



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN



Diplomarbeit

# Parameterstudie für den Lastfall ”Not-Aus der Stoppkategorie 0” bei Hubzügen in der Bühnentechnik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des Akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI) eingereicht an der TU Wien,  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Bernd Schwarz, B.Sc.**

Mat.Nr.: 01228102

unter der Leitung von

Em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr. techn. Bruno GRÖSEL

und

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg KARTNIG

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, E307-01



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Jänner 2020

---

Bernd Schwarz



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

---

## Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Bruno Grösel und Prof. Dr. Georg Kartnig für die Betreuung meiner Diplomarbeit und die Zusammenarbeit bedanken.

Meinen Eltern und Großeltern danke ich ganz besonders, da ich durch ihre Unterstützung in Wien studieren konnte und sie immer für mich da waren und hinter mir und meinen Entscheidungen standen.

Auch bei meiner Freundin Magdalena bedanke ich mich dafür, dass sie mich durch die positiven wie auch die negativen Phasen meines Studiums begleitet und mir mit viel Geduld beigestanden hat.

## Kurzfassung

Mithilfe des vorhandenen Simulationsmodells wurden bei Hubzügen in der Bühnentechnik der Einfluss der Parameter auf die Seilkräfte und Beschleunigungen, für den Lastfall "Not-Aus der Stoppkategorie 0", bestimmt.

Für die auftretenden Seilkräfte konnten Näherungslösungen, für die 4 betrachteten Hubzüge, bestimmt werden. Mit diesen kann abgeschätzt werden, wann der Störfall kritischer als der Betriebsfall ist bzw. wann der Lastfall Heben kritischer ist als der Lastfall Senken. Es wurde untersucht, wann es beim Heben zur Schlaffseilbildung kommt, wie sich die Parameter auf die Schlaffseilbildung auswirken und es wurde eine Näherungsformel zur Abschätzung ob es zur Schlaffseilbildung kommt gefunden.

Die betrachteten Hubzüge wurden mit Anlagen, die auf eine niedrigere Nenngeschwindigkeit ausgelegt sind, verglichen und Maßnahmen zur Reduktion der Seilkräfte und Beschleunigungen untersucht.

## Abstract

Based on the provided simulation model, the effect of different parameters on the rope forces and accelerations were determined for hoists used in stagecraft in the event of a "emergency stop after stop category 0".

With the approximations for the rope forces, for the 4 observed hoists, it can be estimated whether the emergency case is more critical than the normal operating mode or when the load case lifting is more critical than lowering.

For the load case lifting simulations were carried out to find out when the rope goes slack, it was analysed how the parameters affect the going slack of the rope and an approximation of the point at which the rope goes slack has been derived.

The hoists analysed in this thesis were compared to similar hoists, which were designed for lower operating speeds, and measures to reduce the rope forces and accelerations were evaluated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
2.1	Zielsetzung . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
3.1	Einführung in die Bühnentechnik . . . . .	5
3.1.1	Bühnentechnische Einrichtungen . . . . .	5
3.1.2	Hubzüge mit Seilen . . . . .	6
3.1.2.1	Seile . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Modellierung</b>	<b>9</b>
4.1	Anlagenschemata . . . . .	9
4.1.1	Technische Daten der Hubzüge . . . . .	11
4.1.1.1	Punktzug 2.5kN . . . . .	11
4.1.1.2	Punktzug 5kN . . . . .	12
4.1.1.3	Prospektzug 5kN . . . . .	13
4.1.1.4	Prospektzug 10kN . . . . .	14
4.2	Simulationsmodell . . . . .	15
4.2.1	Mathematisches Modell . . . . .	15
4.2.2	Berechnung der Kräfte und Beschleunigungen mit dem Simulationsmodell . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Simulation des Störfalls</b>	<b>19</b>
5.1	Seilkräfte und Beschleunigung bei Nennbedingungen . . . . .	19
5.1.1	Punktzug 2.5 kN . . . . .	20
5.1.1.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	21
5.1.1.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	24
5.1.2	Punktzug 5 kN . . . . .	27
5.1.2.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	28

5.1.2.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	31
5.1.3	Prospektzug 5 kN . . . . .	34
5.1.3.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	35
5.1.3.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	38
5.1.4	Prospektzug 10 kN . . . . .	41
5.1.4.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	42
5.1.4.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	45
5.2	Variation der Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	48
5.2.1	Punktzug 2.5kN . . . . .	50
5.2.2	Punktzug 5kN . . . . .	54
5.2.3	Prospektzug 5kN . . . . .	58
5.2.4	Prospektzug 10kN . . . . .	62
5.3	Näherungsformeln für die Berechnung der Seilkraft . . . . .	66
5.3.1	Näherungslösungen für die einzelnen Hubzüge . . . . .	66
5.3.1.1	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	67
5.3.1.2	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	67
5.3.2	Graphische Darstellung der Näherungslösungen und deren Fehler . . . . .	67
5.3.2.1	Punktzug 2.5kN . . . . .	68
5.3.2.2	Punktzug 5kN . . . . .	69
5.3.2.3	Prospektzug 5kN . . . . .	70
5.3.2.4	Prospektzug 10kN . . . . .	71
5.3.3	Allgemeine Näherungslösung . . . . .	72
5.3.4	Abschätzung für den Maximalwert der Seilkraft . . . . .	75
5.3.4.1	Abschätzungsformeln Lastfall Heben . . . . .	75
5.3.4.2	Abschätzungsformeln Lastfall Senken . . . . .	76
5.4	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Simulation des Störfalls bei Dimensionierung auf geringere Nenngeschwindigkeit</b>	<b>79</b>
6.1	Seilkräfte und Beschleunigungen bei Dimensionierung auf verringerte Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	81
6.1.1	Punktzug 2.5 kN . . . . .	81
6.1.1.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	82
6.1.1.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	84
6.1.2	Punktzug 5 kN . . . . .	86
6.1.2.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	87
6.1.2.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	89

6.1.3	Prospektzug 5 kN . . . . .	91
6.1.3.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	92
6.1.3.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	94
6.1.4	Prospektzug 10 kN . . . . .	96
6.1.4.1	Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	97
6.1.4.2	Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	99
6.2	Vergleich zum Störfall bei Nennbedingungen . . . . .	101
6.3	Vergleich zum Betriebsfall . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Unter welchen Voraussetzungen kommt es beim Heben zur Schlaffseilbildung?</b>	<b>103</b>
7.1	Bereiche der Schlaffseilbildung . . . . .	103
7.2	Verlauf von Seilkraft und Beschleunigung bei Schlaffseilbildung . . . . .	105
7.2.1	Bereich 1, keine Schlaffseilbildung: $a < 9.807m/s^2$ . . . . .	106
7.2.2	Bereich 2, Schlaffseilbildung: $a = 9.807m/s^2$ . . . . .	107
7.3	Einfluss der Parameter auf die Schlaffseilbildung beim Heben . . . . .	108
7.3.1	Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	109
7.3.2	Bremsmoment . . . . .	111
7.3.3	Seillänge . . . . .	115
7.3.4	Masse der Last . . . . .	115
7.4	Parameterstudie zur Schlaffseilbildung . . . . .	116
7.5	Näherungsformel für die Schlaffseilbildung . . . . .	121
7.6	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Maßnahmen zur Vermeidung hoher Belastungen beim Störfall</b>	<b>125</b>
8.1	Verzögerter Einfall der 2. Bremse . . . . .	125
8.1.1	Einfall der 2. Bremse im Stillstand . . . . .	125
8.1.2	Einfall der 2. Bremse um 100ms verzögert . . . . .	127
8.1.2.1	Punktzug 2.5 kN . . . . .	129
8.1.2.2	Punktzug 5 kN . . . . .	134
8.1.2.3	Prospektzug 5 kN . . . . .	139
8.1.2.4	Prospektzug 10 kN . . . . .	144
8.1.2.5	Vergleich zur Belastung ohne verzögerten Einfall der 2. Bremse . . . . .	149
8.2	Reduktion der Verfahrgeschwindigkeit im Bereich der kritischen Seillänge . . . . .	150
8.3	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	150

<b>9 Welchen Effekt hat ein Feder-Dämpfer Element im Seilzug?</b>	<b>153</b>
9.1 Modellierung . . . . .	153
9.2 Einfluss der Parameter des Feder-Dämpfer Elements . . . . .	156
9.2.1 Feder im Seilzug . . . . .	157
9.2.2 Feder-Dämpfer Element im Seilzug . . . . .	161
9.3 Näherungslösung für die Abschätzung des Feder-Dämpfer Elements . . . . .	164
9.4 Simulation der Seilkräfte und Beschleunigungen . . . . .	166
9.4.1 Punktzug 2.5 kN . . . . .	167
9.4.1.1 Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	168
9.4.1.2 Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	172
9.4.2 Punktzug 5 kN . . . . .	176
9.4.2.1 Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	177
9.4.2.2 Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	181
9.4.3 Prospektzug 5 kN . . . . .	185
9.4.3.1 Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	186
9.4.3.2 Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	190
9.4.4 Prospektzug 10 kN . . . . .	194
9.4.4.1 Lastfall Not-Aus beim Senken . . . . .	195
9.4.4.2 Lastfall Not-Aus beim Heben . . . . .	199
9.4.5 Ergebnisse und Interpretation . . . . .	203
<b>10 Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>207</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>209</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>211</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>217</b>

# 1 Einleitung

Gemäß der "ÖNORM 9630-1:2010 - Maschinelle Bühnentechnische Einrichtungen" [1] ist die Nennbelastung die, sich aus der Nennlast ergebene, bauteilbezogene Gesamtbelastung. Hierbei wird zwischen statischer und dynamischer Nennbelastung unterschieden. Die dynamische Nennlast ergibt sich aus der statischen Nennlast und den betriebsmäßigen Massenkräften.

Die Bauteile im Leistungsfluss zwischen Antriebsmotor bzw. Bremse und Hublast sind für 400 Volllast-Betriebsstunden bei doppelter dynamischer Nennbelastung auszulegen. Davon ausgenommen sind Tragmittel (z.B.: Seile) und Lastaufnahmemittel (z.B.: Laststangen). Für den Störfall der Stoppkategorie 0 (z.B.: Not-Aus nach Stromausfall), sind die entsprechenden Bauteile für die einfache, dann auftretende Störfallbelastung auszulegen, so dass es zu keinen plastischen Verformungen kommt. <sup>1</sup>

Die Not-Aus Funktion muss in jedem Fall vorhanden sein, da Hubzüge in der Bühnentechnik zu den maschinentechnischen Einrichtungen zählen. Die Auswahl zwischen den Stoppkategorien 0 und 1, gemäß ÖVE/ÖNORM EN 60204-32, ist entsprechend einer Risikoanalyse vorzunehmen, wobei Stoppkategorie 0 immer Vorrang haben muss. Beim Einschalten der Anlage muss diese automatisch eine Testroutine unterlaufen, welche die Abschaltfähigkeit der maschinentechnischen Einrichtungen überprüft. <sup>2</sup>

Hubzüge in der Bühnentechnik verfügen über 2 Bremsen, welche im Falle eines Stromausfalls fast gleichzeitig aktiviert werden/einfallen. Jede der Bremsen muss so ausgelegt werden, dass sie innerhalb eines angemessenen Bremswegs die Last sicher zum Stillstand bringen kann. Die Verwendung von 2 Bremsen ist vorgeschrieben, da bei Ausfall einer Bremse keine Gefährdung stattfinden darf. Der Grund für diese spezielle Anforderung ist zum einen, dass sich im Betrieb in der Regel Personen unter der schwebenden Last aufhalten und es zum anderem auch vorkommen kann, dass Personen selbst vom Hubwerk

<sup>1</sup>vgl. ÖNORM 9630-1:2010 - 5.2 Seite 11 & 5.11.2 Seite 14

<sup>2</sup>vgl. ÖNORM 9630-1:2010 - 6.9.4 Seite 25

transportiert werden (in diesem Fall spricht man dann von einem Flugwerk).

Wenn 2 Bremsen (von denen jede alleine den Hubzug abbremsen kann) gleichzeitig einfallen bedeutet das, dass ein sehr viel höheres Bremsmoment wirkt als es eigentlich nötig wäre. Durch die sich daraus ergebende stärkere Verzögerung kommt es dann zu erhöhten Seilkräften und Beschleunigungen. Aus wirtschaftlichen und innovativen Gesichtspunkten wäre es deshalb interessant, Methoden zur Vermeidung von zu großen Belastungen zu finden.

Stopp-Kategorie 0 ist laut EN ISO 13850:2008 Pkt. 4.1.3 definiert als: Stillsetzen durch sofortiges Unterbrechen der Energiezufuhr zu dem/den Maschinen-Antriebselement(en).

## 2 Aufgabenstellung

### 2.1 Zielsetzung

Die bisherigen Untersuchungen zum Thema beschäftigten sich mit der Erstellung und Validierung eines Simulationsmodells für Hubzüge in der Bühnentechnik [3] und, basierend auf diesem Modell, der Berechnung von Hubzügen mit unterschiedlichen Seillängen, Lasten und Geschwindigkeiten, der Auswirkung verschiedener Bremsmomente, einem verzögertem Einfall der 2. Bremse und damit, durch Ermittlung von Korrekturfaktoren, eine vereinfachte Störfallberechnung zu ermöglichen [4]. Darauf aufbauend sollen nun weitere Parameterstudien durchgeführt werden, um den Einfluss verschiedener Parameter an Hand von Punkt- und Prospektzügen unterschiedlicher Tragfähigkeit und Nenngeschwindigkeit zu untersuchen. Es sollen Maßnahmen aufgezeigt werden, durch die im Störfall zu hohe Belastungen vermieden werden können. Bei Arbeiten mit Nennlast sollen zu hohe Verzögerungen und damit zu hohe (für die Dimensionierung relevante) Massenkräfte vermieden werden. Beim Einsatz als Flugwerk mit geringen Nutzlasten (erwachsene Person mit 80 kg, Kind mit 40 kg) sollen zu große Verzögerungswerte vermieden werden.

Insbesondere ist der Einfluss verschiedener Arbeitsgeschwindigkeiten, sowohl im Senksinn als auch im Hubsinn, zu betrachten. Es wäre zu untersuchen, ob Kriterien zu finden wären, unter welchen Bedingungen die kritischeren Belastungswerte beim Heben oder Senken auftreten. Vielleicht lässt sich auch eine allgemeine Aussage formulieren, unter welchen Randbedingungen bei Störfall höhere Belastungswerte auftreten als bei zweifacher dynamischer Nennbelastung im Betriebsfall. Interessant wäre auch zu untersuchen, mit welcher Zeitverzögerung die zweite Bremse einfallen müsste, wenn sie erst dann zur Wirkung kommen sollte, wenn das Windwerk bereits zum Stillstand gekommen ist und zu überprüfen, ob sich dabei noch zulässige Bremswege ergeben würden.

Bei Prospektzügen hängt die Hublast an mehreren Seilen, sodass bei Prospektzügen höhere Federkennzahlen für die elastische Koppelung mit dem Windwerk gegeben sind als bei Punktzügen. Daher ist zu erwägen, ob es Sinn macht, in allgemeinen Aussagen zwischen dem Verhalten von Punktzügen und Prospektzügen zu unterscheiden. Schließlich sollte die Simulationsrechnung mit Matlab in dem Sinn erweitert werden, dass zwischen Winde und Hublast ein, die Belastung reduzierendes, Feder-Dämpfer Element eingebaut wird.

Im Rahmen der Arbeit sollen also folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Lassen sich Kriterien definieren, für die, bei der Dimensionierung, die Belastungswerte im Störfall höher/kritischer sind als die doppelten Lastwerte aus dem Betriebsfall?
- Lassen sich Kriterien definieren, für die Belastungswerte beim Störfall Heben größer sind als beim Störfall Senken?
- Unter welchen Voraussetzungen kommt es beim Heben zur Schlaffseilbildung?
- Können Maßnahmen zur Vermeidung hoher Belastungen beim Störfall getroffen werden?
- Welchen Effekt hat ein Feder-Dämpfer Element im Seilzug?

# 3 Grundlagen

## 3.1 Einführung in die Bühnentechnik <sup>1</sup>

Der Ursprung des Theaterbaus im Abendland liegt in der griechischen Antike. Schon damals wurde maschinelle Bühnentechnik eingesetzt, um Bühnenbilder zu ändern oder mittels Versenkungen oder Flugapparaten einen "Gott aus der Maschine" (Deus ex machina) erscheinen zu lassen.<sup>2</sup>

### 3.1.1 Bühnentechnische Einrichtungen

Die moderne Bühnentechnik geht größtenteils auf den "Entwicklungsschub in der Bühnentechnik [...] um die Jahrhundertwende" ([2, s. 13]), also Ende des 19. Jahrhunderts, zurück. Heute zählen zu den bühnentechnischen Einrichtungen:

- mechanische Systeme zur Gestaltung des Bühnen- und Zuschauerraumes in Spielstätten wie Sprech-, Musik- und Tanztheatern, Opernhäusern, Konzertsälen, aber auch in Konferenzräumen und Mehrzweckhallen
- mechanische Systeme zum Bewegen von Bauelementen der Bühne, zur szenischen Gestaltung und für Verwandlungen zum Wechseln des Bühnenbildes
- mechanische Systeme zum Fördern und Lagern von Dekorationselementen
- mechanische Einrichtungen für den Brandschutz
- Einrichtungen der Beleuchtungs- und Projektionstechnik
- akustische Systeme der Tontechnik

---

<sup>1</sup>Dieses Kapitel bezieht sich auf [2]

<sup>2</sup>siehe [2],s9-10

Die in der Arbeit betrachteten Hubzüge gehören zu den Einbauten in der Oberbühne und sind dafür zuständig Bühnenbilder oder Personen (dann spricht man von Flugwerken) auf der Bühne zu bewegen. In der Bühnentechnik werden üblicherweise Hubzüge mit Seilen eingesetzt, Ketten und Stahlbänder werden selten verwendet, weswegen im Rahmen der Arbeit nur Hubzüge mit Seilen betrachtet werden.

### 3.1.2 Hubzüge mit Seilen

Die Hubzüge mit Seilen werden, je nach Art der Lastaufnahme, in Punktzüge und Laststangenzüge unterteilt. Beim Punktzug wird die Last an einem Punkt am Hubseil befestigt, während bei den Laststangenzügen mehrere nebeneinander angeordnete Seile am Ende mit einer Laststange verbunden sind, an welcher die Last angebracht wird. Ist der Laststangenzug normal zur Bühnenachse angebracht spricht man auch von einem Prospektzug. Abbildung 3.1 zeigt verschiedene Möglichkeiten mit denen man üblicherweise die Seile mit der Laststange verbindet. Dabei sind die Seillängen justierbar um eine horizontale Position der Laststange zu ermöglichen.

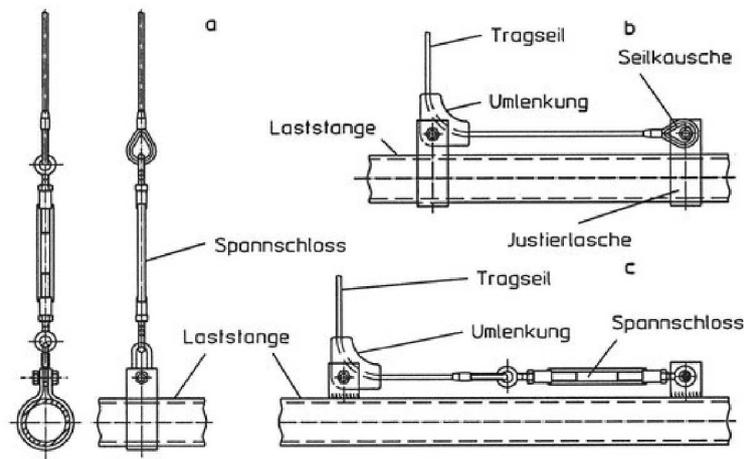


Abbildung 3.1: Seilaufhängung, Quelle: [2], s238

Angetrieben werden die Hubzüge üblicherweise von Elektromotoren, die über ein Getriebe mit der Seiltrommel verbunden sind. Die Bremsen sitzen entweder beide beim Motor, oder eine am Motor und die andere an der Seiltrommel. Der schematische Aufbau der Antriebseinheit ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Für den Fall, dass beide Bremsen an der Motorwelle angebracht sind, ist das Getriebe mit entsprechend hoher Sicherheit auszulegen, so dass ein Getriebebruch ausgeschlossen werden kann.

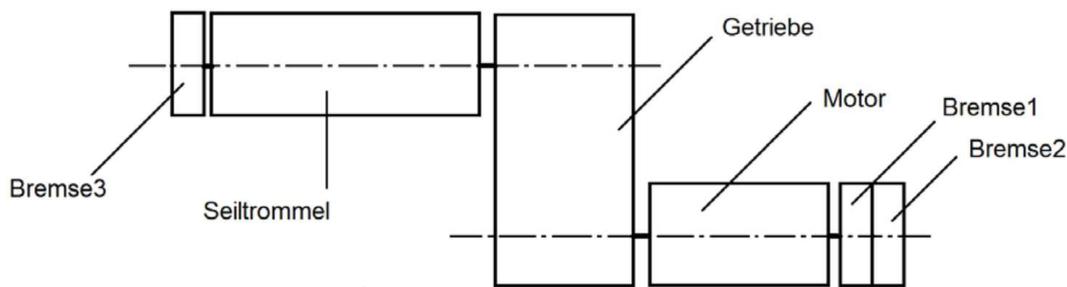


Abbildung 3.2: Hubzug: Schematische Antriebseinheit, Quelle: [3], s51

Die Bremsen müssen das Hubwerk, im Falle eines Stromausfalls, zum Stillstand bringen. Dabei sind die Bremsen auf die 1.25-fache Nennlast auszulegen und so zu dimensionieren, dass auch im Falle des Ausfalls einer Bremse die Last in einer angemessenen Bremsdistanz zum Stillstand kommt. Da (herstellungsbedingt) das maximale Bremsmoment der Bremsen bis zu 60% über dem Nennbremsmoment liegen kann und in der Regel beide Bremsen (gleichzeitig) einfallen, ist das tatsächlich wirkende Bremsmoment um einiges höher als das erforderliche Mindestbremsmoment, um die Last sicher und angemessen schnell zum Stillstand zu bringen.

### 3.1.2.1 Seile

In einem Seil wird die Zugkraft auf mehrere dünne Einzeldrähte aufgeteilt. Bei Spiralseilen und Litzen werden dazu eine oder mehrere Drahtlagen um einen Kerndraht spiralförmig angeordnet. Werden mehrere Litzen um einen Kern/Seele aus Hanf oder Kunststoff angeordnet, so spricht man von einem Rundlitzenseil. Wenn als Kern eine Litze verwendet wird spricht man von einem Litzenspiralseil. Neben diesen Varianten gibt es noch zahlreiche andere, die bei automatisierten Hubzügen aber in der Regel nicht verwendet werden. In der Bühnentechnik werden bei Punktzügen häufig entweder Litzenspiralseile verwendet, da diese drehfrei oder dreharm hergestellt werden können, oder es kommen Spezialseile mit verdichteten Litzen zum Einsatz. Bei Prospektzügen ist es nicht wichtig ob die Seile drehfrei sind oder nicht, da durch die Anordnung der Seile nebeneinander eine Verdrehung der Last unterbunden wird. Es kommen also Rundlitzenseile zum Einsatz, oder, um die Anzahl der verwendeten Seiltypen gering zu halten, die selben Seiltypen die beim Punktzug verwendet werden.

Unter Zug dehnen sich Seile ähnlich wie Zugfedern. Da es durch die Anordnung der Drähte im Seil bei einer 1-achsigen Zugbelastung zu mehrachsigen Spannungszuständen kommt

und aufgrund der Nachgiebigkeit der Seele liegen die maximal zulässige Spannung und der E-Modul unterhalb der Werte des Drahtwerkstoffs.

Die Federrate des Seils kann mit der Formel 3.1 berechnet werden. Je länger das Seil wird, umso mehr dehnt sich das Seil bei gleicher Krafteinwirkung, die Federsteifigkeit verringert sich also. Mit Erhöhung des metallischen Querschnitts und des E-Moduls wird das Seil steifer, die Federsteifigkeit erhöht sich somit.

$$c = \frac{A_m \cdot E_s}{l}$$

$c$  Federsteifigkeit in  $\frac{N}{mm}$

$A_m$  Metallischer Querschnitt in  $mm^2$

$E_s$  E-Modul des Seils in  $\frac{N}{mm^2}$

$l$  Länge des Seils in  $mm$

(3.1)

Quelle: [2], Formel 4.1/7, s.503

## 4 Modellierung

In diesem Kapitel werden die 4 untersuchten Hubzüge schematisch dargestellt und die technischen Daten aufgelistet. Des Weiteren wird kurz auf das Simulationsmodell bzw. die mathematischen Grundlagen eingegangen.

Bei Hubzügen sind Last und Seiltrommel mit einem Seil verbunden. Da dieses eine nicht vernachlässigbare Dehnung zulässt, sind Last und Seiltrommel nicht starr miteinander gekoppelt. Die Bewegungen von Last und Seiltrommel sind dadurch voneinander verschieden und beeinflussen sich gegenseitig, weswegen es Sinn macht, die Problemstellung mit Simulationsmodellen zu lösen.

Bei Prospektzügen sind die einzelnen Seile unterschiedlich lang. Um die Simulation zu vereinfachen wird dies vernachlässigt und für alle Seile die mittlere Seillänge verwendet. Ebenfalls vernachlässigt wird die Änderung der freien Seillänge, während des Störfalls, da die entsprechenden Bremswege, im Vergleich zu den Seillängen, sehr kurz sind.

Da in den weiteren Kapiteln nur die gesammelten Ergebnisse der einzelnen Simulationen mit verschiedenen Nutzlasten und Seillängen in Diagrammen ersichtlich sind, wird auch gezeigt wie aus der Simulation Daten ausgelesen und weiter verwendet werden. Anhand dieses Beispiels wird auch die Funktionsweise des Simulationsmodells erklärt.

### 4.1 Anlagenschemata

In Abbildung 4.1 ist das Anlagenschema eines Punktzuges zu sehen. Beim Prospektzug (Anlagenschema in Abbildung 4.2) werden, im Gegensatz zum Punktzug, mehrere Seile

verwendet, welche alle mit der selben Laststange verbunden sind.

Wie in Abbildung 3.2 ersichtlich, wird die Seiltrommel üblicherweise mit einem Elektromotor angetrieben. Dazwischen sitzt das Getriebe und je nach Sicherheitsstandard befinden sich die Bremsen beide auf der Motorwelle, oder es befinden sich je eine auf der Motorwelle und Seiltrommel.

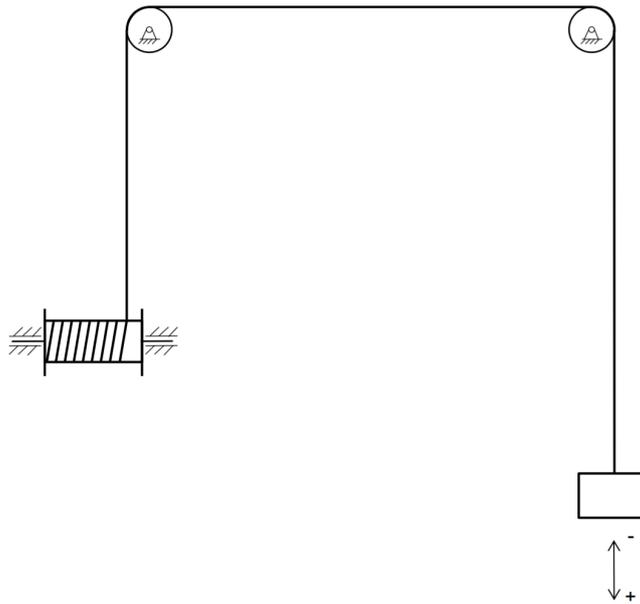


Abbildung 4.1: Punktzug, Anlagenschema, Quelle: [4], s12

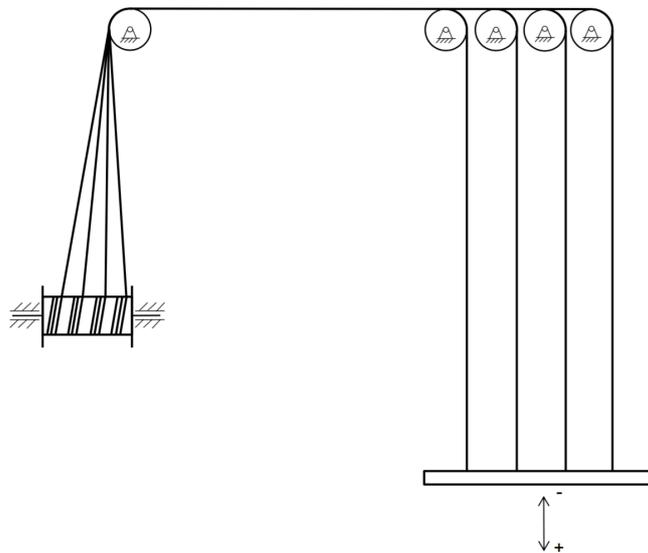


Abbildung 4.2: Prospektzug, Anlagenschema, Quelle: [4], s13

## 4.1.1 Technische Daten der Hubzüge

### 4.1.1.1 Punktzug 2.5kN

Kategorie	Einflussgröße	Wert	Einheit
Variablen	Störfallhöhe	50 - 5	m
	Startbeschleunigung	$\pm 3.0$	$\text{m/s}^2$
	Fahrgeschwindigkeit	$\pm 1.8$	m/s
	Nennlast	250	kg
	Masse Lastaufnahme	10	kg
	Übersetzung Schneckengetriebe	20	1
Bremse 1	Nennbremsmoment	64	Nm
Motorbremse	Ansprechverzögerung	0.034	s
RSO64	Verknüpfungszeit	0.11	s
Bremse 2	Nennbremsmoment	64	Nm
Motorbremse	Ansprechverzögerung	0.034	s
RSO64	Verknüpfungszeit	0.11	s
Konstanten	Gewicht der Seiltrommel	70	kg
	$\eta$ Betrieb	0.86	1
Massenträgheitsmomente	MTM Motor	0.0128	$\text{kgm}^2$
	MTM Bremse 1	0.0006	$\text{kgm}^2$
	MTM Bremse 2	0.0006	$\text{kgm}^2$
	MTM Getriebe	0	$\text{kgm}^2$
	MTM Seiltrommel	6.5	$\text{kgm}^2$
	MTM Seilrollen	0.044	$\text{kgm}^2$
Motor	Nenndrehzahl	1528	U/min
Seiltrommel	Radius der Trommel	0.2069	mm
Seilrollen	Anzahl der Seilrollen	1	1
	Radius der Seilrollen	0.1	m
	Wirkungsgrad der Seilrollen	0.99	1
Seil	Seildämpfung	640	kg/s
	E-Modul des Seils	80000	$\text{N/mm}^2$
	Seildurchmesser	0.007	m
	Metallischer Querschnitt	22.959	$\text{mm}^2$
	Anzahl der Seilstränge	1	1
	Dichte des Seils	8800	$\text{kg/m}^3$
	Mindestbruchkraft	45000	N
	Länge des Seils	55	m

Tabelle 4.1: Technische Daten Punktzug 2.5kN

## 4.1.1.2 Punktzug 5kN

Kategorie	Einflussgröße	Wert	Einheit
Variablen	Störfallhöhe	50 - 5	m
	Startbeschleunigung	$\pm 3.0$	$m/s^2$
	Fahrgeschwindigkeit	$\pm 1.8$	m/s
	Nennlast	500	kg
	Masse Lastaufnahme	20	kg
	Übersetzung Schneckengetriebe	20	1
Bremse 1	Nennbremsmoment	120	Nm
Motorbremse	Ansprechverzögerung	0.035	s
RSO100	Verknüpfungszeit	0.16	s
Bremse 2	Nennbremsmoment	120	Nm
Motorbremse	Ansprechverzögerung	0.035	s
RSO100	Verknüpfungszeit	0.16	s
Konstanten	Gewicht der Seiltrommel	180	kg
	$\eta$ Betrieb	0.92	1
Massenträgheitsmomente	MTM Motor	0.0492	$kgm^2$
	MTM Bremse 1	0.0011	$kgm^2$
	MTM Bremse 2	0.0011	$kgm^2$
	MTM Getriebe	0	$kgm^2$
	MTM Seiltrommel	6.5	$kgm^2$
	MTM Seilrollen	0.044	$kgm^2$
Motor	Nenndrehzahl	1710	U/min
Seiltrommel	Radius der Trommel	0.2069	mm
Seilrollen	Anzahl der Seilrollen	1	1
	Radius der Seilrollen	0.1	m
	Wirkungsgrad der Seilrollen	0.99	1
Seil	Seildämpfung	640	kg/s
	E-Modul des Seils	80000	$N/mm^2$
	Seildurchmesser	0.009	m
	Metallischer Querschnitt	35.787	$mm^2$
	Anzahl der Seilstränge	1	1
	Dichte des Seils	8800	$kg/m^3$
	Mindestbruchkraft	77300	N
Länge des Seils	55	m	

Tabelle 4.2: Technische Daten Punktzug 5kN

## 4.1.1.3 Prospektzug 5kN

Kategorie	Einflussgröße	Wert	Einheit
Variablen	Störfallhöhe	50 - 5	m
	Startbeschleunigung	$\pm 1.5$	$m/s^2$
	Fahrgeschwindigkeit	$\pm 1.5$	m/s
	Nennlast	500	kg
	Masse Lastaufnahme	250	kg
	Übersetzung Schneckengetriebe	19	1
Bremsen 1 Motorbremse	Nennbremsmoment	148	Nm
	Ansprechverzögerung	0.04	s
	Verknüpfungszeit	0.12	s
Bremsen 2 Motorbremse	Nennbremsmoment	148	Nm
	Ansprechverzögerung	0.04	s
	Verknüpfungszeit	0.12	s
Konstanten	Gewicht der Seiltrommel	70	kg
	$\eta$ Betrieb	0.92	1
Massenträgheits- momente	MTM Motor	0.032	$kgm^2$
	MTM Bremse 1	0.0058	$kgm^2$
	MTM Bremse 2	0.0058	$kgm^2$
	MTM Getriebe	0.0107	$kgm^2$
	MTM Seiltrommel	4	$kgm^2$
	MTM Seilrollen	0.044	$kgm^2$
Motor	Nenndrehzahl	1478	U/min
Seiltrommel	Radius der Trommel	0.159	mm
Seilrollen	Anzahl der Seilrollen	6	1
	Radius der Seilrollen	0.1	m
	Wirkungsgrad der Seilrollen	0.99	1
Seil	Seildämpfung	640	kg/s
	E-Modul des Seils	80000	$N/mm^2$
	Seildurchmesser	0.006	m
	Metallischer Querschnitt	15.623	$mm^2$
	Anzahl der Seilstränge	6	1
	Dichte des Seils	8800	$kg/m^3$
	Mindestbruchkraft	25100	N
Länge des Seils	55	m	

Tabelle 4.3: Technische Daten Prospektzug 5kN

## 4.1.1.4 Prospektzug 10kN

Kategorie	Einflussgröße	Wert	Einheit
Variablen	Störfallhöhe	50 - 5	m
	Startbeschleunigung	$\pm 1.0$	$m/s^2$
	Fahrgeschwindigkeit	$\pm 1.5$	m/s
	Nennlast	1000	kg
	Masse Lastaufnahme	250	kg
	Übersetzung Schneckengetriebe	20	1
Bremsen 1 Motorbremse	Nennbremsmoment	165	Nm
	Ansprechverzögerung	0.04	s
	Verknüpfungszeit	0.12	s
Bremsen 2 Motorbremse	Nennbremsmoment	165	Nm
	Ansprechverzögerung	0.04	s
	Verknüpfungszeit	0.12	s
Konstanten	Gewicht der Seiltrommel	70	kg
	$\eta$ Betrieb	0.91	1
Massenträgheits- momente	MTM Motor	0.083	$kgm^2$
	MTM Bremse 1	0.0058	$kgm^2$
	MTM Bremse 2	0.0058	$kgm^2$
	MTM Getriebe	0.0107	$kgm^2$
	MTM Seiltrommel	6.5	$kgm^2$
	MTM Seilrollen	0.044	$kgm^2$
Motor	Nenndrehzahl	1662	U/min
Seiltrommel	Radius der Trommel	0.1875	mm
Seilrollen	Anzahl der Seilrollen	6	1
	Radius der Seilrollen	0.1	m
	Wirkungsgrad der Seilrollen	0.99	1
Seil	Seildämpfung	640	kg/s
	E-Modul des Seils	80000	$N/mm^2$
	Seildurchmesser	0.007	m
	Metallischer Querschnitt	25.212	$mm^2$
	Anzahl der Seilstränge	6	1
	Dichte des Seils	8800	$kg/m^3$
	Mindestbruchkraft	42600	N
Länge des Seils	55	m	

Tabelle 4.4: Technische Daten Prospektzug 10kN

## 4.2 Simulationsmodell

### 4.2.1 Mathematisches Modell

Wie schon beschrieben werden die Bewegungen mathematisch exakt modelliert. In Abbildung 4.3 ist das dynamische Modell eines Hubzugs, inklusive der wirkenden Kräfte, zu sehen. Ermittelt man die Kräfte, erhält man das Differentialgleichungssystem (Formeln: 4.1: DGL-Antriebseinheit, 4.2: DGL-Last und 4.3: DGL-Seil) das den Hubzug beschreibt.

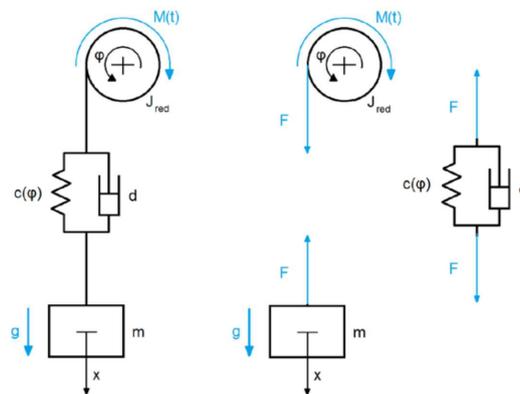


Abbildung 4.3: Dynamisches Modell, Freigemacht, Quelle: [3], s50

$$J_{red} \cdot \ddot{\varphi} = F \cdot r_T - M(t) \quad (4.1)$$

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g - F \quad (4.2)$$

$$F = c(\varphi)(x - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) + d(\dot{x} - r \cdot \dot{\varphi}) \quad (4.3)$$

## 4.2.2 Berechnung der Kräfte und Beschleunigungen mit dem Simulationsmodell

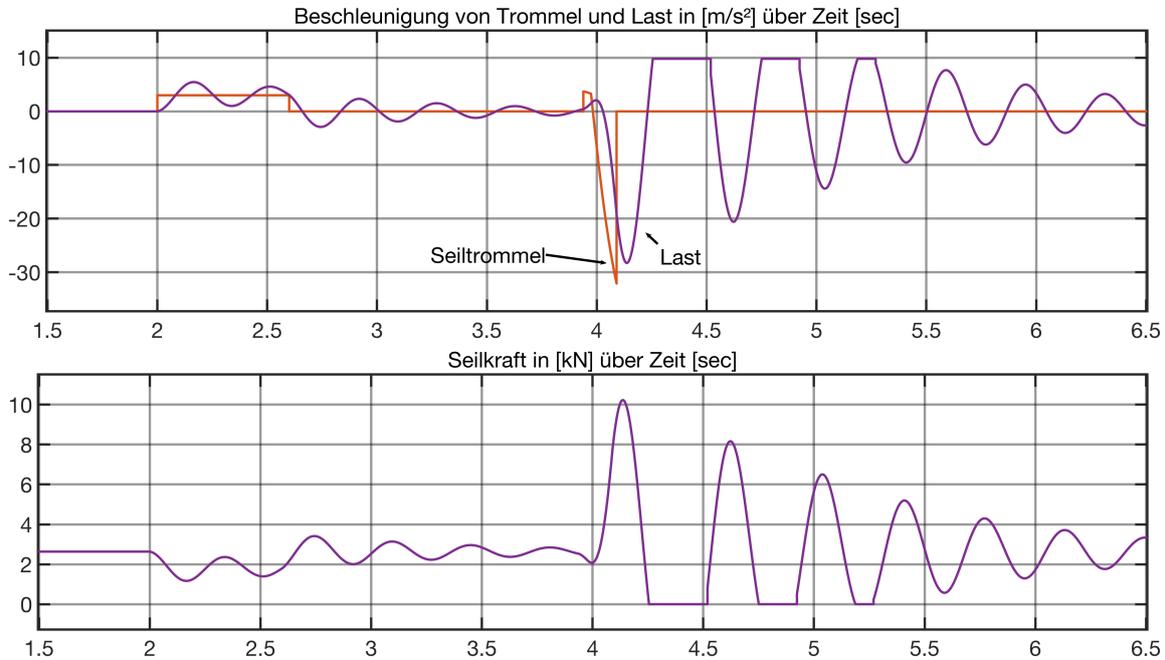


Abbildung 4.4: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Senken

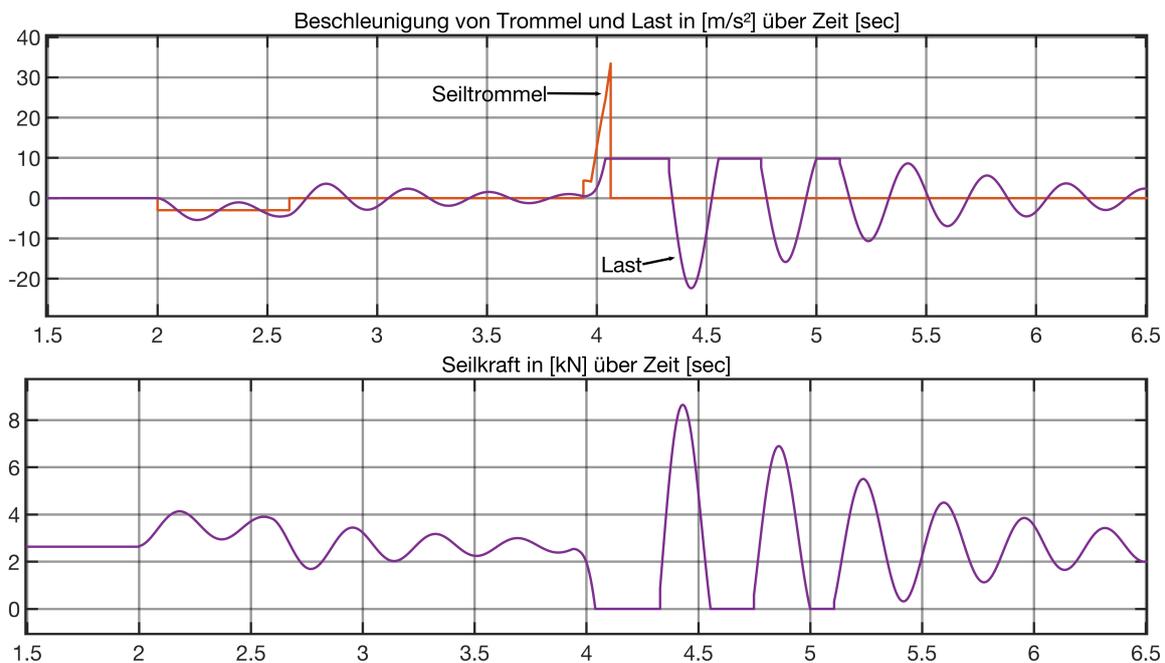


Abbildung 4.5: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben

In Abbildung 4.4 ist der schematische Verlauf der Beschleunigungen von Seiltrommel (rote Kurve) und Last (violette Kurve oben), sowie die Seilkraft (violette Kurve unten) beim Senken zu sehen, in Abbildung 4.5 beim Heben.

Zu Beginn der Simulation stehen Seiltrommel und Last still, es wirken keine Kräfte oder Momente. Im ersten Zeitschritt werden dann die Kräfte und Momente aufgebracht. Nach einer "Einschwingphase" von  $2s$ , kommt es zur Beschleunigung der Seiltrommel auf die Nenngeschwindigkeit. In diesem Bereich beginnt die Last zu schwingen, wobei die Schwingungsamplitude, wegen der Dämpfung des Seils, immer kleiner wird. Sobald die Nenngeschwindigkeit erreicht ist, stoppt der Beschleunigungsvorgang und das System hat wieder etwas Zeit sich einzuschwingen.

Nach dieser Einschwingphase beginnt dann die eigentliche Simulation des Stromausfalls, dieser Zeitpunkt wird im Simulationsprogramm " $t_{stör}$ " genannt. Der Motor wird von Modus "Beschleunigung vorgeben" in den Modus "Krafteinwirkung" umgeschaltet, das heißt, dass ab diesem Zeitpunkt Motor und Last sich, entsprechend der wirkenden Kräfte, bewegen können. Da also das Antriebsmoment des Motors null ist und die Bremsen noch nicht eingefallen sind befindet sich die Last theoretisch im freien Fall. Da Motor, Getriebe, Seiltrommel, Last und Lastaufnahme eine gewisse Trägheit besitzen, ist die tatsächliche Beschleunigung kleiner als die Erdbeschleunigung. Je nachdem wie die rotatorischen im Verhältnis zu den translatorischen Trägheitsmomenten stehen, wird die Beschleunigung nun größer oder kleiner, dies hat aber kaum Auswirkungen, da nach der kurzen Ansprechverzögerung ( $t < 100ms$ ) die Bremse/n beginnen einzufallen und sich die Beschleunigung dadurch, je nach Lastfall, stark erhöht oder verringert. Da beim Heben das Bremsmoment und der freie Fall die Seiltrommel gemeinsam abbremsen, ist die Gesamtbeschleunigung größer als beim Senken, wo der freie Fall die Seiltrommel antreibt anstatt zu bremsen.

Nachdem die Seiltrommel bis zum Stillstand abgebremst wurde, schwingt die Last noch weiter, da sie mit dem Seil nicht starr mit der Seiltrommel verbunden ist. Da die maximalen Seilkräfte und Beschleunigungen in der Regel erst nach dem Stillstand der Seiltrommel wirken, wird noch ein paar Sekunden weiter simuliert ( $\approx 6s$ ). Die dadurch erhöhte Simulationsdauer stellt auch sicher, dass der Störfall auf jeden Fall mitsimuliert wird und die Simulation nicht schon vor  $t_{stör}$  endet. Der genaue Wert von  $t_{stör}$  hängt unter anderem von der Verfahrensgeschwindigkeit und der Nennbeschleunigung ab. Die einfachste Methode den Störfall auf jeden Fall zu simulieren ist es also, die Simulationsdauer konservativ an-

zunehmen. In den Abbildungen 4.4 und 4.5 ist zu erkennen, dass sich schon vor Ende der Simulation ( $t_{sim} = 10s$ ) die Seilkräfte den statischen Lasten annähern und die Beschleunigung der Last langsam null wird.

Für die weiteren Betrachtungen der Hubwerke sind nur die Maximalwerte von Seilkraft und Beschleunigung der Last relevant, das heißt diese werden gemeinsam mit den Simulationsparametern gespeichert, um daraus Diagramme erstellen zu können.

Die Seilkraft im Störfall wird auch als  $F_{stör}$  bezeichnet und aus ihr werden die dimensionslosen Faktoren  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  berechnet, um aus deren Verlauf ebenfalls Diagramme erstellen zu können.  $\varphi_{stat}$  ist das Verhältnis der Seilkraft im Störfall zu der statischen Nennkraft,  $\varphi_{dyn}$  das Verhältnis von der Seilkraft im Störfall zu der dynamischen Nennkraft.

$$\varphi_{stat} = \frac{F_{stör}}{F_{stat}} = \frac{F_{stör}}{(m_{Nennlast} + m_{Lastaufnahme})g} \quad (4.4)$$

$$\varphi_{dyn} = \frac{F_{stör}}{F_{dyn}} = \frac{F_{stör}}{(m_{Nennlast} + m_{Lastaufnahme})(a_{Nenn} + g)} \quad (4.5)$$

mit:  $F_{stör}$  = Seilkraft im Störfall

Unter Anwendung der Formel 4.5 erhält man für die 4 betrachteten Hubzüge folgende Werte für  $F_{dyn}$

Hubzug	$m_{Nennlast}$	$m_{Lastaufnahme}$	$a_{Nenn}$	$F_{dyn}$
Punktzug 2.5kN	250kg	10kg	3.0m/s <sup>2</sup>	3.33kN
Punktzug 5kN	500kg	20kg	3.0m/s <sup>2</sup>	6.66kN
Prospektzug 5kN	500kg	250kg	1.5m/s <sup>2</sup>	8.48kN
Prospektzug 10kN	1000kg	250kg	1.0m/s <sup>2</sup>	13.51kN

Tabelle 4.5:  $F_{dyn}$  für die verschiedenen Hubzüge

## 5 Simulation des Störfalls

Aus den bisherigen Untersuchungen ergab sich, dass die Belastungswerte im Lastfall Heben immer größer waren als im Lastfall Senken [4]. Um für die weiteren Simulationen einen Vergleichswert zu haben, werden für 4 Hubzüge (Punktzug  $2.5kN$  &  $5kN$  und Prospektzug  $5kN$  &  $10kN$ ) Simulationen durchgeführt.

Da die Seilkraft und die Beschleunigung (wenn die anderen Parameter konstant bleiben) von der Seillänge und der Last abhängen, wird, um ein aussagekräftiges Diagramm zu erhalten, die Simulation für verschiedene Lasten ( $m = 40kg$ ,  $80kg$ , 50% Nennlast, 100% Nennlast und 125% Nennlast) und Seillängen ( $50 - 5m$ , im Intervall:  $\Delta l = 1m$ ) durchgeführt.

### 5.1 Seilkräfte und Beschleunigung bei Nennbedingungen

Die **Nennbedingungen** werden entsprechend der Tabellen der technischen Daten der Hubzüge 4.1 bis 4.4 definiert als:

- Verfahren mit maximaler Nenngeschwindigkeit
- maximale Nennbeschleunigungen
- gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen (Bremsmoment maximal:  $M_{B,Nenn} + 60\%$ )
- Nutzlast:  $40kg$ ,  $80kg$ , 50% Nennlast, 100% Nennlast und 125% Nennlast
- Seillänge zwischen  $5m - 50m$

### 5.1.1 Punktzug 2.5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 2.5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.1), das Anlagenschema ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1):

Nenngeschwindigkeit:  $1.8\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $3.0\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen

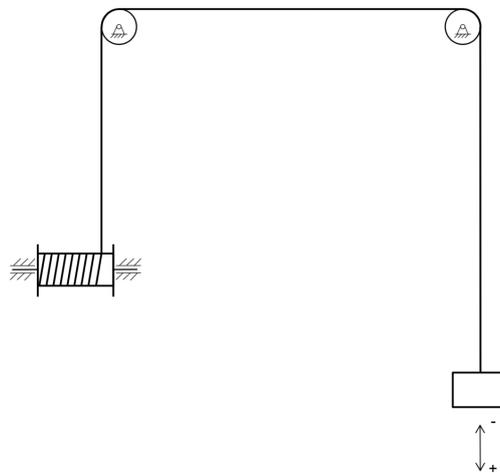


Abbildung 5.1: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

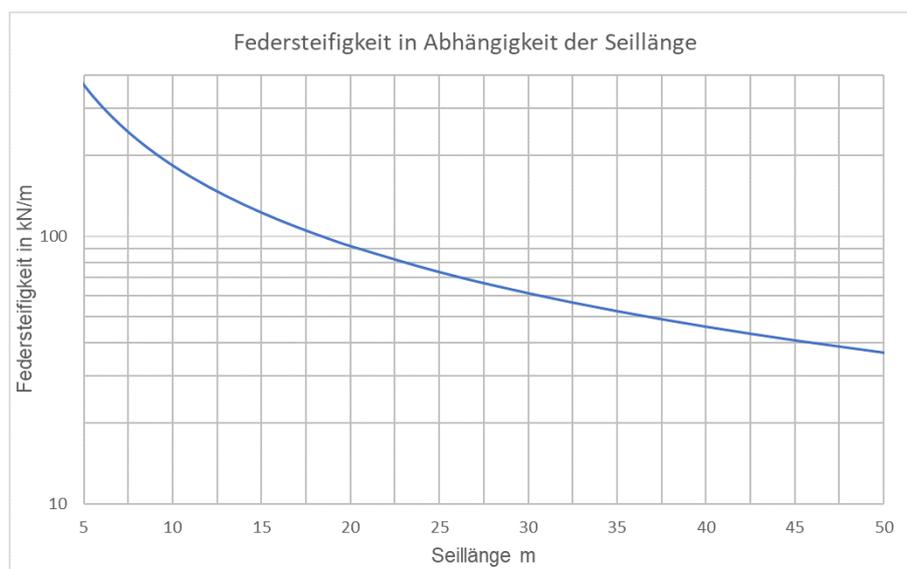


Abbildung 5.2: Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 5.1.1.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

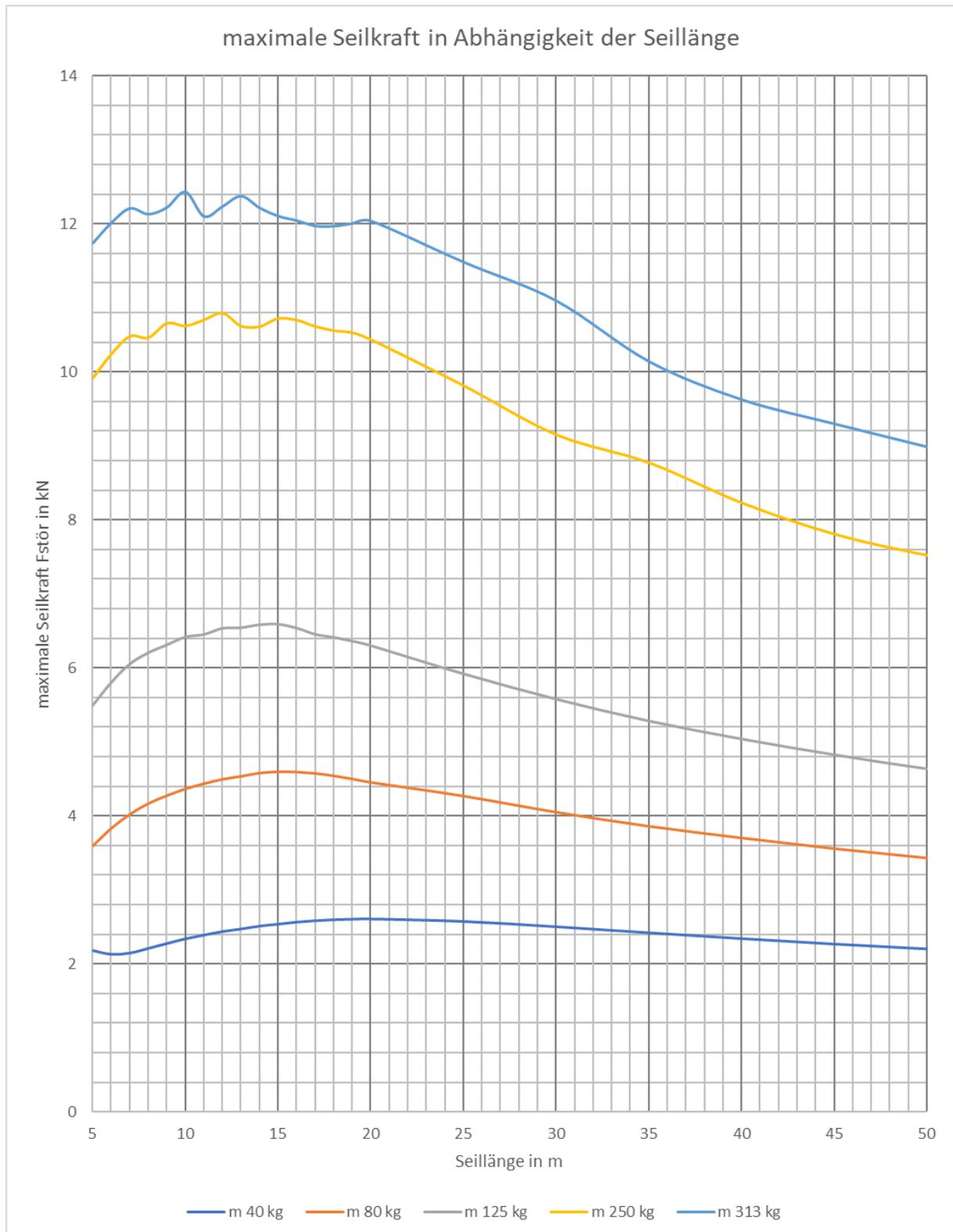


Abbildung 5.3: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken mit Nennbedingungen

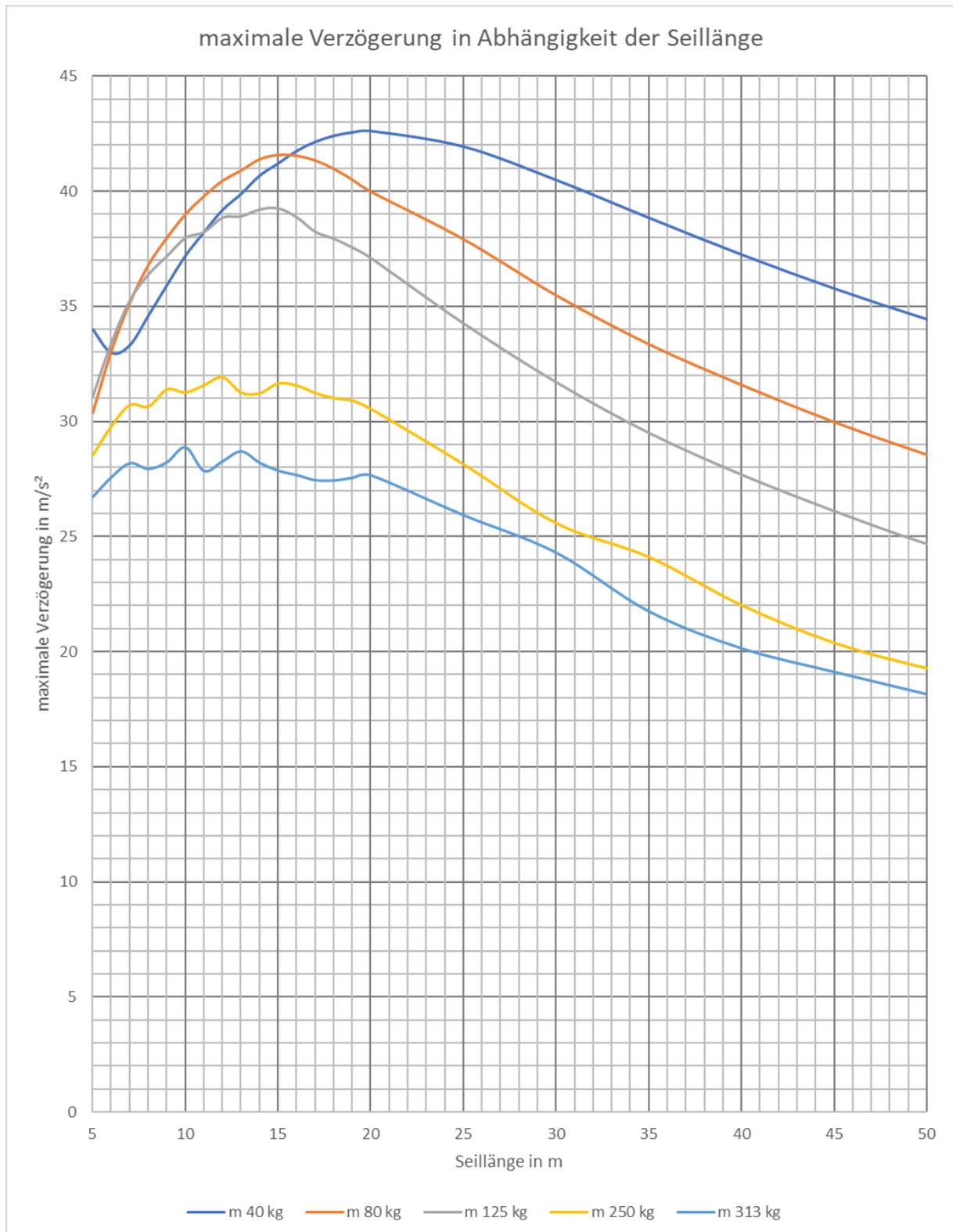


Abbildung 5.4: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken mit Nennbedingungen

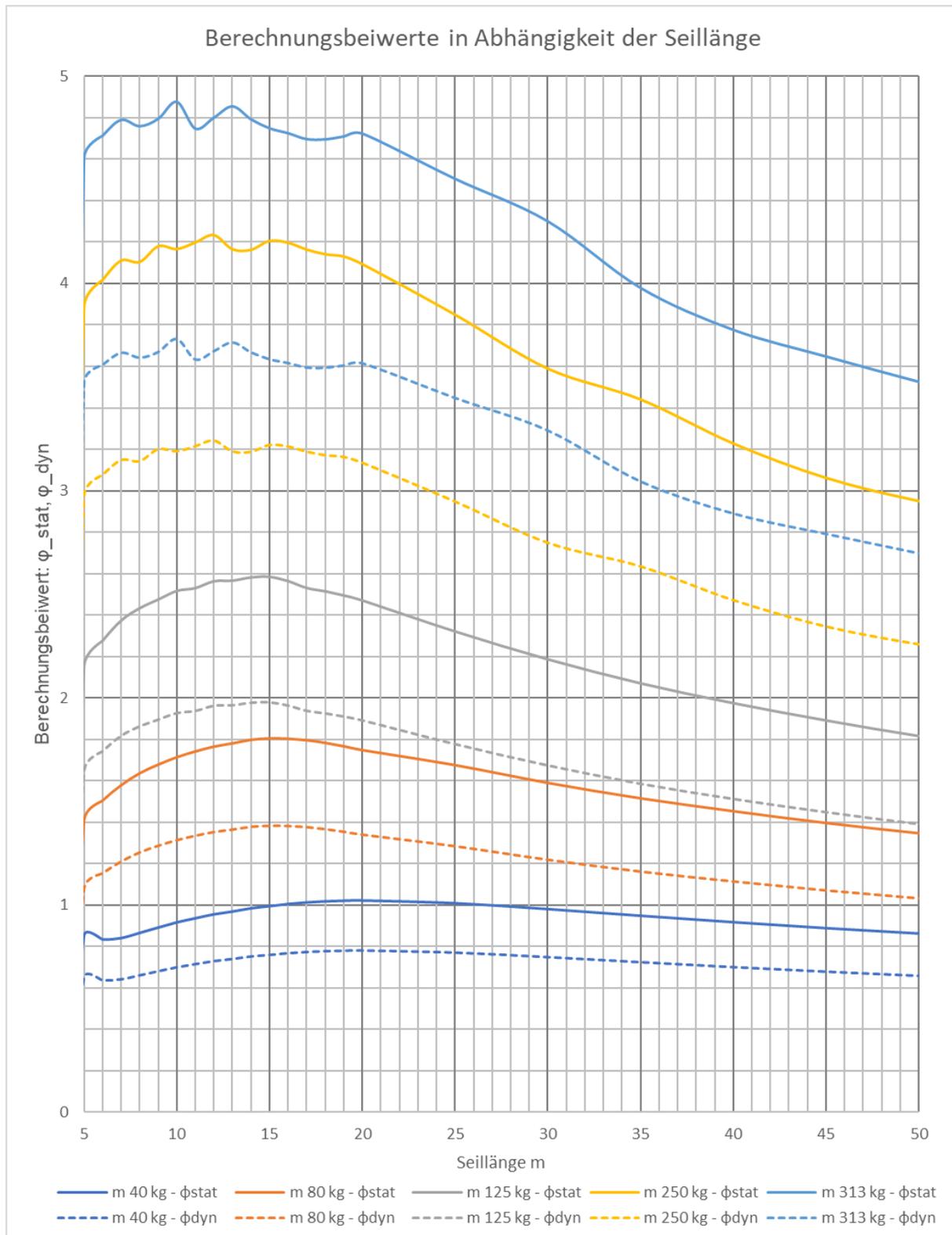


Abbildung 5.5: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken mit Nennbedingungen

## 5.1.1.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

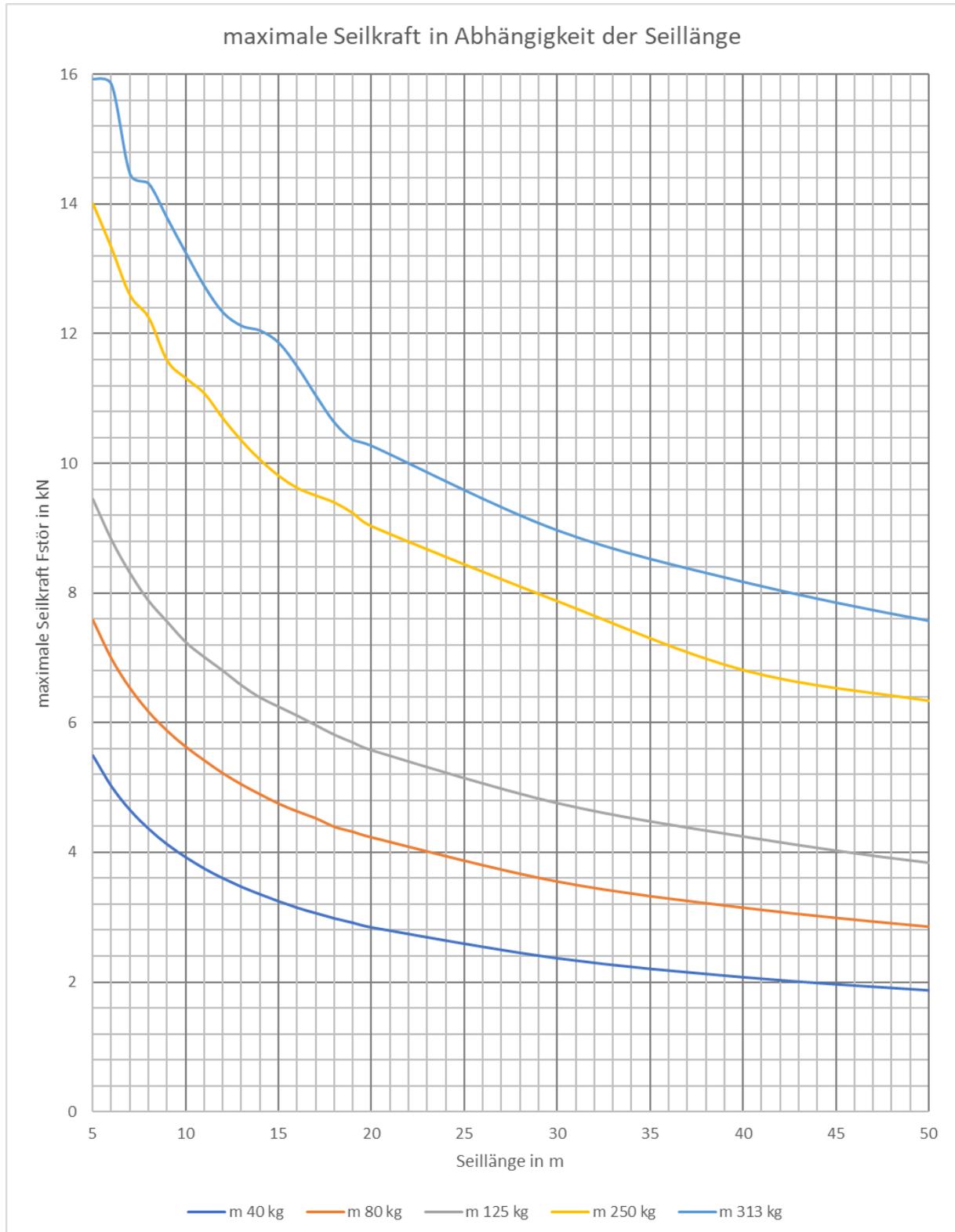


Abbildung 5.6: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben mit Nennbedingungen

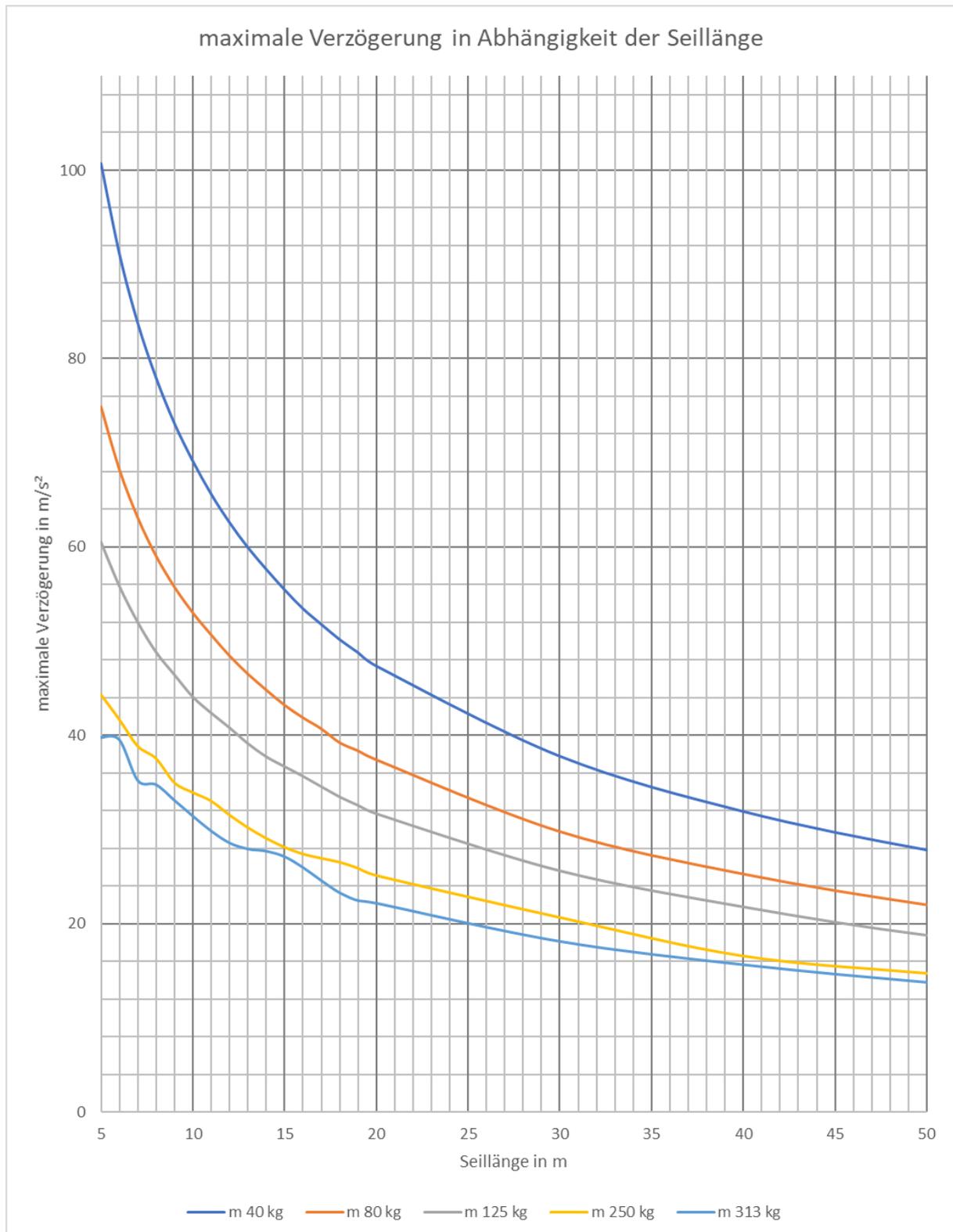


Abbildung 5.7: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben mit Nennbedingungen

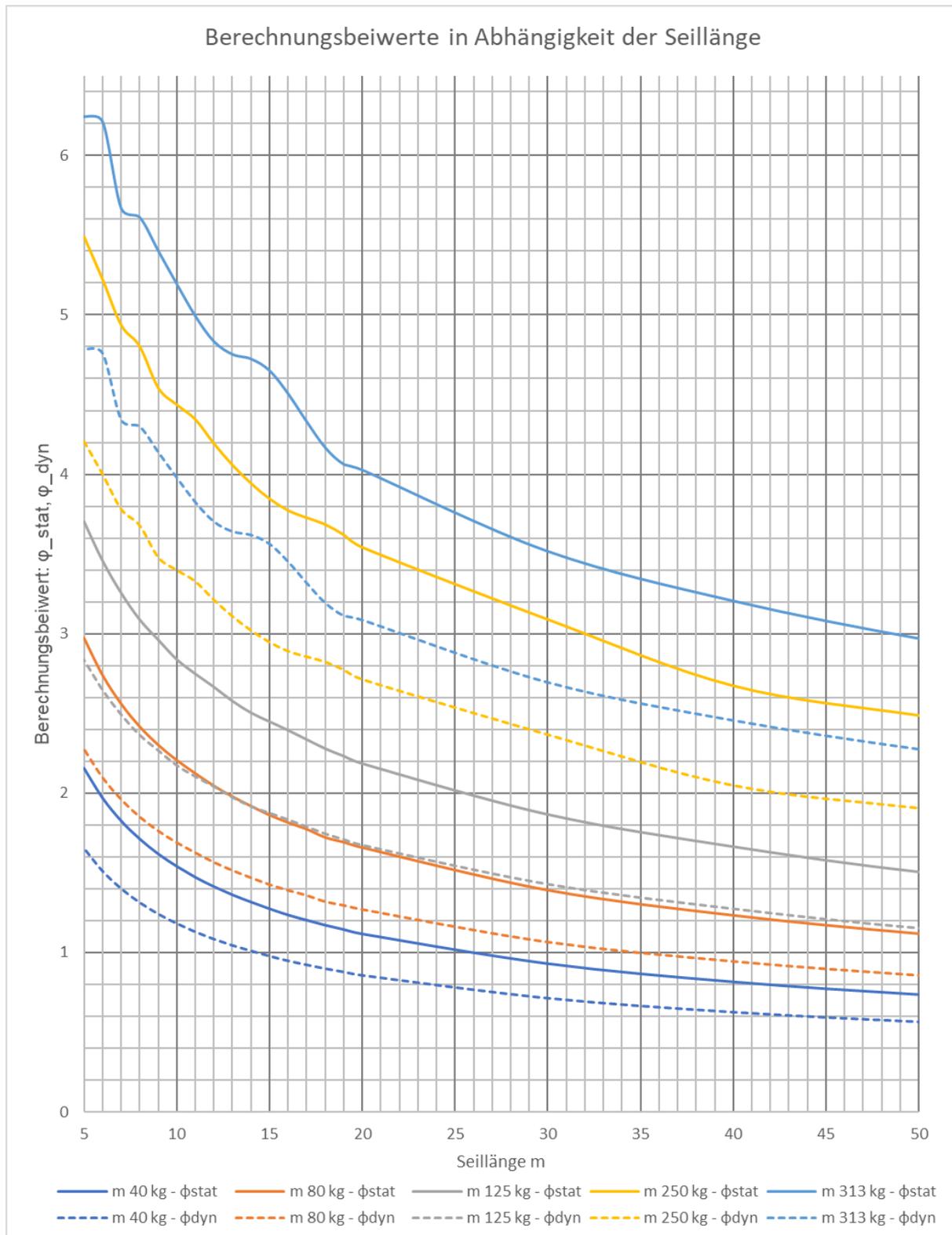


Abbildung 5.8: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben mit Nennbedingungen

### 5.1.2 Punktzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.2), das Anlagenschema ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1):

Nenngeschwindigkeit:  $1.8\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $3.0\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen bei-der Bremsen

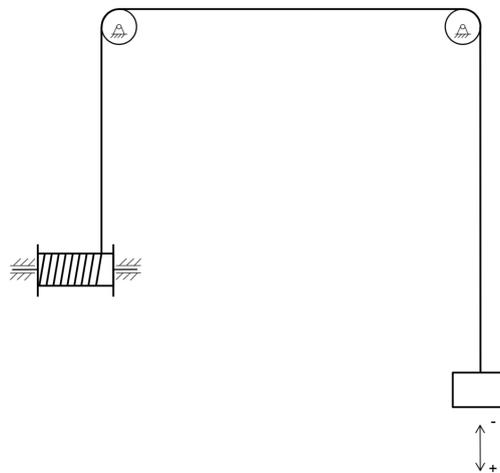


Abbildung 5.9: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

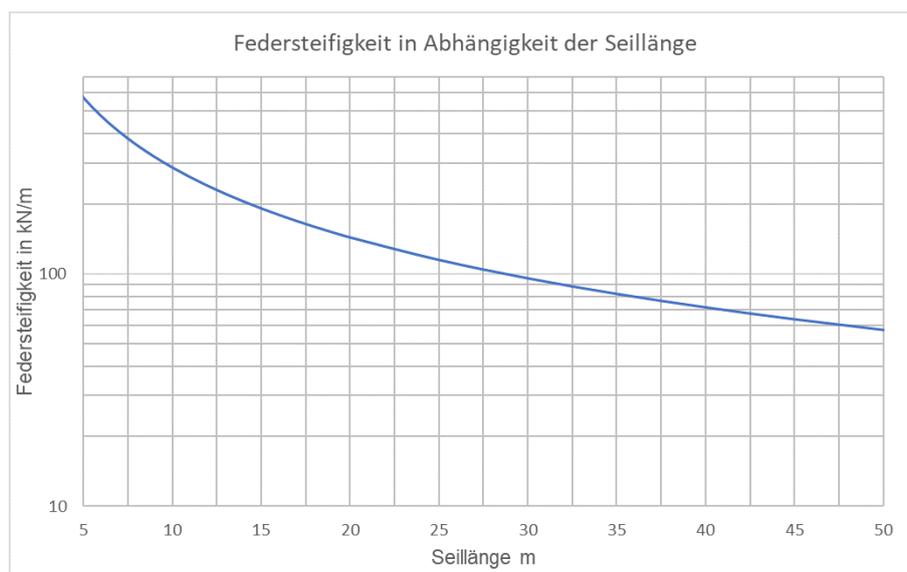


Abbildung 5.10: Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 5.1.2.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

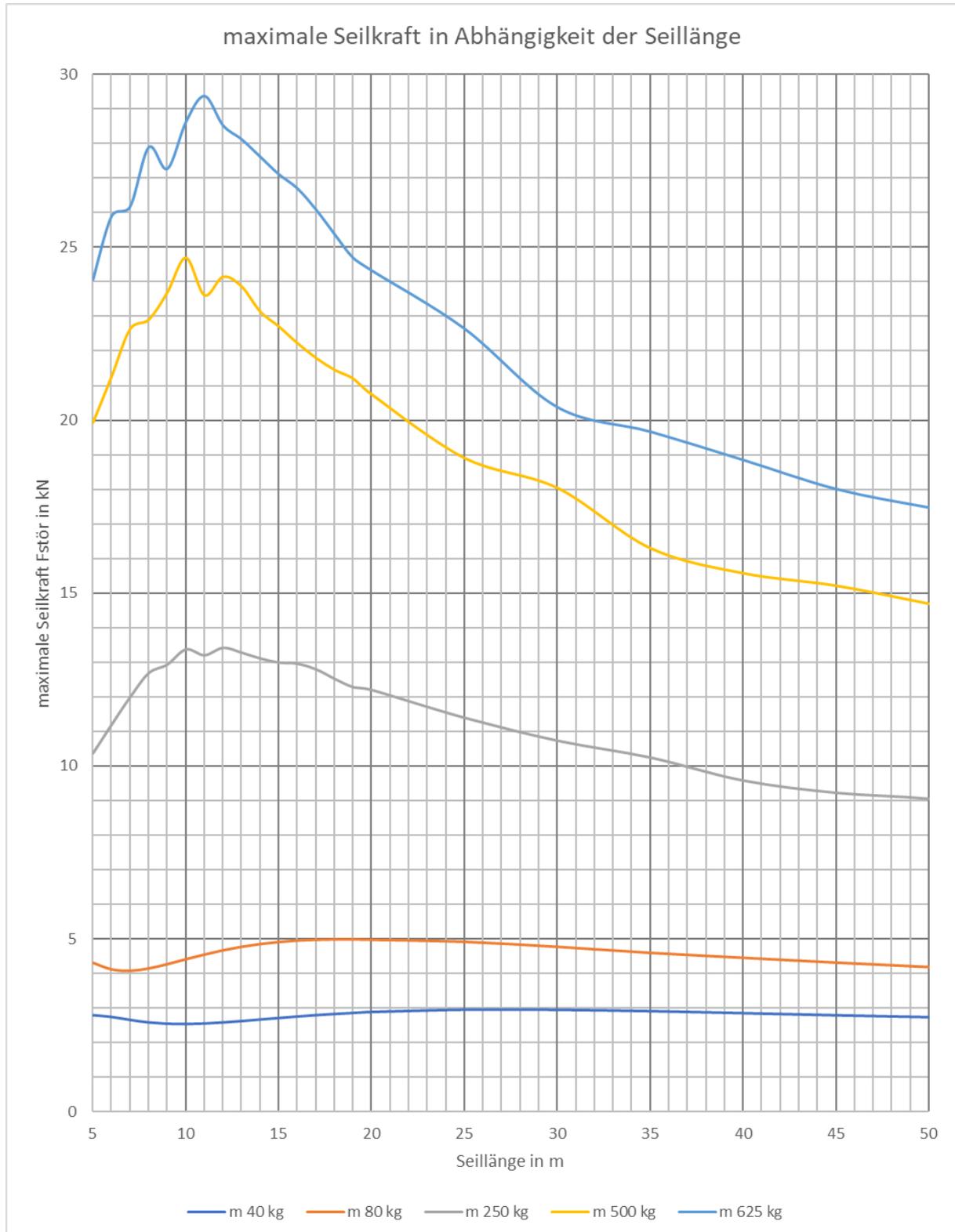


Abbildung 5.11: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

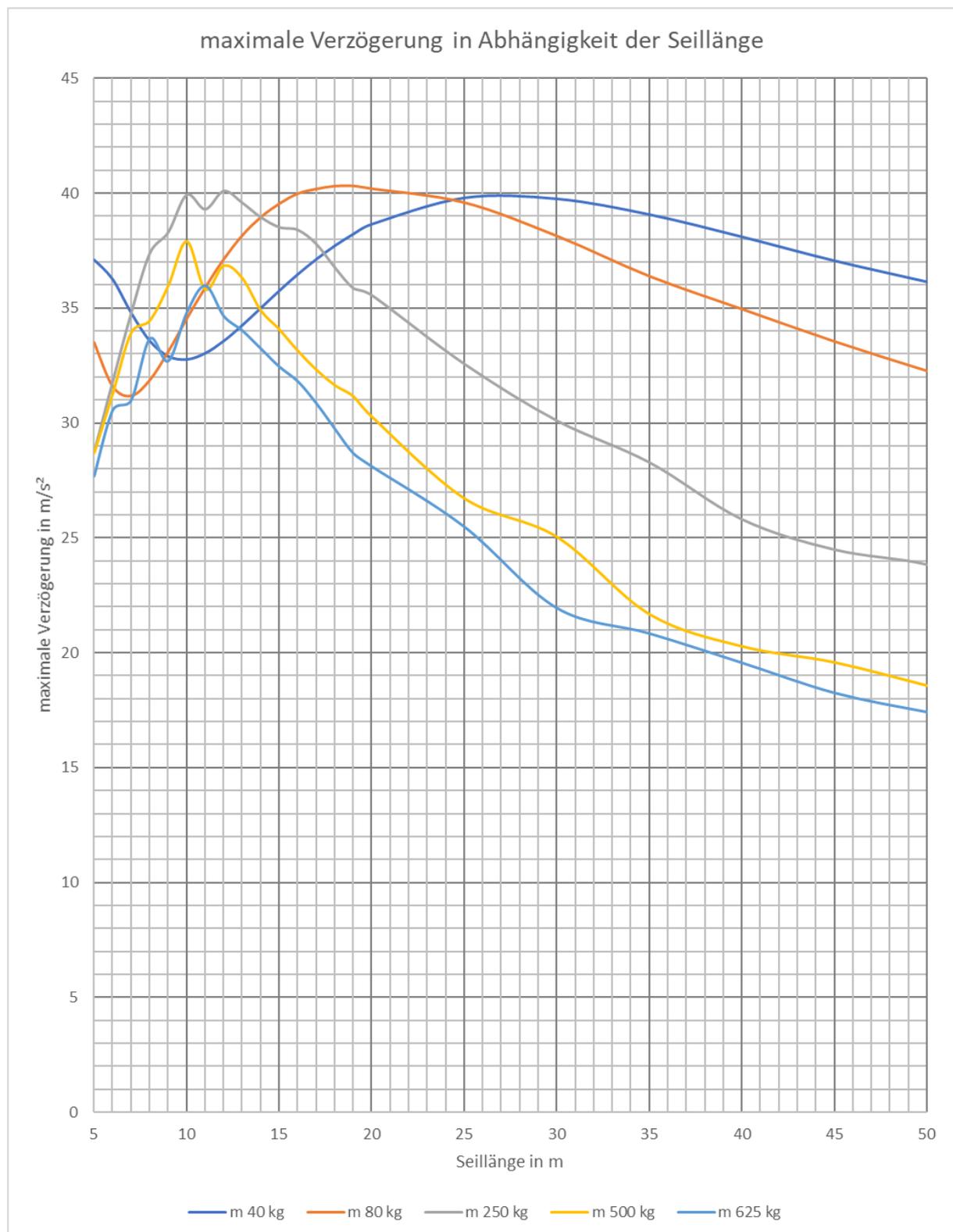


Abbildung 5.12: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

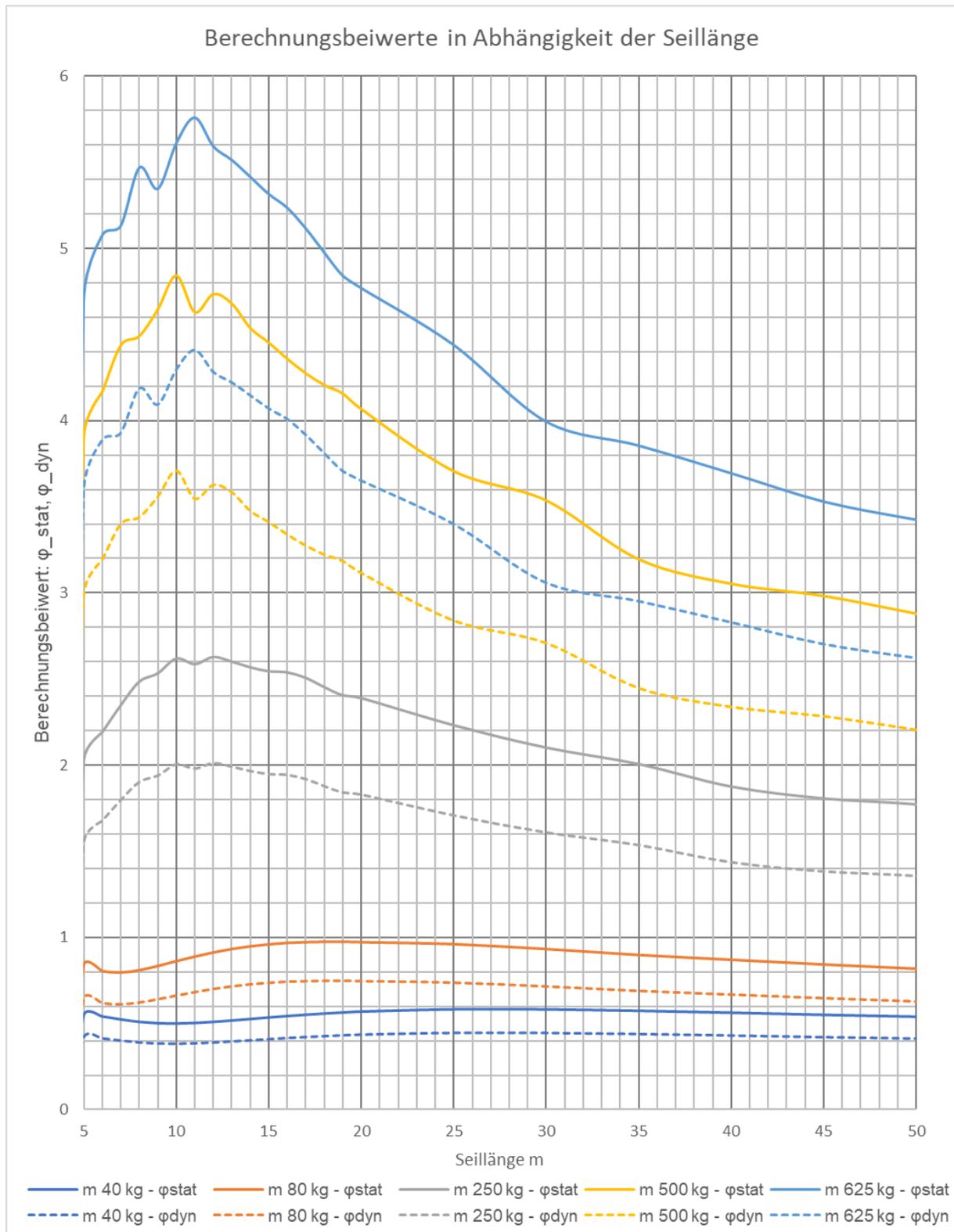


Abbildung 5.13: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Punkt-zug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

## 5.1.2.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

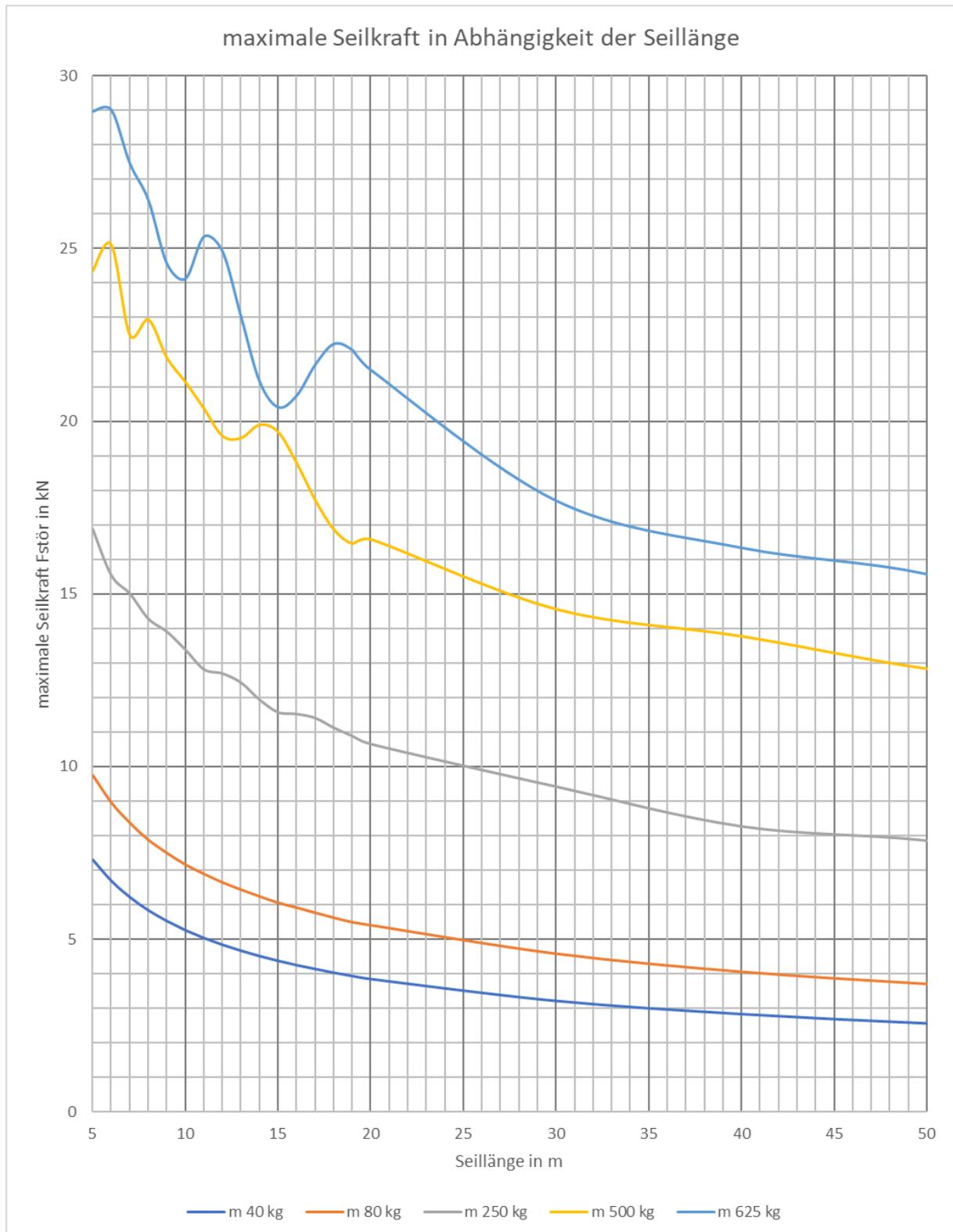


Abbildung 5.14: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

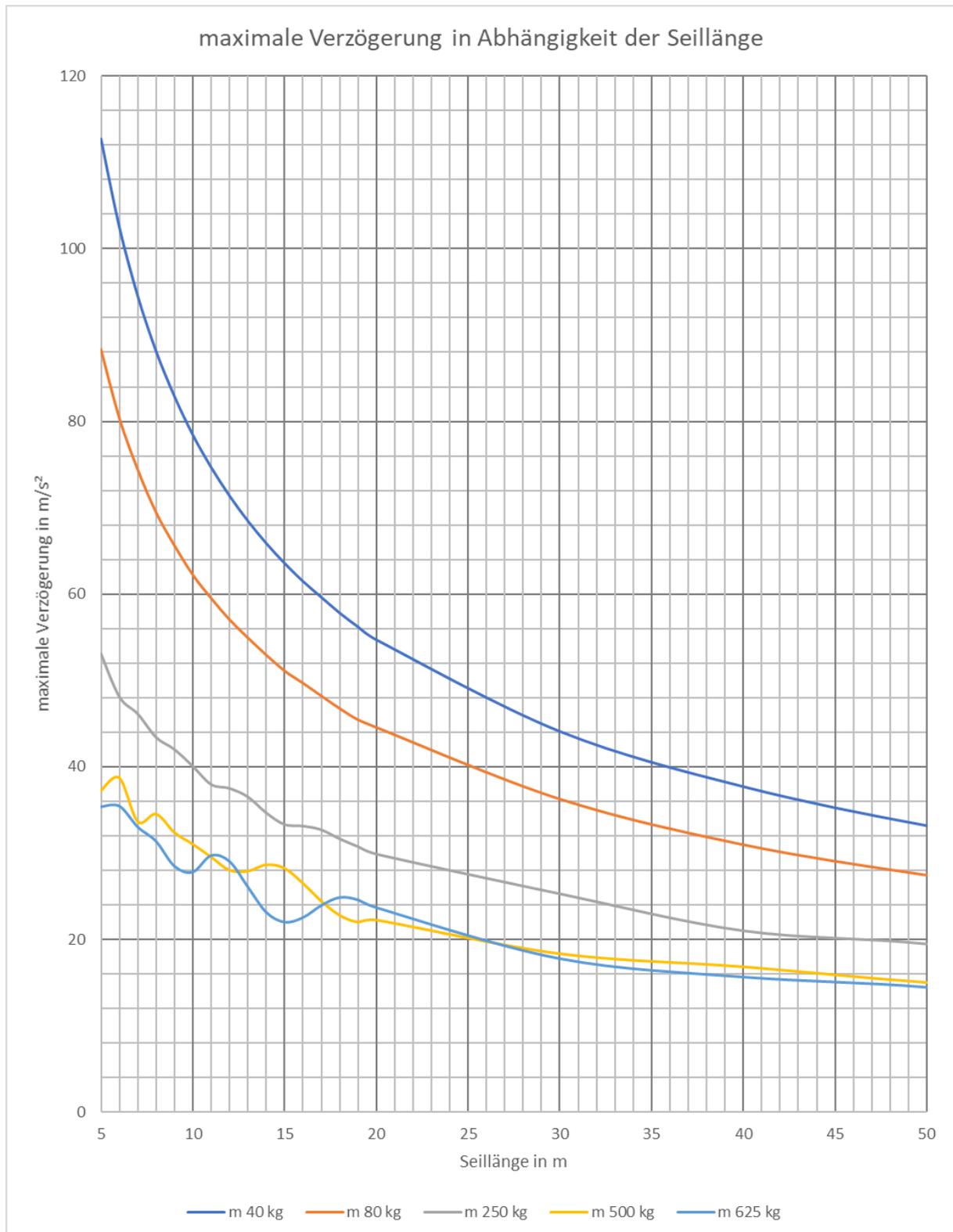


Abbildung 5.15: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

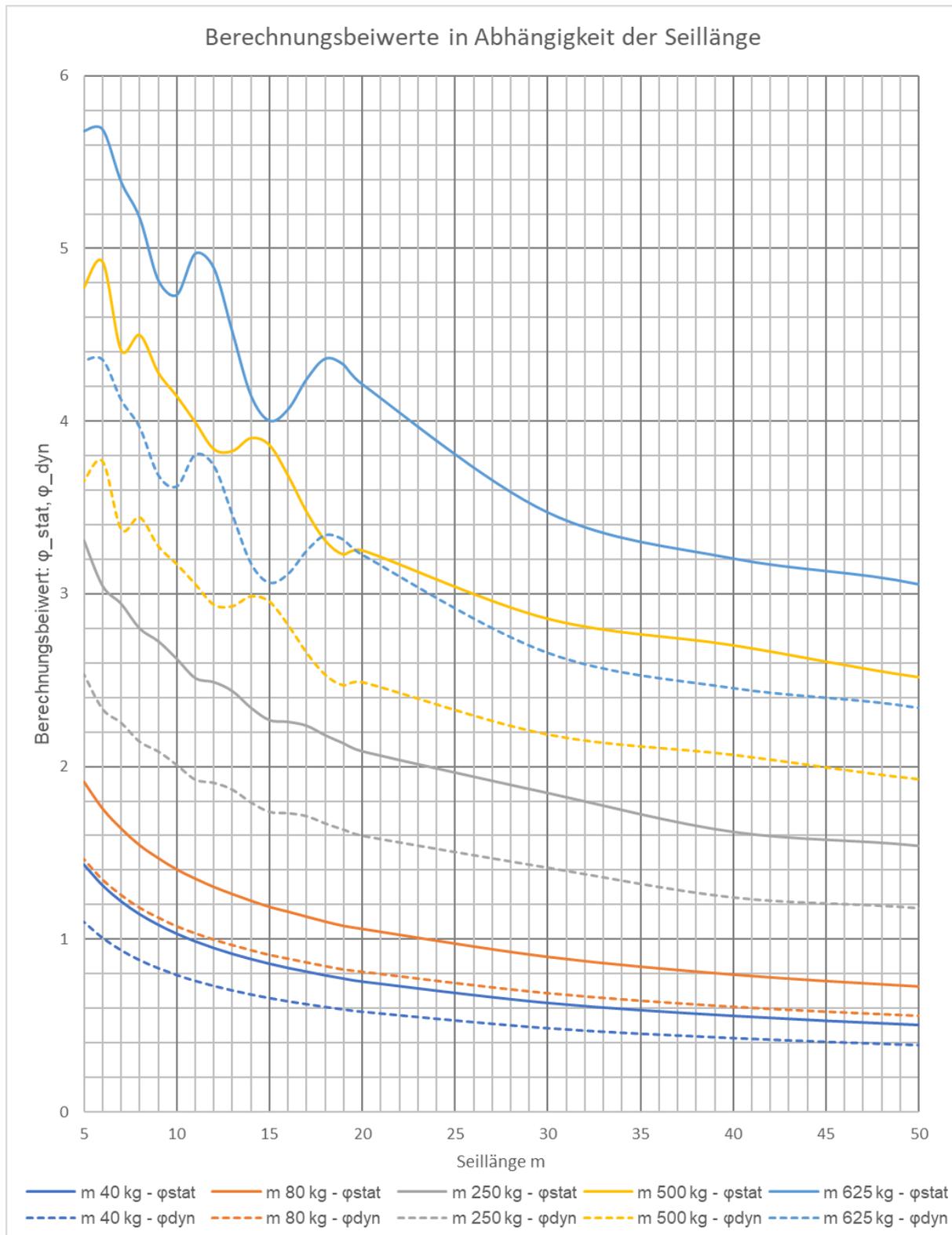


Abbildung 5.16: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Punkt-zug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

### 5.1.3 Prospektzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.3), das Anlagenschema ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1):

Nenngeschwindigkeit:  $1.5\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.5\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen

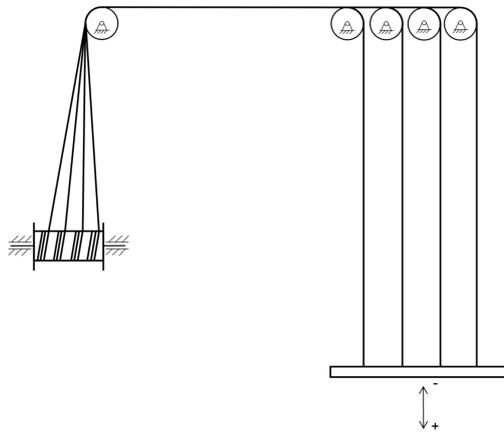


Abbildung 5.17: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

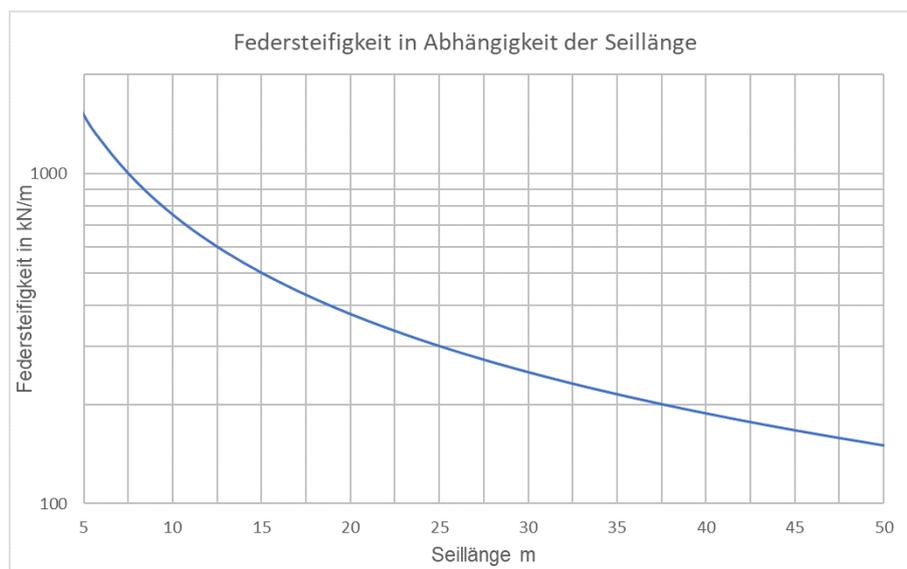


Abbildung 5.18: Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 5.1.3.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

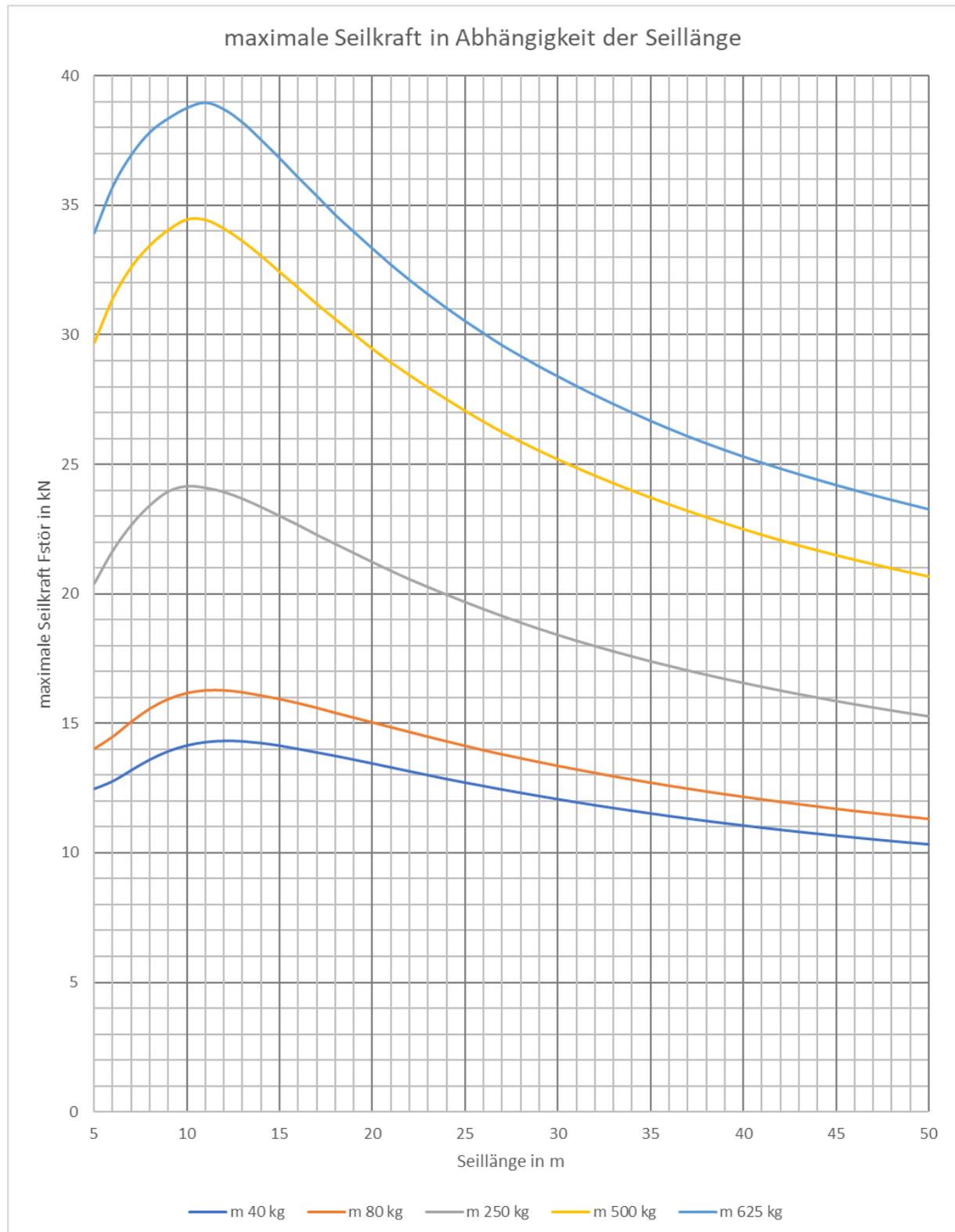


Abbildung 5.19: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

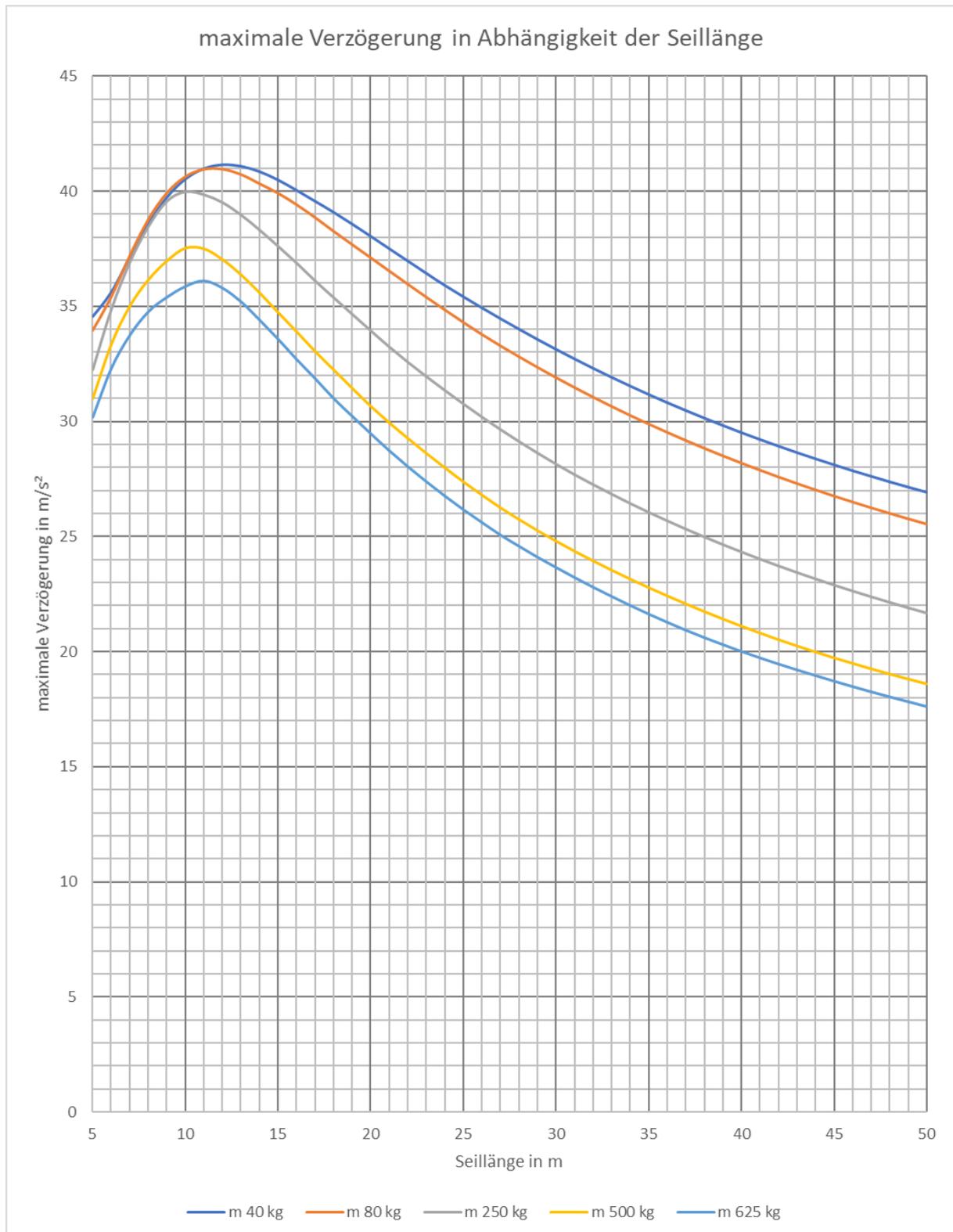


Abbildung 5.20: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

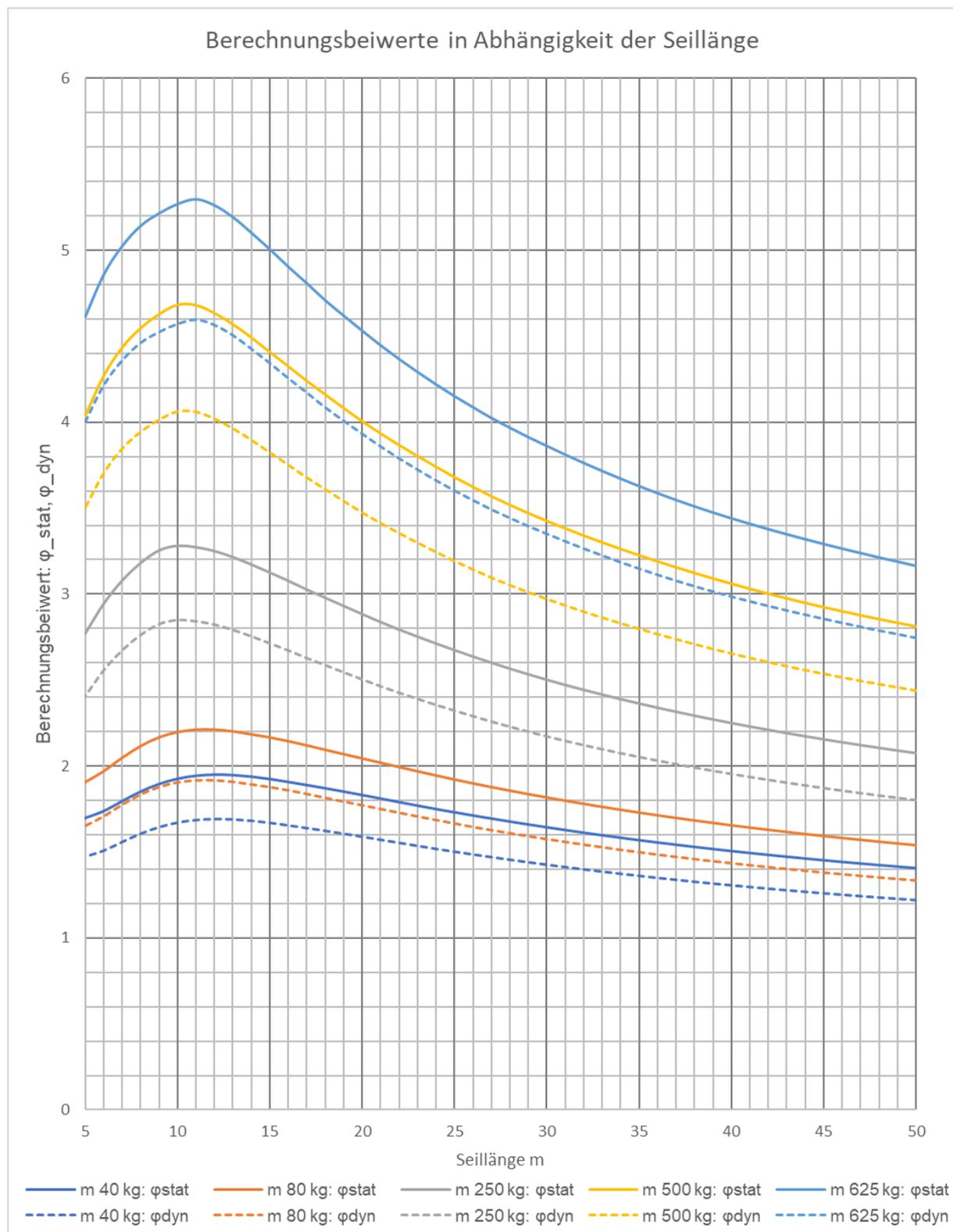


Abbildung 5.21: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen

## 5.1.3.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

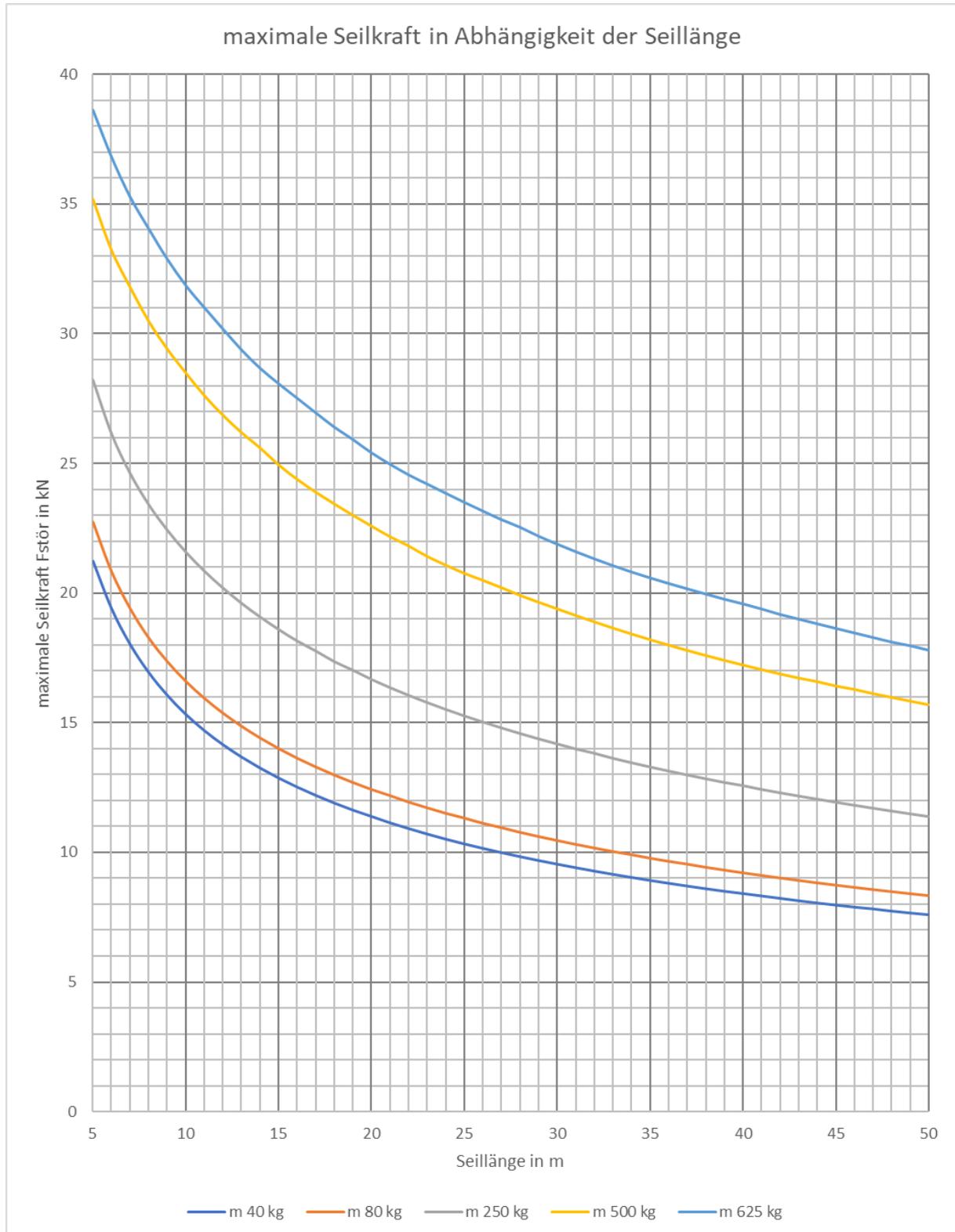


Abbildung 5.22: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

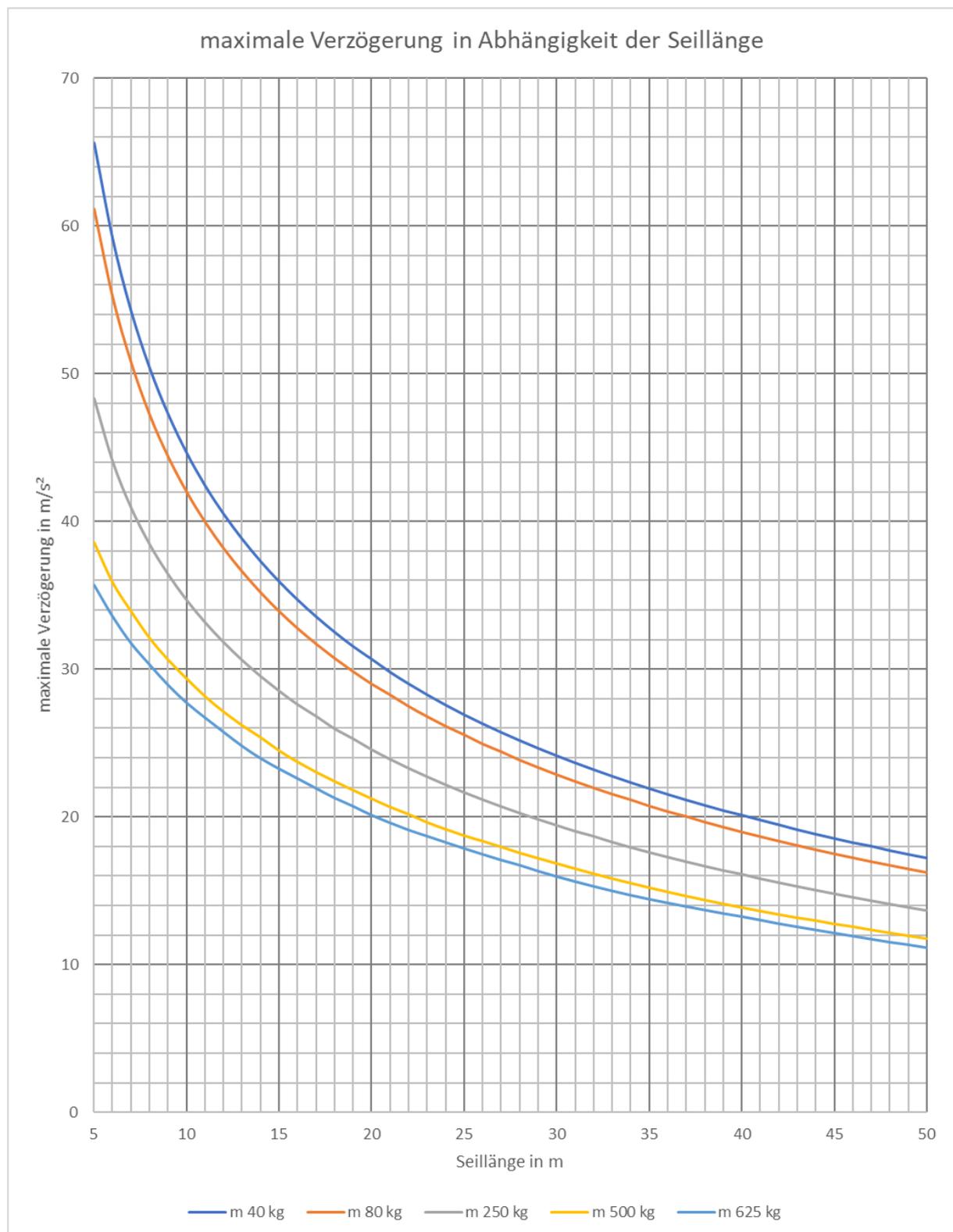


Abbildung 5.23: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

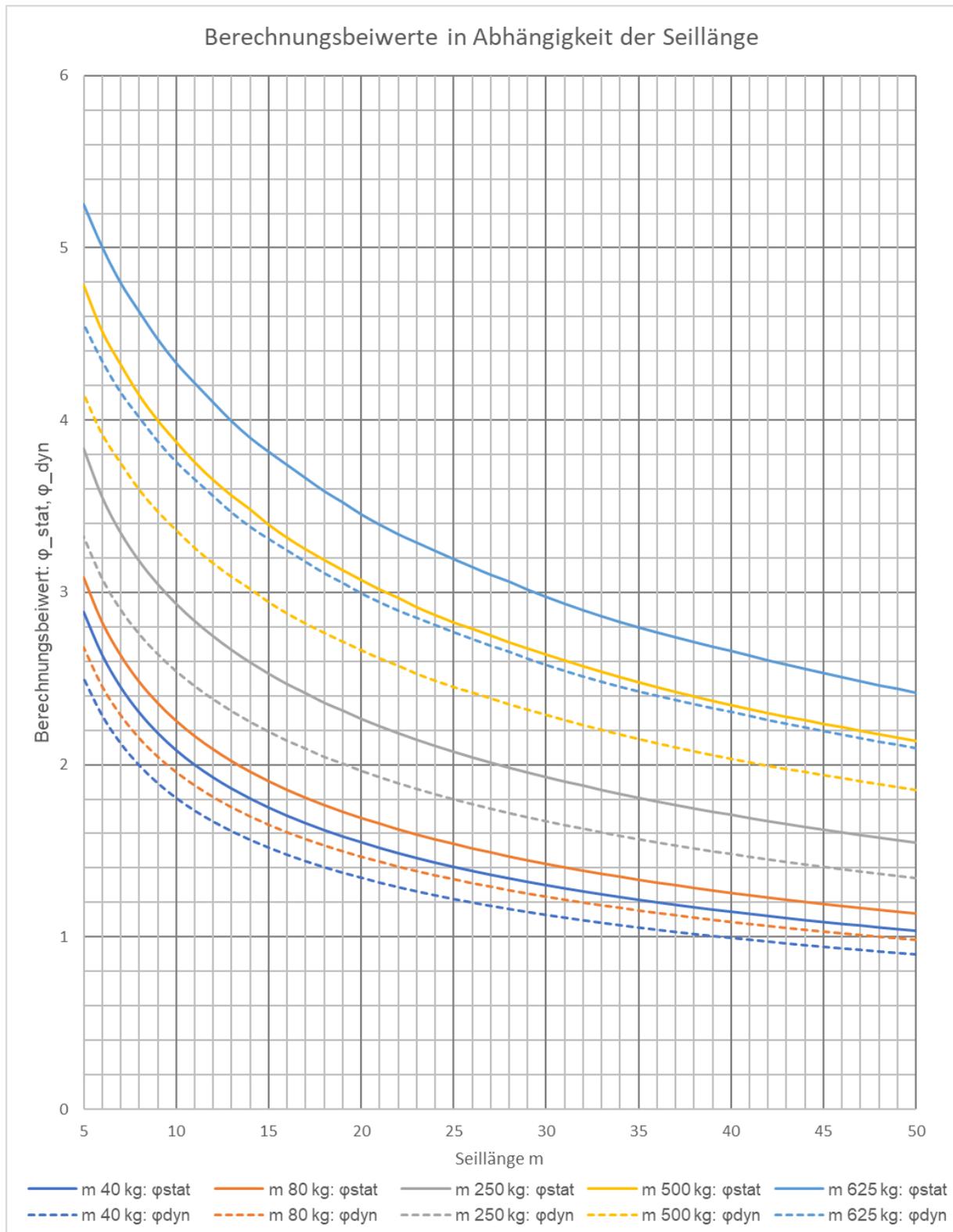


Abbildung 5.24: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen

### 5.1.4 Prospektzug 10 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 10kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.4), das Anlagenschema ist in Abbildung 5.25 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1):

Nenngeschwindigkeit:  $1.5\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.0\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen

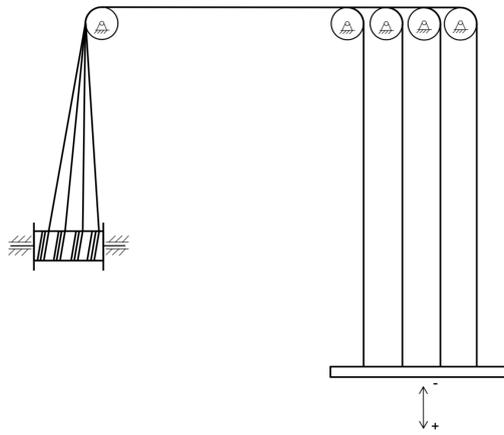


Abbildung 5.25: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

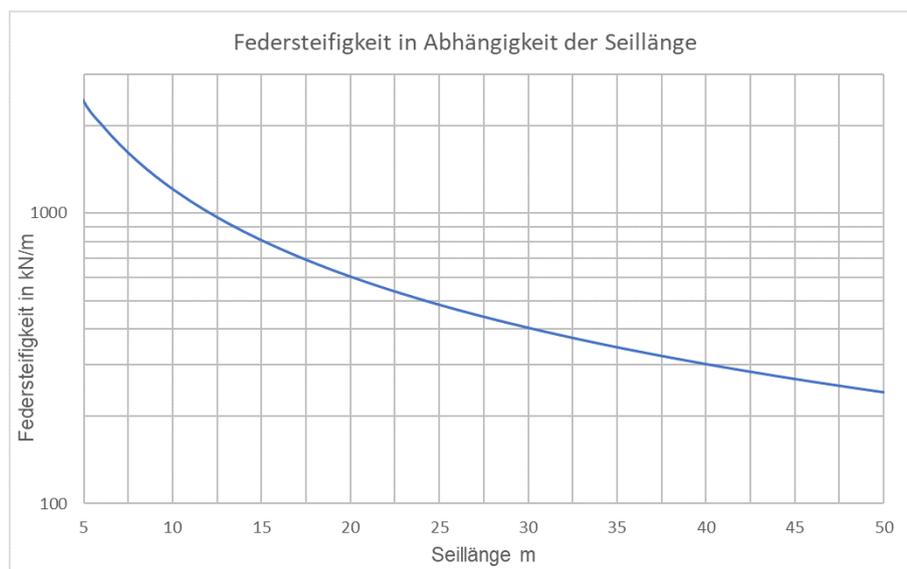


Abbildung 5.26: Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 5.1.4.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

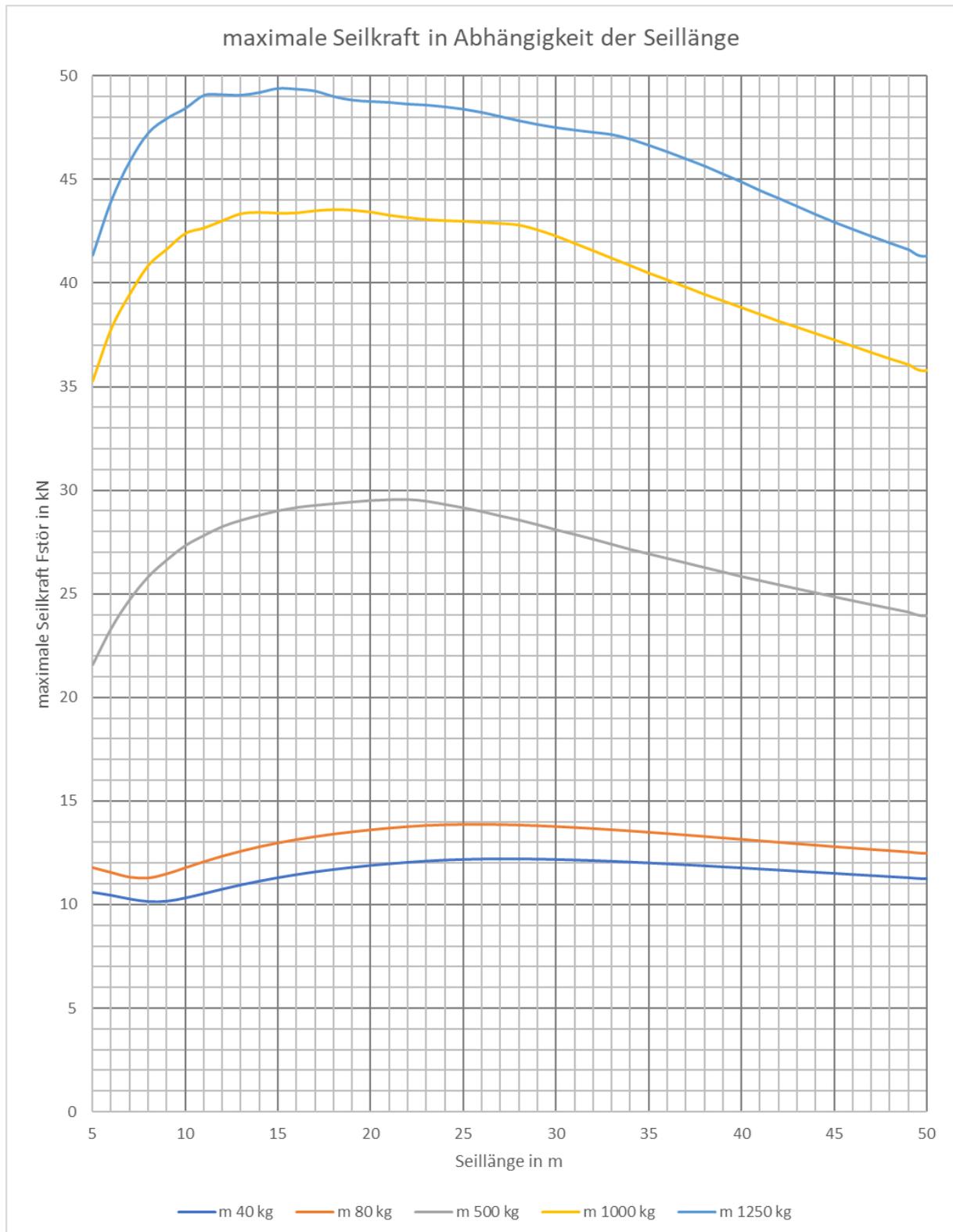


Abbildung 5.27: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken mit Nennbedingungen

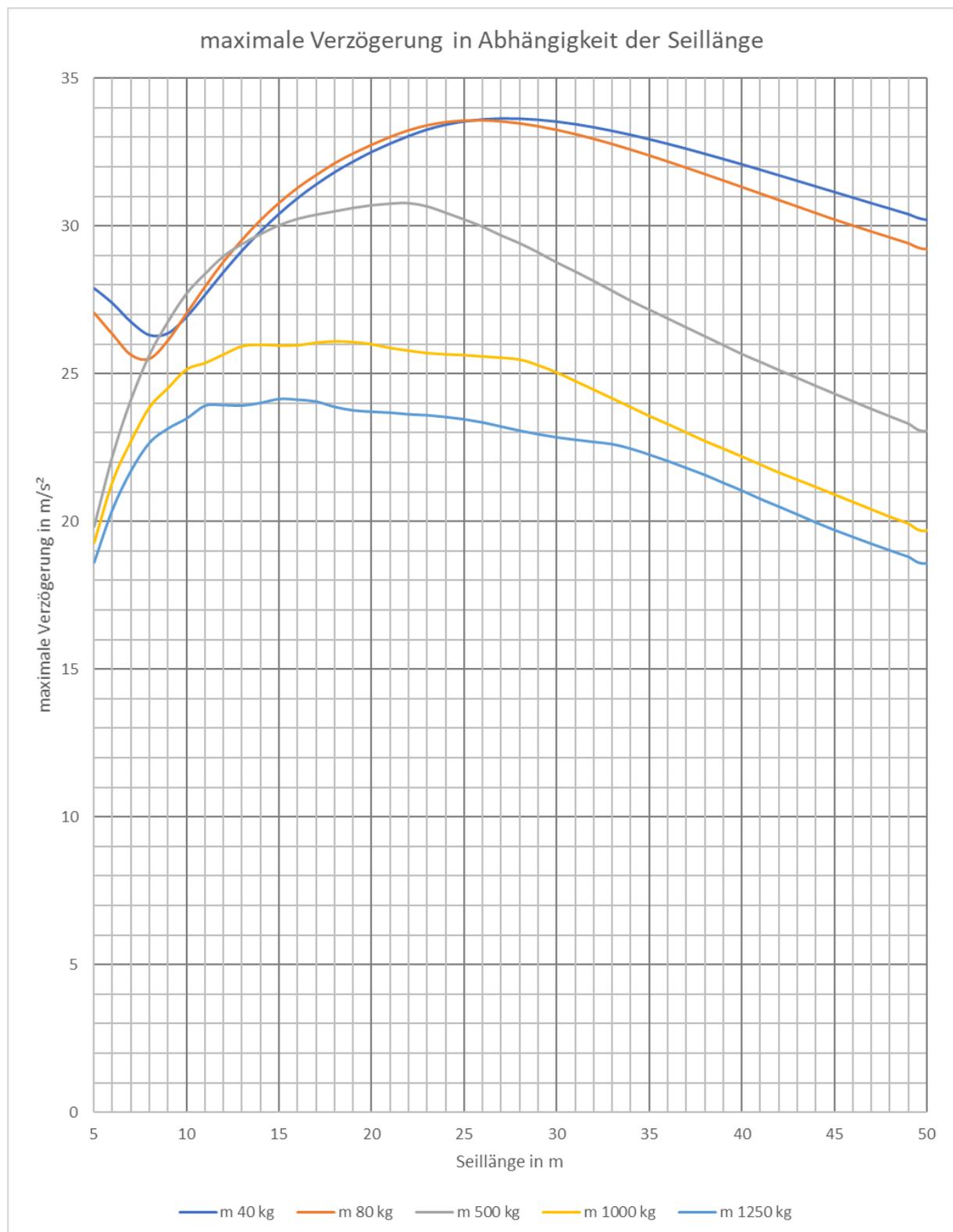


Abbildung 5.28: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken mit Nennbedingungen

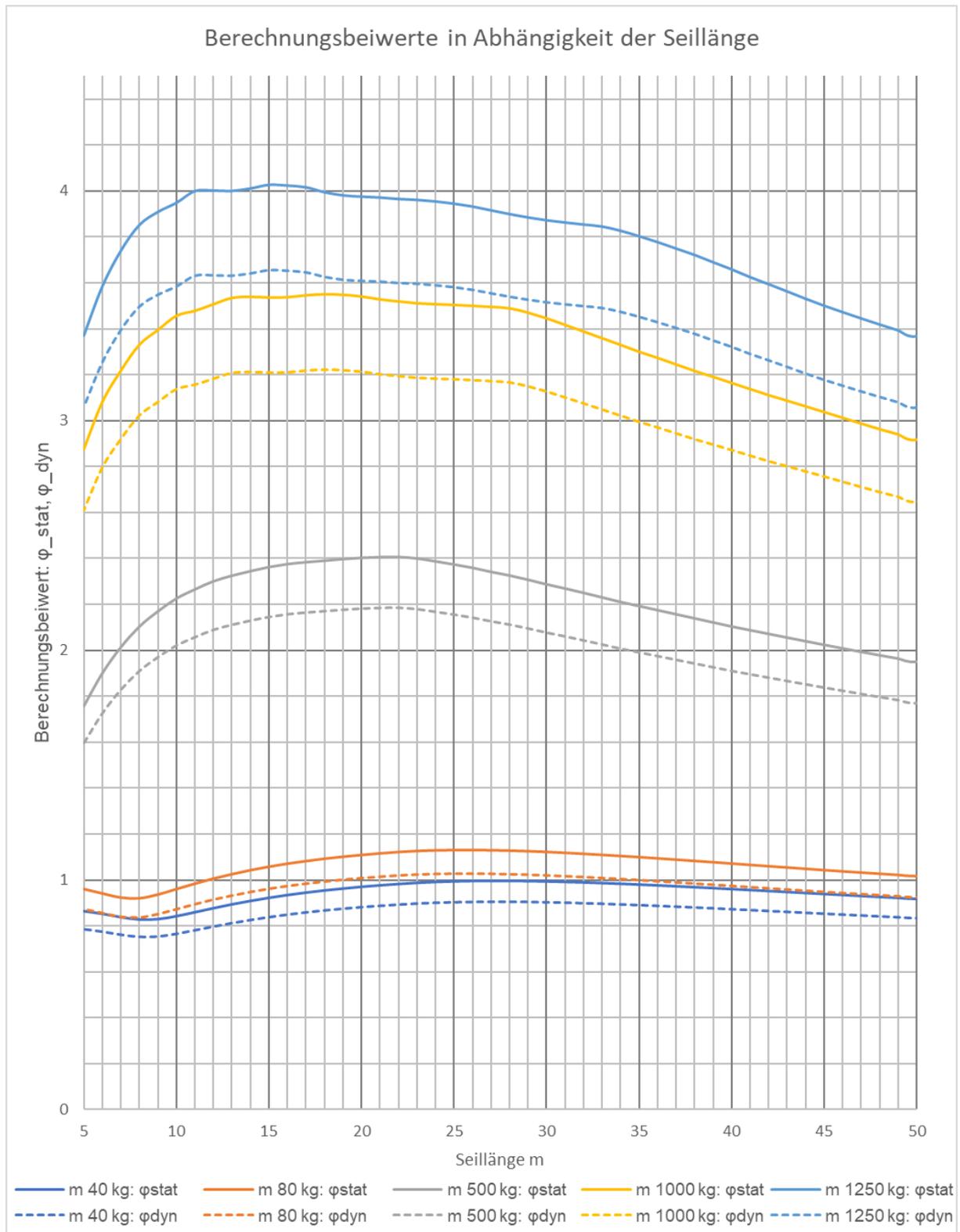


Abbildung 5.29: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken mit Nennbedingungen

## 5.1.4.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

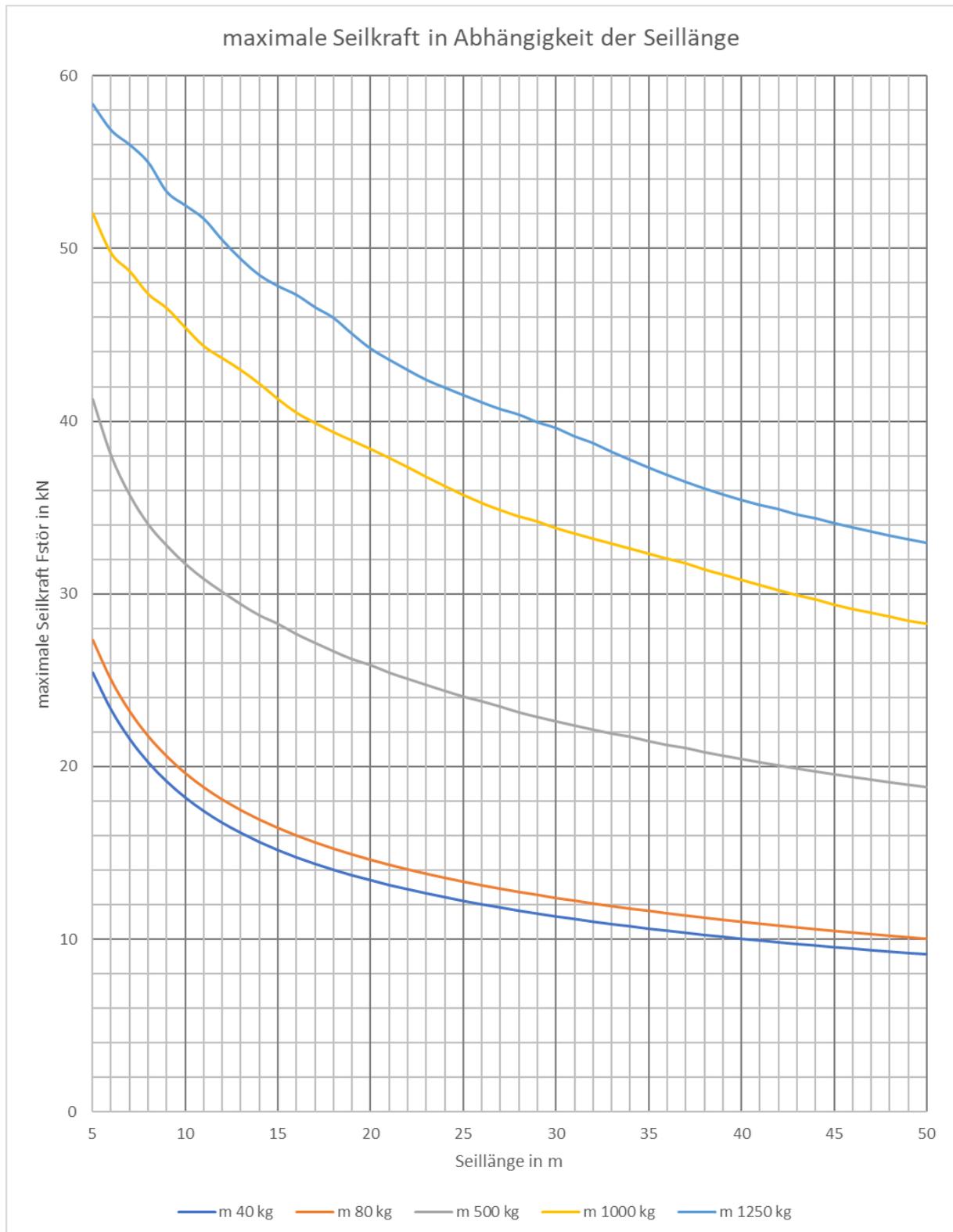


Abbildung 5.30: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben mit Nennbedingungen

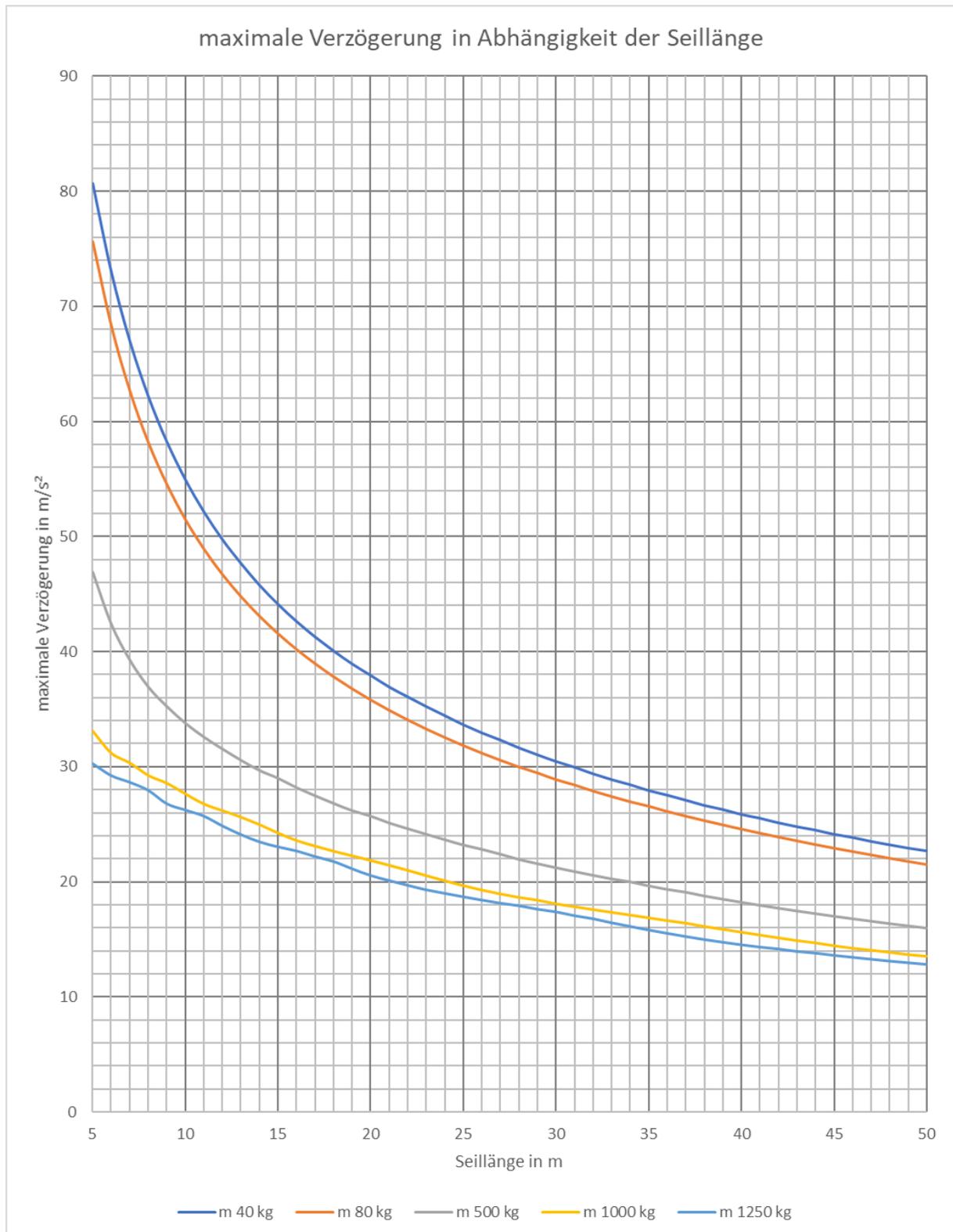


Abbildung 5.31: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben mit Nennbedingungen

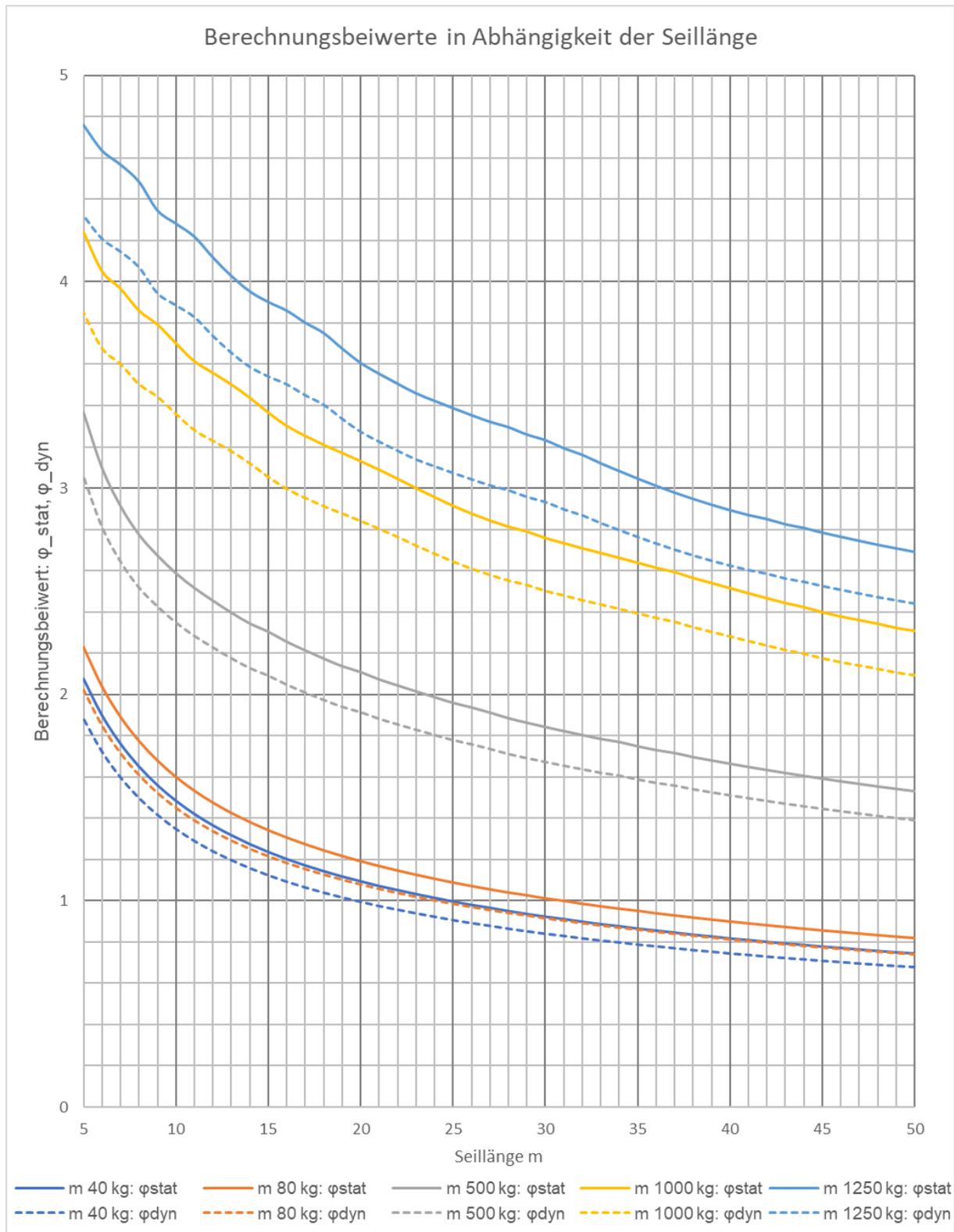


Abbildung 5.32: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben mit Nennbedingungen

## 5.2 Variation der Verfahrgeschwindigkeit

Nach dem die Seilkräfte und Beschleunigungen bei Nennbedingungen (siehe Abschnitt 5.1) im vorherigen Abschnitt für 4 verschiedene Hubzüge detailliert dargestellt wurden, soll nun mittels einer Parameterstudie der Einfluss der Seillänge, der (Nutz-)Last und der Verfahrgeschwindigkeit auf die Seilkraft und die Beschleunigung simuliert werden.

Für die Parameter werden folgende Intervalle bzw. Werte gewählt:

- Die Seillängen werden, wie schon bei den Simulationen zuvor, zwischen 50 und 5m variiert.
- Die Verfahrgeschwindigkeit wird vom Startwert  $1.8m/s$  (Punktzüge) bzw.  $1.5m/s$  (Prospektzüge) in 10 Schritten auf  $0.2m/s$  verringert.
- Als Lasten werden, wie schon bei den Simulationen zuvor,  $40kg$ ,  $80kg$ , 50% Nennlast, 100% Nennlast und 125% Nennlast angenommen.

Um besser erkennen zu können, ab wann im Störfall höhere Seilkräfte auftreten als im Betriebsfall (wenn  $\varphi_{dyn} > 2$ ), wird anstatt der Seilkraft die Kennzahl  $\varphi_{dyn}$  (das Verhältnis von Seilkraft zur dynamischen Nennlast) angegeben und jeder  $\varphi_{dyn}$ -Wert größer als 2 rot markiert.

Beschleunigungen über  $4g/39.24m/s^2$  sind ebenfalls rot markiert.

Ob eine Beschleunigungseinwirkung fatale Folgen hat oder verletzungsfrei ertragen werden kann hängt ab von:

- Amplitude der Beschleunigung
- Richtung der Beschleunigung
- Dauer der Beschleunigung
- Änderungsrate der Beschleunigung
- Position/Sicherung/Fixierung der Person
- Alter der Person
- Geschlecht der Person
- Antrainierter Resistenz oder physische Konditionierung
- und anderen Faktoren

Quelle: [6], s 6.5-6.6

Als Referenzwert für die Beschleunigung werden  $4g/39.24m/s^2$  gewählt, da dieser Wert bei Achterbahnfahrten durchaus erreicht wird <sup>1</sup>. Zwar sind die Beschleunigungseinwirkungen bei Achterbahnfahrten nicht 1 zu 1 auf den betrachteten Fall übertragbar, der Referenzwert ist aber aussagekräftiger als die maximal ertragbare Beschleunigung. Für eine volle Fixierung und einer Beschleunigungsdauer von 0.1s liegt diese nämlich bei  $15g$  (siehe [6], s 6.7).

<sup>1</sup>z.B.: <https://www.europapark.de/de/attraktionen/silver-star>

## 5.2.1 Punktzug 2.5kN

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,66	0,64	0,62	0,59	0,57	0,52	0,46	0,40	0,35	0,28	0,17
m in kg	80	1,03	1,00	0,96	0,92	0,88	0,80	0,72	0,63	0,55	0,46	0,31
m in kg	125	1,39	1,35	1,30	1,24	1,19	1,09	0,98	0,88	0,77	0,66	0,47
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,26</b>	<b>2,19</b>	<b>2,13</b>	<b>2,05</b>	<b>1,96</b>	<b>1,83</b>	<b>1,69</b>	<b>1,53</b>	<b>1,37</b>	<b>1,21</b>	<b>0,88</b>
m in kg	313	2,70	2,59	2,51	2,45	2,34	2,21	2,04	1,87	1,68	1,50	1,09
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,70	0,68	0,66	0,63	0,61	0,55	0,49	0,43	0,37	0,30	0,18
m in kg	80	1,11	1,08	1,04	1,00	0,95	0,87	0,78	0,68	0,59	0,49	0,32
m in kg	125	1,52	1,46	1,41	1,35	1,30	1,18	1,06	0,95	0,83	0,70	0,48
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,48</b>	<b>2,42</b>	<b>2,31</b>	<b>2,22</b>	<b>2,15</b>	<b>1,97</b>	<b>1,83</b>	<b>1,65</b>	<b>1,47</b>	<b>1,29</b>	<b>0,90</b>
m in kg	313	2,89	2,81	2,75	2,64	2,53	2,32	2,19	2,01	1,81	1,60	1,11
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,75	0,73	0,71	0,68	0,66	0,60	0,54	0,48	0,40	0,33	0,19
m in kg	80	1,22	1,18	1,14	1,10	1,05	0,96	0,86	0,76	0,65	0,54	0,34
m in kg	125	1,67	1,62	1,56	1,51	1,44	1,32	1,18	1,05	0,91	0,77	0,50
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,75</b>	<b>2,66</b>	<b>2,60</b>	<b>2,50</b>	<b>2,38</b>	<b>2,19</b>	<b>2,01</b>	<b>1,83</b>	<b>1,63</b>	<b>1,41</b>	<b>0,93</b>
m in kg	313	3,29	3,18	3,03	2,94	2,84	2,61	2,37	2,23	1,99	1,75	1,14
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,77	0,76	0,73	0,71	0,69	0,63	0,57	0,50	0,43	0,35	0,19
m in kg	80	1,28	1,25	1,21	1,17	1,12	1,02	0,92	0,81	0,69	0,57	0,35
m in kg	125	1,78	1,72	1,67	1,61	1,54	1,41	1,26	1,11	0,97	0,82	0,51
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,95</b>	<b>2,88</b>	<b>2,76</b>	<b>2,67</b>	<b>2,58</b>	<b>2,36</b>	<b>2,13</b>	<b>1,96</b>	<b>1,74</b>	<b>1,51</b>	<b>0,95</b>
m in kg	313	3,45	3,36	3,29	3,18	3,03	2,79	2,55	2,38	2,13	1,87	1,17
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,78	0,77	0,76	0,74	0,72	0,66	0,60	0,54	0,46	0,37	0,20
m in kg	80	1,35	1,32	1,28	1,24	1,20	1,10	0,99	0,87	0,75	0,61	0,36
m in kg	125	1,89	1,84	1,79	1,73	1,67	1,53	1,38	1,21	1,05	0,88	0,53
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>3,14</b>	<b>3,08</b>	<b>3,01</b>	<b>2,90</b>	<b>2,81</b>	<b>2,58</b>	<b>2,33</b>	<b>2,12</b>	<b>1,89</b>	<b>1,63</b>	<b>0,98</b>
m in kg	313	3,62	3,55	3,53	3,45	3,33	3,07	2,78	2,49	2,32	2,02	1,21
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,76	0,76	0,76	0,75	0,73	0,69	0,64	0,58	0,50	0,41	0,20
m in kg	80	1,38	1,37	1,34	1,31	1,28	1,19	1,08	0,96	0,83	0,67	0,37
m in kg	125	1,98	1,95	1,92	1,87	1,81	1,68	1,52	1,35	1,16	0,98	0,55
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>3,22</b>	<b>3,19</b>	<b>3,21</b>	<b>3,17</b>	<b>3,10</b>	<b>2,87</b>	<b>2,61</b>	<b>2,32</b>	<b>2,10</b>	<b>1,82</b>	<b>1,03</b>
m in kg	313	3,64	3,66	3,63	3,68	3,62	3,43	3,13	2,79	2,53	2,25	1,26
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,68	0,65	0,61	0,54	0,46	0,19
m in kg	80	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,26	1,18	1,07	0,94	0,78	0,38
m in kg	125	1,93	1,93	1,92	1,93	1,92	1,84	1,71	1,54	1,34	1,11	0,58
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>3,20</b>	<b>3,23</b>	<b>3,20</b>	<b>3,21</b>	<b>3,23</b>	<b>3,21</b>	<b>3,03</b>	<b>2,73</b>	<b>2,38</b>	<b>2,11</b>	<b>1,10</b>
m in kg	313	3,74	3,66	3,72	3,68	3,71	3,70	3,65	3,29	2,89	2,61	1,35
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,60	0,57	0,55	0,53	0,48	0,21
m in kg	80	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,05	1,00	0,90	0,29
m in kg	125	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,62	1,53	1,36	0,48
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,99</b>	<b>2,97</b>	<b>2,97</b>	<b>2,97</b>	<b>2,98</b>	<b>2,97</b>	<b>2,97</b>	<b>2,97</b>	<b>2,92</b>	<b>2,59</b>	<b>1,15</b>
m in kg	313	3,53	3,48	3,47	3,50	3,49	3,52	3,50	3,51	3,51	3,20	1,47

Tabelle 5.1: Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, senken,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,56	0,54	0,51	0,48	0,45	0,40	0,34	0,29	0,24	0,22	0,20
m in kg	80	0,86	0,82	0,78	0,74	0,70	0,63	0,55	0,47	0,41	0,40	0,35
m in kg	125	1,15	1,11	1,06	1,01	0,96	0,86	0,77	0,67	0,60	0,58	0,50
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>1,90</b>	<b>1,82</b>	<b>1,76</b>	<b>1,70</b>	<b>1,60</b>	<b>1,48</b>	<b>1,34</b>	<b>1,22</b>	<b>1,15</b>	<b>1,06</b>	<b>0,92</b>
m in kg	313	2,28	2,15	2,05	2,01	1,96	1,73	1,59	1,48	1,40	1,29	1,13
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,62	0,59	0,56	0,53	0,50	0,44	0,38	0,32	0,26	0,22	0,21
m in kg	80	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77	0,69	0,60	0,52	0,44	0,40	0,36
m in kg	125	1,27	1,22	1,16	1,11	1,05	0,95	0,84	0,73	0,64	0,59	0,52
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,05</b>	<b>2,01</b>	<b>1,94</b>	<b>1,83</b>	<b>1,76</b>	<b>1,58</b>	<b>1,43</b>	<b>1,29</b>	<b>1,17</b>	<b>1,08</b>	<b>0,94</b>
m in kg	313	2,46	2,34	2,28	2,20	2,06	1,93	1,75	1,56	1,43	1,32	1,15
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,71	0,68	0,64	0,60	0,57	0,50	0,43	0,36	0,29	0,23	0,21
m in kg	80	1,07	1,02	0,97	0,92	0,87	0,77	0,68	0,58	0,48	0,40	0,37
m in kg	125	1,43	1,37	1,30	1,24	1,18	1,06	0,93	0,81	0,69	0,61	0,53
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,38</b>	<b>2,22</b>	<b>2,11</b>	<b>2,06</b>	<b>1,96</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,40</b>	<b>1,24</b>	<b>1,12</b>	<b>0,97</b>
m in kg	313	2,69	2,67	2,55	2,40	2,33	2,11	1,90	1,68	1,51	1,36	1,18
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61	0,54	0,46	0,39	0,31	0,24	0,22
m in kg	80	1,16	1,10	1,04	0,99	0,94	0,83	0,72	0,62	0,51	0,42	0,38
m in kg	125	1,54	1,47	1,40	1,33	1,26	1,13	0,99	0,86	0,73	0,62	0,54
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,44</b>	<b>2,36</b>	<b>2,32</b>	<b>2,18</b>	<b>2,08</b>	<b>1,89</b>	<b>1,69</b>	<b>1,49</b>	<b>1,30</b>	<b>1,14</b>	<b>0,98</b>
m in kg	313	3,02	2,84	2,65	2,59	2,48	2,25	1,99	1,79	1,58	1,39	1,20
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,86	0,81	0,77	0,72	0,68	0,59	0,50	0,42	0,34	0,26	0,22
m in kg	80	1,27	1,21	1,14	1,08	1,02	0,90	0,78	0,67	0,55	0,44	0,38
m in kg	125	1,68	1,60	1,52	1,45	1,37	1,22	1,07	0,92	0,78	0,65	0,56
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,72</b>	<b>2,61</b>	<b>2,43</b>	<b>2,38</b>	<b>2,25</b>	<b>2,03</b>	<b>1,82</b>	<b>1,59</b>	<b>1,38</b>	<b>1,18</b>	<b>1,01</b>
m in kg	313	3,08	2,98	2,98	2,79	2,64	2,41	2,17	1,92	1,67	1,44	1,22
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,98	0,92	0,87	0,82	0,77	0,66	0,56	0,47	0,38	0,29	0,22
m in kg	80	1,43	1,36	1,28	1,21	1,14	1,00	0,86	0,73	0,60	0,48	0,40
m in kg	125	1,87	1,78	1,69	1,61	1,52	1,34	1,17	1,01	0,85	0,69	0,57
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>2,95</b>	<b>2,86</b>	<b>2,72</b>	<b>2,57</b>	<b>2,49</b>	<b>2,22</b>	<b>1,98</b>	<b>1,73</b>	<b>1,49</b>	<b>1,26</b>	<b>1,03</b>
m in kg	313	3,58	3,32	3,13	3,13	2,87	2,62	2,36	2,07	1,80	1,53	1,26
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,18	1,11	1,05	0,98	0,91	0,79	0,66	0,54	0,43	0,32	0,23
m in kg	80	1,69	1,60	1,51	1,42	1,33	1,15	0,98	0,82	0,67	0,52	0,41
m in kg	125	2,18	2,07	1,96	1,85	1,74	1,52	1,32	1,12	0,93	0,75	0,59
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>3,40</b>	<b>3,23</b>	<b>3,08</b>	<b>2,95</b>	<b>2,76</b>	<b>2,50</b>	<b>2,21</b>	<b>1,92</b>	<b>1,65</b>	<b>1,38</b>	<b>1,08</b>
m in kg	313	3,97	3,80	3,60	3,50	3,24	2,99	2,63	2,32	2,01	1,68	1,31
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,65	1,55	1,45	1,35	1,26	1,07	0,88	0,71	0,54	0,39	0,23
m in kg	80	2,28	2,14	2,01	1,88	1,74	1,49	1,24	1,00	0,78	0,58	0,41
m in kg	125	2,84	2,68	2,52	2,35	2,19	1,88	1,57	1,29	1,03	0,81	0,62
<b>m in kg</b>	<b>250</b>	<b>4,22</b>	<b>4,04</b>	<b>3,74</b>	<b>3,56</b>	<b>3,36</b>	<b>2,91</b>	<b>2,52</b>	<b>2,15</b>	<b>1,83</b>	<b>1,56</b>	<b>1,14</b>
m in kg	313	4,81	4,77	4,32	4,18	3,93	3,49	3,02	2,62	2,27	1,95	1,39

Tabelle 5.2: Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, heben,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	34,58	33,06	31,50	29,89	28,19	24,72	21,05	17,26	13,29	9,17	3,92
m in kg	80	28,53	27,20	25,80	24,40	22,95	19,99	16,92	13,79	10,69	7,47	3,20
m in kg	125	24,70	23,56	22,37	21,05	19,81	17,22	14,58	12,04	9,37	6,61	2,74
m in kg	250	19,27	18,38	17,65	16,59	15,46	13,71	11,90	9,93	7,87	5,79	2,10
m in kg	313	18,15	16,98	16,16	15,56	14,47	13,05	11,29	9,57	7,63	5,73	1,92
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	37,31	35,83	34,21	32,59	30,85	27,20	23,30	19,23	14,92	10,37	4,28
m in kg	80	31,60	30,19	28,73	27,22	25,67	22,45	19,09	15,63	12,15	8,58	3,57
m in kg	125	27,76	26,41	25,08	23,78	22,33	19,48	16,55	13,72	10,75	7,67	3,09
m in kg	250	22,08	21,31	19,98	18,74	17,81	15,59	13,70	11,45	9,16	6,81	2,38
m in kg	313	20,15	19,32	18,64	17,51	16,37	14,27	12,89	11,02	8,91	6,77	2,17
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	40,47	39,05	37,60	35,96	34,25	30,50	26,42	22,02	17,27	12,16	4,70
m in kg	80	35,57	34,16	32,64	31,08	29,41	25,91	22,20	18,31	14,27	10,24	4,09
m in kg	125	31,71	30,43	28,96	27,54	25,98	22,82	19,47	16,15	12,83	9,28	3,58
m in kg	250	25,56	24,37	23,59	22,31	20,85	18,36	16,12	13,79	11,15	8,40	2,79
m in kg	313	24,31	23,13	21,62	20,63	19,66	17,25	14,73	13,29	10,85	8,36	2,55
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	41,92	40,75	39,33	37,86	36,19	32,52	28,39	23,87	18,88	13,45	4,90
m in kg	80	37,87	36,57	35,09	33,53	31,85	28,25	24,35	20,19	15,83	11,44	4,42
m in kg	125	34,26	32,94	31,56	30,02	28,47	25,11	21,55	17,82	14,31	10,46	3,92
m in kg	250	28,20	27,23	25,72	24,51	23,39	20,53	17,59	15,41	12,58	9,57	3,08
m in kg	313	25,94	24,97	24,25	23,13	21,60	19,15	16,59	14,83	12,27	9,53	2,82
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	42,60	41,89	40,88	39,58	38,10	34,66	30,68	26,13	20,97	15,16	5,01
m in kg	80	40,23	39,11	37,77	36,32	34,71	31,09	27,06	22,67	17,93	13,03	4,82
m in kg	125	37,09	35,84	34,58	33,09	31,55	28,07	24,28	20,23	16,27	12,08	4,35
m in kg	250	30,56	29,90	28,90	27,51	26,32	23,36	20,12	17,44	14,54	11,20	3,47
m in kg	313	27,70	27,02	26,82	25,94	24,73	21,96	18,98	15,99	14,19	11,16	3,19
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	41,24	41,21	40,90	40,25	39,28	36,48	32,98	28,73	23,60	17,50	5,13
m in kg	80	41,55	41,00	40,13	39,00	37,68	34,40	30,42	25,93	20,88	15,27	5,26
m in kg	125	39,25	38,57	37,68	36,56	35,18	31,87	27,95	23,63	18,91	14,40	4,91
m in kg	250	31,65	31,23	31,56	31,03	30,09	27,19	23,82	20,10	17,26	13,59	4,04
m in kg	313	27,89	28,15	27,81	28,37	27,71	25,72	22,60	19,14	16,45	13,54	3,73
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	37,20	37,19	37,19	37,18	37,06	35,98	33,87	30,79	26,49	20,66	5,30
m in kg	80	39,05	39,04	39,04	39,06	38,77	36,92	33,90	29,95	25,02	19,01	5,46
m in kg	125	37,97	37,92	37,91	37,94	37,67	35,79	32,58	28,39	23,44	17,73	5,53
m in kg	250	31,33	31,71	31,36	31,53	31,74	31,53	29,18	25,30	20,86	17,31	4,94
m in kg	313	28,94	28,13	28,70	28,29	28,66	28,57	28,00	24,31	20,14	17,28	4,63
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,99	33,87	33,49	32,87	32,05	30,10	28,27	26,89	25,46	22,64	5,59
m in kg	80	30,38	30,38	30,35	30,33	30,31	30,27	30,19	29,42	27,51	23,70	5,69
m in kg	125	31,09	31,11	31,12	31,07	31,09	31,06	31,04	30,41	28,14	23,88	5,74
m in kg	250	28,65	28,37	28,43	28,39	28,49	28,48	28,46	28,48	27,71	23,52	5,81
m in kg	313	26,76	26,29	26,16	26,43	26,33	26,66	26,45	26,51	26,57	23,32	5,83

Tabelle 5.3: Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, senken, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	27.87	26.02	24.17	22.33	20.48	16.87	13.25	9.81	9.81	8.12	3.74
m in kg	80	22.06	20.59	19.18	17.73	16.32	13.48	10.65	9.81	9.43	6.34	3.02
m in kg	125	18.82	17.60	16.50	15.25	14.02	11.60	9.81	9.81	8.00	5.39	2.58
m in kg	250	14.71	13.58	12.90	12.04	10.77	9.81	9.81	8.10	6.13	4.13	1.97
m in kg	313	13.80	12.52	11.41	11.00	10.51	9.81	8.98	7.37	5.60	3.77	1.80
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	31.97	29.88	27.79	25.71	23.68	19.61	15.61	11.67	9.81	8.95	4.05
m in kg	80	25.29	23.71	22.11	20.52	18.91	15.77	12.63	9.81	9.81	7.06	3.33
m in kg	125	21.73	20.42	18.94	17.68	16.31	13.62	10.92	9.81	8.94	6.03	2.86
m in kg	250	16.57	16.03	15.13	13.77	12.85	10.59	9.81	9.15	6.90	4.66	2.20
m in kg	313	15.65	14.43	13.83	12.98	11.52	10.17	9.81	8.25	6.30	4.25	2.00
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	37.84	35.41	33.00	30.61	28.22	23.48	18.88	14.35	9.89	9.81	4.44
m in kg	80	29.93	28.07	26.22	24.37	22.54	18.89	15.30	11.72	9.81	8.05	3.75
m in kg	125	25.61	24.09	22.54	20.94	19.45	16.35	13.30	10.22	9.81	6.93	3.25
m in kg	250	20.77	18.80	17.37	16.74	15.37	12.96	10.48	9.81	7.99	5.41	2.52
m in kg	313	18.11	17.88	16.64	15.11	14.35	12.04	9.93	9.56	7.38	4.96	2.30
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	42.01	39.31	36.64	33.99	31.35	26.15	21.09	16.11	11.27	9.81	4.66
m in kg	80	33.14	31.06	29.04	27.01	25.01	20.98	17.05	13.17	9.81	8.72	4.02
m in kg	125	28.31	26.59	24.87	23.21	21.50	18.18	14.86	11.53	9.81	7.54	3.51
m in kg	250	21.58	20.54	20.08	18.27	16.94	14.47	11.91	9.81	8.74	5.95	2.73
m in kg	313	21.47	19.57	17.61	17.03	15.91	13.46	10.85	9.81	8.10	5.45	2.50
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	47.54	44.50	41.48	38.48	35.50	29.68	23.97	18.42	13.02	9.81	4.87
m in kg	80	37.37	35.03	32.73	30.46	28.17	23.66	19.26	14.98	10.77	9.55	4.35
m in kg	125	31.74	29.86	27.93	26.08	24.13	20.44	16.76	13.12	9.81	8.32	3.84
m in kg	250	25.20	23.77	21.44	20.79	19.14	16.30	13.58	10.70	9.73	6.66	3.01
m in kg	313	22.10	21.04	21.10	19.05	17.55	15.20	12.67	10.07	8.99	6.12	2.75
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	55.55	52.00	48.47	44.98	41.51	34.67	28.00	21.54	15.30	9.81	5.00
m in kg	80	43.32	40.61	37.92	35.24	32.58	27.35	22.28	17.33	12.58	9.81	4.74
m in kg	125	36.65	34.41	32.16	29.98	27.77	23.46	19.26	15.15	11.15	9.34	4.25
m in kg	250	28.12	27.03	25.25	23.26	22.25	18.74	15.67	12.51	9.81	7.65	3.38
m in kg	313	27.24	24.63	22.65	22.65	19.91	17.32	14.67	11.64	9.81	7.08	3.10
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	69.12	64.64	60.19	55.78	51.41	42.82	34.46	26.44	18.78	11.61	5.11
m in kg	80	53.04	49.62	46.23	42.88	39.56	33.06	26.77	20.68	14.97	9.81	5.17
m in kg	125	44.30	41.54	38.77	35.95	33.25	27.96	22.86	17.92	13.21	9.81	4.79
m in kg	250	33.93	31.83	29.90	28.16	25.70	22.42	18.58	14.95	11.46	9.17	3.91
m in kg	313	31.32	29.54	27.48	26.45	23.80	21.22	17.41	14.19	10.97	8.62	3.61
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	100.62	93.95	87.35	80.82	74.36	61.67	49.37	37.57	26.45	16.22	5.27
m in kg	80	75.00	69.92	64.93	59.97	55.07	45.50	36.24	27.40	19.15	11.73	5.43
m in kg	125	60.69	56.61	52.57	48.51	44.48	36.73	29.19	22.19	15.75	10.22	5.44
m in kg	250	44.45	42.15	38.36	36.01	33.38	27.69	22.65	17.91	13.74	10.25	4.74
m in kg	313	40.01	39.60	35.00	33.51	30.91	26.32	21.49	17.34	13.71	10.35	4.42

Tabelle 5.4: Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, heben, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

## 5.2.2 Punktzug 5kN

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,41	0,40	0,39	0,37	0,36	0,33	0,29	0,26	0,22	0,18	0,11
m in kg	80	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54	0,49	0,44	0,39	0,33	0,27	0,18
m in kg	250	1,36	1,28	1,23	1,20	1,15	1,05	0,95	0,86	0,75	0,65	0,48
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,22</b>	<b>2,13</b>	<b>2,08</b>	<b>2,04</b>	<b>1,94</b>	<b>1,82</b>	<b>1,64</b>	<b>1,53</b>	<b>1,36</b>	<b>1,20</b>	<b>0,89</b>
m in kg	625	2,66	2,55	2,43	2,37	2,38	2,09	2,03	1,81	1,67	1,49	1,09
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,43	0,42	0,41	0,39	0,38	0,35	0,31	0,28	0,24	0,19	0,11
m in kg	80	0,67	0,65	0,63	0,60	0,58	0,53	0,47	0,42	0,36	0,29	0,19
m in kg	250	1,44	1,41	1,36	1,28	1,25	1,14	1,03	0,92	0,81	0,69	0,49
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,37</b>	<b>2,32</b>	<b>2,26</b>	<b>2,18</b>	<b>2,10</b>	<b>1,93</b>	<b>1,77</b>	<b>1,61</b>	<b>1,46</b>	<b>1,28</b>	<b>0,91</b>
m in kg	625	2,85	2,76	2,70	2,64	2,51	2,39	2,15	2,01	1,79	1,59	1,11
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,37	0,34	0,30	0,26	0,21	0,12
m in kg	80	0,72	0,69	0,67	0,65	0,63	0,57	0,52	0,46	0,39	0,32	0,20
m in kg	250	1,61	1,55	1,51	1,43	1,38	1,26	1,13	1,02	0,89	0,75	0,51
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,71</b>	<b>2,62</b>	<b>2,47</b>	<b>2,42</b>	<b>2,34</b>	<b>2,17</b>	<b>1,98</b>	<b>1,80</b>	<b>1,59</b>	<b>1,40</b>	<b>0,94</b>
m in kg	625	3,08	3,07	2,98	2,89	2,81	2,59	2,37	2,21	1,94	1,74	1,15
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,44	0,44	0,43	0,42	0,41	0,38	0,35	0,31	0,27	0,22	0,12
m in kg	80	0,74	0,72	0,70	0,68	0,65	0,60	0,54	0,48	0,41	0,34	0,20
m in kg	250	1,71	1,66	1,59	1,54	1,46	1,34	1,21	1,08	0,94	0,80	0,52
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,84</b>	<b>2,70</b>	<b>2,66</b>	<b>2,59</b>	<b>2,48</b>	<b>2,31</b>	<b>2,13</b>	<b>1,91</b>	<b>1,70</b>	<b>1,49</b>	<b>0,96</b>
m in kg	625	3,41	3,33	3,13	3,08	2,99	2,79	2,57	2,33	2,08	1,85	1,17
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,39	0,36	0,33	0,28	0,23	0,12
m in kg	80	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	0,63	0,58	0,51	0,44	0,36	0,21
m in kg	250	1,83	1,77	1,72	1,65	1,59	1,45	1,31	1,16	1,02	0,86	0,54
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,12</b>	<b>3,03</b>	<b>2,87</b>	<b>2,78</b>	<b>2,70</b>	<b>2,49</b>	<b>2,30</b>	<b>2,08</b>	<b>1,84</b>	<b>1,61</b>	<b>0,99</b>
m in kg	625	3,66	3,52	3,45	3,34	3,16	3,02	2,79	2,54	2,27	2,00	1,20
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,39	0,38	0,36	0,34	0,30	0,25	0,12
m in kg	80	0,74	0,73	0,72	0,70	0,69	0,65	0,61	0,55	0,48	0,39	0,21
m in kg	250	1,95	1,91	1,84	1,80	1,73	1,59	1,45	1,29	1,12	0,95	0,56
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,41</b>	<b>3,33</b>	<b>3,19</b>	<b>3,11</b>	<b>2,98</b>	<b>2,73</b>	<b>2,52</b>	<b>2,31</b>	<b>2,06</b>	<b>1,78</b>	<b>1,03</b>
m in kg	625	4,07	3,94	3,84	3,71	3,55	3,27	3,06	2,83	2,53	2,22	1,25
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,35	0,34	0,33	0,31	0,27	0,10
m in kg	80	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,63	0,61	0,57	0,52	0,44	0,21
m in kg	250	2,01	1,94	1,93	1,90	1,85	1,75	1,62	1,46	1,28	1,07	0,60
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,71</b>	<b>3,57</b>	<b>3,53</b>	<b>3,45</b>	<b>3,37</b>	<b>3,13</b>	<b>2,88</b>	<b>2,59</b>	<b>2,34</b>	<b>2,06</b>	<b>1,10</b>
m in kg	625	4,30	4,19	4,30	4,16	4,03	3,78	3,46	3,14	2,90	2,56	1,34
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,42	0,41	0,40	0,39	0,37	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,13
m in kg	80	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,53	0,51	0,49	0,48	0,46	0,20
m in kg	250	1,55	1,55	1,54	1,54	1,55	1,54	1,54	1,52	1,44	1,29	0,55
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,99</b>	<b>2,89</b>	<b>2,93</b>	<b>2,94</b>	<b>2,91</b>	<b>2,94</b>	<b>2,92</b>	<b>2,92</b>	<b>2,76</b>	<b>2,48</b>	<b>1,20</b>
m in kg	625	3,61	3,52	3,49	3,56	3,62	3,52	3,49	3,54	3,41	3,07	1,49

Tabelle 5.5: Parameterstudie, Punktzug 5kN, senken,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31	0,27	0,24	0,20	0,17	0,14	0,13
m in kg	80	0,56	0,53	0,51	0,48	0,46	0,41	0,36	0,31	0,26	0,22	0,20
m in kg	250	1,18	1,13	1,06	1,02	0,98	0,89	0,79	0,71	0,63	0,58	0,50
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>1,93</b>	<b>1,81</b>	<b>1,71</b>	<b>1,71</b>	<b>1,71</b>	<b>1,43</b>	<b>1,32</b>	<b>1,22</b>	<b>1,14</b>	<b>1,04</b>	<b>0,91</b>
m in kg	625	2,34	2,27	2,08	1,87	1,85	1,86	1,73	1,58	1,38	1,26	1,12
Seillänge in m	40	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,30	0,26	0,22	0,18	0,14	0,13
m in kg	80	0,61	0,58	0,55	0,53	0,50	0,44	0,39	0,33	0,28	0,23	0,21
m in kg	250	1,24	1,19	1,17	1,11	1,05	0,96	0,86	0,76	0,66	0,59	0,51
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,07</b>	<b>1,96</b>	<b>1,93</b>	<b>1,87</b>	<b>1,71</b>	<b>1,67</b>	<b>1,52</b>	<b>1,31</b>	<b>1,17</b>	<b>1,07</b>	<b>0,93</b>
m in kg	625	2,45	2,29	2,17	2,19	2,22	1,80	1,66	1,53	1,42	1,30	1,14
Seillänge in m	30	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,48	0,46	0,43	0,41	0,39	0,34	0,29	0,25	0,20	0,16	0,13
m in kg	80	0,69	0,65	0,62	0,59	0,56	0,49	0,43	0,37	0,31	0,25	0,21
m in kg	250	1,42	1,34	1,26	1,24	1,16	1,05	0,94	0,82	0,71	0,61	0,53
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,19</b>	<b>2,22</b>	<b>2,14</b>	<b>2,00</b>	<b>1,95</b>	<b>1,76</b>	<b>1,60</b>	<b>1,40</b>	<b>1,28</b>	<b>1,10</b>	<b>0,95</b>
m in kg	625	2,66	2,53	2,51	2,39	2,20	2,12	1,98	1,62	1,54	1,34	1,16
Seillänge in m	25	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,52	0,50	0,47	0,44	0,42	0,36	0,31	0,26	0,21	0,17	0,13
m in kg	80	0,74	0,70	0,67	0,63	0,60	0,53	0,46	0,39	0,32	0,26	0,22
m in kg	250	1,48	1,42	1,38	1,28	1,25	1,12	0,99	0,87	0,75	0,63	0,54
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,54</b>	<b>2,38</b>	<b>2,16</b>	<b>2,12</b>	<b>2,07</b>	<b>1,87</b>	<b>1,65</b>	<b>1,54</b>	<b>1,32</b>	<b>1,13</b>	<b>0,97</b>
m in kg	625	2,69	2,73	2,68	2,50	2,45	2,14	1,93	1,84	1,56	1,37	1,18
Seillänge in m	20	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,58	0,55	0,52	0,49	0,46	0,40	0,34	0,28	0,23	0,18	0,14
m in kg	80	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,57	0,49	0,42	0,35	0,27	0,22
m in kg	250	1,60	1,53	1,46	1,40	1,32	1,20	1,06	0,92	0,79	0,66	0,55
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,49</b>	<b>2,37</b>	<b>2,47</b>	<b>2,32</b>	<b>2,14</b>	<b>1,99</b>	<b>1,82</b>	<b>1,63</b>	<b>1,40</b>	<b>1,19</b>	<b>0,99</b>
m in kg	625	3,22	3,04	2,72	2,67	2,62	2,39	2,08	1,98	1,68	1,43	1,20
Seillänge in m	15	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,66	0,62	0,58	0,55	0,51	0,44	0,38	0,31	0,25	0,19	0,14
m in kg	80	0,91	0,86	0,81	0,77	0,72	0,63	0,54	0,46	0,37	0,29	0,23
m in kg	250	1,74	1,69	1,60	1,53	1,44	1,29	1,14	0,99	0,85	0,70	0,56
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,95</b>	<b>2,72</b>	<b>2,46</b>	<b>2,59</b>	<b>2,32</b>	<b>2,13</b>	<b>1,95</b>	<b>1,69</b>	<b>1,50</b>	<b>1,26</b>	<b>1,02</b>
m in kg	625	3,07	3,12	3,27	2,87	2,77	2,57	2,29	2,06	1,74	1,52	1,23
Seillänge in m	10	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,79	0,74	0,70	0,65	0,61	0,52	0,44	0,36	0,28	0,21	0,14
m in kg	80	1,08	1,02	0,96	0,90	0,84	0,73	0,62	0,51	0,41	0,32	0,23
m in kg	250	2,01	1,91	1,82	1,70	1,62	1,44	1,25	1,08	0,92	0,75	0,59
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,17</b>	<b>3,05</b>	<b>2,83</b>	<b>2,89</b>	<b>2,52</b>	<b>2,40</b>	<b>2,11</b>	<b>1,86</b>	<b>1,64</b>	<b>1,37</b>	<b>1,06</b>
m in kg	625	3,64	3,42	3,66	3,11	3,18	2,92	2,55	2,30	2,03	1,64	1,28
Seillänge in m	5	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,10	1,03	0,96	0,90	0,83	0,70	0,58	0,46	0,35	0,26	0,14
m in kg	80	1,47	1,38	1,29	1,20	1,12	0,95	0,79	0,64	0,50	0,37	0,23
m in kg	250	2,53	2,40	2,22	2,09	1,95	1,69	1,42	1,18	0,98	0,80	0,62
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,67</b>	<b>3,75</b>	<b>3,32</b>	<b>3,29</b>	<b>3,08</b>	<b>2,71</b>	<b>2,46</b>	<b>2,05</b>	<b>1,80</b>	<b>1,57</b>	<b>1,12</b>
m in kg	625	4,36	4,39	4,00	3,72	3,82	3,06	2,78	2,54	2,23	1,91	1,36

Tabelle 5.6: Parameterstudie, Punktzug 5kN, heben,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrensgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	36,26	34,82	33,32	31,74	30,11	26,69	23,02	19,07	14,85	10,33	4,38
m in kg	80	32,26	30,80	29,31	27,76	26,22	22,97	19,60	16,08	12,40	8,58	3,77
m in kg	250	23,83	21,99	20,76	20,04	18,61	16,23	13,85	11,39	8,89	6,31	2,60
m in kg	500	18,77	17,66	16,99	16,49	15,17	13,68	11,26	9,83	7,72	5,66	1,96
m in kg	625	17,75	16,62	15,38	14,79	14,91	11,90	11,22	8,98	7,49	5,70	1,78
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	38,27	36,89	35,41	33,92	32,33	28,91	25,14	21,02	16,53	11,62	4,73
m in kg	80	35,06	33,53	32,03	30,45	28,82	25,43	21,82	18,02	13,99	9,74	4,17
m in kg	250	25,84	25,18	23,88	22,04	21,13	18,37	15,69	12,99	10,21	7,32	2,92
m in kg	500	20,66	20,00	19,34	18,20	17,19	14,97	12,95	10,96	8,94	6,65	2,21
m in kg	625	19,79	18,87	18,20	17,59	16,25	14,95	12,49	11,02	8,79	6,66	2,01
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	39,77	38,58	37,34	36,01	34,57	31,38	27,73	23,56	18,82	13,47	5,06
m in kg	80	38,17	36,71	35,23	33,70	32,05	28,58	24,80	20,70	16,25	11,47	4,68
m in kg	250	30,12	28,55	27,57	25,72	24,44	21,46	18,32	15,35	12,19	8,85	3,39
m in kg	500	25,05	23,86	22,01	21,32	20,35	18,10	15,65	13,39	10,65	8,20	2,59
m in kg	625	22,12	22,02	21,13	20,19	19,35	17,04	14,78	13,09	10,38	8,21	2,36
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	39,81	38,87	37,82	36,65	35,39	32,50	29,09	25,02	20,27	14,71	5,14
m in kg	80	39,58	38,24	36,90	35,41	33,83	30,43	26,64	22,44	17,80	12,70	4,99
m in kg	250	32,55	31,31	29,62	28,41	26,50	23,42	20,14	16,94	13,56	9,98	3,72
m in kg	500	26,77	24,97	24,48	23,56	22,13	19,94	17,56	14,83	12,09	9,31	2,86
m in kg	625	25,57	24,70	22,71	22,17	21,21	19,19	16,89	14,42	11,79	9,39	2,61
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	38,66	38,03	37,32	36,49	35,54	33,18	30,24	26,53	21,94	16,27	5,22
m in kg	80	40,43	39,30	38,17	36,90	35,48	32,36	28,72	24,54	19,75	14,31	5,30
m in kg	250	35,57	34,11	32,81	31,16	29,51	26,26	22,65	18,96	15,40	11,50	4,15
m in kg	500	30,32	29,17	27,08	25,97	24,98	22,23	19,81	17,01	13,94	10,86	3,22
m in kg	625	28,13	26,70	26,04	24,85	22,94	21,51	19,15	16,55	13,78	10,94	2,95
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	35,77	35,35	34,93	34,46	33,94	32,57	30,54	27,65	23,63	18,17	5,33
m in kg	80	39,53	38,88	38,07	37,22	36,22	33,80	30,72	26,88	22,18	16,51	5,46
m in kg	250	38,53	37,66	35,89	34,81	32,96	29,70	26,02	22,06	17,85	13,67	4,74
m in kg	500	34,08	33,00	31,29	30,19	28,56	25,39	22,68	19,90	16,65	13,12	3,77
m in kg	625	32,45	31,07	30,08	28,69	27,06	24,13	21,96	19,54	16,40	13,20	3,46
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	32,77	31,93	31,17	30,51	29,93	28,97	28,07	26,77	24,33	20,06	5,46
m in kg	80	34,53	34,30	34,05	33,78	33,48	32,53	30,92	28,43	24,69	19,42	5,57
m in kg	250	39,92	38,31	38,05	37,17	36,13	33,61	30,31	26,38	21,85	16,76	5,52
m in kg	500	38,00	36,16	35,62	34,66	33,58	30,46	27,20	23,59	20,29	16,67	4,67
m in kg	625	34,77	33,68	34,81	33,41	32,06	29,39	26,13	22,79	20,27	16,80	4,33
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	37,11	35,98	34,68	33,23	31,65	28,24	24,77	21,99	20,23	18,81	5,69
m in kg	80	33,76	32,21	30,67	29,19	27,81	25,50	24,05	23,29	22,65	20,71	5,76
m in kg	250	28,74	28,73	28,44	28,28	28,56	28,31	28,38	27,82	26,01	22,29	5,85
m in kg	500	28,70	27,39	27,91	28,08	27,67	28,06	27,83	27,78	25,78	22,11	5,89
m in kg	625	27,71	26,70	26,44	27,12	27,75	26,73	26,43	26,93	25,56	22,03	5,90

Tabelle 5.7: Parameterstudie, Punktzug 5kN, senken, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,19	31,06	28,96	26,88	24,81	20,74	16,74	12,79	9,81	9,24	4,19
m in kg	80	27,42	25,66	24,02	22,32	20,68	17,37	14,12	10,81	9,81	7,52	3,57
m in kg	250	19,53	18,11	16,37	15,51	14,55	12,22	9,82	9,81	7,51	5,06	2,44
m in kg	500	15,02	13,48	12,23	12,25	12,26	9,81	8,69	7,12	5,54	3,82	1,84
m in kg	625	14,45	13,73	11,74	9,81	9,81	9,81	9,66	7,78	5,28	3,43	1,67
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	37,67	35,29	32,90	30,58	28,28	23,71	19,21	14,81	10,51	9,81	4,51
m in kg	80	30,97	29,13	27,21	25,35	23,50	19,81	16,18	12,54	9,81	8,33	3,91
m in kg	250	21,00	19,62	19,26	17,77	16,22	13,89	11,49	9,81	8,38	5,66	2,71
m in kg	500	16,86	15,41	14,99	14,21	12,18	11,75	9,81	8,30	6,17	4,37	2,05
m in kg	625	15,65	13,99	12,68	12,96	13,20	9,81	8,55	7,02	5,51	3,86	1,86
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	44,08	41,32	38,58	35,86	33,16	27,82	22,63	17,56	12,63	9,81	4,87
m in kg	80	36,13	33,96	31,75	29,58	27,43	23,16	18,97	14,88	10,76	9,43	4,35
m in kg	250	25,32	23,33	21,40	20,96	18,87	16,17	13,51	10,60	9,58	6,50	3,08
m in kg	500	18,39	18,79	17,78	15,92	15,34	12,82	10,77	9,53	7,62	5,07	2,34
m in kg	625	17,81	16,46	16,21	14,95	13,03	12,19	10,69	7,99	6,97	4,47	2,13
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	48,66	45,57	42,53	39,55	36,53	30,65	24,94	19,37	14,05	9,81	5,04
m in kg	80	39,72	37,28	34,85	32,47	30,13	25,41	20,81	16,35	11,94	9,81	4,62
m in kg	250	26,76	25,29	24,38	21,90	21,20	17,99	14,79	11,72	9,81	7,07	3,33
m in kg	500	22,83	20,88	17,99	17,54	16,78	14,32	11,39	9,95	8,24	5,46	2,54
m in kg	625	18,14	18,51	18,05	16,18	15,64	12,43	10,18	9,81	7,16	4,98	2,31
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	54,74	51,27	47,80	44,39	41,01	34,36	27,94	21,73	15,76	10,04	5,13
m in kg	80	44,44	41,65	38,93	36,24	33,57	28,29	23,16	18,20	13,37	9,81	4,92
m in kg	250	29,85	28,21	26,39	24,97	22,87	19,94	16,43	13,11	9,81	7,79	3,64
m in kg	500	22,20	20,68	21,98	20,02	17,69	15,79	13,67	11,15	9,28	6,14	2,80
m in kg	625	23,64	21,79	18,40	17,94	17,35	14,95	11,80	10,79	8,43	5,53	2,55
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	63,54	59,46	55,42	51,41	47,45	39,68	32,18	24,97	18,12	11,62	5,21
m in kg	80	51,14	47,95	44,74	41,57	38,45	32,33	26,38	20,66	15,17	9,84	5,24
m in kg	250	33,36	32,19	29,74	28,14	25,95	22,28	18,52	14,83	11,17	8,74	4,05
m in kg	500	28,21	25,25	21,90	23,58	20,10	17,58	15,26	12,00	9,81	7,15	3,14
m in kg	625	22,02	22,61	24,12	19,94	18,94	16,84	13,91	11,62	9,07	6,53	2,87
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	78,36	73,25	68,19	63,18	58,23	48,53	39,16	30,17	21,73	13,94	5,31
m in kg	80	62,35	58,28	54,32	50,32	46,42	38,79	31,47	24,42	17,76	11,50	5,45
m in kg	250	40,05	37,62	35,27	32,34	30,40	25,79	21,09	16,97	12,90	9,81	4,61
m in kg	500	31,02	29,42	26,65	27,39	22,69	21,11	17,31	14,16	11,27	8,51	3,64
m in kg	625	27,96	25,69	28,21	22,43	23,20	20,48	16,67	14,01	11,21	7,82	3,34
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	112,88	105,29	97,77	90,34	83,00	68,68	54,95	41,86	29,68	18,85	5,44
m in kg	80	88,42	82,43	76,54	70,77	65,04	53,86	43,10	32,85	23,34	14,72	5,55
m in kg	250	52,97	49,65	45,28	41,91	38,42	32,12	25,46	19,50	14,37	10,02	5,37
m in kg	500	37,48	38,51	32,93	32,57	29,79	25,01	21,86	16,58	13,38	10,38	4,46
m in kg	625	35,45	35,73	31,73	28,78	29,79	21,95	19,00	16,60	13,34	9,97	4,12

Tabelle 5.8: Parameterstudie, Punktzug 5kN, heben, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

## 5.2.3 Prospektzug 5kN

Seillänge in m	50	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,22	1,17	1,11	1,06	1,00	0,95	0,89	0,83	0,72	0,60	0,36
m in kg	80	1,33	1,28	1,22	1,16	1,10	1,04	0,98	0,92	0,79	0,67	0,41
m in kg	250	1,80	1,73	1,65	1,57	1,50	1,42	1,35	1,27	1,12	0,96	0,63
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,44</b>	<b>2,34</b>	<b>2,24</b>	<b>2,16</b>	<b>2,07</b>	<b>1,97</b>	<b>1,88</b>	<b>1,78</b>	<b>1,58</b>	<b>1,38</b>	<b>0,94</b>
m in kg	625	2,75	2,64	2,54	2,44	2,35	2,24	2,14	2,03	1,81	1,59	1,10
Seillänge in m	40	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,31	1,25	1,19	1,13	1,08	1,02	0,96	0,89	0,77	0,64	0,36
m in kg	80	1,43	1,37	1,31	1,25	1,18	1,12	1,05	0,98	0,85	0,71	0,41
m in kg	250	1,95	1,87	1,79	1,71	1,62	1,53	1,45	1,37	1,20	1,02	0,64
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,65</b>	<b>2,55</b>	<b>2,44</b>	<b>2,33</b>	<b>2,23</b>	<b>2,13</b>	<b>2,03</b>	<b>1,92</b>	<b>1,70</b>	<b>1,47</b>	<b>0,96</b>
m in kg	625	2,98	2,87	2,75	2,64	2,54	2,43	2,31	2,19	1,95	1,70	1,12
Seillänge in m	30	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,42	1,37	1,31	1,24	1,18	1,12	1,05	0,98	0,84	0,69	0,36
m in kg	80	1,58	1,51	1,44	1,37	1,31	1,23	1,16	1,08	0,93	0,77	0,42
m in kg	250	2,17	2,08	1,99	1,90	1,80	1,70	1,61	1,51	1,32	1,11	0,65
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,97</b>	<b>2,85</b>	<b>2,73</b>	<b>2,60</b>	<b>2,48</b>	<b>2,37</b>	<b>2,25</b>	<b>2,13</b>	<b>1,88</b>	<b>1,61</b>	<b>0,98</b>
m in kg	625	3,35	3,21	3,08	2,94	2,81	2,70	2,57	2,44	2,16	1,86	1,14
Seillänge in m	25	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,50	1,44	1,38	1,32	1,25	1,18	1,11	1,04	0,89	0,73	0,36
m in kg	80	1,67	1,60	1,53	1,46	1,39	1,31	1,24	1,16	0,99	0,82	0,42
m in kg	250	2,32	2,23	2,13	2,03	1,93	1,83	1,72	1,61	1,40	1,18	0,65
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,19</b>	<b>3,06</b>	<b>2,93</b>	<b>2,80</b>	<b>2,66</b>	<b>2,53</b>	<b>2,41</b>	<b>2,28</b>	<b>2,01</b>	<b>1,72</b>	<b>0,99</b>
m in kg	625	3,60	3,46	3,31	3,17	3,01	2,88	2,75	2,61	2,31	1,99	1,16
Seillänge in m	20	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,59	1,53	1,47	1,41	1,34	1,27	1,20	1,12	0,96	0,79	0,35
m in kg	80	1,77	1,71	1,64	1,57	1,49	1,41	1,33	1,25	1,07	0,88	0,41
m in kg	250	2,50	2,41	2,31	2,20	2,10	1,99	1,87	1,75	1,52	1,28	0,65
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,47</b>	<b>3,34</b>	<b>3,20</b>	<b>3,06</b>	<b>2,91</b>	<b>2,76</b>	<b>2,61</b>	<b>2,47</b>	<b>2,18</b>	<b>1,87</b>	<b>1,00</b>
m in kg	625	3,93	3,78	3,63	3,47	3,30	3,13	2,97	2,84	2,51	2,16	1,18
Seillänge in m	15	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,67	1,62	1,56	1,50	1,44	1,37	1,30	1,22	1,06	0,87	0,35
m in kg	80	1,88	1,82	1,76	1,69	1,62	1,54	1,46	1,37	1,18	0,97	0,40
m in kg	250	2,71	2,62	2,53	2,42	2,32	2,20	2,08	1,95	1,68	1,41	0,64
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,82</b>	<b>3,70</b>	<b>3,56</b>	<b>3,41</b>	<b>3,26</b>	<b>3,09</b>	<b>2,93</b>	<b>2,75</b>	<b>2,43</b>	<b>2,08</b>	<b>1,00</b>
m in kg	625	4,34	4,20	4,05	3,88	3,70	3,52	3,33	3,14	2,80	2,41	1,18
Seillänge in m	10	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,67	1,64	1,61	1,57	1,52	1,47	1,41	1,34	1,18	0,99	0,37
m in kg	80	1,90	1,87	1,83	1,78	1,73	1,66	1,59	1,51	1,33	1,11	0,41
m in kg	250	2,85	2,80	2,73	2,65	2,56	2,46	2,35	2,22	1,95	1,63	0,59
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>4,06</b>	<b>4,02</b>	<b>3,94</b>	<b>3,83</b>	<b>3,70</b>	<b>3,55</b>	<b>3,38</b>	<b>3,20</b>	<b>2,80</b>	<b>2,39</b>	<b>0,95</b>
m in kg	625	4,57	4,57	4,50	4,39	4,24	4,07	3,88	3,67	3,22	2,79	1,14
Seillänge in m	5	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,47	1,45	1,43	1,40	1,38	1,35	1,33	1,30	1,23	1,10	0,38
m in kg	80	1,65	1,64	1,62	1,60	1,57	1,55	1,52	1,50	1,41	1,26	0,42
m in kg	250	2,41	2,41	2,40	2,40	2,40	2,38	2,35	2,30	2,17	1,94	0,63
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,45</b>	<b>3,27</b>	<b>2,93</b>	<b>1,04</b>
m in kg	625	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,99	3,80	3,42	1,20

Tabelle 5.9: Parameterstudie, Prospektzug 5kN, senken,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrensgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,90	0,85	0,79	0,74	0,69	0,64	0,59	0,54	0,46	0,42	0,42
m in kg	80	0,98	0,93	0,87	0,82	0,76	0,71	0,66	0,61	0,52	0,48	0,48
m in kg	250	1,34	1,28	1,21	1,14	1,07	1,00	0,93	0,87	0,79	0,74	0,73
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>1,85</b>	<b>1,76</b>	<b>1,68</b>	<b>1,59</b>	<b>1,50</b>	<b>1,41</b>	<b>1,34</b>	<b>1,28</b>	<b>1,17</b>	<b>1,11</b>	<b>1,07</b>
m in kg	625	2,10	2,00	1,90	1,81	1,71	1,62	1,54	1,48	1,36	1,30	1,24
Seillänge in m	40	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,99	0,93	0,88	0,82	0,76	0,71	0,65	0,60	0,50	0,43	0,42
m in kg	80	1,09	1,03	0,96	0,91	0,84	0,78	0,72	0,67	0,56	0,49	0,48
m in kg	250	1,48	1,41	1,33	1,25	1,18	1,10	1,03	0,95	0,83	0,75	0,74
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,03</b>	<b>1,94</b>	<b>1,84</b>	<b>1,74</b>	<b>1,65</b>	<b>1,55</b>	<b>1,45</b>	<b>1,37</b>	<b>1,24</b>	<b>1,12</b>	<b>1,09</b>
m in kg	625	2,31	2,19	2,09	1,98	1,88	1,77	1,66	1,58	1,43	1,31	1,26
Seillänge in m	30	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,13	1,06	0,99	0,93	0,86	0,80	0,74	0,67	0,55	0,46	0,43
m in kg	80	1,23	1,16	1,09	1,02	0,95	0,88	0,82	0,75	0,62	0,52	0,49
m in kg	250	1,67	1,58	1,50	1,41	1,32	1,24	1,15	1,07	0,90	0,79	0,74
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,29</b>	<b>2,17</b>	<b>2,06</b>	<b>1,95</b>	<b>1,84</b>	<b>1,74</b>	<b>1,63</b>	<b>1,51</b>	<b>1,33</b>	<b>1,18</b>	<b>1,11</b>
m in kg	625	2,58	2,46	2,34	2,22	2,10	1,98	1,86	1,73	1,54	1,36	1,28
Seillänge in m	25	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,22	1,15	1,08	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,59	0,48	0,43
m in kg	80	1,34	1,26	1,18	1,10	1,03	0,95	0,88	0,80	0,66	0,55	0,49
m in kg	250	1,80	1,70	1,61	1,51	1,42	1,32	1,23	1,14	0,96	0,82	0,74
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,45</b>	<b>2,33</b>	<b>2,21</b>	<b>2,09</b>	<b>1,97</b>	<b>1,85</b>	<b>1,74</b>	<b>1,62</b>	<b>1,40</b>	<b>1,22</b>	<b>1,12</b>
m in kg	625	2,77	2,63	2,50	2,37	2,24	2,11	1,99	1,85	1,62	1,42	1,29
Seillänge in m	20	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,34	1,26	1,18	1,10	1,02	0,94	0,86	0,79	0,64	0,51	0,43
m in kg	80	1,47	1,38	1,29	1,20	1,12	1,04	0,95	0,87	0,72	0,58	0,49
m in kg	250	1,97	1,86	1,75	1,64	1,54	1,43	1,33	1,23	1,03	0,87	0,75
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,66</b>	<b>2,53</b>	<b>2,39</b>	<b>2,26</b>	<b>2,13</b>	<b>2,00</b>	<b>1,87</b>	<b>1,75</b>	<b>1,49</b>	<b>1,29</b>	<b>1,13</b>
m in kg	625	3,00	2,86	2,70	2,56	2,42	2,28	2,14	2,00	1,72	1,49	1,31
Seillänge in m	15	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,52	1,42	1,33	1,23	1,14	1,05	0,96	0,87	0,70	0,55	0,43
m in kg	80	1,65	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15	1,05	0,96	0,78	0,62	0,49
m in kg	250	2,19	2,07	1,94	1,82	1,70	1,57	1,46	1,34	1,12	0,92	0,75
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>2,94</b>	<b>2,79</b>	<b>2,63</b>	<b>2,48</b>	<b>2,33</b>	<b>2,19</b>	<b>2,04</b>	<b>1,90</b>	<b>1,62</b>	<b>1,37</b>	<b>1,13</b>
m in kg	625	3,31	3,14	2,97	2,81	2,64	2,49	2,33	2,18	1,87	1,59	1,32
Seillänge in m	10	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,81	1,69	1,57	1,45	1,34	1,22	1,11	1,00	0,79	0,60	0,43
m in kg	80	1,96	1,83	1,70	1,57	1,45	1,33	1,21	1,09	0,87	0,67	0,49
m in kg	250	2,55	2,39	2,23	2,07	1,92	1,77	1,63	1,49	1,23	1,00	0,75
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>3,36</b>	<b>3,17</b>	<b>2,97</b>	<b>2,79</b>	<b>2,61</b>	<b>2,43</b>	<b>2,25</b>	<b>2,09</b>	<b>1,78</b>	<b>1,50</b>	<b>1,14</b>
m in kg	625	3,76	3,55	3,36	3,15	2,95	2,76	2,57	2,40	2,07	1,75	1,33
Seillänge in m	5	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	2,50	2,32	2,15	1,97	1,80	1,63	1,46	1,30	0,99	0,71	0,44
m in kg	80	2,68	2,49	2,30	2,11	1,92	1,74	1,56	1,39	1,07	0,77	0,50
m in kg	250	3,33	3,09	2,85	2,62	2,40	2,17	1,96	1,75	1,37	1,06	0,76
<b>m in kg</b>	<b>500</b>	<b>4,15</b>	<b>3,85</b>	<b>3,57</b>	<b>3,29</b>	<b>3,02</b>	<b>2,76</b>	<b>2,52</b>	<b>2,28</b>	<b>1,88</b>	<b>1,61</b>	<b>1,14</b>
m in kg	625	4,56	4,24	3,94	3,65	3,36	3,09	2,83	2,59	2,18	1,92	1,33

Tabelle 5.10: Parameterstudie, Prospektzug 5kN, heben,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrensgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	26,94	25,36	23,74	22,11	20,44	18,78	17,08	15,34	11,82	8,31	2,20
m in kg	80	25,54	24,03	22,48	20,92	19,36	17,75	16,15	14,51	11,23	7,91	2,23
m in kg	250	21,68	20,38	19,05	17,72	16,37	15,05	13,76	12,42	9,70	6,89	2,27
m in kg	500	18,61	17,48	16,35	15,32	14,28	13,19	12,06	10,93	8,60	6,23	2,08
m in kg	625	17,61	16,51	15,57	14,61	13,62	12,59	11,53	10,47	8,28	6,07	1,99
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	29,53	27,84	26,13	24,39	22,63	20,82	18,98	17,11	13,25	9,38	2,25
m in kg	80	28,19	26,57	24,91	23,24	21,55	19,81	18,06	16,27	12,64	8,99	2,28
m in kg	250	24,33	22,92	21,45	20,00	18,51	17,00	15,57	14,11	11,10	7,97	2,37
m in kg	500	21,12	19,88	18,62	17,36	16,24	15,05	13,83	12,57	9,97	7,31	2,26
m in kg	625	20,01	18,85	17,66	16,61	15,54	14,43	13,28	12,09	9,64	7,15	2,18
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,13	31,37	29,56	27,68	25,78	23,83	21,81	19,73	15,44	11,02	2,32
m in kg	80	31,91	30,20	28,42	26,59	24,76	22,85	20,90	18,91	14,79	10,64	2,35
m in kg	250	28,15	26,60	24,99	23,35	21,69	19,99	18,26	16,59	13,22	9,64	2,44
m in kg	500	24,81	23,42	21,99	20,54	19,07	17,78	16,44	15,04	12,07	8,98	2,47
m in kg	625	23,66	22,29	20,96	19,57	18,30	17,13	15,85	14,52	11,72	8,82	2,41
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	35,41	33,67	31,82	29,90	27,92	25,89	23,79	21,59	17,03	12,20	2,37
m in kg	80	34,31	32,58	30,76	28,87	26,94	24,96	22,90	20,79	16,37	11,84	2,39
m in kg	250	30,76	29,10	27,44	25,70	23,93	22,10	20,26	18,35	14,72	10,87	2,48
m in kg	500	27,38	25,91	24,37	22,83	21,23	19,62	18,25	16,78	13,59	10,21	2,55
m in kg	625	26,17	24,77	23,29	21,82	20,30	18,94	17,65	16,27	13,25	10,06	2,54
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	38,03	36,28	34,47	32,57	30,58	28,48	26,29	24,01	19,13	13,87	2,42
m in kg	80	37,12	35,39	33,58	31,68	29,70	27,62	25,48	23,25	18,50	13,45	2,45
m in kg	250	33,95	32,28	30,54	28,72	26,85	24,91	22,90	20,86	16,72	12,55	2,52
m in kg	500	30,67	29,15	27,53	25,85	24,14	22,37	20,57	19,03	15,64	11,93	2,59
m in kg	625	29,47	27,97	26,41	24,83	23,17	21,49	19,89	18,51	15,30	11,78	2,62
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	40,47	38,93	37,32	35,54	33,64	31,59	29,44	27,10	22,04	16,31	2,49
m in kg	80	39,92	38,40	36,71	34,89	32,98	30,95	28,78	26,47	21,47	15,86	2,51
m in kg	250	37,61	36,06	34,39	32,57	30,66	28,64	26,53	24,32	19,64	14,92	2,59
m in kg	500	34,74	33,28	31,69	29,98	28,14	26,26	24,29	22,25	18,48	14,42	2,65
m in kg	625	33,57	32,18	30,63	28,96	27,19	25,37	23,47	21,51	18,18	14,29	2,67
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	40,51	39,73	38,69	37,45	36,00	34,41	32,60	30,60	25,81	19,91	2,58
m in kg	80	40,64	39,81	38,70	37,38	35,89	34,21	32,38	30,30	25,49	19,61	2,60
m in kg	250	39,98	39,07	37,92	36,55	34,95	33,17	31,19	29,07	24,22	18,61	2,67
m in kg	500	37,53	37,04	36,12	34,84	33,32	31,54	29,60	27,48	22,85	18,07	2,72
m in kg	625	35,86	35,81	35,14	34,03	32,57	30,83	28,91	26,85	22,33	18,05	2,74
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	34,56	33,91	33,19	32,45	31,72	31,02	30,30	29,50	27,28	23,49	2,75
m in kg	80	33,96	33,55	33,05	32,47	31,86	31,24	30,57	29,80	27,51	23,67	2,77
m in kg	250	32,25	32,23	32,22	32,20	32,11	31,79	31,24	30,48	28,13	24,16	2,81
m in kg	500	31,00	30,99	30,98	30,97	30,95	30,95	30,92	30,41	28,26	24,37	2,84
m in kg	625	30,17	30,15	30,15	30,13	30,13	30,12	30,11	30,03	28,14	24,39	2,85

Tabelle 5.11: Parameterstudie, Prospektzug 5kN, senken, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	17,23	15,67	14,10	12,56	11,02	9,81	9,81	9,81	9,81	7,02	2,18
m in kg	80	16,25	14,79	13,31	11,87	10,42	9,81	9,81	9,81	9,81	6,60	2,21
m in kg	250	13,69	12,48	11,30	10,07	9,81	9,81	9,81	9,81	8,18	5,53	2,18
m in kg	500	11,78	10,72	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,17	6,94	4,70	1,95
m in kg	625	11,14	10,19	9,81	9,81	9,81	9,81	9,66	8,62	6,53	4,41	1,86
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	20,13	18,36	16,63	14,92	13,25	11,53	9,86	9,81	9,81	7,67	2,23
m in kg	80	19,00	17,37	15,75	14,18	12,55	10,96	9,81	9,81	9,81	7,25	2,26
m in kg	250	16,15	14,76	13,42	12,09	10,78	9,81	9,81	9,81	9,08	6,15	2,30
m in kg	500	13,89	12,79	11,65	10,52	9,81	9,81	9,81	9,81	7,77	5,28	2,11
m in kg	625	13,24	12,10	11,08	9,99	9,81	9,81	9,81	9,65	7,32	4,97	2,03
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	24,15	22,17	20,15	18,19	16,23	14,34	12,44	10,52	9,81	8,59	2,29
m in kg	80	22,88	21,00	19,11	17,27	15,47	13,62	11,83	10,05	9,81	8,17	2,32
m in kg	250	19,45	17,88	16,38	14,85	13,29	11,81	10,33	9,81	9,81	7,03	2,41
m in kg	500	16,86	15,51	14,26	12,96	11,69	10,43	9,81	9,81	8,95	6,12	2,32
m in kg	625	15,96	14,79	13,54	12,36	11,15	9,94	9,81	9,81	8,47	5,79	2,24
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	26,92	24,74	22,61	20,41	18,26	16,17	14,09	12,04	9,81	9,21	2,33
m in kg	80	25,58	23,46	21,39	19,38	17,38	15,39	13,42	11,50	9,81	8,76	2,36
m in kg	250	21,68	19,99	18,28	16,62	14,97	13,33	11,73	10,11	9,81	7,63	2,44
m in kg	500	18,74	17,37	15,96	14,56	13,21	11,80	10,43	9,81	9,76	6,71	2,43
m in kg	625	17,86	16,47	15,21	13,88	12,58	11,29	10,02	9,81	9,27	6,37	2,36
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	30,69	28,22	25,72	23,30	20,93	18,54	16,21	13,92	9,81	9,81	2,37
m in kg	80	29,02	26,67	24,38	22,11	19,89	17,66	15,45	13,30	9,81	9,51	2,40
m in kg	250	24,57	22,66	20,77	18,89	17,05	15,22	13,47	11,67	9,81	8,37	2,48
m in kg	500	21,24	19,63	18,08	16,54	15,04	13,49	12,00	10,54	9,81	7,48	2,54
m in kg	625	20,11	18,71	17,21	15,78	14,36	12,95	11,55	10,16	9,81	7,14	2,50
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	35,94	33,08	30,15	27,36	24,55	21,80	19,08	16,50	11,38	9,81	2,42
m in kg	80	33,93	31,22	28,54	25,93	23,24	20,66	18,13	15,65	10,89	9,81	2,45
m in kg	250	28,54	26,32	24,11	21,93	19,83	17,70	15,63	13,63	9,81	9,31	2,53
m in kg	500	24,49	22,67	20,89	19,11	17,36	15,68	13,97	12,32	9,81	8,51	2,60
m in kg	625	23,26	21,57	19,86	18,23	16,61	15,04	13,47	11,94	9,81	8,20	2,62
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	44,65	41,03	37,44	33,93	30,44	26,96	23,57	20,30	14,06	9,81	2,49
m in kg	80	42,02	38,59	35,21	31,87	28,57	25,34	22,20	19,13	13,32	9,81	2,51
m in kg	250	34,69	31,90	29,21	26,43	23,77	21,16	18,73	16,26	11,64	9,81	2,58
m in kg	500	29,36	27,08	24,85	22,68	20,61	18,47	16,47	14,55	10,96	9,81	2,65
m in kg	625	27,72	25,68	23,71	21,68	19,66	17,74	15,91	14,19	10,86	9,75	2,67
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	65,64	60,20	54,86	49,55	44,34	39,23	34,23	29,33	20,04	11,54	2,57
m in kg	80	61,17	56,07	51,01	46,04	41,15	36,34	31,64	27,08	18,42	10,57	2,60
m in kg	250	48,34	44,15	40,04	36,04	32,09	28,17	24,40	20,78	14,17	9,81	2,66
m in kg	500	38,57	35,10	31,79	28,55	25,42	22,40	19,51	16,78	12,11	9,81	2,71
m in kg	625	35,70	32,59	29,57	26,61	23,75	21,01	18,51	16,02	11,99	9,81	2,73

Tabelle 5.12: Parameterstudie, Prospektzug 5kN, heben, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

## 5.2.4 Prospektzug 10kN

Seillänge in m	50	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,83	0,80	0,77	0,74	0,70	0,67	0,63	0,59	0,51	0,42	0,21
m in kg	80	0,92	0,89	0,86	0,82	0,78	0,74	0,70	0,65	0,56	0,47	0,24
m in kg	500	1,77	1,71	1,64	1,57	1,49	1,42	1,34	1,27	1,12	0,97	0,58
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,65</b>	<b>2,56</b>	<b>2,46</b>	<b>2,36</b>	<b>2,26</b>	<b>2,15</b>	<b>2,06</b>	<b>1,98</b>	<b>1,79</b>	<b>1,57</b>	<b>0,99</b>
m in kg	1250	3,06	2,97	2,85	2,74	2,62	2,51	2,39	2,32	2,13	1,89	1,19
Seillänge in m	40	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,87	0,85	0,82	0,78	0,75	0,71	0,67	0,63	0,54	0,45	0,21
m in kg	80	0,97	0,94	0,91	0,87	0,83	0,79	0,75	0,70	0,60	0,50	0,24
m in kg	500	1,91	1,85	1,77	1,70	1,62	1,54	1,46	1,37	1,21	1,04	0,58
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,87</b>	<b>2,77</b>	<b>2,68</b>	<b>2,57</b>	<b>2,46</b>	<b>2,34</b>	<b>2,22</b>	<b>2,12</b>	<b>1,93</b>	<b>1,69</b>	<b>1,00</b>
m in kg	1250	3,32	3,22	3,10	2,98	2,86	2,73	2,59	2,46	2,30	2,04	1,20
Seillänge in m	30	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,90	0,89	0,86	0,83	0,80	0,76	0,72	0,68	0,59	0,49	0,22
m in kg	80	1,02	1,00	0,97	0,93	0,90	0,85	0,81	0,76	0,66	0,54	0,25
m in kg	500	2,08	2,02	1,95	1,88	1,80	1,71	1,62	1,52	1,33	1,14	0,57
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,13</b>	<b>3,06</b>	<b>2,97</b>	<b>2,86</b>	<b>2,74</b>	<b>2,62</b>	<b>2,49</b>	<b>2,35</b>	<b>2,13</b>	<b>1,88</b>	<b>1,00</b>
m in kg	1250	3,52	3,52	3,44	3,33	3,20	3,05	2,90	2,75	2,46	2,26	1,21
Seillänge in m	25	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,90	0,89	0,88	0,85	0,82	0,79	0,75	0,71	0,62	0,51	0,22
m in kg	80	1,03	1,01	0,99	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,69	0,57	0,25
m in kg	500	2,16	2,11	2,06	1,99	1,91	1,82	1,73	1,63	1,41	1,22	0,56
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,18</b>	<b>3,19</b>	<b>3,13</b>	<b>3,05</b>	<b>2,93</b>	<b>2,81</b>	<b>2,67</b>	<b>2,52</b>	<b>2,23</b>	<b>2,00</b>	<b>0,99</b>
m in kg	1250	3,58	3,56	3,58	3,54	3,42	3,28	3,12	2,96	2,62	2,41	1,20
Seillänge in m	20	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,88	0,88	0,88	0,86	0,84	0,81	0,78	0,74	0,65	0,55	0,22
m in kg	80	1,01	1,01	1,00	0,98	0,95	0,92	0,88	0,84	0,74	0,61	0,25
m in kg	500	2,18	2,18	2,15	2,10	2,03	1,95	1,86	1,76	1,53	1,31	0,55
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,22</b>	<b>3,21</b>	<b>3,21</b>	<b>3,21</b>	<b>3,15</b>	<b>3,04</b>	<b>2,90</b>	<b>2,75</b>	<b>2,42</b>	<b>2,17</b>	<b>0,97</b>
m in kg	1250	3,61	3,63	3,62	3,62	3,62	3,55	3,40	3,23	2,86	2,56	1,19
Seillänge in m	15	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,81	0,79	0,76	0,69	0,59	0,22
m in kg	80	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87	0,78	0,66	0,25
m in kg	500	2,15	2,15	2,15	2,15	2,12	2,07	2,00	1,91	1,69	1,43	0,57
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,21</b>	<b>3,21</b>	<b>3,22</b>	<b>3,22</b>	<b>3,22</b>	<b>3,22</b>	<b>3,16</b>	<b>3,04</b>	<b>2,71</b>	<b>2,32</b>	<b>0,92</b>
m in kg	1250	3,66	3,66	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,58	3,20	2,76	1,14
Seillänge in m	10	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,75	0,74	0,73	0,69	0,62	0,22
m in kg	80	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,84	0,79	0,71	0,25
m in kg	500	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	1,99	1,85	1,62	0,60
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,14</b>	<b>3,14</b>	<b>3,14</b>	<b>3,13</b>	<b>3,14</b>	<b>3,13</b>	<b>3,13</b>	<b>3,14</b>	<b>3,04</b>	<b>2,68</b>	<b>0,96</b>
m in kg	1250	3,59	3,59	3,59	3,59	3,60	3,59	3,60	3,60	3,59	3,21	1,11
Seillänge in m	5	maximale Verfahrensgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,79	0,79	0,78	0,78	0,76	0,73	0,70	0,67	0,61	0,57	0,23
m in kg	80	0,87	0,87	0,87	0,86	0,84	0,81	0,78	0,75	0,70	0,66	0,26
m in kg	500	1,60	1,60	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,58	0,57
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,61</b>	<b>2,62</b>	<b>2,61</b>	<b>2,60</b>	<b>0,97</b>						
m in kg	1250	3,06	3,07	3,06	3,06	3,06	3,07	3,07	3,06	3,06	3,06	1,08

Tabelle 5.13: Parameterstudie, Prospektzug 10kN, senken,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrensgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,68	0,64	0,60	0,56	0,52	0,48	0,45	0,41	0,34	0,29	0,25
m in kg	80	0,74	0,70	0,66	0,62	0,58	0,54	0,50	0,46	0,38	0,33	0,29
m in kg	500	1,39	1,33	1,26	1,19	1,13	1,06	1,00	0,93	0,82	0,73	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,09</b>	<b>2,02</b>	<b>1,92</b>	<b>1,83</b>	<b>1,73</b>	<b>1,65</b>	<b>1,55</b>	<b>1,48</b>	<b>1,33</b>	<b>1,19</b>	<b>1,10</b>
m in kg	1250	2,44	2,33	2,25	2,12	2,03	1,92	1,83	1,75	1,58	1,41	1,31
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,74	0,70	0,66	0,61	0,57	0,53	0,49	0,45	0,37	0,30	0,25
m in kg	80	0,81	0,77	0,72	0,68	0,63	0,58	0,54	0,50	0,41	0,34	0,29
m in kg	500	1,51	1,44	1,37	1,29	1,22	1,15	1,08	1,01	0,87	0,76	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,28</b>	<b>2,18</b>	<b>2,08</b>	<b>1,98</b>	<b>1,88</b>	<b>1,78</b>	<b>1,68</b>	<b>1,58</b>	<b>1,41</b>	<b>1,24</b>	<b>1,10</b>
m in kg	1250	2,62	2,55	2,41	2,32	2,19	2,08	1,96	1,86	1,67	1,47	1,32
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,84	0,79	0,74	0,69	0,64	0,59	0,54	0,50	0,41	0,32	0,25
m in kg	80	0,92	0,86	0,81	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,45	0,37	0,29
m in kg	500	1,67	1,59	1,51	1,42	1,34	1,26	1,18	1,10	0,95	0,81	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,50</b>	<b>2,40</b>	<b>2,28</b>	<b>2,18</b>	<b>2,06</b>	<b>1,95</b>	<b>1,84</b>	<b>1,73</b>	<b>1,51</b>	<b>1,32</b>	<b>1,10</b>
m in kg	1250	2,93	2,77	2,67	2,53	2,41	2,30	2,16	2,03	1,79	1,56	1,33
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,90	0,85	0,79	0,74	0,68	0,63	0,58	0,53	0,43	0,34	0,25
m in kg	80	0,99	0,93	0,87	0,81	0,75	0,69	0,64	0,58	0,48	0,38	0,29
m in kg	500	1,78	1,69	1,60	1,51	1,42	1,33	1,25	1,16	0,99	0,84	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,65</b>	<b>2,54</b>	<b>2,42</b>	<b>2,29</b>	<b>2,18</b>	<b>2,06</b>	<b>1,95</b>	<b>1,83</b>	<b>1,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,11</b>
m in kg	1250	3,07	2,95	2,80	2,69	2,55	2,42	2,28	2,15	1,88	1,62	1,33
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	0,99	0,93	0,87	0,80	0,74	0,68	0,62	0,57	0,46	0,36	0,25
m in kg	80	1,08	1,01	0,95	0,88	0,81	0,75	0,69	0,63	0,51	0,40	0,29
m in kg	500	1,91	1,81	1,71	1,61	1,51	1,41	1,32	1,23	1,05	0,88	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>2,84</b>	<b>2,70</b>	<b>2,56</b>	<b>2,44</b>	<b>2,31</b>	<b>2,19</b>	<b>2,07</b>	<b>1,94</b>	<b>1,69</b>	<b>1,44</b>	<b>1,11</b>
m in kg	1250	3,27	3,14	3,01	2,85	2,70	2,57	2,43	2,29	1,99	1,70	1,33
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,12	1,05	0,97	0,90	0,83	0,76	0,69	0,63	0,50	0,38	0,25
m in kg	80	1,22	1,14	1,06	0,98	0,90	0,83	0,75	0,68	0,55	0,43	0,29
m in kg	500	2,09	1,97	1,85	1,73	1,62	1,51	1,40	1,30	1,11	0,93	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,06</b>	<b>2,90</b>	<b>2,76</b>	<b>2,61</b>	<b>2,47</b>	<b>2,33</b>	<b>2,20</b>	<b>2,06</b>	<b>1,81</b>	<b>1,54</b>	<b>1,11</b>
m in kg	1250	3,54	3,39	3,20	3,05	2,89	2,74	2,60	2,45	2,16	1,83	1,33
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,35	1,25	1,16	1,07	0,98	0,89	0,80	0,72	0,56	0,42	0,25
m in kg	80	1,45	1,35	1,25	1,15	1,06	0,96	0,87	0,78	0,61	0,46	0,29
m in kg	500	2,35	2,20	2,06	1,90	1,76	1,63	1,50	1,37	1,16	0,98	0,66
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,36</b>	<b>3,17</b>	<b>2,99</b>	<b>2,81</b>	<b>2,64</b>	<b>2,48</b>	<b>2,33</b>	<b>2,19</b>	<b>1,92</b>	<b>1,68</b>	<b>1,11</b>
m in kg	1250	3,89	3,70	3,49	3,30	3,12	2,94	2,77	2,62	2,32	2,01	1,34
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	1,88	1,74	1,61	1,47	1,34	1,21	1,08	0,96	0,73	0,53	0,26
m in kg	80	2,02	1,88	1,73	1,58	1,44	1,30	1,17	1,03	0,79	0,57	0,29
m in kg	500	3,06	2,83	2,61	2,39	2,17	1,96	1,76	1,57	1,23	0,95	0,67
<b>m in kg</b>	<b>1000</b>	<b>3,85</b>	<b>3,55</b>	<b>3,28</b>	<b>3,02</b>	<b>2,75</b>	<b>2,51</b>	<b>2,29</b>	<b>2,09</b>	<b>1,80</b>	<b>1,70</b>	<b>1,11</b>
m in kg	1250	4,32	4,01	3,68	3,42	3,15	2,91	2,69	2,49	2,24	2,15	1,34

Tabelle 5.14: Parameterstudie, Prospektzug 10kN, heben,  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	30,20	28,77	27,29	25,67	23,99	22,22	20,39	18,49	14,50	10,24	1,54
m in kg	80	29,20	27,81	26,32	24,75	23,09	21,37	19,57	17,74	13,88	9,82	1,56
m in kg	500	23,07	21,90	20,61	19,29	17,94	16,54	15,11	13,75	11,07	8,13	1,67
m in kg	1000	19,70	18,70	17,57	16,49	15,33	14,15	13,10	12,27	10,11	7,70	1,73
m in kg	1250	18,58	17,72	16,65	15,63	14,54	13,48	12,36	11,75	9,94	7,72	1,71
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	32,07	30,80	29,33	27,78	26,07	24,29	22,38	20,40	16,18	11,57	1,57
m in kg	80	31,30	29,98	28,54	26,98	25,28	23,52	21,65	19,70	15,59	11,13	1,59
m in kg	500	25,67	24,44	23,14	21,74	20,28	18,77	17,22	15,62	12,69	9,46	1,70
m in kg	1000	22,20	21,09	20,02	18,79	17,55	16,27	14,94	13,81	11,72	9,06	1,75
m in kg	1250	21,03	20,04	19,00	17,88	16,75	15,50	14,27	13,03	11,52	9,09	1,77
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,52	32,68	31,53	30,10	28,54	26,79	24,91	22,92	18,51	13,51	1,61
m in kg	80	33,24	32,26	30,96	29,57	27,96	26,21	24,32	22,32	17,97	13,09	1,63
m in kg	500	28,77	27,68	26,44	25,05	23,54	21,93	20,23	18,46	14,93	11,43	1,73
m in kg	1000	25,04	24,26	23,27	22,05	20,74	19,35	17,87	16,34	13,95	11,09	1,78
m in kg	1250	22,83	22,89	22,12	21,10	19,86	18,53	17,14	15,73	13,06	11,13	1,80
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,53	33,09	32,29	31,16	29,71	28,12	26,33	24,38	19,97	14,82	1,64
m in kg	80	33,56	32,99	32,06	30,78	29,35	27,69	25,87	23,91	19,50	14,43	1,66
m in kg	500	30,22	29,43	28,36	27,07	25,61	24,00	22,25	20,40	16,45	12,78	1,75
m in kg	1000	25,63	25,70	25,08	24,11	22,87	21,46	19,92	18,30	15,06	12,52	1,80
m in kg	1250	23,44	23,28	23,39	23,01	21,93	20,62	19,18	17,66	14,47	12,56	1,82
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	32,50	32,49	32,21	31,55	30,52	29,16	27,59	25,81	21,63	16,45	1,68
m in kg	80	32,74	32,71	32,35	31,58	30,42	29,00	27,36	25,55	21,28	16,12	1,69
m in kg	500	30,71	30,66	30,07	29,11	27,88	26,40	24,71	22,83	18,68	14,47	1,78
m in kg	1000	26,00	25,90	25,96	25,94	25,24	24,00	22,52	20,84	17,17	14,32	1,82
m in kg	1250	23,70	23,84	23,80	23,76	23,78	23,13	21,78	20,20	16,74	13,96	1,84
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	30,41	30,41	30,40	30,33	29,91	29,14	28,05	26,68	23,16	18,33	1,72
m in kg	80	30,78	30,77	30,77	30,70	30,25	29,40	28,19	26,75	23,08	18,15	1,73
m in kg	500	30,03	30,02	30,01	30,04	29,58	28,63	27,29	25,64	21,57	16,73	1,81
m in kg	1000	25,96	25,97	26,01	26,02	26,04	26,07	25,42	24,05	20,32	15,98	1,85
m in kg	1250	24,13	24,13	24,03	24,05	24,09	24,11	24,08	23,39	19,92	15,82	1,86
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	26,93	26,92	26,92	26,91	26,76	26,42	25,90	25,24	23,31	19,83	1,77
m in kg	80	27,04	27,03	27,02	27,02	27,01	26,81	26,37	25,70	23,60	19,98	1,78
m in kg	500	27,73	27,71	27,72	27,72	27,72	27,72	27,71	27,15	24,49	20,21	1,85
m in kg	1000	25,15	25,13	25,11	25,07	25,12	25,11	25,11	25,11	24,07	20,03	1,88
m in kg	1250	23,47	23,51	23,51	23,49	23,58	23,54	23,57	23,58	23,56	19,96	1,89
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	27,88	27,89	27,87	27,43	26,48	25,14	23,62	22,15	19,67	17,73	1,87
m in kg	80	27,04	27,05	27,04	26,64	25,78	24,57	23,18	21,83	19,63	17,90	1,87
m in kg	500	19,83	19,81	19,80	19,78	19,76	19,75	19,73	19,72	19,69	19,45	1,91
m in kg	1000	19,28	19,32	19,27	19,28	19,26	19,26	19,24	19,24	19,22	19,21	1,93
m in kg	1250	18,61	18,71	18,60	18,62	18,63	18,65	18,64	18,64	18,63	18,61	1,94

Tabelle 5.15: Parameterstudie, Prospektzug 10kN, senken, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	22,68	20,75	18,89	17,05	15,22	13,41	11,68	9,89	9,81	8,40	1,53
m in kg	80	21,50	19,76	17,97	16,23	14,52	12,82	11,17	9,81	9,81	7,97	1,55
m in kg	500	16,02	14,80	13,55	12,36	11,16	9,92	9,81	9,81	8,67	5,91	1,66
m in kg	1000	13,53	12,67	11,56	10,62	9,81	9,81	9,81	9,48	7,20	4,88	1,70
m in kg	1250	12,85	11,82	11,09	9,88	9,81	9,81	9,81	8,84	6,71	4,53	1,65
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	25,84	23,76	21,68	19,61	17,58	15,62	13,60	11,69	9,81	9,14	1,56
m in kg	80	24,58	22,59	20,61	18,69	16,81	14,87	13,01	11,18	9,81	8,69	1,58
m in kg	500	18,26	16,89	15,55	14,20	12,86	11,56	10,21	9,81	9,60	6,59	1,69
m in kg	1000	15,62	14,46	13,36	12,22	11,19	10,00	9,81	9,81	8,07	5,50	1,74
m in kg	1250	14,56	13,82	12,58	11,73	10,49	9,81	9,81	9,81	7,54	5,11	1,74
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	30,45	28,04	25,57	23,15	20,81	18,50	16,21	13,99	9,81	9,81	1,60
m in kg	80	28,87	26,55	24,34	22,04	19,82	17,63	15,50	13,40	9,81	9,64	1,61
m in kg	500	21,26	19,72	18,15	16,60	15,08	13,60	12,13	10,70	9,81	7,52	1,72
m in kg	1000	18,08	16,92	15,57	14,46	13,19	11,96	10,73	9,81	9,28	6,39	1,77
m in kg	1250	17,42	15,91	14,99	13,70	12,60	11,50	10,27	9,81	8,73	5,95	1,79
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	33,63	30,92	28,23	25,59	23,01	20,46	17,95	15,52	10,84	9,81	1,62
m in kg	80	31,83	29,30	26,79	24,31	21,86	19,46	17,12	14,81	10,42	9,81	1,64
m in kg	500	23,23	21,49	19,81	18,14	16,49	14,88	13,34	11,73	9,81	8,10	1,73
m in kg	1000	19,65	18,44	17,11	15,70	14,44	13,15	11,86	10,57	9,81	7,02	1,79
m in kg	1250	18,73	17,59	16,20	15,19	13,87	12,62	11,38	10,14	9,54	6,56	1,80
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	37,92	34,80	31,78	28,81	25,89	23,01	20,18	17,45	12,24	9,81	1,65
m in kg	80	35,80	32,93	30,13	27,33	24,51	21,80	19,17	16,60	11,71	9,81	1,66
m in kg	500	25,74	23,76	21,87	20,00	18,17	16,38	14,64	12,94	9,81	8,82	1,76
m in kg	1000	21,85	20,21	18,73	17,37	15,97	14,55	13,20	11,84	9,81	7,83	1,80
m in kg	1250	20,58	19,32	18,10	16,61	15,28	14,01	12,75	11,47	9,81	7,36	1,82
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	44,10	40,51	37,00	33,47	30,03	26,66	23,38	20,20	14,14	9,81	1,68
m in kg	80	41,56	38,17	34,82	31,53	28,29	25,14	22,04	19,06	13,42	9,81	1,69
m in kg	500	29,02	26,69	24,48	22,32	20,30	18,17	16,18	14,30	10,77	9,61	1,78
m in kg	1000	24,22	22,49	20,96	19,31	17,69	16,10	14,69	13,18	10,37	8,95	1,82
m in kg	1250	23,06	21,68	19,92	18,46	17,00	15,61	14,29	12,94	10,20	8,51	1,84
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	54,92	50,38	45,91	41,51	37,17	32,94	28,80	24,78	17,26	10,42	1,71
m in kg	80	51,47	47,22	42,99	38,86	34,80	30,79	26,90	23,17	16,10	9,81	1,73
m in kg	500	33,80	31,00	28,35	25,54	22,93	20,50	17,99	15,70	11,64	9,81	1,81
m in kg	1000	27,63	25,46	23,52	21,47	19,63	17,86	16,14	14,53	11,59	9,81	1,85
m in kg	1250	26,27	24,55	22,59	20,83	19,12	17,46	15,90	14,47	11,75	9,81	1,86
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,60	0,40	0,20
m in kg	40	80,64	73,90	67,26	60,73	54,34	48,11	42,05	36,18	25,17	15,43	1,77
m in kg	80	75,62	69,30	63,07	56,95	50,95	45,09	39,37	33,84	23,51	14,25	1,78
m in kg	500	46,92	42,75	38,55	34,47	30,50	26,64	22,91	19,34	12,95	9,02	1,84
m in kg	1000	33,08	29,73	26,70	23,86	20,85	18,13	15,65	13,43	10,28	9,81	1,88
m in kg	1250	30,30	27,38	24,37	21,91	19,44	17,17	15,12	13,28	10,94	10,18	1,89

Tabelle 5.16: Parameterstudie, Prospektzug 10kN, heben, Beschleunigung bei Nennbedingungen für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

## 5.3 Näherungsformeln für die Berechnung der Seilkraft

Eine der Aufgabenstellungen dieser Diplomarbeit war es, Kriterien zu finden bei denen im Dimensionierungsfall:

- der Störfall kritischer ist als der Betriebsfall
- der Störfall beim Heben kritischer ist als beim Senken <sup>2</sup>

Mit Näherungsformeln zur Berechnung der Seilkraft wären beide Punkte erfüllt. Um die Näherungsformeln besser miteinander vergleichbar zu machen, soll mit diesen nicht die Seilkraft, sondern der dimensionslose Parameter  $\varphi_{dyn}$  berechnet werden können (siehe Formel 4.5).

Zur Berechnung der Näherungslösungen werden die  $\varphi_{dyn}$  Werte (z-Achse) für verschiedene Seillängen (y-Achse) und Verfahrgeschwindigkeiten (x-Achse) aufgetragen. An diese Punktwolke wird eine Fläche so angenähert (Method of Least Squares), dass die Abweichungen der Punkte von der Fläche möglichst gering sind.

### 5.3.1 Näherungslösungen für die einzelnen Hubzüge

Die in Abbildung 5.33 bis 5.40 gezeigten Näherungsflächen unterscheiden sich für die Lastfälle Heben und Senken. Beim Heben wird die Punkteschar mit einer Poly13 Funktion angenähert, beim Senken mit einer Poly23 Funktion. Das heißt, die Polynomfunktionen der Näherungsfläche sind in x-Richtung von Ordnung 1 bzw. 2, während die y-Richtung mit Polynomfunktionen 3. Ordnung angenähert wird.

Näherungslösungen fürs Heben:

$$\varphi_{dyn} = f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{11}x \cdot y + p_{02}y^2 + p_{12}x \cdot y^2 + p_{03}y^3 \quad (5.1)$$

Gültig für:  $x_{Punktzug} : [1.8m/s, 0.2m/s]$ ;  $x_{Prospektzug} : [1.5m/s, 0.2m/s]$ ;  $y : [50m, 5m]$

<sup>2</sup>Wobei kritisch in diesem Fall bedeutet, dass die Belastungswerte größer sind (siehe Abschnitt 5.4)

Näherungslösungen fürs Senken:

$$\varphi_{dyn} = f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}x \cdot y + p_{02}y^2 + p_{21}x^2 \cdot y + p_{12}x \cdot y^2 + p_{03}y^3 \quad (5.2)$$

Gültig für:  $x_{Punktzug} : [1.8m/s, 0.4m/s]$ ;  $x_{Prospektzug} : [1.5m/s, 0.4m/s]$ ;  $y : [50m, 10m]$

### 5.3.1.1 Lastfall Not-Aus beim Heben

Hubzug	$p_{00}$	$p_{10}$	$p_{01}$	$p_{11}$	$p_{02}$	$p_{12}$	$p_{03}$
PKZ2.5kN	0.962	2.11	-4.08e-2	-6.46e-2	1.88e-3	7.12e-4	-2.33e-5
PKZ5kN	1.04	1.77	-3.86e-2	-4.80e-2	1.61e-3	5.13e-4	-1.93e-5
PRZ5kN	0.740	2.54	-1.47e-2	-8.28e-2	1.14e-3	9.16e-4	-1.65e-5
PRZ10kN	0.662	2.17	1.76e-2	-5.38e-2	-3.49e-4	5.38e-4	1.44e-6

Tabelle 5.17: Parameter der Näherungslösungen für  $\varphi_{dyn}$ , Heben

### 5.3.1.2 Lastfall Not-Aus beim Senken

Hubzug	$p_{00}$	$p_{10}$	$p_{01}$	$p_{20}$	$p_{11}$	$p_{02}$	$p_{21}$	$p_{12}$	$p_{03}$
PKZ2.5kN	1.94	2.28	-7.04e-2	-0.742	-1.02e-2	1.01e-3	1.82e-2	-5.8e-4	1.66e-6
PKZ5kN	2.10	1.80	-8.08e-2	-0.190	-2.66e-2	1.83e-3	3.37e-3	1.16e-4	-1.38e-5
PRZ5kN	2.31	2.79	-0.101	-0.513	-4.36e-2	2.42e-3	1.22e-2	5.47e-5	-1.77e-5
PRZ10kN	2.40	2.24	-5.53e-2	-1.39	3.56e-2	-2.10e-4	3.12e-2	-1.37e-3	1.83e-5

Tabelle 5.18: Parameter der Näherungslösungen für  $\varphi_{dyn}$ , Senken

## 5.3.2 Graphische Darstellung der Näherungslösungen und deren Fehler

In den folgenden Abbildungen werden die Näherungslösungen und die Abweichung der einzelnen  $\varphi_{dyn}$ -Werte von dieser dargestellt.

Im oberen Diagramm ist jeweils die Näherungsfunktion und die  $\varphi_{dyn}$  Punkteschar abgebildet. In den unteren Diagrammen ist der Residuenplot, also die Abweichung der  $\varphi_{dyn}$ -Werte von der Näherungslösung, zu sehen. Setzt man die Residuen mit den dazugehörigen  $\varphi_{dyn}$ -Werten ins Verhältnis, so ergibt sich, dass die Abweichung der Näherungslösung von den simulierten  $\varphi_{dyn}$ -Werten maximal  $\pm 5\%$  beträgt.

### 5.3.2.1 Punktzug 2.5kN

#### 5.3.2.1.1 Lastfall Not-Aus beim Heben

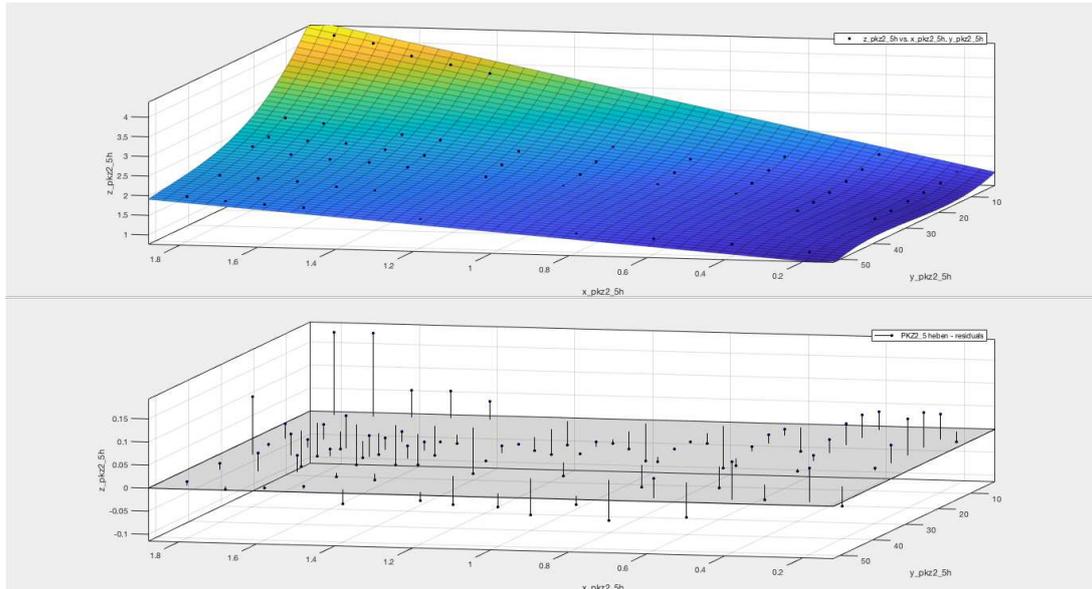


Abbildung 5.33: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 2.5kN, Heben

#### 5.3.2.1.2 Lastfall Not-Aus beim Senken

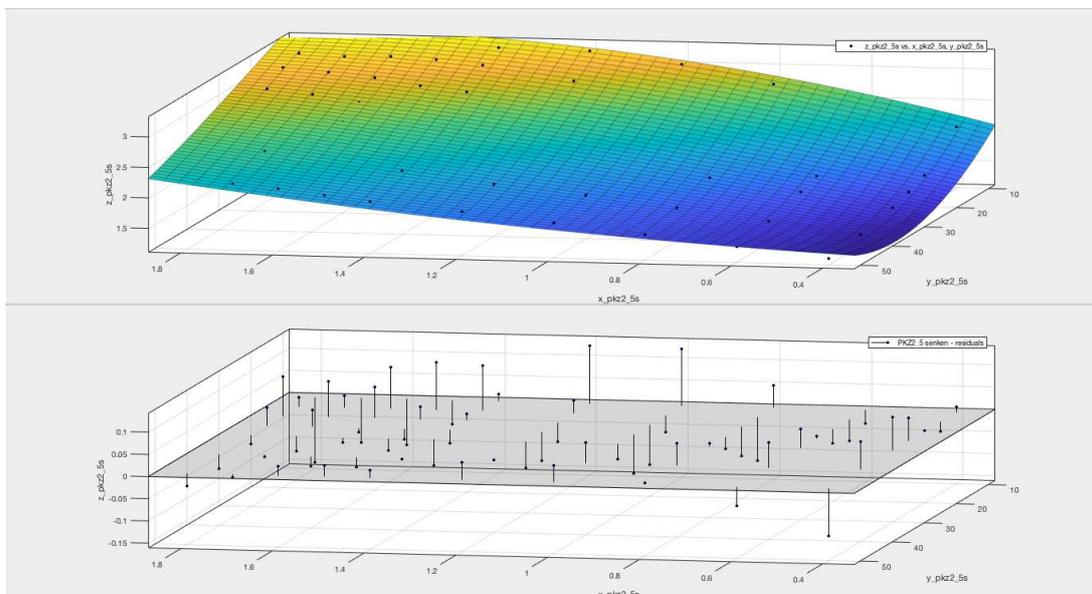
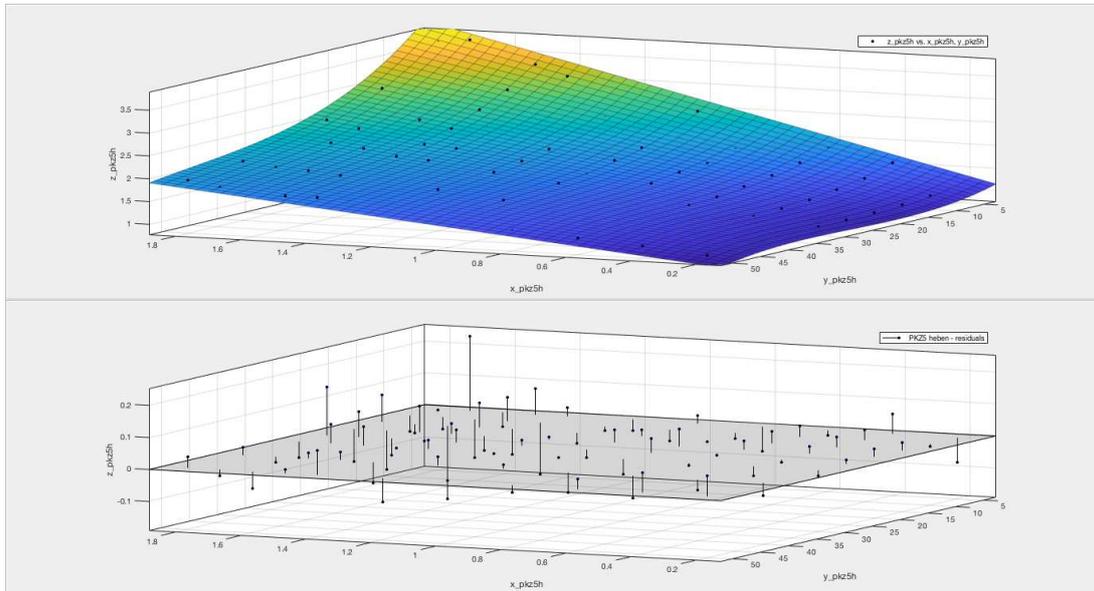


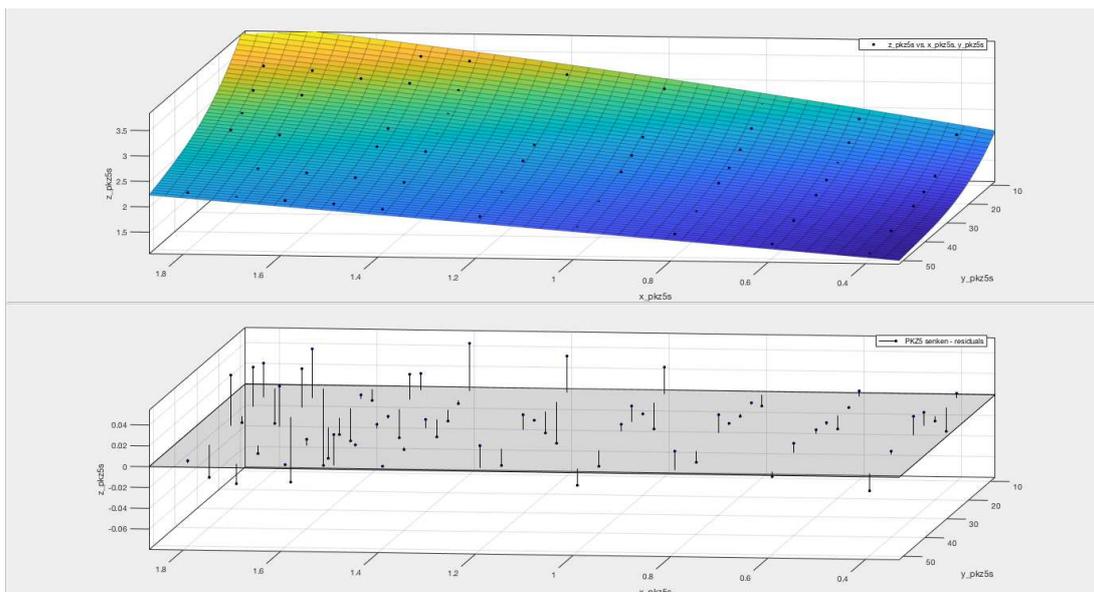
Abbildung 5.34: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 2.5kN, Senken

## 5.3.2.2 Punktzug 5kN

## 5.3.2.2.1 Lastfall Not-Aus beim Heben

Abbildung 5.35: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Heben

## 5.3.2.2.2 Lastfall Not-Aus beim Senken

Abbildung 5.36: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Senken

### 5.3.2.3 Prospektzug 5kN

#### 5.3.2.3.1 Lastfall Not-Aus beim Heben

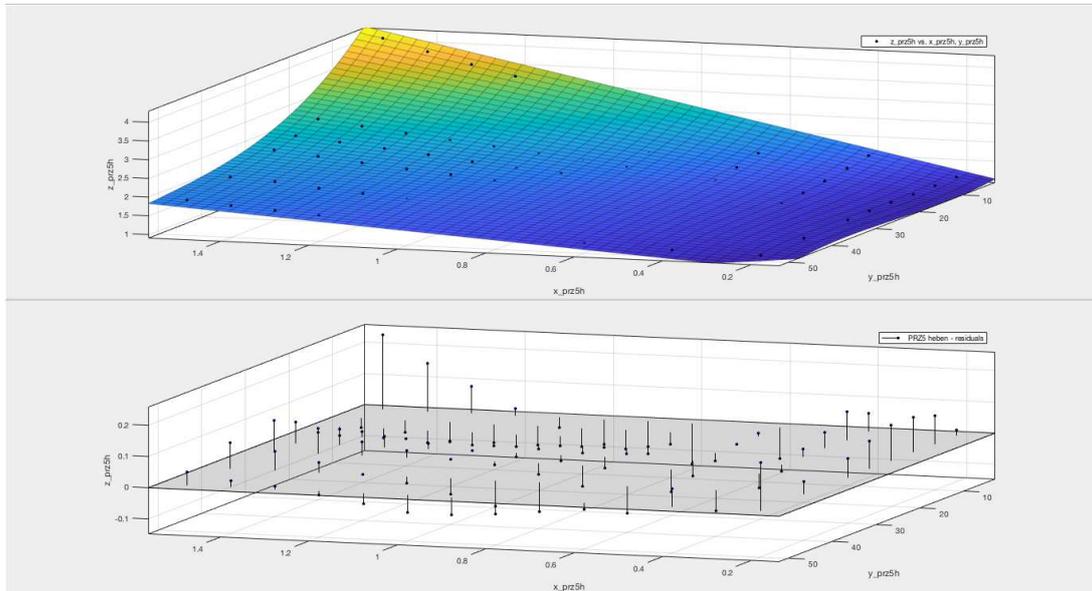


Abbildung 5.37: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Heben

#### 5.3.2.3.2 Lastfall Not-Aus beim Senken

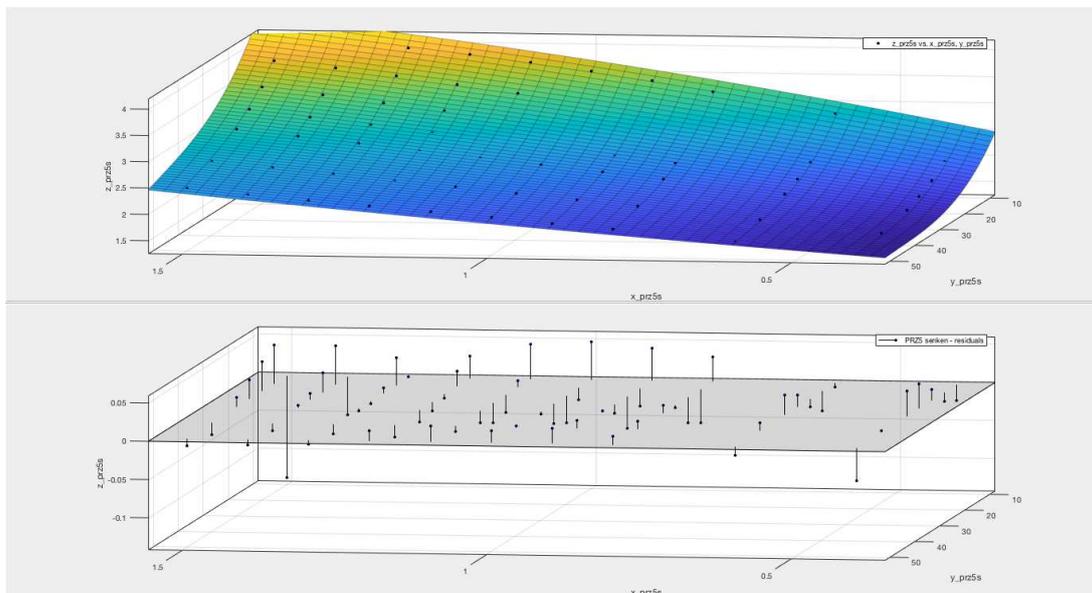
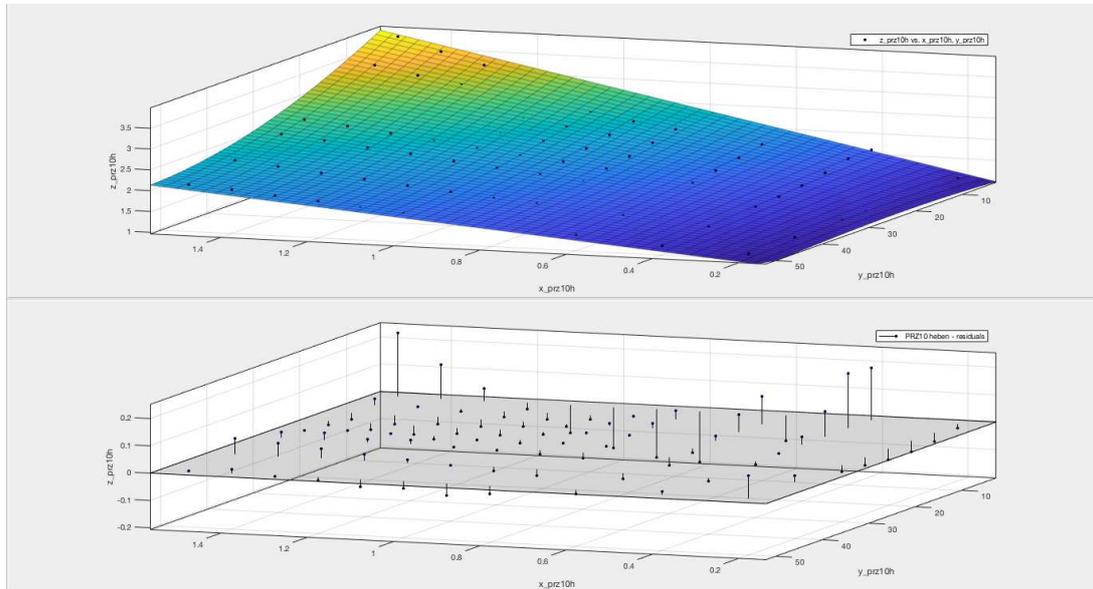


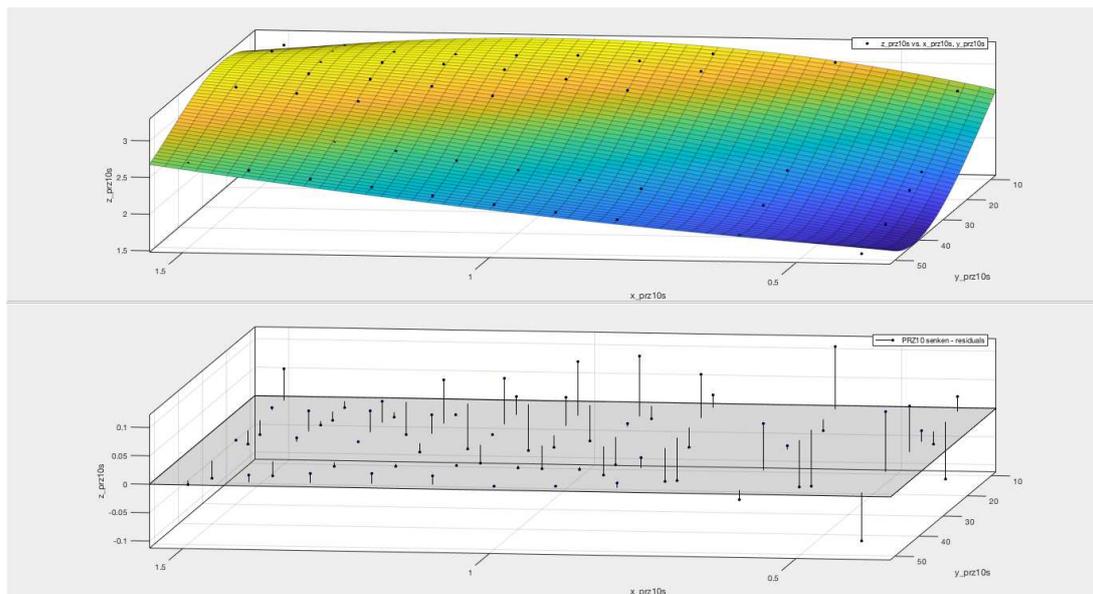
Abbildung 5.38: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Senken

## 5.3.2.4 Prospektzug 10kN

## 5.3.2.4.1 Lastfall Not-Aus beim Heben

Abbildung 5.39: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 10kN, Heben

## 5.3.2.4.2 Lastfall Not-Aus beim Senken

Abbildung 5.40: Näherungslösung  $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 10kN, Senken

### 5.3.3 Allgemeine Näherungslösung

Bisher wurden Näherungslösungen für die einzelnen Hubzüge betrachtet. Für diese stimmen sie auch sehr gut mit den Simulationswerten überein, allerdings lassen sich somit keine Schlüsse auf andere Hubzüge ziehen. Deshalb wird versucht eine allgemein gültige Näherungslösung zu finden.

Da sich die einzelnen Näherungslösungen recht ähnlich sind, werden die Parameter der Näherungslösungen für die einzelnen Hubzüge arithmetisch gemittelt. Aus diesen Mittelwerten ergeben sich dann allgemeine Näherungslösungen, die, da sie für alle 4 betrachteten Hubzüge gültig sind, sehr wahrscheinlich auch auf andere Hubzüge angewendet werden können.

Die Parameter der Näherungslösung für den Lastfall Heben (Formel 5.1) und Lastfall Senken (Formel 5.2) nehmen dann folgende Werte an:

Hubzug	$p_{00}$	$p_{10}$	$p_{01}$	$p_{11}$	$p_{02}$	$p_{12}$	$p_{03}$
Allgemein	0.852	2.15	-1.91e-2	-6.23e-2	1.07e-3	6.70e-4	-1.44e-5

Tabelle 5.19: Parameter der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Heben

Hubzug	$p_{00}$	$p_{10}$	$p_{01}$	$p_{20}$	$p_{11}$	$p_{02}$	$p_{21}$	$p_{12}$	$p_{03}$
Allgemein	2.19	2.28	-7.69e-2	-0.709	-1.12e-2	1.26e-3	1.62e-2	-4.45e-4	-2.89e-6

Tabelle 5.20: Parameter der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Senken

Damit ergeben sich folgende Fehler:

v in m/s	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
l in m											
50	7%	8%	7%	7%	10%	9%	10%	9%	4%	-1%	-2%
40	6%	5%	5%	7%	7%	10%	12%	13%	12%	7%	8%
30	3%	6%	7%	5%	6%	8%	10%	11%	11%	8%	6%
25	8%	7%	5%	7%	7%	7%	8%	9%	9%	7%	3%
20	6%	6%	9%	7%	7%	8%	7%	8%	8%	6%	1%
15	9%	7%	8%	9%	7%	8%	7%	7%	6%	3%	-1%
10	6%	7%	7%	6%	8%	6%	6%	5%	3%	1%	0%
5	-2%	-3%	0%	0%	1%	3%	4%	5%	3%	-2%	1%

Tabelle 5.21: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Heben Punktzug 2.5kN

v in m/s	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
l in m											
50	6%	9%	11%	6%	2%	13%	11%	9%	4%	1%	-1%
40	5%	8%	6%	5%	11%	4%	5%	11%	12%	9%	10%
30	11%	6%	5%	9%	7%	8%	8%	11%	8%	9%	8%
25	4%	6%	12%	10%	8%	8%	11%	6%	7%	8%	5%
20	16%	17%	7%	9%	13%	10%	7%	5%	6%	5%	3%
15	9%	13%	19%	8%	15%	12%	9%	9%	5%	3%	1%
10	14%	13%	16%	9%	18%	11%	11%	9%	4%	1%	1%
5	12%	5%	13%	8%	10%	11%	7%	10%	5%	-3%	3%

Tabelle 5.22: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Heben Punktzug 5kN

v in m/s	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4	0.2
l in m											
50	-2%	0%	0%	2%	3%	4%	5%	4%	1%	-6%	-15%
40	-3%	-3%	-1%	0%	2%	3%	5%	7%	6%	4%	-6%
30	-5%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	3%	4%	2%	-7%
25	-5%	-5%	-4%	-3%	-3%	-2%	-1%	0%	2%	0%	-9%
20	-5%	-4%	-4%	-3%	-3%	-2%	-2%	-2%	-1%	-3%	-10%
15	-5%	-4%	-4%	-4%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-5%	-9%
10	-7%	-6%	-5%	-5%	-4%	-3%	-3%	-3%	-4%	-7%	-6%
5	-14%	-12%	-11%	-9%	-7%	-5%	-3%	-1%	1%	-5%	1%

Tabelle 5.23: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Heben Prospektzug 5kN

v in m/s	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4	0.2
l in m											
50	-13%	-13%	-12%	-12%	-11%	-11%	-10%	-10%	-11%	-12%	-17%
40	-14%	-13%	-13%	-12%	-11%	-10%	-9%	-8%	-7%	-6%	-7%
30	-13%	-13%	-12%	-12%	-12%	-11%	-11%	-10%	-9%	-9%	-7%
25	-12%	-12%	-12%	-12%	-12%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-8%
20	-11%	-10%	-10%	-10%	-11%	-11%	-11%	-12%	-12%	-13%	-8%
15	-8%	-8%	-8%	-8%	-9%	-9%	-10%	-11%	-13%	-16%	-7%
10	-7%	-6%	-6%	-5%	-5%	-6%	-6%	-7%	-11%	-17%	-4%
5	-8%	-5%	-3%	-1%	2%	5%	7%	8%	5%	-11%	3%

Tabelle 5.24: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Heben Prospektzug 10kN

v in m/s	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
l in m										
50	13%	13%	11%	11%	12%	10%	10%	10%	12%	15%
40	2%	11%	12%	12%	12%	12%	10%	9%	8%	7%
30	9%	10%	9%	10%	12%	13%	12%	11%	10%	8%
25	6%	6%	8%	9%	9%	12%	14%	12%	11%	10%
20	4%	4%	5%	6%	7%	10%	13%	13%	12%	12%
15	6%	6%	4%	3%	4%	6%	9%	13%	12%	12%
10	12%	11%	11%	9%	7%	3%	3%	6%	10%	9%

Tabelle 5.25: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Senken Punktzug 2.5kN

v in m/s	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
l in m										
50	15%	16%	14%	12%	13%	10%	13%	11%	13%	16%
40	17%	16%	14%	14%	14%	14%	13%	12%	10%	8%
30	11%	12%	15%	14%	14%	14%	14%	13%	12%	9%
25	10%	13%	12%	12%	14%	14%	14%	15%	14%	11%
20	5%	6%	10%	11%	11%	14%	14%	15%	15%	13%
15	0%	2%	4%	5%	8%	12%	13%	13%	14%	14%
10	-3%	0%	0%	1%	2%	6%	8%	11%	12%	12%

Tabelle 5.26: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Senken Punktzug 5kN

v in m/s	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4
l in m										
50	-7%	-6%	-6%	-7%	-7%	-6%	-6%	-5%	-3%	2%
40	-6%	-6%	-6%	-5%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%
30	-7%	-7%	-6%	-5%	-4%	-5%	-5%	-5%	-5%	-6%
25	-9%	-8%	-7%	-6%	-5%	-4%	-4%	-4%	-4%	-4%
20	-11%	-10%	-9%	-8%	-6%	-5%	-4%	-4%	-3%	-2%
15	-14%	-13%	-12%	-11%	-9%	-8%	-6%	-5%	-3%	-2%
10	-14%	-14%	-14%	-14%	-13%	-12%	-11%	-10%	-7%	-4%

Tabelle 5.27: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Senken Prospektzug 5kN

v in m/s	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4
l in m										
50	-14%	-14%	-15%	-15%	-14%	-14%	-14%	-15%	-14%	-11%
40	-13%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%	-15%	-17%	-18%
30	-12%	-13%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%	-13%	-16%	-19%
25	-9%	-11%	-13%	-13%	-14%	-14%	-13%	-13%	-13%	-18%
20	-4%	-6%	-9%	-12%	-13%	-14%	-14%	-13%	-13%	-16%
15	2%	0%	-3%	-5%	-8%	-11%	-13%	-14%	-13%	-12%
10	11%	10%	8%	5%	2%	-1%	-4%	-8%	-14%	-14%

Tabelle 5.28: Fehler der allgemeinen Näherungslösung für  $\varphi_{dyn}$ , Senken Prospektzug 10kN

### 5.3.4 Abschätzung für den Maximalwert der Seilkraft

Für die Dimensionierung der Hubzüge ist nicht der Verlauf der Seilkraft entscheidend, sondern nur der jeweilige Maximalwert. Betrachtet man den Verlauf der maximalen Seilkraft abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit, so kann man eine Abschätzung für den Rückgang der Seilkraft bei Variation der Verfahrgeschwindigkeit bilden.

Mit den Formeln 5.3 bis 5.6 kann man die  $\varphi_{dyn}$ -Werte, relativ zum maximalen  $\varphi_{dyn}$ -Wert, berechnen. Anders ausgedrückt, geben die Formeln an auf welchen Prozentwert der maximalen Seilkraft sich die Seilkraft, bei Variation der Verfahrgeschwindigkeit, verringert.

#### 5.3.4.1 Abschätzungsformeln Lastfall Heben

Punktzüge:

$$\varphi_{dyn,rel} = 1 - (1.8 - v) \cdot 0.4468 \quad (5.3)$$

Prospektzüge:

$$\varphi_{dyn,rel} = 1 - (1.5 - v) \cdot 0.5308 \quad (5.4)$$

### 5.3.4.2 Abschätzungsformeln Lastfall Senken

Punktzüge:

$$\varphi_{dyn,rel} = 1 - (1.8 - v) \cdot 0.1783 \quad (5.5)$$

Prospektzüge:

$$\varphi_{dyn,rel} = 1 - (1.5 - v) \cdot 0.1783 \quad (5.6)$$

## 5.4 Ergebnisse und Interpretation

Wie in den Abbildungen 5.3 bis 5.32, bzw. Tabelle 5.29 zu sehen ist, sind die maximalen Seilkräfte und Beschleunigungen bei dem Lastfall Heben (bei Nennlast) immer höher als beim Senken. Die hohen Seilkräfte beim Heben ergeben sich aufgrund der Schlaffseilbildung, welche bei hohen Federsteifigkeiten/kurzen Seillängen besonders kritisch ist. Unter welchen Umständen es zur Schlaffseilbildung kommt wird in Kapitel 7 behandelt. In Tabelle 5.30 ist zu erkennen, dass der Berechnungsfaktor  $\varphi_{dyn}$  sowohl beim Heben als auch beim Senken für den Dimensionierungsfall immer größer als 2 ist und deshalb die Belastungswerte beim Störfall größer sind als die, zur Dimensionierung verwendete, doppelte Nennlast aus dem Betriebsfall.

Die Auslegung im Betriebsfall erfolgt mit der doppelten Nennbelastung auf Dauerfestigkeit, im Störfall mit der, dabei auftretenden, Störlast  $F_{stör}$  auf die Streckgrenze (es darf zu keiner Beschädigung der Anlage kommen und es dürfen keine plastischen Verformungen entstehen). Aus diesem Grund kann keine allgemeine Aussage darüber getroffen werden, welcher Lastfall der kritischere ist, auch wenn die Seilkräfte im Störfall doppelt so hoch sind, wie die Nennlast.

Die Lastfaktoren  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  lassen sich mit den Formeln 4.4 & 4.5 aus der Seilkraft  $F_{stör}$  berechnen. In den Abbildungen ist folglich zu erkennen, dass die Seilkraft  $F_{stör}$  den selben Verlauf hat wie die Lastfaktoren  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$ . In weiterer Folge werden die Verläufe von  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  nicht mehr in Diagrammen festgehalten, sondern nur noch die Maximalwerte (wie z.B.: in Tabelle 5.30) dokumentiert.

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	<b>100% Nennlast</b>	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	<b>100% Nennlast</b>	125% Nennlast
maximale Seilkraft										
Punktzug 2.5kN	5.50kN	7.59kN	9.44kN	<b>14.01kN</b>	15.93kN	2.61kN	4.60kN	6.59kN	<b>10.79kN</b>	12.44kN
Punktzug 5kN	7.31kN	9.76kN	16.88kN	<b>25.11kN</b>	29.02kN	2.96kN	4.99kN	13.40kN	<b>24.69kN</b>	29.37kN
Prospektzug 5kN	21.23kN	22.73kN	28.21kN	<b>35.20kN</b>	38.64kN	14.33kN	16.26kN	24.15kN	<b>34.45kN</b>	38.97kN
Prospektzug 10kN	25.45kN	27.35kN	41.28kN	<b>52.02kN</b>	58.37kN	12.22kN	13.89kN	29.54kN	<b>43.55kN</b>	49.40kN
maximale Verzögerung										
Punktzug 2.5kN	100.7m/s <sup>2</sup>	74.9m/s <sup>2</sup>	60.5m/s <sup>2</sup>	<b>44.3m/s<sup>2</sup></b>	39.8m/s <sup>2</sup>	42.6m/s <sup>2</sup>	41.6m/s <sup>2</sup>	39.2m/s <sup>2</sup>	<b>31.9m/s<sup>2</sup></b>	28.9m/s <sup>2</sup>
Punktzug 5kN	112.7m/s <sup>2</sup>	88.3m/s <sup>2</sup>	53.0m/s <sup>2</sup>	<b>38.7m/s<sup>2</sup></b>	35.4m/s <sup>2</sup>	39.8m/s <sup>2</sup>	40.3m/s <sup>2</sup>	40.1m/s <sup>2</sup>	<b>37.9m/s<sup>2</sup></b>	36.0m/s <sup>2</sup>
Prospektzug 5kN	65.6m/s <sup>2</sup>	61.2m/s <sup>2</sup>	48.3m/s <sup>2</sup>	<b>38.6m/s<sup>2</sup></b>	35.7m/s <sup>2</sup>	41.1m/s <sup>2</sup>	41.0m/s <sup>2</sup>	40.0m/s <sup>2</sup>	<b>37.5m/s<sup>2</sup></b>	36.1m/s <sup>2</sup>
Prospektzug 10kN	80.6m/s <sup>2</sup>	75.6m/s <sup>2</sup>	46.9m/s <sup>2</sup>	<b>33.1m/s<sup>2</sup></b>	30.3m/s <sup>2</sup>	33.6m/s <sup>2</sup>	33.6m/s <sup>2</sup>	30.8m/s <sup>2</sup>	<b>26.1m/s<sup>2</sup></b>	24.1m/s <sup>2</sup>

Tabelle 5.29: Lasten und Beschleunigungen bei Nennbedingungen

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	<b>100% Nennlast</b>	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	<b>100% Nennlast</b>	125% Nennlast
$\varphi_{stat}$										
Punktzug 2.5kN	2.16	2.97	3.70	<b>5.49</b>	6.25	1.02	1.80	2.58	<b>4.23</b>	4.88
Punktzug 5kN	1.43	1.91	3.31	<b>4.92</b>	5.69	0.58	0.98	2.63	<b>4.84</b>	5.76
Prospektzug 5kN	2.89	3.09	3.83	<b>4.78</b>	5.25	1.95	2.21	3.28	<b>4.68</b>	5.30
Prospektzug 10kN	2.08	2.23	3.37	<b>4.24</b>	4.76	1.00	1.13	2.41	<b>3.55</b>	4.03
$\varphi_{dyn}$										
Punktzug 2.5kN	1.65	2.28	2.84	<b>4.21</b>	4.78	0.78	1.38	1.98	<b>3.24</b>	3.73
Punktzug 5kN	1.10	1.46	2.53	<b>3.77</b>	4.36	0.44	0.75	2.01	<b>3.71</b>	4.41
Prospektzug 5kN	2.50	2.68	3.33	<b>4.15</b>	4.55	1.69	1.92	2.85	<b>4.06</b>	4.59
Prospektzug 10kN	1.88	2.02	3.06	<b>3.85</b>	4.32	0.90	1.03	2.19	<b>3.22</b>	3.66

Tabelle 5.30: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen

Anhand der Parameterstudie (in Abschnitt 5.2) ist gut zu erkennen, dass eine Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit eine Verringerung der Seilkräfte und Beschleunigungen zur Folge hat. Dies liegt an der elastischen Kopplung von Last und Seiltrommel, welche eine (geschwindigkeitsabhängige) Schwingungen zulässt. Ist die freie Seillänge also ausreichend lang, so ist der Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit auf die maximale Seilkraft sehr groß. Je kürzer die Seillängen wird, umso geringer wird der Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit auf die Seilkraft.

Beim Lastfall Senken, für sehr kurze Seillängen, sind die Seilkräfte und Beschleunigungen also nahezu konstant. In diesem Bereich ist die Federsteifigkeit des Seil so groß, dass das Seil als starre Kopplung betrachtet werden kann. Die Seilkräfte und die Beschleunigungen

sind in diesem Bereich also, wie zu erwarten, proportional zueinander.

Die Näherungslösungen für die vereinfachte Berechnung der Seilkräfte stellen gute Abschätzungen für die tatsächlich auftretenden Seilkräfte dar. Der Fehler liegt unter  $\pm 5\%$ .

Aus den einzelnen Näherungslösungen konnten allgemeingültige Näherungslösungen abgeleitet werden. Des Weiteren wurden Formeln zur Abschätzung des Rückgangs der Seilkraft, bei Reduktion der Verfahrensgeschwindigkeit, gebildet.

## 6 Simulation des Störfalls bei Dimensionierung auf geringere Nenngeschwindigkeit

Laut Norm<sup>1</sup> sind Verfahrensgeschwindigkeiten von  $v_{max} = 1.8m/s$  erlaubt, in älteren Fassungen war die Geschwindigkeit auf  $v_{max} = 1.2m/s$  limitiert. Außerdem wurden im Verlauf der Zeit die Maximallasten der Hubzüge immer größer. Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass die Seilkräfte und Beschleunigungen sowohl im Betriebsfall als auch im Störfall zugenommen haben. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass bei Nennbedingungen (siehe Abschnitt 5.1) im Störfall die Belastungswerte immer größer sind, als im Betriebsfall (siehe Tabelle 5.30).

Ob das auch bei älteren Anlagen, oder neueren, die nicht auf die maximale Verfahrensgeschwindigkeit ausgelegt wurden, zutrifft, soll in diesem Kapitel untersucht werden.

Grund für die Lasterhöhung:

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_{kin, alt} = \frac{500kg \cdot 1.2ms^{-1}}{2} = 360J$$

$$E_{kin, neu} = \frac{1000kg \cdot 1.8ms^{-1}}{2} = 1620J$$

$$\frac{E_{kin, neu}}{E_{kin, alt}} = \frac{1620J}{360J} = 4.5$$

Das heißt, die kinetische Energie im System hat sich in den letzten Jahrzehnten mehr als vervierfacht (sofern die Hubzüge auf die entsprechenden Werte dimensioniert wurden). Bei gleichem Bremsweg müssen also die Bremsen größer dimensioniert werden.

<sup>1</sup>siehe ÖNORM M9630-1:2010 [1]

Um diese Auswirkung zu untersuchen, wurde bei den 4 betrachteten Hubzügen die maximale Verfahrgeschwindigkeit auf 1.2 m/s reduziert und anschließend das Bremsmoment so variiert, dass die Bremswege ungefähr gleich bleiben.

Da neben den Bremsen auch die restlichen Elemente des Antriebsstrangs, wie z.B.: Getriebe und Motor, geändert werden, variiert auch das Trägheitsmoment des Gesamtsystems. Dieser Effekt wird der Einfachheit halber vernachlässigt.

**Bremswege bei Nennlast**  
Bremsweg bei  $m_{\text{Nenn}}$  und  $v_{\text{Nenn}}$ :

senken		Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN	
	Bremsweg in mm	Bremsmoment in Nm							
Mb 100%	723.0	64.0	568.1	120.0	363.4	148.0	713.2	165.0	
Mb 160%	392.1	64.0	338.1	120.0	231.8	148.0	368.9	165.0	

heben		Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN	
	Bremsweg in mm	Bremsmoment in Nm							
Mb 100%	164.7	64.0	189.0	120.0	126.7	148.0	142.1	165.0	
Mb 160%	141.6	64.0	164.4	120.0	112.0	148.0	122.8	165.0	

Bremsweg bei  $v=1.2\text{m/s}^2$ :

senken		Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN	
	Bremsweg in mm	Bremsmoment in Nm							
Mb 100%	729.2	48.0	623.3	80.0	431.3	100.0	866.6	132.0	
Mb 160%	303.4	48.0	315.9	80.0	248.9	100.0	335.3	132.0	
	-7.4%	-25.0%	3.6%	-33.3%	14.3%	-32.4%	11.1%	-20.0%	

heben		Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN	
	Bremsweg in mm	Bremsmoment in Nm							
Mb 100%	90.1	48.0	91.5	80.0	99.0	100.0	101.5	132.0	
Mb 160%	80.0	48.0	82.3	80.0	87.4	100.0	89.1	132.0	
	-44.5%	-25.0%	-50.8%	-33.3%	-21.9%	-32.4%	-28.0%	-20.0%	

Tabelle 6.1: Bremsmomente bei niedrigerer Verfahrgeschwindigkeit

Wie in Tabelle 6.1 zu sehen ist, kann bei Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit (von 1.8/1.5m/s auf 1.2m/s) das Bremsmoment um ca. 20-33% gesenkt werden. Umgekehrt bedeutet das, dass mit der Erhöhung der Verfahrgeschwindigkeit (von 1.2m/s auf 1.8/1.5m/s) die Bremsmomente um ca. 25-50% zugenommen haben. Damit die reduzierten Bremsmomente in Tabelle 6.1 möglichst realistisch und praxisnah sind, wurden Bremsen aus der gleichen Modellreihe wie die aktuell bei den Hubzügen verwendeten Bremsen gewählt (siehe [5]).

## 6.1 Seilkräfte und Beschleunigungen bei Dimensionierung auf verringerte Verfahrensgeschwindigkeit

### 6.1.1 Punktzug 2.5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 2.5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.1), das Anlagenschema ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei für die Nenngeschwindigkeit und das Nennbremsmoment abgeänderte Werte verwendet werden: Nenngeschwindigkeit:  $1.2m/s$ , Nennbeschleunigung:  $3.0m/s^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Bremsmoment:  $64Nm$

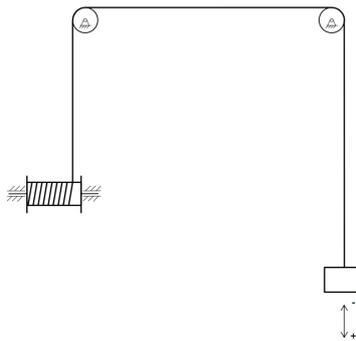


Abbildung 6.1: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

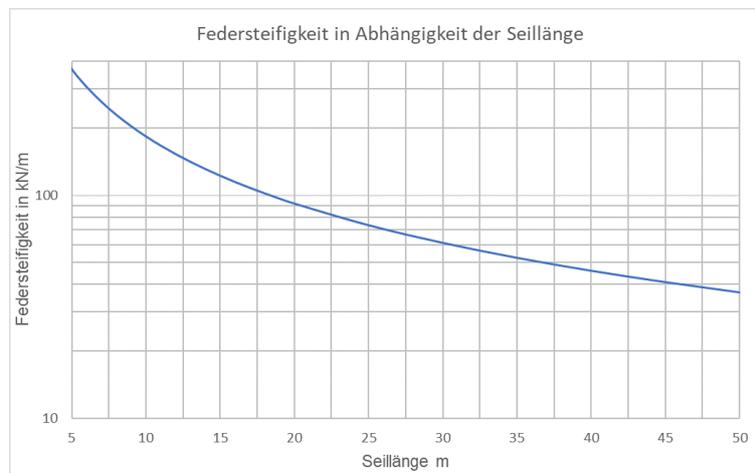


Abbildung 6.2: Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

### 6.1.1.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

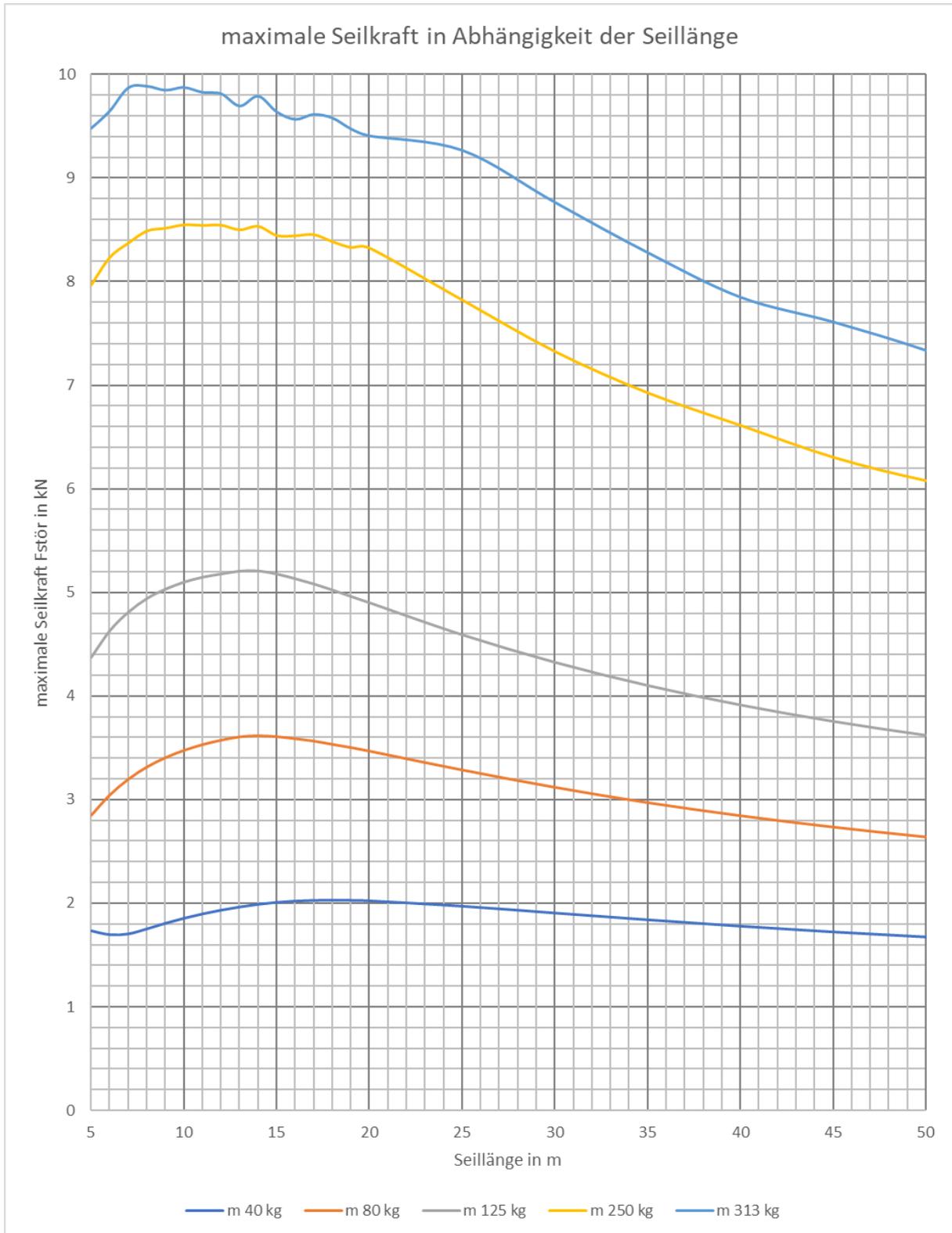


Abbildung 6.3: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 64Nm$

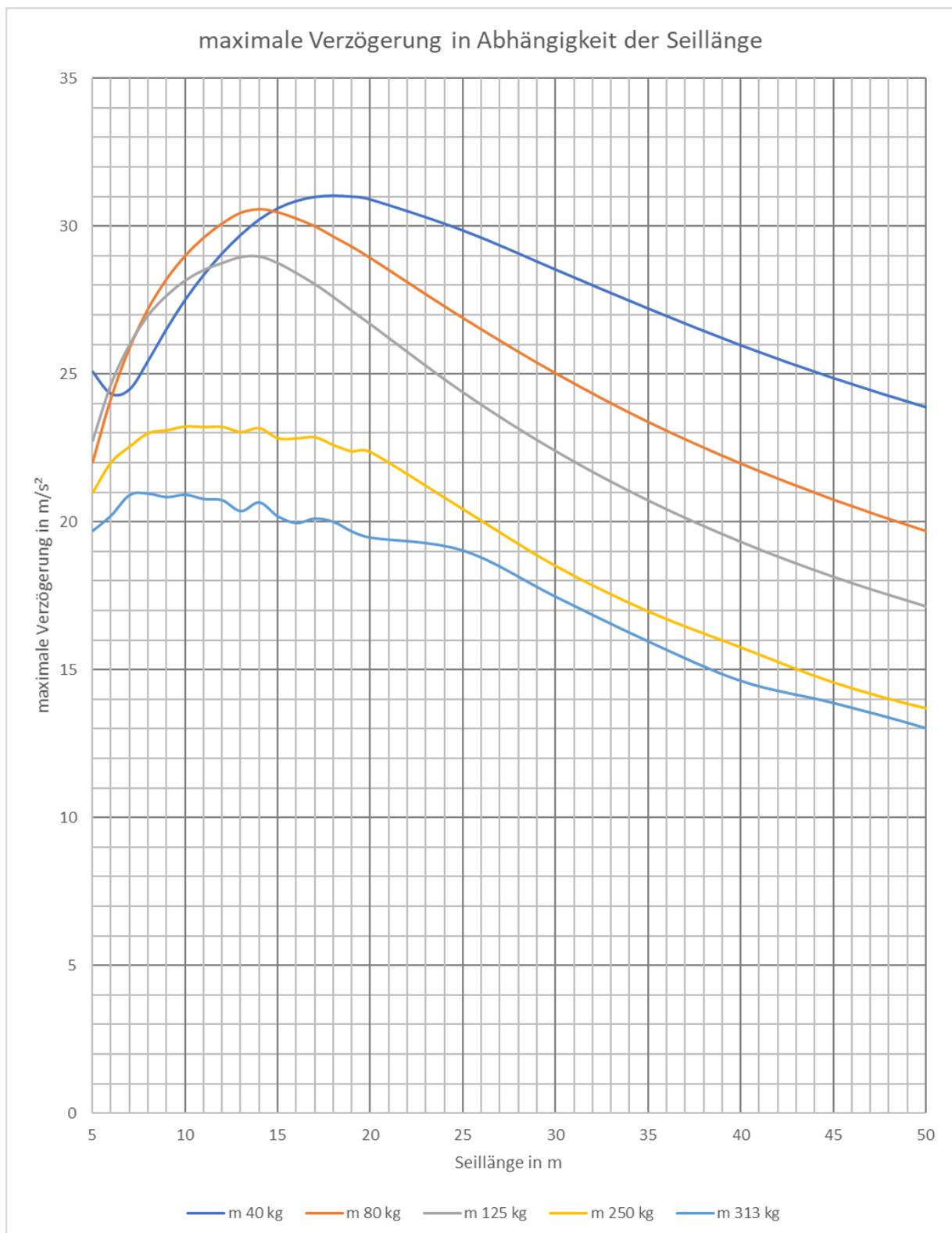


Abbildung 6.4: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 64Nm$

### 6.1.1.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

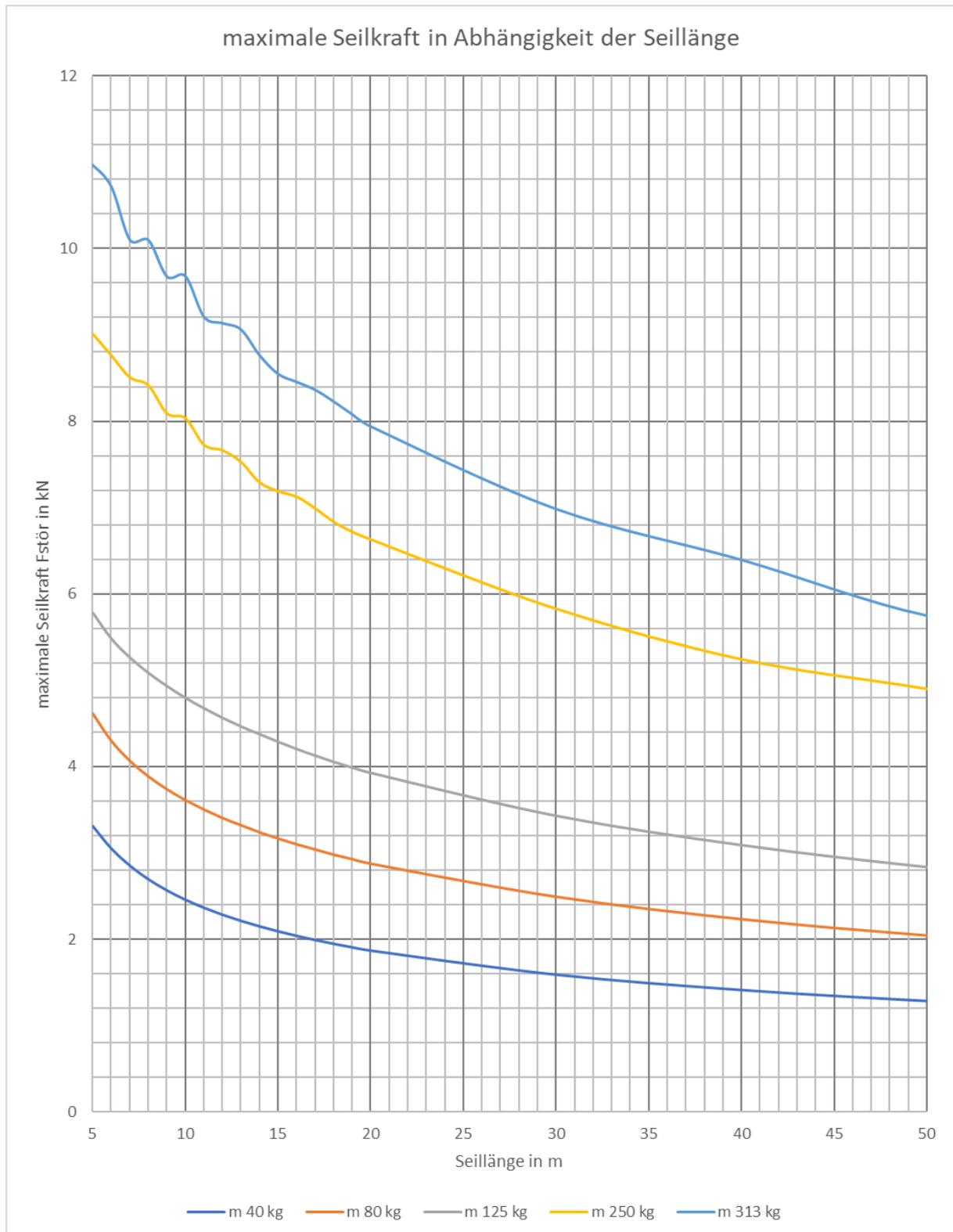


Abbildung 6.5: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 64Nm$

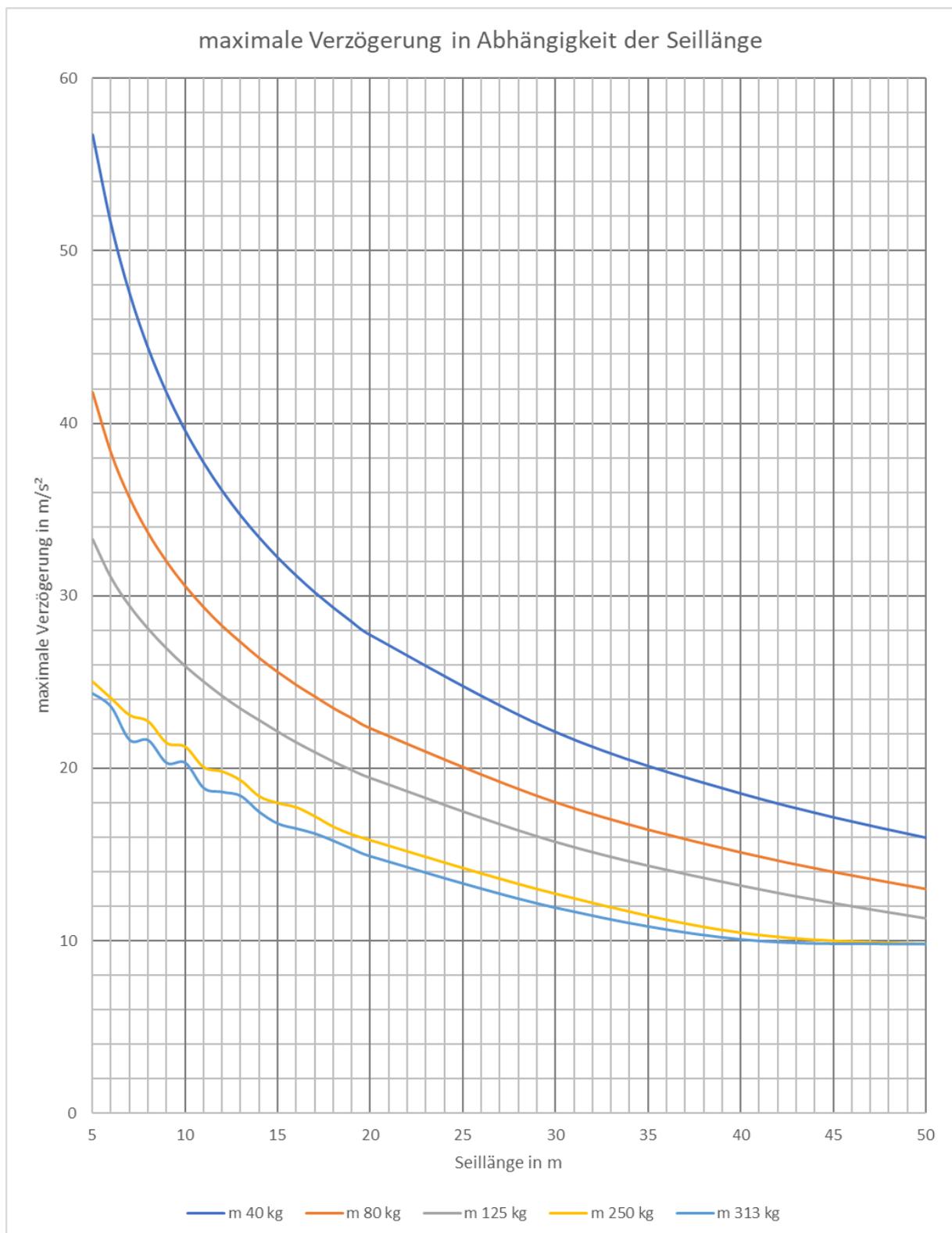


Abbildung 6.6: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 64Nm$

### 6.1.2 Punktzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.2), das Anlagenschema ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei für die Nenngeschwindigkeit und das Nennbremsmoment abgeänderte Werte verwendet werden:

Nenngeschwindigkeit:  $1.2\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $3.0\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Bremsmoment:  $80\text{m}$

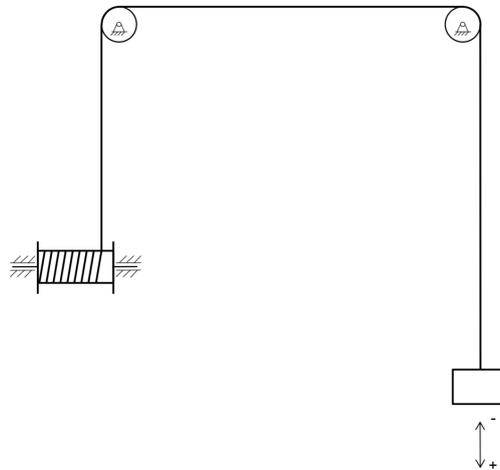


Abbildung 6.7: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

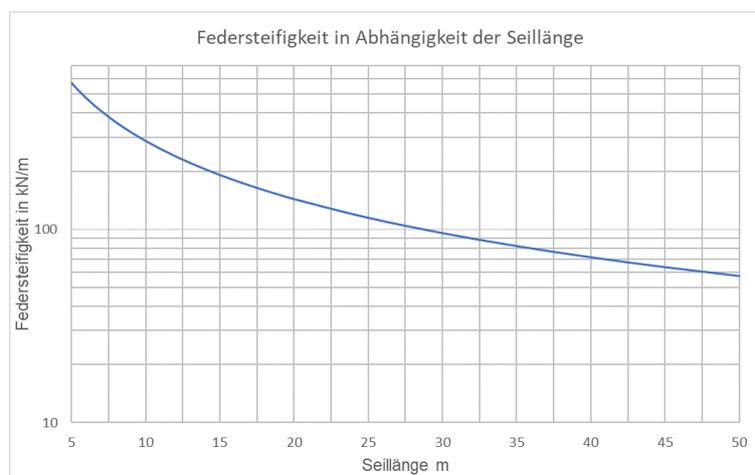


Abbildung 6.8: Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

### 6.1.2.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

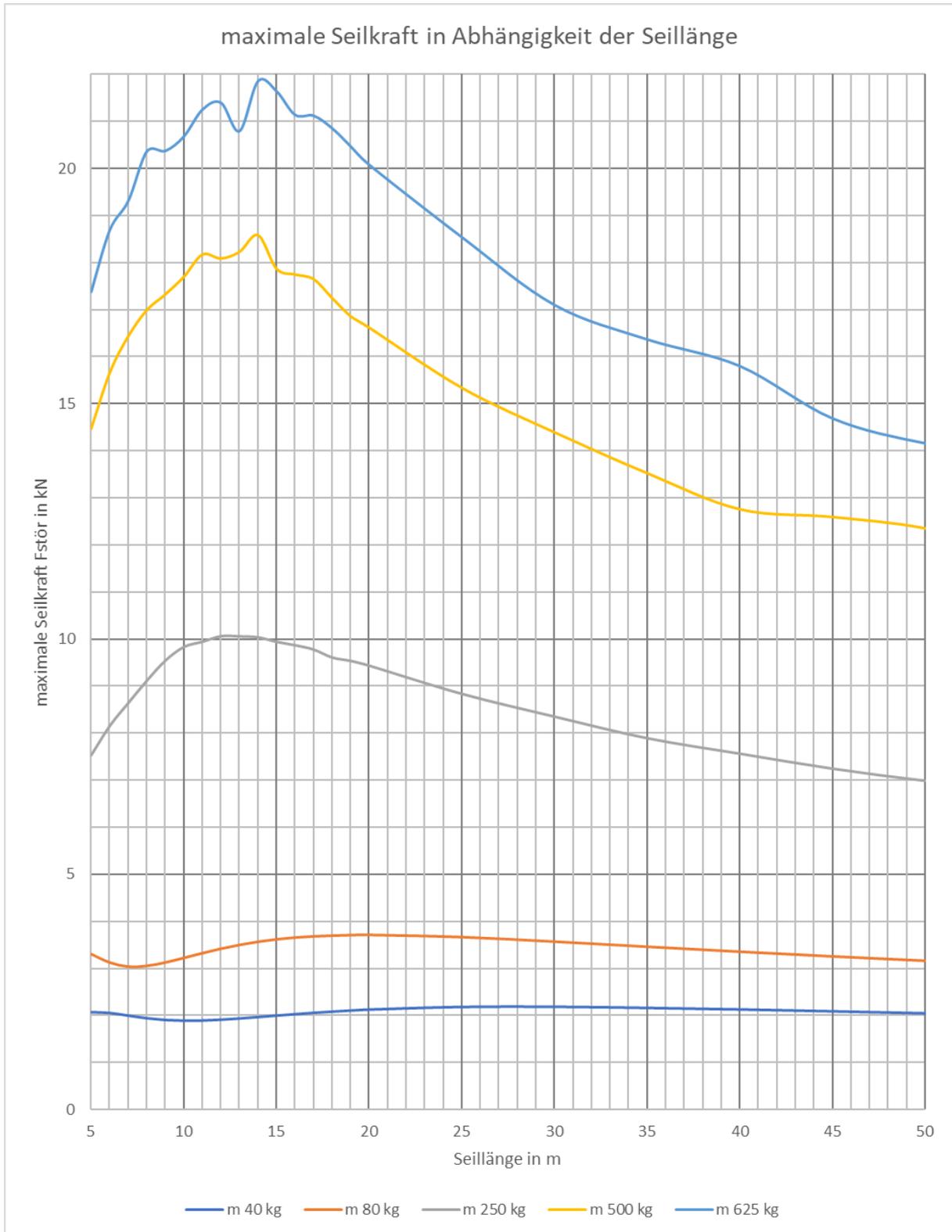


Abbildung 6.9: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 80Nm$

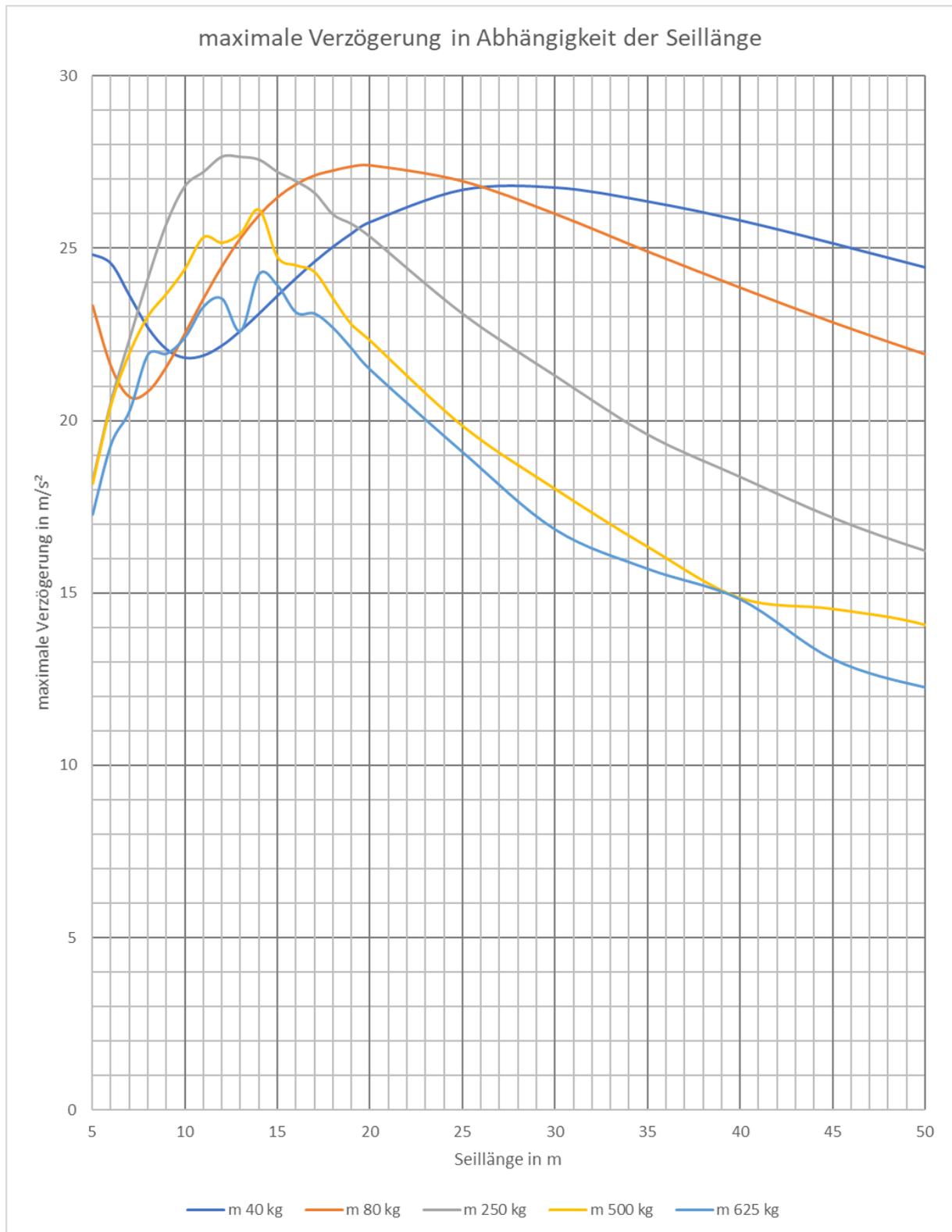


Abbildung 6.10: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 80Nm$

### 6.1.2.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

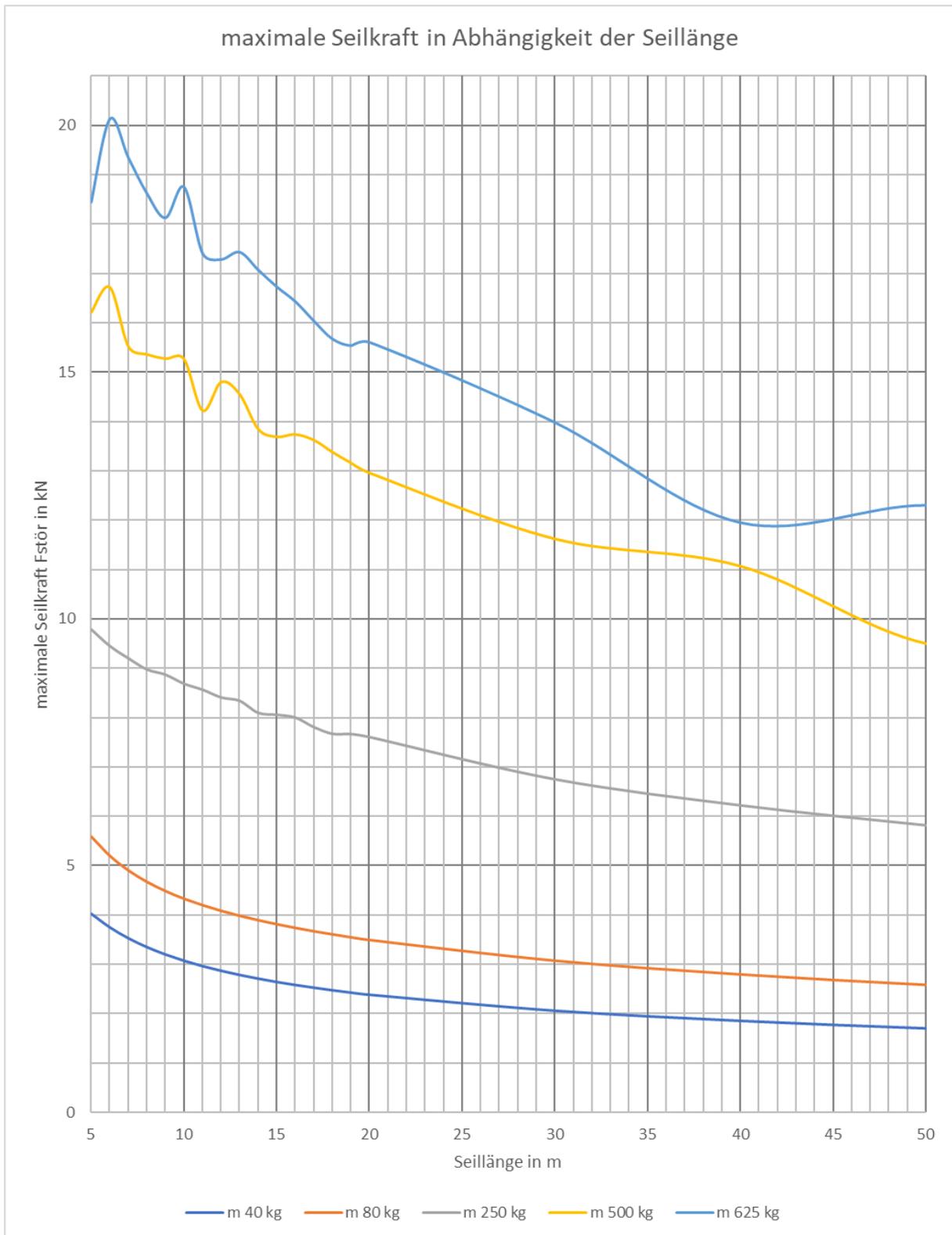


Abbildung 6.11: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 80Nm$

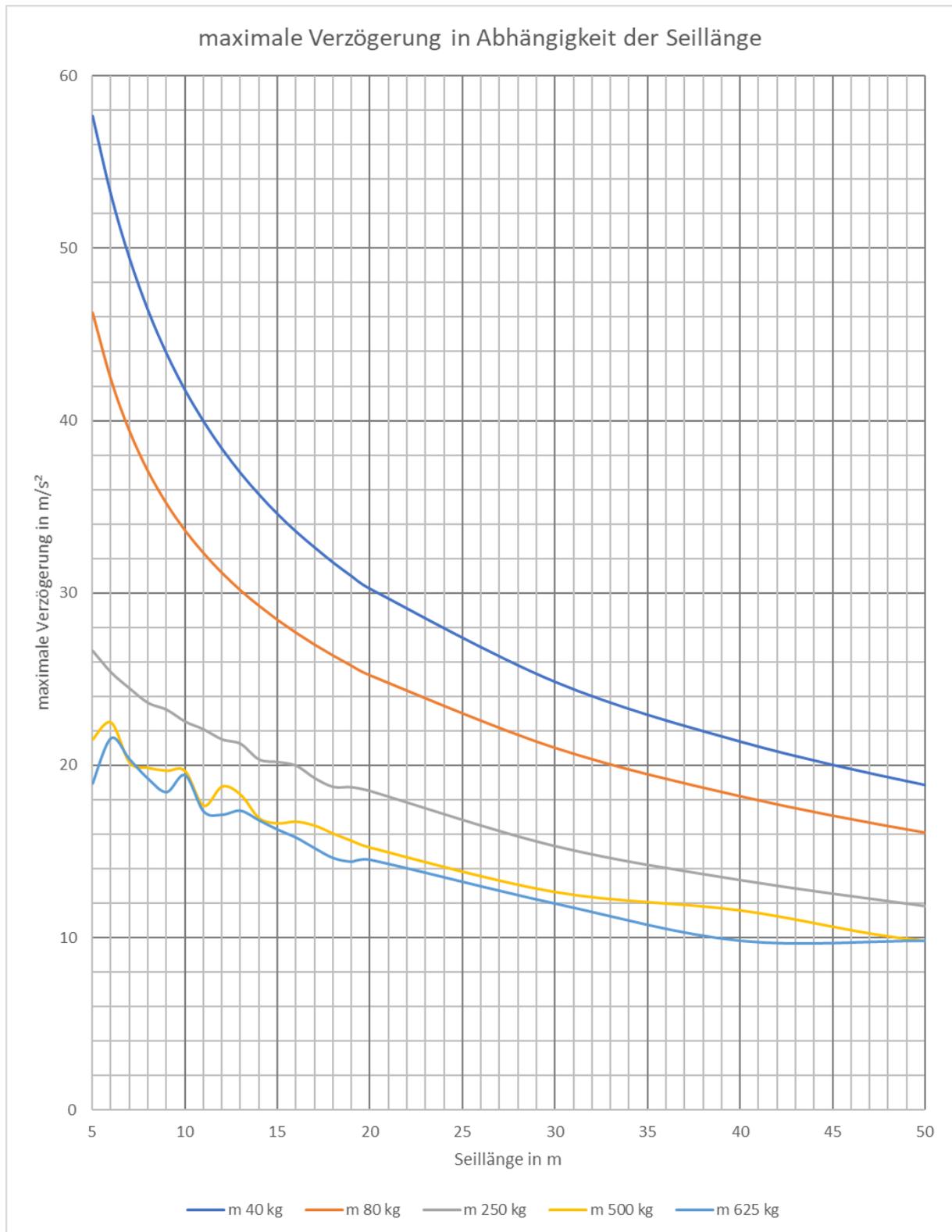


Abbildung 6.12: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 80Nm$

### 6.1.3 Prospektzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.3), das Anlagenschema ist in Abbildung 6.13 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei für die Nenngeschwindigkeit und das Nennbremsmoment abgeänderte Werte verwendet werden:

Nenngeschwindigkeit:  $1.2\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.5\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Bremsmoment:  $100\text{Nm}$

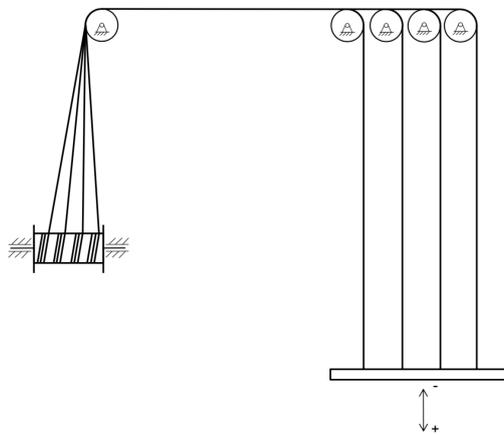


Abbildung 6.13: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

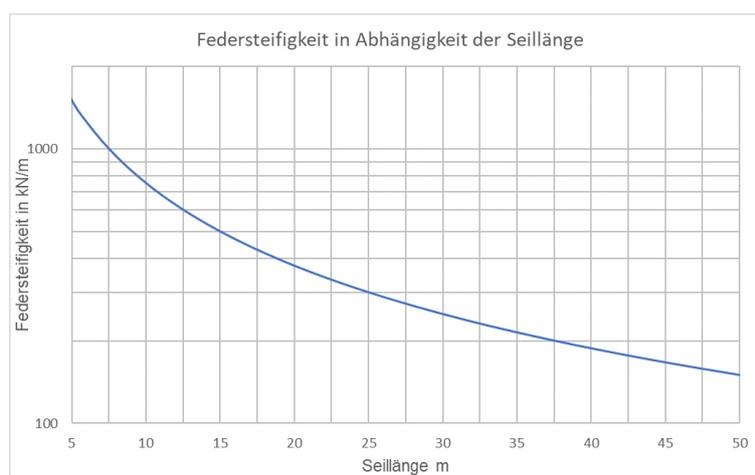


Abbildung 6.14: Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

### 6.1.3.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

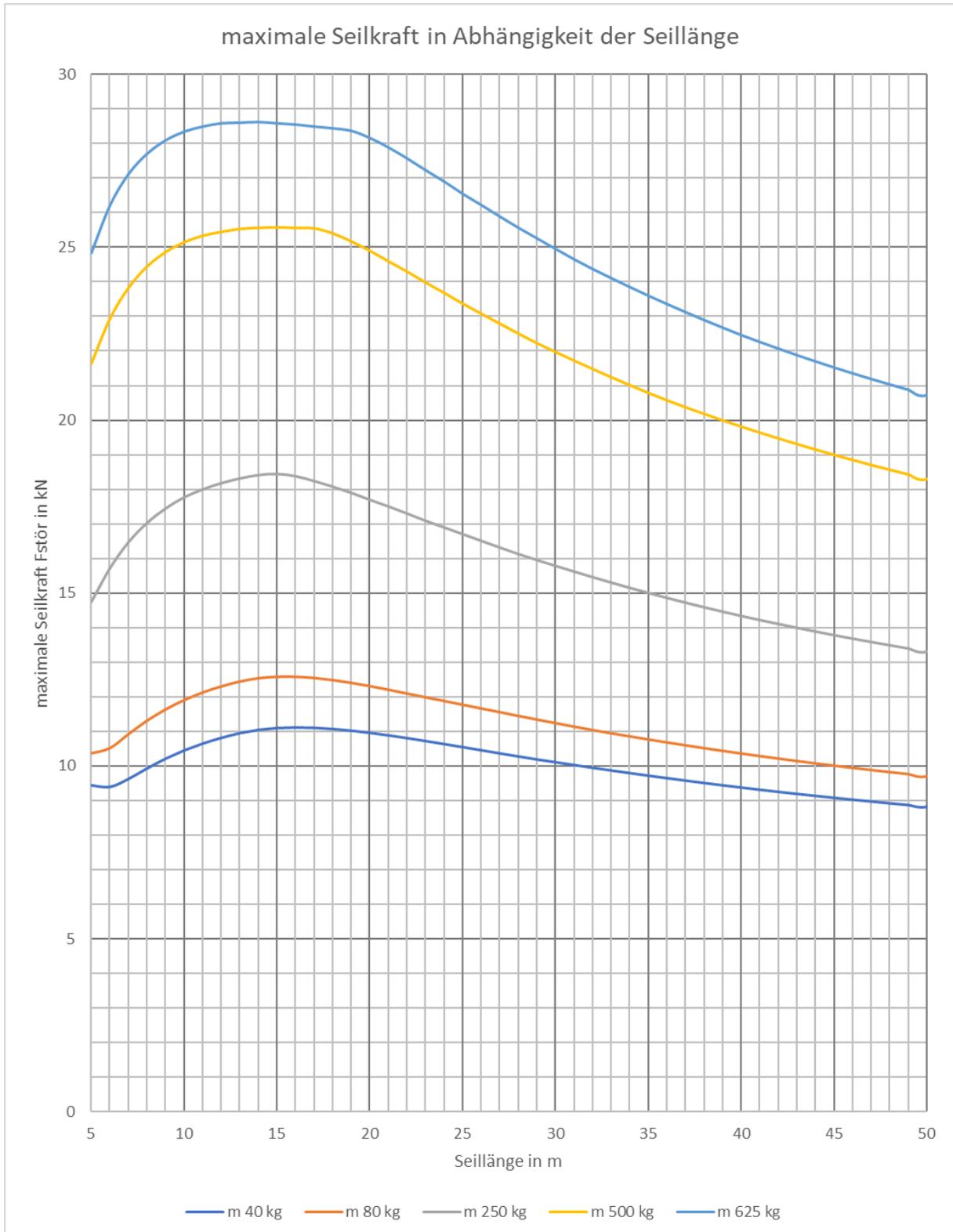


Abbildung 6.15: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 100Nm$

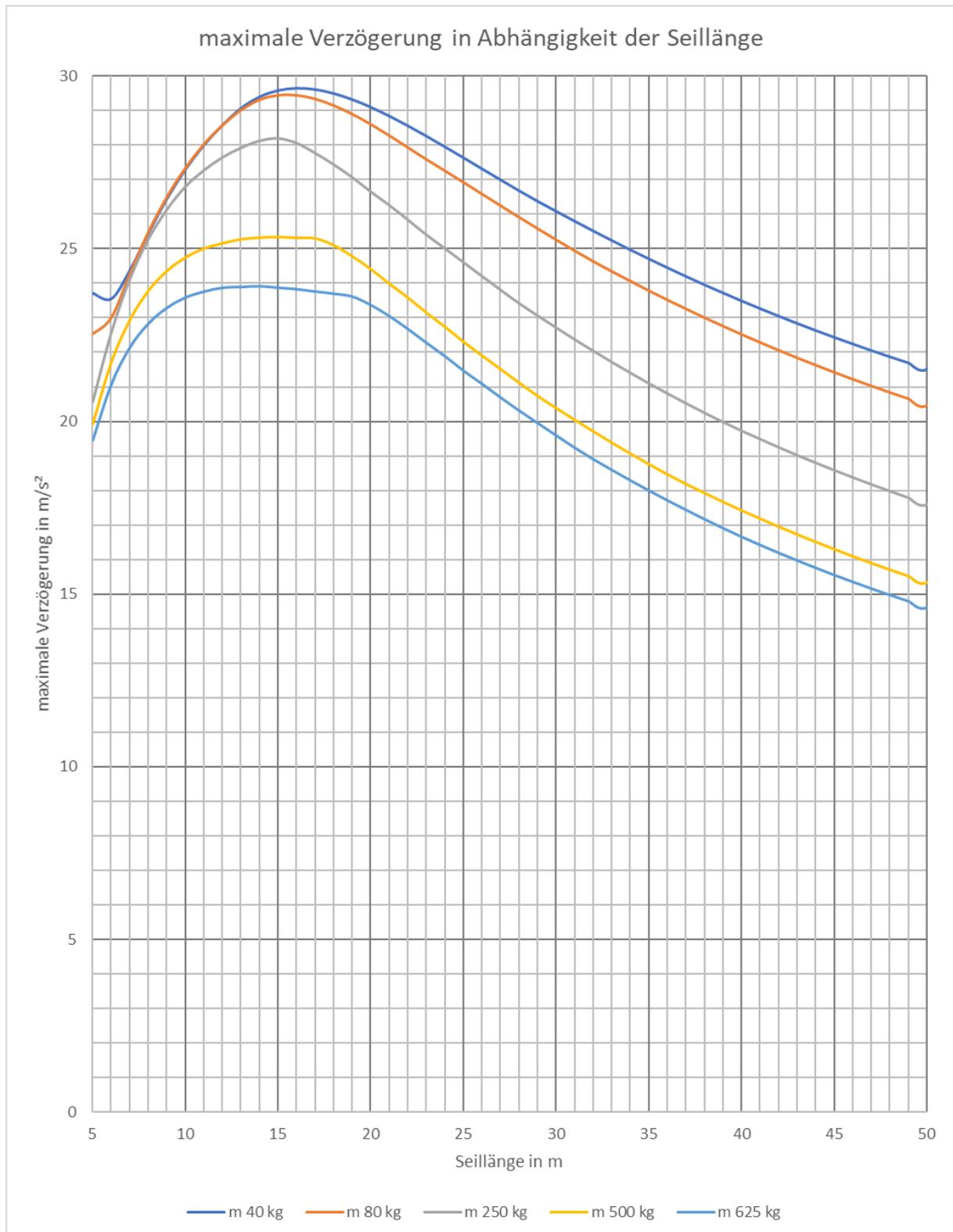


Abbildung 6.16: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 100Nm$

### 6.1.3.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

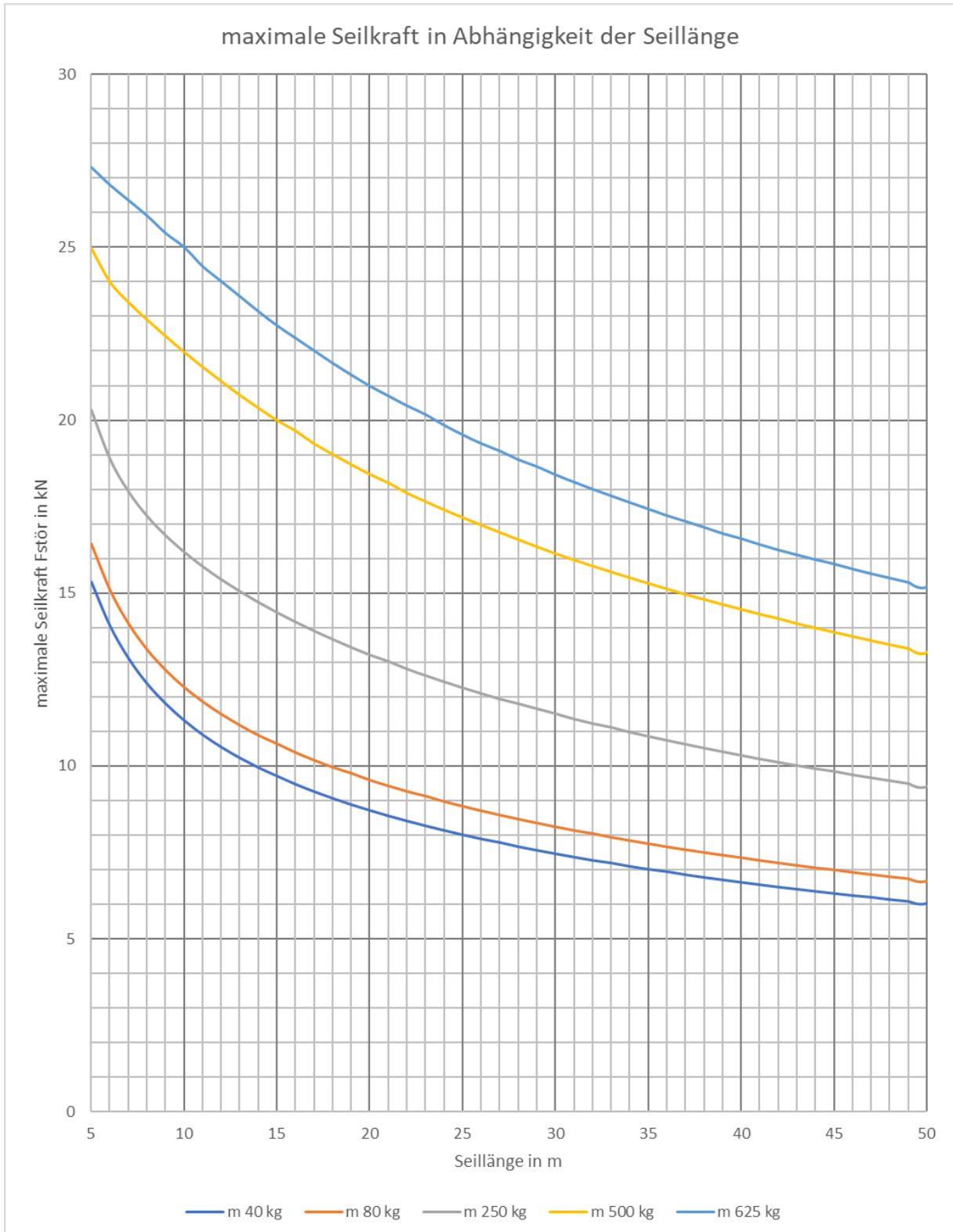


Abbildung 6.17: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 100Nm$

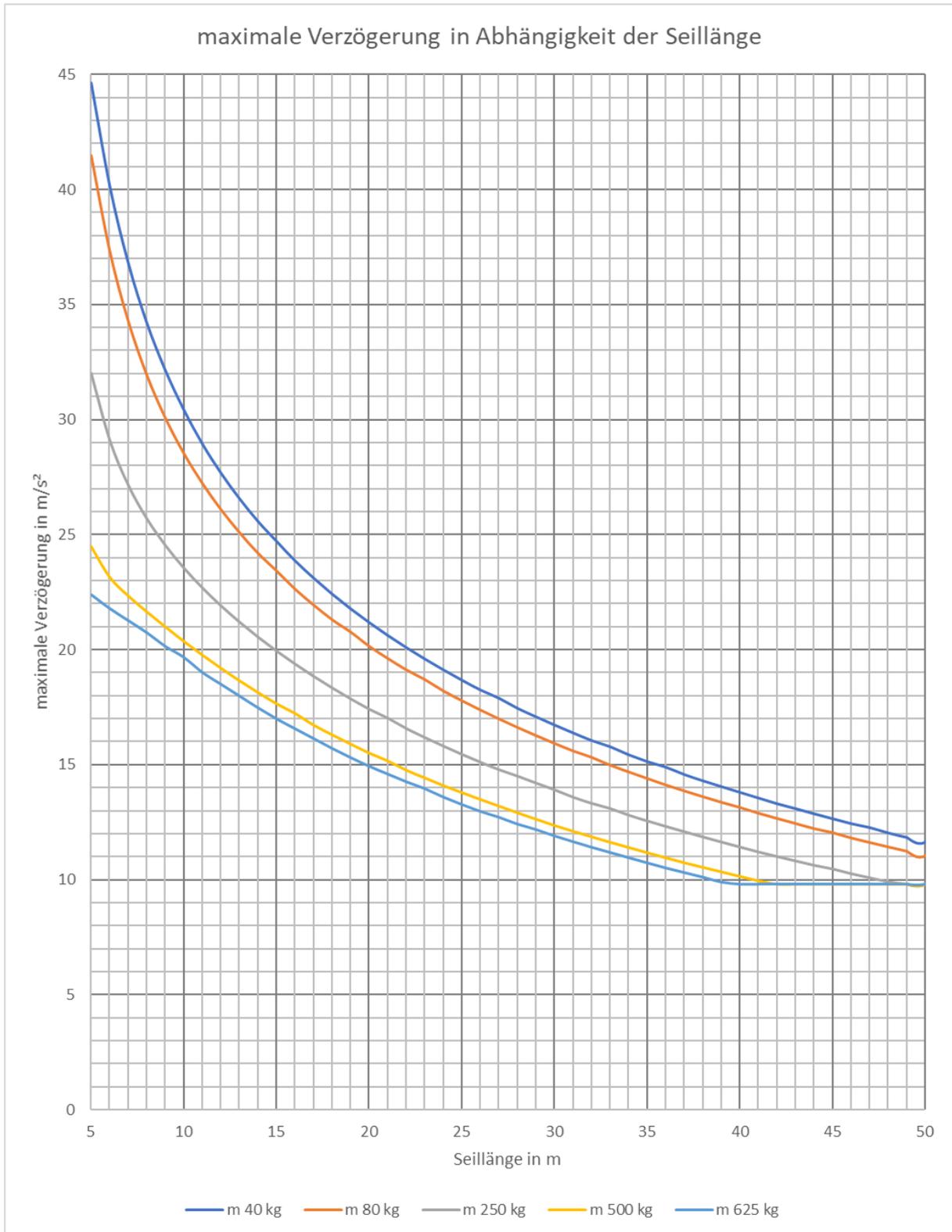


Abbildung 6.18: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 100Nm$

### 6.1.4 Prospektzug 10 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 10kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.4), das Anlagenschema ist in Abbildung 6.19 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei für die Nenngeschwindigkeit und das Nennbremsmoment abgeänderte Werte verwendet werden:

Nenngeschwindigkeit:  $1.2\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.0\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Bremsmoment:  $132\text{Nm}$

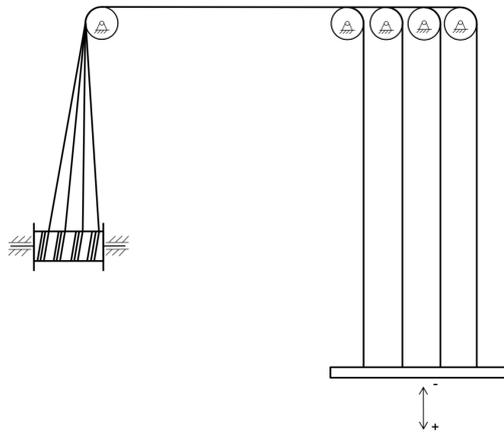


Abbildung 6.19: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

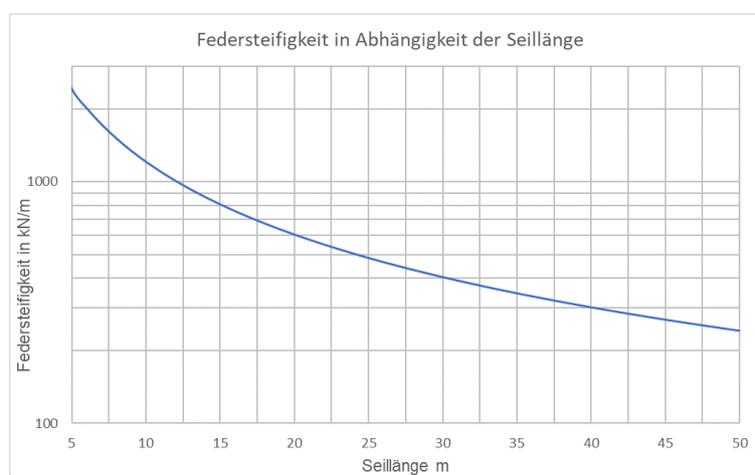


Abbildung 6.20: Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

### 6.1.4.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

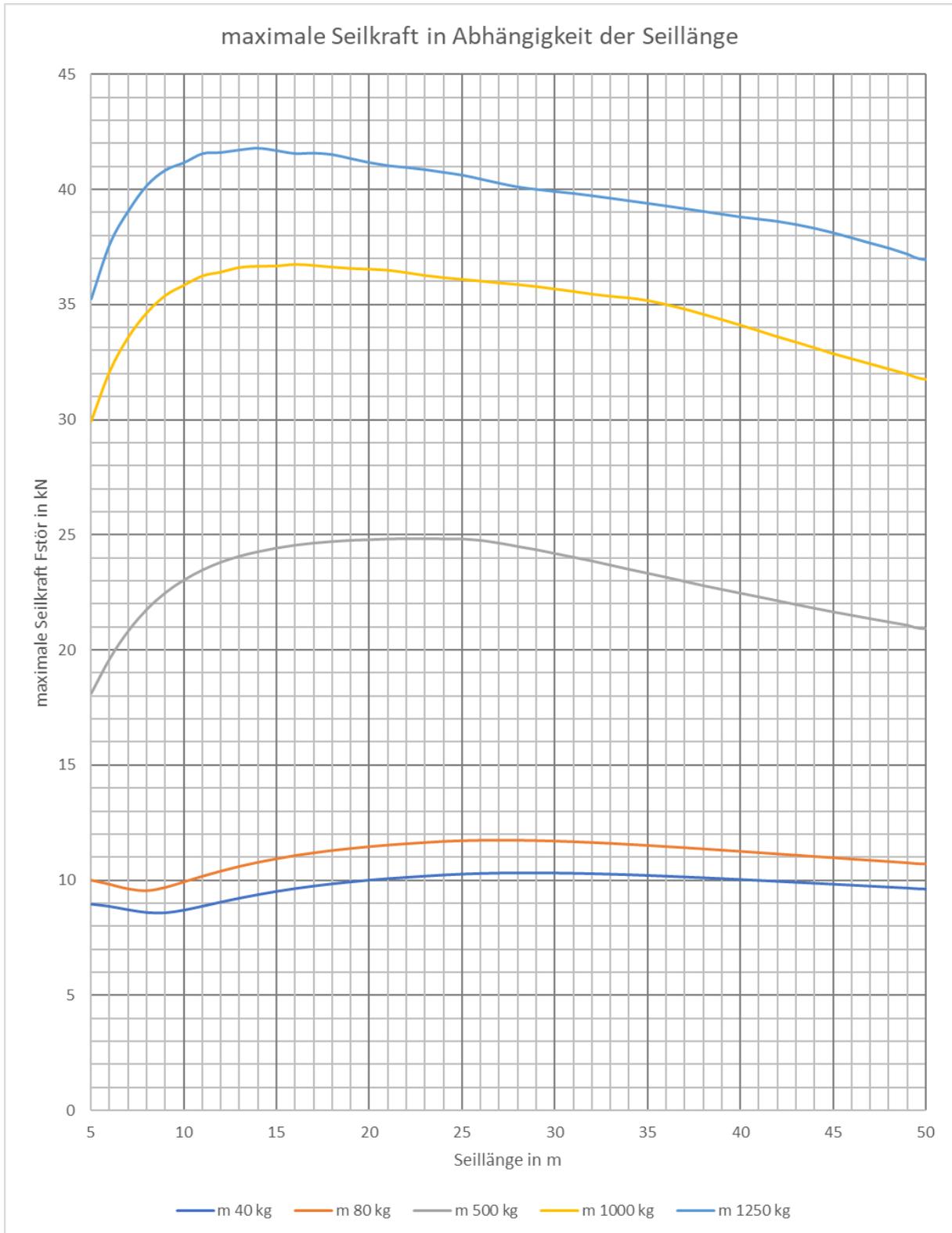


Abbildung 6.21: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 132Nm$

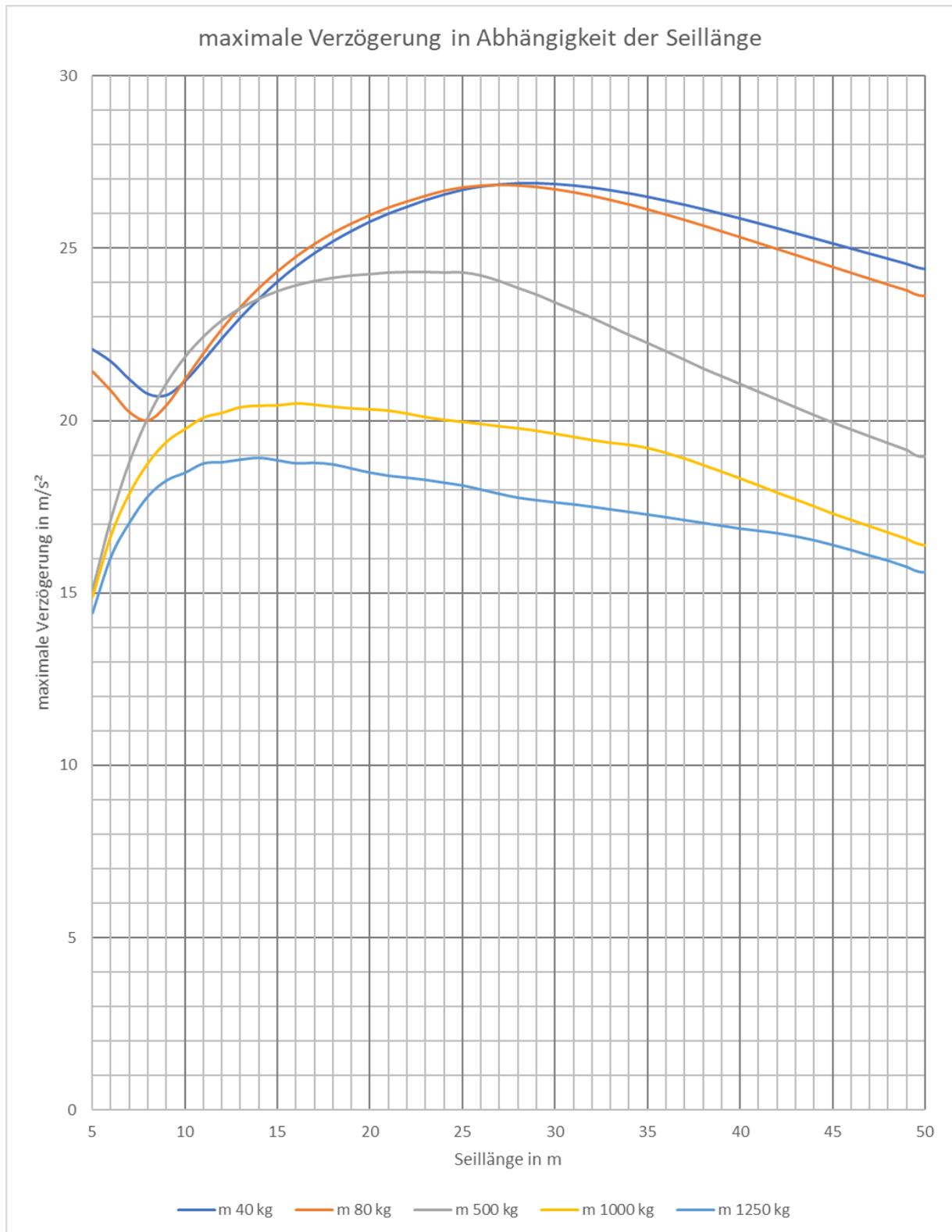


Abbildung 6.22: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 132Nm$

### 6.1.4.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

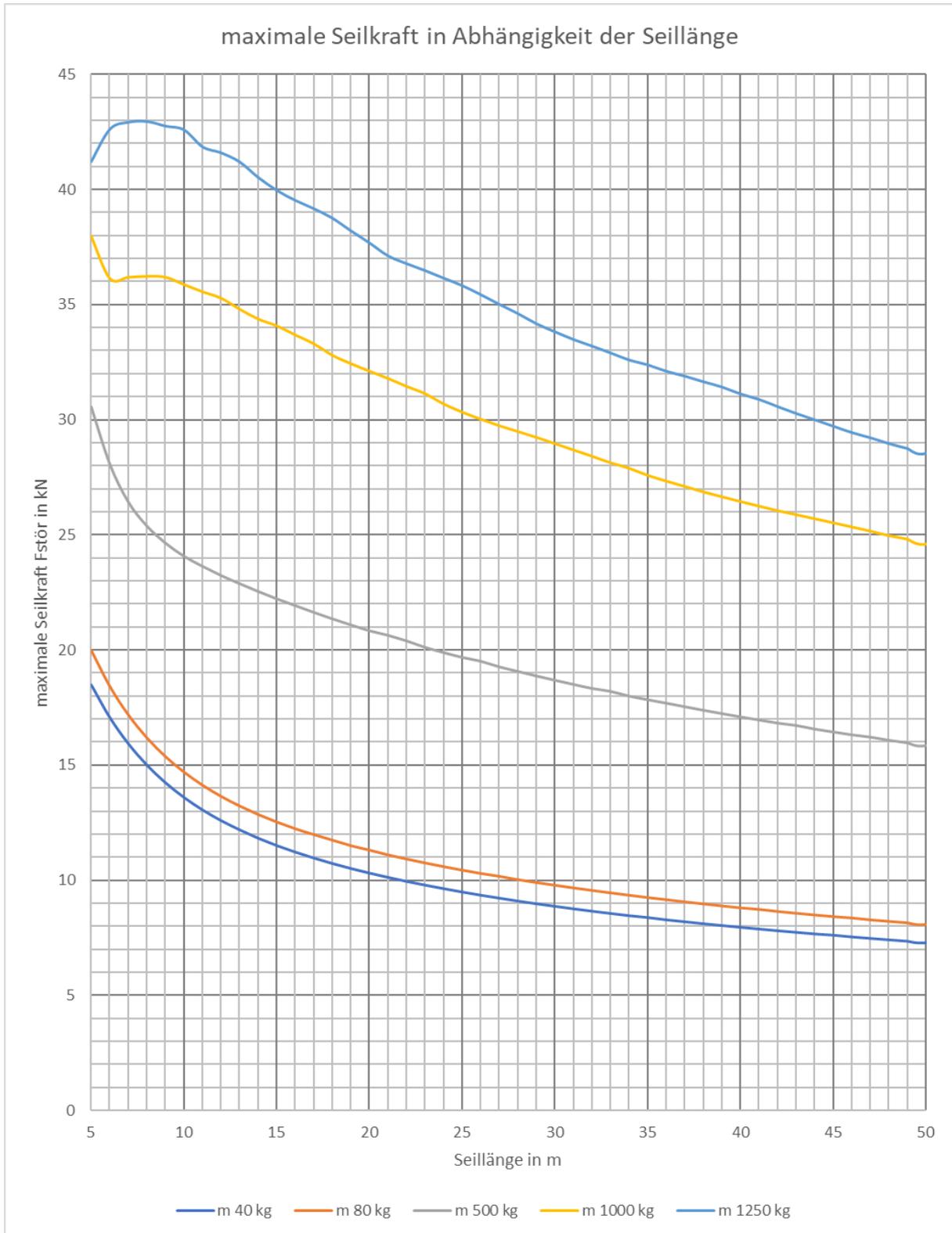


Abbildung 6.23: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 132Nm$

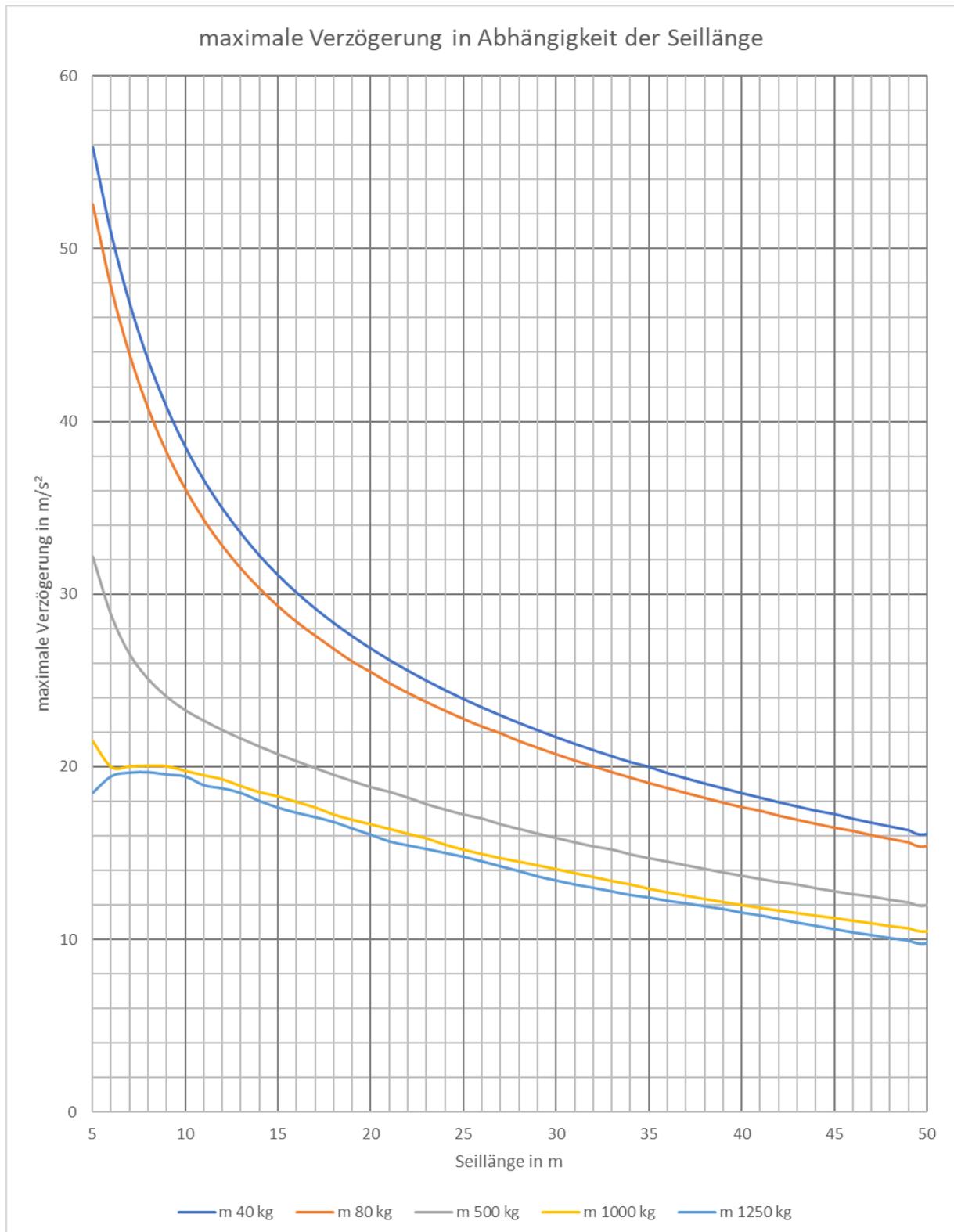


Abbildung 6.24: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 132Nm$

## 6.2 Vergleich zum Störfall bei Nennbedingungen

Vergleicht man die Belastungswerte bei der Simulation des Störfalls bei Nennbedingungen (Tabelle 5.29) mit jenen bei Auslegung auf eine verringerte Verfahrensgeschwindigkeit (Tabelle 6.1), erkennt man, wie sich sowohl die Seilkräfte als auch die Beschleunigungen, bei Reduzierung der Verfahrensgeschwindigkeit (und entsprechender Reduktion des Bremsmoments), erheblich verringern. Beim Rückgang der Belastung und der Reduktion des Bremsmoments, siehe Tabelle 6.1, ist eine Korrelation erkennbar, wobei die Belastungen prozentual beim Heben mehr als das Bremsmoment abgenommen haben und beim Senken weniger. Der Rückgang ist beim Heben also größer als beim Senken (siehe Tabelle 6.2). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass mit der Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit die Belastungen im Lastfall Not-Aus beim Heben stärker zugenommen haben als beim Lastfall Not-Aus beim Senken. Dies hat zur Folge, dass die Belastungswerte beim Heben nicht mehr stets größer sind als beim Senken.

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last		50% Nennlast			100% Nennlast			125% Nennlast	
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
maximale Seilkraft										
Punktzug 2.5kN	3.31kN	4.62kN	5.79kN	<b>9.01kN</b>	10.97kN	2.03kN	3.62kN	5.21kN	<b>8.55kN</b>	9.89kN
vgl. zu vorher	-39.8%	-39.1%	-38.7%	<b>-35.7%</b>	-31.1%	-22.1%	-21.4%	-20.9%	<b>-20.8%</b>	-20.5%
Punktzug 5kN	4.03kN	5.58kN	9.79kN	<b>16.71kN</b>	20.13kN	2.18kN	3.70kN	10.07kN	<b>18.59kN</b>	21.86kN
vgl. zu vorher	-44.9%	-42.8%	-42.0%	<b>-33.4%</b>	-30.7%	-26.3%	-25.8%	-24.9%	<b>-24.7%</b>	-25.6%
Prospektzug 5kN	15.32kN	16.42kN	20.29kN	<b>24.96kN</b>	27.32kN	11.10kN	12.57kN	18.44kN	<b>25.59kN</b>	28.63kN
vgl. zu vorher	-27.8%	-27.7%	-28.1%	<b>-29.1%</b>	-29.3%	-22.6%	-22.7%	-23.7%	<b>-25.7%</b>	-26.6%
Prospektzug 10kN	18.48kN	19.97kN	30.55kN	<b>37.96kN</b>	42.95kN	10.33kN	11.73kN	24.83kN	<b>36.76kN</b>	41.80kN
vgl. zu vorher	-27.4%	-27.0%	-26.0%	<b>-27.0%</b>	-26.4%	-15.5%	-15.5%	-15.9%	<b>-15.6%</b>	-15.4%
maximale Verzögerung										
Punktzug 2.5kN	56.7m/s <sup>2</sup>	41.8m/s <sup>2</sup>	33.3m/s <sup>2</sup>	<b>25.0m/s<sup>2</sup></b>	24.3m/s <sup>2</sup>	31.0m/s <sup>2</sup>	30.6m/s <sup>2</sup>	29.0m/s <sup>2</sup>	<b>23.2m/s<sup>2</sup></b>	21.0m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-43.7%	-44.2%	-45.0%	<b>-43.6%</b>	-38.8%	-27.1%	-26.4%	-26.1%	<b>-27.2%</b>	-27.4%
Punktzug 5kN	57.7m/s <sup>2</sup>	46.3m/s <sup>2</sup>	26.6m/s <sup>2</sup>	<b>22.5m/s<sup>2</sup></b>	21.6m/s <sup>2</sup>	26.8m/s <sup>2</sup>	27.4m/s <sup>2</sup>	27.7m/s <sup>2</sup>	<b>26.1m/s<sup>2</sup></b>	24.3m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-48.8%	-47.6%	-49.8%	<b>-41.9%</b>	-39.1%	-32.7%	-32.0%	-31.0%	<b>-31.1%</b>	-32.5%
Prospektzug 5kN	44.7m/s <sup>2</sup>	41.5m/s <sup>2</sup>	32.0m/s <sup>2</sup>	<b>24.5m/s<sup>2</sup></b>	22.4m/s <sup>2</sup>	29.6m/s <sup>2</sup>	29.5m/s <sup>2</sup>	28.2m/s <sup>2</sup>	<b>25.4m/s<sup>2</sup></b>	23.9m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-32.0%	-32.2%	-33.8%	<b>-36.5%</b>	-37.3%	-27.9%	-28.1%	-29.5%	<b>-32.4%</b>	-33.8%
Prospektzug 10kN	55.9m/s <sup>2</sup>	52.6m/s <sup>2</sup>	32.2m/s <sup>2</sup>	<b>21.5m/s<sup>2</sup></b>	19.7m/s <sup>2</sup>	26.9m/s <sup>2</sup>	26.8m/s <sup>2</sup>	24.3m/s <sup>2</sup>	<b>20.5m/s<sup>2</sup></b>	18.9m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-30.7%	-30.5%	-31.4%	<b>-35.0%</b>	-35.0%	-20.0%	-20.0%	-21.0%	<b>-21.4%</b>	-21.6%

Tabelle 6.2: Lasten und Beschleunigungen bei verringerter Verfahrensgeschwindigkeit

## 6.3 Vergleich zum Betriebsfall

Für den Vergleich mit dem Betriebsfall, in dem mit der doppelten dynamischen Nennlast  $F_{dyn}$  dimensioniert wird, müssen die auftretenden Kräfte also mit  $F_{dyn}$  verglichen werden. In Tabelle 6.3 sind für die betrachteten Hubzüge die Berechnungsfaktoren  $\varphi_{stat}$  &  $\varphi_{dyn}$  bei unterschiedlichen Lasten in den Lastfällen Heben und Senken aufgetragen. Außerdem sind die prozentualen Veränderungen im Vergleich zur Verfahrensgeschwindigkeit  $1.8m/s$  bzw.

1.5m/s ersichtlich. Trotz der stark verringerten Lasten ist der Berechnungsfaktor  $\varphi_{dyn}$  im Dimensionierungsfall immer noch stets größer als 2 und die Belastungswerte im Störfall damit größer als die doppelte Nennlast aus dem Betriebsfall. Es lässt sich also sagen, dass auch schon bei Dimensionierung auf eine maximal zulässige Verfahrensgeschwindigkeit  $v_{max} = 1.2m/s$  (für den Fall, dass auch wirklich mit dieser Geschwindigkeit verfahren wird) im Störfall die Seilkräfte größer sind als die, für die Dimensionierung relevanten, Belastungen im Betriebsfall.

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
$\varphi_{stat}$	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
Punktzug 2.5kN	1.30	1.81	2.27	<b>3.53</b>	4.30	0.80	1.42	2.04	<b>3.35</b>	3.88
	-39.8%	-39.1%	-38.7%	<b>-35.7%</b>	-31.1%	-22.1%	-21.4%	-20.9%	<b>-20.8%</b>	-20.5%
Punktzug 5kN	0.79	1.09	1.92	<b>3.28</b>	3.95	0.43	0.73	1.97	<b>3.64</b>	4.29
	-44.9%	-42.8%	-42.0%	<b>-33.4%</b>	-30.7%	-26.3%	-25.8%	-24.9%	<b>-24.7%</b>	-25.6%
Prospektzug 5kN	2.08	2.23	2.76	<b>3.39</b>	3.71	1.38	1.54	2.17	<b>3.02</b>	3.43
	-27.8%	-27.7%	-28.1%	<b>-29.1%</b>	-29.3%	-29.0%	-30.3%	-34.0%	<b>-35.5%</b>	-35.2%
Prospektzug 10kN	1.51	1.63	2.49	<b>3.10</b>	3.50	0.84	0.96	1.99	<b>2.92</b>	3.26
	-27.4%	-27.0%	-26.0%	<b>-27.0%</b>	-26.4%	-15.5%	-15.6%	-17.6%	<b>-17.8%</b>	-19.0%
	$\varphi_{dyn}$									
Punktzug 2.5kN	0.99	1.39	1.74	<b>2.70</b>	3.29	0.61	1.09	1.56	<b>2.57</b>	2.97
	-39.8%	-39.1%	-38.7%	<b>-35.7%</b>	-31.1%	-22.1%	-21.4%	-20.9%	<b>-20.8%</b>	-20.5%
Punktzug 5kN	0.60	0.84	1.47	<b>2.51</b>	3.02	0.33	0.56	1.51	<b>2.79</b>	3.28
	-44.9%	-42.8%	-42.0%	<b>-33.4%</b>	-30.7%	-26.3%	-25.8%	-24.9%	<b>-24.7%</b>	-25.6%
Prospektzug 5kN	1.81	1.94	2.39	<b>2.94</b>	3.22	1.20	1.34	1.88	<b>2.62</b>	2.98
	-27.8%	-27.7%	-28.1%	<b>-29.1%</b>	-29.3%	-29.0%	-30.3%	-34.0%	<b>-35.5%</b>	-35.2%
Prospektzug 10kN	1.37	1.48	2.26	<b>2.81</b>	3.18	0.76	0.87	1.80	<b>2.65</b>	2.96
	-27.4%	-27.0%	-26.0%	<b>-27.0%</b>	-26.4%	-15.5%	-15.6%	-17.6%	<b>-17.8%</b>	-19.0%

Tabelle 6.3: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  bei  $v_{max} = 1.2m/s$

# 7 Unter welchen Voraussetzungen kommt es beim Heben zur Schlaffseilbildung?

## 7.1 Bereiche der Schlaffseilbildung

Bewegt sich die Last nach oben, während die Seiltrommel verzögert wird, so verringert sich die (Umfangs-)Geschwindigkeit der Seiltrommel schneller als die der Last. Das unter Spannung stehende Seil wird entlastet. Wenn zum Zeitpunkt, in dem das Seil komplett entspannt ist, die Last immer noch schneller ist als die Seiltrommel, kommt es zur Schlaffseilbildung, weil eine weitere Verringerung der Seilspannung nicht möglich ist (Seile können keine Druckkräfte übertragen). Wenn sich die Last, aufgrund der Erdbeschleunigung, anschließend wieder nach unten bewegt, geschieht dies im freien Fall, bis das Seil plötzlich wieder gespannt wird. Bei diesem "Fallen in das schlaffe Seil" kommt es also zu einem plötzlichen Anstieg der Seilkraft, die Last wird nun verzögert.

Zur Schlaffseilbildung kommt also hauptsächlich in dem Lastfall Heben. Auch im Lastfall Senken kann es zur Schlaffseilbildung kommen, wenn die Beschleunigung der Last so hoch ist, dass die Seilkraft beim nach oben Schwingen der Last null wird. Dies ist aber nicht kritisch, da die auftretenden Kräfte und Beschleunigungen geringer sind, als die Maximalwerte kurz nach Stillstand der Seiltrommel. Aufgrund der Dämpfung nimmt die Amplitude der Seilkraft mit der Zeit ab, deshalb ist die erste Amplitude der Seilkraft immer die Größte.

Um den Einfluss der Parameter Verfahrensgeschwindigkeit, Bremsmoment, Seillänge und Masse der Last auf die Schlaffseilbildung analysieren zu können, werden nicht nur mit

den Nennwerten dieser Parameter, sondern auch mit größeren und kleineren Werten, Simulationen durchgeführt.

Für die Simulation wird der Punktzug 5kN, mit Dimensionierung auf verringerte Verfahrgeschwindigkeit und einer Last von 250kg, herangezogen (die getroffen Feststellungen gelten aber auch für andere Hubzüge und Lasten). So ist es möglich, dass man das Nennbremsmoment und die Nennverfahrgeschwindigkeit variieren kann, diese aber nicht völlig unrealistische Werte annehmen. Die Verringerung der Nennverfahrgeschwindigkeit bewirkt auch, dass sich die Seillänge, ab der es zur Schlaffseilbildung kommt, verringert. Sie liegt also näher am Arbeitsbereich als beim "normalen" Punktzug 5kN, aber immer noch außerhalb.

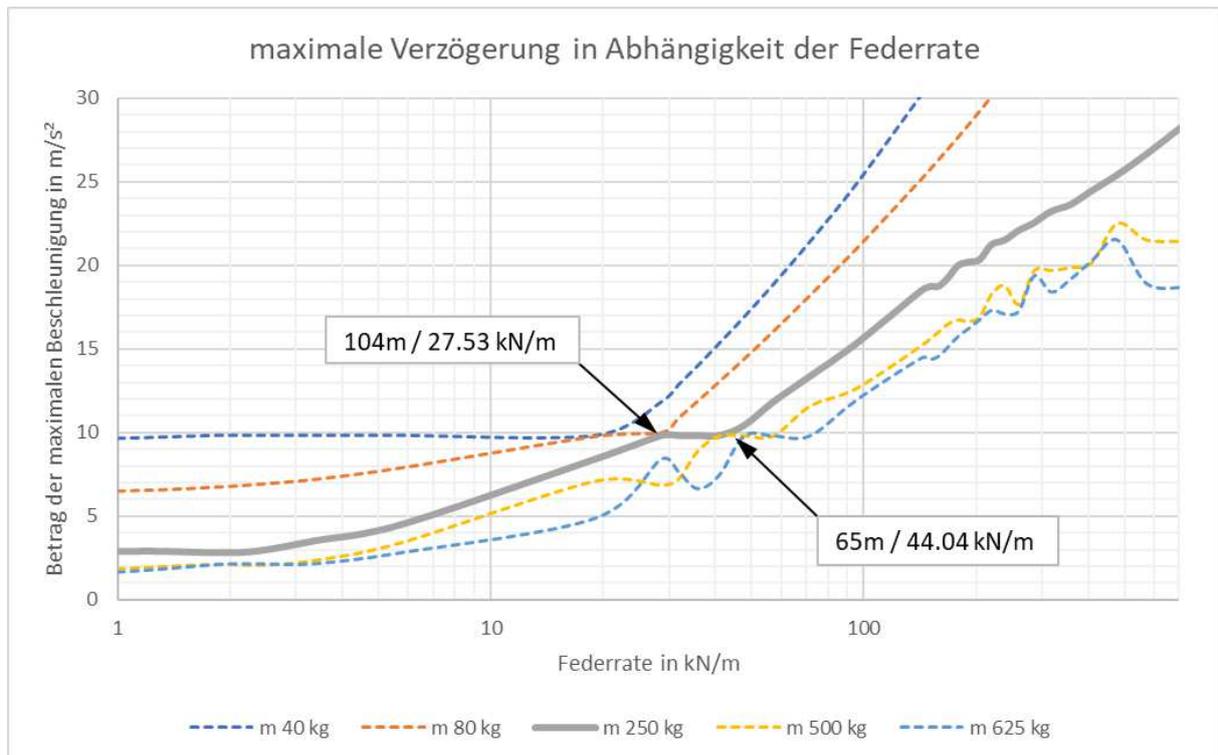


Abbildung 7.1: Schlaffseilbildung beim Punktzug 5kN: Beschleunigung in Abhängigkeit der Federrate, Heben mit Nennbedingungen |  $v = 1.2m/s$  &  $M_B = 80Nm$

Betrachtet man das Diagramm (siehe Abbildung 7.1) der maximal wirkenden Beschleunigung der Last, so erkennt man 2 Bereiche:

1. Maximale Beschleunigung in Hubrichtung  $a < 9.807m/s^2$
2. Maximale Beschleunigung in Hubrichtung  $a = 9.807m/s^2$

Der erste Bereich, in welchem es nicht zur Schlaffseilbildung kommt, tritt in diesem konkreten Fall bei Seillängen zwischen  $\infty m / 0 kN/m$  und  $104 m / 27.53 kN/m$  auf. Die maximale Beschleunigung, in Hubrichtung, ist stets kleiner als  $9.807 m/s^2$ , es kommt also zu keinem Abheben der Last mit anschließendem freien Fall.

Im zweiten Bereich, von  $104 m / 27.53 \frac{kN}{m}$  bis  $0 m / \infty kN/m$ , tritt dann die Schlaffseilbildung auf.

Zwischen  $104 m / 27.53 \frac{kN}{m}$  und  $65 m / 44.04 kN/m$  liegt der Wert der maximalen Beschleunigung, in Hubrichtung, konstant bei  $9.807 m/s^2$ . Wenn die Last sich nach oben bewegt, dann erreicht die Beschleunigung also den Wert  $a = g$ , das Seil entspannt sich und wenn die Last sich anschließend wieder nach unten bewegt, fällt sie ins schlaffe Seil. Beim diesem Fallen in das schlaffe Seil sind die Verzögerungen aber geringer als die Erdbeschleunigung. Anschließend, zwischen  $65 m / 44.04 kN/m$  und  $0 m / \infty kN/m$ , gilt für die Beschleunigung der, sich nach oben bewegenden, Last ebenfalls  $a = g$ . Wenn es danach zum Fall ins schlaffe Seil kommt, werden die Maximalwerte der Verzögerungen aber größer als  $9.807 m/s^2$ . Seillängen unter  $5 m$  werden, wie schon beschrieben, nicht betrachtet, da sie in der Praxis nicht zur Anwendung kommen.

Da die Schlaffseilbildung, unabhängig davon ob die Verzögerung in der Abwärtsbewegung größer oder kleiner als  $g$  ist, immer bei einer Beschleunigung, in Hubrichtung, von  $a = g$  eintritt, wird beides als gemeinsamer Bereich betrachtet.

## 7.2 Verlauf von Seilkraft und Beschleunigung bei Schlaffseilbildung

In Abbildung 7.1 sind für verschiedene Lasten und Seillängen die Maximalwerte der Beschleunigung zu sehen, um im Detail verstehen zu können wie es zur Schlaffseilbildung kommt und wie die Seilkräfte und Beschleunigungen sich dabei verhalten, werden im Folgenden die Einzelsimulationen für verschiedene Punkte auf dem Diagramm untersucht.

### 7.2.1 Bereich 1, keine Schlaffseilbildung: $a < 9.807m/s^2$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast:250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 150m / 19.09kN/m
- Bremsmoment: 80Nm
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 8.407m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 4.076kN$

Wie in Abbildung 7.2 zu erkennen ist, wird die maximale Beschleunigung der Last nie größer als die Erdbeschleunigung. Das Seil bleibt stets gespannt, da die Seilkraft immer größer als 0 ist.

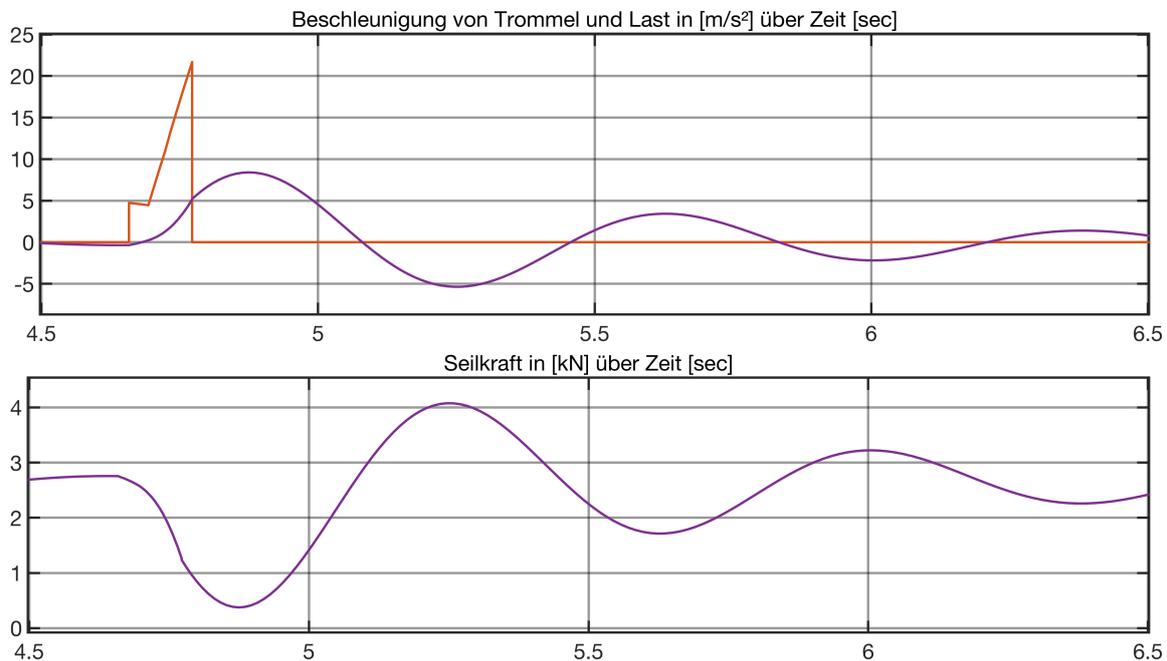


Abbildung 7.2: Schlaffseilbildung: 1. Bereich, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

### 7.2.2 Bereich 2 Schlaffseilbildung: $a = 9.807m/s^2$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast:250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 85m / 33.68kN/m
- Bremsmoment: 80Nm
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 4.860kN$

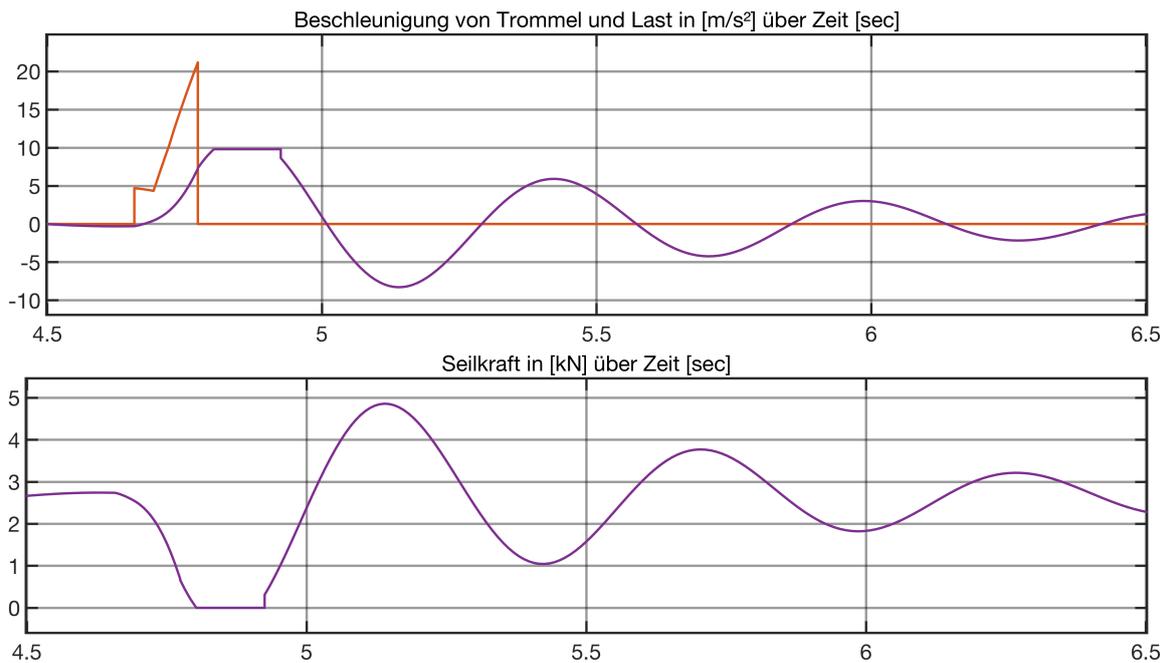


Abbildung 7.3: Schlaffseilbildung: 2. Bereich, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

In Abbildung 7.3 ist zu erkennen, dass es beim Bremsen, aber erst nach dem Stillstand der Seiltrommel, zur Schlaffseilbildung kommt: die Seilkraft ist in diesem Bereich 0. Die maximale Beschleunigung der Last wird, in diesem Fall, nie größer als die Erdbeschleunigung.

Wird die Seillänge weiter verkürzt, kommt es irgendwann zu dem Fall, dass die maximale Beschleunigung der Last betragsmäßig größer als die Erdbeschleunigung wird. In diesem Bereich tritt die Schlaffseilbildung mitunter auch beim Ausschwingen auf, es kommt also mehrfach zur Schlaffseilbildung.

## 7.3 Einfluss der Parameter auf die Schlaffseilbildung beim Heben

In diesem Abschnitt soll der qualitative Einfluss der Parameter (Verfahrgeschwindigkeit, Bremsmoment, Seillänge und Masse der Last) auf die Schlaffseilbildung untersucht werden. Wie schon zu Beginn des Kapitels wird wieder der Punktzug 5kN, mit Dimensionierung auf verringerte Verfahrgeschwindigkeit, mit einer Nutzlast von 250kg verwendet.

Als Ausgangspunkt wird der Bereich  $|a| = 9.807m/s^2$  verwendet (siehe Abbildung 7.3), da hier gut zu erkennen ist wie die Parameterveränderung sich auf die Schlaffseilbildung auswirkt. Wird bei einer Parametervariation der Betrag der maximalen Beschleunigung kleiner als  $g$ , so hat diese Parametervariation einen positiven Einfluss auf die Schlaffseilbildung. Wird bei einer Parametervariation der Betrag der maximalen Beschleunigung größer als  $g$ , so hat diese Parametervariation einen negativen Einfluss auf die Schlaffseilbildung.

Da der qualitative Einfluss der Parameter auf die Schlaffseilbildung untersucht wird, die Schlaffseilbildung im betrachteten Fall jedoch schon außerhalb des realistischen Arbeitsbereichs beginnt, müssen für die Parameter und deren Variation mitunter nicht praxisrelevante Werte gewählt werden.

### 7.3.1 Verfahrgeschwindigkeit

Je höher die Geschwindigkeit des Hubzugs ist desto größer ist die kinetische Energie der Last. Diese wiederum führt dazu, dass es eher zur Schlaffseilbildung kommt.

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 85m / 33.68kN/m
- Bremsmoment: 80Nm
- **Verfahrgeschwindigkeit: 1.8m/s (+50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 6.200kN (+27.6\%)$

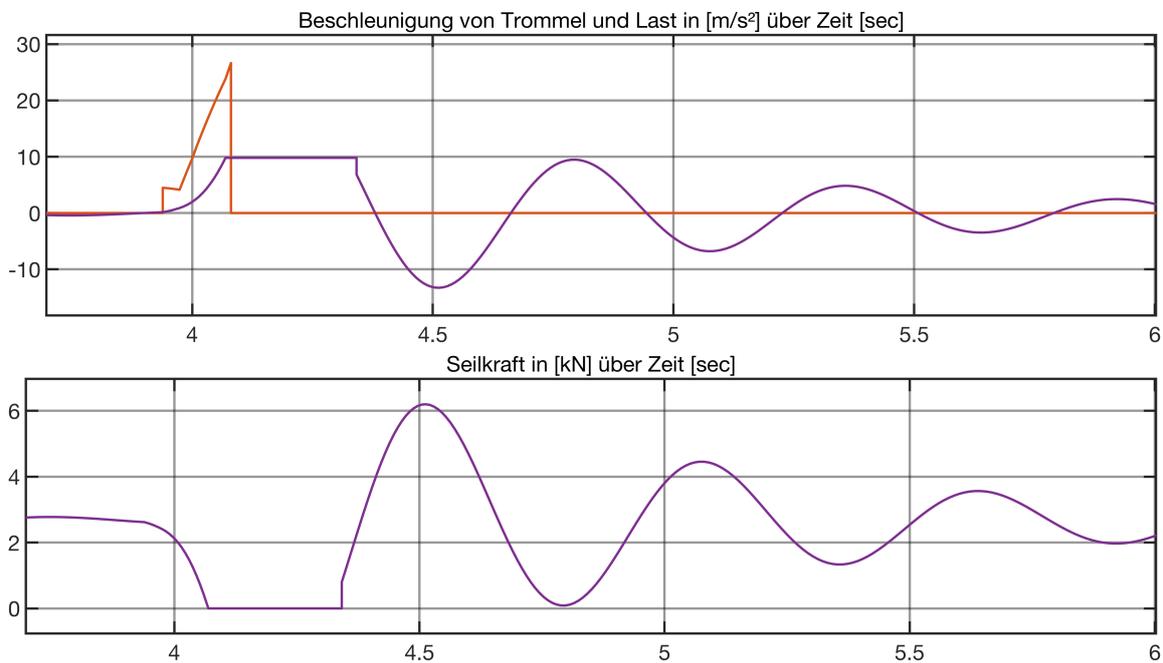


Abbildung 7.4: Schlaffseilbildung: Erhöhung der Verfahrgeschwindigkeit, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 85m / 33.68kN/m
- Bremsmoment: 80Nm
- **Verfahrgeschwindigkeit: 0.6m/s (-50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 5.700m/s^2$  (-41.8%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 3.928kN$  (-19.2%)

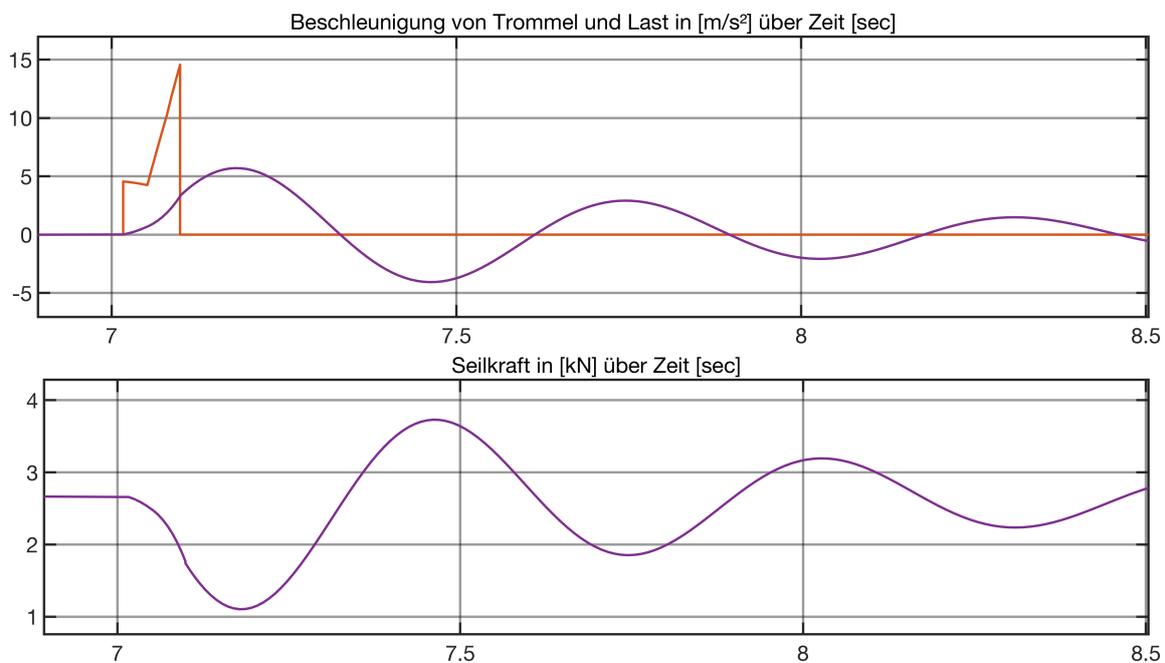


Abbildung 7.5: Schlaffseilbildung: Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

### 7.3.2 Bremsmoment

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 85m / 33.68kN/m
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s
- **Bremsmoment: 120Nm (+50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 4.896kN (+0.7\%)$

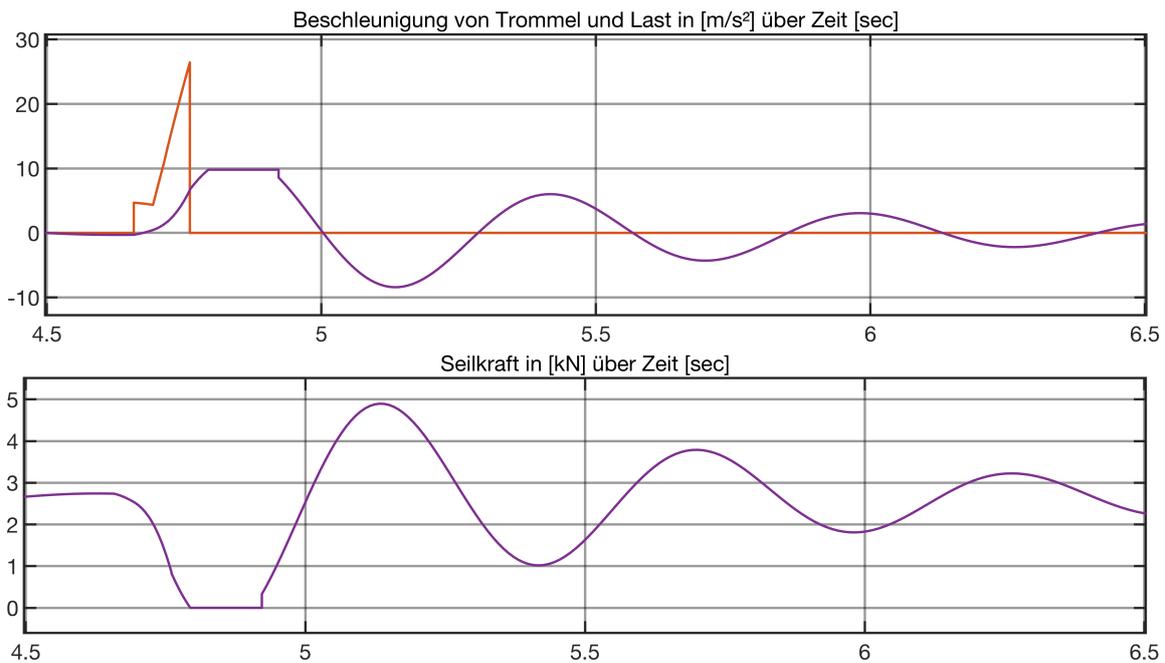


Abbildung 7.6: Schlaffseilbildung: Erhöhung des Bremsmoments bei großer Seillänge, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 85m / 33.68kN/m
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s
- **Bremsmoment: 40Nm (-50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 4.760kN$  (-2.1%)

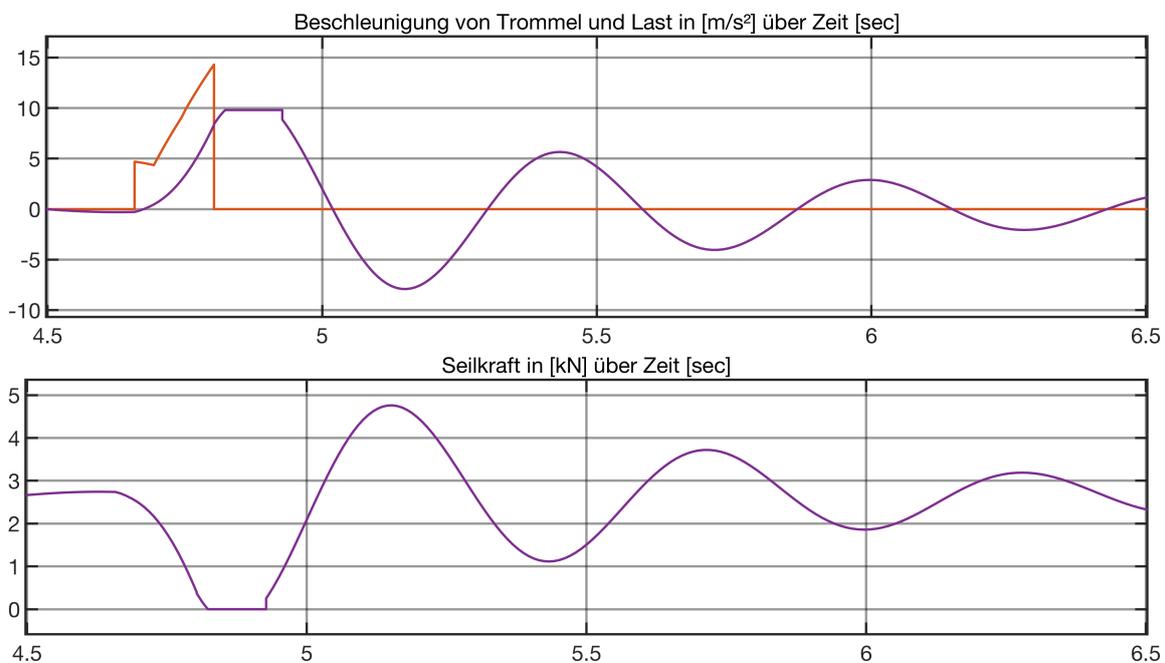


Abbildung 7.7: Schlaffseilbildung: Verringerung des Bremsmoments bei großer Seillänge, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 5m / 572.56kN/m
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s
- **Bremsmoment: 120Nm (+50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 11.263kN$  (+15.1%)

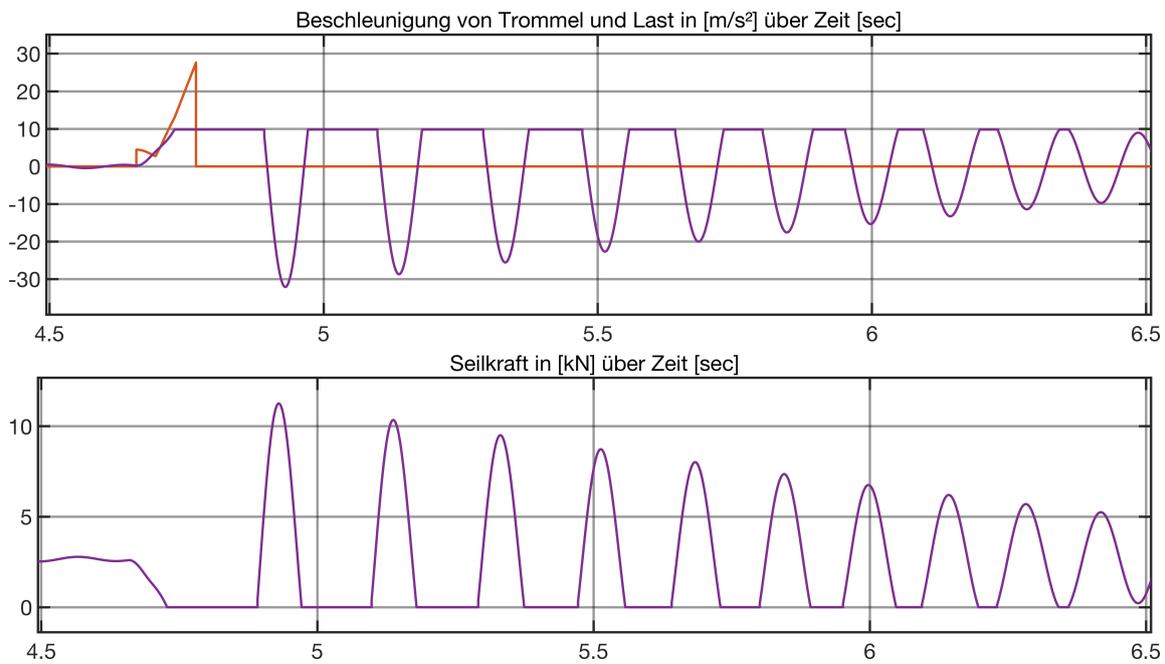


Abbildung 7.8: Schlaffseilbildung: Erhöhung des Bremsmoments bei kurzer Seillänge, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 5kN, Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 5m / 572.56kN/m
- Verfahrgeschwindigkeit: 1.2m/s
- **Bremsmoment: 40Nm (-50%)**

Belastung:

- maximale Beschleunigung in Hubrichtung:  $a = 9.807m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 7.340kN$  (-25.0%)

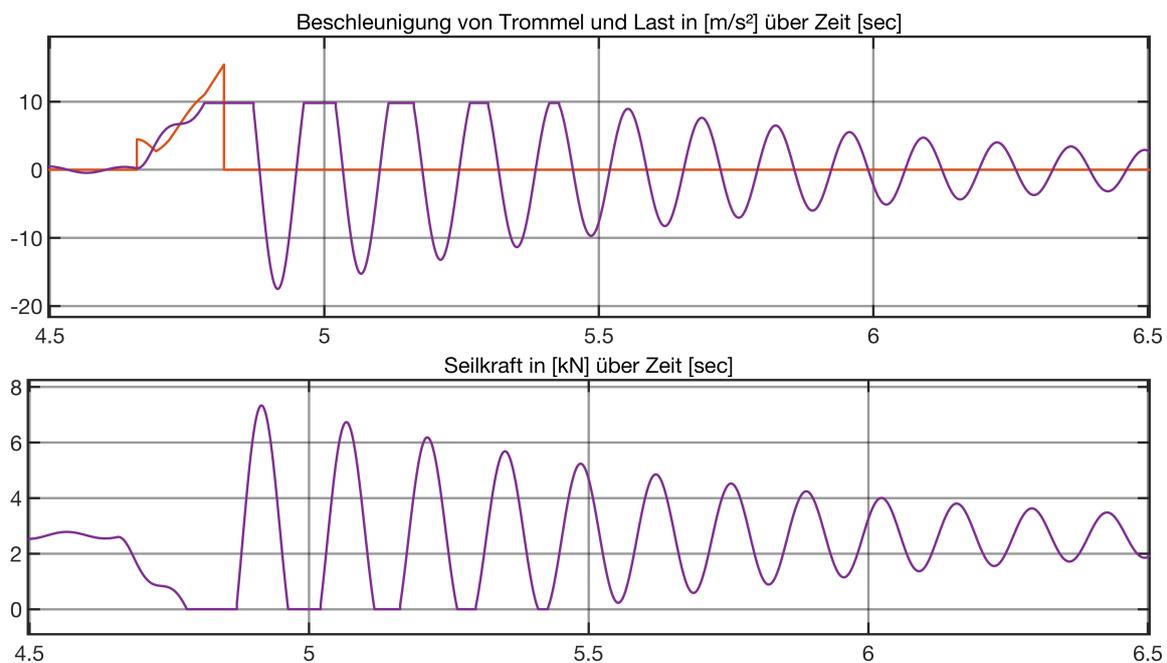


Abbildung 7.9: Schlaffseilbildung: Verringerung des Bremsmoments bei kurzer Seillänge, Verlauf von Beschleunigungen und Seilkraft

Wie in den Abbildungen 7.6 & 7.7 zu sehen ist, hat das Bremsmoment in diesem Fall keine nennenswerte Auswirkung auf die Schlaffseilbildung. Obwohl die Variation des Bremsmoments Einfluss auf das Bremsverhalten der Seiltrommel hat, ändert sich aus Sicht der Last fast nichts, da die Last nicht starr sondern elastisch mit der Seiltrommel gekoppelt ist. Bei kurzen Seillängen (hohe Federsteifigkeit  $\approx$  starre Kopplung) hingegen hat das Bremsmoment einen sehr hohen Einfluss auf die Schlaffseilbildung und die Belastung, siehe Abbildungen 7.8 & 7.9.

### 7.3.3 Seillänge

Je kürzer das Seil, um so höher die Federsteifigkeit und dadurch die Eigenfrequenz des Systems. Je schneller die Last schwingt desto höher müssen die Seilkräfte werden, dies führt wiederum dazu, dass es eher zur Schlaffseilbildung kommt. Dies ist auch u.a. in Abbildung 7.1 zu erkennen. Höhere Federsteifigkeiten bedeuten, dass die Last "starrer" mit der Seiltrommel gekoppelt ist, das plötzliche Einfallen der Bremse/n wirkt sich stärker auf die Last aus, je "starrer" die Kopplung zwischen Seiltrommel und Last ist.

### 7.3.4 Masse der Last

Durch Erhöhung der Masse verringert sich die Eigenfrequenz (siehe Abschnitt 7.3.3). Je träger das System wird (also je niedriger die Eigenfrequenz ist), desto länger braucht die Last um auf das Bremsmanöver zu reagieren, die Schlaffseilbildung tritt gar nicht oder erst später auf.

## 7.4 Parameterstudie zur Schlaffseilbildung

Bisher wurde untersucht:

- wie man anhand der Beschleunigung der Last erkennen kann ob es zur Schlaffseilbildung kommt und
- wie die einzelnen Parameter sich auf die Schlaffseilbildung auswirken

Im Rahmen einer Parameterstudie soll nun geklärt werden wie sich die Variation von Seillänge, (Nutz-)Last und die Verfahrgeschwindigkeit auf die Schlaffseilbildung auswirkt. Untersucht werden die 4 Hubzüge bei Nennbedingungen (siehe Abschnitt 5.1).

Für die Parameter werden folgende Intervalle bzw. Werte gewählt:

- Die Seillängen werden, wie schon bei den Simulation zuvor, zwischen 50 und 5m variiert.
- Die Verfahrgeschwindigkeit wird ausgehend vom Startwert  $1.8m/s$  (Punktzüge) und  $1.5m/s$  (Prospektzüge) in 10 Schritten auf  $0.2m/s$  verringert.
- Als Lasten werden wie schon bei den Simulationen zuvor  $40kg$ ,  $80kg$ , 50% Nennlast, 100% Nennlast und 125% Nennlast angenommen.

Um besser erkennen zu können, ab wann es zur Schlaffseilbildung kommt, werden die in den folgenden Tabellen eingetragenen Beschleunigungswerte rot markiert, wenn sie über der Erdbeschleunigung liegen (Schlaffseilbildung tritt auf bei  $a \geq g$ ).

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
	0	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	27.87	26.02	24.17	22.33	20.48	16.87	13.25	9.81	9.81	8.12	3.74
m in kg	80	22.06	20.59	19.18	17.73	16.32	13.48	10.65	9.81	9.43	6.34	3.02
m in kg	125	18.82	17.60	16.50	15.25	14.02	11.60	9.81	9.81	8.00	5.39	2.58
m in kg	250	14.71	13.58	12.90	12.04	10.77	9.81	9.81	8.10	6.13	4.13	1.97
m in kg	313	13.80	12.52	11.41	11.00	10.51	9.81	8.98	7.37	5.60	3.77	1.80
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	31.97	29.88	27.79	25.71	23.68	19.61	15.61	11.67	9.81	8.95	4.05
m in kg	80	25.29	23.71	22.11	20.52	18.91	15.77	12.63	9.81	9.81	7.06	3.33
m in kg	125	21.73	20.42	18.94	17.68	16.31	13.62	10.92	9.81	8.94	6.03	2.86
m in kg	250	16.57	16.03	15.13	13.77	12.85	10.59	9.81	9.15	6.90	4.66	2.20
m in kg	313	15.65	14.43	13.83	12.98	11.52	10.17	9.81	8.25	6.30	4.25	2.00
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	37.84	35.41	33.00	30.61	28.22	23.48	18.88	14.35	9.89	9.81	4.44
m in kg	80	29.93	28.07	26.22	24.37	22.54	18.89	15.30	11.72	9.81	8.05	3.75
m in kg	125	25.61	24.09	22.54	20.94	19.45	16.35	13.30	10.22	9.81	6.93	3.25
m in kg	250	20.77	18.80	17.37	16.74	15.37	12.96	10.48	9.81	7.99	5.41	2.52
m in kg	313	18.11	17.88	16.64	15.11	14.35	12.04	9.93	9.56	7.38	4.96	2.30
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	42.01	39.31	36.64	33.99	31.35	26.15	21.09	16.11	11.27	9.81	4.66
m in kg	80	33.14	31.06	29.04	27.01	25.01	20.98	17.05	13.17	9.81	8.72	4.02
m in kg	125	28.31	26.59	24.87	23.21	21.50	18.18	14.86	11.53	9.81	7.54	3.51
m in kg	250	21.58	20.54	20.08	18.27	16.94	14.47	11.91	9.81	8.74	5.95	2.73
m in kg	313	21.47	19.57	17.61	17.03	15.91	13.46	10.85	9.81	8.10	5.45	2.50
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	47.54	44.50	41.48	38.48	35.50	29.68	23.97	18.42	13.02	9.81	4.87
m in kg	80	37.37	35.03	32.73	30.46	28.17	23.66	19.26	14.98	10.77	9.55	4.35
m in kg	125	31.74	29.86	27.93	26.08	24.13	20.44	16.76	13.12	9.81	8.32	3.84
m in kg	250	25.20	23.77	21.44	20.79	19.14	16.30	13.58	10.70	9.73	6.66	3.01
m in kg	313	22.10	21.04	21.10	19.05	17.55	15.20	12.67	10.07	8.99	6.12	2.75
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	55.55	52.00	48.47	44.98	41.51	34.67	28.00	21.54	15.30	9.81	5.00
m in kg	80	43.32	40.61	37.92	35.24	32.58	27.35	22.28	17.33	12.58	9.81	4.74
m in kg	125	36.65	34.41	32.16	29.98	27.77	23.46	19.26	15.15	11.15	9.34	4.25
m in kg	250	28.12	27.03	25.25	23.26	22.25	18.74	15.67	12.51	9.81	7.65	3.38
m in kg	313	27.24	24.63	22.65	22.65	19.91	17.32	14.67	11.64	9.81	7.08	3.10
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	69.12	64.64	60.19	55.78	51.41	42.82	34.46	26.44	18.78	11.61	5.11
m in kg	80	53.04	49.62	46.23	42.88	39.56	33.06	26.77	20.68	14.97	9.81	5.17
m in kg	125	44.30	41.54	38.77	35.95	33.25	27.96	22.86	17.92	13.21	9.81	4.79
m in kg	250	33.93	31.83	29.90	28.16	25.70	22.42	18.58	14.95	11.46	9.17	3.91
m in kg	313	31.32	29.54	27.48	26.45	23.80	21.22	17.41	14.19	10.97	8.62	3.61
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	100.62	93.95	87.35	80.82	74.36	61.67	49.37	37.57	26.45	16.22	5.27
m in kg	80	75.00	69.92	64.93	59.97	55.07	45.50	36.24	27.40	19.15	11.73	5.43
m in kg	125	60.69	56.61	52.57	48.51	44.48	36.73	29.19	22.19	15.75	10.22	5.44
m in kg	250	44.45	42.15	38.36	36.01	33.38	27.69	22.65	17.91	13.74	10.25	4.74
m in kg	313	40.01	39.60	35.00	33.51	30.91	26.32	21.49	17.34	13.71	10.35	4.42

Tabelle 7.1: Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Punktzug 2.5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
	0	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	33.19	31.06	28.96	26.88	24.81	20.74	16.74	9.81	9.81	9.24	4.19
m in kg	80	27.42	25.66	24.02	22.32	20.68	17.37	14.12	9.81	9.81	7.52	3.57
m in kg	250	19.53	18.11	16.37	15.51	14.55	12.22	9.82	9.81	7.51	5.06	2.44
m in kg	500	15.02	13.48	12.23	12.25	12.26	9.81	8.69	7.12	5.54	3.82	1.84
m in kg	625	14.45	13.73	11.74	9.81	9.81	9.81	9.66	7.76	5.28	3.43	1.67
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	37.67	35.29	32.90	30.58	28.28	23.71	19.21	9.81	10.51	9.81	4.51
m in kg	80	30.97	29.13	27.21	25.35	23.50	19.81	16.18	9.81	9.81	8.33	3.91
m in kg	250	21.00	19.62	19.26	17.77	16.22	13.89	11.49	9.81	8.38	5.66	2.71
m in kg	500	16.86	15.41	14.99	14.21	12.18	11.75	9.81	8.30	6.17	4.37	2.05
m in kg	625	15.65	13.99	12.68	12.96	13.20	9.81	8.55	7.02	5.51	3.86	1.86
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	44.08	41.32	38.58	35.86	33.16	27.82	22.63	9.81	12.63	9.81	4.87
m in kg	80	36.13	33.96	31.75	29.58	27.43	23.16	18.97	9.81	10.76	9.43	4.35
m in kg	250	25.32	23.33	21.40	20.96	18.87	16.17	13.51	9.81	9.58	6.50	3.08
m in kg	500	18.39	18.79	17.78	15.92	15.34	12.82	10.77	9.53	7.62	5.07	2.34
m in kg	625	17.81	16.46	16.21	14.95	13.03	12.19	10.69	7.99	6.97	4.47	2.13
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	48.66	45.57	42.53	39.55	36.53	30.65	24.94	19.37	14.05	9.81	5.04
m in kg	80	39.72	37.28	34.85	32.47	30.13	25.41	20.81	16.35	11.94	9.81	4.62
m in kg	250	26.76	25.29	24.38	21.90	21.20	17.99	14.79	11.72	9.81	7.07	3.33
m in kg	500	22.83	20.88	17.99	17.54	16.78	14.32	11.39	9.95	8.24	5.46	2.54
m in kg	625	18.14	18.51	18.05	16.18	15.64	12.43	10.18	9.81	7.16	4.98	2.31
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	54.74	51.27	47.80	44.39	41.01	34.36	27.94	21.73	15.76	10.04	5.13
m in kg	80	44.44	41.65	38.93	36.24	33.57	28.29	23.16	18.20	13.37	9.81	4.92
m in kg	250	29.85	28.21	26.39	24.97	22.87	19.94	16.43	13.11	9.81	7.79	3.64
m in kg	500	22.20	20.68	21.98	20.02	17.69	15.79	13.67	11.15	9.28	6.14	2.80
m in kg	625	23.64	21.79	18.40	17.94	17.35	14.95	11.80	10.79	8.43	5.53	2.55
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	63.54	59.46	55.42	51.41	47.45	39.68	32.18	24.97	18.12	11.62	5.21
m in kg	80	51.14	47.95	44.74	41.57	38.45	32.33	26.38	20.66	15.17	9.84	5.24
m in kg	250	33.36	32.19	29.74	28.14	25.95	22.28	18.52	14.83	11.17	8.74	4.05
m in kg	500	28.21	25.25	21.90	23.58	20.10	17.58	15.26	12.00	9.81	7.15	3.14
m in kg	625	22.02	22.61	24.12	19.94	18.94	16.84	13.91	11.62	9.07	6.53	2.87
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	78.36	73.25	68.19	63.18	58.23	48.53	39.16	30.17	21.73	13.94	5.31
m in kg	80	62.35	58.28	54.32	50.32	46.42	38.79	31.47	24.42	17.76	11.50	5.45
m in kg	250	40.05	37.62	35.27	32.34	30.40	25.79	21.09	16.97	12.90	9.81	4.61
m in kg	500	31.02	29.42	26.65	27.39	22.69	21.11	17.31	14.16	11.27	8.51	3.64
m in kg	625	27.96	25.69	28.21	22.43	23.20	20.48	16.67	14.01	11.21	7.82	3.34
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	112.88	105.29	97.77	90.34	83.00	68.68	54.95	41.86	29.68	18.85	5.44
m in kg	80	88.42	82.43	76.54	70.77	65.04	53.86	43.10	32.85	23.34	14.72	5.55
m in kg	250	52.97	49.65	45.28	41.91	38.42	32.12	25.46	19.50	14.37	10.02	5.37
m in kg	500	37.48	38.51	32.93	32.57	29.79	25.01	21.86	16.58	13.38	10.38	4.46
m in kg	625	35.45	35.73	31.73	28.78	29.79	21.95	19.00	16.60	13.34	9.97	4.12

Tabelle 7.2: Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Punktzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
	0	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	17.23	15.67	14.10	12.56	11.02	9.81	9.81	9.81	9.81	7.02	2.18
m in kg	80	16.25	14.79	13.31	11.87	10.42	9.81	9.81	9.81	9.81	6.60	2.21
m in kg	250	13.69	12.48	11.30	10.07	9.81	9.81	9.81	9.81	8.18	5.53	2.18
m in kg	500	11.78	10.72	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.17	6.94	4.70	1.95
m in kg	625	11.14	10.19	9.81	9.81	9.81	9.81	9.66	8.62	6.53	4.41	1.86
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	20.13	18.36	16.63	14.92	13.25	11.53	9.86	9.81	9.81	7.67	2.23
m in kg	80	19.00	17.37	15.75	14.18	12.55	10.96	9.81	9.81	9.81	7.25	2.26
m in kg	250	16.15	14.76	13.42	12.09	10.78	9.81	9.81	9.81	9.08	6.15	2.30
m in kg	500	13.89	12.79	11.65	10.52	9.81	9.81	9.81	9.81	7.77	5.28	2.11
m in kg	625	13.24	12.10	11.08	9.99	9.81	9.81	9.81	9.65	7.32	4.97	2.03
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	24.15	22.17	20.15	18.19	16.23	14.34	12.44	12.04	9.81	9.21	2.33
m in kg	80	22.88	21.00	19.11	17.27	15.47	13.62	11.83	11.50	9.81	8.76	2.36
m in kg	250	19.45	17.88	16.38	14.85	13.29	11.81	10.33	10.11	9.81	7.63	2.44
m in kg	500	16.86	15.51	14.26	12.96	11.69	10.43	9.81	9.81	9.76	6.71	2.43
m in kg	625	15.96	14.79	13.54	12.36	11.15	9.94	9.81	9.81	9.27	6.37	2.36
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	26.92	24.74	22.61	20.41	18.26	16.17	14.09	12.04	9.81	9.21	2.33
m in kg	80	25.58	23.46	21.39	19.38	17.38	15.39	13.42	11.50	9.81	8.76	2.36
m in kg	250	21.68	19.99	18.28	16.62	14.97	13.33	11.73	10.11	9.81	7.63	2.44
m in kg	500	18.74	17.37	15.96	14.56	13.21	11.80	10.43	9.81	9.76	6.71	2.43
m in kg	625	17.86	16.47	15.21	13.88	12.58	11.29	10.02	9.81	9.27	6.37	2.36
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	30.69	28.22	25.72	23.30	20.93	18.54	16.21	13.92	9.81	9.81	2.37
m in kg	80	29.02	26.67	24.38	22.11	19.89	17.66	15.45	13.30	9.81	9.51	2.40
m in kg	250	24.57	22.66	20.77	18.89	17.05	15.22	13.47	11.67	9.81	8.37	2.48
m in kg	500	21.24	19.63	18.08	16.54	15.04	13.49	12.00	10.54	9.81	7.48	2.54
m in kg	625	20.11	18.71	17.21	15.78	14.36	12.95	11.55	10.16	9.81	7.14	2.50
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	35.94	33.08	30.15	27.36	24.55	21.80	19.08	16.50	11.38	9.81	2.42
m in kg	80	33.93	31.22	28.54	25.93	23.24	20.66	18.13	15.65	10.89	9.81	2.45
m in kg	250	28.54	26.32	24.11	21.93	19.83	17.70	15.63	13.63	9.81	9.31	2.53
m in kg	500	24.49	22.67	20.89	19.11	17.36	15.68	13.97	12.32	9.81	8.51	2.60
m in kg	625	23.26	21.57	19.86	18.23	16.61	15.04	13.47	11.94	9.81	8.20	2.62
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	44.65	41.03	37.44	33.93	30.44	26.96	23.57	20.30	14.06	9.81	2.49
m in kg	80	42.02	38.59	35.21	31.87	28.57	25.34	22.20	19.13	13.32	9.81	2.51
m in kg	250	34.69	31.90	29.21	26.43	23.77	21.16	18.73	16.26	11.64	9.81	2.58
m in kg	500	29.36	27.08	24.85	22.68	20.61	18.47	16.47	14.55	10.96	9.81	2.65
m in kg	625	27.72	25.68	23.71	21.68	19.66	17.74	15.91	14.19	10.86	9.75	2.67
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	65.64	60.20	54.86	49.55	44.34	39.23	34.23	29.33	20.04	11.54	2.57
m in kg	80	61.17	56.07	51.01	46.04	41.15	36.34	31.64	27.08	18.42	10.57	2.60
m in kg	250	48.34	44.15	40.04	36.04	32.09	28.17	24.40	20.78	14.17	9.81	2.66
m in kg	500	38.57	35.10	31.79	28.55	25.42	22.40	19.51	16.78	12.11	9.81	2.71
m in kg	625	35.70	32.59	29.57	26.61	23.75	21.01	18.51	16.02	11.99	9.81	2.73

Tabelle 7.3: Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Prospektzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

Seillänge in m	50	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
	0	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	22.68	20.75	18.89	17.05	15.22	13.41	11.68	9.89	9.81	8.40	1.53
m in kg	80	21.50	19.76	17.97	16.23	14.52	12.82	11.17	9.81	9.81	7.97	1.55
m in kg	500	16.02	14.80	13.55	12.36	11.16	9.92	9.81	9.81	8.67	5.91	1.66
m in kg	1000	13.53	12.67	11.56	10.62	9.81	9.81	9.81	9.48	7.20	4.88	1.70
m in kg	1250	12.85	11.82	11.09	9.88	9.81	9.81	9.81	8.84	6.71	4.53	1.65
Seillänge in m	40	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	25.84	23.76	21.68	19.61	17.58	15.62	13.60	11.69	9.81	9.14	1.56
m in kg	80	24.58	22.59	20.61	18.69	16.81	14.87	13.01	11.18	9.81	8.69	1.58
m in kg	500	18.26	16.89	15.55	14.20	12.86	11.56	9.81	9.81	9.60	6.59	1.69
m in kg	1000	15.62	14.46	13.36	12.22	11.19	10.00	9.81	9.81	8.07	5.50	1.74
m in kg	1250	14.56	13.82	12.58	11.73	10.49	9.81	9.81	9.81	7.54	5.11	1.74
Seillänge in m	30	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	30.45	28.04	25.57	23.15	20.81	18.50	16.21	13.99	9.81	9.81	1.60
m in kg	80	28.87	26.55	24.34	22.04	19.82	17.63	15.50	13.40	9.81	9.64	1.61
m in kg	500	21.26	19.72	18.15	16.60	15.08	13.60	12.13	10.70	9.81	7.52	1.72
m in kg	1000	18.08	16.92	15.57	14.46	13.19	11.96	10.73	9.81	9.28	6.39	1.77
m in kg	1250	17.42	15.91	14.99	13.70	12.60	11.50	10.27	9.81	8.73	5.95	1.79
Seillänge in m	25	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	33.63	30.92	28.23	25.59	23.01	20.46	17.95	15.52	10.84	9.81	1.62
m in kg	80	31.83	29.30	26.79	24.31	21.86	19.46	17.12	14.81	10.42	9.81	1.64
m in kg	500	23.23	21.49	19.81	18.14	16.49	14.88	13.34	11.73	9.81	8.10	1.73
m in kg	1000	19.65	18.44	17.11	15.70	14.44	13.15	11.86	10.57	9.81	7.02	1.79
m in kg	1250	18.73	17.59	16.20	15.19	13.87	12.62	11.38	10.14	9.54	6.56	1.80
Seillänge in m	20	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	37.92	34.80	31.78	28.81	25.89	23.01	20.18	17.45	12.24	9.81	1.65
m in kg	80	35.80	32.93	30.13	27.33	24.51	21.80	19.17	16.60	11.71	9.81	1.66
m in kg	500	25.74	23.76	21.87	20.00	18.17	16.38	14.64	12.94	9.81	8.82	1.76
m in kg	1000	21.85	20.21	18.73	17.37	15.97	14.55	13.20	11.84	9.81	7.83	1.80
m in kg	1250	20.58	19.32	18.10	16.61	15.28	14.01	12.75	11.47	9.81	7.36	1.82
Seillänge in m	15	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	44.10	40.51	37.00	33.47	30.03	26.66	23.38	20.20	14.14	9.81	1.68
m in kg	80	41.56	38.17	34.82	31.53	28.29	25.14	22.04	19.06	13.42	9.81	1.69
m in kg	500	29.02	26.69	24.48	22.32	20.30	18.17	16.18	14.30	10.77	9.61	1.78
m in kg	1000	24.22	22.49	20.96	19.31	17.69	16.10	14.69	13.18	10.37	8.95	1.82
m in kg	1250	23.06	21.68	19.92	18.46	17.00	15.61	14.29	12.94	10.20	8.51	1.84
Seillänge in m	10	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	54.92	50.38	45.91	41.51	37.17	32.94	28.80	24.78	17.26	10.42	1.71
m in kg	80	51.47	47.22	42.99	38.86	34.80	30.79	26.90	23.17	16.10	9.81	1.73
m in kg	500	33.80	31.00	28.35	25.54	22.93	20.50	17.99	15.70	11.64	9.81	1.81
m in kg	1000	27.63	25.46	23.52	21.47	19.63	17.86	16.14	14.53	11.59	9.81	1.85
m in kg	1250	26.27	24.55	22.59	20.83	19.12	17.46	15.90	14.47	11.75	9.81	1.86
Seillänge in m	5	maximale Verfahrgeschwindigkeit in m/s										
		1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.60	0.40	0.20
m in kg	40	80.64	73.90	67.26	60.73	54.34	48.11	42.05	36.18	25.17	15.43	1.77
m in kg	80	75.62	69.30	63.07	56.95	50.95	45.09	39.37	33.84	23.51	14.25	1.78
m in kg	500	46.92	42.75	38.55	34.47	30.50	26.64	22.91	19.34	12.95	9.02	1.84
m in kg	1000	33.08	29.73	26.70	23.86	20.85	18.13	15.65	13.43	10.28	9.81	1.88
m in kg	1250	30.30	27.38	24.37	21.91	19.44	17.17	15.12	13.28	10.94	10.18	1.89

Tabelle 7.4: Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Prospektzug 10kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten

## 7.5 Näherungsformel für die Schlaffseilbildung

Zur Herleitung einer Abschätzungsformel für die Schlaffseilbildung wird eine Energiebilanz für den Fall, dass die Last sich mit  $v_{krit}$  bewegt (es also gerade zur Schlaffseilbildung kommt), erstellt. Werden Reibungsverluste, Dämpfungsverluste und sonstige Verluste vernachlässigt, so muss zu jedem Zeitpunkt die Gesamtenergie des Systems konstant sein. Die einzelnen Terme stehen für die kinetische Energie der Last sowie der Seiltrommel mit Antriebsstrang, die Federenergie des Seils und der potentiellen Energie der Last.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{ges} \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta l^2 + m \cdot g \cdot h \quad (7.1)$$

mit:  $\Delta l = \frac{F}{c}$

Eine Möglichkeit das Problem zu vereinfachen ist es, bei der Energiebilanz nur die Zeitpunkte "Eintritt des Störfalls" und "Last befindet sich am höchsten Punkt" zu betrachten und die Seiltrommel ganz zu vernachlässigen.

Damit ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{c \cdot \Delta l^2}{2} = m \cdot g \cdot h$$

mit:  $h = \Delta l = \frac{m \cdot g}{c}$

$$v_{krit} = g \sqrt{\frac{m}{c}} \quad (7.2)$$

Um die Gleichung 7.2 zu erhalten, werden also die kinetische Energie der Last und die im Seil gespeicherte Federenergie mit der potentiellen Energie der Last am höchsten Punkt gleichgesetzt.

	Seillänge in m / Federsteifigkeit in kN/m					
	5		25		50	
Punktzug 2.5kN	367.4		73.47		36.74	
Näherung	v in m/s:	0.26	v in m/s:	0.58	v in m/s:	0.82
Simulation	v in m/s:	0.31	v in m/s:	0.67	v in m/s:	0.96
Punktzug 5kN	572.6		114.51		57.26	
Näherung	v in m/s:	0.30	v in m/s:	0.66	v in m/s:	0.93
Simulation	v in m/s:	0.33	v in m/s:	0.90	v in m/s:	1.03
Prospektzug 5kN	1500		300		150	
Näherung	v in m/s:	0.22	v in m/s:	0.49	v in m/s:	0.69
Simulation	v in m/s:	0.42	v in m/s:	0.61	v in m/s:	0.86
Prospektzug 10kN	2420		484.1		242	
Näherung	v in m/s:	0.22	v in m/s:	0.50	v in m/s:	0.70
Simulation	v in m/s:	0.25	v in m/s:	0.57	v in m/s:	0.83

Tabelle 7.5: Abschätzung der für die Schlaffseilbildung kritischen Verfahrensgeschwindigkeit  $v_{krit}$  mit Formel 7.2, bei Nennlast

In Tabelle 7.5 sind die kritischen Verfahrensgeschwindigkeiten, bei denen es zur Schlaffseilbildung kommt, für verschiedene Seillängen und Hubzüge aufgetragen. Es sind sowohl die Ergebnisse der Näherung nach Formel 7.2, als auch die Ergebnisse der Simulation zu erkennen.

## 7.6 Ergebnisse und Interpretation

Die Simulationen zeigen, dass Schlaffseilbildung im Lastfall Heben vorkommt, wenn für die maximale Beschleunigung gilt:  $|a| \geq 9.807m/s^2$ .

Weiters konnte gezeigt werden, wie sich verschiedene Parameter auf die Schlaffseilbildung auswirken.

- **Verfahrensgeschwindigkeit:** je höher, desto eher kommt es zur Schlaffseilbildung
- **Bremsmoment:** je höher, desto eher kommt es zur Schlaffseilbildung
- **Seillänge:** je kürzer, desto eher kommt es zur Schlaffseilbildung
- **Masse der Last:** je niedriger, desto eher kommt es zur Schlaffseilbildung

Die Ergebnisse der Parameterstudie zur Schlaffseilbildung bestätigen die Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Verfahrgeschwindigkeit, Seillänge und Masse der Last auf die Schlaffseilbildung. Eine Veränderung des Bremsmoments wurde in der Parameterstudie nicht berücksichtigt, da dieses im Betrieb nicht veränderbar ist. Der Ausfall einer Bremse würde zwar eine Verringerung des Bremsmoments bedeuten, bei der Dimensionierung ist jedoch mit dem Einfallen beider Bremsen zu rechnen.

Die mit der Näherungsformel 7.2 berechneten Werte für die kritische Verfahrgeschwindigkeit, bei der es zur Schlaffseilbildung kommt, liegen unterhalb der jeweiligen Simulationsergebnisse.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 8 Maßnahmen zur Vermeidung hoher Belastungen beim Störfall

## 8.1 Verzögerter Einfall der 2. Bremse

### 8.1.1 Einfall der 2. Bremse im Stillstand

Bei einem verzögerten Einfall der 2. Bremse wird die maximale Seilkraft und Belastung gesenkt, wenn die 2. Bremse erst nach dem Zurückschwingen der Last aus dem maximalen Seilkraftwert einfällt und die Dämpfung so groß ist, dass es trotz Erhöhung des Bremsmoments (2 Bremsen = doppeltes Bremsmoment) zu keiner Erhöhung der maximalen Seilkraft kommt.

Die bisherigen Analysen haben ergeben, dass dies tatsächlich der Fall ist, aber zwischen der Verzögerungsdauer und den auftretenden Belastungen keine Gesetzmäßigkeit herrscht, da die Belastung stark davon abhängt in welche Richtung sich die Last beim Einfallen der 2. Bremse bewegt [4].

Ein interessanter Ansatz wäre es, die Verzögerungszeit so zu wählen, dass das Einfallen der 2. Bremse im Stillstand erfolgt. Somit wirkt immer nur das Nennbremsmoment und nicht wie beim gleichzeitigen Einfallen beider Bremsen das doppelte Nennbremsmoment, allerdings muss sichergestellt werden, dass die Bremswege immer ausreichend kurz sind, auch beim Ausfall der ersten Bremse.

Der Fall, dass die 2. Bremse ausfällt, wäre weniger kritisch, da die Last dann ja schon still steht. Der Ausfall der ersten Bremse würde jedoch zur Folge haben, dass die Last sich, für die Dauer der Verzögerung, im freien Fall befindet und sich die Geschwindigkeit der Last somit erhöht (beim Lastfall Senken, beim Heben wäre das genau umgekehrt).

<b>Bremswege bei Nennlast</b>									
Bremsweg nur 1. Bremse:									
senken									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	723.0	610.1	580.1	421.9	363.4	323.6	713.2	727.0	
Mb 160%	392.1	320.6	338.1	297.2	231.8	235.3	368.9	320.8	
tv in ms		610.0		422.0		324.0		727.0	
heben									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	164.7	160.7	189.0	173.0	126.7	146.3	142.1	173.7	
Mb 160%	141.6	138.2	164.4	146.1	112.0	119.4	122.8	137.9	
Bremsweg: Ausfall erster Bremse und Einfall der 2. Bremse mit Verzögerungszeit tv									
senken									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	5169.0	1905.0	2735.0	1125.0	1899.0	932.8	6479.0	2470.0	
Mb 160%	3516.0	1216.0	2089.0	816.1	1450.0	676.8	4140.0	1483.0	
	<b>678.9%</b>	<b>235.4%</b>	<b>425.4%</b>	<b>169.9%</b>	<b>462.7%</b>	<b>188.0%</b>	<b>881.3%</b>	<b>277.3%</b>	
Bremsweg: Ausfall erster Bremse und Einfall der 2. Bremse mit Verzögerungszeit tv/2									
senken									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	2518.0	1250.0	1485.0	807.2	867.2	579.7	2921.0	1572.0	
Mb 160%	1641.0	761.4	1095.0	560.0	668.6	429.5	1812.0	896.6	
	<b>273.0%</b>	<b>116.1%</b>	<b>181.0%</b>	<b>90.1%</b>	<b>158.0%</b>	<b>80.6%</b>	<b>337.4%</b>	<b>135.6%</b>	
Bremsweg: Ausfall erster Bremse und Einfall der 2. Bremse mit Verzögerungszeit 100ms									
senken									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	1214.0	833.3	954.4	625.5	657.0	488.9	1196.0	1021.0	
Mb 160%	738.7	444.4	677.2	430.0	495.0	364.4	675.1	496.6	
	<b>75.1%</b>	<b>37.3%</b>	<b>77.7%</b>	<b>46.8%</b>	<b>93.5%</b>	<b>52.7%</b>	<b>72.9%</b>	<b>44.8%</b>	
Bremsweg: Ausfall erster Bremse und Einfall der 2. Bremse mit Verzögerungszeit tv									
heben									
	Punktzug 2.5kN		Punktzug 5kN		Prospektzug 5kN		Prospektzug 10kN		
	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	Bremsweg in mm	Bremsdauer in ms	
Mb 100%	341.3	406.7	356.6	387.7	252.2	370.0	234.2	343.7	
Mb 160%	341.3	406.7	356.6	387.7	252.2	370.0	234.2	343.7	
	<b>122.9%</b>	<b>172.2%</b>	<b>101.8%</b>	<b>143.0%</b>	<b>111.3%</b>	<b>178.5%</b>	<b>76.8%</b>	<b>120.6%</b>	

Tabelle 8.1: Bremswege bei verzögertem Einfallen der 2. Bremse

Die Tabelle 8.1 zeigt den Bremsweg im Auslegungsfall (eine Bremse fällt ein) und den Bremsweg bei verzögertem Einfall der 2. Bremse im kritischen Fall (erste Bremse fällt aus).

In Tabelle 8.1 ist zu sehen, dass beim Ausfall der ersten Bremse und Einfall der 2. Bremse nach der Verzögerungszeit  $t_v$  (die Zeit welche die erste Bremse alleine für den Bremsvorgang benötigt), die Bremswege zu lang werden. Wird die Verzögerungsdauer gesenkt, so können im Lastfall Senken ausreichend kurze Bremswege erreicht werden. Beim Heben sind hohe Verzögerungszeiten kein Problem, da hier während der Verzögerungsdauer die Last im freien Fall nicht schneller sondern langsamer wird. Beim Heben sind die Bremswege ausreichend kurz, auch wenn die 2. Bremse im Stillstand einfällt.

### 8.1.2 Einfall der 2. Bremse um 100ms verzögert

Im vorherigen Abschnitt wurde der Effekt des verzögerten Einfalls der 2. Bremse auf den Bremsweg untersucht, mit dem Ergebnis, dass beim Heben bei Einfall der 2. Bremse im Stillstand ausreichend kurze Bremswege erreicht werden können, beim Senken in diesem Fall die Bremswege aber zu lang werden.

Deswegen sollen nun die Auswirkungen eines verzögerten Einfalls der 2. Bremse auf die Belastung (Seilkraft und Beschleunigung) untersucht werden. Die Verzögerungszeit wird mit 100ms so gewählt, dass auch bei Ausfall der ersten Bremse noch ausreichend kurze Bremswege sichergestellt werden können. Im Datenblatt werden für die Bremsen der Ansprechverzug beim Verknüpfen und die Verknüpfzeiten angegeben.

In Abbildung 8.1 ist das Ansprechverhalten der Bremse zu sehen. Der Ansprechverzug beim Verknüpfen gibt an, wie viel Zeit zwischen dem Abfallen der Spulenspannung und dem Einfallen der Bremse vergeht. Die Verknüpfzeit gibt an wie lange es, nach dem Abfallen der Spulenspannung, dauert bis die Bremse vollständig verknüpft ist, sprich das volle Bremsmoment erreicht wird.

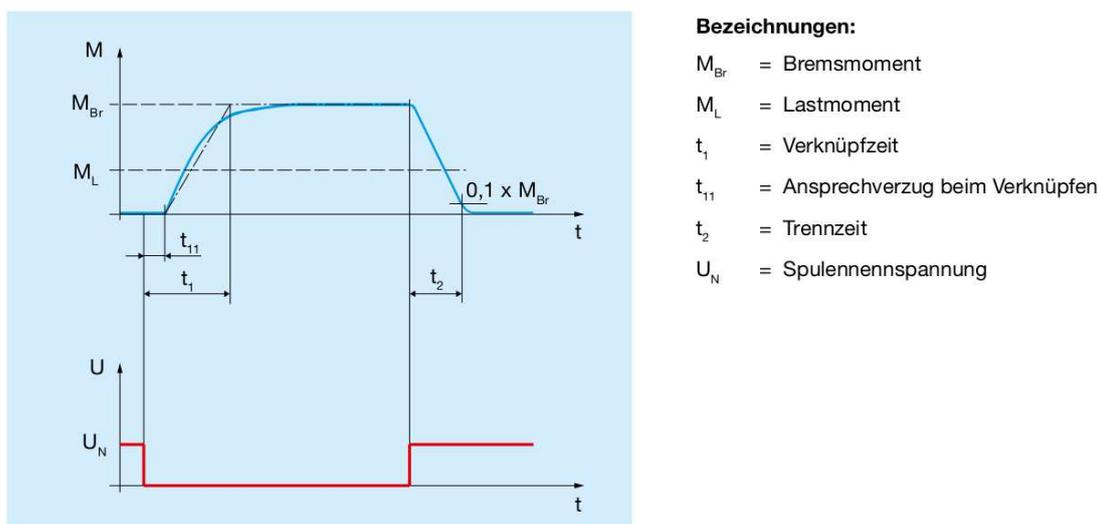


Abbildung 8.1: Verknüpfungsverhalten der Bremsen, Quelle: [5]

In Tabelle 8.2 sind die verschiedenen Verknüpfzeiten und Ansprechverzüge beim Verknüpfen der verwendeten Bremsen bei Ansteuerung mit Gleich- oder Wechselstrom angegeben. Für die verwendeten Bremsen sind die Ansprechverzüge beim Verknüpfen ca. 100ms größer, wenn die Bremse mit Wechselstrom statt Gleichstrom gespeist wird. Die zweite

Bremse fällt also ca. 100ms später ein als die erste, weswegen dieser Ansprechverzug beim Verknüpfen als Verzögerungszeit bezeichnet werden kann.

Schaltzeiten Typen 896_0_ _ _			Größe											
			4	8	16	32	64	100	200	300	500	800	1300	1800
Nennbremsmoment	Type 896.10_ _ _	$M_N$ [Nm]	4	8	16	32	64	100	200	300	500	800	1300	1800
Verknüpfzeit	Schaltung DC	$t_1$ [ms]	33	46	99	121	110	160	190	245	260	270	270	300
	Schaltung AC	$t_1$ [ms]	135	196	398	518	447	488	968	1087	1133	1231	1464	1920
Ansprechverzug beim Verknüpfen	Schaltung DC	$t_{11}$ [ms]	6	9	20	32	34	35	60	60	65	65	80	100
	Schaltung AC	$t_{11}$ [ms]	52	79	145	229	164	154	412	429	518	531	588	800
Trennzeit		$t_2$ [ms]	52	70	94	120	174	234	270	308	444	581	589	850

Tabelle 8.2: Verzögerungszeiten der Bremsen bei unterschiedlicher Spannungsversorgung,  
Quelle: [5]

### 8.1.2.1 Punktzug 2.5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 2.5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.1), das Anlagenschema ist in Abbildung 8.2 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei der Einfall der 2. Bremse verzögert wird:

Nenngeschwindigkeit:  $1.8m/s$ , Nennbeschleunigung:  $3.0m/s^2$ , verzögertes Einfallen der 2. Bremse, Verzögerungszeit beim Senken & Heben:  $100ms$ . Untersucht werden die 2 Fälle: Ausfall der ersten Bremse, (in der Legende "1 BF") und der Fall, dass beide Bremsen funktionieren (gestrichelte Kurve).

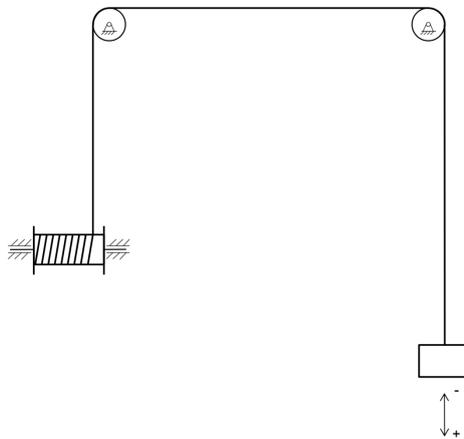


Abbildung 8.2: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

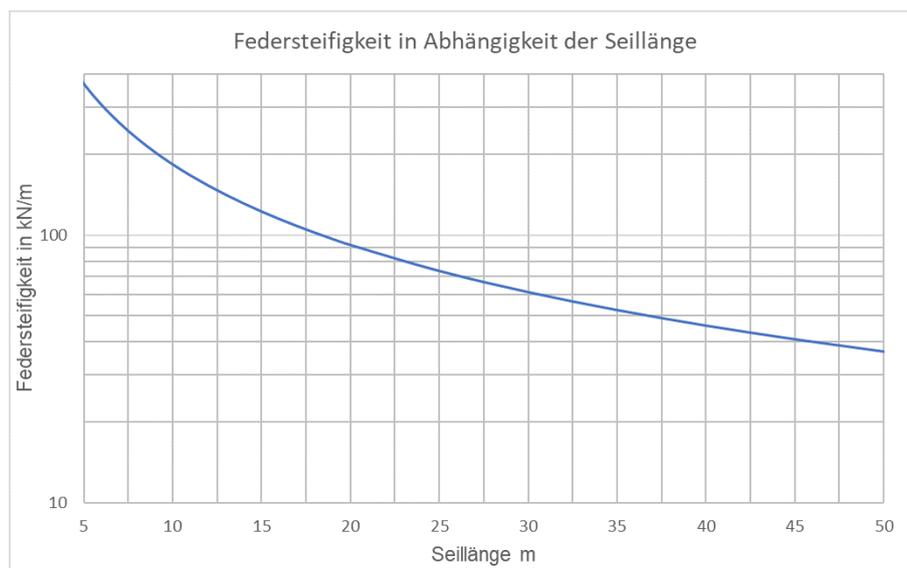


Abbildung 8.3: Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 8.1.2.1.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

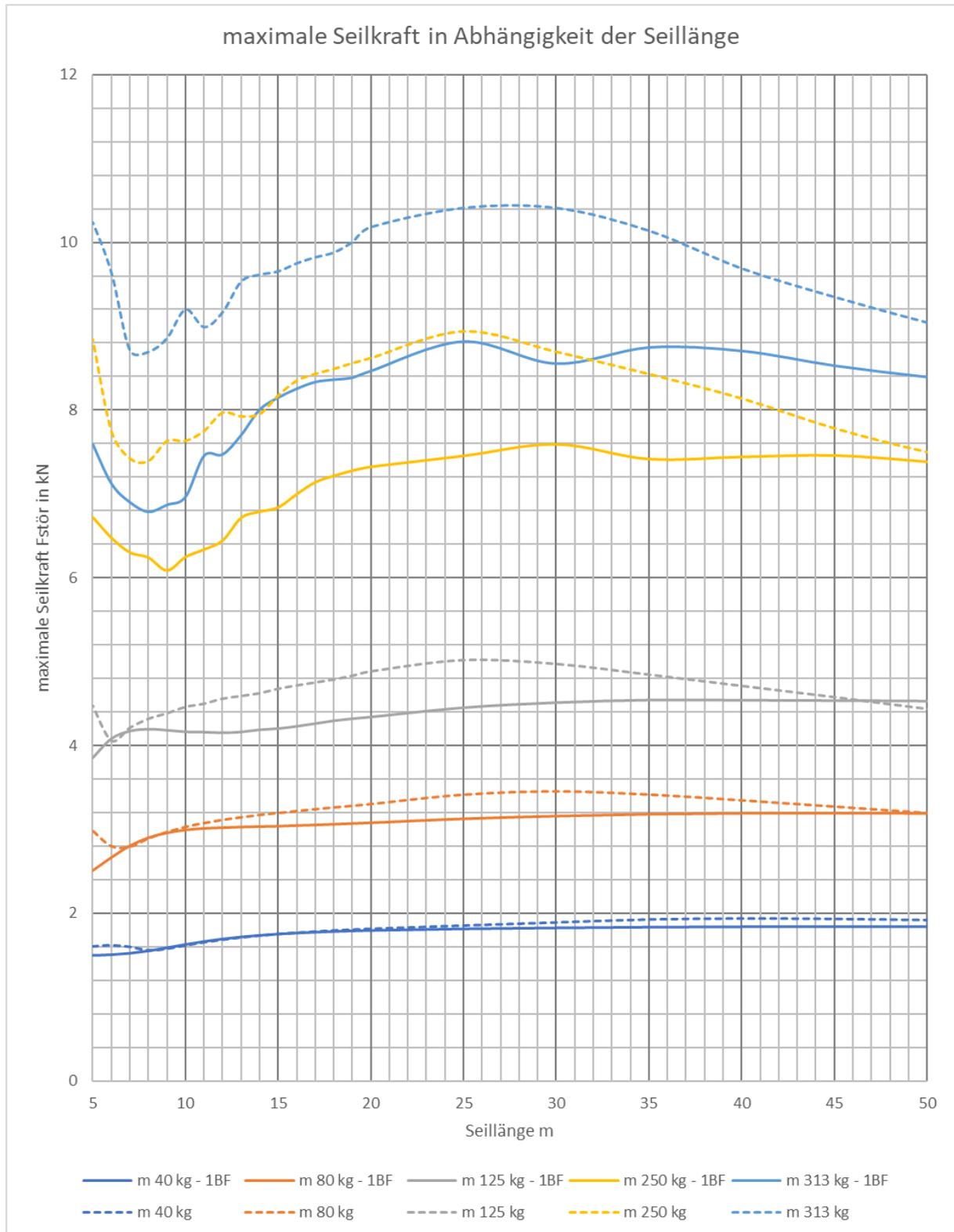


Abbildung 8.4: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

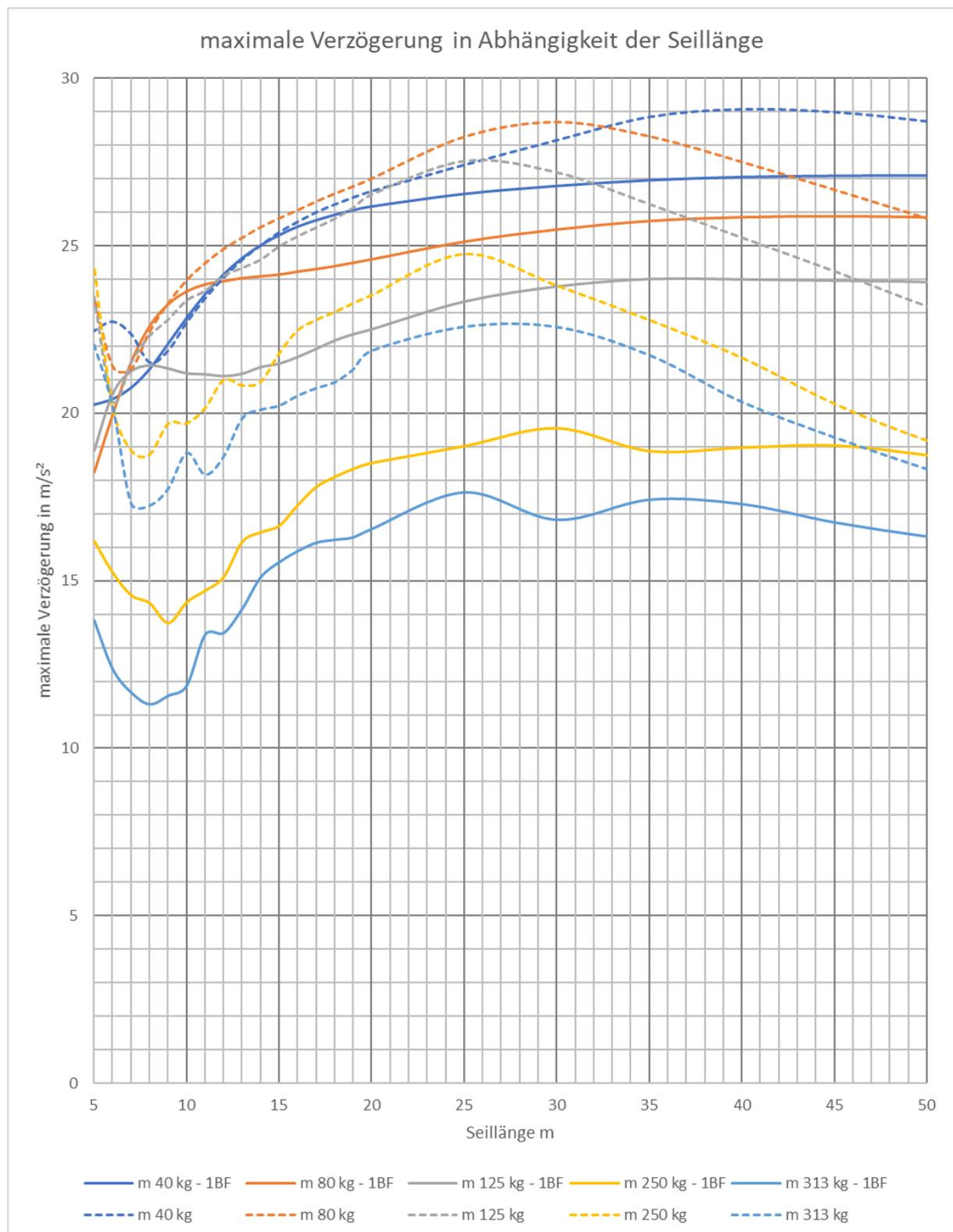


Abbildung 8.5: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

## 8.1.2.1.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

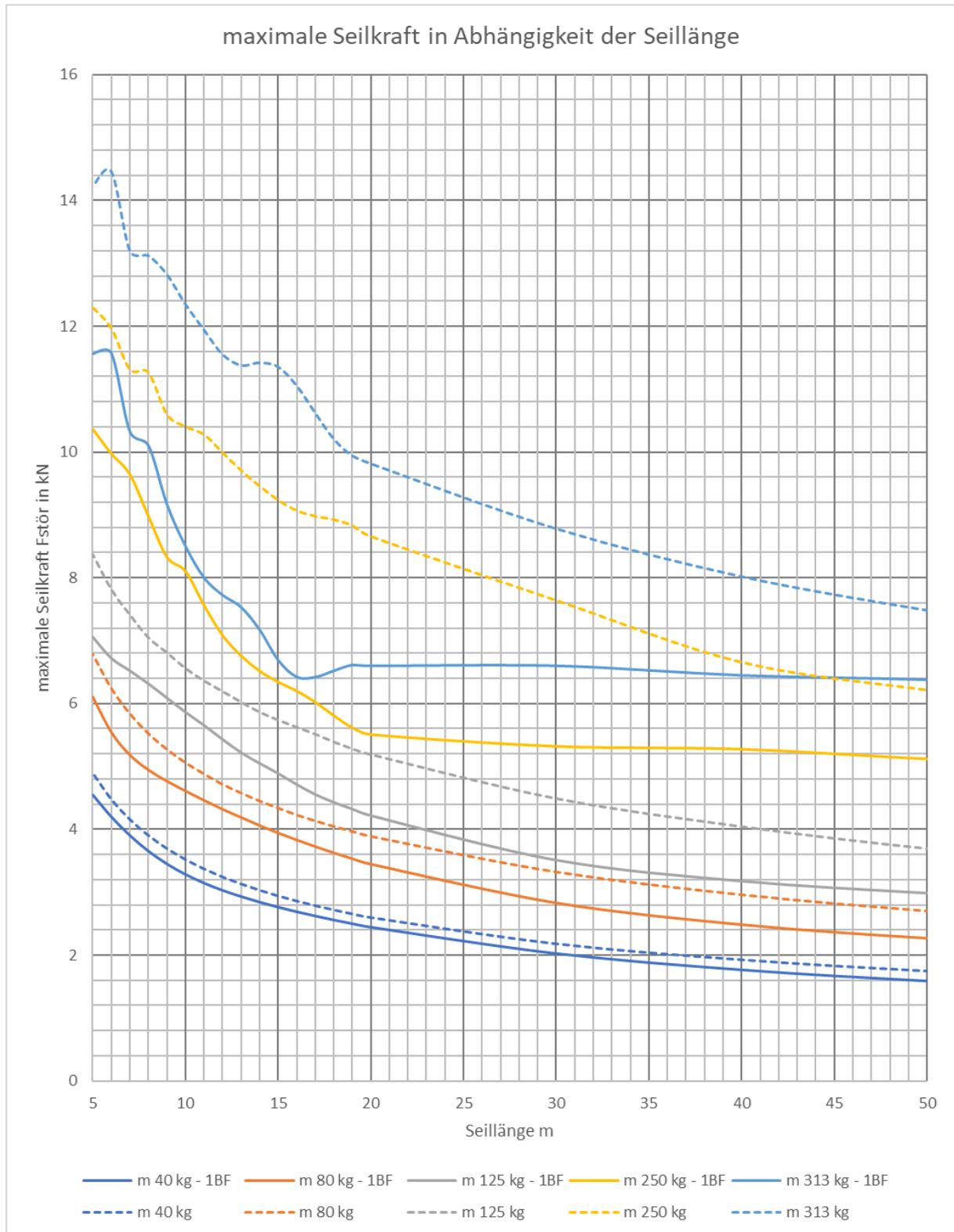


Abbildung 8.6: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

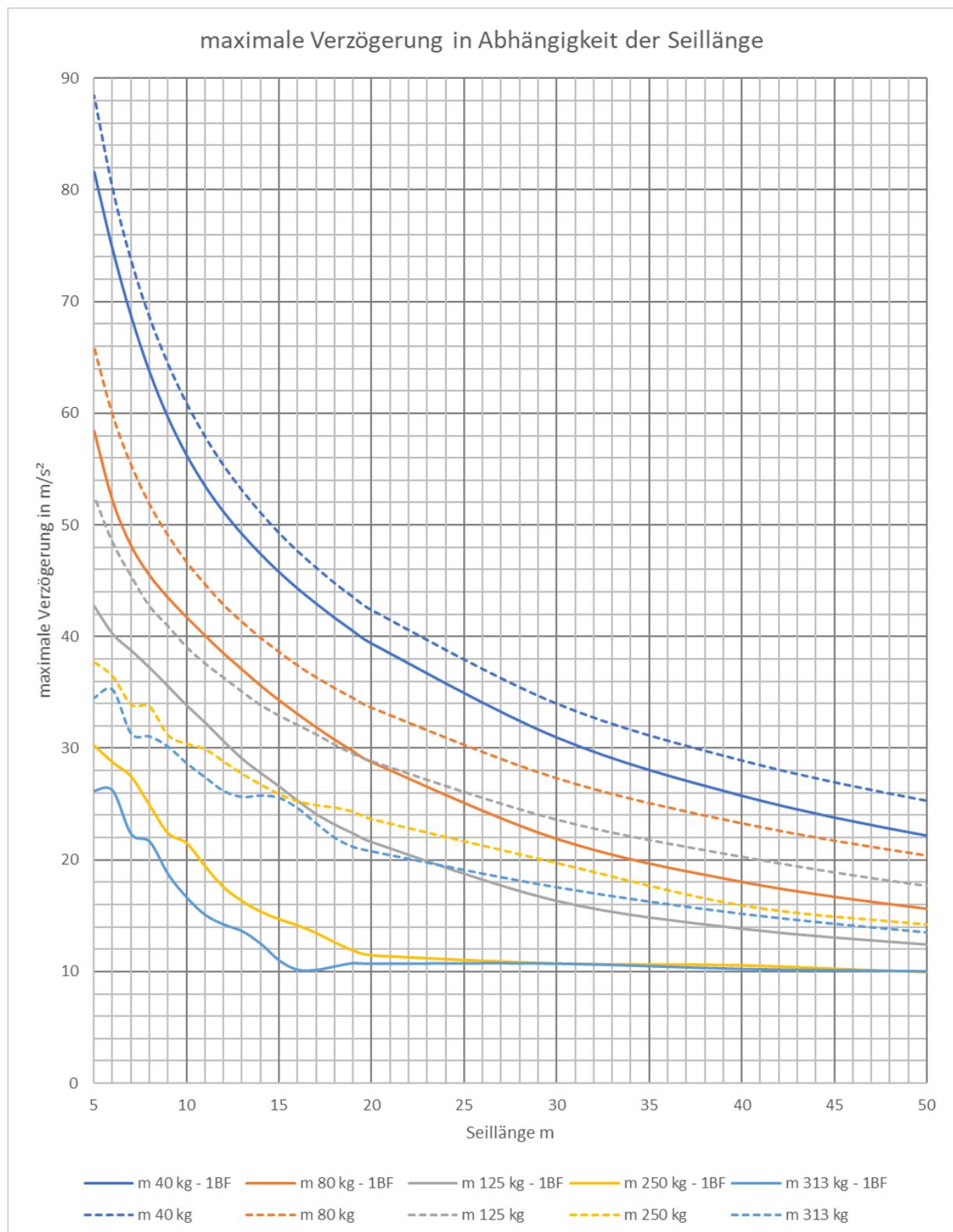


Abbildung 8.7: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

### 8.1.2.2 Punktzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.2), das Anlagenschema ist in Abbildung 8.8 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei der Einfall der 2. Bremse verzögert wird:

Nenngeschwindigkeit:  $1.8\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $3.0\text{m/s}^2$ , verzögertes Einfallen der 2. Bremse, Verzögerungszeit beim Senken & Heben:  $100\text{ms}$ . Untersucht werden die 2 Fälle: Ausfall der ersten Bremse, (in der Legende "1 BF") und der Fall, dass beide Bremsen funktionieren (gestrichelte Kurve).

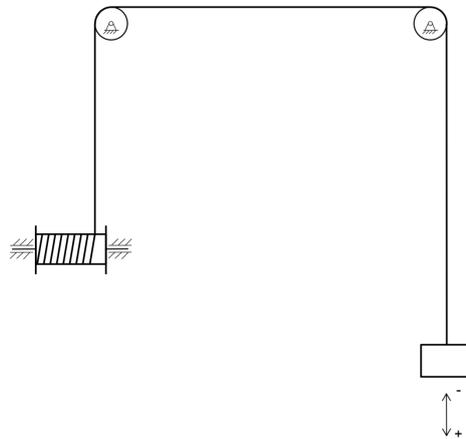


Abbildung 8.8: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

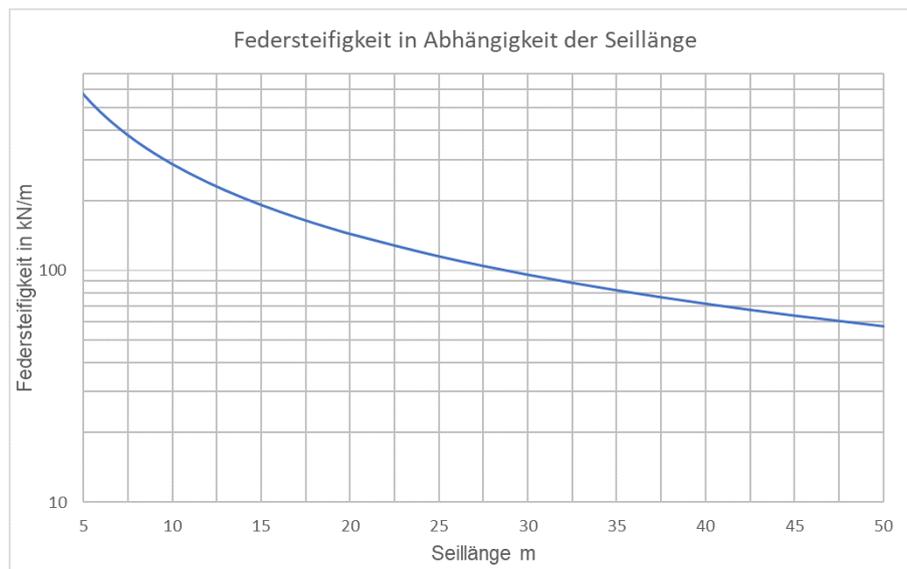


Abbildung 8.9: Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

8.1.2.2.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

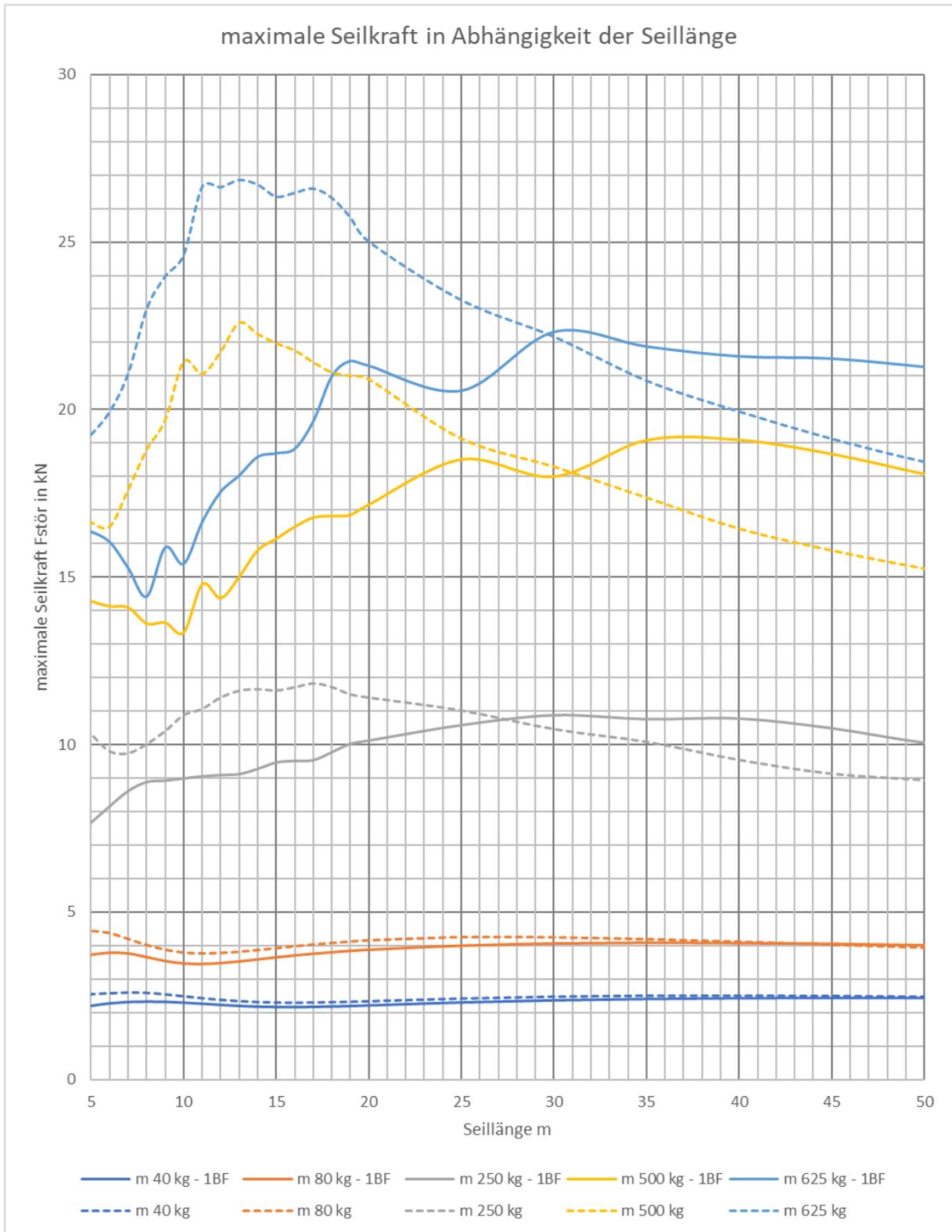


Abbildung 8.10: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

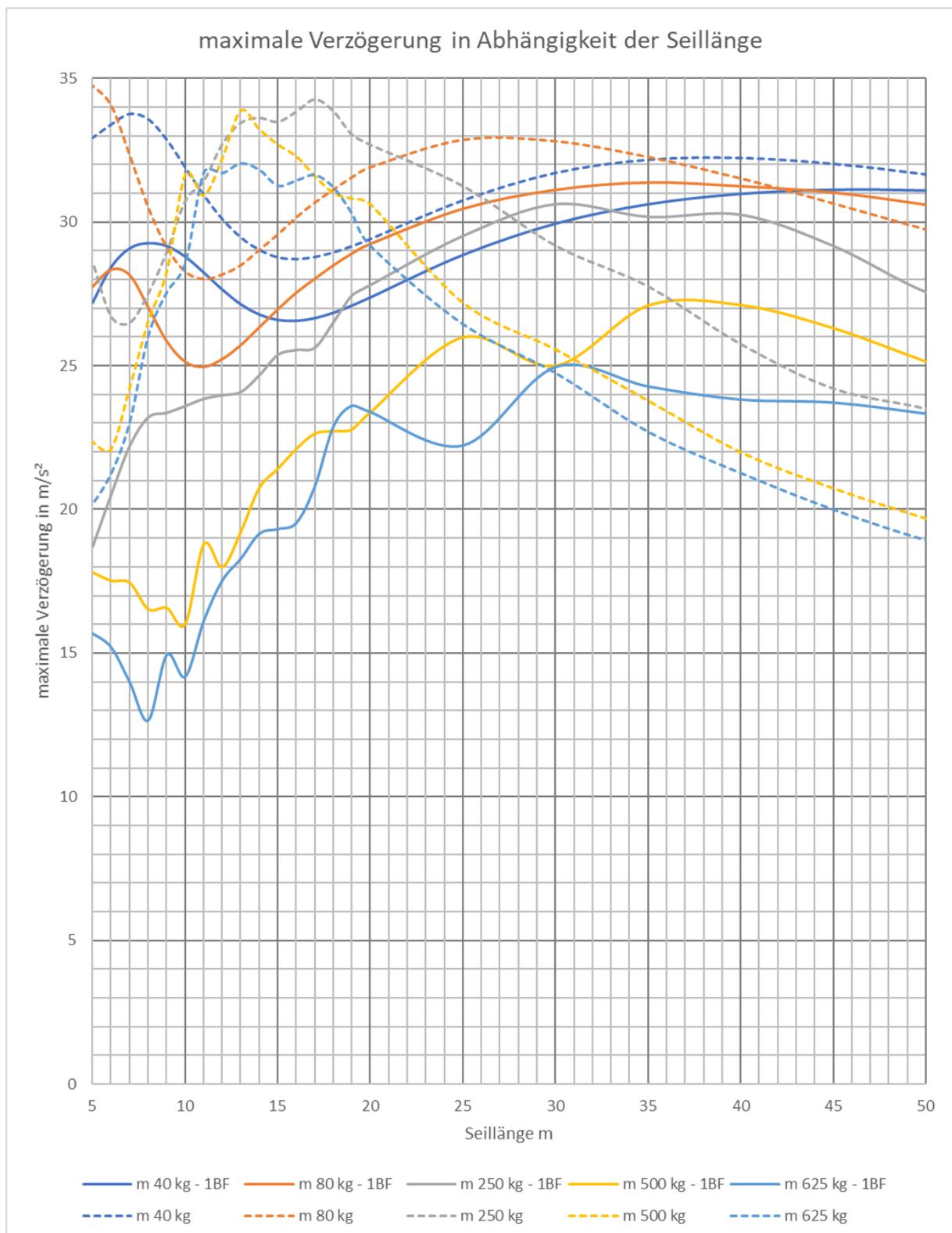


Abbildung 8.11: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

## 8.1.2.2.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

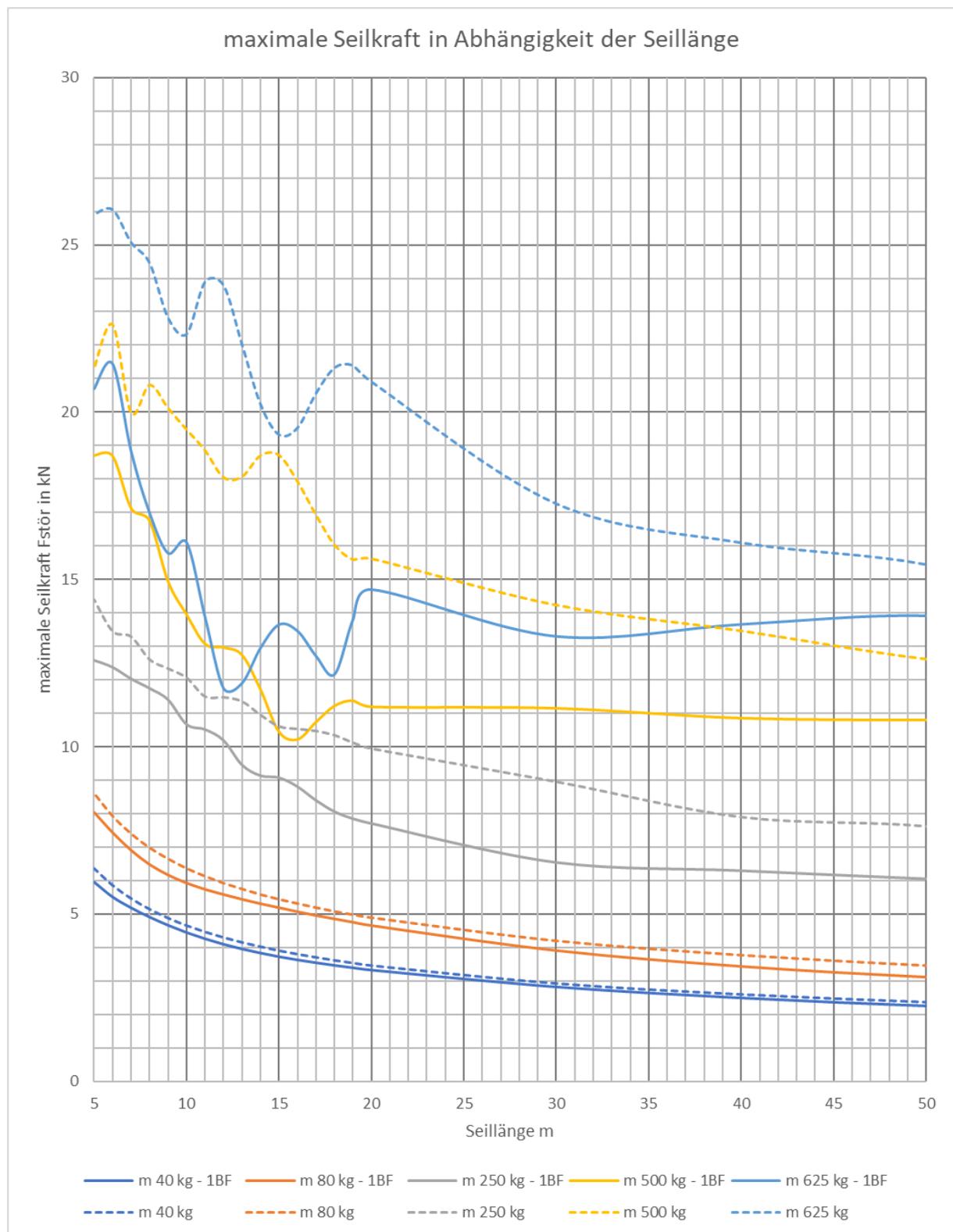


Abbildung 8.12: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

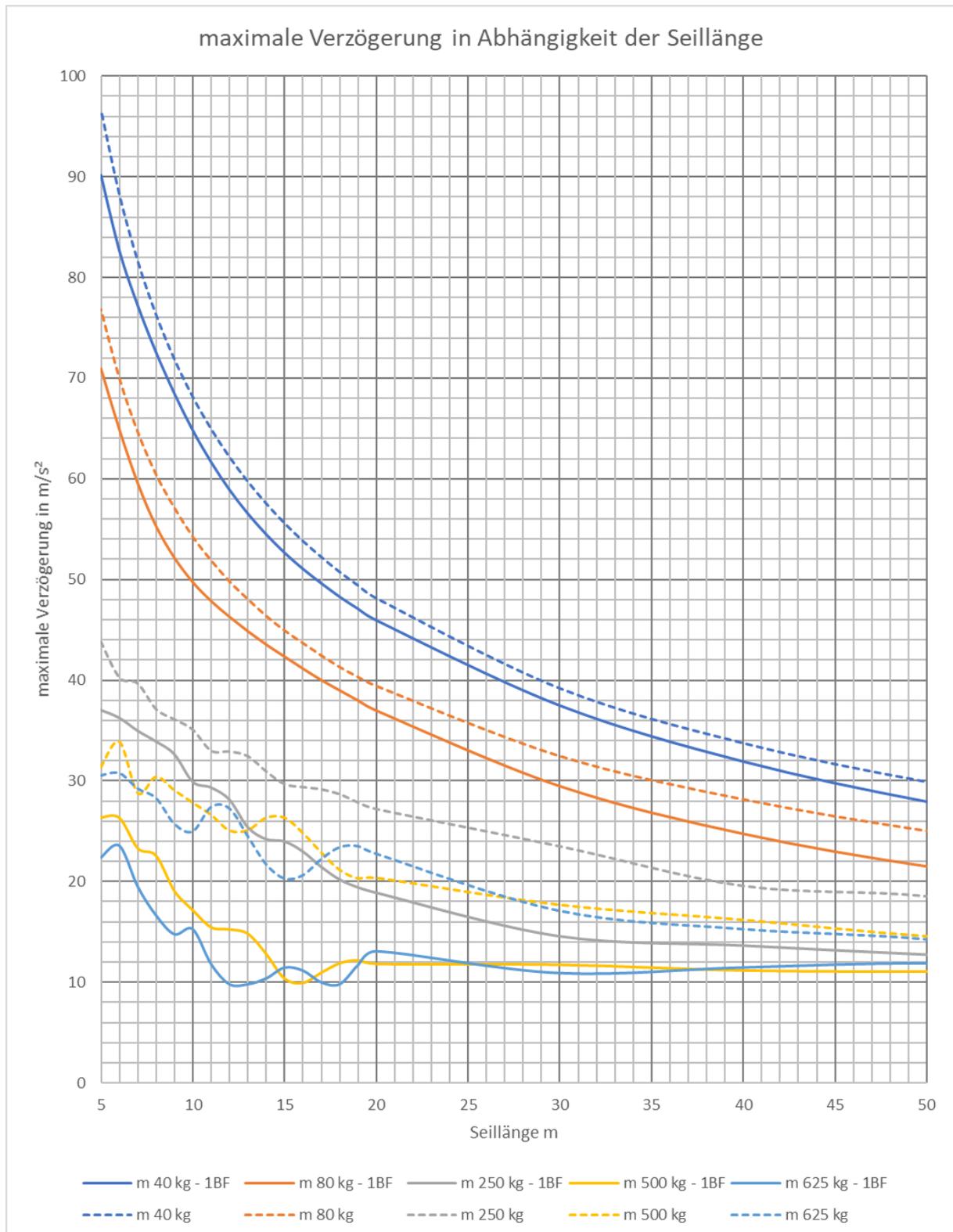


Abbildung 8.13: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

### 8.1.2.3 Prospektzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.3), das Anlagenschema ist in Abbildung 8.14 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei der Einfall der 2. Bremse verzögert wird:

Nenngeschwindigkeit:  $1.5\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.5\text{m/s}^2$ , verzögertes Einfallen der 2. Bremse, Verzögerungszeit beim Senken & Heben:  $100\text{ms}$ . Untersucht werden die 2 Fälle: Ausfall der ersten Bremse, (in der Legende "1 BF") und der Fall, dass beide Bremsen funktionieren (gestrichelte Kurve).

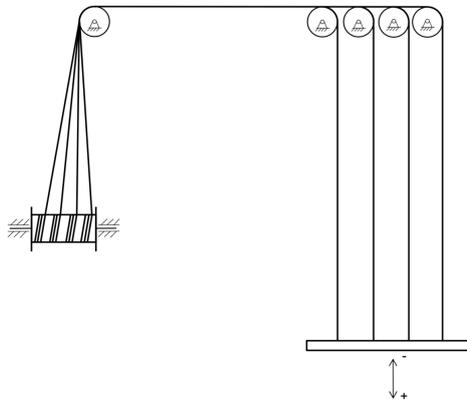


Abbildung 8.14: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

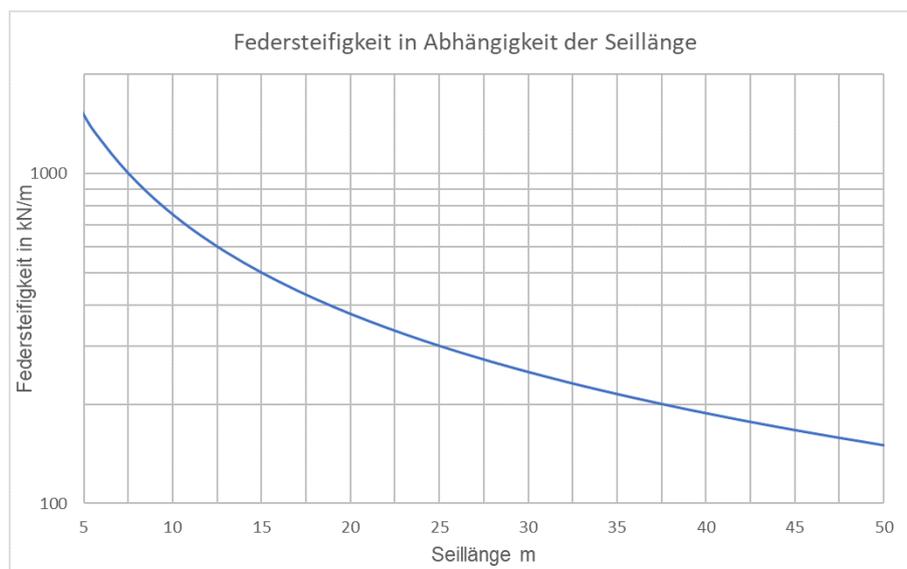


Abbildung 8.15: Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 8.1.2.3.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

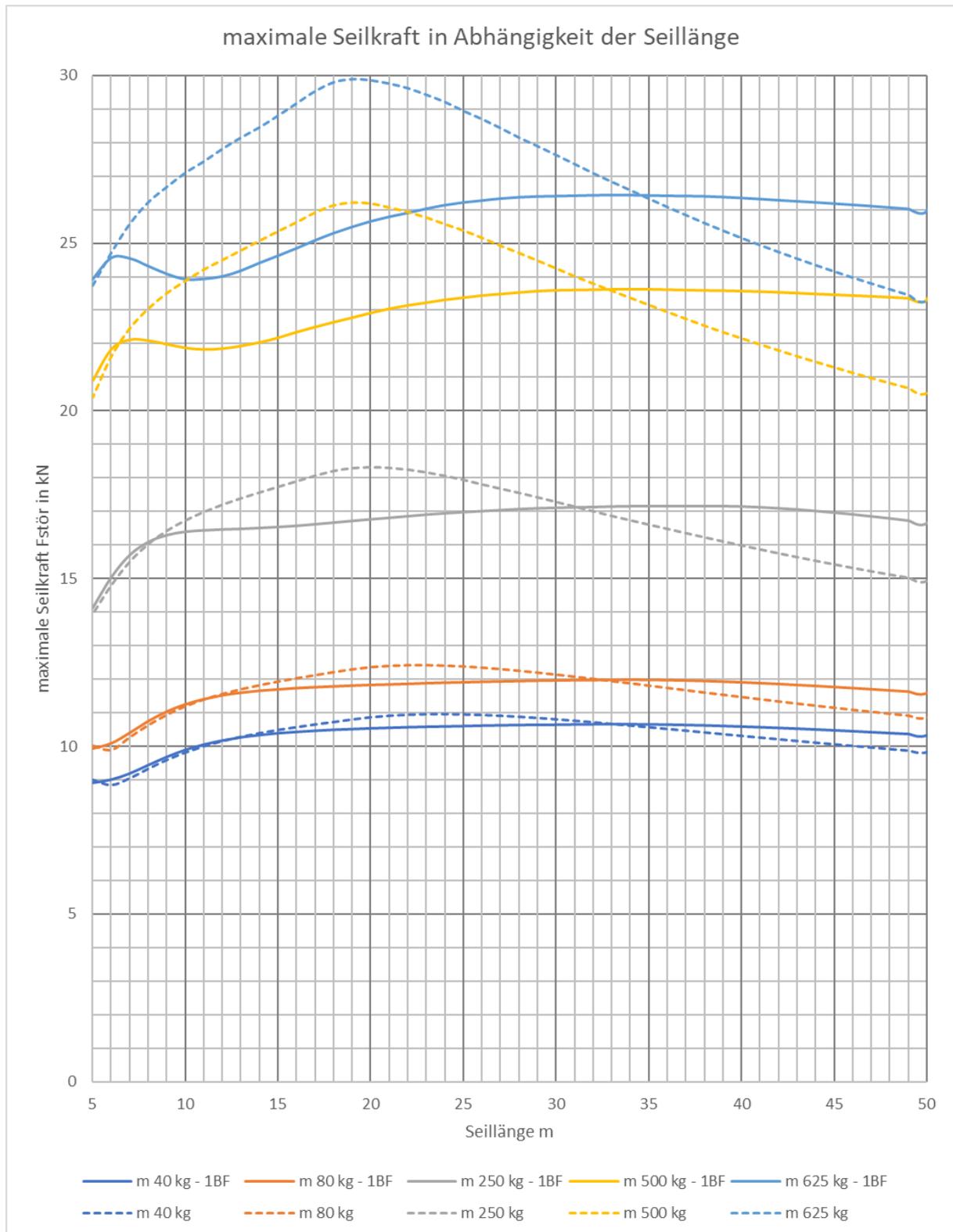


Abbildung 8.16: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

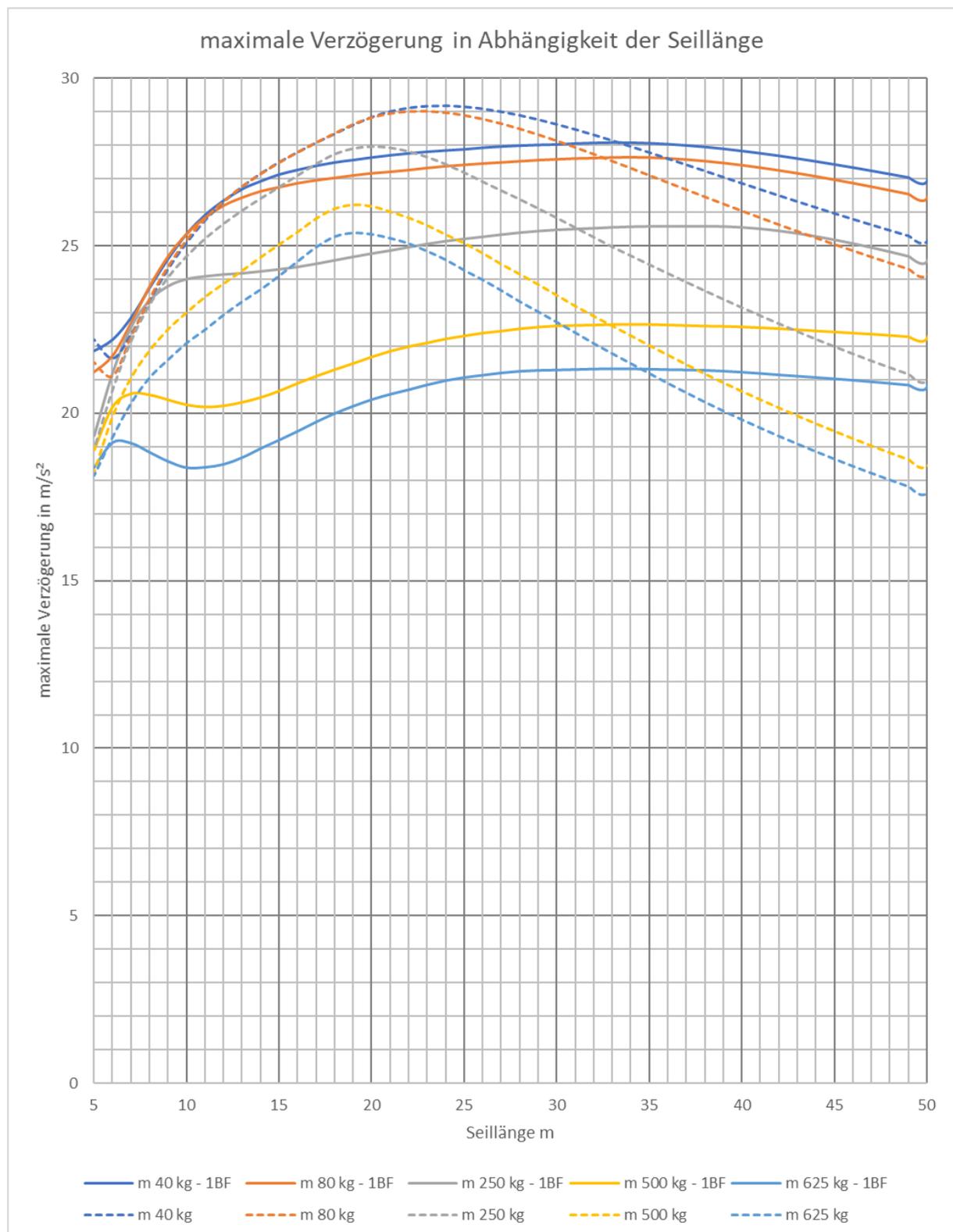


Abbildung 8.17: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

## 8.1.2.3.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

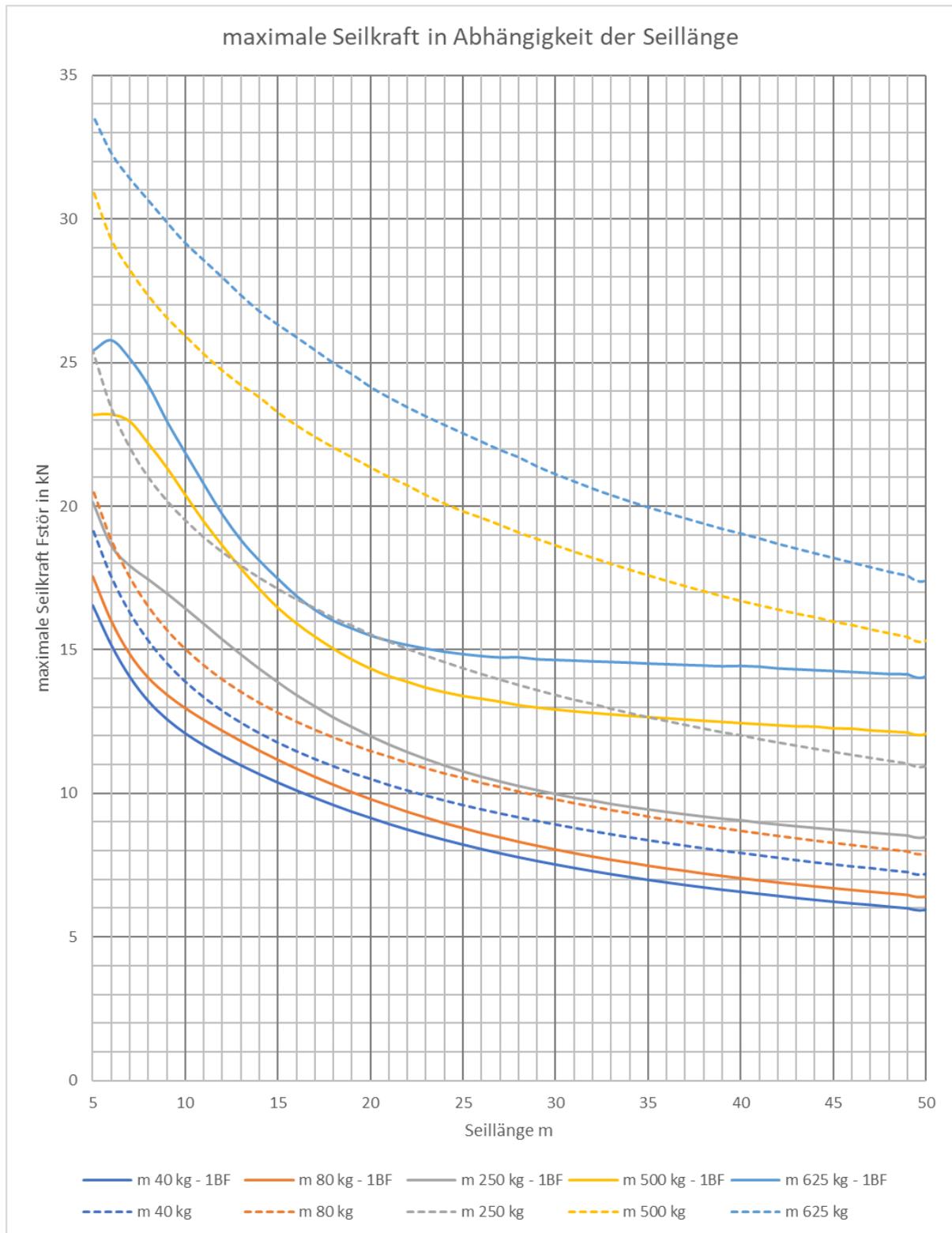


Abbildung 8.18: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

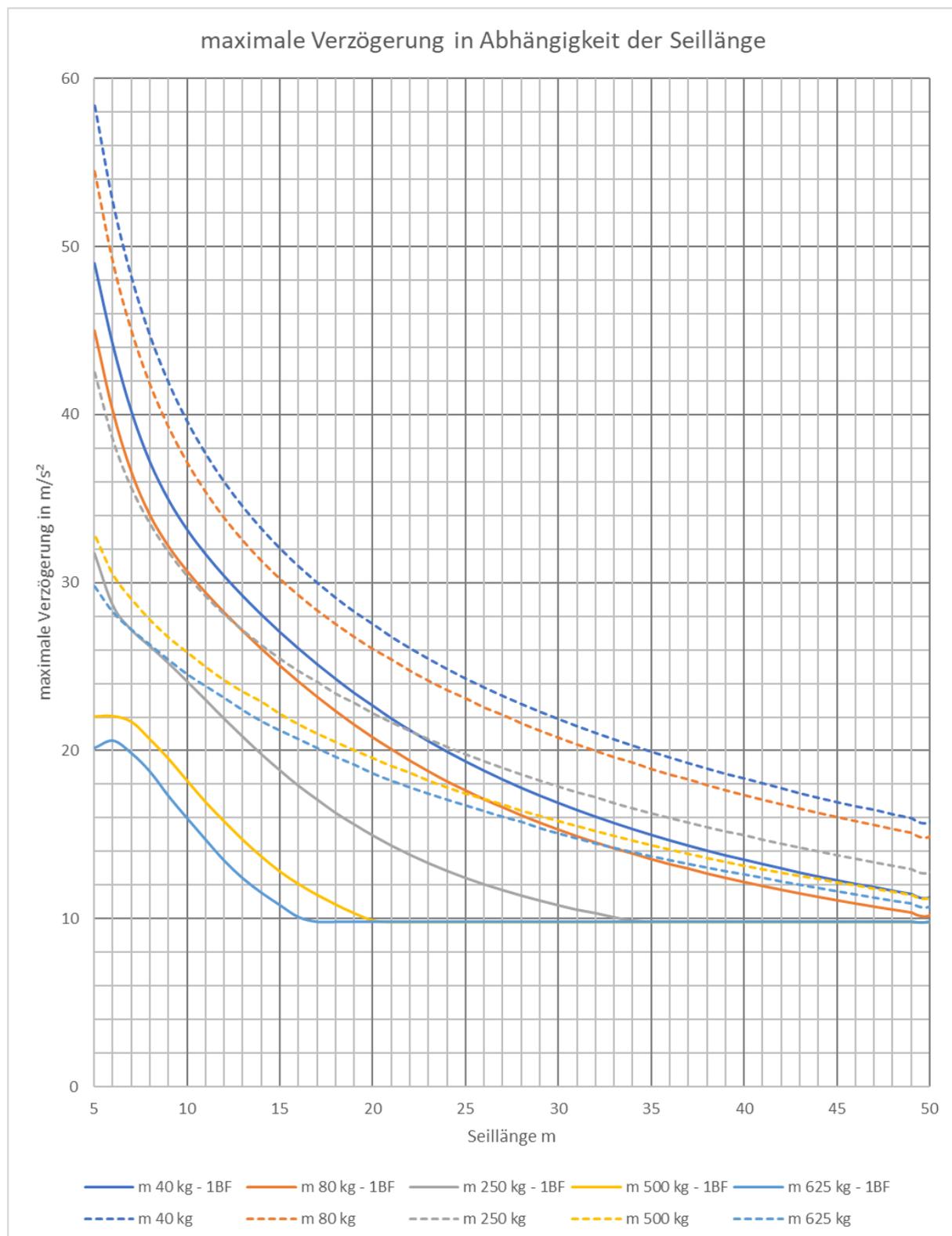


Abbildung 8.19: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

### 8.1.2.4 Prospektzug 10 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 10kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.4), das Anlagenschema ist in Abbildung 8.20 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei der Einfall der 2. Bremse verzögert wird:

Nenngeschwindigkeit:  $1.5\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.0\text{m/s}^2$ , verzögertes Einfallen der 2. Bremse, Verzögerungszeit beim Senken & Heben:  $100\text{ms}$ . Untersucht werden die 2 Fälle: Ausfall der ersten Bremse, (in der Legende "1 BF") und der Fall, dass beide Bremsen funktionieren (gestrichelte Kurve).

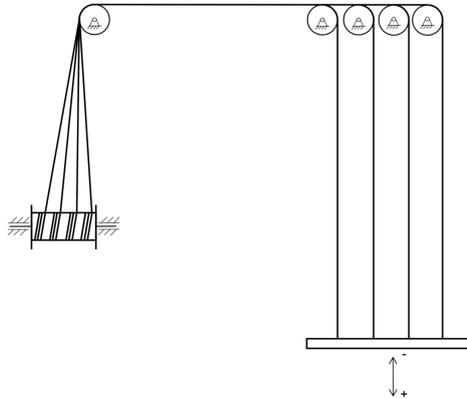


Abbildung 8.20: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

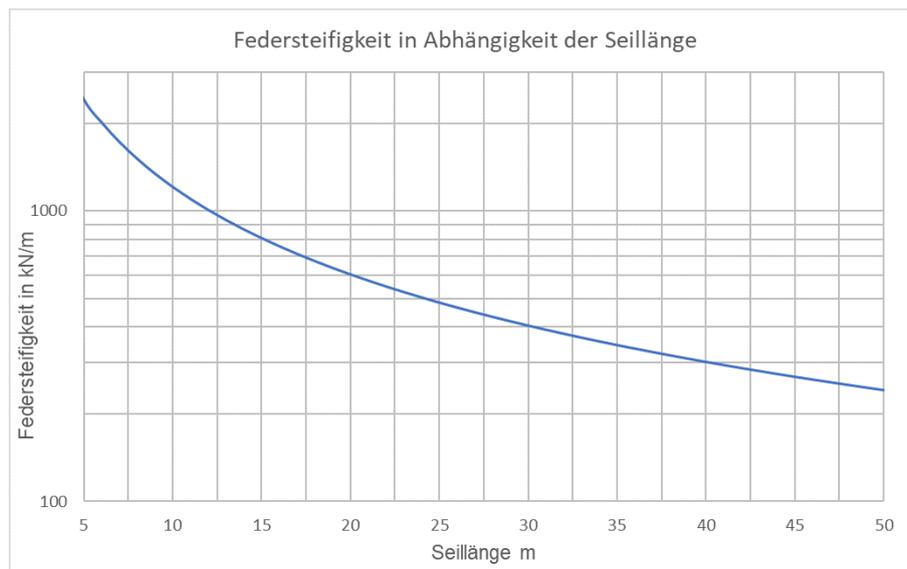


Abbildung 8.21: Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

### 8.1.2.4.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

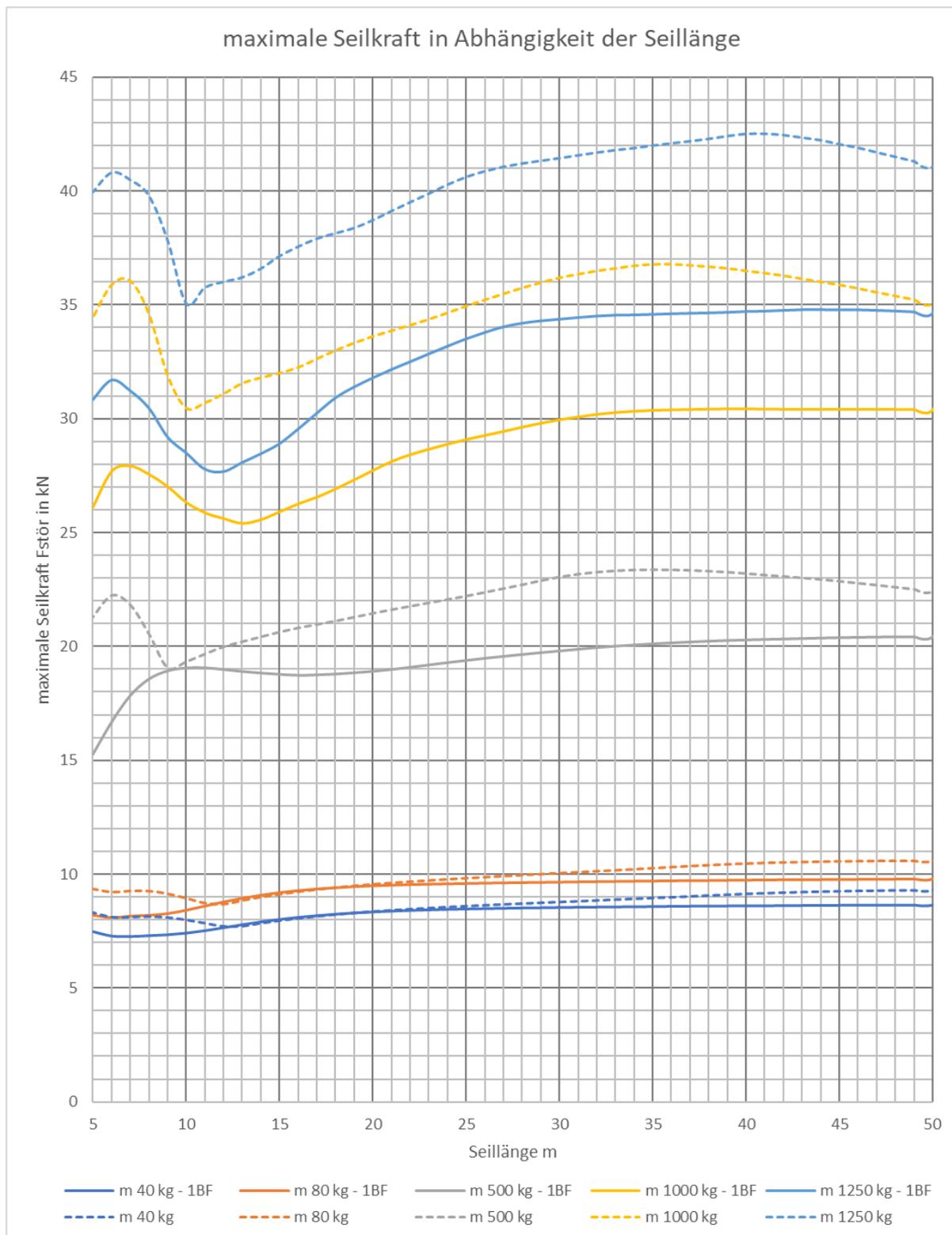


Abbildung 8.22: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

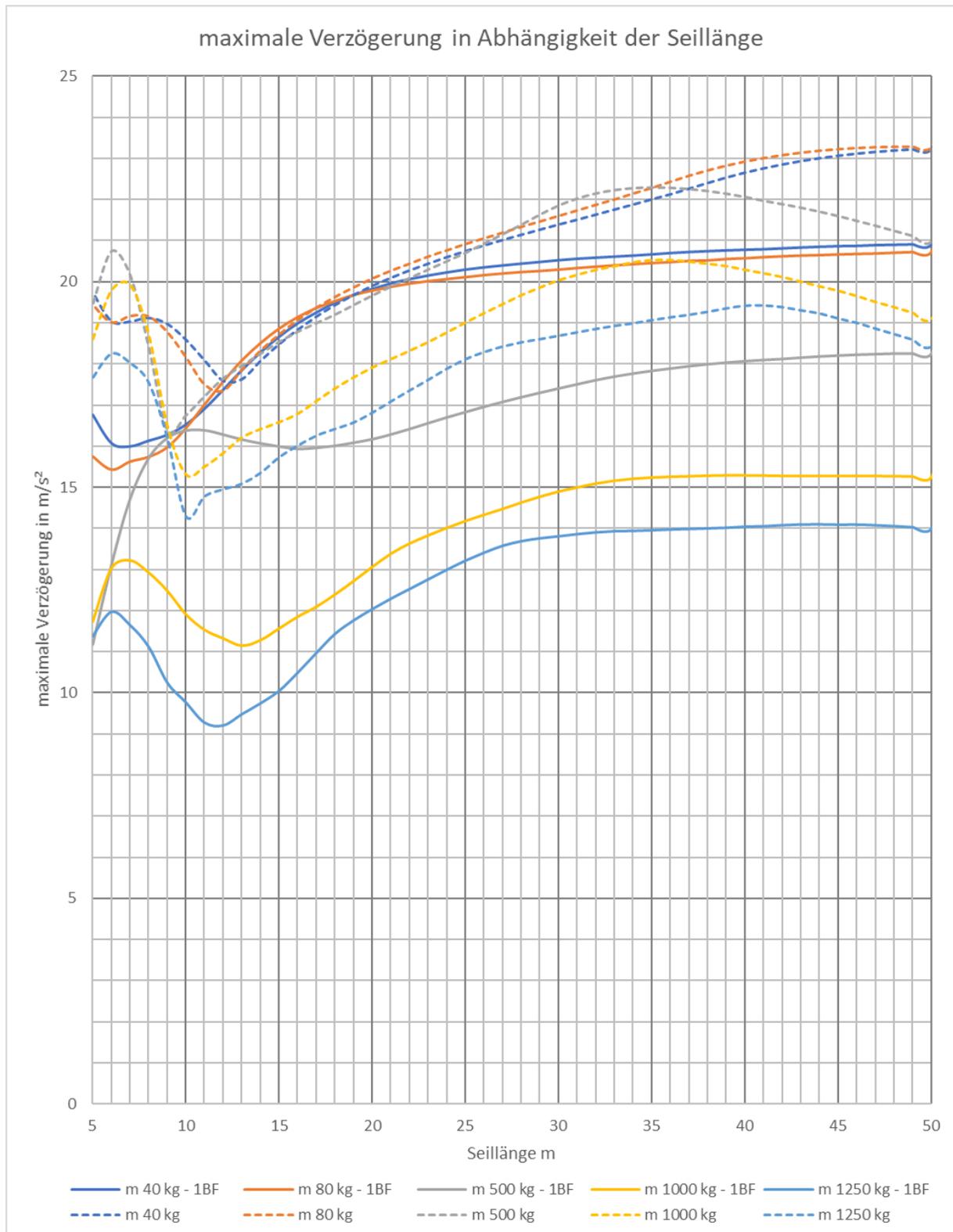


Abbildung 8.23: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

## 8.1.2.4.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

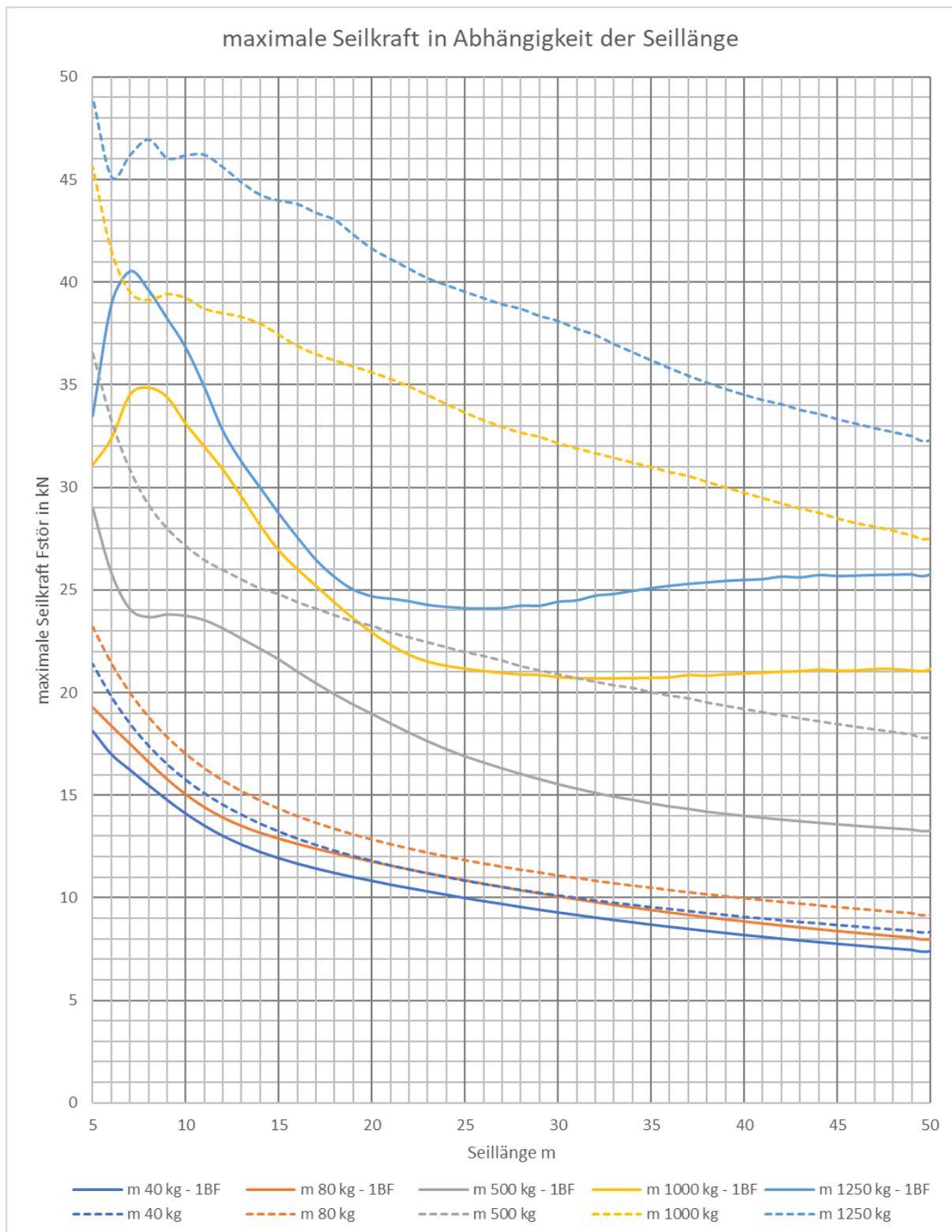


Abbildung 8.24: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremse

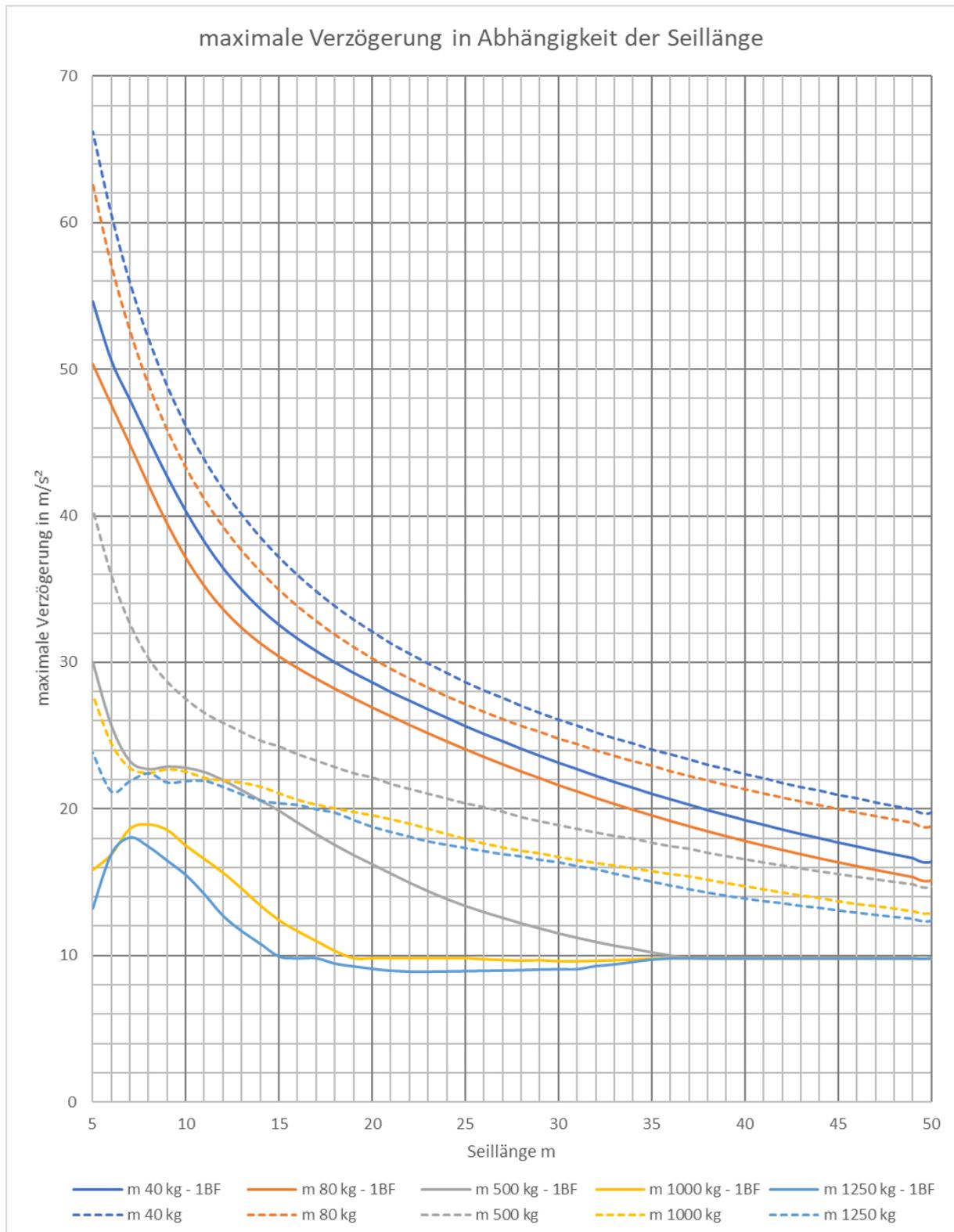


Abbildung 8.25: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremsen

8.1.2.5 Vergleich zur Belastung ohne verzögerten Einfall der 2. Bremse

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
maximale Seilkraft in kN										
Punktzug 2.5kN	4.55kN	6.11kN	7.05kN	<b>10.36kN</b>	11.57kN	1.84kN	3.20kN	4.54kN	<b>7.60kN</b>	8.82kN
vgl. zu vorher	-17.3%	-19.5%	-25.3%	<b>-26.0%</b>	-27.4%	-29.6%	-30.5%	-31.0%	<b>-29.6%</b>	-29.1%
Punktzug 5kN	5.97kN	8.04kN	12.59kN	<b>18.71kN</b>	21.44kN	2.44kN	4.10kN	10.86kN	<b>19.10kN</b>	22.31kN
vgl. zu vorher	-18.4%	-17.6%	-25.4%	<b>-25.5%</b>	-26.1%	-17.5%	-17.8%	-18.9%	<b>-22.6%</b>	-24.0%
Prospektzug 5kN	16.55kN	17.55kN	20.15kN	<b>23.19kN</b>	25.79kN	11.87kN	13.28kN	19.27kN	<b>27.62kN</b>	31.77kN
vgl. zu vorher	-22.0%	-22.8%	-28.6%	<b>-34.1%</b>	-33.3%	-17.2%	-18.3%	-20.2%	<b>-19.8%</b>	-18.5%
Prospektzug 10kN	18.14kN	19.27kN	28.97kN	<b>34.85kN</b>	40.54kN	10.33kN	11.67kN	24.66kN	<b>36.87kN</b>	41.35kN
vgl. zu vorher	-28.7%	-29.6%	-29.8%	<b>-33.0%</b>	-30.5%	-15.5%	-16.0%	-16.5%	<b>-15.3%</b>	-16.3%

	maximale Verzögerung in m/s <sup>2</sup>										
		40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast		40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast
Punktzug 2.5kN	81.6m/s <sup>2</sup>	58.4m/s <sup>2</sup>	42.7m/s <sup>2</sup>	<b>30.2m/s<sup>2</sup></b>	26.2m/s <sup>2</sup>	27.1m/s <sup>2</sup>	25.9m/s <sup>2</sup>	24.0m/s <sup>2</sup>	<b>19.6m/s<sup>2</sup></b>	17.6m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-19.0%	-22.1%	-29.4%	<b>-31.8%</b>	-34.1%	-36.4%	-37.7%	-38.8%	<b>-38.7%</b>	-39.0%	
Punktzug 5kN	90.2m/s <sup>2</sup>	71.0m/s <sup>2</sup>	37.1m/s <sup>2</sup>	<b>26.3m/s<sup>2</sup></b>	23.6m/s <sup>2</sup>	31.1m/s <sup>2</sup>	31.4m/s <sup>2</sup>	30.6m/s <sup>2</sup>	<b>27.1m/s<sup>2</sup></b>	25.0m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-20.0%	-19.6%	-30.1%	<b>-32.0%</b>	-33.4%	-21.8%	-22.2%	-23.6%	<b>-28.5%</b>	-30.6%	
Prospektzug 5kN	49.0m/s <sup>2</sup>	45.0m/s <sup>2</sup>	31.7m/s <sup>2</sup>	<b>22.1m/s<sup>2</sup></b>	20.6m/s <sup>2</sup>	32.4m/s <sup>2</sup>	31.7m/s <sup>2</sup>	29.9m/s <sup>2</sup>	<b>28.1m/s<sup>2</sup></b>	27.6m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-25.3%	-26.4%	-34.4%	<b>-42.8%</b>	-42.4%	-21.3%	-22.7%	-25.2%	<b>-25.0%</b>	-23.5%	
Prospektzug 10kN	54.6m/s <sup>2</sup>	50.4m/s <sup>2</sup>	30.0m/s <sup>2</sup>	<b>18.9m/s<sup>2</sup></b>	18.0m/s <sup>2</sup>	26.9m/s <sup>2</sup>	26.6m/s <sup>2</sup>	24.1m/s <sup>2</sup>	<b>20.6m/s<sup>2</sup></b>	18.6m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-32.2%	-33.4%	-36.1%	<b>-42.8%</b>	-40.4%	-20.0%	-20.6%	-21.8%	<b>-21.1%</b>	-22.9%	

Tabelle 8.3: Lasten und Beschleunigungen bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremsen

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
φ <sub>stat</sub>										
Punktzug 2.5kN	1.78	2.39	2.77	<b>4.06</b>	4.54	0.72	1.25	1.78	<b>2.98</b>	3.46
vgl. zu vorher	-17.3%	-19.5%	-25.3%	<b>-26.0%</b>	-27.4%	-29.6%	-30.5%	-31.0%	<b>-29.6%</b>	-29.1%
Punktzug 5kN	1.17	1.58	2.47	<b>3.67</b>	4.20	0.48	0.80	2.13	<b>3.74</b>	4.37
vgl. zu vorher	-18.4%	-17.6%	-25.4%	<b>-25.5%</b>	-26.1%	-17.5%	-17.8%	-18.9%	<b>-22.6%</b>	-24.0%
Prospektzug 5kN	2.25	2.38	2.74	<b>3.15</b>	3.50	1.61	1.80	2.62	<b>3.75</b>	4.32
vgl. zu vorher	-22.0%	-22.8%	-28.6%	<b>-34.1%</b>	-33.3%	-17.2%	-18.3%	-20.2%	<b>-19.8%</b>	-18.5%
Prospektzug 10kN	1.48	1.57	2.36	<b>2.84</b>	3.31	0.84	0.95	2.01	<b>3.01</b>	3.37
vgl. zu vorher	-28.7%	-29.6%	-29.8%	<b>-33.0%</b>	-30.5%	-15.5%	-15.9%	-16.5%	<b>-15.3%</b>	-16.3%

	φ <sub>dyn</sub>										
		40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast		40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast
Punktzug 2.5kN	1.37	1.83	2.12	<b>3.11</b>	3.47	0.55	0.96	1.36	<b>2.28</b>	2.65	
vgl. zu vorher	-17.3%	-19.5%	-25.3%	<b>-26.0%</b>	-27.4%	-29.6%	-30.5%	-31.0%	<b>-29.6%</b>	-29.1%	
Punktzug 5kN	0.90	1.21	1.89	<b>2.81</b>	3.22	0.37	0.62	1.63	<b>2.87</b>	3.35	
vgl. zu vorher	-18.4%	-17.6%	-25.4%	<b>-25.5%</b>	-26.1%	-17.5%	-17.8%	-18.9%	<b>-22.6%</b>	-24.0%	
Prospektzug 5kN	1.95	2.07	2.38	<b>2.73</b>	3.04	1.40	1.57	2.27	<b>3.26</b>	3.75	
vgl. zu vorher	-22.0%	-22.8%	-28.5%	<b>-34.1%</b>	-33.2%	-17.2%	-18.3%	-20.2%	<b>-19.8%</b>	-18.5%	
Prospektzug 10kN	1.34	1.43	2.14	<b>2.58</b>	3.00	0.76	0.86	1.83	<b>2.73</b>	3.06	
vgl. zu vorher	-28.7%	-29.5%	-29.8%	<b>-33.0%</b>	-30.5%	-15.5%	-15.9%	-16.5%	<b>-15.3%</b>	-16.3%	

Tabelle 8.4: φ<sub>stat</sub> und φ<sub>dyn</sub> bei Nennbedingungen mit 100ms verzögertem Einfallen der 2. Bremsen

In Tabelle 8.3 ist zu sehen, wie sich die Seilkraft und Verzögerung ändert, wenn die 2. Bremse um 100ms verzögert einfällt. Außerdem sind jeweils die prozentualen Veränderungen zu den Belastungswerten bei der Simulation des Störfalls bei Nennbedingungen zu sehen, Tabelle 5.29.

## 8.2 Reduktion der Verfahrgeschwindigkeit im Bereich der kritischen Seillänge

Da die modernen Steuerungen in der Bühnentechnik stets die aktuelle Position der Last und damit die freie Seillänge kennen, wäre es denkbar die Verfahrgeschwindigkeit im Bereich der kurzen freien Seillängen so zu reduzieren, dass im Falle eines Störfalls die Seilkraft nicht größer wird als die, zur Dimensionierung verwendete, Nennlast des Betriebsfalls.

Dies kann anstatt beim Senken und beim Heben auch nur beim Heben angewandt werden. So kann dann verhindert werden, dass beim Heben höhere Belastungswerte als beim Senken auftreten.

Wie schnell man abhängig von der Seillänge, Last und Lastfall (Heben/Senken) maximal verfahren darf, kann man der Parameterstudie im Abschnitt 5.2 entnehmen.

## 8.3 Ergebnisse und Interpretation

Es konnte gezeigt werden, dass ein Einfallen der 2. Bremse erst im Stillstand (um die Zeit verzögert, die die Bremse 1 zum Abbremsen auf Stillstand benötigen würde) nicht möglich ist. Für den Fall, dass die 1. Bremse ausfällt würden sich somit nämlich zu hohe Bremswege ergeben (siehe Tabelle 8.1).

Trotzdem ist es möglich die 2. Bremse verzögert einfallen zu lassen. Beträgt die Verzögerungszeit, mit der die 2. Bremse einfällt, zum Beispiel 100ms, so verringern sich die maximalen Seilkräfte um 15% bis 34%. Dies ist in Tabelle 8.3 zu sehen, in der man auch den Rückgang der Verzögerungen gut erkennen kann.

Verzögerungszeiten in dieser Größenordnung können durch verschiedene Stromversorgung der Bremsen (eine Bremse AC, die andere DC) erzielt werden. Die genaue Verzögerungszeit hängt dann von dem jeweiligen Bremstyp ab, aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wurden aber bei allen betrachteten Hubzügen die selbe Verzögerungszeit verwendet. Die Reduktion der Belastungswerte, beim verzögerten Einfallen der 2. Bremse, lassen sich dadurch erklären, dass diese wie eine Reduktion des Bremsmoments wirkt.

Für den Fall, dass die 1. Bremse funktioniert, fällt die 2. Bremse mit 100ms verzögert ein (also in der Regel nach dem ersten Maximum der Seilkraft). Die 2. Bremse wirkt also erst

nach der ersten Lastamplitude, wenn die Masse sich wieder nach oben bewegt und die Seilkräfte und Beschleunigungen abnehmen. Aufgrund der Dämpfung im System ist die 2. Lastspitze der Seilkraft entweder geringer oder nur minimal höher als es die 1. war.

Für den Fall, dass die 1. Bremse ausfällt, beschleunigt die Masse zwar bis zum Einfallen der 2. Bremse. Da aber nun, im Gegensatz zum gleichzeitigen Einfallen der Bremsen, wieder nur das halbe Bremsmoment wirkt, sind die auftretenden Belastungen geringer als beim gleichzeitigen Einfallen beider Bremsen.

Die Simulationen zeigen, dass in der Regel der Fall, bei dem beide Bremsen funktionieren, der kritischere ist. Es kommt vereinzelt aber auch vor, dass für eine bestimmte Seillänge, beim Ausfall der 1. Bremse, höhere Seilkräfte wirken als wie wenn beide Bremsen funktionieren (siehe z.B.: Abbildung 8.10). Tritt dies auf, liegen die Seilkräfte aber unter den jeweiligen Maximalwerten. Wird die Verzögerungszeit verändert, so kann sich dies jedoch leicht ändern und deshalb keine allgemeine Aussage darüber getroffen werden, ob das Ausfallen der 1. Bremse oder das Wirken beider Bremsen kritischer ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Lastreduktion ist die Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit. Die hiermit erzielten Belastungsreduktionen hängen natürlich davon ab, in welchen Bereichen der freien Seillänge die Verfahrgeschwindigkeit reduziert wird und wie groß diese Reduktion ausfällt, sowie ob diese nur beim Lastfall Heben oder auch beim Senken angewandt wird.

Neben dem verzögerten Einfallen der 2. Bremse und der Reduktion der Verfahrgeschwindigkeit, gibt es zur Reduktion der Seilkräfte und Verzögerungen im Störfall noch die Möglichkeit ein Feder-Dämpfer Element in den Seilzug einzubauen, dies wird im nächsten Kapitel betrachtet.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 9 Welchen Effekt hat ein Feder-Dämpfer Element im Seilzug?

Im Allgemeinen lässt sich für die betrachteten Hubzüge sagen, dass die Seilkräfte und Beschleunigungen bei kurzen Seillängen höher sind als bei langen Seilen.

Wird im Seilzug, zwischen Seilwinde und Last, ein Feder-Dämpfer Element eingebaut, so sollte sich dadurch eine Reduzierung der Seilkräfte und Beschleunigungen erzielen lassen.

Das Feder-Dämpfer Element bewirkt zum einen, dass sich die Gesamtfedersteifigkeit des Seilzugs verringert, zum anderen erhöht sich die Dämpfungsrate des Gesamtsystems. Im Normalbetrieb kann dies durchaus störend sein, so wäre es zum Beispiel möglich dass ein Bühnenbild in Position gebracht wird und danach anstatt still zu stehen, noch nachschwingt. Um dies zu vermeiden, muss sichergestellt werden können, dass das Feder-Dämpfer Element nur im Störfall wirksam ist.

### 9.1 Modellierung

Die genaue technische Umsetzung der Sperrung des Feder-Dämpfer Elements im Betriebsfall, bzw. die Freigabe im Störfall wird nicht spezifiziert, um den Produktentwicklungsprozess nicht einzuschränken. In der Simulation wird deshalb die Annahme getroffen, dass das Feder-Dämpfer Element schon bei Eintritt des Störfalls wirksam ist.

In Abschnitt 4.2 wurde bereits auf das Simulationsmodell eingegangen. Dieses soll nun um ein Feder-Dämpfer Element zwischen Last und Seilende, oder direkt nach der Seil-

trommel, erweitert werden.

Es macht keinen Unterschied, ob das Feder-Dämpfer Element zwischen Seilende und Last wirkt oder direkt nach der Seiltrommel, da beide in Serie geschaltet sind (die Ersatzmodelle von Seil und Feder-Dämpfer werden dann einfach vertauscht).

Wirkt das Feder-Dämpfer Element zwischen Seilende und Last so muss im dynamischen Modell ein Knoten zwischen Feder-Dämpfer Element und Seilende (und damit ein zusätzlicher Freiheitsgrad) eingefügt werden.

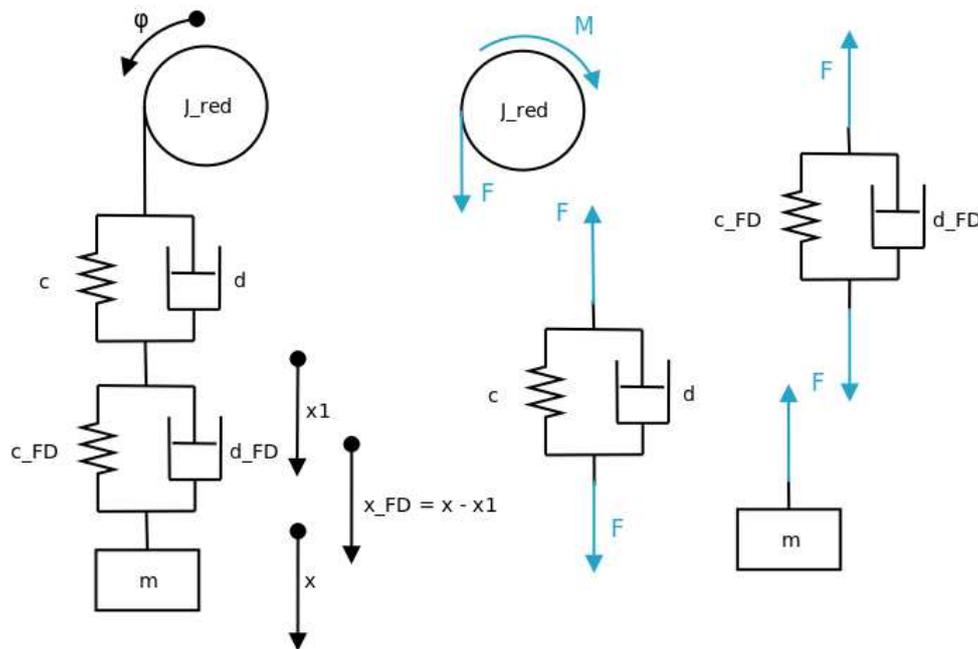


Abbildung 9.1: Dynamisches Modell mit Feder-Dämpfer Element, freigemacht

Durch das in Serie geschaltete Feder-Dämpfer Element erweitert sich das Gleichungssystem, das die Bewegung des Hubzugs beschreibt: zum einen ergibt sich eine zusätzliche Gleichung für die Seilkraft, zum anderen kommt ein zweiter Freiheitsgrad (Position des "Knoten" zwischen Seil und Feder-Dämpfer Element) hinzu.

Bisheriges Gleichungssystem:

$$J_{red} \cdot \ddot{\varphi} = F \cdot r_T - M(t) \quad (9.1)$$

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g - F \quad (9.2)$$

$$F = c(\varphi)(x - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) + d(\dot{x} - r \cdot \dot{\varphi}) \quad (9.3)$$

Erweitertes Gleichungssystem:

$$J_{red} \cdot \ddot{\varphi} = F \cdot r_T - M(t) \quad (9.4)$$

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g - F \quad (9.5)$$

$$F = c(\varphi)(x - x_{FD} - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) + d(\dot{x} - \dot{x}_{FD} - r \cdot \dot{\varphi}) \quad (9.6)$$

$$F = c_{FD} \cdot x_{FD} + d_{FD} \cdot \dot{x}_{FD} \quad (9.7)$$

$$\text{mit: } x_{FD} = x - x_1$$

Will man das erweiterte Gleichungssystem (Formel 9.4 bis 9.7) nun lösen, ergibt sich das Problem, dass mit  $x_{FD}$  ( $x_{FD} = x - x_1$ ) ein 2. Freiheitsgrad eingeführt wurde. Will man  $x_{FD}$  berechnen, in dem man die Formeln für die Seilkräfte (9.6 & 9.7) gleichsetzt, erhält man eine Schleife: Die Seilkraft hängt von  $x$  und  $x_{FD}$  ab,  $x$  und  $x_{FD}$  wiederum hängen von der Seilkraft ab. Eine iterative Lösung des Gleichungssystems in Matlab/Simulink ist nicht möglich, da sich für  $x_{FD}$  eine Differentialgleichung ergibt. Für  $x_{FD}$  muss also eine Näherung getroffen werden:

$$\begin{aligned} c_{FD} \cdot x_{FD} + \cancel{d_{FD} \cdot \dot{x}_{FD}} &= c(\varphi)(x - x_{FD} - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) + \cancel{d(\dot{x} - \dot{x}_{FD} - r \cdot \dot{\varphi})} \\ x_{FD}(c_{FD} + c) &= c(x - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) \\ x_{FD} &= (x - r_T \cdot \varphi + \Delta l_0) \frac{c}{c_{FD} + c} \end{aligned} \quad (9.8)$$

Die Federkräfte sind viel größer als die Dämpferkräfte<sup>1</sup>, beim Gleichsetzen der Gleichungen 9.6 & 9.7 können die Dämpfungsterme deshalb vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich Formel 9.8, mit der  $x_{FD}$  angenähert werden kann.

Die Wirkung des Feder-Dämpfer Elements im Seilzug kann somit in Matlab/Simulink simuliert werden (Gleichungssystem Formel 9.4 bis 9.7), da die Dämpfungsterme nur für die Berechnung von  $x_{FD}$  vernachlässigt werden.

<sup>1</sup>Da die Werte der Federsteifigkeiten ( $c > 100,000 N/m$ ) um einiges höher als die Dämpfungsraten ( $d < 1,000 N/(m/s)$  bzw.  $kg/s$ ) sind, die Dehnungen (in m) und Dehnungsgeschwindigkeiten (in m/s) des Feder-Dämpfer Elements jedoch ungefähr die selbe Größenordnung haben.

## 9.2 Einfluss der Parameter des Feder-Dämpfer Elements

Ein Feder-Dämpfer Element im Seilzug ändert die Federsteifigkeit des Gesamtsystems (dies wird genauer betrachtet in Abschnitt 9.3 "Näherungslösung für die Abschätzung des Feder-Dämpfer Elements"). Das heißt, die Verläufe von Seilkraft und Verzögerung verschieben sich entsprechend dieser Änderung der Federsteifigkeit. Beim Lastfall Senken liegen die Lastmaxima bei den mittleren Seillängen, beim Heben bei den kurzen Seillängen. Somit verringern sich nur für den Lastfall Heben die Belastungswerte im gesamten Arbeitsbereich, weswegen in den folgenden Abschnitten die Wirkung von einem Feder Element/Feder-Dämpfer Element im Seilzug bzw. dessen Parameter (Federsteifigkeit und Dämpfungsrate), für den Lastfall Heben aufgezeigt wird.

Die Simulationen werden am selben Hubzug und mit den selben Parametern wie in Abschnitt 7.2.2 "Bereich 2, Schlaffseilbildung:  $a = 9.807m/s^2$ " durchgeführt (siehe Abbildung 7.3).

## 9.2.1 Feder im Seilzug

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element: ohne

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 21.597m/s^2$
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 8.124kN$

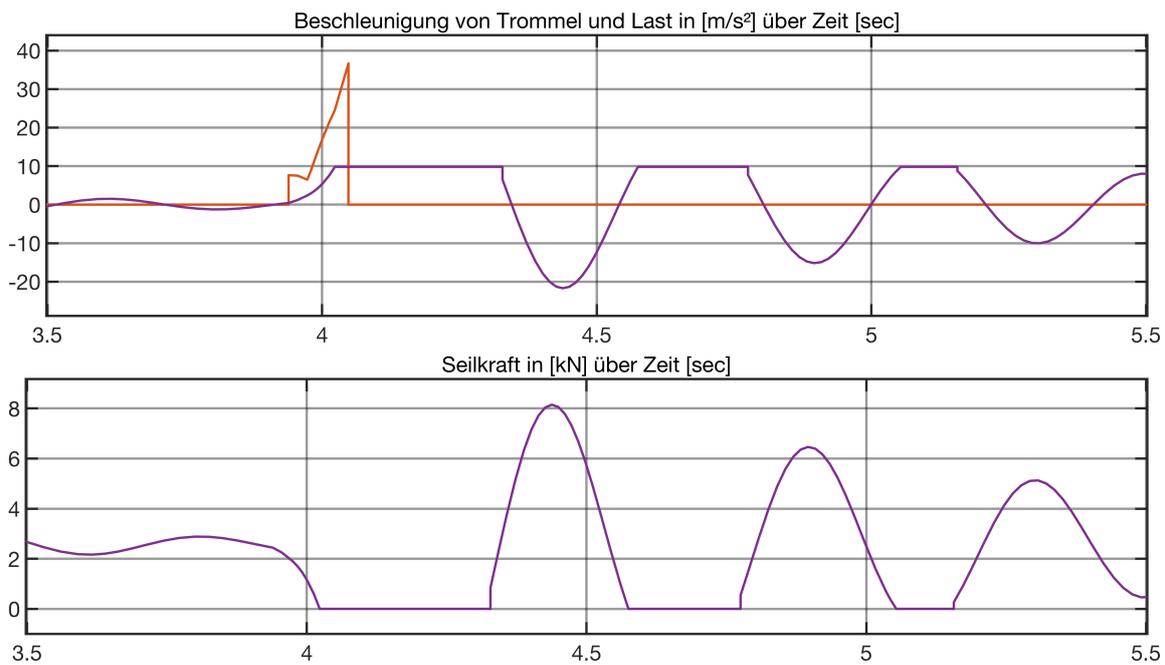


Abbildung 9.2: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben ohne Feder-Dämpfer Element

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 730kN/m$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 21.693m/s^2$  (+0.4%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 8.149kN$  (+2.5%)

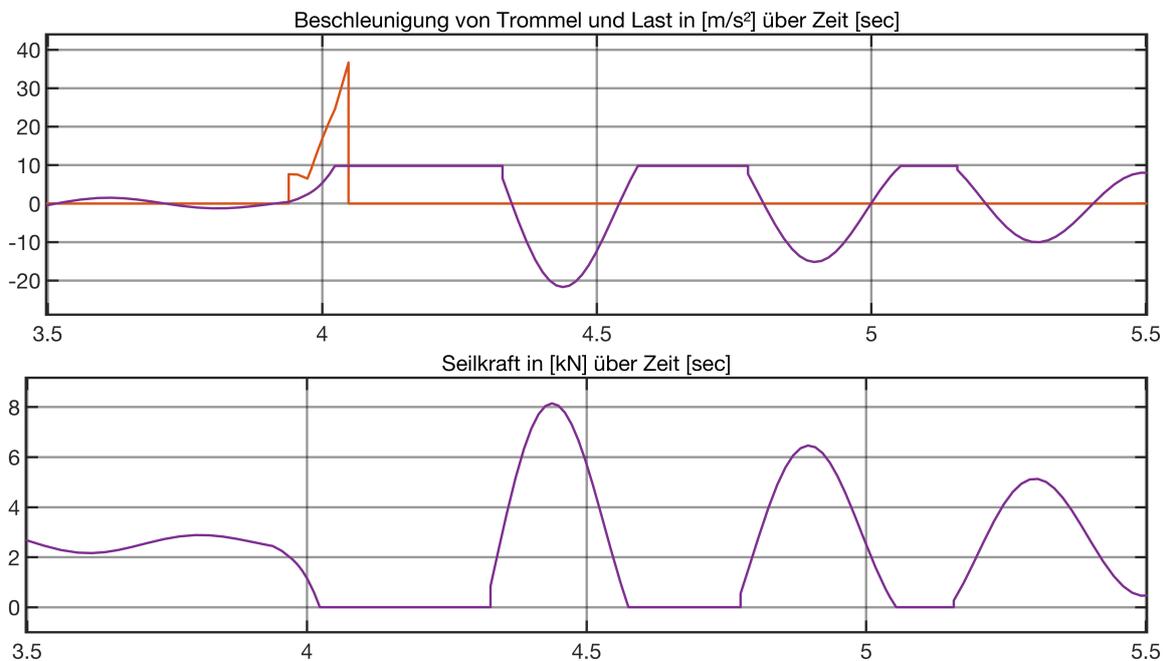


Abbildung 9.3: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=730kN/m$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 73\text{kN/m}$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 16.967\text{m/s}^2$  (-21.4%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 6.926\text{kN}$  (-14.7%)

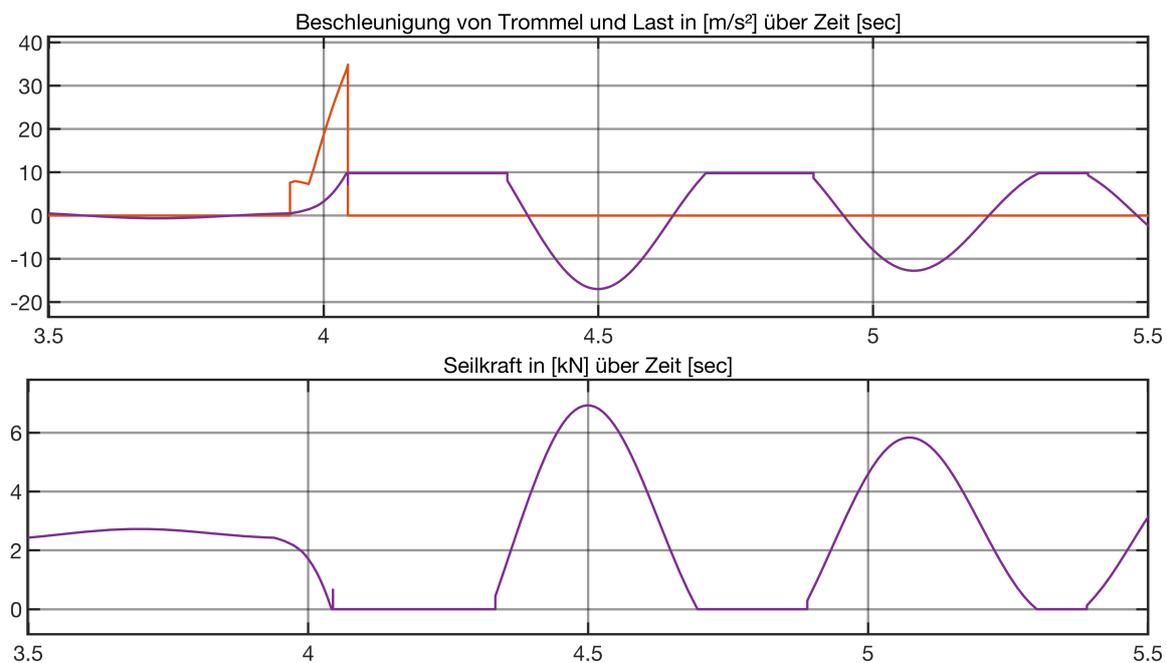


Abbildung 9.4: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=73\text{kN/m}$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 7.3kN/m$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 6.950m/s^2$  (-67.8%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 4.214kN$  (-48.1%)

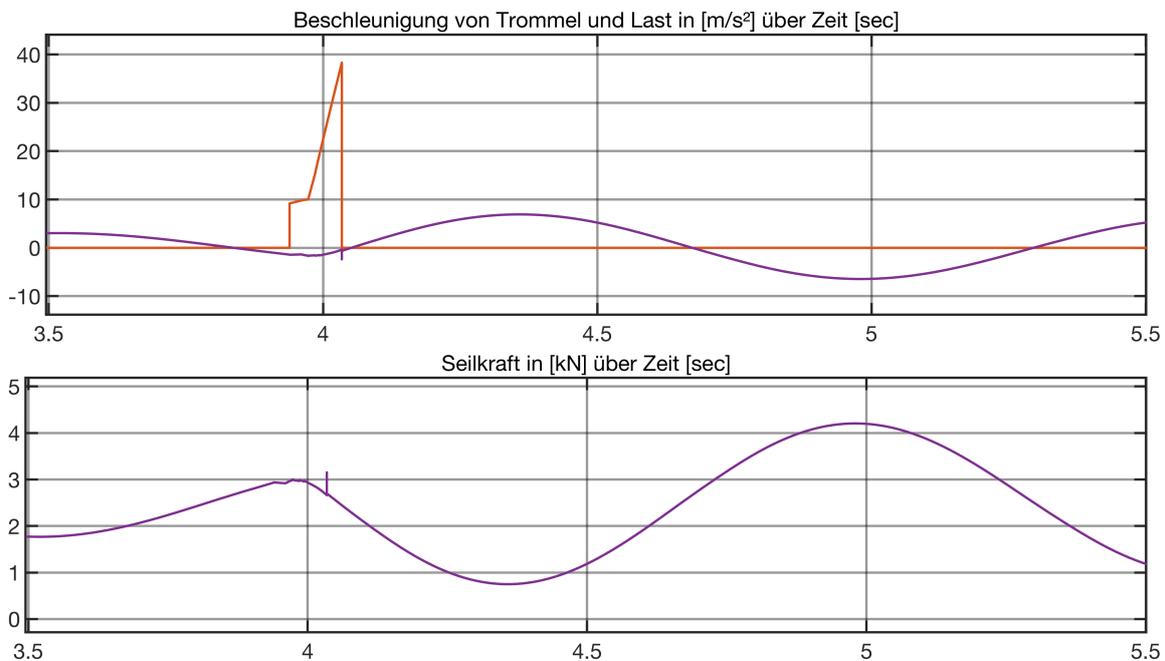


Abbildung 9.5: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=7.3kN/m$

## 9.2.2 Feder-Dämpfer Element im Seilzug

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 73\text{kN/m}$  &  $d = 1280\text{kg/s}$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 12.749\text{m/s}^2$  (-40.9%)
- maximale Seilkraft:  $F_{\text{stör}} = 5.835\text{kN}$  (-28.2%)

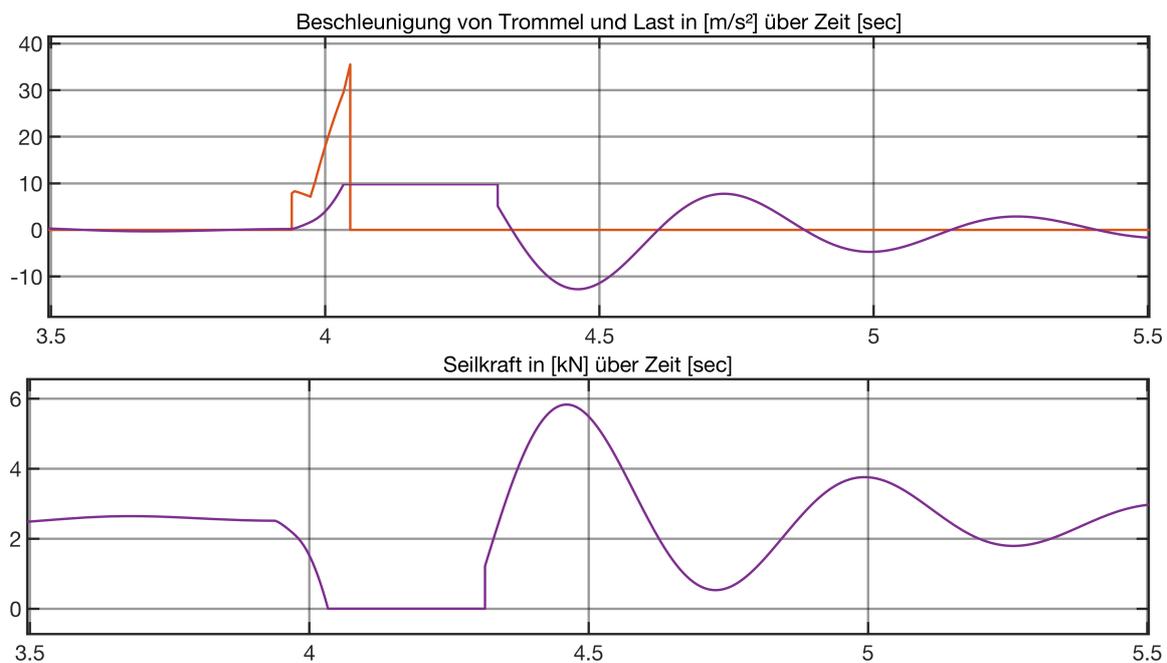


Abbildung 9.6: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=73\text{kN/m}$   $d=1280\text{kg/s}$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 73kN/m$  &  $d = 640kg/s$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 14.655m/s^2$  (-32.1%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 6.328kN$  (-22.1%)

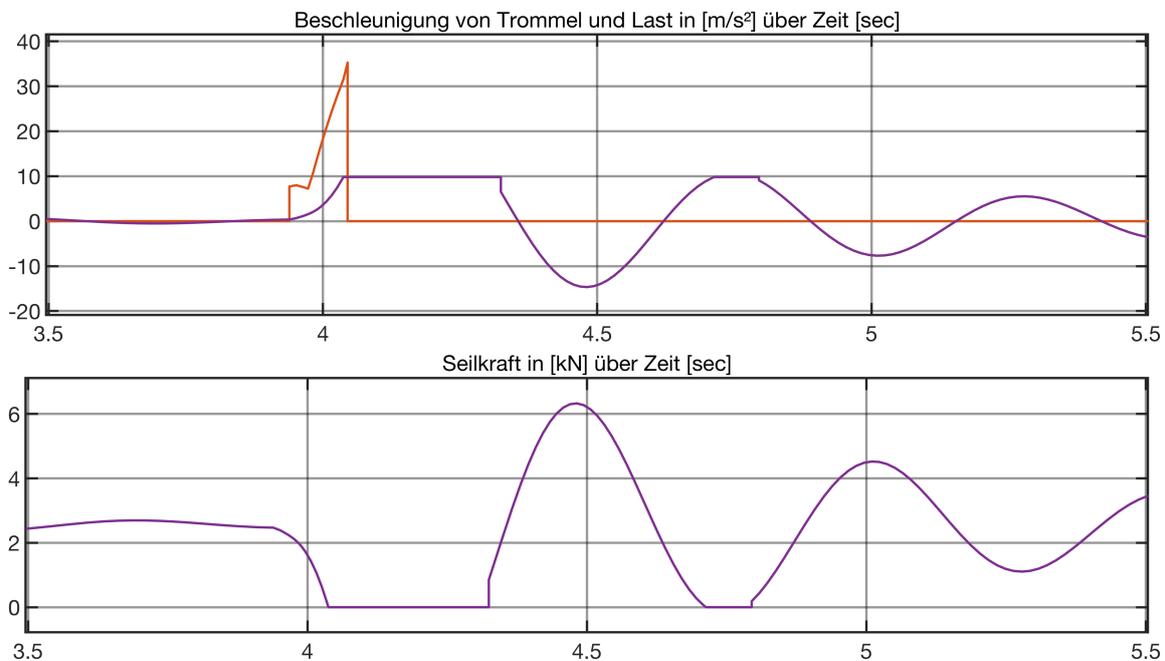


Abbildung 9.7: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=73kN/m$   $d=640kg/s$

Parameter:

- Hubzug: Punktzug 2.5kN
- Nutzlast: 250kg
- Seillänge/Federsteifigkeit: 25m / 73.47kN/m
- FD Element:  $c = 73kN/m$  &  $d = 320kg/s$

Belastung:

- maximale Beschleunigung:  $|a| = 15.786m/s^2$  (-26.9%)
- maximale Seilkraft:  $F_{stör} = 6.621kN$  (-18.5%)

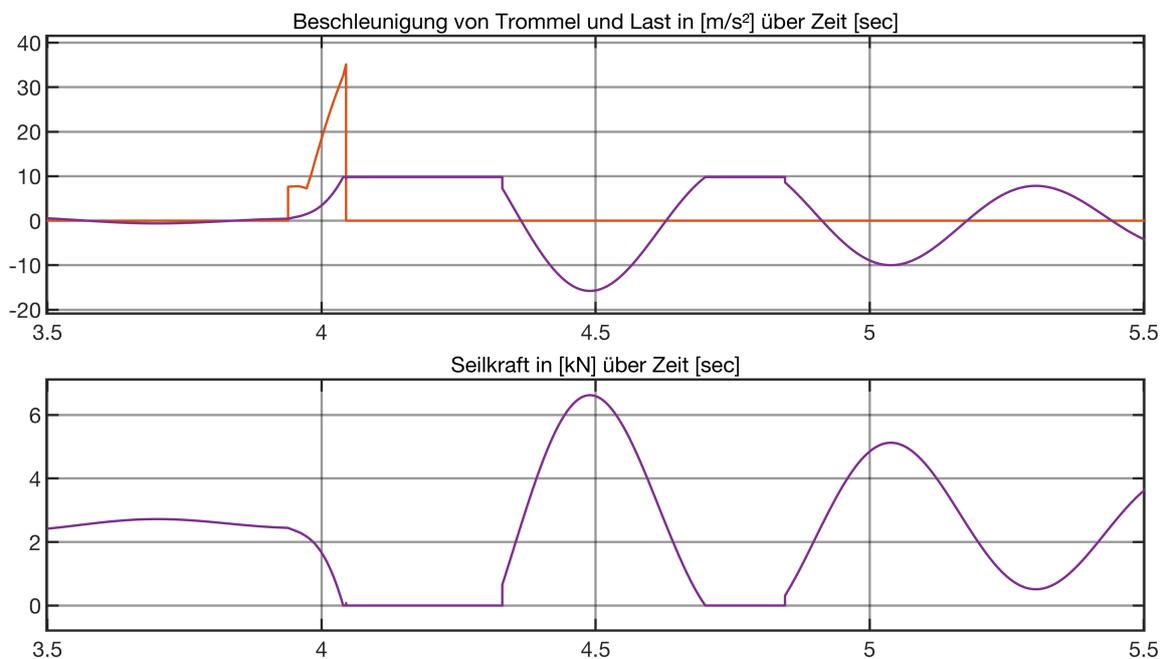


Abbildung 9.8: Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf beim Heben mit Feder-Dämpfer Element:  $c=73kN/m$   $d=320kg/s$

### 9.3 Näherungslösung für die Abschätzung des Feder-Dämpfer Elements

Zu Beginn des Kapitels wurde festgestellt, dass sich bei Verwendung eines Feder-Dämpfer Elementes dessen Dämpfungsrate weniger stark auf die Seilkräfte auswirkt als seine Federkonstante. Betrachtet man das Feder-Dämpfer Modell und das Seil also näherungsweise als reine Federn, so kann man sich eine Ersatzfedersteifigkeit für das Gesamtsystem berechnen.

$$c_{ges} = \frac{c_{FD} \cdot c_{Seil}}{c_{FD} + c_{Seil}} \quad (9.9)$$

$$\text{mit } c = \frac{A_m \cdot E_S}{l}$$

$$\frac{A_m \cdot E_S}{l_{ges}} = \frac{c_{FD} \cdot \frac{A_m \cdot E_S}{l_{Seil}}}{c_{FD} + \frac{A_m \cdot E_S}{l_{Seil}}} \quad (9.10)$$

$$l_{ges} = l_{Seil} \frac{c_{FD} + \frac{A_m \cdot E_S}{l_{Seil}}}{c_{FD}} = l_{Seil} + \frac{A_m \cdot E_S}{c_{FD}} \quad (9.11)$$

Wenn man also für ein Seil mit der Länge  $l_{Seil}$ , sowie dem metallischen Querschnitt  $A_m$ , dem E-Modul des Seils  $E_S$  und der Federsteifigkeit des Feder-Dämpfer Elements  $c_{FD}$  in Formel 9.11 einsetzt, erhält man die entsprechende Länge, die das Seil ohne Feder-Dämpfer Element haben muss, um die selbe Federsteifigkeit zu besitzen. In der Formel ist außerdem zu erkennen, dass diese "Seilverlängerung", die das Feder-Dämpfer Element bewirkt, konstant ist.

Das Feder-Dämpfer Element wirkt also wie eine Verlängerung der freien Seillänge, bei einer Seilverlängerung von z.B.: 10m sind die Seilkräfte mit Feder-Dämpfer Element und einer freien Seillänge von 5m so groß, wie beim identen Hubzug ohne Feder-Dämpfer Element und einer freien Seillänge von 15m. Es verschieben sich also die Kurven der Seilkräfte und Beschleunigungen entsprechend der Seilverlängerung nach links, wenn in den Hubzug ein Feder-Dämpfer Element eingebaut wird.

Berechnet man diese Seilverlängerung  $l_+$ , so kann man also recht einfach zwischen einem Hubzug mit Feder-Dämpfer Element und einem ohne vergleichen.

Hubzug	$c_{FD}$ in kN/m	$l_+$ in m
Punktzug $2.5kN$	140	13.13
Punktzug $2.5kN$	70	26.27
Punktzug $5kN$	250	11.45
Punktzug $5kN$	125	22.91
Prospektzug $5kN$	380	19.73
Prospektzug $5kN$	190	39.46
Prospektzug $10kN$	450	26.89
Prospektzug $10kN$	225	53.78

Tabelle 9.1: Seilverlängerung des Feder-Dämpfer Elements

In Tabelle 9.1 werden (unter Verwendung von Formel 9.11) für die 4 betrachteten Hubzüge die äquivalente Seilverlängerung, im Vergleich zu identen Hubzüge ohne Feder-Dämpfer Elemente, berechnet.

## 9.4 Simulation der Seilkräfte und Beschleunigungen

Die bisherigen Simulationen haben gezeigt, dass die Belastungen abnehmen wenn die Federrate reduziert wird. Bei der Dämpfung gilt: je höher die Dämpfungsrate, desto geringer die Belastung. Dabei gilt es jedoch die getroffene Annahme ( $F_{Feder} \gg F_{Dämpfer}$ ) zu beachten.

Je weicher die Feder, umso größer ist die Dehnung und damit natürlich auch die Geschwindigkeit im Feder-Dämpfer Element. Eine Verringerung der Federsteifigkeit bewirkt also neben der Verringerung der Federkraft eine Erhöhung der Dämpferkraft.

Es müssen die Parameter also so gewählt werden, dass die Dehnung des Feder-Dämpfer Elements nicht zu groß wird. Für die Simulationen werden 2 Fälle untersucht:

Beim Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ , wird das Feder-Dämpfer Elements so dimensioniert, dass seine Dehnung unter  $10\text{cm}$  bleibt. ( $c_{FD} \geq \frac{F_{stör,max}}{\Delta l_{FD,max}}$ )

Beim Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$ , bleibt sie unter  $20\text{cm}$ .

Für die Dämpfungsrate werden Werte verwendet, die in etwa der Dämpfungsrate des Seils/ der Seile entsprechen.

Die Parameter der Feder-Dämpfer Elemente, für beide Fälle, sind in der Tabelle 9.2 zu sehen.

Hubzug	$F_{stör,max}$	Federsteifigkeit des Feder-Dämpfer Elements		Dämpfungsrate
		$\Delta l_{FD,max} < 10\text{cm}$	$\Delta l_{FD,max} < 20\text{cm}$	
Punktzug 2.5kN	14.01kN	140kN/m	70kN/m	640 kg/s
Punktzug 5kN	25.11kN	250kN/m	125kN/m	640 kg/s
Prospektzug 5kN	35.2kN	380kN/m	190kN/m	3840 kg/s
Prospektzug 10kN	52.02kN	450kN/m	225kN/m	3840 kg/s

Tabelle 9.2: Federsteifigkeit und Dämpfungsrate der FD Elemente

Um zu überprüfen, ob Näherungslösung aus dem vorherigen Abschnitt stimmt, sollen in die folgenden Diagramme die Simulationsergebnisse und die Näherungslösungen aufgetragen werden.

### 9.4.1 Punktzug 2.5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 2.5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.1), das Anlagenschema ist in Abbildung 9.9 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei ein Feder-Dämpfer Element zwischen Seil und Last angebracht ist:

Nenngeschwindigkeit:  $1.8m/s$ , Nennbeschleunigung:  $3.0m/s^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ :  $c = 140kN/m$  &  $d = 640kg/s$ ,  $FD_{20}$ :  $c = 70kN/m$  &  $d = 640kg/s$

Die durchgezogenen Linien zeigen die simulierten Lasten mit Feder-Dämpfer Element im Seilzug. Gepunktet ist die Näherungslösung (siehe Formel 9.11) dargestellt.

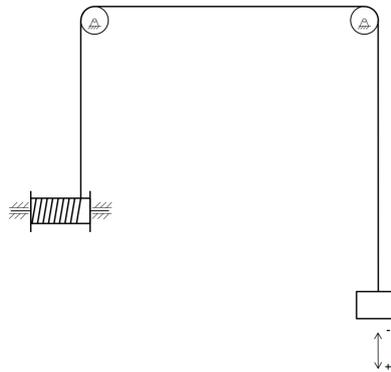


Abbildung 9.9: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

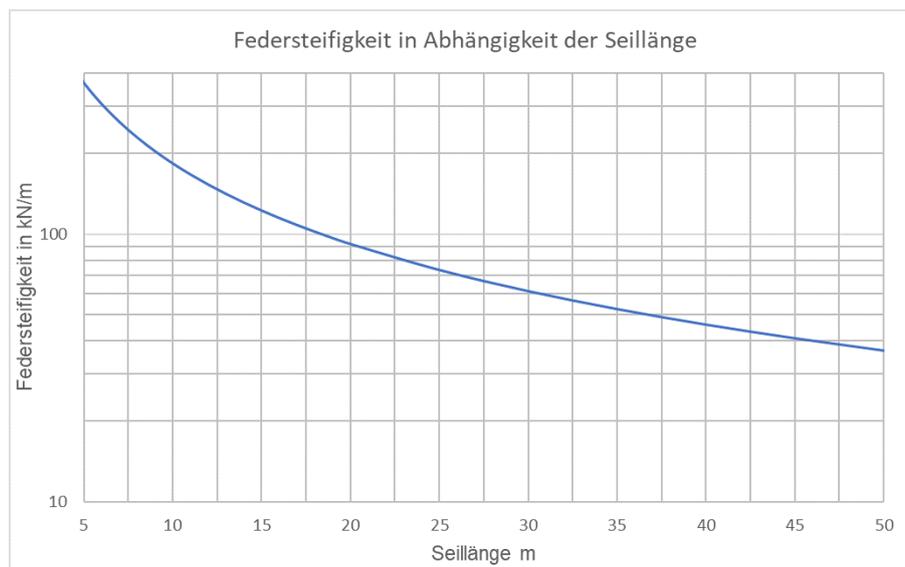


Abbildung 9.10: Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 9.4.1.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

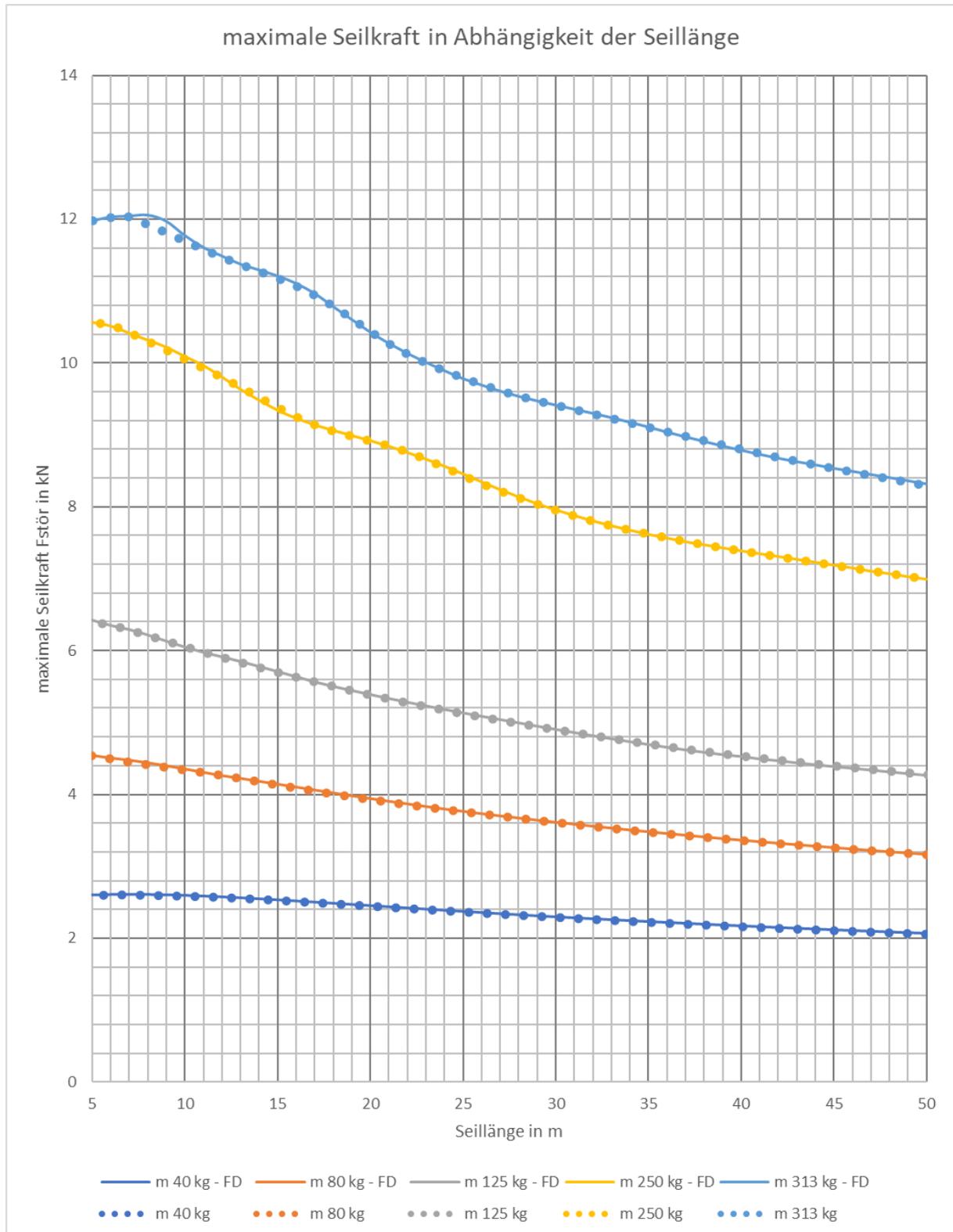


Abbildung 9.11: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

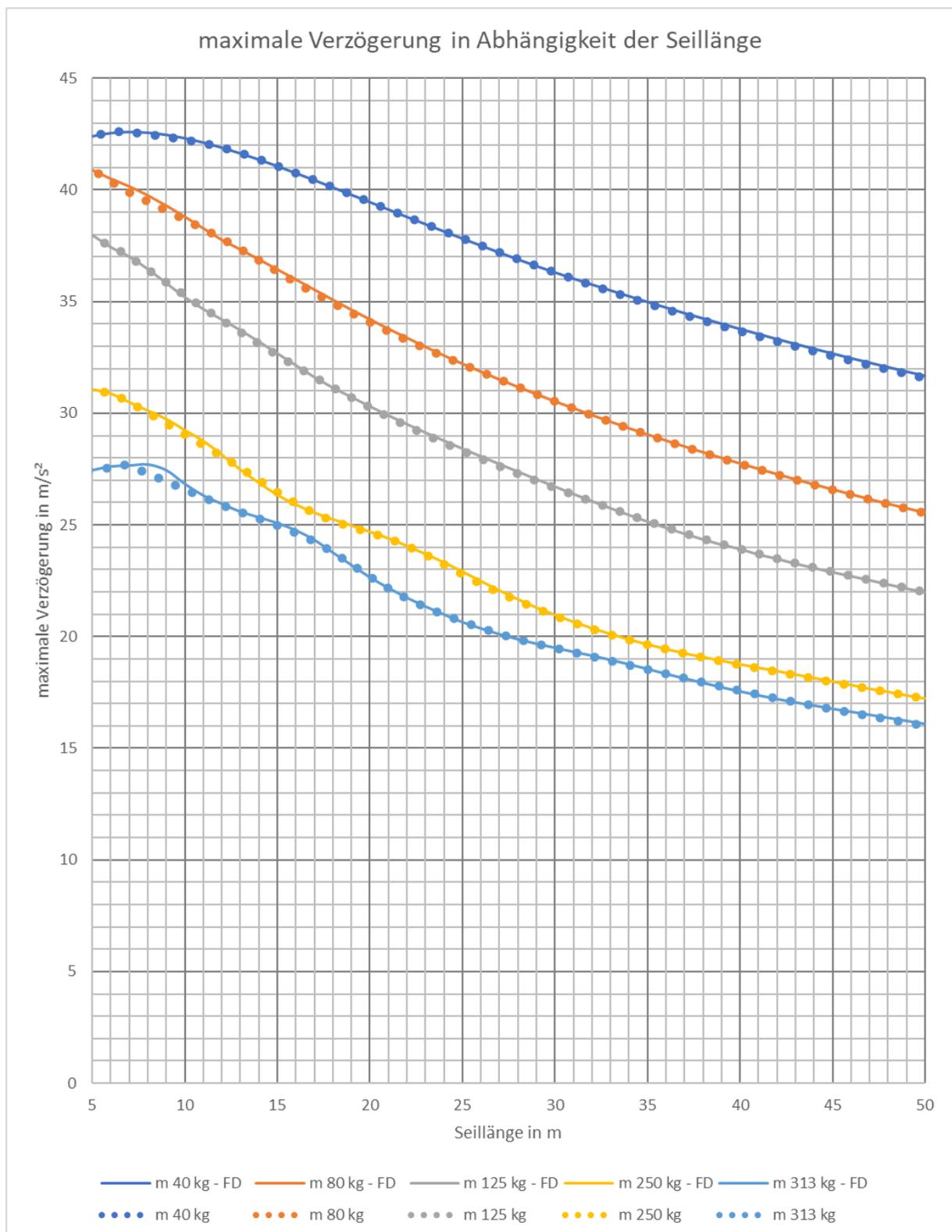


Abbildung 9.12: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

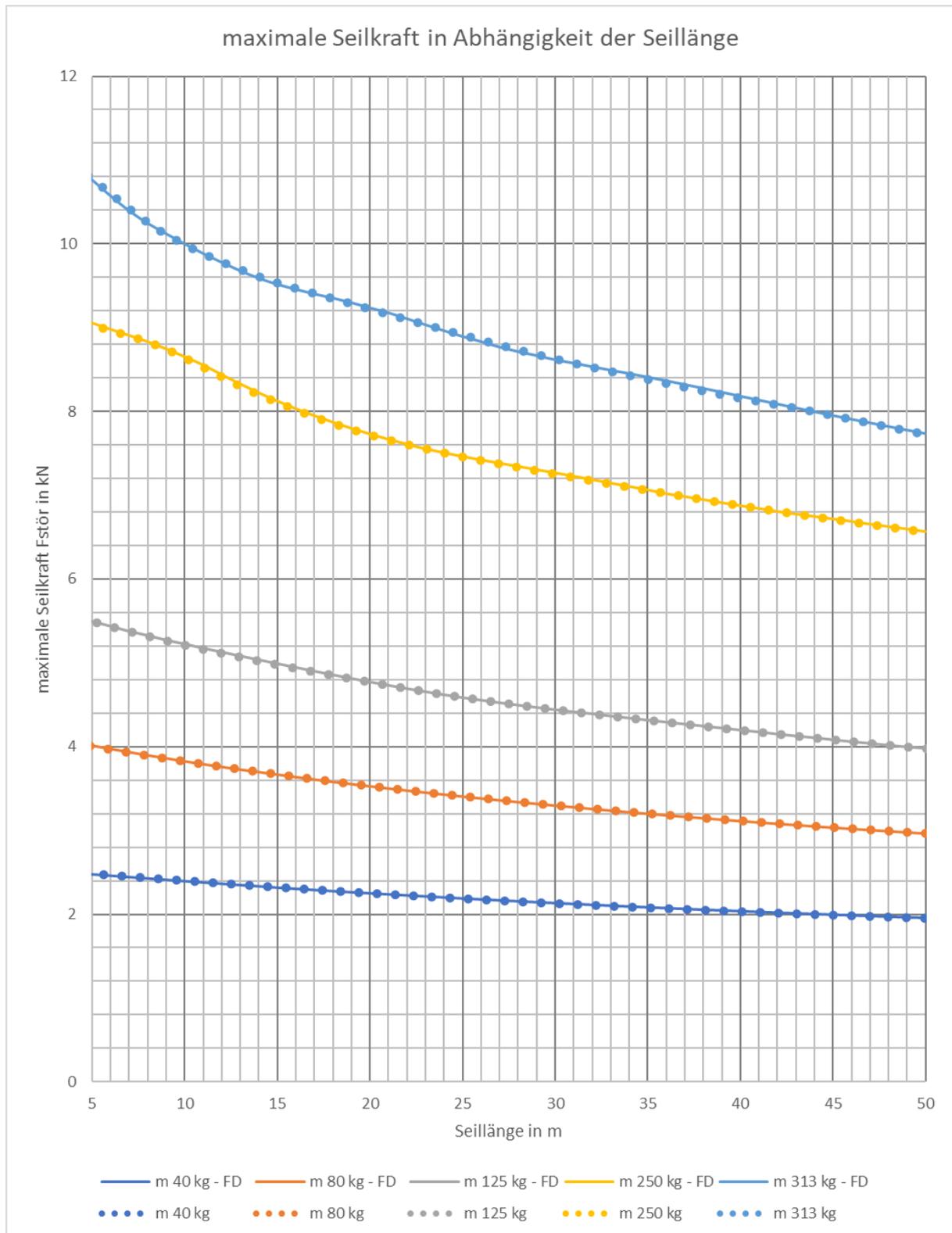


Abbildung 9.13: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

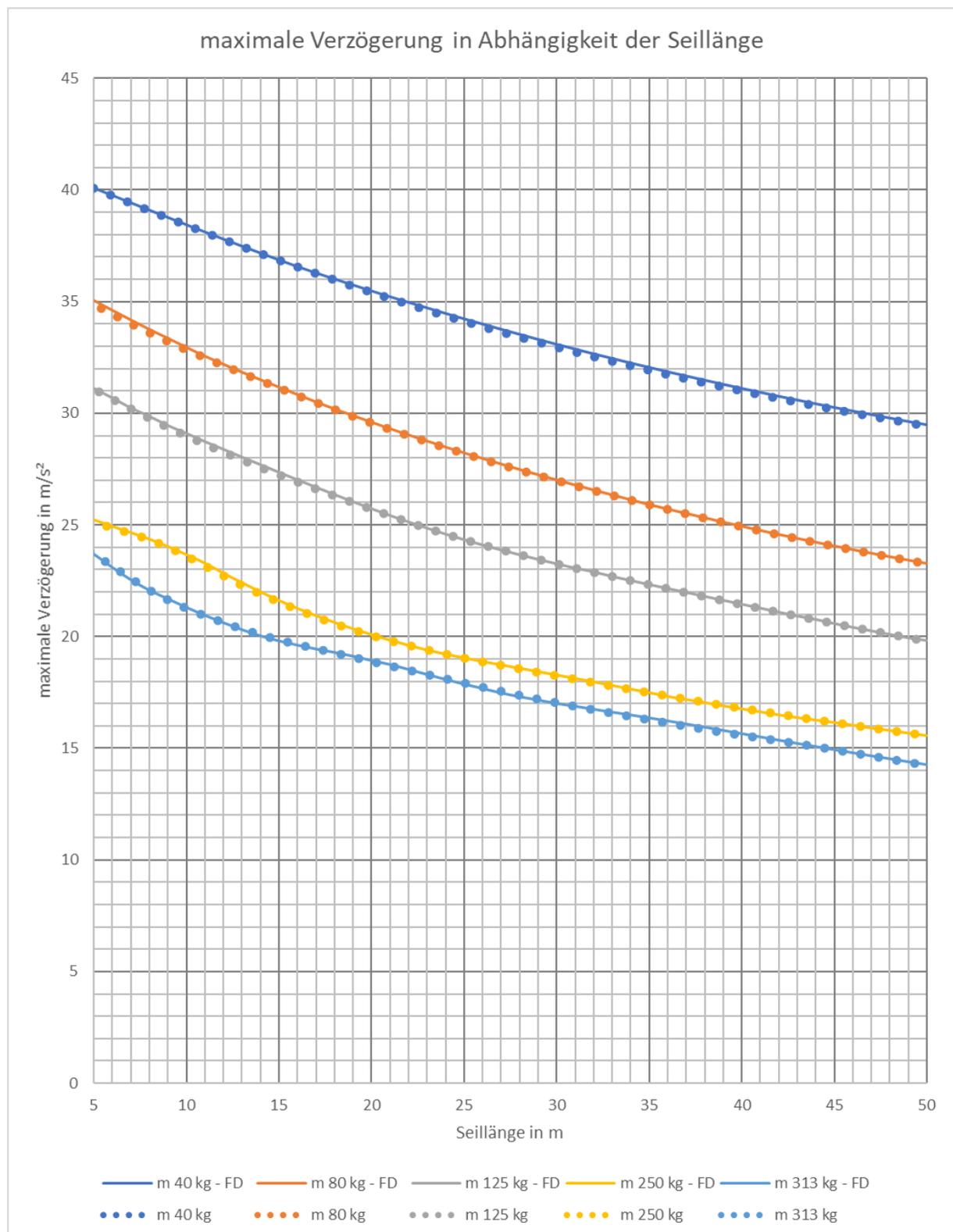


Abbildung 9.14: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

9.4.1.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

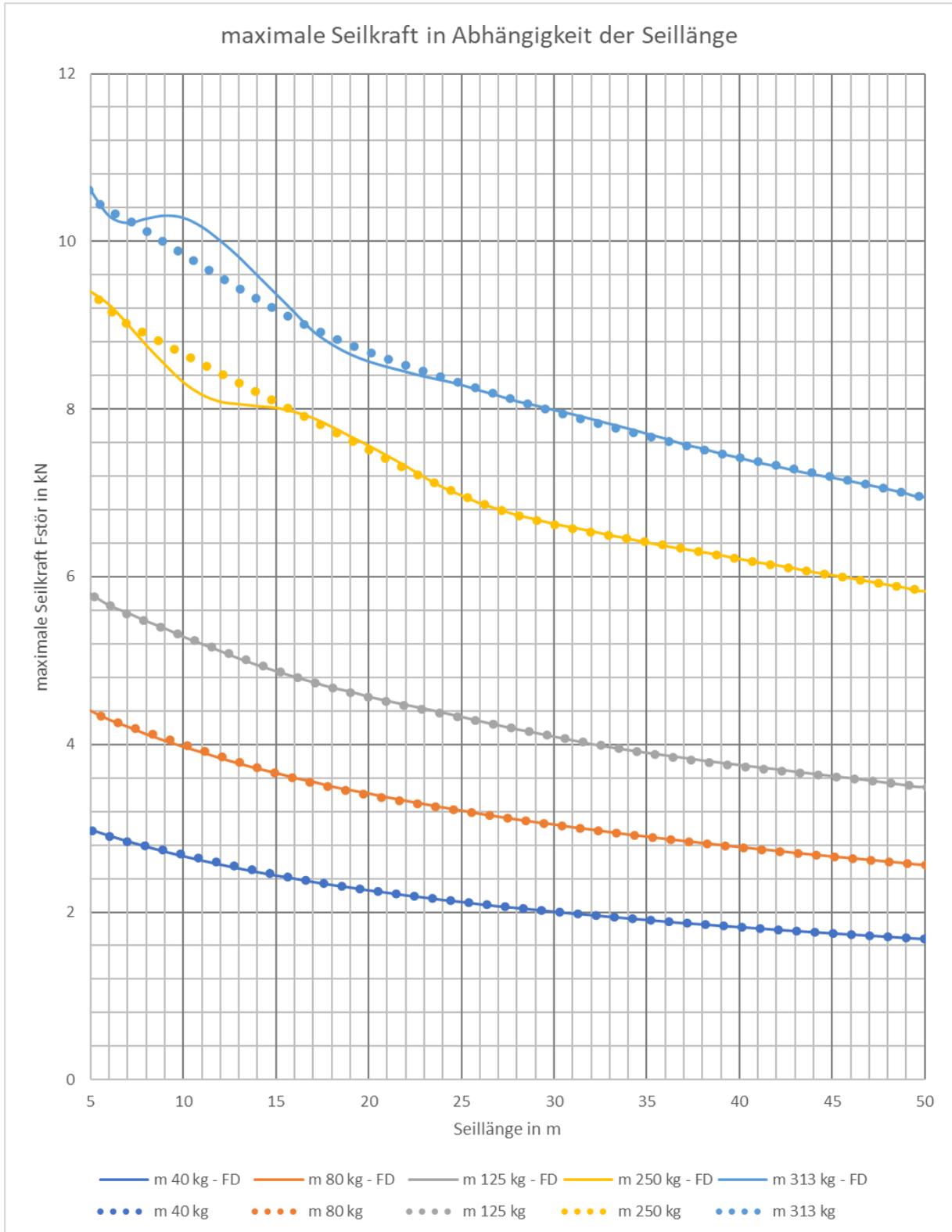


Abbildung 9.15: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

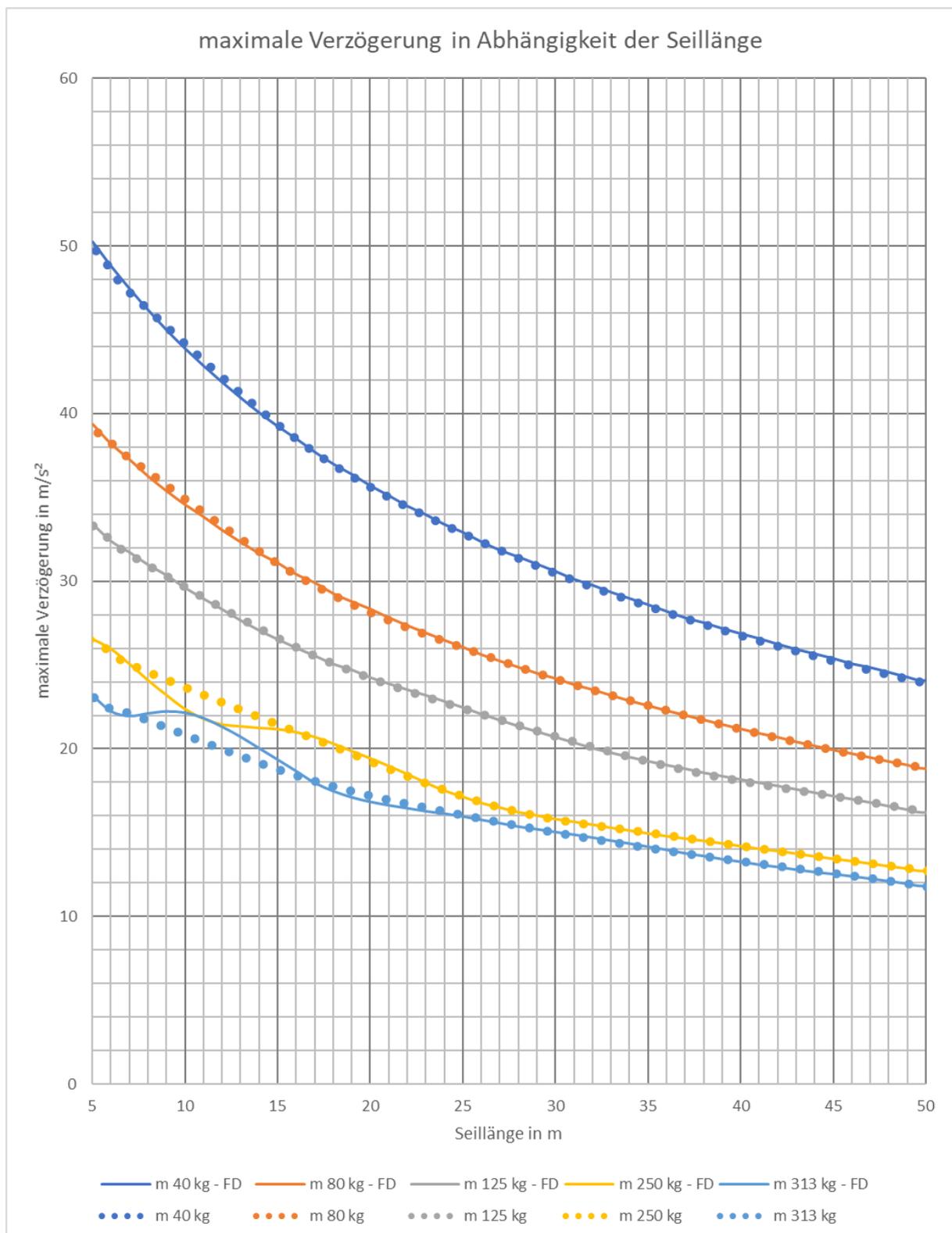


Abbildung 9.16: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

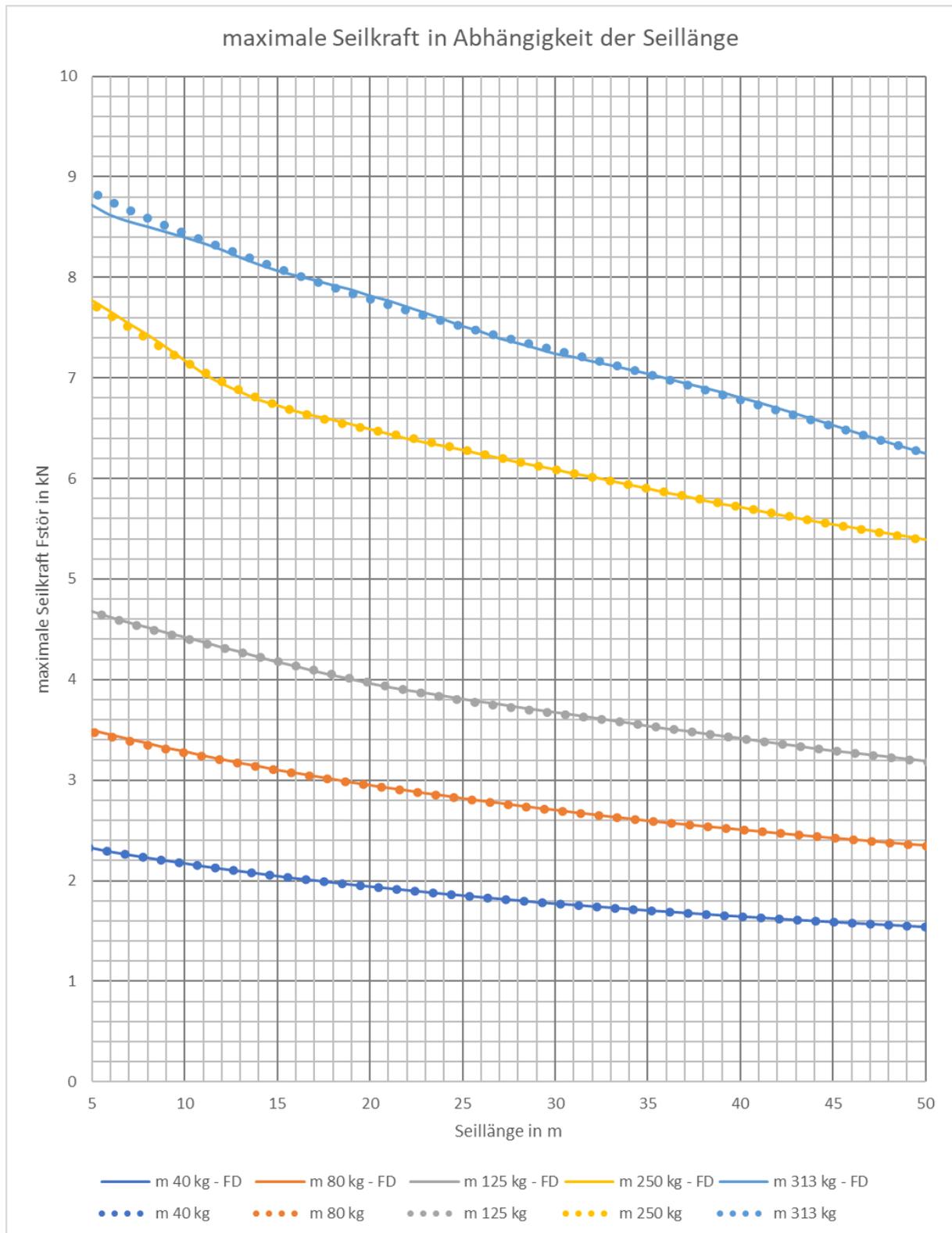


Abbildung 9.17: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

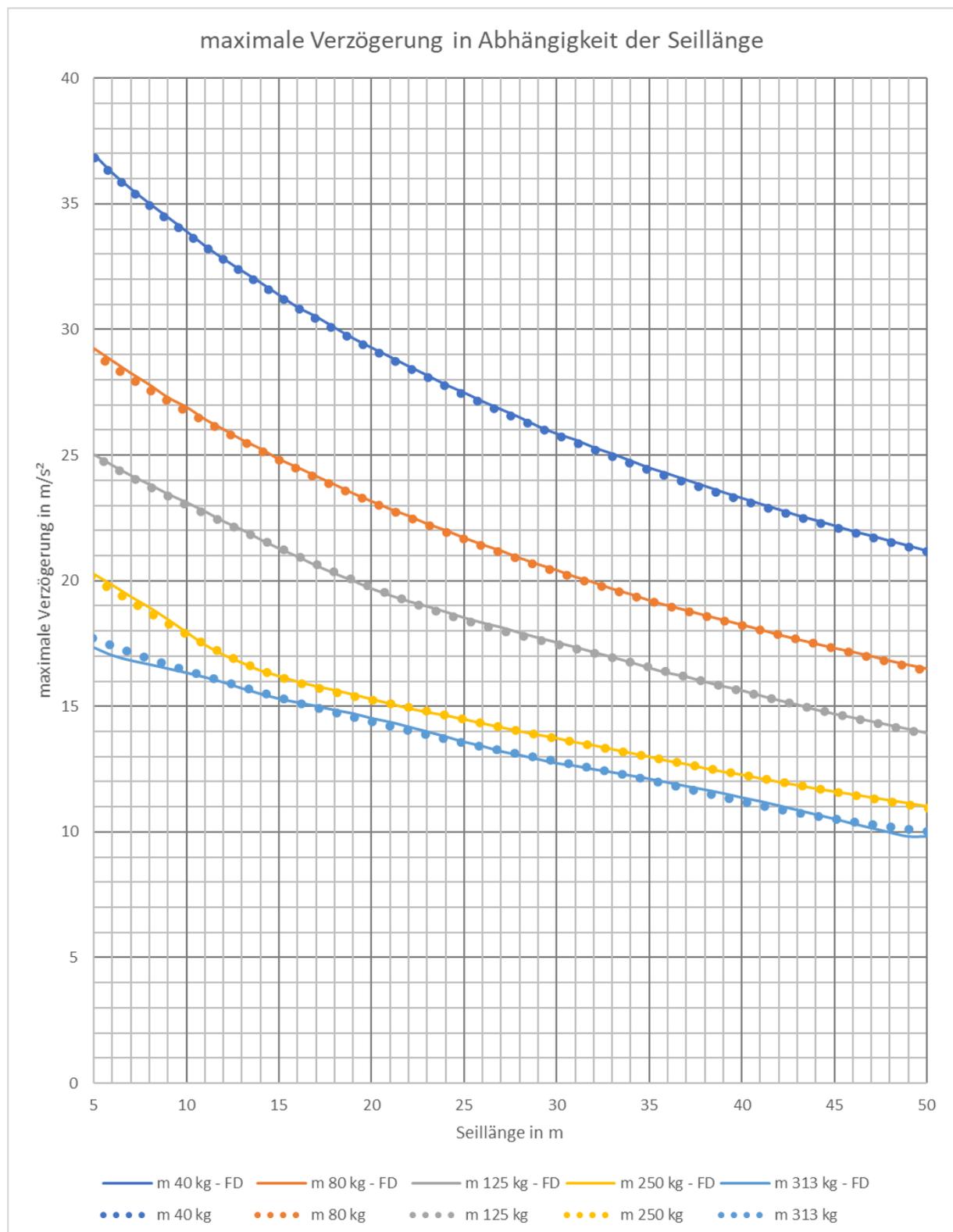


Abbildung 9.18: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 2.5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

### 9.4.2 Punktzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Punktzug (technische Details siehe Tabelle 4.2), das Anlagenschema ist in Abbildung 9.19 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei ein Feder-Dämpfer Element zwischen Seil und Last angebracht ist:

Nenngeschwindigkeit:  $1.8m/s$ , Nennbeschleunigung:  $3.0m/s^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ :  $c = 250kN/m$  &  $d = 640kg/s$ ,  $FD_{20}$ :  $c = 125kN/m$  &  $d = 640kg/s$

Die durchgezogenen Linien zeigen die simulierten Lasten mit Feder-Dämpfer Element im Seilzug. Gepunktet ist die Näherungslösung (siehe Formel 9.11) dargestellt.

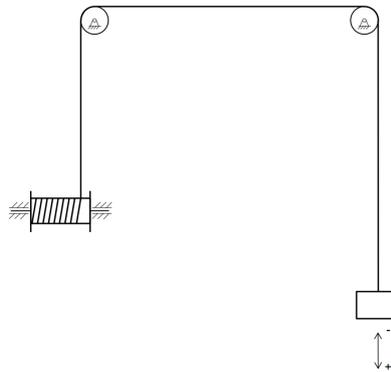


Abbildung 9.19: Punktzug, Schema, Quelle: [4], s12

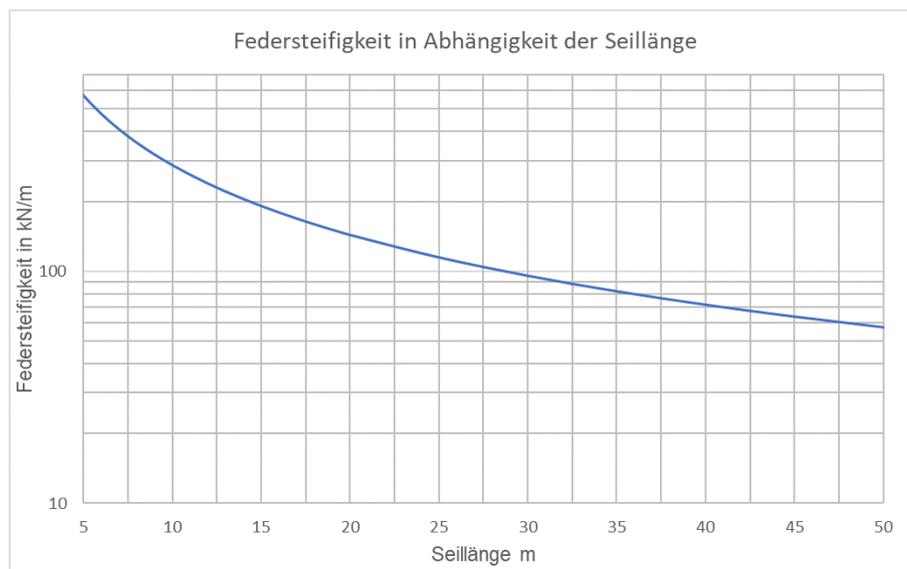


Abbildung 9.20: Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

9.4.2.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

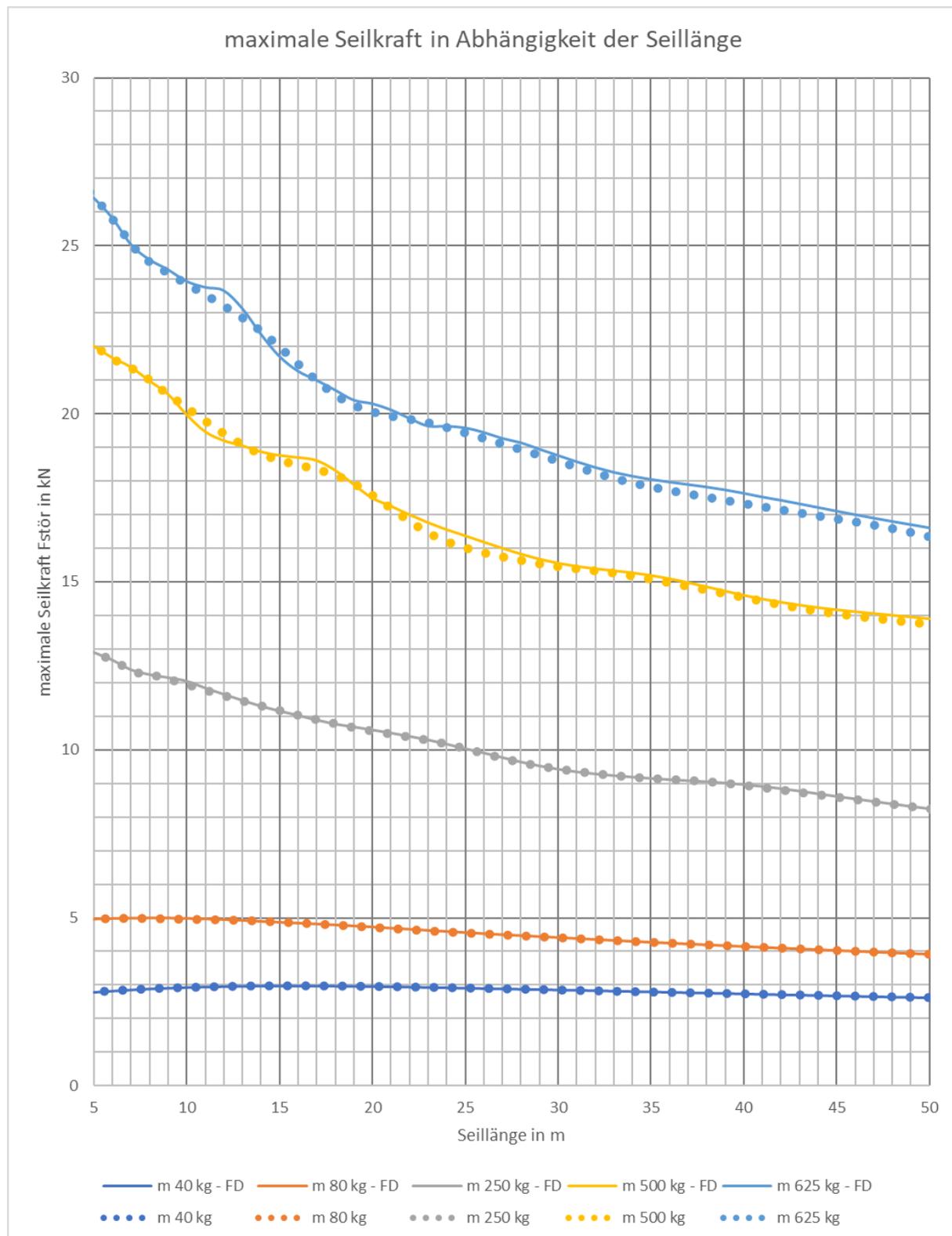


Abbildung 9.21: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

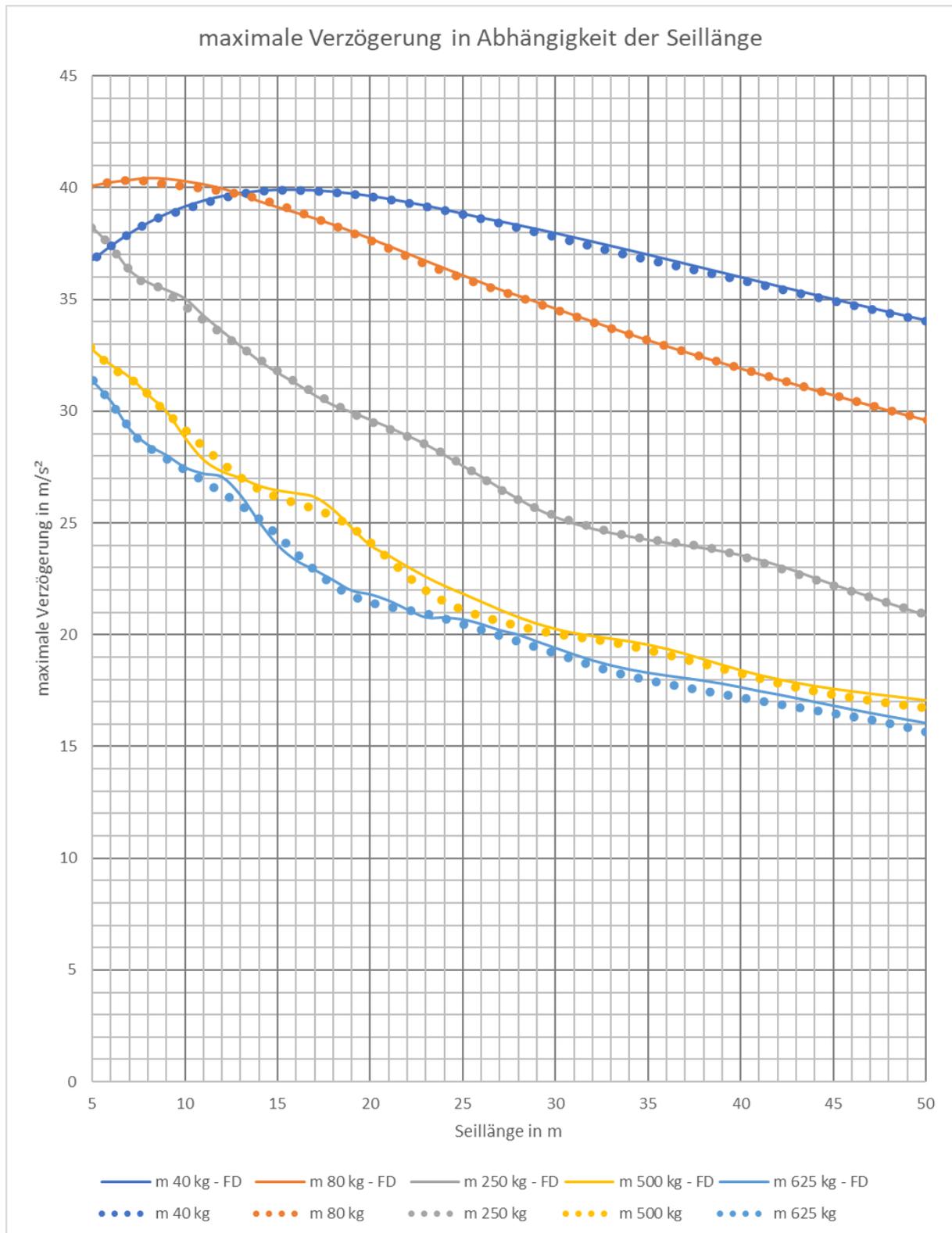


Abbildung 9.22: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

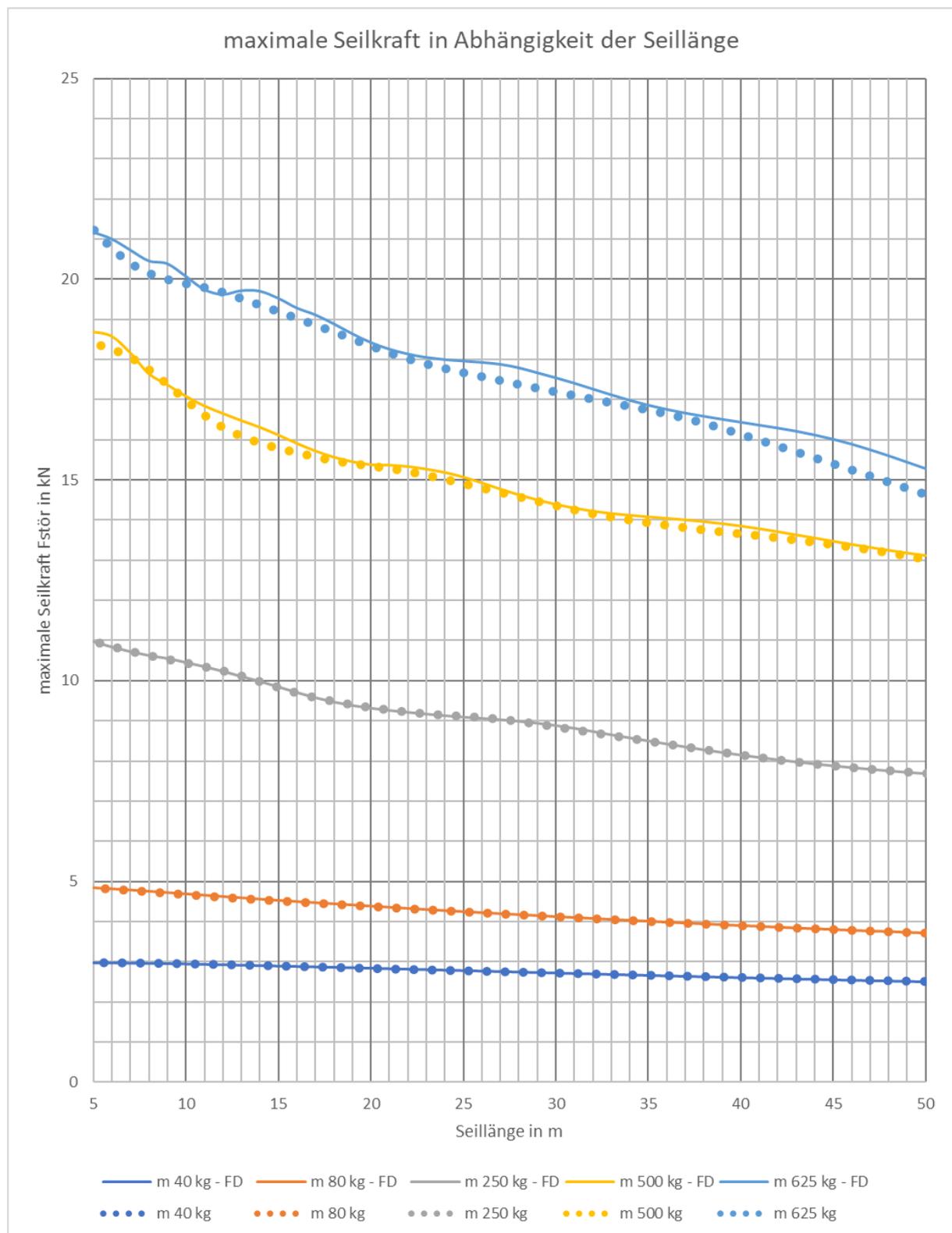


Abbildung 9.23: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

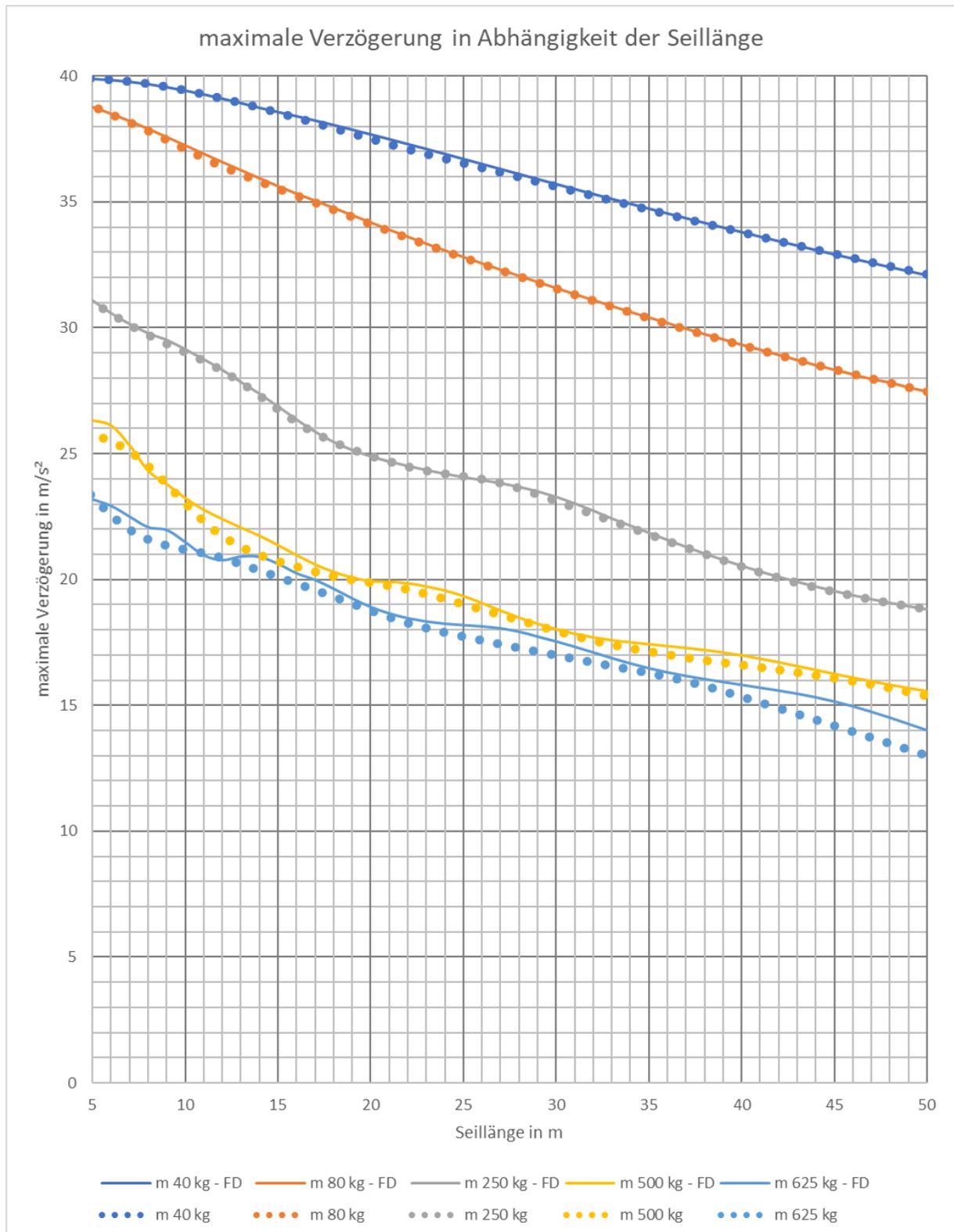


Abbildung 9.24: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

9.4.2.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

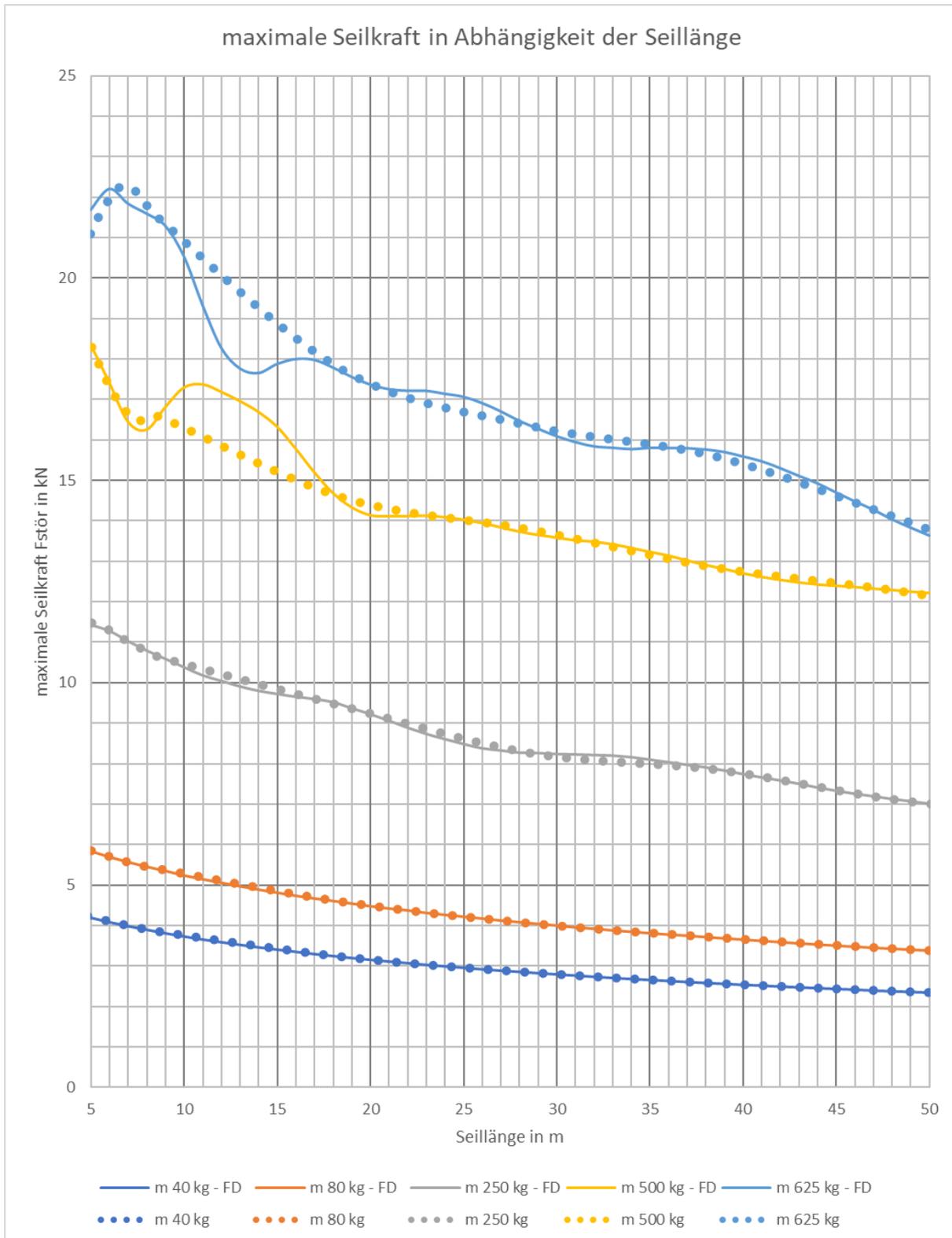


Abbildung 9.25: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

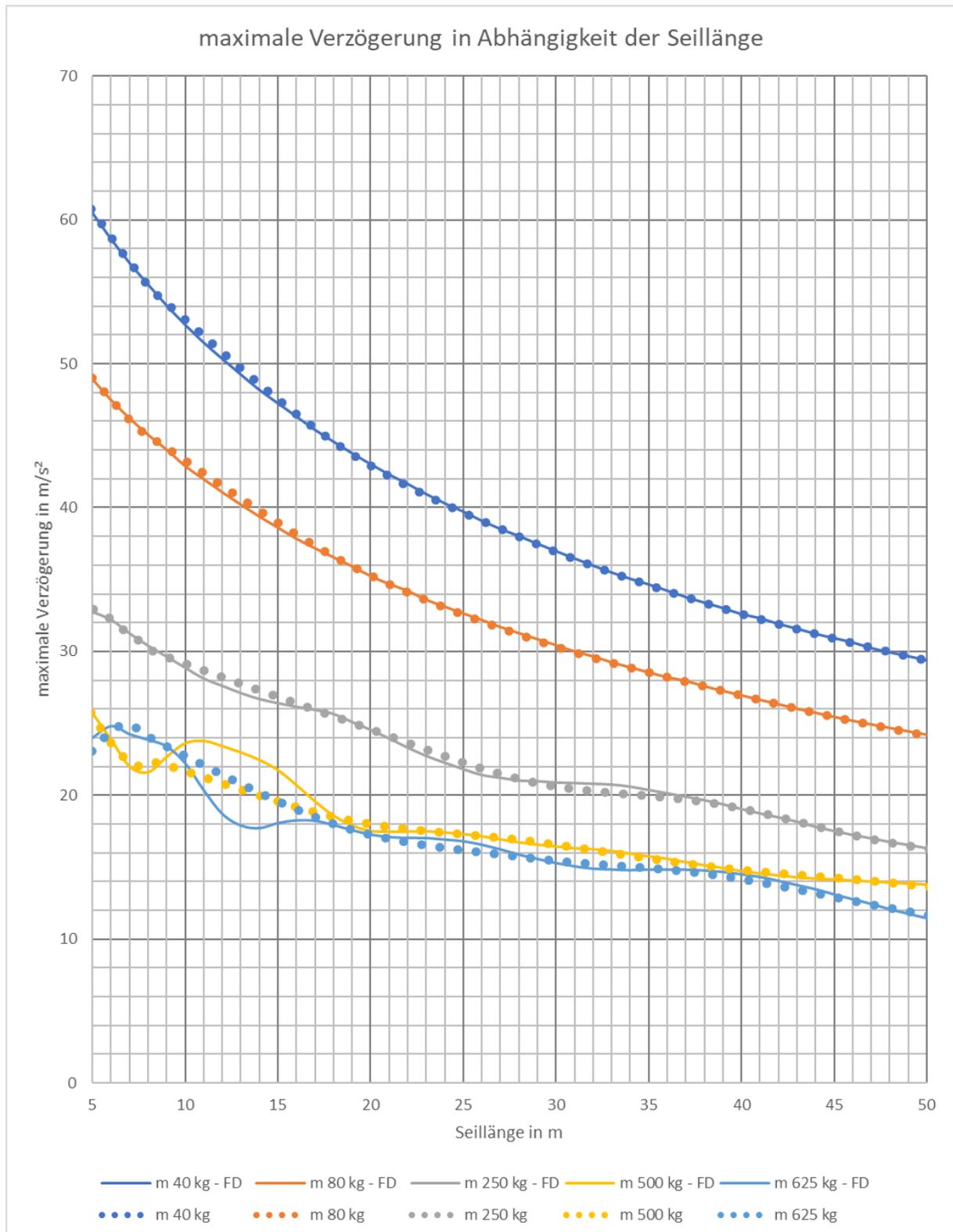


Abbildung 9.26: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

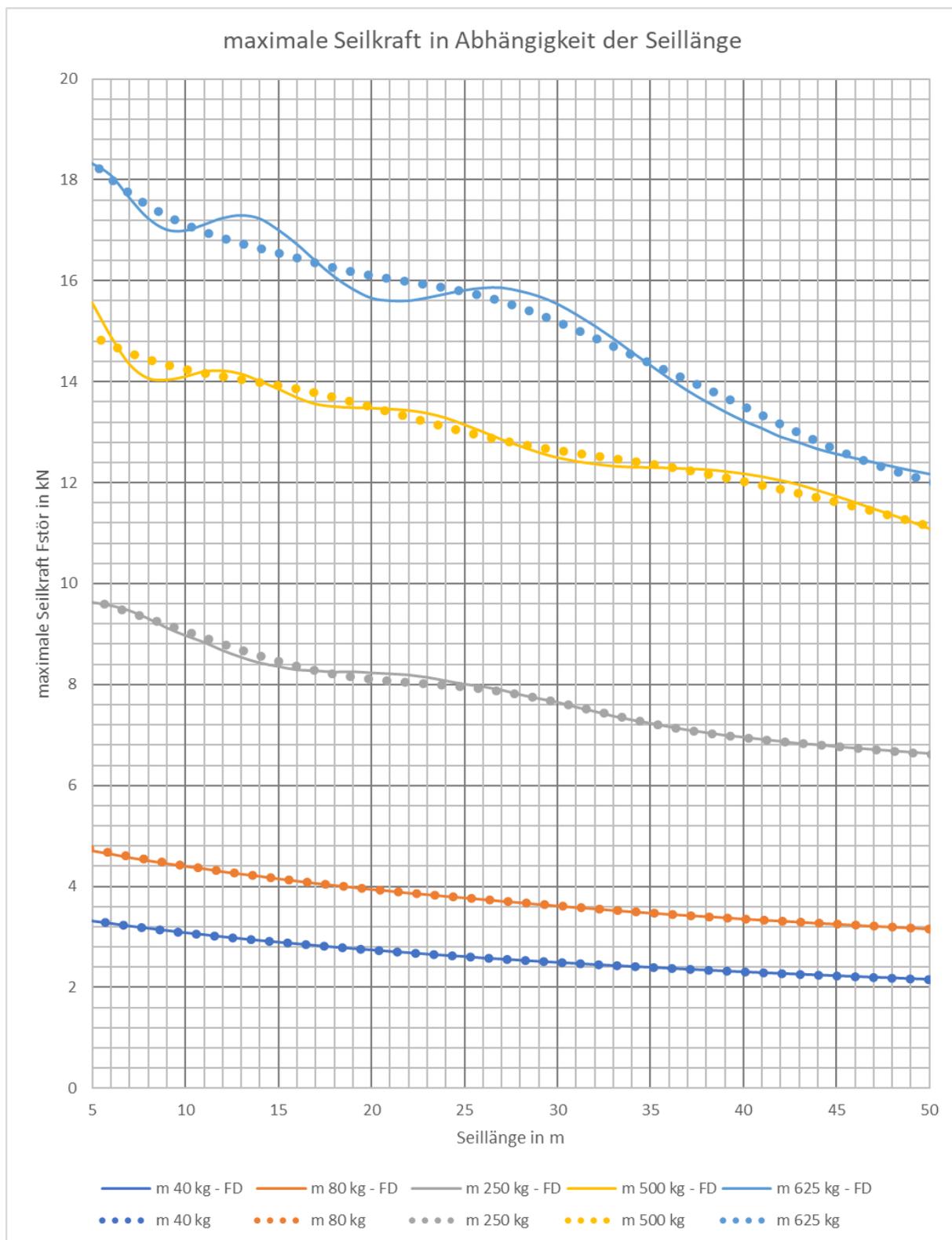


Abbildung 9.27: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

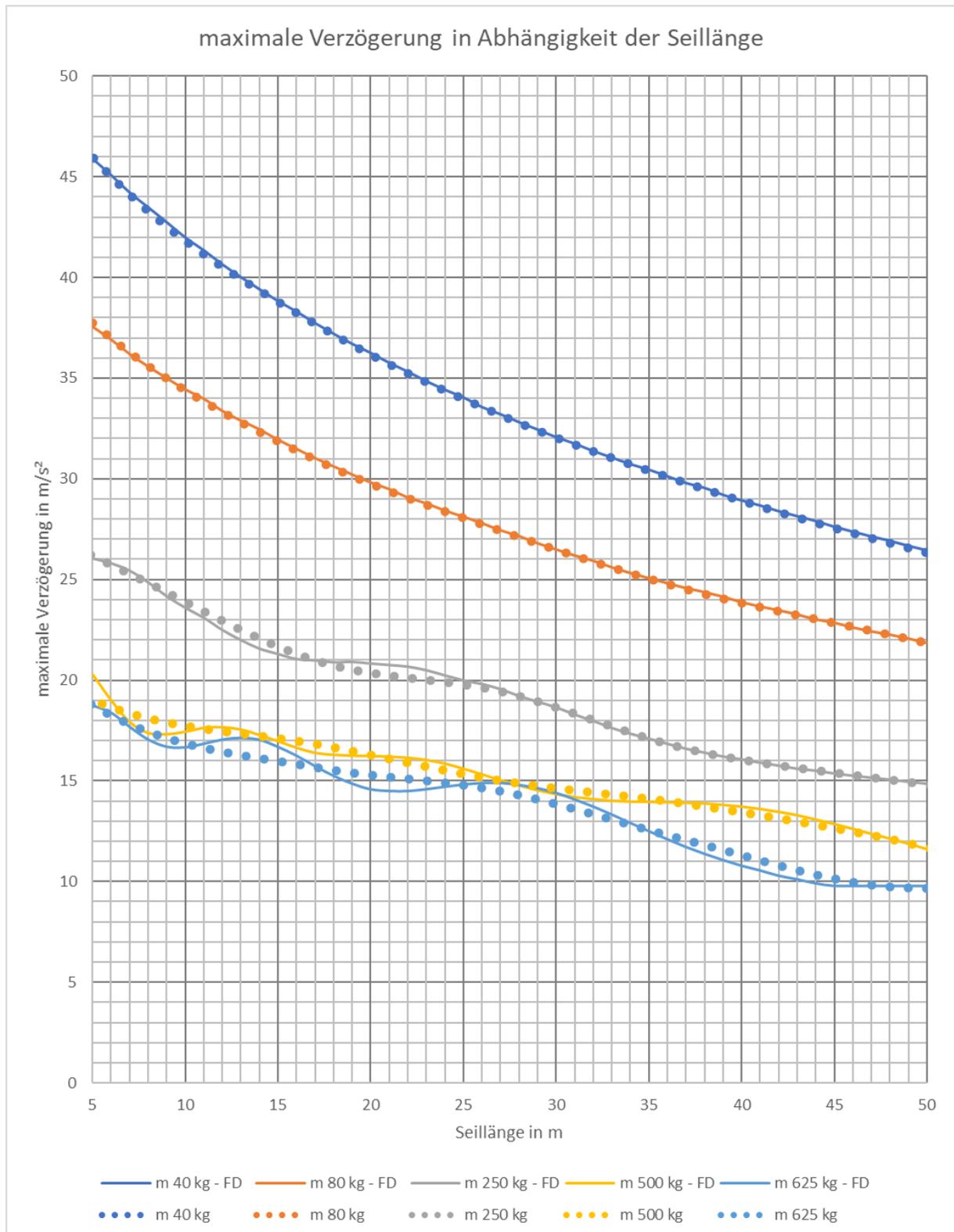


Abbildung 9.28: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Punktzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

### 9.4.3 Prospektzug 5 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 5kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.3), das Anlagenschema ist in Abbildung 9.29 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei ein Feder-Dämpfer Element zwischen Seil und Last angebracht ist:

Nenngeschwindigkeit:  $1.5\text{m/s}$ , Nennbeschleunigung:  $1.5\text{m/s}^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ :  $c = 380\text{kN/m}$  &  $d = 3840\text{kg/s}$ ,  $FD_{20}$ :  $c = 190\text{kN/m}$  &  $d = 3840\text{kg/s}$

Die durchgezogenen Linien zeigen die simulierten Lasten mit Feder-Dämpfer Element im Seilzug. Gepunktet ist die Näherungslösung (siehe Formel 9.11) dargestellt.

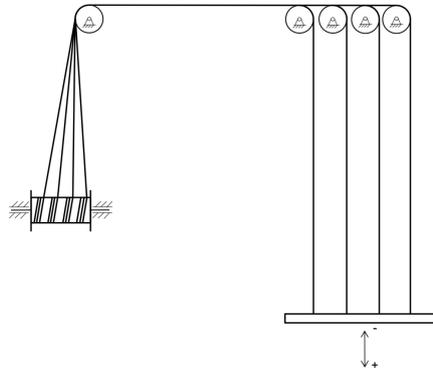


Abbildung 9.29: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

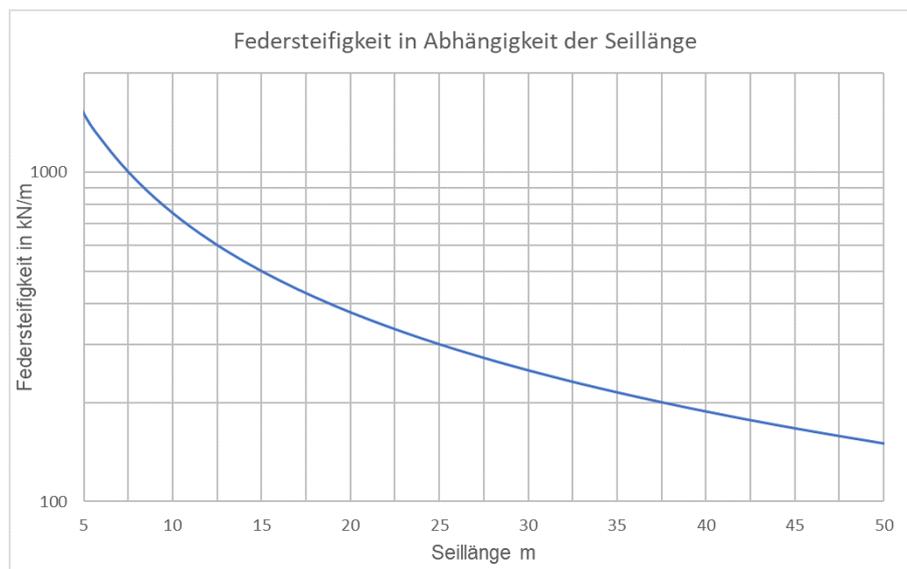


Abbildung 9.30: Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

## 9.4.3.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

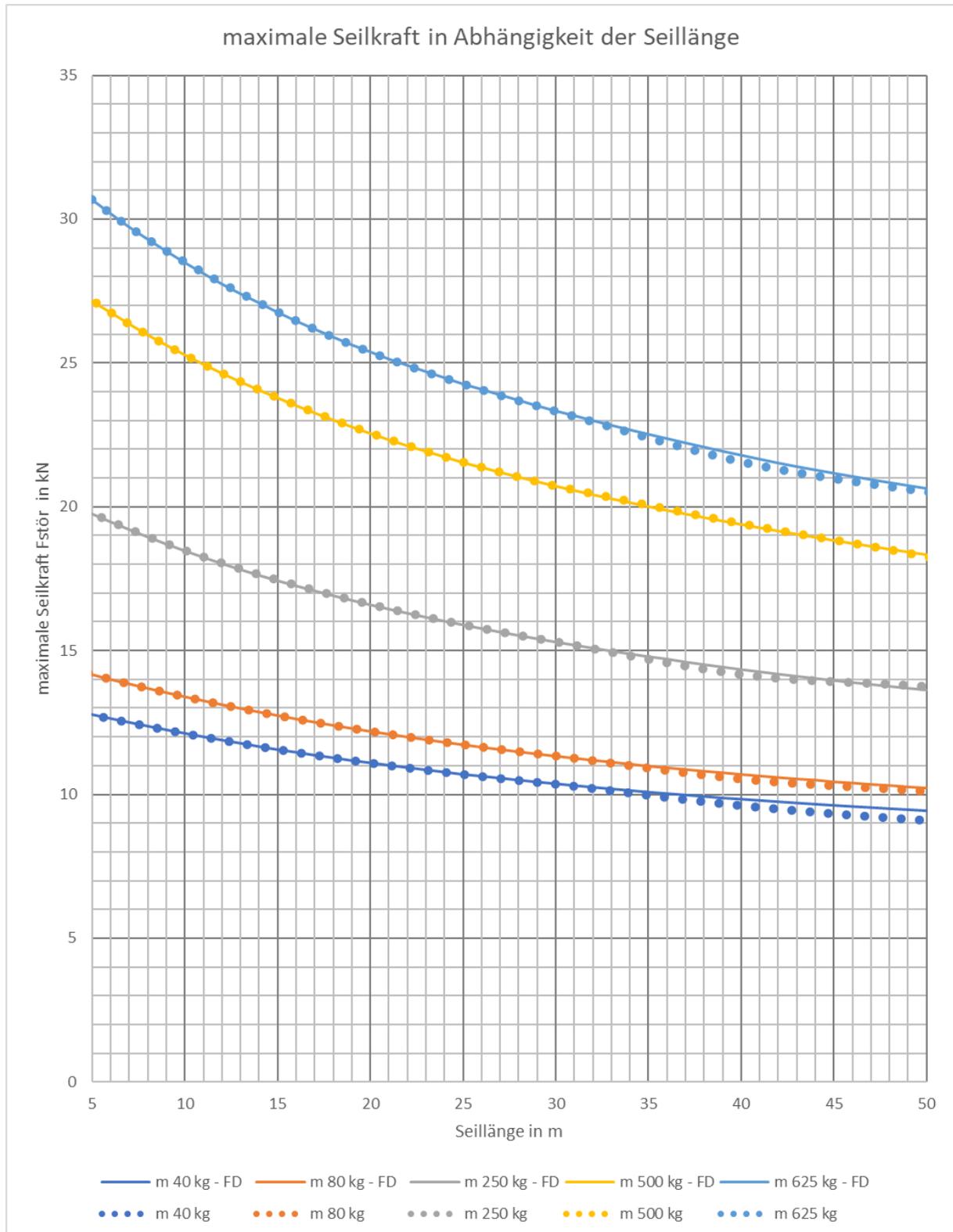


Abbildung 9.31: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

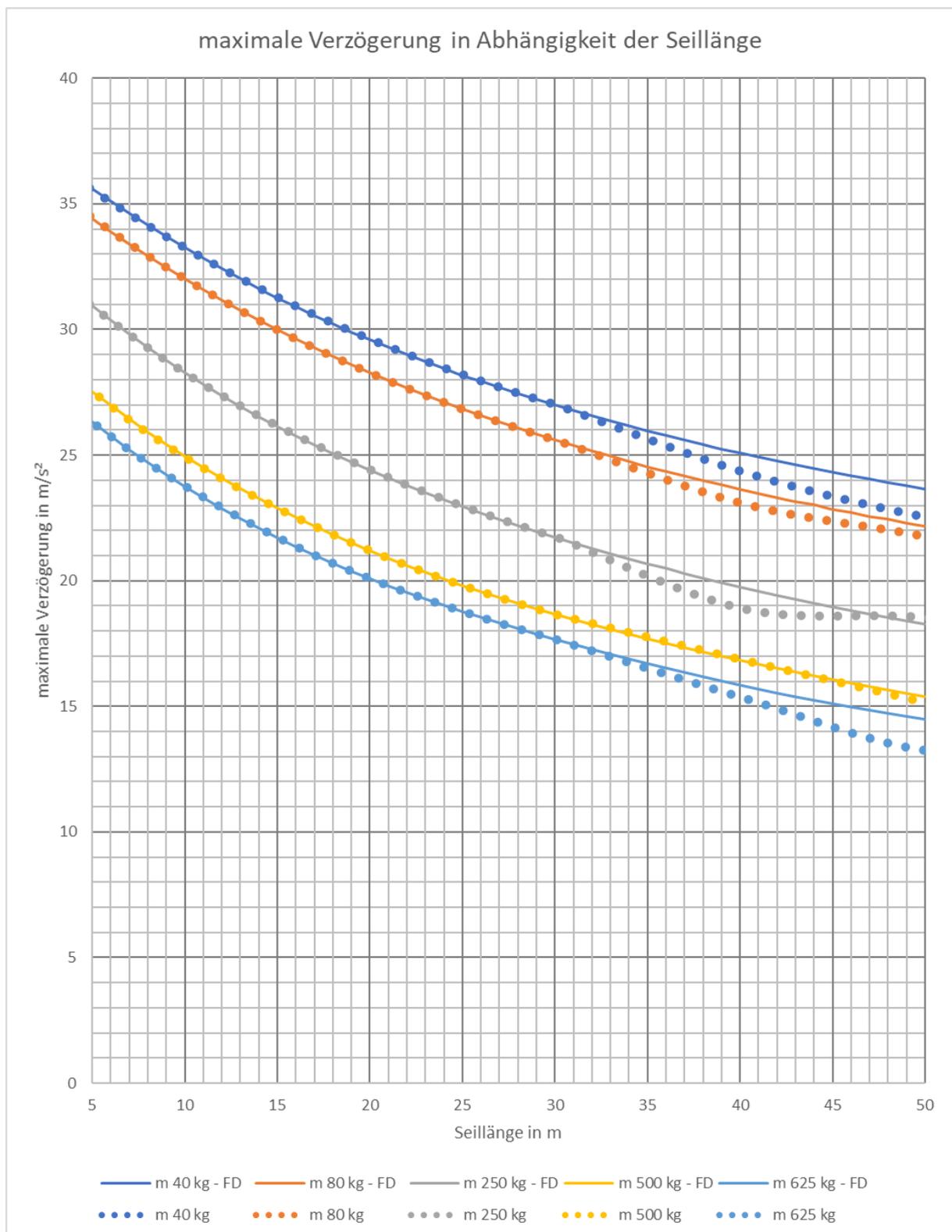


Abbildung 9.32: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

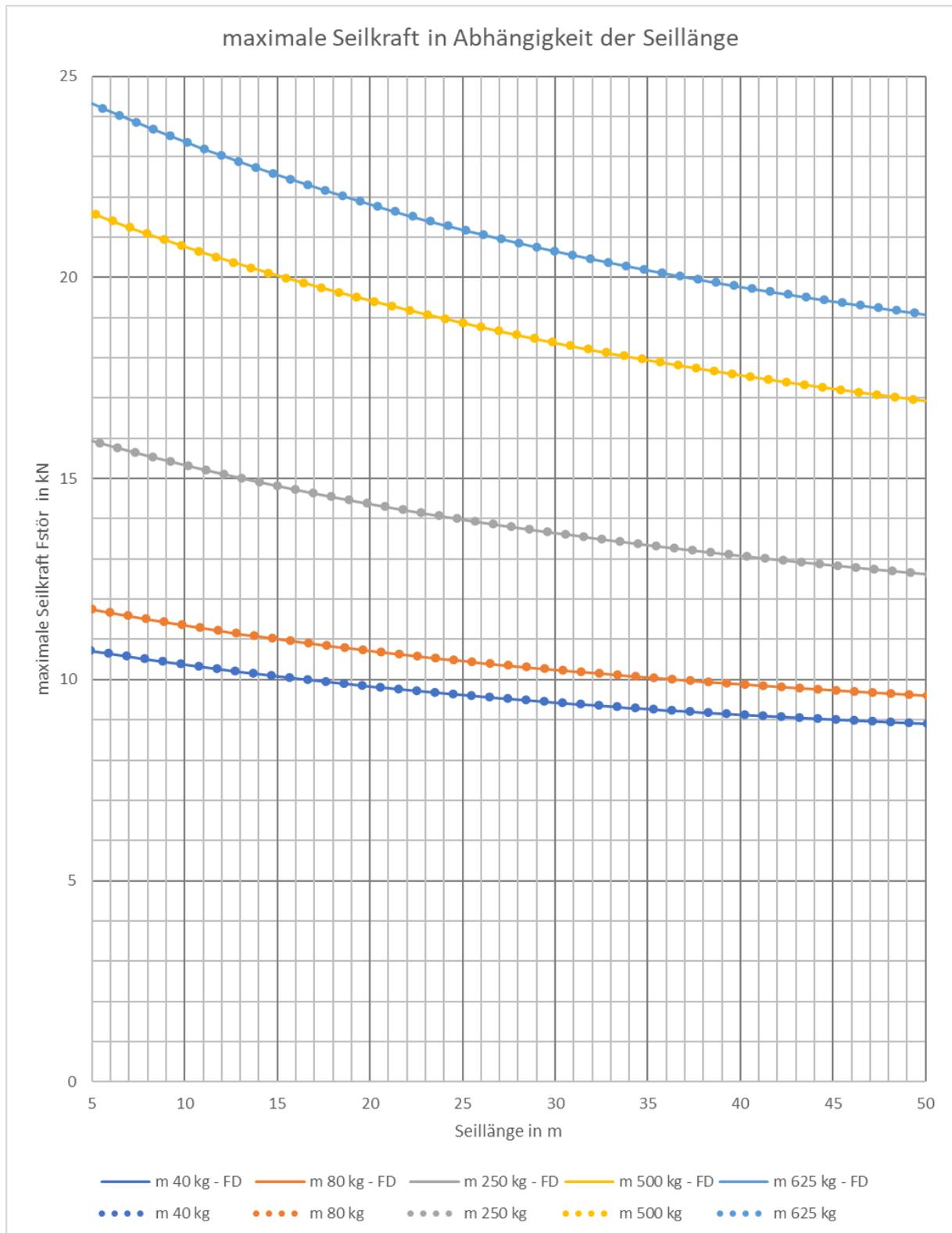


Abbildung 9.33: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

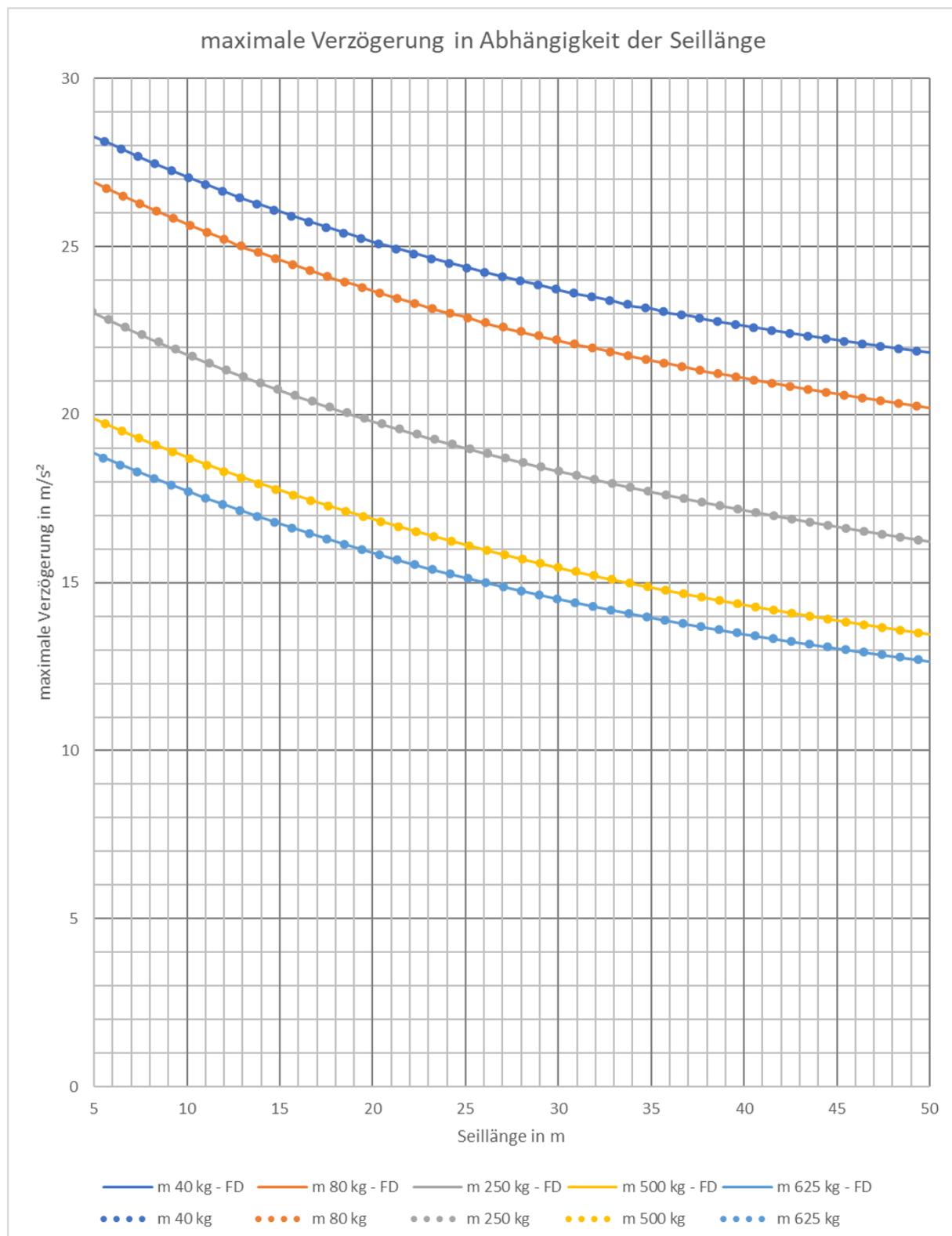


Abbildung 9.34: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

9.4.3.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

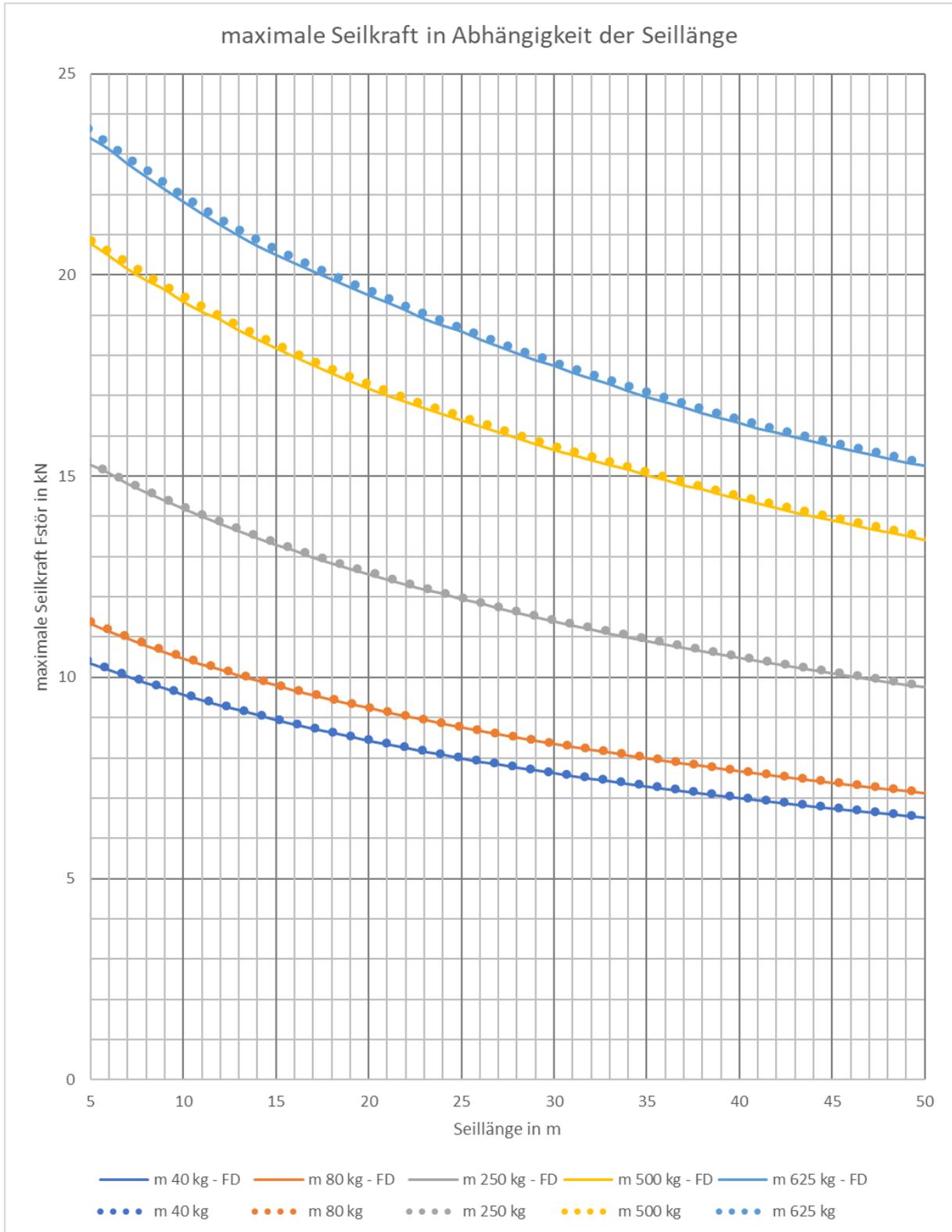


Abbildung 9.35: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

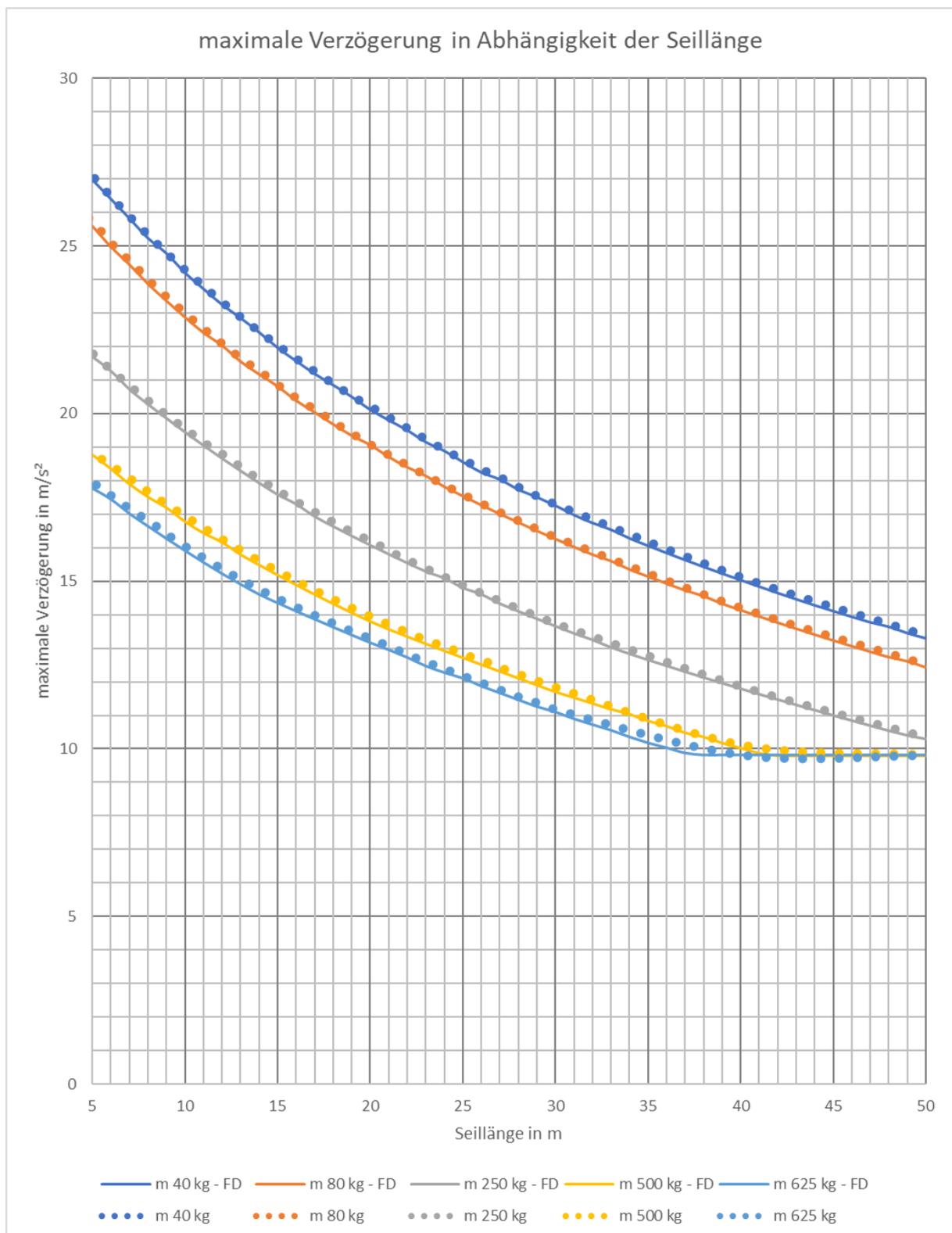


Abbildung 9.36: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

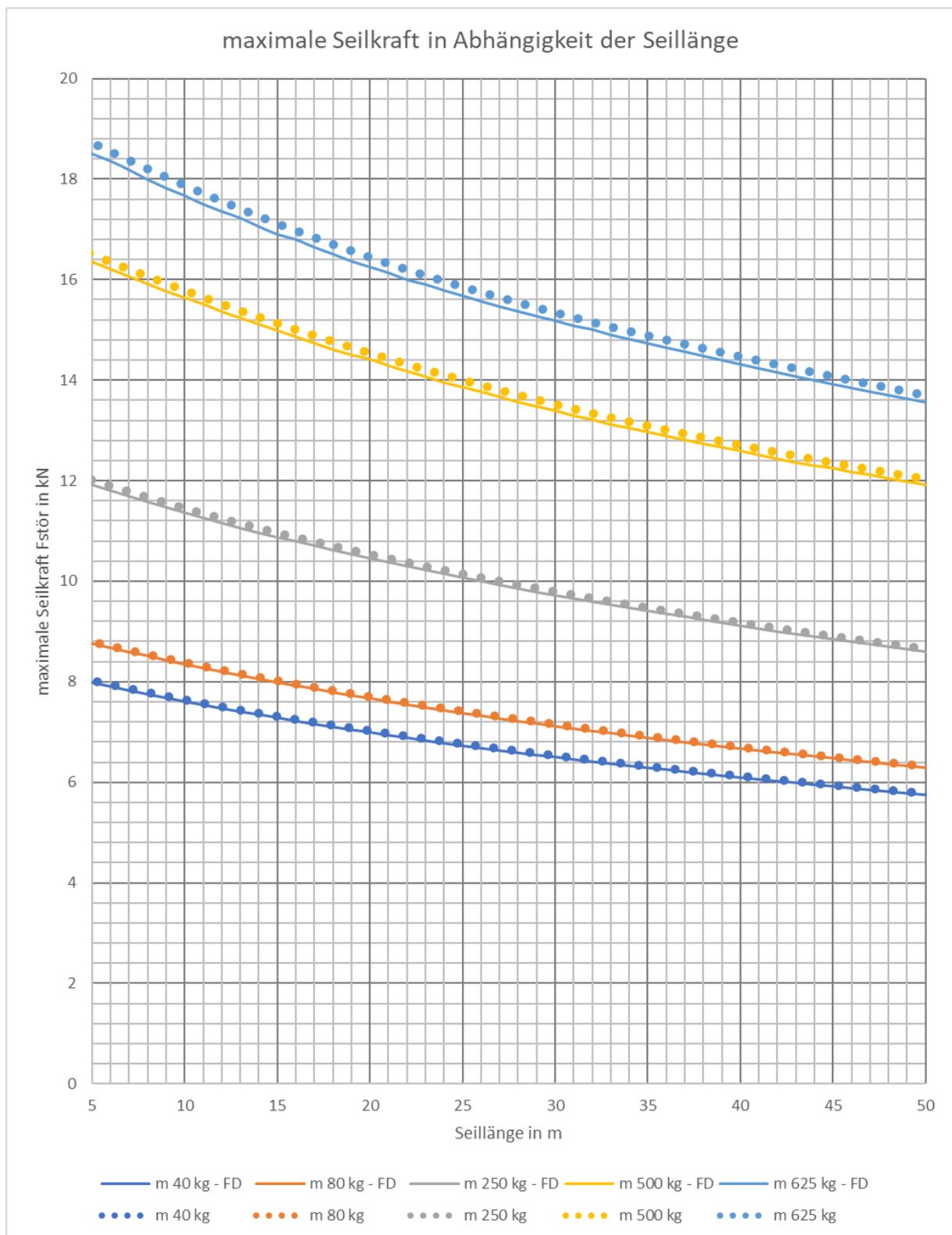


Abbildung 9.37: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

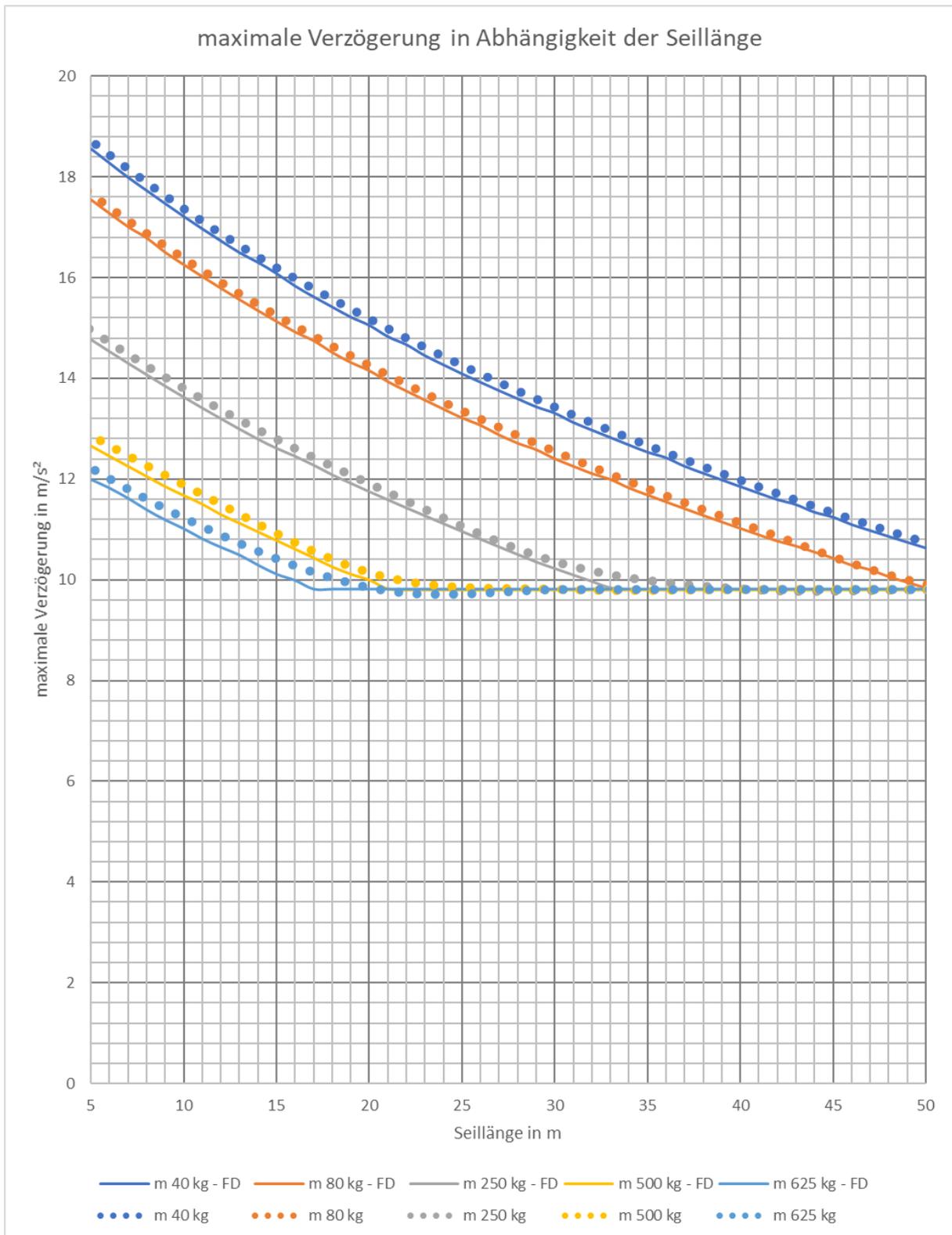


Abbildung 9.38: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 5kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

### 9.4.4 Prospektzug 10 kN

Die Simulation erfolgt mit dem 10kN Prospektzug (technische Details siehe Tabelle 4.4), das Anlagenschema ist in Abbildung 9.39 dargestellt.

Die Simulation wird für die Nennbedingungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1), wobei ein Feder-Dämpfer Element zwischen Seil und Last angebracht ist:

Nenngeschwindigkeit:  $1.5m/s$ , Nennbeschleunigung:  $1.0m/s^2$ , gleichzeitiges Einfallen beider Bremsen, Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ :  $c = 450kN/m$  &  $d = 3840kg/s$ ,  $FD_{20}$ :  $c = 225kN/m$  &  $d = 3840kg/s$

Die durchgezogenen Linien zeigen die simulierten Lasten mit Feder-Dämpfer Element im Seilzug. Gepunktet ist die Näherungslösung (siehe Formel 9.11) dargestellt.

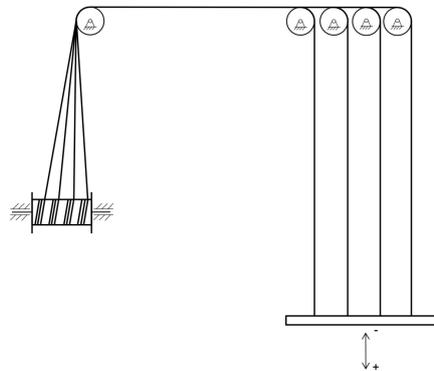


Abbildung 9.39: Prospektzug, Schema, Quelle: [4], s13

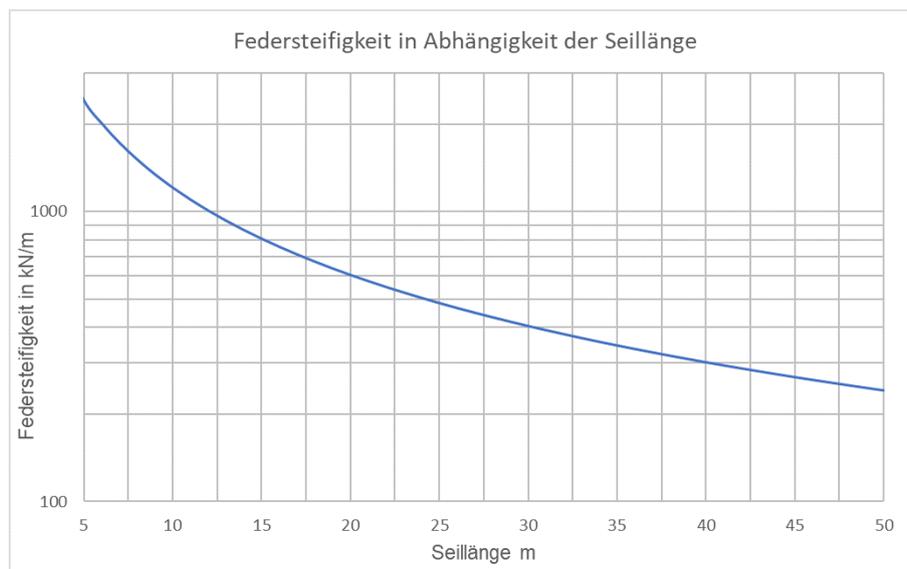


Abbildung 9.40: Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge, siehe Formel 3.1

9.4.4.1 Lastfall Not-Aus beim Senken

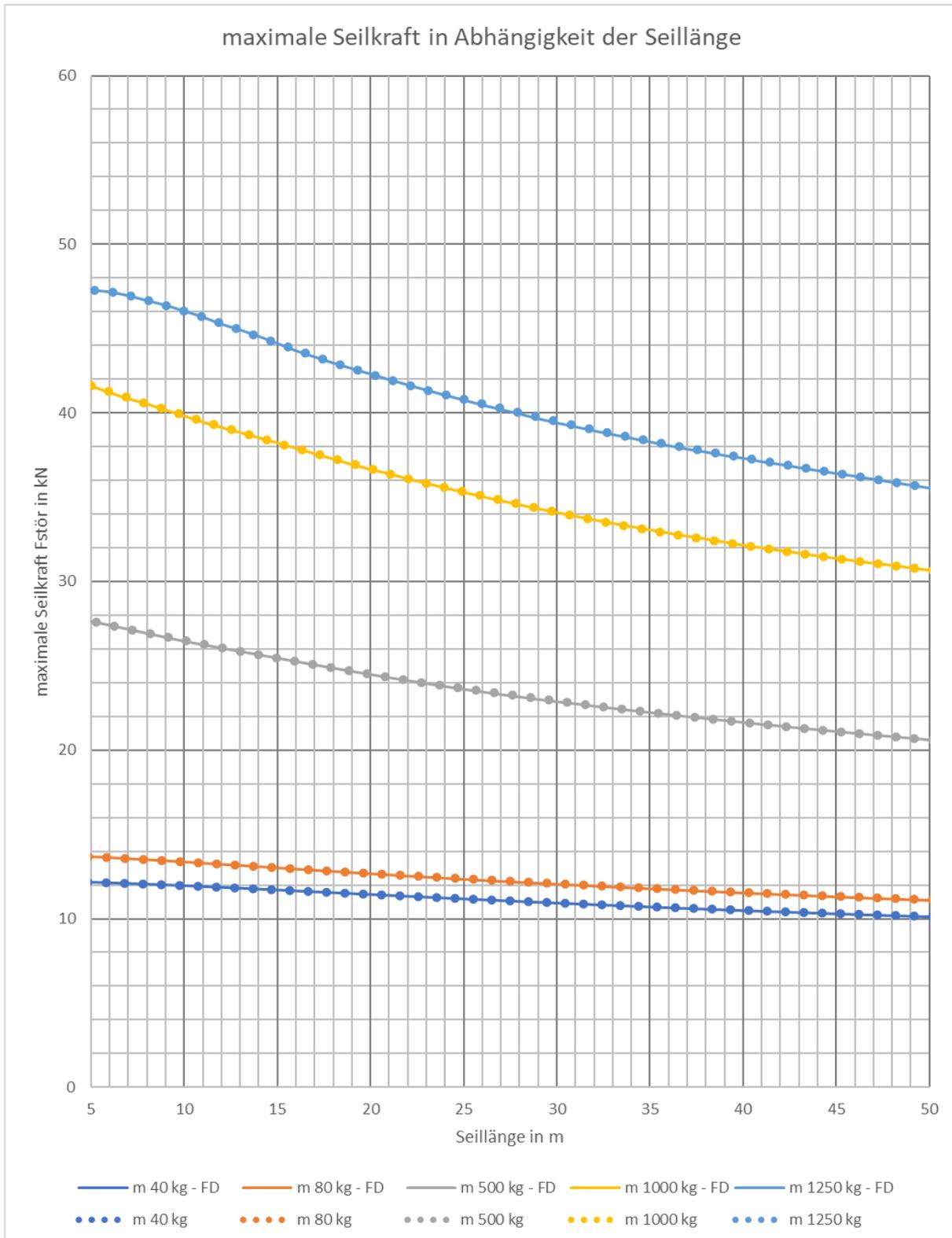


Abbildung 9.41: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

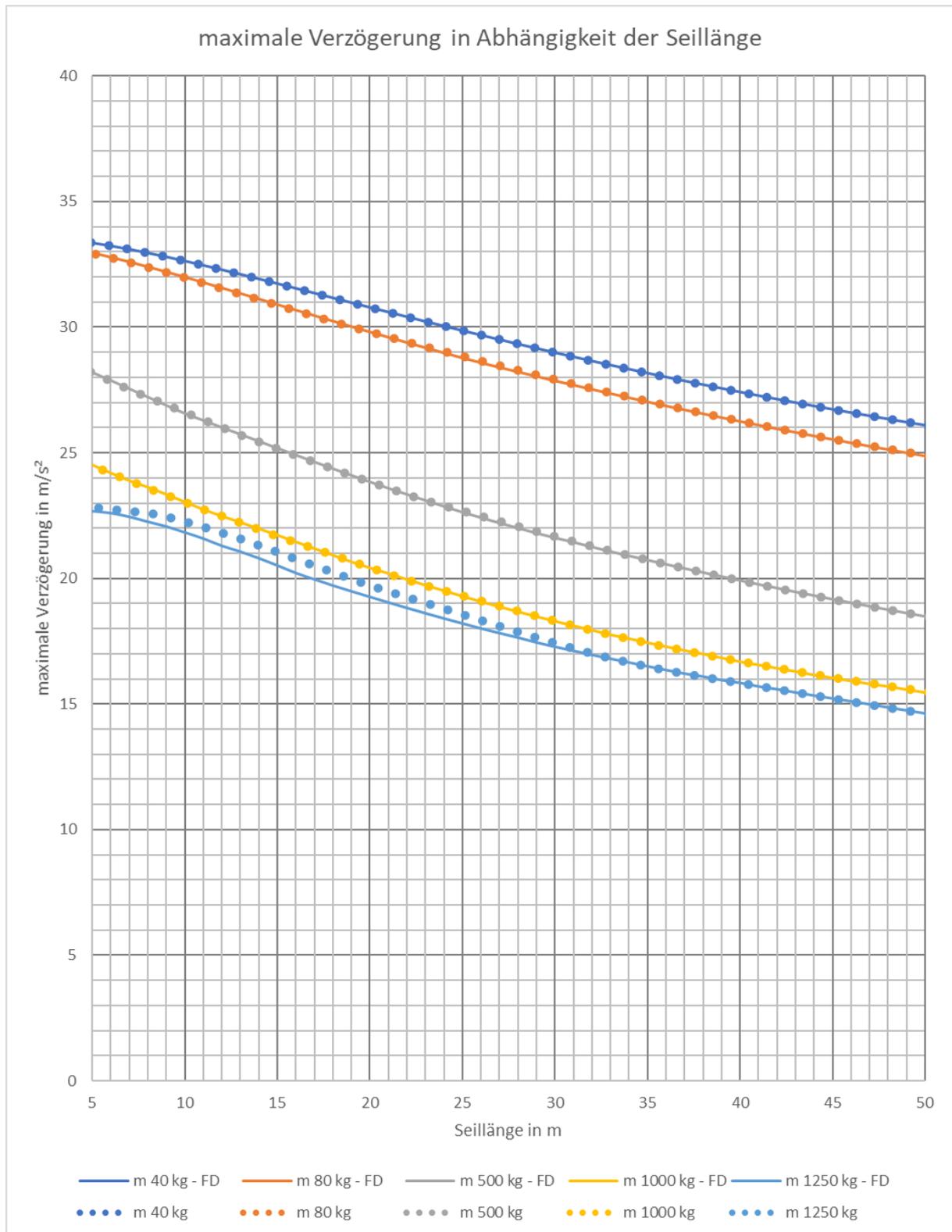


Abbildung 9.42: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

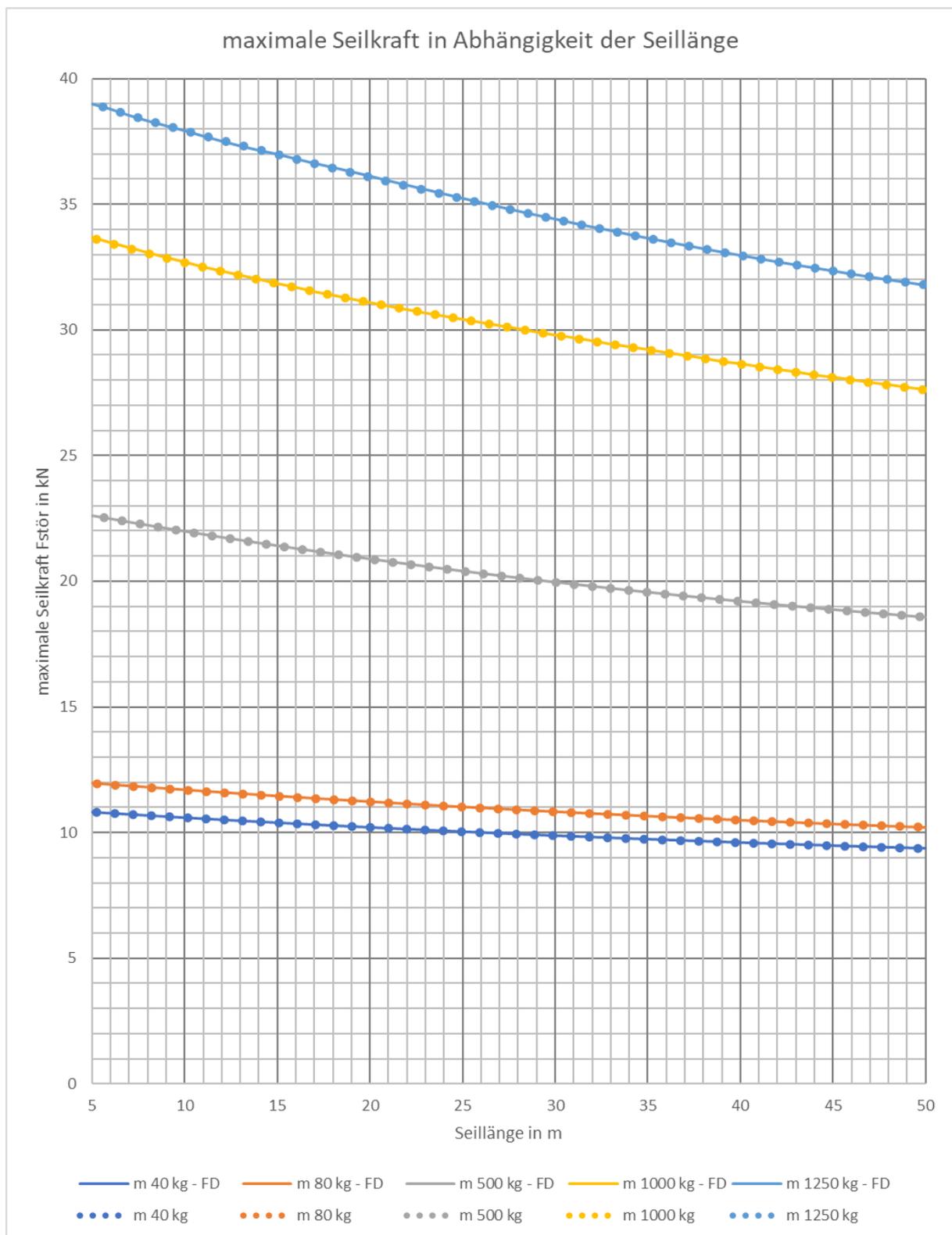


Abbildung 9.43: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

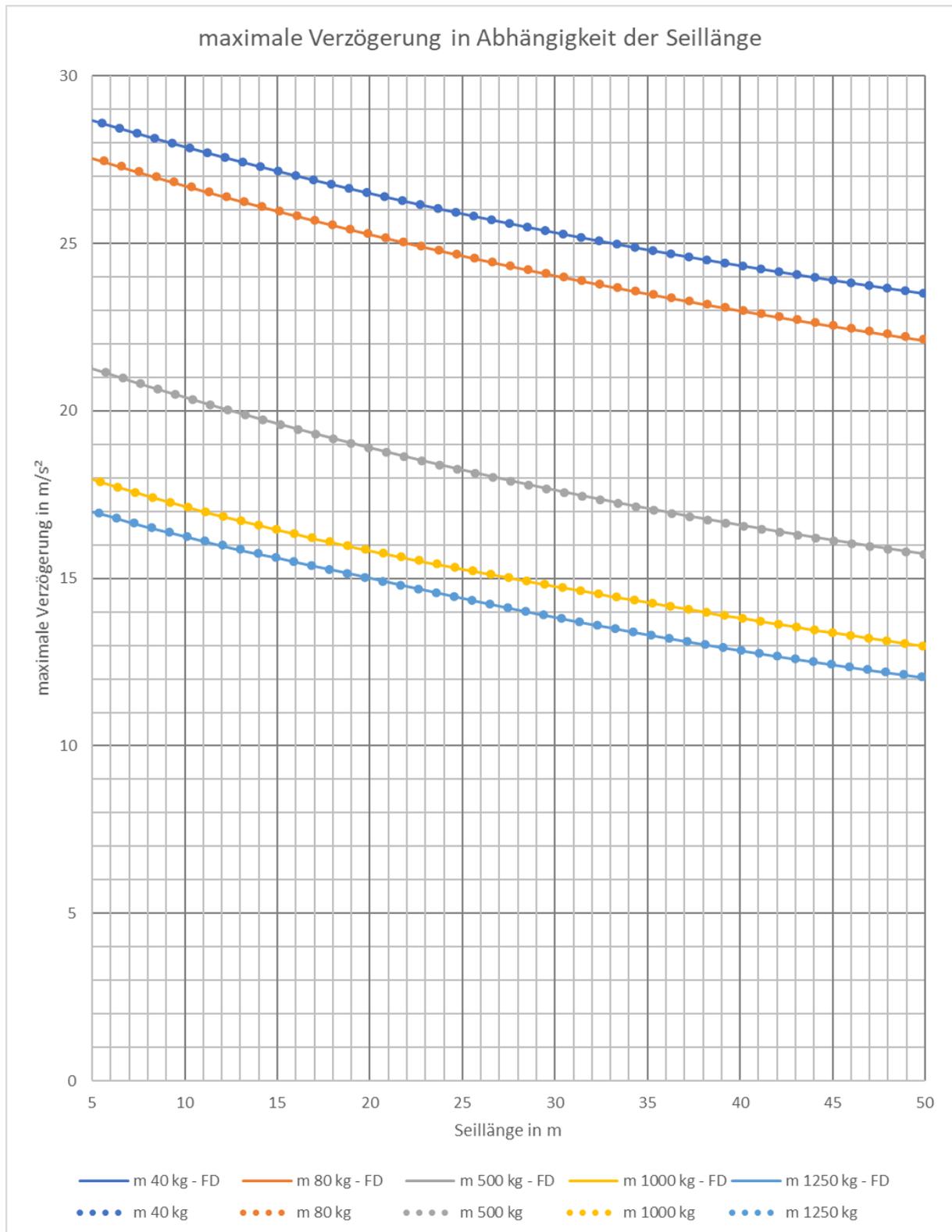


Abbildung 9.44: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Senken bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

9.4.4.2 Lastfall Not-Aus beim Heben

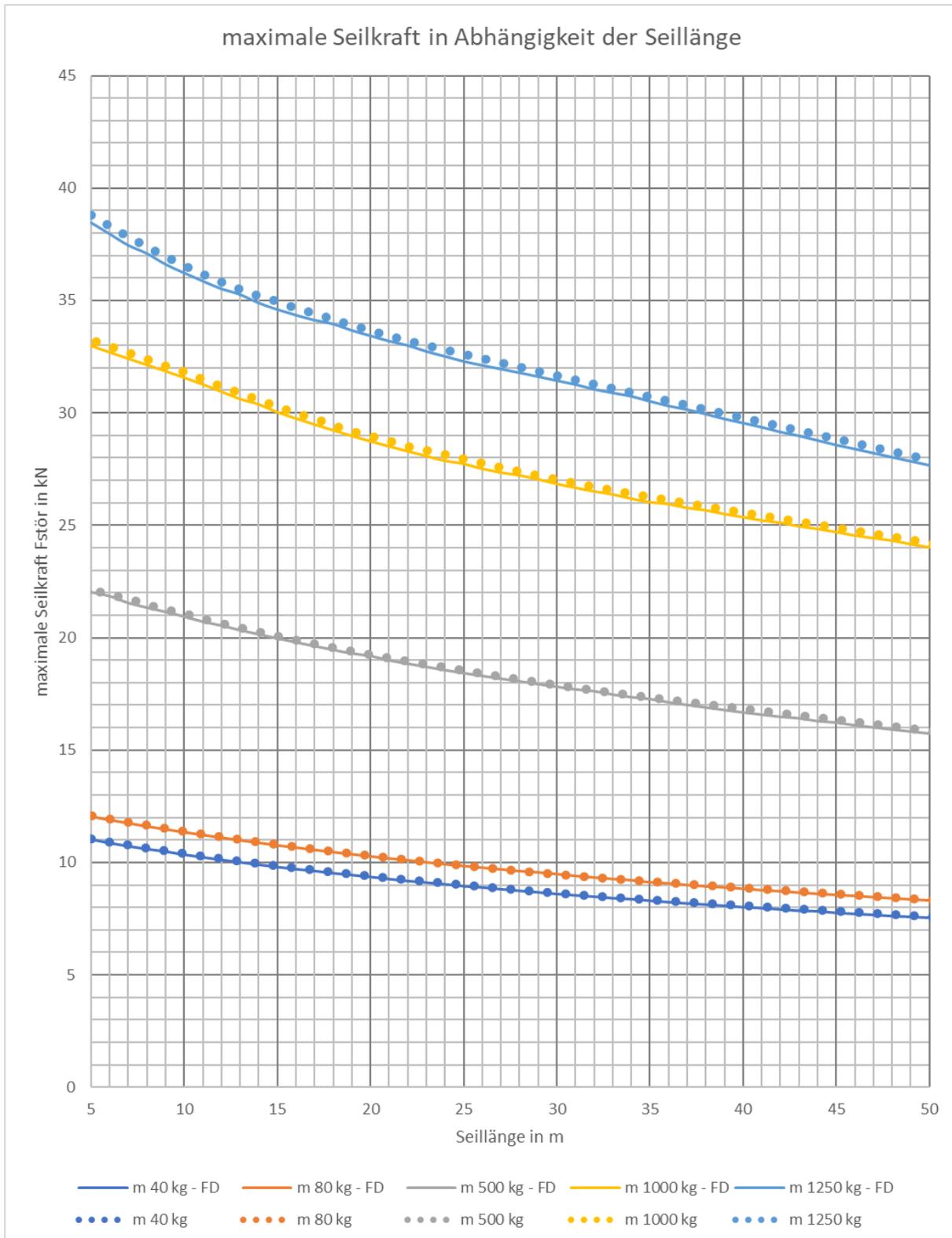


Abbildung 9.45: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

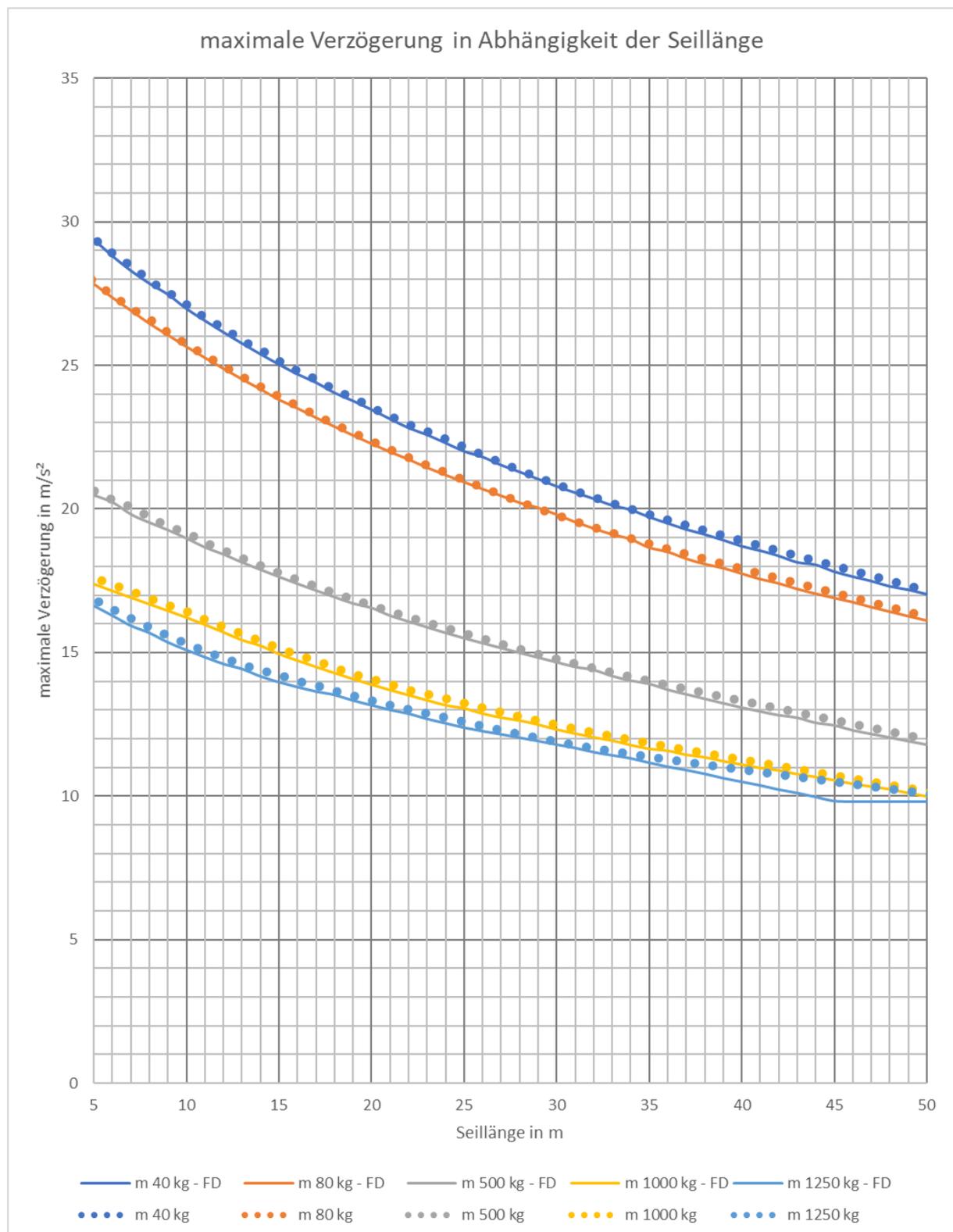


Abbildung 9.46: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

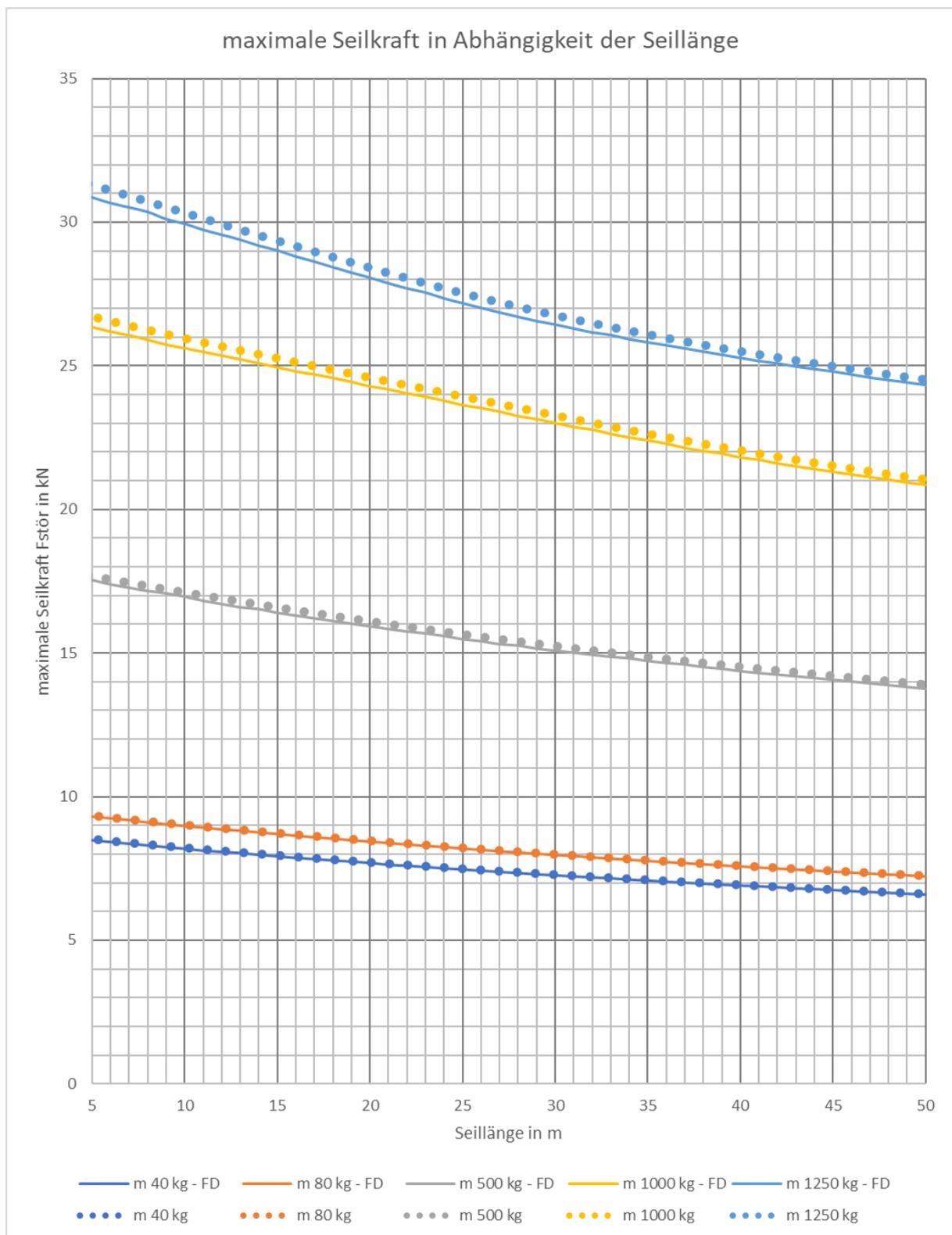


Abbildung 9.47: Maximale Seilkraft in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

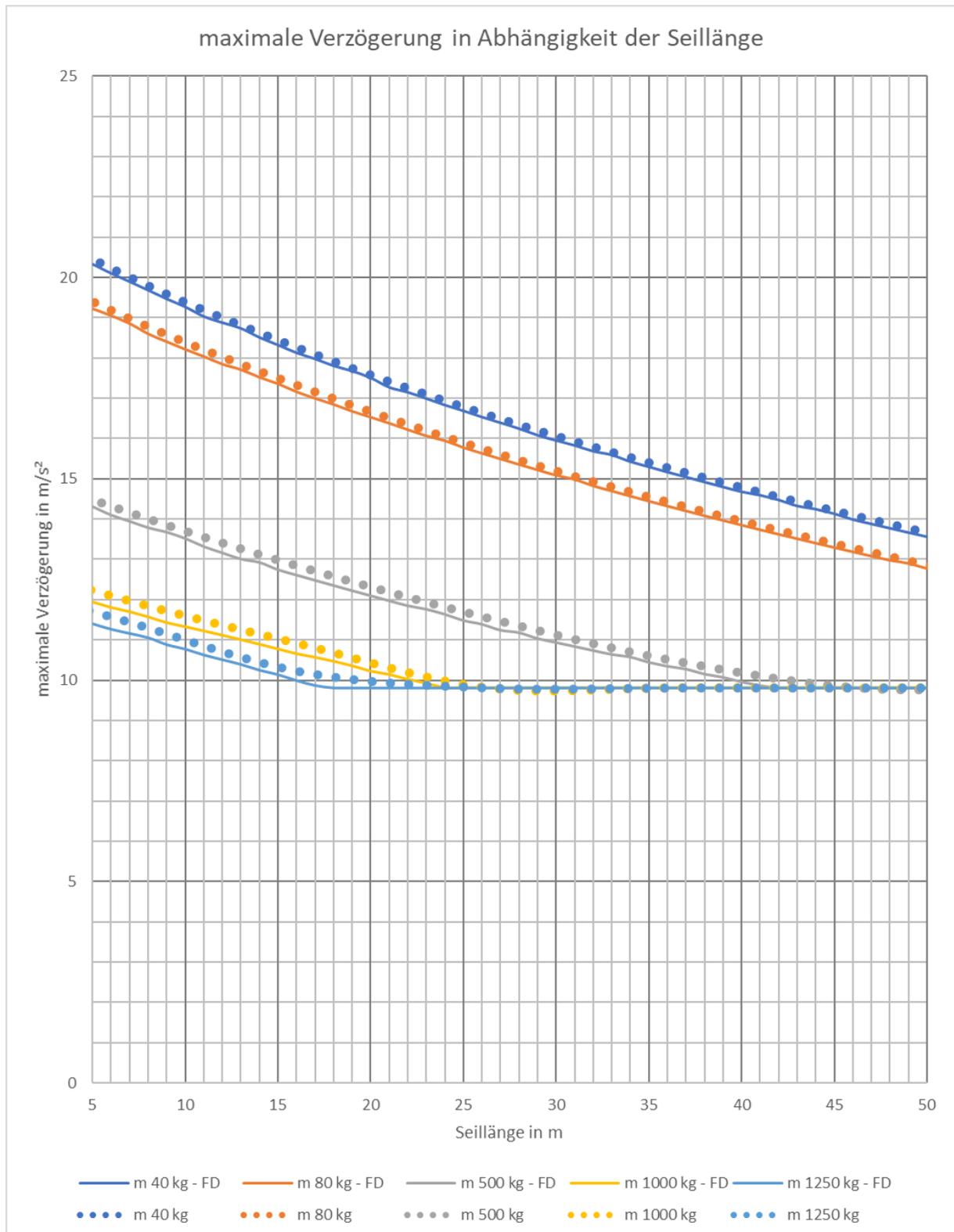


Abbildung 9.48: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit der Seillänge, Prospektzug 10kN, Heben bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

### 9.4.5 Ergebnisse und Interpretation

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
maximale Seilkraft										
Punktzug 2.5kN	2.99kN	4.41kN	5.80kN	<b>9.41kN</b>	10.61kN	2.61kN	4.54kN	6.42kN	<b>10.57kN</b>	12.05kN
vgl. zu vorher	-45.7%	-41.9%	-38.5%	<b>-32.8%</b>	-33.4%	0.0%	-1.3%	-2.6%	<b>-2.1%</b>	-3.1%
Punktzug 5kN	4.19kN	5.84kN	11.42kN	<b>18.34kN</b>	22.20kN	2.97kN	5.00kN	12.90kN	<b>22.01kN</b>	26.42kN
vgl. zu vorher	-42.6%	-40.1%	-32.3%	<b>-26.9%</b>	-23.5%	0.2%	0.2%	-3.7%	<b>-10.9%</b>	-10.0%
Prospektzug 5kN	11.33kN	12.40kN	16.67kN	<b>22.51kN</b>	25.52kN	13.33kN	14.83kN	20.72kN	<b>28.47kN</b>	32.02kN
vgl. zu vorher	-46.6%	-45.4%	-40.9%	<b>-36.1%</b>	-34.0%	-7.0%	-8.8%	-14.2%	<b>-17.3%</b>	-17.9%
Prospektzug 10kN	12.05kN	13.20kN	23.88kN	<b>35.51kN</b>	41.77kN	12.68kN	14.30kN	29.01kN	<b>43.63kN</b>	49.89kN
vgl. zu vorher	-52.7%	-51.8%	-42.1%	<b>-31.7%</b>	-28.4%	3.8%	3.0%	-1.8%	<b>0.2%</b>	1.0%
maximale Verzögerung										
Punktzug 2.5kN	50.2m/s <sup>2</sup>	39.4m/s <sup>2</sup>	33.4m/s <sup>2</sup>	<b>26.6m/s<sup>2</sup></b>	23.2m/s <sup>2</sup>	42.6m/s <sup>2</sup>	40.9m/s <sup>2</sup>	38.0m/s <sup>2</sup>	<b>31.1m/s<sup>2</sup></b>	27.7m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-50.1%	-47.4%	-44.8%	<b>-40.1%</b>	-41.6%	0.0%	-1.6%	-3.2%	<b>-2.7%</b>	-4.1%
Punktzug 5kN	60.5m/s <sup>2</sup>	48.9m/s <sup>2</sup>	32.7m/s <sup>2</sup>	<b>25.6m/s<sup>2</sup></b>	24.8m/s <sup>2</sup>	39.9m/s <sup>2</sup>	40.4m/s <sup>2</sup>	38.2m/s <sup>2</sup>	<b>32.7m/s<sup>2</sup></b>	31.4m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-46.3%	-44.6%	-38.3%	<b>-33.8%</b>	-30.0%	0.2%	0.3%	-4.6%	<b>-13.7%</b>	-12.8%
Prospektzug 5kN	30.5m/s <sup>2</sup>	28.9m/s <sup>2</sup>	24.6m/s <sup>2</sup>	<b>21.1m/s<sup>2</sup></b>	20.2m/s <sup>2</sup>	37.6m/s <sup>2</sup>	36.5m/s <sup>2</sup>	32.9m/s <sup>2</sup>	<b>29.3m/s<sup>2</sup></b>	27.9m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-53.6%	-52.7%	-49.2%	<b>-45.2%</b>	-43.3%	-8.7%	-10.9%	-17.7%	<b>-21.9%</b>	-22.7%
Prospektzug 10kN	33.0m/s <sup>2</sup>	31.4m/s <sup>2</sup>	23.0m/s <sup>2</sup>	<b>19.5m/s<sup>2</sup></b>	18.9m/s <sup>2</sup>	35.3m/s <sup>2</sup>	34.9m/s <sup>2</sup>	30.1m/s <sup>2</sup>	<b>26.2m/s<sup>2</sup></b>	24.5m/s <sup>2</sup>
vgl. zu vorher	-59.1%	-58.5%	-51.0%	<b>-41.1%</b>	-37.6%	4.9%	3.9%	-2.4%	<b>0.3%</b>	1.4%

Tabelle 9.3: Seilkräfte und Beschleunigungen bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

	Lastfall									
	Heben					Senken				
	Last					Last				
	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast
$\varphi_{stat}$										
Punktzug 2.5kN	1.17	1.73	2.28	<b>3.69</b>	4.16	1.02	1.78	2.52	<b>4.14</b>	4.73
vgl. zu vorher	-45.7%	-41.9%	-38.5%	<b>-32.8%</b>	-33.4%	0.0%	-1.3%	-2.6%	<b>-2.1%</b>	-3.1%
Punktzug 5kN	0.82	1.15	2.24	<b>3.60</b>	4.35	0.58	0.98	2.53	<b>4.31</b>	5.18
vgl. zu vorher	-42.6%	-40.1%	-32.3%	<b>-26.9%</b>	-23.5%	0.2%	0.2%	-3.7%	<b>-10.9%</b>	-10.0%
Prospektzug 5kN	1.48	1.62	2.19	<b>2.96</b>	3.36	1.81	2.02	2.82	<b>3.87</b>	4.35
vgl. zu vorher	-48.7%	-47.5%	-42.9%	<b>-38.1%</b>	-36.0%	-7.0%	-8.8%	-14.2%	<b>-17.3%</b>	-17.9%
Prospektzug 10kN	0.98	1.08	1.95	<b>2.90</b>	3.41	1.03	1.17	2.37	<b>3.56</b>	4.07
vgl. zu vorher	-52.7%	-51.8%	-42.1%	<b>-31.7%</b>	-28.4%	3.8%	3.0%	-1.8%	<b>0.2%</b>	1.0%
$\varphi_{dyn}$										
Punktzug 2.5kN	0.90	1.32	1.74	<b>2.82</b>	3.19	0.78	1.36	1.93	<b>3.17</b>	3.62
vgl. zu vorher	-45.7%	-41.9%	-38.5%	<b>-32.8%</b>	-33.4%	0.0%	-1.3%	-2.6%	<b>-2.1%</b>	-3.1%
Punktzug 5kN	0.63	0.88	1.71	<b>2.75</b>	3.33	0.45	0.75	1.94	<b>3.30</b>	3.97
vgl. zu vorher	-42.6%	-40.1%	-32.3%	<b>-26.9%</b>	-23.5%	0.2%	0.2%	-3.7%	<b>-10.9%</b>	-10.0%
Prospektzug 5kN	1.28	1.41	1.90	<b>2.57</b>	2.91	1.57	1.75	2.44	<b>3.36</b>	3.77
vgl. zu vorher	-48.7%	-47.5%	-42.9%	<b>-38.1%</b>	-36.0%	-7.0%	-8.8%	-14.2%	<b>-17.3%</b>	-17.9%
Prospektzug 10kN	0.89	0.98	1.77	<b>2.63</b>	3.09	0.94	1.06	2.15	<b>3.23</b>	3.69
vgl. zu vorher	-52.7%	-51.8%	-42.1%	<b>-31.7%</b>	-28.4%	3.8%	3.0%	-1.8%	<b>0.2%</b>	1.0%

Tabelle 9.4: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$

Lastfall											
Heben						Senken					
Last						Last					
40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg
maximale Seilkraft											
Punktzug 2.5kN	2.33kN	3.50kN	4.68kN	<b>7.78kN</b>	8.72kN	2.48kN	4.02kN	5.50kN	<b>9.06kN</b>	10.77kN	
vgl. zu vorher	-57.7%	-53.9%	-50.5%	<b>-44.5%</b>	-45.3%	-4.8%	-12.7%	-16.6%	<b>-16.1%</b>	-13.4%	
Punktzug 5kN	3.32kN	4.71kN	9.63kN	<b>15.57kN</b>	18.32kN	2.97kN	4.83kN	10.98kN	<b>18.70kN</b>	21.16kN	
vgl. zu vorher	-54.6%	-51.7%	-43.0%	<b>-38.0%</b>	-36.9%	0.2%	-3.1%	-18.0%	<b>-24.3%</b>	-28.0%	
Prospektzug 5kN	7.98kN	8.76kN	11.92kN	<b>16.35kN</b>	18.51kN	10.71kN	11.75kN	15.93kN	<b>21.60kN</b>	24.33kN	
vgl. zu vorher	-62.4%	-61.5%	-57.7%	<b>-53.6%</b>	-52.1%	-25.3%	-27.7%	-34.1%	<b>-37.3%</b>	-37.6%	
Prospektzug 10kN	8.48kN	9.30kN	17.55kN	<b>26.37kN</b>	30.88kN	10.83kN	11.96kN	22.61kN	<b>33.68kN</b>	38.98kN	
vgl. zu vorher	-66.7%	-66.0%	-57.5%	<b>-49.3%</b>	-47.1%	-11.4%	-13.9%	-23.4%	<b>-22.7%</b>	-21.1%	
maximale Verzögerung											
Punktzug 2.5kN	37.0m/s <sup>2</sup>	29.2m/s <sup>2</sup>	25.0m/s <sup>2</sup>	<b>20.3m/s<sup>2</sup></b>	17.3m/s <sup>2</sup>	40.1m/s <sup>2</sup>	35.0m/s <sup>2</sup>	31.1m/s <sup>2</sup>	<b>25.2m/s<sup>2</sup></b>	23.7m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-63.3%	-61.0%	-58.6%	<b>-54.3%</b>	-56.4%	-5.9%	-15.7%	-20.7%	<b>-21.0%</b>	-18.0%	
Punktzug 5kN	45.9m/s <sup>2</sup>	37.5m/s <sup>2</sup>	26.0m/s <sup>2</sup>	<b>20.3m/s<sup>2</sup></b>	18.7m/s <sup>2</sup>	39.9m/s <sup>2</sup>	38.8m/s <sup>2</sup>	31.1m/s <sup>2</sup>	<b>26.3m/s<sup>2</sup></b>	23.2m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-59.3%	-57.5%	-50.9%	<b>-47.6%</b>	-47.1%	0.2%	-3.8%	-22.5%	<b>-30.5%</b>	-35.6%	
Prospektzug 5kN	18.6m/s <sup>2</sup>	17.5m/s <sup>2</sup>	14.8m/s <sup>2</sup>	<b>12.7m/s<sup>2</sup></b>	12.0m/s <sup>2</sup>	28.3m/s <sup>2</sup>	26.9m/s <sup>2</sup>	23.0m/s <sup>2</sup>	<b>19.9m/s<sup>2</sup></b>	18.8m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-71.7%	-71.3%	-69.5%	<b>-67.2%</b>	-66.4%	-31.3%	-34.3%	-42.4%	<b>-47.0%</b>	-47.8%	
Prospektzug 10kN	20.3m/s <sup>2</sup>	19.2m/s <sup>2</sup>	14.3m/s <sup>2</sup>	<b>11.9m/s<sup>2</sup></b>	11.4m/s <sup>2</sup>	28.7m/s <sup>2</sup>	27.5m/s <sup>2</sup>	21.3m/s <sup>2</sup>	<b>18.0m/s<sup>2</sup></b>	17.0m/s <sup>2</sup>	
vgl. zu vorher	-74.8%	-74.6%	-69.5%	<b>-63.9%</b>	-62.3%	-14.7%	-18.0%	-30.9%	<b>-31.2%</b>	-29.6%	

Tabelle 9.5: Seilkräfte und Beschleunigungen bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

Lastfall											
Heben						Senken					
Last						Last					
40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg	50% Nennlast	100% Nennlast	125% Nennlast	40 kg	80 kg
$\varphi_{stat}$											
Punktzug 2.5kN	0.91	1.37	1.83	<b>3.05</b>	3.42	0.97	1.57	2.16	<b>3.55</b>	4.22	
vgl. zu vorher	-57.7%	-53.9%	-50.5%	<b>-44.5%</b>	-45.3%	-4.8%	-12.7%	-16.6%	<b>-16.1%</b>	-13.4%	
Punktzug 5kN	0.65	0.92	1.89	<b>3.05</b>	3.59	0.58	0.95	2.15	<b>3.67</b>	4.15	
vgl. zu vorher	-54.6%	-51.7%	-43.0%	<b>-38.0%</b>	-36.9%	0.2%	-3.1%	-18.0%	<b>-24.3%</b>	-28.0%	
Prospektzug 5kN	1.08	1.19	1.62	<b>2.22</b>	2.52	1.46	1.60	2.16	<b>2.94</b>	3.31	
vgl. zu vorher	-62.4%	-61.5%	-57.7%	<b>-53.6%</b>	-52.1%	-25.3%	-27.7%	-34.1%	<b>-37.3%</b>	-37.6%	
Prospektzug 10kN	0.69	0.76	1.43	<b>2.15</b>	2.52	0.88	0.98	1.84	<b>2.75</b>	3.18	
vgl. zu vorher	-66.7%	-66.0%	-57.5%	<b>-49.3%</b>	-47.1%	-11.4%	-13.9%	-23.4%	<b>-22.7%</b>	-21.1%	
$\varphi_{dyn}$											
Punktzug 2.5kN	0.70	1.05	1.41	<b>2.34</b>	2.62	0.75	1.21	1.65	<b>2.72</b>	3.23	
vgl. zu vorher	-57.7%	-53.9%	-50.4%	<b>-44.5%</b>	-45.3%	-4.8%	-12.7%	-16.5%	<b>-16.1%</b>	-13.4%	
Punktzug 5kN	0.50	0.71	1.45	<b>2.34</b>	2.75	0.45	0.73	1.65	<b>2.81</b>	3.18	
vgl. zu vorher	-54.5%	-51.7%	-42.9%	<b>-38.0%</b>	-36.9%	0.2%	-3.1%	-18.0%	<b>-24.3%</b>	-27.9%	
Prospektzug 5kN	0.94	1.03	1.41	<b>1.93</b>	2.18	1.26	1.39	1.88	<b>2.55</b>	2.87	
vgl. zu vorher	-62.4%	-61.5%	-57.7%	<b>-53.5%</b>	-52.1%	-25.3%	-27.7%	-34.0%	<b>-37.3%</b>	-37.6%	
Prospektzug 10kN	0.63	0.69	1.30	<b>1.95</b>	2.29	0.80	0.89	1.67	<b>2.49</b>	2.89	
vgl. zu vorher	-66.7%	-66.0%	-57.5%	<b>-49.3%</b>	-47.1%	-11.4%	-13.9%	-23.4%	<b>-22.6%</b>	-21.1%	

Tabelle 9.6: Berechnungsbeiwerte  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  bei Nennbedingungen mit Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$

Für das Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$  (maximale Dehnung des Feder-Dämpfer Elements kleiner als 10cm) zeigen die Tabellen 9.3 und 9.4 die maximalen Seilkräfte und Beschleunigungen, sowie  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  im Vergleich jenen Werten ohne Feder-Dämpfer Element. Wie man in Tabelle 9.3 sehen kann, nehmen die Seilkräfte im Dimensionierungsfall um bis zu 36% ab, beim Heben tendenziell stärker als beim Senken.

Für das Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$  (maximale Dehnung des Feder-Dämpfer Elements kleiner als 20cm) zeigen die Tabellen 9.5 und 9.6 zeigen die maximalen Seilkräfte und

Beschleunigungen, sowie  $\varphi_{stat}$  und  $\varphi_{dyn}$  im Vergleich jenen Werten ohne Feder-Dämpfer Element. Im Vergleich zum Feder-Dämpfer Element  $FD_{10}$ , sind die Belastungswerte beim Feder-Dämpfer Element  $FD_{20}$  deutlich geringer.

Beim Lastfall Heben treten die höchsten Belastungen bei kurzen Seillängen auf, durch die seilverlängernde Wirkung des Feder-Dämpfer Elements fallen diese Bereiche also aus dem Simulations-/Arbeitsbereich (treten bei Seillängen unter 5m auf). Da beim Lastfall Senken die Belastungsmaxima jedoch bei mittleren Seillängen auftreten, ist dies nicht zwingend der Fall.

Dies erklärt wieso die Belastungen beim Heben mehr abnehmen als beim Senken.

Beim Vergleich der simulierten Seilkräfte und Beschleunigungen mit Feder-Dämpfer Element zu den Näherungslösungen, lässt sich erkennen, dass die Werte für die betrachteten Hubzüge sehr gut übereinstimmen. Die Dämpfungsrate hat einen großen Einfluss darauf, wie schnell die Schwingung der Last abklingt. Da die größten Belastungen kurz nach dem Einfallen der Bremsen wirken, hat die Dämpfungsrate jedoch nur einen sehr geringen Einfluss auf die Maximalbelastungen. Die Annahme, dass die Dämpfungsrate des Feder-Dämpfer Elements also einen vernachlässigbaren Einfluss hat, ist korrekt.

Die Wirkung eines Feder-Dämpfer Elements kann also durch Berechnung der äquivalenten Seilverlängerung (mit Formel 9.11) gut abgeschätzt werden.

In Kombination mit Näherungsformeln für die Seilkräfte, kann so die Wirkung eines Feder-Dämpfer Elements abgeschätzt werden, ohne dass eine aufwändige Simulation durchgeführt werden muss.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 10 Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden für verschiedene Hubzüge Parameterstudien durchgeführt, die zeigen wie sich im Falle eines "Not-Aus der Stoppkategorie 0" die Parameter "freie Seillänge", "Verfahrgeschwindigkeit" und "Nutzlast" auf die Seilkräfte und Beschleunigungen auswirken.

Für die dabei auftretenden Seilkräfte konnten Näherungslösungen gefunden werden. Diese ermöglichen es abzuschätzen, wann der Lastfall Heben kritischer ist als der Lastfall Senken, bzw. wann beim Störfall höhere Lasten auftreten als im Dimensionierungsfall (doppelte Nennlast des Betriebsfalls).

Da beim Lastfall Heben sehr hohe Seilkräfte auftreten, wenn es zur Schlaffseilbildung kommt, wurde mittels Parameterstudien untersucht wann es zur Schlaffseilbildung kommt. Eine exakte Näherung für das Eintreten der Schlaffseilbildung konnte nicht gefunden werden, allerdings konnte eine grobe Abschätzung für die kritische Geschwindigkeit, ab der es zu Schlaffseilbildung kommt, getroffen werden.

Es wurden Anlagen, die auf niedrigere Nenngeschwindigkeit ausgelegt sind, simuliert, um herauszufinden ob der Lastfall Heben auch bei diesen Anlagen kritischer ist als der Lastfall Senken. Außerdem wurde geprüft ob auch bei diesen Anlagen im Störfall höhere Seilkräfte auftreten als im Dimensionierungsfall (doppelte Nennlast des Betriebsfalls). Das Ergebnis dieser Analyse war, dass bei Auslegung auf eine reduzierte Nenngeschwindigkeit von 1.2 m/s, für den Dimensionierungsfall, Heben und Senken ungefähr gleich kritisch sind und die Seilkräfte im Störfall immer noch höher sind als die doppelte Nennlast des Betriebsfalls.

Des Weiteren wurden Maßnahmen zur Reduktion der Seilkräfte und Beschleunigungen untersucht. Dafür wurden zuerst die Auswirkungen eines verzögerten Einfallens der 2. Bremse untersucht und betrachtet ob die Verzögerung so weit erhöht werden kann, dass die 2. Bremse im Stillstand einfällt. Da dies nicht, unter Einhaltung eines angemessenen

Bremswegs, möglich ist, konnte nur die Wirkung einer Verzögerung von 100ms untersucht werden.

Des Weiteren wurde das Simulationsprogramm um ein Feder-Dämpfer Element im Seilzug erweitert und dessen Einfluss analysiert.

Für die Wirkung des Feder-Dämpfer Elements konnte eine gute Näherung gefunden werden. In Kombination mit den Näherungslösungen für die Seilkräfte ist somit eine Abschätzung der Wirkung des Feder-Dämpfer Elements, ohne Verwendung des Simulationsprogramms möglich.

Obwohl bei Prospektzügen die Last an mehreren Seilen hängt und sie deshalb höhere Federkennzahlen für die elastische Kopplung mit dem Windwerk als Punktzüge besitzen, verhalten sich beide recht ähnlich. Die Maßnahmen zur Reduktion der Seilkräfte und Beschleunigungen haben bei beiden Typen, relativ zu den ursprünglichen Werten, die selbe Auswirkung.

Im Rahmen der Arbeit wurden vier unterschiedliche Hubzüge untersucht, deshalb könnte es auch interessant sein weitere Hubzüge zu analysieren um zu sehen, wie diese sich verhalten und um feststellen zu können, wie die betrachteten Maßnahmen auf diese wirken.

Um die Wirkung der einzelnen Maßnahmen zur Reduktion der Belastung analysieren zu können, wurden diese immer einzeln betrachtet. In der Praxis würde es aber Sinn machen mehrere dieser Maßnahmen miteinander zu koppeln.

Es wäre also interessant herauszufinden ob/wie die einzelnen Maßnahmen sich beeinflussen und ob durch Kombination der Maßnahmen die Belastungen beim Störfall so weit gesenkt werden können, dass in diesem die Belastungswerte nicht mehr höher sind als jene des doppelten Betriebsfalls.

# Literaturverzeichnis

- [1] *ÖNORM M9630: Maschinelle bühnentechnische Einrichtungen - Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln*, 01.2010
- [2] Bruno Grösel, *Bühnentechnik: Mechanische Einrichtungen*, De Gruyter Oldenbourg, 5. Auflage, 16.06.2015
- [3] Christof Partl, *Untersuchung der Lasten an Seilwinden der Bühnentechnik bei Not-Halt der Stoppkategorie 0*, Diplomarbeit, TU Wien, 2015
- [4] Thomas Mitterlehner, *Hubwerke in der Bühnentechnik Spezielle Untersuchungen an „Not-Aus der Stoppkategorie 0“*, Diplomarbeit, TU Wien, 2018
- [5] Chr. Mayr GmbH + Co. KG, *ROBA-stop®-silenzio® Bremen: Produktkatalog*, 2019
- [6] Dennis F. Shanahan, M.D., M.P.H. *Human Tolerance and Crash Survivability Injury Analysis*, LLC 2839 Via Conquistador Carlsbad, CA 92009-3020 USA 2004



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Seilaufhängung . . . . .	6
3.2	Hubzug: Schematische Antriebseinheit . . . . .	7
4.1	Punktzug, Anlagenschema . . . . .	10
4.2	Prospektzug, Anlagenschema . . . . .	10
4.3	Dynamisches Modell, Freigemacht . . . . .	15
4.4	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, senken . . . . .	16
4.5	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben . . . . .	16
5.1	Punktzug, Schema . . . . .	20
5.2	Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	20
5.3	Punktzug 2.5kN, Senken NB, F-max . . . . .	21
5.4	Punktzug 2.5kN, Senken NB, a-max . . . . .	22
5.5	Punktzug 2.5kN, Senken NB, $\varphi_{stat}$ , $\varphi_{dyn}$ . . . . .	23
5.6	Punktzug 2.5kN, Heben NB, F-max . . . . .	24
5.7	Punktzug 2.5kN, Heben NB, a-max . . . . .	25
5.8	Punktzug 2.5kN, Heben NB, $\varphi_{stat}$ , $\varphi_{dyn}$ . . . . .	26
5.9	Punktzug, Schema . . . . .	27
5.10	Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	27
5.11	Punktzug 5kN, Senken NB, F-max . . . . .	28
5.12	Punktzug 5kN, Senken NB, a-max . . . . .	29
5.13	Punktzug 5kN, Senken NB, $\varphi_{stat}$ , $\varphi_{dyn}$ . . . . .	30
5.14	Punktzug 5kN, Heben NB, F-max . . . . .	31
5.15	Punktzug 5kN, Heben NB, a-max . . . . .	32
5.16	Punktzug 5kN, Heben NB, $\varphi_{stat}$ , $\varphi_{dyn}$ . . . . .	33
5.17	Prospektzug, Schema . . . . .	34
5.18	Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	34
5.19	Prospektzug 5kN, Senken NB, F-max . . . . .	35
5.20	Prospektzug 5kN, Senken NB, a-max . . . . .	36
5.21	Prospektzug 5kN, Senken NB, $\varphi_{stat}$ , $\varphi_{dyn}$ . . . . .	37

5.22	Prospektzug 5kN, Heben NB, F-max . . . . .	38
5.23	Prospektzug 5kN, Heben NB, a-max . . . . .	39
5.24	Prospektzug 5kN, Heben NB, $\varphi_{stat}, \varphi_{dyn}$ . . . . .	40
5.25	Prospektzug, Schema . . . . .	41
5.26	Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	41
5.27	Prospektzug 10kN, Senken NB, F-max . . . . .	42
5.28	Prospektzug 10kN, Senken NB, a-max . . . . .	43
5.29	Prospektzug 10kN, Senken NB, $\varphi_{stat}, \varphi_{dyn}$ . . . . .	44
5.30	Prospektzug 10kN, Heben NB, F-max . . . . .	45
5.31	Prospektzug 10kN, Heben NB, a-max . . . . .	46
5.32	Prospektzug 10kN, Heben NB, $\varphi_{stat}, \varphi_{dyn}$ . . . . .	47
5.33	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 2.5kN, Heben . . . . .	68
5.34	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 2.5kN, Senken . . . . .	68
5.35	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Heben . . . . .	69
5.36	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Senken . . . . .	69
5.37	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Heben . . . . .	70
5.38	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 5kN, Senken . . . . .	70
5.39	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 10kN, Heben . . . . .	71
5.40	Näherungslösung $\varphi_{dyn}$ , Punktzug 10kN, Senken . . . . .	71
6.1	Punktzug, Schema . . . . .	81
6.2	Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	81
6.3	Punktzug 2.5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 64Nm$ , F-max . . . . .	82
6.4	Punktzug 2.5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 64Nm$ , a-max . . . . .	83
6.5	Punktzug 2.5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 64Nm$ , F-max . . . . .	84
6.6	Punktzug 2.5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 64Nm$ , a-max . . . . .	85
6.7	Punktzug, Schema . . . . .	86
6.8	Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	86
6.9	Punktzug 5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 80Nm$ , F-max . . . . .	87
6.10	Punktzug 5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 80Nm$ , a-max . . . . .	88
6.11	Punktzug 5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 80Nm$ , F-max . . . . .	89
6.12	Punktzug 5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 80Nm$ , a-max . . . . .	90
6.13	Prospektzug, Schema . . . . .	91
6.14	Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	91
6.15	Prospektzug 5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 100Nm$ , F-max . . . . .	92
6.16	Prospektzug 5kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 100Nm$ , a-max . . . . .	93
6.17	Prospektzug 5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 100Nm$ , F-max . . . . .	94

6.18	Prospektzug 5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 100Nm$ , a-max . . . .	95
6.19	Prospektzug, Schema . . . . .	96
6.20	Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	96
6.21	Prospektzug 10kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 132Nm$ , F-max . . .	97
6.22	Prospektzug 10kN, Senken NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 132Nm$ , a-max . . .	98
6.23	Prospektzug 10kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 132Nm$ , F-max . . .	99
6.24	Prospektzug 10kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 132Nm$ , a-max . . . .	100
7.1	Schlaffseilbildung: Punktzug 5kN, Heben NB   $v = 1.2m/s$ & $M_B = 80Nm$	104
7.2	Schlaffseilbildung: 1. Bereich . . . . .	106
7.3	Schlaffseilbildung: 2. Bereich . . . . .	107
7.4	Schlaffseilbildung: Erhöhung Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	109
7.5	Schlaffseilbildung: Verringerung Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	110
7.6	Schlaffseilbildung: Erhöhung Bremsmoment, langes Seil . . . . .	111
7.7	Schlaffseilbildung: Verringerung Bremsmoment, langes Seil . . . . .	112
7.8	Schlaffseilbildung: Erhöhung Bremsmoment, kurzes Seil . . . . .	113
7.9	Schlaffseilbildung: Verringerung Bremsmoment, kurzes Seil . . . . .	114
8.1	Verknüpfungsverhalten der Bremsen . . . . .	127
8.2	Punktzug, Schema . . . . .	129
8.3	Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	129
8.4	Punktzug 2.5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	130
8.5	Punktzug 2.5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	131
8.6	Punktzug 2.5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	132
8.7	Punktzug 2.5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	133
8.8	Punktzug, Schema . . . . .	134
8.9	Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	134
8.10	Punktzug 5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	135
8.11	Punktzug 5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	136
8.12	Punktzug 5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	137
8.13	Punktzug 5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	138
8.14	Prospektzug, Schema . . . . .	139
8.15	Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	139
8.16	Prospektzug 5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	140
8.17	Prospektzug 5kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	141
8.18	Prospektzug 5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	142
8.19	Prospektzug 5kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	143
8.20	Prospektzug, Schema . . . . .	144

8.21	Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	144
8.22	Prospektzug 10kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	145
8.23	Prospektzug 10kN, Senken NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	146
8.24	Prospektzug 10kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, F-max . . . . .	147
8.25	Prospektzug 10kN, Heben NB   2. Bremse 100ms verzögert, a-max . . . . .	148
9.1	Dynamisches Modell mit FD Element, freigemacht . . . . .	154
9.2	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, kein FD Element . . . . .	157
9.3	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=730\text{kN/m}$ . . . . .	158
9.4	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=73\text{kN/m}$ . . . . .	159
9.5	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=7.3\text{kN/m}$ . . . . .	160
9.6	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=73\text{kN/m}$ $d=1280\text{kg/s}$ . . . . .	161
9.7	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=73\text{kN/m}$ $d=640\text{kg/s}$ . . . . .	162
9.8	Simulierter Beschleunigungsverlauf und Seilkraftverlauf, heben, FD Ele- ment: $c=73\text{kN/m}$ $d=320\text{kg/s}$ . . . . .	163
9.9	Punktzug, Schema . . . . .	167
9.10	Punktzug 2.5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	167
9.11	Punktzug 2.5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max . .	168
9.12	Punktzug 2.5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . .	169
9.13	Punktzug 2.5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max . .	170
9.14	Punktzug 2.5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . .	171
9.15	Punktzug 2.5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max . .	172
9.16	Punktzug 2.5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . .	173
9.17	Punktzug 2.5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max . .	174
9.18	Punktzug 2.5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . .	175
9.19	Punktzug, Schema . . . . .	176
9.20	Punktzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	176
9.21	Punktzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max . . .	177
9.22	Punktzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . . .	178
9.23	Punktzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max . . .	179
9.24	Punktzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . . .	180

9.25	Punktzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max, FD Element . . . . .	181
9.26	Punktzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . . .	182
9.27	Punktzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max, FD Element . . . . .	183
9.28	Punktzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . . .	184
9.29	Prospektzug, Schema . . . . .	185
9.30	Prospektzug 5kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	185
9.31	Prospektzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max .	186
9.32	Prospektzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . .	187
9.33	Prospektzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max .	188
9.34	Prospektzug 5kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . .	189
9.35	Prospektzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max . .	190
9.36	Prospektzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max . .	191
9.37	Prospektzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max . .	192
9.38	Prospektzug 5kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max . .	193
9.39	Prospektzug, Schema . . . . .	194
9.40	Prospektzug 10kN, Zusammenhang Federsteifigkeit und Seillänge . . . . .	194
9.41	Prospektzug 10kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max .	195
9.42	Prospektzug 10kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max .	196
9.43	Prospektzug 10kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max .	197
9.44	Prospektzug 10kN, Senken NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max .	198
9.45	Prospektzug 10kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , F-max .	199
9.46	Prospektzug 10kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{10}$ , a-max .	200
9.47	Prospektzug 10kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , F-max .	201
9.48	Prospektzug 10kN, Heben NB mit Feder-Dämpfer Element $FD_{20}$ , a-max .	202



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Tabellenverzeichnis

4.1	Technische Daten Punktzug 2.5kN . . . . .	11
4.2	Technische Daten Punktzug 5kN . . . . .	12
4.3	Technische Daten Prospektzug 5kN . . . . .	13
4.4	Technische Daten Prospektzug 10kN . . . . .	14
4.5	$F_{dyn}$ für die verschiedenen Hubzüge . . . . .	18
5.1	Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, senken, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	50
5.2	Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, heben, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	51
5.3	Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, senken, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	52
5.4	Parameterstudie, Punktzug 2.5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	53
5.5	Parameterstudie, Punktzug 5kN, senken, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	54
5.6	Parameterstudie, Punktzug 5kN, heben, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	55
5.7	Parameterstudie, Punktzug 5kN, senken, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	56
5.8	Parameterstudie, Punktzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	57
5.9	Parameterstudie, Prospektzug 5kN, senken, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	58
5.10	Parameterstudie, Prospektzug 5kN, heben, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	59
5.11	Parameterstudie, Prospektzug 5kN, senken, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	60

5.12	Parameterstudie, Prospektzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	61
5.13	Parameterstudie, Prospektzug 10kN, senken, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	62
5.14	Parameterstudie, Prospektzug 10kN, heben, $\varphi_{dyn}$ für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	63
5.15	Parameterstudie, Prospektzug 10kN, senken, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	64
5.16	Parameterstudie, Prospektzug 10kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . . . . .	65
5.17	Parameter der Näherungslösungen für $\varphi_{dyn}$ , Heben . . . . .	67
5.18	Parameter der Näherungslösungen für $\varphi_{dyn}$ , Senken . . . . .	67
5.19	Parameter der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Heben . . . . .	72
5.20	Parameter der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Senken . . . . .	72
5.21	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Heben Punktzug 2.5kN .	72
5.22	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Heben Punktzug 5kN . .	73
5.23	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Heben Prospektzug 5kN	73
5.24	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Heben Prospektzug 10kN	73
5.25	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Senken Punktzug 2.5kN	74
5.26	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Senken Punktzug 5kN .	74
5.27	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Senken Prospektzug 5kN	74
5.28	Fehler der allgemeinen Näherungslösung für $\varphi_{dyn}$ , Senken Prospektzug 10kN	75
5.29	Lasten und Beschleunigungen bei Nennbedingungen . . . . .	77
5.30	Berechnungsbeiwerte $\varphi_{stat}$ & $\varphi_{dyn}$ bei Nennbedingungen . . . . .	77
6.1	Bremsmomente bei niedrigerer Verfahrgeschwindigkeit . . . . .	80
6.2	Lasten und Beschleunigungen bei verringerter Verfahrgeschwindigkeit . . .	101
6.3	Berechnungsbeiwerte $\varphi_{stat}$ und $\varphi_{dyn}$ bei $v_{max} = 1.2m/s$ . . . . .	102
7.1	Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Punktzug 2.5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten .	117
7.2	Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Punktzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten . .	118
7.3	Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Prospektzug 5kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten .	119
7.4	Parameterstudie zur Schlaffseilbildung, Prospektzug 10kN, heben, Beschleunigung für verschiedene Seillängen, Lasten und Verfahrgeschwindigkeiten .	120

7.5	Abschätzung der für die Schlaffseilbildung kritischen Verfahrensgeschwindigkeit mit Formel 7.2 . . . . .	122
8.1	Bremswege bei verzögertem Einfallen der 2. Bremse . . . . .	126
8.2	Verzögerungszeiten der Bremsen bei unterschiedlicher Spannungsversorgung	128
8.3	Lasten und Beschleunigungen bei NB   2. Bremse 100ms verzögert . . . . .	149
8.4	$\varphi_{stat}$ und $\varphi_{dyn}$ bei NB   2. Bremse 100ms verzögert . . . . .	149
9.1	Seilverlängerung des Feder-Dämpfer Elements . . . . .	165
9.2	Federsteifigkeit und Dämpfungsrate der FD Elemente . . . . .	166
9.3	Seilkräfte und Beschleunigungen NB mit FD Element $FD_{10}$ . . . . .	203
9.4	Berechnungsbeiwerte $\varphi_{stat}$ und $\varphi_{dyn}$ NB mit FD Element $FD_{10}$ . . . . .	203
9.5	Seilkräfte und Beschleunigungen NB mit FD Element $FD_{20}$ . . . . .	204
9.6	Berechnungsbeiwerte $\varphi_{stat}$ und $\varphi_{dyn}$ NB mit FD Element $FD_{20}$ . . . . .	204