



Diplomarbeit

Stufenüberschreitbarkeit von Radfahrzeugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Lugner

am

E 325 Institut für Mechanik und Mechatronik

in Zusammenarbeit mit

Univ.Lektor Brigadier Prof. Dipl.-Ing. Günter Hohl

vom

Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Martin Hessmann BSc

Matrikelnummer: 0825746

Studienkennzahl: 066 445

Edlauerstraße 21, A-4052 Ansfelden

Wien, im Dezember 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am 30.12.2013

Martin Hessmann

Zusammenfassung

Beschäftigen sich PKW-Fahrer hauptsächlich mit den Eigenschaften ihrer Fahrzeuge auf der Straße wie beispielsweise Beschleunigung, Kurvenverhalten etc., so ist es für die Benutzer von geländegängigen Fahrzeugen wichtig zu wissen, wie sich ihr Fahrzeug im Gelände verhält. Unter anderem ist die Überschreitbarkeit von Hindernissen – im Speziellen von Stufen – von großer Bedeutung. Eine Nutzergruppe von Geländefahrzeugen, für die diese Kennwerte überaus wichtig sind, ist das Militär.

In dieser Arbeit werden – in Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik – verschiedene Hindernistypen auf ihre Überschreitbarkeit untersucht und die Ergebnisse in einem benutzerfreundlichen Computerprogramm zusammengefasst, welches zur Berechnung von Hindernisdimensionen aufgrund von Fahrzeugparametern dienen soll. Augenmerk wird hier auf eine einfache Benutzung und variable Eingabemöglichkeiten gelegt.

Ebenfalls berücksichtigt werden verschiedenste Fahrzeuge mit Hinterradantrieb und Allradantrieb mit Überfahren des Hindernisses aus dem Stand, wobei vereinfachte Ansätze mit starren Rädern, sowie realere Ansätze mit flexiblen Rädern zum Tragen kommen. Für die Bodenspezifikation wurden die dimensionslosen Antriebsbeiwerte und der Rollwiderstandsbeiwert verwendet. Andere Bodenkennwerte wie jene von Bekker oder die Cone-Indexwerte sind wegen der geringen Geschwindigkeit für diese Aufgabenstellung nicht anwendbar. Für die Untersuchungen wird ein quasistatisches (mit $v = \text{konst.}$) Szenario betrachtet.

Die Arbeit schließt mit einem fertigen Computerprogramm zur Berechnung von Hindernisüberschreitungen mit Kräfteverläufen basierend auf der Eingabe von Fahrzeug- und Hindernisparametern auf der einen Seite und einem Vergleich der verschiedenen Ansätze auf der anderen Seite ab.

Abstract

For drivers of standard cars for on-road performance, it is mainly necessary to concentrate on such characteristics as acceleration, behaviour in curves or braking in dangerous situations. For off-road vehicles and especially those for military use, it is more important to know how to overcome obstacles or barriers. The topic was initiated by the Austrian Society of Automotive Engineers (ÖVK).

This thesis investigates the ability to cross barriers depending on the dimensions and properties of the vehicles trying to overcome the barriers. A quasi-static scenario is considered ($v = \text{constant}$). Various types of barriers together with rear and all-wheel-driven vehicles are examined. The outcome of the considerations results in a user-friendly, easy to handle and powerful computer program. Based on the vehicle, obstacle and ground characteristics, this program is able to calculate the wheel forces while overcoming different types of obstacles and plot those results in various diagrams. In addition to existing programs (see: [4]), this allows the user to analyze the whole crossing of the barrier and ascertain whether such overcoming is possible or not. Earlier programs only calculated the maximum height of obstacles to be overcome.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Hindernisformen und Überschreitungsarten	2
2.1	Ideale Hindernisformen	2
2.2	Angenäherte reale Hindernisform.....	4
2.3	Überschreitungsarten von Hindernissen.....	6
2.4	Allgemeine Hinweise	7
3	Zweiachsiges Radfahrzeug mit starren Rädern.....	8
3.1	Überschreitung eines Plateauhindernisses	8
3.2	Überschreitung eines Stufenhindernisses	17
3.3	Überschreitung eines Grabenhindernisses.....	26
3.4	Überschreitung eines realen Plateauhindernisses	37
4	Radfahrzeug mit flexiblen Rädern	51
4.1	Überschreitung eines Plateauhindernisses	52
4.2	Überschreitung eines Stufenhindernisses	55
4.3	Überschreitung eines Grabenhindernisses.....	60
5	3-achsiges Radfahrzeug mit starren Rädern	67
5.1	Schwerpunkt liegt vor 2. Achse	68
5.2	Schwerpunkt liegt hinter 2. Achse	81
6	MATLAB – Programm: Hinweise zur Bedienung und programmtechnische Ausarbeitung.....	88
6.1	Ablaufschema MATLAB	88
6.2	Eingabemaske und Bedienung des Programms.....	89
7	Auswertung	93
7.1	Referenzfahrzeug.....	93
7.2	Auswertung der Hindernisse	95
7.3	Auswertung und Gegenüberstellung der untersuchten Hindernisformen und Antriebsarten.....	96
8	Anhang.....	153
8.1	Variablenübersicht.....	154
8.2	Gültigkeitsbereiche für α_0 und $\alpha(x)$	155
8.3	Literaturverzeichnis	156
8.4	Abbildungsverzeichnis.....	157

1 Einleitung

Das Thema Geländegängigkeit von Fahrzeugen ist für viele Menschen von Interesse. Während an normale Personenkraftwagen und Lastkraftwagen keine Anforderungen bezüglich ihrer Geländeeigenschaften gestellt werden, so sieht es bereits bei den für den Privatkundenmarkt sehr wichtigen SUVs und Geländewagen, sowie natürlich auch bei hochgeländegängigen Militärfahrzeugen und Kommunalfahrzeugen, ganz anders aus. Hier werden teils sehr große Anforderungen bezüglich Steigfähigkeit, Wattiefe und Schrägfahrten gestellt. Diese Arbeit beschäftigt sich jedoch einzig und allein mit dem wichtigen Thema der Stufenüberschreitbarkeit von geländegängigen, zwei- und mehrachsigen Radfahrzeugen mit Hinterradantrieb und Allradantrieb, da reiner Vorderradantrieb bei den Fahrzeugen dieser Zielgruppe nicht verbreitet ist.

In Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik beschäftigt sich diese Arbeit mit unterschiedlichen Ansätzen verschiedenster Hindernisformen und Antriebskombinationen (siehe spätere Kapitel).

Sowohl das Anfahren über das Hindernis aus dem Stand als auch das dynamische Überfahren werden an idealen Hindernissen und real gestalteten Hindernisformen untersucht und einander gegenübergestellt. Ebenso wird die Nachgiebigkeit der Geländereifen berücksichtigt und die Bodenparameter fließen über Rollwiderstandsbeiwert und Reibkoeffizient ein. Fahrzeugdaten fließen nur in Form von Masse, Abmessungen, Lage des Schwerpunkts, Reifendimensionen und Anzahl der Achsen ein. Es wird also ein ebenes Fahrzeugmodell ohne Details innerer Strukturen simuliert, bei dem die Karosserieform keine Berücksichtigung findet. Ein mögliches Aufsitzen des Fahrzeuges mit dem Unterboden, Tank, etc. wird somit nicht betrachtet.

In Erweiterung zu bereits existierenden Programmen [4] wird nicht die maximal überwindbare Hindernishöhe ausgegeben, sondern ein Kräfteverlauf während der gesamten Hindernisüberquerung dargestellt. Ein Überschreiten ist somit so lange möglich, wie Motorleistung und übertragbare Kräfte nicht überschritten werden.

2 Hindernisformen und Überschreitungsarten

Je nach Geländetyp und –beschaffenheit gibt es unterschiedliche Hindernisformen, die es zu überwinden gilt. Darunter befinden sich sowohl in der Literatur definierte, ideale Hindernisse, sowie auch ein Ansatz, der einer realen Stufe näher kommt.

2.1 Ideale Hindernisformen

Es werden im Folgenden drei ideale Hindernistypen behandelt. Auf Überhänge, seitliche Schräglagen oder nur einseitige Anhebung eines Rades einer Achse wird nicht eingegangen. Alle drei idealen Hindernisformen starten in der Ebene und enden in der Ebene, eine Anfahrt aus schrägem Gelände wird somit nicht berücksichtigt. [2]

2.1.1 Plateauhindernis

Das erste ideale Hindernis, im Folgenden „A“ genannt, wird gemäß Bekker [2] als Plateauhindernis bezeichnet. Es besteht aus 2 waagrechten, parallelen Ebenen, die durch eine senkrechte Stufe voneinander getrennt sind. Befindet sich das Fahrzeug erst einmal auf der höher gelegenen Ebene, so bleibt es auf diesem Fahrbahnniveau. In Abb. 1 ist ein Plateauhindernis ersichtlich.

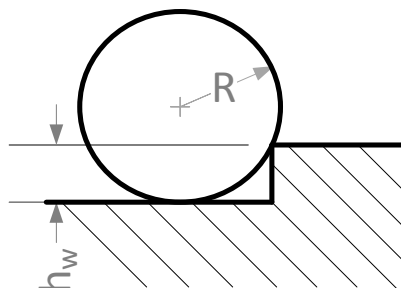


Abbildung 1: Hindernis Typ "A" [2]

2.1.2 Stufenhindernis

Ein weiteres ideales Hindernis, im Folgenden „B“ genannt, wird gemäß [2] als Stufenhindernis bezeichnet. Es besteht aus einer rechteckigen Erhebung auf der Fahrbahn und führt im weiteren Verlauf – im Gegensatz zum Plateauhindernis – wieder auf das ursprüngliche Fahrbahnniveau zurück. In Abb. 2 ist ein Stufenhindernis ersichtlich.

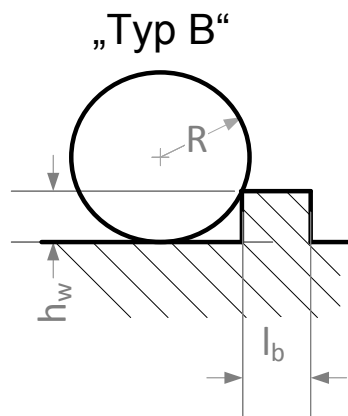


Abbildung 2: Hindernis Typ "B" [2]

2.1.3 Grabenhindernis

Das letzte ideale Hindernis, im Folgenden „C“ genannt, wird gemäß [2] als Grabenhindernis bezeichnet, wobei hier beachtet werden muss, dass die Grabenbreite l_d nicht größer ist als der Reifendurchmesser D , da es sonst wieder ein Hindernis der Form „A“ wäre. In Abb. 3 ist ein Grabenhindernis ersichtlich.

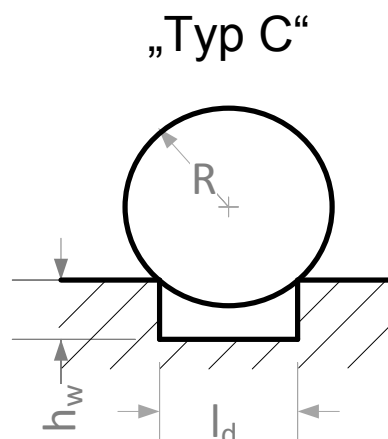


Abbildung 3: Hindernis Typ "C" [2]

2.2 Angenäherte reale Hindernisform

Die bisher erwähnten Hindernisformen sind von eher theoretischem Interesse, da im Gelände rechtwinklige Hindernisse kaum anzutreffen sind. Es ist daher eine Stufenform zu finden, die möglichst nahe an reale Hindernisformen herankommt. Um dies zu gewährleisten, wird die Form der Barriere aus mehreren Funktionen gebildet. Die Koeffizienten dieser Funktionen können in einem gewissen Rahmen beliebig verändert werden, wodurch unterschiedlichste Barrieren mit einer waagerechten Anfahrt simuliert werden können.

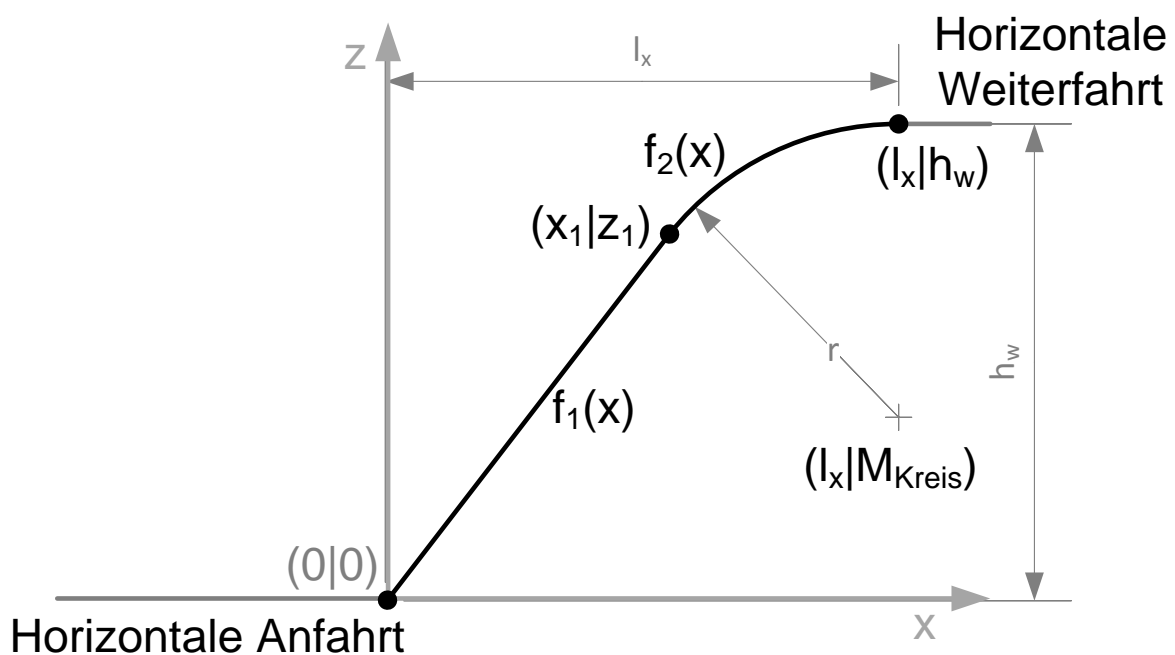


Abbildung 4: Reale Hindernisform

In Abb. 4 ist eine reale Barriere aus zwei Funktionen stückweise zusammengesetzt worden. Im Koordinatenursprung ist der Übergang von der horizontalen Anfahrt zur Steigung als Kante dargestellt. Dieser Übergang ist auch gleichwertig einer Ausrundung, solange der Radius derselben kleiner ist als der Radradius. In Abb. 5 sind die Funktionsgleichungen zur Beschreibung dieses realen Hindernisses ersichtlich.

Funktion	Typ	Funktionsgleichung
$f_1(x)$	linear	$z_1(x) = k_1 \cdot x$
$f_2(x)$	Kreisbogen	$(x-l_x)^2 + (z_2(x)-M_{\text{kreis}})^2 = r^2$

Abbildung 5: Funktionsgleichungen für ein reales Hindernis

Für jede reale Hindernisform ist die Angabe von l_x (gibt an, auf welcher Länge das Hindernis erklommen wird) und h_w (Hindernishöhe) durch den Benutzer notwendig.

Die Anfahrt vor dem Hindernis sowie die Weiterfahrt nach Erreichen der Hindernishöhe sind horizontal ausgeführt, es wird hier also keine Funktion angegeben.

Die Funktion $f_1(x)$ stellt die Flanke des Hindernisses dar. Es ist die Steigung $k_1(x)$ frei zu wählen. Für eine senkrechte Flanke ist im Computerprogramm ein möglichst hoher Wert einzugeben, da eine senkrechte Flanke theoretisch eine Steigung von $k_1(x) = \infty$ bedeuten würde. Details zu Funktionen, Übergangsbedingungen und Definitionen sind Kapitel 3.4 zu entnehmen.

Die Funktion $f_2(x)$ stellt den Übergang von der Flanke in die darüber liegende Ebene dar und wird als Kreisbogen realisiert. Maßgeblich für diese Funktion ist die Berechnung des Radius r durch das Programm (siehe 3.4). Es müssen außer den Funktionen noch Übergangsbedingungen (Stetigkeitsbedingungen) erfüllt werden. Es wird gefordert, dass der Kreisbogen stetig in die dahinterliegende, waagerechte Ebene übergeht. Dies wird gewährleistet durch die Bedingung: $z_2'(l_x)=0$

Ebenfalls wird ein stetiger Übergang bei $(x_1|z_1)$ gefordert. Durch die Vorgabe der Steigung k_1 kann die Bedingung folgendermaßen formuliert werden: $z_2'(x_1) = k_1$

2.3 Überschreitungsarten von Hindernissen

Beim Überschreiten von Hindernissen sind gemäß Bekker [2][4] 3 Varianten zu berücksichtigen:

- Das Hinauffahren auf das Hindernis mit dem Vorderrad („A“)
- Das Nachziehen des Hinterrads auf das Hindernis („B“)
- Das Überfahren eines vertikalen Hindernisses mit dem Hinterrad („C“)

Zusätzlich ist noch eine weitere Überschreitungsart zu definieren, um das Hindernis „C“ darstellen zu können:

- Das Hinabfahren in ein als Loch ausgeführtes Hindernis mit dem Vorderrad („D“)
- Das Hinabfahren in ein als Loch ausgeführtes Hindernis mit dem Hinterrad („E“)

Die in 2.1 definierten idealen Hindernisse wurden demnach alle gemäß Auffahrsituation „A“ dargestellt.

Aus den Informationen aus 2.1 und 2.3 ergeben sich folgende mögliche ideale Hindernis – Überschreitungsartkombinationen (Hindernisform – Überschreitungsart):

- „A-A“: Hinauffahren auf ein Plateau mit dem Vorderrad
- „A-B“: Nachziehen des Hinterrades auf das Plateau
- „B-A“: Hinauffahren auf eine Stufe mit dem Vorderrad
- „B-B“: Hinunterfahren einer Stufe mit dem Vorderrad
- „B-C“: Hinauffahren auf eine Stufe mit dem Hinterrad
- „B-D“: Hinunterfahren einer Stufe mit dem Hinterrad
- „C-AD“: Das Fahren in eine Senke mit dem Vorderrad und gleichzeitiges Hochfahren auf das gegenüberliegende Hindernis (2 Berührungspunkte)
- „C-AE“: Das Fahren in eine Senke mit dem Hinterrad und gleichzeitiges Hochfahren auf das gegenüberliegende Hindernis (2 Berührungspunkte)

2.4 Allgemeine Hinweise

Zusätzlich zum Ablaufschema des MATLAB – Programms in 6.1 folgen einige Hinweise zum besseren Verständnis. Für die verwendeten Bezeichnungen siehe Abb. 6 und folgend.

Der Radius aller starren Räder wird mit R angegeben. Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit wird auf die Angabe der Bemaßung aller Räder pro Skizze verzichtet.

Die mit griechischen Zahlen versehenen Gleichgewichtsbedingungen sind direkt aus den Skizzen abgeleitet, während die Formeln mit römischer Nummerierung jene Gleichungen darstellen, die vom MATLAB – Programm zur Berechnung der Kräfteverläufe herangezogen werden. Ebenfalls berücksichtigt werden Zusammenhänge und Gültigkeitsbereiche, die jedoch ebenfalls griechisch nummeriert sind. Ergebnis des MATLAB – Programms ist ein Kräfteverlauf der Aufstandskräfte N und der Antriebskräfte F pro Achse sowie des Winkels β , jeweils aufgetragen über der x -Koordinate der 1. Achse, dargestellt im ortsfesten Koordinatensystem, welches in der Skizze ersichtlich ist.

Die Indizes der aus den Skizzen entnommenen Momentengleichgewichte beziehen sich immer auf die jeweilige, im Index stehende, Achse als Drehpunkt.

Der Winkel α kann im Bereich $\alpha_0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ sämtliche Werte annehmen, wobei α_0 von Fall zu Fall unterschiedlich ist und durch Einsetzen von $\beta=0$ bzw. $\beta=\beta_{\max}$ (je nach Ansatz) in die Gleichung, die den Zusammenhang zwischen α und β widerspiegelt, ausgerechnet werden kann. α_0 ist abhängig von R und h_w . Der Winkel α erreicht den Wert 90° für den Fall, dass das auf dem Hindernis rollende Rad nur eine horizontale Bewegung ausführt. Dies stellt gleichzeitig den Maximalwert β_{\max} des Winkels β dar. Der Winkel β kann sich somit im Bereich $0 \leq \beta \leq \beta_{\max} = \arcsin(h_w/s)$ bewegen. Wie aus diesem Gültigkeitsbereich ersichtlich, ist β somit neben der Hindernishöhe auch noch vom Radstand abhängig.

Sämtliche Winkel werden auf die Horizontale bezogen – Winkel α wird somit von der Hindernisebene aus gemessen, während Winkel β auf die Horizontale durch die 1. Achse bezogen wird und somit die Neigung des Fahrzeuges angibt.

3 Zweiaxsiges Radfahrzeug mit starren Rädern

Die in 2.3 definierten Überschreitungsarten von idealen Hindernisformen werden im Folgenden anhand von zweiachsigen, ebenen Radfahrzeugmodellen mit starren Rädern überwunden. Die für die Berechnung nötigen Ansätze sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Alle aufgeführten Überschreitungsarten werden als ebene, quasistatische Probleme behandelt, um die Berechnung zu vereinfachen. Das resultiert in einer konstanten Geschwindigkeit des Fahrzeuges bei Vernachlässigung der Vertikalbeschleunigung. Als Vereinfachung wird ebenfalls angenommen, dass bei Allradantrieb die Antriebsmomente T_1 , T_2 und dadurch die Antriebskräfte F_1 , F_2 auf beide Räder gleich groß sind

3.1 Überschreitung eines Plateauhindernisses

Bei der Überschreitung eines Plateauhindernisses werden als unterschiedliche Ansätze die Situationen „A-A“ und „A-B“ mit jeweils reinem Hinterrad- und Allradantrieb betrachtet.

3.1.1 „A-A“ mit Hinterradantrieb

Abb. 6 zeigt die für die Berechnung maßgebliche Situation für das Auffahren des Vorderrads auf ein Plateauhindernis bei reinem Hinterradantrieb. Reines Rollen der Räder unter Vernachlässigung der Schlupfwerte wird vorausgesetzt.

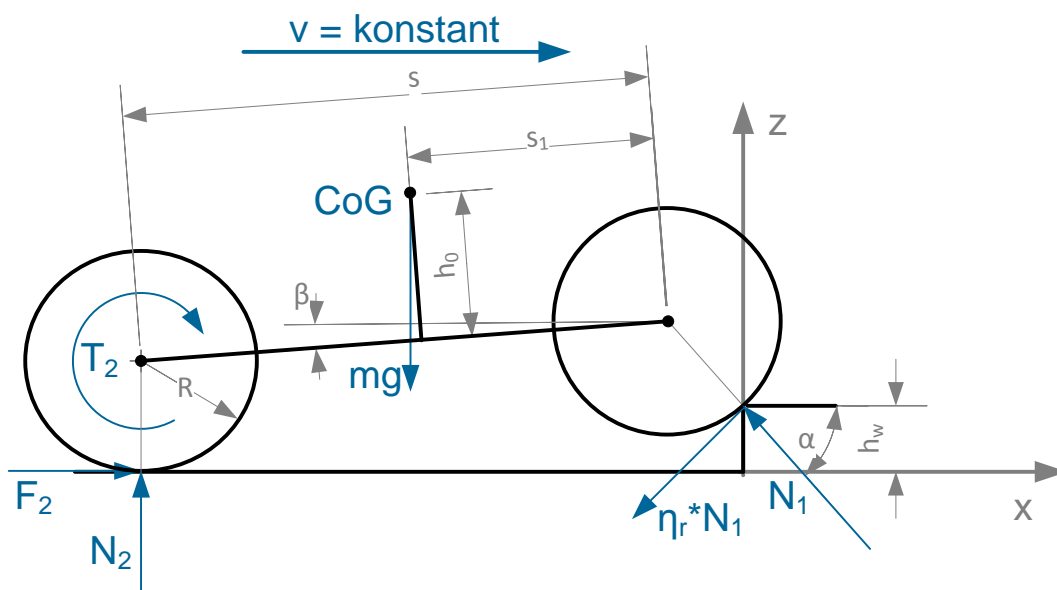


Abbildung 6: "A-A" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

Daraus ergeben sich folgende Gleichgewichtsbedingungen, die zur weiteren Berechnung in MATLAB umgeformt werden müssen. Hier werden jedoch nur die Grundformeln aufgeführt, da eine Angabe aller einzelnen Umformungsschritte den Umfang der Arbeit überschreiten würde. Unter Berücksichtigung des Rollwiderstandbeiwertes η_r ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\sum F_x = 0 = -N_1(\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha) + F_2 \quad (1)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1(\sin\alpha - \eta_r \cos\alpha) + N_2 - mg \quad (2)$$

$$\sum M_1 = 0 = N_2 s \cos\beta - F_2(R + s \sin\beta) + N_1 \eta_r R - mg(s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta) \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (1) – (3) ergeben sich nach längerem Umformen die Gleichungen (I) – (III), auf denen das MATLAB - Programm aufbaut:

$$F_2 = \frac{mg(s \cos\beta - s_1 \cos\beta - h_0 \sin\beta)(\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha)}{R + s \sin\beta - R \eta_r - s \cos\beta(\eta_r \cos\alpha - \sin\alpha)} \quad (I)$$

$$N_1 = \frac{F_2}{\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha} \quad (II)$$

$$N_2 = \frac{F_2(\eta_r \cos\alpha - \sin\alpha)}{\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha} + mg \quad (III)$$

Berücksichtigt werden müssen folgende Bedingungen und Zusammenhänge mit dem Antriebsmoment T_2 und dem Reibwert μ_a :

$$F_2 = \begin{cases} \frac{T_2}{R} \text{ für } \frac{T_2}{R} \leq N_2 \mu_a \\ N_2 \mu_a \text{ für } \frac{T_2}{R} \geq N_2 \mu_a \end{cases} \quad (4)$$

Die Einführung von F_2 ist notwendig, da das Hinterrad nur eine von Achslast und Bodenbeschaffenheit abhängige Kraft übertragen kann, die durch $N_2 \cdot \mu_a$ festgelegt ist. Die maximal zur Verfügung stehende Antriebskraft T_2/R könnte diese maximal übertragbare Kraft jedoch überschreiten. Um die übertragene Kraft zu begrenzen, wird diese Fallunterscheidung durchgeführt. Diese Unterscheidung führt also nur die Höchstwerte der Kraft $F_{2\max}$ an, die tatsächlich wirkende Kraft F_2 (bis zu diesem Höchstwert) ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen (1) – (3) und ist in (I) angegeben. Formel (5) stellt den Zusammenhang zwischen Neigungswinkel β und Winkel α der Berührnormalen mit dem Hindernis dar.

$$R + s \sin \beta = h_w + R \sin \alpha \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{R - h_w}{R}\right) \quad (5s)$$

$$\alpha(x) = \arccos\left(\frac{-x}{R}\right) \quad (5x)$$

$$\alpha_0 \leq \alpha_x \leq \frac{\pi}{2} \quad (5d)$$

$$0 \leq h_w < R \quad (6)$$

Die Formeln (1) – (5) sind in dem in Formel (6) angegebenen Bereich gültig.

Vom Benutzer müssen für die Berechnung in MATLAB die folgenden Variablen eingegeben werden: Fahrzeugmasse m , Reifenradius R , Hindernishöhe h_w , Lage des Fahrzeugschwerpunkts über der Achse h_0 , Achsabstand s , Lage des Fahrzeugschwerpunkts hinter der 1. Achse s_1 , Antriebsmoment auf das Rad T_2 , Reibwert μ_a und Rollwiderstandsbeiwert η_r . Es ist auf die Eingabe in SI-Einheiten zu achten. Die Erdbeschleunigung g ist im Programm mit $g=9.81\text{m/s}^2$ hinterlegt. In Formel (5s) ist eine Sonderform des Winkels α dargestellt. Durch Wahl des Winkels $\beta = 0$ (Berühren des Hindernisses mit dem Vorderrad) in der Glg. (5) ergibt sich der Winkel α_0 . Dieser stellt die Untergrenze für den Gültigkeitsbereich des Winkels α dar (Siehe: 2.4 Allgemeine Hinweise). Die Obergrenze beträgt 90° (Vorderrad fährt auf

dem Plateau entlang) – siehe (5d). In (5x) wird der Winkel α als Funktion der x-Koordinate des Vorderrades als $\alpha(x)$ angegeben.

3.1.2 „A-B“ mit Hinterradantrieb

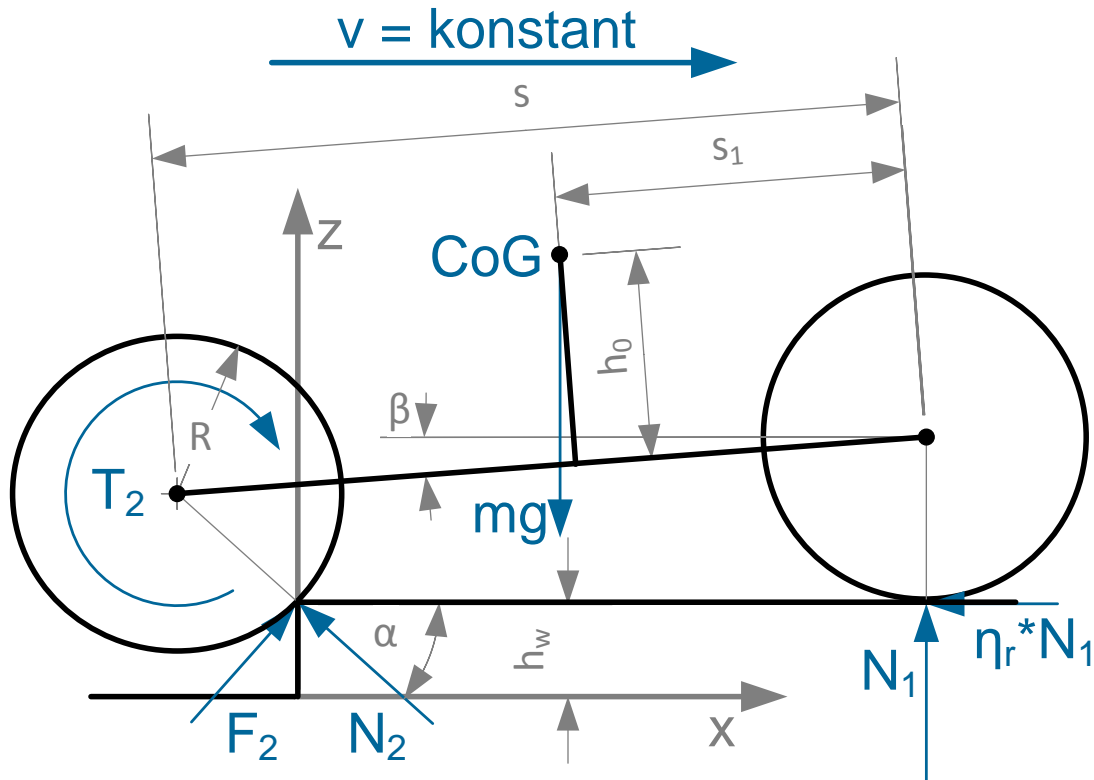


Abbildung 7: "A-B" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 7 ist die Skizze zum Ansatz des Nachziehens des Hinterrades auf ein Plateauhindernis bei Hinterradantrieb ersichtlich. Diese Situation ergibt sich ab Erreichen des Hindernisses mit dem Hinterrad. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Gleichungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha - N_1 \eta_r \quad (7)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (8)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_2 R + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta + N_1 \eta_r R \sin \alpha \quad (9)$$

Nach mehreren Umformschritten ergeben sich aus den Gleichungen (7) – (9) die Gleichungen (IV) – (VI), auf denen das MATLAB-Programm aufbaut:

$$F_2 = \frac{mg((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta)(\eta_r\sin\alpha - \cos\alpha) + \cos\alpha(s\cos\beta - \eta_r R\sin\alpha)}{s\cos\beta - R\cos\alpha} \quad (\text{IV})$$

$$N_1 = \frac{F_2 - mg\cos\alpha}{\eta_r\sin\alpha - \cos\alpha} \quad (\text{V})$$

$$N_2 = \frac{F_2\sin\alpha - N_1\eta_r}{\cos\alpha} \quad (\text{VI})$$

$$s\sin\beta + R\sin\alpha = R \quad (10)$$

Die Formeln (4) und (6) besitzen auch in diesem Fall Gültigkeit. Die Formel (10) gibt für diesen Fall den Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β an, da die Hindernishöhe hier keinen zusätzlichen Einfluss mehr hat, der nicht bereits im Winkel β berücksichtigt wird. Um auf die Angabe von α_0 und $\alpha(x)$ in den folgenden Ansätzen verzichten zu können, werden diese in tabellarischer Form im Anhang (siehe 8.2) aufgelistet.

3.1.3 „A-A“ mit Allradantrieb

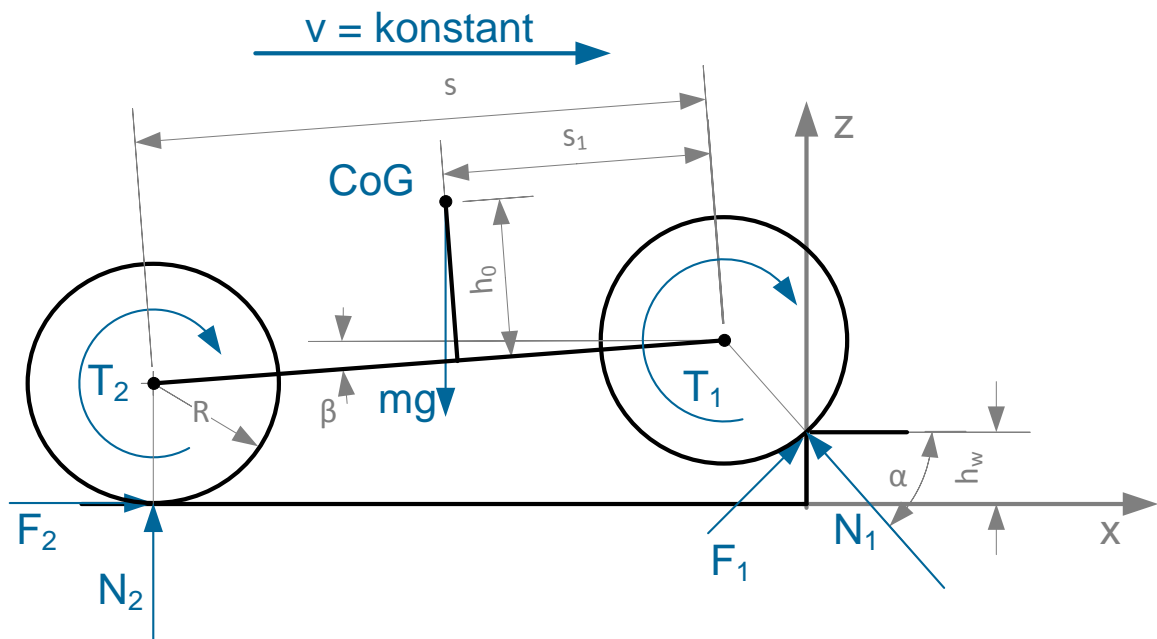


Abbildung 8: "A-A" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 8 ist die Skizze zum Ansatz des Auffahrens mit dem Vorderrad auf ein Plateauhindernis bei Allradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Gleichungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 + F_1 \sin \alpha - N_1 \cos \alpha \quad (11)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin \alpha + F_1 \cos \alpha - mg \quad (12)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R - mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_2 s \cos \beta - F_2(R + s \sin \beta) \quad (13)$$

$$F_1 = F_2 \quad (14)$$

Die Formeln (4), (5) und (6) besitzen hier auch Gültigkeit. Zusätzlich muss aufgrund des Allradantriebes die aus (4) bekannte Fallunterscheidung auch für $F_{1\max}$ durchgeführt werden. Es ist wiederum gültig, dass (15) nur die maximal übertragbare Kraft F_1 angibt, Werte unter dieser Höchstgrenze werden aus (11) – (14) bestimmt

und sind in den Gleichungen (VII) – (IX) enthalten, die wiederum durch Umformungen entstanden sind:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{T_1}{R} \text{ für } \frac{T_1}{R} \leq N_1\mu_a \\ N_1\mu_a \text{ für } \frac{T_1}{R} \geq N_1\mu_a \end{cases} \quad (15)$$

$$F_2 = \begin{cases} \frac{T_2}{R} \text{ für } \frac{T_2}{R} \leq N_2\mu_a \\ N_2\mu_a \text{ für } \frac{T_2}{R} \geq N_2\mu_a \end{cases} \quad (4)$$

$$N_1 = \frac{mg(1 + \sin\alpha)((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta)}{s\cos\beta + s\cos\beta\sin\alpha + s\cos\alpha\sin\beta + 2R\cos\alpha} \quad (VII)$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (VIII)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{mg - N_2 - N_1\sin\alpha}{\cos\alpha} \quad (IX)$$

Die Gleichung (4) wird hier ergänzend zu (15) nochmals angegeben. Beim Allradantrieb mit fixer Momentenaufteilung (in diesem Fall Vorne:Hinten = 50:50) ist das Durchdrehen von Rädern nicht möglich, da das Rad mit den geringeren übertragbaren Kräften die übertragbaren Antriebskräfte für alle Achsen limitiert.

3.1.4 „A-B“ mit Allradantrieb

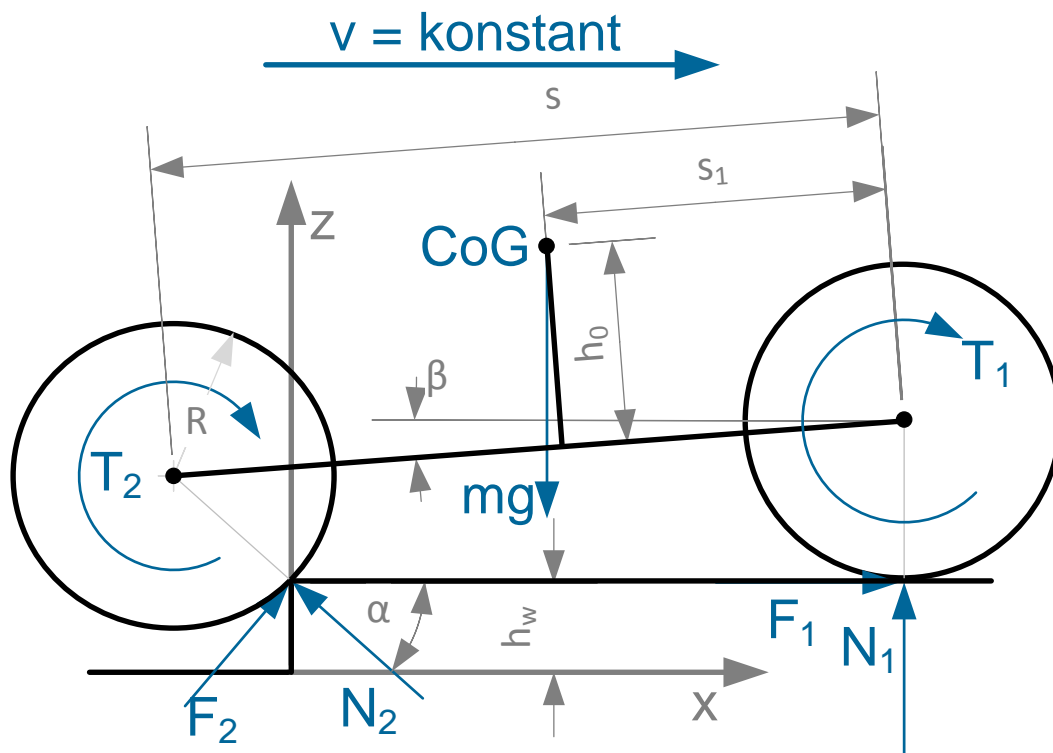


Abbildung 9: "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 9 ist die Skizze zum Ansatz des Nachziehens des Hinterrades auf ein Plateauhindernis bei Allradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_1 + F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha \quad (16)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (17)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_2 R + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_1 R \sin \alpha \quad (18)$$

$$F_1 = F_2 \quad (19)$$

Die Formeln (4), (6), (10) und (15) besitzen hier auch Gültigkeit. Es ergeben sich durch Umformen die für das MATLAB-Programm gültigen Gleichungen (X) – (XII).

$$N_2 = \frac{mg(s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta)}{s \cos\beta - R \cos\alpha} \quad (\text{X})$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (\text{XI})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (\text{XII})$$

3.2 Überschreitung eines Stufenhindernisses

Bei der Überschreitung eines Stufenhindernisses werden die unterschiedlichen Ansätze „B-A“, „B-B“, „B-C“ & „B-D“ mit jeweils reinem Hinterradantrieb und Allradantrieb betrachtet.

3.2.1 „B-A“ mit Hinterradantrieb & Allradantrieb

Die Anfahrtsituation entspricht derjenigen wie beim Auffahren des Vorderrades auf ein Plateauhindernis („A-A“) mit Hinterrad- bzw. Allradantrieb. Die Länge der Stufe ist hier nicht von Bedeutung. Es werden für diesen Fall also keine gesonderten Berechnungen angestellt.

3.2.2 „B-B“ mit Hinterradantrieb

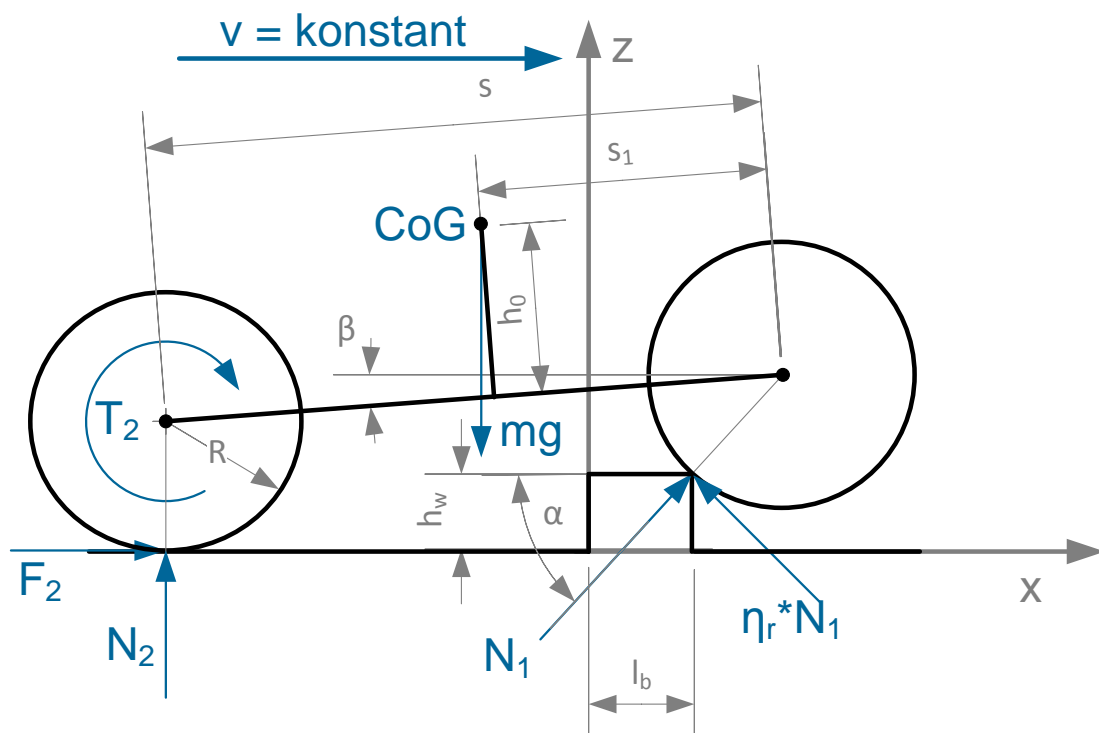


Abbildung 10: „B-B“ mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 10 ist die Skizze zum Ansatz des Hinunterfahrens einer Stufe mit dem Vorderrad bei Hinterradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 + N_1 \cos \alpha - N_1 \eta_r \sin \alpha \quad (20)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin \alpha + N_1 \eta_r \cos \alpha - mg \quad (21)$$

$$\sum M_1 = 0 = N_1 \eta_r R - mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_2 s \cos \beta - F_2(R + s \sin \beta) \quad (22)$$

Die Formeln (4), (5) und (6) besitzen ebenfalls Gültigkeit. Zusätzlich kommt die Bedingung (23) hinzu, die die maximale Stufenlänge l_b beschränkt. Würde (23) nicht gelten, könnte das Hinterrad die Stufe berühren, obwohl das Vorderrad das Hindernis noch nicht vollständig verlassen hat.

$$0 < l_b < s - 2R \quad (23)$$

Aus den Gleichungen (20) bis (22) ergeben sich nach Umformungsarbeiten die für das MATLAB-Programm gültigen Gleichungen (XV) – (XVII):

$$N_1 = \frac{mg(-s \cos \beta + s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta)}{R \eta_r - s \cos \beta (\sin \alpha + \eta_r \cos \alpha) + (\cos \alpha - \eta_r \sin \alpha)(R + s \sin \alpha)} \quad (XIII)$$

$$N_2 = mg - N_1(\sin \alpha - \eta_r \cos \alpha) \quad (XIV)$$

$$F_2 = N_1(\eta_r \sin \alpha - \cos \alpha) \quad (XV)$$

3.2.3 „B-C“ mit Hinterradantrieb

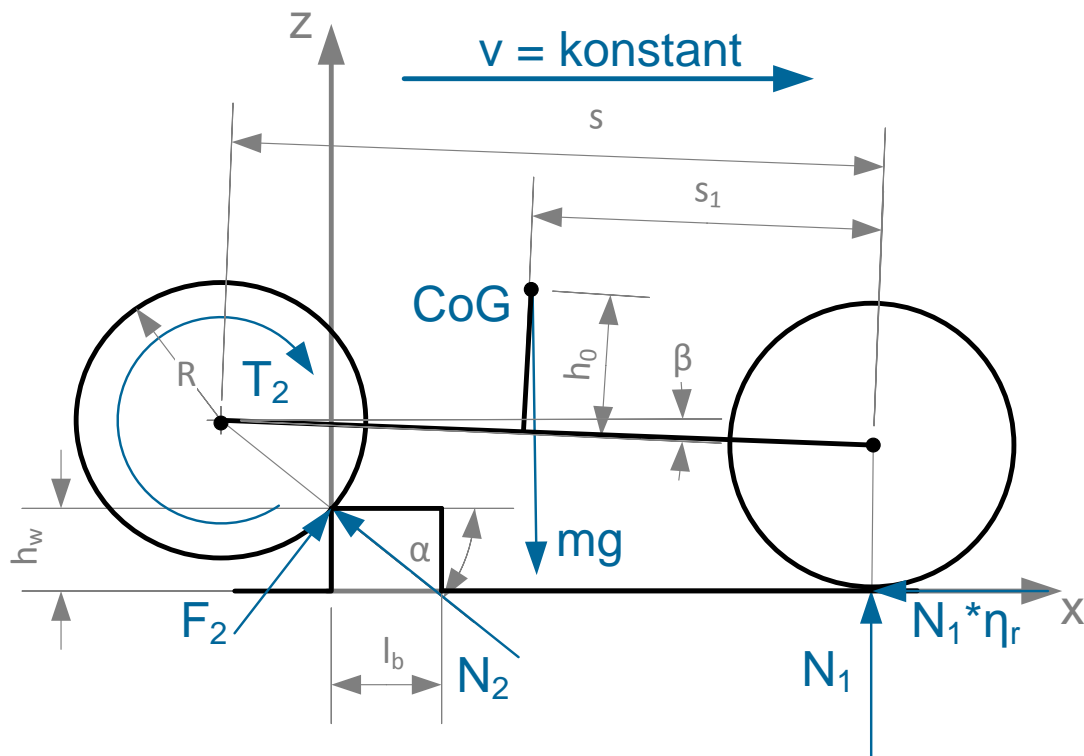


Abbildung 11: "B-C" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 11 ist die Skizze zum Ansatz des Hinauffahrens auf eine Stufe mit dem Hinterrad bei Hinterradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha - N_1 \eta_r \quad (24)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (25)$$

$$\sum M_2 = 0 = N_1 \eta_r (R + s \sin \beta) + mg ((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R \quad (26)$$

Es gelten zusätzlich die Gleichungen (4) – (6) und (23). Nach Umformungsschritten folgen die Gleichungen (XVI) – (XVIII), die im MATLAB – Programm gültig sind.

$$N_1 = \frac{mg((s - s_1)\cos\beta + h_0\sin\beta - R\cos\alpha)}{s\cos\beta - R\cos\alpha} \quad (\text{XVI})$$

$$N_2 = mgs\sin\alpha - N_1 \frac{(\cos\alpha(\eta_r\sin\alpha - \cos\alpha) + 1)}{\sin\alpha} \quad (\text{XVII})$$

$$F_2 = \frac{N_1\eta_r + N_2\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (\text{XVIII})$$

3.2.4 „B-D“ mit Hinterradantrieb

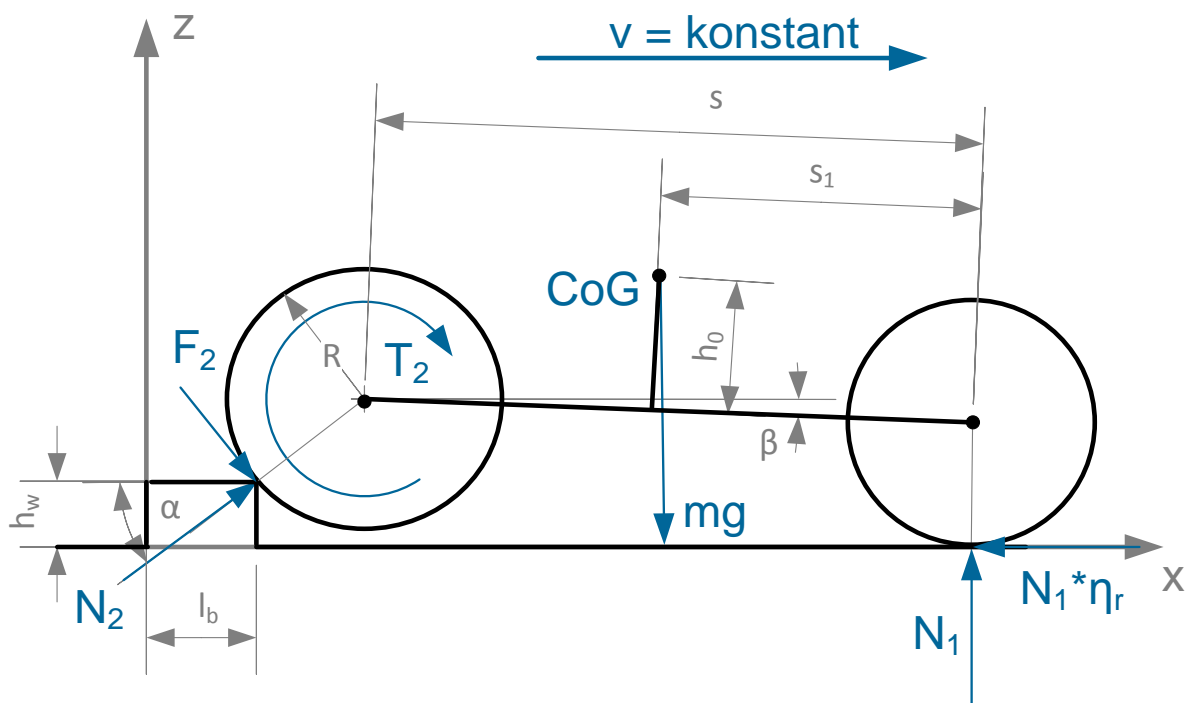


Abbildung 12: "B-D" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 12 ist die Skizze zum Ansatz des Hinunterfahrens einer Stufe mit dem Hinterrad bei Hinterradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2\sin\alpha + N_2\cos\alpha - N_1\eta_r \quad (27)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2\sin\alpha - F_2\cos\alpha - mg \quad (28)$$

$$\sum M_2 = 0 = N_1 \eta_r (R \sin \alpha + h_w) + mg((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R \quad (29)$$

Es gelten außerdem die Gleichungen (4) – (6) und (23). Daraus ergeben sich nach mehrmaligem Umformen die folgenden, im MATLAB-Programm gültigen, Gleichungen (XIX) – (XXI):

$$N_1 = \frac{mg \sin \alpha (R - ((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta))}{R \eta_r + s \cos \beta \sin \alpha + \cos^2 \alpha R (\tan \alpha - \eta_r) - \eta_r \sin \alpha (R \sin \alpha + h_w)} \quad (XIX)$$

$$N_2 = (mg \tan \alpha - N_1 (\tan \alpha - \eta_r)) \cos \alpha \quad (XX)$$

$$F_2 = \frac{N_1 \eta_r - N_2 \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (XXI)$$

Das Hinunterfahren des Hindernisses ist bereits aufgrund des Eigengewichts und der zu erwartenden geringen Werte für η_r möglich. Es wird jedoch ein Bremsmoment aufzubringen sein, um die Geschwindigkeit konstant zu halten. Dies resultiert in negativen Werten für F_2 .

3.2.5 „B-B“ mit Allradantrieb

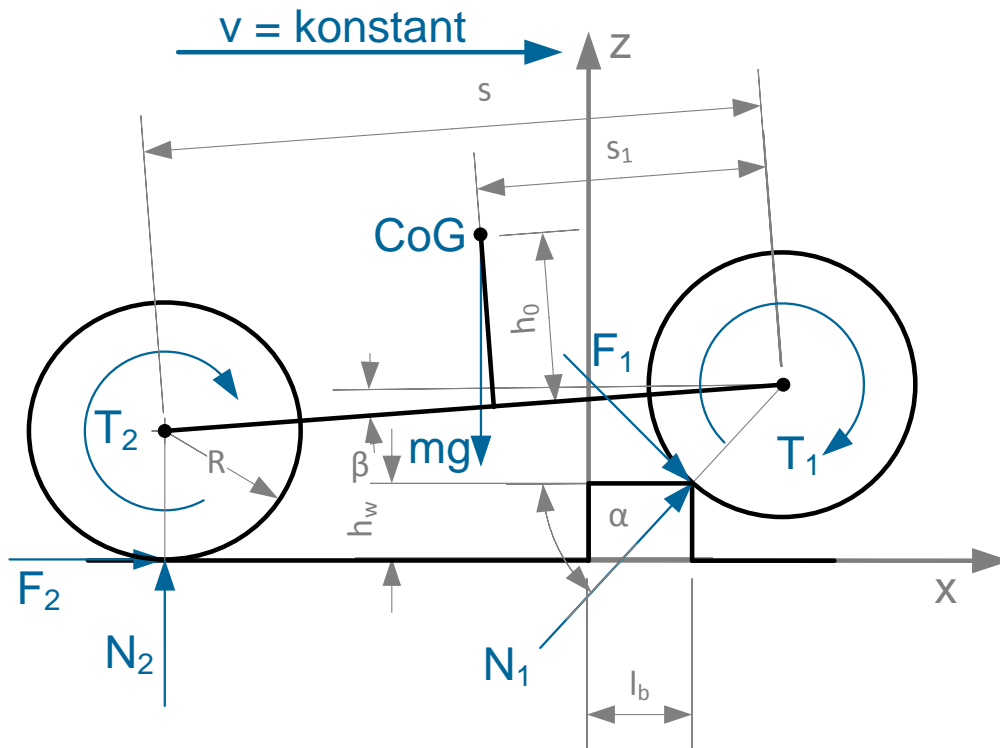


Abbildung 13: "B-B" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 13 ist die Skizze zum Ansatz des Hinunterfahrens einer Stufe mit dem Vorderrad bei Allradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 + N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha \quad (30)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin \alpha - F_1 \cos \alpha - mg \quad (31)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R - mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_2 s \cos \beta - F_2(R + s \sin \beta) \quad (32)$$

$$F_1 = F_2 \quad (33)$$

Zusätzlich haben die Gleichungen (4) – (6), (15) und (23) Gültigkeit. Aus den Gleichungen (30) und (33) ergibt sich, dass ein Hinunterfahren der Stufe mit dem

Vorderrad bei Allradantrieb kein Problem darstellt. Es ist für das Halten einer konstanten Geschwindigkeit sogar das Abbremsen vonnöten. In (XXII) – (XXIV) sind die für das MATLAB – Programm notwendigen Gleichungen ersichtlich.

$$N_1 = \frac{mg(\sin\alpha + 1)(h_0\sin\beta - (s - s_1)\cos\beta)}{\cos\alpha(s\cos\beta - 2R - s\sin\beta) - (1 + \sin\alpha)(s\cos\beta\sin\alpha)} \quad (\text{XXII})$$

$$N_2 = mg - N_1\sin\alpha - \frac{N_1\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{XXIII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_1\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{XXIV})$$

3.2.6 B-C“ mit Allradantrieb

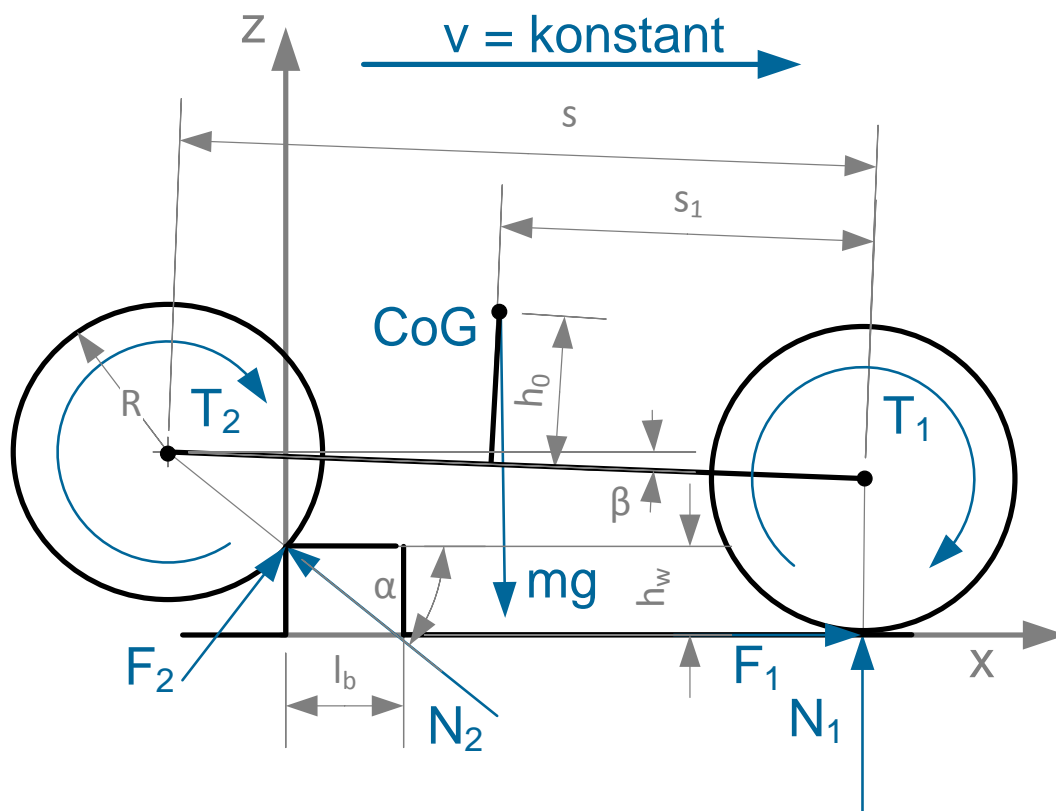


Abbildung 14: "B-C" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 14 ist die Skizze zum Ansatz des Hinauffahrens auf eine Stufe mit dem Hinterrad bei Allradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (34)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (35)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1(R + s \sin \beta) + mg((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R \quad (36)$$

$$F_1 = F_2 \quad (37)$$

Zusätzlich gelten die Gleichungen (4) – (6) und (23). Durch Umformen ergeben sich die im MATLAB-Programm gültigen Gleichungen (XXV) – (XXVII):

$$N_2 = \frac{mg(\sin \alpha + 1)(h_0 \sin \beta - s_1 \cos \beta)}{\cos \alpha (2R + s(\sin \beta - \sin^2 \alpha - \sin \alpha - \cos \alpha))} \quad (XXV)$$

$$N_1 = mg - \frac{N_2(\sin^2 \alpha + \sin \alpha + \cos \alpha)}{\sin \alpha + 1} \quad (XXVI)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos \alpha}{\sin \alpha + 1} \quad (XXVII)$$

3.2.7 „B-D“ mit Allradantrieb

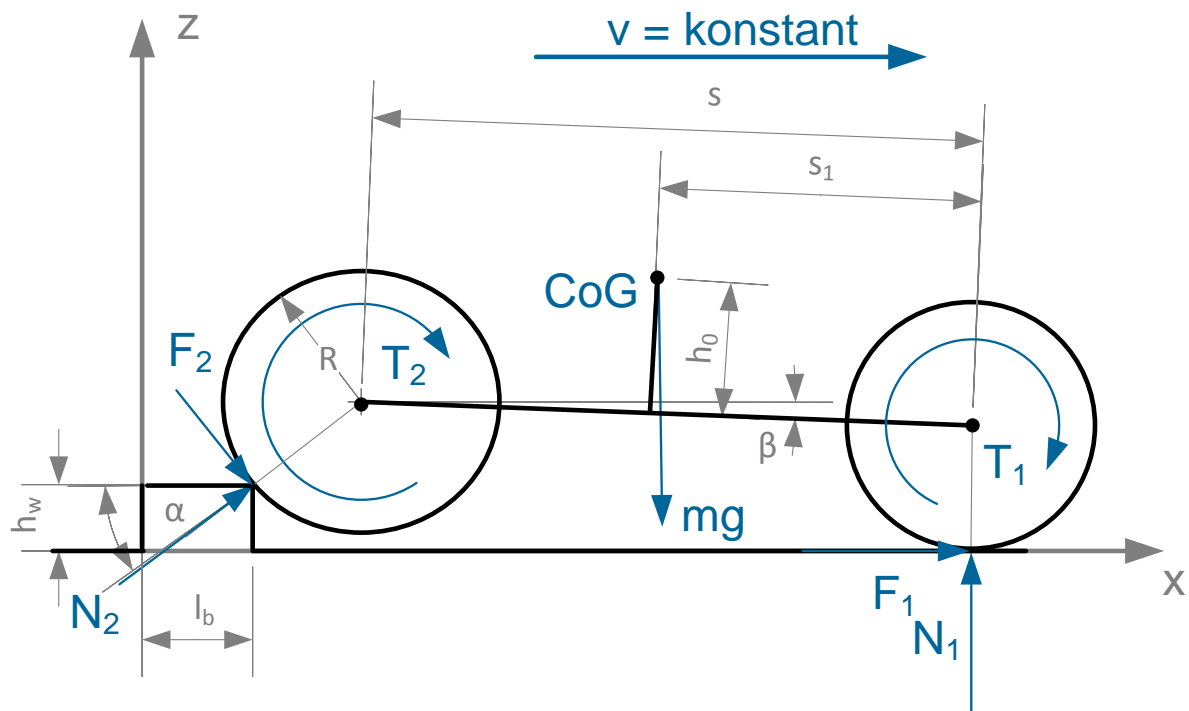


Abbildung 15: "B-D" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 15 ist die Skizze zum Ansatz des Hinunterfahrens einer Stufe mit dem Hinterrad bei Allradantrieb ersichtlich. Hieraus ergeben sich wiederum folgende Formeln, Beziehungen und Gültigkeitsbereiche:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (38)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (39)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1 (R + s \sin \beta) + mg ((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R \quad (40)$$

$$F_1 = F_2 \quad (41)$$

Zusätzlich haben die Glg. (4) – (6) und (23) Gültigkeit. Aus den Glg. (38) und (40) ist ersichtlich, dass das Herunterfahren der Stufe ohne Antriebskraft nur aufgrund des Eigengewichts möglich ist. Es ist zusätzlich ein Bremsmoment vonnöten, um die

Geschwindigkeit des Fahrzeuges konstant zu halten. In (XXVIII) – (XXX) sind die Berechnungen für das MATLAB – Programm ersichtlich.

$$N_2 = \frac{mg(\sin\alpha + 1)(h_0\sin\beta - s_1\cos\beta)}{\cos\alpha(2R + s(\sin\beta - \sin^2\alpha - \sin\alpha - \cos\alpha))} \quad (\text{XXVIII})$$

$$N_1 = mg - \frac{N_2(\sin^2\alpha + \sin\alpha + \cos\alpha)}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{XXIX})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{XXX})$$

3.3 Überschreitung eines Grabenhindernisses

Die Überschreitung eines Grabenhindernisses setzt sich pro Rad aus 2 Ansätzen zusammen. Der Bereich, in dem das Rad an der Kante abrollt, wird als „-1“ bezeichnet, ab dem Zeitpunkt, an dem das Rad die gegenüberliegende Kante berührt, gilt Ansatz „-2“.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$R\sin\alpha + s\sin\beta = R \quad (42)$$

$$0 < l_d < 2R \quad (43)$$

Zusätzlich gilt die Glg. (6). Aufgrund dieser Bedingung ist darauf zu achten, dass bei einer groß gewählten Grabenbreite l_d und einer niedrigen Hindernishöhe h_w kein Aufstandspunkt des Rades im Graben entsteht. Für diesen Fall würden die Fälle „B“ gelten, also das Hinunter- bzw. Hinauffahren einer Stufe. Es ist daher auch die Bedingung (44) zu berücksichtigen.

$$R(1 - \sin\alpha_{min}) < h_w \quad (44)$$

Die hier angeführten Gleichungen (42) – (44) sowie die bereits früher eingeführten Gleichungen (4), (6) und (15) sind für den gesamten Punkt 3.3 – also alle Überquerungsmöglichkeiten eines Grabenhindernisses – gültig.

3.3.1 „C-AD-1“ und „C-AE-1“ mit Hinterradantrieb und Allradantrieb

Das Hinabfahren in eine Senke – egal ob mit Vorder- oder Hinterrad, oder Hinterrad- oder Allradantrieb – benötigt Bremsmomente, um die Geschwindigkeit konstant zu halten. Diese werden mit folgenden Glg. (XXXI) – (XXXIII) & (XXXIV) – (XXXVI) bzw. (XXXVII) – (XXXIX) & (XL) – (XLII) berechnet. In folgender Abb. 16 ist der Ansatz „C-AD-1“ mit Hinterrad- und Allradantrieb dargestellt:

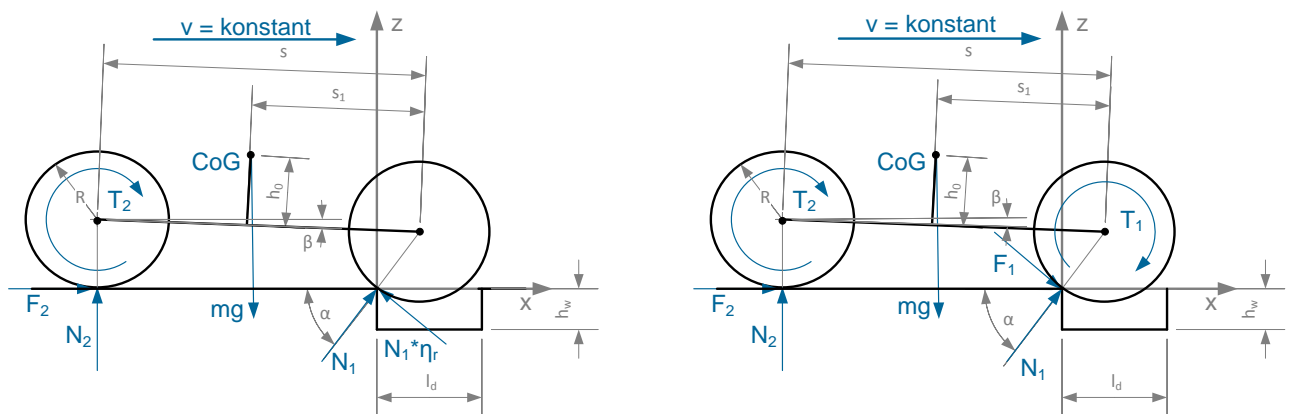


Abbildung 16: "C-AD-1" mit Hinterrad- und Allradantrieb (Ansatz)

Gleichungen für das Hinabfahren in eine Senke mit dem Vorderrad bei Hinterradantrieb (45) – (47):

$$\sum F_x = 0 = N_1 \cos \alpha - N_1 \eta_r \sin \alpha + F_2 \quad (45)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin \alpha + N_1 \eta_r \cos \alpha - mg \quad (46)$$

$$\sum M_1 = 0 = -N_1 \eta_r R + mg(s_1 \cos \beta - h_0 \sin \beta) - N_2 s \cos \beta + F_2 R \sin \alpha \quad (47)$$

Die im MATLAB – Programm gültigen Gleichungen (XXXI) – (XXXIII) lauten:

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta - h_0\sin\beta)}{\eta_r R - s\cos\beta(\sin\alpha + \eta_r\cos\alpha) - R\sin\alpha(\eta_r\sin\alpha - \cos\alpha)} \quad (\text{XXXI})$$

$$N_2 = mg - N_1(\sin\alpha + \eta_r\cos\alpha) \quad (\text{XXXII})$$

$$F_2 = N_1(\eta_r\sin\alpha - \cos\alpha) \quad (\text{XXXIII})$$

Gleichungen für das Hinabfahren in eine Senke mit dem Vorderrad bei Allradantrieb (48) – (51):

$$\sum F_x = 0 = N_1\cos\alpha + F_1\sin\alpha + F_2 \quad (48)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1\sin\alpha - F_1\cos\alpha - mg \quad (49)$$

$$\sum M_1 = 0 = F_1R + mg(s_1\cos\beta - h_0\sin\beta) - N_2s\cos\beta + F_2R\sin\alpha \quad (50)$$

$$F_1 = F_2 \quad (51)$$

Die im MATLAB – Programm gültigen Gleichungen (XXXIV) – (XXXVI) lauten:

$$N_1 = \frac{mg(\sin\alpha + 1)(-h_0\sin\beta + (s_1 - s)\cos\beta)}{\cos\alpha R(1 + \sin\alpha) - s\cos\beta(1 + \sin\alpha)} \quad (\text{XXXIV})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{XXXV})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_1\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{XXXVI})$$

In Abb. 17 sind die Ansätze für den Fall „C-AE-1“ mit Hinterrad- und Allradantrieb ersichtlich:

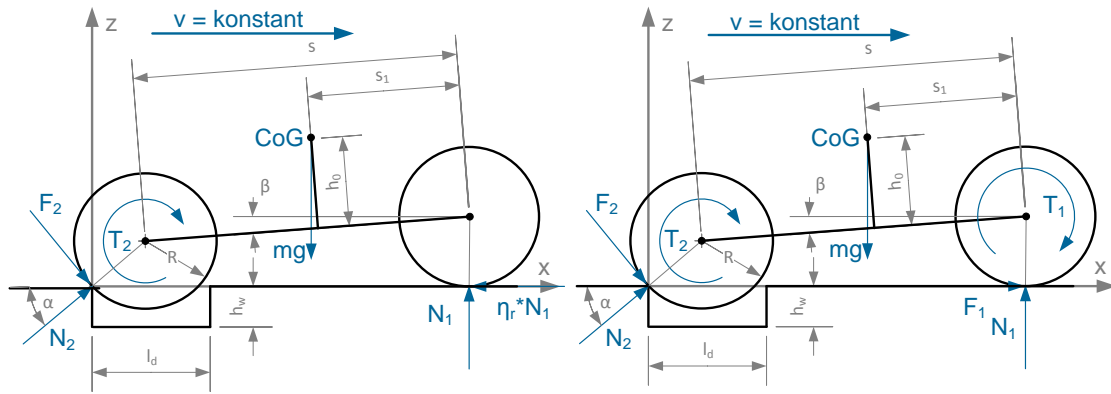


Abbildung 17: "C-AE-1" mit Hinterrad- und Allradantrieb (Ansatz)

Gleichungen für das Hinabfahren in eine Senke mit dem Hinterrad bei Hinterradantrieb (52) – (54):

$$\sum F_x = 0 = N_2 \cos \alpha - N_1 \eta_r + F_2 \sin \alpha \quad (52)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (53)$$

$$\sum M_2 = 0 = -N_1 \eta_r R \sin \alpha - mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) + N_1 s \cos \beta + F_2 R \quad (54)$$

Die im MATLAB – Programm gültigen Gleichungen (XXXVII) – (XXXIX) lauten:

$$N_2 = \frac{mg((s_1 - s) \cos \beta + h_0 \sin \beta)(\tan \alpha + \eta_r) \sin \alpha - \tan \alpha (\eta_r R (1 + \sin^2 \alpha) + R \eta_r)}{(\cos \alpha - \sin \alpha \tan \alpha)(\eta_r R \sin^2 \alpha - s \cos \beta \sin \alpha + R \eta_r) - R \cos \alpha (\tan \alpha + \eta_r)} \quad (XXXVII)$$

$$N_1 = \frac{mg \tan \alpha + N_2 (\cos \alpha - \sin \alpha \tan \alpha)}{\tan \alpha + \eta_r} \quad (XXXVIII)$$

$$F_2 = \frac{N_2 \cos \alpha - N_1 \eta_r}{\sin \alpha} \quad (XXXIX)$$

Gleichungen für das Hinabfahren in eine Senke mit dem Hinterrad bei Allradantrieb (55) – (58):

$$\sum F_x = 0 = N_2 \cos \alpha + F_2 \sin \alpha + F_1 \quad (55)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (56)$$

$$\sum M_2 = 0 = F_2 R - mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) + N_1 s \cos \beta + F_1 R \sin \alpha \quad (57)$$

$$F_1 = F_2 \quad (58)$$

Die im MATLAB – Programm gültigen Gleichungen (XL) – (XLII) lauten:

$$N_1 = \frac{mg(R \cos \alpha - h_0 \sin \beta + (s - s_1) \cos \beta)}{R \cos \alpha + s \cos \beta} \quad (XL)$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (XLI)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_2 \cos \alpha}{\sin \alpha + 1} \quad (XLII)$$

Der Übergang von Fall „-1“ – also das Hinunterfahren des Hindernisses auf der einen Seite – geht nahtlos in Fall „-2“ – also das Hinauffahren des Hindernisses auf der anderen Seite – über. Fall „-1“ ist gültig im Bereich

$$0 \leq \beta \leq \beta_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{R}{s} \left(1 - \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{l_d}{2R} \right) \right) \right) \right).$$

In diesem Punkt berührt das Rad an 2 Punkten das Hindernis. Hier setzt Fall „-2“ ein, der im Bereich gültig $\beta_{\max} \geq \beta \geq 0$ ist. Dieser Fall gilt, bis das Rad wieder die Ebene erreicht hat und auf dieser horizontal weiterfährt.

3.3.2 „C-AD-2“ mit Hinterradantrieb

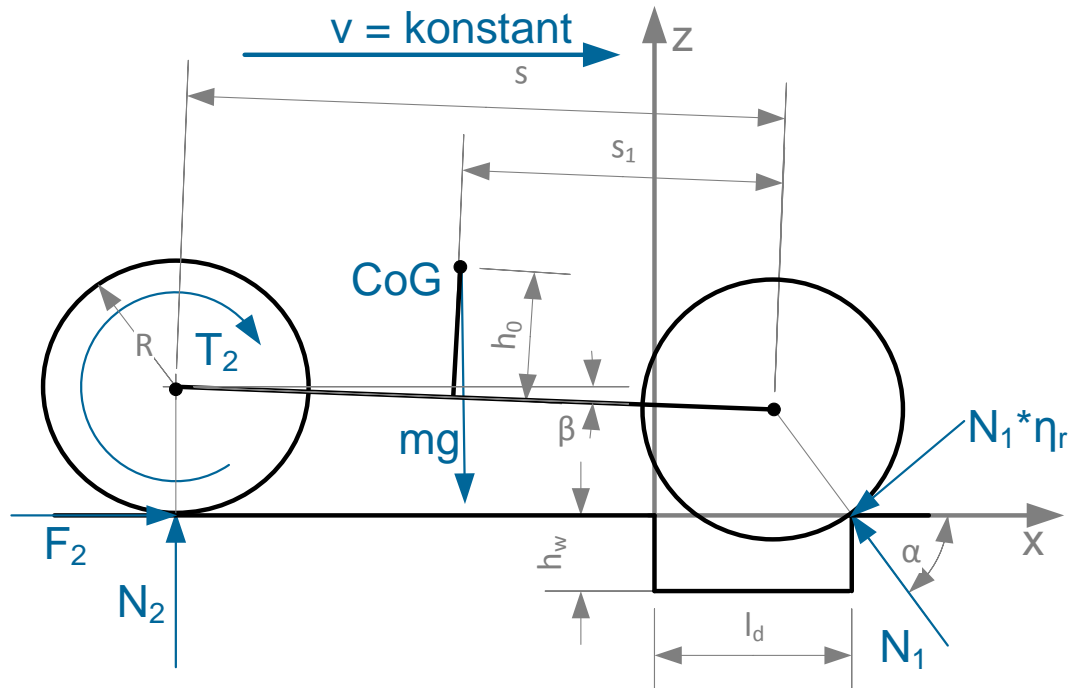


Abbildung 18: "C-AD-2" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 18 ist der Ansatz zum Überqueren eines Grabenhindernisses mit dem Vorderrad bei Hinterradantrieb ersichtlich. Es wird der Teil betrachtet, indem das Vorderrad nur Kontakt mit der gegenüberliegenden Grabenwand aufweist – Fall „2“. Unter diesen Umständen gelten die unter Punkt 3.3 aufgeführten Gleichungen sowie zusätzlich die Glg. (59) – (61).

$$\sum F_x = 0 = -N_1(\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha) + F_2 \quad (59)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1(\sin\alpha - \eta_r \cos\alpha) + N_2 - mg \quad (60)$$

$$\sum M_1 = 0 = N_1\eta_r R + N_2 s \cos\beta - F_2 R \sin\alpha - mg(s_1 \cos\beta - h_0 \sin\beta) \quad (61)$$

Nach Umformarbeiten ergeben sich die für das MATLAB-Programm relevanten Gleichungen (XLIII) – (XLV).

$$F_2 = N_1(\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha) \quad (\text{XLIII})$$

$$N_2 = mg - N_1(\sin\alpha - \eta_r \cos\alpha) \quad (\text{XLIV})$$

$$N_1 = \frac{mg(h_0 \sin\beta - (s - s_1) \cos\beta)}{R\eta_r - s \cos\beta(\sin\alpha - \eta_r \cos\alpha) - R \sin\alpha(\cos\alpha + \eta_r \sin\alpha)} \quad (\text{XLV})$$

3.3.3 „C-AE-2“ mit Hinterradantrieb

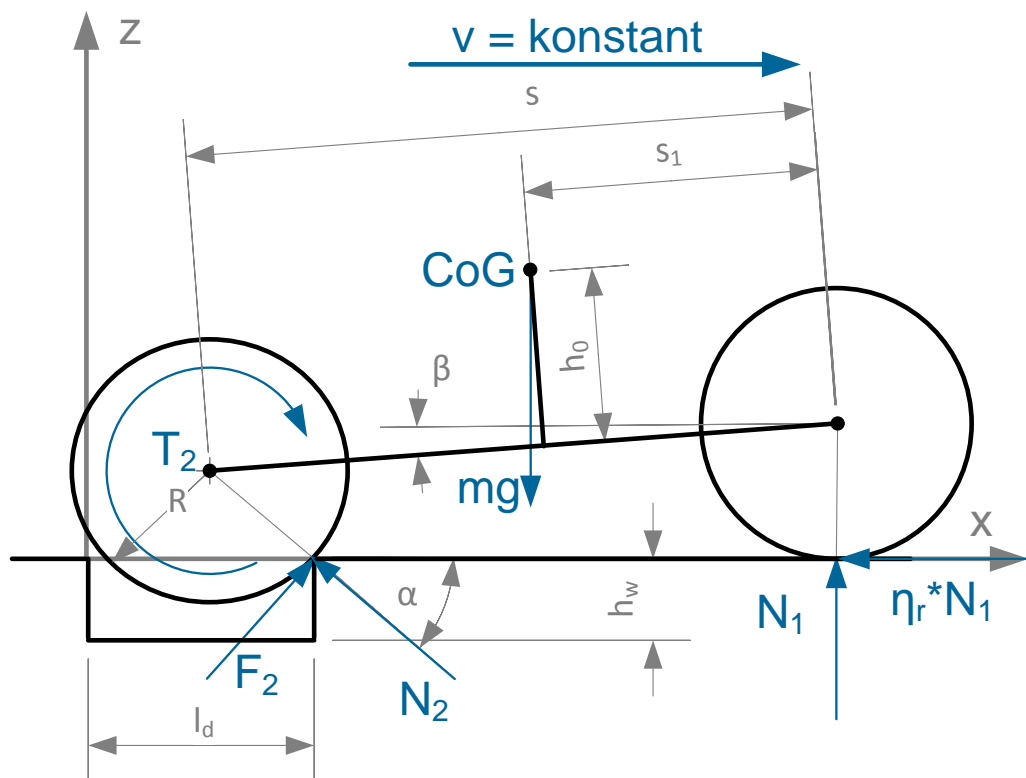


Abbildung 19: "C-AE-" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 19 ist der Ansatz für das Überqueren eines Grabenhindernisses mit dem Hinterrad bei Hinterradantrieb ersichtlich. Es wird hier nur der Fall „2“ betrachtet. Es gelten zusätzlich zu den in 3.2 definierten Bedingungen und Zusammenhängen die folgenden Gleichungen (62) – (64):

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_1 \eta_r - N_2 \cos \alpha \quad (62)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (63)$$

$$\sum M_2 = 0 = N_1 \eta_r R \sin \alpha + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - F_2 R - N_1 s \cos \beta \quad (64)$$

Daraus wiederum resultieren nach Umformarbeiten die im MATLAB-Programm hinterlegten Gleichungen (XLVI) – (XLVIII).

$$N_1 = \frac{mg(R \cos \alpha + h_0 \sin \beta - (s - s_1) \cos \beta)}{R \cos \alpha - s \cos \beta} \quad (\text{XLVI})$$

$$N_2 = mg \sin \alpha - N_1 (\sin \alpha + \eta_r \cos \alpha) \quad (\text{XLVII})$$

$$F_2 = \frac{N_1 \eta_r + N_2 \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (\text{XLVIII})$$

3.3.4 „C-AD-2“ mit Allradantrieb

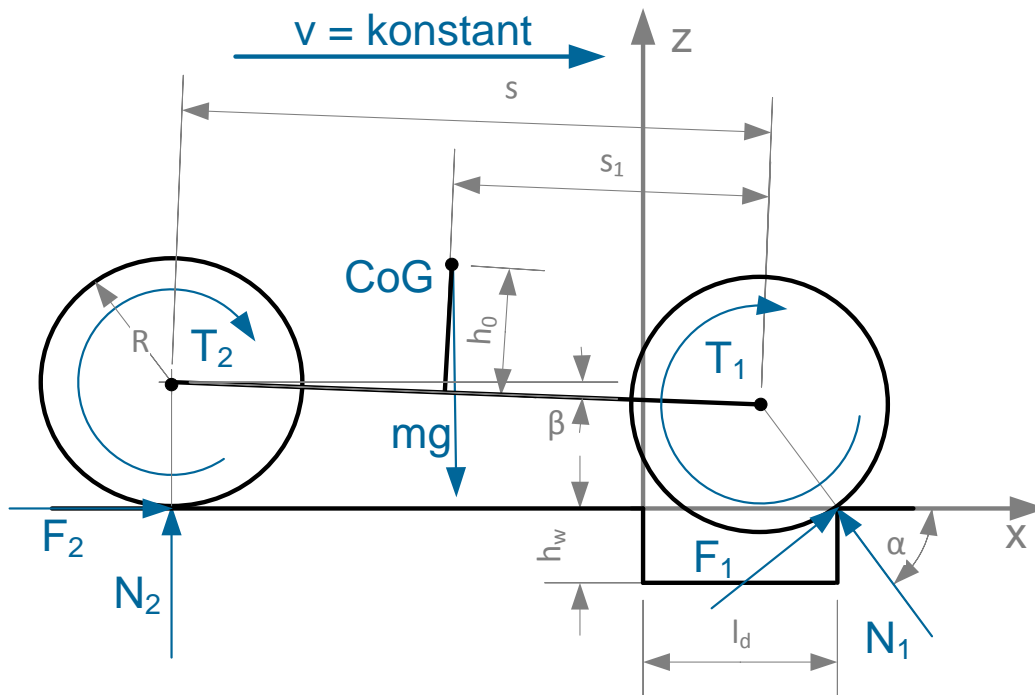


Abbildung 20: "C-AD-2" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 20 ist der Ansatz der Überquerung eines Grabenhindernisses mit dem Vorderrad bei Allradantrieb dargestellt. Es wird nur der Fall „2“ betrachtet – der Berührungspunkt des Rades mit dem Graben liegt also auf der gegenüberliegenden Seite. Es gelten – zusätzlich zu bereits erwähnten Gleichungen – die Glg. (65) – (68).

$$\sum F_x = 0 = -N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha + F_2 \quad (65)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 \sin \alpha + F_1 \cos \alpha + N_2 - mg \quad (66)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R + N_2 s \cos \beta - F_2 R \sin \alpha - mg(s_1 \cos \beta - h_0 \sin \beta) \quad (67)$$

$$F_1 = F_2 \quad (68)$$

Daraus ergeben sich nach Umformarbeiten wiederum die im MATLAB – Programm gültigen Formeln (XLIX) – (LI)

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta + h_0\sin\beta)}{R\cos\alpha + s\cos\beta} \quad (\text{XLIX})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{L})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_1\cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (\text{LI})$$

3.3.5 „C-AE-2“ mit Allradantrieb

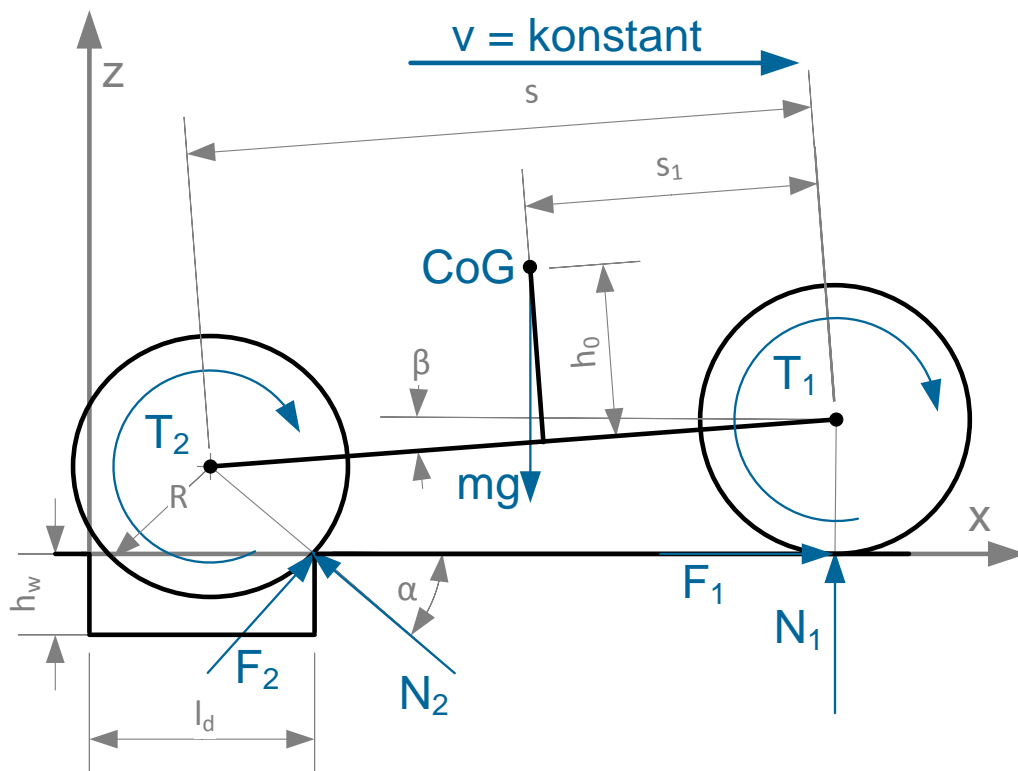


Abbildung 21: "C-AE-2" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 21 ist der Ansatz zur Überquerung eines Grabenhindernisses mit dem Hinterrad bei Allradantrieb ersichtlich. Es wird hier wiederum nur der Fall „2“ betrachtet, da Fall „1“ in 3.3.1 als irrelevant für die Berechnung ermittelt wurde. Der

Berührungspunkt des Rades mit dem Hindernis liegt also auf der der Anfahrt gegenüber liegenden Seite des Grabens. Aus Abb. 21 ergeben sich somit die Glg. (69) – (72).

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + F_1 - N_2 \cos \alpha \quad (69)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (70)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1 R \sin \alpha + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - F_2 R - N_1 s \cos \beta \quad (71)$$

$$F_1 = F_2 \quad (72)$$

Daraus ergeben sich nach Umformarbeiten die für das MATLAB – Programm relevanten Gleichungen (LII) – (LIV):

$$N_1 = \frac{mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta - R \cos \alpha)}{s \cos \beta - R \cos \alpha} \quad (\text{LII})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LIII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos \alpha}{1 + \sin \alpha} \quad (\text{LIV})$$

3.4 Überschreitung eines realen Plateauhindernisses

In diesem Punkt wird das Überschreiten eines realen Plateauhindernisses – wie in 2.2 und in Abb. 23 definiert – behandelt. Es werden – um ausreichende Vergleichsmöglichkeiten zum idealen Hindernis zu gewährleisten – die Fälle „A-A“ & „A-B“ jeweils mit Hinterradantrieb und Allradantrieb behandelt. Auf die Hindernisformen „Stufe“ und „Graben“ mit „realer Hindernisform“ wird nicht näher eingegangen. Für die Benutzung des MATLAB-Programms sind zusätzlich zu den bereits bekannten Variablen R , h_w , die in Abb. 22 folgenden Kenngrößen einzugeben:

Variable	Bedeutung
k_1 [-]	Steigung der linearen Funktion $f_1(x)$
l_x [m]	Länge des Hindernisses

Abbildung 22: Zusätzliche Variablen für reales Hindernis

Für die Variablen sind folgende Gültigkeitsbereiche zu beachten:

Theoretisch wäre eine maximale Steigung $k_1 = \infty$ möglich. Diese Eingabe ist in MATLAB jedoch nicht vorgesehen, daher wird die max. Steigung begrenzt. Die minimale Steigung resultiert aus den vom Benutzer einzugebenden Werten l_x und h_w .

$$\frac{h_w}{l_x} \leq k_1 \leq 100000 \quad (73)$$

Die Bedingung eines stetigen Übergangs von $f_1(x)$ auf $f_2(x)$ sowie der von $f_2(x)$ auf die Horizontale (wie in 2.2 angegeben) muss erfüllt sein, das Programm wählt unter Einhaltung der Stetigkeitsbedingungen und der geometrischen Bedingungen den Radius von $f_2(x)$ wie folgt:

$$r(1 - \cos\gamma) \leq h_w \quad (74)$$

$$r \sin\gamma \leq l_x \quad (75)$$

$$(x_1 \ z_1) \begin{pmatrix} l_x - x_1 \\ -r \cos \gamma \end{pmatrix} = 0 \quad (76)$$

$$r(1 - \cos \gamma) = h_w - k_1 x_1 \quad (77)$$

(76) basiert auf der Tatsache, dass das Skalarprodukt zweier zueinander orthogonaler Vektoren 0 ergibt. Siehe hierzu auch (79), (81) und (82). (77) stellt den geometrischen Zusammenhang zwischen r und x_1 unter Verwendung von $z_1 = k_1 x_1$ dar. Die Länge des Hindernisses muss größer als 0 sein. Das MATLAB Programm berechnet nun aufgrund dieser Bedingungen ein „ r “ und passt die Kurvenform an – ist dies nicht möglich (k_1 zu groß oder zu klein, siehe (73)), wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

$$l_x > 0 \quad (78)$$

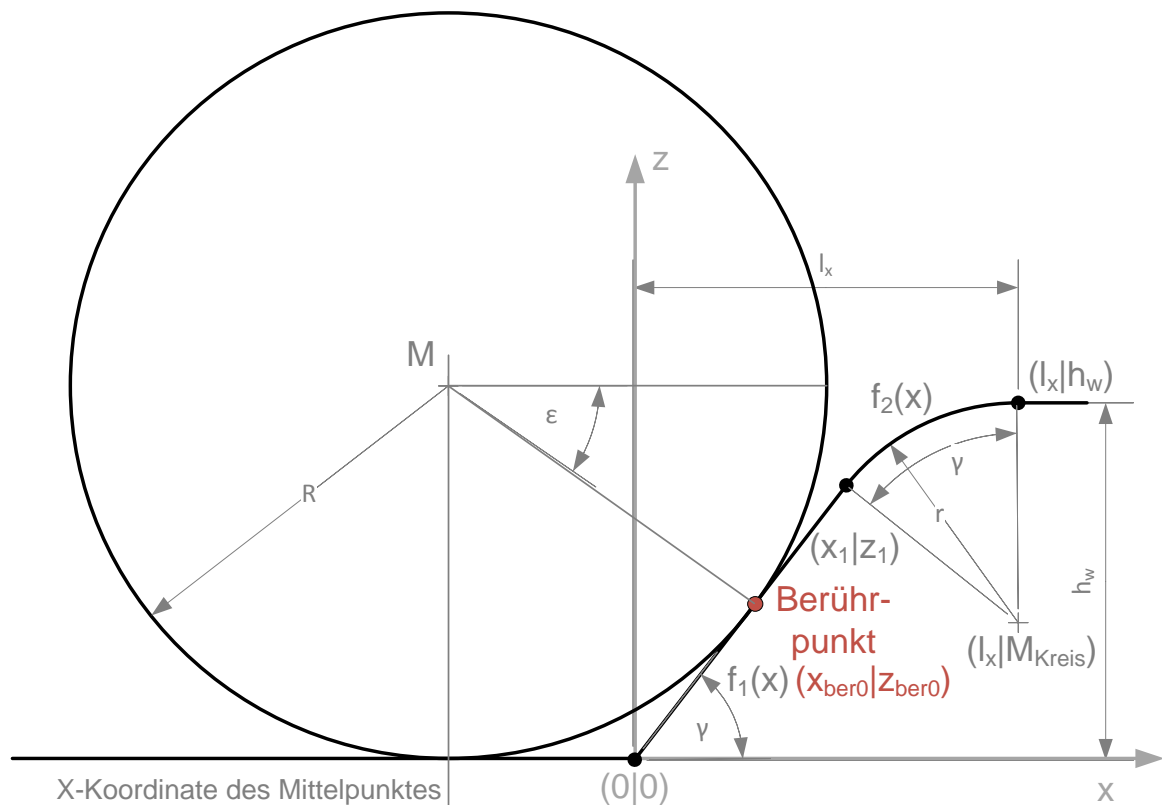


Abbildung 23: Reales Hindernis - Geometrische Verhältnisse – Berührungspunkt auf $f_1(x)$ liegend

Fall 1:

In Abb. 23 sind die geometrischen Verhältnisse einer realen Stufe ersichtlich. Es gelten gemäß 2.2 und Abb. 23 folgende Zusammenhänge:

$$\gamma = \text{atan}(k_1) \quad (79)$$

$$\varepsilon = 90^\circ - \gamma \quad (80)$$

$$z_1 = h_w - r(1 - \cos\gamma) \quad (81)$$

$$x_1 = l_x - r \sin\gamma \quad (82)$$

(81) und (82) geben die Koordinaten des Übergangspunktes $(x_1|z_1)$ an. Zusätzlich gilt die Glg. (6). Unter der Voraussetzung, dass das Rad das Hindernis auf $f_1(x)$ berührt, gilt:

$$z_{ber0} = R(1 - \sin\varepsilon) \quad (83)$$

$$x_{ber0} = l_x - r \sin\gamma \quad (84)$$

Fall 2:

Unter der Voraussetzung, dass das Rad das Hindernis erstmalig auf $f_2(x)$ berührt, also die konstante Steigung nur auf einem kleinen Teil des Hindernisses auftritt, gilt (siehe Abb. 24):

$$z_{ber} = z_1 + r \cos\varepsilon' \quad (85)$$

$$x_{ber} = x_1 + r(1 - \sin\varepsilon') \quad (86)$$

$$z_{ber}(x_{ber}) = h_w - r(1 - \cos\left(\text{asin}\left(\frac{l_x - x_{ber}}{r}\right)\right)) \text{ für } x_1 \leq x_{ber} \leq l_x \quad (85e)$$

(85e) ist die explizite Darstellung von $z_{ber}(x_{ber})$.

Als ε' wird der Winkel zwischen der Berührnormalen des Rades und der Horizontalen verstanden – dieser Winkel ist nur dann vorhanden, wenn der Berührungspunkt auf $f_2(x)$ liegt. In diesem Fall gilt weiterhin:

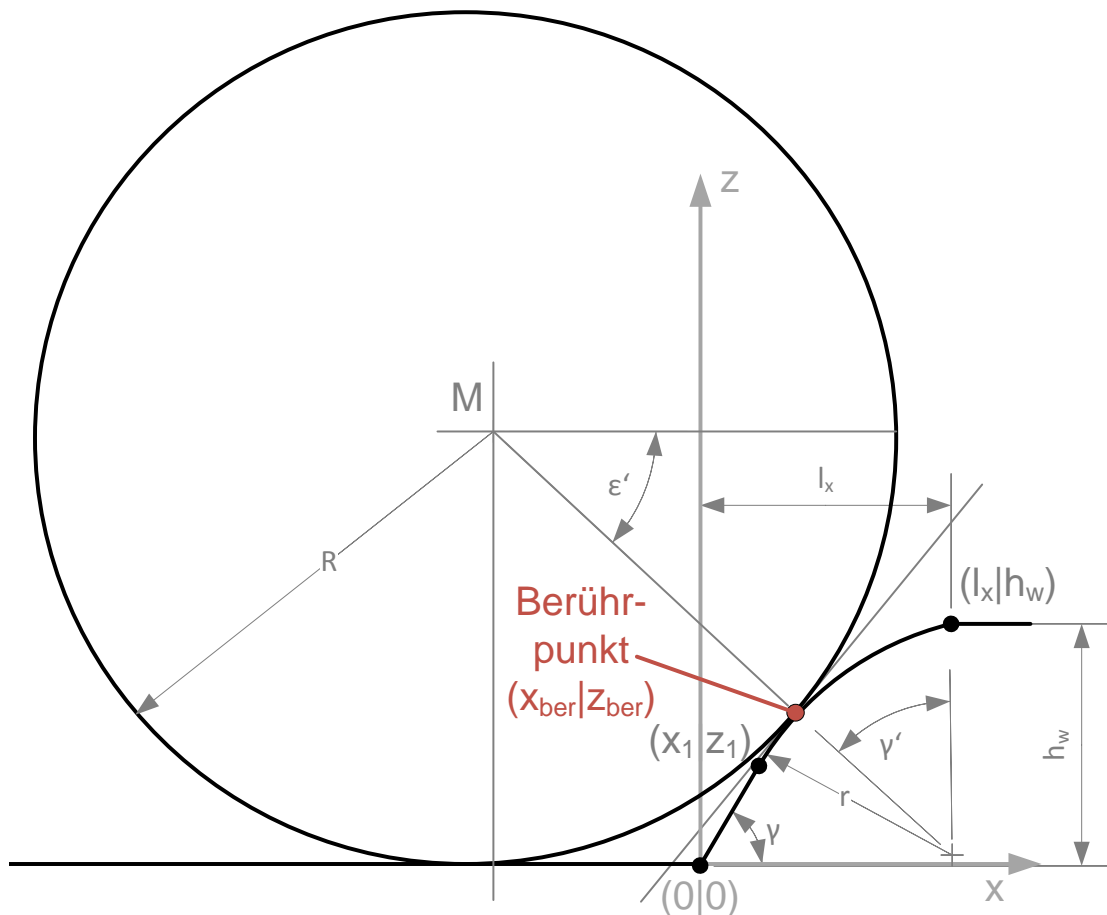
$$h_w - r(1 - \cos\gamma') + R\sin\varepsilon' = R \quad (87)$$

$$\gamma' = 90^\circ - \varepsilon' \quad (88)$$

Der Berührungspunkt ist durch $(x_{ber}|z_{ber})$ bestimmt. Die Bedeutung der restlichen Variablen ist in Kapitel 2.2 ersichtlich. Für die Lage des Berührungspunktes auf dem Hindernis gilt:

$$\text{Berührungspunkt liegt auf } \begin{cases} f_1(x) & \text{für } z_{ber} \leq z_1 \\ f_2(x) & \text{für } z_{ber} > z_1 \end{cases} \quad (89)$$

Abb. 24 zeigt die geometrischen Verhältnisse für den Fall 2, wo der Berührungspunkt auf $f_2(x)$ liegt. Für die Berechnung der wirkenden Kräfte sind für das MATLAB – Programm 2 Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall liegt der Berührungspunkt zuerst auf $f_1(x)$ und rollt dann am Hindernis ab über $f_2(x)$ bis zur horizontalen Weiterfahrt. Der Übergangspunkt von $f_1(x)$ auf $f_2(x)$ liegt hierbei im Punkt $(x_1|z_1)$. Im zweiten Fall liegt der erste Berührungspunkt des Rades auf $f_2(x)$ (siehe hierzu Abb. 24) und rollt auch hier bis zur horizontalen Weiterfahrt auf dem Hindernis ab. Das MATLAB – Programm wählt aufgrund der einzugebenden Hindernis- und Fahrzeugparameter selbstständig den zu berechnenden Fall aus.

Abbildung 24: Reales Hindernis - Berührungspunkt auf $f_2(x)$ liegend

Übergang von Fall 1 zu Fall 2 (Vorderrad befährt Hindernis, Hinterrad auf Boden):

Da Fall 1 auch Fall 2 einschließt - das Rad rollt ja auch auf der Kreisbogenkontur ab, wenn es das Hindernis erstmalig auf der Geraden berührt - , wird anschließend der Übergang dargestellt. In [Abb. 25](#) ist dieser Übergang ersichtlich. Das Vorderrad rollt hierbei auf der linearen Funktion $f_1(x)$, während sich das Hinterrad noch auf dem Boden befindet.

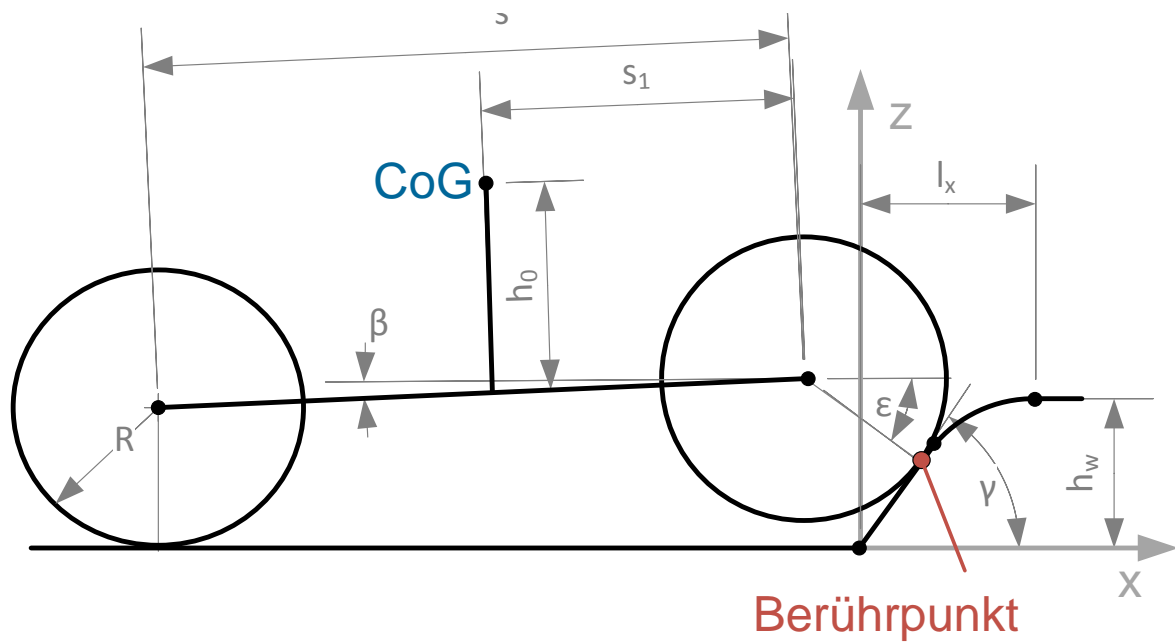


Abbildung 25: Übergang von Fall 1 auf Fall 2

Für diesen Fall gelten die Gleichungen (90) und (91). Die Winkel ϵ bzw. γ bleiben konstant bis zum Eintreten des Fall 2. Die Koordinaten des Berührungspunktes ($x_{\text{ber}}|z_{\text{ber}}$) und der Neigungswinkel β variieren jedoch mit sich ändernder Position des Vorderrades.

Im Folgenden werden die Überschreitungsarten „A-A“ und „A-B“ mit Hinterrad- und Allradantrieb am realen Hindernis berechnet. In den Ansätzen ist teilweise Fall 1 – also der Berührungspunkt auf $f_1(x)$ – und teilweise Fall 2 – Berührungspunkt auf $f_2(x)$ – dargestellt, jedoch berechnet das MATLAB – Programm selbstverständlich beide Fälle. – Auf Angabe einer Skizze wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

3.4.1 „A-A“ mit Hinterradantrieb

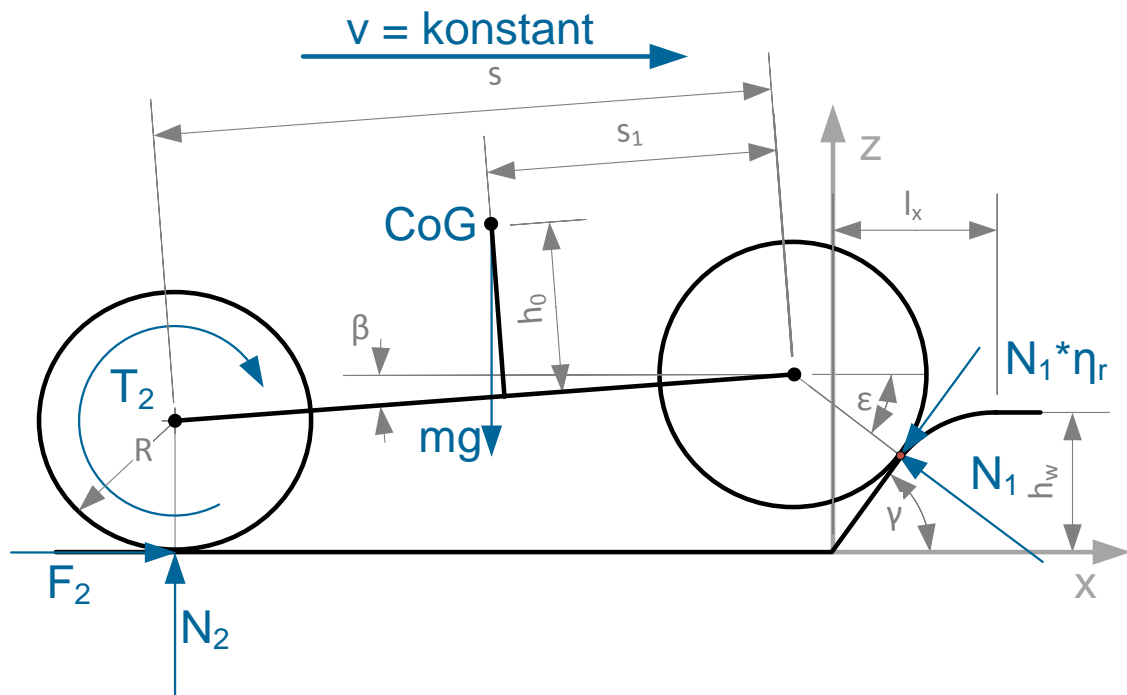


Abbildung 26: Reales Hindernis - "A-A" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 26 ist der Ansatz für das Hinauffahren eines realen Hindernisses mit dem Vorderrad bei Hinterradantrieb ersichtlich (**Dargestellt ist Fall 1**). Für Fall 1 – Berührungspunkt zwischen Rad und Hindernis liegt auf $f_1(x)$ – gelten folgende geometrische Zusammenhänge und Kräftegleichgewichte:

$$R + s * \sin\beta = R \sin\epsilon + z_{ber} \quad (90)$$

$$0 \leq \beta \leq \text{asin}\left(\frac{z_1 - R(1 - \cos\gamma)}{s}\right) \quad (91)$$

$$\sum F_x = 0 = -N_1(\sin\gamma + \eta_r \cos\gamma) + F_2 \quad (92)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1(\cos\gamma - \eta_r \sin\gamma) + N_2 - mg \quad (93)$$

$$\sum M_1 = 0 = N_2 s \cos\beta - F_2(R + s \sin\beta) + N_1 \eta_r R - mg(s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta) \quad (94)$$

Daraus ergeben sich die für das MATLAB – Programm wichtigen Gleichungen (LV) – (LVII):

$$N_1 = \frac{mg(h_0 \sin\beta - (s - s_1) \cos\beta)}{\eta_r R - s \cos\beta (\cos\gamma - \eta_r \sin\gamma) - (R + s \sin\beta) (\sin\gamma + \eta_r \cos\gamma)} \quad (\text{LV})$$

$$N_2 = mg - N_1 (\cos\gamma - \eta_r \sin\gamma) \quad (\text{LVI})$$

$$F_2 = N_1 (\sin\gamma + \eta_r \cos\gamma) \quad (\text{LVII})$$

Für Fall 2 gelten dieselben Kräfte- und Momentengleichgewichte wie in Fall 1 und folgende geometrische Zusammenhänge:

$$R + s * \sin\beta = R \sin\epsilon' + z_{ber} \dots \text{mit } z_{ber} = h_w - r(1 - \cos\gamma') \quad (96)$$

$$\text{asin}\left(\frac{z_1 - R(1 - \cos\gamma)}{s}\right) \leq \beta \leq \text{asin}\left(\frac{h_w}{s}\right) \quad (97)$$

Einzig die Winkel γ und ϵ sind für den Fall 1 auf γ' bzw. ϵ' zu ändern. Diese Winkel sind jetzt von der Lage des Vorderrades abhängig, siehe hierzu (87) und (88).

3.4.2 „A-B“ mit Hinterradantrieb

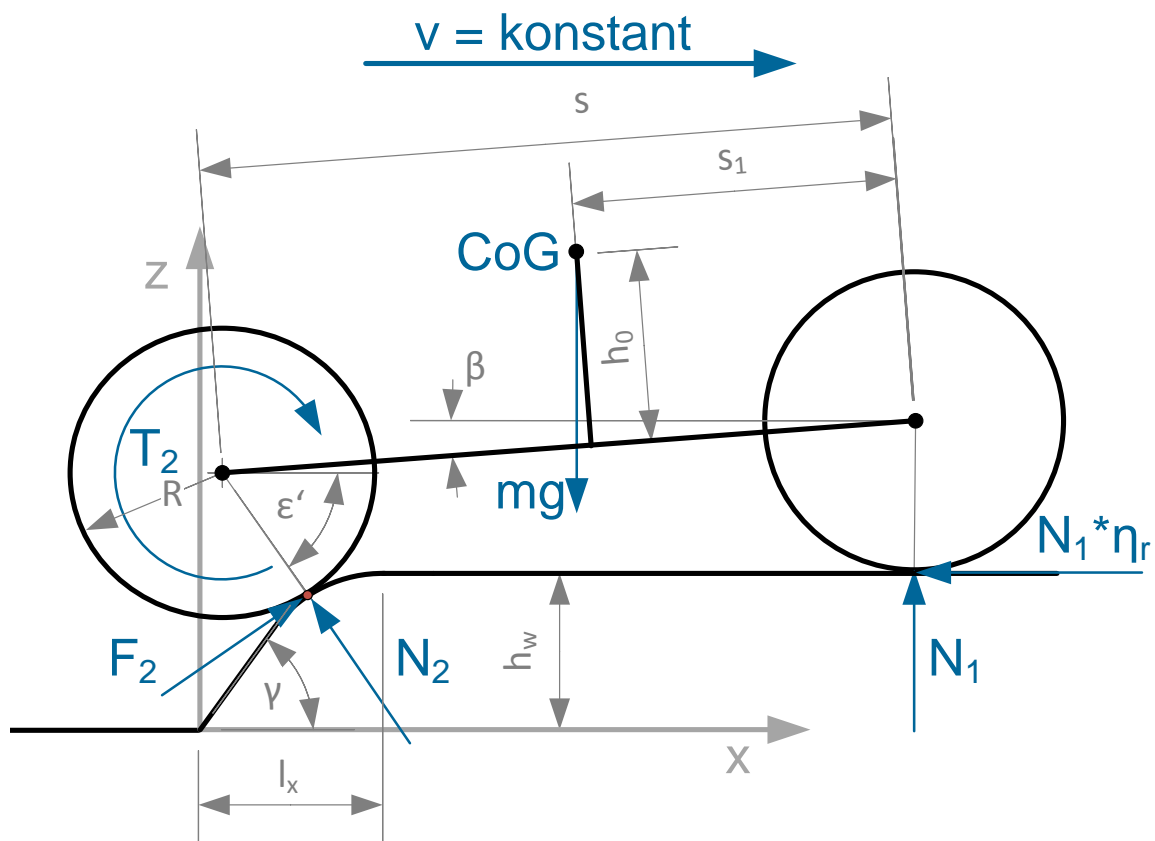


Abbildung 27: Reales Hindernis - "A-B" mit Hinterradantrieb (Ansatz)

In Abb. 27 ist das Hinauffahren eines realen Hindernisses mit dem Hinterrad bei Hinterradantrieb ersichtlich (**Dargestellt ist hier Fall 2**). Es gelten folgende geometrische Zusammenhänge und Kräfte- & Momentengleichgewichte für Fall 1:

$$R + h_w = s \sin \beta + R \sin \varepsilon + z_{ber} \quad (98)$$

$$\operatorname{asin}\left(\frac{h_w}{s}\right) \geq \beta \geq \operatorname{asin}\left(\frac{(r+R)(1-\cos\gamma)}{s}\right) \quad (99)$$

$$\sum F_x = 0 = -N_1 \eta_r + F_2 \cos \gamma - N_2 \sin \gamma \quad (100)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \cos \gamma + F_2 \sin \gamma - mg \quad (101)$$

$$\sum M_2 = 0 = N_1 s \cos\beta + F_2 R - N_1 \eta_r (R - s \sin\beta) - mg((s - s_1) \cos\beta - h_0 \sin\beta) \quad (102)$$

Daraus ergeben sich wiederum die in MATLAB gültigen Gleichungen (LVIII) – (LX):

$$N_1 = \frac{mg(\cos\gamma((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta) - \frac{R\sin\gamma}{\cos\gamma + \sin^2\gamma}}{\cos\gamma(s\cos\beta - \eta_r(R - s\sin\beta)) + R\eta_r - \frac{R\sin\gamma(1 + \eta_r\sin\gamma)}{\cos\gamma + \sin^2\gamma}} \quad (\text{LVIII})$$

$$N_2 = \frac{mg - N_1(1 + \eta_r\sin\gamma)}{\cos\gamma + \sin^2\gamma} \quad (\text{LIX})$$

$$F_2 = \frac{N_1\eta_r + N_2\sin\gamma}{\cos\gamma} \quad (\text{LX})$$

Für Fall 2 gelten dieselben Kräfte- und Momentengleichgewichte wie in Fall 1 und folgende geometrische Zusammenhänge:

$$R + h_w = s * \sin\beta + R\sin\epsilon' + z_{ber} \dots \text{mit } z_{ber} = h_w - r(1 - \cos\gamma') \quad (103)$$

$$\text{asin}\left(\frac{(r + R)(1 - \cos\gamma)}{s}\right) \geq \beta \geq 0 \quad (104)$$

Einzig die Winkel γ und ϵ sind für den Fall 2 auf γ' bzw. ϵ' zu ändern. Diese Winkel sind jetzt von der Lage des Hinterrades abhängig.

3.4.3 „A-A“ mit Allradantrieb

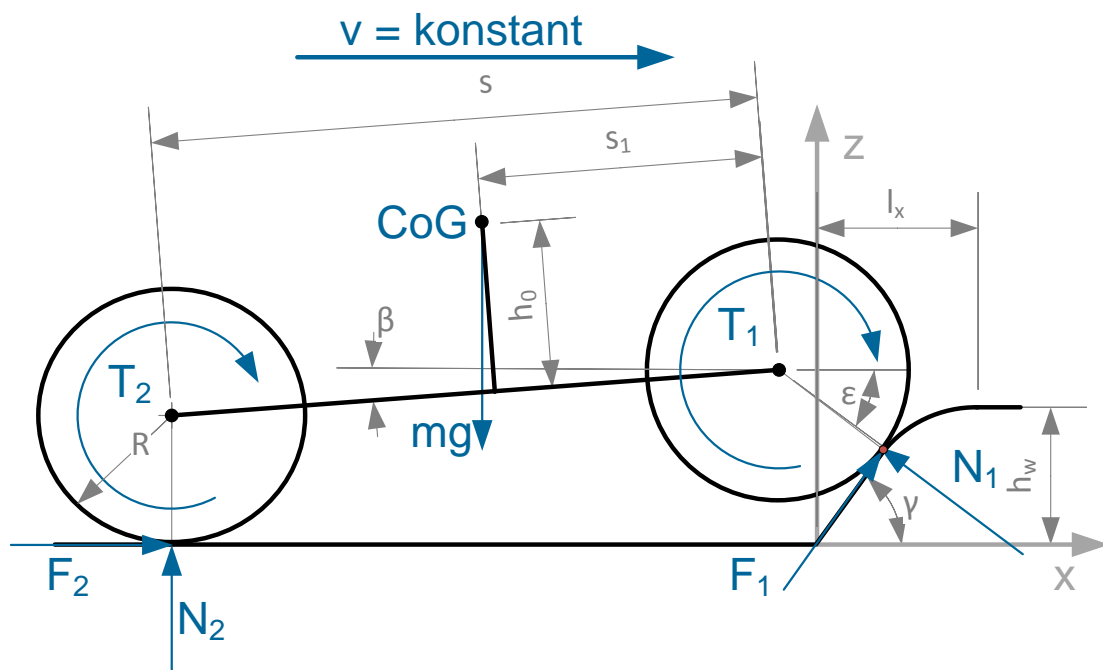


Abbildung 28: Reales Hindernis - "A-A" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 28 ist der Ansatz für das Hinauffahren eines realen Hindernisses mit dem Vorderrad bei Allradantrieb ersichtlich (**Dargestellt ist Fall 1**). Die geometrischen Zusammenhänge sind 3.4.1 zu entnehmen. Für Fall 1 – Berührungspunkt zwischen Rad und Hindernis liegt auf $f_1(x)$ – gelten folgende Kräftegleichgewichte:

$$\sum F_x = 0 = -N_1 \sin \gamma + F_1 \cos \gamma + F_2 \quad (105)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 \cos \gamma + F_1 \sin \gamma + N_2 - mg \quad (106)$$

$$\sum M_1 = 0 = N_2 s \cos \beta - F_2 (R + s \sin \beta) - F_1 R - mg (s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) \quad (107)$$

$$F_1 = F_2 \quad (108)$$

Es ergeben sich die im MATLAB – Programm hinterlegten Gleichungen (LXI) – (LXIII). Die geometrischen Zusammenhänge in Fall 2 sind ebenfalls 3.4.1 zu

entnehmen und die Kräftegleichgewichte entsprechen denen aus Fall 1. Einzig die Winkel sind für den Fall 2 wieder von γ und ε auf γ' bzw. ε' zu ändern.

$$N_2 = \frac{mg((s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta)(1 + \cos\gamma) + \sin\gamma(2R + s \sin\beta))}{\sin\gamma(2R + s \sin\beta) + s \cos\beta(1 + \cos\gamma)} \quad (\text{LXI})$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (\text{LXII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_1 \sin\gamma}{1 + \cos\gamma} \quad (\text{LXIII})$$

3.4.4 „A-B“ mit Allradantrieb

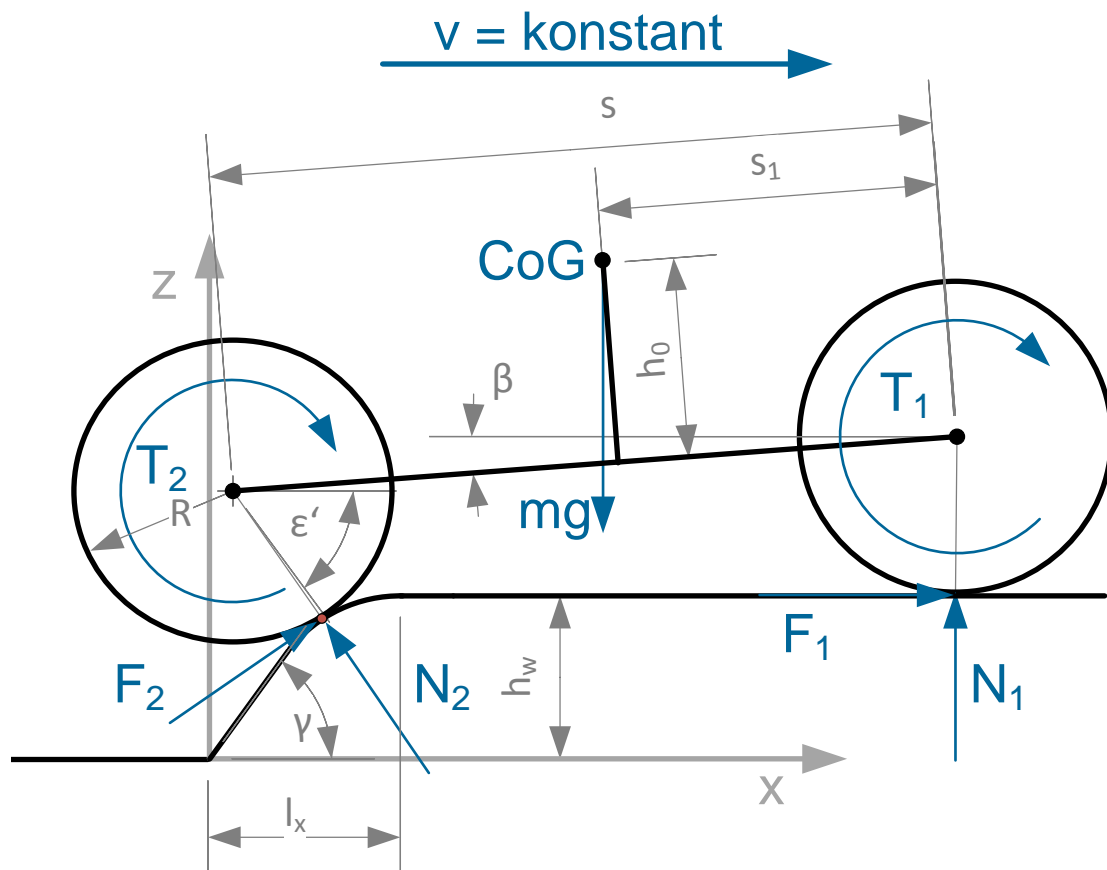


Abbildung 29: Reales Hindernis - "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 29 ist das Hinauffahren eines realen Hindernisses mit dem Hinterrad bei Allradantrieb ersichtlich (**Dargestellt ist hier Fall 2**). Die geometrischen Zusammenhänge sind 3.4.2 zu entnehmen und es gelten folgende Kräfte- und Momentengleichgewichte:

$$\sum F_x = 0 = F_1 + F_2 \cos \gamma - N_2 \sin \gamma \quad (109)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \cos \gamma + F_2 \sin \gamma - mg \quad (110)$$

$$\sum M_2 = 0 = -N_1 s \cos \beta - F_2 R - F_1 (R - s \sin \beta) + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) \quad (111)$$

$$F_1 = F_2 \quad (112)$$

Daraus ergeben sich wiederum die in MATLAB gültigen Gleichungen (LXIV) – (LXVI), die geometrischen Verhältnisse für Fall 2 sind 3.4.2 zu entnehmen und die Kräfte- und Momentengleichgewichte für Fall 2 entsprechen denen aus Fall 1 mit der bekannten Winkeländerung.

$$N_1 = \frac{mg((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta)(1 + \cos\gamma) - \sin\gamma(2R - ssin\beta)}{s\cos\beta(1 + \cos\gamma) - \sin\gamma(2R - ssin\beta)} \quad (\text{LXIV})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LXV})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2\sin\gamma}{1 + \cos\gamma} \quad (\text{LXVI})$$

4 Radfahrzeug mit flexiblen Rädern

Im Gegensatz zu den Kapiteln 2 & 3 beschäftigt sich das Kapitel 4 mit einem 2-achsigen Radfahrzeug mit flexiblen Rädern. Dadurch soll im Vergleich zum Kapitel 3 der Unterschied zum starren Rad in Abhängigkeit des Reifenwerkstoffes und seiner Eigenschaften (Reifenfederrate) demonstriert werden. Es werden die in 2.3 standardisierten Hindernisüberschreitungsarten mit Allradantrieb durchgerechnet und im Anhang den Ergebnissen aus 3.1 – 3.3 gegenübergestellt. Auf die Durchrechnung mit Hinterradantrieb wird verzichtet, da der Unterschied zwischen flexiblen und starren Rädern ebenso aus der Berechnung bei Allradfahrzeugen ersichtlich ist.

Zusätzlich zu den Variablen in Kapitel 3 ist die Einführung weiterer Variablen und Gültigkeitsbereiche von Formeln und Definitionen notwendig. Die Glg. (6) ist ebenfalls gültig. Die Gleichungen (4) & (15) müssen in leicht abgewandelter Form verwendet werden. Die Federrate c der flexiblen Räder wird vom Benutzer des MATLAB-Programms angegeben – es kann somit vom Benutzer vor der Berechnung auf unterschiedlichste Reifenwerkstoffe und Druckverhältnisse eingegangen werden – und ist während des Rechenvorgangs konstant. Eine Nichtlinearität der Federrate des Reifens aufgrund einer lokalen Verformung wird nicht berücksichtigt. Näherungsweise wird die Kontaktkraftrichtung gleich wie beim starren Rad angenommen. Zu beachten ist, dass es sich auch beim flexiblen Rad um eine 1-Punkt-Berührung handelt, eine mögliche 2-Punkt-Berührung (Hindernis und Boden) während des Beginns der Überquerung wird nicht berücksichtigt.

Linear über die Federrate hängen Kraft auf den Reifen (N_1, N_2) und Einsenkung des Reifens (δ_1, δ_2) zusammen:

$$N_1 = c\delta_1 \tag{113a}$$

$$N_2 = c\delta_2 \tag{113b}$$

Zur Vereinfachung bei der Darstellung der Formeln werden Hilfsvariablen für den flexiblen Radhalbmesser eingeführt. Dieser berücksichtigt bereits die Einsenkung der Räder und ist wie folgt definiert:

$$R_1 = R - \delta_1 \quad (114a)$$

$$R_2 = R - \delta_2 \quad (114b)$$

$$F_2 = \begin{cases} \frac{T_2}{R_2} \text{ für } \frac{T_2}{R_2} \leq N_2\mu_a \\ N_2\mu_a \text{ für } \frac{T_2}{R_2} \geq N_2\mu_a \end{cases} \quad (115)$$

$$F_1 = \begin{cases} \frac{T_1}{R_1} \text{ für } \frac{T_1}{R_1} \leq N_1\mu_a \\ N_1\mu_a \text{ für } \frac{T_1}{R_1} \geq N_1\mu_a \end{cases} \quad (116)$$

4.1 Überschreitung eines Plateauhindernisses

Im Folgenden werden die Überschreitungsarten eines Plateauhindernisses bei reinem Allradantrieb mit flexiblen Rädern dargestellt:

4.1.1 „A-A“ mit Allradantrieb

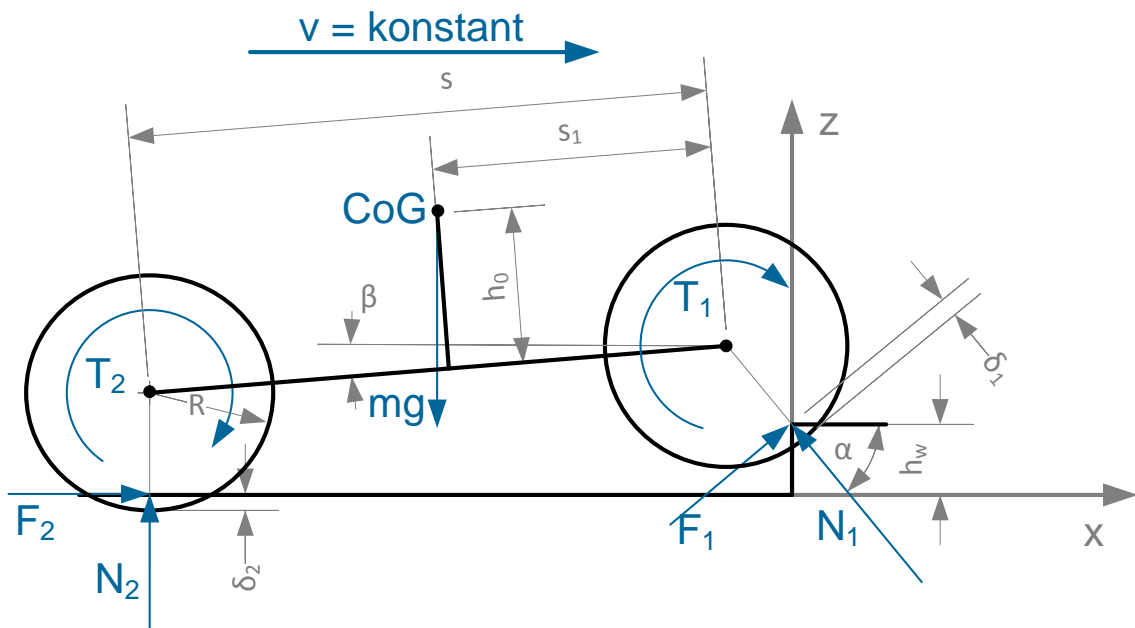


Abbildung 30: "A-A" mit Allradantrieb (Ansatz flexible Räder)

In Abb. 30 ist der Ansatz für das Auffahren auf ein Plateau mit dem Vorderrad bei Allradantrieb und flexiblen Rädern ersichtlich. Zusätzlich gilt (117). Daraus ergeben sich die folgenden Gleichgewichtsbedingungen (118) – (121):

$$R_2 + s * \sin\beta = h_w + R_1 \sin\alpha \quad (117)$$

$$\sum F_x = 0 = F_2 + F_1 \sin\alpha - N_1 \cos\alpha \quad (118)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin\alpha + F_1 \cos\alpha - mg \quad (119)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R_1 - mg(s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta) + N_2 s \cos\beta - F_2 (R_2 + s \sin\beta) \quad (120)$$

$$F_1 = F_2 \quad (121)$$

Daraus ergeben sich die folgenden, im MATLAB – Programm gültigen, Gleichungen (LXVII) – (LXIX):

$$N_1 = \frac{mg(1 + \sin\alpha)((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta)}{s\cos\beta + s\cos\beta\sin\alpha + s\cos\alpha\sin\beta + (R_1 + R_2)\cos\alpha} \quad (\text{LXVII})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LXVIII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{mg - N_2 - N_1\sin\alpha}{\cos\alpha} \quad (\text{LXIX})$$

4.1.2 „A-B“ mit Allradantrieb

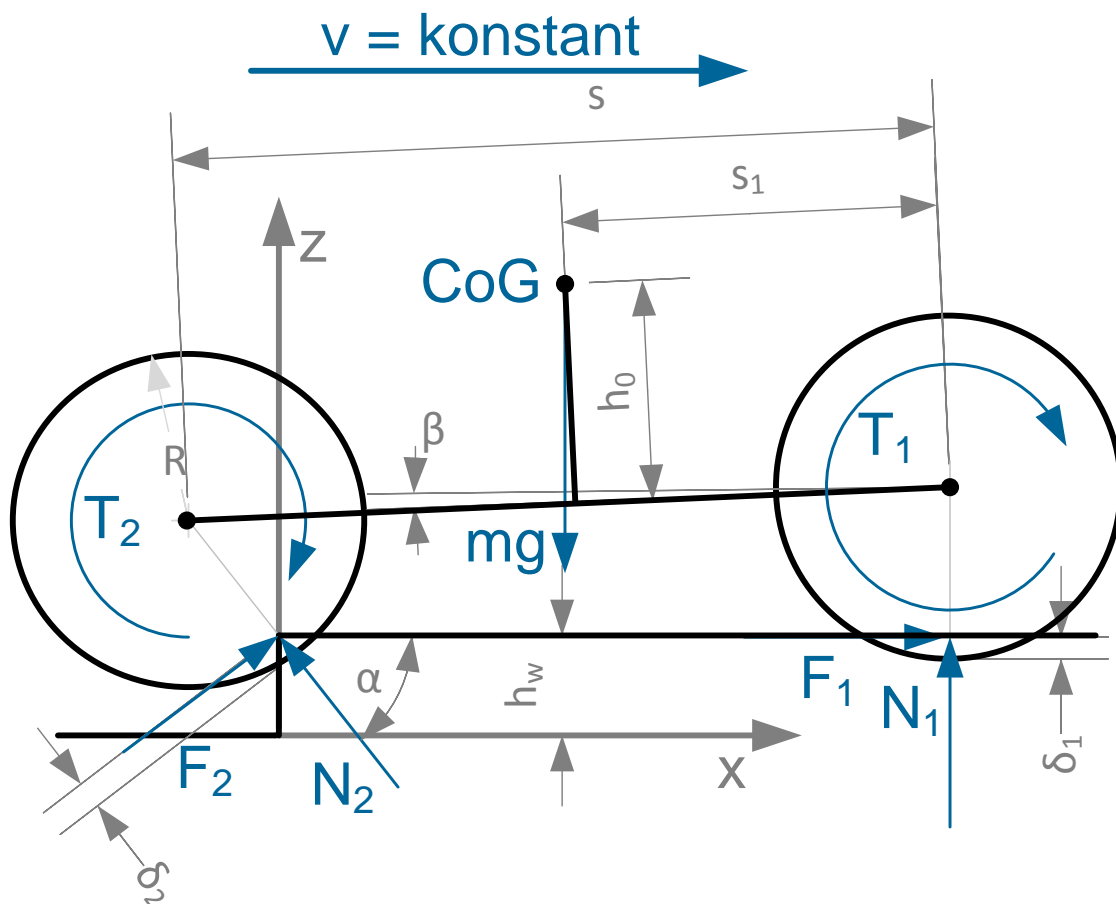


Abbildung 31: "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 31 ist der Ansatz des Nachziehens des Hinterrades auf ein Plateauhindernis bei Allradantrieb und flexiblen Rädern ersichtlich. Es gelten folgende Gleichgewichtsbedingungen und Definitionen (122) – (126):

$$s \sin \beta + R_2 \sin \alpha = R_1 \quad (122)$$

$$\sum F_x = 0 = F_1 + F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha \quad (123)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (124)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_2 R_2 + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_1 R_2 \sin \alpha \quad (125)$$

$$F_1 = F_2 \quad (126)$$

Daraus ergeben sich die folgenden – für das MATLAB-Programm wichtigen – Gleichungen (LXX) – (LXXII):

$$N_2 = \frac{mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta)}{s \cos \beta - R_2 \cos \alpha} \quad (LXX)$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (LXXI)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos \alpha}{1 + \sin \alpha} \quad (LXXII)$$

4.2 Überschreitung eines Stufenhindernisses

Im Folgenden werden die Überschreitungsarten eines Stufenhindernisses bei reinem Allradantrieb mit flexiblen Rädern dargestellt, es gilt zusätzlich die Glg. (23):

4.2.1 „B-A“ mit Allradantrieb

Das Auffahren auf eine Stufe mit dem Vorderrad bei Allradantrieb mit flexiblen Rädern entspricht dem Fall „A-A“ in Kapitel 4.1.1 und wird daher hier nicht mehr ausgeführt.

4.2.2 „B-B“ mit Allradantrieb

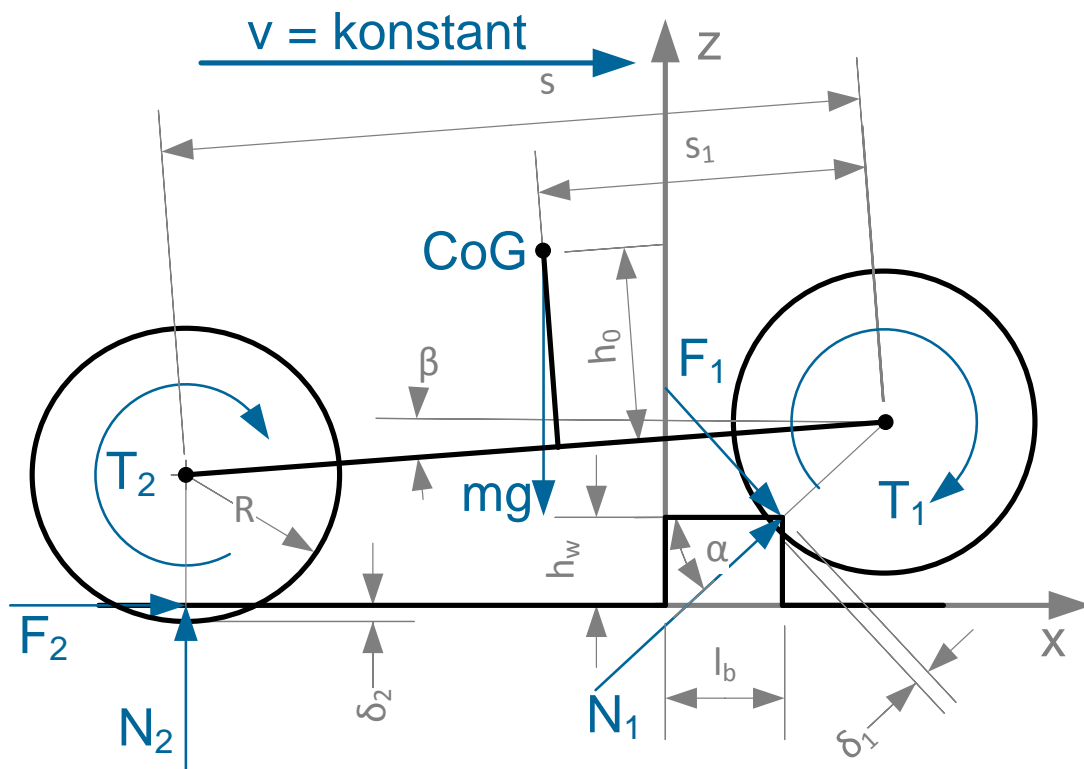


Abbildung 32: "B-B" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 32 ist das Hinabfahren eines Stufenhindernisses mit dem Vorderrad bei Allradantrieb und flexiblen Rädern ersichtlich. Daraus ergeben sich folgende Gleichgewichtsbedingungen (127) – (131):

$$R_2 + s * \sin\beta = h_w + R_1 \sin\alpha \quad (127)$$

$$\sum F_x = 0 = F_2 + N_1 \cos\alpha + F_1 \sin\alpha \quad (128)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin\alpha - F_1 \cos\alpha - mg \quad (129)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R_1 - mg(s_1 \cos\beta + h_0 \sin\beta) + N_2 s \cos\beta - F_2(R_2 + s \sin\beta) \quad (130)$$

$$F_1 = F_2 \quad (131)$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen ist ersichtlich, dass ein Hinunterfahren der Stufe ohne Antriebsmoment möglich ist. Um die Geschwindigkeit konstant zu halten, muss das Fahrzeug sogar zusätzlich gebremst werden. Im Folgenden sind die hierzu nötigen Formeln (LXIII) – (LXV) für das MATLAB – Programm aufgeführt:

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta + h_0\sin\beta)(1 + \sin\alpha)}{\cos\alpha(R_1 + R_2 + s\sin\beta) - (1 + \sin\alpha)s\cos\beta} \quad (\text{LXXIII})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LXXIV})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_1\cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (\text{LXXV})$$

4.2.3 „B-C“ mit Allradantrieb

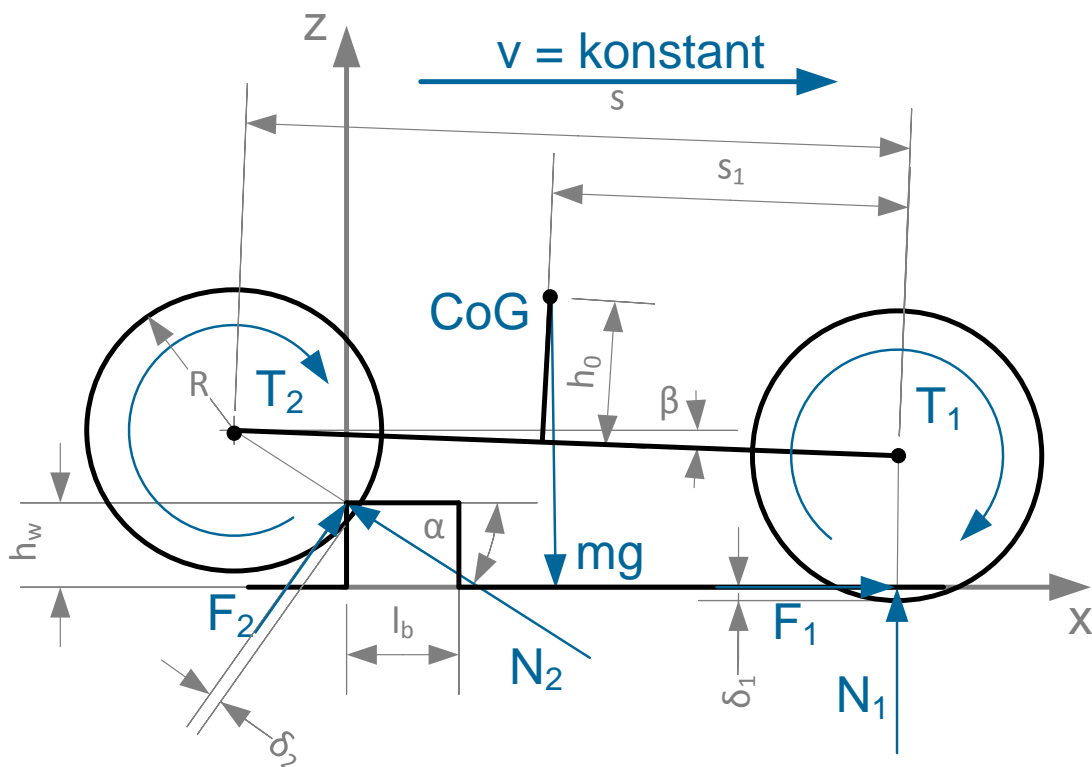


Abbildung 33: "B-C" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 33 ist das Hinauffahren eines Stufenhindernisses mit dem Hinterradantrieb bei Allradantrieb mit flexiblen Rädern ersichtlich. Daraus ergeben sich folgende Gleichgewichtsbedingungen (132) – (136):

$$R_1 + s * \sin\beta = h_w + R_2 \sin\alpha \quad (132)$$

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin\alpha - N_2 \cos\alpha + F_1 \quad (133)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin\alpha + F_2 \cos\alpha - mg \quad (134)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1(R_1 + s \sin\beta) + mg((s - s_1) \cos\beta + h_0 \sin\beta) - N_1 s \cos\beta - F_2 R_2 \quad (135)$$

$$F_1 = F_2 \quad (136)$$

Aus diesen Gleichgewichtsbedingungen ergeben sich die im MATLAB-Programm verwendeten Gleichungen (LXXVI) – (LXXVIII):

$$N_2 = \frac{mg(\sin\alpha + 1)(h_0 \sin\beta - s_1 \cos\beta)}{\cos\alpha(R_1 + R_2 + s(\sin\beta - \sin^2\alpha - \sin\alpha - \cos\alpha))} \quad (\text{LXXVI})$$

$$N_1 = mg - \frac{N_2(\sin^2\alpha + \sin\alpha + \cos\alpha)}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{LXXVII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{LXXVIII})$$

4.2.4 „B-D“ mit Allradantrieb

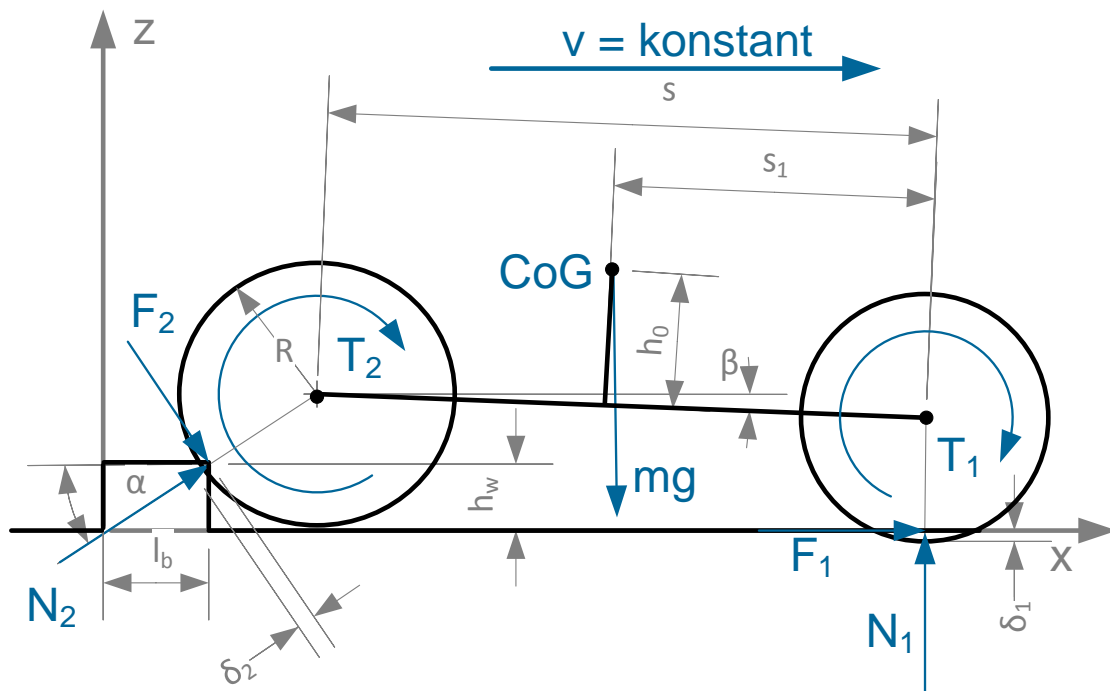


Abbildung 34: "B-D" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 34 ist das Hinunterfahren eines Stufenhindernisses mit dem Hinterrad mit Allradantrieb und flexiblen Rädern dargestellt. Daraus lassen sich zusätzlich zu (132) folgende Gleichgewichtsbedingungen ableiten (137) – (140):

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (137)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (138)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1(R_1 + s \sin \beta) + mg((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R_2 \quad (139)$$

$$F_1 = F_2 \quad (140)$$

Aus diesen Gleichgewichtsbedingungen folgt – wie in 4.2.2 – dass das Hinabfahren der Stufe mit dem Hinterrad auch ohne Antriebsmoment möglich ist. Es werden die daraus resultierenden Bremskräfte und Achslasten in (LXXIX) – (LXXXI) berechnet:

$$N_2 = \frac{mg(\sin\alpha + 1)(-h_0\sin\beta + s_1\cos\beta)}{\cos\alpha(R_1 + R_2 + s\sin\beta) + (1 + \sin\alpha)s\cos\beta} \quad (\text{LXXIX})$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (\text{LXXX})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_2\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{LXXXI})$$

4.3 Überschreitung eines Grabenhindernisses

Im Folgenden werden die Überschreitungsarten eines Grabenhindernisses bei reinem Allradantrieb mit flexiblen Rädern dargestellt, es gelten zusätzlich die Glg. (42) – (44):

4.3.1 „C-AD-1“ und „C-AE-1“ mit Allradantrieb

Die Abb. 35 & Abb. 36 zeigen das Hinabfahren in einen Graben mit dem Vorder- bzw. Hinterrad bei Allradantrieb und flexiblen Rädern. In beiden Fällen wird es notwendig sein, ein Bremsmoment aufzubringen, um die Geschwindigkeit konstant zu halten.

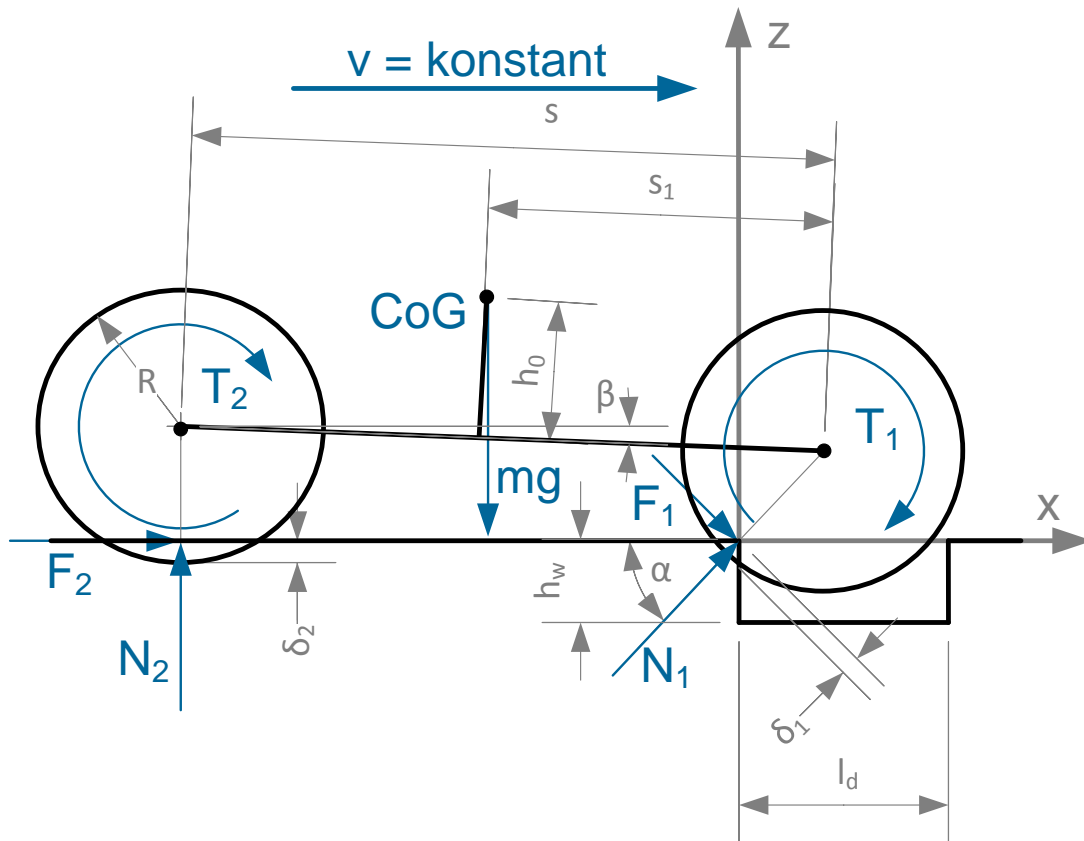


Abbildung 35: "C-AD-1" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

Es ergeben sich die folgenden Gleichgewichtsbedingungen (141) – (145) für das Hinabfahren in den Graben mit dem Vorderrad:

$$s \sin \beta + R_1 \sin \alpha = R_2 \quad (141)$$

$$\sum F_x = 0 = F_2 + N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha \quad (142)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_1 \sin \alpha - F_1 \cos \alpha - mg \quad (143)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R_1 - mg(s_1 \cos \beta - h_0 \sin \beta) + N_2 s \cos \beta - F_2 R_1 \sin \alpha \quad (144)$$

$$F_1 = F_2 \quad (145)$$

Für das MATLAB – Programm ergeben sich die Glg. (LXXXII) – (LXXXIV):

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta - h_0\sin\beta)}{R_1\cos\alpha - s\cos\beta} \quad (\text{LXXXII})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LXXXIII})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_1\cos\alpha}{\sin\alpha + 1} \quad (\text{LXXXIV})$$

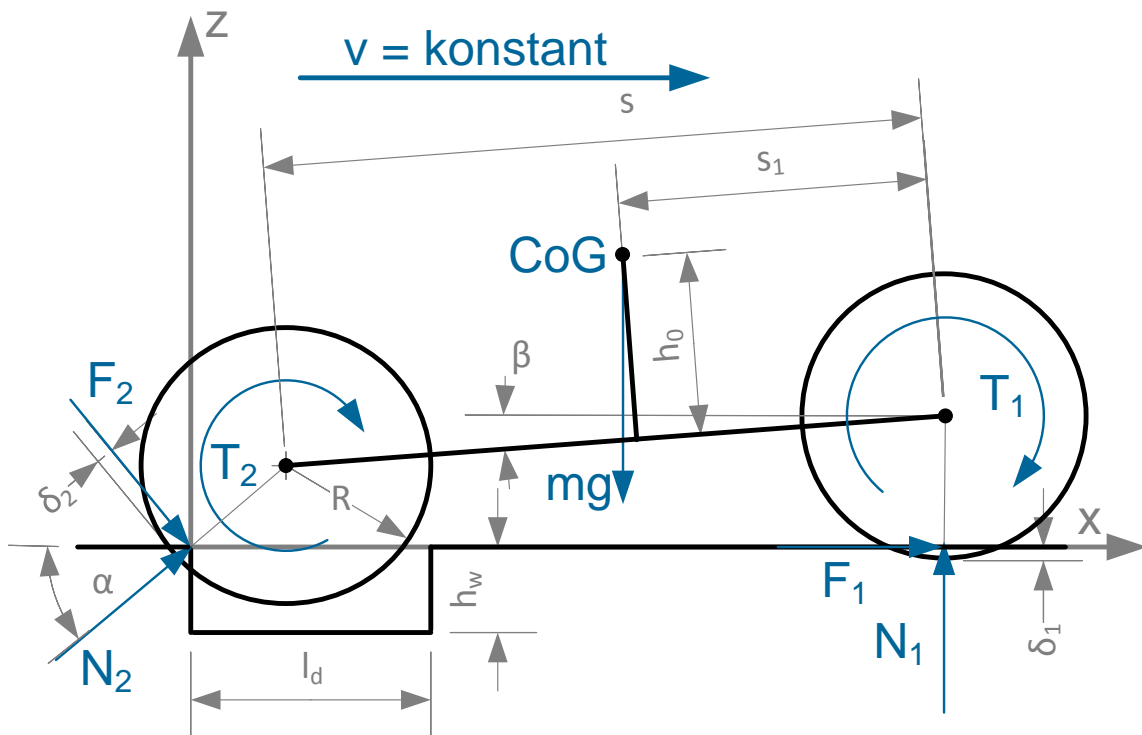


Abbildung 36: "C-AE-1" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

Ebenso ergeben sich zusätzlich zu (122) die Gleichgewichtsbedingungen (146) – (149) für das Hinabfahren in den Graben mit dem Hinterrad:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (146)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (147)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1 R_2 \sin \alpha + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_2 R_2 \quad (148)$$

$$F_1 = F_2 \quad (149)$$

Daraus ergeben sich die Gleichungen (LXXXV) – (LXXXVII) zur Bestimmung der Bremskräfte:

$$N_2 = \frac{mg(h_0 \sin \beta + s_1 \cos \beta)}{\cos \alpha R_2 - s \cos \beta} \quad (LXXXV)$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (LXXXVI)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{-N_2 \cos \alpha}{\sin \alpha + 1} \quad (LXXXVII)$$

4.3.2 „C-AD-2“ mit Allradantrieb

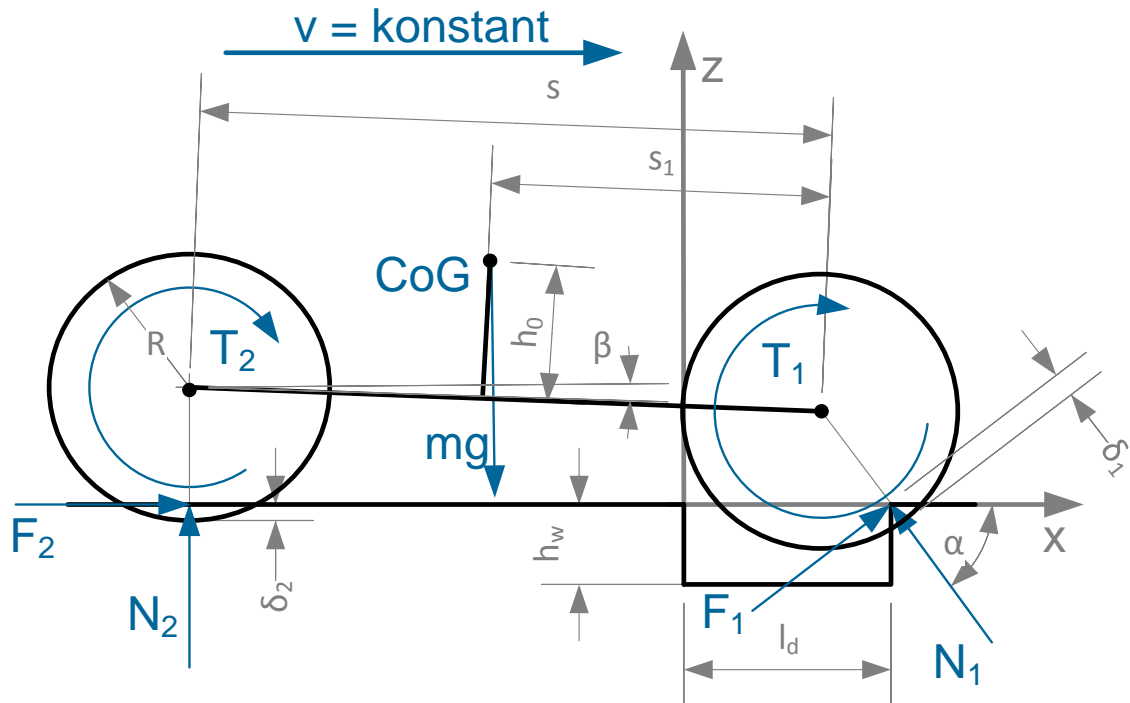


Abbildung 37: "C-AD-2" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 37 ist das Hinauffahren auf der gegenüberliegenden Stufenseite mit dem Vorderrad bei Allradantrieb ersichtlich. Daraus ergeben sich zusätzlich zu (140) die Gleichgewichtsbedingungen (150) – (153):

$$\sum F_x = 0 = -N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha + F_2 \quad (150)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 \sin \alpha + F_1 \cos \alpha + N_2 - mg \quad (151)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R_1 + N_2 s \cos \beta - F_2 R_1 \sin \alpha - mg(s_1 \cos \beta - h_0 \sin \beta) \quad (152)$$

$$F_1 = F_2 \quad (153)$$

Daraus ergeben sich die im MATLAB – Programm gültigen Gleichungen (LXXXVIII) – (XC):

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta + h_0\sin\beta)}{R\cos\alpha + s\cos\beta} \quad (\text{LXXXIII})$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (\text{LXXXIX})$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_1\cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (\text{XC})$$

4.3.3 „C-AE-2“ mit Allradantrieb

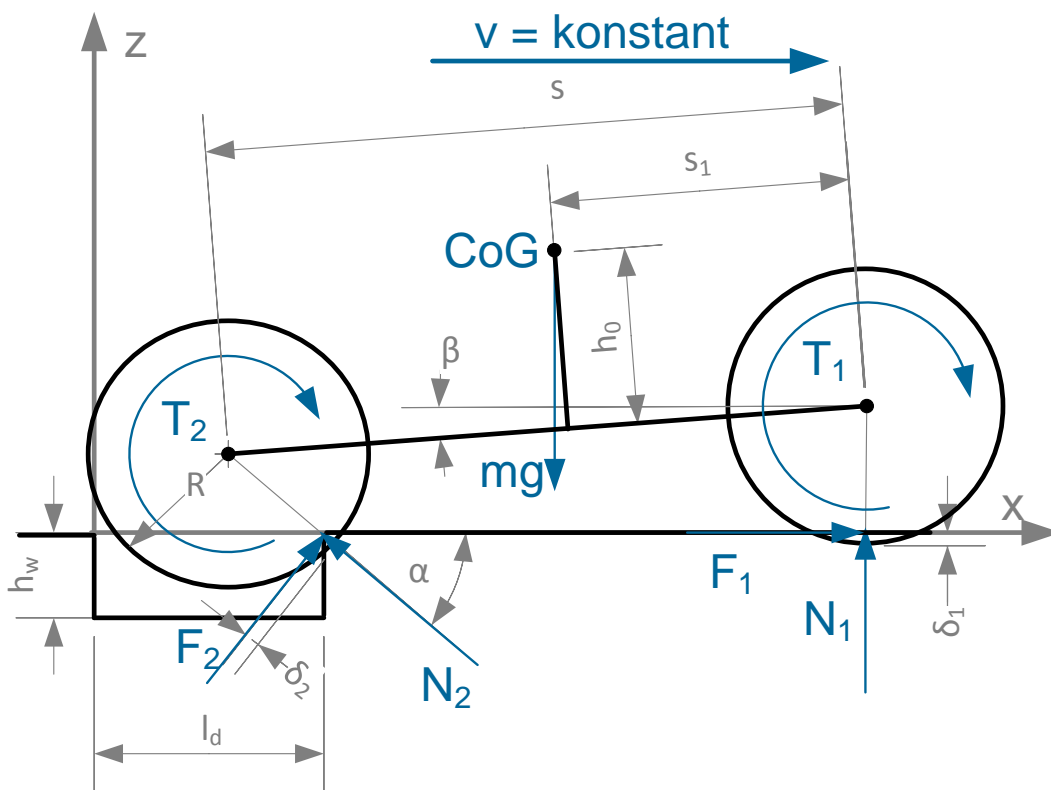


Abbildung 38: "C-AE-2" mit Allradantrieb (Ansatz mit flexiblen Rädern)

In Abb. 38 ist das Hinauffahren auf der gegenüberliegenden Stufenseite mit dem Hinterrad bei Allradantrieb ersichtlich. Daraus ergeben zusätzlich zu (122) sich die Gleichgewichtsbedingungen (154) – (157):

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + F_1 - N_2 \cos \alpha \quad (154)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (155)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1 R_2 \sin \alpha + mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta) - F_2 R_2 - N_1 s \cos \beta \quad (156)$$

$$F_1 = F_2 \quad (157)$$

Daraus ergeben sich die gültigen Gleichungen (XCI) – (XCIII), die im Programm Verwendung finden:

$$N_1 = \frac{mg((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta - R_2 \cos \alpha)}{s \cos \beta - R_2 \cos \alpha} \quad (XCI)$$

$$N_2 = mg - N_1 \quad (XCII)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2 \cos \alpha}{1 + \sin \alpha} \quad (XCIII)$$

5 3-achsiges Radfahrzeug mit starren Rädern

Für die Berechnung der Stufenüberschreitbarkeit von 3-achsigen Radfahrzeugen mit starren Rädern wird ein anderer Ansatz verwendet. Die Berechnung der Stufenüberschreitbarkeit von Fahrzeugen mit mehr als drei Achsen wird aufgrund mangelnder Praxisrelevanz nicht durchgeführt. Da einzig Sonderfahrzeuge (Schützenpanzer, mobile Raketenabschussrampen und Panzertransporter etc.) 4 und mehr Achsen aufweisen, wird von der Untersuchung von Fahrzeugen solcher Bauart Abstand genommen.

Es wird davon ausgegangen, dass Allradantrieb die einzige Antriebsart ist. Außerdem gilt das Antriebsmoment des Motors als auf alle mit dem Boden in Kontakt stehenden Achsen gleichmäßig verteilt. Im Falle des Abhebens einer Achse wird das Antriebsmoment somit gleichmäßig auf die beiden restlichen Achsen verteilt – es herrschen gleiche Zustände wie beim 2-achsigen Fahrzeug. Ab diesem Punkt ist eine grundlegende Unterscheidung für die weitere Berechnung einzuführen. Abhängig von der Lage des Schwerpunkts werden die Fälle „Schwerpunkt vor 2. Achse“ und „Schwerpunkt nach 2. Achse“ betrachtet. Hierzu ist die Einführung einer neuen Variablen – die Lage der 2. Achse s_2 – notwendig.

Es werden im Folgenden die drei idealen Hindernisfälle – Plateau, Stufe und Graben – für beide Lagefälle des Schwerpunkts durchgearbeitet.

Es haben zusätzlich zu den im Folgenden definierten Gleichungen die Glg. (4), (6) & (15) Gültigkeit.

$$F_3 = \begin{cases} \frac{T_3}{R} \text{ für } \frac{T_3}{R} \leq N_3\mu_a \\ N_3\mu_a \text{ für } \frac{T_3}{R} \geq N_3\mu_a \end{cases} \quad (158)$$

Es ist anzumerken, dass dieser Fahrzeugtyp nur am Beispiel „Plateauhindernis“ betrachtet wird. Für die Hindernistypen „Stufe“ und „Graben“ werden Skizzen und Gleichgewichtsbedingungen angegeben, eine Auswertung durch MATLAB ist jedoch in dieser Arbeit nicht enthalten und kann in einer eventuellen Erweiterung realisiert werden.

5.1 Schwerpunkt liegt vor 2. Achse

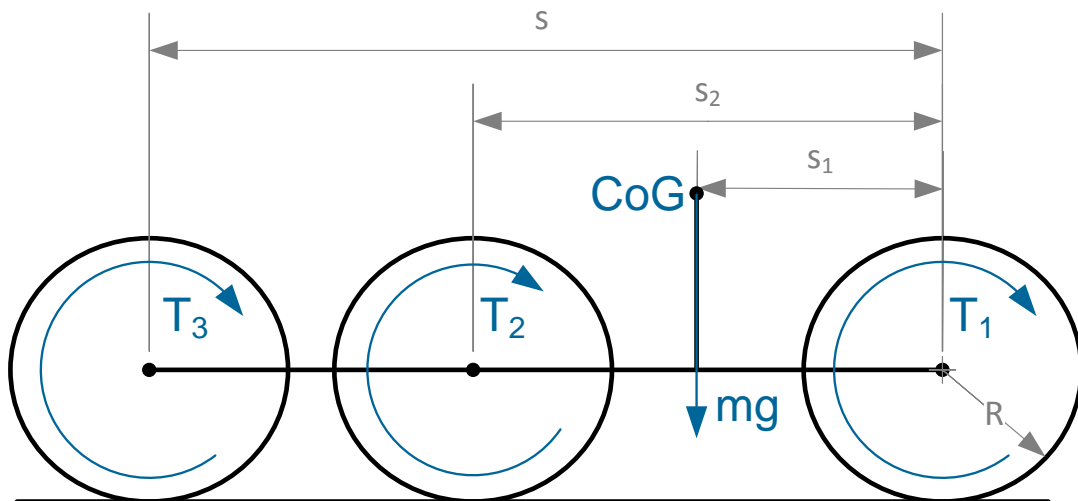


Abbildung 39: 3-achsiges Fahrzeug mit Schwerpunkt vor der 2. Achse

In Abb. 39 ist die Lage des Schwerpunkts vor der 2. Achse ersichtlich. Hierzu werden nun die Berechnungen für die Stufenüberschreitbarkeit der idealen Hindernisse durchgeführt.

5.1.1 „A-A“ mit Allradantrieb

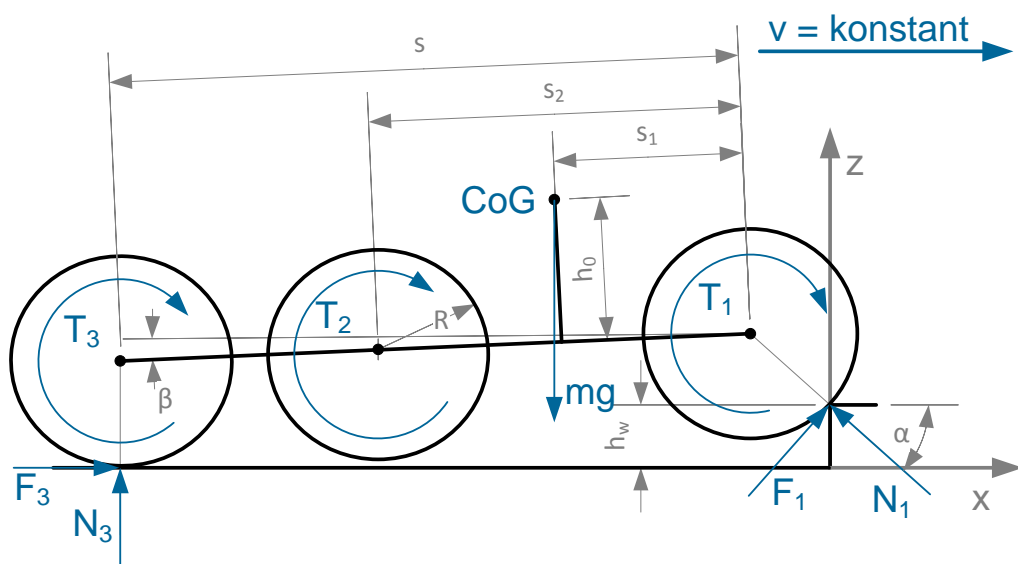


Abbildung 40: "A-A" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 40 ist der Ansatz für das Befahren des Plateauhindernisses mit der 1. Achse bei Allradantrieb ersichtlich. Es ergeben sich folgende Gleichgewichtsbedingungen (159) – (162):

$$\sum F_x = 0 = F_3 + F_1 \sin \alpha - N_1 \cos \alpha \quad (159)$$

$$\sum F_z = 0 = N_3 + N_1 \sin \alpha + F_1 \cos \alpha - mg \quad (160)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R - mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_3 s \cos \beta - F_3 (R + s \sin \beta) \quad (161)$$

$$F_1 = F_3 \quad (162)$$

Ferner gilt der Zusammenhang (5). Daraus ergeben sich die für das MATLAB – Programm relevanten Gleichungen (XCIV) – (XCVI):

$$N_1 = \frac{mg(1 + \sin \alpha)((s - s_1) \cos \beta - h_0 \sin \beta)}{s \cos \beta + s \cos \beta \sin \alpha + s \cos \alpha \sin \beta + 2R \cos \alpha} \quad (XCIV)$$

$$N_3 = mg - N_1 \quad (XCV)$$

$$F_1 = F_3 = \frac{mg - N_3 - N_1 \sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (XCVI)$$

5.1.2 „A-B“ mit Allradantrieb

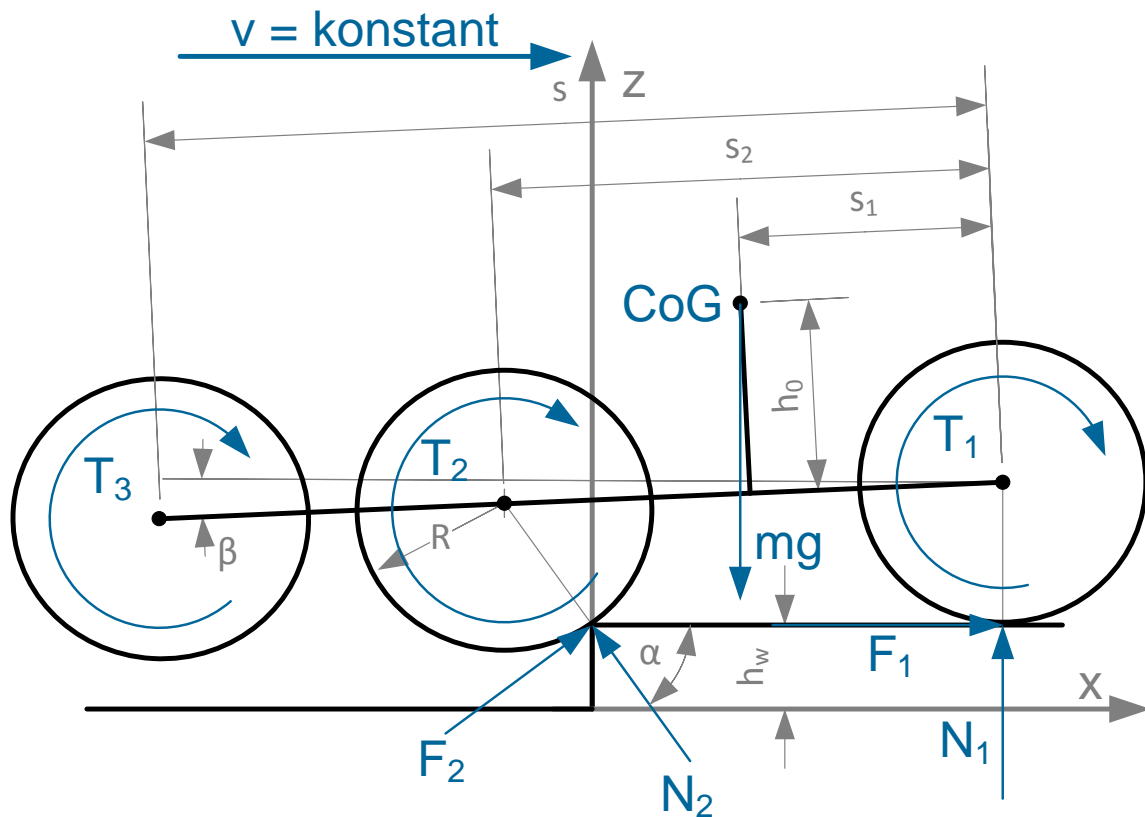


Abbildung 41: "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 41 ist der Ansatz für das Befahren eines Plateauhindernisses eines dreiaxigen Fahrzeuges mit der 2. Achse bei Allradantrieb ersichtlich. Durch die Lage des Schwerpunktes vor der 2. Achse kippt der Vorderteil des Fahrzeuges auf das Plateau, wodurch sich die dritte Achse in der Luft befindet und somit keinerlei Antriebskräfte übertragen kann. Somit gleicht dieser Ansatz dem in 3.1 verwendeten Ansatz. Es gelten somit folgende Gleichungen (163) – (167):

$$R \sin \alpha + s_2 \sin \beta = R \quad (163)$$

$$\sum F_x = 0 = F_1 + F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha \quad (164)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (165)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_2 R + mg((s_2 - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta) - N_1 s \cos\beta - F_1 R \sin\alpha \quad (166)$$

$$F_1 = F_2 \quad (167)$$

Daraus ergeben sich folgende, für das MATLAB – Programm gültige, Gleichungen (XCVII) – (XCIX):

$$N_2 = \frac{mg(s_1\cos\beta + h_0\sin\beta)}{s_2\cos\beta - R\cos\alpha} \quad (XCVII)$$

$$N_1 = mg - N_2 \quad (XCVIII)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{N_2\cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (XCIX)$$

5.1.3 „B-A“ mit Allradantrieb

Das Auffahren auf ein Stufenhindernis mit dem Vorderrad entspricht dem Fall „A-A“ und wird somit nicht extra behandelt.

5.1.4 „B-B“ mit Allradantrieb

Für die Überschreitung eines Stufenhindernisses müssen weitere Definitionen festgelegt werden. Die zu überschreitende Stufe hat eine Maximallänge gemäß (168-Teil 1) aufzuweisen. Es wird davon ausgegangen, dass das Hindernis von der Zusammenstellung 1.-2. – Achse gleichermaßen überschritten wird, wie von der Kombination 2.-3.-Achse. Dies wird angegeben durch (168-Teil 2).

$$l_b < s_2 - 2R \text{ bzw. } l_b < s - s_2 - 2R \quad (168)$$

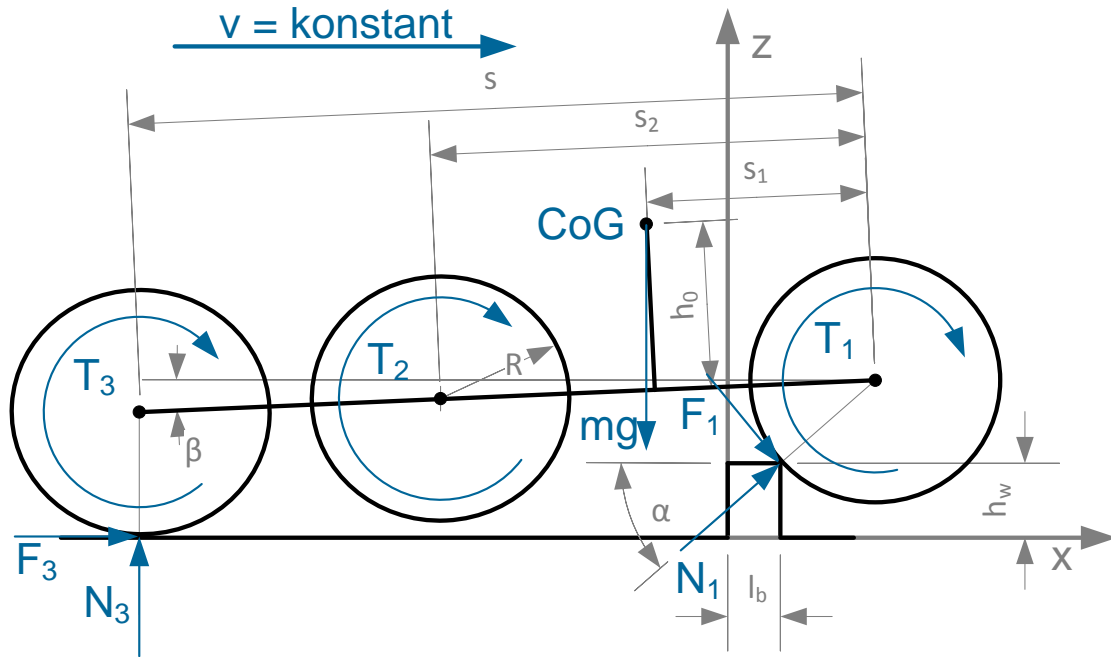


Abbildung 42: "B-B" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 42 ist der Ansatz für das Hinunterfahren eines Stufenhindernisses mit der 1. Achse bei Allradantrieb ersichtlich. Es gelten zusätzlich zu (5) folgende Gleichgewichtsbedingungen (169) – (172):

$$\sum F_x = 0 = F_3 + N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha \quad (169)$$

$$\sum F_z = 0 = N_3 + N_1 \sin \alpha - F_1 \cos \alpha - mg \quad (170)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R - mg(s_1 \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_3 s \cos \beta - F_3(R + s \sin \beta) \quad (171)$$

$$F_1 = F_3 \quad (172)$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen ist ersichtlich, dass kein Antriebsmoment aufgebracht werden muss, um mit dem Vorderrad von der Stufe zu fahren. Die Gleichungen im MATLAB würden nun dazu dienen, Bremskräfte auszurechnen.

5.1.5 „B-C“ mit Allradantrieb

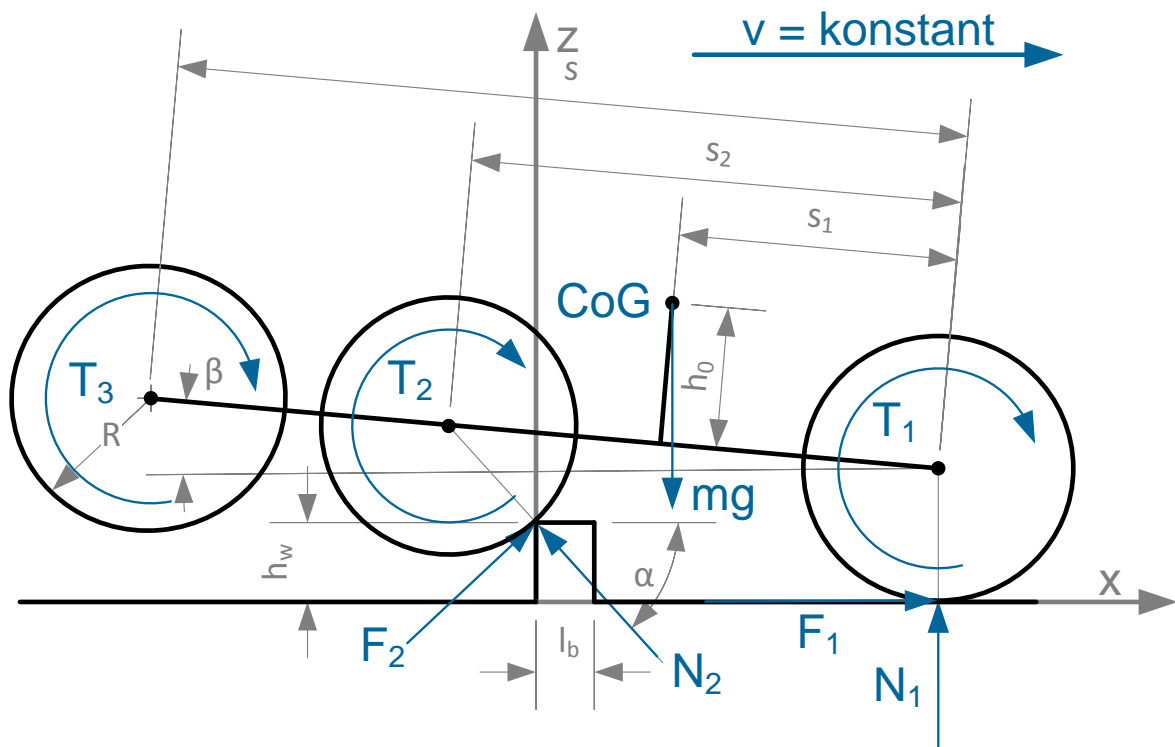


Abbildung 43: "B-C" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 43 ist das Befahren eines Stufenhindernisses mit den Rädern der 2. Achse ersichtlich. Daraus lassen sich die folgenden Gleichgewichtsbedingungen (173) – (176) ableiten:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (173)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (174)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1(R + s_2 \sin \beta) + mg((s_2 - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s_2 \cos \beta - F_2 R \quad (175)$$

$$F_1 = F_2 \quad (176)$$

Zusätzlich gilt die Definition (177):

$$R + s_2 \sin \beta = h_w + R \sin \alpha \quad (177)$$

5.1.6 „B-D“ mit Allradantrieb

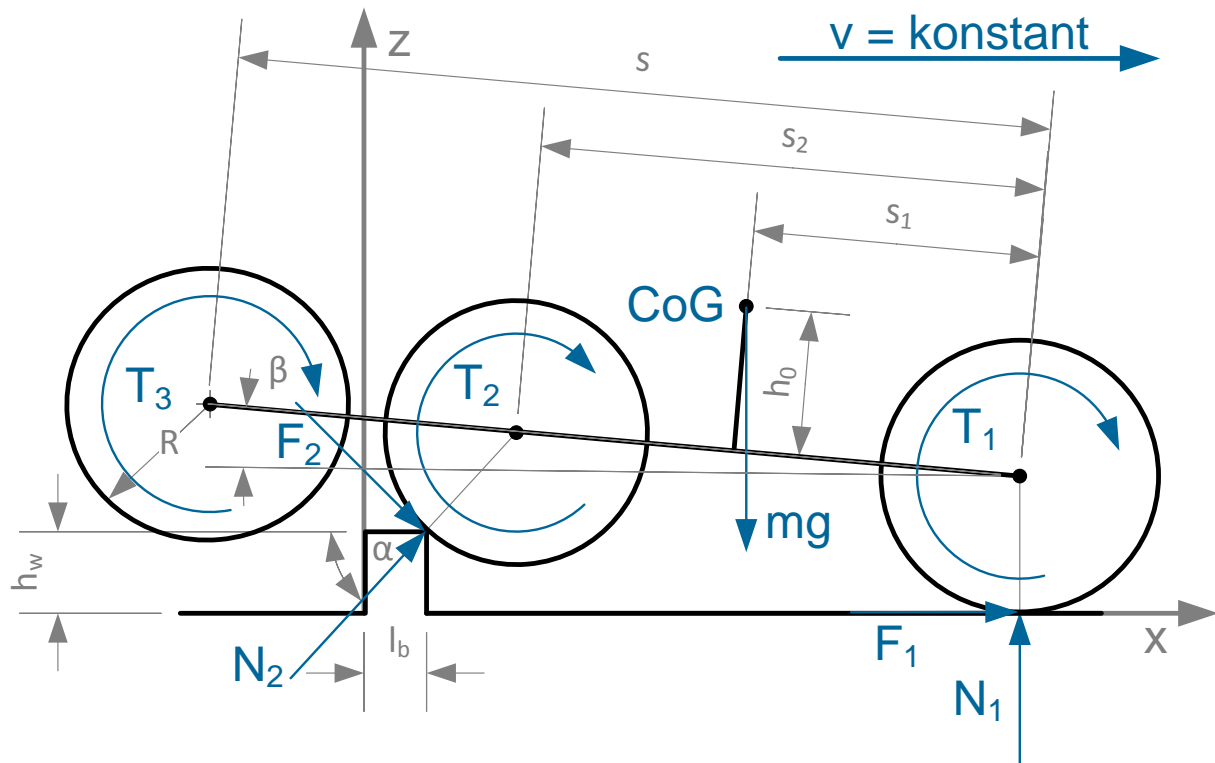


Abbildung 44: "B-D" mit Allradantrieb (Ansatz Teil 1)

Das Überwinden des Stufenhindernisses mit der 2. & 3. Achse ist in mehrere Vorgänge zu unterteilen. In Abb. 44 ist Teil 1 – das Hinabfahren der Stufe mit der 2. Achse – ersichtlich. Dieser Vorgang hat solange Gültigkeit, bis die 3. Achse das Stufenhindernis berührt. Es ergeben sich unter Berücksichtigung von (177) die Gleichgewichtsbedingungen (178) – (181) für Teil 1:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (178)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha - mg \quad (179)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_1(R + s_2 \sin\beta) + mg((s_2 - s_1)\cos\beta + h_0 \sin\beta) - N_1 s_2 \cos\beta - F_2 R \quad (180)$$

$$F_1 = F_2 \quad (181)$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen ist erkennbar, dass das Herunterfahren des Stufenhindernisses mit der 2. Achse keine Antriebsmomente erfordert. Die 2. Achse setzt auf dem Boden auf – das Fahrzeug fährt horizontal weiter, bis die dritte Achse das Hindernis berührt und mit der Auffahrt beginnt. Ab diesem Zeitpunkt gilt Teil 2, der im Folgenden dargestellt wird. Teil 2 ähnelt Kapitel 5.1.5 – daraus ergeben sich auch ähnliche Gleichungen und Definitionen.

In Abb. 45 ist Teil 2 des Ansatzes für „B-D“ dargestellt. Es ergeben sich unter Berücksichtigung von (5) die Gleichgewichtsbedingungen (182) – (185):

$$\sum F_x = 0 = F_3 \sin\alpha - N_3 \cos\alpha + F_1 \quad (182)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_3 \sin\alpha + F_3 \cos\alpha - mg \quad (183)$$

$$\sum M_3 = 0 = -F_1(R + s \sin\beta) + mg((s - s_1)\cos\beta + h_0 \sin\beta) - N_1 s \cos\beta - F_3 R \quad (184)$$

$$F_1 = F_3 \quad (185)$$

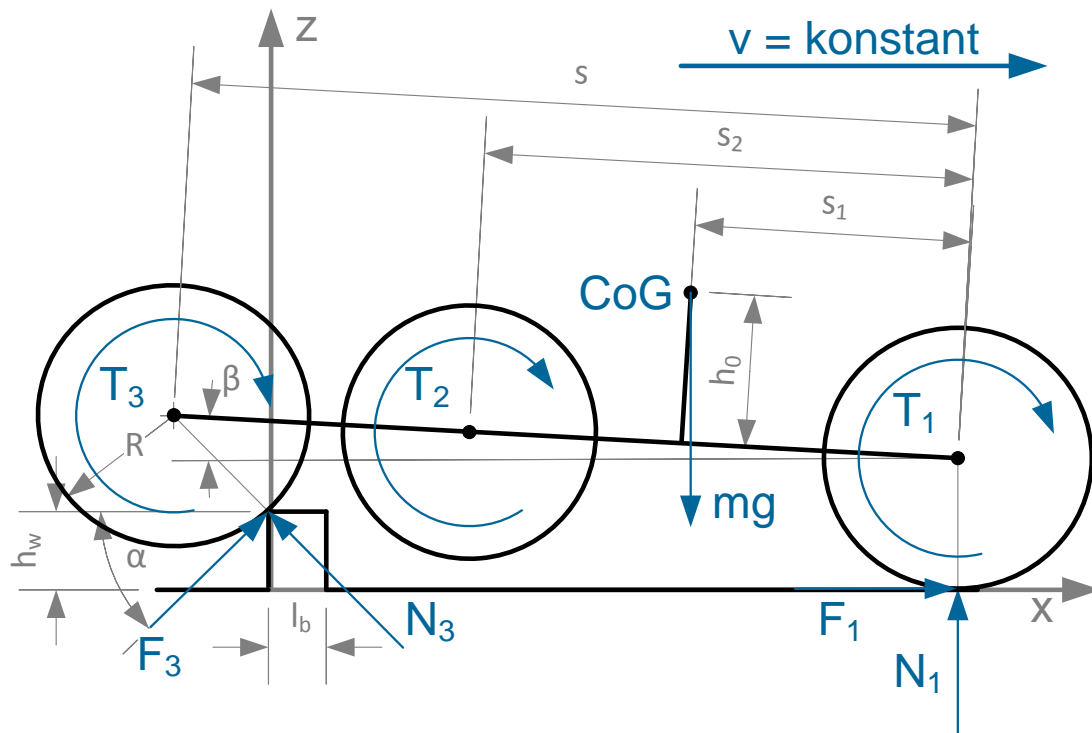


Abbildung 45: "B-D" mit Allradantrieb (Ansatz Teil 2)

Teil 2 hat solange Gültigkeit, bis die 3. Achse auf der Stufe angekommen ist und horizontal weiterfährt. Teil 3 beginnt, wo die 3. Achse die Kante erreicht und mit dem Hinunterfahren der Stufe beginnt – dieser Teil ist vergleichbar mit „B-D“ beim zweiachsigen Fahrzeug. In [Abb. 46](#) ist Teil 3 des Ansatzes ersichtlich:

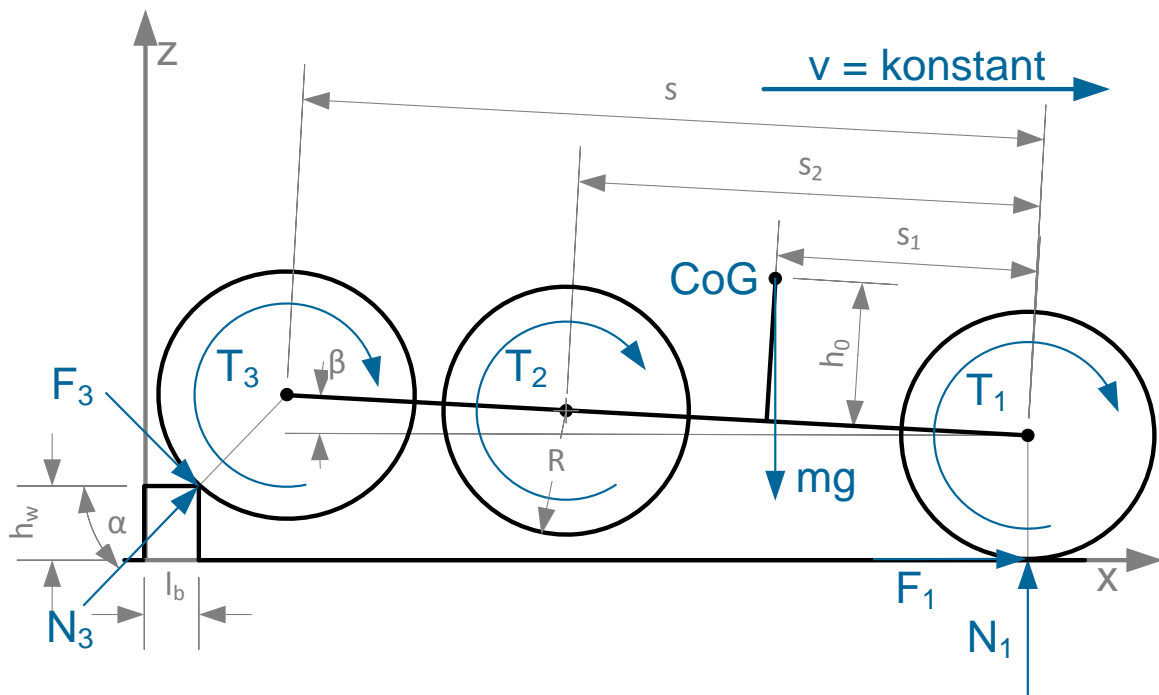


Abbildung 46: "B-D" mit Allradantrieb (Ansatz Teil 3)

Es ergeben sich unter Berücksichtigung von (5) die Gleichgewichtsbedingungen (186) – (189):

$$\sum F_x = 0 = F_3 \sin \alpha + N_3 \cos \alpha + F_1 \quad (186)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 + N_3 \sin \alpha - F_3 \cos \alpha - mg \quad (187)$$

$$\sum M_3 = 0 = -F_1(R + s \sin \beta) + mg((s - s_1) \cos \beta + h_0 \sin \beta) - N_1 s \cos \beta - F_3 R \quad (188)$$

$$F_1 = F_3 \quad (189)$$

Daraus folgt, dass ein Hinabfahren der Stufe mit der 3. Achse ohne Antriebsmoment möglich ist.

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R - mg(s_1 \cos\beta - h_0 \sin\beta) + N_2 s_2 \cos\beta - F_2 R \sin\alpha \quad (192)$$

$$F_1 = F_2 \quad (193)$$

Daraus ist ableitbar, dass ein Bremsmoment für das Hinabfahren der Vorderachse in den Graben notwendig ist, um die Geschwindigkeit konstant zu halten. Es erfolgt – wie in Kapitel 5 definiert -keine weitere Auswertung.

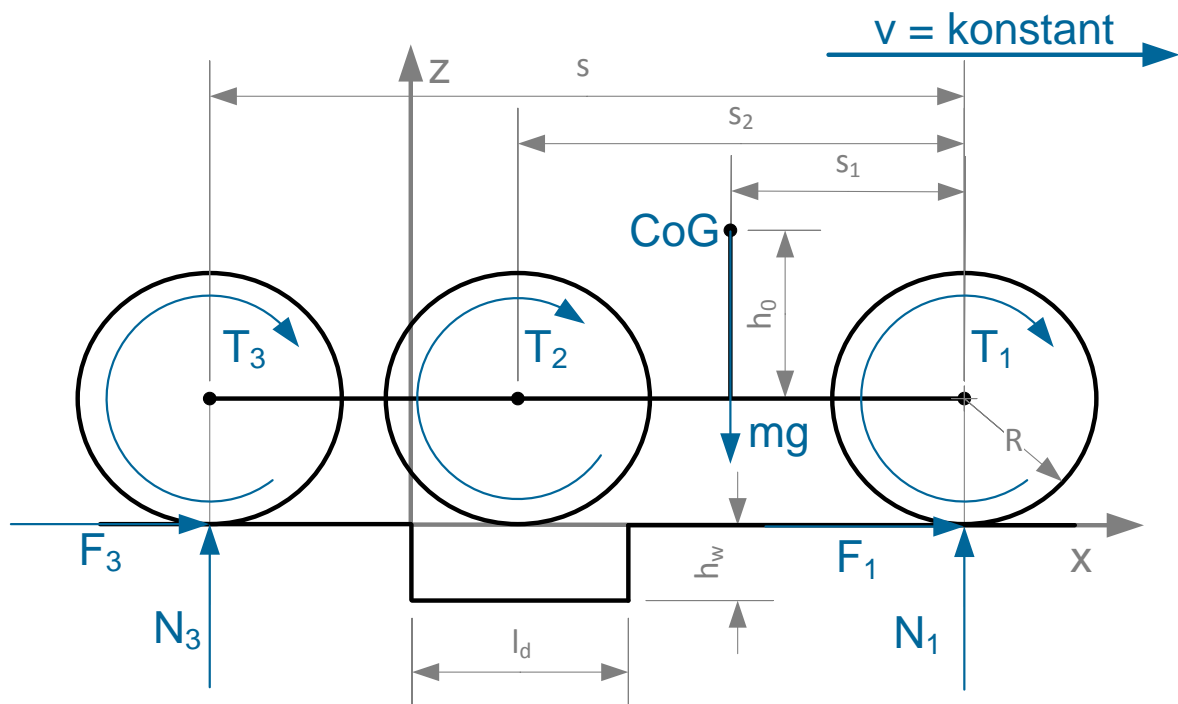


Abbildung 48: "C-AE" mit Allradantrieb (Ansatz)

In Abb. 48 ist das Überqueren des Grabens mit der zweiten Achse ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass hier eine Fahrt wie auf ebenem Untergrund möglich ist, da 1. und 3. Achse den Boden berühren. Es ist somit nicht notwendig, Gleichungen anzuführen oder im MATLAB – Programm Berechnungen durchzuführen.

Abb. 49 zeigt das Überqueren des Grabens mit der dritten Achse. Es sind ebenfalls keine Berechnungen anzustellen, da aufgrund der Schwerpunktlage das Fahrzeug mit den Rädern der 1. und 2. Achse auf der Ebene jenseits des Grabens unbehindert fährt.

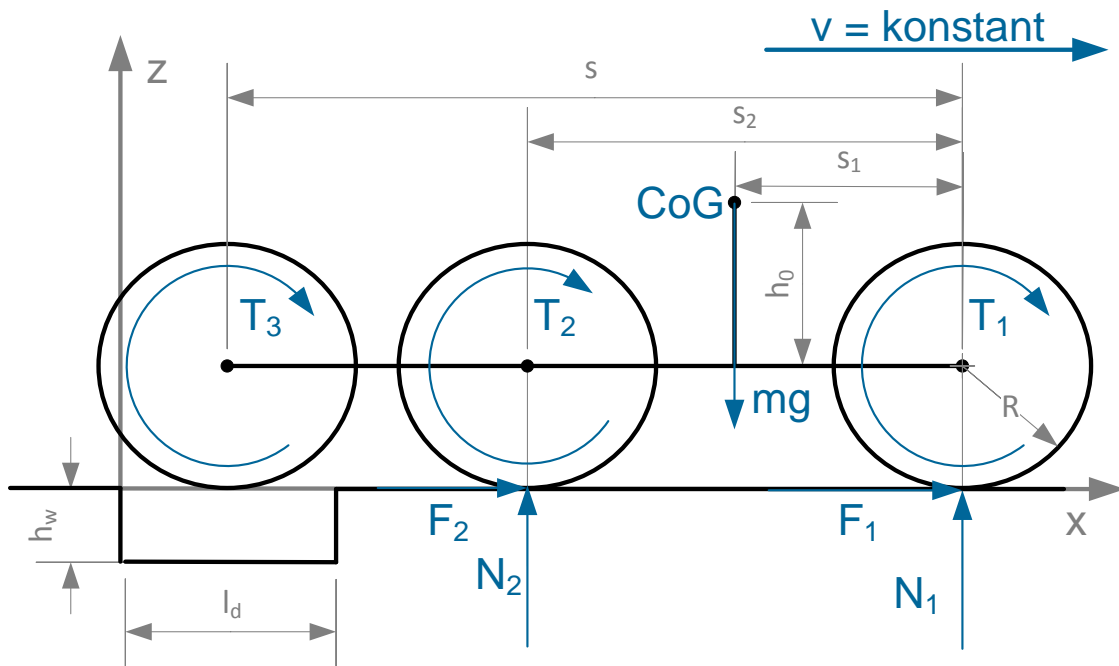


Abbildung 49: "C-AF" mit Allradantrieb (Ansatz)

5.1.8 „C-AD-2“ mit Allradantrieb

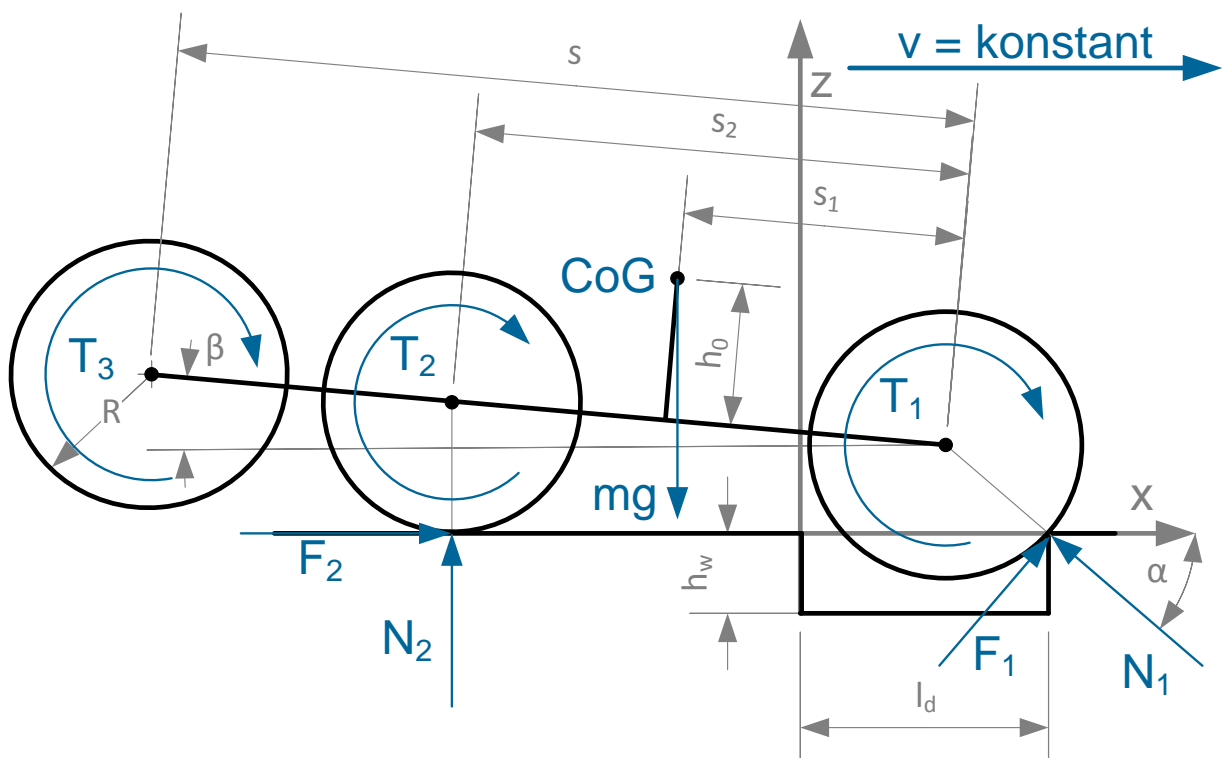


Abbildung 50: "C-AD-2" mit Allradantrieb

In Abb. 50 ist das Auffahren der Vorderachse auf der gegenüberliegenden Grabenseite dargestellt. Hierfür sind Gleichgewichtsbedingungen (194) – (197) unter Berücksichtigung von (163) aufstellbar:

$$\sum F_x = 0 = -N_1 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha + F_2 \quad (194)$$

$$\sum F_z = 0 = N_1 \sin \alpha + F_1 \cos \alpha + N_2 - mg \quad (195)$$

$$\sum M_1 = 0 = -F_1 R + N_2 s_2 \cos \beta - F_2 R \sin \alpha - mg(s_1 \cos \beta - h_0 \sin \beta) \quad (196)$$

$$F_1 = F_2 \quad (197)$$

5.2 Schwerpunkt liegt hinter 2. Achse

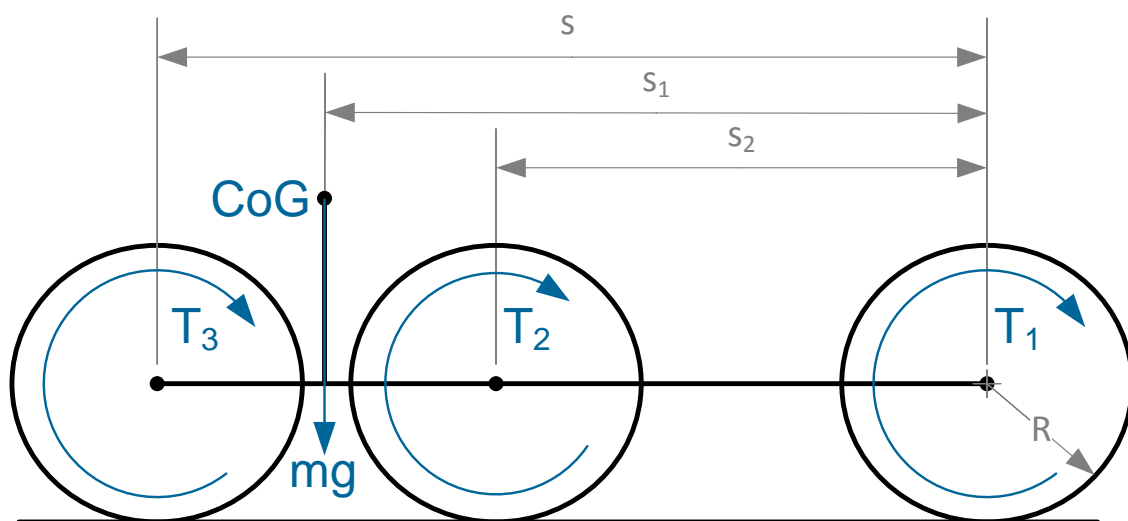


Abbildung 51: 3-achsiges Fahrzeug mit Schwerpunkt hinter der 2. Achse

In Abb. 51 ist die Lage des Schwerpunkts hinter der 2. Achse ersichtlich. Hierzu werden nun die Berechnungen für die Stufenüberschreitbarkeit der idealen Hindernisse durchgeführt.

5.2.1 „A-A“ mit Allradantrieb

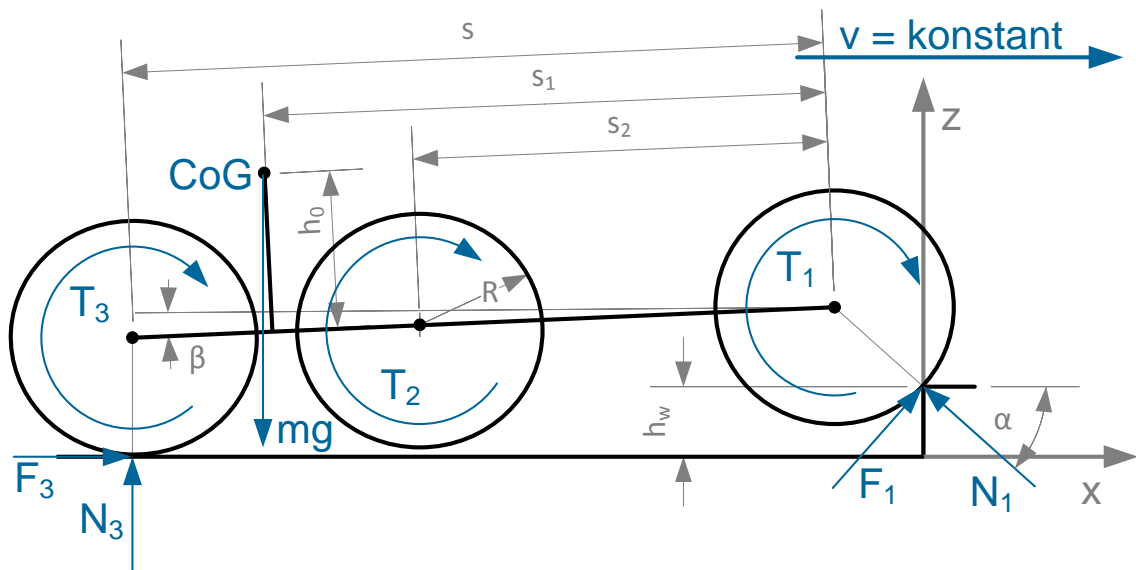


Abbildung 52: "A-A" mit Allradantrieb (Ansatz)

Im Wesentlichen gleicht dieser Ansatz dem aus 5.1.1. Außer durch eine Skizze des Ansatzes in Abb. 52 wird dieser Punkt nicht weiter behandelt – die zugehörigen Gleichgewichtsbedingungen und Formeln sind im oben genannten Kapitel ersichtlich.

5.2.2 „A-B“ mit Allradantrieb (2.Achse)

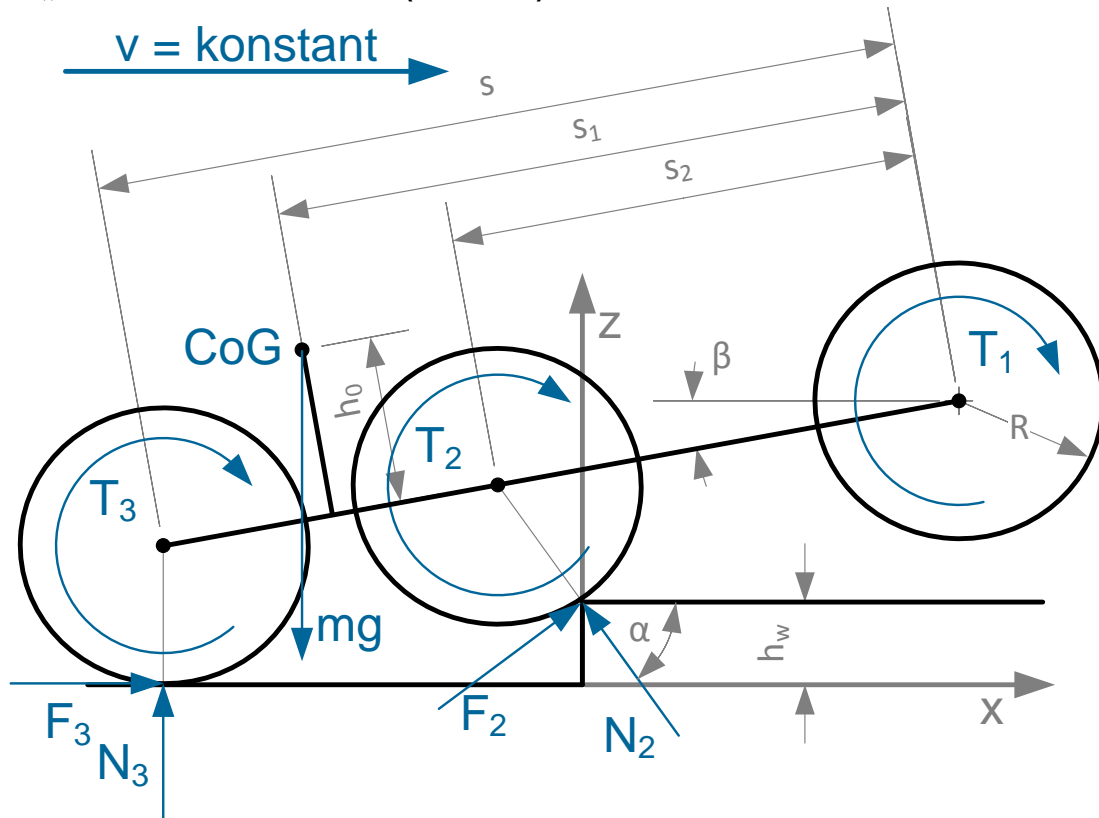


Abbildung 53: "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz für die 2. Achse)

In Abb. 53 ist das Befahren eines Plateauhindernisses mit den Rädern der 2. Achse bei Allradantrieb ersichtlich. Es ergeben sich daraus und unter Berücksichtigung von (158) & (198) die Gleichgewichtsbedingungen (199) – (202):

$$R + (s - s_2)\sin\beta = h_w + R\sin\alpha \quad (198)$$

$$\sum F_x = 0 = F_2\sin\alpha - N_2\cos\alpha + F_3 \quad (199)$$

$$\sum F_z = 0 = N_3 + N_2\sin\alpha + F_2\cos\alpha - mg \quad (200)$$

$$\begin{aligned} \sum M_2 = 0 = & -F_3(R + (s - s_2)\sin\beta) - mg((s_1 - s_2)\cos\beta + h_0\sin\beta) \\ & + N_3(s - s_2)\cos\beta - F_2R \end{aligned} \quad (201)$$

$$F_2 = F_3 \quad (202)$$

Daraus ergeben sich die Gleichungen (C) – (CII) für das MATLAB – Programm:

$$N_1 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta + h_0\sin\beta)(1 + \sin\alpha)}{\cos\alpha(2R + (s - s_2)\sin\beta) + (1 + \sin\alpha)((s - s_2)\cos\beta)} \quad (C)$$

$$N_3 = mg - N_2 \quad (CI)$$

$$F_2 = F_3 = \frac{N_2 \cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (CII)$$

5.2.3 „A-B“ mit Allradantrieb (3. Achse)

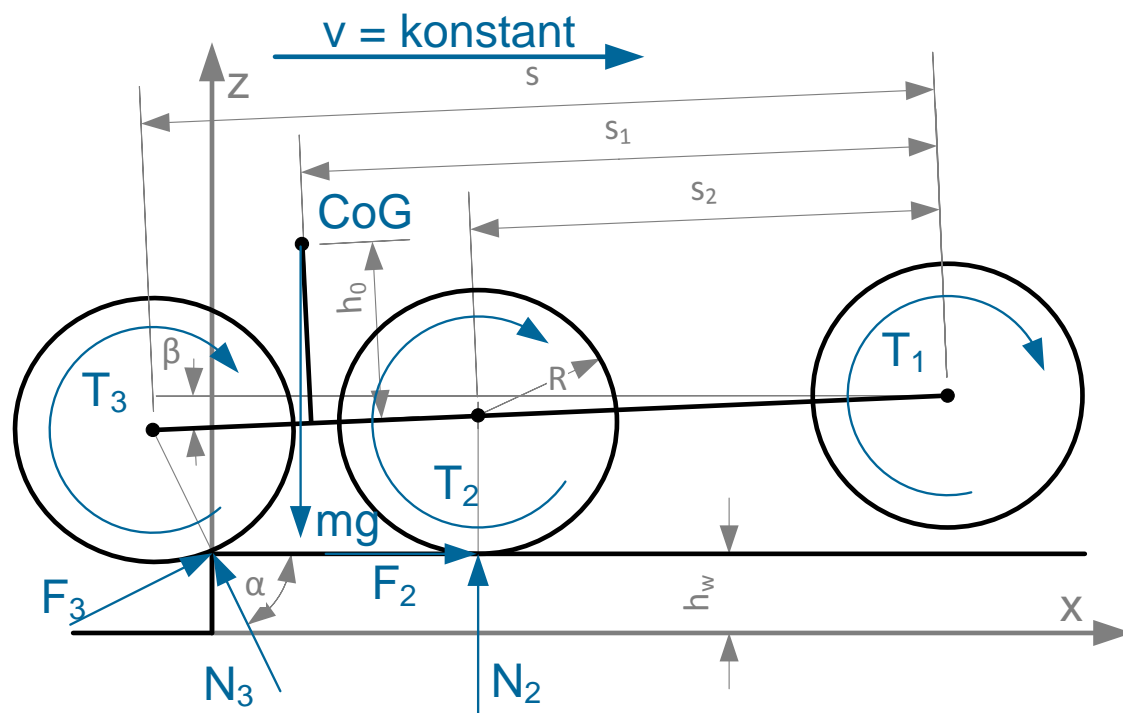


Abbildung 54: "A-B" mit Allradantrieb (Ansatz für 3. Achse)

In Abb. 54 ist das Hinauffahren eines Plateauhindernisses mit der 3. Achse ersichtlich. Aufgrund der Schwerpunktlage senkt sich die 1. Achse erst auf das Plateau herab, wenn die 3. Achse vollständig auf dem Plateau angekommen ist. Anschließend ist eine horizontale Weiterfahrt möglich. Unter Berücksichtigung von

(158) & (203) ergeben sich die Gleichgewichtsbedingungen (204) – (207), die zu den MATLAB – Gleichungen (CIII) – (CV) führen:

$$R + (s - s_2)\sin\beta = h_w + R\sin\alpha \quad (203)$$

$$\sum F_x = 0 = F_3\sin\alpha - N_3\cos\alpha + F_2 \quad (204)$$

$$\sum F_z = 0 = N_2 + N_3\sin\alpha + F_3\cos\alpha - mg \quad (205)$$

$$\sum M_3 = 0 = -F_2R\sin\alpha + mg((s - s_1)\cos\beta - h_0\sin\beta) - N_2(s - s_2)\cos\beta - F_3R \quad (206)$$

$$F_2 = F_3 \quad (207)$$

$$N_3 = \frac{mg((s_1 - s)\cos\beta + h_0\sin\beta)}{R\cos\alpha - (s - s_2)\cos\beta} \quad (\text{CIII})$$

$$N_2 = mg - N_3 \quad (\text{CIV})$$

$$F_2 = F_3 = \frac{N_3\cos\alpha}{1 + \sin\alpha} \quad (\text{CV})$$

5.2.4 „B-A“ mit Allradantrieb

Das Auffahren auf ein Stufen- oder Plateauhindernis ist ident, darum wird hier keine Berechnung angeführt. Diese ist 5.2.1 zu entnehmen. Generell hat bei einem Stufenhindernis (168) Gültigkeit.

5.2.5 „B-B“ mit Allradantrieb

Das Herunterfahren einer Stufe mit der 1. Achse ist in 5.1.4 ersichtlich. Trotz anderer Lage des Schwerpunkts haben die dort angegebenen Formeln auch für diesen Fall Gültigkeit. Darum wird auf eine erneute Angabe einer Skizze und von Formeln verzichtet.

5.2.6 „B-C“ & „B-D“ mit Allradantrieb

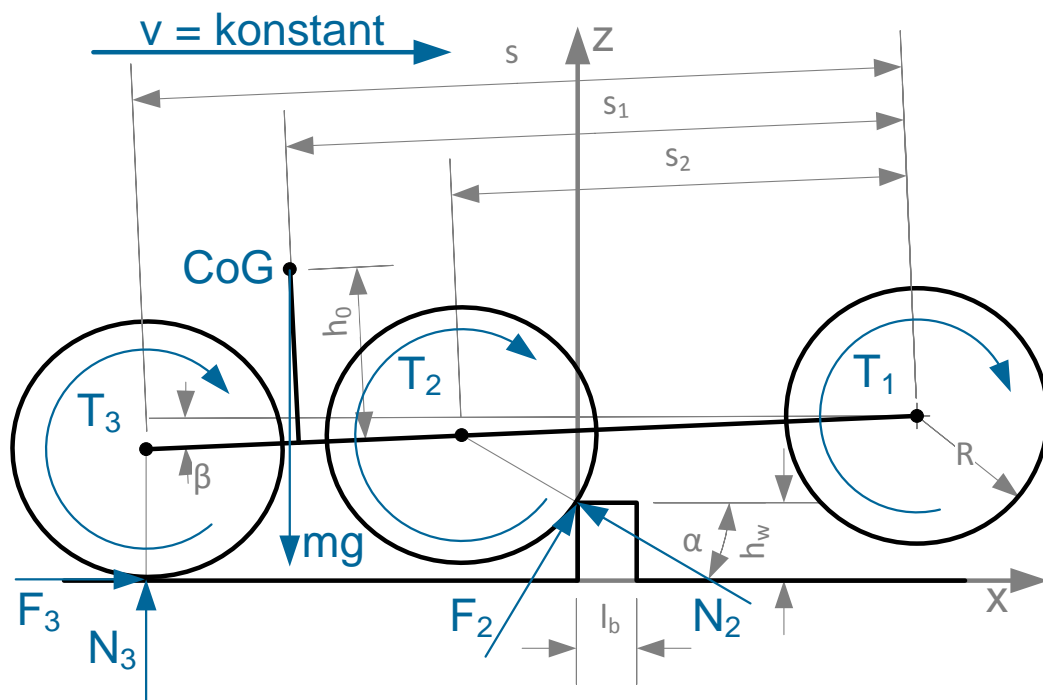


Abbildung 55: "B-C" mit Allradantrieb (Ansatz für 2. Achse)

In Abb. 55 ist das Befahren eines Stufenhindernisses mit der 2. Achse bei Allradantrieb dargestellt. Die Gleichungen (208) – (211) sind unter Berücksichtigung von (203) gültig:

$$\sum F_x = 0 = F_2 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + F_3 \quad (208)$$

$$\sum F_z = 0 = N_3 + N_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha - mg \quad (209)$$

$$\sum M_2 = 0 = -F_3((s - s_2) \sin \beta + R) - mg((s_1 - s_2) \cos \beta + h_0 \sin \beta) + N_3(s - s_2) \cos \beta - F_2 R \quad (210)$$

$$F_2 = F_3 \quad (211)$$

Auf eine Auswertung der Gleichgewichtsbedingung wird – wie in Kapitel 5 angegeben – verzichtet.

5.2.7 Verbleibende Hindernisfälle (Stufe und Graben)

Das Hinabfahren der Stufe mit der 2. Achse entspricht im Großen und Ganzen dem Hinunterfahren eines Stufenhindernisses mit dem Vorderrad eines 2-achsigen Fahrzeuges mit Allradantrieb (Siehe Kapitel 3.2.2). Das Befahren des Stufenhindernisses mit der 3. Achse entspricht somit Kapitel 3.2.3 und das Hinunterfahren des Stufenhindernisses entspricht Kapitel 3.2.4 – Somit wird für diese Fälle auf Angabe von Skizzen und Gleichgewichtsbedingungen verzichtet. Zu berücksichtigen ist hier jeweils, dass anstelle der Kräfte und Abmessungen der 2. Achse jene der 3. Achse in die Gleichungen einzusetzen sind.

Das Überfahren eines Grabenhindernisses mit der 1. und 2. Achse erfolgt wie die horizontale Fahrt – auf Angabe von Gleichungen kann daher verzichtet werden. Eine Skizze hierzu ist in 5.2.6 ersichtlich.

Das Überqueren eines Grabenhindernisses mit der 3. Achse setzt sich wieder aus 2 Teilen zusammen. Teil 1 beschreibt das Hinabfahren in das Hindernis, bis das Rad den Graben schließlich an 2 Punkten berührt – die 1. Achse befindet sich hierbei aufgrund der Schwerpunktlage in der Luft. Teil 2 beschreibt das Hinauffahren auf der gegenüberliegenden Wand des Grabenhindernisses mit der 3. Achse – die 1. Achse senkt sich erst auf den Boden, wenn die 3. Achse die Horizontale erreicht hat. Auf eine Angabe von Skizzen kann wiederum verzichtet werden, da dieser Fall im Prinzip Kapitel 4.3.3 entspricht. Es ist einzig darauf zu achten, dass in den Gleichungen die Abstände und Kräfte der 1. Achse durch jene der 2. und die die der 2. Achse durch jene der 3. Achse ersetzt werden

6 MATLAB – Programm: Hinweise zur Bedienung und programmtechnische Ausarbeitung

6.1 Ablaufschema MATLAB

In Abb. 56 ist das Ablaufschema des MATLAB – Programms ersichtlich.

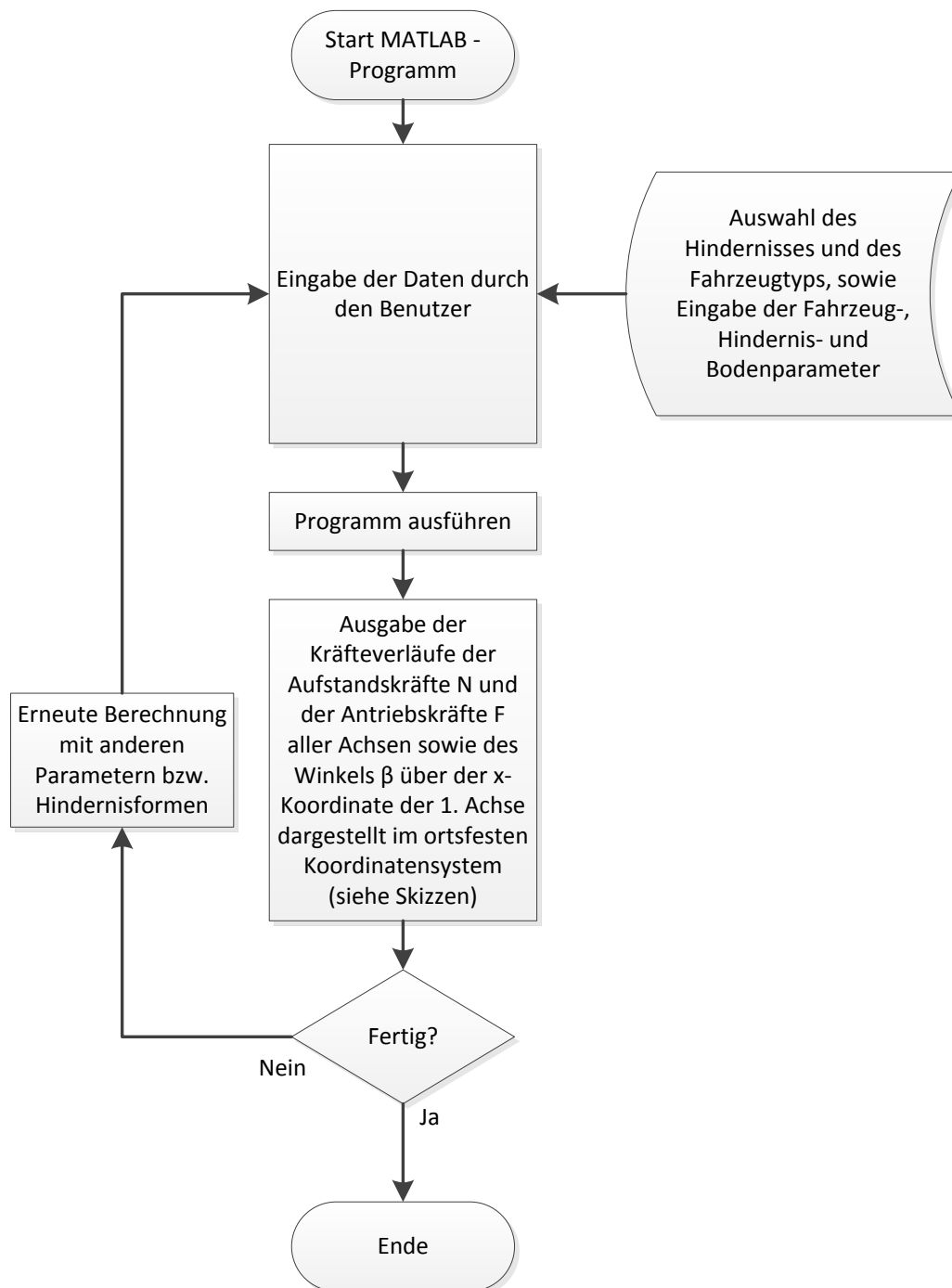


Abbildung 56: Ablaufschema MATLAB - Programm

6.2 Eingabemaske und Bedienung des Programms

In [Abb. 57](#) ist die Eingabemaske für das MATLAB – Programm „STEPMASTER“ ersichtlich. Abhängig von der zu berechnenden Hindernis- und Fahrzeugart sind nicht alle Größen einzugeben. Jene Variablen, die nicht für die Berechnung benötigt werden, können ausgelassen werden, jedoch auch eingegeben werden, da nur jene Variablen Berücksichtigung finden, die für den jeweiligen Fall benötigt werden. Die Auswahl von Hindernistyp, Fahrzeugtyp (2- oder 3-achsig), Antriebsart (Hinterrad- bzw. Allradantrieb) und Radeigenschaften (flexibel, starr) erfolgt durch Listenmenüs.

Abbildung 57: Eingabemaske "STEPMASTER"

Durch Eingabe der Variablen $x_{1\text{interest}}$ (steht für die zu betrachtende Lage der 1. Achse x_1) können die berechneten Werte (F_1 , F_2 , N_1 , N_2 , β ...) an dieser Stelle in einem Dialogfenster ([siehe Abb. 58](#)) ausgegeben werden. Der Wert von $x_{1\text{interest}}$ hat im Bereich $-2 \cdot R \leq x_{1\text{interest}}$ zu liegen. Für Werte, die nach der Hindernisüberquerung

liegen, wird eine Fahrt in der Ebene angenommen. Um keine Werte für $x_{1\text{interest}}$ auszugeben, ist das Eingabefeld freizulassen.

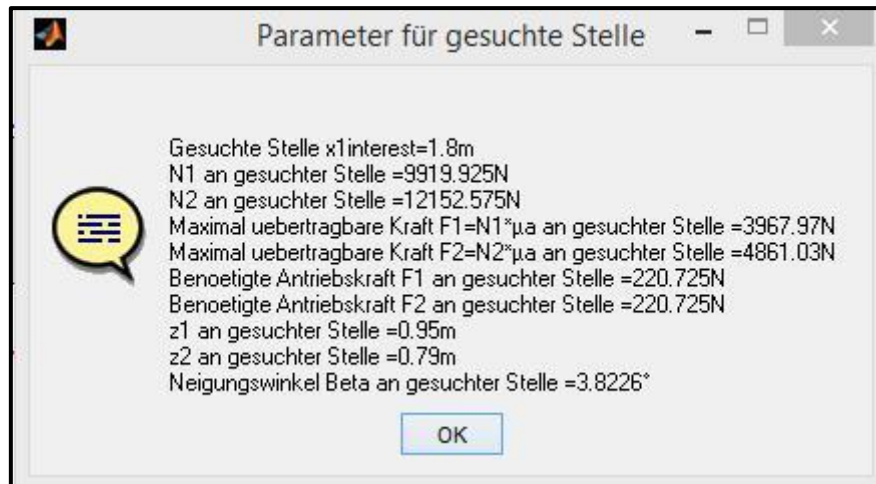


Abbildung 58: Parameterausgabe für die untersuchte Stelle $x_{1\text{interest}}$

Hindernisform	Achszahl	Antriebsart	Radeigenschaften
Ideales Plateauhindernis	2	Hinterrad	starr
	2	Allrad	starr
	2	Allrad	flexibel
	3	Allrad	starr
Ideales Stufenhindernis	2	Hinterrad	starr
	2	Allrad	starr
	2	Allrad	flexibel
Ideales Grabenhindernis	2	Hinterrad	starr
	2	Allrad	starr
	2	Allrad	flexibel
Reales Plateauhindernis	2	Hinterrad	starr
	2	Allrad	starr

Abbildung 59: Auswählbare Fahrzeug - Hinderniskombinationen

In Abb. 59 sind die vom Programm berechenbaren Fahrzeug-Hinderniskombinationen ersichtlich. Für jede dieser Kombinationen ist zusätzlich eine Variation der Eingabeparameter Fahrzeugmasse, Radstand, etc. .. möglich. Eine Übersicht, welche Variablen für die jeweilige Fahrzeug-Hinderniskombination benötigt werden, können Abb. 60 oder den jeweiligen Ansatzabbildungen in den Kapiteln entnommen werden.

Variable	Plateauhindernis ideal	Stufenhindernis ideal	Grabenhindernis ideal	Plateauhindernis real
s	•	•	•	•
s ₁	•	•	•	•
s ₂	• ¹⁾			
h ₀	•	•	•	•
R	•	•	•	•
m	•	•	•	•
T	•	•	•	•
c	• ²⁾	• ²⁾	• ²⁾	
h _w	•	•	•	•
l _x				•
l _d			•	
l _b		•		
k ₁				•
η _r	•	•	•	•
μ _a	•	•	•	•

Legende: 1) 3-achsig 2) flexible Räder

Abbildung 60: Variablenbedarf für STEPMASER

Weiters sind in den Abb. 61 – Abb. 62 Warnhinweise dargestellt, die bei Eingabe von Werten erfolgen, die nicht in der Definition liegen – beispielsweise negativer Radradius. Außerdem wird so auf die Eingabe von nicht im Programm hinterlegten Fahrzeug – Hindernis – Kombinationen reagiert – z.B.: Dreiachsiges Fahrzeug mit flexiblen Rädern.

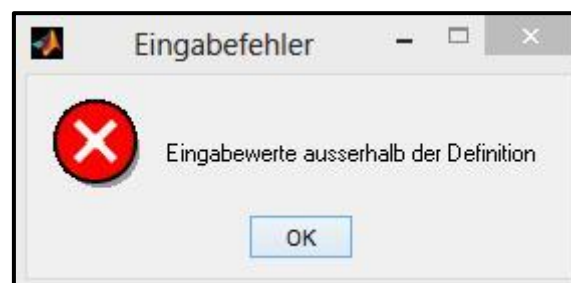


Abbildung 61: Warnhinweise "Eingabewerte außerhalb der Definition"



Abbildung 62: Auswahl einer nicht berechenbaren Fahrzeug-Hindernis-Kombination

Eine Auswahl und Berechnung dieser Varianten ist somit nicht möglich, kann aber in einer möglichen Erweiterung problemlos in den bestehenden Code eingefügt werden. Beispielsweise ist eine Änderung der Momentenaufteilung beim Allradantrieb jederzeit möglich. Im Programm sind jene Varianten hinterlegt, die auch im Rahmen dieser Arbeit behandelt wurden und für die MATLAB – Gleichungen angeführt sind (erkennbar durch Nummerierung mit römischen Zahlen).

7 Auswertung

7.1 Referenzfahrzeug

Die Auswertung der Hindernisformen erfolgt anhand eines Referenzfahrzeuges, das häufig eingesetzt wird und somit einen Bezug zur Realität aufweist. Hierzu wird der Mercedes G 290 GD als kurzer Stationwagen herangezogen, der als Puch G Verwendung beim österreichischen Bundesheer findet. Weiters wird er bei anderen Militärs und nichtmilitärischen Organisationen weltweit eingesetzt. In Abb. 63 ist ein Foto des Puch G ersichtlich und in Abb. 64 sind die technischen Daten des zweiachsigen Mercedes / Puch G 290 aufgeführt.



Abbildung 63: Mercedes G-Modell des ÖBH [1]

Technische Daten Mercedes / Puch G 290 GD	
Baureihe	W461
Bauzeit	1992 - 1997
Achszahl [-]	2
Raddurchmesser [m]	0.79
Radstand [m]	2.4
Schwerpunktlage hinter Vorderachse [m]	1.3264
Schwerpunktlage über Achse [m]	0.3483
Leergewicht [kg]	2012
Berücksichtigte Gesamtmasse [kg] *	2250
Max. Drehmoment [Nm]	192
Achsübersetzung	1:5.286
Hubraum [ccm]	2874
Leistung [kW]	70
Umfangskraftverteilung bei Allradantrieb [-]	vorne:hinten = 50:50
Bremsabstimmung: Scheibenbremsen vorne & hinten	
*) Leergewicht + Fahrer + Beifahrer + Betriebsflüssigkeiten	

Abbildung 64: Technische Daten Puch G 2-achsig [4][9]

Da dieses Fahrzeug nicht als dreiachsiges Fahrzeug hergestellt bzw. eingesetzt wird, wird eine fiktive dritte Achse angenommen und die Fahrzeugmasse und Schwerpunktlage entsprechend angepasst.

Technische Daten Mercedes / Puch G 290 GD (fiktiv)	
Baureihe	W461
Bauzeit	1992 - 1997
Achszahl fiktiv [-]	3
Raddurchmesser [m]	0.79
Radstand zw. 1. und 2. Achse [m]	2.4
Radstand zw. 2. und 3. Achse fiktiv [m]	1
Schwerpunktlage hinter Vorderachse [m]	1.64
Schwerpunktlage über Achse [m]	0.32
Leergewicht [kg]	2300
Berücksichtigte Gesamtmasse [kg] *	2550
Max. Drehmoment [Nm]	192
Achsübersetzung	1:5.286
Hubraum [ccm]	2874
Leistung [kW]	70
Umfangskraftverteilung bei Allradantrieb gleichmäßig auf alle Achsen mit Bodenkontakt	
Bremsabstimmung: Scheibenbremsen vorne & hinten	
*) Leergewicht + Fahrer + Beifahrer + Betriebsflüssigkeiten	

Abbildung 65: Technische Daten Puch G 3-achsig (Fiktiv) [4][9]

Motor und Getriebe werden nicht verändert, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die technischen Daten des fiktiven 3-achsigen Fahrzeuges sind Abb. 65 zu entnehmen.

7.2 Auswertung der Hindernisse

Um eine Vergleichbarkeit der Ansätze zu ermöglichen, werden folgende Hindernisfälle untersucht:

- 2-achsiges Fahrzeug mit starren Rädern mit Hinter- und Allradantrieb für ideales Plateauhindernis, Stufenhindernis und Grabenhindernis bei folgenden Parametervariationen: $\eta_r = 0.02 = \text{konst}$ & $\mu_a = 0.2, 0.4, 0.6$ & $h_w/R = 0.3, 0.6, 0.99 = 54$ Fälle
- 2-achsiges Fahrzeug mit Allradantrieb mit flexiblen Rädern bzw. starren Rädern für ideales Plateauhindernis bei Parametern: $\eta_r = 0.02 = \text{konst}$ & $\mu_a = 0.4$ & $h_w/R = 0.6 = 2$ Fälle
- 2-achsiges Fahrzeug mit Allradantrieb und starren Rädern für ideales Plateauhindernis im Vergleich zum realen Plateauhindernis mit Parametern: $\eta_r = 0.02 = \text{konst}$ & $\mu_a = 0.4$ & $h_w/R = 0.6$ & $l_x = h_w/4$ & $k_1 = \text{annähernd senkrecht} = 2$ Fälle
- 3-achsiges Fahrzeug mit Allradantrieb und starren Rädern für ideales Plateauhindernis im Vergleich zum 2-achsigen Fahrzeug mit Parametern: $\eta_r = 0.02 = \text{konst}$ & $\mu_a = 0.4$ & $h_w/R = 0.6 = 2$ Fälle

Um eine gute Übersichtlichkeit zu gewährleisten, können die Diagramme dieser Fälle der beiliegenden CD-ROM entnommen werden. Im Folgenden werden einige spezifische Fälle herausgegriffen, die eine gute Vergleichbarkeit der Ansätze und Antriebsarten ermöglichen.

7.3 Auswertung und Gegenüberstellung der untersuchten Hindernisformen und Antriebsarten

In folgenden Auswertungen werden die Fahrzeugparameter des Referenzfahrzeugs (2- bzw. 3- achsig – siehe [Abb. 64](#) & [Abb. 65](#)) herangezogen und darum nicht mehr gesondert angegeben. Weiters sind in [Abb. 66](#) Fahrzeug- und Hindernisparameter aufgeführt, die – außer bei einzelnen Variationen von Werten bei den unterschiedlichen Gegenüberstellungen – für sämtliche Untersuchungen als konstant gelten.

Konstante Hindernis- und Fahrzeugparameter		
Antriebsart	Rollwiderstandsbeiwert η_r [-]	Reibwert μ_a [-]
Allrad	0.02	0.4
Stufenlänge l_b [m]	Grabenlänge l_d [m]	Hindernishöhe h_w [m]
0.4	0.4	0.24

Abbildung 66: Konstante Fahrzeug- und Hindernisparameter

Generell gilt für den Allradantrieb, dass die Antriebs- und Bremskräfte gleichmäßig auf alle in Bodenkontakt stehenden Achsen aufgeteilt werden.

7.3.1 Variation des Reibwerts μ_a am Plateauhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb

In dieser Gegenüberstellung wird die Auswirkung des Reibwerts μ_a auf die Überschreitbarkeit eines Plateauhindernisses dargestellt. Sämtliche anderen Fahrzeug- und Hindernisparameter bleiben unverändert. Abb. 67 zeigt zur besseren Vorstellbarkeit die Überquerung des Plateauhindernisses mit den in den Diagrammen ausgegebenen Größen.

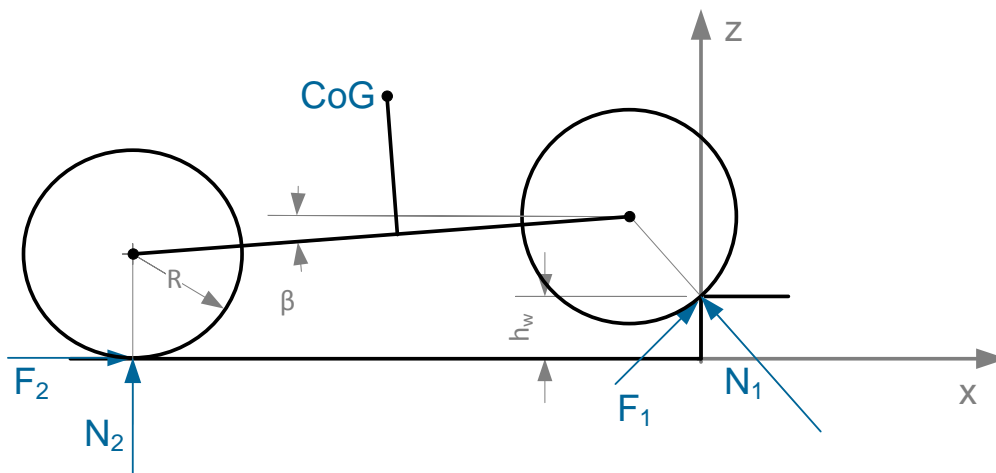


Abbildung 67: Skizze des Plateauhindernisses und der ausgegebenen Größen

In Abb. 68 sind die betrachteten Variationen ersichtlich. Die Abb. 69 – 72 zeigen die Kräfteverläufe bei der Überquerung des Plateauhindernisses.

Plateauhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von μ_a		
μ_a [-]		
0.2	0.4	0.6

Abbildung 68: Reibwertvariation am Plateauhindernis

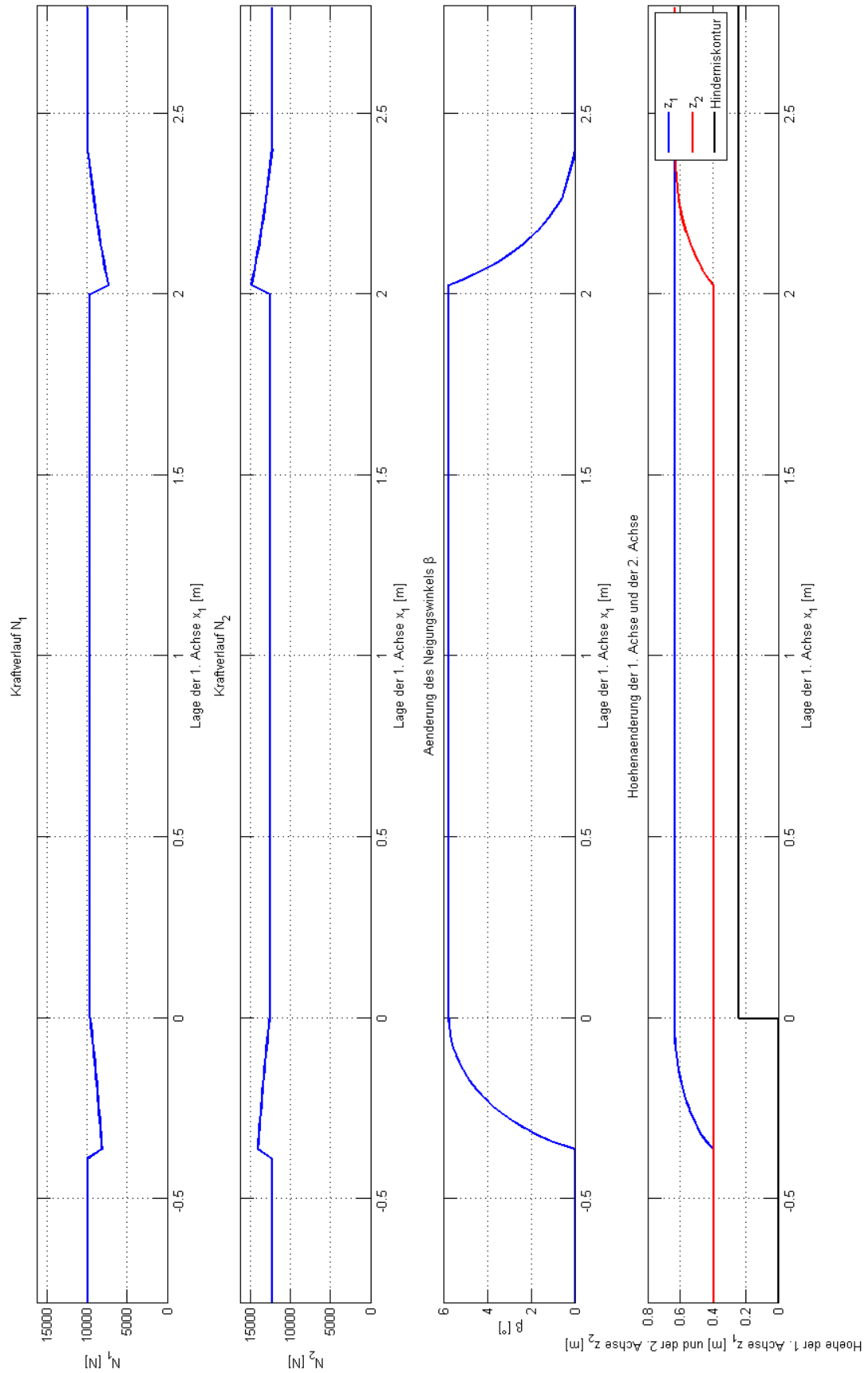


Abbildung 69: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Reibwertvariation am Plateauhindernis

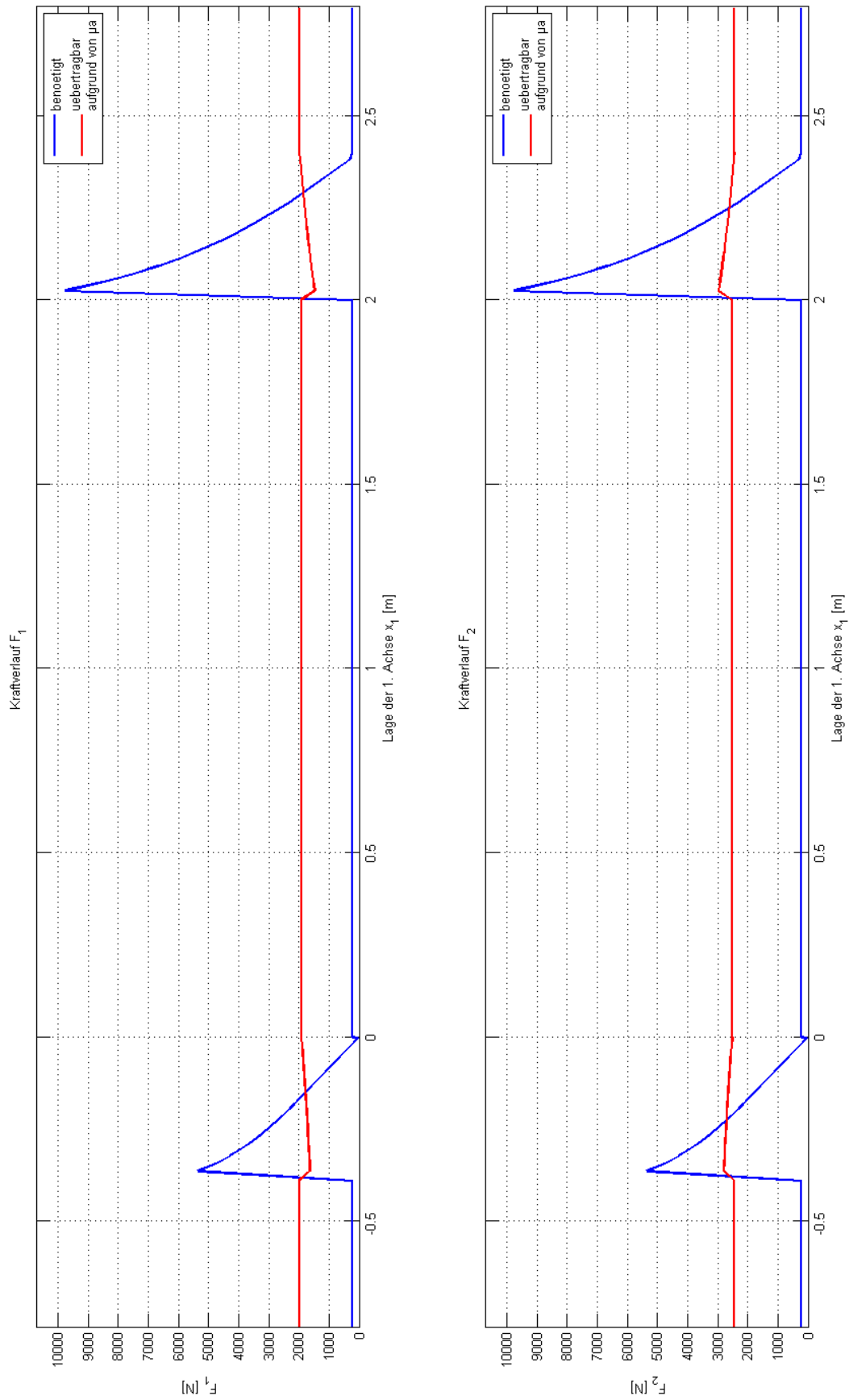


Abbildung 70: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Plateauhindernis bei $\mu_a=0.2$

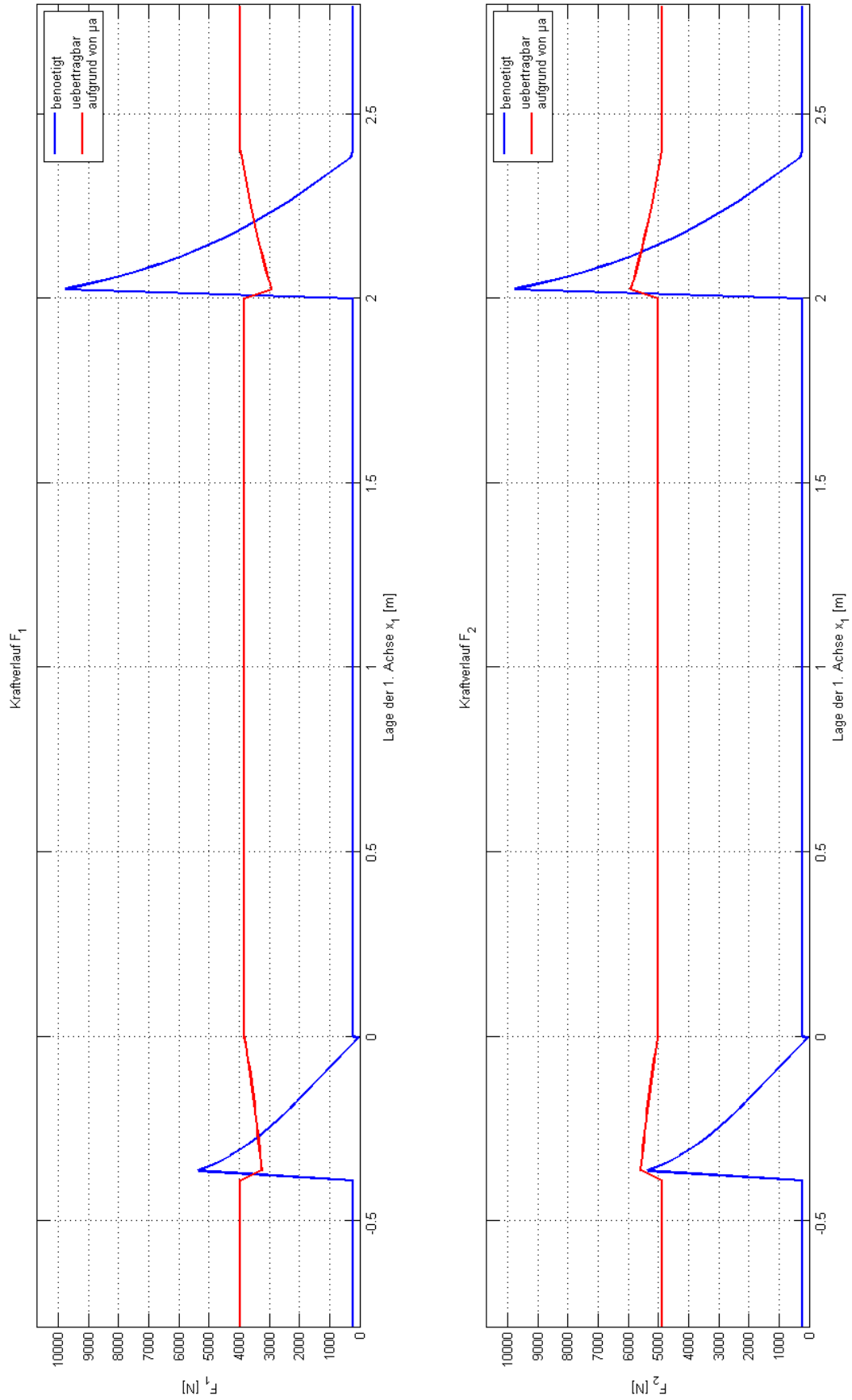


Abbildung 71: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Plateauhindernis bei $\mu_a=0.4$

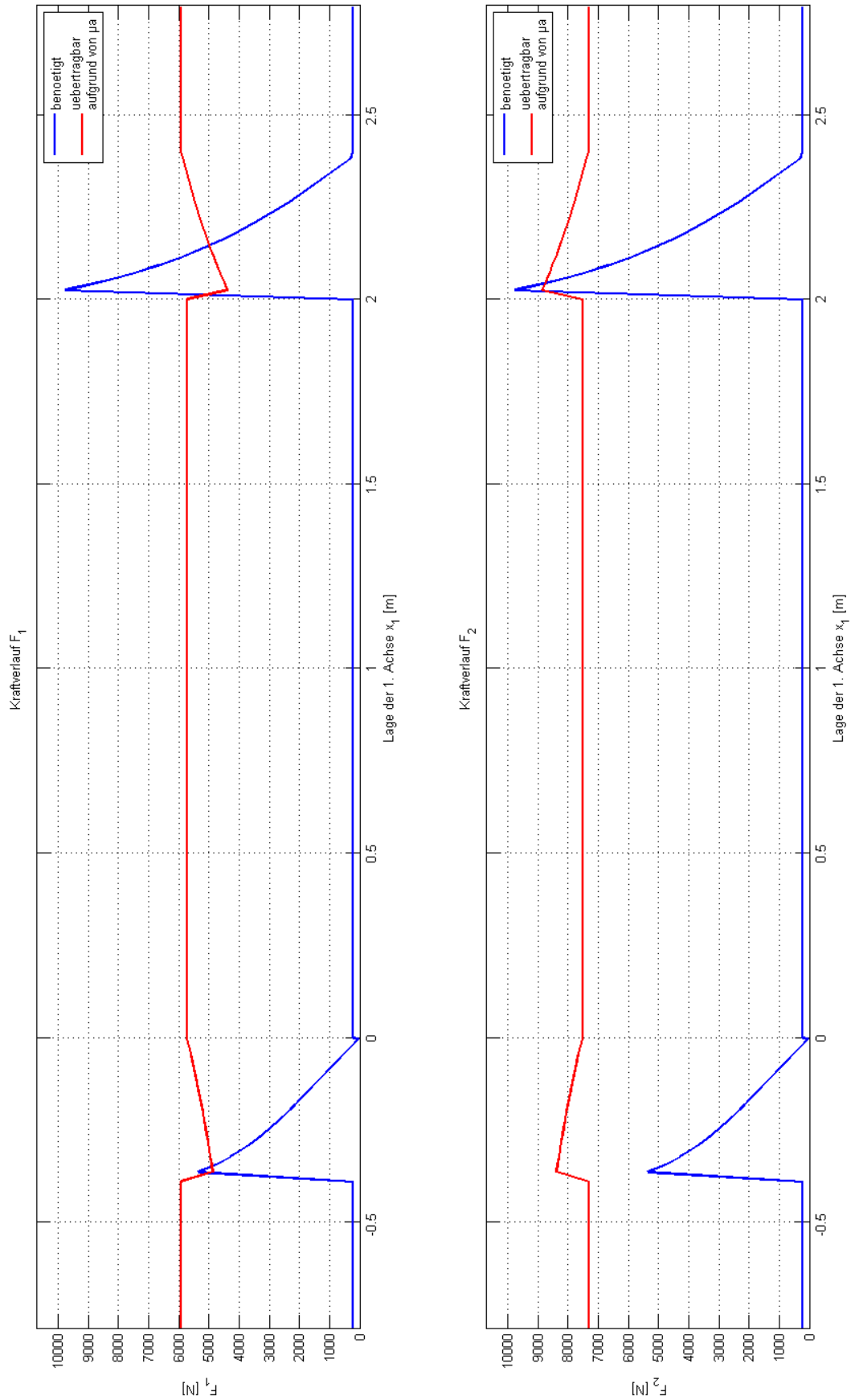


Abbildung 72: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Plateauhindernis bei $\mu_a=0.6$

Die Aufstandskräfte N_1 und N_2 , der Neigungswinkel β und die Lagen der Achsen z_1 und z_2 werden von der Reibwertvariation nicht beeinflusst und können somit in einem Diagramm (Abb. 69) dargestellt werden, während sich die benötigten und übertragbaren Antriebskräfte F_1 und F_2 ändern und für jeden Reibwert eigene Diagramme benötigen (Abb. 70 – Abb. 72). In Abb. 73 werden diese Antriebskräfte miteinander verglichen.

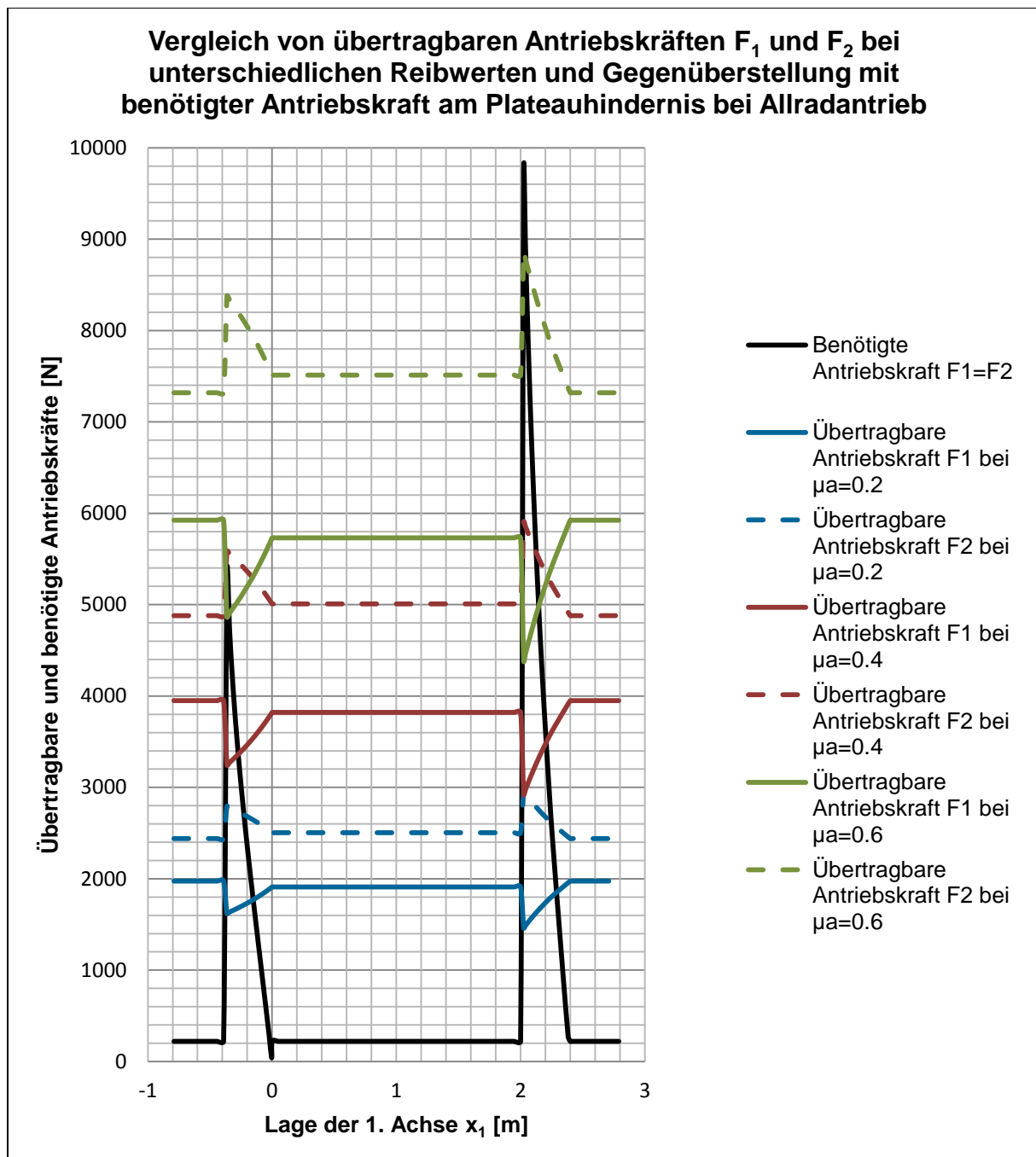


Abbildung 73: Gegenüberstellung der übertragbaren und benötigten Antriebskräfte bei Reibwertvariation

Gut erkennbar sind in der Gegenüberstellung die übertragbaren Antriebskräfte, die selbst bei einem Reibwert von $\mu_a=0.6$ eine Überschreitung des Plateauhindernisses nicht möglich machen, da die benötigten Antriebskräfte sowohl beim Auffahren der 1. Achse als auch beim Auffahren der 2. Achse auf das Hindernis über den übertragbaren Kräften liegen. Hier zeigt sich die eindeutige Limitierung der Geländegängigkeit von Fahrzeugen durch die Bodenparameter, während zu niedrige Motorleistungen von Fahrzeugen heutzutage kaum mehr Einschränkungen darstellen.

Während der Fahrt in der Ebene (vor Befahren des Hindernisses mit der 1. Achse und nach Befahren mit der 2. Achse) und der schrägen Fahrt (Vorderachse auf dem Hindernis, Hinterachse auf dem Boden) sind jedoch kaum Antriebskräfte nötig, einzig der Rollwiderstand muss überwunden werden.

Der Einfluss der Hindernishöhe auf die Überschreitbarkeit wird im nachfolgenden Vergleich (siehe 7.3.2) untersucht. Ebenfalls gut erkennbar sind die unterschiedlich hohen Kraftbedarfe für das Überschreiten des Hindernisses mit der 1. und der 2. Achse. Ebenso gut ablesbar sind die unterschiedlichen übertragbaren Kräfte an den beiden Achsen. Dies resultiert aus der Schwerpunktlage. Eine Variation der Schwerpunktlage und Ihre Auswirkung auf die Kraftverläufe werden in 7.3.3 betrachtet.

7.3.2 Variation der Hindernishöhe h_w am Plateauhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb

Plateauhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von h_w		
h_w [m]		
0.08	0.16	0.24
daraus resultierend: h_w / R [-]		
0.2	0.4	0.6

Abbildung 74: Variation der Hindernishöhe am Plateauhindernis

Für die Parameter der Variation der Hindernishöhe wird auf [Abb. 74](#) verwiesen. Dieser zeigt die Hindernisvariation bei dem in [Abb. 67](#) dargestellten Plateauhindernis samt zweiachsigem Fahrzeug mit Allradantrieb und starren Rädern. [Abb. 75 – Abb. 78](#) zeigen die Lage- und Kräfteverläufe der Hindernishöhen $h_w = 0.08\text{m}$ und $h_w = 0.16\text{m}$. Für die Darstellung der Kräfteverläufe für eine Hindernishöhe $h_w = 0.24\text{m}$ wird auf die [Abb. 69](#) & [Abb. 71](#) verwiesen.

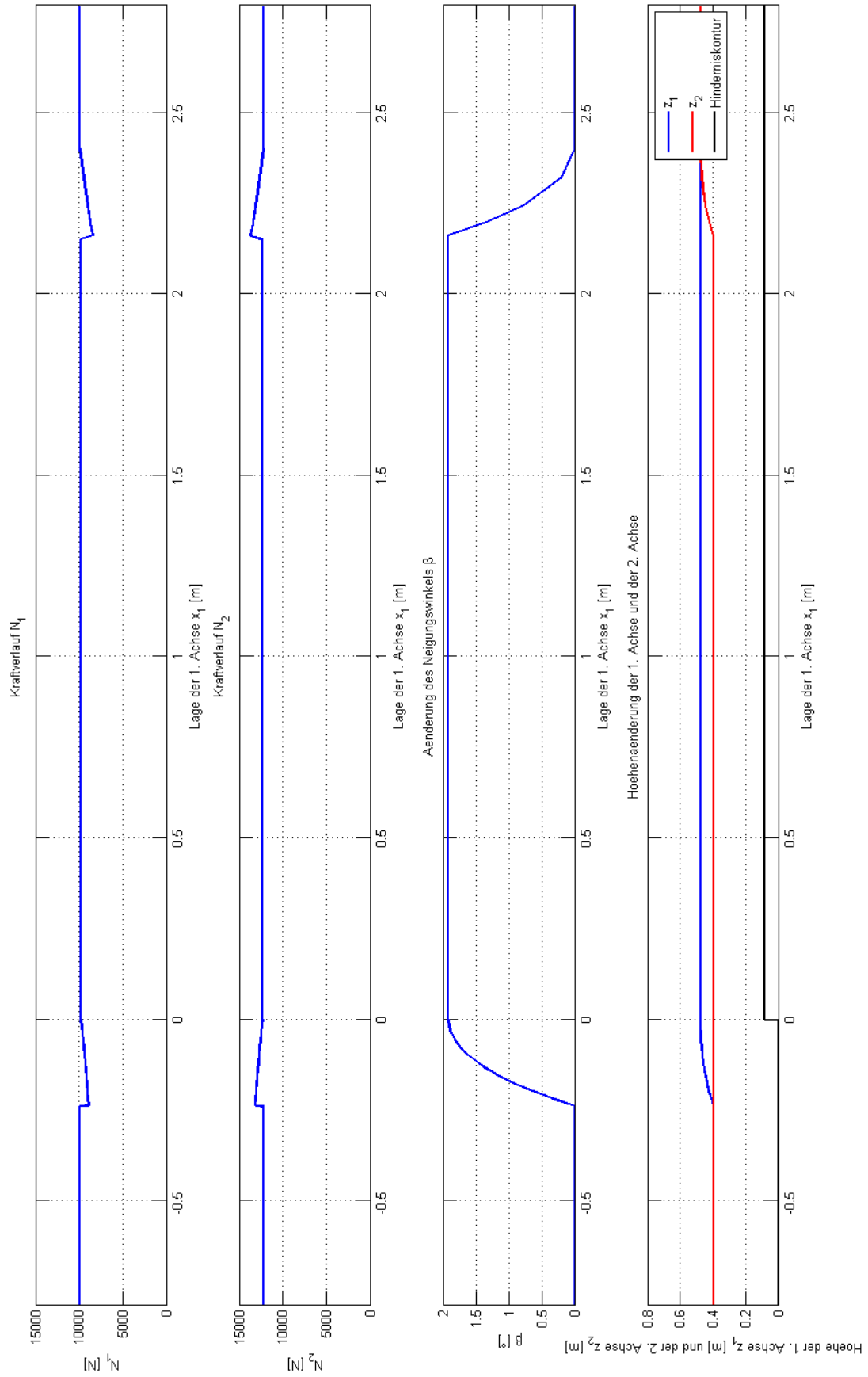


Abbildung 75 Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Hindernishöhenvariation am Plateauhindernis bei $h_w=0.08\text{m}$

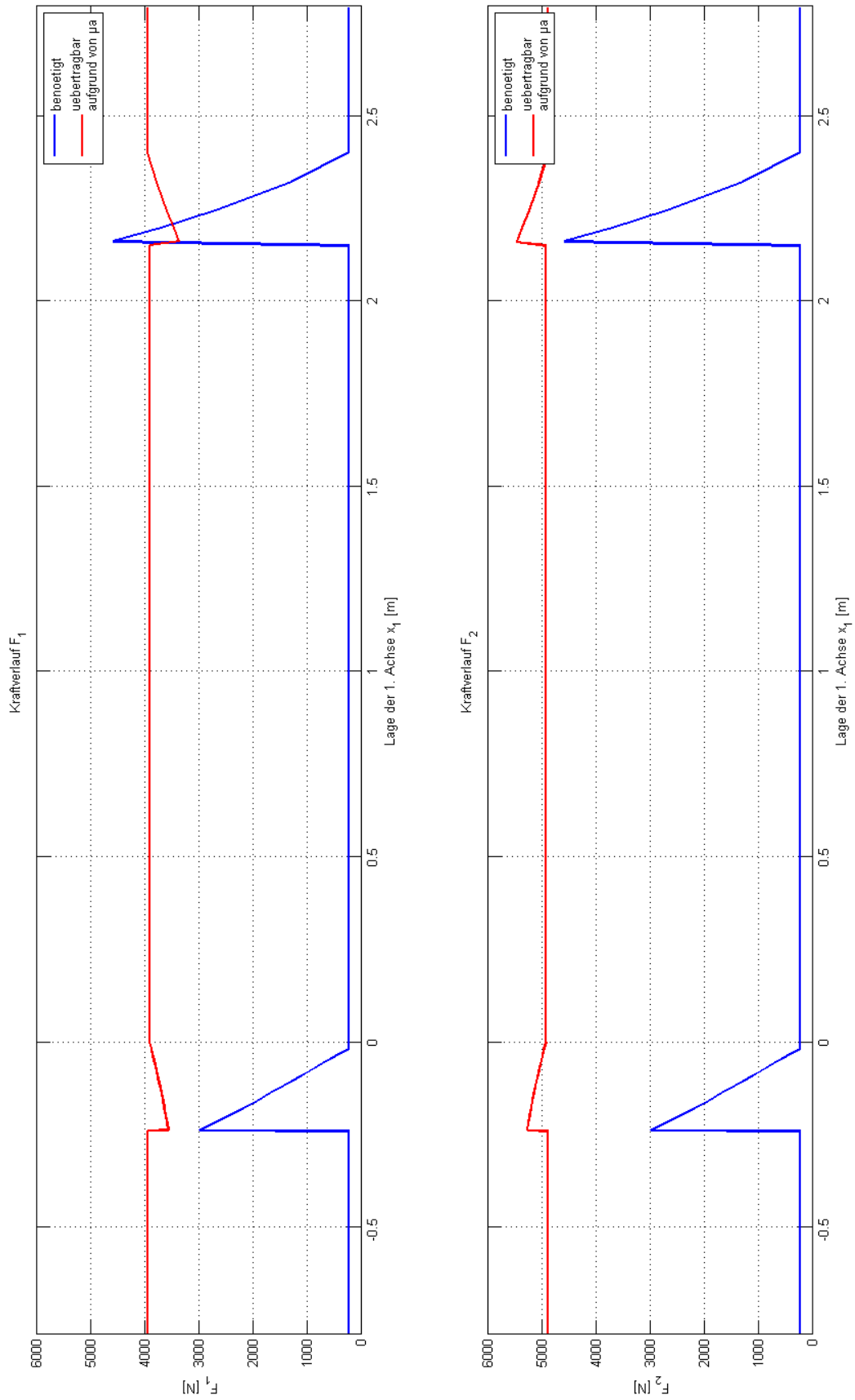


Abbildung 76: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Hindernishöhenvariation am Plateauhindernis bei $h_w=0.08\text{m}$

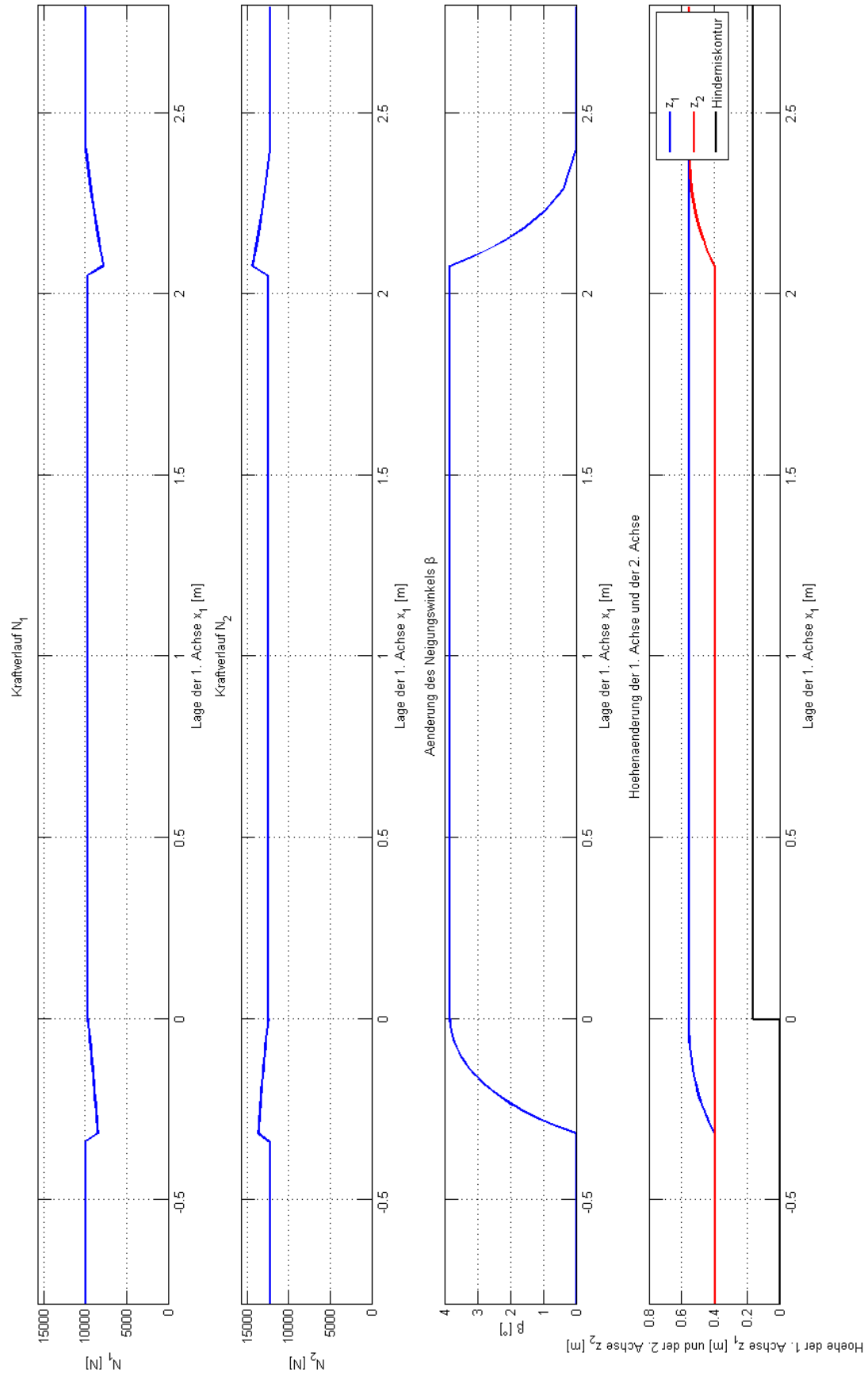


Abbildung 77: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Hindernishöhenvariation am Plateauhindernis bei $h_w=0.16\text{m}$

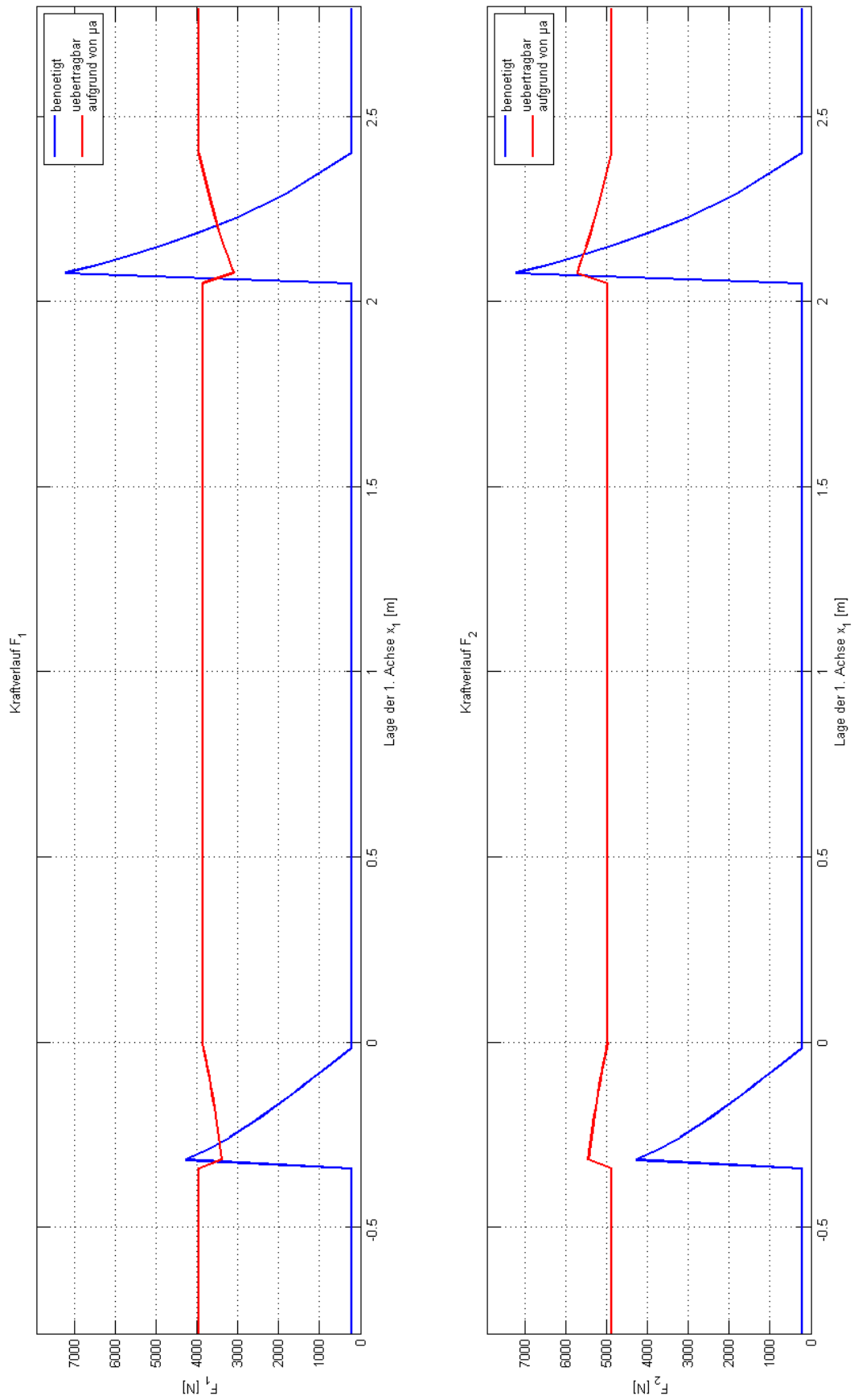


Abbildung 78: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Hindernishöhenvariation am Plateauhindernis bei $h_w=0.16\text{m}$

In Abb. 79 werden die benötigten und übertragbaren Antriebskräfte F_1 & F_2 der unterschiedlichen Hindernishöhen miteinander verglichen. Während sich die übertragbaren Antriebskräfte bei allen Höhen kaum voneinander unterscheiden, weichen die benötigten Antriebskräfte weiter voneinander ab. Erkennbar ist, dass zumindest die 2 niedrigeren Hindernisse ($h_w=0.08$ bzw. 0.16m) mit höheren Reibwerten durchaus überwindbar wären, während das höchste Hindernis – wie im vorigen Vergleich bereits dargestellt – auch mit höheren μ_a -Werten nicht überwindbar ist.

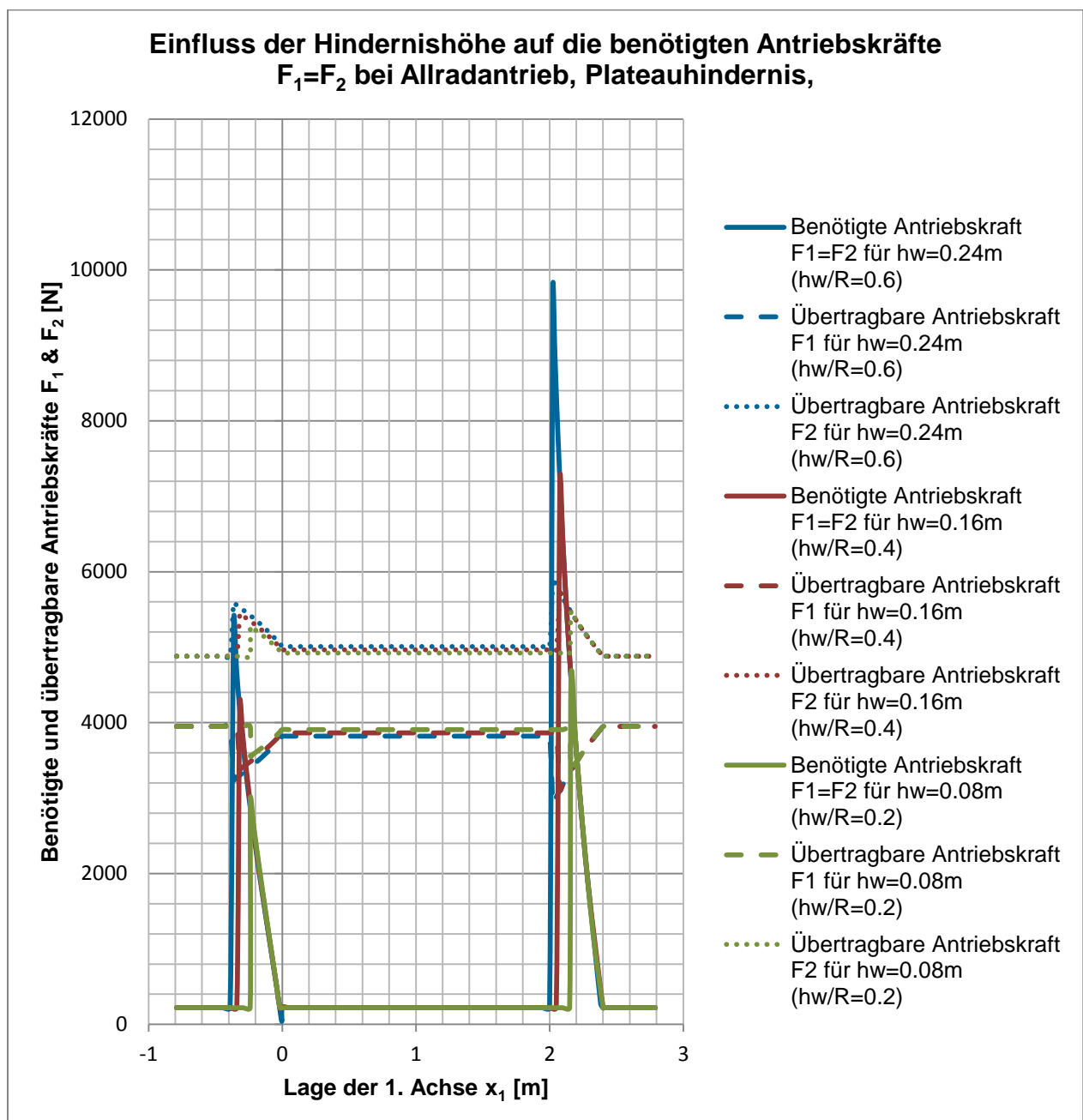


Abbildung 79: Gegenüberstellung der übertragbaren und benötigten Antriebskräfte bei Hindernishöhenvariation

7.3.3 Variation der Schwerpunktlage s_1 am Plateauhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb

Für die Darstellung dieses Hindernisses siehe [Abb. 67](#). In [Abb. 80](#) sind die Parameter der Schwerpunktlage s_1 dargestellt. Sämtliche anderen Hindernis- und Fahrzeugparameter entsprechen den Referenzwerten, die in 7.3 angegeben wurden.

Plateauhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von s_1			
s_1 [m]			
0.8	1.0	1.2	1.3264

Abbildung 80: Variation der Schwerpunktlage s_1 bei Plateauhindernis mit Allradantrieb

Die [Abb. 81 – 86](#) stellen die Kräfteverläufe der Schwerpunktlagen $s_1 = 0.8$, 1.0 und 1.2m dar. Für die Kräfteverläufe des Referenzfahrzeugs ($s_1 = 1.3264\text{m}$) wird auf die [Abb. 69](#) und [Abb. 71](#) verwiesen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Abbildungen nicht bei jedem untersuchten Fall einzeln beigelegt. Ein Vergleich der Kraftverläufe aller betrachteten Schwerpunktlagen ist [Abb. 87](#) zu entnehmen.

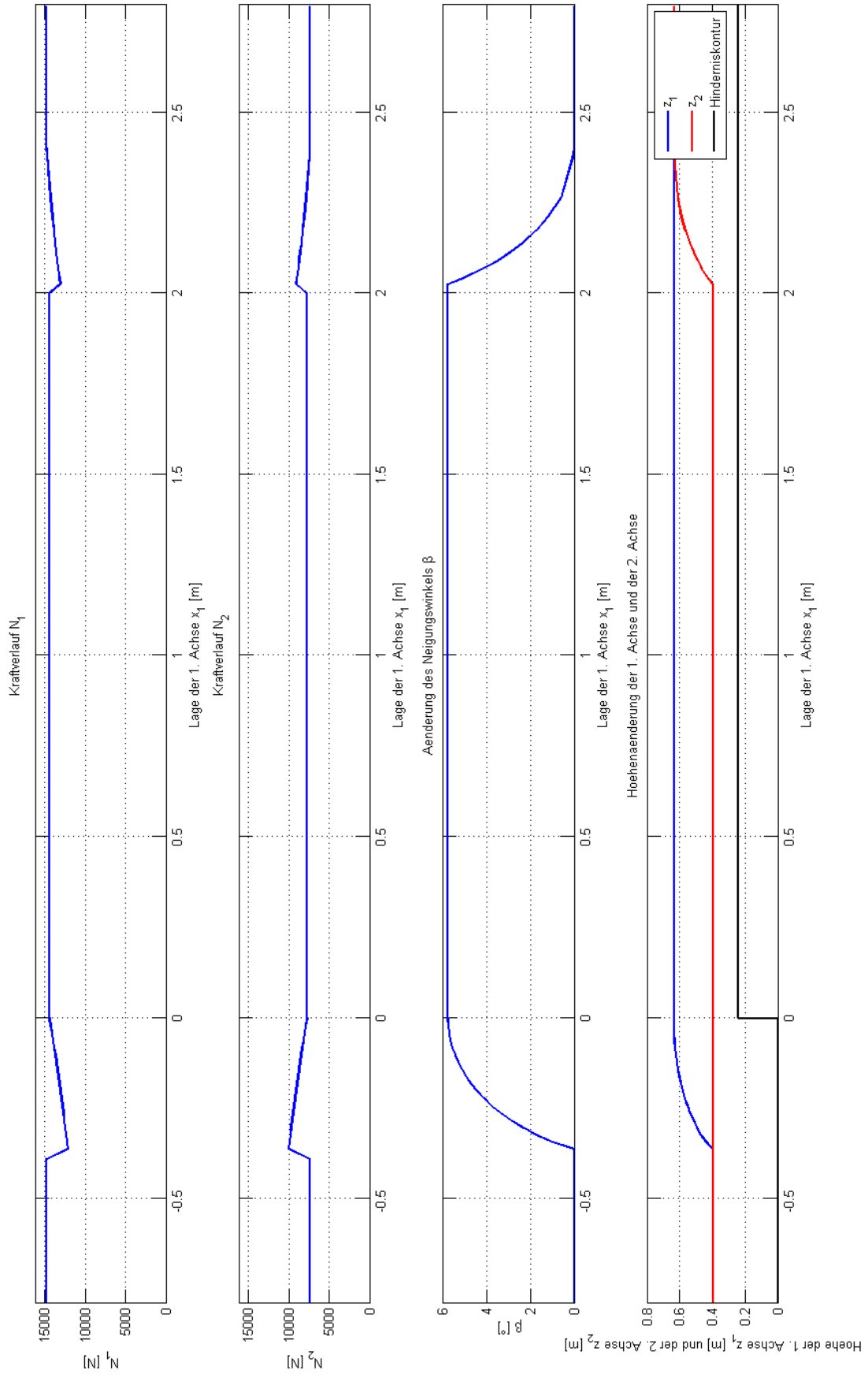


Abbildung 81: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Schwerpunktvariation am Plateauhindernis bei $s_1=0.8\text{m}$

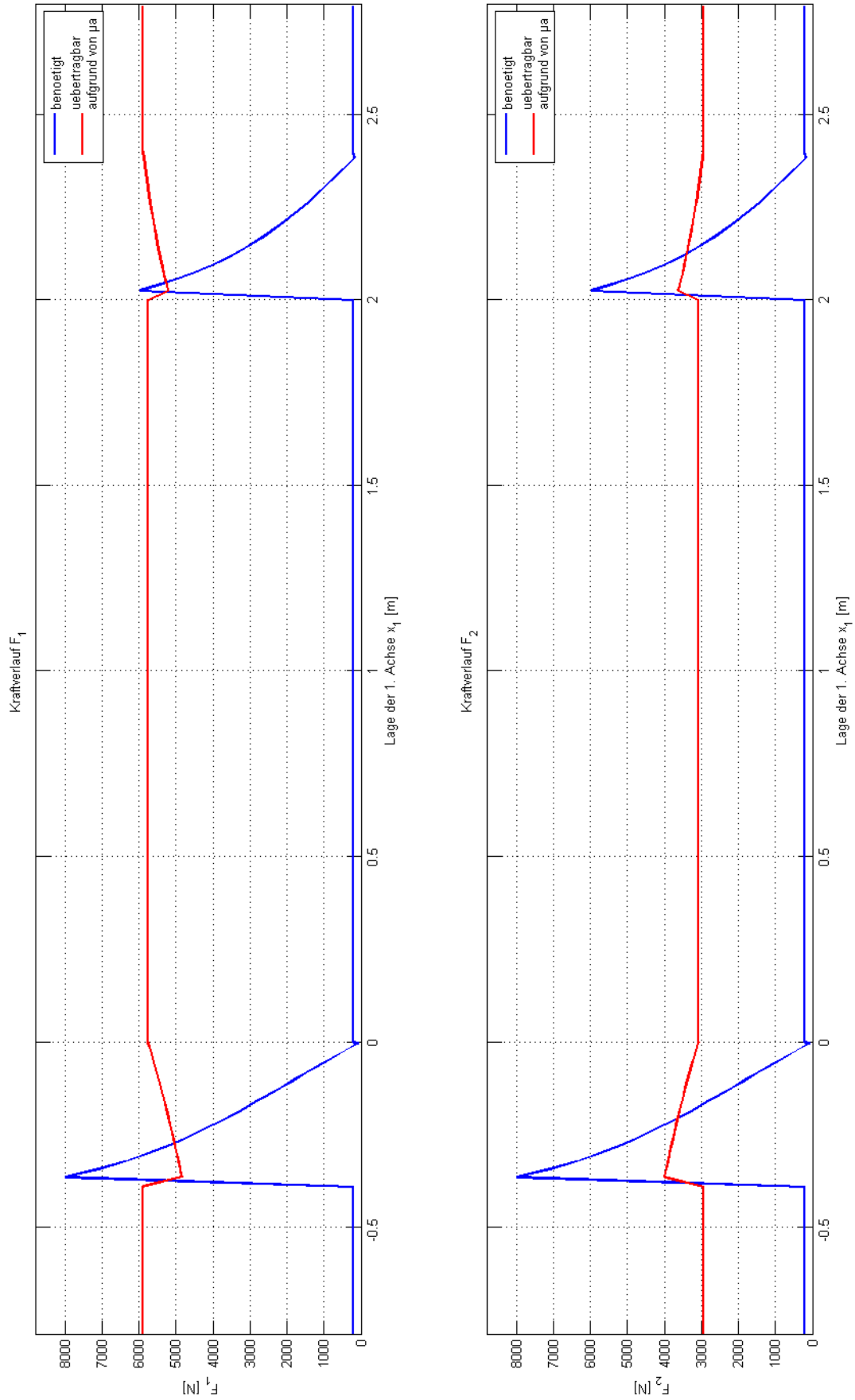


Abbildung 82: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Schwerpunktlagenvariation am Plateauhindernis bei $s_1=0.8\text{m}$

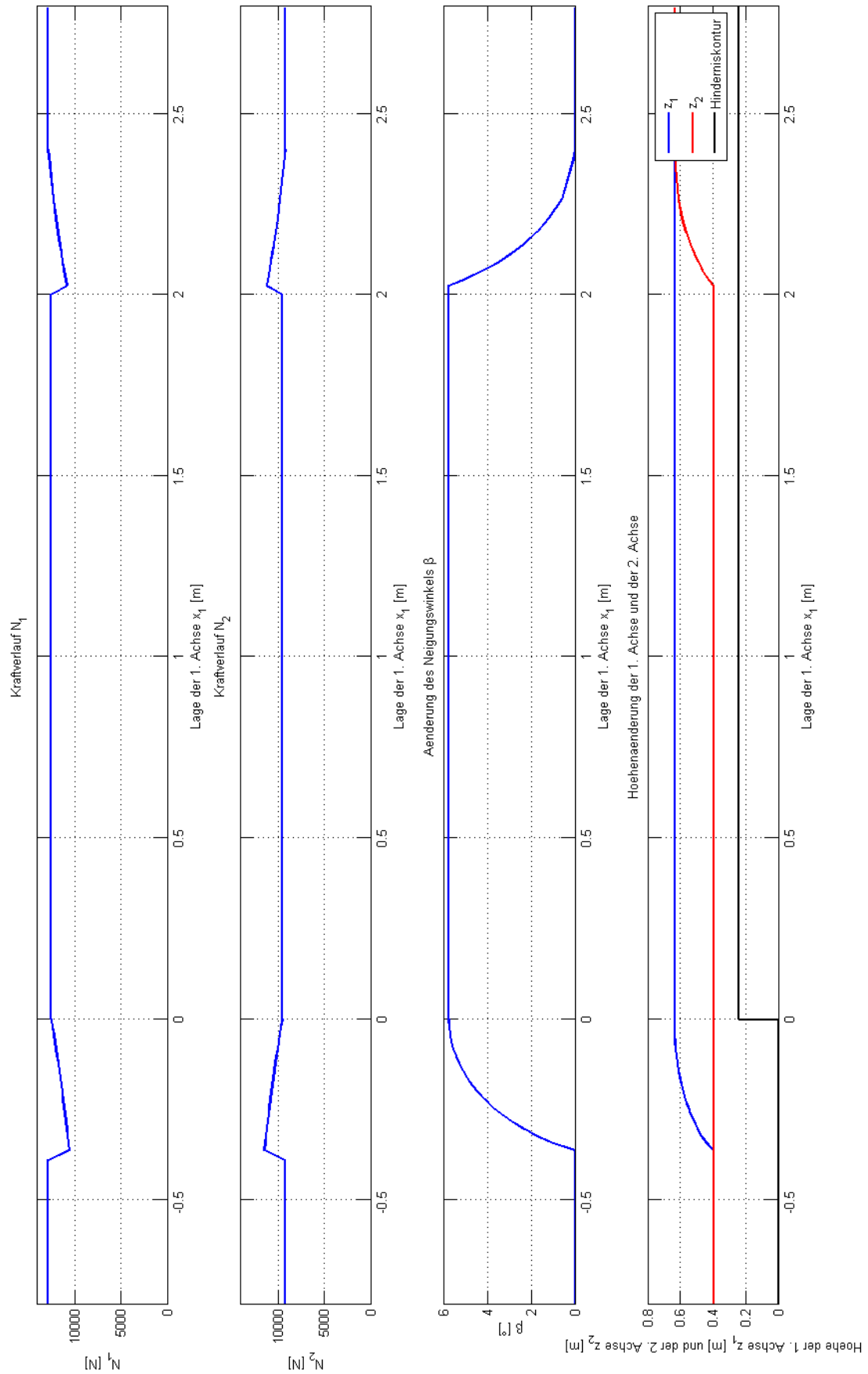


Abbildung 83: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Schwerpunktvariation am Plateauhindernis bei $s_1=1.0\text{m}$

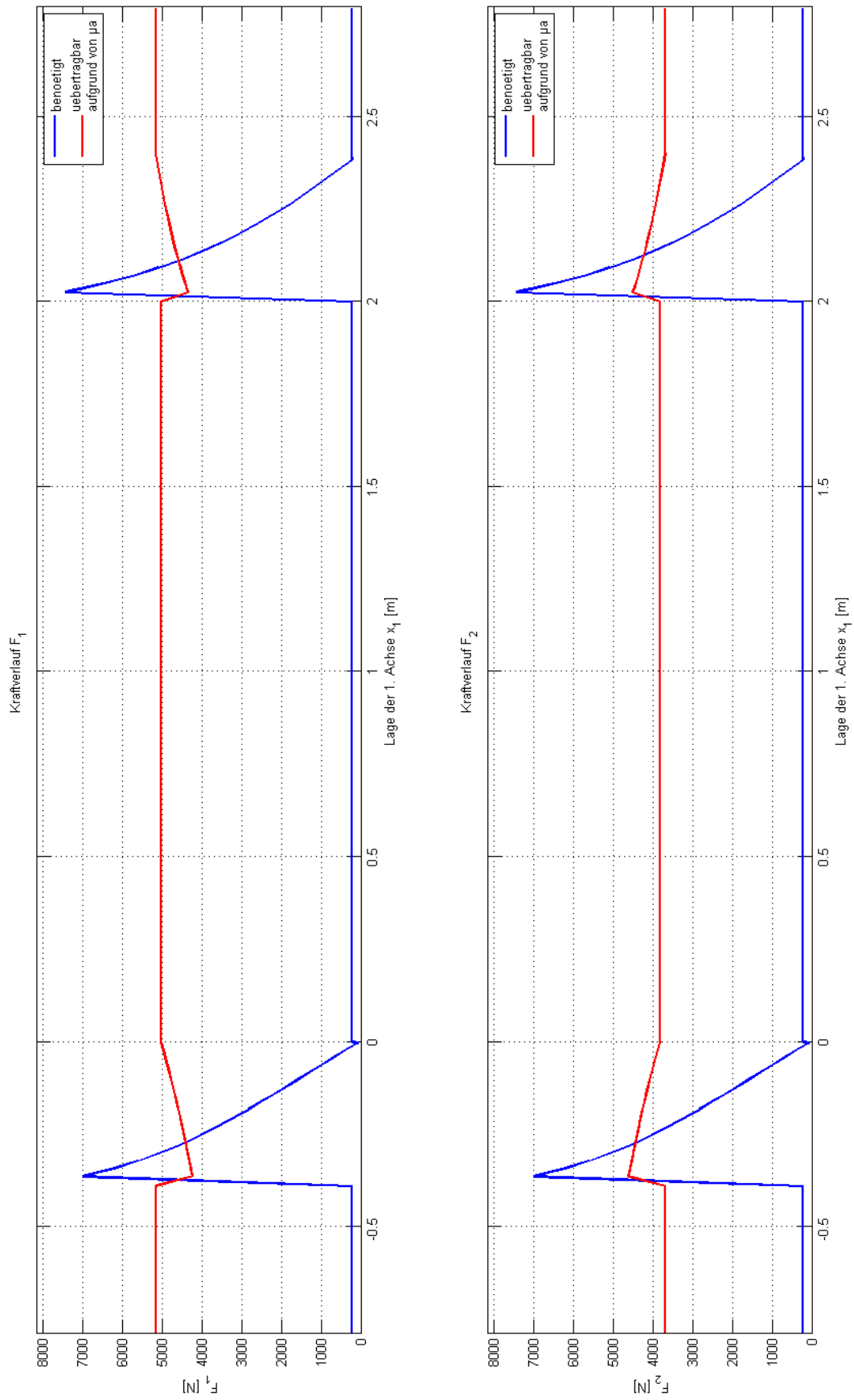


Abbildung 84: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Schwerpunktlagenvariation am Plateauhindernis bei $s_1=1.0\text{m}$

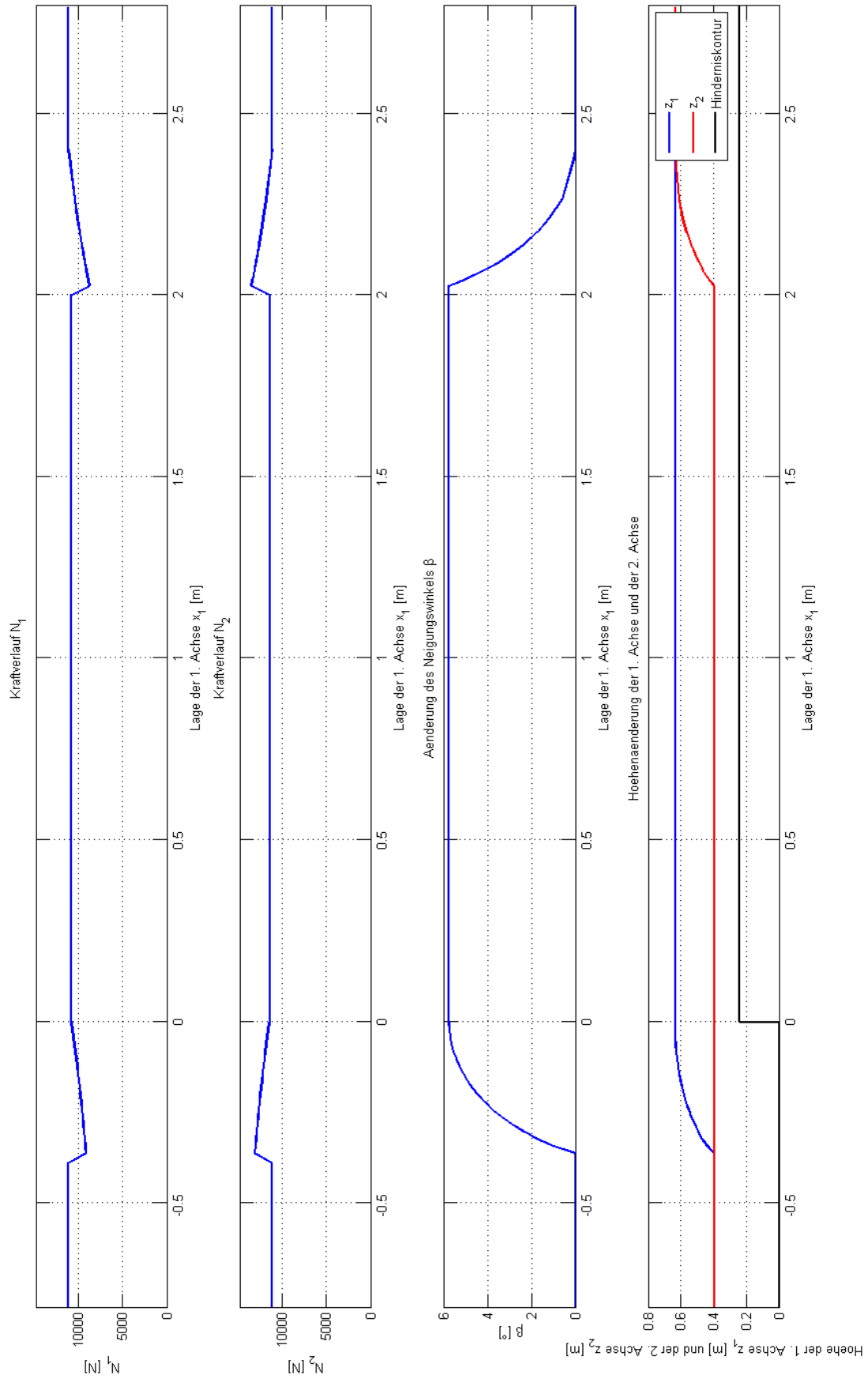


Abbildung 85: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Schwerpunktvariation am Plateauhindernis bei $s_1=1.2\text{m}$

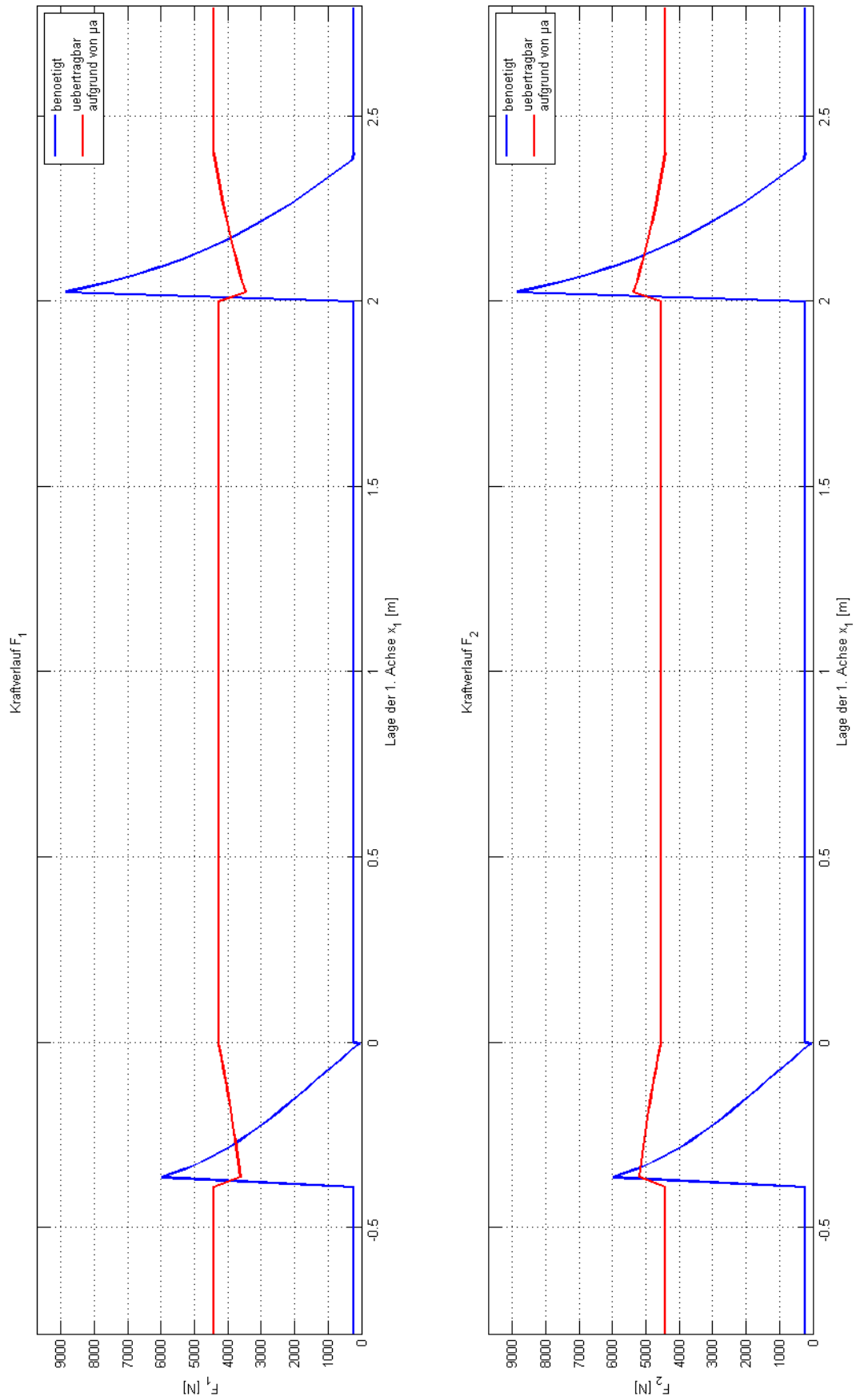


Abbildung 86: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Schwerpunktlagenvariation am Plateauhindernis bei $s_1=1.2\text{m}$

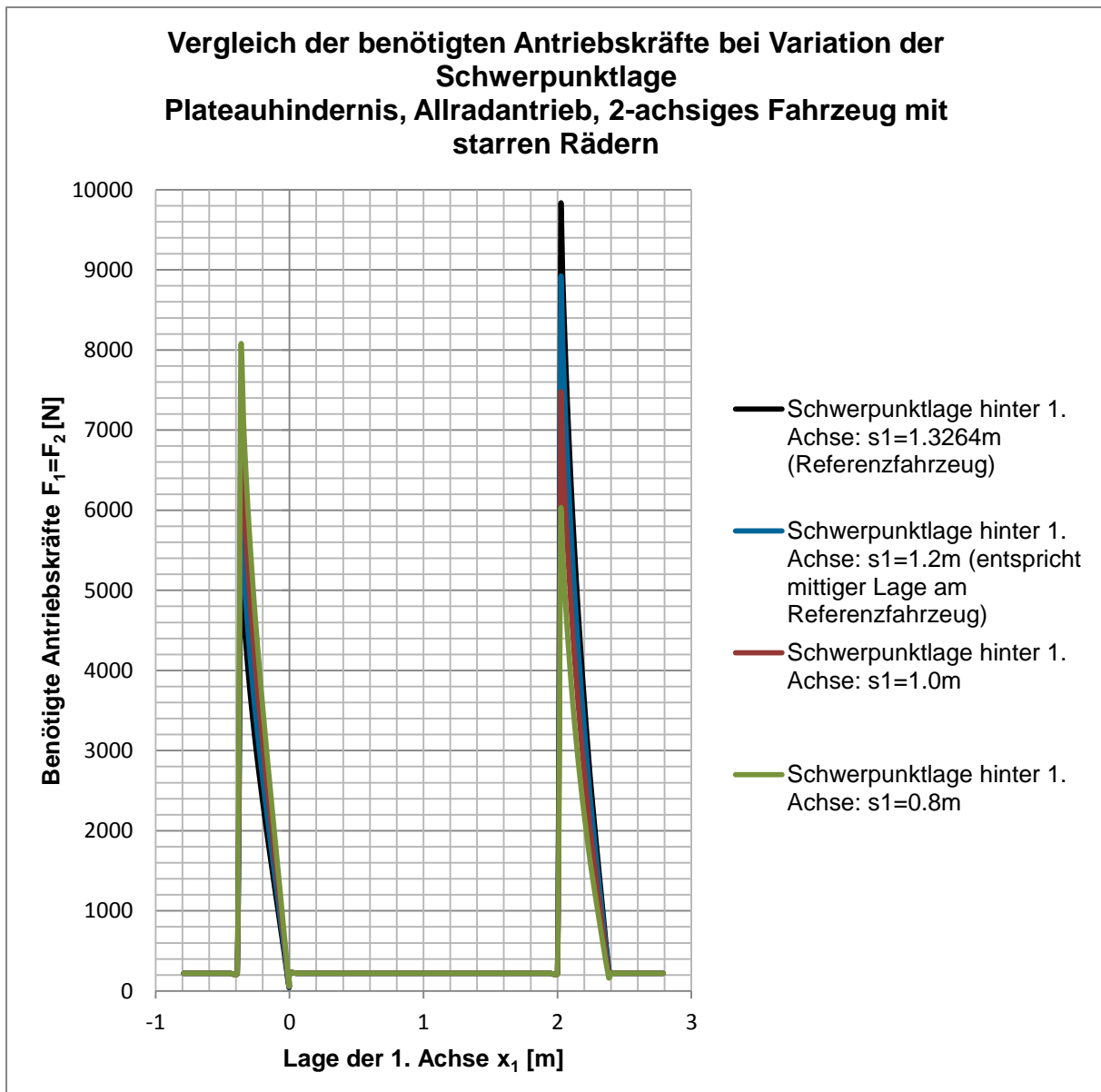


Abbildung 87: Gegenüberstellung der benötigten Antriebskräfte bei Schwerpunktlagenvariation

Abb. 87 zeigt die benötigten Antriebskräfte bei Variation der Schwerpunktlage. Sehr deutlich zu erkennen ist, dass die benötigten Kräfte bei Verringerung von s_1 beim Überqueren der 1. Achse kontinuierlich größer werden, während sie bei der 2. Achse abnehmen. Ein gleicher Kraftbedarf für 1. und 2. Achse ist jedoch nicht bei Lage des Schwerpunkts in der Fahrzeugmitte ($s_1=1.2\text{m}$) festzustellen. Dies begründet sich durch die durch die Lage des Schwerpunkts über den Achsen h_0 und den Neigungswinkel β resultierende Verlagerung des Schwerpunkts weiter Richtung 2. Achse. Die Lage des Schwerpunkts, bei der die benötigten Antriebskräfte für beide Achsen gleich groß sind, liegt gemäß den Diagrammen im Bereich $0.8\text{m} < s_1 < 1.0\text{m}$.

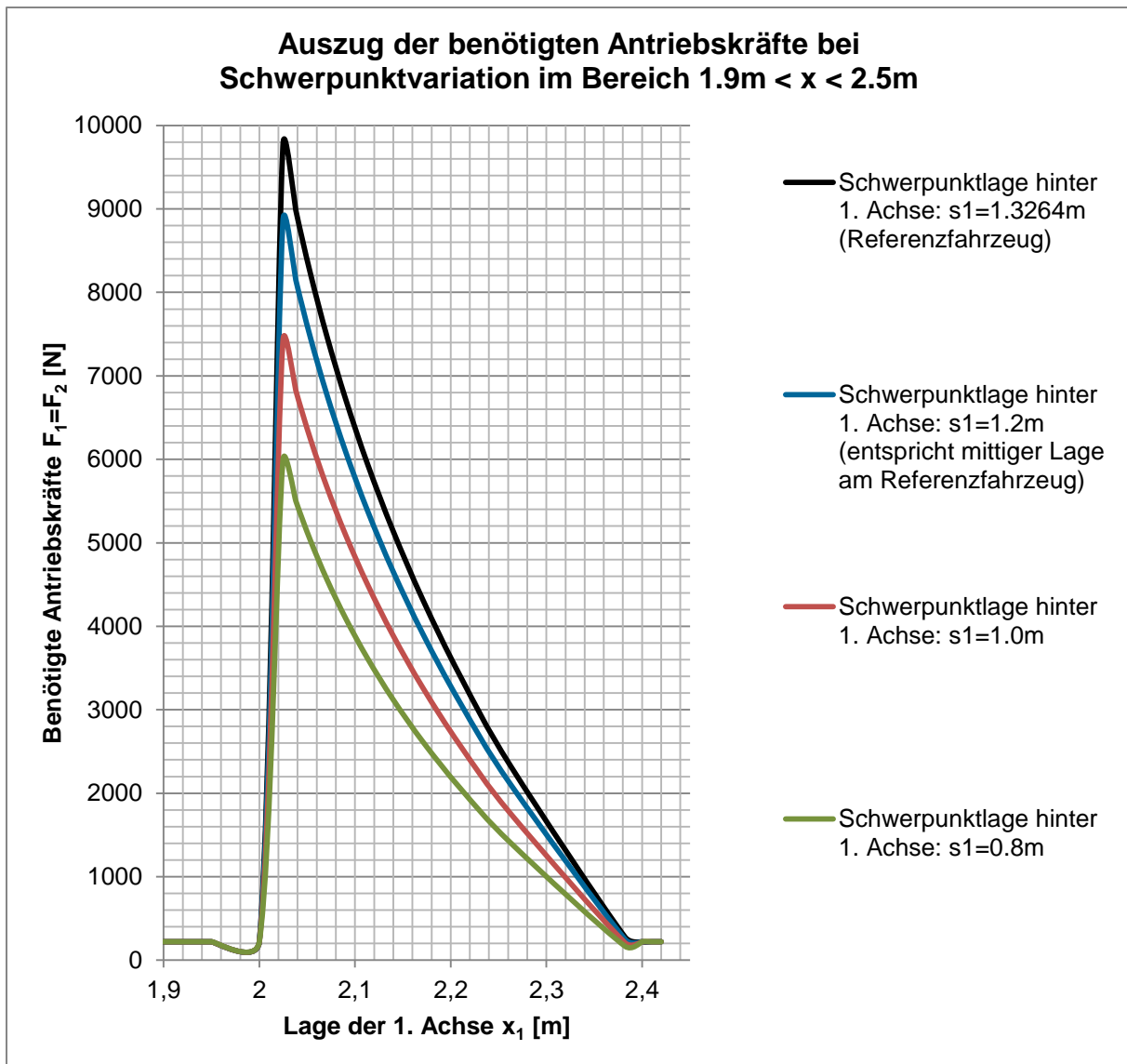


Abbildung 88: Auszug der benötigten Antriebskräfte bei Schwerpunktvariation

In Abb. 88 ist ein vergrößerter Ausschnitt der benötigten Antriebskräfte bei Schwerpunktvariation im Bereich $1.9\text{m} < x_1 < 2.5\text{m}$ dargestellt. Dieser dient der besseren Übersichtlichkeit, da in Abb. 87 die Kurven nahezu deckungsgleich sind und keine Auswertung ermöglichen.

7.3.4 Variation der Antriebsart am Plateauhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern

In dieser Gegenüberstellung werden anhand des 2-achsigen Fahrzeuges mit starren Rädern bei Überquerung eines Plateauhindernisses die Antriebsarten „Allrad“ und „Hinterrad“ miteinander verglichen. Auf die Variation von anderen Parametern wie Reibwert, Hindernishöhe oder Schwerpunktlage wird verzichtet, da die Auswirkungen dieser Parameteränderungen bereits aus vorherigen Kapiteln bekannt sind und direkt auf diesen Vergleich umgelegt werden können. In Abb. 89 ist die Situation eines Plateauhindernisses mit Hinterradantrieb dargestellt.

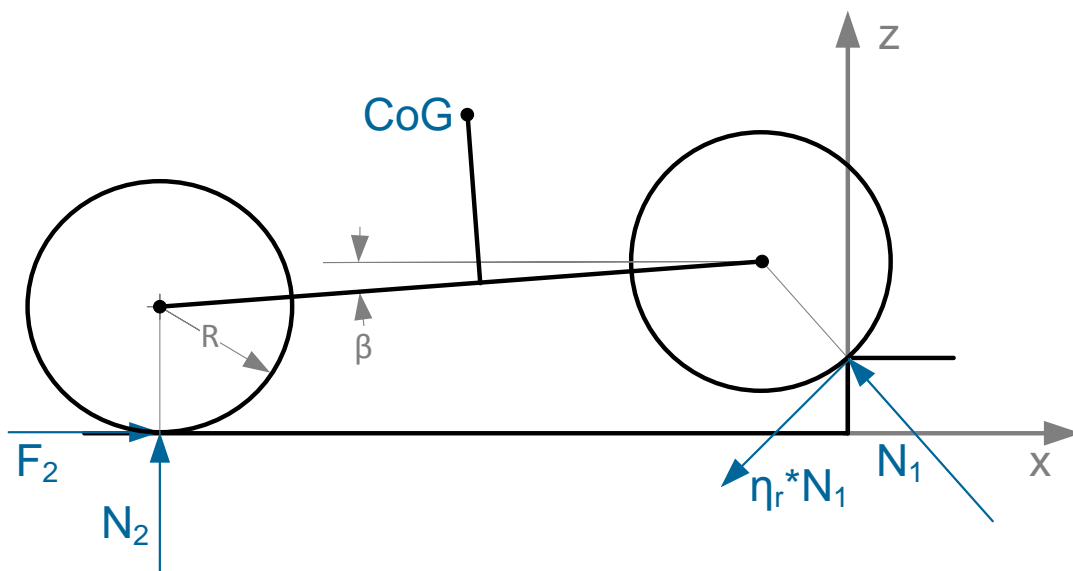


Abbildung 89: Skizze des Plateauhindernisses bei Überquerung durch ein hinterradgetriebenes Fahrzeug

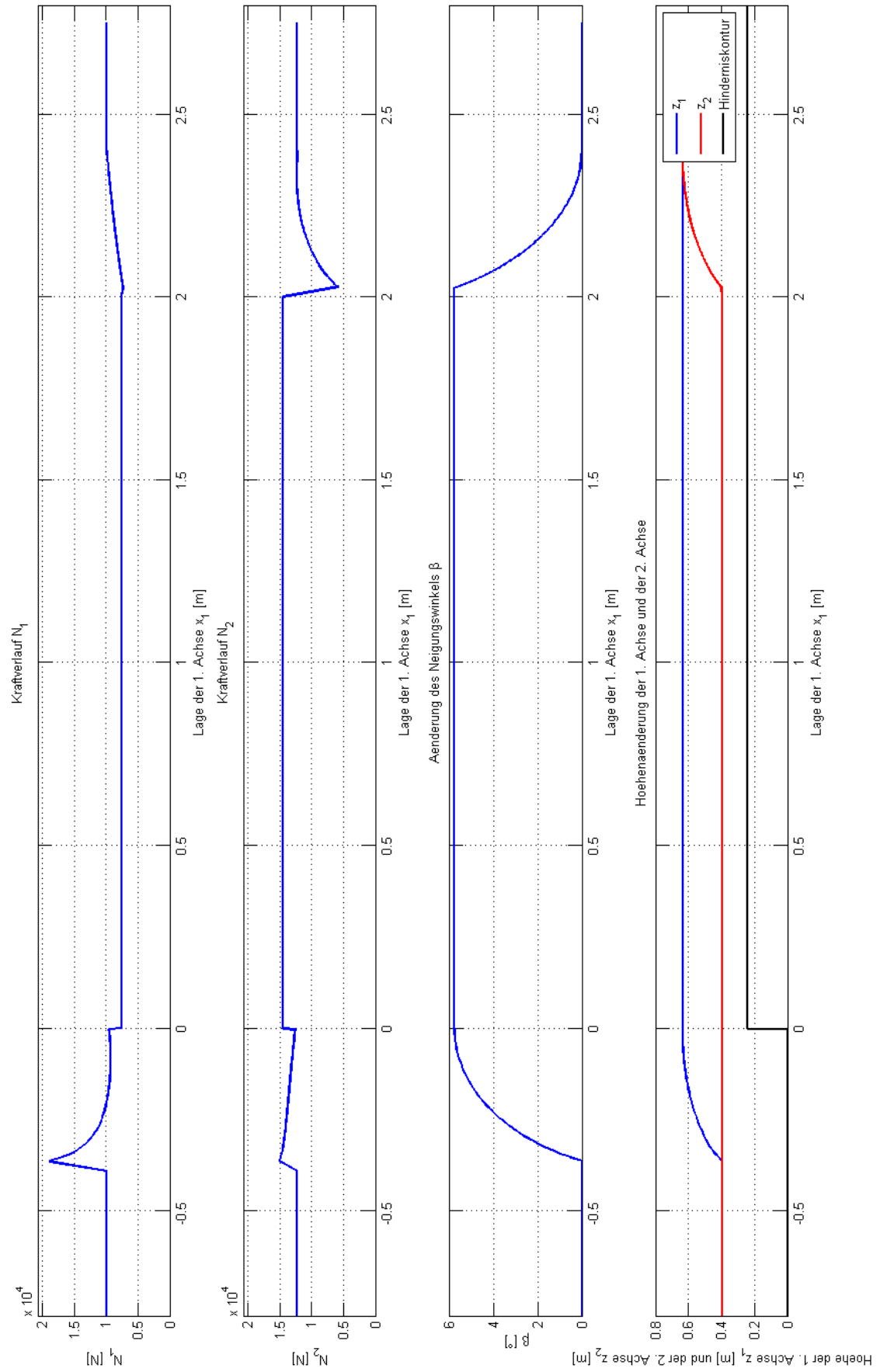


Abbildung 90: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Hinterradantrieb am Plateauhindernis

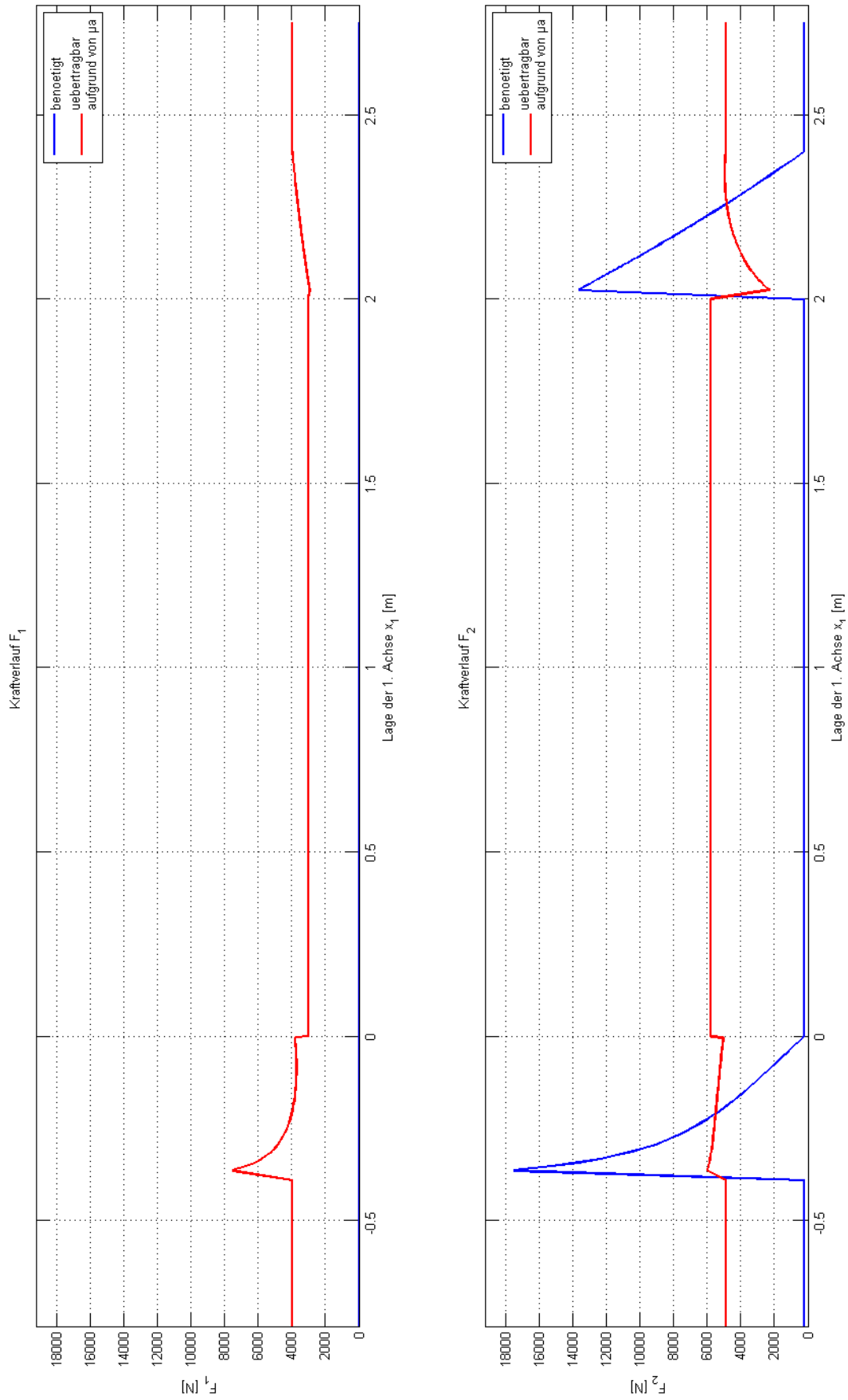


Abbildung 91: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Hinterradantrieb am Plateauhindernis

In [Abb. 90](#) und [Abb. 91](#) sind die Kraftverläufe bei Überquerung eines Plateauhindernisses bei Hinterradantrieb dargestellt. Für die Kraftverläufe bei Allradantrieb wird wieder auf [Abb. 69](#) und [Abb. 71](#) verwiesen. [Abb. 92](#) stellt den Vergleich von Allrad- und Hinterradantrieb dar.

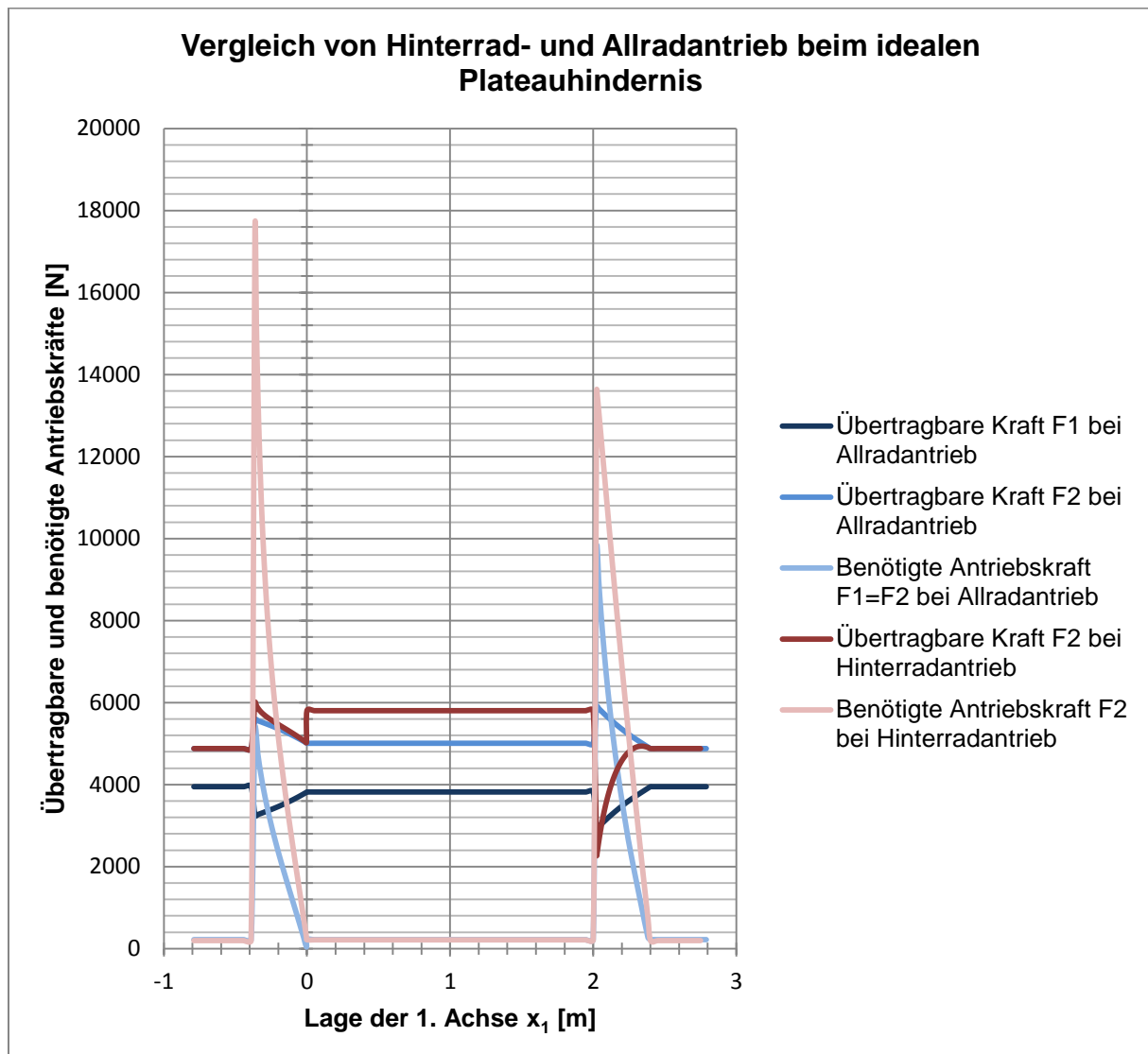


Abbildung 92: Gegenüberstellung von übertragbaren und benötigten Antriebskräften bei Allrad- und Hinterradantrieb

Gut erkennbar sind die wesentlich größeren benötigten Antriebskräfte F_2 beim Hinterradantrieb. Dies erklärt sich durch den Wegfall der 1. Achse als zusätzliche Antriebsachse und resultiert in einer wesentlich schlechteren Hindernisüberschreitbarkeit als beim Allradantrieb, da sich die übertragbaren Umfangskräfte bei beiden Antriebsarten nicht wesentlich unterscheiden. Dadurch lässt sich feststellen, dass der Allradantrieb im Gelände wesentliche Vorteile bietet.

7.3.5 Variation der Achszahl am Plateauhindernis bei Allradantrieb und starren Rädern

In diesem Vergleich wird dem zweiachsigen Referenzfahrzeug das dreiachsige Referenzfahrzeug gegenübergestellt. Einzige Unterschiede sind neben der Achszahl die Fahrzeugmasse und die Lage des Schwerpunkts. In [Abb. 93](#) ist eine Skizze des dreiachsigen Fahrzeuges gegeben.

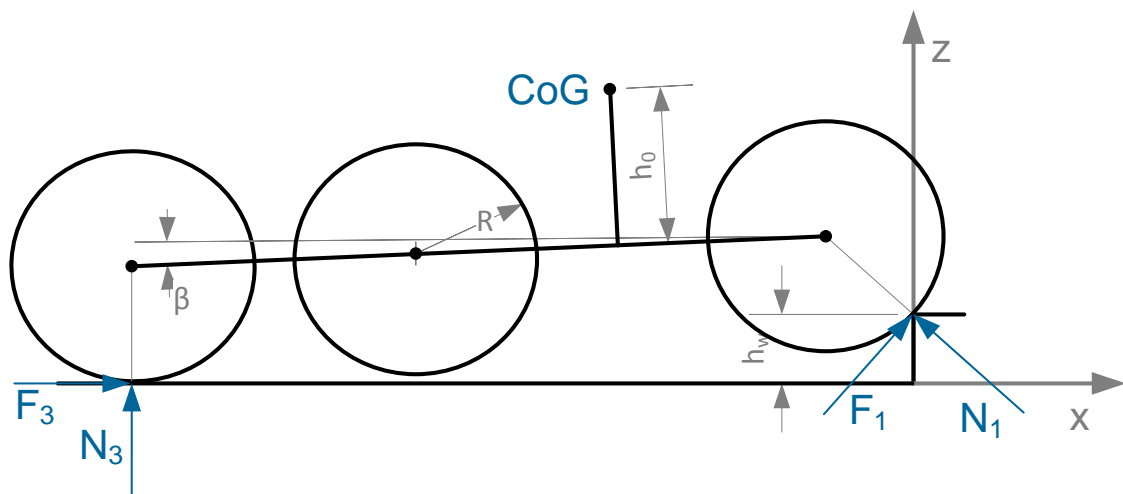


Abbildung 93: Skizze des Plateauhindernisses bei Überquerung durch ein dreiachsiges Fahrzeug

Beim dreiachsigen Fahrzeug ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob der Schwerpunkt vor oder nach der 2. Achse liegt. Eine Lage vor der 2. Achse führt zum Abheben der dritten Achse vom Boden, sobald die 2. Achse auf das Hindernis auffährt. Eine Lage des Schwerpunkts hinter der 2. Achse würde dazu führen, dass ab Berühren des Hindernisses mit der 2. Achse die 1. Achse angehoben wird und sich erst wieder absenkt, sobald die 3. Achse mit der Überquerung des Plateauhindernisses beginnt. Aufgrund der Daten des dreiachsigen Referenzfahrzeuges liegt hier der Schwerpunkt vor der 2. Achse. Genauere Betrachtungen erfolgen in der Gegenüberstellung in [Abb. 96](#). [Abb. 94](#) und [Abb. 95](#) zeigen die Kräfteverläufe des dreiachsigen Fahrzeuges bei der Überquerung des Plateauhindernisses, die Verläufe des zweiachsigen Fahrzeuges sind wiederum in [Abb. 69](#) und [Abb. 71](#) ersichtlich.

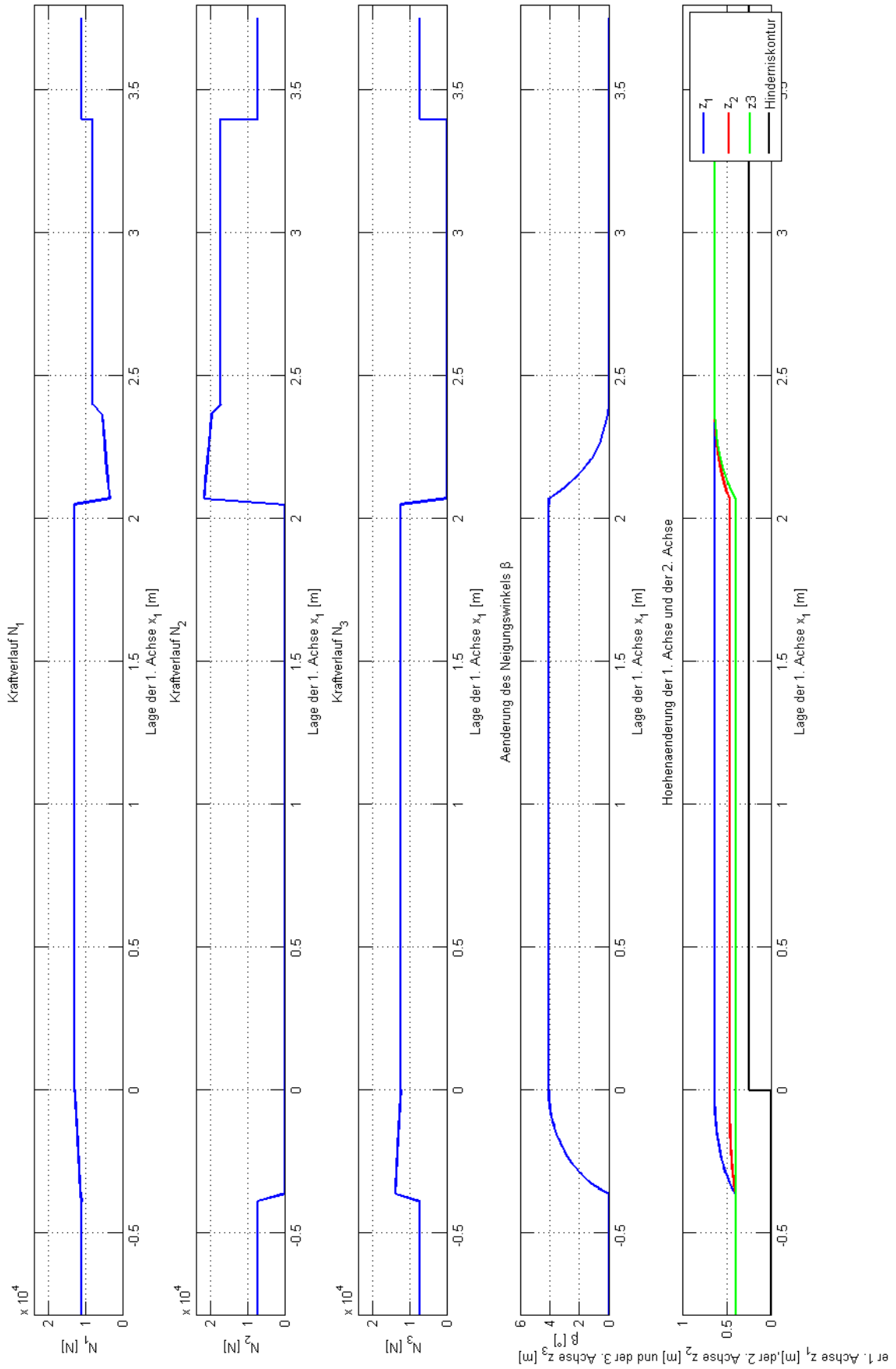


Abbildung 94: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei dreiachsigem Fahrzeug am Plateauhindernis

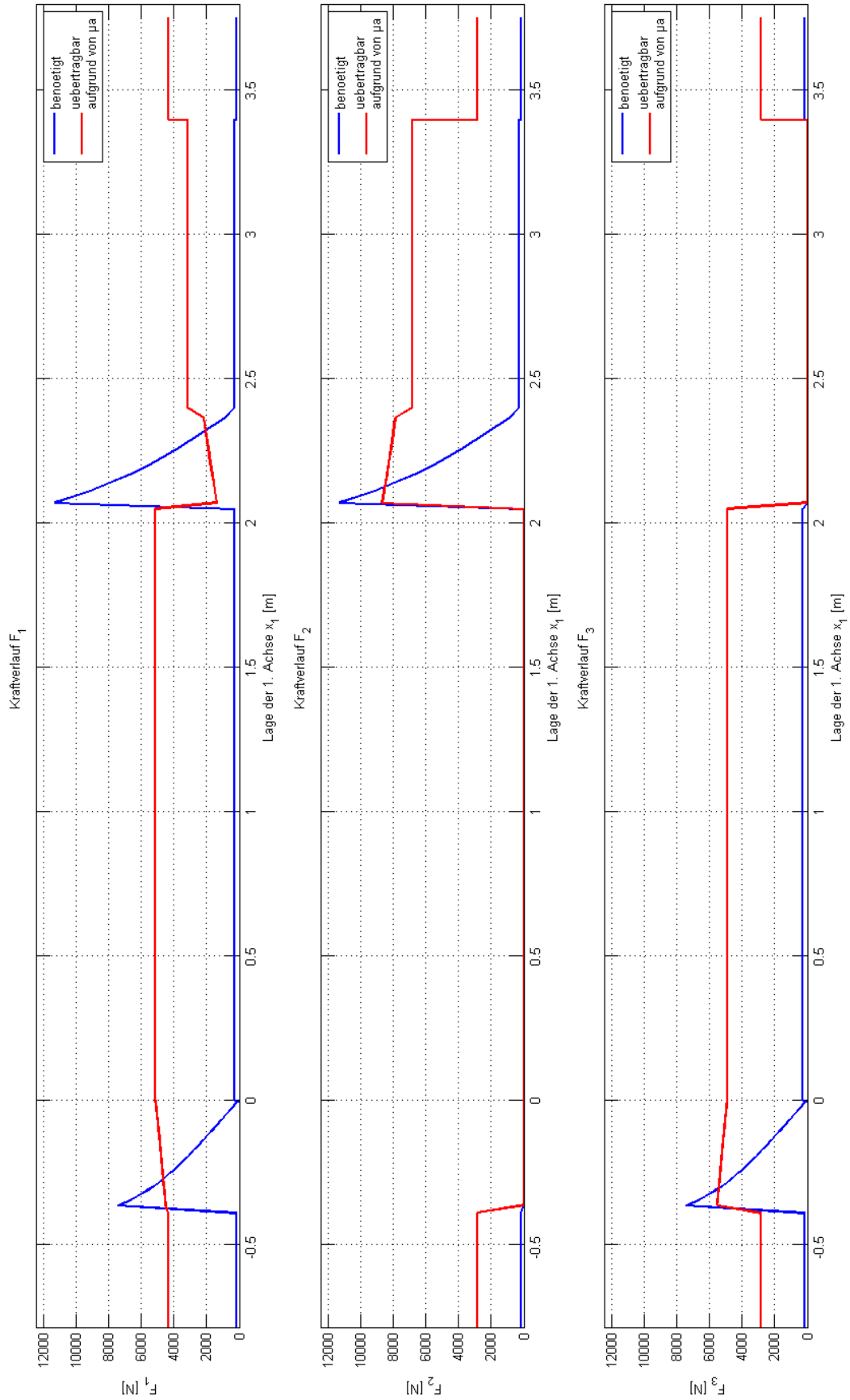


Abbildung 95: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte beim 3-achsigen Fahrzeug am Plateauhindernis

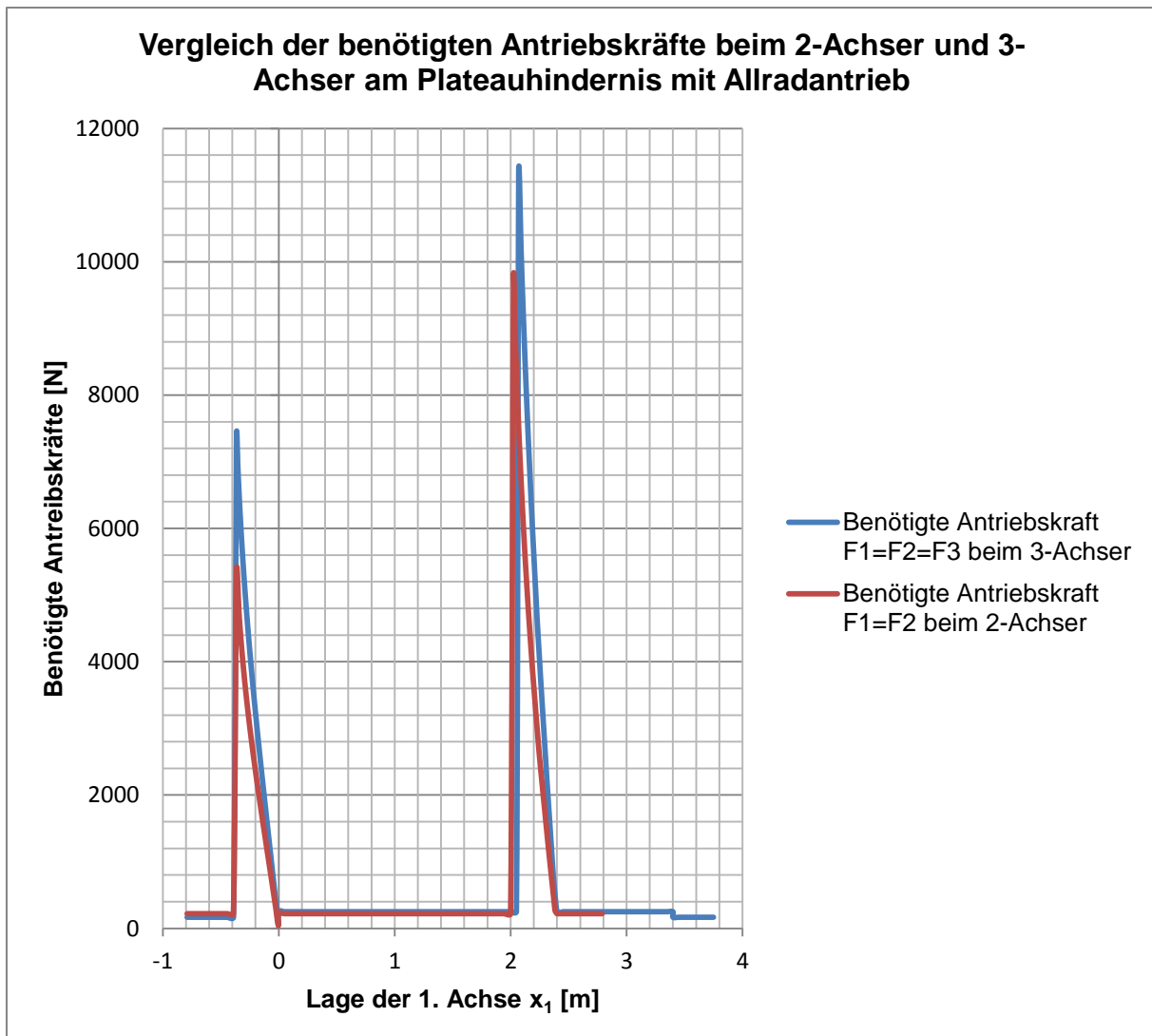


Abbildung 96: Benötigte Antriebskraft beim 2-achsigen und 3-achsigen Fahrzeug mit Allradantrieb am Plateauhindernis

In [Abb. 96](#) ist ersichtlich, dass außer den höheren benötigten Antriebskräften (bedingt durch die höhere Gesamtmasse und die leicht veränderte Schwerpunktlage) im Bereich der Hindernisüberschreitung und eine nochmals kleinere notwendige Antriebskraft im Bereich der ebenen Fahrt keine wesentlichen Unterschiede zum 2-achsigen Fahrzeug existieren. Die möglichen Vorteile eines 3-achsigen Fahrzeugs mit Berücksichtigung einer Achsfederung und dadurch der Möglichkeit des Hinderniskontakts aller drei Achsen bei Befahren des Plateaus kommen in diesem Modell nicht zum Tragen, es erweist sich somit im Prinzip als zweiachsiges Modell mit veränderten Abmessungen und leicht erhöhter Fahrzeugmasse.

In [Abb. 94](#) sind durch die Aufstandskräfte N_i gut jene Bereiche erkennbar, an denen eine Achse i angehoben wird und somit keinen Bodenkontakt aufweist.

7.3.6 Variation der Radeigenschaften am Plateauhindernis beim 2-achsigen Fahrzeug mit Allradantrieb

Dieser Vergleich stellt die Auswirkungen von flexiblen Rädern anstatt von starren Rädern bei der Überquerung eines Plateauhindernisses durch ein 2-achsiges, allradgetriebenes Fahrzeug dar. Die flexiblen Räder werden durch lineare Federn angenähert, deren Federkonstante c in diesem Vergleich variiert wird – Die Variation der Parameter ist in [Abb. 98](#) dargestellt. Aufgrund der geringen Auswirkung der Berücksichtigung von flexiblen Rädern wird auf die Darstellung von MATLAB-Diagrammen verzichtet – die Verläufe der benötigten Antriebskräfte sind dem EXCEL-Diagramm in [Abb. 99](#) zu entnehmen. Eine Prinzipskizze ist [Abb. 97](#) zu entnehmen. Die zugehörigen Gleichungen sind dem Kapitel 4 zu entnehmen.

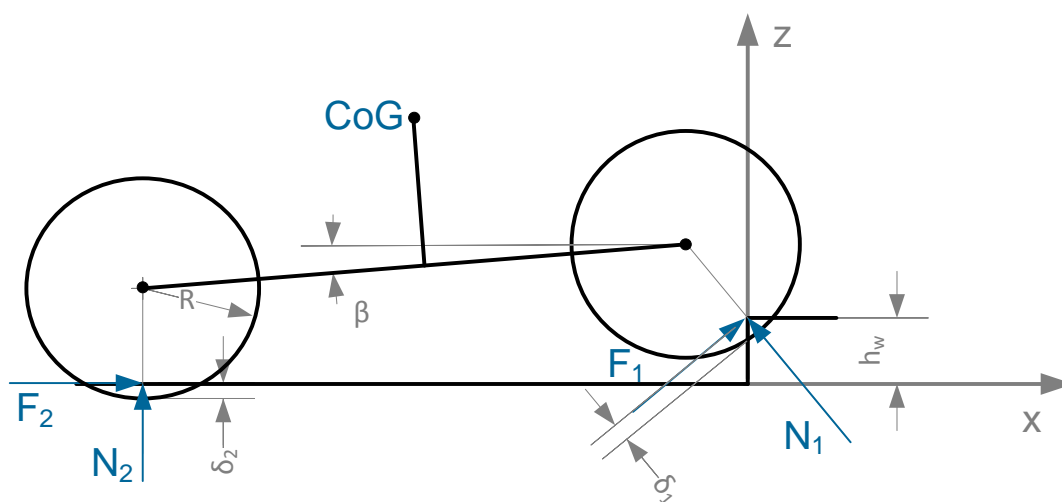


Abbildung 97: Skizze der Plateauhindernisüberquerung durch ein 2-achsiges Fahrzeug mit Allradantrieb und flexiblen Rädern

Plateauhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit flexiblen Rädern und Allradantrieb - Variation von c		
c [N/m]		
300000	100000	50000

Abbildung 98: Federkonstantenvariation der flexiblen Räder am Plateauhindernis

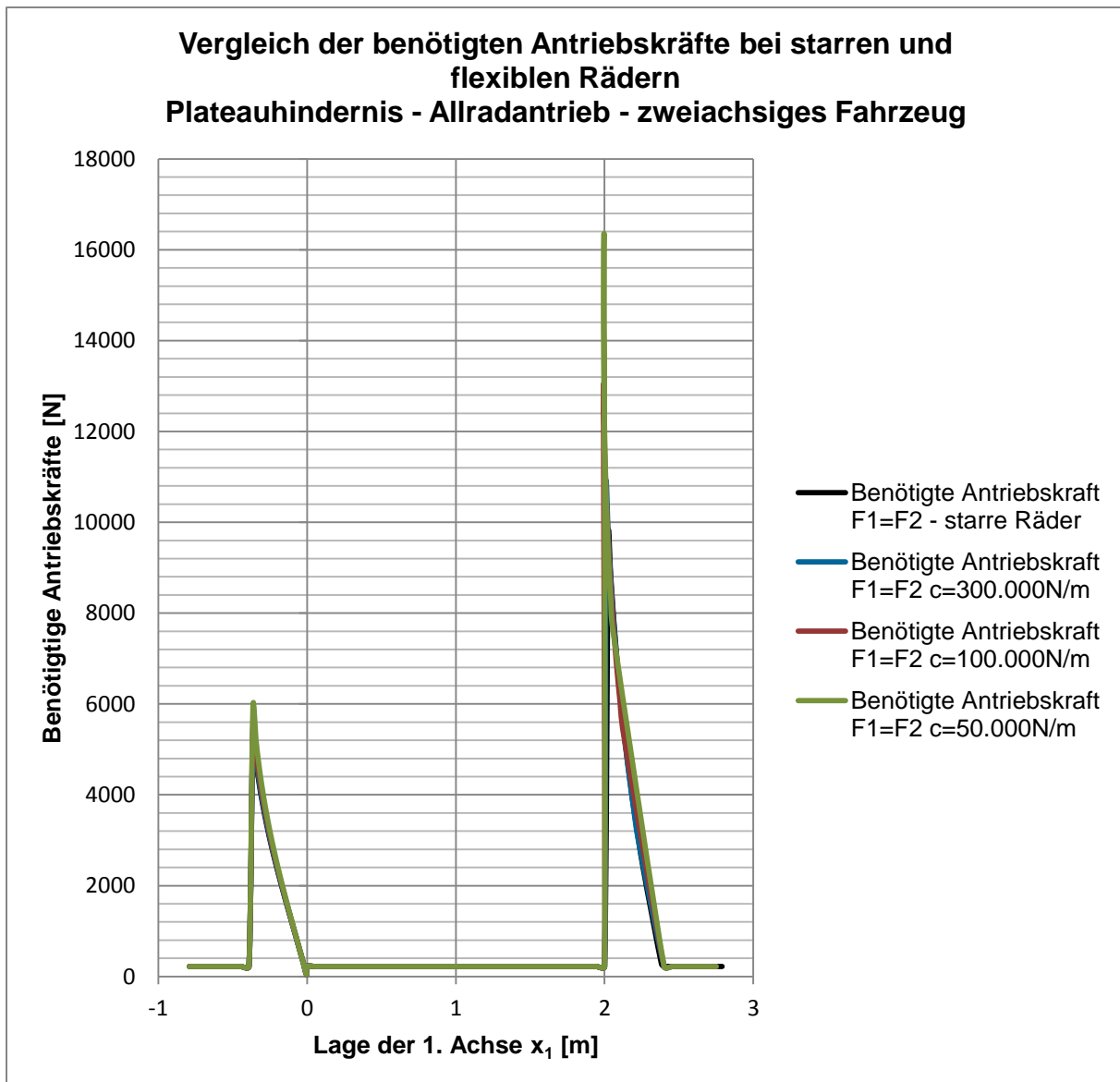


Abbildung 99: Gegenüberstellung der benötigten Antriebskräfte bei flexiblen Rädern am Plateauhindernis

In Abb. 99 ist erkennbar, dass die Einführung von flexiblen Rädern keine großen Auswirkungen auf die Stufenüberschreitbarkeit von Radfahrzeugen aufweist. Dadurch dass die Wirkungslinien der Aufstandskräfte wie beim Fahrzeug mit starren Rädern nach wie vor durch die Radmittelpunkte zeigen, wird das reale Verhalten von flexiblen Rädern nur ungenügend angenähert und kann somit vernachlässigt werden.

7.3.7 Variation des Reibwerts μ_a am Stufenhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb

In diesem Vergleich werden die in 7.3.1 durchgeführten Untersuchungen anhand eines Stufenhindernisses durchgeführt. Eine Skizze der Stufenüberquerung ist Abb. 100 zu entnehmen, die Parametervariation ist in Abb. 101 aufgeführt.

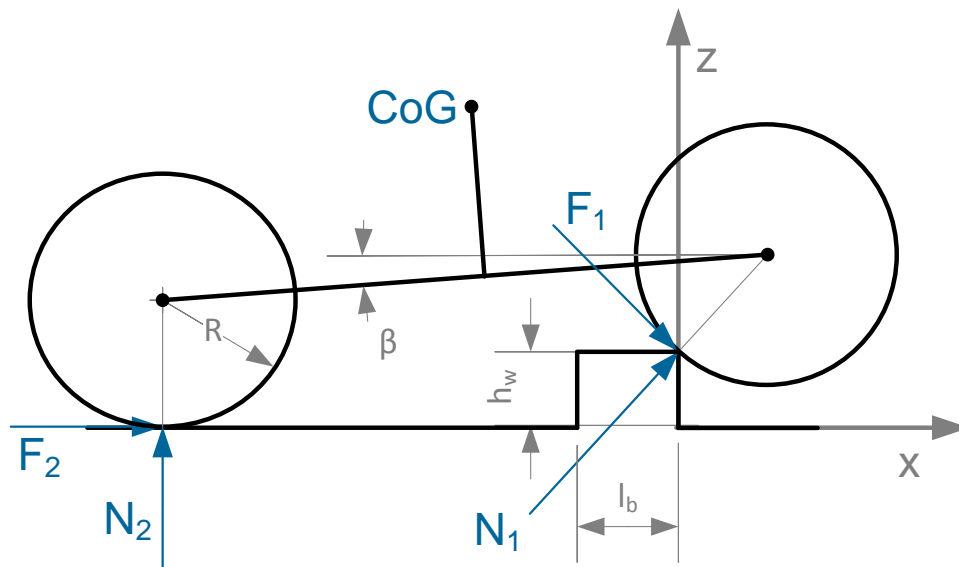


Abbildung 100: Skizze der Stufenüberquerung mit einem zweiachsigen Fahrzeug

Stufenhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von μ_a		
μ_a [-]		
0.2	0.4	0.6

Abbildung 101: Reibwertvariation am Stufenhindernis

Die Abb. 102 – Abb. 105 stellen die Kräfteverläufe beim Überqueren eines Stufenhindernisses unter Berücksichtigung der Reibwertvariation dar.

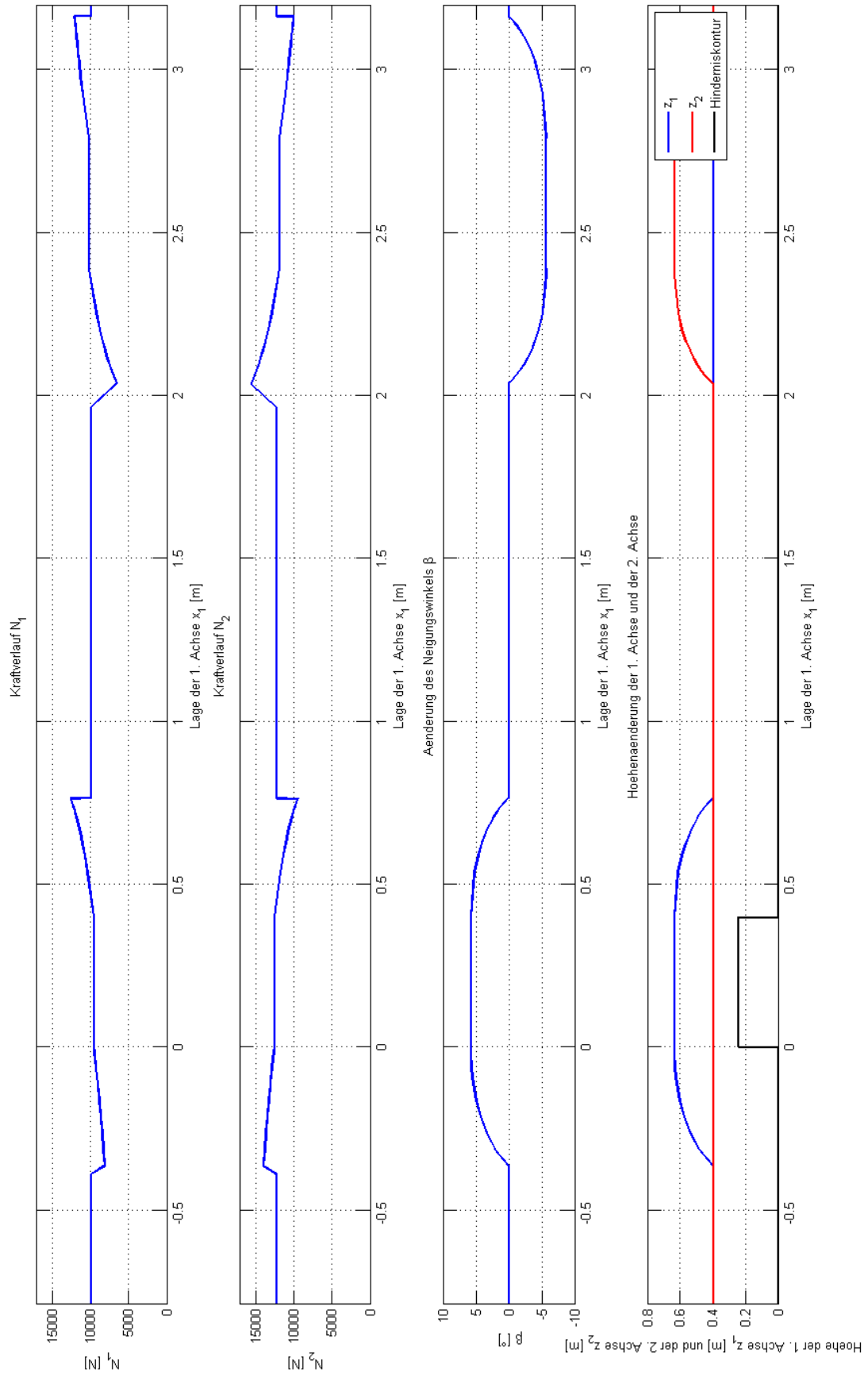


Abbildung 102: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Reibwertvariation am Stufenhindernis

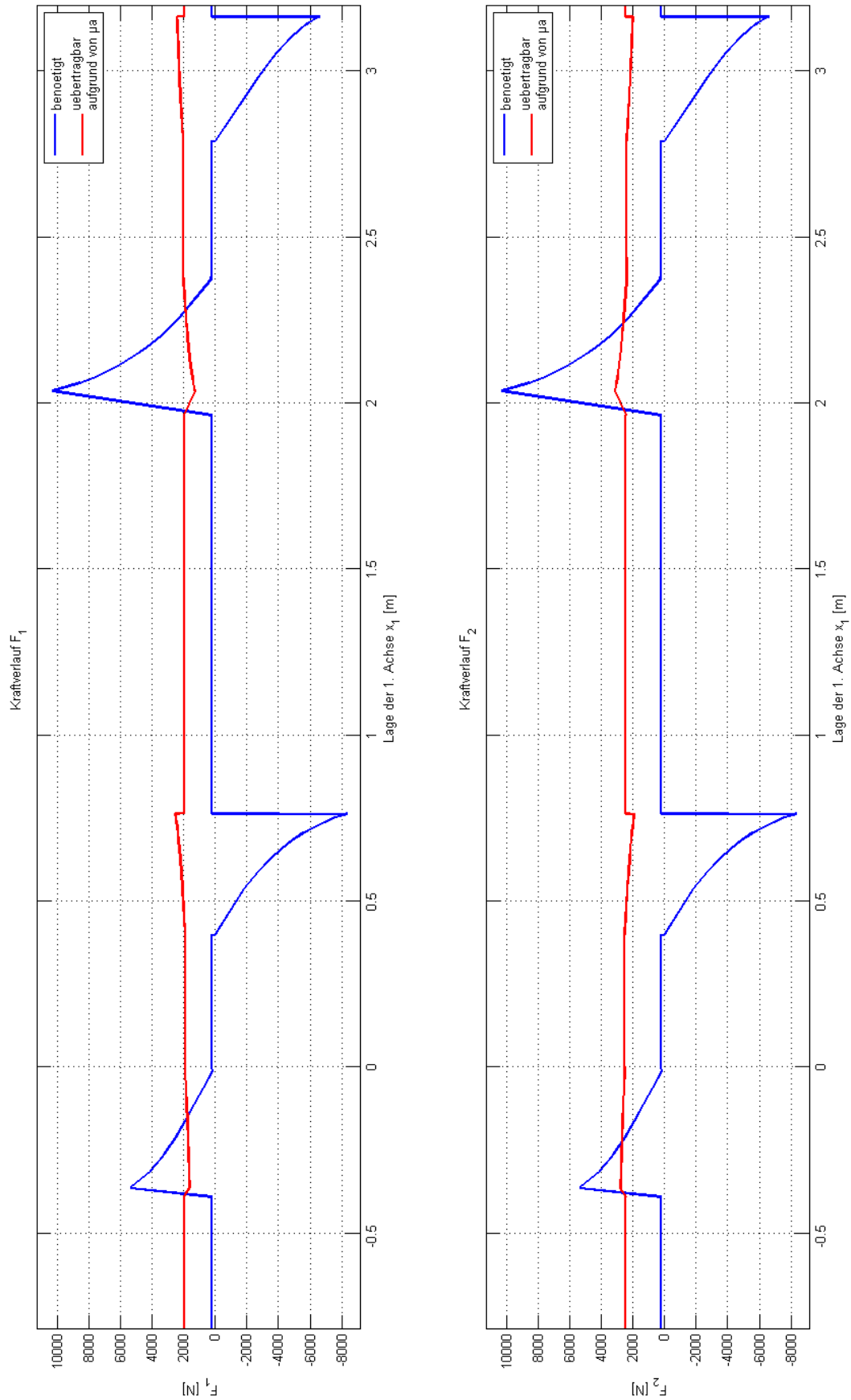


Abbildung 103: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Stufenhindernis bei $\mu_a=0.2$

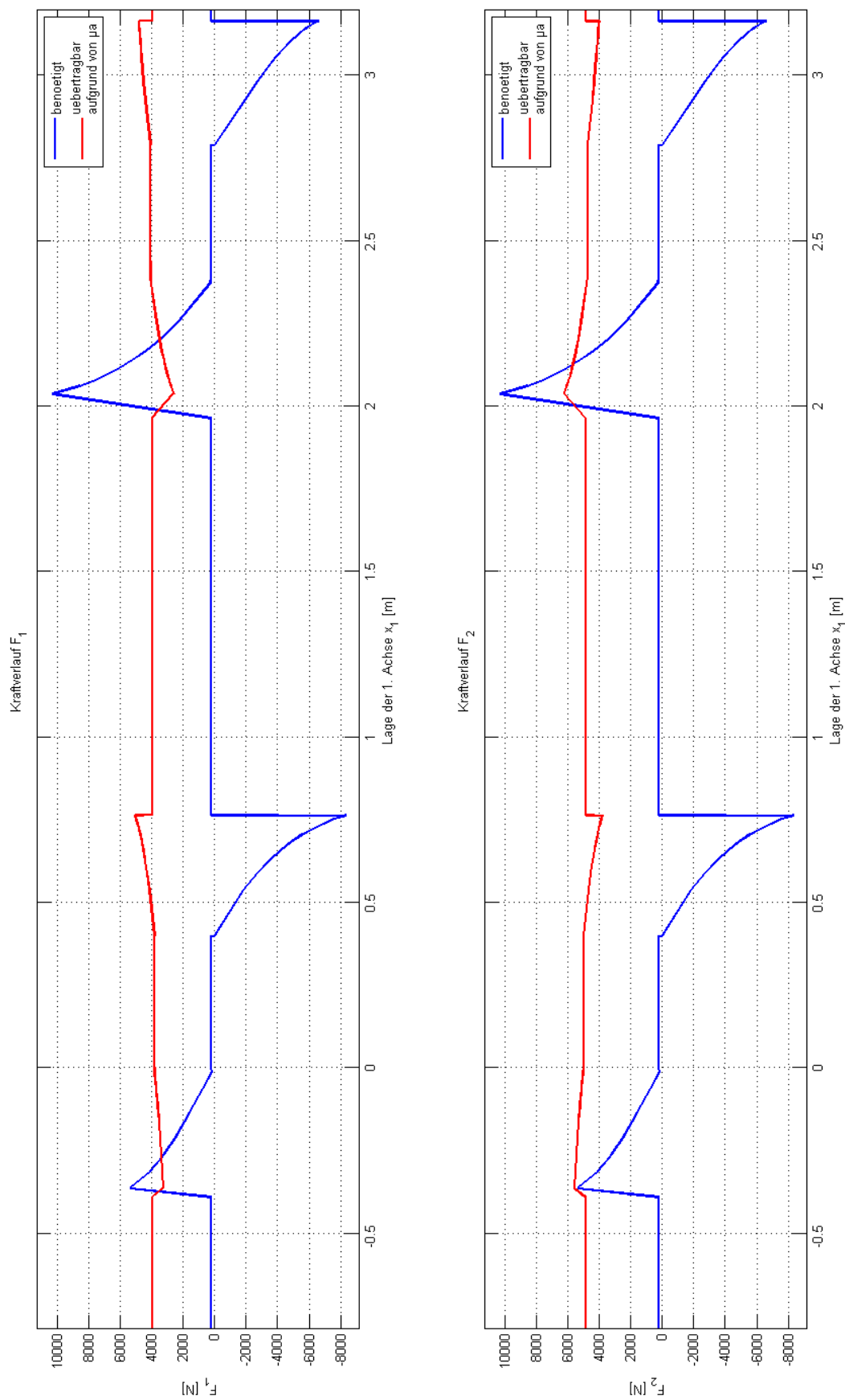


Abbildung 104: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Stufenhindernis bei $\mu_a=0.4$

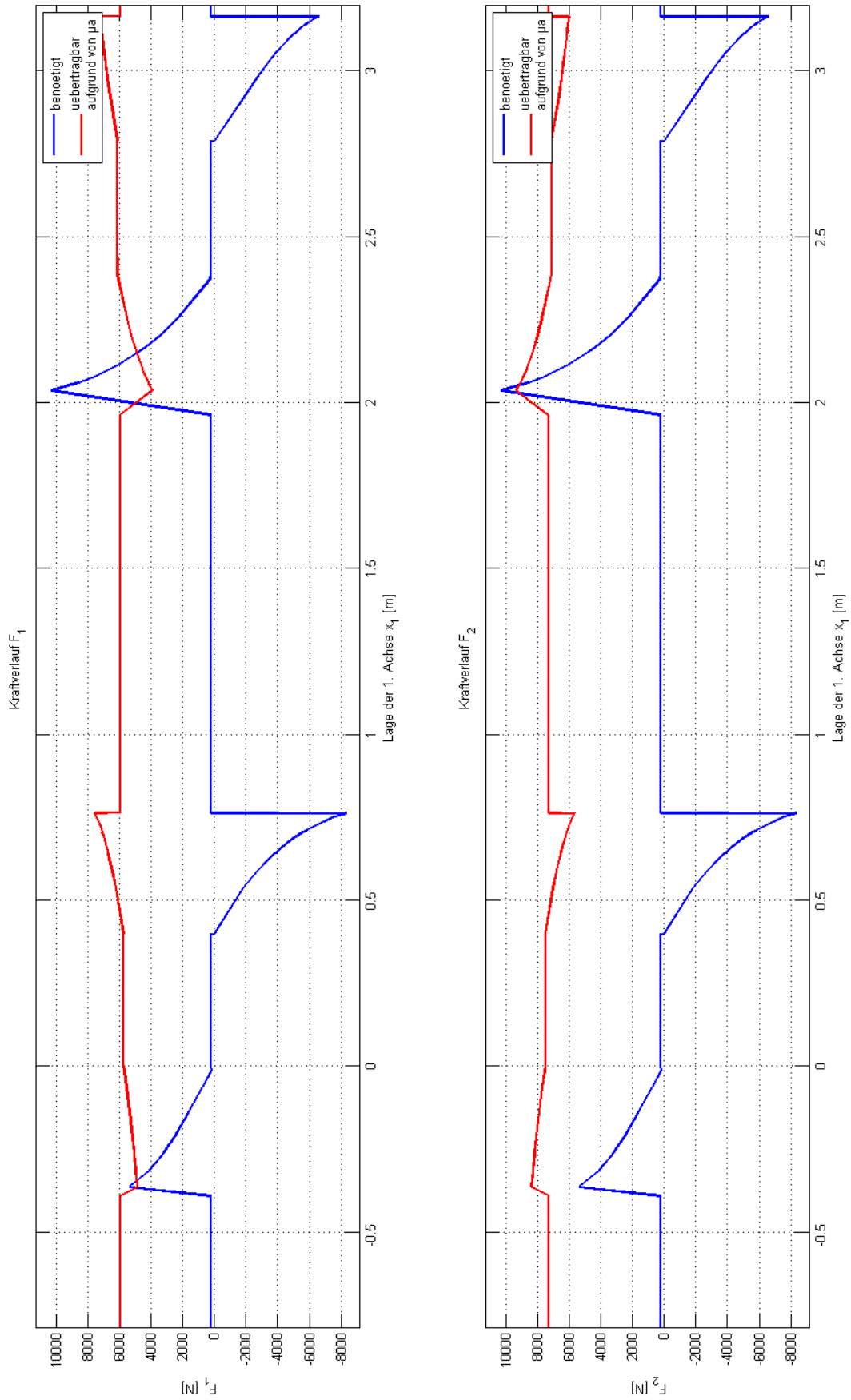


Abbildung 105: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Stufenhindernis bei $\mu_a=0.6$

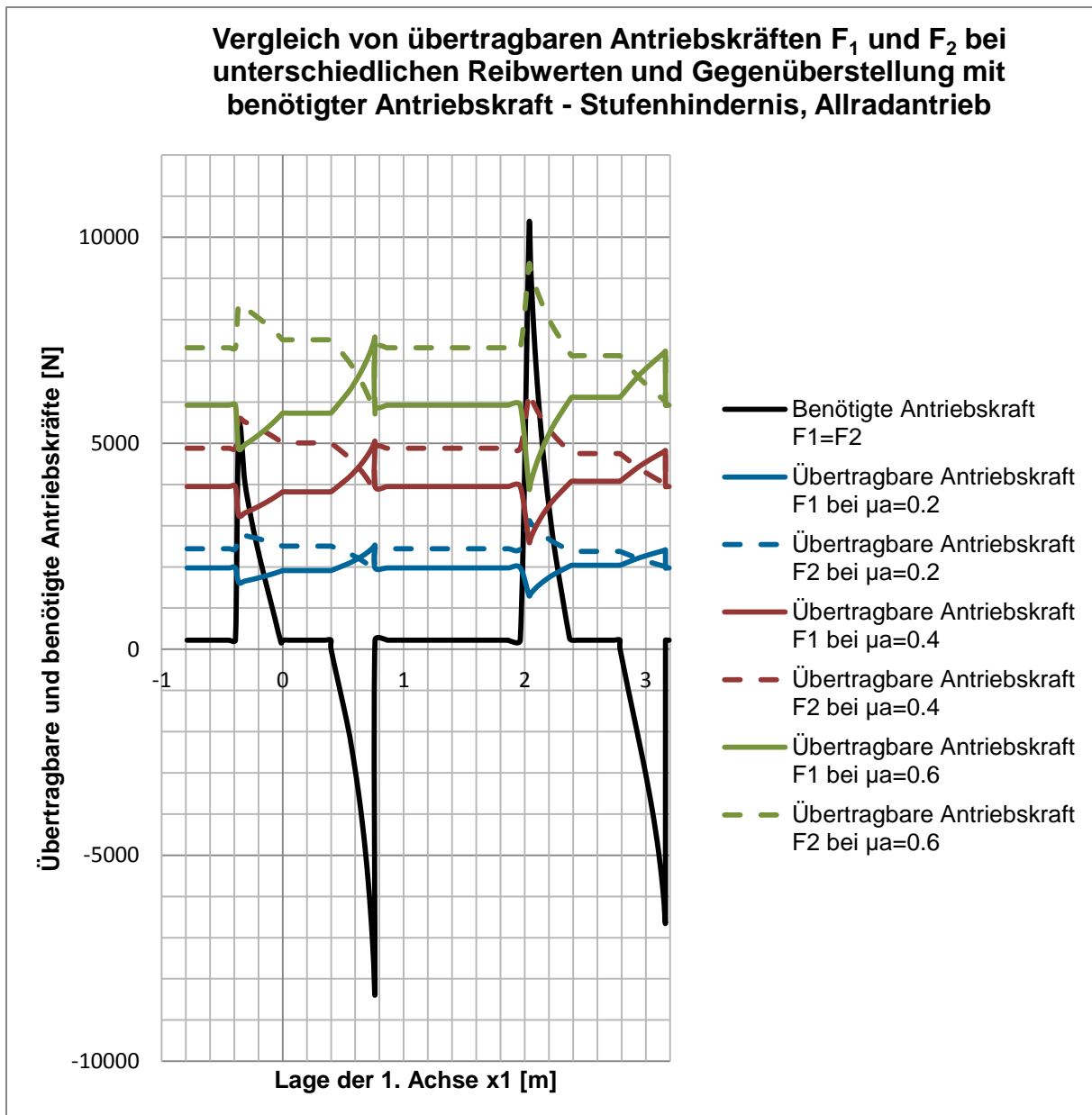


Abbildung 106: Gegenüberstellung der übertragbaren und benötigten Antriebskräfte beim Stufenhindernis

Abb. 106 zeigt die Gegenüberstellung der übertragbaren und benötigten Antriebskräfte bei der Überquerung eines Stufenhindernisses mit einem zweiachsigen Fahrzeug mit Allradantrieb und starren Rädern. Im Gegensatz zum Plateauhindernis treten hier auch negative Antriebskräfte – also Bremskräfte – auf, die vom Fahrzeug aufgebracht werden müssen und vom Fahrzeug auf den Boden übertragbar sein müssen. Dennoch liegt eine Limitierung der Stufenüberschreitbarkeit immer noch beim Hinauffahren auf das Hindernis. Bremskräfte, die nicht zur Gänze übertragen werden können, würden das Fahrzeug zwar schneller werden lassen und somit die Ansätze verletzen, jedoch ist eine

Überquerung des Hindernisses dennoch möglich. Weiters liegen die benötigten Bremskräfte betragsmäßig nur in kurzen Bereichen über den übertragbaren Bremskräften, womit sich keine signifikante Geschwindigkeitserhöhung ergeben würde.

Auch zu beachten ist der Verlauf des Neigungswinkels β , der hier erstmalig negativ wird. Dies ergibt sich dadurch, dass beim Überschreiten der Stufe mit der 2. Achse der hintere Teil des Fahrzeuges angehoben wird, während die 1. Achse ihre Höhenlage beibehält. Daraus resultiert die negative Neigung des Fahrzeuges. Beim Überschreiten eines Plateauhindernisses hingegen war der Neigungswinkel jedoch stets positiv, da durch das Auffahren der 2. Achse auf das Hindernis die Fahrt in der Ebene wieder ermöglicht wurde.

7.3.8 Variation des Reibwerts μ_a am Grabenhindernis bei einem 2-achsigen Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb

In diesem Vergleich werden die in 7.3.1 und 7.3.7 durchgeführten Untersuchungen anhand eines Grabenhindernisses durchgeführt. Eine Skizze der Stufenüberquerung ist Abb. 107 zu entnehmen, die Parametervariation ist in Abb. 108 aufgeführt.

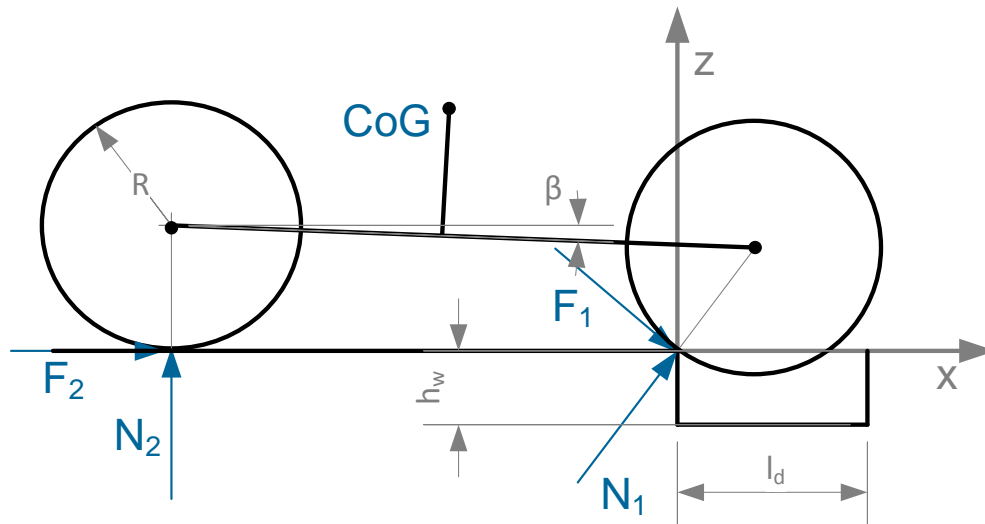


Abbildung 107: Skizze der Grabenüberschreitbarkeit eines allradgetriebenen, 2-achsigen Fahrzeugs mit starren Rädern

Grabenhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von μ_a		
μ_a [-]		
0.2	0.4	0.6

Abbildung 108: Reibwertvariation am Grabenhindernis

Die Abb. 109 – Abb. 112 zeigen die Kräfteverläufe, die beim Überschreiten eines Grabenhindernisses mit zweiachsigen, allradgetriebenen Radfahrzeugen mit starren Rädern auftreten.

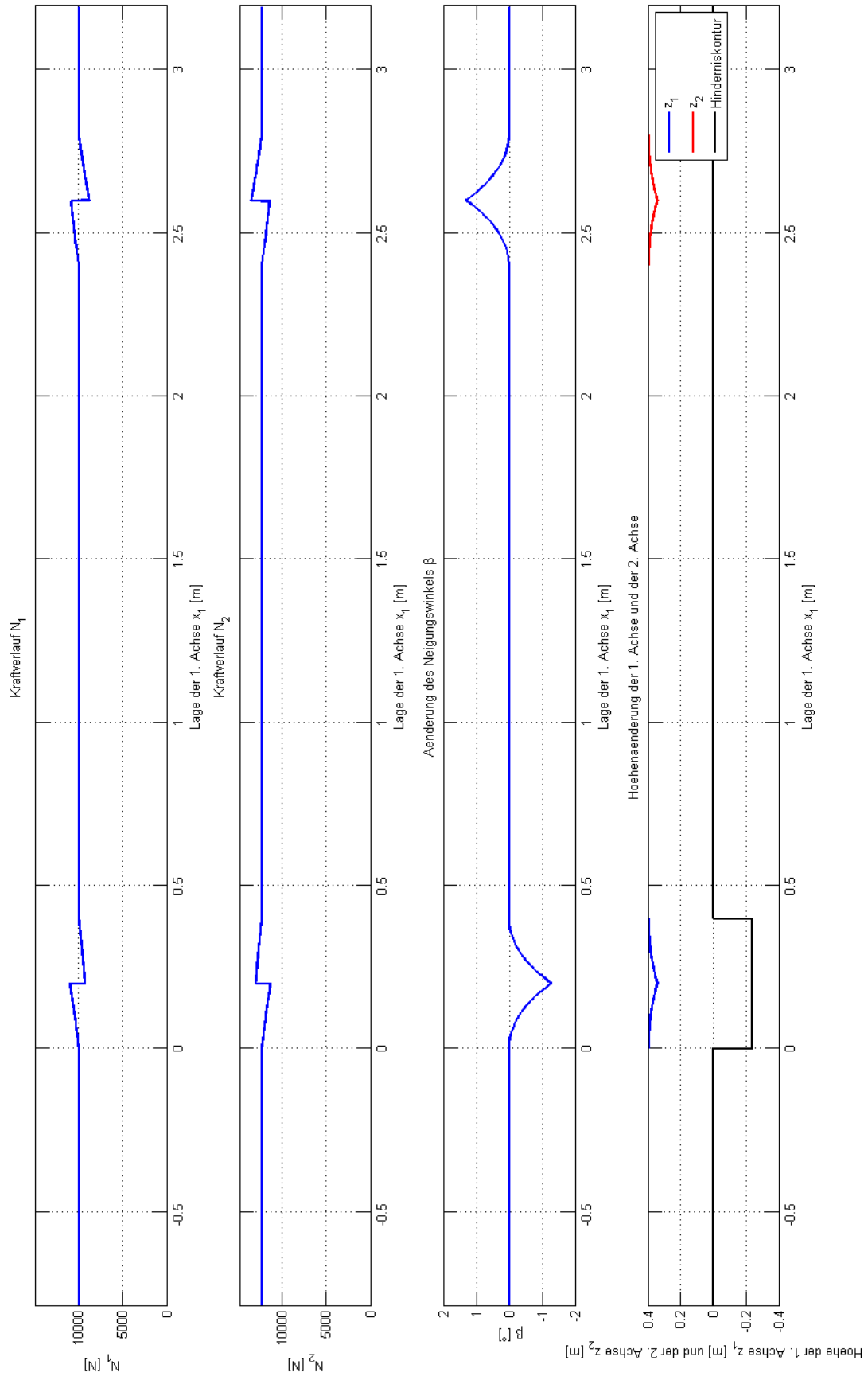


Abbildung 109: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten bei Reibwertvariation am Grabenhindernis

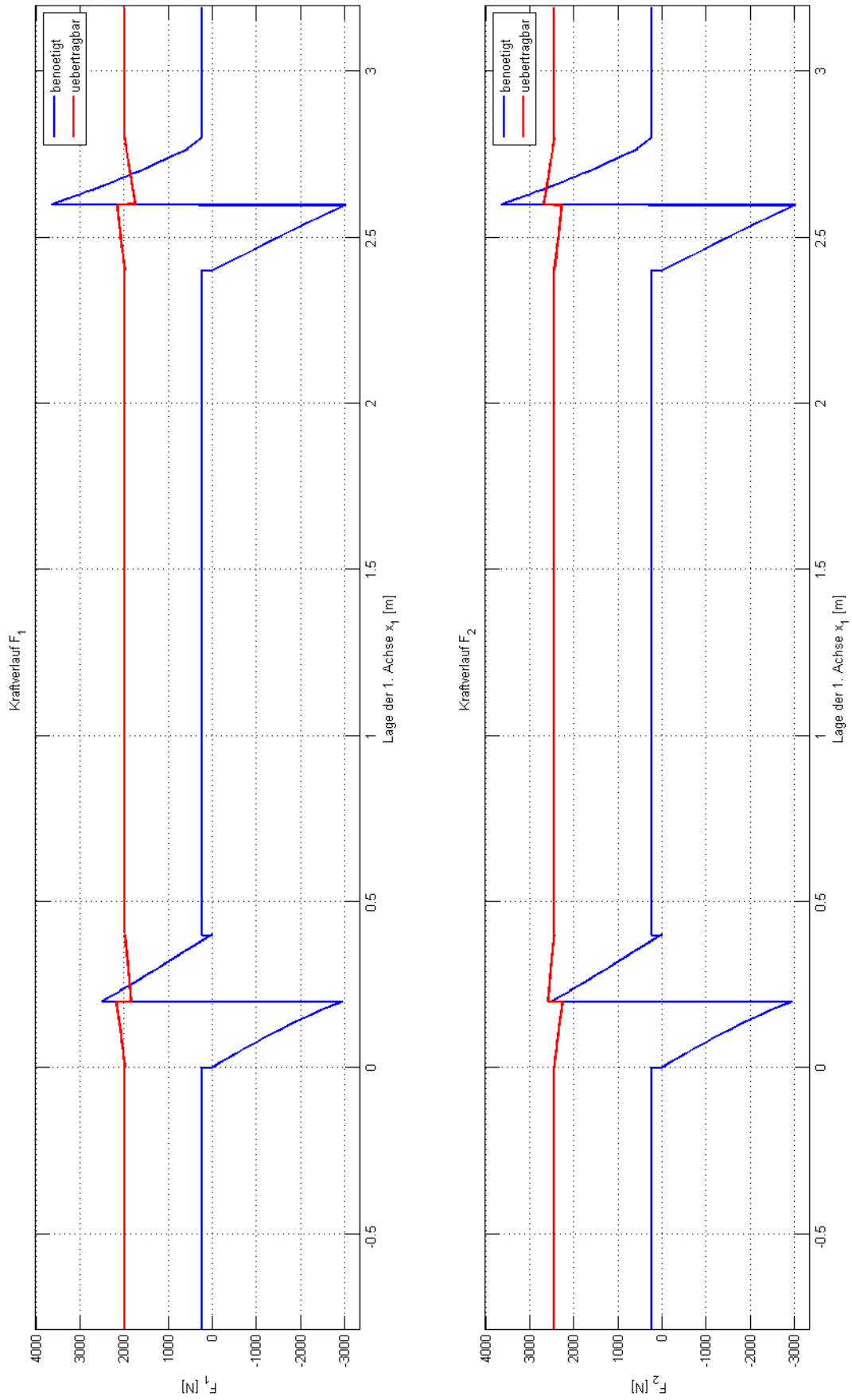


Abbildung 110: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Grabenhindernis bei $\mu_a=0.2$

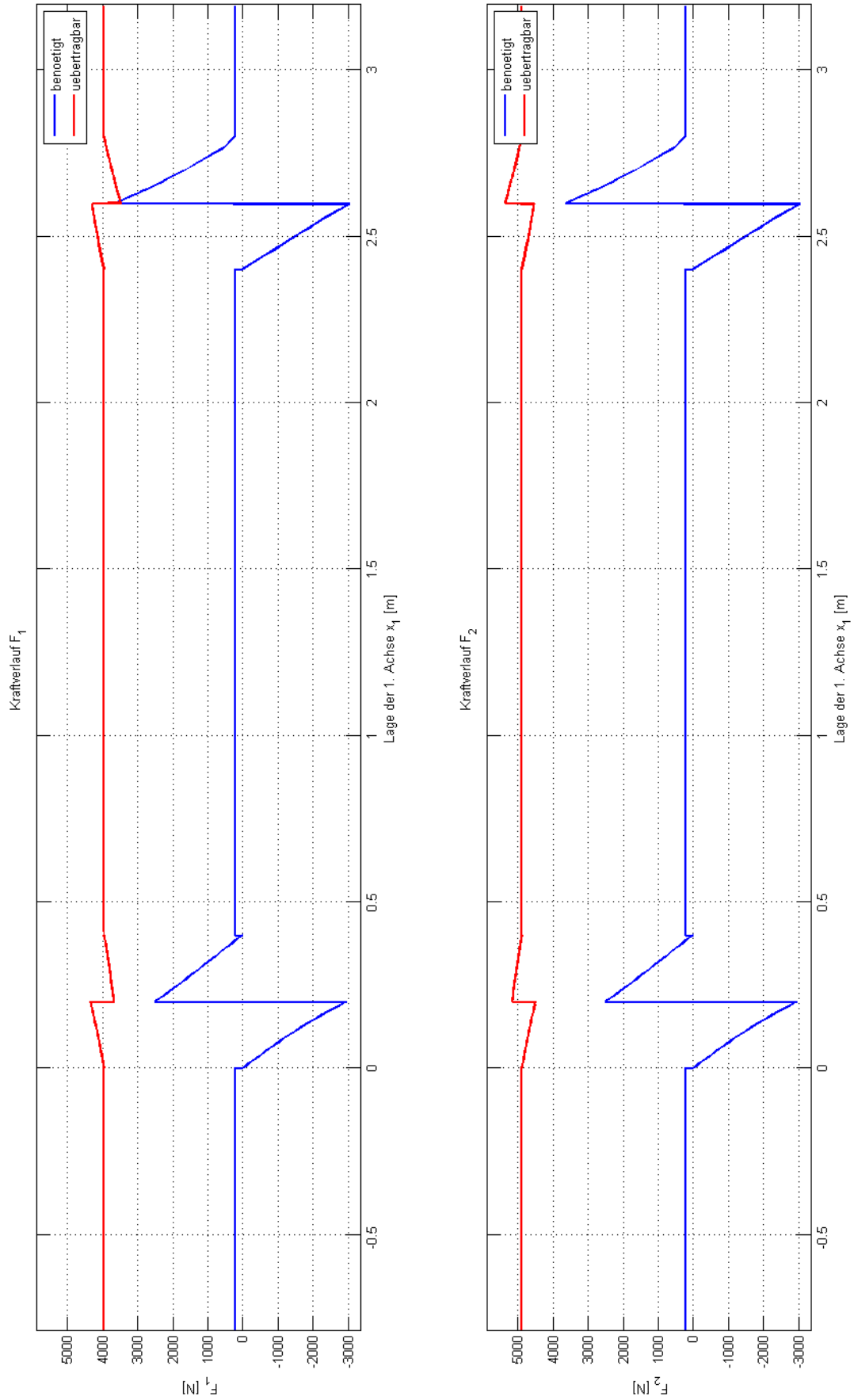


Abbildung 111: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Grabenhindernis bei $\mu_a=0.4$

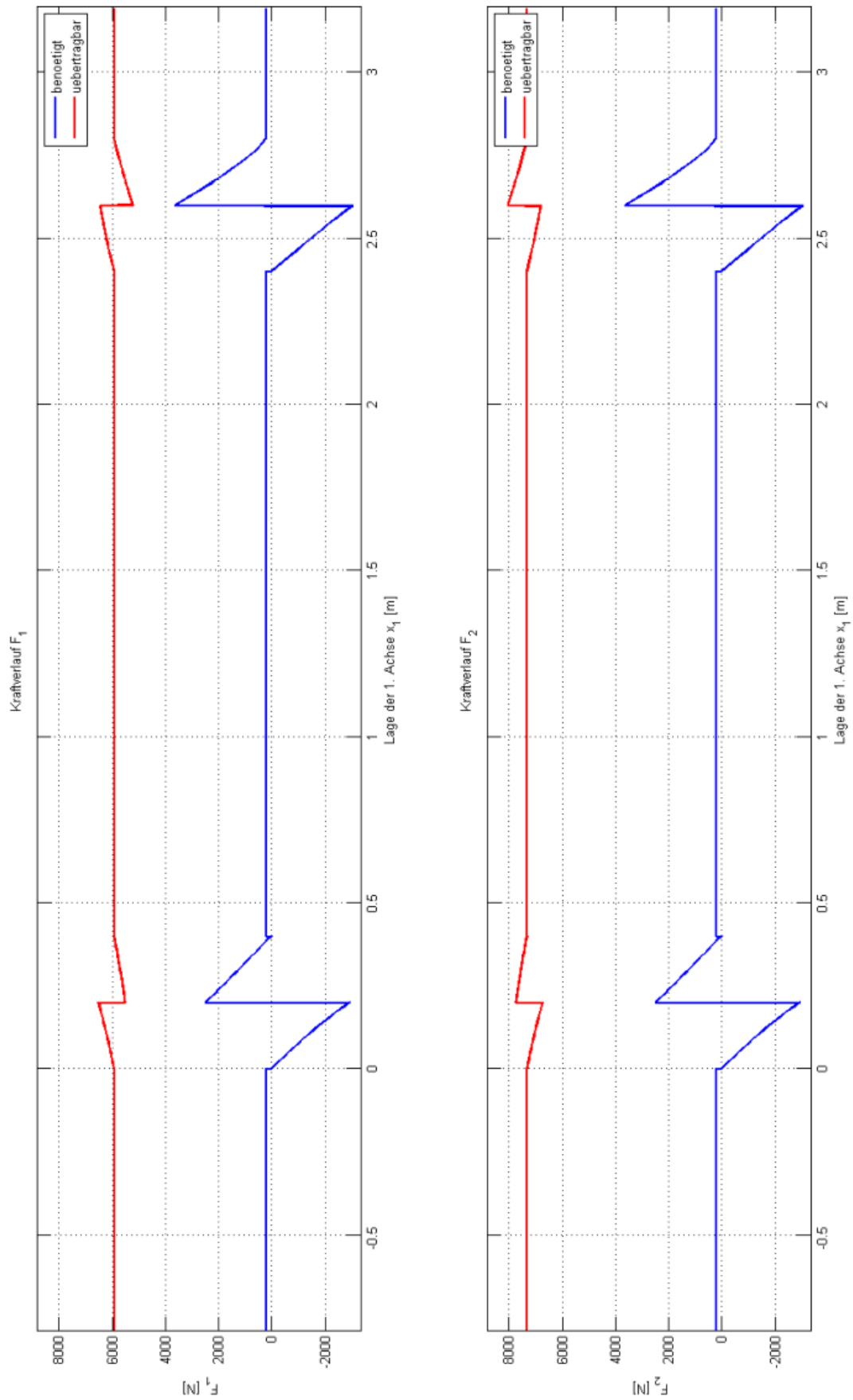


Abbildung 112: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Grabenhindernis bei $\mu_a=0.6$

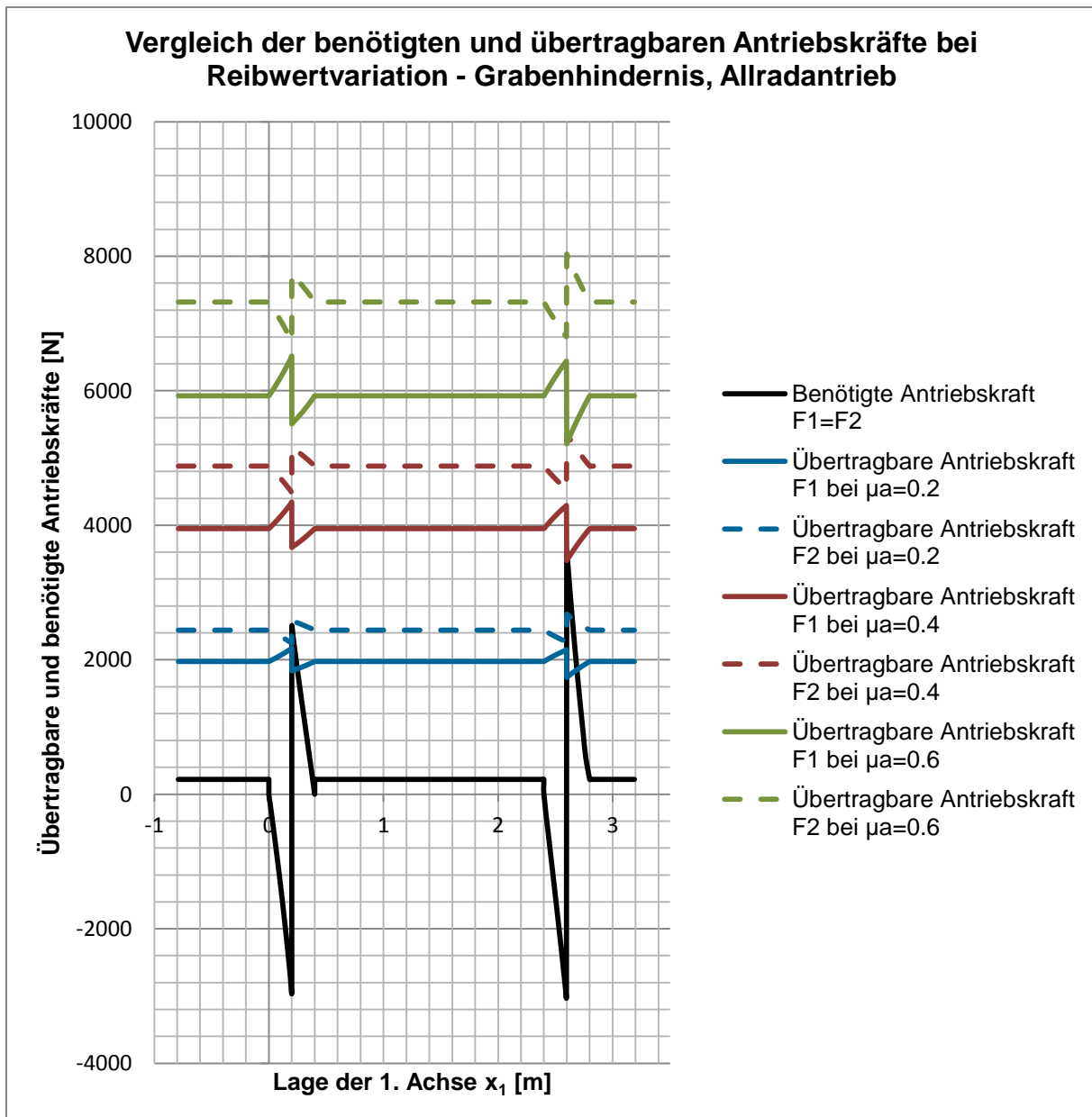


Abbildung 113: Gegenüberstellung der übertragbaren und benötigten Antriebskräfte bei Reibwertvariation am Grabenhindernis

Abb. 113 stellt die übertragbaren und benötigten Antriebskräfte bei der Überschreitung eines Grabenhindernisses dar. Gut erkennbar ist, dass – im Gegensatz zum Plateau- und Stufenhindernis – eine Überquerung bereits ab $\mu_a=0.4$ möglich ist. Sämtliche Antriebs- und Bremsmomente können übertragen werden. Dies resultiert daraus, dass das Rad beim Hinabfahren in den Graben nicht sehr weit hinunter fährt, da es die gegenüberliegende Grabenkante frühzeitig berührt und somit bereits wieder mit der Ausfahrt aus dem Graben beginnt. Belegt wird dies einerseits durch den Neigungswinkelverlauf und den Verlauf der Lagekoordinaten z_1 & z_2 und andererseits durch den Kräfteverlauf.

7.3.9 Vergleich des idealen Plateauhindernisses mit dem angenäherten, realitätsnahen Plateauhindernis und Variation der Parameter l_x und k_1 des realitätsnahen Plateaus

Beim realitätsnahen Plateauhindernis werden die Hindernislänge l_x und die zugehörige Steigung k_1 variiert, um den Einfluss der Hindernisform auf die benötigten Antriebskräfte zu zeigen. Anstatt einer Prinzipskizze sind in Abb. 114 die tatsächlichen Hinderniskonturen der untersuchten, realitätsnahen sowie eines idealen Plateauhindernisses dargestellt, als Größenvergleich ist außerdem ein Rad des Referenzfahrzeuges aufgeführt. In Abb. 115 ist die Parametervariation ersichtlich.

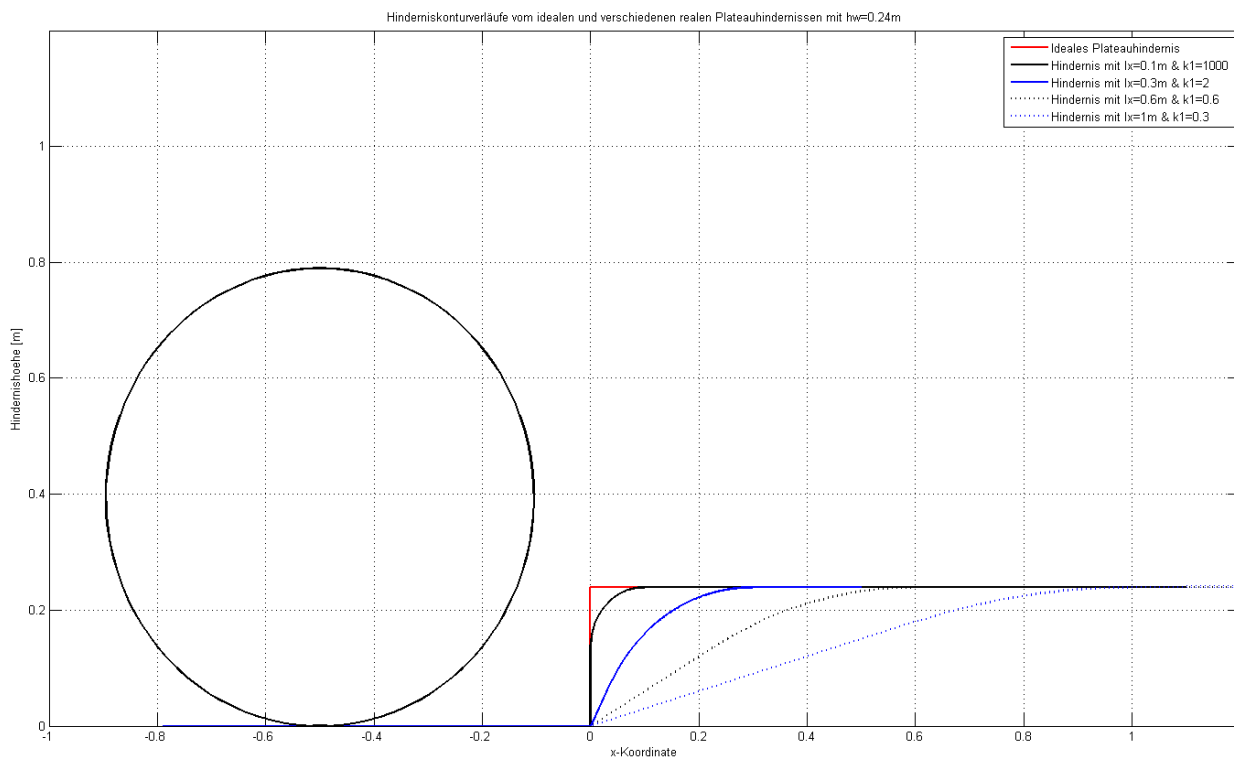


Abbildung 114: Hinderniskonturverlauf der realitätsnahen Plateauhindernisse mit $h_w=0.24m$

Realitätsnahes Plateauhindernis bei 2-achsigem Fahrzeug mit starren Rädern und Allradantrieb - Variation von l_x und k_1			
l_x [m] / zugehöriges k_1 [-]			
0.1 / 1000	0.3 / 2	0.6 / 0.6	1.0 / 0.3

Abbildung 115: Variation der Parameter l_x und k_1 der realitätsnahen Plateauhindernisse

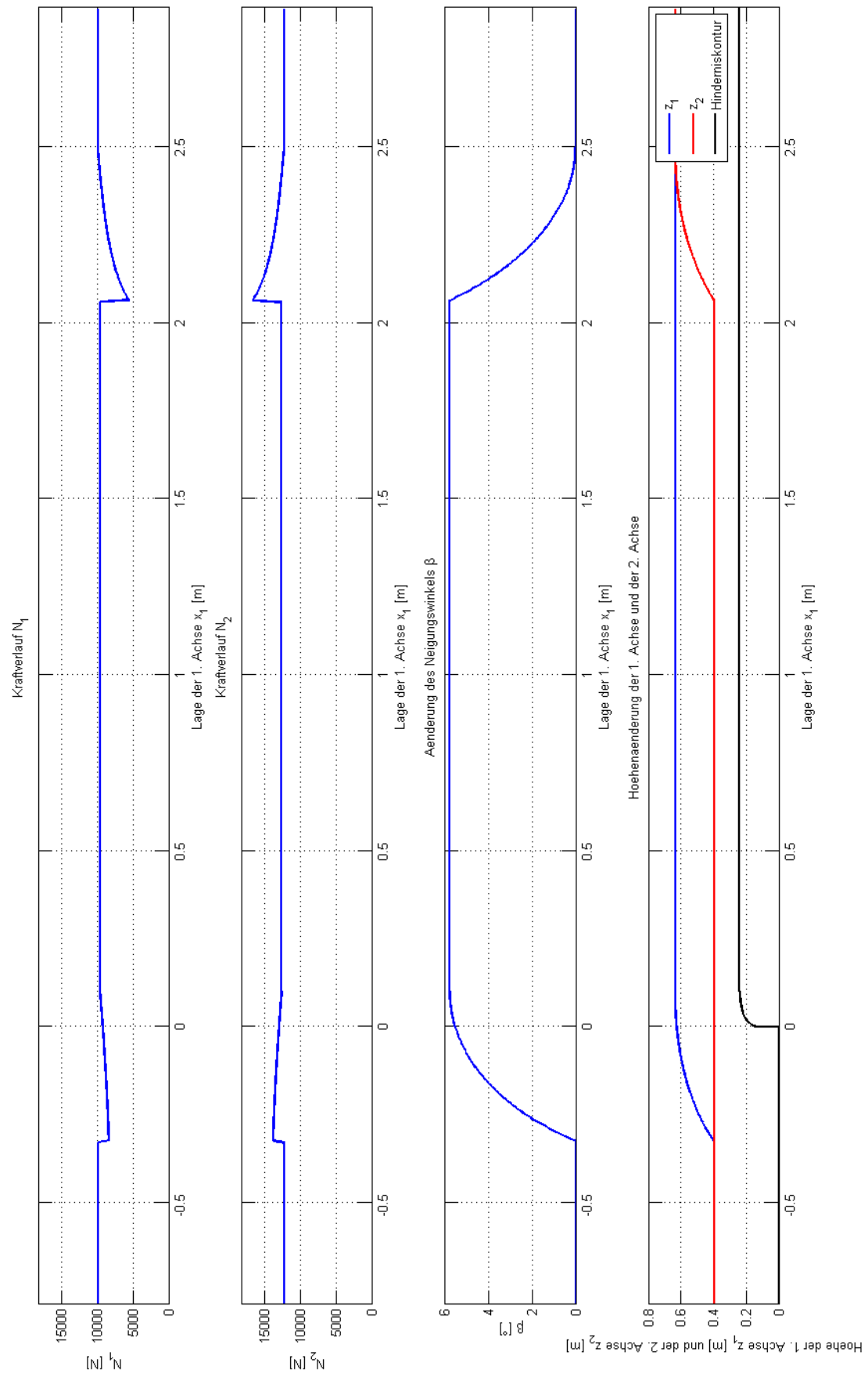


Abbildung 116: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.1\text{m}$ und $k_1=1000$

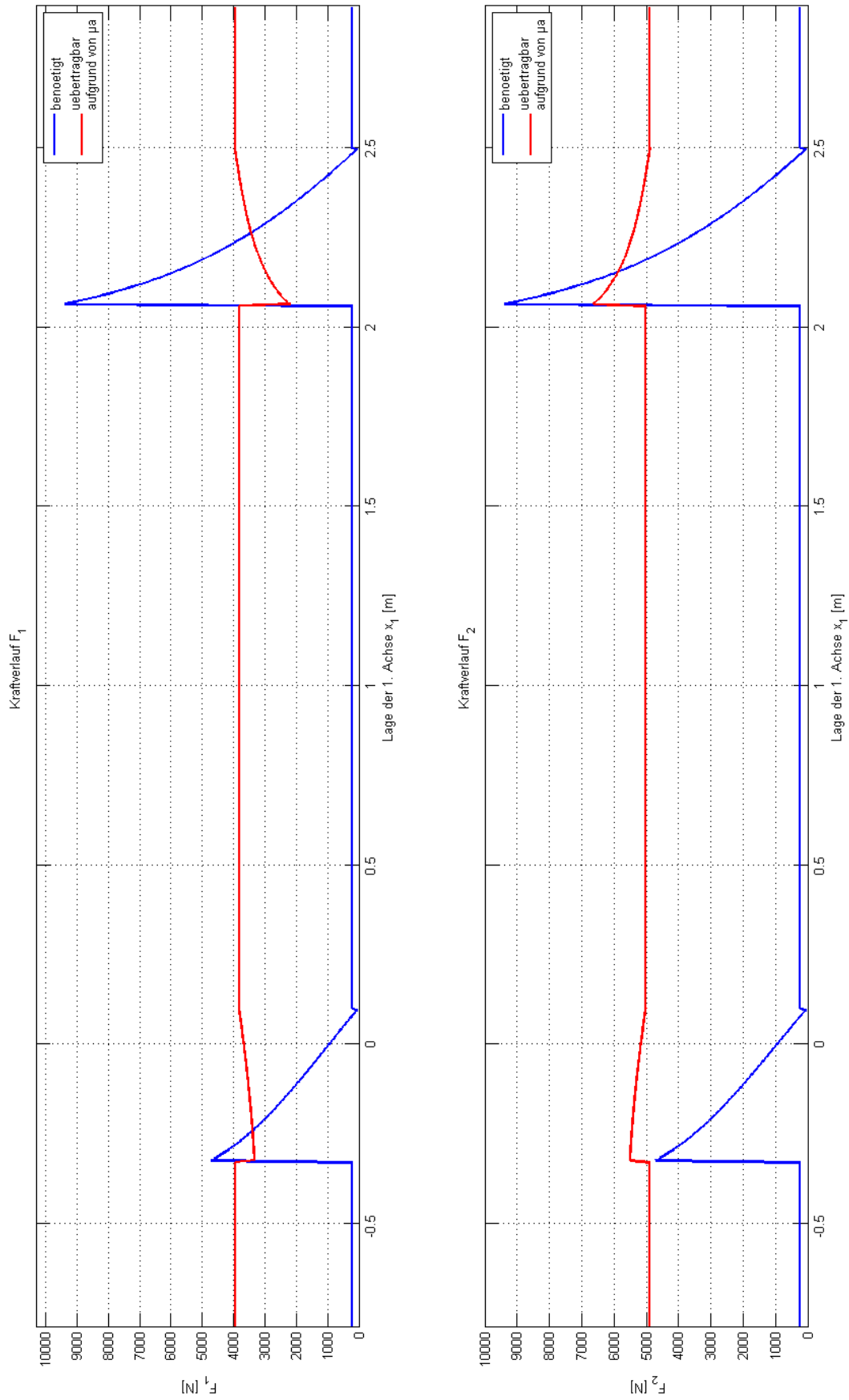


Abbildung 117: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.1\text{m}$ und $k_1=1000$

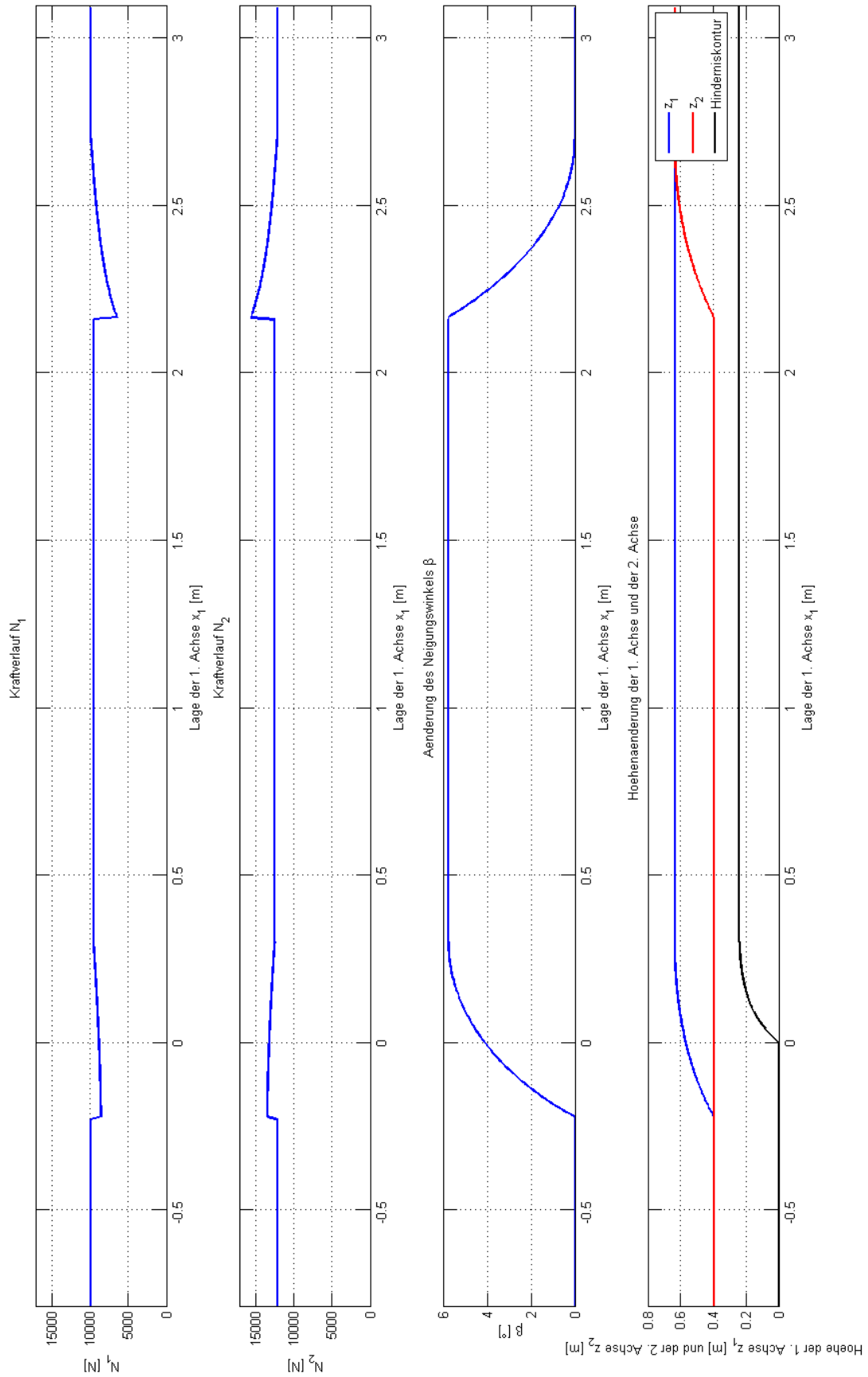


Abbildung 118: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.3\text{m}$ und $k_1=2$

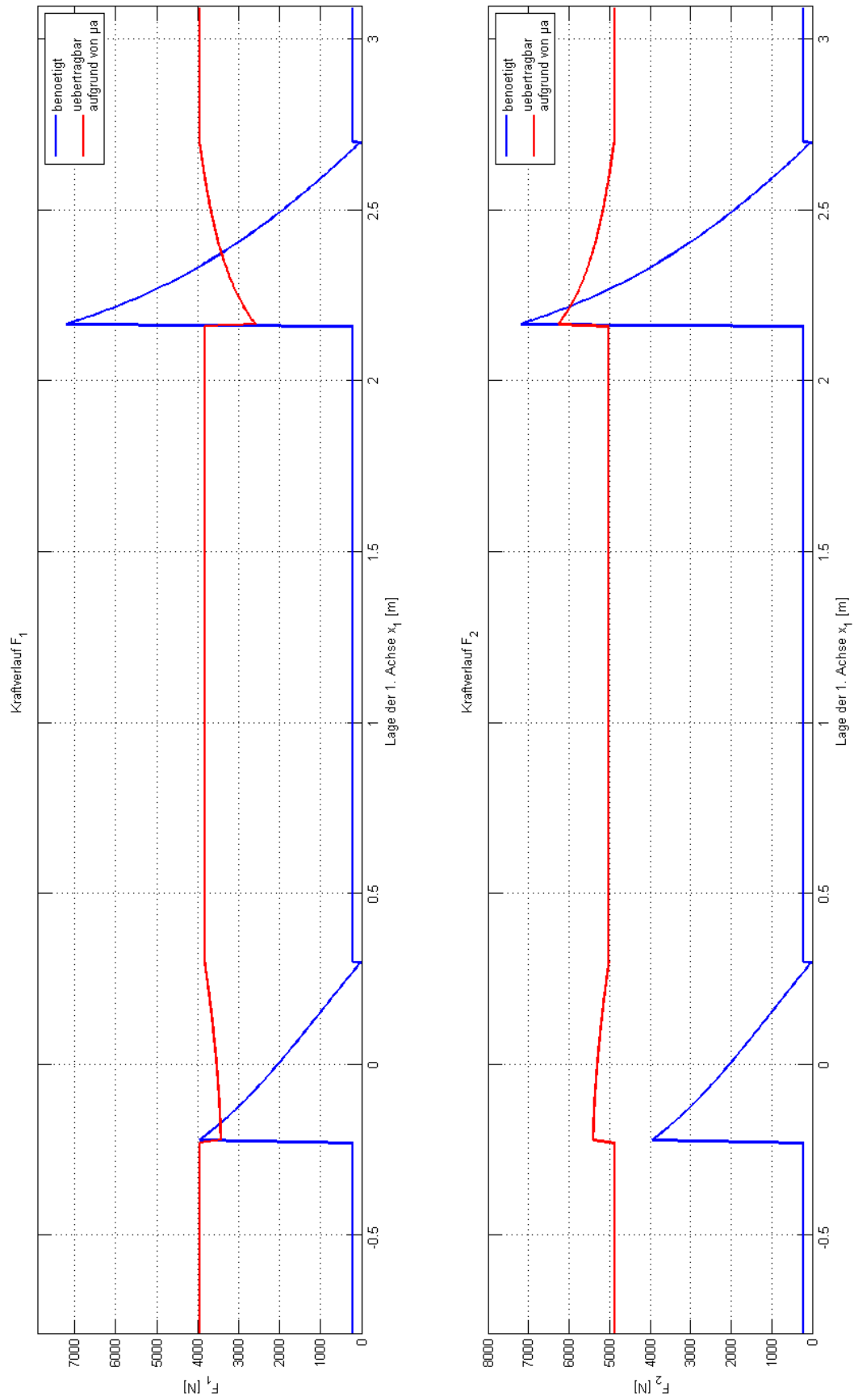


Abbildung 119: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.3\text{m}$ und $k_1=2$

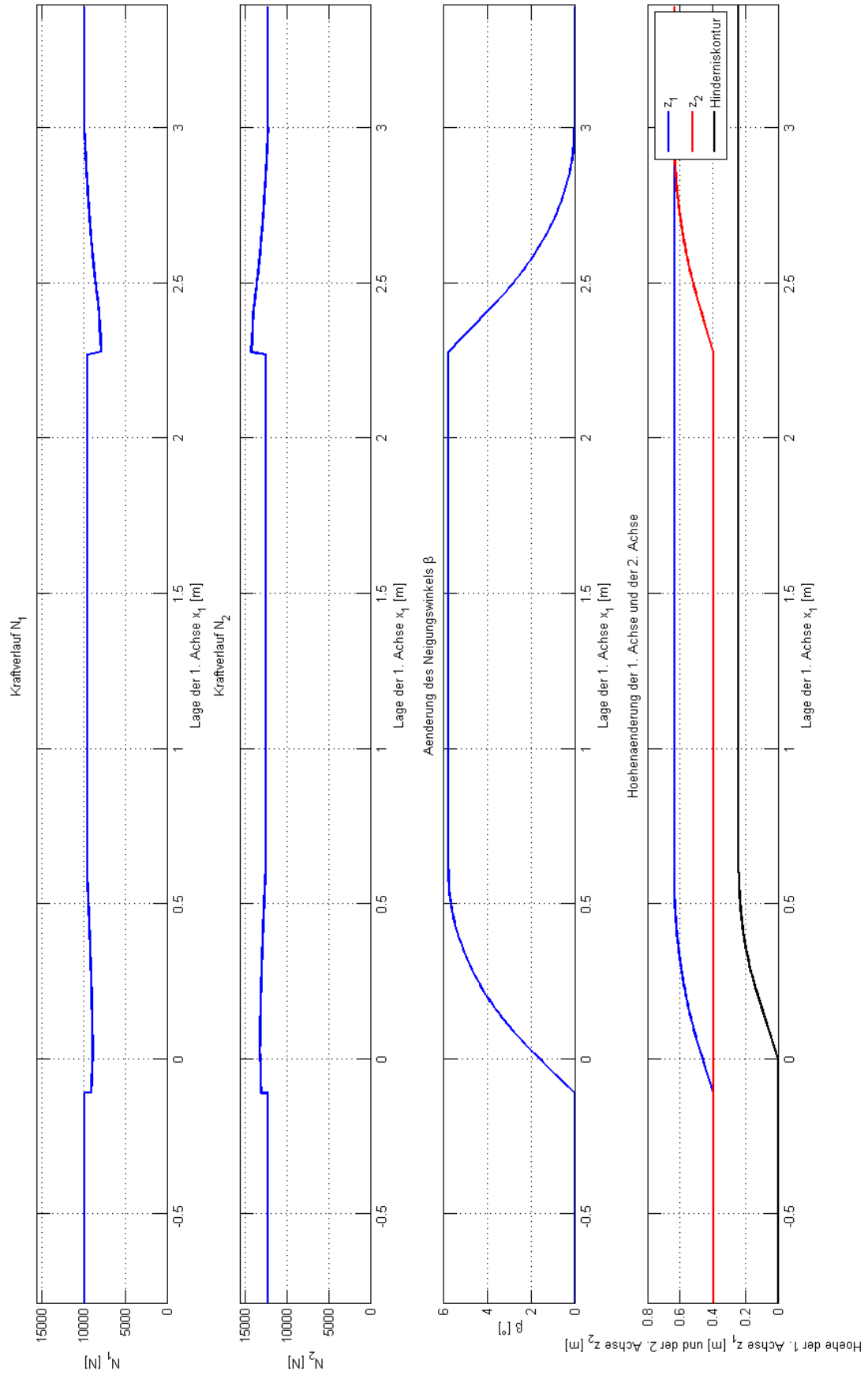


Abbildung 120: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.6\text{m}$ und $k_1=0.6$

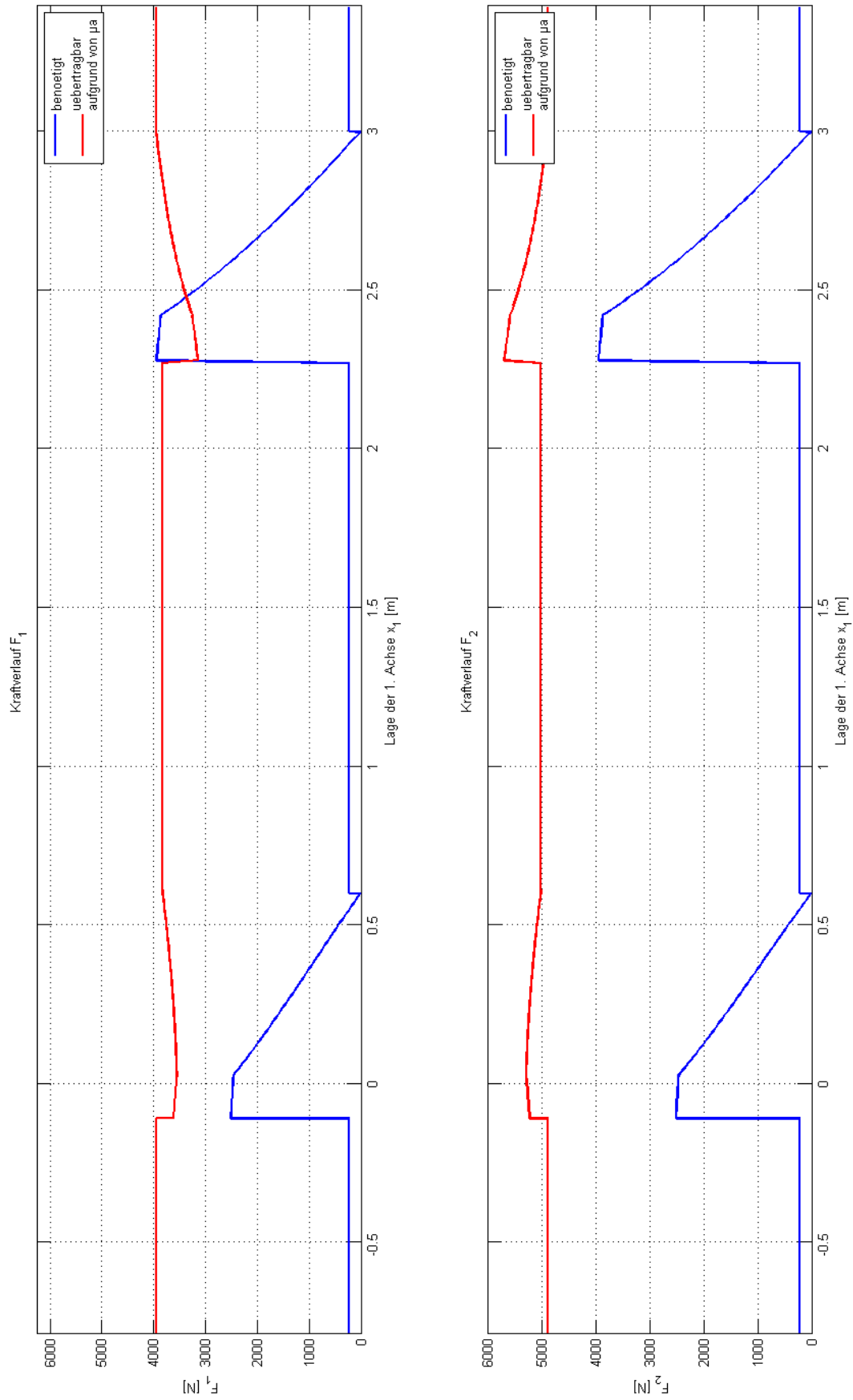


Abbildung 121: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=0.6\text{m}$ und $k_1=0.6$

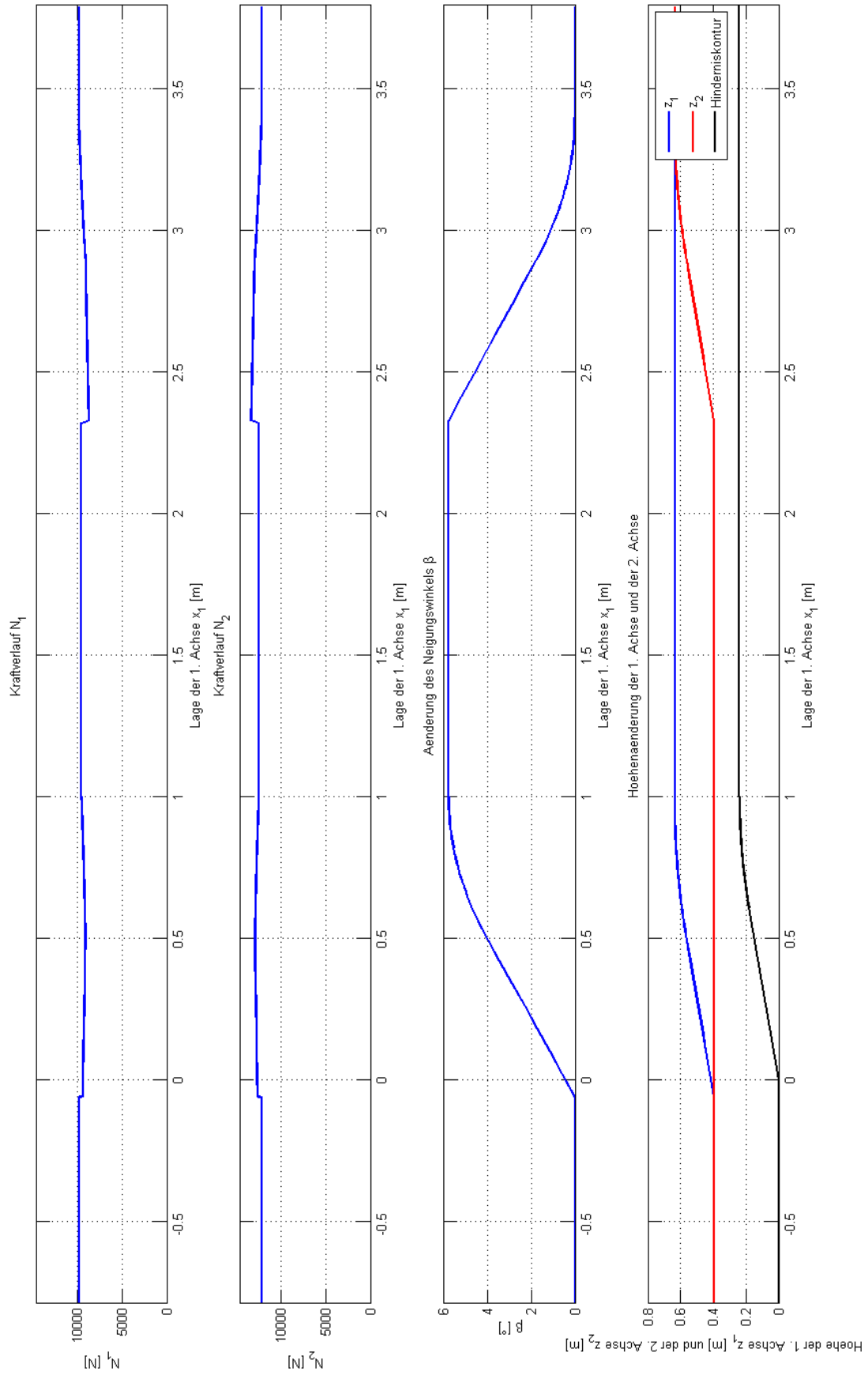


Abbildung 122: Aufstandskräfte, Neigungswinkel und Lagekoordinaten beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=1.0\text{m}$ und $k_1=0.3$

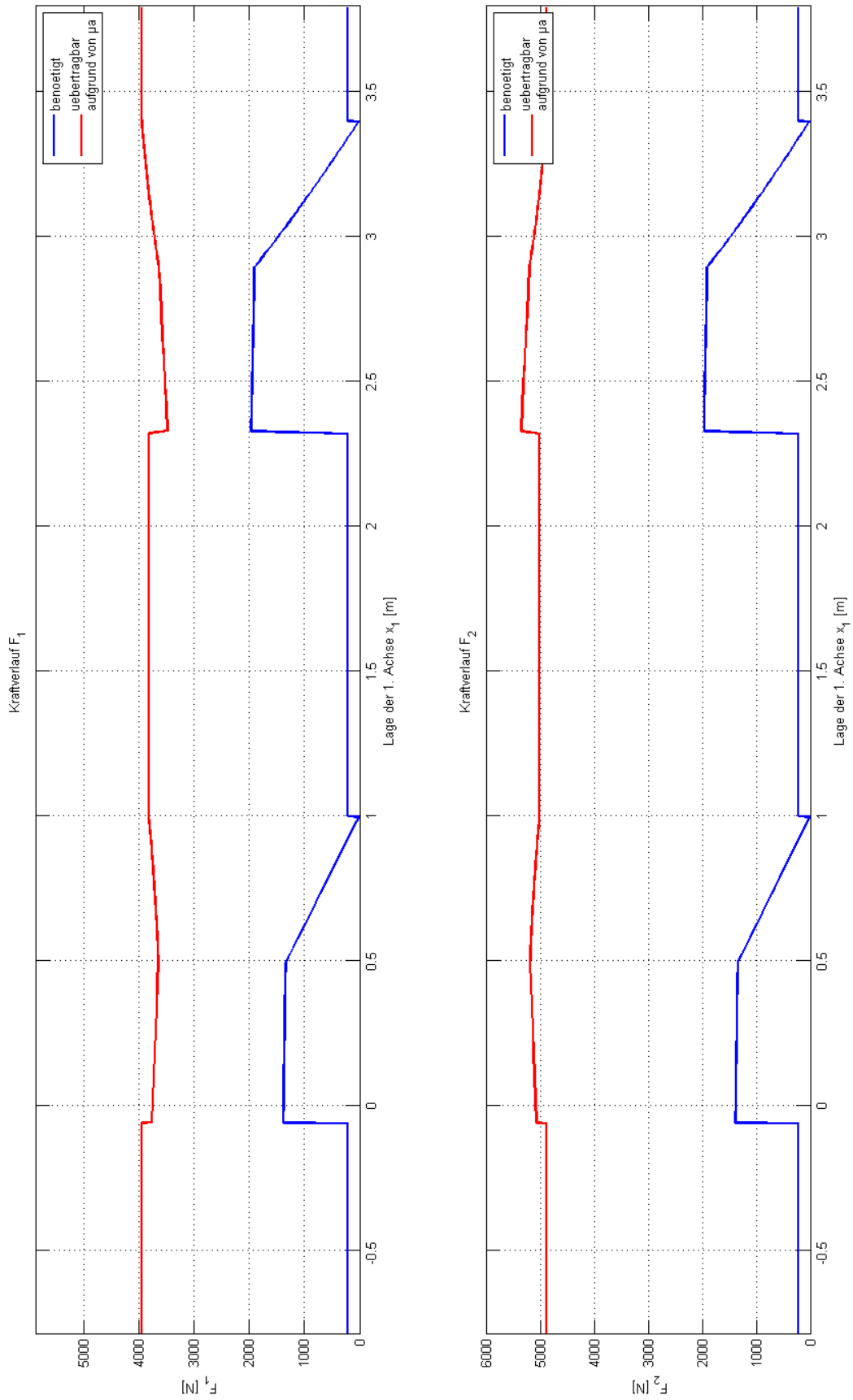


Abbildung 123: Übertragbare und benötigte Antriebskräfte beim realitätsnahen Plateauhindernis mit $l_x=1.0\text{m}$ und $k_1=0.3$

Die [Abb. 116](#) – [Abb. 123](#) zeigen die Kräfteverläufe der vier untersuchten realitätsnahen Plateauhindernisse. Die vergleichbaren idealen Plateauhindernisse sind [Abb. 69](#) und [Abb. 71](#) dargestellt. Ein Vergleich der benötigten Antriebskräfte ist in [Abb. 124](#) ersichtlich.

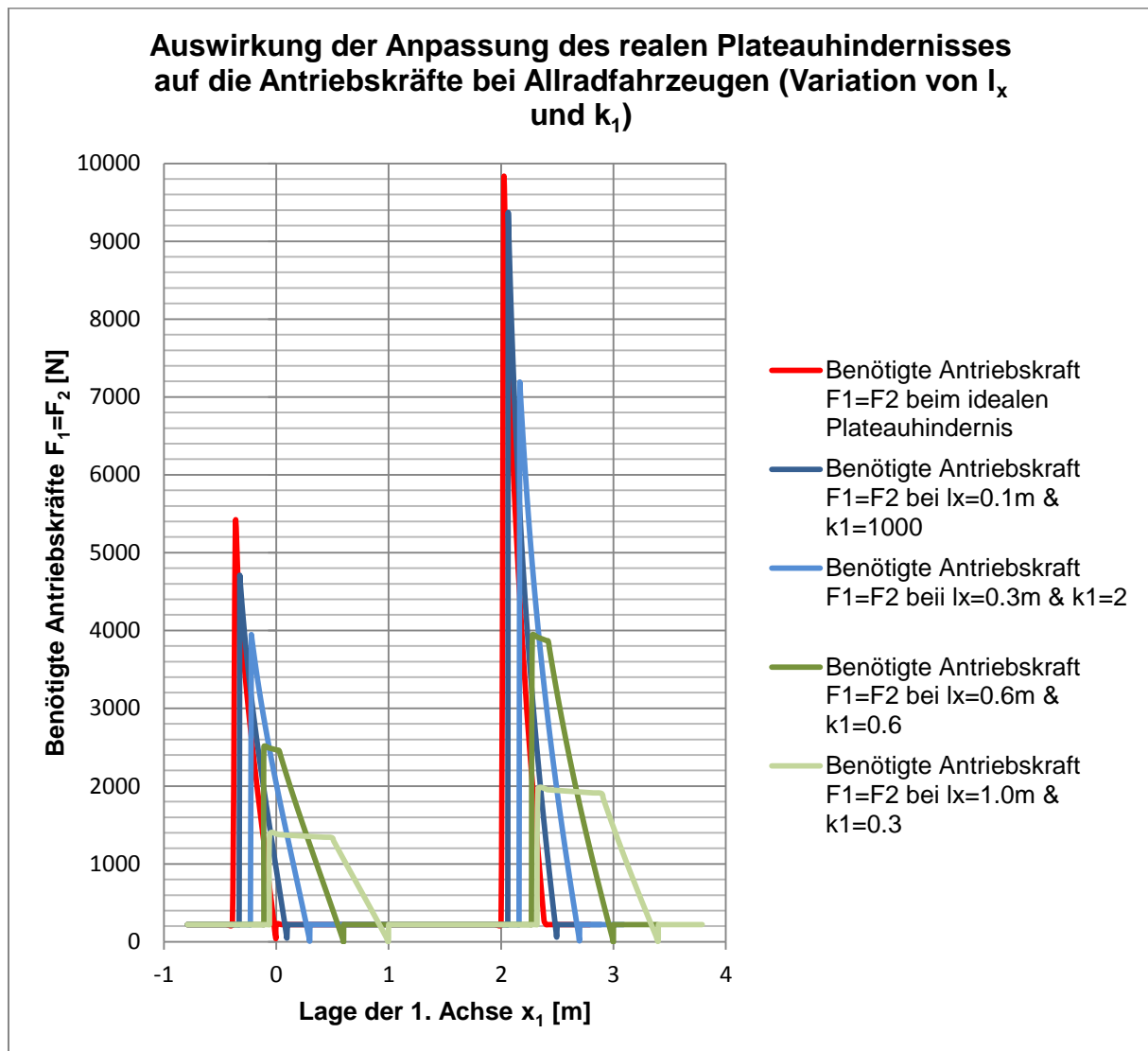


Abbildung 124: Gegenüberstellung der benötigten Antriebskräfte beim realitätsnahen und beim idealen Plateauhindernis

In [Abb. 124](#) sind die benötigten Antriebskräfte für ein ideales und mehrere realitätsnahe Plateauhindernisse gegenübergestellt. Besonders für die 2 flacheren Hindernisse (in Grün dargestellt) sind abgeflachte Spitzen in den Kräfteverläufen erkennbar. Diese annähernd horizontalen Bereiche entsprechen der schrägen Anfahrt beim realitätsnahen Hindernis, während die darauffolgende Schräge im Kräfteverlauf die Ausrundung darstellt. Ebenfalls gut erkennbar ist, dass beim steilsten realitätsnahen Hindernis dieser nahezu horizontale Bereich nicht existiert,

es kommt also einem erstmaligen Berühren des Rades auf der Rundung des Hindernisses. Außerdem sinken die für ein Überschreiten notwendigen Kräfte beim flachsten Hindernis sowohl bei Vorder- als auch bei der Hinterachse auf ca. ein Viertel der Kräfte der idealen Hindernisform. Dementsprechend groß sind also die Auswirkungen der Hindernisform auf seine Überschreitbarkeit.

8 Anhang

Im Anhang befinden sich ein Variablen-, Literatur- und Abbildungsverzeichnis. Auf die Angabe des Quellcodes in schriftlicher Form wurde aus Platzgründen verzichtet. Dieser sowie das Programm STEPMaster sind auf Nachfrage beim ÖVK unter folgender Adresse erhältlich:

Professor Günter Hohl
Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik
Elisabethstraße 26/24
A-1010 Wien
AUSTRIA
E-Mail: guenter.hohl@oevk.at | Mobil: +43 (0) 676 / 55 32 458

8.1 Variablenübersicht

Variable	Einheit	Bedeutung & Erklärung
R	[m]	Radradius
h_w	[m]	Hindernishöhe
l_b	[m]	Hindernislänge (Hindernistyp: Stufenhindernis)
l_d	[m]	Hindernisbreite (Hindernistyp: Vertiefung)
s	[m]	Radstand
s_1	[m]	Schwerpunktlage hinter 1. Achse
s_2	[m]	Lage der 2. Achse bei dreiachsigem Fahrzeug
h_0	[m]	Schwerpunktlage über Achsmittle
CoG	[-]	Kennzeichnet das "Center of Gravity" (s_1/h_0)
N_i	[N]	Normalkraft der i-ten Achse (Aufstandskraft)
m	[kg]	Fahrzeugmasse
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung, $g=9,81$
F_i	[N]	Antriebskraft der i-ten Achse
$\alpha, \alpha(x), \alpha_0$	[rad]	Winkel der Berührnormalen und Sonderfälle
β	[rad]	Neigungswinkel des Fahrzeuges
μ_a	[-]	Reibwert
η_r	[-]	Rollwiderstandsbeiwert
r	[m]	Radius Kreisbogen in real. Stufen
l_x	[m]	Länge realitätsnahes Plateauhindernis
k_1	[-]	Steigung der Geraden im variablen Plateauhindernis
$f_1(x), f_2(x)$	[-]	Funktionen zur Beschreibung des realen Plateaus
T_1	[Nm]	Antriebsmoment Vorderachse
T_2, T_3	[Nm]	Antriebsmoment Hinterachse
$\gamma, \gamma', \varepsilon, \varepsilon'$	[rad]	Winkel bei realem Hindernis
x_1, z_1	[-]	Koordinaten Übergangspunkt bei realem Hindernis
x_{ber}	[-]	x-Koordinate Berührungspunkt Rad mit realem Hindernis
z_{ber}	[-]	z-Koordinate Berührungspunkt Rad mit realem Hindernis
δ_1	[m]	Einsenkung flexibles Vorderrad
δ_2	[m]	Einsenkung flexibles Hinterrad
c	[N/m]	Lineare Federkonstante der Reifeneinsenkung

Abbildung 125: Variablenübersicht

8.2 Gültigkeitsbereiche für α_0 und $\alpha(x)$

Ideale Hindernis - Fahrzeugkombination	Wertebereiche für	
	α_0	$\alpha(x)$
2-achsig mit starren Rädern		
A-A, B-A	$\text{asin}\left(\frac{R-h_w}{R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{-x}{R}\right)$
A-B	$\text{asin}\left(\frac{R-s\sin\beta_{max}}{R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R}\right)$
B-B	$\text{asin}\left(\frac{R-h_w}{R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-l_b}{R}\right)$
B-C	$\text{asin}\left(\frac{R-h_w}{R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R}\right)$
B-D	$\text{asin}\left(\frac{R-h_w}{R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-l_b-s\cos\beta}{R}\right)$
C-AD-1	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x}{R}\right)$
C-AD-2	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{l_d-x}{R}\right)$
C-AE-1	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R}\right)$
C-AE-2	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{s\cos\beta+l_d-x}{R}\right)$
2-achsig mit flexiblen Rädern		
A-A, B-A	$\text{asin}\left(\frac{R_2-h_w}{R_1}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{-x}{R_1}\right)$
A-B	$\text{asin}\left(\frac{R_1-s\sin\beta_{max}}{R_2}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R_2}\right)$
B-B	$\text{asin}\left(\frac{R_2-h_w}{R_1}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-l_b}{R_1}\right)$
B-C	$\text{asin}\left(\frac{R_1-h_w}{R_2}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R_2}\right)$
B-D	$\text{asin}\left(\frac{R_1-h_w}{R_2}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-l_b-s\cos\beta}{R_2}\right)$
C-AD-1	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R_1}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x}{R_1}\right)$
C-AD-2	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R_1}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{l_d-x}{R_1}\right)$
C-AE-1	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R_2}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{x-s\cos\beta}{R_2}\right)$
C-AE-2	$\text{asin}\left(\frac{l_d}{2R_2}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{s\cos\beta+l_d-x}{R_2}\right)$

Abbildung 126: Gültigkeitsbereich des Kraftangriffswinkels

Werte für reale Hindernisse und dreiachsige Fahrzeuge sind nicht in Abb. 126 enthalten, da bei realen Hindernissen der Winkel α keine Verwendung findet und bei dreiachsigen Fahrzeugen die Gleichungen des 2-achsigen Fahrzeuges in leicht abgeänderter Form herangezogen werden können.

8.3 Literaturverzeichnis

- [1] Günter Hohl: Geländegängige Fahrzeuge, Vorlesungsskriptum TU Wien WS 2011/2012, erhältlich am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, mit Unterstützung des ÖVK
- [2] Mieczyslaw Gregory Bekker: Theory of Land Locomotion, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1962
- [3] U.S. Army Material Command: AUTOMOTIVE SUSPENSIONS: DESIGN HANDBOOK, AMCP 706-356, 1967, Elektronische ISBN: 978-1-62198-118-3
- [4] Sascha Prohaska: Überwindung von stufenförmigen Hindernissen im Gelände mit einem zweiachsigen Radfahrzeug, Diplomarbeit TU Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, 1996
- [5] G. Hohl, B. Peschak: A model to predict the overcoming of geometrically defined obstacles by a two-axle wheeled vehicle, Beitrag zur 13th International Conference of the ISTVS, München, 1999
- [6] Günter Hohl et al: Handbook of Road Vehicle Dynamics, CRC Press, 2013, ISBN: 9780849333224
- [7] Iakov Semenovich Ageikin: Off-the-road mobility of automobiles, Übersetzung: Oxonian Press Pvt. Ltd., New Delhi, Veröffentlichung: Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1987
- [8] A. S. Antonow et al: Militärkraftfahrzeuge – Band 1: Theorie der Räderfahrzeuge, Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1975
- [9] Mercedes / Puch G – Webseite: <http://www.w463.de/> - abgerufen am 10.10.2013

8.4 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: HINDERNIS TYP "A" [2].....	2
ABBILDUNG 2: HINDERNIS TYP "B" [2].....	3
ABBILDUNG 3: HINDERNIS TYP "C" [2].....	3
ABBILDUNG 4: REALE HINDERNISFORM	4
ABBILDUNG 5: FUNKTIONSGLEICHUNGEN FÜR EIN REALES HINDERNIS.....	5
ABBILDUNG 6: "A-A" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	8
ABBILDUNG 7: "A-B" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	11
ABBILDUNG 8: "A-A" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ).....	13
ABBILDUNG 9: "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ).....	15
ABBILDUNG 10: "B-B" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ).....	17
ABBILDUNG 11: "B-C" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	19
ABBILDUNG 12: "B-D" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	20
ABBILDUNG 13: "B-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	22
ABBILDUNG 14: "B-C" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	23
ABBILDUNG 15: "B-D" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	25
ABBILDUNG 16: "C-AD-1" MIT HINTERRAD- UND ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	27
ABBILDUNG 17: "C-AE-1" MIT HINTERRAD- UND ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	29
ABBILDUNG 18: "C-AD-2" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	31
ABBILDUNG 19: "C-AE-" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ).....	32
ABBILDUNG 20: "C-AD-2" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	34
ABBILDUNG 21: "C-AE-2" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ).....	35
ABBILDUNG 22: ZUSÄTZLICHE VARIABLEN FÜR REALES HINDERNIS	37
ABBILDUNG 23: REALES HINDERNIS - GEOMETRISCHE VERHÄLTNISSSE – BERÜHRPUNKT AUF F ₁ (X) LIEGEND	38
ABBILDUNG 24: REALES HINDERNIS - BERÜHRPUNKT AUF F ₂ (X) LIEGEND	41
ABBILDUNG 25: ÜBERGANG VON FALL 1 AUF FALL 2.....	42
ABBILDUNG 26: REALES HINDERNIS - "A-A" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	43
ABBILDUNG 27: REALES HINDERNIS - "A-B" MIT HINTERRADANTRIEB (ANSATZ)	45
ABBILDUNG 28: REALES HINDERNIS - "A-A" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	47
ABBILDUNG 29: REALES HINDERNIS - "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	49
ABBILDUNG 30: "A-A" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ FLEXIBLE RÄDER).....	53
ABBILDUNG 31: "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	54
ABBILDUNG 32: "B-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	56
ABBILDUNG 33: "B-C" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	57
ABBILDUNG 34: "B-D" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	59
ABBILDUNG 35: "C-AD-1" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	61
ABBILDUNG 36: "C-AE-1" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN).....	62
ABBILDUNG 37: "C-AD-2" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN)	64
ABBILDUNG 38: "C-AE-2" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ MIT FLEXIBLEN RÄDERN).....	65
ABBILDUNG 39: 3-ACHSIGES FAHRZEUG MIT SCHWERPUNKT VOR DER 2. ACHSE	68
ABBILDUNG 40: "A-A" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	68
ABBILDUNG 41: "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	70
ABBILDUNG 42: "B-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	72
ABBILDUNG 43: "B-C" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	73
ABBILDUNG 44: "B-D" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ TEIL 1).....	74
ABBILDUNG 45: "B-D" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ TEIL 2).....	76
ABBILDUNG 46: "B-D" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ TEIL 3).....	77
ABBILDUNG 47: "C-AD-1" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	78
ABBILDUNG 48: "C-AE" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ).....	79
ABBILDUNG 49: "C-AF" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ).....	80

ABBILDUNG 50: "C-AD-2" MIT ALLRADANTRIEB	80
ABBILDUNG 51: 3-ACHSIGES FAHRZEUG MIT SCHWERPUNKT HINTER DER 2. ACHSE.....	81
ABBILDUNG 52: "A-A" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ)	82
ABBILDUNG 53: "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ FÜR DIE 2. ACHSE)	83
ABBILDUNG 54: "A-B" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ FÜR 3. ACHSE).....	84
ABBILDUNG 55: "B-C" MIT ALLRADANTRIEB (ANSATZ FÜR 2.ACHSE)	86
ABBILDUNG 56: ABLAUSCHEMA MATLAB - PROGRAMM.....	88
ABBILDUNG 57: EINGABEMASKE "STEPMAS"	89
ABBILDUNG 58: PARAMETERAUSGABE FÜR DIE UNTERSUCHTE STELLE $X_{1INTEREST}$	90
ABBILDUNG 59: AUSWÄHLBARE FAHRZEUG - HINDERNISKOMBINATIONEN.....	90
ABBILDUNG 60: VARIABLENBEDARF FÜR STEPMAS	91
ABBILDUNG 61: WARNHINWEISE "EINGABEWERTE AUßERHALB DER DEFINITION"	91
ABBILDUNG 62: AUSWAHL EINER NICHT BERECHENBAREN FAHRZEUG-HINDERNIS- KOMBINATION	92
ABBILDUNG 63: MERCEDES G-MODELL DES ÖBH [1].....	93
ABBILDUNG 64: TECHNISCHE DATEN PUCH G 2-ACHSIG [4][9].....	94
ABBILDUNG 65: TECHNISCHE DATEN PUCH G 3-ACHSIG (FIKTIV) [4][9].....	94
ABBILDUNG 66: KONSTANTE FAHRZEUG- UND HINDERNISPARAMETER	96
ABBILDUNG 67: SKIZZE DES PLATEAUHINDERNISSES UND DER AUSGEGEBENEN GRÖÖEN	97
ABBILDUNG 68: REIBWERTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS	97
ABBILDUNG 69: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI REIBWERTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS	98
ABBILDUNG 70: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $\mu_A=0.2$	99
ABBILDUNG 71: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $\mu_A=0.4$	100
ABBILDUNG 72: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $\mu_A=0.6$	101
ABBILDUNG 73: GEGENÜBERSTELLUNG DER ÜBERTRAGBAREN UND BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION.....	102
ABBILDUNG 74: VARIATION DER HINDERNISHÖHE AM PLATEAUHINDERNIS	104
ABBILDUNG 75 AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI HINDERNISHÖHENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $H_W=0.08M$	105
ABBILDUNG 76: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI HINDERNISHÖHENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $H_W=0.08M$	106
ABBILDUNG 77: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI HINDERNISHÖHENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $H_W=0.16M$	107
ABBILDUNG 78: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI HINDERNISHÖHENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $H_W=0.16M$	108
ABBILDUNG 79: GEGENÜBERSTELLUNG DER ÜBERTRAGBAREN UND BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI HINDERNISHÖHENVARIATION.....	109
ABBILDUNG 80: VARIATION DER SCHWERPUNKTLAGE S_1 BEI PLATEAUHINDERNIS MIT ALLRADANTRIEB.....	110
ABBILDUNG 81: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI SCHWERPUNKTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=0.8M$	111
ABBILDUNG 82: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI SCHWERPUNKTLAGENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=0.8M$..	112
ABBILDUNG 83: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI SCHWERPUNKTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=1.0M$	113
ABBILDUNG 84: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI SCHWERPUNKTLAGENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=1.0M$...	114
ABBILDUNG 85: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI SCHWERPUNKTVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=1.2M$	115

ABBILDUNG 86: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI SCHWERPUNKTLAGENVARIATION AM PLATEAUHINDERNIS BEI $S_1=1.2M$...	116
ABBILDUNG 87: GEGENÜBERSTELLUNG DER BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI SCHWERPUNKTLAGENVARIATION	117
ABBILDUNG 88: AUSZUG DER BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI SCHWERPUNKTVARIATION.....	118
ABBILDUNG 89: SKIZZE DES PLATEAUHINDERNISSES BEI ÜBERQUERUNG DURCH EIN HINTERRADGETRIEBENES FAHRZEUG	119
ABBILDUNG 90: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI HINTERRADANTRIEB AM PLATEAUHINDERNIS	120
ABBILDUNG 91: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI HINTERRADANTRIEB AM PLATEAUHINDERNIS	121
ABBILDUNG 92: GEGENÜBERSTELLUNG VON ÜBERTRAGBAREN UND BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTEN BEI ALLRAD- UND HINTERRADANTRIEB.....	122
ABBILDUNG 93: SKIZZE DES PLATEAUHINDERNISSES BEI ÜBERQUERUNG DURCH EIN DREIACHSIGES FAHRZEUG	123
ABBILDUNG 94: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI DREIACHSIGEM FAHRZEUG AM PLATEAUHINDERNIS	124
ABBILDUNG 95: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEIM 3-ACHSIGEN FAHRZEUG AM PLATEAUHINDERNIS.....	125
ABBILDUNG 96: BENÖTIGTE ANTRIEBSKRAFT BEIM 2-ACHSIGEN UND 3-ACHSIGEN FAHRZEUG MIT ALLRADANTRIEB AM PLATEAUHINDERNIS.....	126
ABBILDUNG 97: SKIZZE DER PLATEAUHINDERNISÜBERQUERUNG DURCH EIN 2-ACHSIGES FAHRZEUG MIT ALLRADANTRIEB UND FLEXIBLEN RÄDERN	127
ABBILDUNG 98: FEDERKONSTANTENVARIATION DER FLEXIBLEN RÄDER AM PLATEAUHINDERNIS	127
ABBILDUNG 99: GEGENÜBERSTELLUNG DER BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI FLEXIBLEN RÄDERN AM PLATEAUHINDERNIS	128
ABBILDUNG 100: SKIZZE DER STUFENÜBERQUERUNG MIT EINEM ZWEIACHSIGEN FAHRZEUG.....	129
ABBILDUNG 101: REIBWERTVARIATION AM STUFENHINDERNIS	129
ABBILDUNG 102: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI REIBWERTVARIATION AM STUFENHINDERNIS	130
ABBILDUNG 103: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM STUFENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.2$	131
ABBILDUNG 104: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM STUFENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.4$	132
ABBILDUNG 105: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM STUFENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.6$	133
ABBILDUNG 106: GEGENÜBERSTELLUNG DER ÜBERTRAGBAREN UND BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEIM STUFENHINDERNIS	134
ABBILDUNG 107: SKIZZE DER GRABENÜBERSCHREITBARKEIT EINES ALLRADGETRIEBENEN, 2-ACHSIGEN FAHRZEUGS MIT STARREN RÄDERN	136
ABBILDUNG 108: REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS.....	136
ABBILDUNG 109: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEI REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS	137
ABBILDUNG 110: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.2$	138
ABBILDUNG 111: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.4$	139
ABBILDUNG 112: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS BEI $\mu_A=0.6$	140

ABBILDUNG 113: GEGENÜBERSTELLUNG DER ÜBERTRAGBAREN UND BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEI REIBWERTVARIATION AM GRABENHINDERNIS	141
ABBILDUNG 114: HINDERNISKONTURVERLAUF DER REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNISSE MIT $H_W=0.24M$	142
ABBILDUNG 115: VARIATION DER PARAMETER L_x UND K_1 DER REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNISSE	142
ABBILDUNG 116: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.1M$ UND $K_1=1000$	143
ABBILDUNG 117: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.1M$ UND $K_1=1000$	144
ABBILDUNG 118: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.3M$ UND $K_1=2$	145
ABBILDUNG 119: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.3M$ UND $K_1=2$	146
ABBILDUNG 120: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.6M$ UND $K_1=0.6$	147
ABBILDUNG 121: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=0.6M$ UND $K_1=0.6$	148
ABBILDUNG 122: AUFSTANDSKRÄFTE, NEIGUNGSWINKEL UND LAGEKOORDINATEN BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=1.0M$ UND $K_1=0.3$	149
ABBILDUNG 123: ÜBERTRAGBARE UND BENÖTIGTE ANTRIEBSKRÄFTE BEIM REALITÄTSNAHEN PLATEAUHINDERNIS MIT $L_x=1.0M$ UND $K_1=0.3$	150
ABBILDUNG 124: GEGENÜBERSTELLUNG DER BENÖTIGTEN ANTRIEBSKRÄFTE BEIM REALITÄTSNAHEN UND BEIM IDEALEN PLATEAUHINDERNIS.....	151
ABBILDUNG 125: VARIABLENÜBERSICHT.....	154
ABBILDUNG 126: GÜLTIGKEITSBEREICH DES KRAFTANGRIFFSWINKELS	155