.

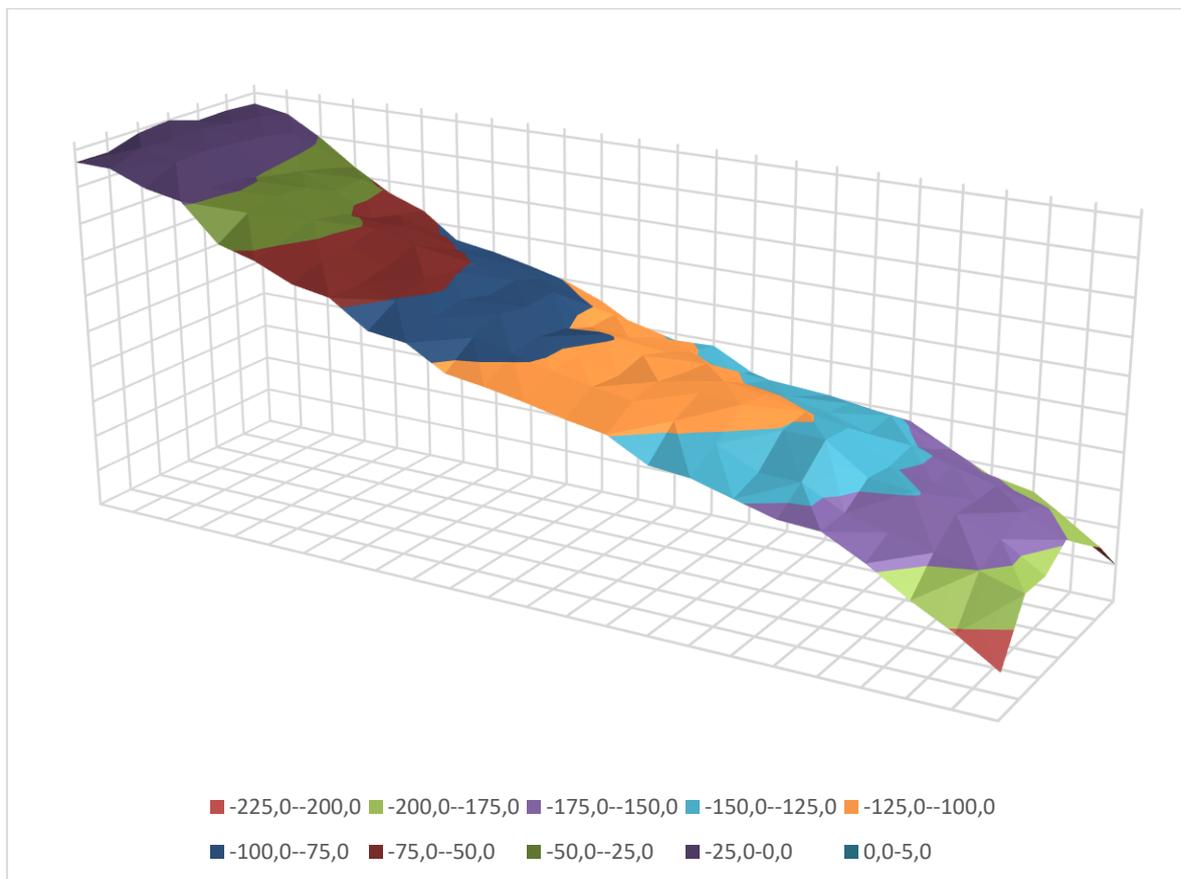


Abbildung 42: 3D - Setzungsmulde

6.1.1 Versuch 1

Versuch 1 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von ± 10 mrad und einer reinen Rotationsbewegung. Die Einbaudichte betrug $1,54 \text{ g/cm}^3$.

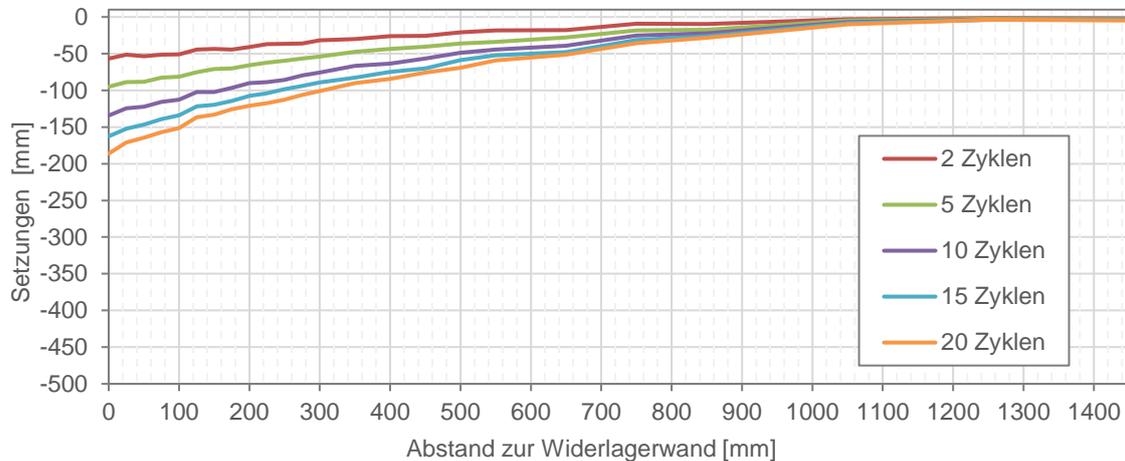


Abbildung 43: Gemittelte Setzungslinien Versuch 1

In Abbildung 43 sind die Setzungslinien des Versuches 1 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 1200 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen $-56,7$ mm, nach 5 Zyklen $-95,0$ mm, nach 10 Zyklen $-134,3$ mm, nach 15 Zyklen $-162,6$ mm und nach 20 Zyklen $-186,1$ mm.

6.1.2 Versuch 2

Versuch 2 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von ± 10 mrad und einer reinen Rotationsbewegung. Die Einbaudichte betrug $1,55 \text{ g/cm}^3$.

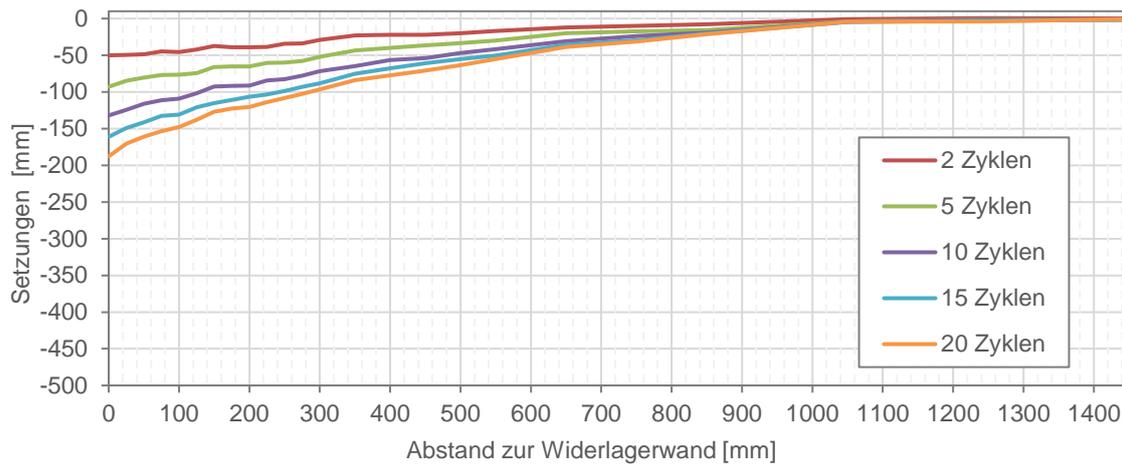


Abbildung 44: Gemittelte Setzungslinien Versuch 2

In Abbildung 44 sind die Setzungslinien des Versuches 2 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 1100 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -50,1 mm, nach 5 Zyklen -93,0 mm, nach 10 Zyklen -132,0 mm, nach 15 Zyklen -161,2 mm und nach 20 Zyklen -187,8 mm.

Versuch 1 und Versuch 2 wurden unter praktisch gleichen Randbedingungen durchgeführt. Die dargestellten Setzungsmulden zeigen eine sehr große Übereinstimmung, was eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse belegt.

6.1.3 Versuch 3

Versuch 3 wurde in passiver Richtung gestartet. Bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von ± 10 mrad und einer reinen Rotationsbewegung. Die Einbaudichte betrug $1,55 \text{ g/cm}^3$. Durch betriebliche Störung der Antriebseinheit in der Phase zwischen den Zyklen 15 und 20 wurde die Letzte Oberflächenmessung nach 15 Zyklen herangezogen.

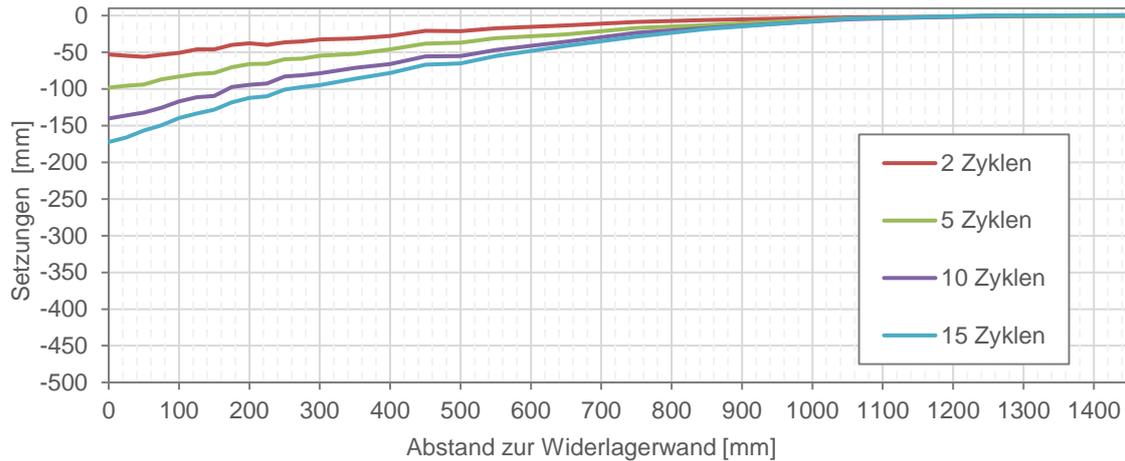


Abbildung 45: Gemittelte Setzungslinien Versuch 3

In Abbildung 45 sind die Setzungslinien des Versuches 3 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 1100 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Auch hier zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Nach 2 Zyklen sind die größten Setzungen nicht direkt hinter der Widerlagerwand, sondern ca. 50 mm davon entfernt. Nach weiteren Zyklen sind diese wieder direkt hinter der Widerlagerwand. Die tiefsten Werte betragen nach 2 Zyklen -56,2 mm, nach 5 Zyklen -98,2 mm, nach 10 Zyklen -140,2 mm und nach 15 Zyklen -172,4 mm.

6.1.4 Versuch 4

Versuch 4 wurde in aktiver Richtung gestartet. Bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von ± 10 mrad und einer reinen Rotationsbewegung. Die Einbaudichte betrug $1,59 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten (30 cm Schichten) erreicht.

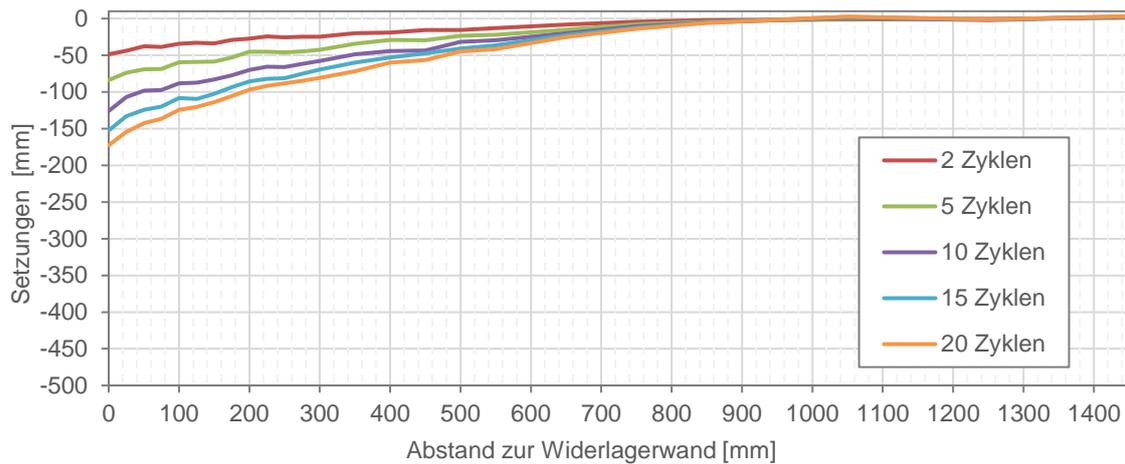


Abbildung 46: Gemittelte Setzungslinien Versuch 4

In Abbildung 46 sind die Setzungslinien des Versuches 4 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 980 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -48,7 mm, nach 5 Zyklen -83,8 mm, nach 10 Zyklen -126,0 mm, nach 15 Zyklen -152,6 mm und nach 20 Zyklen -172,7 mm.

6.1.5 Versuch 5

Versuch 5 wurde in aktiver Richtung gestartet. Es handelte sich um eine Kombination aus Rotation und Translation bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von $\pm 6,4$ mrad und einer Verschiebung von ± 5 mm. Die Einbaudichte betrug $1,59 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten (30 cm Schichten) erreicht. Durch zu hohe Kräfte und einer Überlastung der Versuchseinrichtung musste der Versuch nach 15 Zyklen abgebrochen werden.

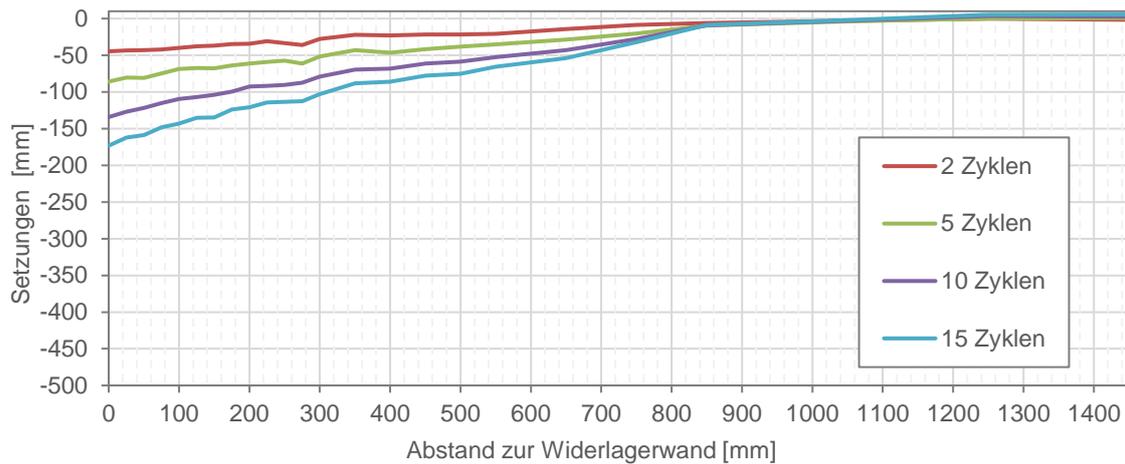


Abbildung 47: Gemittelte Setzungslinien Versuch 5

In Abbildung 47 sind die Setzungslinien des Versuches 5 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 860 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich dort ein Knick wobei dahinter kaum Setzungen auftreten. Ein weiterer Knick ist bei ca. 270 mm zu erkennen. Des Weiteren zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -44,7 mm, nach 5 Zyklen -85,9 mm, nach 10 Zyklen -134,2 mm und nach 15 Zyklen -173,3 mm.

6.1.6 Versuch 6

Versuch 6 wurde in aktiver Richtung gestartet. Es handelte sich um eine Kombination aus Rotation und Translation bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von $\pm 5,2$ mrad und einer Verschiebung von ± 2 mm. Die Einbaudichte betrug $1,60 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten (30 cm Schichten) erreicht.

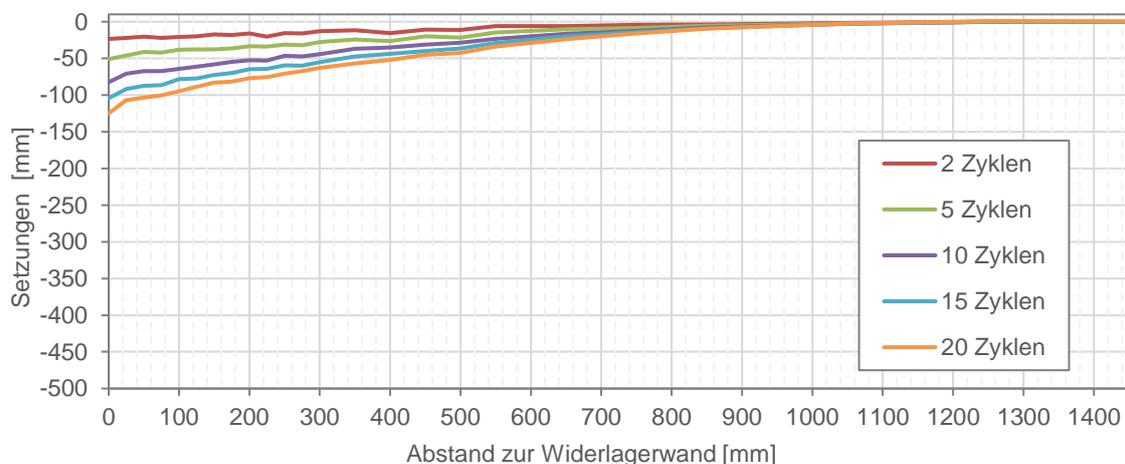


Abbildung 48: Gemittelte Setzungslinien Versuch 6

In Abbildung 48 sind die Setzungslinien des Versuches 6 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 1050 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -23,6 mm, nach 5 Zyklen -51,0 mm, nach 10 Zyklen -82,5 mm, nach 15 Zyklen -104,3 mm und nach 20 Zyklen 124,9 mm.

6.1.7 Versuch 7

Versuch 7 wurde in aktiver Richtung gestartet. Es handelte sich um eine Kombination aus Rotation und Translation bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von $\pm 5,2$ mrad und einer Verschiebung von ± 2 mm. Die Einbaudichte betrug $1,59 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten erreicht. Bei diesem Versuch wurden 25 Zyklen durchgeführt.

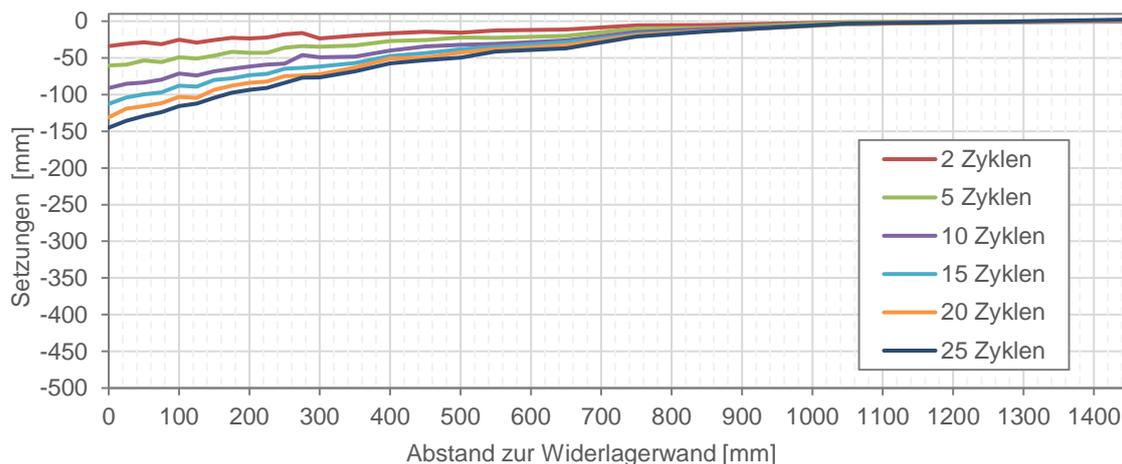


Abbildung 49: Gemittelte Setzungslinien Versuch 7

In Abbildung 49 sind die Setzungslinien des Versuches 7 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 1050 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -34,0 mm, nach 5 Zyklen -60,4 mm, nach 10 Zyklen -91,1 mm, nach 15 Zyklen -112,7 mm, nach 20 Zyklen 131,0 mm und nach 25 Zyklen 145,1 mm.

6.1.8 Versuch 8

Versuch 8 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Es handelte sich um eine Kombination aus Rotation und Translation bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von

$\pm 5,2$ mrad und einer Verschiebung von ± 2 mm. Die Einbaudichte betrug $1,64 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten erreicht.

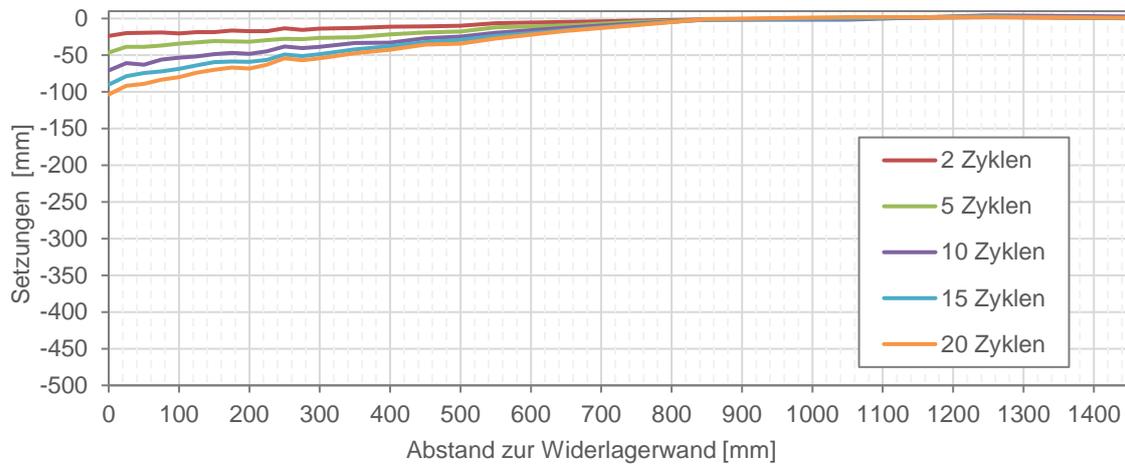


Abbildung 50: Gemittelte Setzungslinien Versuch 8

In Abbildung 50 sind die Setzungslinien des Versuches 8 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 850 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Ein leichtes Abflachen der Setzungslinien zeigt sich bei 270 mm. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -23,7 mm, nach 5 Zyklen -46,4 mm, nach 10 Zyklen -70,8 mm, nach 15 Zyklen 90,1 mm und nach 20 Zyklen 103,6 mm.

6.1.9 Versuch 9

Versuch 9 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Es handelte sich um eine Kombination aus Rotation und Translation bei einer Auslenkung der Modell-Widerlagerwand von $\pm 5,2$ mrad und einer Verschiebung von ± 2 mm. Die Einbaudichte betrug $1,64 \text{ g/cm}^3$. Diese wurde durch lagenweises Verdichten erreicht.

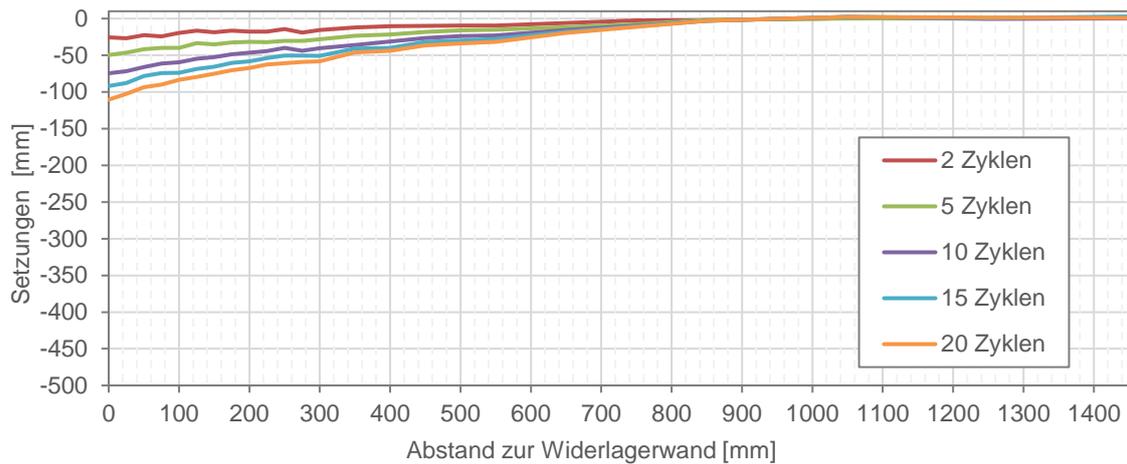


Abbildung 51: Gemittelte Setzungslinien Versuch 9

In Abbildung 51 sind die Setzungslinien des Versuches 9 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 850 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -25,8 mm, nach 5 Zyklen -49,7 mm, nach 10 Zyklen -74,6 mm, nach 15 Zyklen 91,9 mm und nach 20 Zyklen -110,5 mm.

6.1.1 Versuch 11

Versuch 11 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Die Bewegung der Modell-Widerlagerwand war eine Rotation mit einer Neigung der Wand von $\pm 6,4$ mrad. Die Einbaudichte betrug $1,64 \text{ g/cm}^3$.

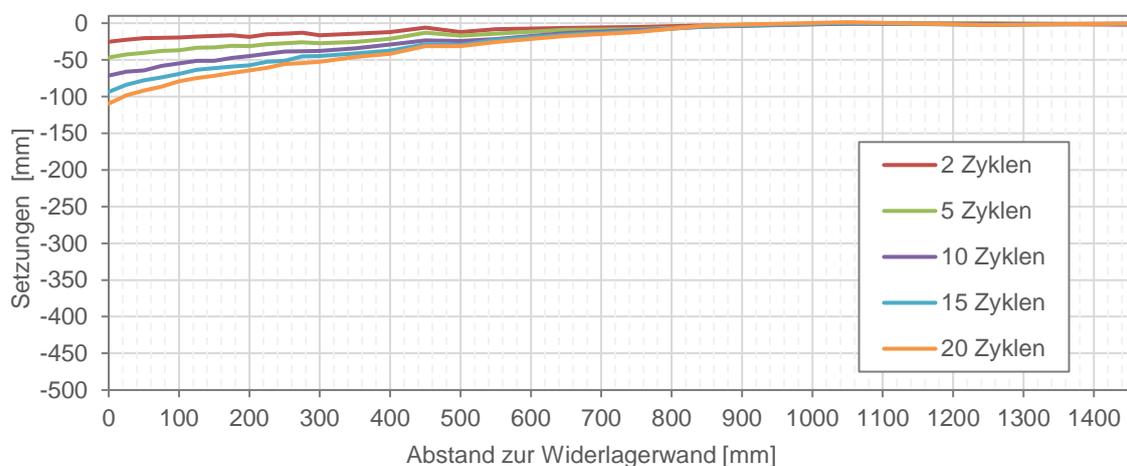


Abbildung 52: Gemittelte Setzungslinien Versuch 11

In Abbildung 52 sind die Setzungslinien des Versuches 11 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 850 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Nach 2 und 10 Zyklen sind bei ca. 280 mm und 450 mm leichte Knicke erkennbar. Ansonsten zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -25,4 mm, nach 5 Zyklen -46,8 mm, nach 10 Zyklen -71,4 mm, nach 15 Zyklen -93,6 mm und nach 20 Zyklen -109,7 mm.

6.1.2 Versuch 12

Versuch 12 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Die Bewegung der Modell-Widerlagerwand war eine Rotation mit einer Neigung der Wand von $\pm 6,4$ mrad. Die Einbaudichte betrug $1,66 \text{ g/cm}^3$. Bei diesem Versuch wurde die Anzahl der Zyklen auf 30 erhöht.

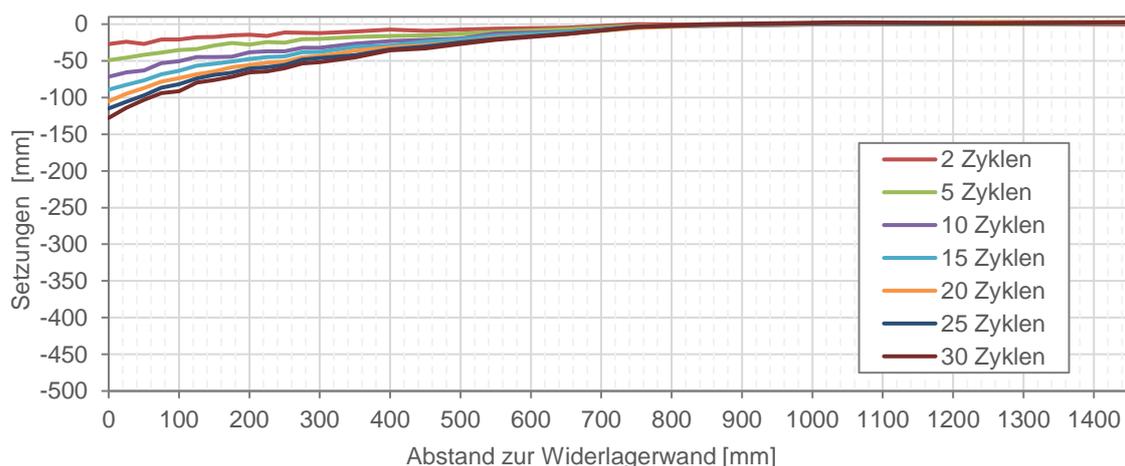


Abbildung 53: Gemittelte Setzungslinien Versuch 12

In Abbildung 53 sind die Setzungslinien des Versuches 12 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 770 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen -27,1 mm, nach 5 Zyklen -49,0 mm, nach 10 Zyklen -71,7 mm, nach 15 Zyklen -89,3 mm, nach 20 Zyklen -105,1 mm, nach 25 Zyklen -114,9 mm und nach 30 Zyklen -127,8 mm.

6.1.3 Versuch 13

Versuch 13 wurde in der aktiven Richtung gestartet. Die Bewegung der Modell-Widerlagerwand war eine Rotation mit einer Neigung der Wand von ± 9 mrad und einer Translation mit einer Verschiebung von ± 2 mm. Die Einbaudichte betrug $1,65 \text{ g/cm}^3$. Bei diesem Versuch wurde die Anzahl der Zyklen auf 30 erhöht.

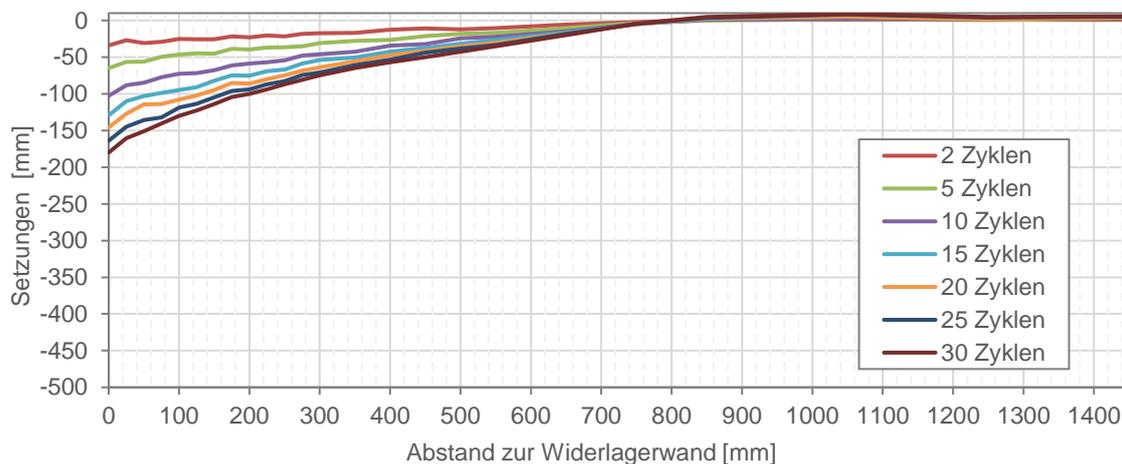


Abbildung 54: Gemittelte Setzungslinien Versuch 13

In Abbildung 54 sind die Setzungslinien des Versuches 13 dargestellt. Die Setzungsmulde reicht bis ca. 750 mm hinter die Modell-Widerlagerwand. Ab dem 10. Zyklus zeigen sich nach 750 mm leichte Hebungen, die ihr Maximum bei ca. 1050 mm erreichen und in weiterer Folge wieder abklingen. Es zeigt sich ein leicht gekrümmter Verlauf. Versagensebenen oder auffällige Knicke sind nicht zu beobachten. Die größten Setzungen sind bei allen Zyklen direkt hinter der Widerlagerwand. Diese betragen nach 2 Zyklen $-34,0$ mm, nach 5 Zyklen $-65,0$ mm, nach 10 Zyklen $-102,7$ mm, nach 15 Zyklen $-129,4$ mm, nach 20 Zyklen $-145,9$ mm, nach 25 Zyklen $-163,8$ mm und nach 30 Zyklen $-180,0$ mm.

6.2 Ergebnisse der Kräfteverläufe

Repräsentativ werden für eine Rotationsbewegung der Versuch 1 und für eine kombinierte Beanspruchung aus Rotation und Translation der Versuch 7 dargestellt und interpretiert. Für eine bessere Darstellung wurde in jedem Diagramm der erste Zyklus mit einer dicken Linie hervorgehoben. Bei den Diagrammen wurden immer die Mittelwerte der am Auflager auftretenden Kräfte herangezogen.

6.2.1 Kräfteverläufe Versuch 1

Versuch 1 startet in aktiver Richtung. In Abbildung 55 ist der Kräfteverlauf, welcher sich im oberen Auflager einstellte, im Diagramm dargestellt. Bei dem Startwert in aktiver Richtung gibt es eine leichte Absenkung der Kraft bis sich der Verlauf nahezu horizontal einstellt. Nachdem der Wendepunkt erreicht ist, steigt die Kraft kontinuierlich nahezu konstant bis zum Wendepunkt auf der passiven Seite an. Nachdem die Richtung der Widerlagerwand wieder umgekehrt wurde, kommt es zu einem Abfall, welcher sich auf einem Weg von etwa 4 mm einstellt. Wie im Diagramm ersichtlich ist, stellt sich nach dem Abfall wieder ein konstanter Verlauf ein, welcher beim 0-Durchgang in etwa die Größe des Startwertes ergibt. Bis zum Wendepunkt auf aktiver Seite ändern sich hier auch bei weiteren Zyklen die Größen der Kräfte kaum. Mit Fortschreiten des Versuches über die Zyklen ist zu beobachten, dass eine Erhöhung der Werte beim passiven Wendepunkt erst schnell, bei späteren Zyklen dann etwas langsamer auftritt. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die Bewegung der Widerlagerwand eine Verdichtung des Versuchsmaterials einstellt. Zu bemerken ist auch, dass sich beim letzten Zyklus vom Wendepunkt auf der Passivseite der Abfall auf den Endwert erst nach einer Verschiebung der Widerlagerwand von 10 mm einstellt.

Auflager oben

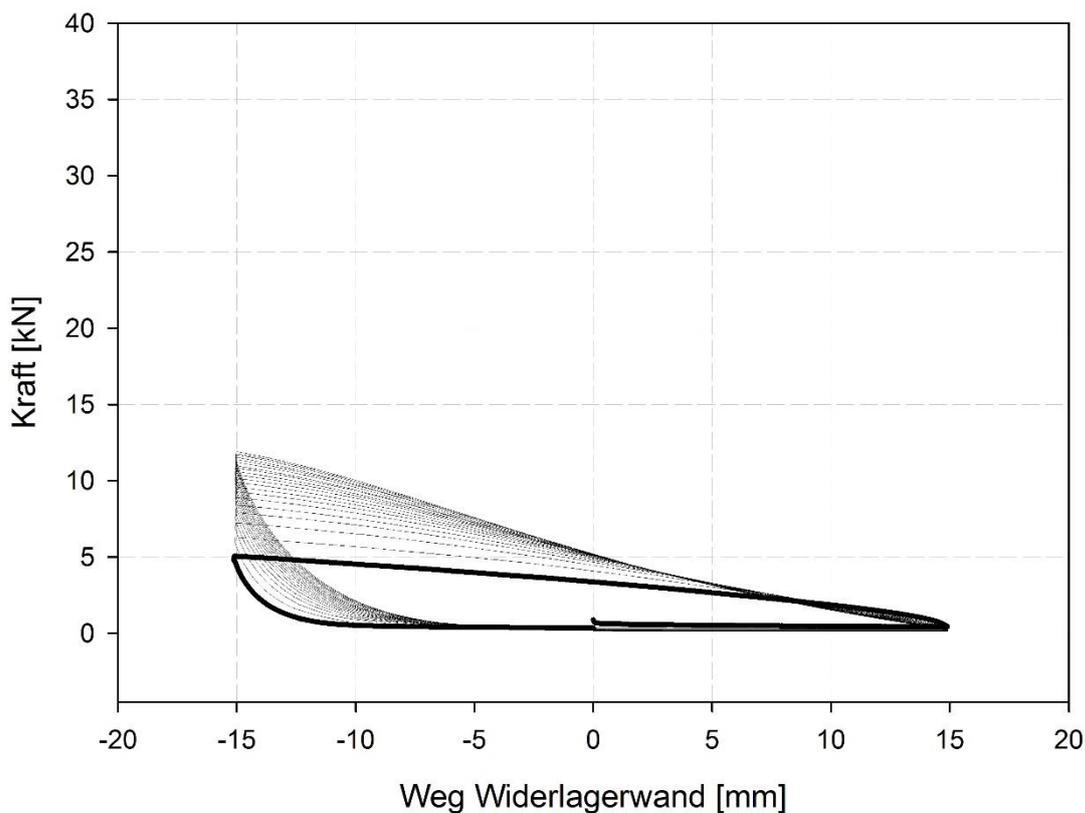


Abbildung 55: Kräfteverlauf Auflager oben Versuch 1

Am unteren Auflager (siehe Abbildung 56) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei dem oberen Auflager. Die Kraft, welche sich vom Wendepunkt auf der passiven Seite zur aktiven hin verändert, nimmt bereits beim ersten Zyklus erst nach 15 mm Fahrweg wieder ungefähr den Startwert an. Im weiteren Verlauf des Versuches erhöht sich dieser Wert bis zum Wendepunkt auf der aktiven Seite. Die Maximalwerte auf der Passivseite steigen von 6 kN auf 13,5 kN an.

Auflager unten

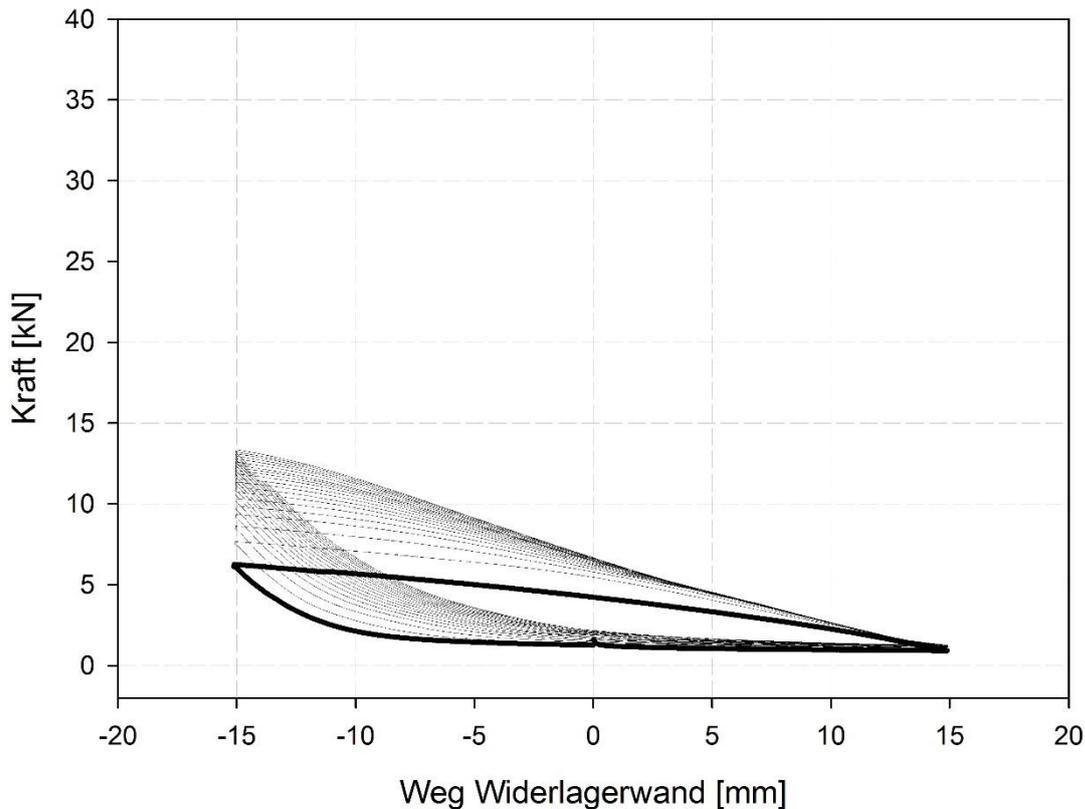


Abbildung 56: Kräfteverlauf Auflager unten Versuch 1

Bei der oberen Wandachse (siehe Abbildung 57) ist zu erkennen, dass die Kräfte vom Startwert beginnend einen konstanten Verlauf zum aktiven Wendepunkt aufweisen. Bei der Bewegung der Widerlagerwand in die passive Richtung steigt der Kräfteverlauf nahezu linear bis zum Wendepunkt auf passiver Seite an. Eine leichte Krümmung nach oben ist zu erkennen. Bewegt sich die Widerlagerwand anschließend wieder in die aktive Richtung, kommt es zu einem schnellen Abfall der Kräfte. Dieses Verhalten findet auf ca. 3 mm statt. Beim Übergang zum zweiten Zyklus ist die auftretende Kraft leicht unter dem des Startwertes. Mit dem Fortschreiten des Versuches erhöht sich die Kraft auf der passiven Seite erst schnell und dann mit späteren Zyklen immer weniger. Der Abbau der Kräfte vom Wechsellpunkt auf der passiven Seite in Richtung aktive wird ebenfalls deutlich länger. Bei Zyklus 20 erreicht die Kraft erst kurz vor dem 0-Durchgang den horizontalen Verlauf. Sprünge im Kräfteverlauf sind nicht zu beobachten. Das Absinken der Kraft unter den Startwert in Richtung aktiver Seite ist von den Autoren nicht erklärbar. Dieser Effekt tritt bei den weiteren Versuchen nicht so stark ausgeprägt auf.

Wandachse oben

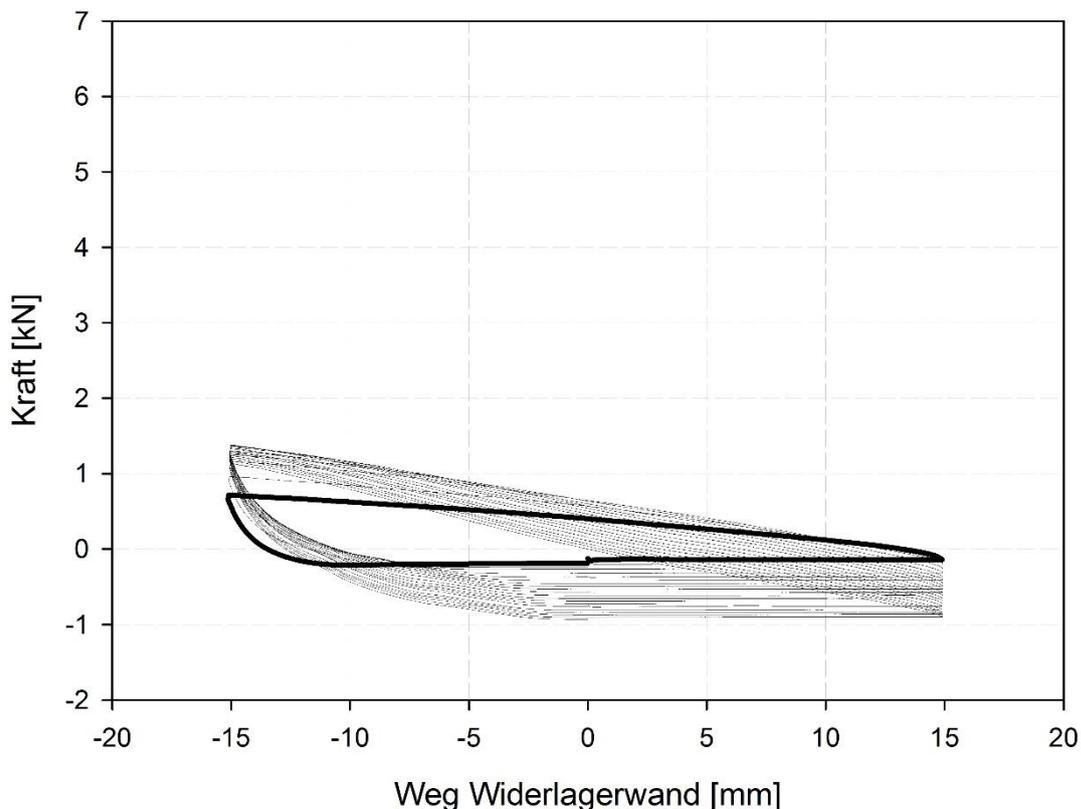


Abbildung 57: Kräfteverlauf Wandachse oben Versuch 1

In Abbildung 58 wird die mittlere Wandachse gezeigt, die der oberen Wandachse gleicht. Es ergibt sich ein konstanter Verlauf der Kräfte bei der Bewegung zur aktiven Seite. Auch die Steigung des Kräfteverlaufes in passive Richtung ist dem der oberen Wandachse ähnlich. Der Abfall nach dem Wendepunkt findet auf etwa 3 mm statt. Die Linie zeigt bei dieser Wandachse jedoch eine leichte S-Kurve. Anschließend zeigt der Kraftverlauf wieder einen konstanten Wert. Beim 0-Durchgang kann ein etwas geringerer Wert als der Startwert beobachtet werden. Mit fortschreitenden Zyklen ändert sich die Form des Verlaufes. Beim letzten Zyklus ist eine starke Steigung des Kräfteverlaufes nach dem Wendepunkt auf aktiver Seite zu sehen. Diese flacht bis zum passiven Wendepunkt weniger ab als es noch im ersten Zyklus der Fall ist. Auch der Abfall nachdem die Widerlagerwand sich wieder zur aktiven Seite bewegt, findet sehr rasant statt. Dennoch tritt ein konstanter Verlauf erst bei etwa 4 mm vor dem 0-Durchgang ein.

Wandachse Mitte

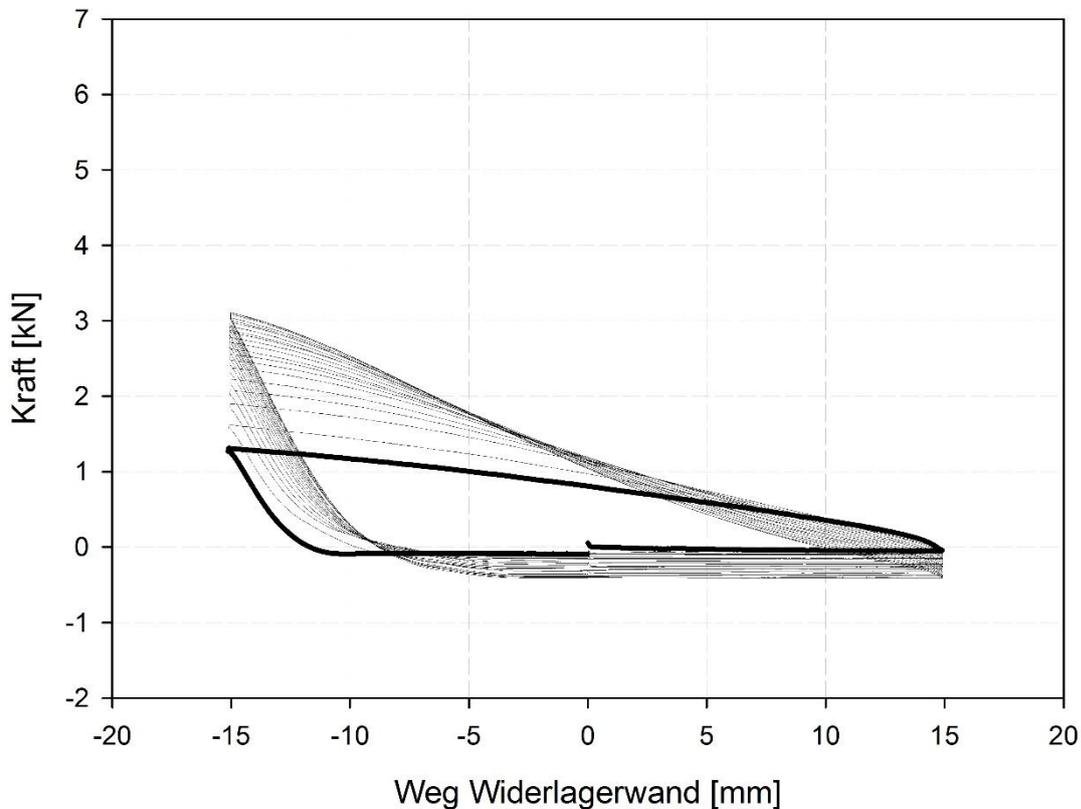


Abbildung 58: Kräfteverlauf Wandachse Mitte Versuch 1

Der Mittelwert der Kraft in der untersten Wandachse (siehe Abbildung 59) fällt innerhalb des ersten Millimeters an Bewegung ab und verläuft anschließend leicht fallend und linear bis zum aktiven Wendepunkt. Bei der Wende der Widerlagerwand steigt die Kraft in konvexer Form an. Nachdem der Weg wieder umgekehrt wird, fällt die Kraft in einer S-förmigen Linie ab. Dies geschieht innerhalb der ersten 7 mm. Beim Beginn von Zyklus 2 ist die auftretende Kraft an der unteren Wandachse geringer als der Startwert. Zu beobachten ist, dass sich beim passiven Wendepunkt bei Zyklus 3 eine horizontale Tangente an der Linie ausbildet. Bei jedem weiteren Zyklus kommt es nach dem Wendepunkt der Widerlagerwand zu einer Steigerung der Kräfte. Somit ist die maximale Kraft erst nach ca. 2 mm in aktiver Richtung erreicht. Der Punkt des Maximalwertes wird mit jedem weiteren Zyklus weiter in Richtung des 0-Durchgangs verlagert. Der darauffolgende Abfall geschieht in einer langgezogenen Kurve bis unterhalb des Startwertes. Bei Zyklus Nr. 20 wird bei Bewegung in aktiver Richtung ein horizontaler Verlauf erst beim 0-Durchgang wieder erreicht.

Wandachse unten

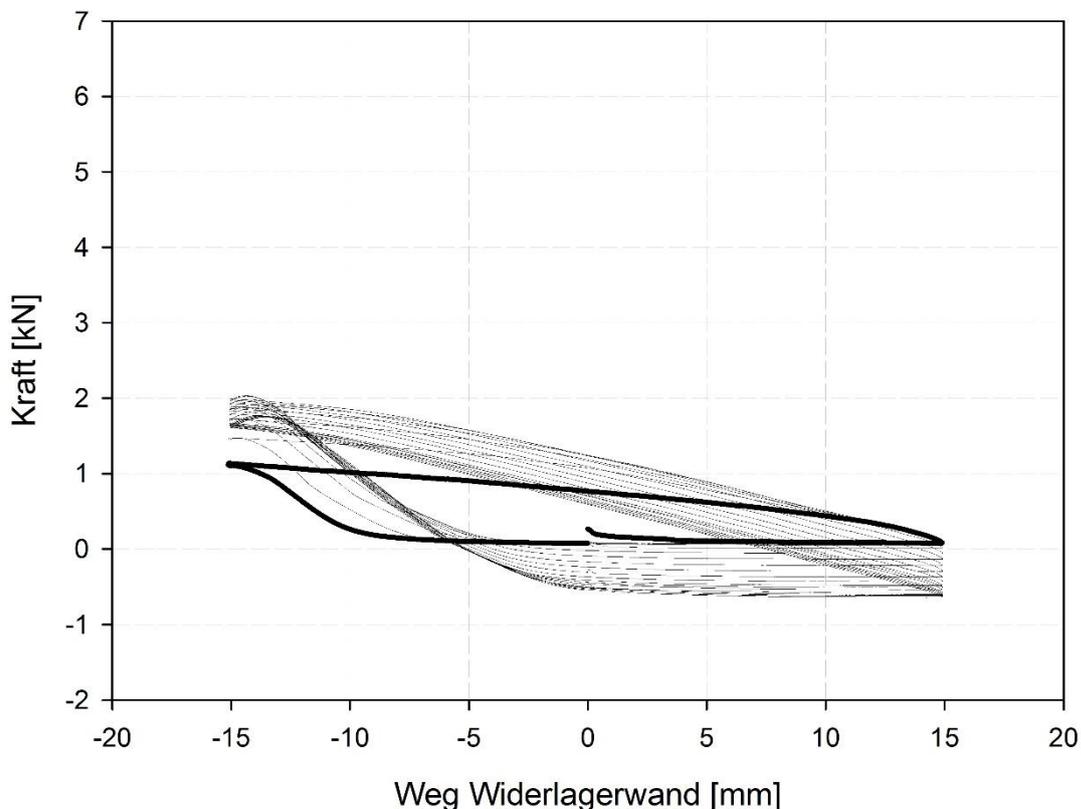


Abbildung 59: Kräfteverlauf Wandachse unten Versuch 1

In Abbildung 60 werden die Kräfte, welche an der Rückwand an der oberen Achse ankommen, dargestellt. Da der Behälter nur 3,0 m lang war, sind die Auswirkungen der bewegten Widerlagerwand messbar. Vom Startpunkt aus bleibt bei Bewegung der Widerlagerwand in aktiver Richtung der Kräfteverlauf konstant. Ab dem Wendepunkt steigt die auftretende Kraft kontinuierlich nahezu linear. Dieser Teil des Verlaufes zeigt sich bei späteren Zyklen in gekrümmter Form. Bei der Bewegung vom passiven zum aktiven Bereich reduzieren sich die Kräfte nach 5 mm Fahrweg auf den ursprünglichen Startwert. Beim 0-Durchgang beträgt die Kraft in etwa die gleiche Größe wie beim Startwert des ersten Zyklus. Bei den letzten Zyklen ist zu beobachten, dass der Abbau der Kraft vom Wendepunkt auf der passiven Seite zur aktiven einen längeren Weg benötigt um wieder auf das Niveau des Startwertes geht. Dieser Weg ist bei Zyklus 20 bereits 15 mm lang.

Rückwand oben

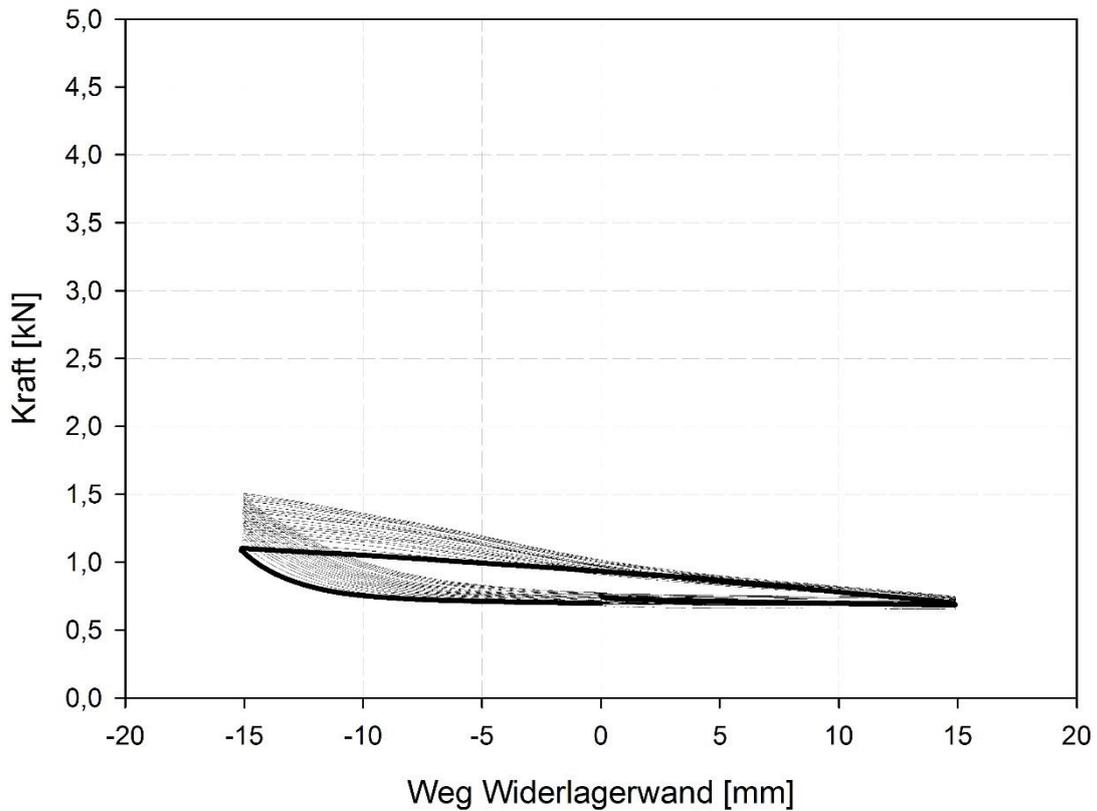


Abbildung 60: Kräfteverlauf Rückwand oben Versuch 1

In Abbildung 61 wird der Kräfteverlauf an der unteren Rückwandachse dargestellt. Am Startpunkt kommt es zu einem leichten Abfall der Kräfte bis zum Wendepunkt auf der aktiven Seite. Bewegt sich die Widerlagerwand in die passive Richtung, so entsteht ein konvexer Verlauf bis zum Maximalwert auf der Passivseite. Nach dem Wendepunkt fällt die Kraft an der unteren Rückwand zuerst schnell, dann etwas langsamer bis zum 0-Durchgang hin ab. Der Maximalwert auf der passiven Seite steigt auf 1,4 kN.

Rückwand unten

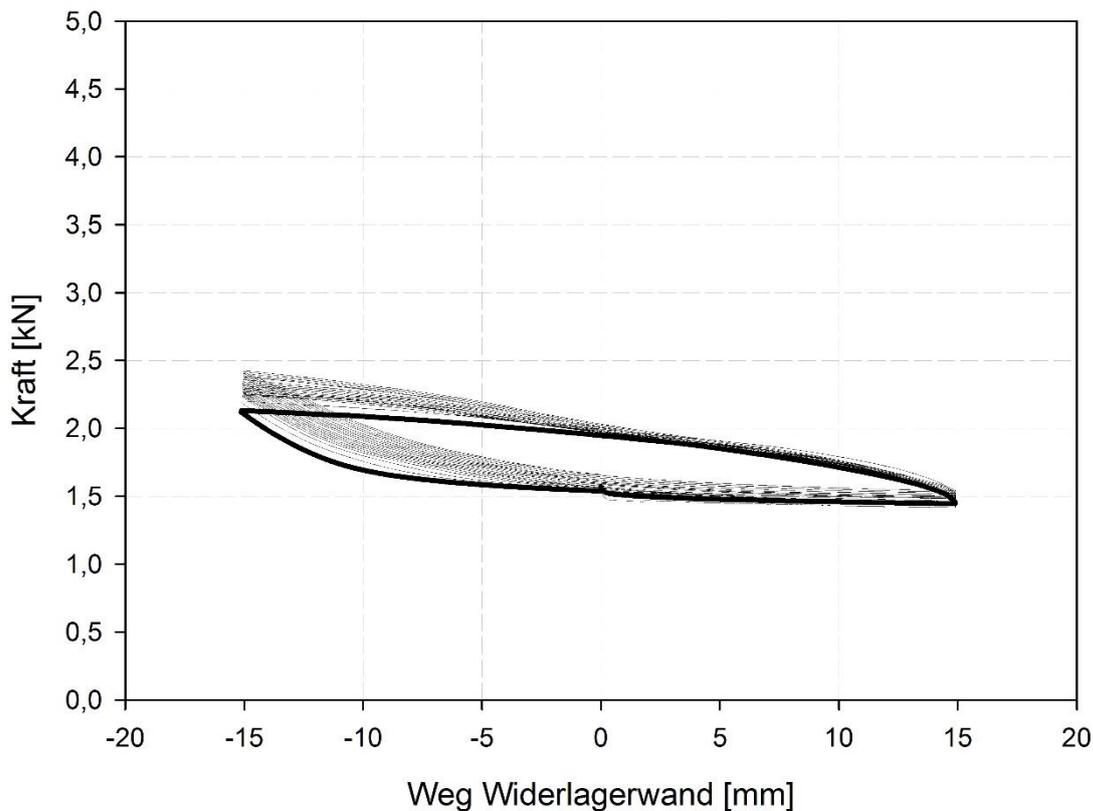


Abbildung 61: Kräfteverlauf Rückwand unten Versuch 1

6.2.2 Kräfteverläufe Versuch 7

Bei Versuch 7 wird die Modellwiderlagerwand in die aktive Richtung gestartet. Es wurden 25 Zyklen gefahren um festzustellen, ob die Kräftesteigerung noch nach dieser Anzahl an Zyklen sich signifikant verändert. Die Verdichtung bei diesem Versuch erfolgte in Schichten von 30 cm. Bei diesem Versuch wird Rotation und Translation aufgebracht. Der Weg der Widerlagerwand beträgt 10 mm in jede Richtung.

Vom Startpunkt aus stellt sich ein konstanter Verlauf bis zum Wendepunkt auf der aktiven Seite ein (siehe Abbildung 62). Wird die Widerlagerwand in die passive Richtung bewegt, kommt es zu einer nahezu linearen Steigerung der Kraft im oberen Auflager. Der Abfall nach dem Wendepunkt geschieht nicht abrupt, sondern auf einer Verschiebung von 5 mm. Der Wert beim 0-Durchgang liegt dann in etwa auf der Höhe des Startwertes. Bei den letzten Zyklen verändert sich die Anfangssteigung nach dem Wendepunkt auf der aktiven Seite. Der Anstieg der Kraft findet dann etwas langsamer statt. Obwohl der Weg der Widerlagerwand nur ± 10 mm beträgt, kommt es am Wendepunkt auf der passiven Seite

zu einer Krafterhöhung nach 25 Zyklen von 6 auf 14 kN. Die ist durch die höhere Verdichtung beim Einbau des Materials erklärbar. Mit steigenden Kräften ergibt sich auch ein längerer Weg zum Abbau bei der Bewegung zur aktiven Seite. Dieser beträgt nach 25 Zyklen 8 mm.

Auflager oben

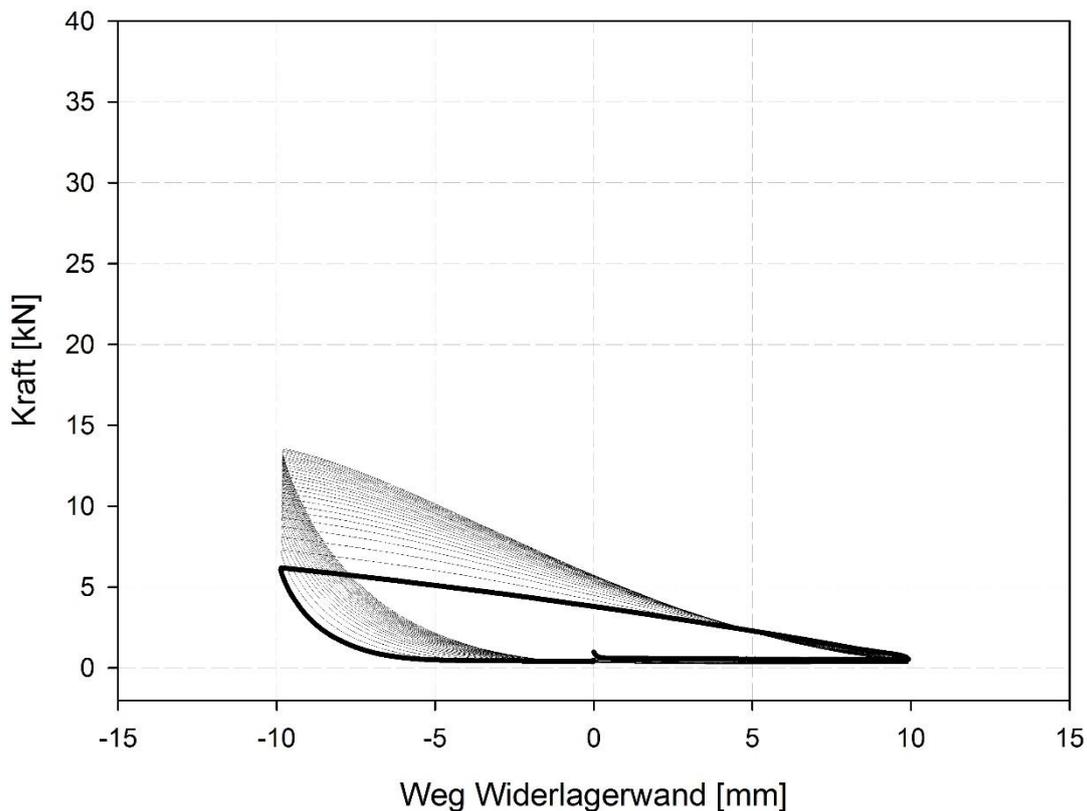


Abbildung 62: Kräfteverlauf Auflager oben Versuch 7

In Abbildung 63 wird der Kräfteverlauf des unteren Auflagers dargestellt. Offensichtlich ist, dass sich der Verlauf stark von dem des oberen Auflagers unterscheidet. Nach einem rapiden Abfall der Kraft direkt nach dem Versuchsstart kommt es zu einem konstant bleibenden Verlauf. Nach dem Wendepunkt auf der aktiven Seite, sinkt die Kraft sogar nach 2 mm Fahrt unter den Wert am aktiven Wendepunkt. 3 mm nach dem aktiven Wendepunkt entsprechen sich die beiden Kräfteverläufe im Betrag. Mit der weiteren Bewegung der Modell-Widerlagerwand in die passive Richtung kommt es zu einem leicht konvexen Verlauf bis zum Wendepunkt auf der passiven Seite. In einer S-Kurve wird die passive Maximalkraft über 7 mm wieder auf den Betrag des Startwertes abgebaut. Beim 25ten Zyklus ändert sich der Verlauf im Bereich vom aktiven Wendepunkt zum passiven Wendepunkt in ihrer Form. Hier stellt sich wieder eine S-Form der Linie ein.

Auflager unten

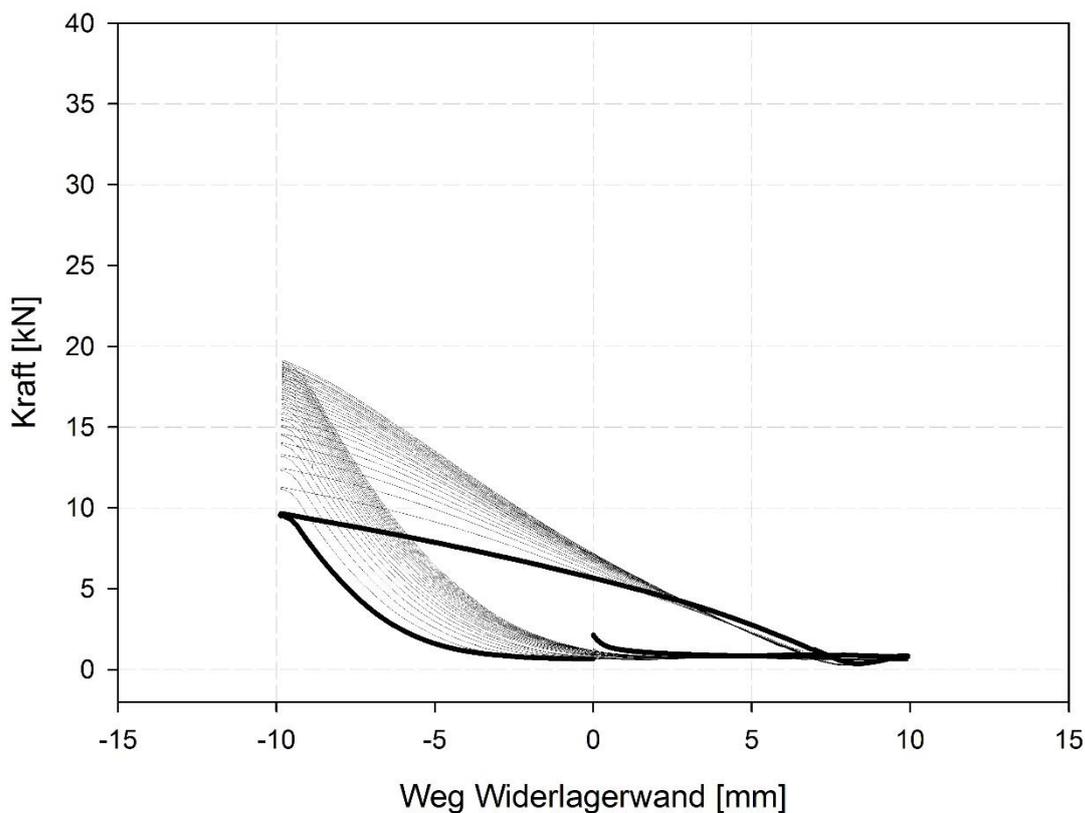


Abbildung 63: Kräfteverlauf Auflager unten Versuch 7

An der oberen Wandachse entwickelt sich der Kräfteverlauf (siehe Abbildung 64) nach dem Startwert konstant. Nach dem Richtungswechsel steigen die Kräfte leicht bauchig an. Nach dem passiven Wendepunkt fällt die Last nach 5 mm wieder auf den Startwert zurück. In den letzten Zyklen wird der Verlauf vom aktiven Wendepunkt zum passiven hin linear. Die letzten 5 Zyklen sind dann in diesem Bereich nahezu identisch.

Wandachse oben

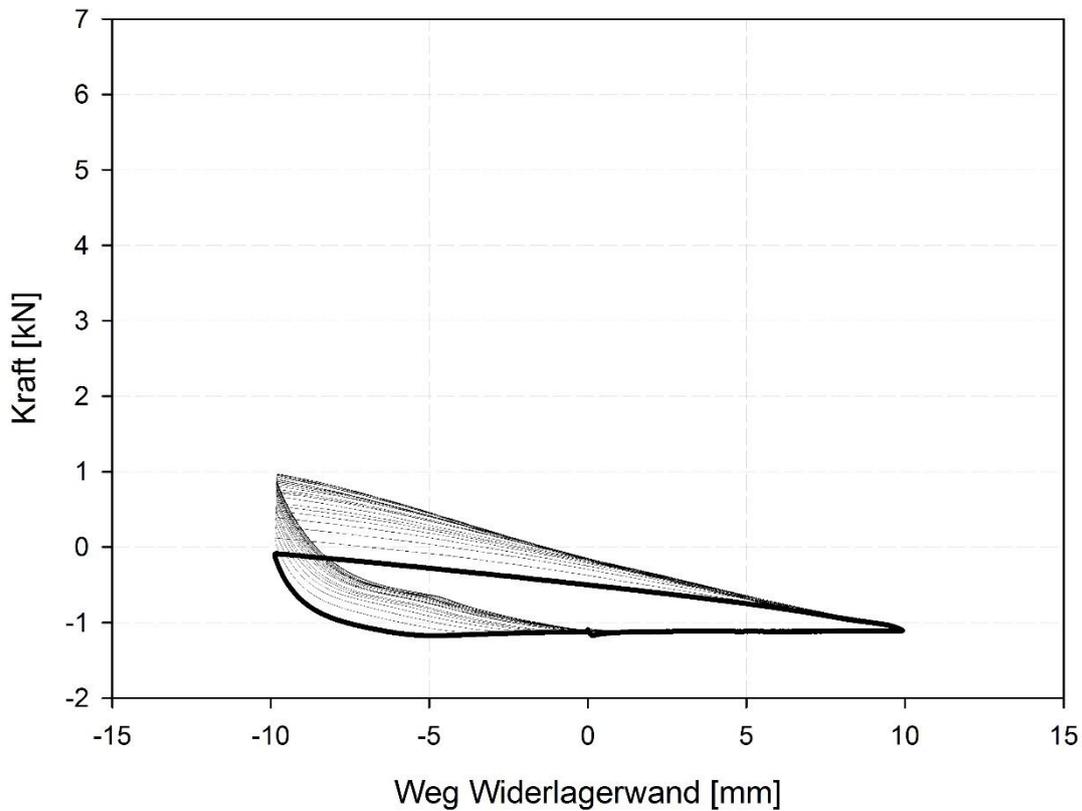


Abbildung 64: Kräfteverlauf Wandachse 1 Versuch 7

Abbildung 65 zeigt, dass nach einem Abfall vom Startwert die auftretenden Kräfte sich kaum ändern. Der Wert der Kräfte steigt, nach dem der aktive Wendepunkt erreicht wurde, beim ersten Zyklus nahezu linear an. Nach der maximalen Kraft am Wendepunkt auf der passiven Seite fällt der Kräfteverlauf wieder auf den Wert des aktiven Bereiches. Im Vergleich zur oberen Wandachse, stellt sich diese Verringerung schon nach 3,5 mm ein. Nach dem 25. Zyklus erreicht der Maximalwert auf passiver Seite einen Wert von 2,9 kN.

Wandachse Mitte

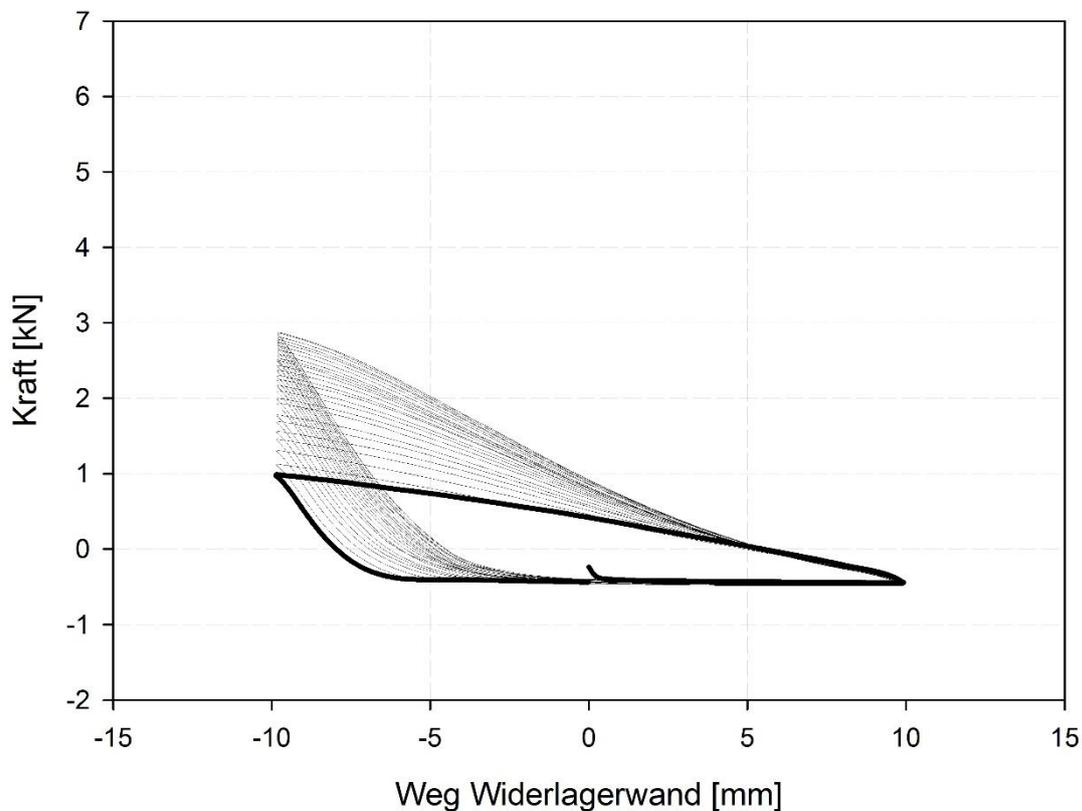


Abbildung 65: Kräfteverlauf Wandachse 2 Versuch 7

An der unteren Wandachse (siehe Abbildung 66) zeigt sich ein anderer Verlauf der Kräfte. Nach einem kurzen Abfall des Startwertes ist der Kräfteverlauf horizontal. Bei der Umkehr der Bewegungsrichtung der Widerlagerwand steigen die Kräfte bei Zyklus 1 leicht konkav bis zum Wendepunkt auf der passiven Seite an. Bei erneuter Umkehr der Widerlagerwand wird die Kraft im unteren Teil der Wandachse S-förmig über einen Weg von 7 mm abgebaut. Am Wendepunkt auf der aktiven Seite ist die Kraft beim 2ten Zyklus dann geringer als im ersten. Der Anstieg danach gleicht dem des ersten Zyklus, bildet jedoch eine größere Steigung aus. Ab dem 2. Zyklus stellt sich das Maximum nicht mehr am passiven Wendepunkt ein, sondern erst nach der Umkehr der Widerlagerwand. Dieser Effekt wird mit jedem Zyklus eindeutiger. Beim letzten Zyklus tritt der Maximalwert dann erst nach 2 mm Bewegung in aktive Richtung auf. Anschließend stellt sich ein langgezogener Abfall der Kraft ein. Dieser reicht bis zum 0-Durchgang.

Wandachse unten

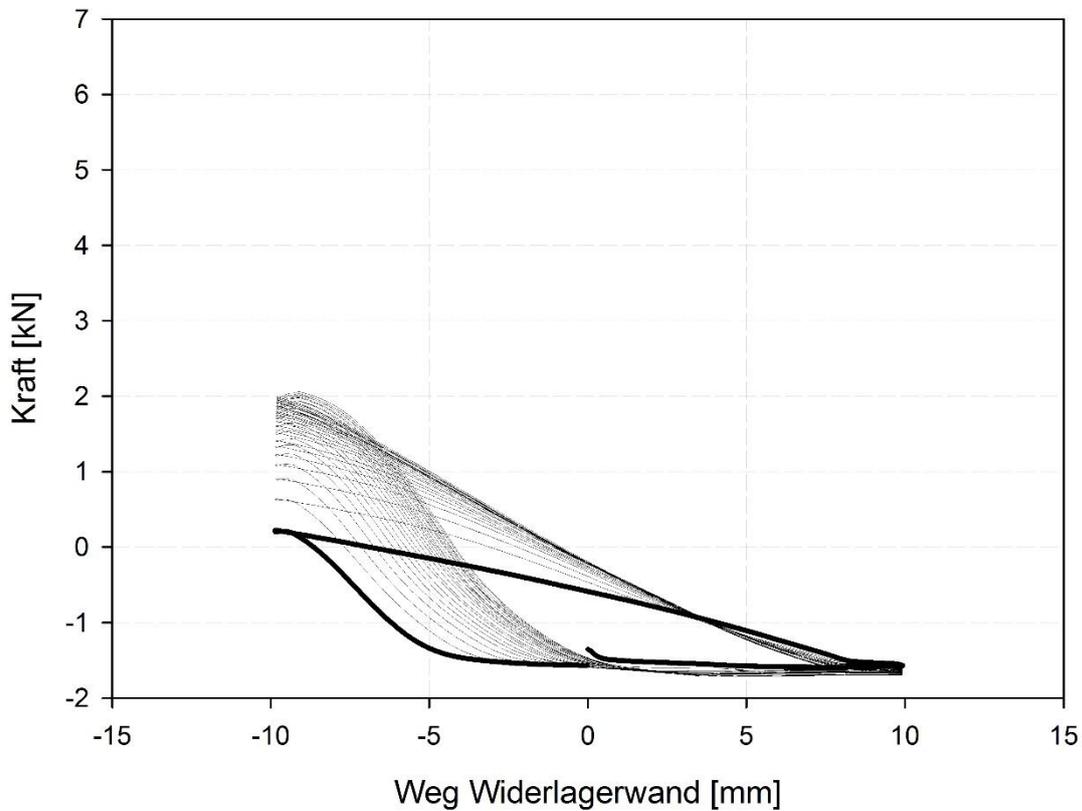


Abbildung 66: Kräfteverlauf Wandachse 3 Versuch 7

Die Kräfte, welche beim 7ten Versuch an der oberen Achse der Rückwand gemessen wurden, werden in Abbildung 67 dargestellt. Auch bei dieser Achse fallen die Kräfte vom Startpunkt weg ein wenig ab bevor sie sich konstant verhalten. Nachdem die Widerlagerwand die Fahrtrichtung umkehrt, kommt es zu einem nahezu linearen Anstieg, welcher bis zum passiven Wendepunkt führt. Der darauffolgende Abbau der Kräfte findet dann bis zum 0-Durchgang statt. Die maximale Kraft im aktiven Bereich übersteigt bei Zyklus 2 die des ersten Zyklus. Beim Kräfteverlauf der oberen Achse der Rückwand fällt auf, dass die Kräftesteigerung von Zyklus zu Zyklus nur sehr gering ausfällt.

Rückwand oben

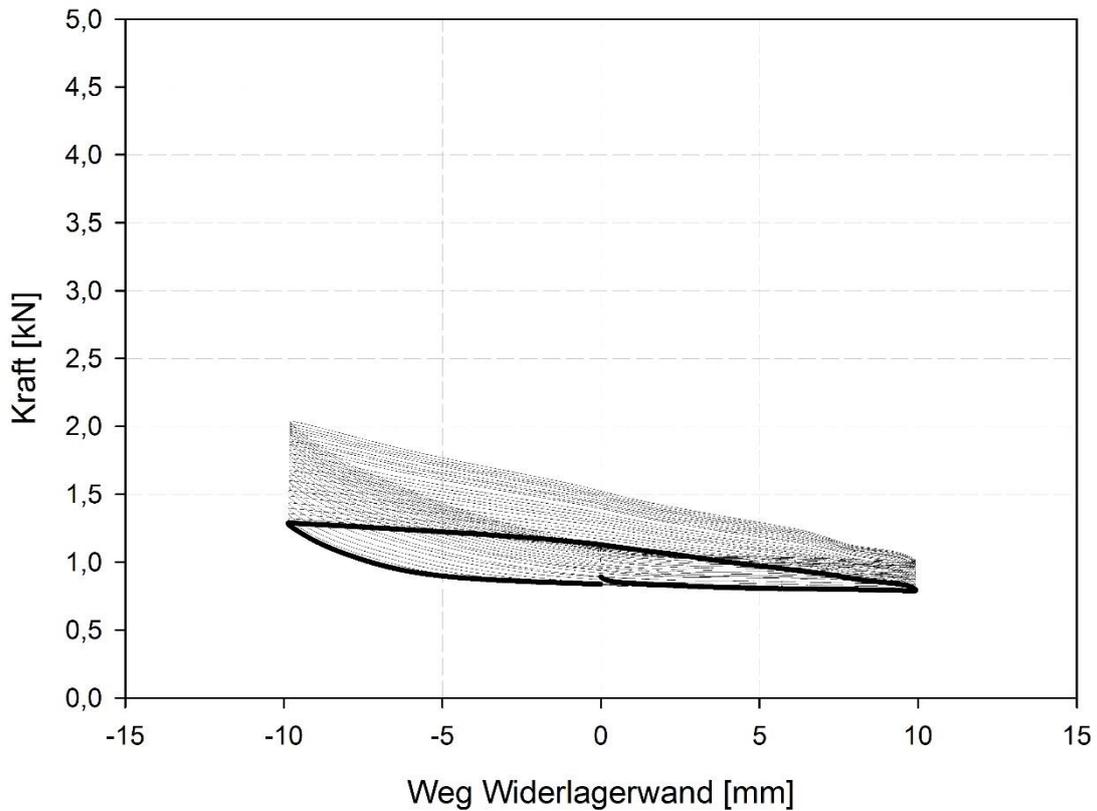


Abbildung 67: Kräfteverlauf Rückwand oben Versuch 7

Abbildung 68 stellt den Kräfteverlauf der unteren Achse an der Rückwand dar. Die Kraft fällt unmittelbar nach dem Start stark ab. Der Abfall der anschließenden linearen Geraden ist danach geringer. Nach dem Wendepunkt auf der aktiven Seite steigt die Kraft verhältnismäßig stark an, flacht ab und erfährt bei ca. 8 mm auf der aktiven Seite einen weiteren starken Anstieg. Anschließend folgt ein leicht konkaver Anstieg. Die Kurven flachen zum passiven Wendepunkt hin ab. Der Abfall der Kraft unterteilt sich in zwei Bereiche. Nach dem passiven Wendepunkt fällt die Kraft im ersten Bereich bis ca. zum 0-Durchgang auf aktiver Seite deutlicher ab und läuft im zweiten Bereich flacher zum aktiven Wendepunkt aus. Mit steigender Zyklenzahl verlängert sich auch der Weg zur Abnahme der Kraft.

Rückwand unten

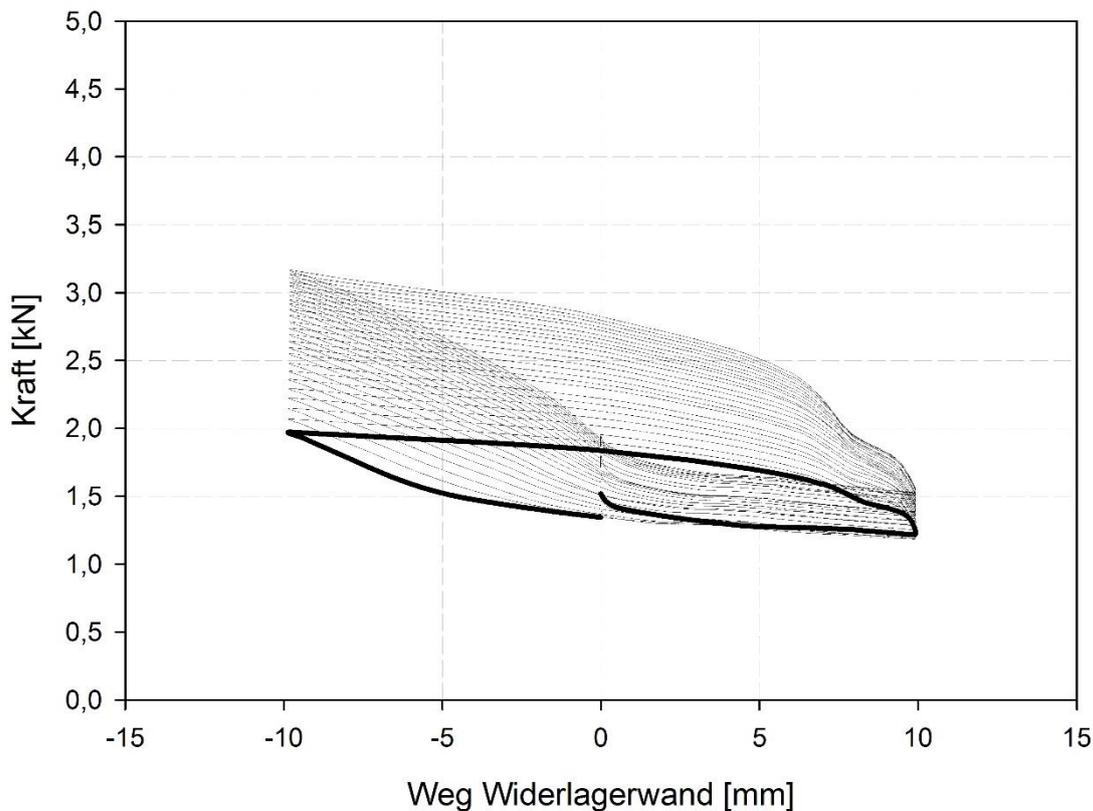


Abbildung 68: Kräfteverlauf Rückwand unten Versuch 7

6.3 Vergleich Kräfte zyklusweise

Im folgenden Kapitel werden Versuche zyklusweise gegenübergestellt. Dadurch ist ein Vergleich der Testergebnisse leichter möglich. Damit ein Vergleich Sinn ergibt, werden nur Versuche mit reiner Rotation der Modellwiderlagerwand miteinander verglichen und jene, bei welchen eine Kombination aus Rotation und Translation gefahren wurde. Versuch 3 musste aufgrund eines Problems der Steuereinheit und Versuch 5 wegen Überlastung frühzeitig abgebrochen werden. Abbildung 69 zeigt die Punkte, an denen die Kräfte abgelesen wurden.

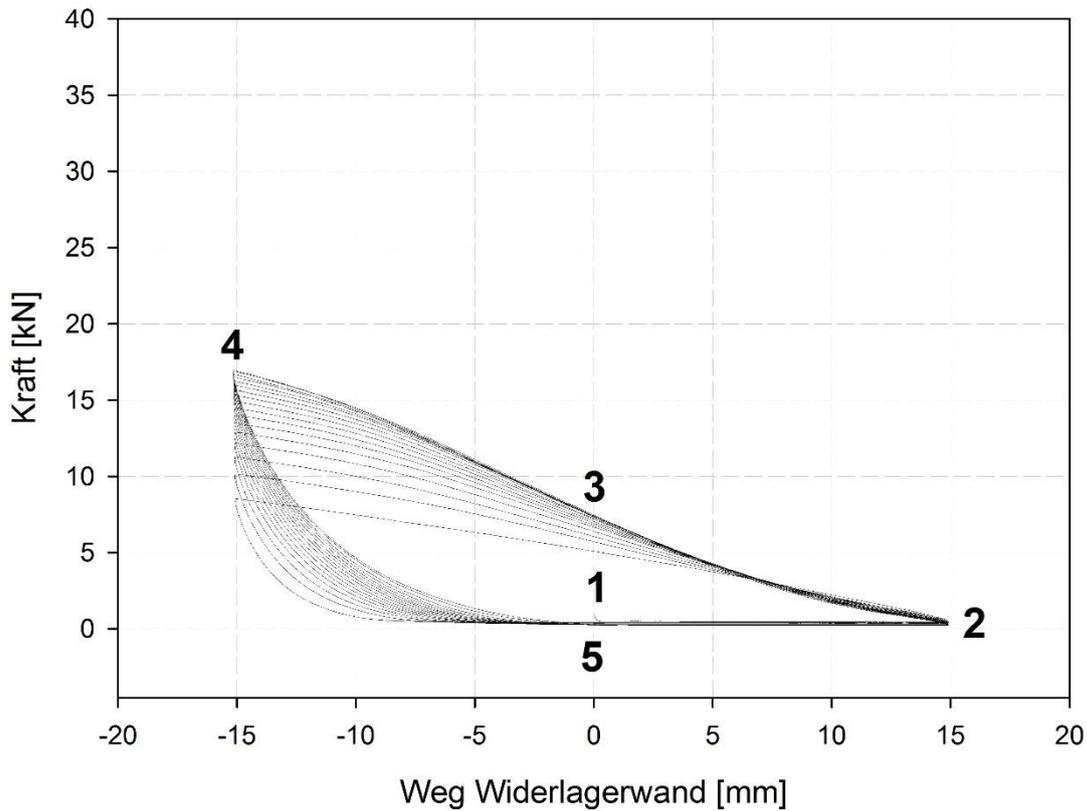


Abbildung 69: Ablesepunkte Kräfteverlauf

- 1 Startwert des Versuches
- 2 Minimalkraft auf aktiver Seite
- 3 0-Durchgang passiv
- 4 Maximalkraft auf passiver Seite
- 5 0-Durchgang aktiv

6.3.1 Vergleich der Rotationsversuche im oberen Auflager

In Abbildung 70 werden die Minimalkräfte des oberen Auflagers, welche am Wendepunkt auf der aktiven Seite (Punkt 2) gemessen wurden, dargestellt. Daraus kann abgelesen werden, dass alle 6 Versuche gleiche Ergebnisse liefern. Zum Startzeitpunkt tritt ein geringer Kraftabfall ein und jeder weitere Zyklus zeigt keine nennenswerten Veränderungen. Die Kräfte sind also konstant. Aus diesem Grund sind die Werte kongruent.

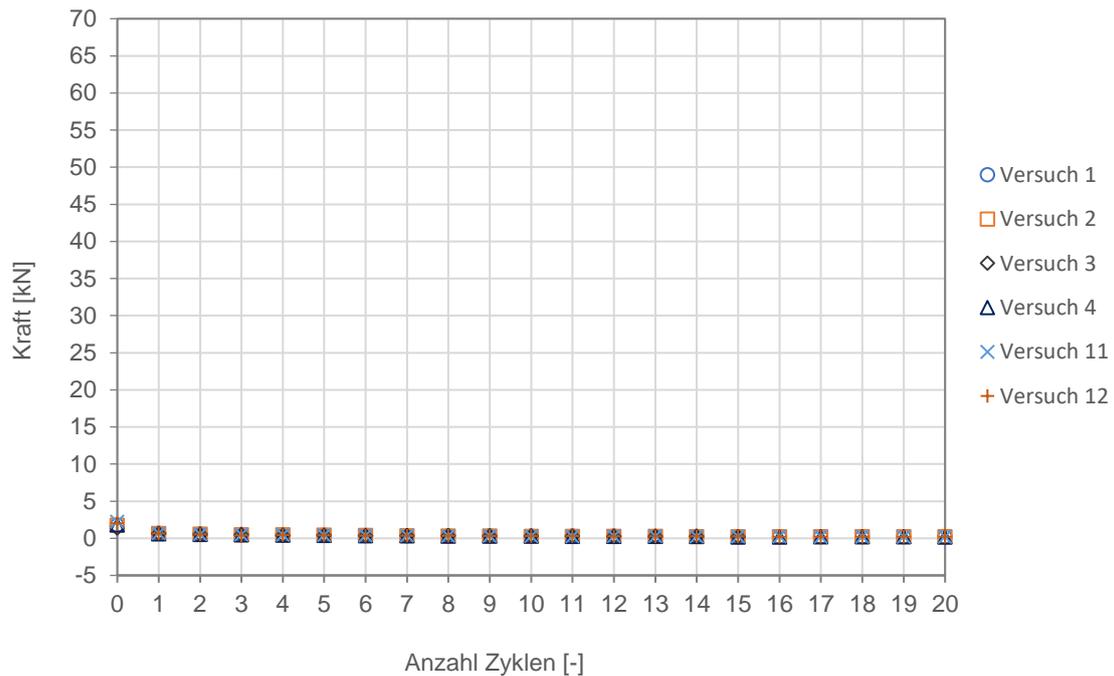


Abbildung 70: Vergleich Rotationsversuche Minimalkräfteaktiv zyklusweise Auflager oben

In Abbildung 71 ist ersichtlich, dass ein kontinuierlicher Anstieg der Kräfte auf Höhe des passiven Wendepunktes (Punkt 2) im oberen Auflager mit jedem Zyklus auftritt. Der Wert am Startpunkt ist bei jedem Versuch gleich groß, jedoch findet anschließend eine markante Erhöhung der Kräfte statt. Mit fortschreitender Zyklusanzahl verringert sich der Anstieg sukzessive im Vergleich zum Wert des vorigen Zyklus. Dadurch flacht die Kurve ab.

Wie in Abbildung 71 ersichtlich ist, gleichen sich beim 0-Durchgang in passiver Richtung (Punkt 3) die auftretenden Kräfte. Der Anstieg der Kräfte ist aus Gründen der lockeren Lagerung zu Beginn groß. Beim Fortlaufen der Versuche zeigt sich, dass die auftretenden Kräfte in diesem Punkt keine große Änderung mehr erfahren.

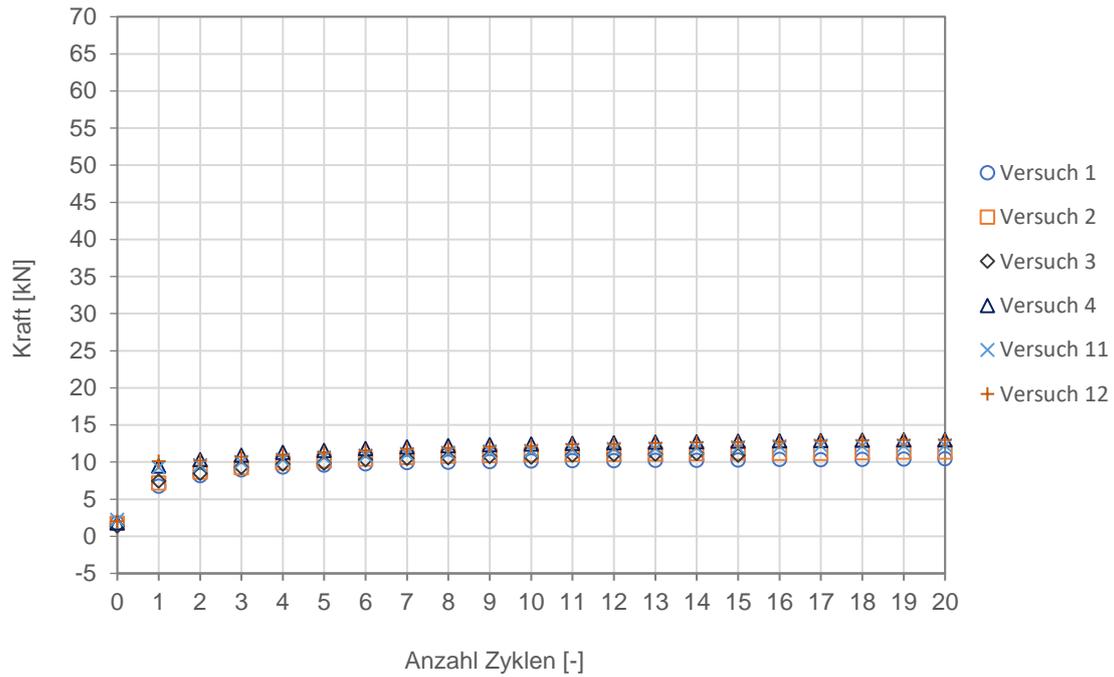


Abbildung 71: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang passiv Auflager oben

Zur Veranschaulichung der Maximalkräfte für das untere Auflager dient Abbildung 72. Der Startwert ist bei allen Rotationsversuchen nahezu gleich. Bereits nach dem ersten Zyklus ist die unterschiedliche Krafterhöhung sichtbar. Die höchsten Werte erreichen bei diesem Vergleich die Kräfte von Versuch 4 und 12. Die Form der Kurven ist aber bei jedem Versuch ähnlich. Bei jedem Versuch nimmt die maximale Kraft stetig zu. Anfangs noch stark, nach mehreren Zyklen jedoch immer schwächer.

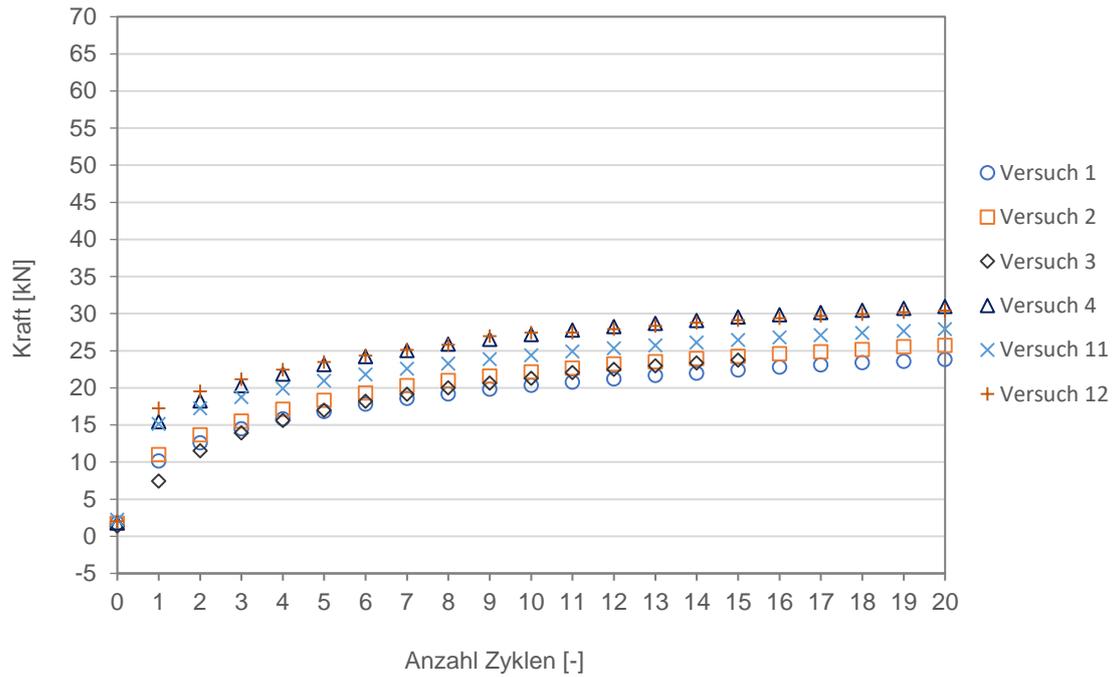


Abbildung 72: Vergleich Rotationsversuche Maximalkräfte passiv zyklusweise Auflager oben

In

Abbildung 73 sind die Kräfte im oberen Auflager beim 0-Durchgang auf der aktiven Seite (Punkt 5) dargestellt. Bei jedem Rotationsversuch fallen die Kräfte unter den Wert am Beginn des Versuches. Es können nur minimale Änderungen zwischen den Versuchen festgestellt werden.

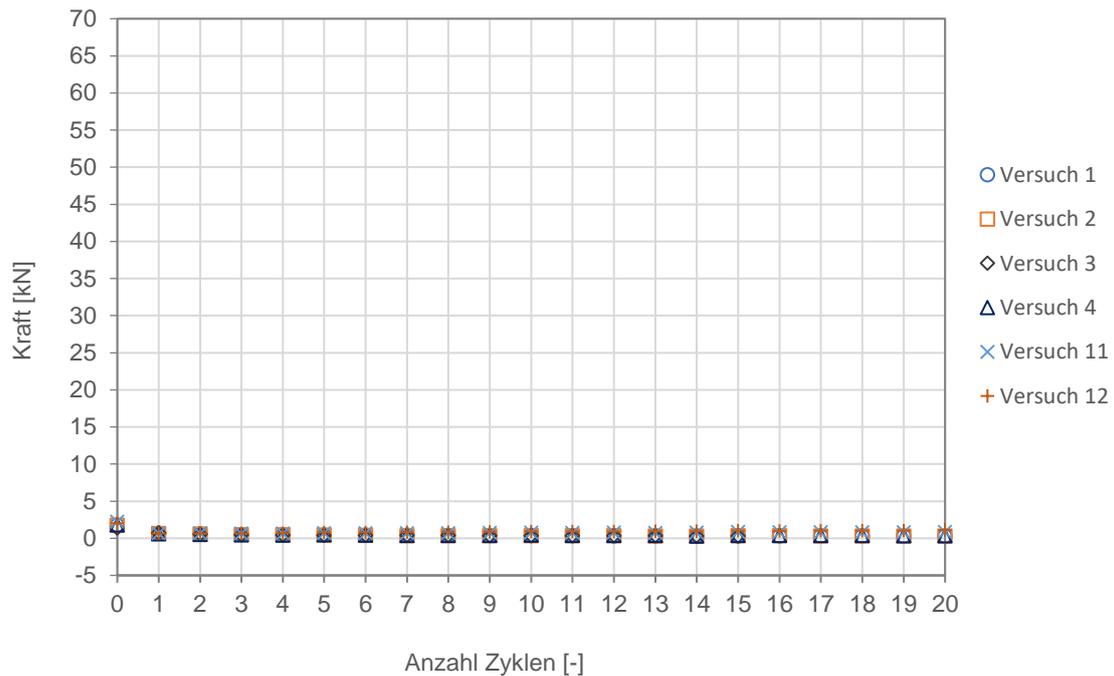


Abbildung 73: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang aktiv Auflager oben

6.3.2 Vergleich der Rotationsversuche im unteren Auflager

Die in Abbildung 74 dargestellten Werte wurden beim Wendepunkt auf der aktiven Seite (Punkt 2) gemessen. Am Startpunkt tritt die höchste Kraft auf. Bei Zyklus 2 sinkt die Minimalkraft bei jedem Versuch ab. Werden die Versuche weitergefahren, steigen die Werte an dieser Stelle wieder. Bei den letzten Zyklen ist bei keinem Versuch eine Größenänderung der Kräfte zu sehen.

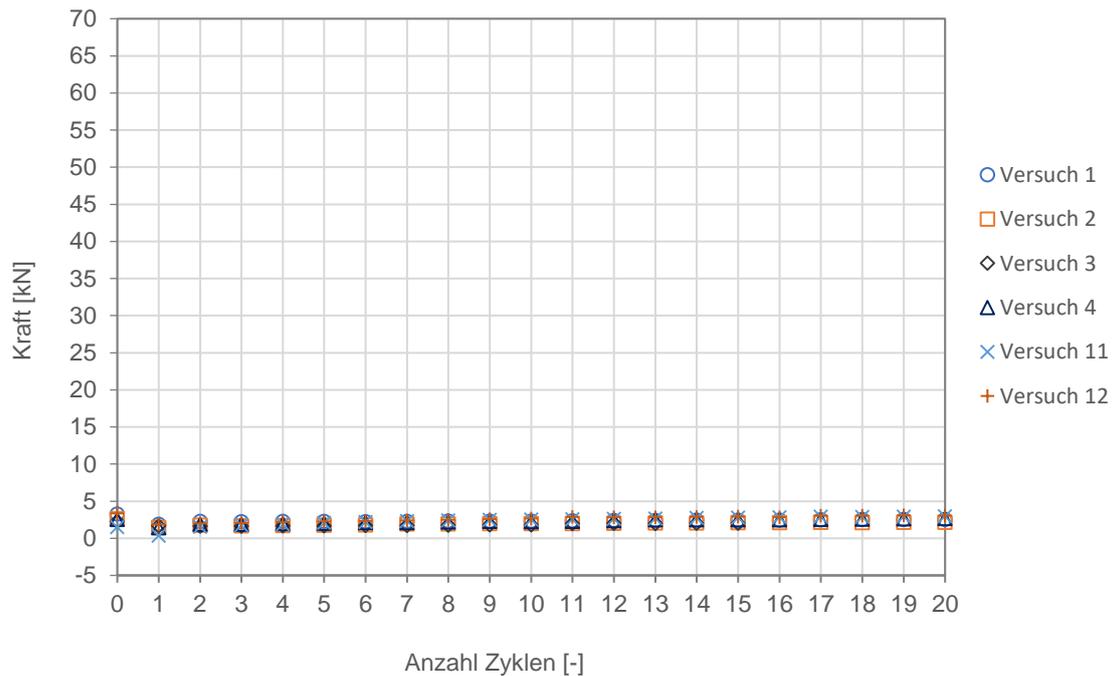


Abbildung 74: Vergleich Rotationsversuche Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager unten

Der Vergleich der Rotationsversuche beim passiven 0-Durchgang wird in Abbildung 75 dargestellt. Zu Beginn jedes Versuches liegen die Kräfte bei etwa 2-3 kN. Dieser Wert steigt bereits nach dem ersten Zyklus stark an. Die auftretenden Kräfte sind in jedem Versuch ähnlich. Die höchsten Werte an der unteren Auflagerachse treten bei Versuch 4 auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass dieser Versuch gut verdichtet ist und einen Weg von ± 15 mm fährt.

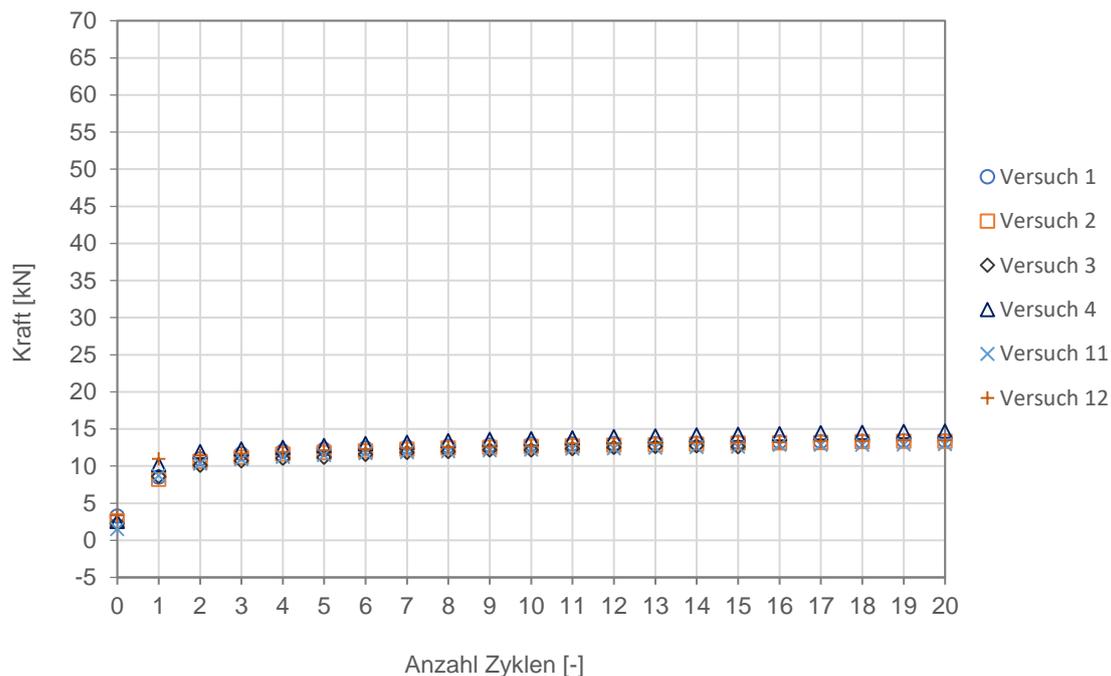


Abbildung 75: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager unten

Aus Abbildung 76 können die Maximalkräfte der Versuche herausgelesen werden. Im Fall der passiven Maximalkräfte ist bei dieser Darstellung ein Unterschied zwischen den verschiedenen Versuchen zu erkennen. Bei Versuch 12 steigt die Kraft nach dem Startwert im Vergleich zu den anderen Versuchen am meisten. Bei späteren Zyklen werden die Werte von Versuch 12 jedoch von denen des vierten Versuches überschritten. Die Kräfte bei Versuch 11 steigen ebenfalls stark an. Diese Kräftezunahme verringert sich jedoch deutlich mehr als bei anderen Versuchen. Am Ende von Zyklus 20 entsprechen die Kräfte von Versuch 11 in etwa den Werten von Versuch 1 und 2.

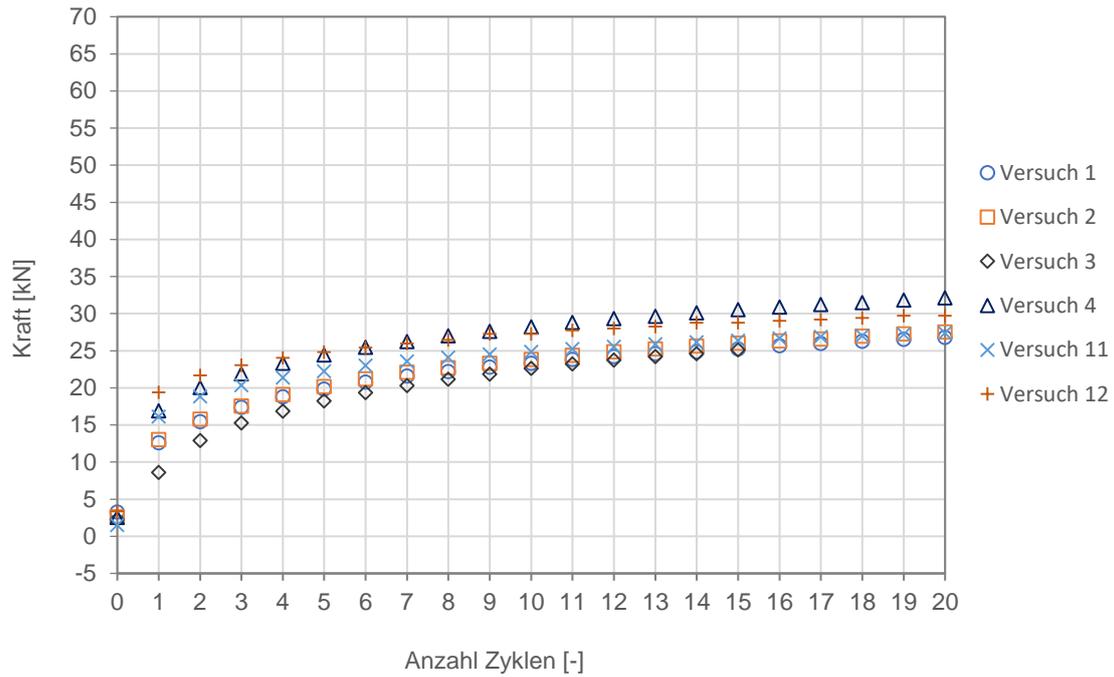


Abbildung 76: Vergleich Rotationsversuche Maximalkräfte passiv zyklusweise Auflager unten

Die Kräfte im unteren Auflager zeigt Abbildung 77. Beim 0-Durchgang in aktiver Richtung weisen die Versuche Ähnlichkeiten auf. Obwohl der Startwert bei jedem Versuch unterschiedlich ist, sind die Kräfte nach dem ersten Zyklus gleich. Erst mit steigender Zyklusanzahl sind die höchsten Werte bei Versuch 11 und 12 klar zu sehen.

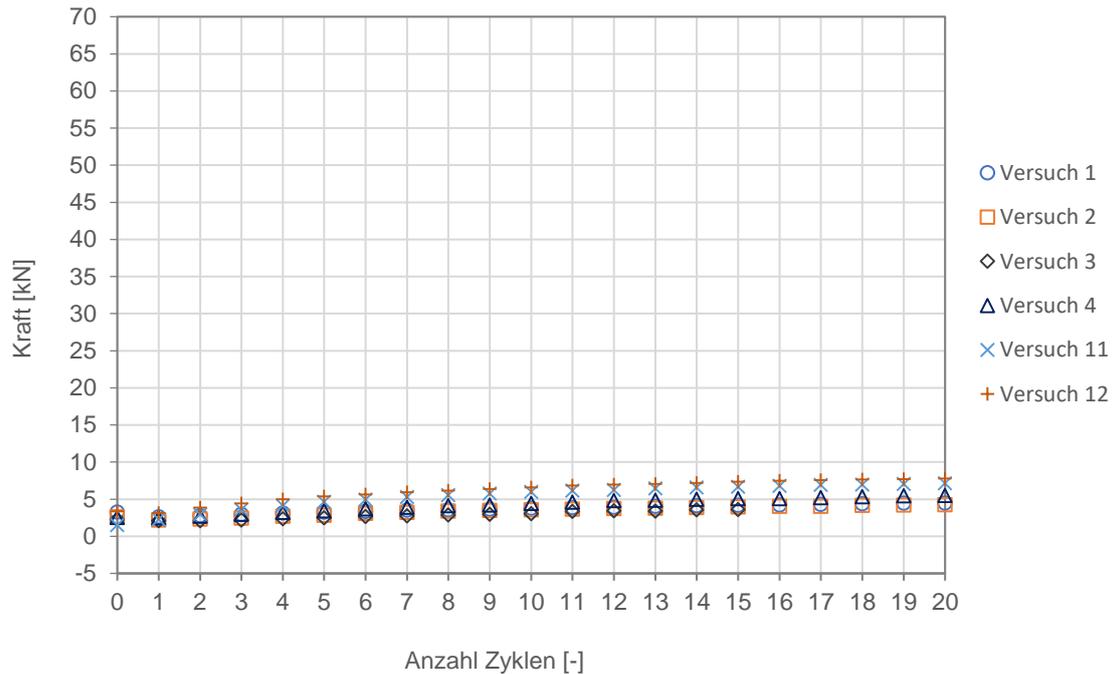


Abbildung 77: Vergleich Rotationsversuche 0-Durchgang aktiv zyklusweise Auflager unten

6.3.3 Vergleich der Versuche Translation und Rotation im oberen Auflager

In Abbildung 78 werden die Versuche mit kombinierter Verschiebung verglichen. Beim Vergleich der Minimalkräfte wird deutlich, dass nach dem Start der Versuche die Kraft am Wendepunkt auf der aktiven Seite nach einem Zyklus abnimmt. Eine signifikante Änderung der Kräfte ist bei den folgenden Zyklen nicht zu beobachten.

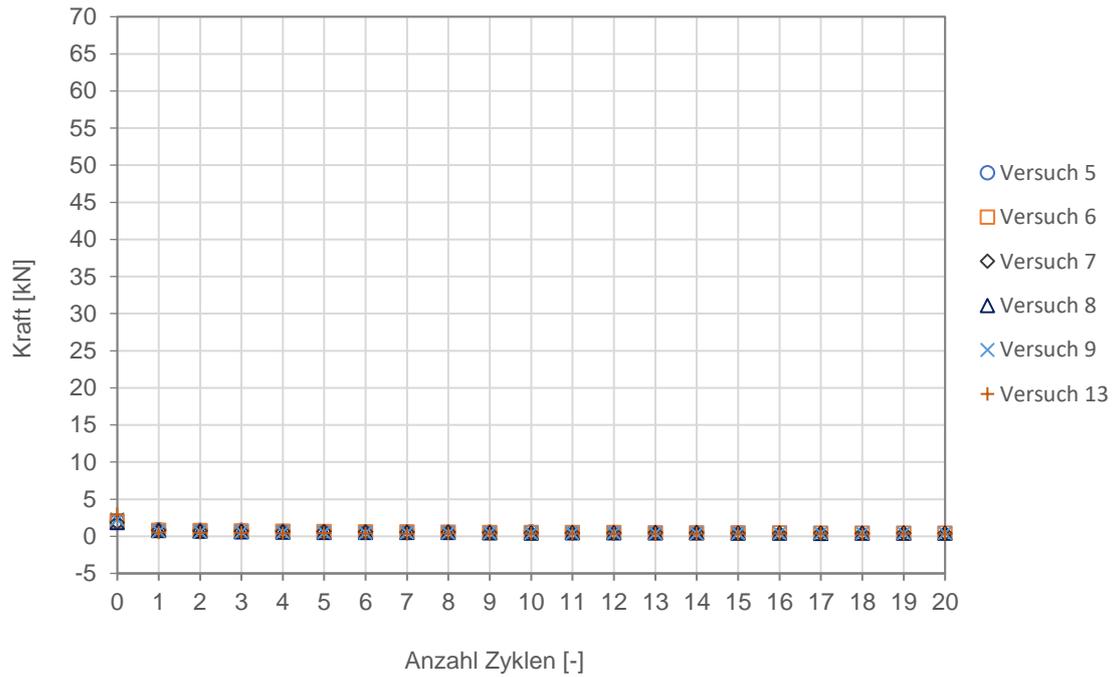


Abbildung 78: Vergleich Versuche Translation und Rotation Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager oben

In Abbildung 79 werden die Kräfte beim 0-Durchgang zur passiven Seite aufgezeigt. Nach dem Startpunkt kommt es zur raschen Erhöhung der Kräfte bei jedem Versuch. Der Versuch 12 weist nach dem ersten Zyklus die größte Kraft auf. Besonders ist, dass die Steigung bei diesem Versuch bei den darauffolgenden Zyklen gering ausfällt. Bei jedem Versuch nimmt die Kräfteentwicklung mit steigender Zyklusanzahl einen nahezu konstanten Verlauf an.

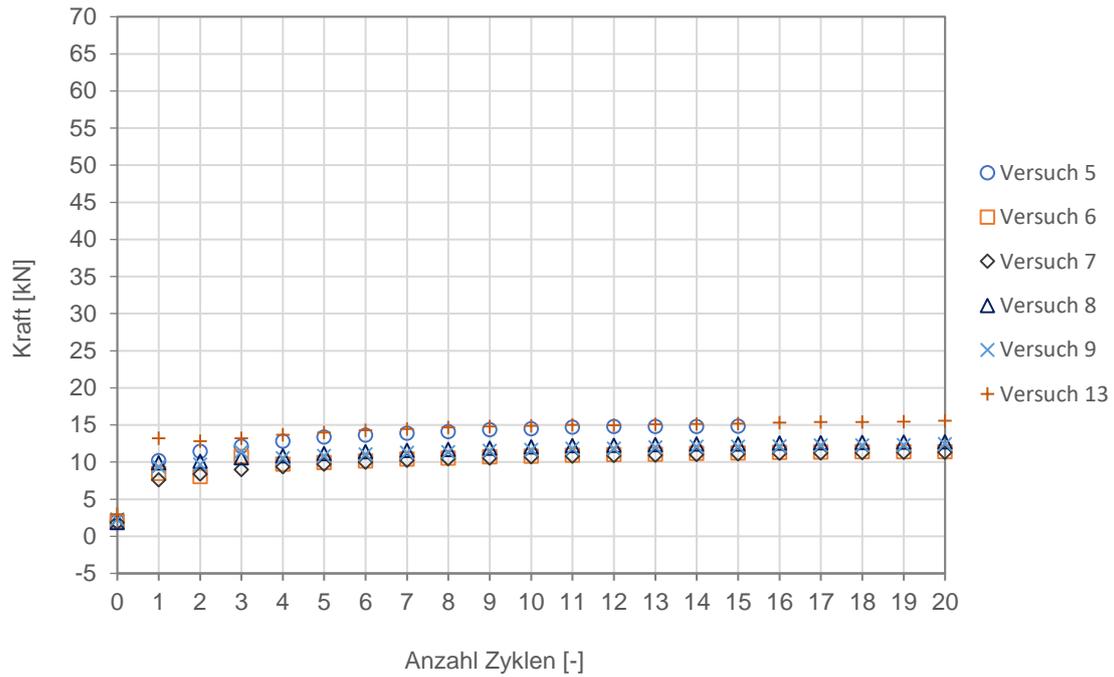


Abbildung 79: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager oben

Die Abbildung 80 zeigt die Entwicklung der Maximalkräfte auf der Passivseite. Nachdem der Kräfteunterschied vom Startwert zum ersten Zyklus groß ist, verringert sich die Steigerung der Werte bei jedem Versuch. Je mehr Zyklen gefahren werden, desto näher kommen die Kräfteverläufe einem konstanten Verlauf.

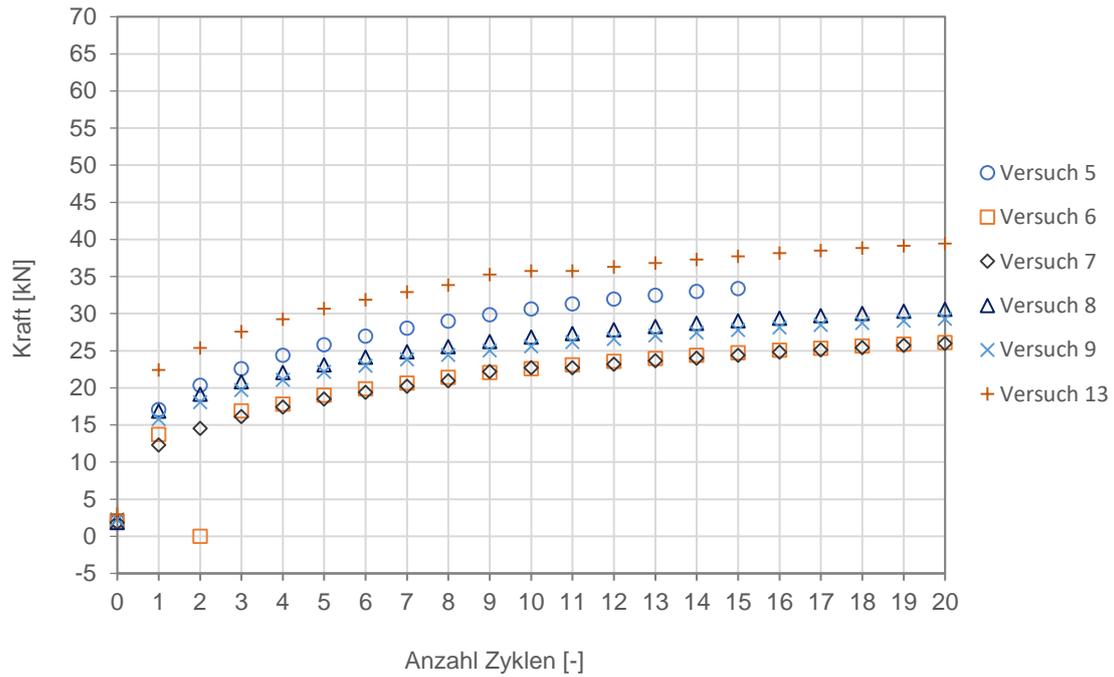


Abbildung 80: Vergleich Versuche Translation und Rotation Maximalwerte passiv zyklusweise Auflager oben

In Abbildung 81 sind die Kräfte beim 0-Durchgang auf der aktiven Seite dargestellt. Bei jedem Versuch sinkt die Kraft unter den Wert des Startpunktes. Die weitere Veränderung der Kräfte ist sehr gering und daher nicht deutlich erkennbar. Die Versuchswerte sind kongruent.

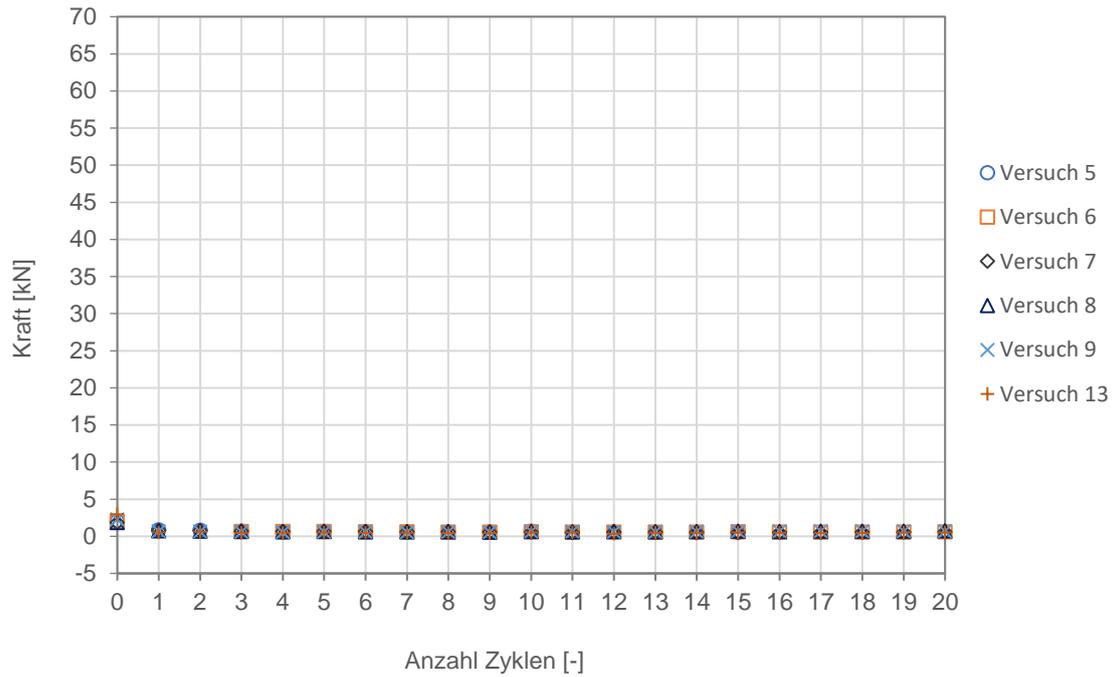


Abbildung 81: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang aktiv zyklusweise
Auflager oben

6.3.4 Vergleich der Versuche Translation und Rotation im unteren Auflager

Die Minimalkräfte auf der aktiven Seite (Punkt 2) werden in Abbildung 82 dargestellt. Der Startwert entspricht bei jedem Versuch etwa 2,5 kN. Nach dem ersten Zyklus wird dieser dann unterschritten. Für die darauffolgenden Zyklen ändern sich die Werte auf der aktiven Seite nur noch in geringem Maße. Die Kräfte pendeln sich um den 0-Wert ein.

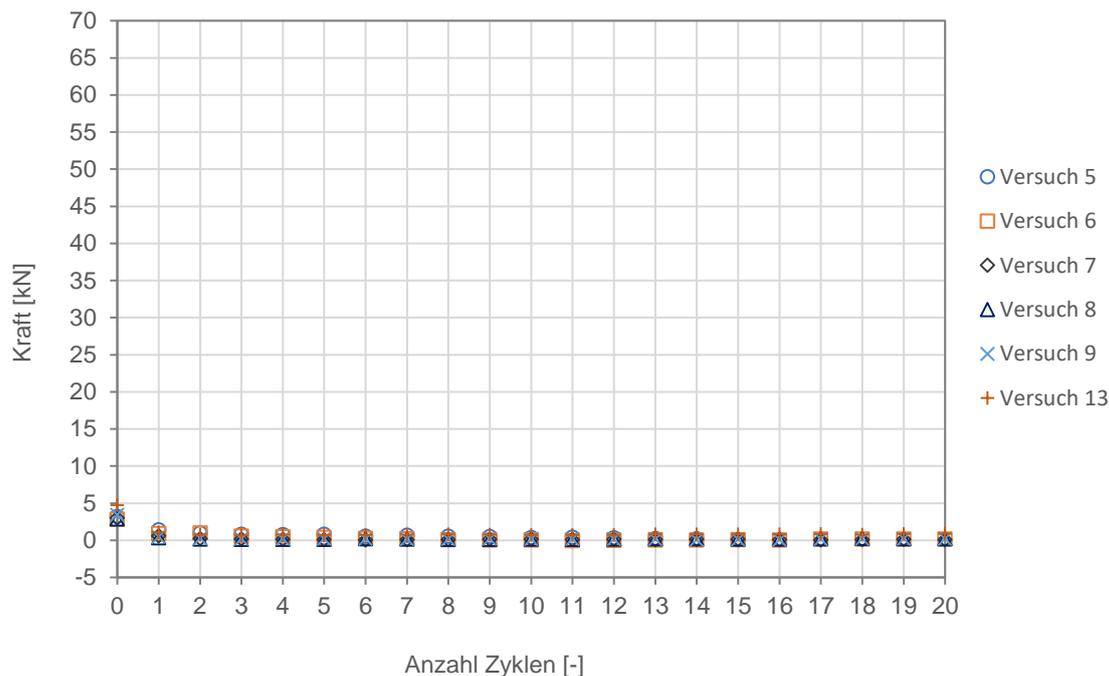


Abbildung 82: Vergleich Versuche Translation und Rotation Minimalkräfte aktiv zyklusweise Auflager unten

Die Kräfteverläufe beim 0-Durchgang auf der passiven Seite werden in Abbildung 83 als Diagramm dargestellt. In diesem Vergleich wird deutlich, dass die Kräfte des fünften Versuches die der anderen stark übersteigt. Ausschlaggebend für diese hohen Messergebnisse ist die große Verschiebung der Widerlagerwand von 15 mm an der oberen und 5 mm an der unteren Seite. Auch der Sprung vom Startpunkt zum Wert des 0-Durchgangs auf passiver Seite ist bei Versuch 5 am größten. Bis zum elften Zyklus steigt die Kraft bei Versuch 5 deutlich an. Danach folgt ein konstanter Verlauf. Die anderen Tests zeigen einen deutlich flacheren Anstieg der Werte nachdem der Sprung zum ersten Zyklus stattgefunden hat. Die zweithöchsten Werte bei diesen Versuchen weist Versuch 13 auf. Die Kräfteentwicklungen sind verhältnismäßig gering.

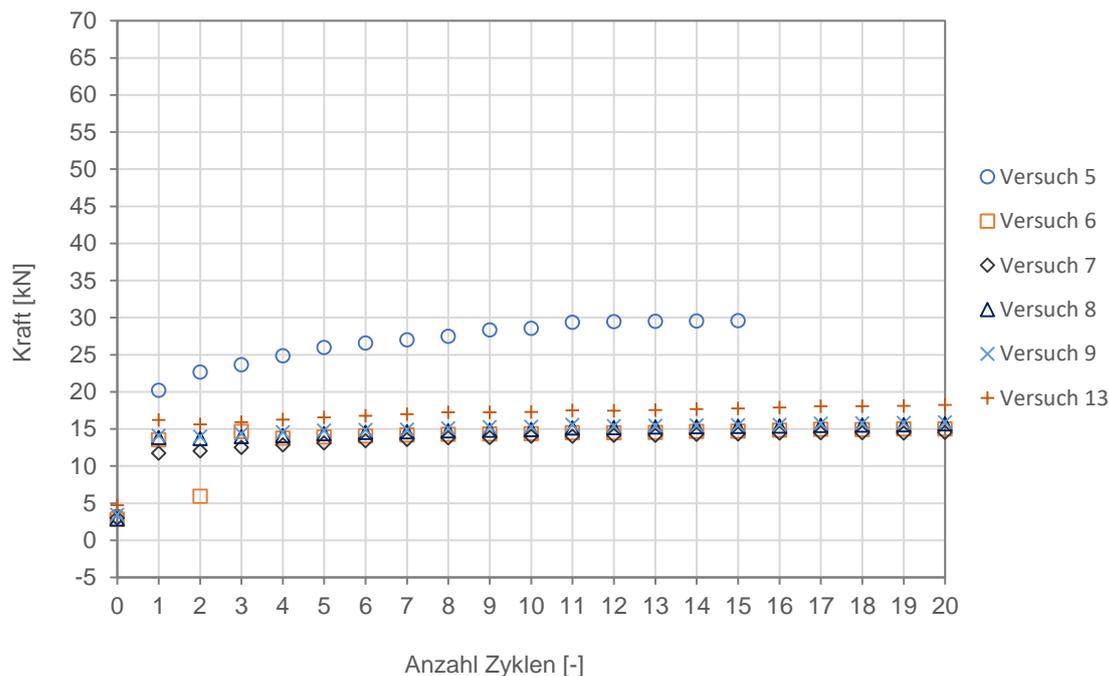


Abbildung 83: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang passiv zyklusweise Auflager unten

Die Maximalwerte, welche in Abbildung 84 dargestellt sind, weisen große Unterschiede auf. Dabei zeigt Versuch 5 weit größere Werte als die anderen. Der Sprung vom Startwert zur Kraft nach dem ersten Zyklus ist bei jedem Versuch signifikant. Da der Verschiebeweg am unteren Auflager beim fünften Versuch 5 mm und bei den anderen Versuchen nur 2 mm beträgt, sticht dieser heraus. Bei jedem Versuch steigen die Kräfte bei den anfänglichen Zyklen stärker an als in weiterer Folge. Eine Besonderheit bei Versuch 5 ist, dass die gemessene Kraft im unteren Auflager nach einem Maximum bei Zyklus 13 wieder abnimmt. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass durch eine Überlastung die Druckstäbe ausgeknickt sind. Anschließend wurde Versuch 5 abgebrochen und die Versuchsanlage repariert. Die anderen Rotationsversuche weisen Ähnlichkeiten auf. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die maximale Kraft beim Wendepunkt auf der passiven Seite nach 20 Zyklen noch nicht erreicht ist.

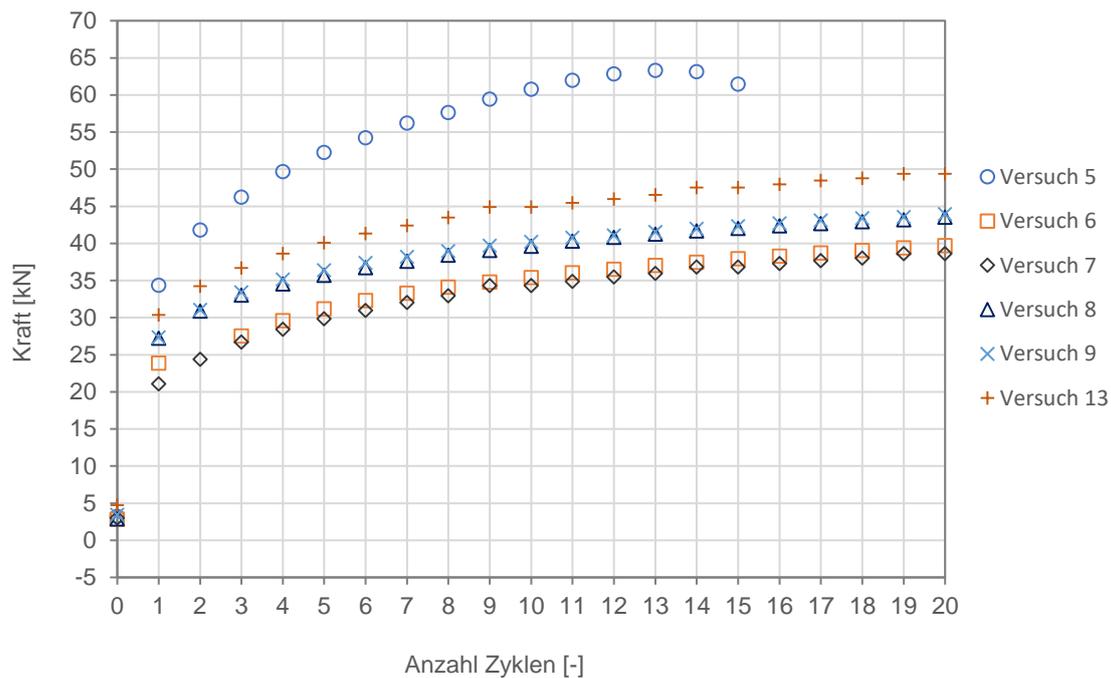


Abbildung 84: Vergleich Versuche Translation und Rotation Maximalwerte passiv zyklusweise Auflager unten

Den Kräfteverlauf beim aktiven 0-Durchgang der kombinierten Versuche zeigt Abbildung 85. Beim Start der Versuche kommt es bei jedem Versuch zu einem Abfall der Kräfte nach dem ersten Zyklus. Die gemessenen Werte steigen vom ersten bis zum letzten Zyklus minimal an. Zu beobachten ist auch, dass bei dem überlasteten Versuch 5 kein Unterschied zu den Werten der anderen kombinierten Versuche am unteren Auflager erkennbar ist.

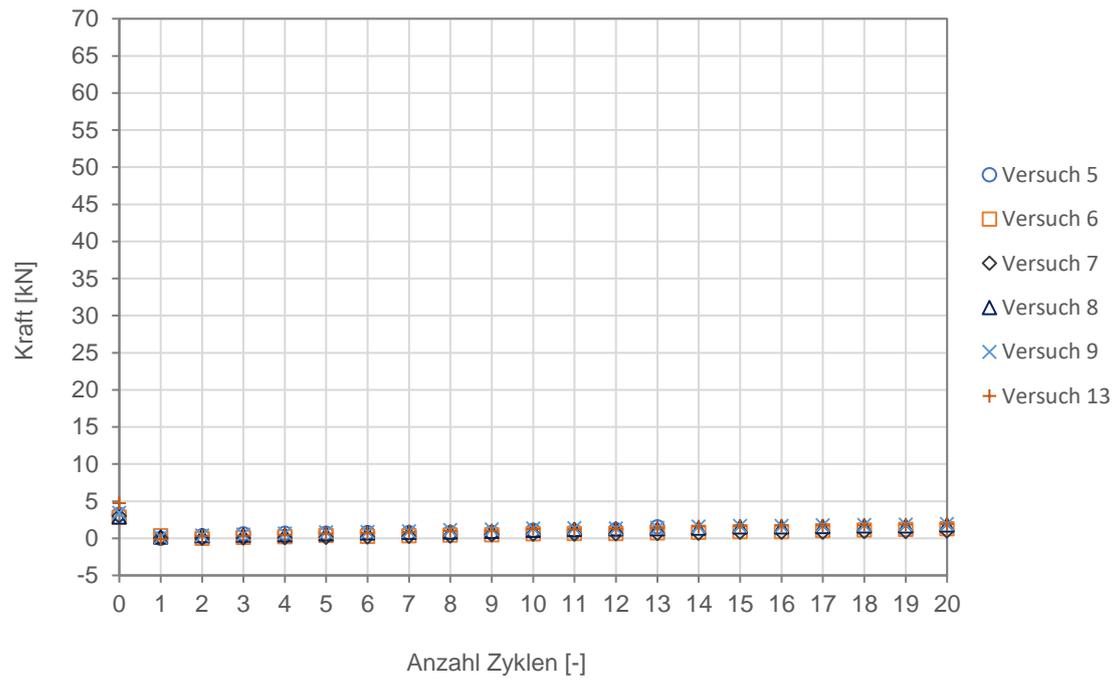


Abbildung 85: Vergleich Versuche Translation und Rotation 0-Durchgang aktiv zyklusweise
Auflager unten

6.4 Änderung der Dichte

Durch die zyklische Bewegung der Widerlagerwand kam es mit jedem Zyklus zu einer Verdichtung des Versuchsmaterials. Anhand der ermittelten Setzungsmulden wurde die Dichte nach Ende der Versuche neu berechnet.

Tabelle 3: Änderung der Lagerungsdichte

	Wichten Start [g/cm ³]	Wichten Ende [g/cm ³]
Versuch 1	1,54	1,58
Versuch 2	1,55	1,58
Versuch 3	1,55	1,58
Versuch 4	1,59	1,62
Versuch 5	1,59	1,62
Versuch 6	1,60	1,62
Versuch 7	1,59	1,62
Versuch 8	1,64	1,66
Versuch 9	1,64	1,66
Versuch 10		nicht vorhanden
Versuch 11	1,64	1,65
Versuch 12	1,66	1,68
Versuch 13	1,65	1,67

7 Erkenntnisse

Die aus dem Modellversuch gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel zusammengefasst und beschrieben.

7.1 Erkenntnisse Verformungsverhalten

In

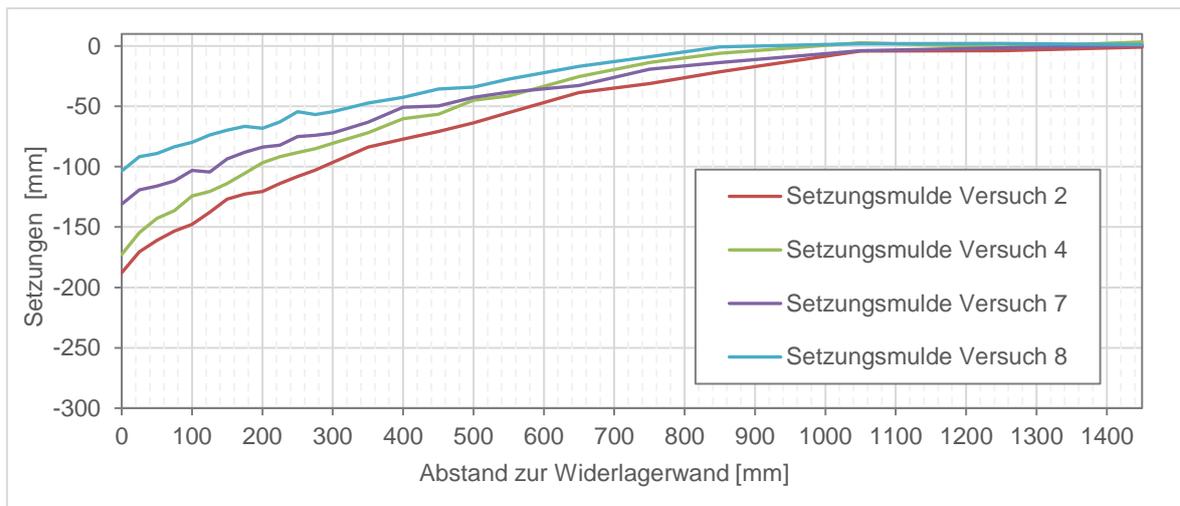


Abbildung 86 ist der Einfluss von drei Faktoren auf die Setzungsmulde deutlich erkennbar. Die Setzungen hinter der Modell-Widerlagerwand sind maßgeblich von der Lagerungsdichte, der Bewegung des Widerlagers und der Anzahl der Zyklen abhängig. In der folgenden Abbildung werden die Versuche 2, 4, 7 und 8 einander gegenübergestellt, um dies zu verdeutlichen. Die Setzungsmulde wird für jeden Versuch nach 20 Zyklen abgebildet.

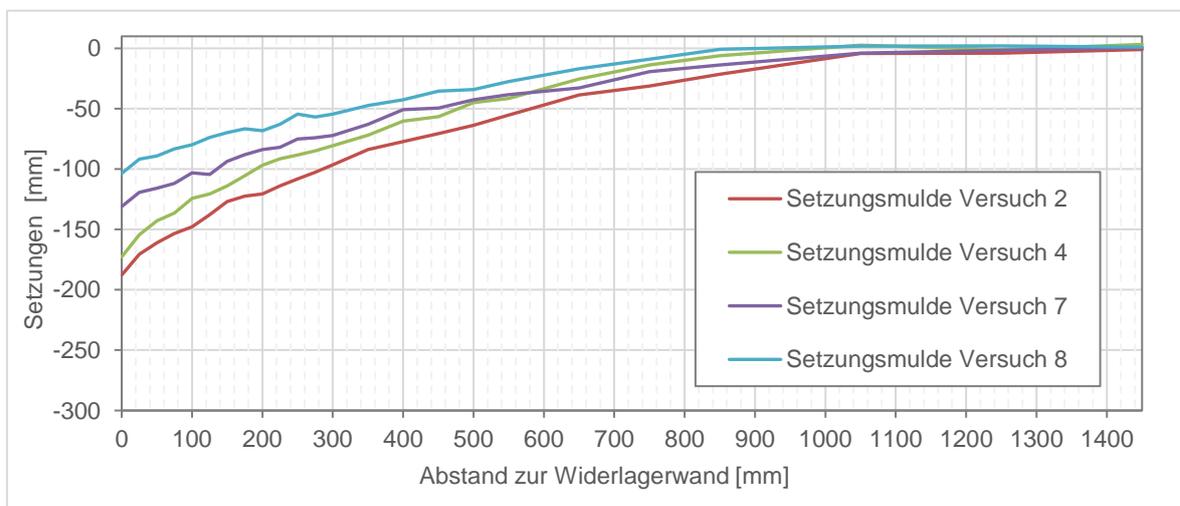


Abbildung 86: Vergleich Setzungslinien Versuch 2, 4, 7 und 8 nach 20 Zyklen

Versuch 2 zeigt auf Grund der fehlenden Verdichtung und größten Auslenkung die größten Setzungen. In Versuch 4 fallen die Setzungen geringer aus, obwohl die Auslenkung dieselbe ist. Dies ist auf die höhere Lagerungsdichte bei Versuch 4 zurückzuführen. Versuch 2 und Versuch 4 wurden mit einer reinen Rotationsbewegung gefahren. Die Bewegung des Kopfpunktes wurde mit ± 15 mm ausgeführt. Bei den Versuchen 7 und 8 zeigt sich das gleiche Bild. Versuch 8 wurde mit einer höheren Lagerungsdichte durchgeführt. Die Auslenkung der Widerlagerwand betrug am Kopfpunkt ± 10 mm und am Fußpunkt ± 2 mm. Für alle Versuche gilt, dass die größten Setzungen nach dem letzten durchgeführten Zyklus auftraten. Es wurden folgenden Erkenntnisse abgeleitet:

- Je höher die Lagerungsdichte, desto geringer die Setzungen.
- Je größer die Auslenkung, desto größer die Setzungen.
- Die Art der Bewegung hat Einfluss auf die Setzungen.
- Bei den ersten Zyklen treten größere Setzungen auf.

7.2 Erkenntnisse Kräfteverläufe

Bei den Messwerten der Kräfte zeigen sich dieselben Einflussfaktoren wie bei der Oberflächensetzung. Lagerungsdichte, Art der Bewegung, Auslenkung und Anzahl der Zyklen sind die entscheidenden Parameter. Bei gleicher Lagerungsdichte und gleicher Verschiebung der Widerlagerwand zeigen sich nahezu identische Ergebnisse. Vergleicht man die Versuche 1 und 2 miteinander, 5 und 6 sowie 8 und 9 wird diese Aussage bestätigt. Auch die Startrichtung hat keinen erkennbaren Einfluss. Versuch 3, in passiver Richtung gestartet, erreicht ähnliche Werte wie die Versuche 1 und 2. Versuch 4 wurde mit einer höheren Lagerungsdichte als die Versuche 1, 2 und 3 durchgeführt. Hier zeigt sich die Erhöhung der Kräfte auf Grund der Lagerungsdichte um ca. 20%.

Unter gleichen Voraussetzungen, Bewegungsart und Auslenkung, wurden die Versuche 6 bis 9 gestartet. Versuche 8 und 9 mit erhöhter Lagerungsdichte, was sich in der Erhöhung der Kräfte um ca. 15% widerspiegelt. Dargestellt wurden die horizontalen Gesamtauflagerkräfte der Versuche in Abbildung 87.

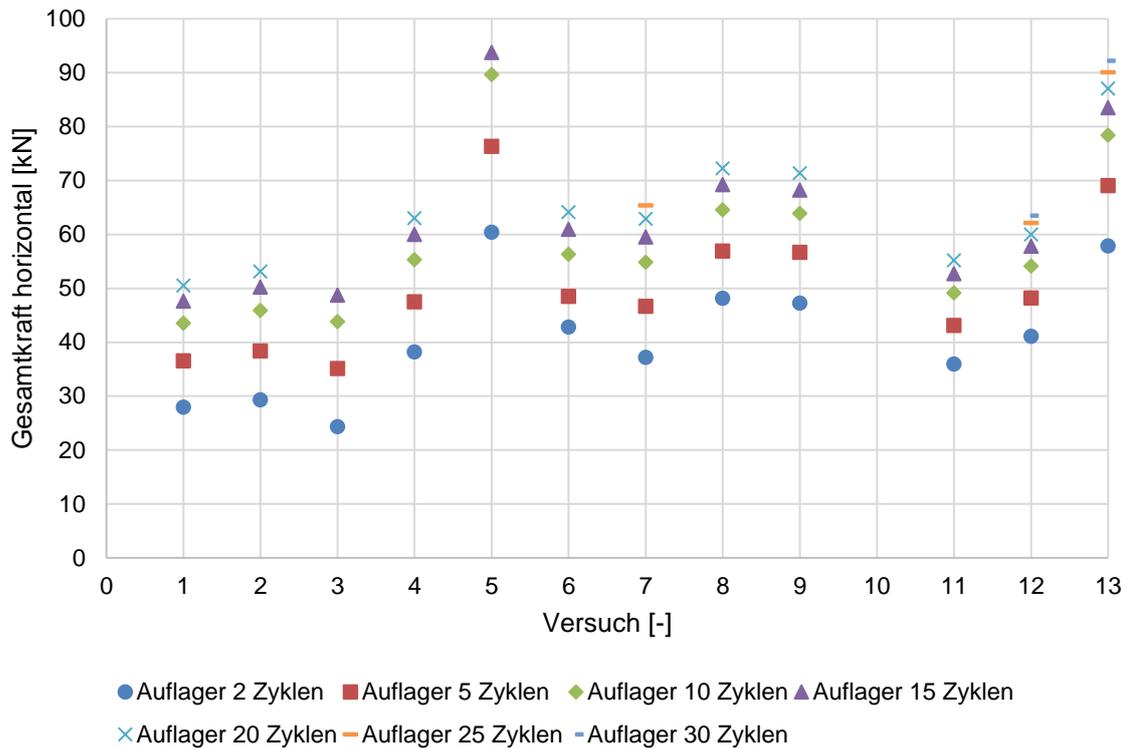


Abbildung 87: Vergleich Versuche 1 bis 13 horizontale Auflagerkraft Gesamt

In den Kräfteverläufen, die dem Anhang zu entnehmen sind, zeigt sich bei fast allen Versuchen, dass die maximalen Kräfte im passiven Wendepunkt noch nicht ihr Maximum erreicht haben. Im 0-Durchgang in passiver Richtung werden jedoch bei höherer Zyklenanzahl kaum Erhöhungen der Kräfte beobachtet. Daraus lässt sich schließen, dass nur noch in der passiven Zone, ab einem gewissen Zyklus, erhöhte Auflagerkräfte generiert werden. Bei Versuchen mit höherer Lagerungsdichte geht dies schneller vonstatten. Der größte Zuwachs von Kräften geschieht in den ersten beiden Zyklen.

In Abbildung 88 kann bei reiner Rotation beobachtet werden, dass in der Mitte der Widerlagerwand die größten horizontalen Kräfte auftreten. Aus diesem Grund liegt die resultierende Erddruckkraft in etwa auf $H/2$.

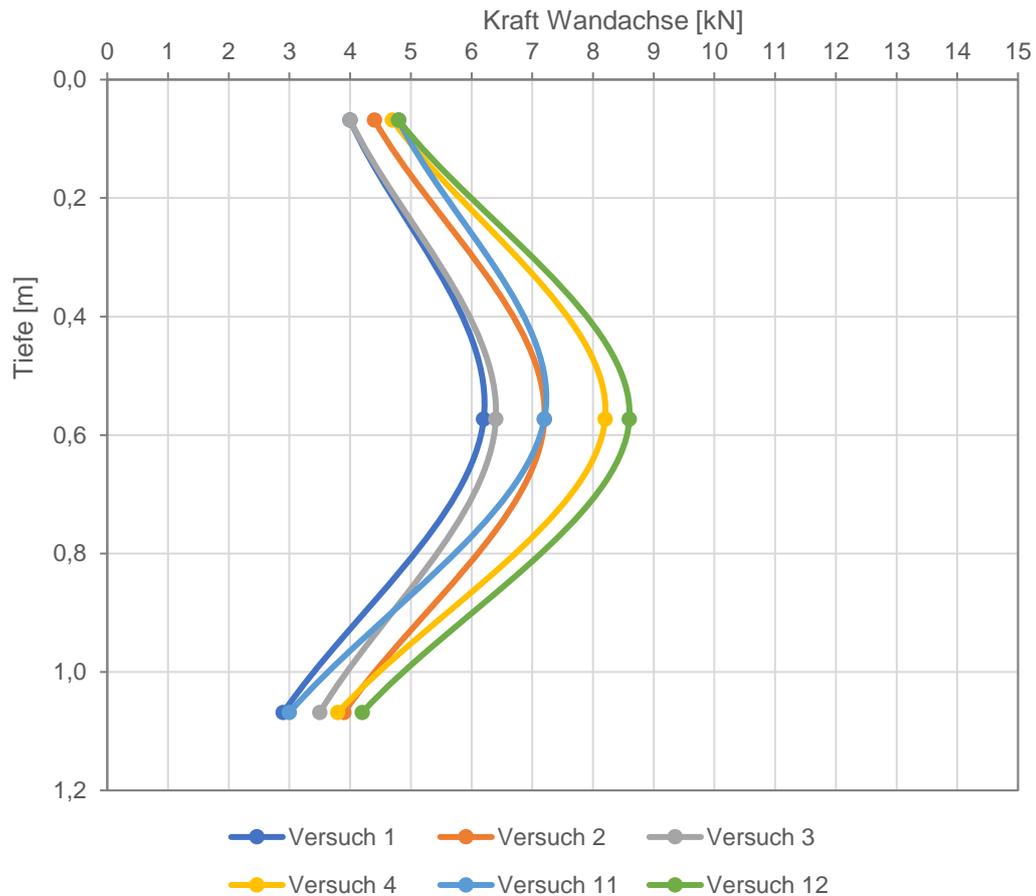


Abbildung 88: Rotationsversuche Wandachsen Vergleich nach 20 Zyklen

Bei kombinierten Versuchen (siehe Abbildung 89) kann festgestellt werden, dass die unterste Wandachse größere Kräfte als bei reiner Rotation aufnimmt, was zu einer Absenkung des Angriffspunktes der Erddruckresultierenden führt. Dieser kann auf ca. $H/3$ vom Rotationspunkt aus geschätzt werden.

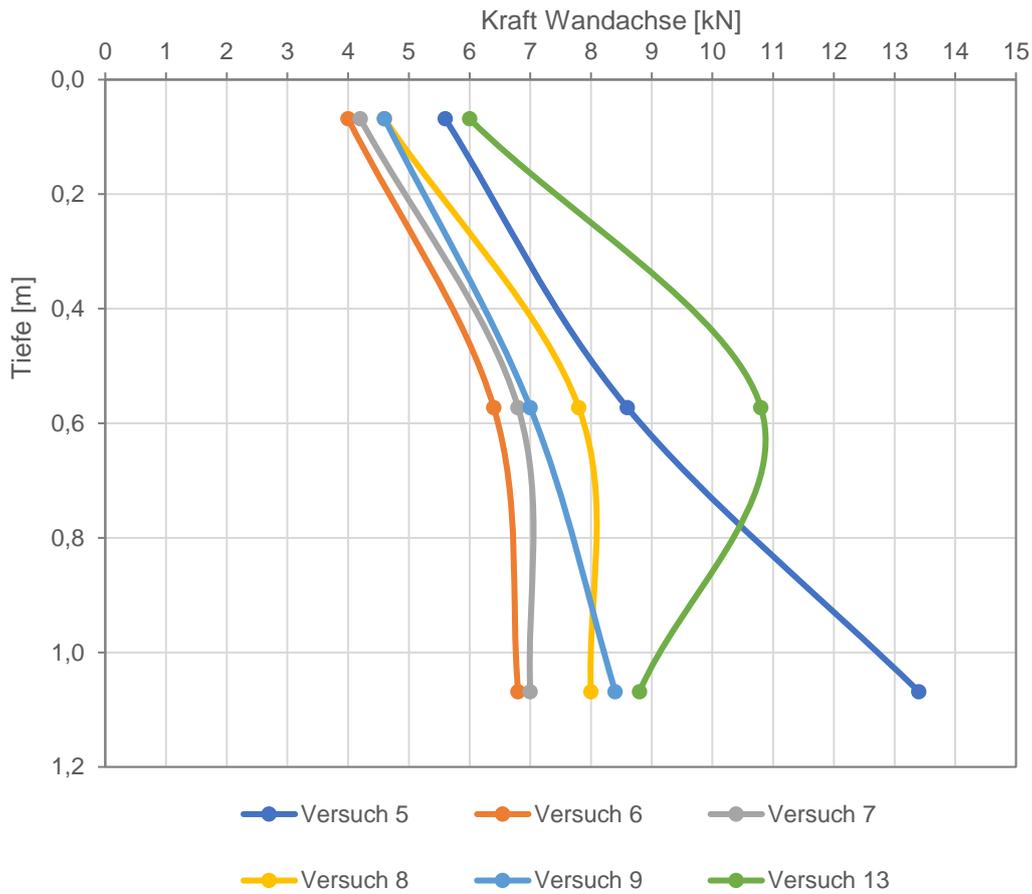


Abbildung 89: Kombinierte Versuche Wandachsen Vergleich

Aus der Kraftentwicklung können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Mit steigender Lagerungsdichte, steigen auch die Kräfte des Erddrucks.
- Der Erddruck steigt bei einer größeren Auslenkung.
- Der größte Sprung im Kräfteverlauf findet innerhalb der ersten beiden Zyklen statt.
- Nach 30 Zyklen steigt der Erddruck auf der passiven Seite noch an.
- Die Lage der Erddruckresultierenden ist bei Rotationsbewegungen näherungsweise bei $H/2$ und bei kombinierten Versuchen bei $H/3$.

7.3 Vergleich der Messungen mit theoretischen Ansätzen

In dem folgenden Kapitel werden die Messergebnisse aus den Versuchen 1-13 mit den errechneten Ergebnissen aus theoretischen Ansätzen verglichen. Zur Erddruckberechnung wird in dieser Arbeit die Theorie nach Vogt (1984) zum Vergleich herangezogen.

Mit Hilfe der Gleichung (2.14) wurden die mobilisierten passiven Erddrücke der Versuche

ermittelt. Der Erdruehdruckbeiwert K_0 wurde nach Jaky und der passive Erddruckbeiwert K_{ph} nach Coulomb ermittelt. Durch die verschiedenen Lagerungsdichten der Versuche wurde der Reibungswinkel φ angepasst. In Abbildung 90 sind die Erddruckverläufe, die nach dem Ansatz von Vogt ermittelt wurden, den Versuchen 1 bis 4, 11 und 12 dargestellt. Die Werte liegen, wie zu erwarten, zwischen dem Erdruehdruck und dem passiven Erddruck. Vergleicht man qualitativ die Verläufe der Wandachsen (Abbildung 88) und die Ergebnisse aus der Berechnung nach Vogt, kann eine Übereinstimmung festgestellt werden.

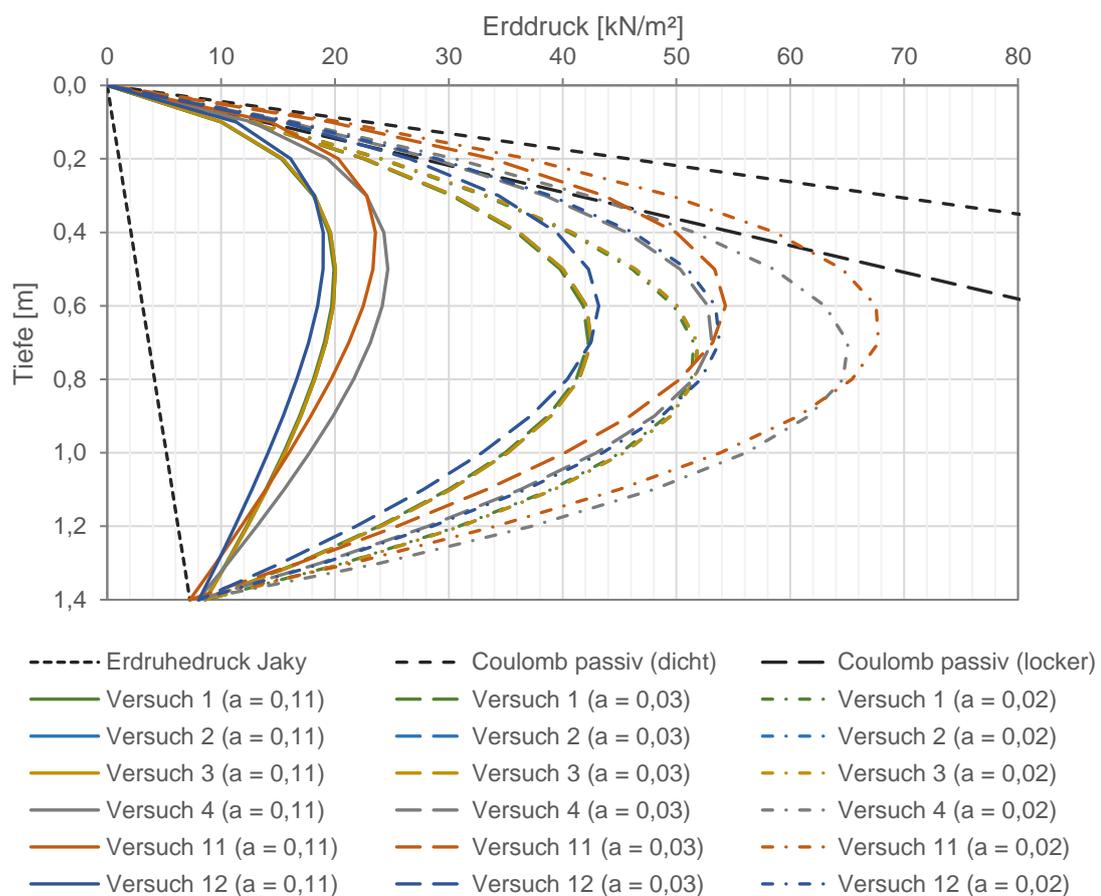


Abbildung 90: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Rotation

Die Verschiebungen, die in die Berechnung eingegangen sind, entsprechen dem doppelten Weg aus der Nulllage. Anders ausgedrückt wurde der Weg vom aktiven Wendepunkt bis zum passiven Wendepunkt in Gleichung (2.14) in Rechnung gestellt. Dies erklärt sich mit der Tatsache, dass es sich bei dem Versuchsmaterial um ein granulares Schüttmedium gehandelt hat. Dasselbe gilt für die Mobilisierung der Versuche 5 bis 9 und 13. In Abbildung 91 sind diese Verläufe, bei denen es sich um eine Kombination aus Parallelverschiebung und Rotation handelt, dargestellt. Die Ergebnisse aus den Versuchen mit kombinierter

Verschiebung (Abbildung 89) entsprechen eher dem Mobilisierungsansatz für parallele Wandverschiebung wie in Abbildung 92.

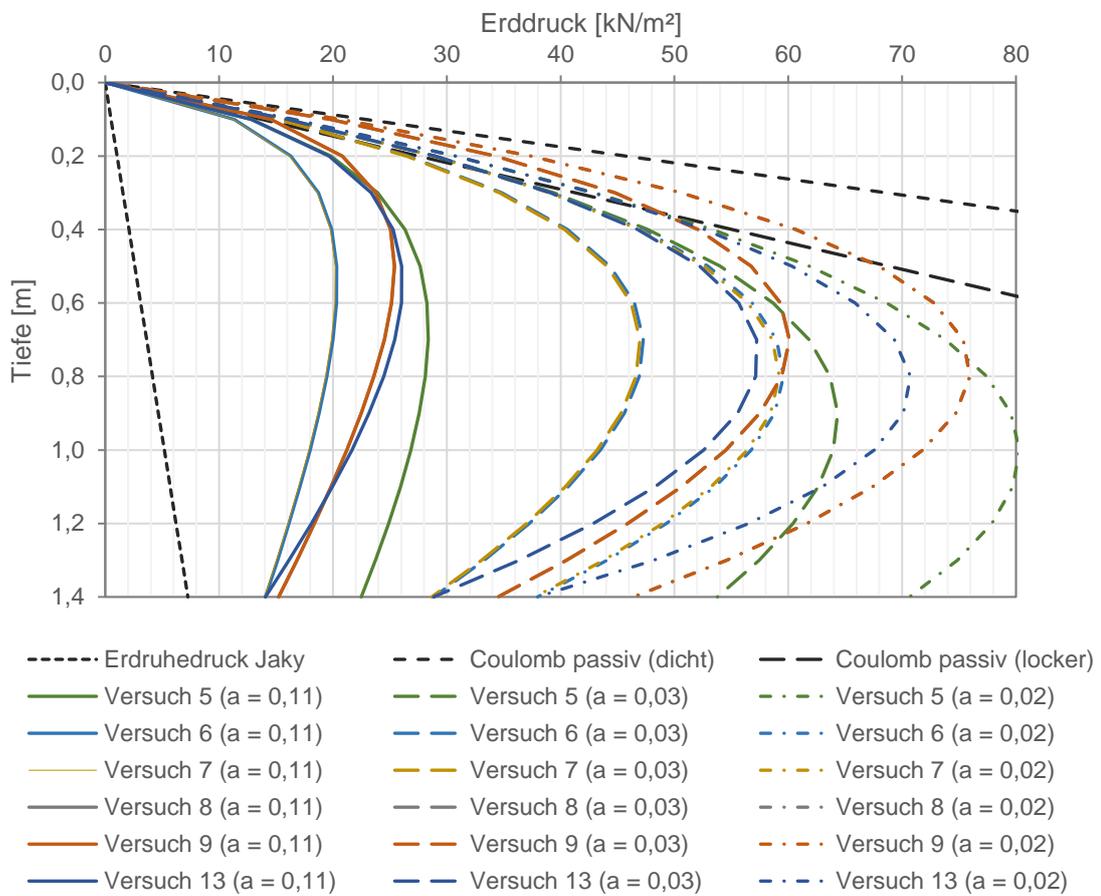


Abbildung 91: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Rotation und Parallelverschiebung

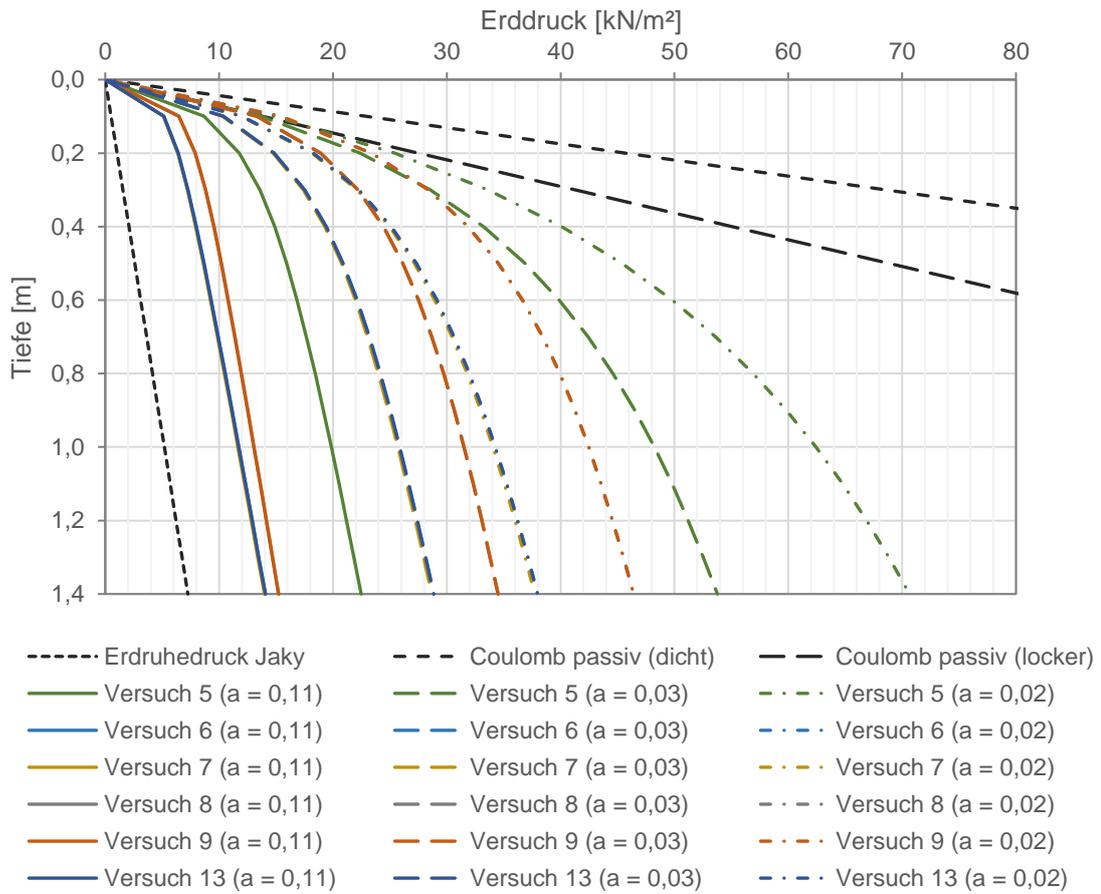


Abbildung 92: Mobilisierung des passiven Erddruckes nach Vogt für Parallelverschiebung

Nachfolgend werden analytische Ansätze mit den Messergebnissen aus allen Versuchen in Abbildung 93 dargestellt. Die strichlierten Linien zeigen dabei die Ergebnisse nach den Methoden von Jaky, Coulomb, Vogt und Rankine. Es werden die Kräfte, welche am Auflager in horizontaler Richtung wirken, verglichen. Für diese Darstellung wurden die Gesamtkräfte im Auflager herangezogen. Der Unterschied der passiven Erddrücke zwischen den Ansätzen von Coulomb und Rankine lässt sich mit der Annahme des Wandreibungswinkels erklären. Dabei wurde für die Berechnung der Wandreibungswinkel $\delta = 20^\circ$ angenommen. Zur besseren Darstellung wurde in Abbildung 94 der Ansatz von Coulomb weggelassen und eine größere Skalierung gewählt.

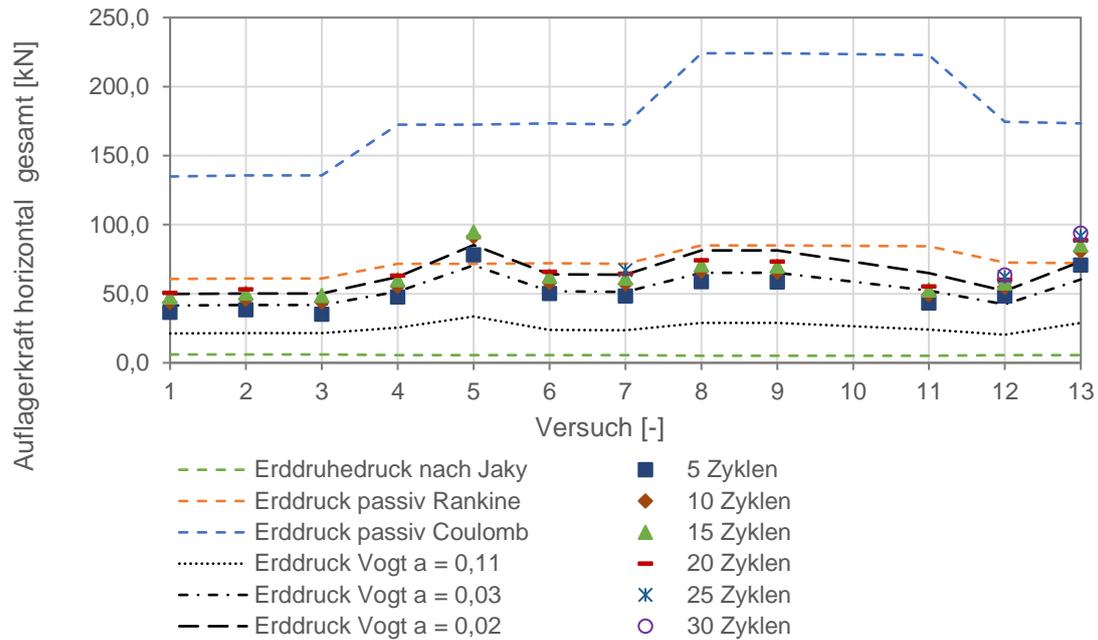


Abbildung 93: Vergleich analytische Ansätze mit gesamter horizontaler Auflagerkraft

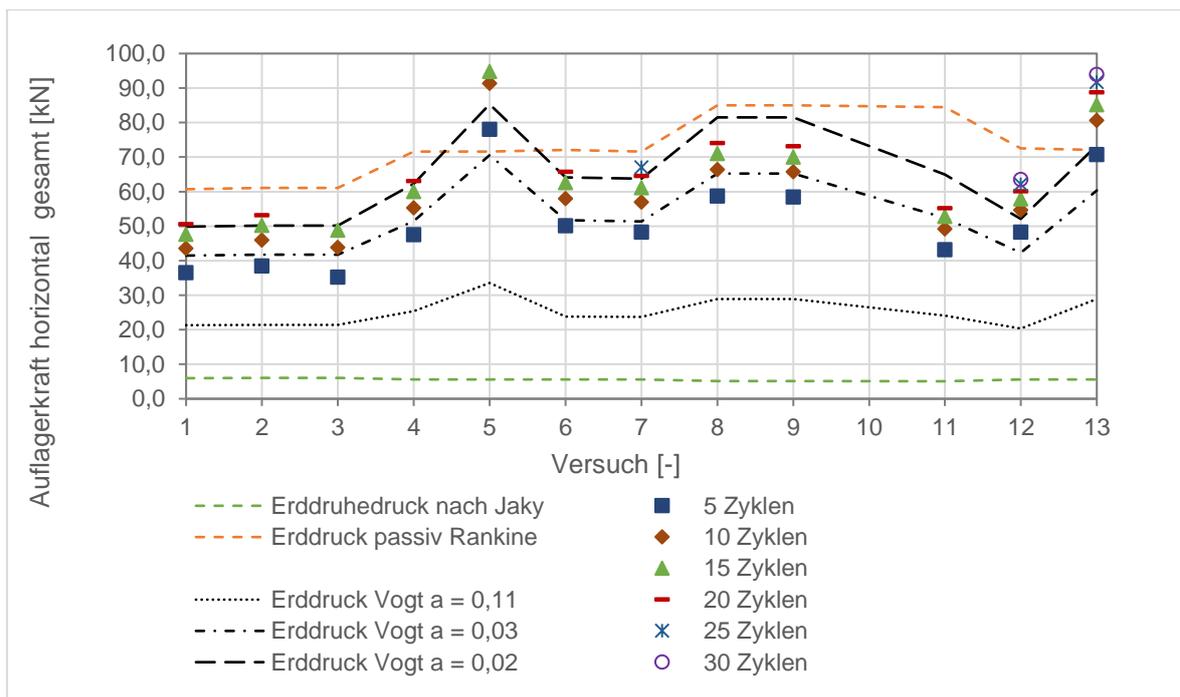


Abbildung 94: Vergleich analytische Ansätze mit gesamter horizontaler Auflagerkraft ohne passiven Erddruck nach Coulomb

Die Versuchswerte sind den Werten nach Vogt (mit $a = 0,02$ bzw. $0,03$) am nächsten. Der nach Coulomb ermittelte passive Erddruck liegt dabei weit darüber und wird nie erreicht. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass Randeinflüsse wie Wandreibung die Kräfte im Auflager beeinflussen. Eine Bestimmung dieser Effekte ist jedoch nur schwer möglich.

Bei den Versuchen 12 und 13 wurden Extrapolationen durchgeführt. Wie in Abbildung 95 zu erkennen ist, nimmt die Auflagerkraft bei Versuch 12 und Versuch 13 nach 30 Zyklen immer noch zu. Aus diesem Grund wurde in Abbildung 96 eine Extrapolation von 30 auf 100 Zyklen durchgeführt. Eine Abschätzung ist näherungsweise möglich, da bei der logarithmischen Darstellung die Messwerte ungefähr auf einer Geraden liegen. Daraus kann eine weitere Steigerung der Kräfte von etwa 20% - 30% von Zyklus 30 bis Zyklus 100 abgelesen werden.

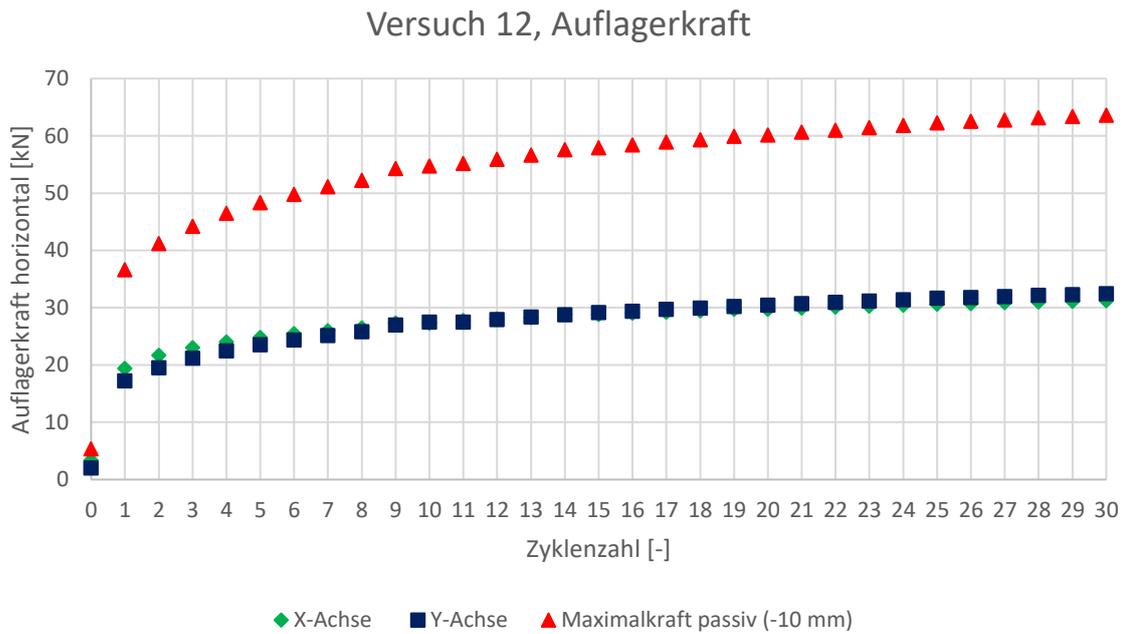


Abbildung 95: Auflagerkraft horizontal zyklusweise Versuch 12

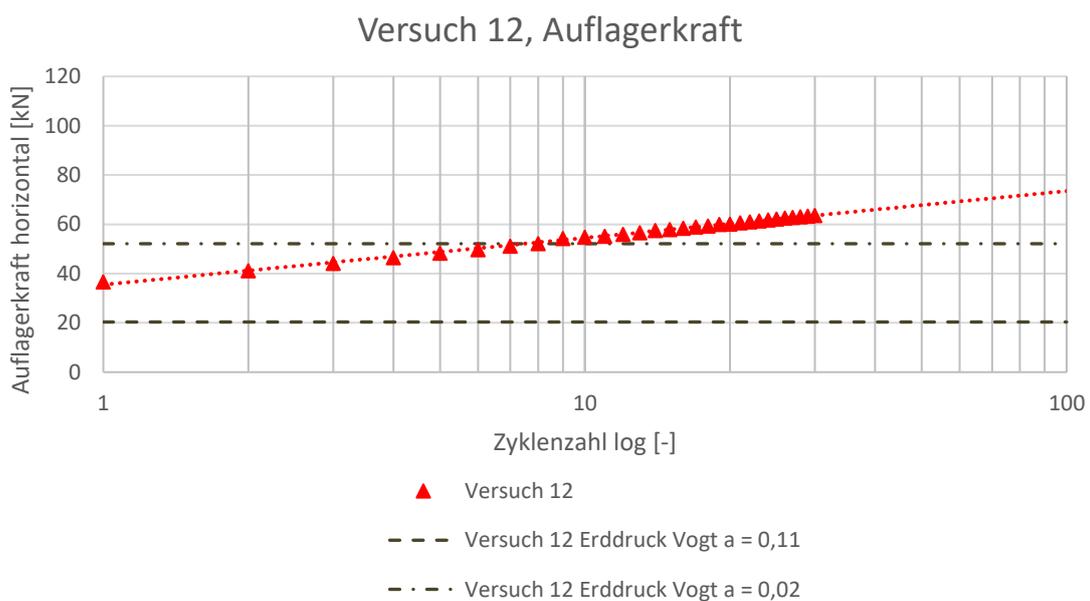


Abbildung 96: Extrapolation Gesamt-Auflagerkraft Versuch 12 logarithmische Darstellung

Auch bei Versuch 13 wurde eine Extrapolation durchgeführt. Zum Unterschied zu Versuch 12 wird Versuch 13 mit einer Kombination aus Rotation und Translation durchgeführt. Die Abbildung 97 zeigt die gemessenen Kräfte in den Auflagern. Diese wurden aufsummiert und in Abbildung 98 dargestellt. Auch hier wurden die Auflagerkräfte zusammengezählt. Mit dem Ergebnis des Versuches 13 kann eine ähnliche Kräfteentwicklung nachgewiesen werden. Auch bei diesem Versuch stellt sich eine Kraftsteigerung nach 100 Zyklen von etwa 20% ein.

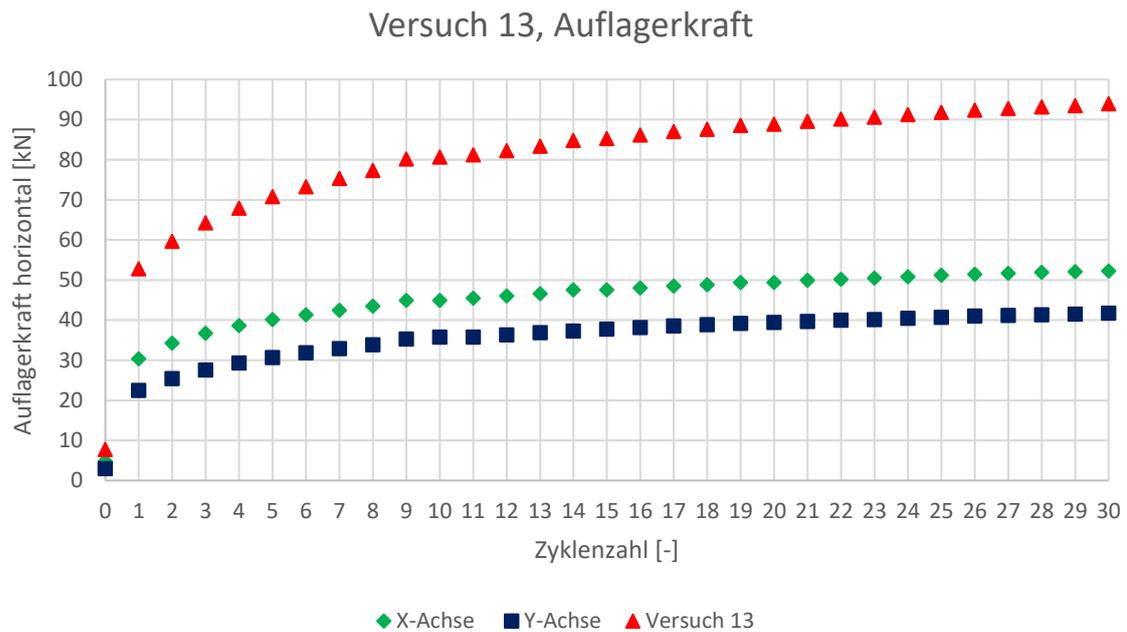


Abbildung 97: Auflagerkraft horizontal zyklusweise Versuch 13

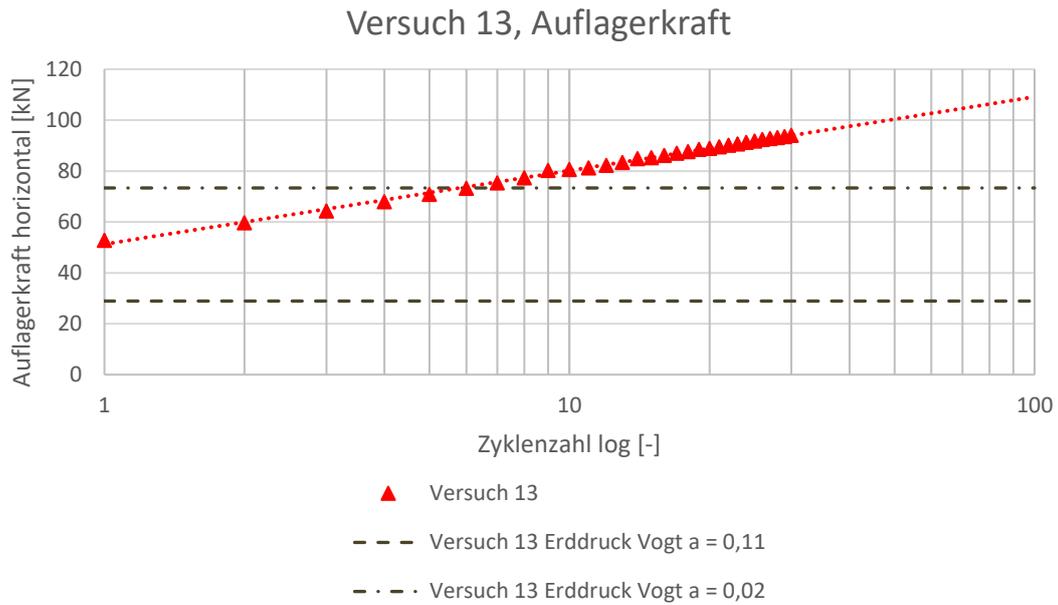


Abbildung 98: Extrapolation Gesamt-Auflagerkraft Versuch 13 logarithmische Darstellung

Erkenntnisse aus dem Vergleich mit theoretischen Ansätzen:

- Der Ansatz von Vogt für eine Fußpunktdrehung konnte bestätigt werden.
- Der Ansatz von Vogt für eine dichte Lagerung ($a = 0,02$) stellt keinen gesicherten oberen Grenzwert dar.
- Die Kombination aus Translation und Rotation entspricht eher den Ansätzen einer Parallelverschiebung der Wand.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Erddruckkräfte sich bei steigender Zyklenanzahl immer geringfügiger ändern. Werden die Messergebnisse des Modellversuches mit den theoretischen Ansätzen verglichen, stellt sich heraus, dass die Ansätze von Vogt am besten mit den Messergebnissen übereinstimmen. Der Ansatz nach Vogt, mit einem Beiwert der Lagerung von $a = 0,02$, stellt auf Basis der durchgeführten Versuche für eine große Anzahl an Zyklen und dicht gelagerte Böden keinen gesicherten oberen Grenzwert dar. Ein detaillierter Ansatz für die Erddruckverteilung und Größe bei einer kombinierten Bewegungsform (Rotation & Translation) konnte aus den Versuchen nicht abgeleitet werden.

8.2 Ausblick

In Zukunft werden die Modellversuche immer besser auf die Natur übertragbar. Messergebnisse von weiteren Versuchsreihen können mit numerischen Berechnungen verglichen und dadurch neue Erkenntnisse gewonnen werden. Durch Beobachtungen bei realisierten integralen Brückenbauwerken können weitere Rückschlüsse gezogen werden. Die Umrüstung von bereits bestehenden konventionellen Brücken auf integrale Brücken wird bereits durchgeführt und zunehmend von größerem Interesse sein.

Literatur

- Adam, Dietmar. 2016.** *Grundbau und Bodenmechanik*. s.l. : Technische Universität Wien, 2016.
- ASTRA 12004. 2011.** Konstruktive Einzelheiten . 2011.
- BA 42/96. 2003.** The Design of Integral Brides. 2003.
- DIN 4085. 2017.** Baugrund - Berechnung des Erddrucks. 2017.
- England, G. L. 2001.** *Towards the Design of Soil Loading for Integral Bridges*. 2001.
- Klement Walter GmbH. 2015.** 2015.
- Lock, R. J. 2002.** *Integral Bridge Abutments*. 2002.
- Moser, Thomas. 2017.** *Nachrechnung und Ertüchtigung von Bestandsbrücken im A+S Netz*. s.l. : ASFINAG Service GmbH, 2017.
- ÖNORM B 4434: 1993 01 01.** Erd- und Grundbau - Erddruckberechnung.
- RVS 15.02.12. 2012.** Bemessung und Ausführung von Integralen Brücken. 2012.
- Szczyrba, Sebastian. 2013.** *Setzungsarme Bauweisen im Hinterfüllbereich von Brückenwiderlagern*. 2013.
- Vogt, N. 1984.** *Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen im Sand*. 1984.
- Walz, Bernhard. 2006.** *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik*. s.l. : Springer Verlag, 2006.

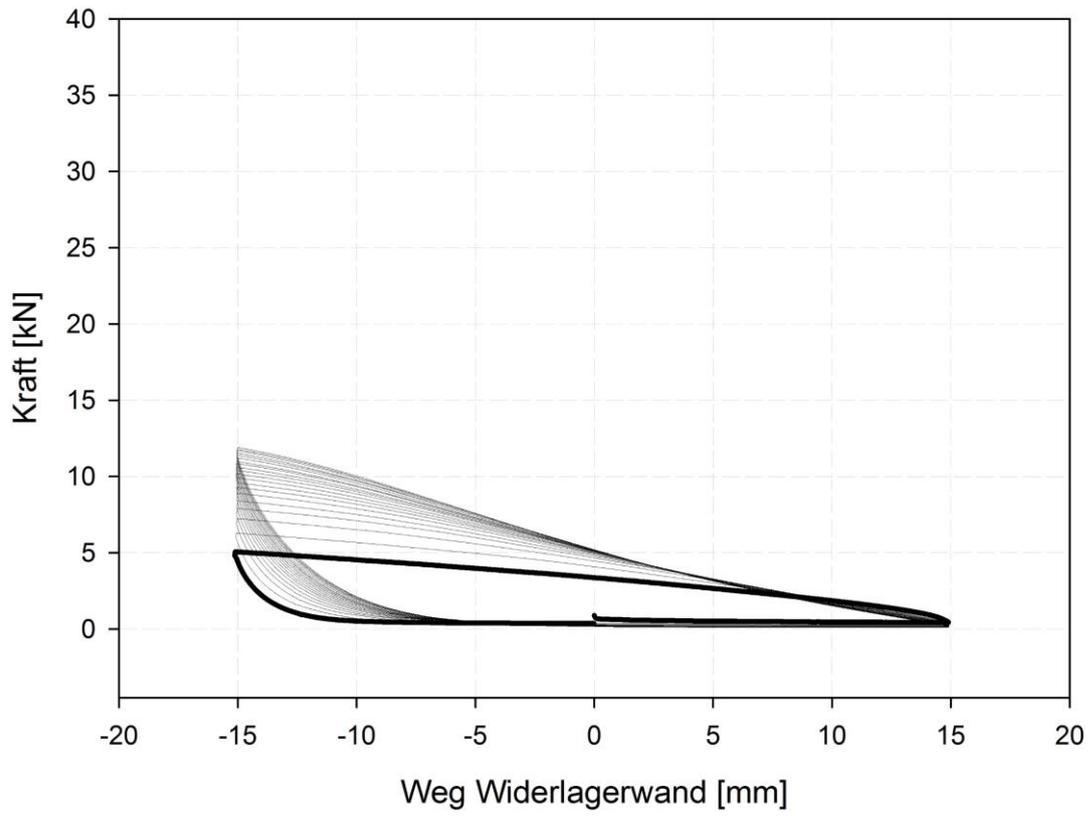
Anhang

Im Anhang sind die Kräfteverläufe der Versuche abgebildet.

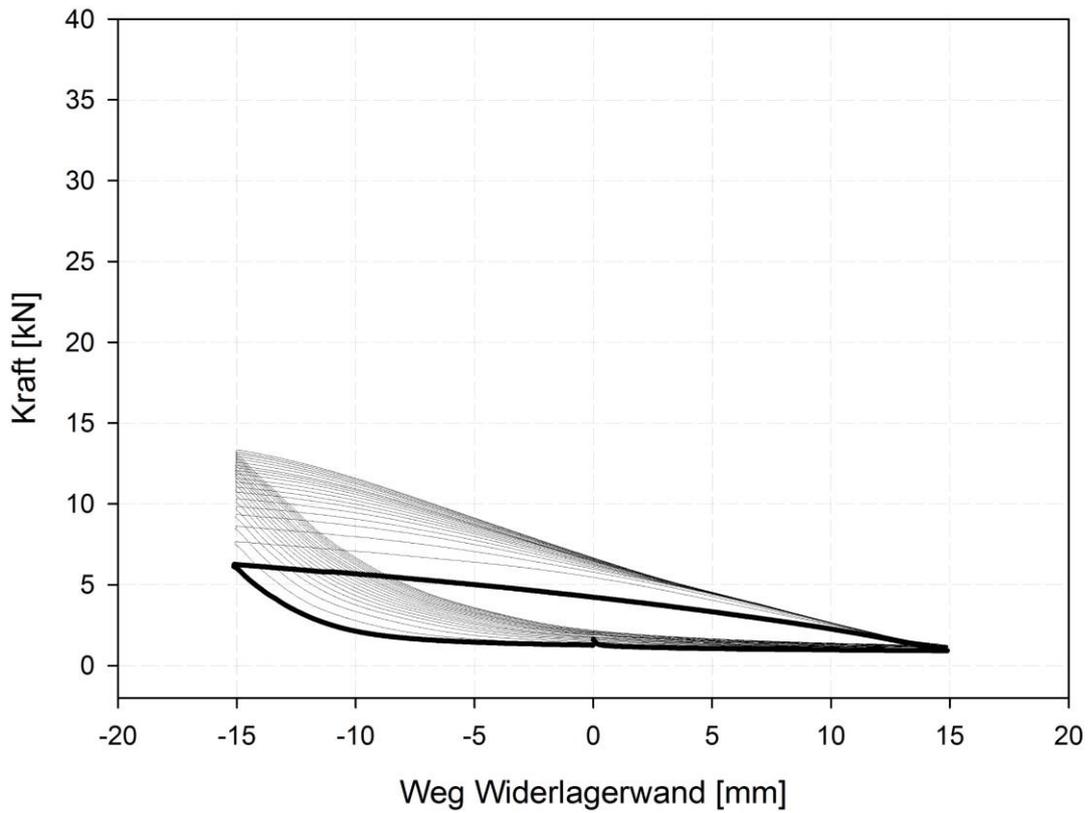
Versuch 1	107
Versuch 2	112
Versuch 3	116
Versuch 4	120
Versuch 5	124
Versuch 6	128
Versuch 7	132
Versuch 8	136
Versuch 9	140
Versuch 11	144
Versuch 12	148
Versuch 13	152

Versuch 1

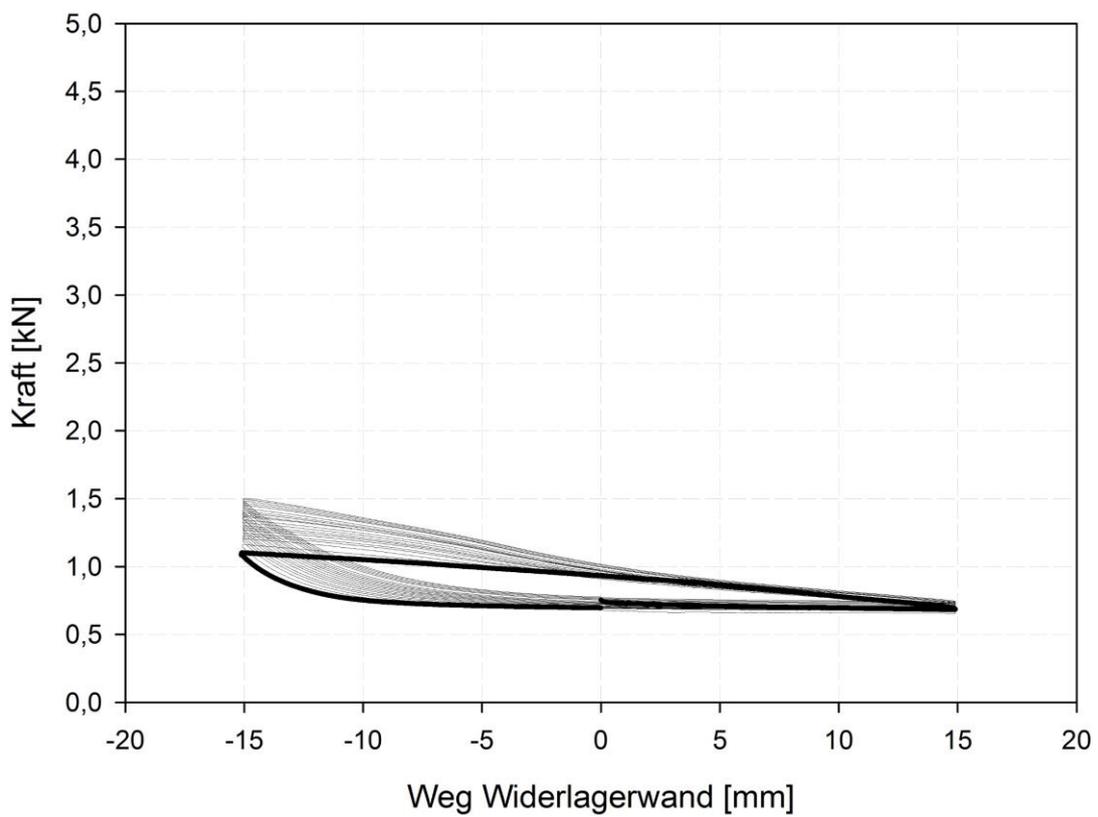
Auflager oben



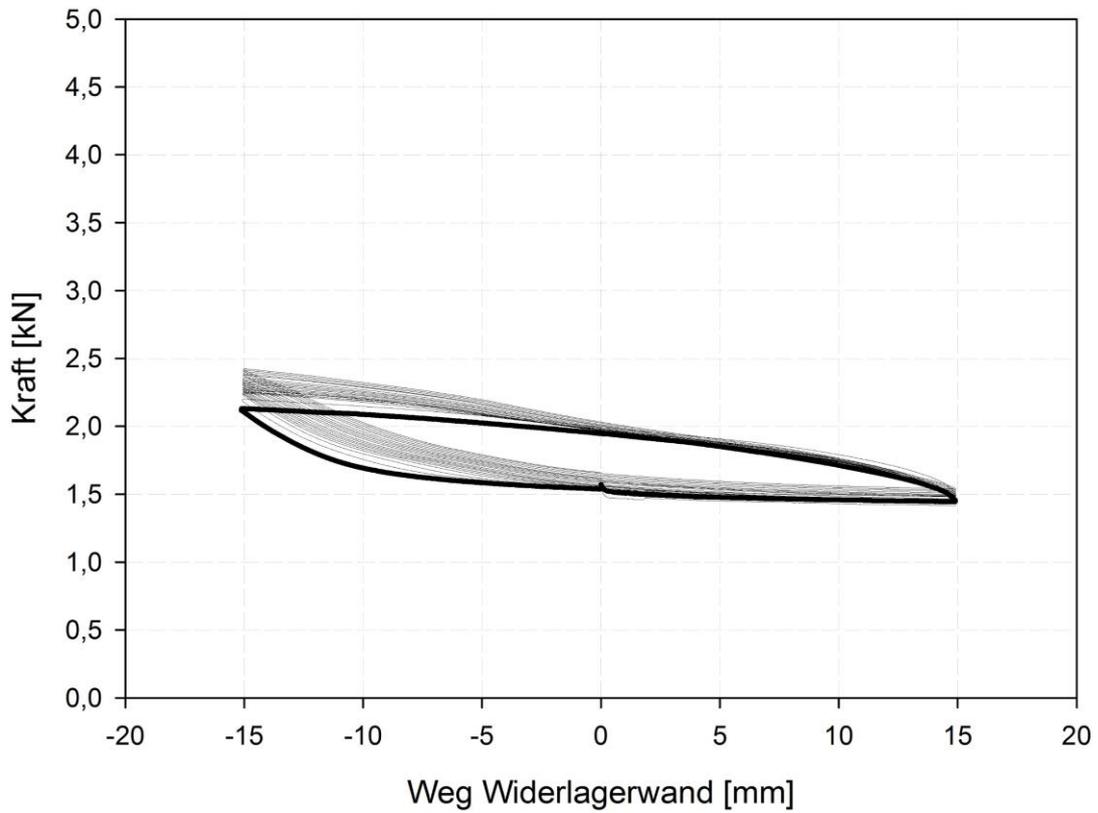
Auflager unten



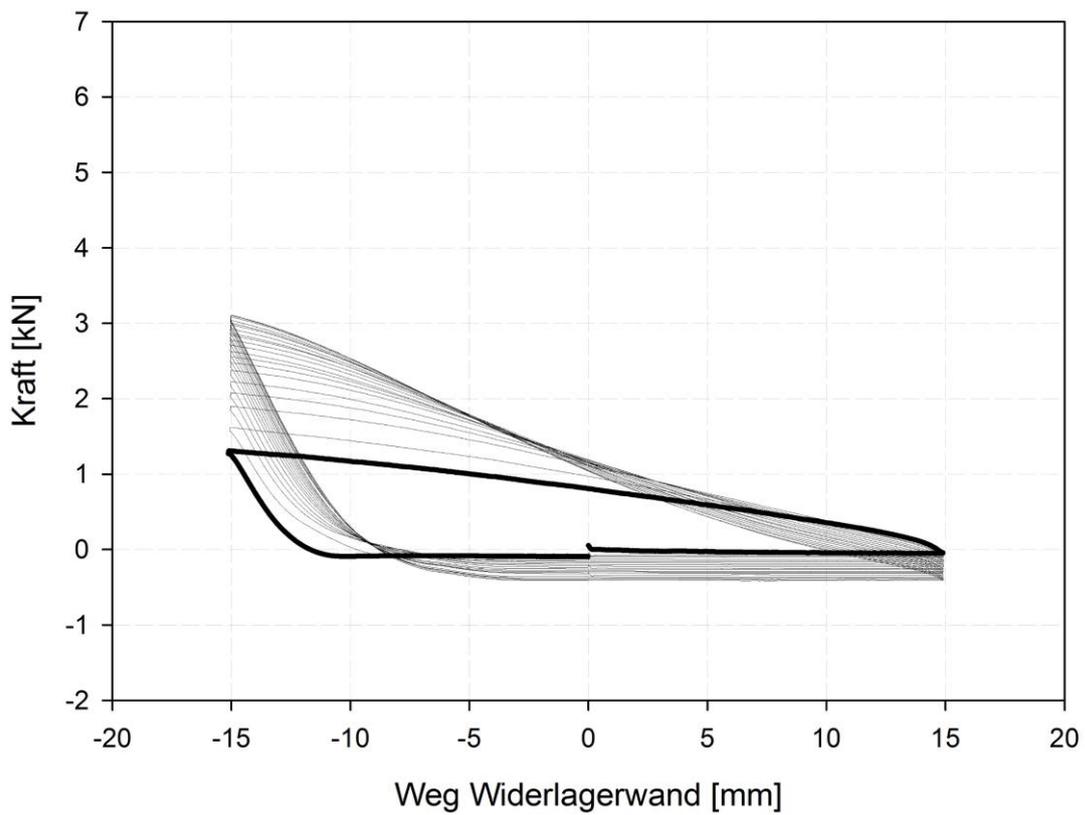
Rückwand oben



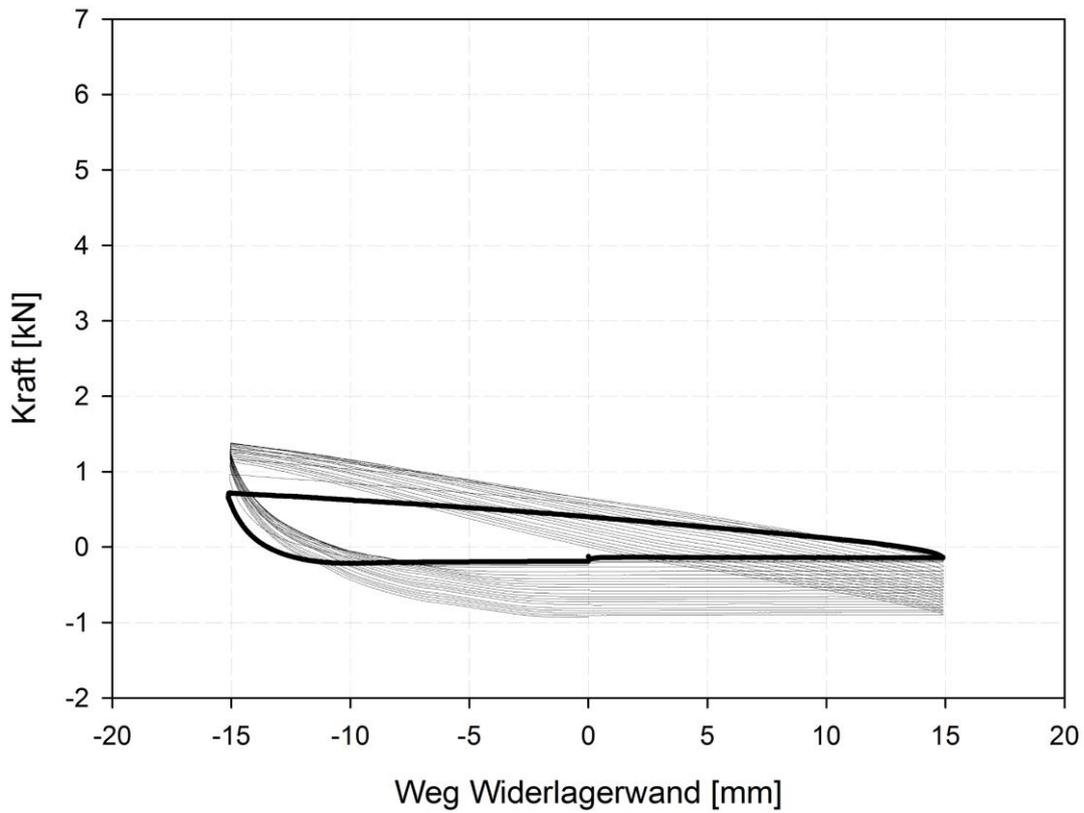
Rückwand unten



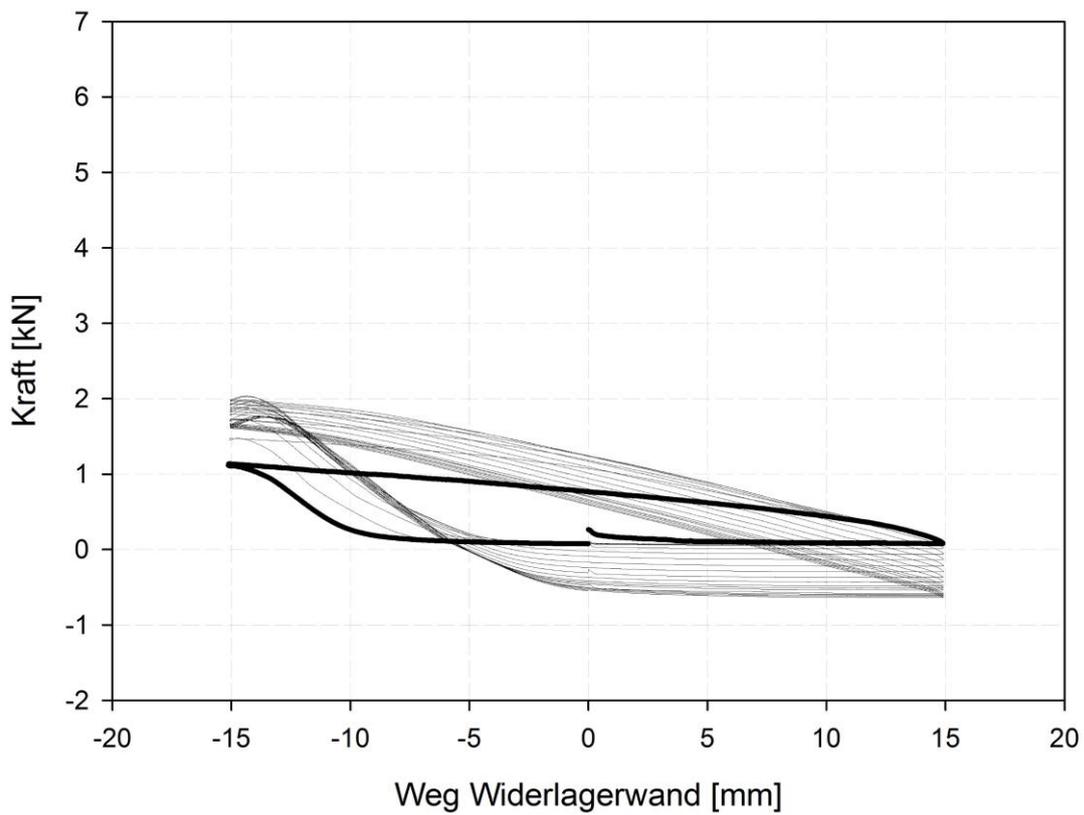
Wandachse Mitte



Wandachse oben

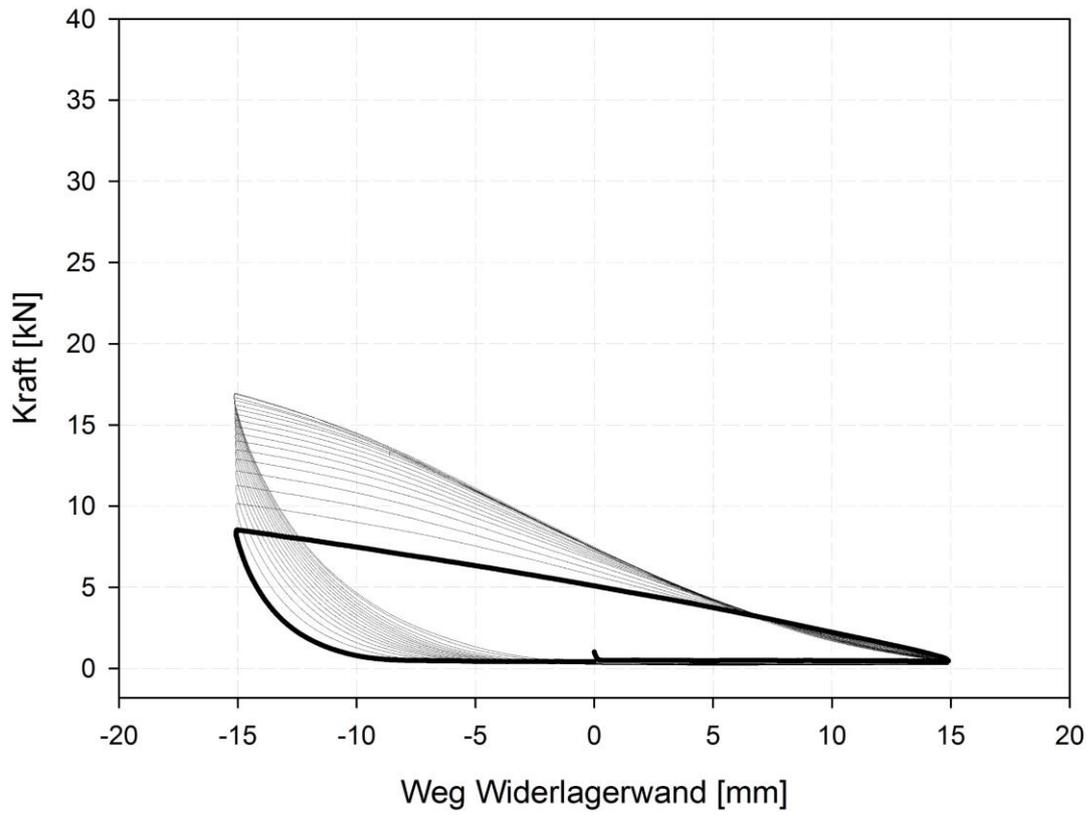


Wandachse unten

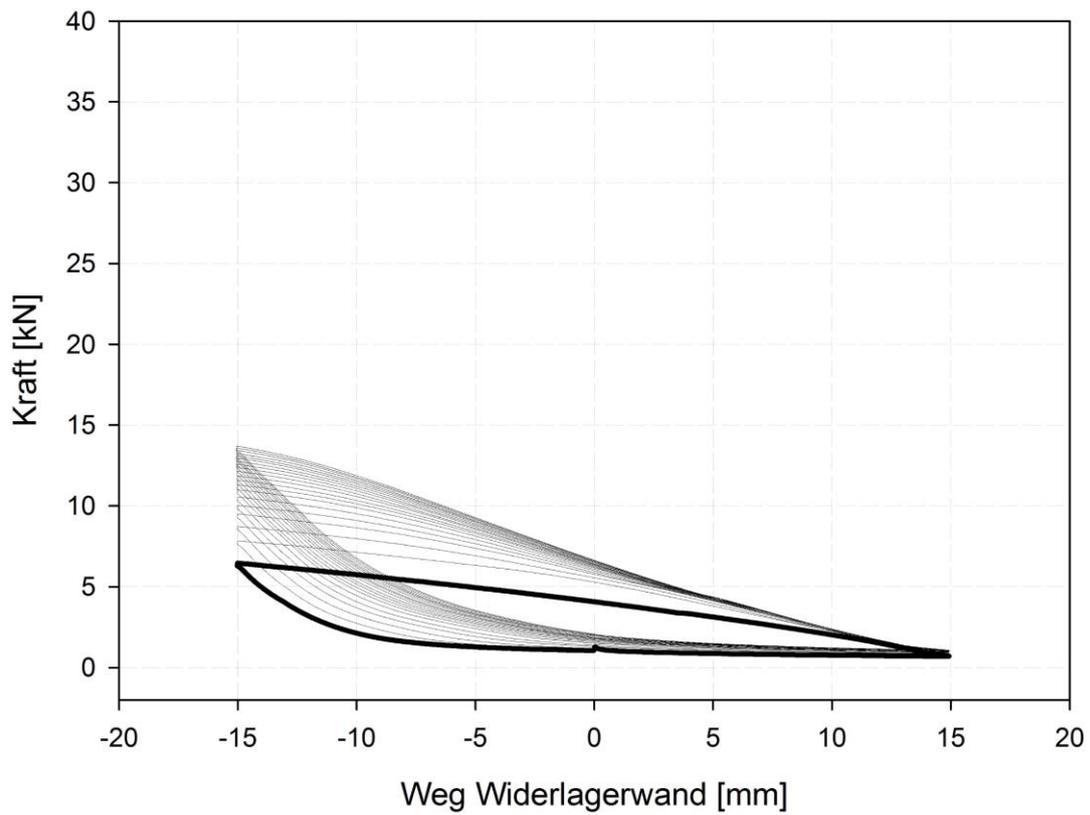


Versuch 2

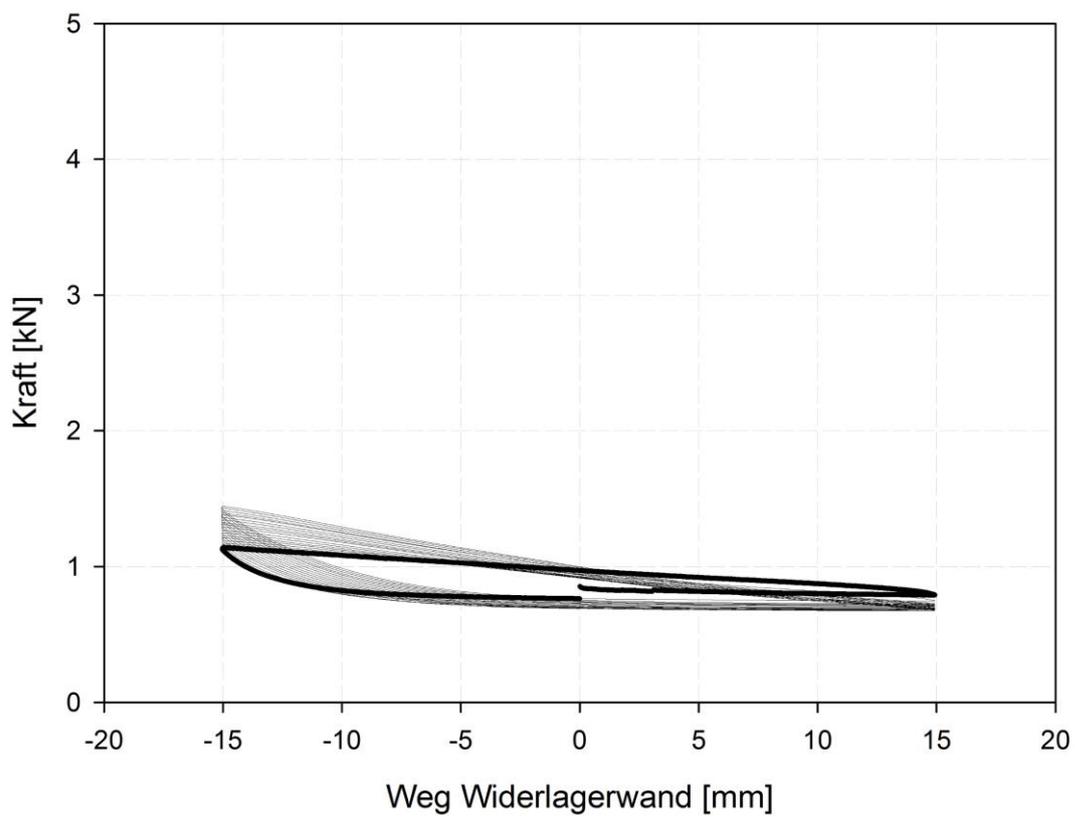
Auflager oben



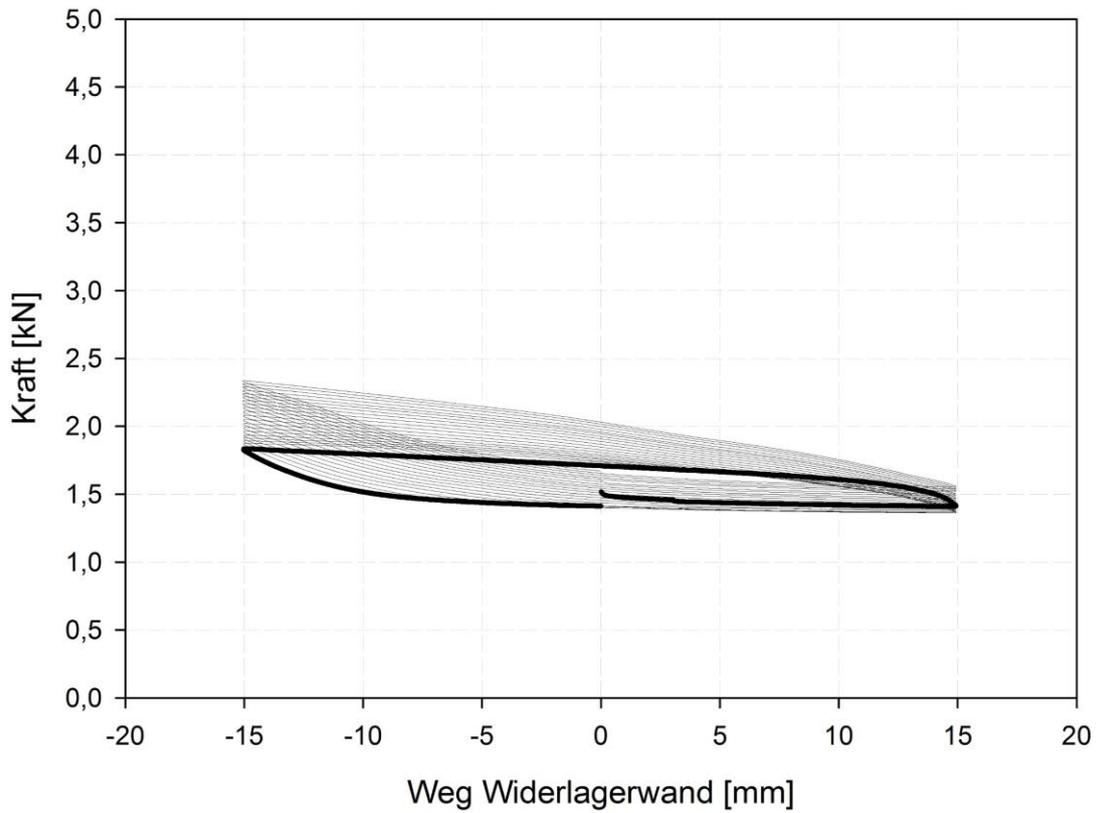
Auflager unten



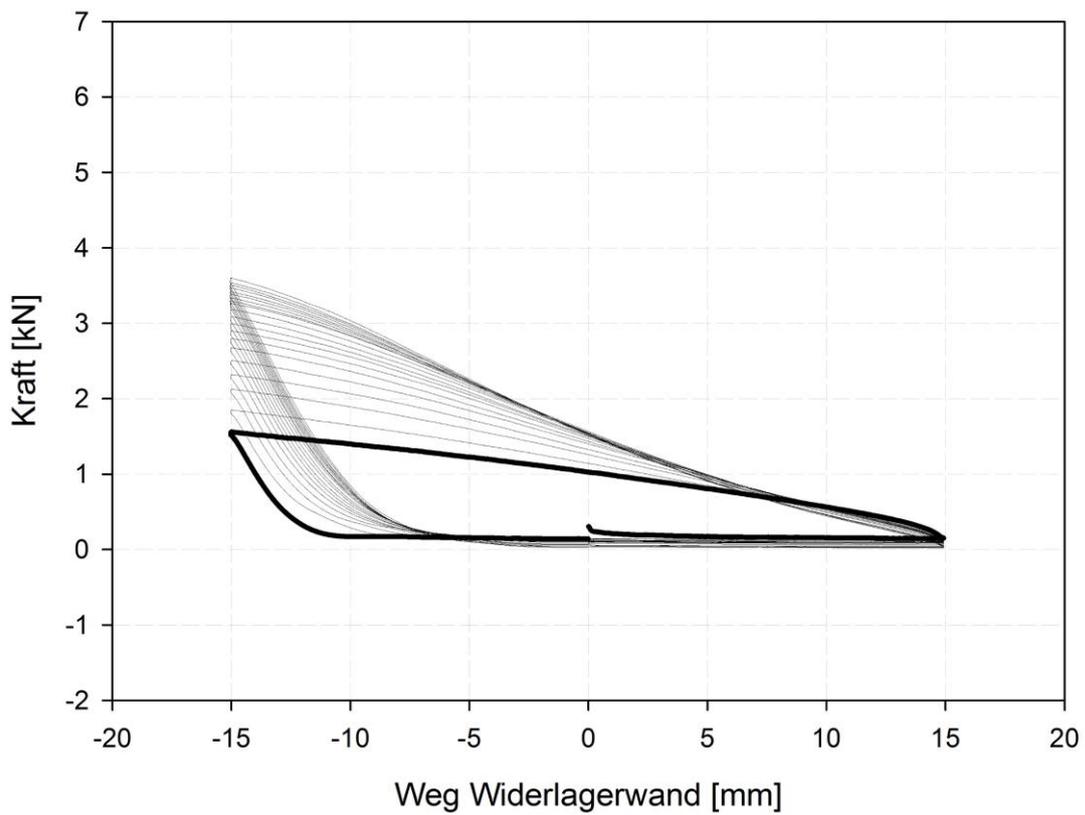
Rückwand oben



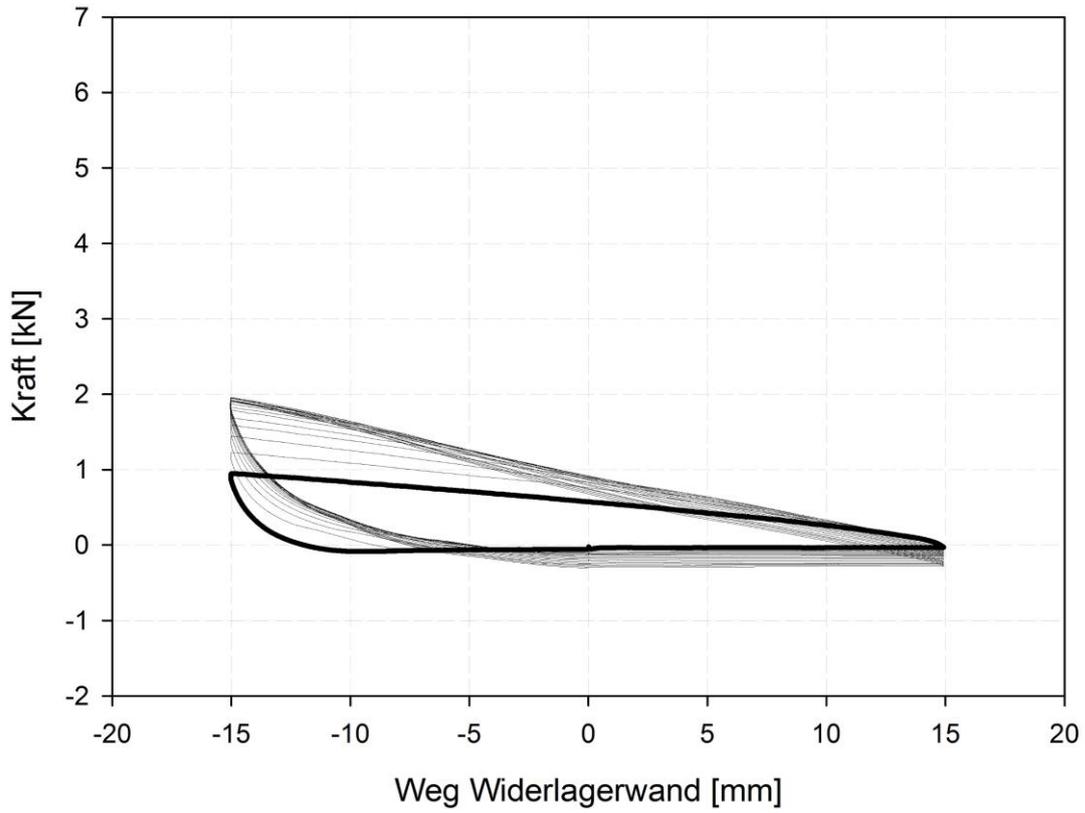
Rückwand unten



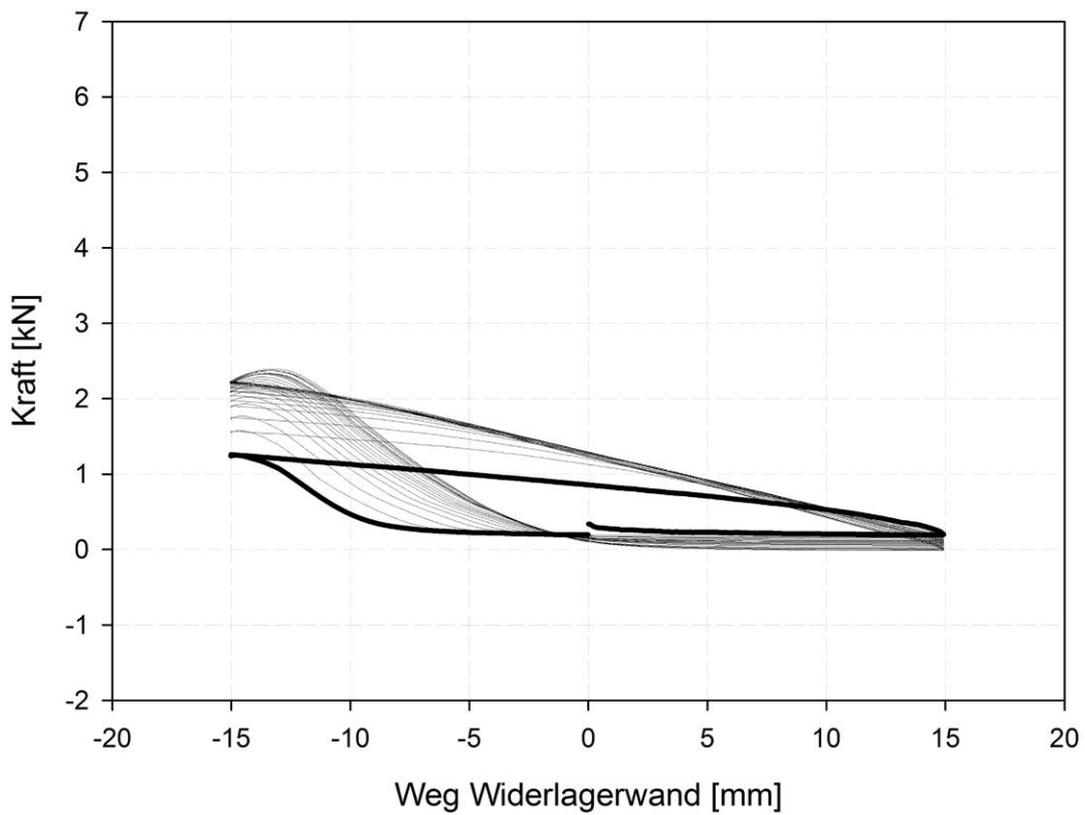
Wandachse Mitte



Wandachse oben

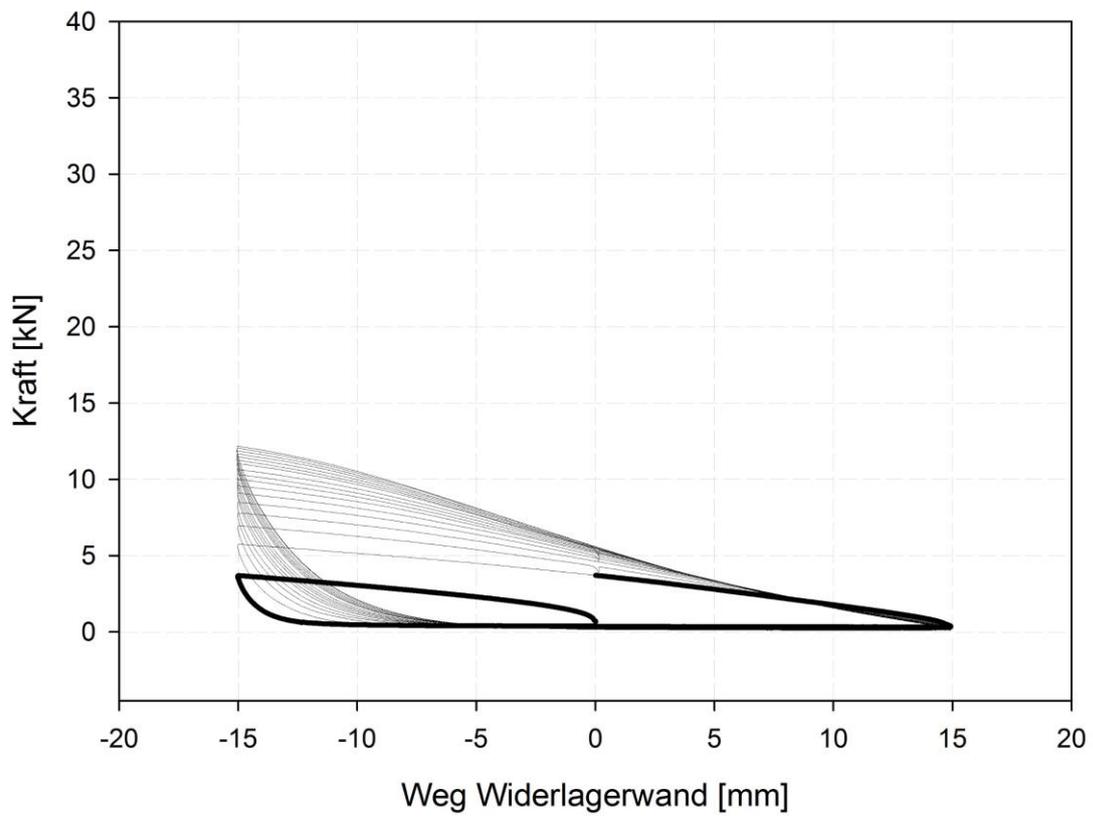


Wandachse unten

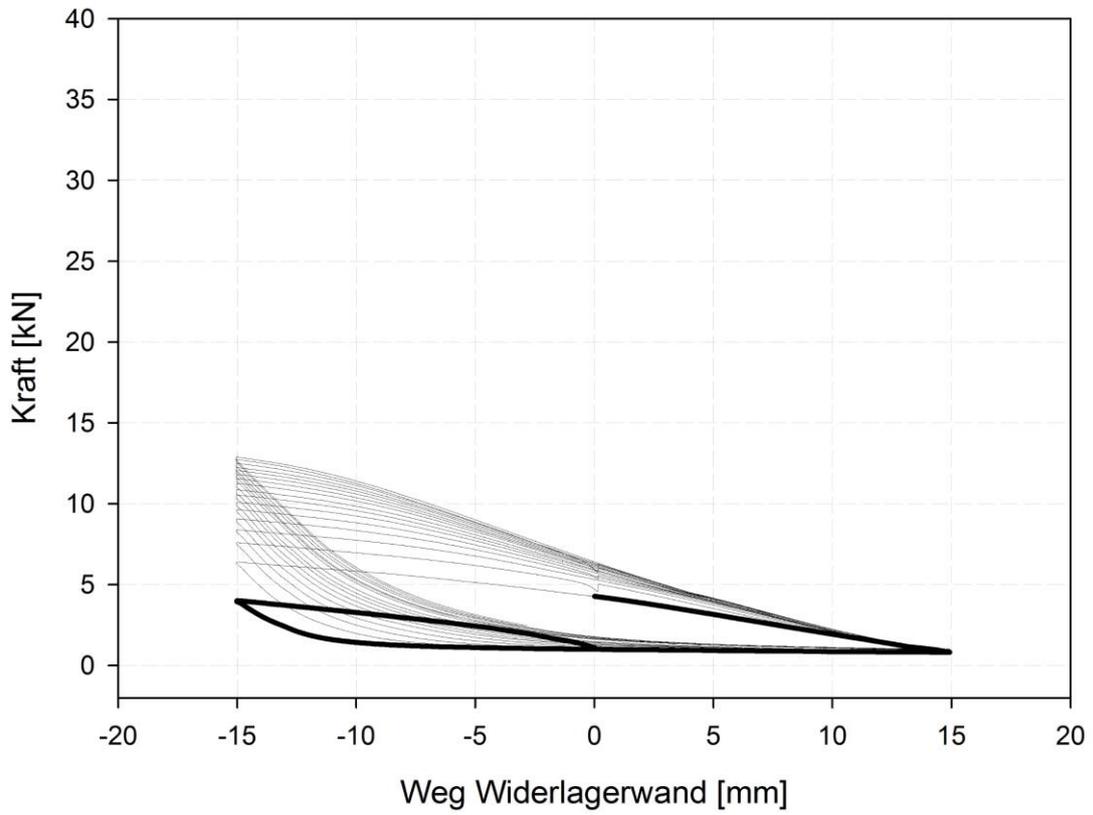


Versuch 3

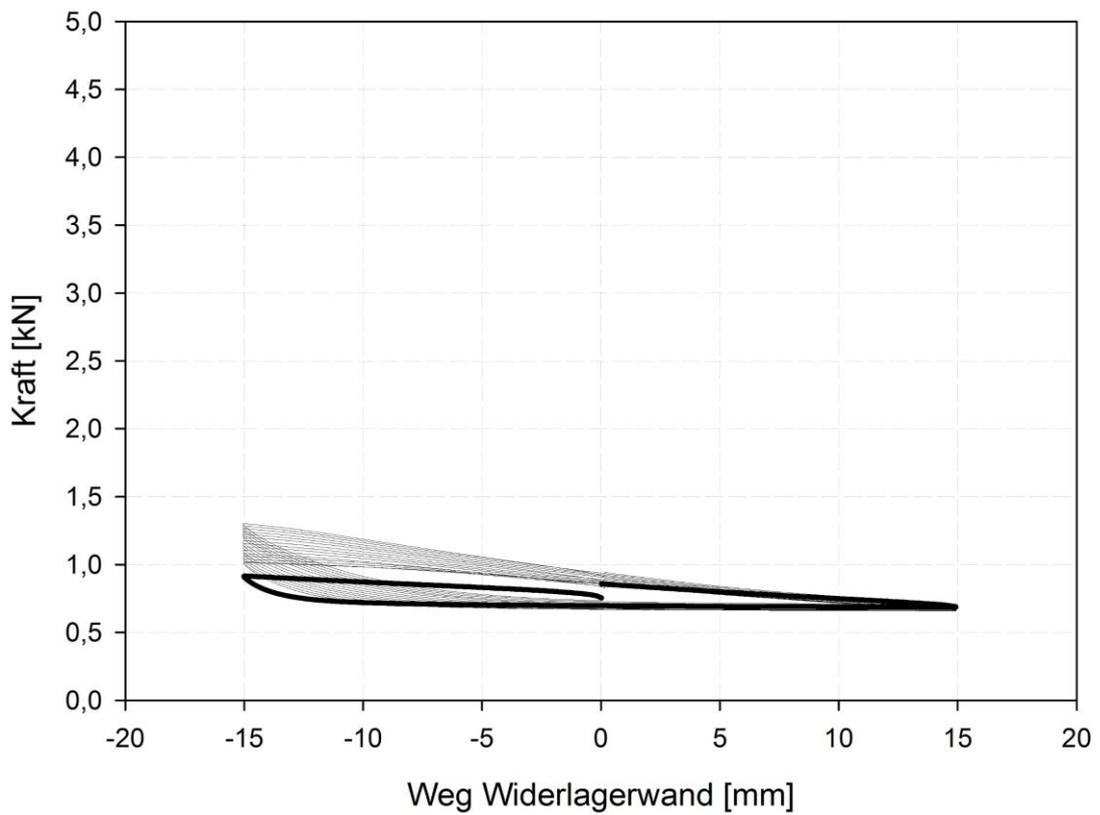
Auflager oben



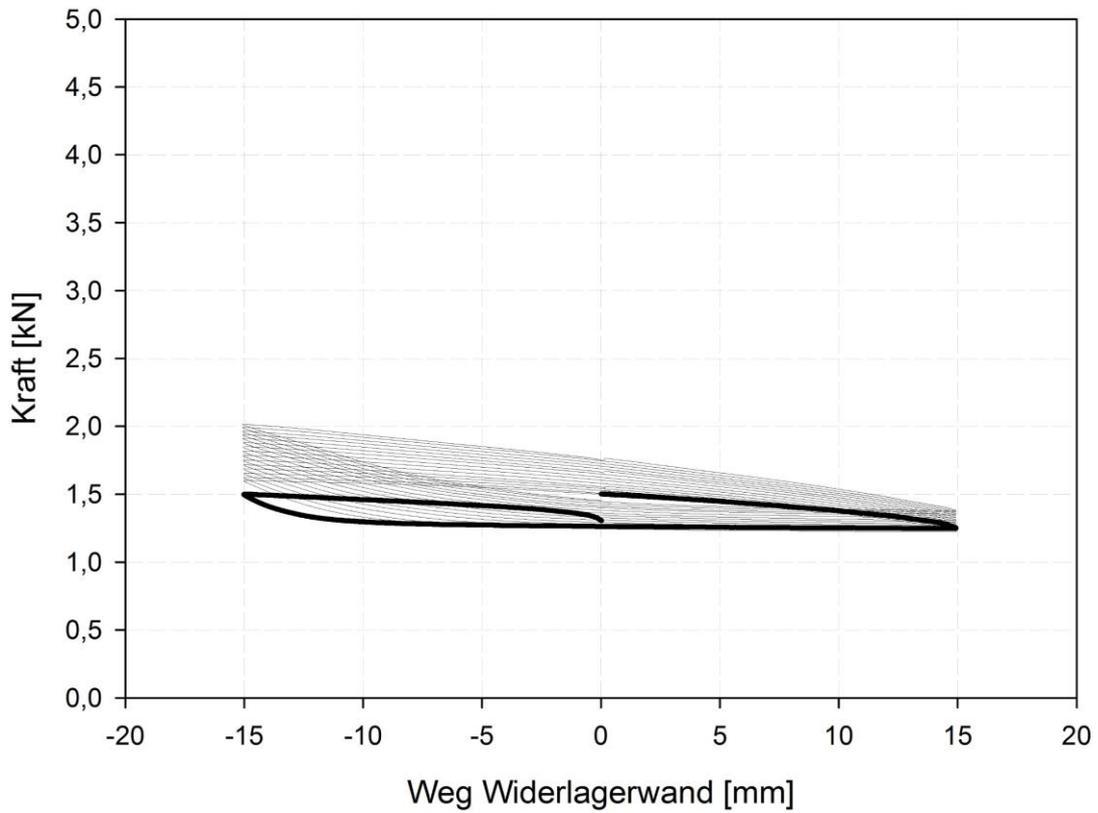
Auflager unten



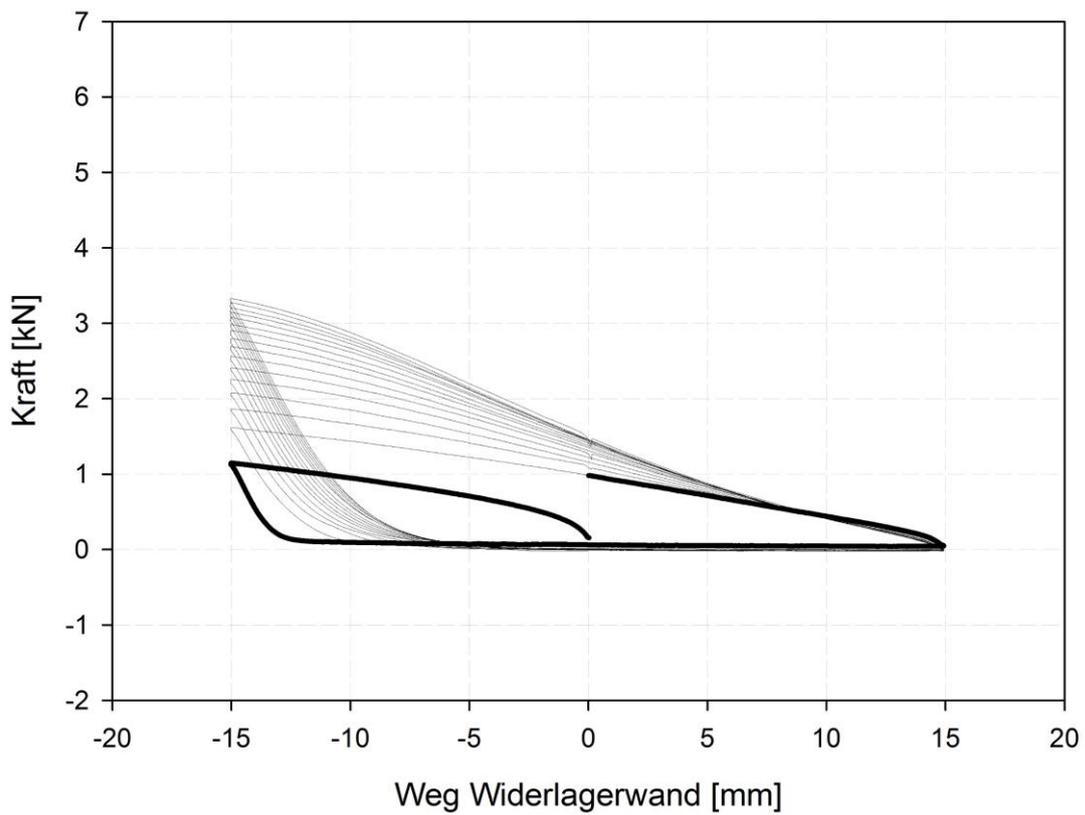
Rückwand oben



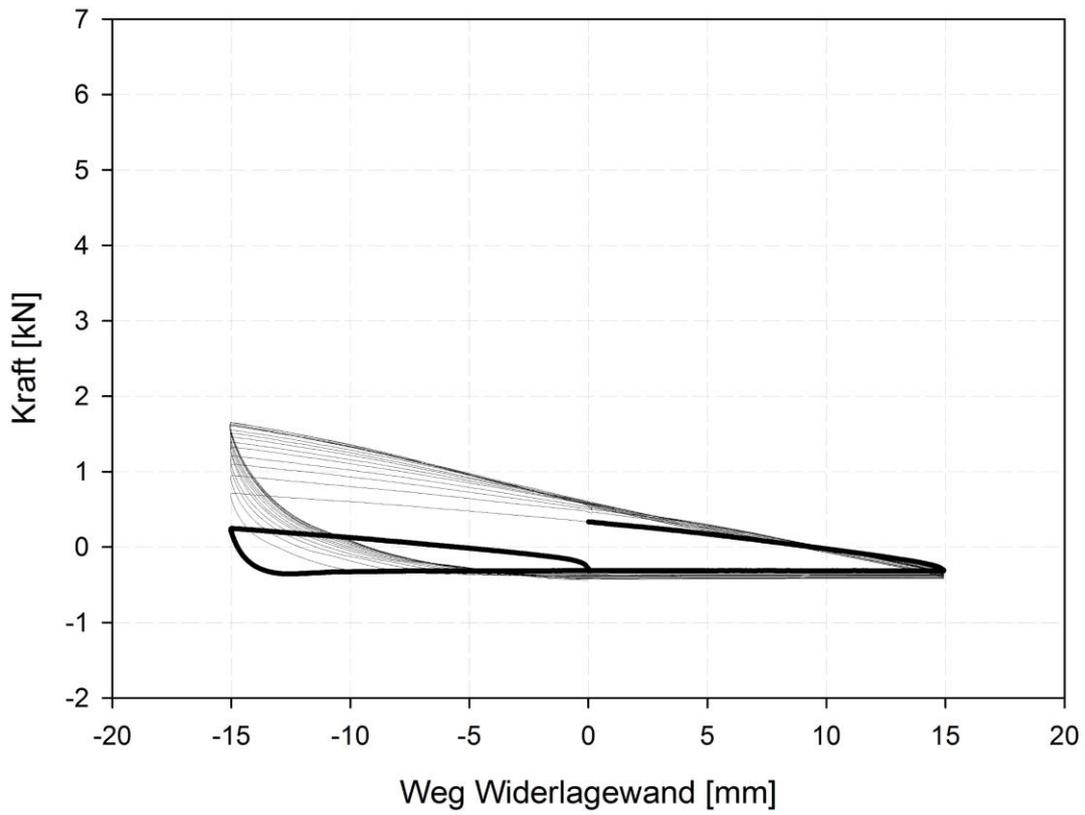
Rückwand unten



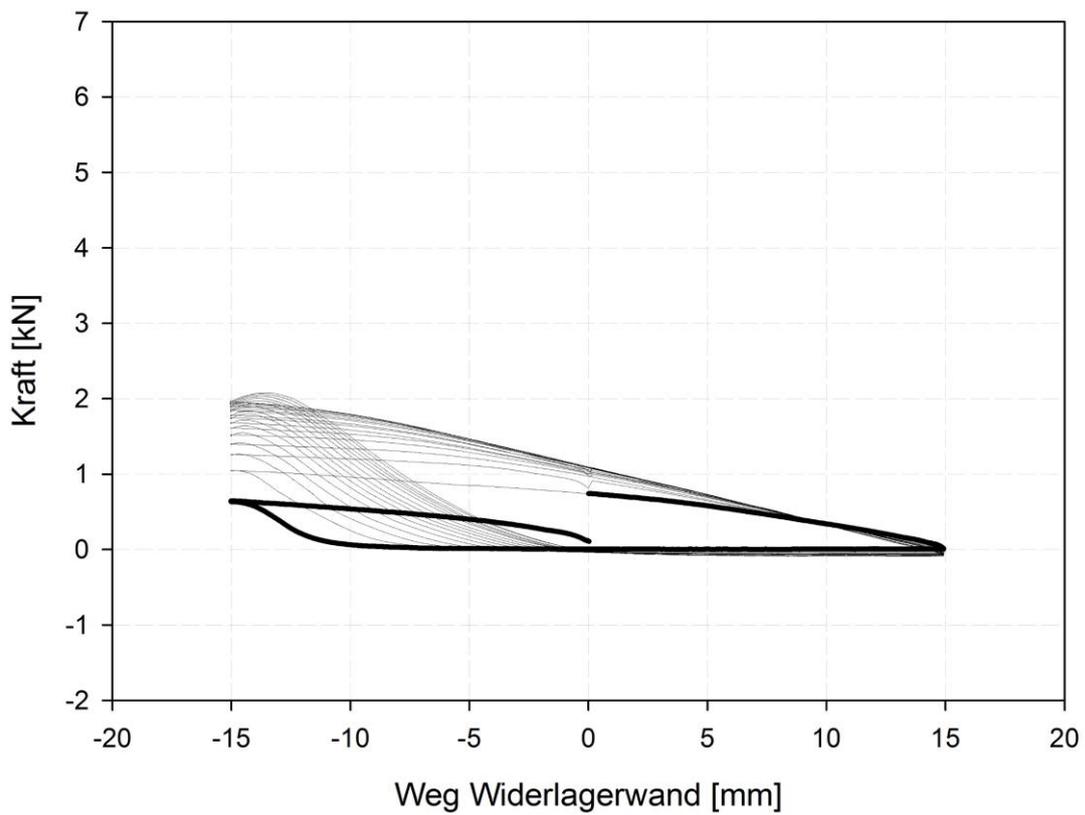
Wandachse Mitte



Wandachse oben

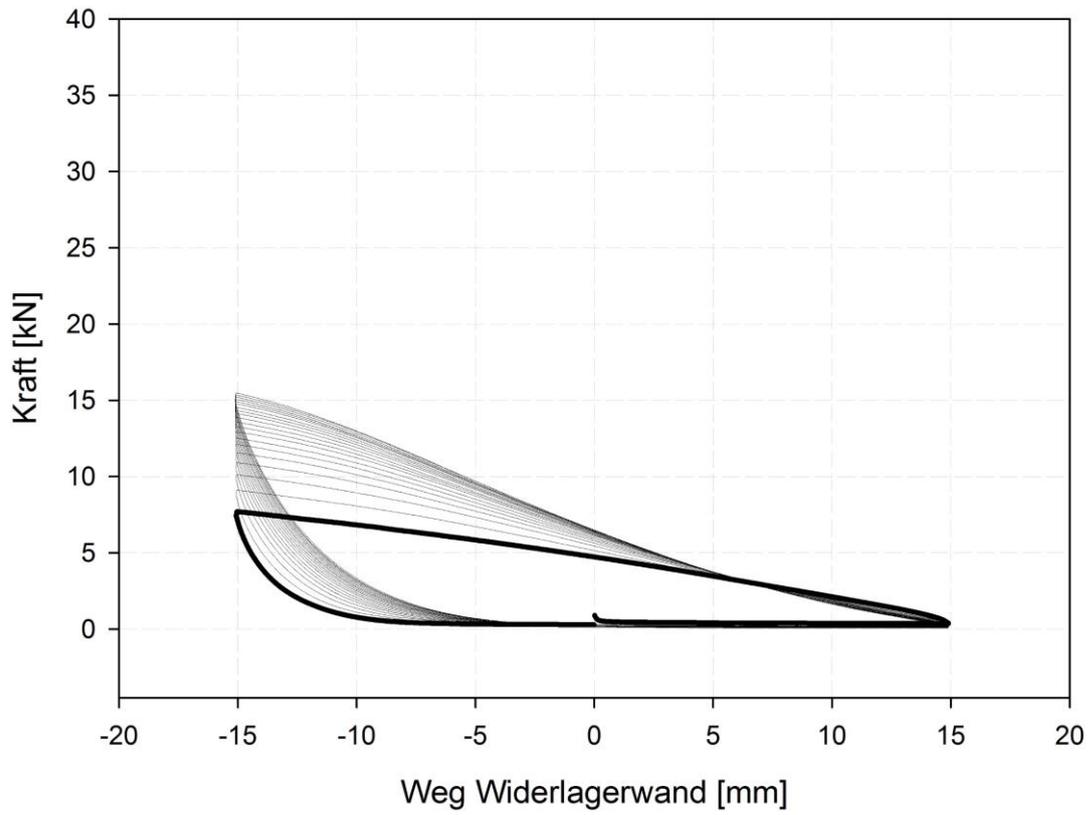


Wandachse unten

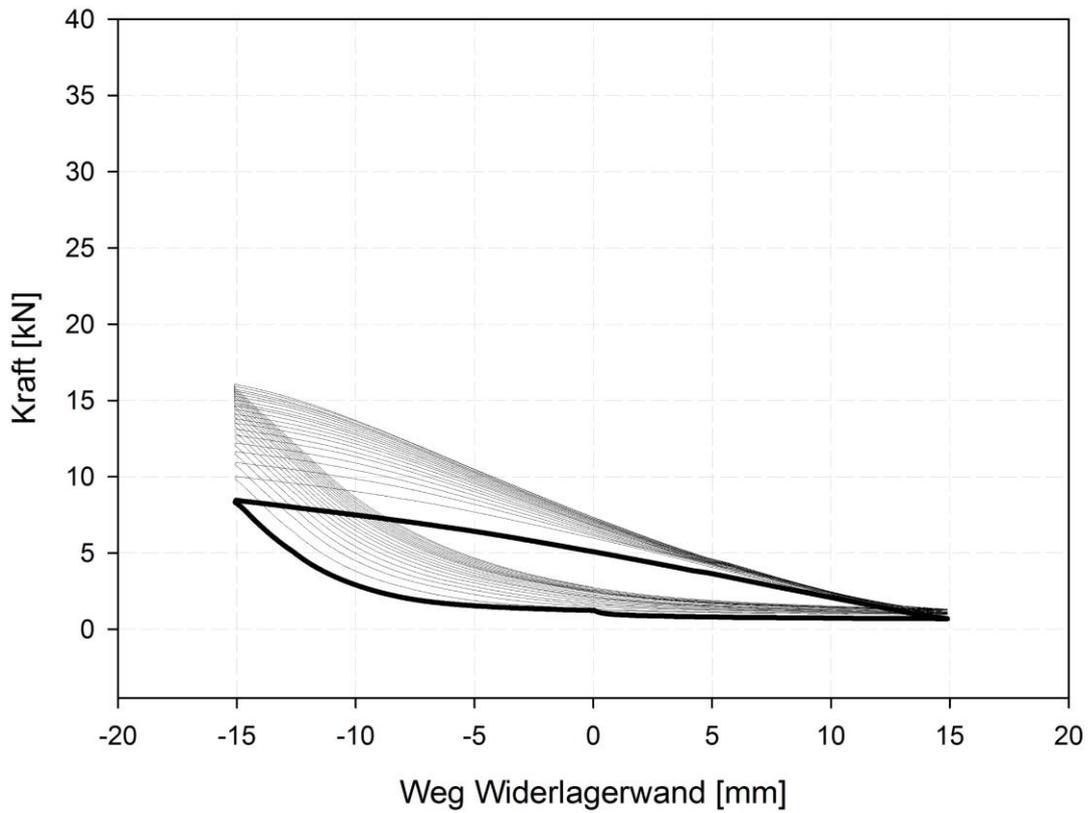


Versuch 4

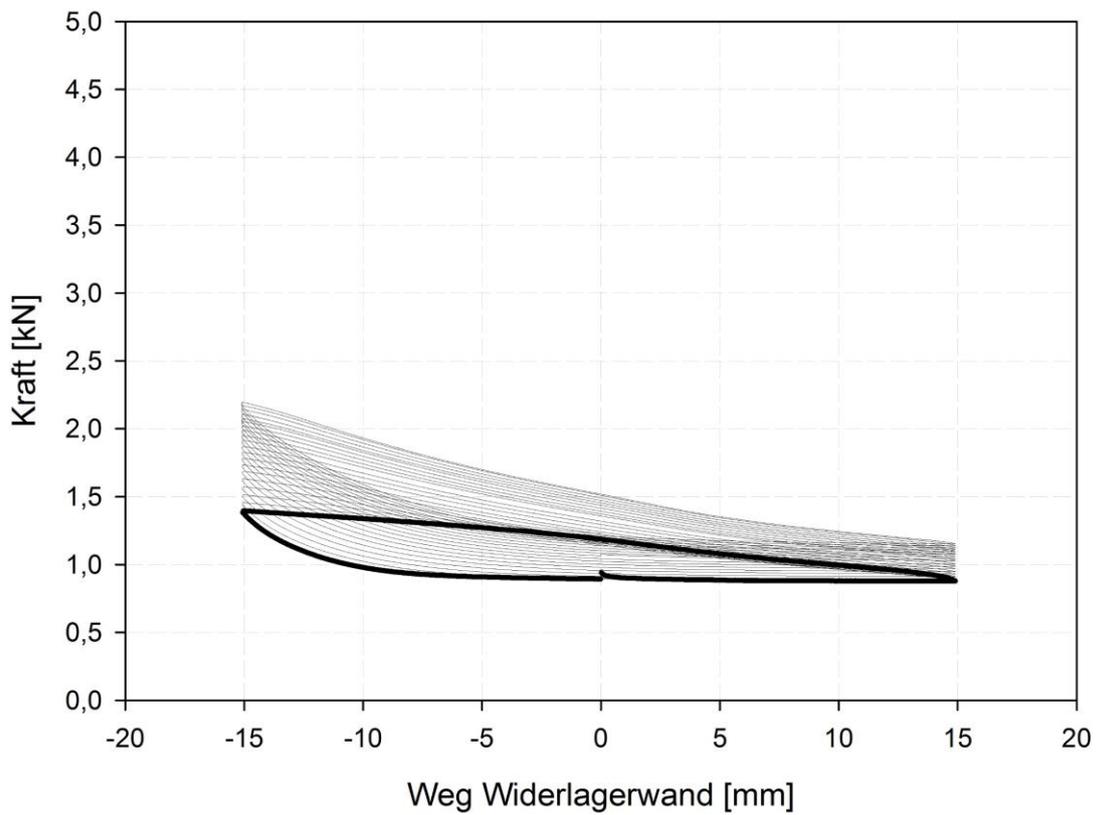
Auflager oben



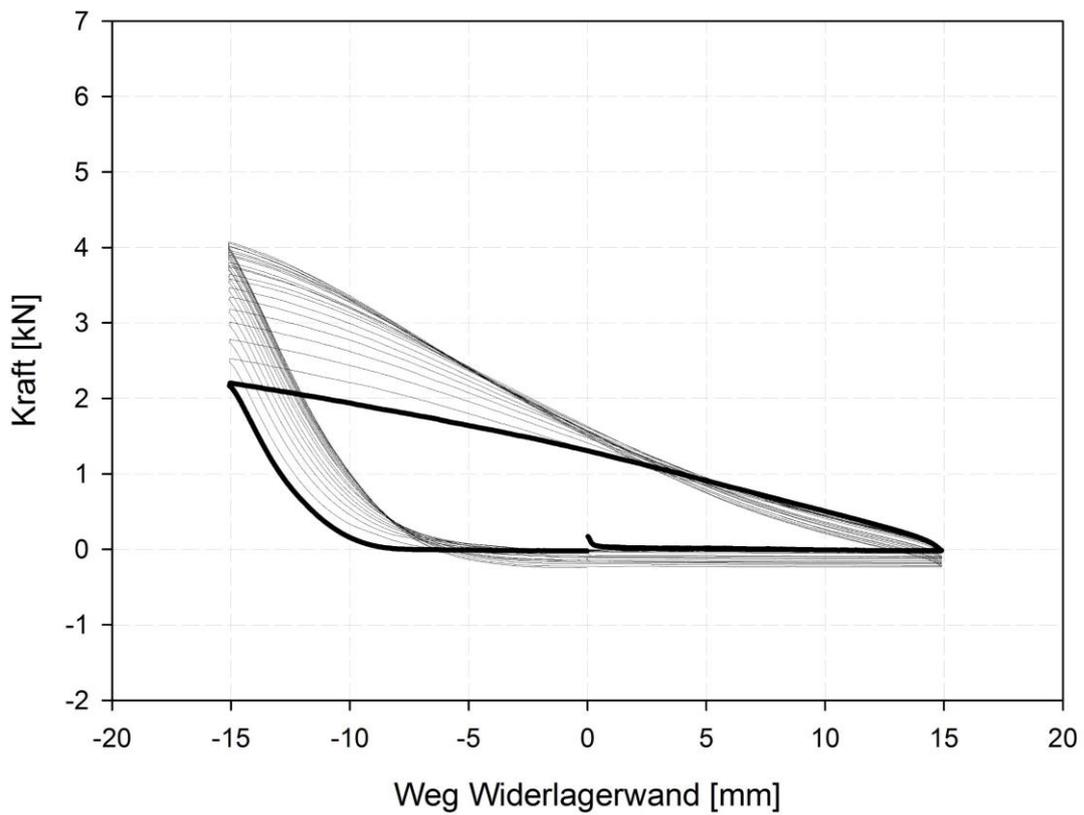
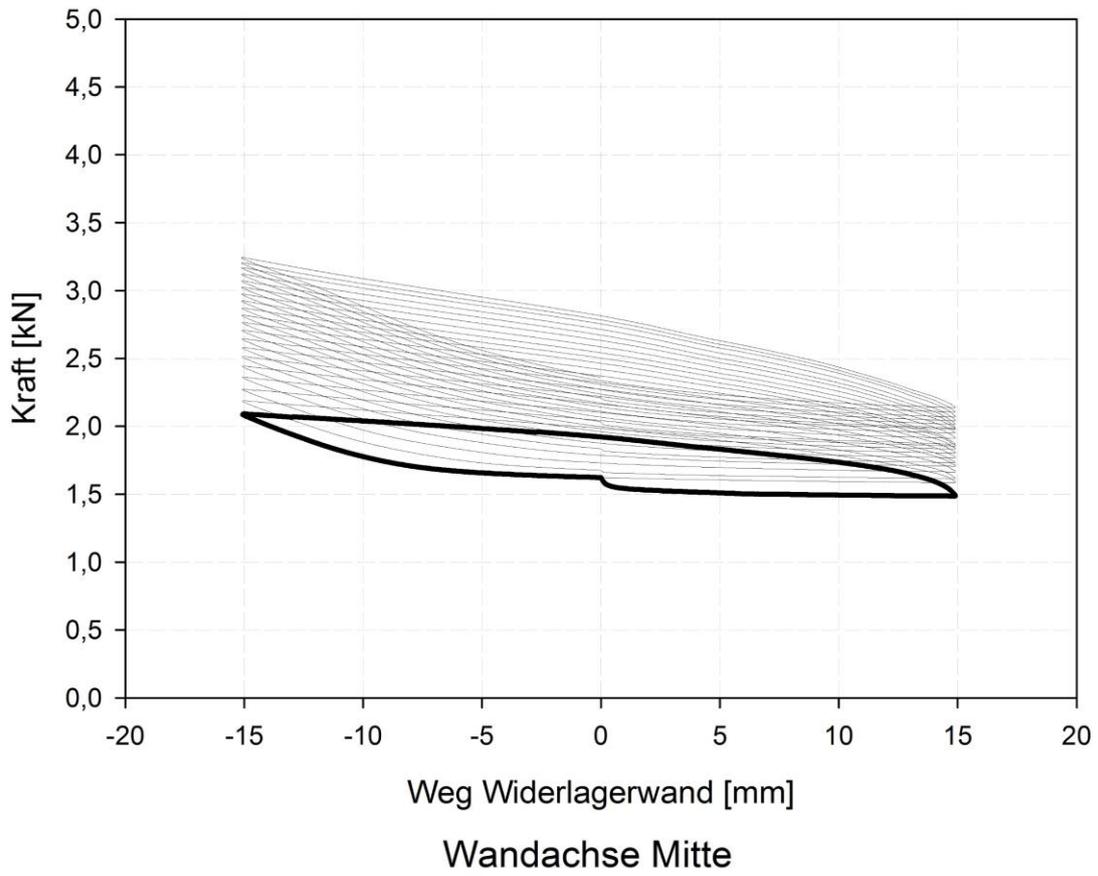
Auflager unten



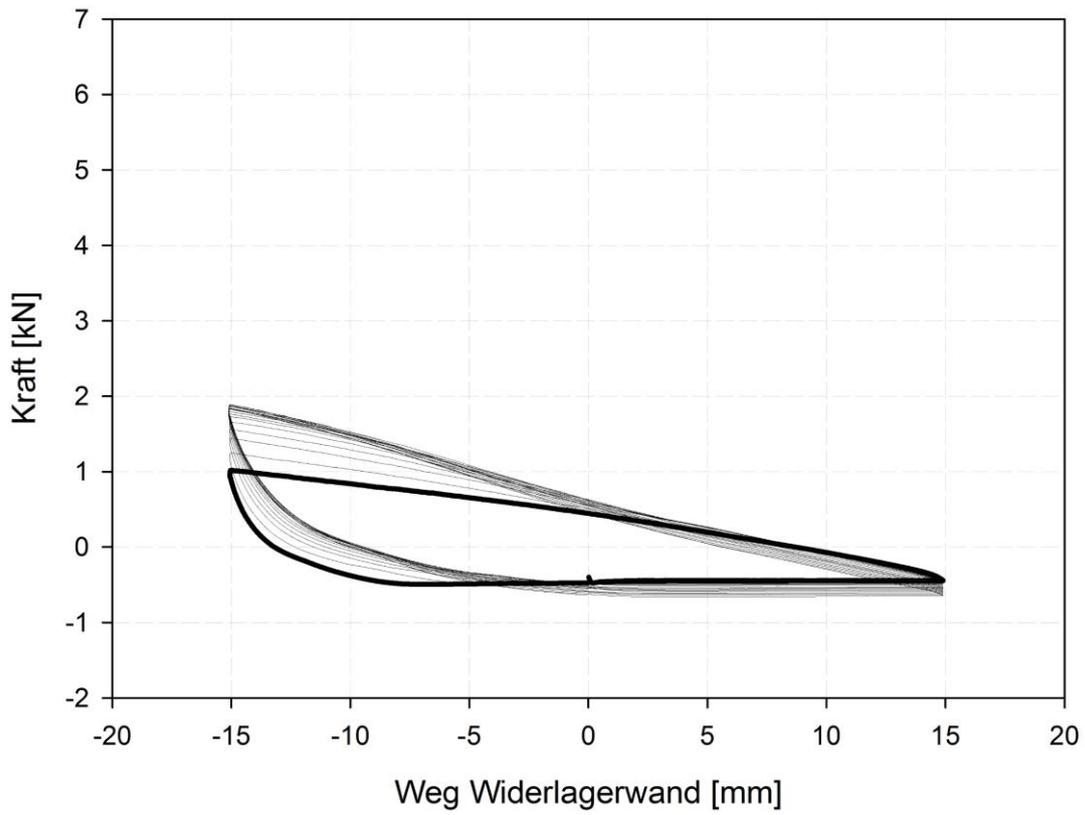
Rückwand oben



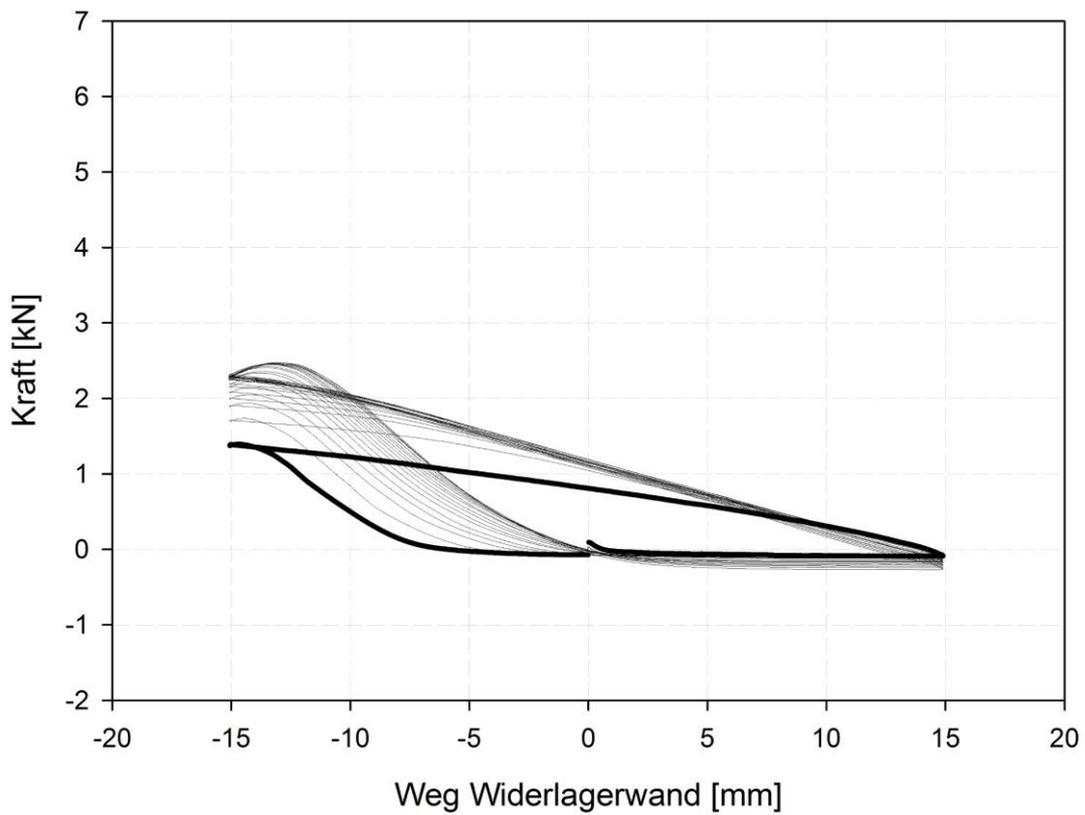
Rückwand unten



Wandachse oben

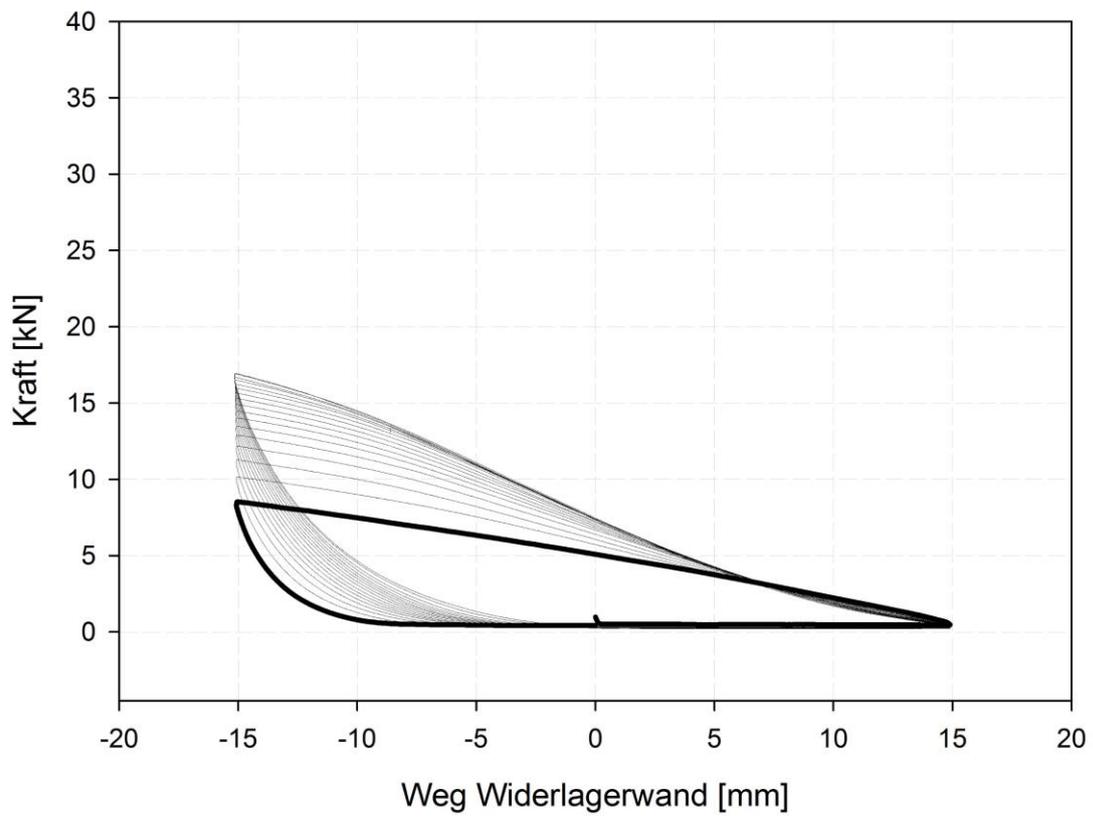


Wandachse unten

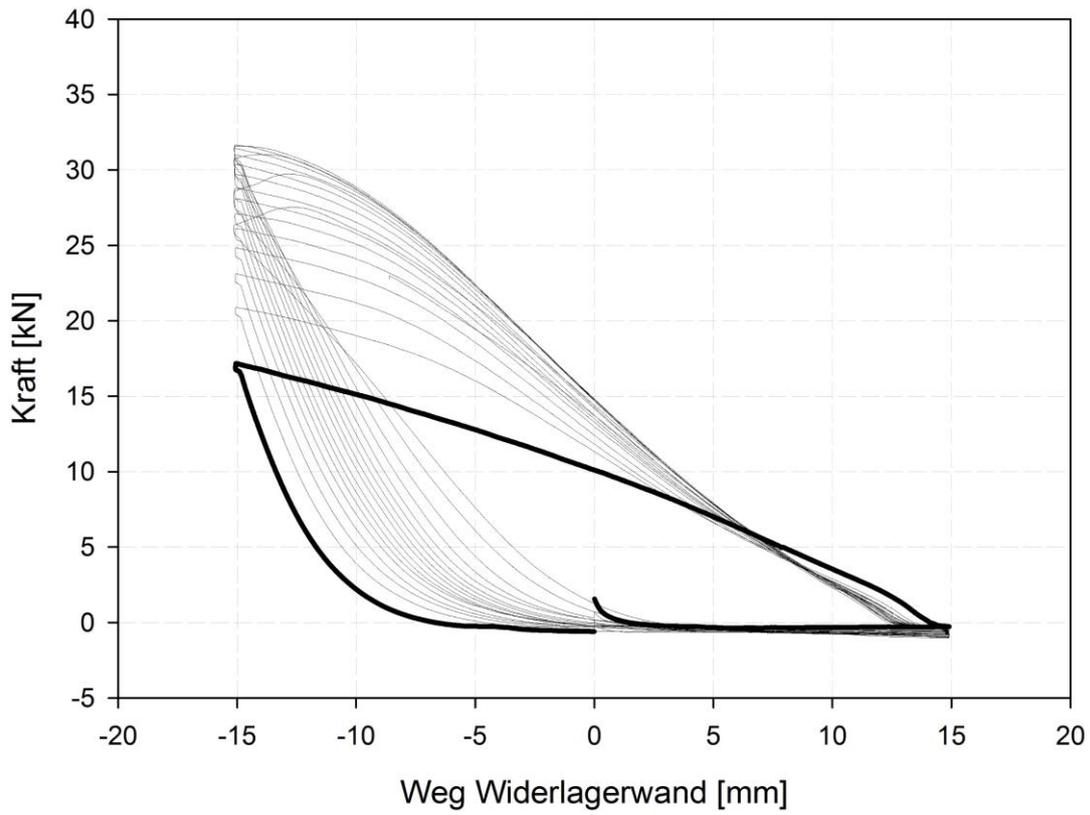


Versuch 5

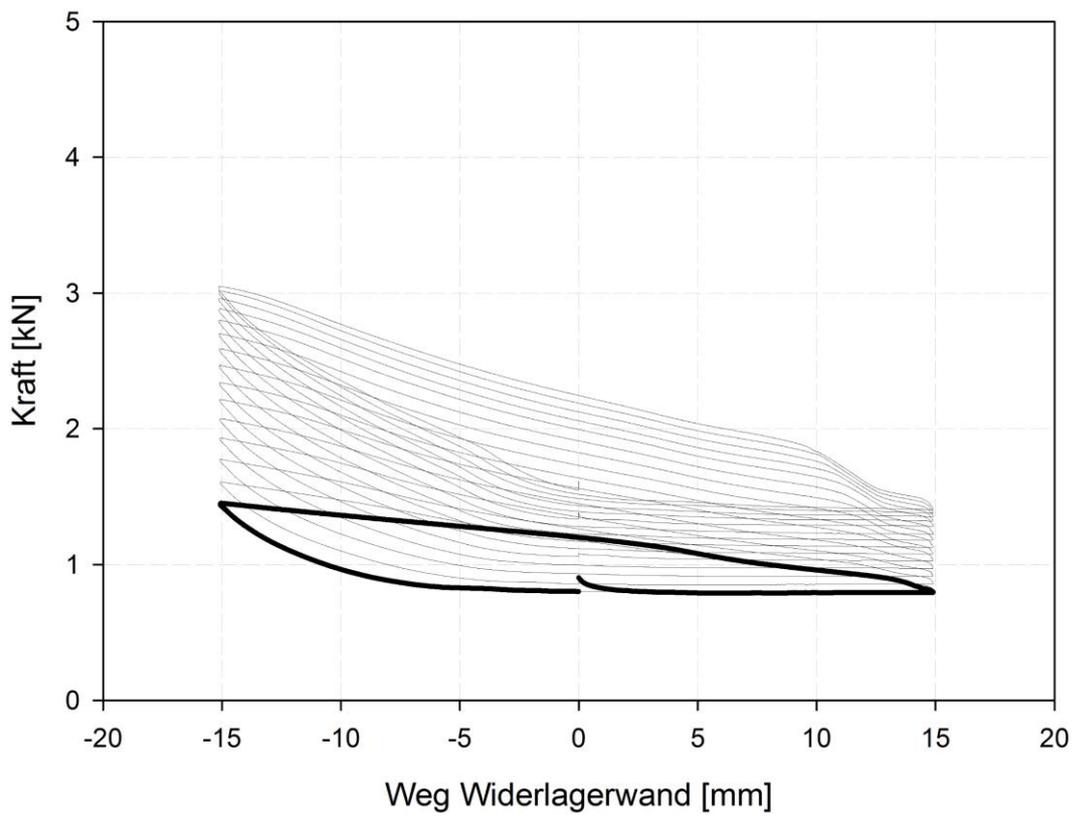
Auflager oben



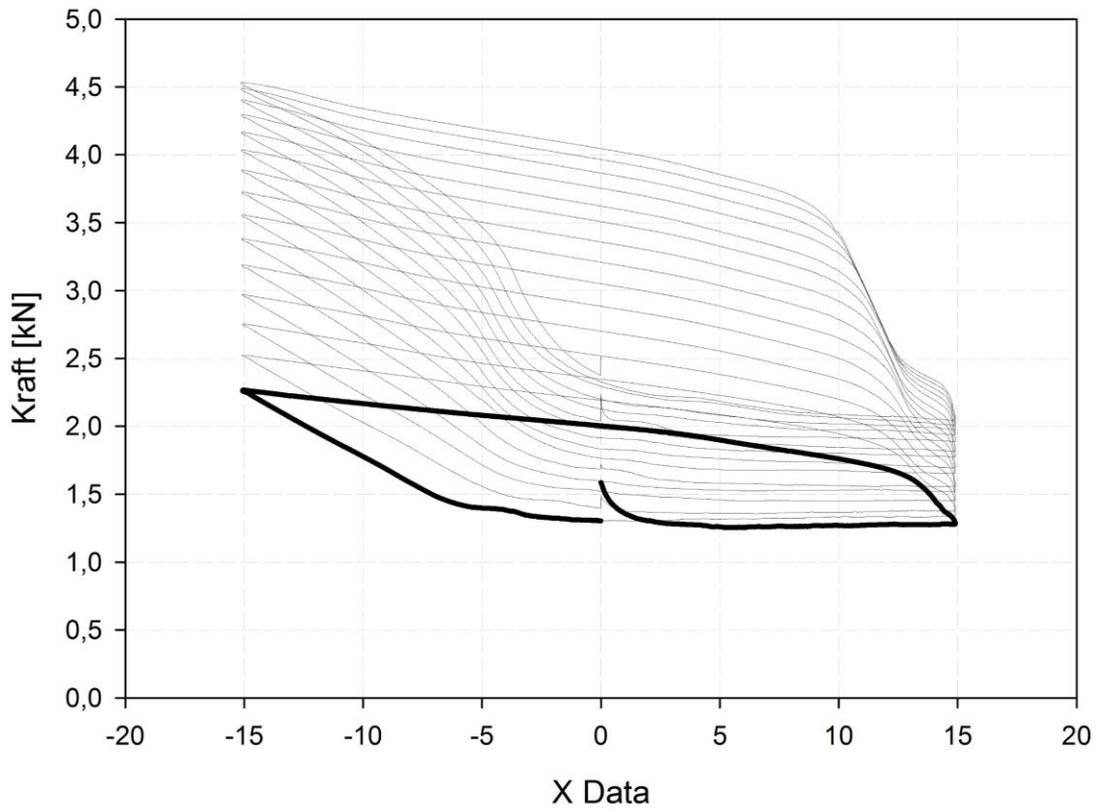
Auflager unten



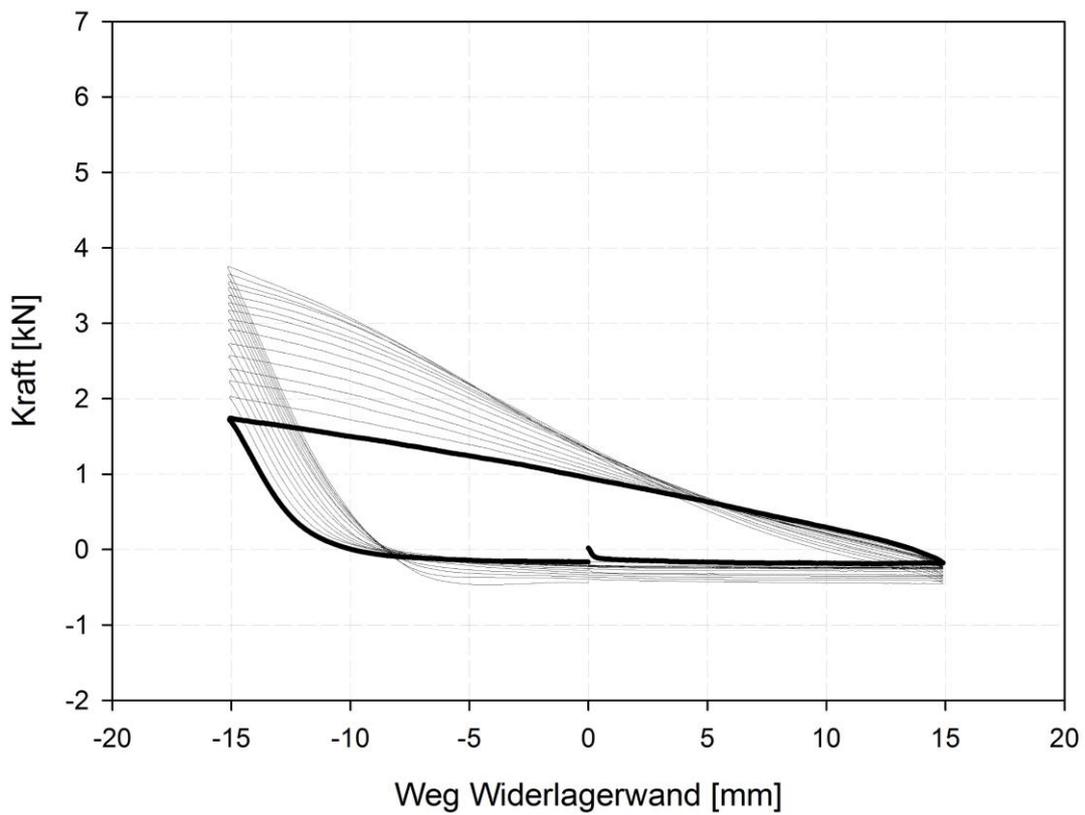
Rückwand oben



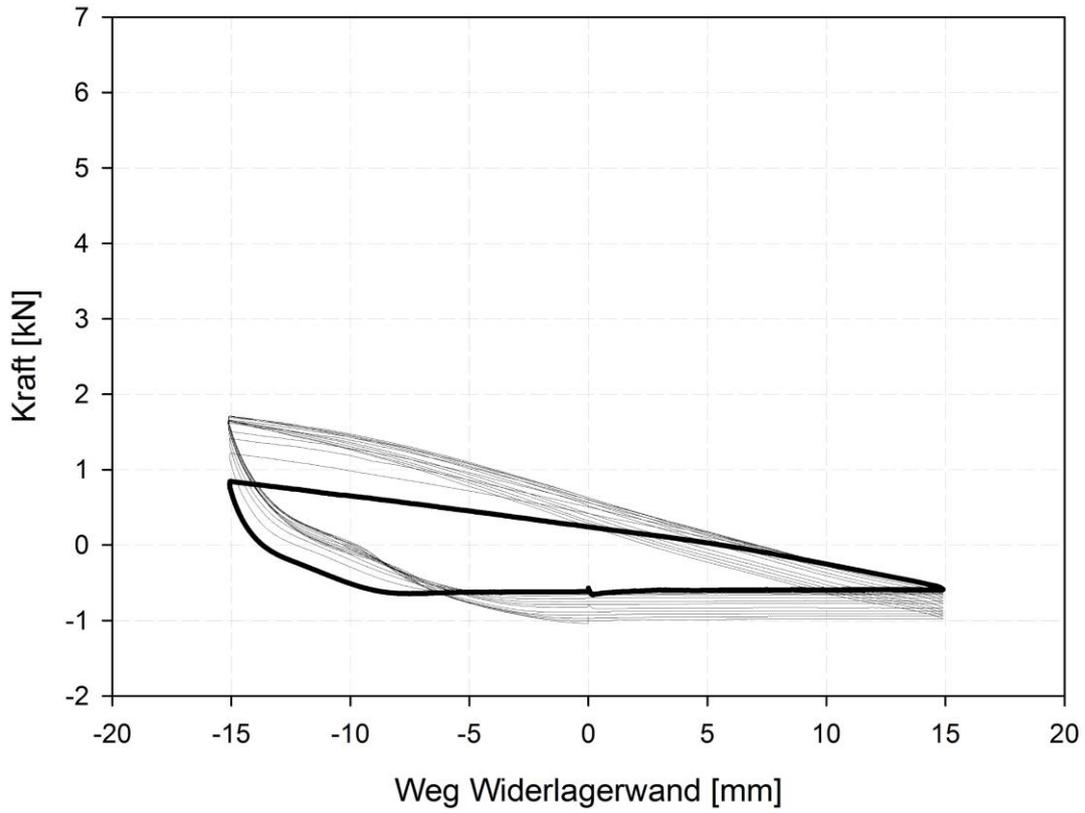
Rückwand unten



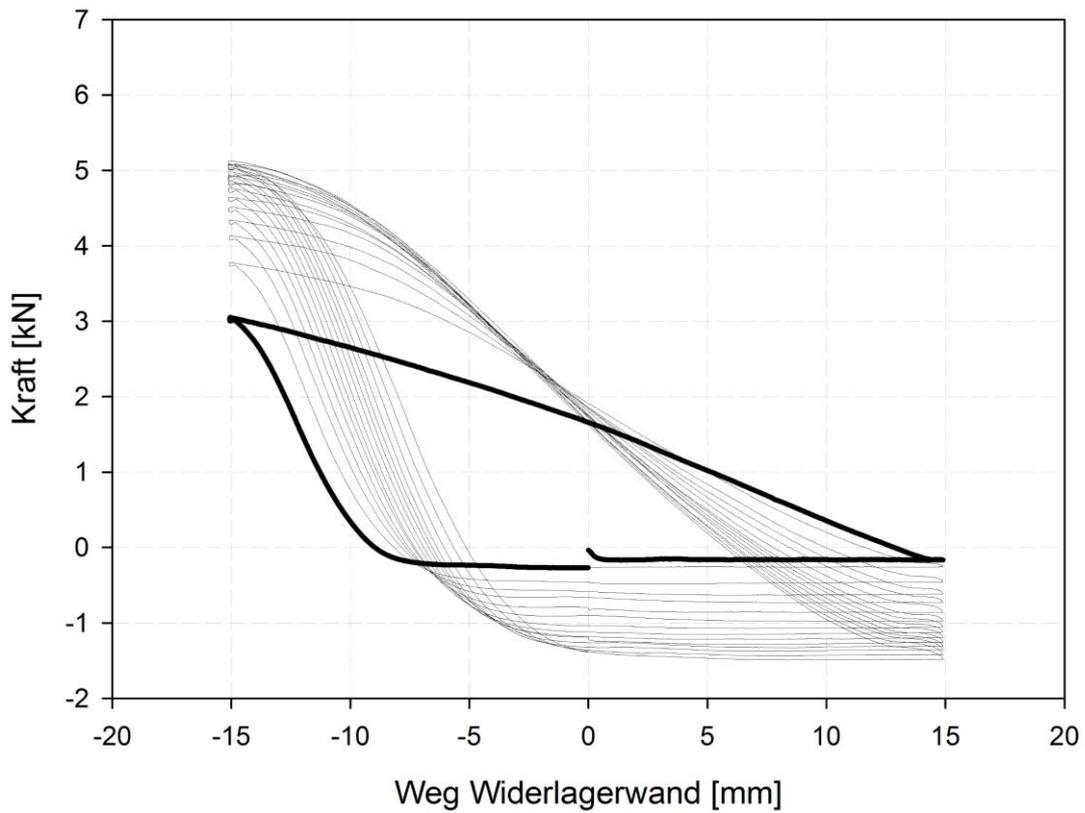
Wandachse Mitte



Wandachse oben

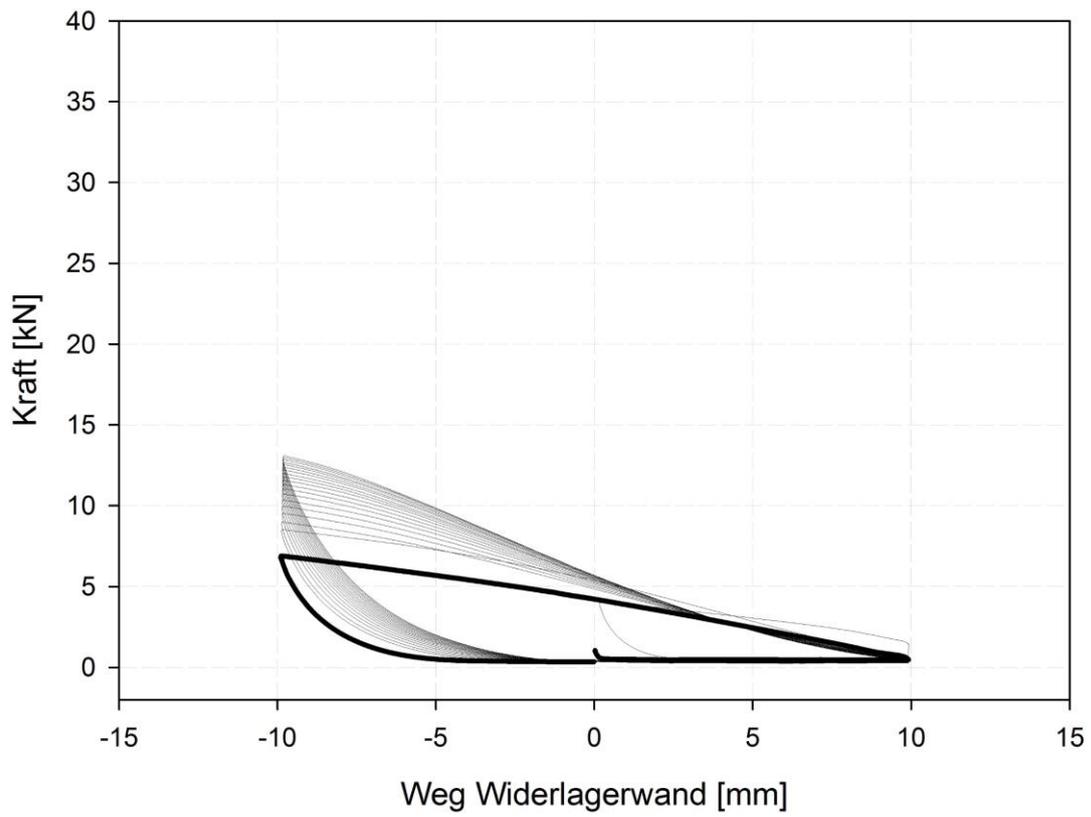


Wandachse unten

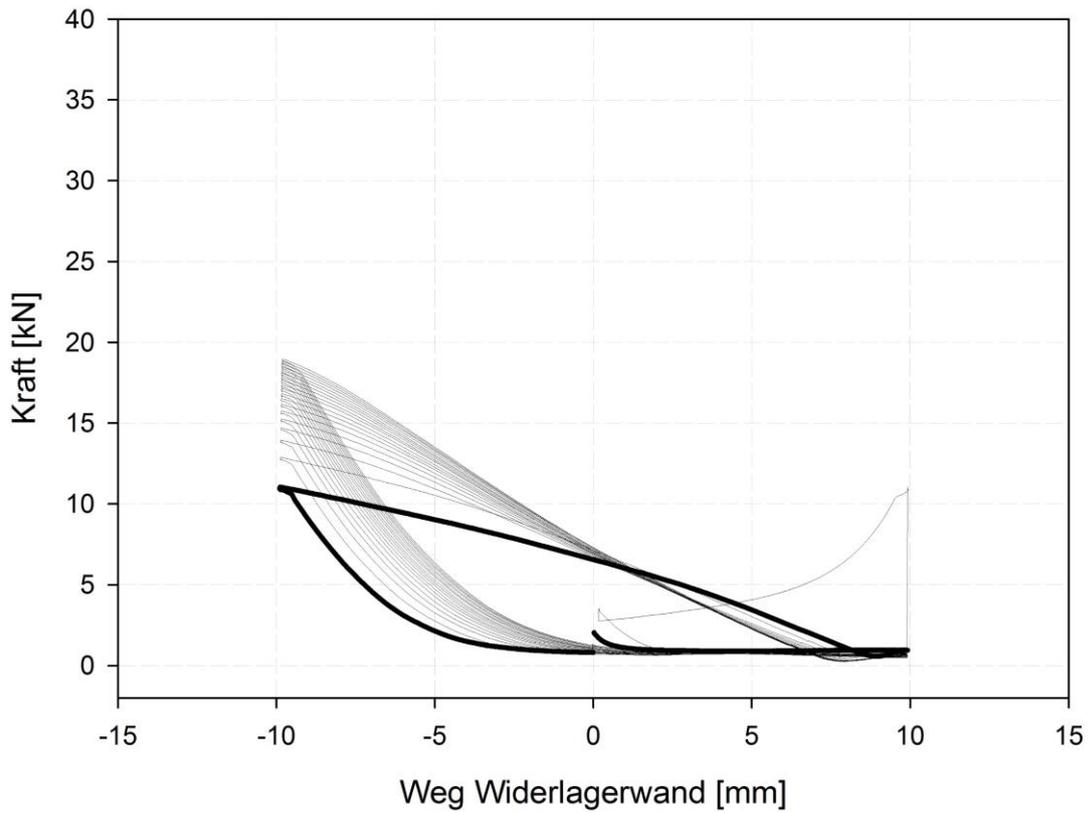


Versuch 6

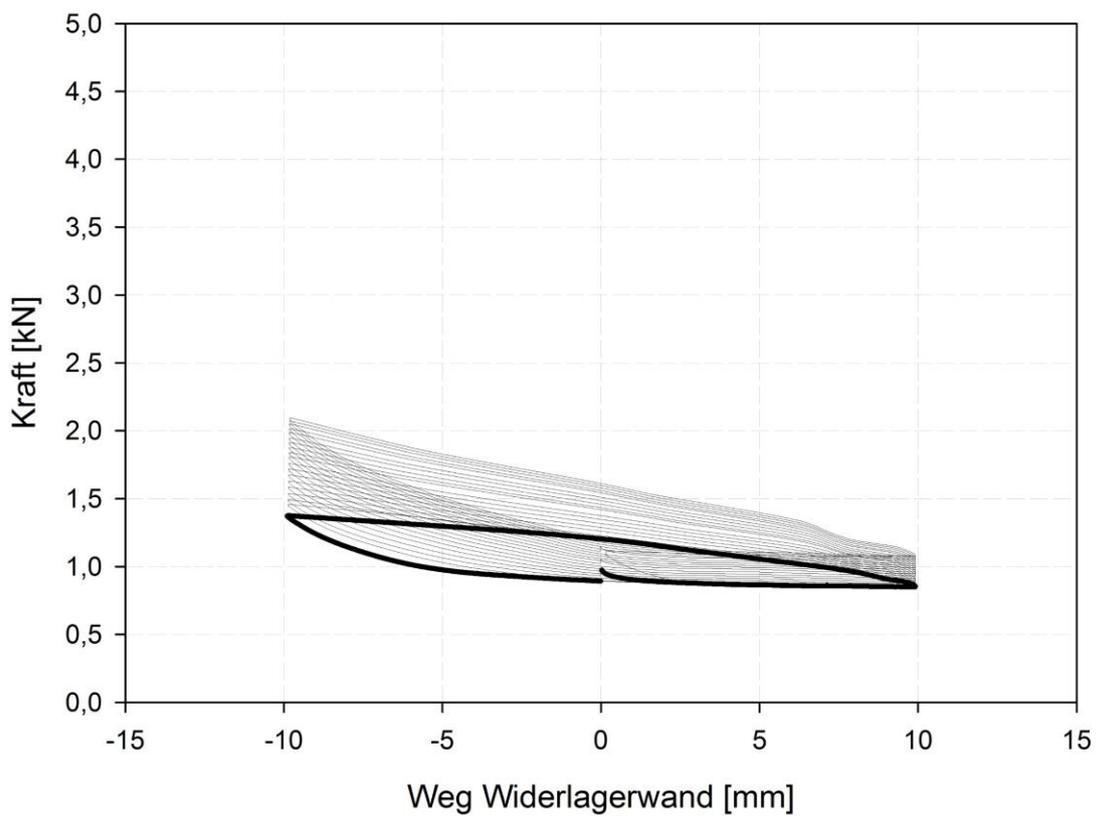
Auflager oben



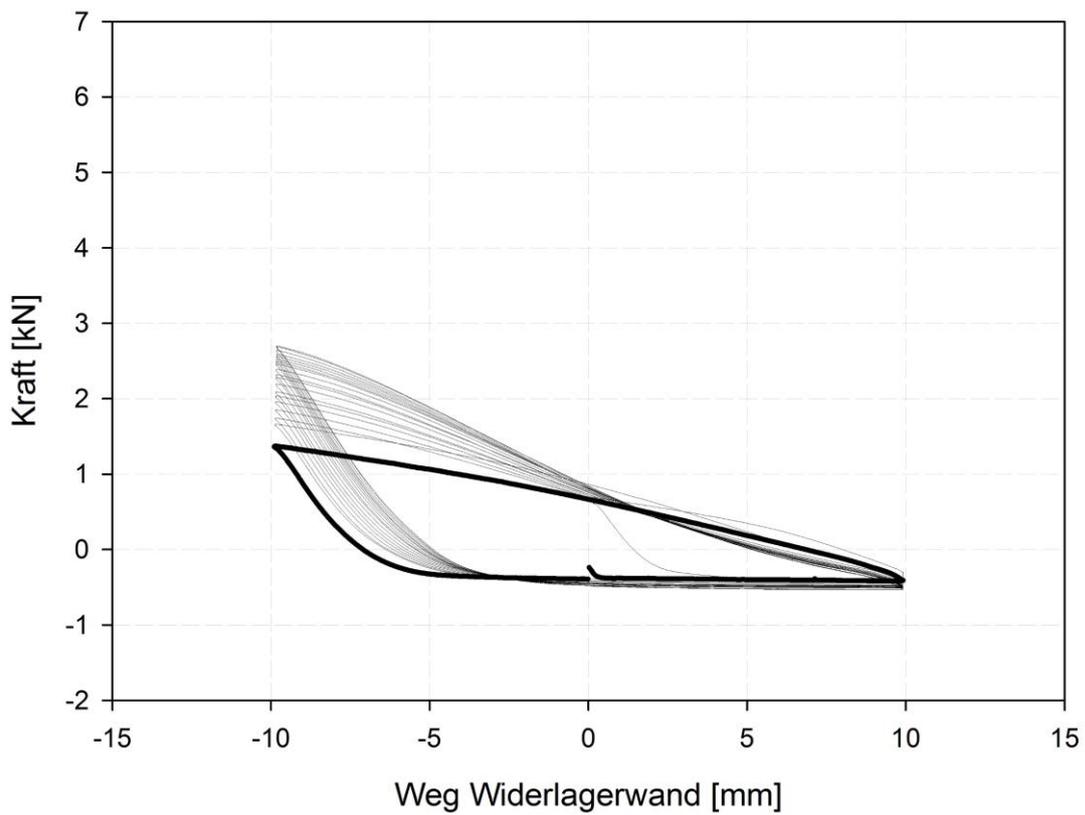
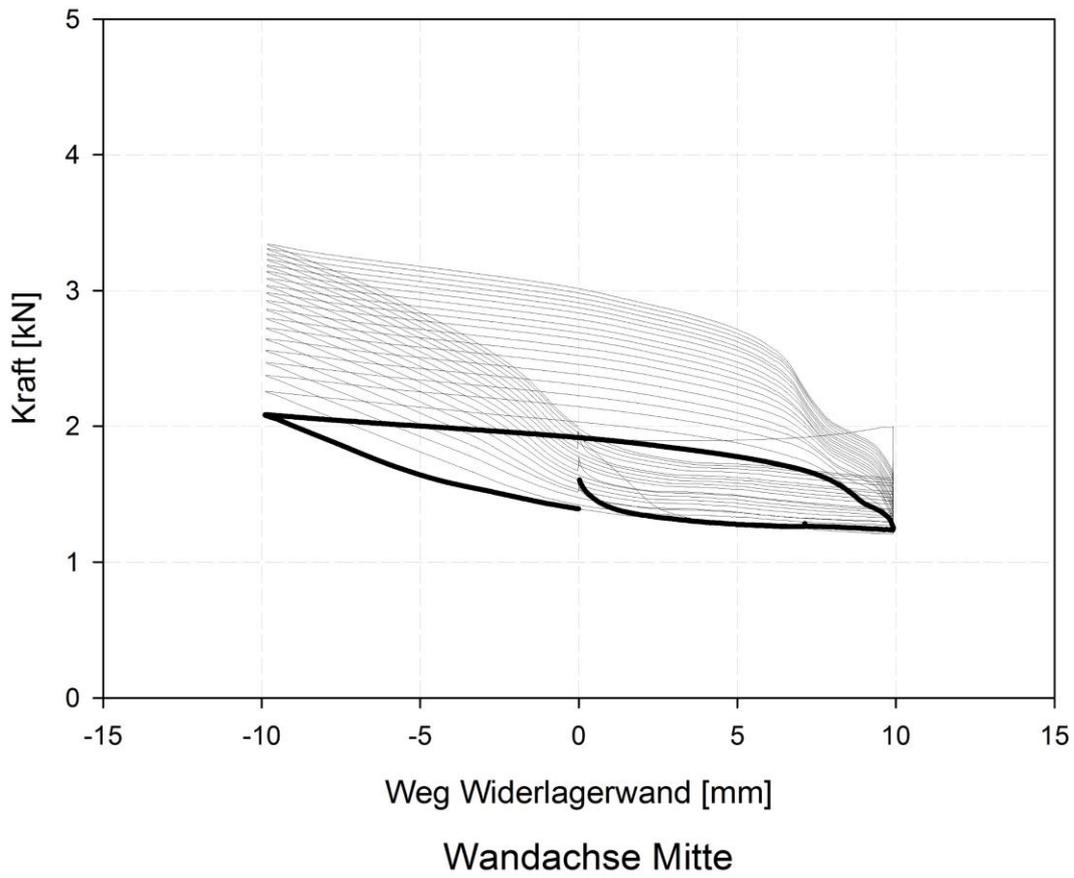
Auflager unten



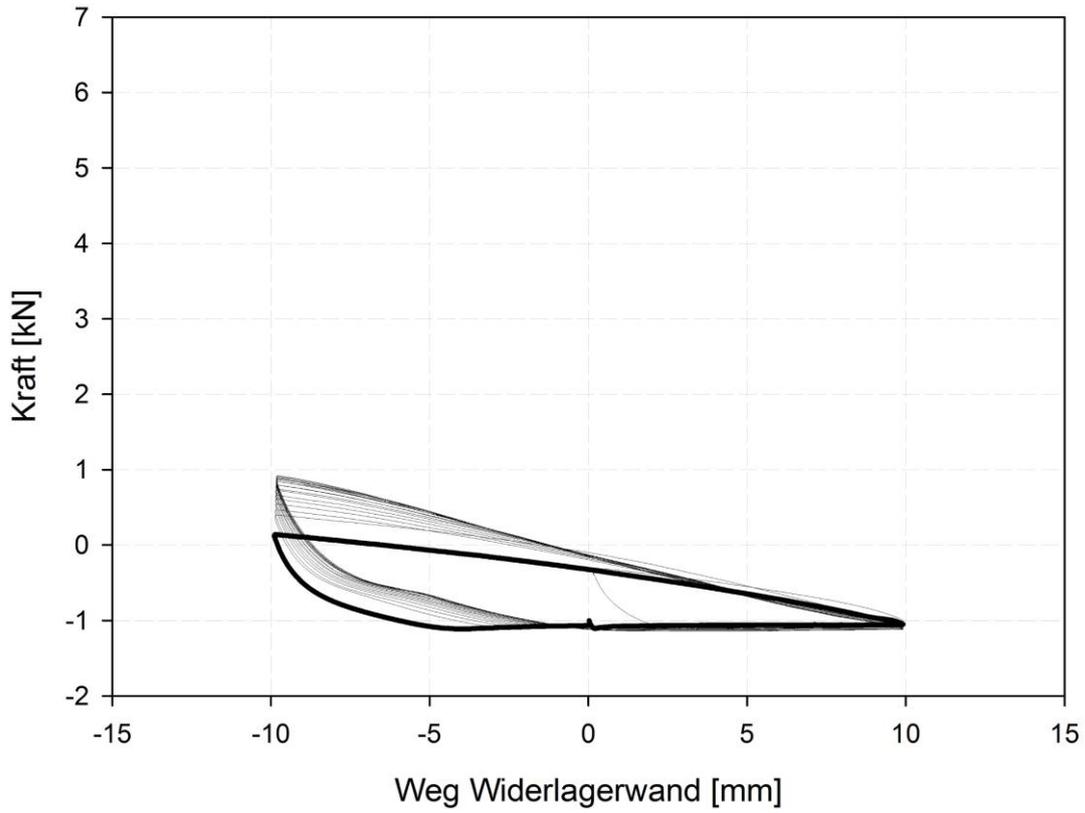
Rückwand oben



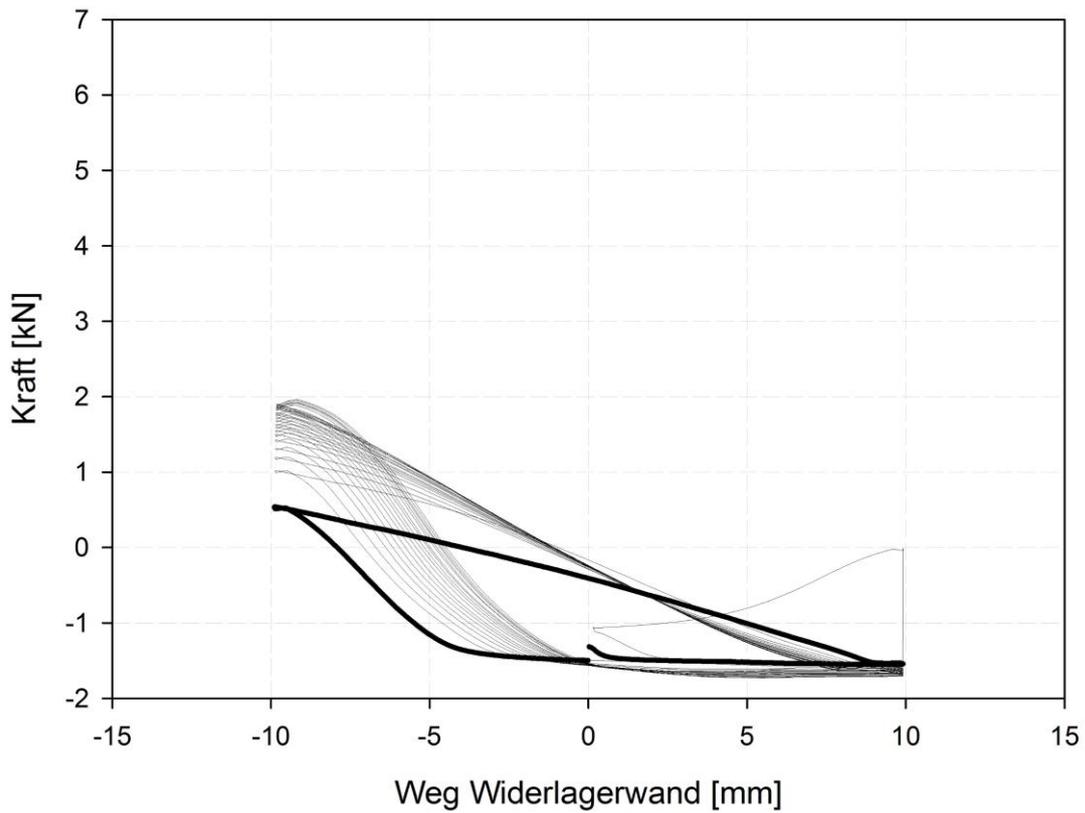
Rückwand unten



Wandachse oben

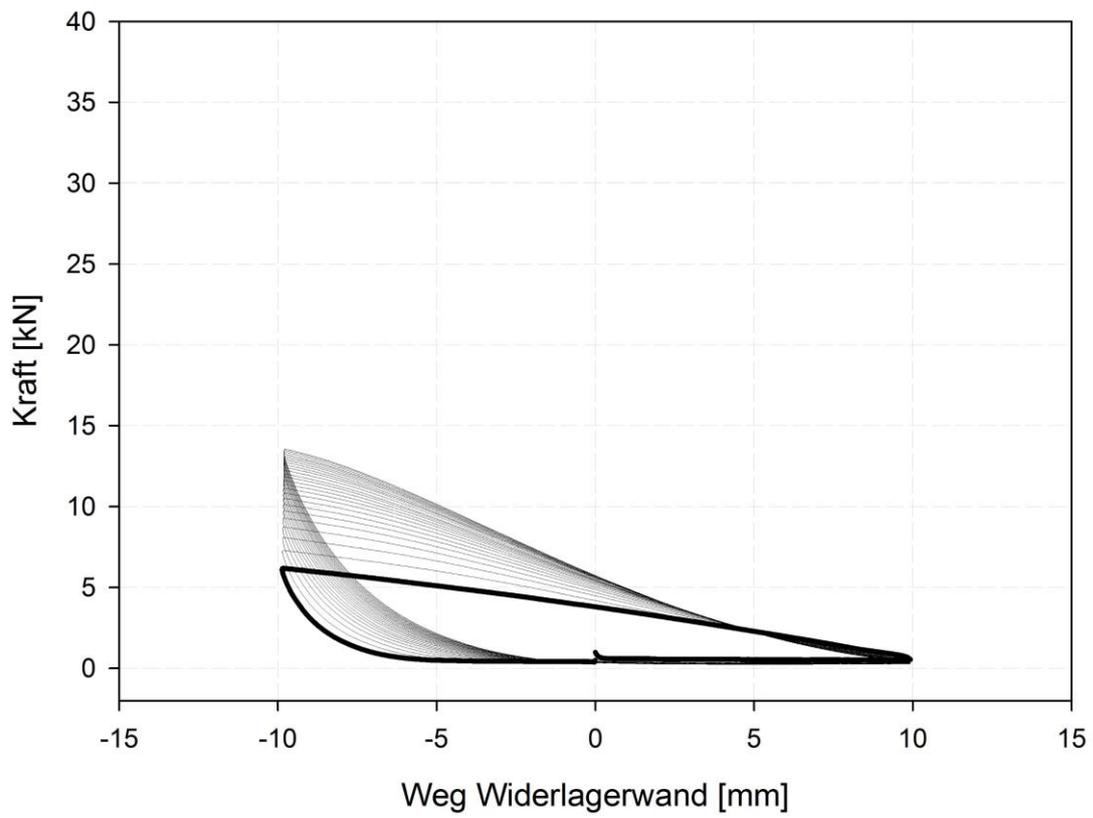


Wandachse unten

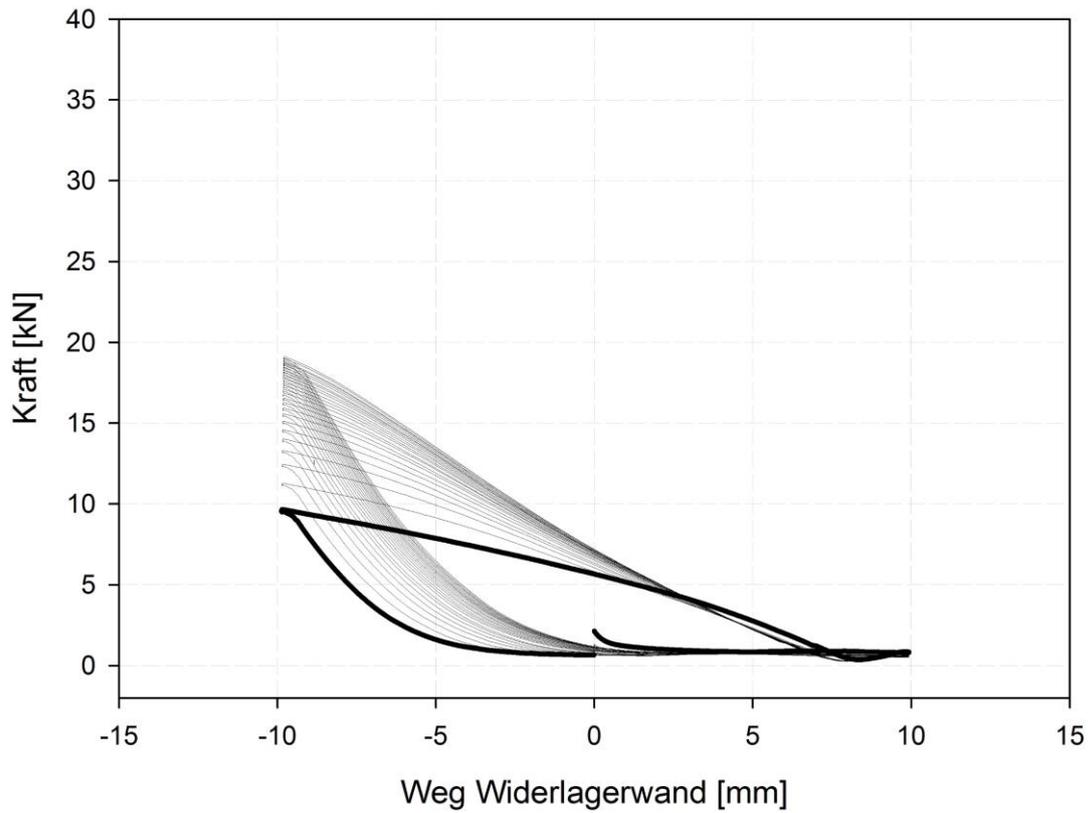


Versuch 7

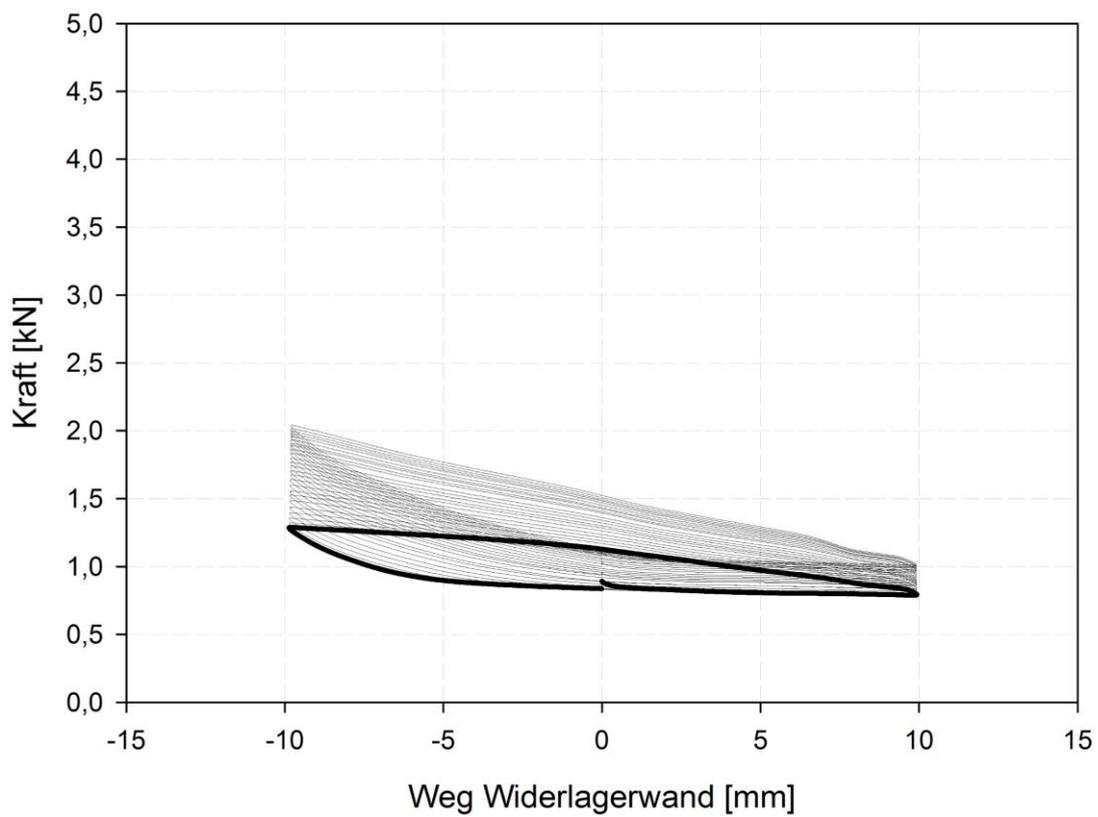
Auflager oben



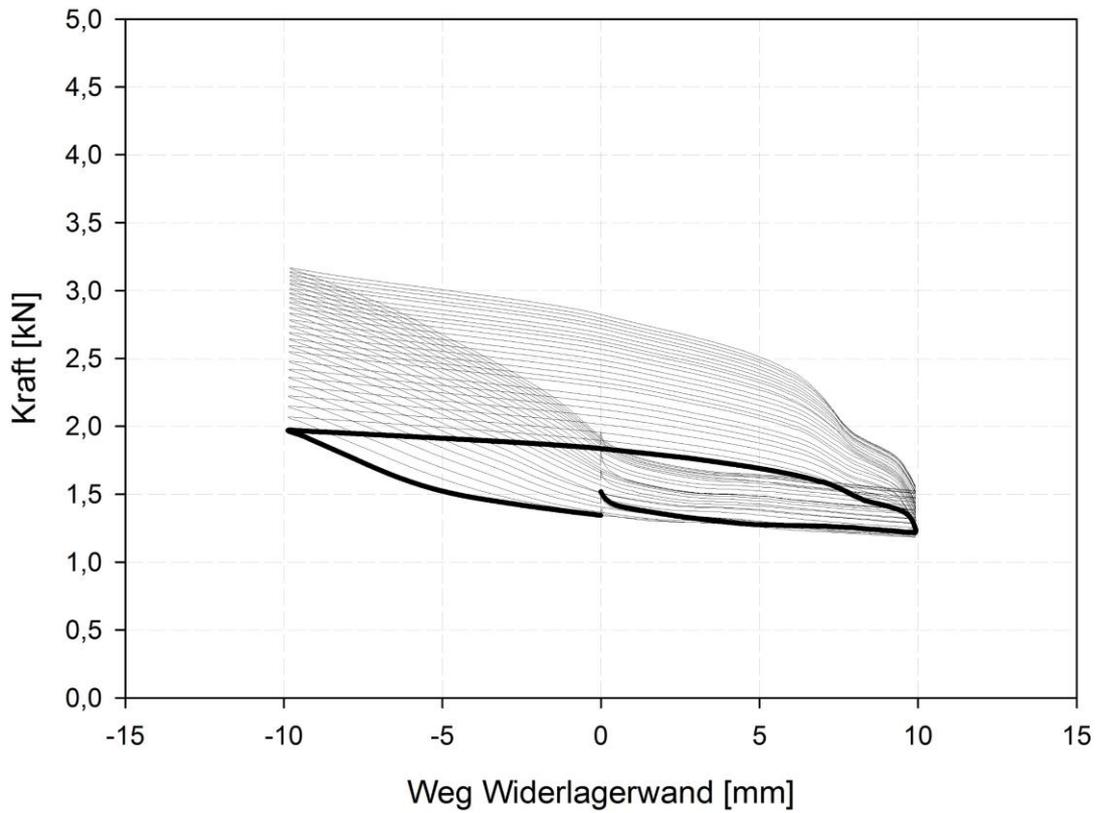
Auflager unten



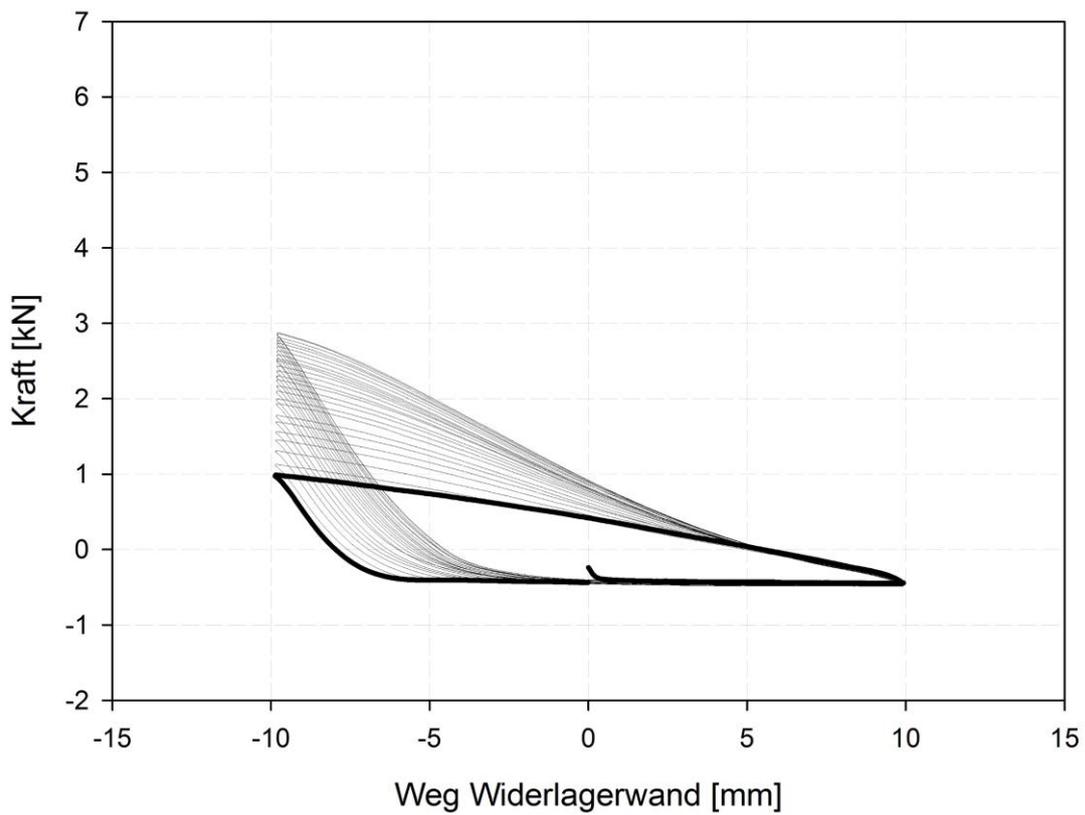
Rückwand oben



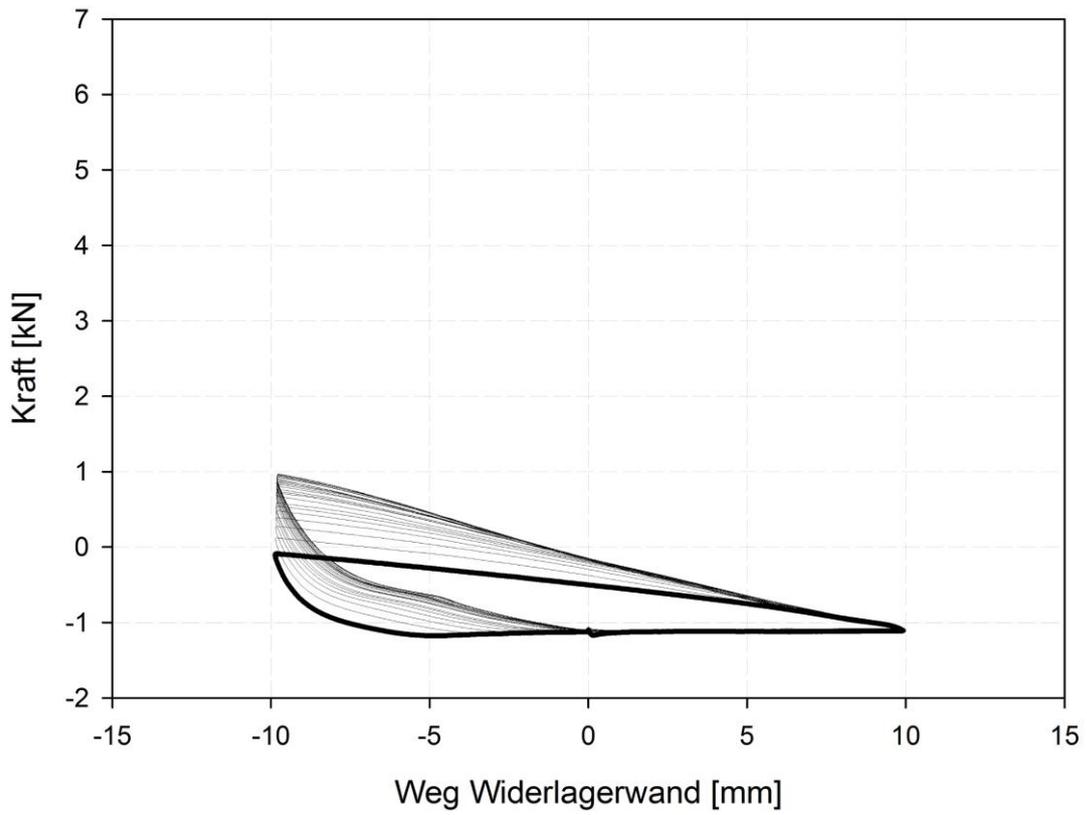
Rückwand unten



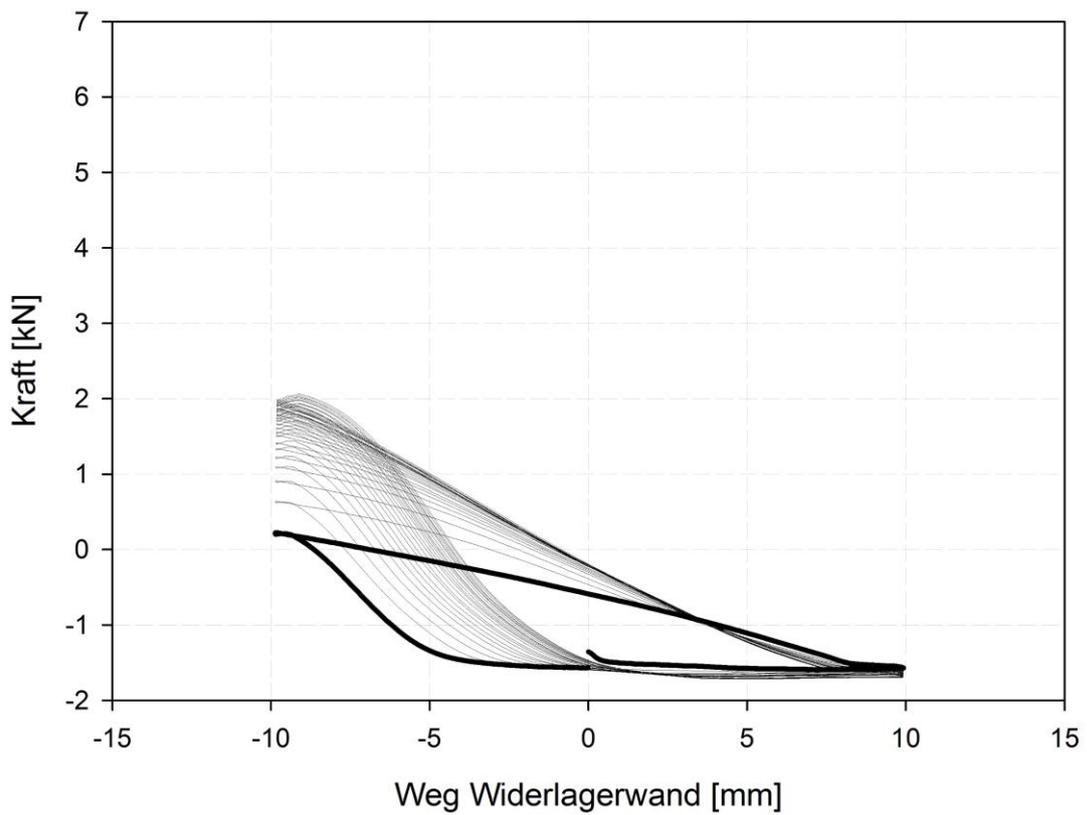
Wandachse Mitte



Wandachse oben

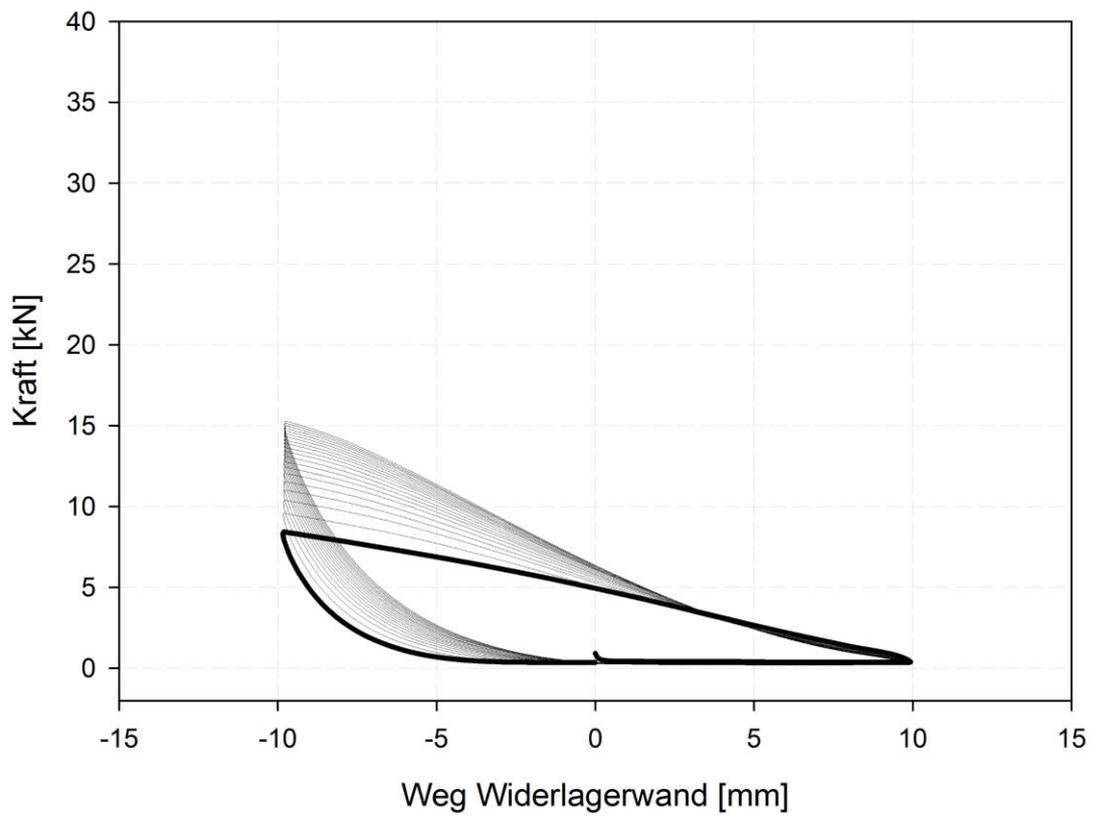


Wandachse unten

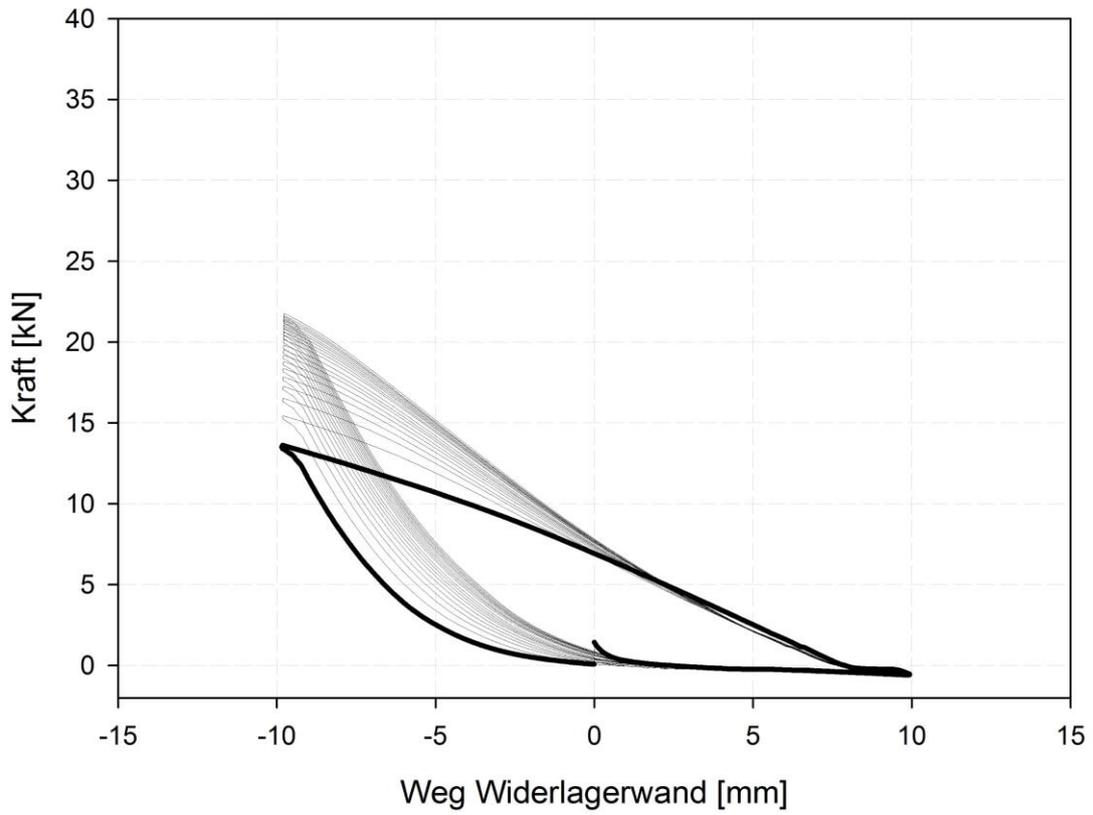


Versuch 8

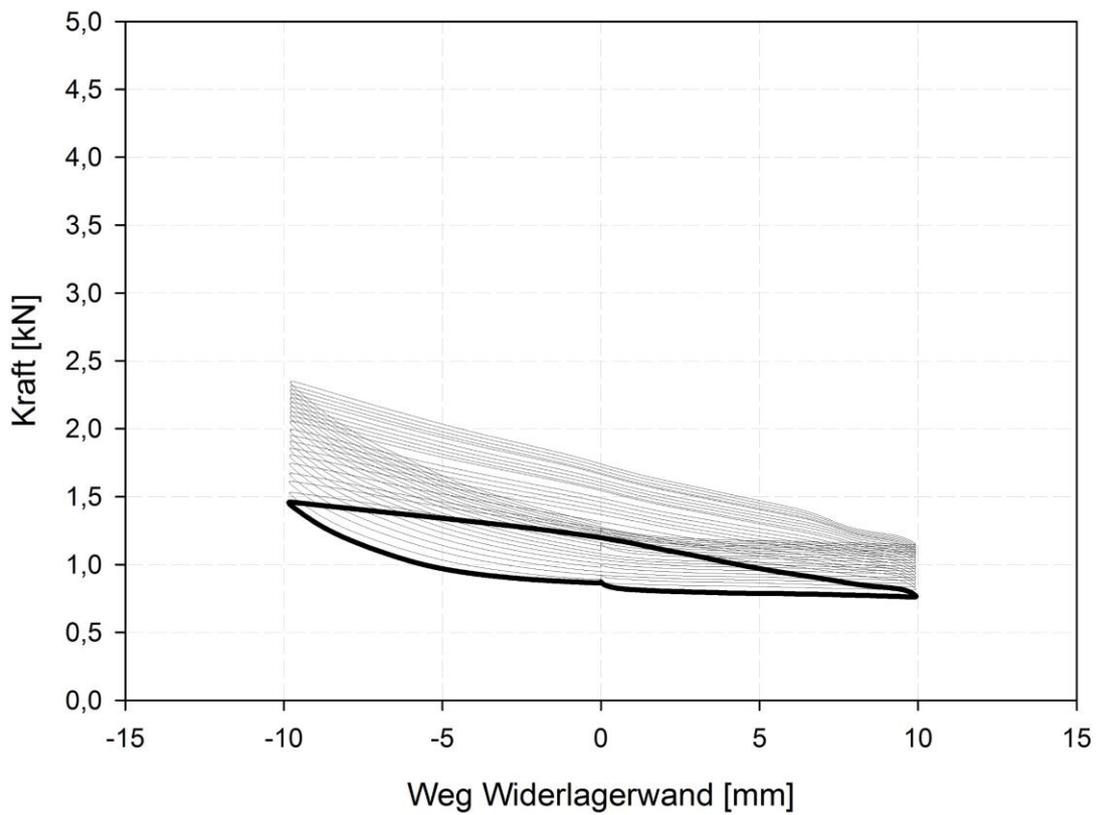
Auflager oben



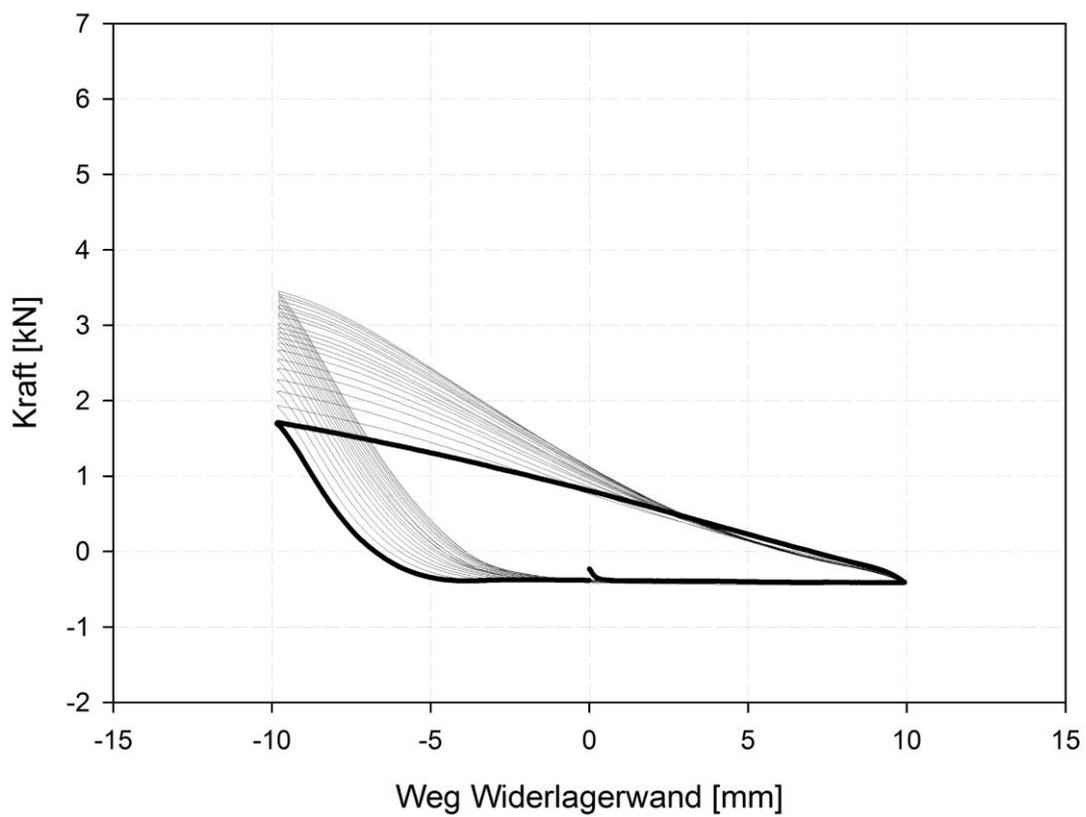
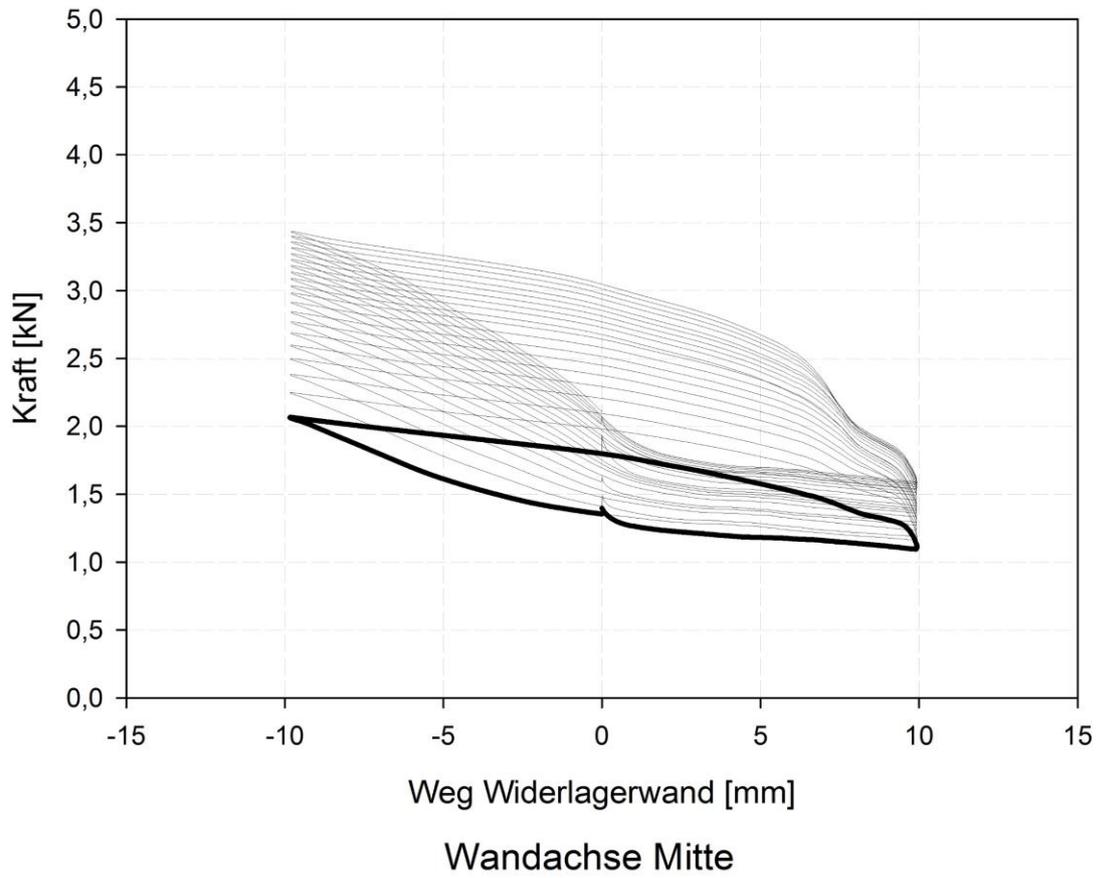
Auflager unten



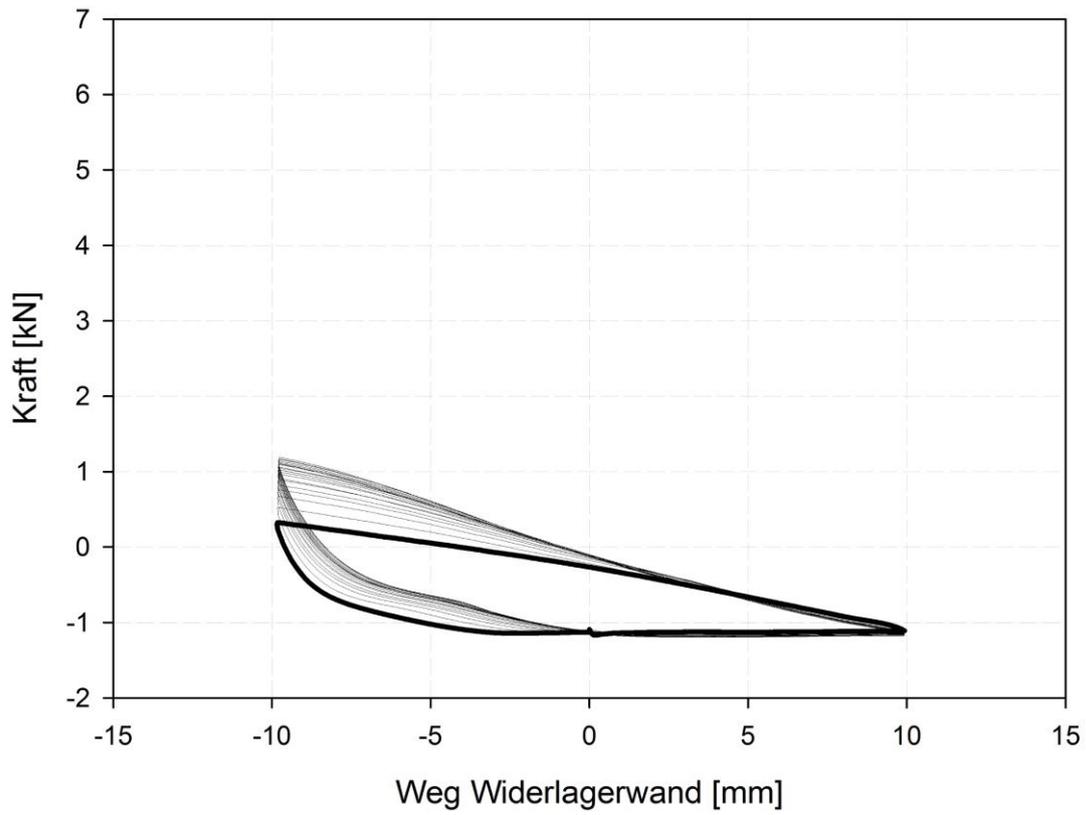
Rückwand oben



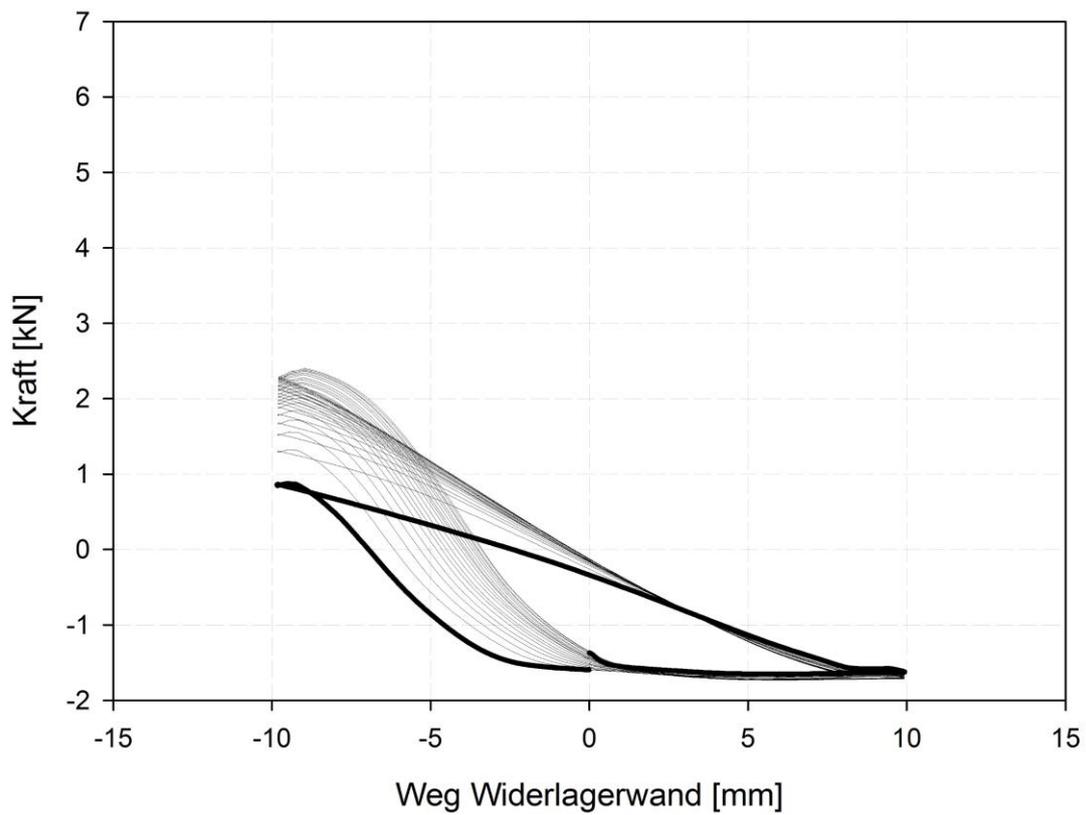
Rückwand unten



Wandachse oben

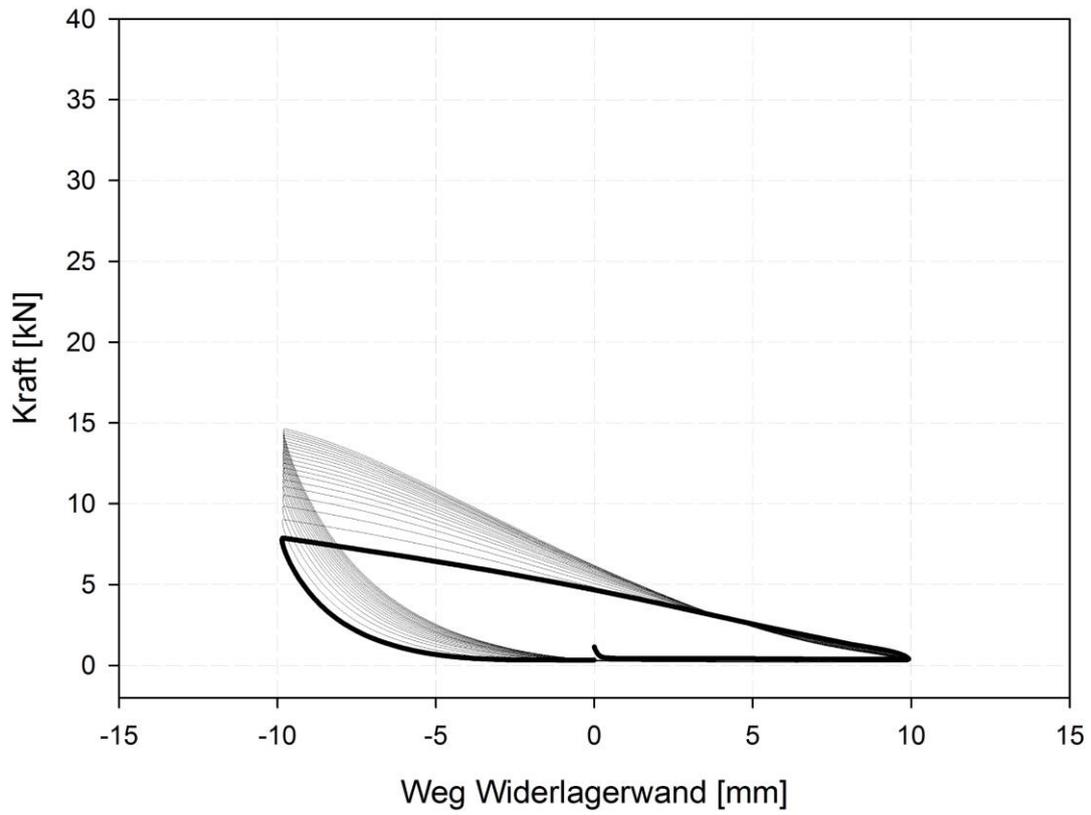


Wandachse unten

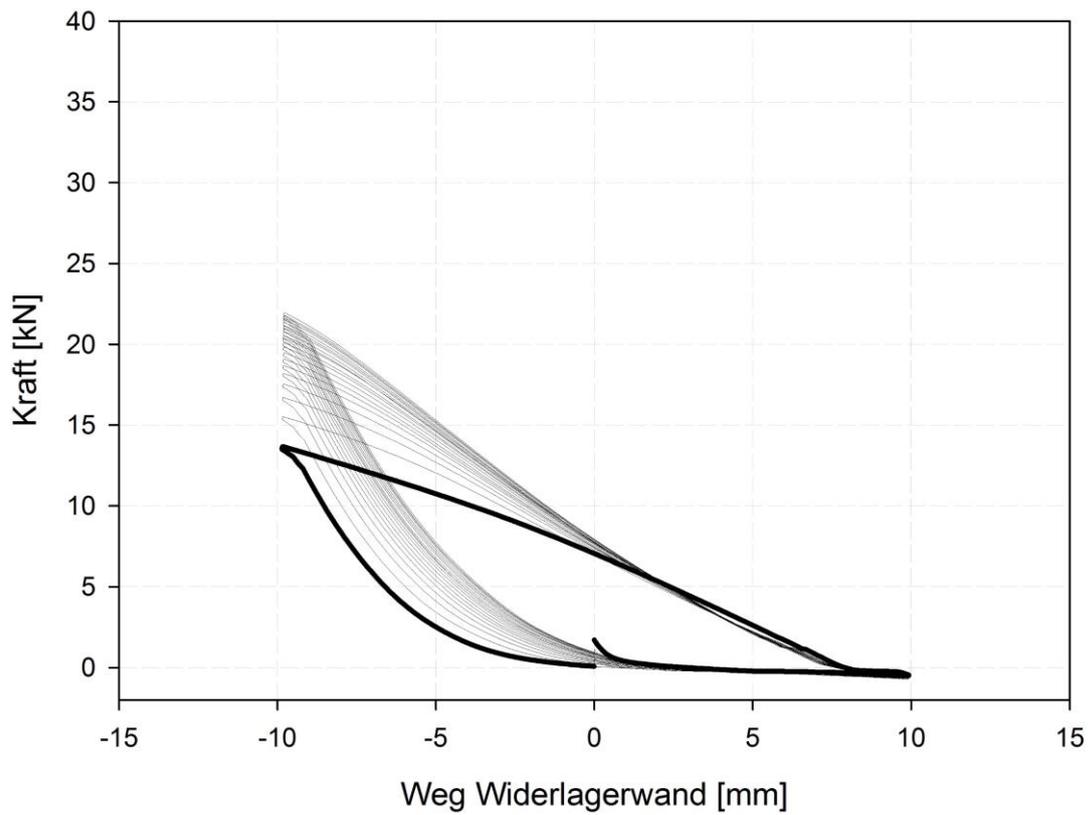


Versuch 9

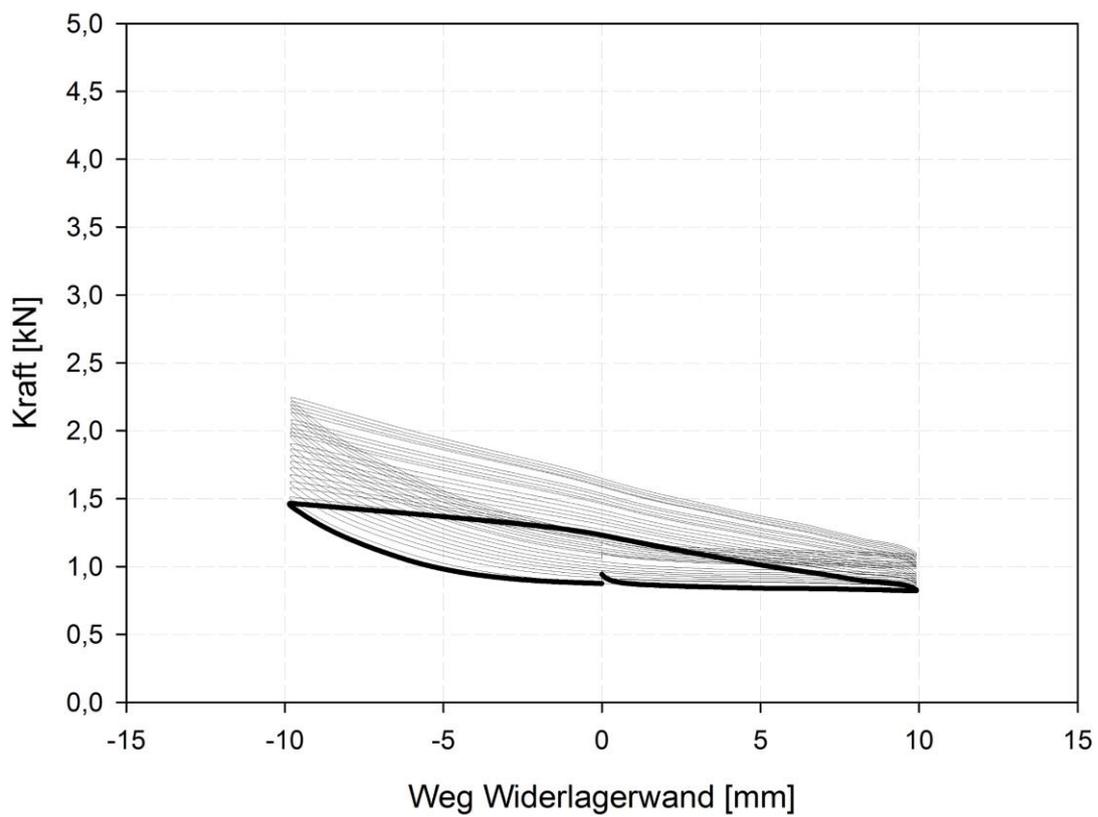
Auflager oben



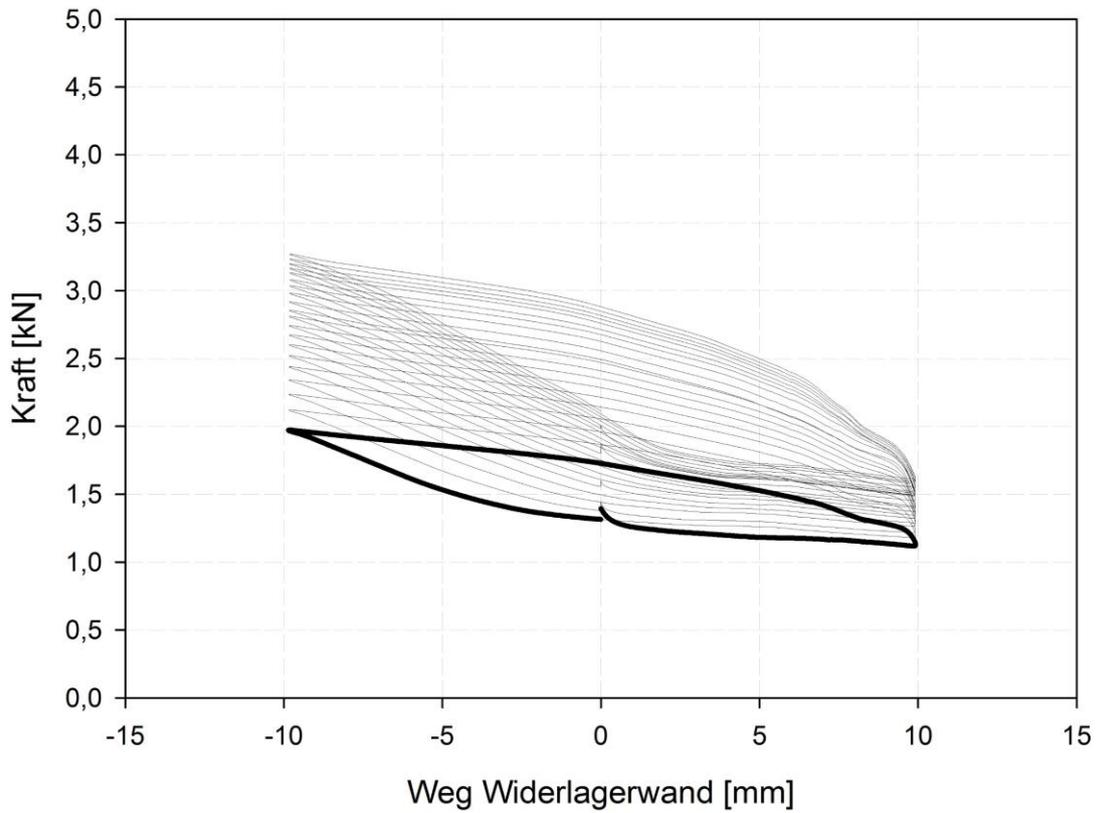
Auflager unten



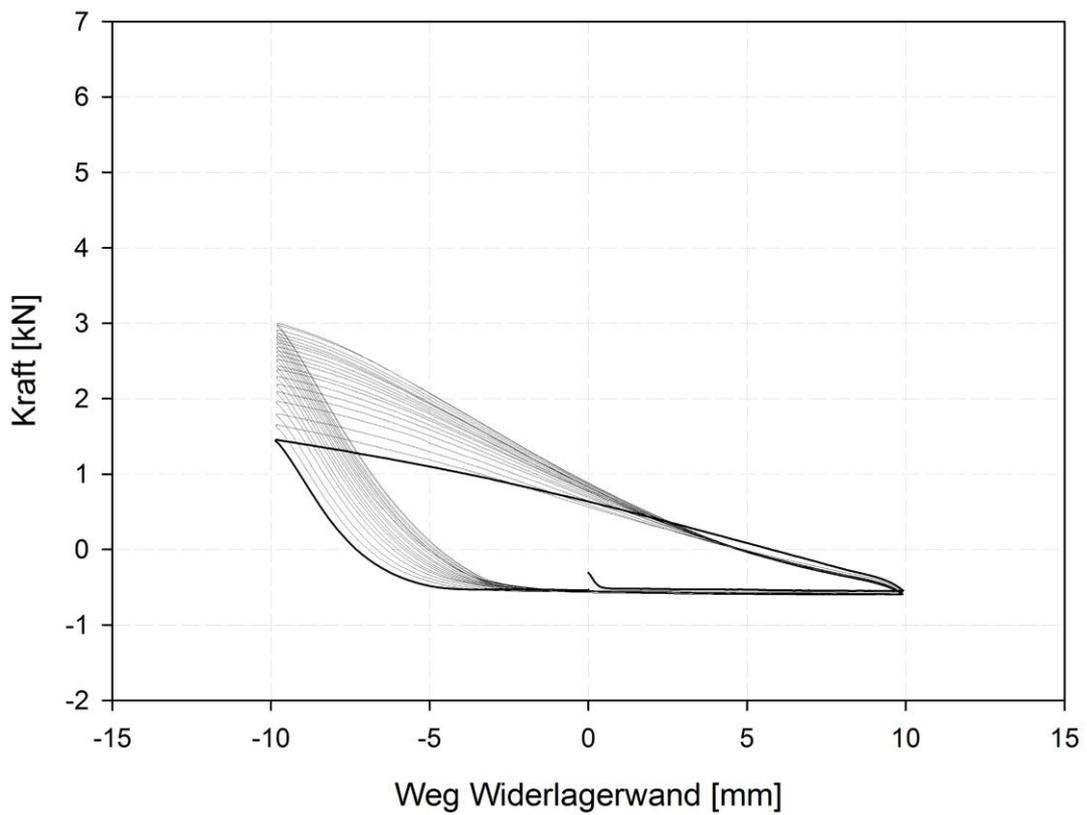
Rückwand oben



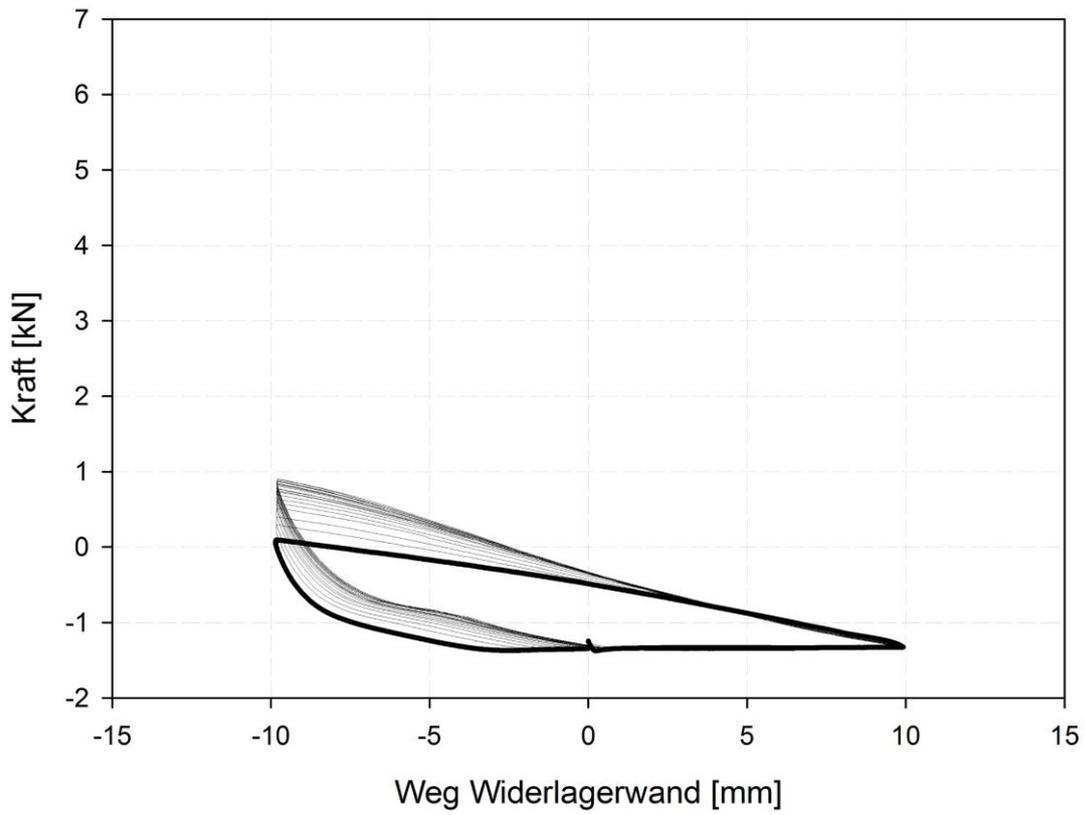
Rückwand unten



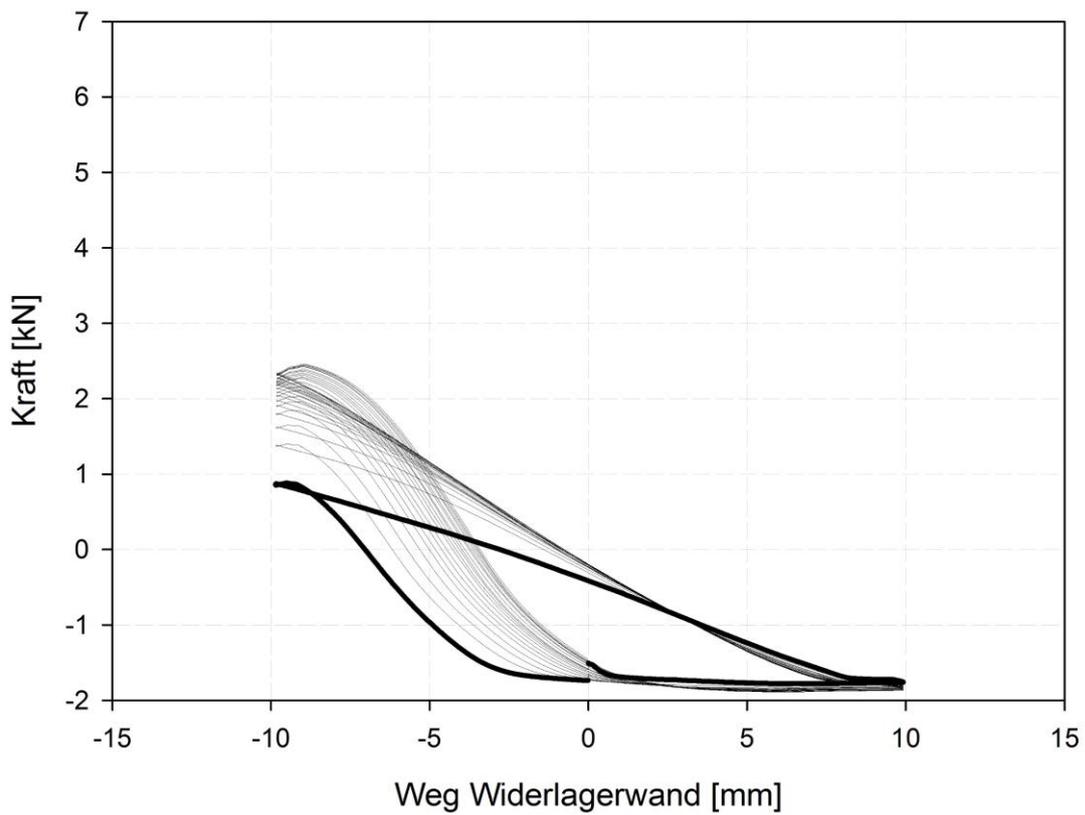
Wandachse Mitte



Wandachse oben

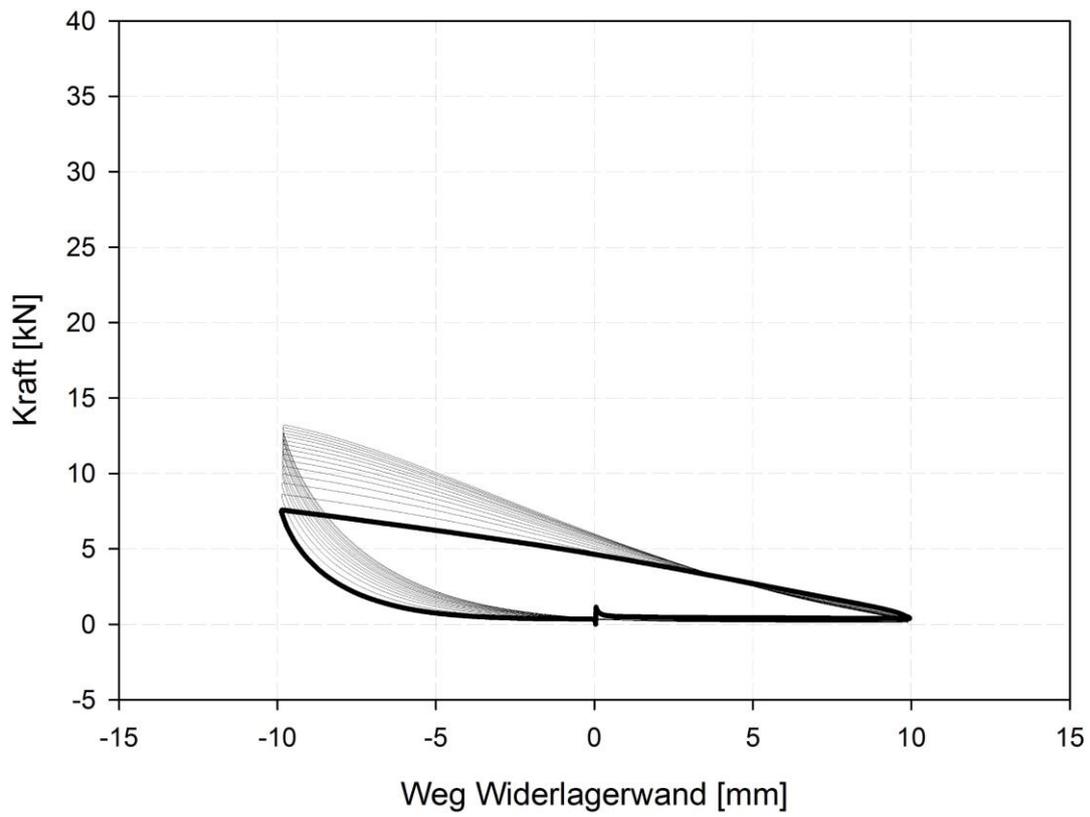


Wandachse unten

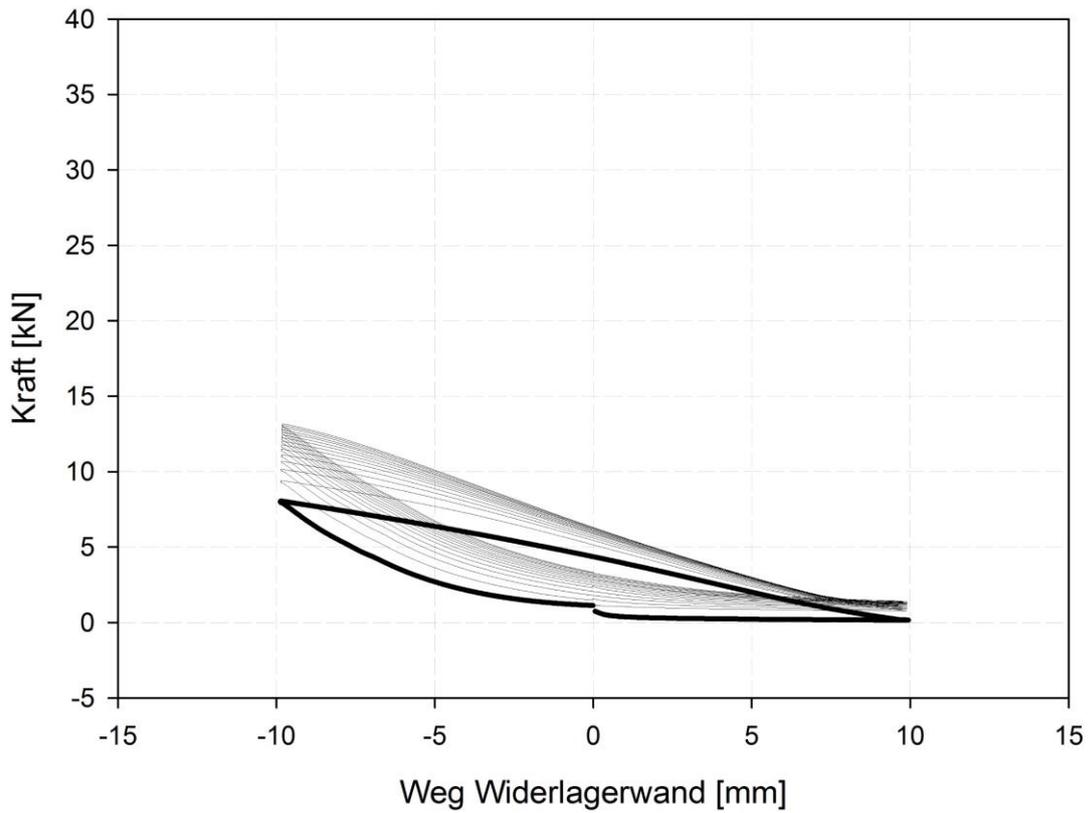


Versuch 11

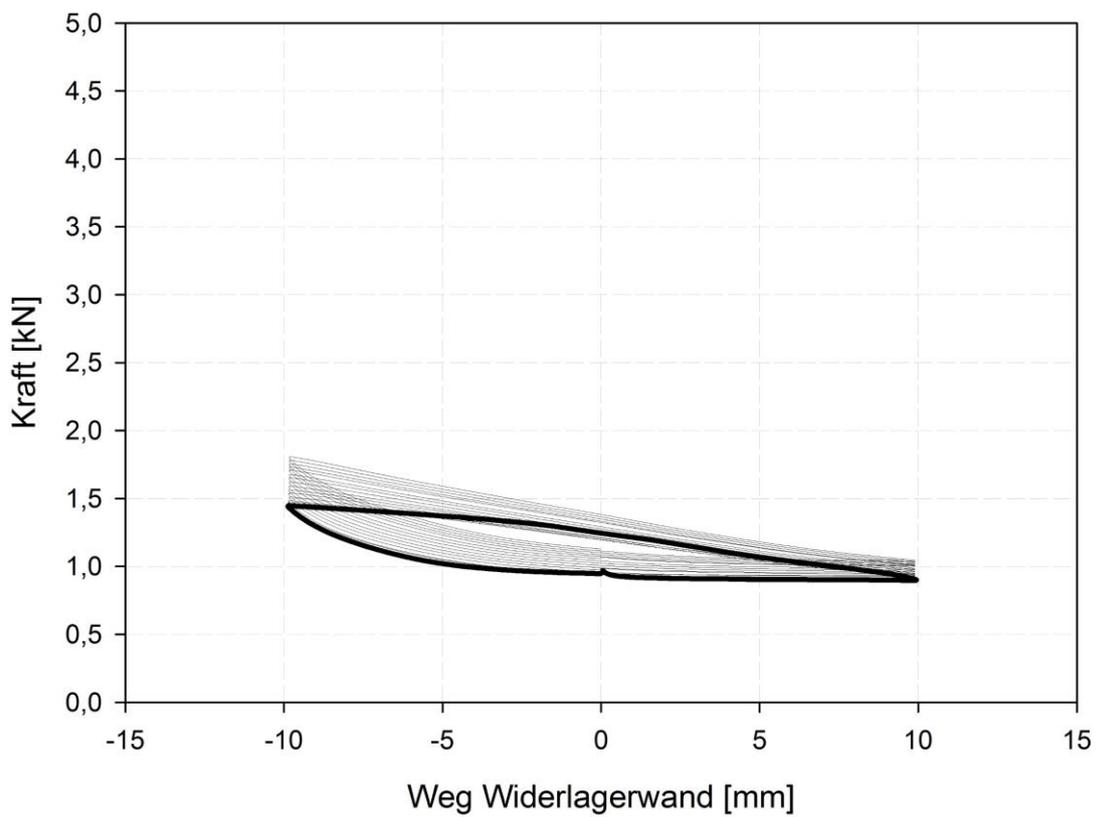
Auflager oben



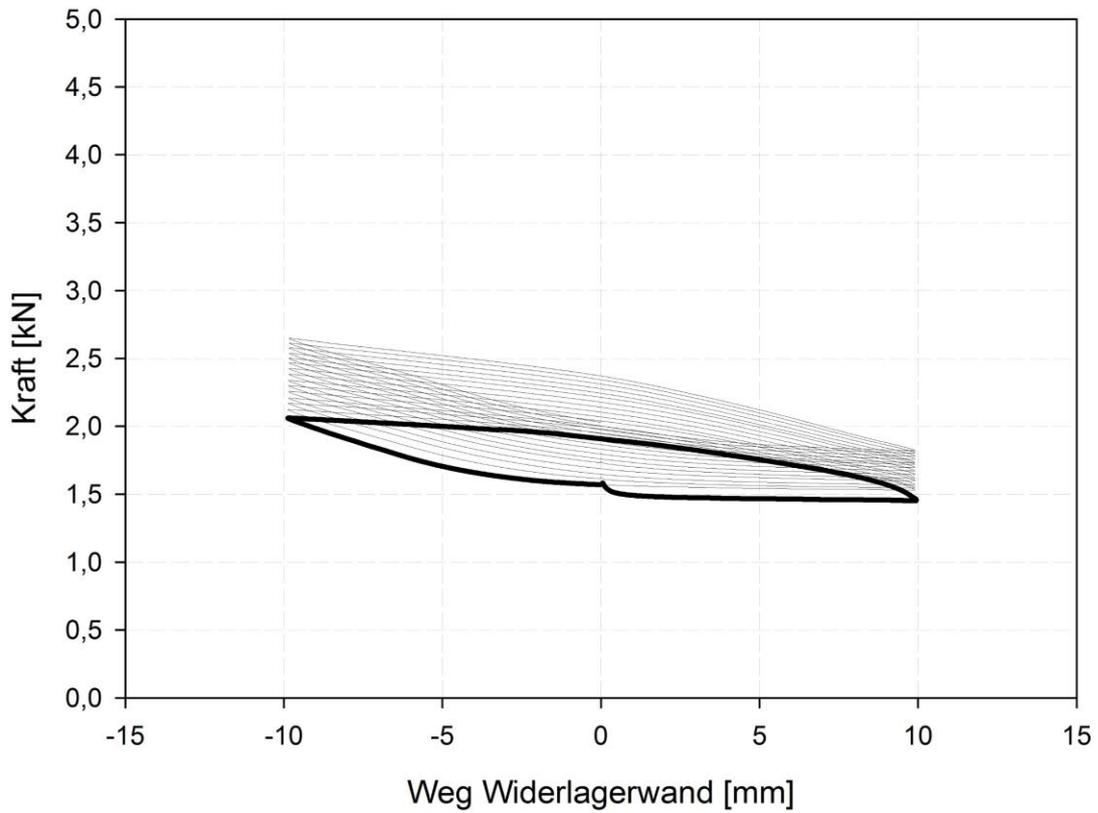
Auflager unten



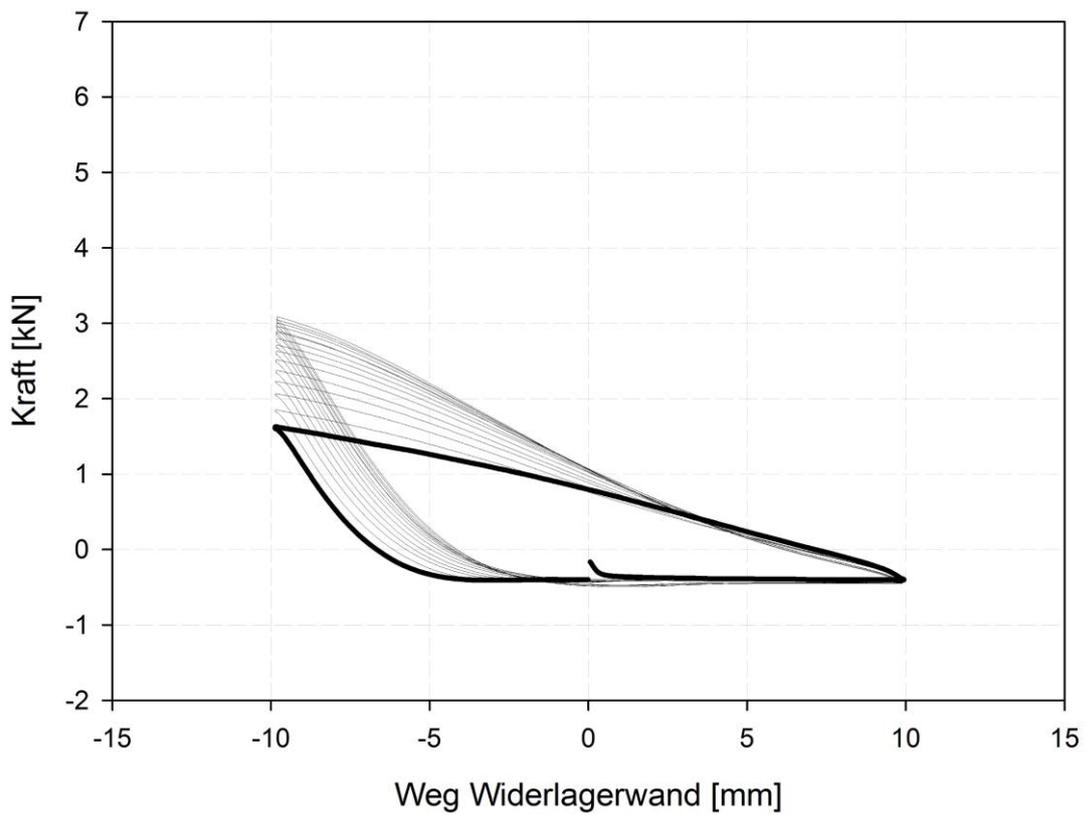
Rückwand oben



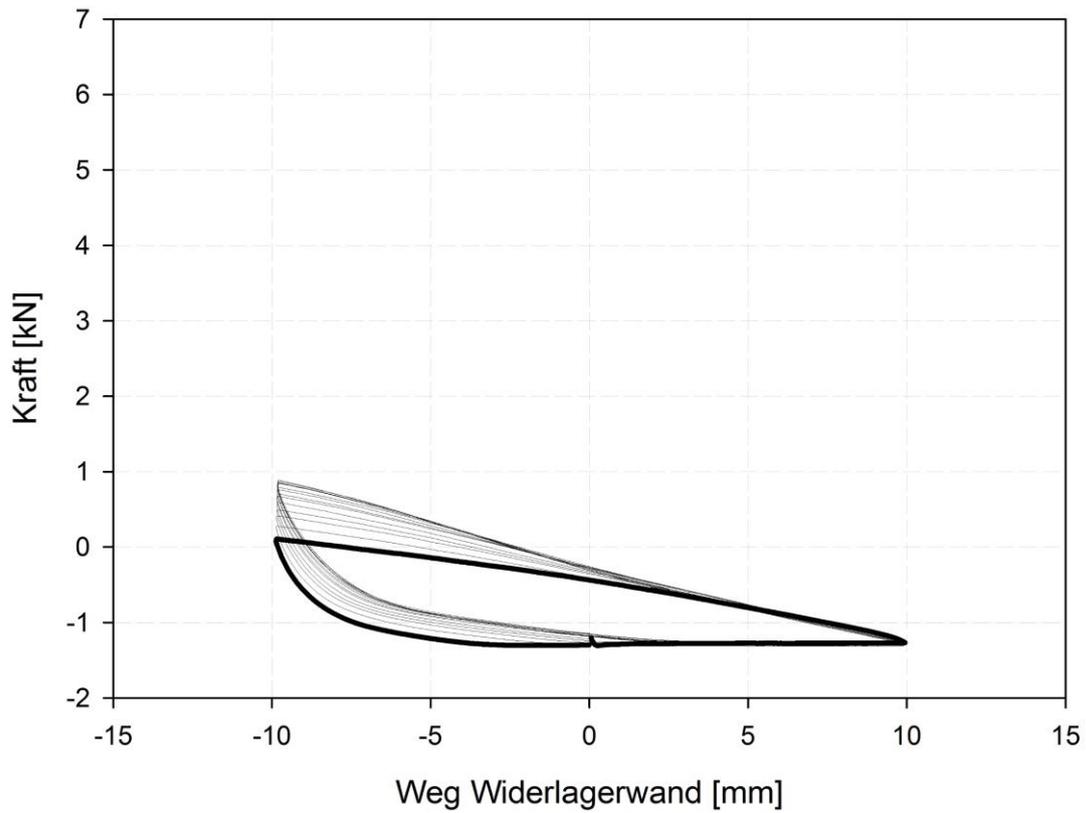
Rückwand unten



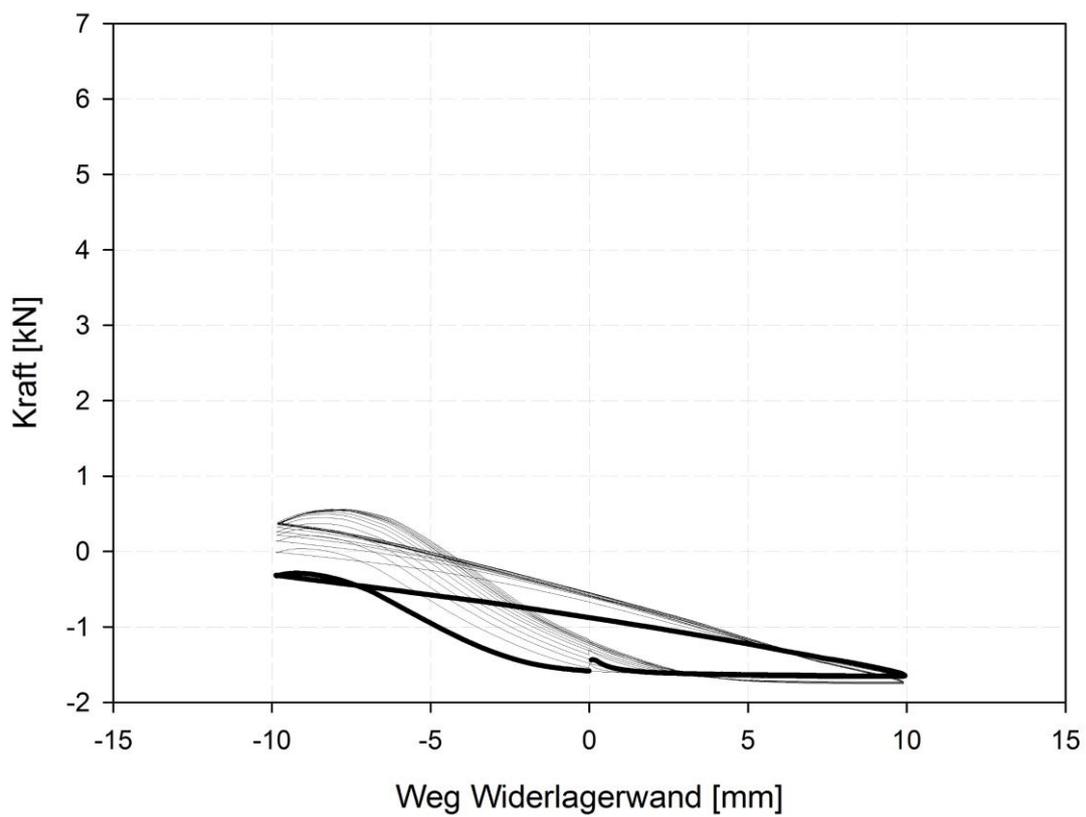
Wandachse Mitte



Wandachse oben

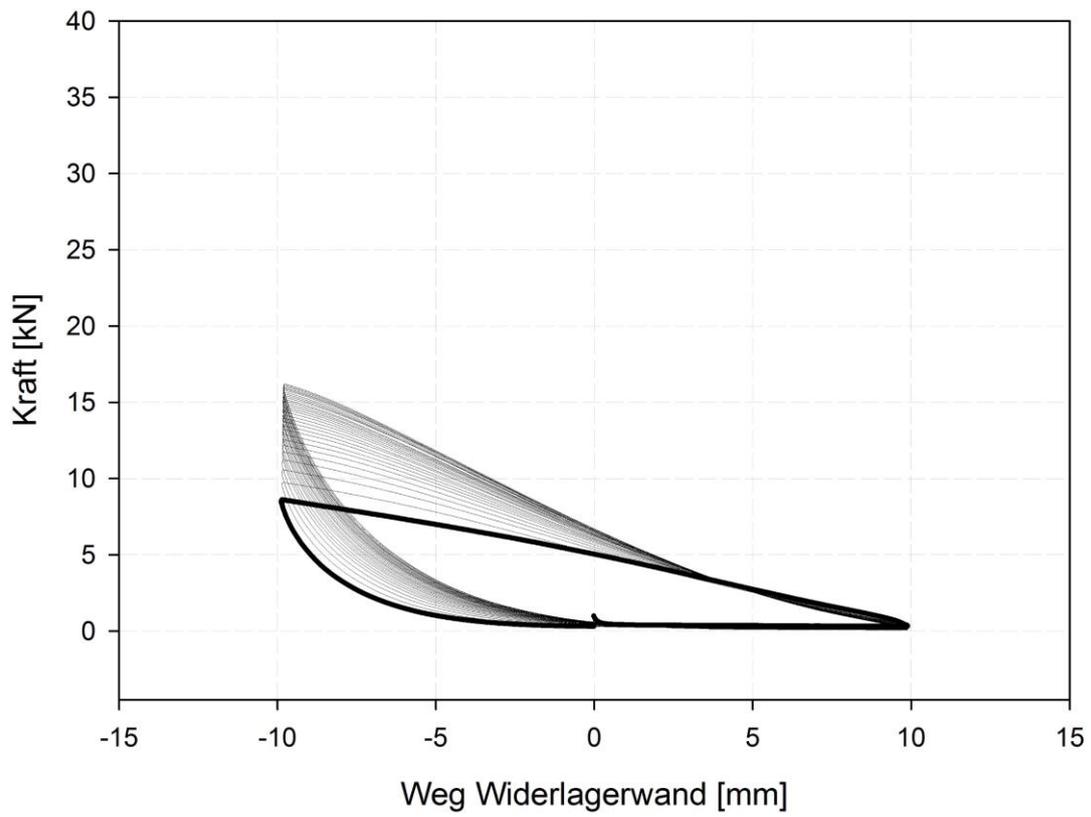


Wandachse unten

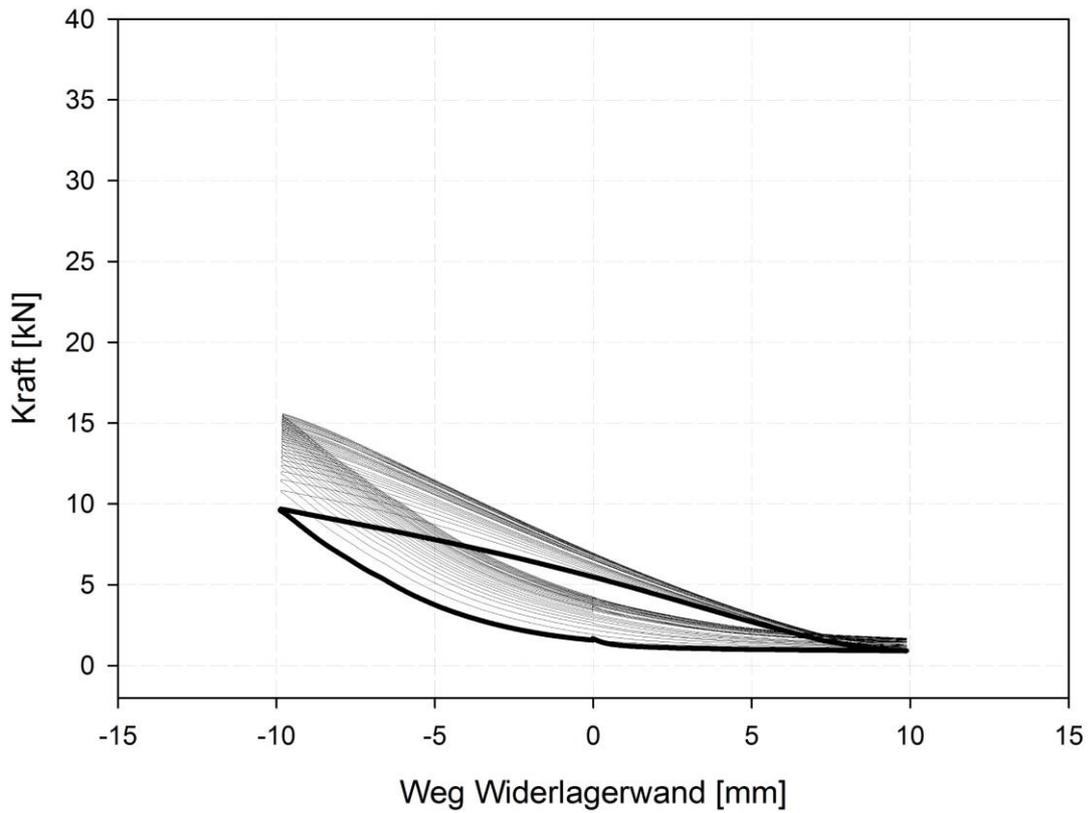


Versuch 12

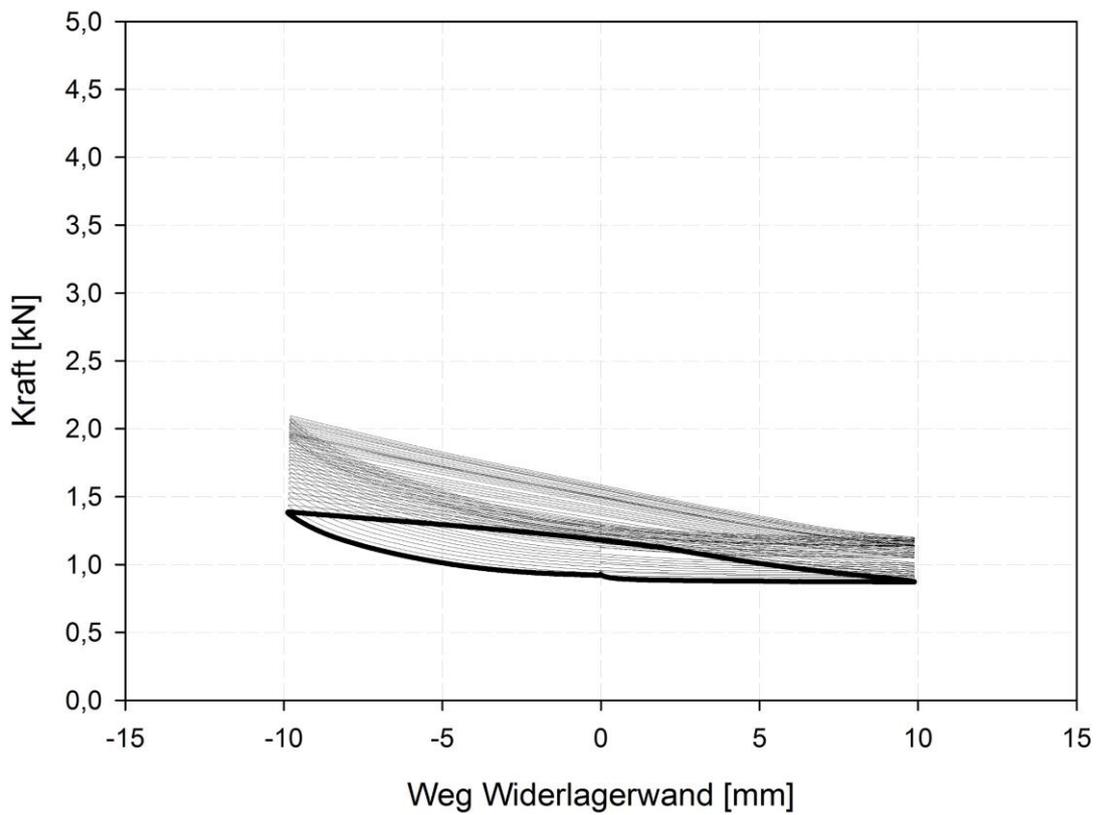
Auflager oben



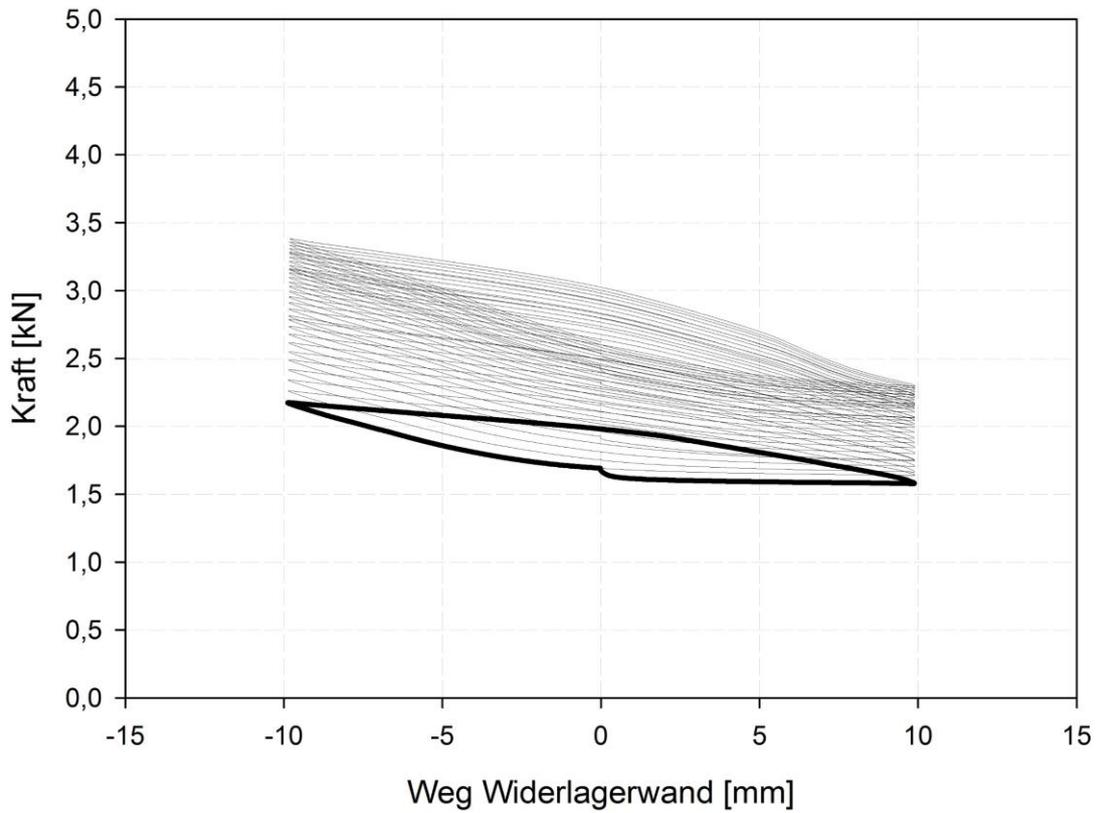
Auflager unten



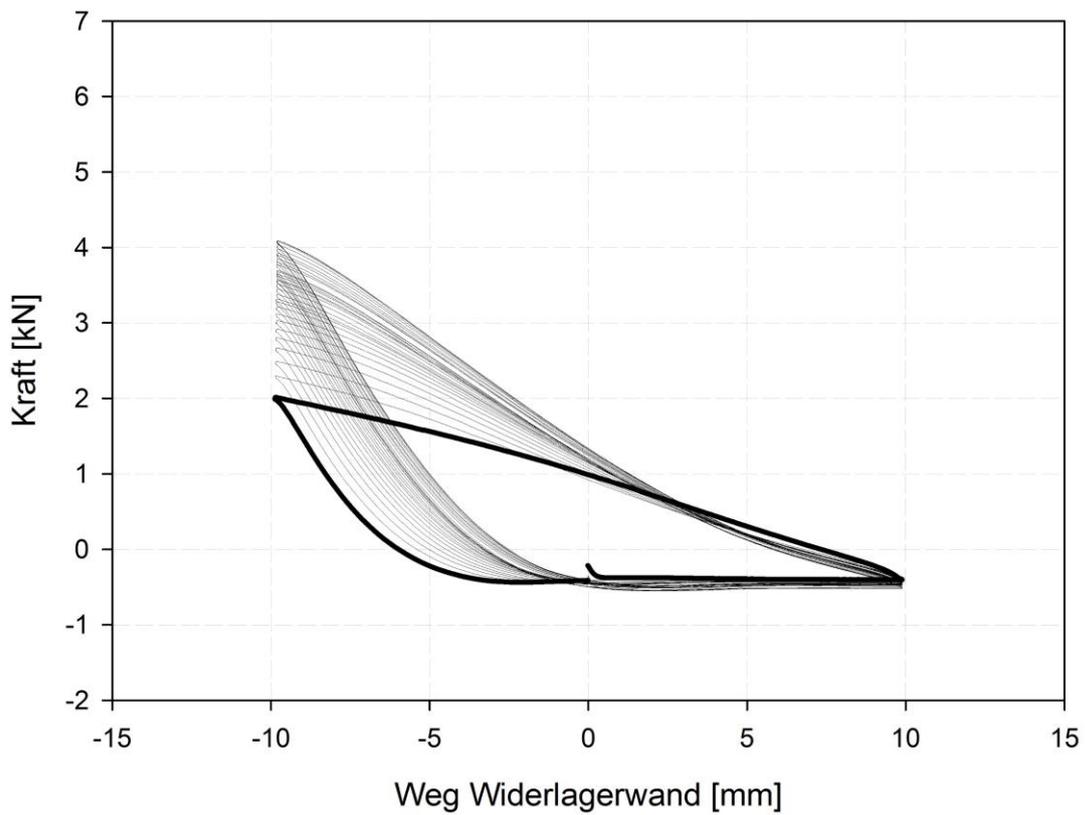
Rückwand oben



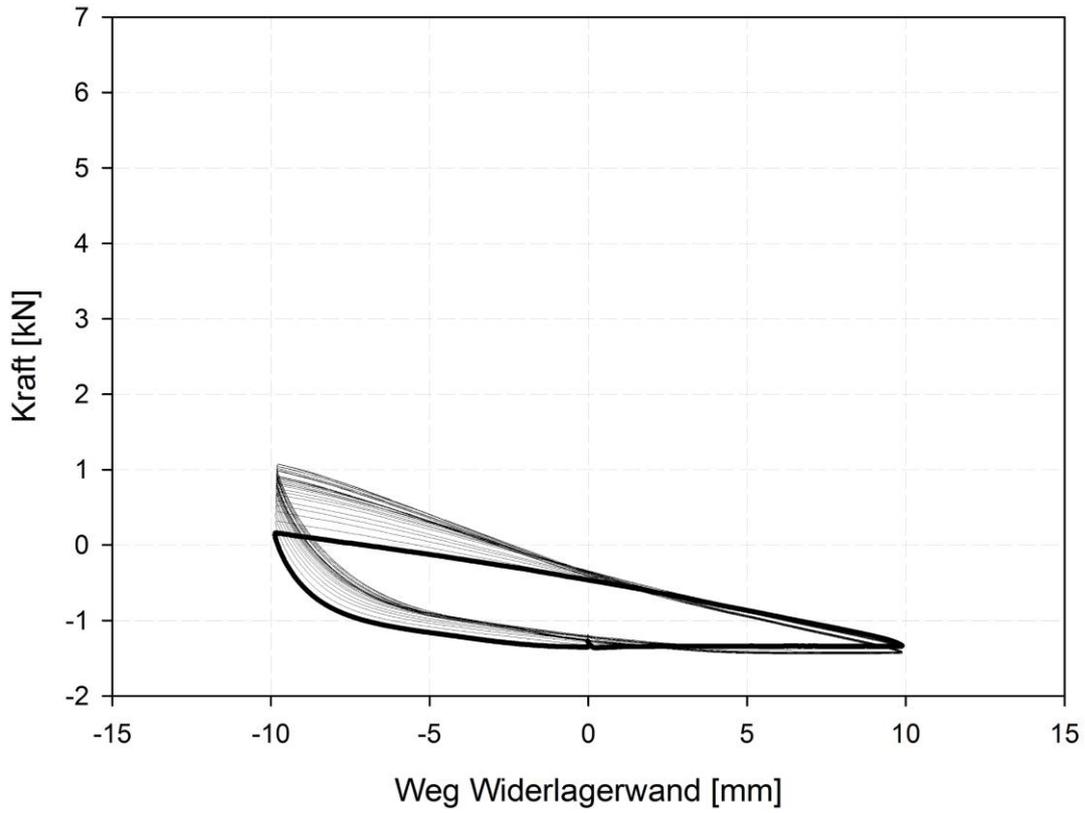
Rückwand unten



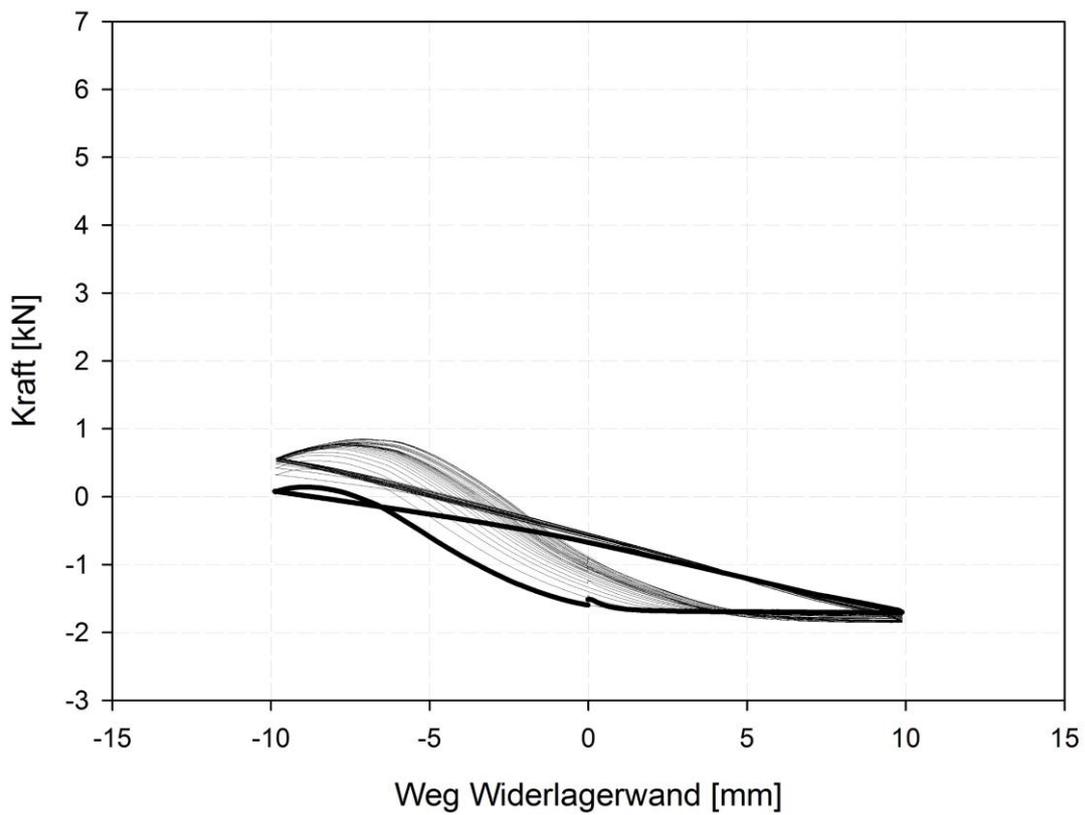
Wandachse Mitte



Wandachse oben

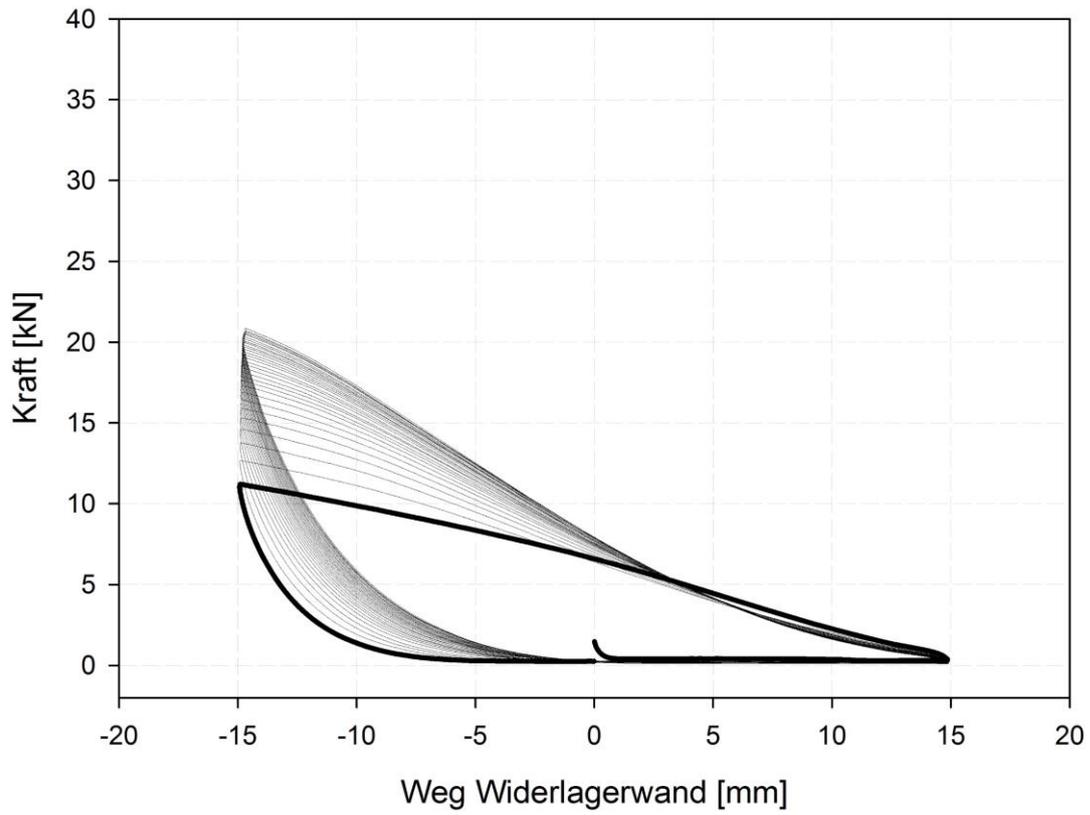


Wandachse unten

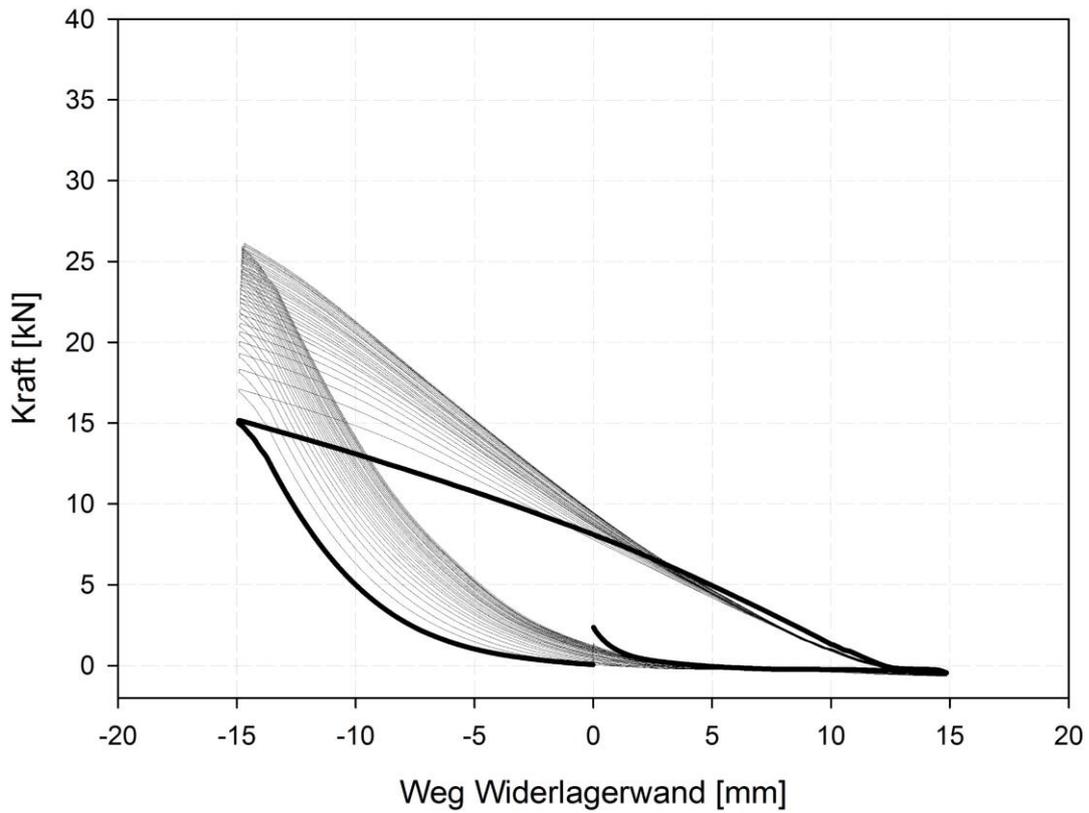


Versuch 13

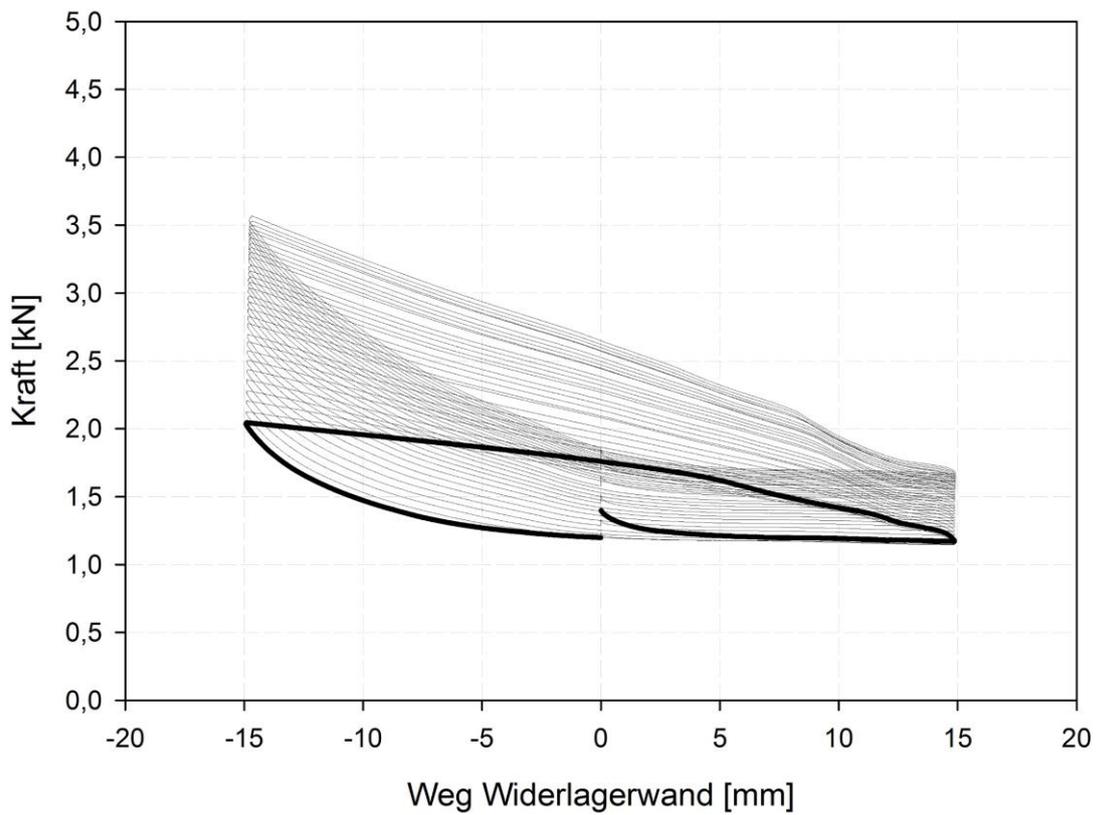
Auflager oben



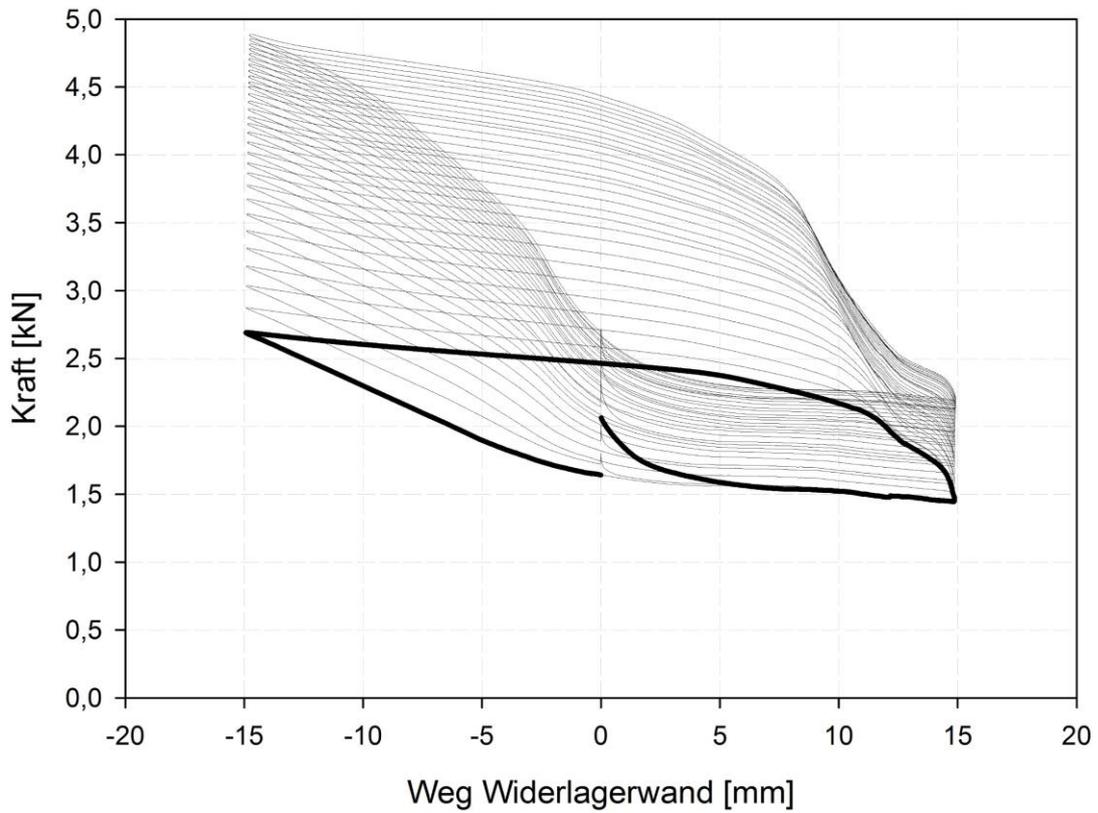
Auflager unten



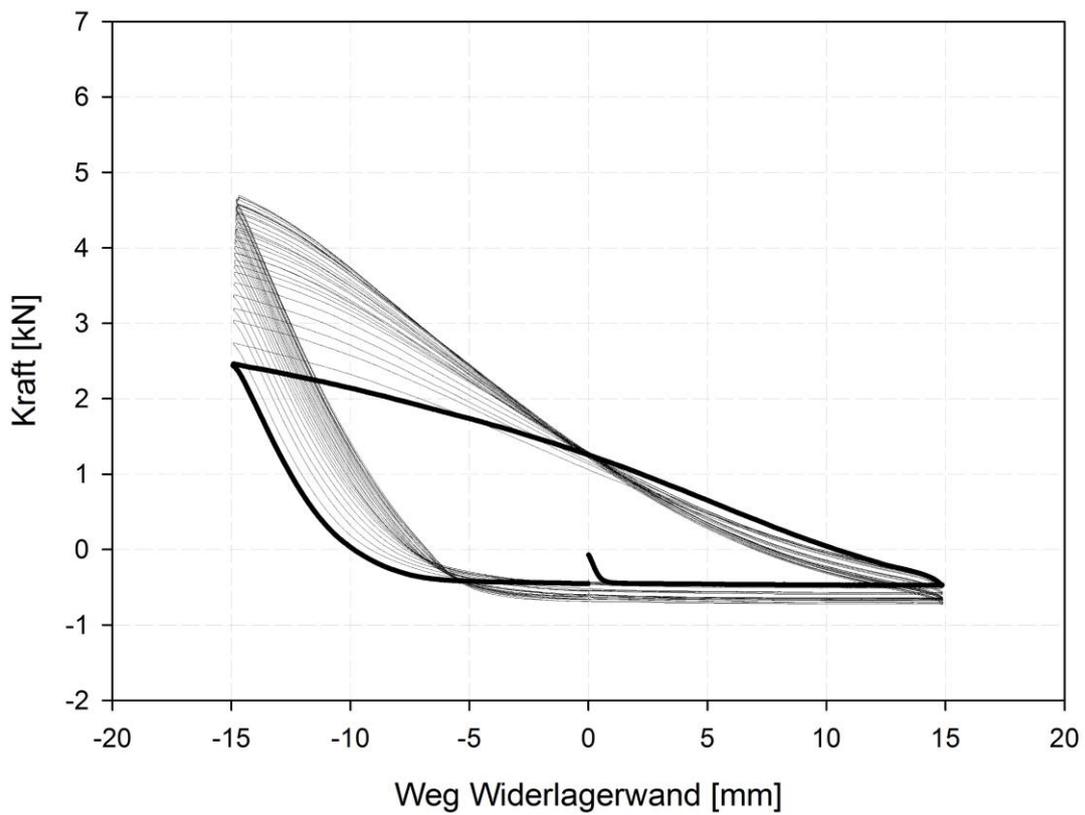
Rückwand oben



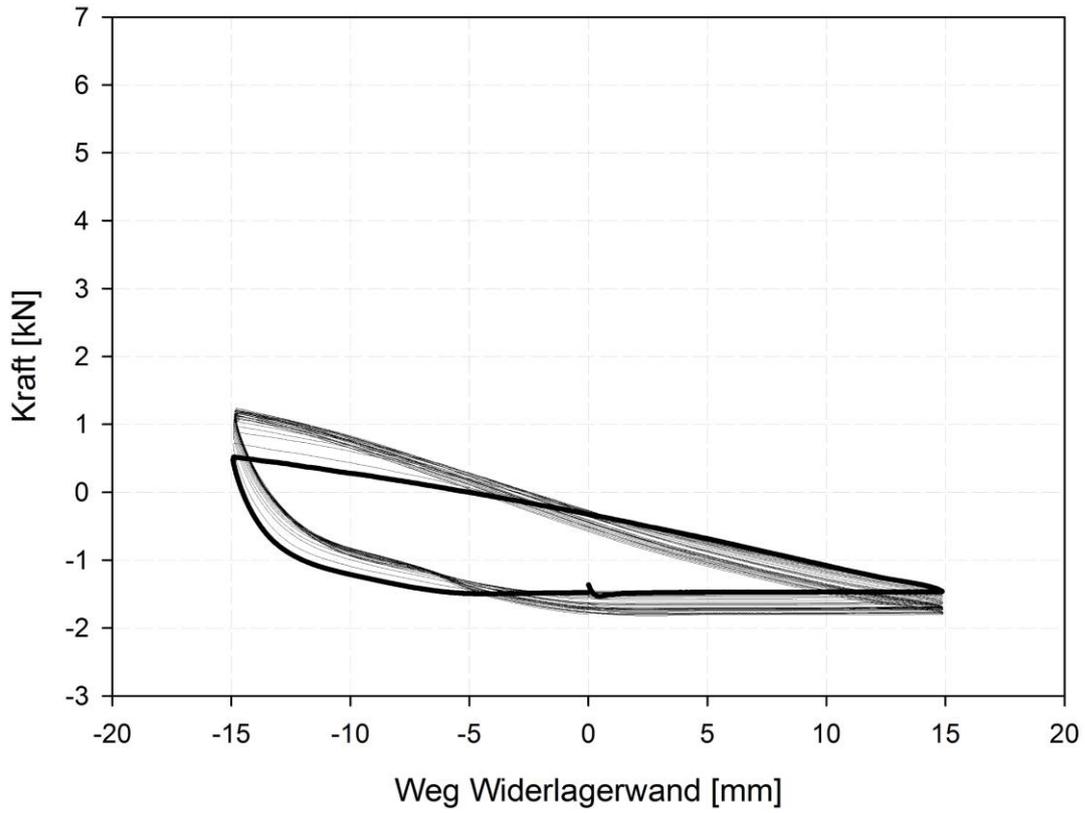
Rückwand unten



Wandachse Mitte



Wandachse oben



Wandachse unten

