

Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnkabinen

Schlussbericht

Auftraggeber: Hanspeter Oprecht
Bundesamt für Verkehr (BAV)
Mühlestrasse 6
3063 Ittigen


Verfasser: Markus Muser
Arne Keller
Linus Trummler

Email: muser@agu.ch
Tel.: +41 44 251 54 30

Seiten: 1-44

Version: 1.1

Datum: Zürich, 30.11.2022


	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

INHALT

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG	5
3	VORGEHEN	6
4	RISIKEN UND AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT	6
4.1	RISIKEN AUS SICHT DER PASSAGIERE / DER ROLLSTUHLFAHRENDEN.....	6
4.2	RISIKEN AUS TECHNISCHER SICHT: INSTABILITÄT DES ROLLSTUHL.....	6
4.3	AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT	8
5	LASTFÄLLE.....	9
5.1	PENDELN	9
5.2	QUASISTATISCHE AUSLENKUNG	10
5.3	ANPRALL AN HINDERNISSE.....	11
6	REIBUNG VON ROLLSTUHLREIFEN AUF TYPISCHEN BODENBELÄGEN	14
6.1	ZIEL DER MESSUNGEN	14
6.2	METHODIK	14
6.3	BODENBELÄGE	14
6.4	BERECHNUNG DES REIBUNGSKOEFFIZIENTEN	15
6.5	RESULTATE	16
6.6	SCHLUSSFOLGERUNGEN REIBUNGSMESSUNGEN	17
7	PENDELN BEI LUFTSEILBAHNEN: THEORIE, SIMULATIONEN, MESSUNGEN	18
7.1	THEORETISCHE BETRACHTUNGEN.....	18
7.2	NUMERISCHE BERECHNUNGEN.....	26
7.3	ERWEITERTES ROLLSTUHL-MODELL.....	29
7.4	BESCHLEUNIGUNGS-MESSUNGEN	30
7.5	SCHLUSSFOLGERUNGEN PENDELN	35
8	SCHLUSSFOLGERUNGEN	38
9	EMPFEHLUNGEN	40


VERSIONEN

2022-11-02	0.1	Entwurf
2022-11-30	1.0	Vis. ak und kus
2022-11-30	1.1	weitere kleine Anpassungen

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

REFERENZEN

- [1] Pflichtenheft zum Projekt "Untersuchung der sicheren Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnkabinen", BAV, 26.1.2022
- [2] BAV-Checkliste Pendelbahnen BehiG-Anforderungen
- [3] BAV-Checkliste Umlaufbahnen BehiG-Anforderungen
- [4] Rollstuhlstellplatz in Luftseilbahnen: Erläuternde Grundlagen zu BehiG-Checklisten, BAV, Version 1.6 / 10.12.2020
- [5] Untersuchung der Sicherheit von Rollstühlen in Eisenbahnfahrzeugen auf Strecken mit Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen, AGU, 30.12.2020
- [6] Vorbericht Reg. Nr. 2022010502, Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST, 11.1.2022
- [7] 742.161 Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV), 1.2.2015,
- [8] SN EN 12929-1:2015: Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für den Personenverkehr - Allgemeine Bestimmungen - Teil 1: Anforderungen an alle Anlagen
- [9] SN EN 12929-2:2015: Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für den Personenverkehr - Allgemeine Bestimmungen - Teil 2: Ergänzende Anforderungen an Zweiseil-Pendelbahnen ohne Tragsseilbremse
- [10] SN EN 13796-1:2017: Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für den Personenverkehr - Fahrzeuge - Teil 1: Befestigungen am Seil, Laufwerke, Fangbremsen, Kabinen, Sessel, Wagen, Instandhaltungsfahrzeuge, Schleppvorrichtungen
- [11] SN EN 13223:2015: Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für den Personenverkehr - Antriebe und weitere mechanische Einrichtungen
- [12] Persönliche Kommunikation, Hr. Sutter, Garaventa AG
- [13] Persönliche Kommunikation, Hr. Joss, Luftseilbahn Adliswil-Felsenegg AG
- [14] Persönliche Kommunikation, Hr. Wehrli, Säntisbahnen AG

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt		Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 4


1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Situationen untersucht, in denen ein in einer Luftseilbahnkabine befindlicher Rollstuhl mit darauf sitzender Person instabil werden könnte, also entweder nach vorne wegrutschen, sich zur Seite abdrehen oder nach hinten kippen könnte. Im Vordergrund standen Effekte, welche während des Pendelns der Kabine, z.B. durch Bremsvorgänge, auftreten. Wir haben die dabei auftretenden Beschleunigungen auf den Rollstuhl analytisch berechnet und durch numerische Simulationen erweitert. Validiert wurden diese theoretischen Betrachtungen durch Messungen, bei welchen wir einen Dummy auf einem Rollstuhl in den Kabinen zweier Luftseilbahnen positioniert haben. Die Bahnen wurden mehrmals an verschiedenen Positionen mit der Betriebsbremse aus der normalen Fahrgeschwindigkeit bis zum Stillstand abgebremst und die dabei auftretenden Beschleunigungen wurden gemessen. Weiter haben wir die Reibungskoeffizienten, welche bei üblichen Bodenbelägen zu erwarten sind, gemessen. Riffelbleche weisen, vor allem bei Nässe, einen geringen Reibungskoeffizienten von ca. 0.25 auf.

Einerseits konnten wir zeigen, dass die Überlegung, ein auf dem Boden einer pendelnden Luftseilbahnkabine befindliches Objekt (z.B. ein Tennisball) sei wegen des Pendelns grundsätzlich überhaupt keinen Beschleunigungen unterworfen, falsch ist. Andererseits zeigte sich, dass die im normalen Betrieb inklusive Nothalt mit der Sicherheitsbremse auftretenden Beschleunigungen relativ geringe Werte annehmen. Bei Annahme ungünstiger Rahmenbedingungen wie geringem Reibungskoeffizienten und hoher Bremsverzögerung nähern sich die berechneten Beschleunigungsspitzen den kritischen Werten an, indes ohne sie zu überschreiten. Ein entgegen der Fahrtrichtung mit den Hinterrädern gegen eine Wand positionierter Rollstuhl wird beim Pendeln abwechselnd gegen die Wand und zur Kabinenmitte hin beschleunigt, so dass sich aus diesen Überlegungen keine eindeutige "perfekte" Position ableiten lässt.

Als gravierender als die beim Pendeln auftretenden Belastungen erwiesen sich quasistatische Auslenkungen, welche durch Winddruck entstehen können. Winddruck kann im Prinzip aus allen Richtungen auftreten und der Rollstuhl wird im Extremfall jeweils auf die dem Wind zugewandte Seite rutschen. Im ungünstigsten Fall können solche Auslenkungen auch zu Kollisionen z.B. gegen Leitvorrichtungen an den Stützen führen. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse hätte eine Kollision gegen eine Leitvorrichtung aber einen geringeren Einfluss auf den Rollstuhl als die zuvor erfolgte quasistatische Auslenkung. Kabinen können z.B. durch Überlast am Boden streifen oder mit dort befindlichen Objekten kollidieren. Dabei entstehen Belastungen, welche immer in Fahrtrichtung wirken. Ein entgegen der Fahrtrichtung bündig an einer Wand positionierter Rollstuhl ist in diesen Situationen gut geschützt. Kollisionen gegen Leitvorrichtungen bei den Stationen erachten wir aufgrund der geringen Geschwindigkeitsänderungen als wenig relevant, auch hier ist aber ein derart positionierter Rollstuhl im Vorteil.

Die Auswertung der Ereignisdatenbank des BAV zeigte, dass Ereignisse, welche zu den oben erwähnten Belastungen führen könnten, recht selten sind. Schweizweit sind ca. 2 solcher Ereignisse pro Jahr dokumentiert, wobei die Anzahl etwas höher liegen könnte, weil nicht alle für uns interessanten Ereignisse gemeldet werden müssen.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

2 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Verbindlich für die Aufgabenstellung ist das Pflichtenheft [1]. Wir fassen die dort aufgeführten Punkte im Folgenden zusammen:

Im Geltungsbereich des BehiG liegen öffentliche Luftseilbahnen, welche mehr als 8 Plätze pro Einheit (z.B. pro Gondel) aufweisen. Es existieren Checklisten und Erläuterungen, welche die Platzierung von Rollstühlen in diesen Bahnen zum Thema haben ([2], [3], [4]) wobei es für die vorliegende Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt, ob es sich um Umlauf- oder Pendelbahnen handelt. Ab einer Kapazität von 11 Personen wurde in den Checklisten eine Platzierung entgegen der Fahrtrichtung, bündig an einer Anschlagfläche, festgelegt. Bei kleineren Kabinen wird davon ausgegangen, dass eine zu kleine Manövrierfläche vorhanden ist und deshalb nur eine Platzierung quer zur Fahrtrichtung erreichbar ist. Bei Kabinen mit einer Kapazität von 12 und mehr Personen werden de facto zwei Rollstuhlplätze vorhanden sein müssen. Es wurde nun von Seiten der Branche eingewandt, dass auf den Rollstuhl und die darauf sitzende Person durch ein Pendeln der Kabine keine Belastungen entstünden. Man könne z.B. einen Tennisball auf den Kabinenboden legen und dieser würde sich beim Pendeln nicht bewegen.


Allerdings könnten Belastungen nicht nur durch (freies) Pendeln, sondern auch durch Kollisionen mit Führungsvorrichtungen, namentlich bei der Einfahrt in die Stationen, entstehen.

Im vorliegenden Bericht soll also diskutiert werden, welche Belastungen a) beim Pendeln, b) beim Anstossen an Führungs-Vorrichtungen, und c) einer Kombination der oben genannten Belastungen mit einer Schräglage der Kabine z.B. durch Windeinfluss entstehen könnten. Die in [2] und [3] festgelegten Positionen der Rollstühle sollen überprüft werden. Dabei sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- die Rutschfestigkeit der üblichen verwendeten Bodenbeläge in Kabinen
- der Reibungskoeffizient von üblichen, in der Praxis verwendeten Rollstuhlreifen
- das Gefährdungspotenzial und die Auftretenswahrscheinlichkeit und -häufigkeit der diskutierten Lastfälle

Wir werden im Folgenden ebenfalls auf das oben erwähnte "Tennisball"-Argument eingehen, sowie weitere, im Pflichtenheft allenfalls nicht erwähnte Faktoren mit einbeziehen.

Gegebenenfalls sollen Anpassungsvorschläge für die Checklisten gemacht und begründet werden.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt		Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 6

3 Vorgehen

Wir haben das Projekt in die folgenden Arbeitsschritte unterteilt:

1. Vorabklärungen, Normen
2. Diskussion (intern) der Risiken und deren Auftretenswahrscheinlichkeit
3. Abklärungen bei Garaventa AG
4. Messungen (Reibungskoeffizient) bei CWA Olten
5. Berechnungen der beim Pendeln auftretenden Kräfte
6. Simulation der beim Pendeln auftretenden Kräfte
7. Simulation der durch die Pendel-Kräfte erzeugten Dummy-Belastungen
8. Versuche mit Dummy auf der Säntisbahn
9. Versuche mit Dummy auf der Felseneggbahn
10. Bericht, interne Diskussion, Empfehlungen

4 Risiken und Auftretenswahrscheinlichkeit


4.1 Risiken aus Sicht der Passagiere / der Rollstuhlfahrenden

Für Personen, welche in einer Luftseilbahn mitfahren, bestehen im Prinzip dieselben Risiken wie z.B. für Passagiere von anderen Transportmitteln des öffentlichen Verkehrs. Falls sich Stehpassagiere nicht oder nicht gut genug festhalten, können sie stürzen, wenn das Fahrzeug entsprechenden Beschleunigungen unterworfen wird. Rollstuhlfahrende Personen müssen sich an den vorgesehenen Plätzen / in der vorgesehenen Ausrichtung positionieren. Bei aussergewöhnlichen Ereignissen, z.B. einer Kollision eines Trams gegen ein festes Hindernis oder falls der Rollstuhl¹ nicht am vorgesehenen Platz positioniert ist, kann der Rollstuhl entweder nach hinten kippen, sich seitwärts abdrehen oder vorwärts rollen. Dadurch entstehen einerseits Verletzungsrisiken für die Rollstuhlfahrenden selber, wenn ein Anprall an Teile des Fahrzeuginnenraums stattfindet. Andererseits entsteht auch ein Verletzungsrisiko für stehende oder sitzende Passagiere, wenn der Rollstuhl mit den Passagieren kollidiert.

4.2 Risiken aus technischer Sicht: Instabilität des Rollstuhls

Ein frei stehender Rollstuhl (mit darauf sitzender Person) muss mit den Radbremsen gesichert werden, so dass er sich nicht bewegen kann solange keine Beschleunigungen in oder quer zur Fahrtrichtung auftreten, welche die entsprechenden Reibungskräfte übersteigen. Die Bedingungen, unter welchen sich der Rollstuhl nicht mehr auf seinem Platz halten kann, sind abhängig von der Einwirkungsrichtung der Beschleunigung. Gleiches gilt für den Bewegungsablauf bei Überschreiten der entsprechenden Grenzwerte. Wir haben diese Faktoren in [5] mittels Handrechnungen und Versuchen analysiert und folgende Resultate erhalten:

¹ im Folgenden ist normalerweise mit "Rollstuhl" das System Rollstuhl mit darauf sitzender Person gemeint.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Bei einer Verzögerung in Fahrtrichtung (also wenn der Rollstuhl in Fahrtrichtung z.B. eines Trams positioniert wird und das Fahrzeug bremst) ergibt sich eine Entlastung der Haupträder und eine zusätzliche Belastung der Vorderräder. Durch die Entlastung sinkt die Reibungskraft der Haupträder; da die Vorderräder nicht gebremst sind und dadurch den Effekt nicht kompensieren können, beginnt der Rollstuhl bereits bei einer relativ niedrigen Beschleunigung nach vorne zu rutschen.

Bei einer Verzögerung entgegen der Fahrtrichtung werden die Hinterräder zusätzlich belastet und dafür die Vorderräder entlastet. Je nach Reibungskoeffizient der Haupträder gegenüber dem Boden rutscht der Rollstuhl rückwärts oder er kippt nach hinten. Die Position entgegen der Fahrtrichtung, mit den Hinterrädern bündig gegen eine Rückhaltevorrichtung abgestützt, verhindert dies.

Bei Beschleunigungen quer zur Fahrtrichtung kann ein seitliches Abdrehen entstehen. Beschleunigungsbedingt wird dabei das Gewicht auf eines der Haupträder verlagert, wodurch die Stabilität nicht mehr gewährleistet ist.


Die Grenzwerte für die Beschleunigungen in diesen drei Lastfällen hängen vom Reibungskoeffizienten der Räder gegenüber dem Boden, vom Radstand, und auch stark von der Höhe des Schwerpunktes des Gesamtsystems Person - Rollstuhl ab. Wir konnten zeigen, dass unter diesen Umständen ein Handrollstuhl den ungünstigsten Fall darstellt. Falls bei einem gegebenen Beschleunigungsverlauf ein Handrollstuhl stabil bleibt, werden alle anderen Bauformen (Elektro-Rollstuhl mit 4 kleinen Rädern, elektrifizierter Handrollstuhl etc.) ebenfalls stabil bleiben. Wie bereits in [5] konzentrieren wir uns daher im Folgenden auf Handrollstühle.

Bei einem Handrollstuhl mit durchschnittlichen Abmessungen, besetzt mit einem Insassenmodell, welches einem 50-perzentil männlichen Dummy entspricht, und bei einem Reibungskoeffizienten von 0.4 ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten kritischen Beschleunigungswerte.

Tabelle 1: kritische Beschleunigungen für verschiedene Lastfälle

Bewegung bei Instabilität	typisch (m/s^2), $\mu = 0.4$	Extremfall (m/s^2), $\mu = 0.25$
Rutschen vorwärts	1.4	1.0
Kippen rückwärts	2.5	2.5
Rutschen rückwärts	6.5	2.4
Wegdrehen seitlich	2.0	1.5
Rutschen seitlich	2.3	1.4

Weil die Werte in Tabelle 1 bei einem Reibungskoeffizienten von 0.4 für Rutschen rückwärts höher sind als für Kippen, und für Rutschen seitlich höher als für Wegdrehen seitlich, wird sich bei Überschreiten der kritischen Beschleunigung ein Kippen bzw. ein Wegdrehen ergeben. Nimmt man einen sehr tiefen Reibungskoeffizienten an (Extremwert aus Tabelle 10), ändert sich das Bild, und der Rollstuhl wird in allen Lastfällen eher Rutschen als zu kippen oder sich wegzudrehen.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

4.3 Auftretenswahrscheinlichkeit

Ereignisse, bei welchen Reisende verletzt oder gar getötet werden, sind bei Luftseilbahnen generell sehr selten. Solche Ereignisse sind unter gewissen Bedingungen meldepflichtig. Die Meldepflicht und die Kriterien hierzu sind in [7] geregelt. Ereignisse, bei denen (vereinfacht formuliert) Personen schwer verletzt werden und / oder ein hoher Sachschaden entstand müssen der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) gemeldet werden. Die SUST kann die Ereignisse untersuchen und einen Bericht dazu erstellen, wobei die Berichte nicht auf juristische Fragen eingehen, sondern ausschliesslich auf die Prävention ausgerichtet sind, in dem u.A. Sicherheitsempfehlungen ausgesprochen werden. Seit 2002 hat die SUST insgesamt 28 Berichte oder Vorberichte veröffentlicht, welche Seilbahnen (also inklusive Standseilbahnen, Sessellifte, Umlaufbahnen mit weniger als 12 Plätzen / Kabine) betreffen. Zwei dieser Berichte sind für uns interessant:

1. Am 26.2.2020 ereignete sich bei einer Luftseilbahn eine Kollision der Kabine mit dem an einer Stütze angebrachten Kabinenabstreifer. Durch einen extremen Windstoss wurde die Kabine so weit ausgelenkt, dass die vordere untere Ecke der Kabine über den Abstreifer geriet und einige Meter in starker Schräglage über den Abstreifer rutschte. Nach Passieren der Stütze pendelte die Kabine in einer Gegenbewegung nach vorne und touchierte dabei das Tragseil. Es befand sich lediglich ein Begleiter in der Kabine, welcher stürzte, aber unverletzt blieb.
2. Am 5.1.2022 kam es bei einer Luftseilbahn zu einer Berührung bzw. Kollision der Unterlast-Barelle zuerst mit einigen Baumwipfeln und danach mit dem Boden. Dabei wurde eine mitreisende Person leicht verletzt. Der Schlussbericht für dieses Ereignis liegt noch nicht vor. Wir vermuten, dass die Kabine beim Streifen der Unterlast auf dem Boden stark nach vorne geneigt wurde, wodurch das Risiko bestand, dass Reisende stürzen und sich dabei verletzen.

Die übrigen Berichte betreffen entweder Bahnen, welche nicht in die hier interessierende Kategorie fallen, und / oder es handelt sich um Ereignisarten (z.B. Arbeitsunfälle beim Unterhalt, Absturz von Kabinen) welche keine Relevanz bezüglich des Transports von Rollstühlen haben.

Das BAV führt eine Datenbank, in welcher ebenfalls meldepflichtige Ereignisse registriert sind. Die Kriterien für die Meldepflicht sind hier im Vergleich zur SUST tiefer angesetzt: meldepflichtig (vereinfacht) sind hier auch Ereignisse, welche zu leichten Verletzungen oder niedrigerem Sachschaden führten.

Wir haben einen Auszug aus dieser Datenbank untersucht, in welchem alle Ereignisse, welche Seilbahnen betreffen, wiedergegeben sind. Das Ereignisdatum liegt zwischen dem 19.1.2000 und dem 7.9.2022. Es sind insgesamt 204 Ereignisse verzeichnet. Insgesamt wurden 37 Personen verletzt oder getötet, davon waren 13 Reisende (die übrigen Personen waren Mitarbeiter oder Dritte). Bei den 12 Ereignissen, bei welchen Reisende verletzt wurden, trat in 6 Fällen ein starkes Pendeln oder eine starke Auslenkung der Kabine auf. Bei den insgesamt 21 Ereignissen, bei welchen andere Personen verletzt wurden, traf dies lediglich für ein Ereignis zu. In der Datenbank finden sich keine Ereignisse, bei welche Rollstuhlfahrende beteiligt waren.

Von insgesamt 171 Ereignissen, bei denen niemand verletzt wurde, verursachten 40 Belastungen, welche einen Einfluss auf die Stabilität eines in der Kabine befindlichen Rollstuhls haben könnten. Bei 11 dieser Ereignisse war der Windeinfluss massgeblich beteiligt. Bei 14 dieser Ereignisse ergaben sich Kollisionen entweder mit Stützen oder mit anderen Objekten. Die Fangbremse wurde in 10 Fällen ausgelöst.

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Fallzahlen pro Jahr (=oben erwähnte Fallzahlen / 22.75). Selbstverständlich sind diese Zahlen zu klein, um statistisch relevante Aussagen zu machen. Dennoch erlauben sie eine Abwägung der einzelnen Belastungs- oder Risikoarten gegeneinander.

Ein Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln, z.B. Tram oder Eisenbahn, gestaltet sich nun sehr schwierig und würde umfangreichere Nachforschungen bedingen.

Tabelle 2: Fälle pro Jahr mit relevanten Belastungsarten, aus Ereignisdatenbank des BAV

Belastung	Fälle / Jahr
Verletzung von Reisenden innerhalb der Kabine	0.26
Belastungen mit Risiko für Rollstuhlfahrende, alle Ursachen, ohne Verletzte	1.76
Belastungen mit Risiko für Rollstuhlfahrende wegen starkem Wind, ohne Verletzte	0.48
Auslösung der Fangbremse	0.44

5 Lastfälle

5.1 Pendeln

Die hier zu betrachtenden Luftseilbahnen sind im Normalfall über ein Gelenk mit dem Gehänge verbunden. Das Gehänge läuft mit Rollen (Laufwerk) auf dem Tragseil und das Gelenk erlaubt ein Pendeln der Kabine in / entgegen der Fahrtrichtung. In Querrichtung erlaubt das Gelenk keine Bewegung, die Kabine kann jedoch auch in Querrichtung pendeln, indem sich das Gehänge um das Tragseil dreht. Damit die einmal angeregte Kabine nicht unendlich weiter pendelt, wird die Bewegung mit einem Dämpfer reduziert. Der Dämpfer kann geschwindigkeitsabhängig oder lediglich reibungsbasiert ausgeführt sein.

Jede Geschwindigkeitsänderung der Seilbahn erzeugt ein Pendeln. Wenn die Kabine beispielsweise eine Stütze überfährt, erfährt sie eine Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung, weil die Steigung des Tragseils vor und nach der Stütze unterschiedlich gross ist. Gleichzeitig entsteht auch eine entsprechende Geschwindigkeitsänderung in vertikaler Richtung.

Weitere Einflüsse, welche die Kabine zum Pendeln anregen können, sind Bremsvorgänge mit der Betriebsbremse, der Sicherheitsbremse oder im Extremfall der Seilbremse (Fangbremse). Die Kabine kann ausserdem in Längs- sowie Querrichtung unter dem Einfluss von Windstössen pendeln (s. auch 5.2).

Laut [8] müssen Luftseilbahnen über mindestens zwei unabhängige Bremssysteme verfügen. Zweiseil-Pendelbahnen müssen überdies mit einer Fangbremse ausgestattet sein. Die Bremsverzögerungen dürfen keine Gefahr für Personen darstellen (sie sind also gegen oben begrenzt). Die Fangbremsen bilden eine

Ausnahme, hier dürfen die Bremsverzögerungen ein "Restrisiko" beinhalten. Für Fangbremsen bestehen keine direkten Anforderungen an die zu erreichende Bremsverzögerung. In verschiedenen, meist relativ alten Publikationen ist der in Tabelle 3 aufgeführte "Idealwert" von 1.5 m/s^2 , mithin tiefer als die maximal zulässige Verzögerung der Sicherheitsbremse, zu finden.

Tabelle 3: zu erwartende Beschleunigungen in Seilrichtung, cf. [8],[11]

Bremssystem	Minimalwert (m/s^2)	Maximalwert (m/s^2)
Betriebsbremse (Nothalt)	0.5	1.25
Sicherheitsbremse (Nothalt)	0.5	2.0
Fangbremse	1.5	1.5

Die Seilrichtung auf das Laufwerk wirkenden Beschleunigungen sind nicht gleich gross wie die parallel zum Kabinenboden wirkenden Beschleunigungen, sondern Letztere sind im Allgemeinen deutlich niedriger, weil die Seilbahn pendelt. Auf diese Beziehungen gehen wir in Kapitel 7 näher ein.

5.2 Quasistatische Auslenkung

Durch starken Wind kann die Kabine aus ihrer Ruhelage ausgelenkt werden. Falls der Wind kontinuierlich einwirkt, entsteht dabei eine quasistatische² Schräglage der Kabine, ohne dass die Kabine pendelt. Auch wenn der Wind nicht kontinuierlich einwirkt, und die Kabine dadurch zu pendeln beginnt, entstehen zusätzlich zu den in Kap. 7 ausführlich diskutierten Effekten Kräfte, welche entgegen der Windrichtung wirken.

Weiter kann eine Schräglage ohne Pendeln entstehen, wenn die in Fahrt befindliche Kabine den Boden touchiert. Nach [6] war dies beispielsweise beim Unfall vom 5.1.2022 der Fall, als die Kabine offenbar zunächst einige Baumwipfel und danach den Boden streifte.


Laut [8] müssen Luftseilbahnkabinen sowohl in Längs- wie auch in Querrichtung um bestimmte Winkel ausgelenkt werden können. Die festgelegten Werte hängen u.A. von der Maximalgeschwindigkeit, dem Vorhandensein von Abweisern, der Beförderungsart sitzend oder stehend, dem Vorhandensein einer Begleitung ab.

Tabelle 4: Anforderungen Quer- und Längspendeln, cf. [8]

Richtung	Minimalwert (rad)	Maximalwert (rad)
Quer	0.12	0.34
Längs	0.15 (in Stationen)	0.34

Bei quasistatischer Auslenkung entsteht eine Kraft auf den Rollstuhl, die vergleichbar ist mit einer Hangabtriebskraft wie in [5] ausführlich diskutiert. Die dazu gehörende Beschleunigung entspricht

² Mit „quasistatisch“ ist hier gemeint, dass die Kräfte über vergleichsweise längere Zeit (einige Sekunden) einwirken, ohne dass sie durch Pendel-Effekte teilweise kompensiert werden.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

$g \cdot \sin(\alpha)$, wobei g =Erdbeschleunigung= 9.81 m/s^2 und α der Auslenkungswinkel aus der Horizontalen ist. Durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 4 erhalten wir:

Tabelle 5: Längs- und Querschleunigungen bei quasistatischer Auslenkung

Richtung	Minimalwert (m/s^2)	Maximalwert (m/s^2)
Quer	1.2	3.3
Längs	1.5 (in Stationen)	3.3

Der Maximalwert von 3.3 m/s^2 würde in jedem Fall zu einem Kippen / Abdrehen / Rutschen des Rollstuhls führen. Allerdings sind diese Werte in der Norm ([8]) festgelegt, um katastrophale Ereignisse wie eine Kollision der Kabine mit der Stütze oder eine Seilentgleisung zu verhindern; ein Zusammenhang mit den hier zu diskutierenden Ereignissen ist nicht direkt abzuleiten.

5.3 Anprall an Hindernisse

Falls die Luftseilbahn in Bewegung z.B. durch Windeinfluss in Schräglage gerät, kann beim Passieren einer Stütze eine Kollision mit Leitvorrichtungen ("Abweiser") auftreten. Die dabei auftretenden Beschleunigungen werden den bereits bestehenden quasistatischen Beschleunigungen überlagert. Laut Norm ([8]) muss dabei mit folgenden Geschwindigkeiten gerechnet werden:


Tabelle 6: Zu erwartende Anprallgeschwindigkeiten

Anprall gegen feste Hindernisse bei stehender Beförderung	1.5 m/s
Anprall gegen feste Hindernisse bei sitzender Beförderung	2.5 m/s
Anprall gegen Streckenbauwerke (z.B. Seilschuhe)	3.5 m/s
Anprall gegen Seile	5.0 m/s

Es sind auch Ereignisse dokumentiert, bei welchen die Kabine mit Objekten wie z.B. Pistenfahrzeugen kollidierte, welche ins Lichtprofil der Seilbahn geraten waren. Im ungünstigsten Fall können solche Kollisionen mit der maximalen Geschwindigkeit der Kabine erfolgen, und die Kabine kann nach der Kollision weiter pendeln.

Wiederum handelt es sich bei den Anforderungen in der Norm um Belastungen, welche gravierende Schäden verursachen könnten. Immerhin wird aber hier (bei Umlaufbahnen) zwischen stehender und sitzender Beförderung unterschieden.

Schliesslich kommt es beim Einfahren in eine Station praktisch immer zu einem sehr leichten Anstossen der Kabine an die Leitvorrichtungen, weil der Ein- und Aussteigebereich nur wenig breiter ist als die Kabine. In unmittelbarer Nähe der Stationen wird deshalb sehr langsam (nach Angaben [13], [14], ca. 0.5 m/s) gefahren.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 12	

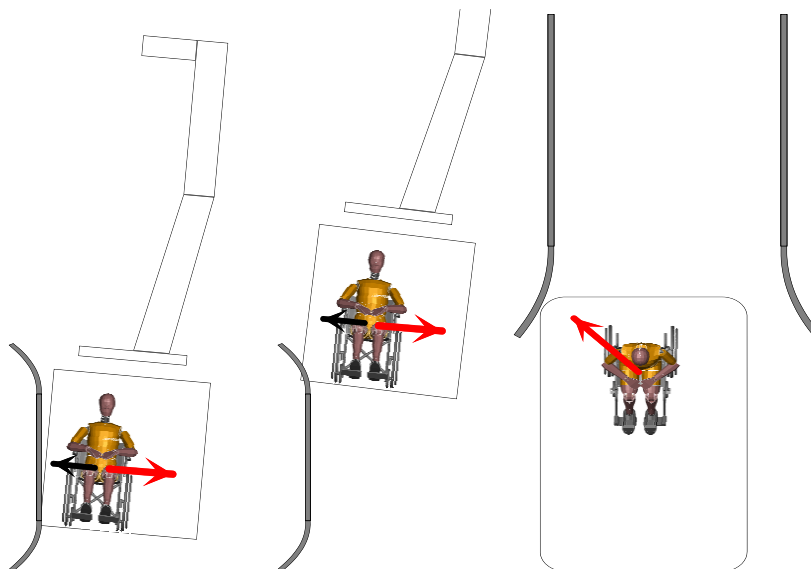


Bild 1: Kollisionen mit Abweisern bzw. Leitvorrichtungen: links: Kollision mit einem Abweiser im Bereich der Stütze, Mitte: unmittelbar vor der Stütze („Einfangen“), rechts: bei der Einfahrt in eine Station. Rote Pfeile: Haupt-Krafteinwirkungen auf den Rollstuhl, schwarze Pfeile links und Mitte: kurzzeitige Krafteinwirkungen durch die Kollision.

Kollisionen gegen Leitvorrichtungen sind in Bild 1 schematisch dargestellt. Links und in der Mitte von Bild 1 sind die Beschleunigungen dargestellt, welche bei einer Kollision gegen einen Abweiser bei einer Stütze auftreten. Da die Kabine bereits vor der Kollision stark seitlich ausgelenkt sein muss, um überhaupt mit der Vorrichtung zu kollidieren, überwiegen die Effekte dieser Auslenkung diejenigen der Kollision. Anders ausgedrückt, bis der Rollstuhl durch die Kollision in Richtung Stütze bewegt würde (schwarze Pfeile), wäre er schon lange durch die Schräglage in die Gegenrichtung in Bewegung geraten (rote Pfeile). Auch wenn die durch die Kollision bewirkten Kräfte grösser sind als die Hangabtriebskräfte, so wirken sie doch nur sehr kurzzeitig, während dem die Hangabtriebskräfte länger, z.B. für die Dauer des Windstosses, wirken.

In Bild 2 sind die Kräfte, welche z.B. bei einer Kollision der Kabine mit einem Hindernis oder einem Streifen der Kabine am Boden entstehen, schematisch dargestellt. Bei solchen Ereignissen schätzen wir, ähnlich wie bei den Kollisionen gegen Leitvorrichtungen, die quasistatischen Kräfte die durch die Schräglage entstehen als bedeutsamer ein als die durch die Kollision initial entstehenden Beschleunigungsspitzen. In dieser Situation ist aber, anders als z.B. unter Windeinfluss, immer klar, in welche Richtung die Kräfte wirken, nämlich in Fahrtrichtung.

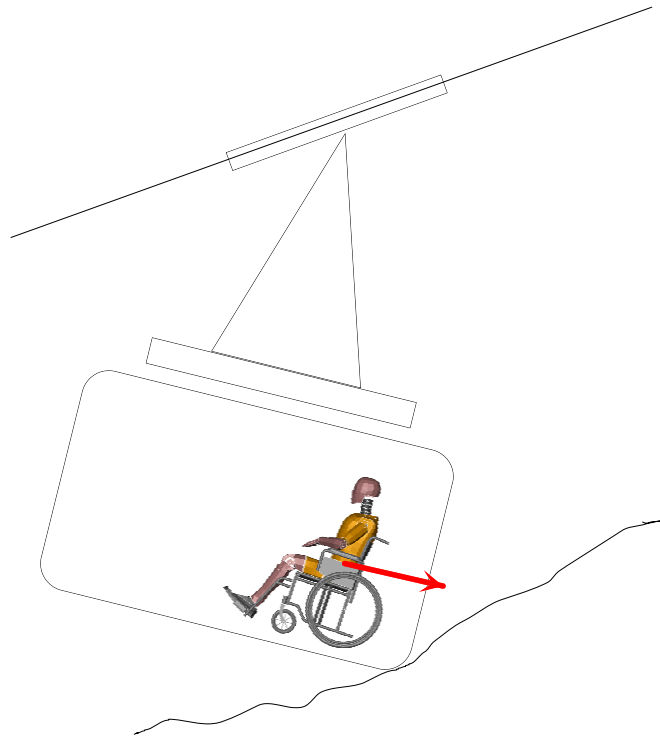


Bild 2: Wenn die Kabine am Boden streift oder gegen ein Hindernis prallt, kann sie quasistatisch oder auch, je nach Topografie, nur kurzzeitig ausgelenkt werden. In jedem Fall wirken die dabei entstehenden Kräfte immer in Fahrtrichtung (roter Pfeil).

Für die in Bild 2 dargestellte Situation entspricht die Kraft, welche vom Rollstuhl auf die bergseitige Kabinnenwand wirkt, den in Tabelle 5 aufgeführten Beschleunigungen multipliziert mit der Masse des Rollstuhls plus darauf sitzender Person. Bei einer Gesamtmasse von 100 kg ergeben sich somit Werte zwischen 120 – 330 N, wobei hier einerseits von den maximal anzunehmenden Auslenkungswinkeln ausgegangen wird und andererseits der Anteil der verbleibenden Reibung der Räder auf dem Boden nicht berücksichtigt wird. Tatsächlich würden die Kräfte in diesem Beispiel dadurch deutlich tiefer ausfallen.

AGU ZÜRICH	Titel:	Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen	Datum:	2022-11-30		
	Autoren:	mhm, ak, lt	Vis.:	kus	Anzahl Seiten:	44 Seite: 14

6 Reibung von Rollstuhlreifen auf typischen Bodenbelägen

6.1 Ziel der Messungen

Die Gleitreibungskraft und der daraus resultierende Reibungskoeffizient von Rollstühlen wurden auf Bodenbelägen, die üblicherweise in Luftseilbahnkabinen verbaut sind, gemessen. Der Reibungskoeffizient geht in die Berechnungen der kritischen Beschleunigungen ein (Tabelle 1).

6.2 Methodik

Die Versuche wurden am 20.06.2022 beim Seilbahnkabinenhersteller CWA in Olten durchgeführt. Der verwendete Rollstuhl mit 46 cm Sitzbreite wurde bereits in früheren Untersuchungen verwendet [1]. Das Modell mit einem Gewicht von 17.2 kg stellt einen „Standard-“ oder „Transport-“ Rollstuhl dar (Bild 3). Der Rollstuhl ist mit einem Vollreifen ausgestattet, der aus einem Silikon-artigen Material besteht und erfahrungsgemäss niedrigere Reibwerte erzeugt als beispielsweise Velopneus.



Bild 3: Das verwendete Rollstuhl-Modell.

6.3 Bodenbeläge

Der Reibungskoeffizient wurde auf drei verschiedenen Bodenbelägen gemessen, die in jeweils drei verschiedenen Luftseilbahnkabinen verbaut waren. Die Art der Kabine ist vernachlässigbar, da überall genügend Platz für die Durchführung der Versuche vorhanden war. Es wurden ein eher rauher und ein eher glatter Bodenbelag getestet (Stronghold™ 30 / Walkway™ 20). Beide Bodenbeläge werden von Altro Safety Flooring (UK) hergestellt. Als dritter Bodenbelag wurde ein Riffelblech gewählt. Die verschiedenen Bodenbeläge sind in Bild 4 dargestellt. Normalerweise wurde jeder Versuch zwei Mal durchgeführt. Bei einigen Versuchen wurde nach dem ersten Test abgebrochen, da sich der Reifen von der Felge löste (siehe Anhang). Jeder Versuch wurde auf trockenem und nassem Bodenbelag durchgeführt.



Bild 4: links: eher rauher Bodenbelag (Alto Stronghold™ 30), Mitte: eher glatter Bodenbelag (Alto Walkway™ 20, rechts: Riffelblech.

Der Reibungskoeffizient wurde bei Zug vorwärts und bei Zug seitlich gemessen (Bild 5). Bei den seitlichen Zugversuchen stand der Rollstuhl sowohl auf allen vier Rädern als auch gekippt nur auf den beiden Hinterrädern. Das Zugseil wurde beim Vorwärtsziehen an den Armlehnen und beim Seitwärtsziehen auf Höhe der Hinterradachse befestigt.



Bild 5: links: Befestigung des Zugseils für Zug vorwärts, rechts: Befestigung des Zugseils für Zug seitwärts.

Die aufgewendete Kraft, um den Rollstuhl vorwärts oder seitlich zu verschieben wurde mit folgendem Messaufbau erfasst:

- FH-2k digitales Kraftmessgerät mit externer Messzelle, Sauter GmbH D-Ballingen
- RS-232 Verbindung
- Software AFH-FAST/FD V.1.0.9.3, Sauter GmbH D-Ballingen
- Rollstuhl wie oben beschrieben, besetzt mit einer Versuchsperson (Gewicht 76.7 kg)

6.4 Berechnung des Reibungskoeffizienten

Der Gleitreibungskoeffizient beim seitlichen Ziehen wird mit folgender Formel berechnet:

$$\mu_{GR} = \frac{F_{GR}}{F_N}$$

wobei: F_{GR} = Gleitreibungskraft, μ_{GR} = Gleitreibungskoeffizient, und F_N = Normalkraft ($m \cdot g$)

AGU ZÜRICH	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 16	

Beim Vorwärtsziehen wird die Normalkraft auf alle vier Räder verteilt. Für die Gleitreibung der Hinterräder ist nur die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kraft auf diese Räder relevant. Diese Kraft kann aus der Schwerpunktlage und dem Radstand bestimmt werden zu:

$$F_{N2} = \frac{xcg + lf}{wb} mg - \frac{h * F_{GR}}{wb}$$

wobei: xcg = Distanz zwischen Schwerpunkt und Hinterachse, wb = Radstand, lf = Radius des nachlaufenden Vorderrads, und h = Schwerpunktshöhe.

Der Gleitreibungskoeffizient entspricht in diesem Fall:

$$\mu_{GR} = \frac{F_{GR}}{F_{N2}}$$


6.5 Resultate

Es wurden insgesamt 38 Versuche durchgeführt und pro Versuch die Gleitreibungskraft und der Reibungskoeffizient berechnet. Von beiden Parametern wurde der Median und die Standardabweichung während der Verschiebung berechnet. Alle Resultate sind im Detail dem Anhang zu entnehmen.

Grundsätzlich muss mehr Kraft aufgewendet werden, um den Rollstuhl seitlich zu verschieben. In gekippter Konfiguration erhöht sich diese Kraft nochmals beträchtlich. Beim Seitwärts- und Vorwärtsziehen sind keine grossen Unterschiede zwischen den Bodenbelägen erkennbar. Einzig beim trockenen Riffelblech fällt die Gleitreibungskraft beim Vorwärtsziehen tiefer aus. Auf nassem Bodenbelag fällt hingegen der Altro Walkway™ 20 und das Riffelblech deutlich ab. Die tiefsten gemessenen Gleitreibungskräfte lagen in einem Bereich von 120 -130 N, die höchsten Kräfte in einem Bereich von 450 – 500 N. Ab dieser Gleitreibungskraft übersteigt die Reibung zwischen Reifen und Bodenbelag die Haftung zwischen Reifen und Felge, was zu einem Ablösen des Reifens von der Felge führte (Bild 6). Solch hohe Gleitreibungskräfte entstanden ausschliesslich bei seitlichem Zug auf die Hinterräder.



Bild 6: Beim seitlichen Zugversuch löste sich der Reifen bisweilen von der Felge.


	Titel:	Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum:	2022-11-30	
	Autoren:	mhm, ak, lt	Vis.:	kus	Anzahl Seiten:	44 Seite: 17

6.6 Schlussfolgerungen Reibungsmessungen

Die Zugversuche lieferten Aufschlüsse über die Gleitreibungskraft und den Reibungskoeffizienten von einem durchschnittlichen Rollstuhl auf in Luftseilbahnkabinen verwendeten Bodenbelägen. Die Messdaten zeigten eine akzeptable Wiederholbarkeit. Geringe Schwankungen in den Messergebnissen werden auf die leicht variierende Zugkraft und –Richtung zurückgeführt.

Über alle Versuche wurden Reibungskoeffizienten in einer Spanne von minimal 0.23 bis maximal 0.55 gemessen. Der Einfluss der Art des Bodenbelags und der Position bzw. Zugrichtung konnte klar gezeigt werden. Ebenso wurden erwartungsgemäss niedrigere Reibwerte bei nassem Belag gemessen, wobei der Effekt vor allem beim (eher) glatten Belag (Altro Walkway™ 20) und beim Riffelblech erkennbar war. Der raue Bodenbelag (Altro Stronghold™ 30) liefert praktisch gleiche Werte bei Nässe wie im trockenen Zustand.

Ab einem Reibungskoeffizienten von ca. 0.5 kann sich der Rollstuhl auf allen Bodenbelägen nicht mehr weiter verschieben, weil sich der Reifen von der Felge löst. Solch hohe Werte wurden jedoch nur bei seitlichen Versuchen gemessen. Beim Vorwärtsziehen finden sich tiefere Reibungskoeffizienten (< 0.3) nur auf dem nassen, glatten Bodenbelag und auf dem Riffelblech. Über die Hälfte der gemessenen Reibungskoeffizienten liegen in einem Bereich von ca. 0.35 - 0.45.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

7 Pendeln bei Luftseilbahnen: Theorie, Simulationen, Messungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die Beschleunigungen ermittelt, die im lokalen beschleunigten Bezugssystem des Seilbahnkabinen-Bodens während des normalen Seilbahn-Betriebs herrschen. Diese Beschleunigungen können in einigen vereinfachten Fällen analytisch ausgerechnet werden (Abschnitt 7.1); wo das nicht mehr möglich ist, ist man auf numerische Simulationen angewiesen (Abschnitt 7.2). Zudem wurden an zwei Seilbahnen Beschleunigungs-Messungen durchgeführt (Abschnitt 7.4). Die Ergebnisse der drei Herangehensweisen werden im Abschnitt 7.5 zusammengefasst, verglichen und eingeordnet.

7.1 Theoretische Betrachtungen

7.1.1 Einleitung

Wir betrachten die Kräfte und Beschleunigungen, die in einem gegebenen Punkt auf einem Starrkörper B wirken, welcher eine Translationsbewegung und eine Rotation vollführt. Dazu berechnen wir erst die Zwangskräfte, welche in dem mit dem Starrkörper mitbewegten Koordinatensystem wirken, um dann die Bewegung des an einem Punkt geführten Starrkörpers selbst zu berechnen.

7.1.2 Zwangskräfte im beschleunigten Bezugssystem

Sei Σ_a ein im Körper B körperfestes Koordinatensystem, dessen Ursprung, gesehen in einem Inertialsystem Σ_i , entlang einer gegebenen zeitabhängigen Trajektorie $R_0(t)$ bewegt wird und dessen Orientierung gegenüber Σ_i durch eine zeitabhängige Rotationsmatrix aus der speziell-orthogonalen Gruppe in drei Dimensionen $\Omega(t) \in SO(3)$ gegeben ist. Es seien $r_0(t)$ die Koordinaten eines Punktes auf dem Starrkörper in Σ_a (die Zeitabhängigkeit bezieht sich dabei auf eine mögliche Bewegung des Punktes relativ zum Starrkörper), an welchem wir die wirkenden Beschleunigungen und (Schein)Kräfte berechnen wollen. Die Koordinaten dieses Punktes im Inertialsystem seien $R(t)$, während $r(t)$ der Verbindungsvektor vom Ursprung von Σ_a zu diesem Punkt ist, also

$$R(t) = R_0(t) + r(t) = R_0(t) + \Omega(t)r_0(t).$$


Für einen Massenpunkt mit Masse m gilt im Inertialsystem gilt die Bewegungsgleichung

$$m\ddot{R}(t) = F(t),$$

wo F sowohl Kontakt- als auch Wechselwirkungskräfte enthält. Die Beziehungen der Ortsvektoren kann genutzt werden, um die Bewegungsgleichung in das rotierende System umzurechnen:

$$\frac{1}{m}F(t) = \ddot{R}(t) = \ddot{R}_0(t) + \dot{\Omega}(t)r_0(t) + \Omega(t)\ddot{r}_0(t) + 2\dot{\Omega}(t)\dot{r}_0(t),$$

wofür die zweite Ableitung der Rotationsmatrix erforderlich ist. Betrachten wir den einfachen Fall einer Rotation um eine konstante Achse (nehmen wir an, diese sei die y -Achse; für andere Achsen gilt analog dasselbe) mit einem geeigneten Rotationswinkel $\phi(t)$ kann die Rotationsmatrix geschrieben werden

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 19	

$$\Omega = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix}.$$

Der Einfachheit halber kann diese Matrix auch als Matrix-Exponentialfunktion geschrieben werden, $\Omega = \exp(G\phi)$, mit dem antisymmetrischen Generator

$$G = \left. \frac{\partial \Omega}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

womit die Ableitungen die Form annehmen

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} &= \dot{\phi} G \Omega, \\ \ddot{\Omega} &= \ddot{\phi} G \Omega + (\dot{\phi})^2 G^2 \Omega. \end{aligned}$$

Wenn wir die Bewegungsgleichung noch mit der inversen Rotation $\Omega^{-1} = \Omega^T$ in das rotierende System transformieren, kann diese also geschrieben werden

$$\frac{1}{m} \Omega^T(t) F(t) = \ddot{r}_0(t) + \Omega^T(t) \ddot{R}_0(t) + \ddot{\phi}(t) G r_0(t) + 2\dot{\phi}(t) G \dot{r}_0(t) + (\dot{\phi})^2(t) G^2 r_0(t).$$


Es tauchen also, neben der Kraft gesehen aus dem rotierenden System $\Omega^T(t)F(t)$ und der Beschleunigung \ddot{r}_0 bezüglich des rotierenden Systems, die bekannten «Scheinkräfte» des beschleunigten Bezugssystems auf. Diese sind, als Beschleunigungen ausgedrückt, in der Reihenfolge der obigen Gleichung: Beschleunigung des Ursprungs, Euler-Beschleunigung, Coriolis-Beschleunigung und Zentripetal-Beschleunigung. Ist die zeitliche Entwicklung des Rotationswinkels ϕ bekannt, ist durch diese Gleichung die Bewegungsgleichung eines Massenpunktes an jedem Ort auf dem Starrkörper gegeben.

7.1.3 Bewegung des an einem Punkt geführten Starrkörpers

Nehmen wir an, der Starrkörper B vollführe eine Bewegung, bei welcher ein Aufpunkt auf B sich bezüglich des Inertialsystems entlang einer vorgegebenen Trajektorie $R_0(t)$ in der x-z-Ebene bewegt und der Körper sich dabei um die y-Achse frei um den Punkt $R_0(t)$ drehen kann. Wir wählen das körperfeste Koordinatensystem Σ_a wieder so, dass der Koordinaten-Ursprung im Punkt $R_0(t)$ liegt. Es seien weiter $r_s^0, r_s(t)$ die Koordinaten des Schwerpunktes im lokalen System Σ_a bzw. im Inertialsystem, und $r(t) = R_0(t) - r_s(t)$ der Verbindungsvektor vom Aufpunkt R_0 zum Schwerpunkt, gesehen im Inertialsystem. Diese beiden Grössen können also wieder mit einer zeitabhängigen SO(3)-Rotation ineinander überführt werden durch eine Rotation und eine Translation, $r(t) = \Omega(\phi(t))r_s^0$. Die Bewegung des Starrkörpers wird also beschrieben durch

$$R_0(t) = r_s(t) - \Omega(\phi(t))r_s^0,$$

wobei die Rotationsmatrix wieder so dargestellt werden kann wie im vorigen Kapitel. Der Rotationswinkel ϕ unterscheidet sich dabei vom Rotationswinkel für die Berechnung der Inertialsystems-Koordinaten eines beliebigen Punktes $r_0(t)$ auf dem Starrkörper allenfalls um eine additive Konstante, welche für die Zwangskräfte keine Rolle spielt (weshalb wir beide Winkel mit demselben Symbol bezeichnen).

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Die Bewegungsgleichungen des Starrkörpers sind gegeben durch die Kräftebilanz und die Momentenbilanz im Schwerpunkt,

$$\begin{aligned} M\ddot{r}_s &= F_z + F_g, \\ -J\ddot{\phi} &= e_y \cdot (-r \times F_z). \end{aligned}$$

Dabei ist F_z die Zwangskraft, die am geführten Aufpunkt auf B wirkt, F_g das Gewicht des Körpers und M, J seine Gesamtmasse und das Trägheitsmoment bzgl. der y-Achse bei Rotation um den Schwerpunkt. Das Minuszeichen in der linken Seite der 2. Gleichung rührt daher, dass der Winkel ϕ in negative y-Richtung definiert ist; dasjenige auf der rechten Seite daher, dass der Angriffspunkt der Kraft aus Sicht des Schwerpunktes durch $-r$ gegeben ist. In den 4 Bewegungsgleichungen ist eigentlich nur ein Freiheitsgrad vorhanden, nämlich der Rotationswinkel ϕ . Die Kräftebilanz kann also zum Eliminieren der unbekanntenen Zwangskraft genutzt werden,

$$-J\ddot{\phi} = e_y \cdot [-r \times (M\ddot{r}_s - F_g)] = -e_y \cdot [r \times (M\ddot{R} - M\ddot{r} - F_g)].$$

Falls der Schwerpunkt im mitrotierenden System gegeben ist durch $r_s^0 = (0, 0, -l)^T$, ergibt sich mit der obigen Darstellung der Rotationsmatrix

$$r(t) = \Omega(\phi)r_s^0 = l \begin{pmatrix} \sin\phi \\ 0 \\ -\cos\phi \end{pmatrix},$$

wobei $l = \|r_s^0\|$ der Abstand des Schwerpunktes zum Aufpunkt ist. Wenn ferner im Inertialsystem die Gewichtskraft $F_g = -Mge_z$ ist und a_x, a_z die Beschleunigung des Aufpunktes in x- und z-Richtung sind, ergibt sich als Bewegungsgleichung für den Rotationswinkel

$$(J + Ml^2)\ddot{\phi} + lMg\sin\phi = -lM(\cos\phi a_x - \sin\phi a_z).$$

Dies ist die Bewegungsgleichung eines inhomogenen physikalischen Pendels, mit dem effektiven Trägheitsmoment $J + Ml^2$ für eine Rotation um den Aufpunkt (siehe Steinerscher Satz) und der winkelabhängigen Inhomogenität auf der rechten Seite.

Freies Pendeln


Im einfachsten Fall, dass keine Beschleunigung des Aufpunktes vorliegt, wird die Bewegungsgleichung homogen. Für kleine Auslenkungen ϕ kann die Gleichung linearisiert werden und es ergibt sich als Lösung die harmonische Schwingung

$$\phi(t) = A\cos(\omega t + B)$$

mit den Integrationskonstanten A und B (Winkel-Amplitude und Phase) und der Kreisfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{lMg}{J + Ml^2}}.$$

Nimmt man an, dass die Masse der Seilbahn-Kabine im Schwerpunkt konzentriert ist, der in der Entfernung l unter dem Aufpunkt liegt, ist die Kreisfrequenz diejenige des mathematischen Pendels:

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt		Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 21

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Wenn uns jetzt die Beschleunigung auf einen Massenpunkt m an einem körperfesten Punkt

$$r_0 = \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ -L \end{pmatrix}$$

interessiert, erhalten wir aus der Gleichung für die Zwangskräfte

$$\frac{1}{m} \left[\begin{pmatrix} -mgsin\phi(t) \\ 0 \\ -mgcos\phi(t) \end{pmatrix} + F_c \right] = \ddot{r}_0(t) + \ddot{\phi}(t) \begin{pmatrix} L \\ 0 \\ d \end{pmatrix} + 2\dot{\phi}(t)G\dot{r}_0(t) - (\dot{\phi})^2(t) \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ -L \end{pmatrix},$$

wo auf der linken Seite die Gewichtskraft im rotierenden System ausgeschrieben wurde und eine zusätzliche Kontaktkraft F_c eingeführt wurde. Wenn r_0 zeitlich konstant bleiben soll, muss die Kontaktkraft genau so gross sein, dass die Beschleunigung verschwindet. Ausserdem verschwindet dann der Coriolis-Term. In der Näherung für kleine Winkel und unter Ausnützung von $\ddot{\phi} = -\omega^2\phi$ erhalten wir

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} g\phi \\ 0 \\ g \end{pmatrix} - \omega^2\phi(t) \begin{pmatrix} L \\ 0 \\ d \end{pmatrix} - (\dot{\phi})^2(t) \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ -L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g \left(1 - \frac{L}{l}\right) \phi - d(\dot{\phi})^2 \\ 0 \\ g - \frac{gd}{l} \phi + (\dot{\phi})^2 L \end{pmatrix}.$$


Davon ist im Wesentlichen die x-Komponente interessant, welche geschrieben werden kann

$$\frac{1}{m} F_c^x = g \left(\frac{L}{l} - 1 \right) A \cos(\omega t + B) - A^2 d \frac{g}{l} \sin^2(\omega t + B).$$

Für die Säntisbahn lauten diese Werte (siehe nachfolgendes Kapitel) $l = 10.18$ m, $L = 9.035$ m, $d = 3$ m. Eine typische Grössenordnung für die Pendel-Amplitude im normalen Betrieb ist $A = 3^\circ = 0.052$, während eine obere Grenze gegeben ist durch die geometrisch maximal mögliche Pendel-Amplitude $A < 17.2^\circ = 0.3$. Daraus ergibt sich als typische Grössenordnung im normalen Betrieb 0.0058 g für den ersten Term und 0.0008 g für den zweiten, während sich mit der Abschätzung für die obere Grenze der Amplitude 0.034 g und 0.027 g für den ersten bzw. zweiten Term. Für Amplituden A in der Grössenordnung des normalen Betriebs dominiert also bei weitem der erste Term, in den diese linear eingeht. In den folgenden Rechnungen werden daher meistens die quadratischen Beiträge in der Amplitude ignoriert, was auch in einem Bereich etwas ausserhalb des normalen Betriebs noch gerechtfertigt sein dürfte.

Gleichmässige horizontale Beschleunigung des Aufpunktes: Anschwingen und Gleichgewichtszustand

Wir betrachten nun eine gleichmässige Beschleunigung a_x des Aufpunktes in x-Richtung, was der Fall wäre, wenn eine Seilbahn an einem horizontalen Tragseil mit gleichmässiger Beschleunigung anfährt oder abbremst. Dieser Fall ist zwar praktisch irrelevant, allerdings zeigt sich, dass die Ergebnisse für den entsprechenden Fall an einem geneigten Tragseil mit kleinen Modifikationen übertragbar sind.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Unter denselben Annahmen wie im letzten Abschnitt ergibt sich für den Auslenkungswinkel ϕ des Starrkörpers die inhomogene Schwingungsgleichung

$$\left(\frac{J}{ml^2} + 1\right) \ddot{\phi} + \frac{g}{l} \sin\phi = \frac{-1}{l} \cos\phi a_x.$$

In der Näherung für kleine Winkel (d.h. $\sin\phi = \phi$, $\cos\phi = 1$) und mit der Annahme, dass das Trägheitsmoment J klein ist gegenüber dem Steinerschen Beitrag kann nun die Bewegung eines Anschwingvorganges bestimmt werden. Dafür muss die Auslenkung und Winkelgeschwindigkeit bei $t = 0$ verschwinden. Für diese Anfangsbedingungen hat die Bewegungsgleichung die Lösung

$$\phi(t) = \frac{a_x}{g} \cos(\omega t) - \frac{a_x}{g},$$

wobei die Kreisfrequenz ω ist wie im letzten Abschnitt.

Bei dieser Gleichung wurde allerdings keine Dämpfung in der Aufhängung mitberücksichtigt. Ist eine (egal wie kleine) Dämpfung gegeben, wird nach einer gewissen Zeit die partikuläre Lösung

$$\phi \equiv -\arctan \frac{a_x}{g} = \frac{-a_x}{g} + O\left(\left(\frac{a_x}{g}\right)^3\right)$$

dominieren.

Setzt man den letzteren Fall in die Gleichung für die Zwangskräfte ein, ergeben sich keine Zwangskräfte durch die Rotation (da der Winkel ϕ konstant ist). Allerdings «sieht» der Massenpunkt in r_0 jetzt einerseits die Beschleunigung des Aufpunktes, andererseits die Schwerkraft, jeweils um den Winkel ϕ rotiert:

$$\frac{1}{m} \left[\begin{pmatrix} -mg \sin\phi(t) \\ 0 \\ -mg \cos\phi(t) \end{pmatrix} + F_c \right] = \ddot{r}_0(t) + \begin{pmatrix} a_x \cos\phi \\ 0 \\ -a_x \sin\phi \end{pmatrix}.$$

Für die Kontaktkraft, die erforderlich ist, um r_0 konstant zu halten, ergibt sich


$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} g \sin\phi + a_x \cos\phi \\ 0 \\ g \cos\phi - a_x \sin\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \left(1 + \frac{1}{2} \frac{a_x^2}{g^2}\right) \end{pmatrix} + O\left(\left(\frac{a_x}{g}\right)^3\right),$$

wobei die Beiträge bis zur quadratischen Ordnung in a_x mitgeführt wurden, um zu zeigen, dass zu dieser Ordnung sich die x-Komponenten der Schwerkraft und der Beschleunigung des Aufpunktes aufheben, während in der z-Komponente ein positiver Beitrag zusätzlich zur Schwerkraft erzeugt wird.

Für den Anschwing-Vorgang betrachten wir wieder einen Ort

$$r_0 = \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ -L \end{pmatrix}$$

und berechnen die Kontaktkraft, die erforderlich ist, um r_0 konstant zu halten. Es ergeben sich zusätzlich zu dem obigen Beitrag noch Beiträge der Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen (den Coriolis-Beitrag können wir für einen konstanten Ort r_0 wieder ignorieren):

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 23	

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} g \sin \phi + a_x \cos \phi \\ 0 \\ g \cos \phi - a_x \sin \phi \end{pmatrix} - \omega^2 \frac{a_x}{g} \cos \omega t \begin{pmatrix} L \\ 0 \\ d \end{pmatrix} + \omega^2 \frac{a_x^2}{g^2} \sin^2 \omega t \begin{pmatrix} -d \\ 0 \\ L \end{pmatrix}.$$

Geht man wieder von kleinen Winkeln $|\phi| \leq \frac{a_x}{g} \ll 1$ aus und berechnet die niedrigste Ordnung in a_x , erhält man

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} a_x \left(1 - \frac{L}{l}\right) \cos \omega t \\ 0 \\ g - a_x \frac{d}{l} \cos \omega t \end{pmatrix}.$$

Die Zusatz-Beiträge in x- und z-Richtung verschwinden also, wenn man sich genau im Schwerpunkt befindet ($d = 0, L = l$). Andernfalls ergeben sich Schwingungs-Beiträge durch die Beschleunigung des Aufpunktes. Diese haben am Anfang den maximalen Ausschlag. Falls eine (kleine) Dämpfung vorhanden ist, werden diese irgendwann abklingen und in die oben vorgestellte partikuläre Lösung übergehen. Diese gedämpfte Schwingung ist in einfachen Fällen auch analytisch lösbar, ergibt aber für eine gegenüber der Eigenfrequenz ω kleine Dämpfung γ wenig neue Erkenntnis (die cos-Schwingung klingt exponentiell mit $-\gamma t$ ab, während die Schwingungsfrequenz sich nur in Ordnung $\frac{\gamma^2}{\omega^2}$ ändert) – die partikuläre Lösung als Asymptote bleibt dadurch unverändert.

Gleichmässige horizontale und vertikale Beschleunigung des Aufpunktes

Bewegt sich der Aufpunkt auf einer vorgegebenen Trajektorie $x(t)$ mit konstanter Beschleunigung in der x-z-Ebene, so ergibt sich (mit derselben Definition für den Winkel ϕ wie oben) die Bewegungsgleichung

$$\left(\frac{J}{ml^2} + 1\right) \ddot{\phi} + \frac{g + a_z}{l} \sin \phi = \frac{-1}{l} \cos \phi a_x$$

In der Näherung für kleine Winkel hat diese Gleichung dieselbe Struktur wie diejenige im letzten Abschnitt, wenn man g ersetzt durch $g_{\text{eff}} = g + a_z$. Entsprechend können alle Lösungen übernommen werden.


Für die ungedämpfte Schwingungs-Lösung ergibt sich also

$$\phi(t) = \frac{a_x}{g + a_z} \cos(\omega t) - \frac{a_x}{g + a_z}$$

und für die partikuläre Lösung erhalten wir $\phi \equiv -\arctan \frac{a_x}{g+a_z} = \frac{-a_x}{g+a_z} + O\left(\left(\frac{a_x}{g+a_z}\right)^3\right)$.

Die Kontaktkraft während der ungedämpften Schwingung ergibt sich in der Näherung der Dominanz des Steinerschen Beitrages zu

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} a_x \left(1 - \frac{L}{l}\right) \cos \omega_{\text{eff}} t \\ 0 \\ g + a_z - a_x \frac{d}{l} \cos \omega_{\text{eff}} t \end{pmatrix}.$$

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt		Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 24

Hierbei muss beachtet werden, dass die Kreisfrequenz sich mit dem modifizierten effektiven Wert von g berechnet werden muss,

$$\omega_{eff} = \sqrt{\frac{g+a_z}{l}}$$

Die beiden Beschleunigungen können als Projektion der maximalen Seil-Beschleunigung berechnet werden, wenn die Neigung des Kabels gegenüber der Horizontalen bekannt ist.

Berechnung der Schwingungsfrequenz und Längen-Parametern für das Beispiel der Säntis-Bahn

Das Fahrzeug der Säntis-Bahn setzt sich zusammen aus dem Laufwerk, dem Gehänge und der Kabine. Da das Laufwerk nicht pendelt, vernachlässigen wir dessen Masse und Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment der Kabine und des Gehänges um deren jeweiligen Schwerpunkt sind gegeben durch den jeweiligen Trägheits-Radius T_G und T_K . Das Gesamt-Trägheitsmoment des Fahrzeugs um den Drehpunkt des Gehänges berechnet sich also zu

$$J_{ges} = m_K(T_K^2 + H_K^2) + m_G(T_G^2 + H_G^2),$$

wobei H_K und H_G die jeweilige vertikale Entfernung des Schwerpunktes der Kabine/des Gehänges vom Drehpunkt sind. Die effektive Pendel-Länge ergibt sich zu

$$l_{eff} = \frac{J_{ges}}{m_G H_G + m_K H_K},$$

wobei der Nenner dem Produkt der Höhe des Gesamt-Schwerpunktes und der Gesamt-Masse entspricht. Für die Säntis-Bahn liegen folgende Daten vor: $m_G = 2120$ Kg, $m_K = 4120$ kg. $T_G = 2.314$ m, $T_K = 2.766$ m, $H_G = 4.200$ m, $H_K = 9.040$ m. Damit ergibt sich das Gesamt-Trägheitsmoment zu $J_{ges} = 4.17E5$ kg*m² und die effektive Pendellänge zu $l_{eff} = 9.035$ m, was nur minimal über dem Schwerpunkt der Kabine liegt. Die Masse des Gehänges trägt also erwartungsgemäss nur minimal zu den Trägheits-Eigenschaften des Gesamt-Systems bei. Die Trägheits-Eigenschaften entsprechen denjenigen eines mathematischen Pendels mit Länge l_{eff} und Masse $m_{eff} = J_{ges}/l_{eff}^2 = 5108$ kg. Als Eigenfrequenz ergibt sich weiter

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l_{eff}}} = 1.04s^{-1}$$

und der Kabinenboden liegt auf einer Höhe $L = 10.180$ m unter dem Drehpunkt. Es können also in die obigen Gleichungen die Grössen $L = 10.180$ m, $l = 9.035$ m, $\omega = 1.04s^{-1}$ in den Gleichungen des vorstehenden Kapitels eingesetzt werden. Als Abschätzung für den horizontalen Versatz d kann als Obergrenze die halbe Kabinenlänge angenommen werden, $d = 3.00$ m.

Für den Fall des Anschwingens bei konstanter Beschleunigung benötigt man die Seil-Beschleunigung und den Winkel des Seiles gegenüber der Horizontalen. Dieser beträgt maximal 44 Grad. Für ein Abbremsen

AGU ZÜRICH	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 25	

während der Bergauf-Fahrt mit einer Seil-Verzögerung von 0.6 m/s^2 (was der Zielwert der geregelten Betriebsbremsung ist) ergibt sich also

$$a_z = -a_s \sin \alpha = -0.417 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

$$a_x = -a_s \cos \alpha = -0.432 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Die effektive Pendelfrequenz ändert sich nur minimal auf 1.01 Hz. Die anderen Parameter können als gleich betrachtet werden.

Als asymptotischer Auslenkungs-Winkel (partikuläre Lösung) ergibt sich

$$\phi \equiv -\arctan \frac{a_x}{g+a_z} = 0.0458 = 2.62^\circ,$$

wodurch gleichzeitig der Amplitude und Ruhelage der Schwingung des ungedämpften Anpendelns entspricht.

Der Ausdruck für die Kontaktbeschleunigungen, die einen Massenpunkt während des ungedämpften Anpendelns an Ort und Stelle halten, liefert

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} a_x \left(1 - \frac{L}{l}\right) \cos \omega_{eff} t \\ 0 \\ g + a_z - a_x \frac{d}{l} \cos \omega_{eff} t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0547 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cos \omega_{eff} t \\ 0 \\ 9.39 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0.143 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cos \omega_{eff} t \end{pmatrix}.$$


Bei der Sicherheitsbremsung liegt der Zielwert bei 2.0 m/s^2 (die Norm würde sogar 2.5 zulassen). In diesem Fall skalieren die obigen Werte also mit dem Faktor $2.0/0.6 = 3.33$, was für die Kontaktbeschleunigungen liefert

$$\frac{1}{m} F_c = \begin{pmatrix} 0.182 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cos \omega_{eff} t \\ 0 \\ 8.42 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0.478 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cos \omega_{eff} t \end{pmatrix}$$

und die effektive Pendelfrequenz beträgt

$$\omega = \sqrt{\frac{g + a_z}{l_{eff}}} = 0.95 \text{ s}^{-1}.$$

Die effektiv in der pendelnden Kabine wirkenden Horizontal-Beschleunigungen sind also wesentlich kleiner als die Seilbeschleunigung und auch als deren horizontale Komponente. Dieses wird dadurch verursacht, dass die Kabine frei pendeln kann und daher dem durch die Beschleunigung verursachten Drehmoment ausweichen kann. Genau auf Höhe der effektiven Pendel-Länge ($L = l$) wäre die Horizontal-

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Beschleunigung in dieser Näherung sogar annähernd 0, was den in der Einleitung erwähnten "Tennisball"-Effekt produzieren würde.

Effekte, die in diesen Rechnung nicht berücksichtigt sind

Einige Effekte, die möglicherweise eine Rolle spielen für die effektiven Beschleunigungen, denen ein Rollstuhl in einer Seilbahn-Kabine ausgesetzt ist, wurden in den obigen Berechnungen nicht berücksichtigt, um die Rechnungen möglichst einfach zu halten. Diese Effekte sind:


Elastische Reaktion des Tragseiles auf eine Beschleunigung der Kabine: Das System elastisches Tragseil + Masse der Kabine kann zu Schwingungen angeregt werden, die mit der Pendel-Schwingung der Kabine gekoppelt sind. Diese Schwingungen können zu zusätzlichen vertikalen Beschleunigungen führen, welche sich (je nach momentanem Pendel-Winkel der Kabine) in Beschleunigungen entlang der horizontalen Kabinen-Achse übersetzen können. Diese gekoppelte Schwingung wäre nur mit grossem Aufwand analytisch berechenbar und auch der Aufwand für eine aussagekräftige numerische Lösung wäre erheblich, weshalb wir darauf verzichten.

Lager-Reibung: In den theoretischen Berechnungen wurde nur ein freies Pendeln der Seilbahn-Kabine betrachtet. Bei einer gedämpften Schwingung in Gegenwart einer Lager-Reibung ist davon auszugehen, dass sich die Pendel-Beschleunigungen und die Schwerkraft-Komponente in der Kabinenebene auch genau auf Höhe der effektiven Pendellänge nicht mehr genau aufheben, da die Kabine durch die Lager-Reibung zusätzlich verlangsamt wird. Dieser Effekt wird allerdings in den numerischen Rechnungen beschrieben im entsprechenden Kapitel quantifiziert.

7.2 Numerische Berechnungen

Die im vorigen Kapitel vorgestellte analytische Berechnung der zu erwartenden Zwangsbeschleunigungen im beschleunigten Bezugssystem der Seilbahn-Kabine ist nur in stark vereinfachten Beispielen mit vernünftigem Aufwand möglich. In allen anderen Situationen ist man auf numerische Lösungen angewiesen.

Mittels des Starrkörper-Algorithmus des Finite-Elemente-Solvers OpenRadioss wurden numerische Lösungen der Starrkörper-Dynamik einer Seilbahn-Kabine mit den Abmessungen und Trägheitseigenschaften der Säntis-Bahn durchgeführt. Dabei wurde die Kabine entlang einer vorgegebenen Trajektorie mit einer Bahngeschwindigkeit von 6 m/s bewegt, um dann entsprechend einer Betriebsbremsung (BB) mit 0.6 m/s^2 während 10 s mit einer konstanten Seil-Verzögerung abgebremst zu werden, oder entsprechend einer Sicherheitsbremsung (SB) mit 2.0 m/s^2 während 3s. Darauf folgte jeweils eine Phase freien Auspendelns. Als Trajektorie wurde entweder eine konstante Steigung von 44° angenommen (entsprechend dem Spannungsfeld kurz unterhalb einer Stütze) oder ein Übergang von einer Steigung von 44° zu 20° mit einem Radius von 32 m (entsprechend dem Überfahren einer Stütze). Die Krümmung der Seil-Linie und die Deformation des Tragseiles wurden nicht berücksichtigt.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Die Kabine konnte sich um den bewegten Aufhängepunkt drehen. Da die Luftseilbahnen normalerweise über Dämpfer verfügen, welche die Pendelbewegung zeitlich begrenzen, wurde ein dämpfendes Drehmoment proportional zur Pendel-Winkelgeschwindigkeit angenommen; die Dämpfungs-Konstante wurde so gewählt, dass sich die Amplitude der Beschleunigung etwa in der halben Periodendauer der freien Pendelschwingung halbiert. Im Unterschied zu den analytischen Berechnungen handelt es sich also um ein gedämpftes Pendeln.

Aus den Simulations-Resultaten wurden die Zwangs-Beschleunigungen im rotierenden Bezugssystem des Kabinen-Bodens in der vorderen Ecke der Kabine ausgelesen. Dieser Punkt befindet sich entlang der Fahrtrichtung 3 m ausserhalb der Falllinie des Pendel-Schwerpunktes (also $d = 3$ m entsprechend den Definitionen des vorigen Kapitels).

Die Resultate werden – entsprechend der in den Messungen in Kapitel 7.4.1 angewandten Konvention – wiedergegeben als Beschleunigung des jeweiligen Punktes gegenüber dem Inertialsystem abzüglich der Erdbeschleunigung (d.h., bei einer Bewegung in positiver x-Richtung erscheint eine positive x-Beschleunigung usw., wobei eine relativ zur Erdoberfläche ruhender Punkt keine Beschleunigung sieht). Die Orientierung der Achsen ist so, dass die z-Achse vertikal aufwärts zeigt und die x-Achse in Fahrtrichtung. Die Steigung ist immer in dieser Fahrtrichtung zu verstehen, also bei $+44^\circ$ erfolgt eine Bergfahrt, bei -44° eine Talfahrt. In dieser Konfiguration entspricht bei der Talfahrt (Bergfahrt) die x-Achse der Simulationen der positiven (negativen) y-Achse bei den Messungen im folgenden Kapitel.

Bild 7 und Bild 8 zeigen exemplarisch die Resultate bei konstantem Neigungswinkel aufwärts für Beschleunigungen von 0.6 m/s^2 , angelegt von der Zeit $t = 1$ s bis $t = 11$ s, bzw. 2 m/s^2 , angelegt von $t = 1$ s bis $t = 3$ s (also jeweils bis zum Stillstand des sich anfangs mit 6 m/s bewegenden Aufhängepunktes). Danach pendelt die Kabine jeweils frei aus, während der Aufhängepunkt sich nicht mehr bewegt. Die Ergebnisse aller Rechnungen sind im Anhang zu finden.

Als Beschleunigungs-Spitzen ergeben sich für eine Seil-Verzögerung von 0.6 m/s^2 Spitzen der Horizontal-Beschleunigung von etwa 0.14 m/s^2 während des Brems-Vorganges und 0.17 m/s^2 beim Auspendeln nach der Bremsung. Diese Werte erhöhen sich auf 0.5 m/s^2 bzw. knapp unter 1 m/s^2 für die Bremsung mit 2.0 m/s^2 Seilverzögerung. Die vertikale Komponente zeigt die maximalen Werte jeweils direkt während des Bremsvorganges, mit einer betragsmässig maximalen Auslenkung von 0.55 m/s^2 bzw. 1.85 m/s^2 bei Seilbeschleunigung von 0.6 m/s^2 bzw. 2.0 m/s^2 . In den anderen Konfigurationen (abwärts bzw. mit unterschiedlichen Steigungen) ändern sich die Amplituden der Horizontal-Beschleunigungen nur unwesentlich. In der vertikalen Komponente können allerdings grössere negative Auslenkungen bis -2 m/s^2 beobachtet werden bei dem Wechsel der Steigungen.

Horizontal and vertical accelerations:
 Angles = -44deg, -44deg, speed = 6.0msec, rope acc = -0.6msec²

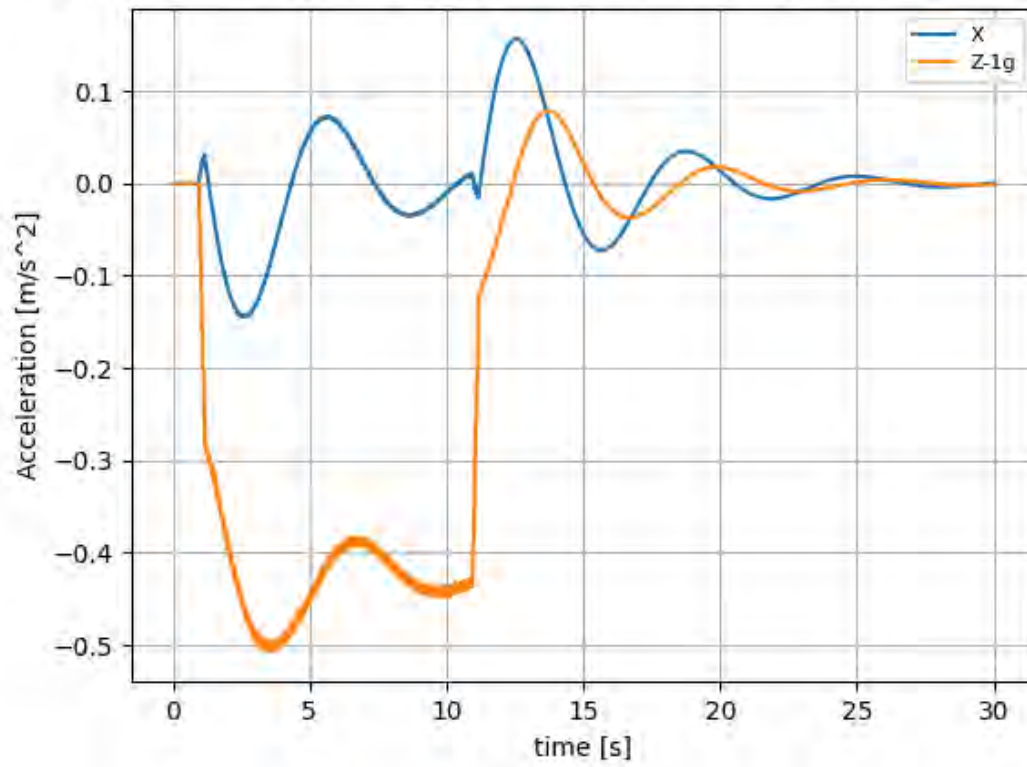


Bild 7: Vertikale (z) und horizontale (x) Beschleunigungen bei Abbremsen mit -0.6 m/s , konstante Steigung 44° aufwärts

Horizontal and vertical accelerations:
Angles = -44deg, -44deg, speed = 6.0msec, rope acc = -2.0msec²

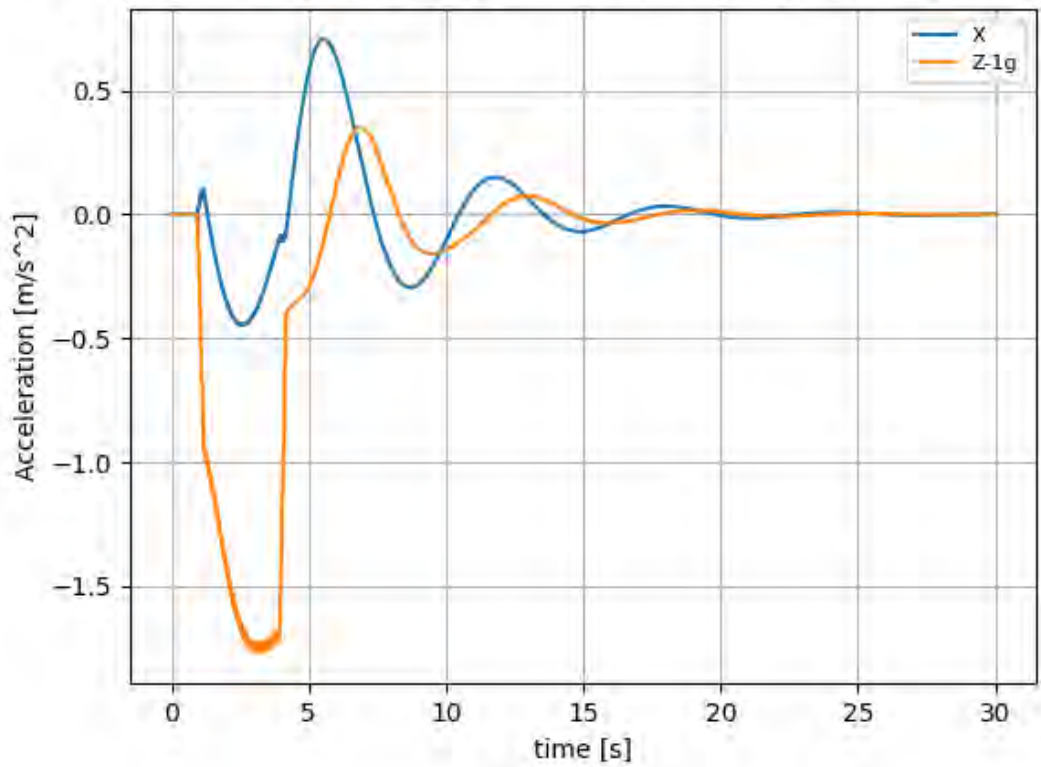



Bild 8: Vertikale (z) und horizontale (x) Beschleunigungen bei Abbremsen mit -2.0 m/s², konstante Steigung 44° aufwärts

7.3 Erweitertes Rollstuhl-Modell



Bild 9: Erweitertes Rollstuhl-Modell (cf. auch Bild 10 und Bild 11).

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Bereits in [5] hatten wir ein Modell vorgestellt, mit welchem ein Rollstuhl mit darauf befindlicher Person mittels MBS (multi-body-system) Methoden simuliert werden kann. Dieses Modell kann aber aus technischen Gründen nur eindimensionale Beschleunigungsverläufe verarbeiten. Deshalb haben wir das Modell in ein FE-Programm überführt, mit welchem auch die komplexeren Beschleunigungsverläufe beim Pendeln berechnet werden können. Zusätzlich haben wir auch ein genaueres Modell des Rollstuhls entwickelt.

Allerdings zeigte sich bald, dass die berechneten Beschleunigungen den Rollstuhl nicht in Bewegung versetzen würden, weswegen wir diesen Ansatz nicht weiter verfolgt haben. Das Modell steht jedoch für weitere Studien zur Verfügung.

7.4 Beschleunigungs-Messungen

7.4.1 Versuchsaufbau

Es wurden Messungen durchgeführt an der Sämtisbahn (Pendelbahn max. 85 Personen pro Kabine) und an der Luftseilbahn Adliswil-Felsenegg (Pendelbahn, 30+1 Personen). In beiden Bahnen wurde in jeweils einer Kabine ein mit einem Hybrid-II 50-perzentil männlichen Dummy besetzter Rollstuhl in der Nähe der (aber ohne Kontakt zur) bergseitigen Kabinen-Wand aufgestellt, mittels Feststellbremse arretiert und per Echtzeit-Video beobachtet. Die Instrumentierung des Dummys wurde dabei nicht ausgelesen. Die Beschleunigungen des Kabinen-Bodens wurden durch ein neben dem Rollstuhl am Boden parallel zur Kabinen-Längsachse befestigtes Smartphone (Samsung Galaxy A32) gemessen, welches dreiachsige Beschleunigungen, Orientierung des Smartphones und GPS-Positionen aufzeichnete. Das Smartphone wurde so ausgerichtet, dass die y-Richtung entlang der fahrtrichtungsparallelen Kabinen-Achse talwärts zeigt und die z-Richtung entlang der Vertikalen aufwärts. Die Beschleunigungen wurden zusätzlich auch mittels zweier Xsens-Accelerometer aufgezeichnet. Die Accelerometer (sowohl Smartphone als auch Xsens) geben jeweils die Beschleunigung des Gerätes gegenüber einem Inertial-System an.


Nach der Installation des Rollstuhls und der Instrumentierung wurde die Seilbahn-Kabine an verschiedenen Stellen und in verschiedenen Fahrtrichtungen von der jeweils dort im normalen Betriebsmodus gefahrenen Geschwindigkeit mittels geregelter Betriebsbremsung bis zum Stillstand abgebremst. Die stärksten Seilbeschleunigungen sind dabei an der jeweils steilsten Stelle der Bahn (Sämtis knapp unterhalb Stütze 2, Felsenegg unterhalb Bergstation) in Fahrtrichtung aufwärts zu erwarten; diese Konfiguration wurde daher bevorzugt getestet. Es wurden aber auch andere Konfigurationen getestet (z.B. steilste Stelle aufwärts, Mitte Spannungsfeld und oberhalb Stütze in beiden Richtungen).



Bild 10: Versuchsaufbau in der Sämtisbahn. Der Rollstuhl ist mit den Hinterrädern in Richtung einer Anschlagfläche in einem Abstand von ca. 10 cm zu den Hinterrädern platziert. Der Rücken zeigt dabei bergaufwärts.



Bild 11: Versuchsaufbau in der Felseneggbahn. Der Rollstuhl ist mit den Hinterrädern in Richtung einer Anschlagfläche in einem Abstand von ca. 10 cm zu den Hinterrädern platziert. Der Rücken zeigt dabei bergaufwärts.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Eine Übersicht über alle durchgeführten Messungen ist in Tabelle 7 zu finden. Der Ziel-Wert der Seilbeschleunigung während der geregelten Betriebsbremsung beträgt bei der Felsenegg-Bahn -0.50 m/s^2 und bei der Säntisbahn -0.60 m/s^2 . Es ergeben sich allerdings noch höhere Verzögerungen, wenn sich eine Kabine mit maximaler Beladung im steilsten Teil der Bahn aufwärts bewegt; da dann die Verzögerung durch das Auslaufen der Bahn schon höher ist als der jeweilige Zielwert. In diesem Fall können bis zu -0.71 m/s^2 (Felsenegg) bzw. -0.91 m/s^2 (Säntis) erreicht werden. Bei den vorliegenden Messungen wurden diese Spitzenwerte jedoch nicht erreicht.

Tabelle 7: Übersicht gemessene Bremsmanöver

Event Nr.	Zeit	Fahrtrichtung	Bremsung	Ort	Anmerkungen/ Beobachtungen
Säntis 1	19:08	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 2	–
Säntis 2	19:10	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 1	–
Säntis 3	19:13	Auf	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 1	Bremse Rollstuhl gelöst
Säntis 4	19:16	Auf	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 2	Bremse Rollstuhl gelöst
Säntis 5	19:19	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 2	Bremse Rollstuhl gelöst
Säntis 6	19:21	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze 1	Bremse Rollstuhl gelöst
Felsenegg 1	8:34	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Bergstation	Pendeln etwa 3 Halbwellen
Felsenegg 2	8:37	Auf	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Bergstation	Kaum Pendeln
Felsenegg 3	8:39	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Mitte Spann- feld oben	Pendeln 3 Halb- wellen
Felsenegg 4	8:42	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze	vertikale Schwin- gung ~4 Hz
Felsenegg 5	8:44	Auf	Betriebsbremsung von 6 m/s	Mitte Spann- feld oben	Pendeln 2 Halb- wellen
Felsenegg 6	8:45	Auf	Betriebsbremsung von 6 m/s	Vor Bergsta- tion	Bremse Rollstuhl gelöst
Felsenegg 7	8:47	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Mitte Spann- feld oben	Bremse Rollstuhl gelöst
Felsenegg 8	8:49	Ab	Betriebsbremsung von 6 m/s	Unterhalb Stütze	vertikale Schwin- gung ~4 Hz

7.4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Beschleunigungs-Messungen werden exemplarisch für beide Seilbahnen jeweils für eine Bremsung aufwärts an der steilsten Stelle dargestellt. Die Beschleunigungen entlang der x-, y- und z-Richtung des Smartphones sind jeweils nach Anwendung eines Lowpass-Filters mit Cutoff-Frequenz 0.5 Hz dargestellt. Bei der z-Beschleunigung wurde ausserdem die Erdbeschleunigung abgezogen.

Saentis, event at time 19:14

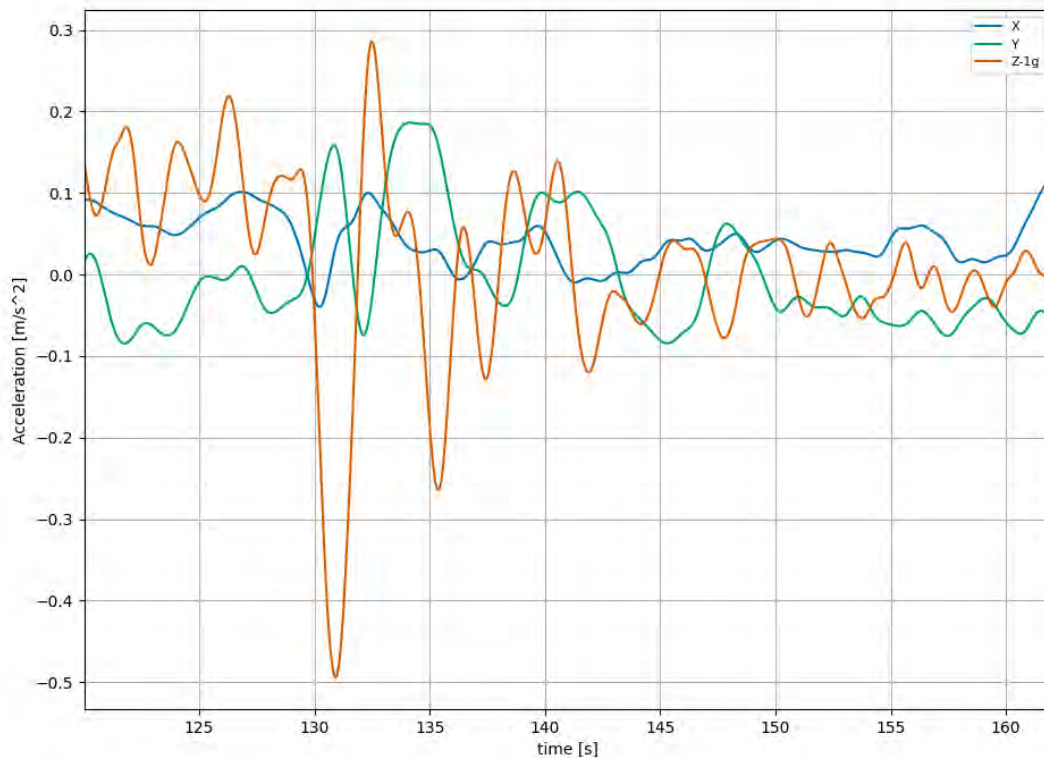


Bild 12: Säntis, Betriebsbremsung aufwärts unterhalb Stütze 2

Für die Felsenegg-Bahn ist ausserdem die Höhe und Geschwindigkeit gemäss GPS dargestellt; bei der Säntis-Bahn standen diese Messwerte nicht zur Verfügung, da aus topographischen Gründen kein ausreichender Satelliten-Empfang gewährleistet war. Die entsprechenden Diagramme für alle anderen Bremsereignisse sind im Anhang zu finden.

In den Diagrammen ist erkennbar, dass sich die Spitzenwerte der Längs-Beschleunigungen sich im Bereich $0.1 - 0.3 \text{ m/s}^2$ (Säntis) bzw. $0.2 - 0.3 \text{ m/s}^2$ (Felsenegg) bewegen, während in vertikaler Richtung bei der Säntis-Bahn Ausschläge von etwa $0.5 - 1.3 \text{ m/s}^2$ erreicht werden (Felsenegg $0.2 - 0.8 \text{ m/s}^2$).

Die Beobachtungen des Rollstuhles und des Dummies zeigte, dass der Rollstuhl nicht nur weit davon entfernt war, instabil zu werden. Bei einigen Tests wurde sogar die Feststellbremse des Rollstuhles gelöst, ohne dass sich dieser mehr als wenige mm von seiner Position in der Kabine bewegt hätte. Dieses ist auch auf den Videos der Versuche ersichtlich.

Felsenegg, Event Number 2

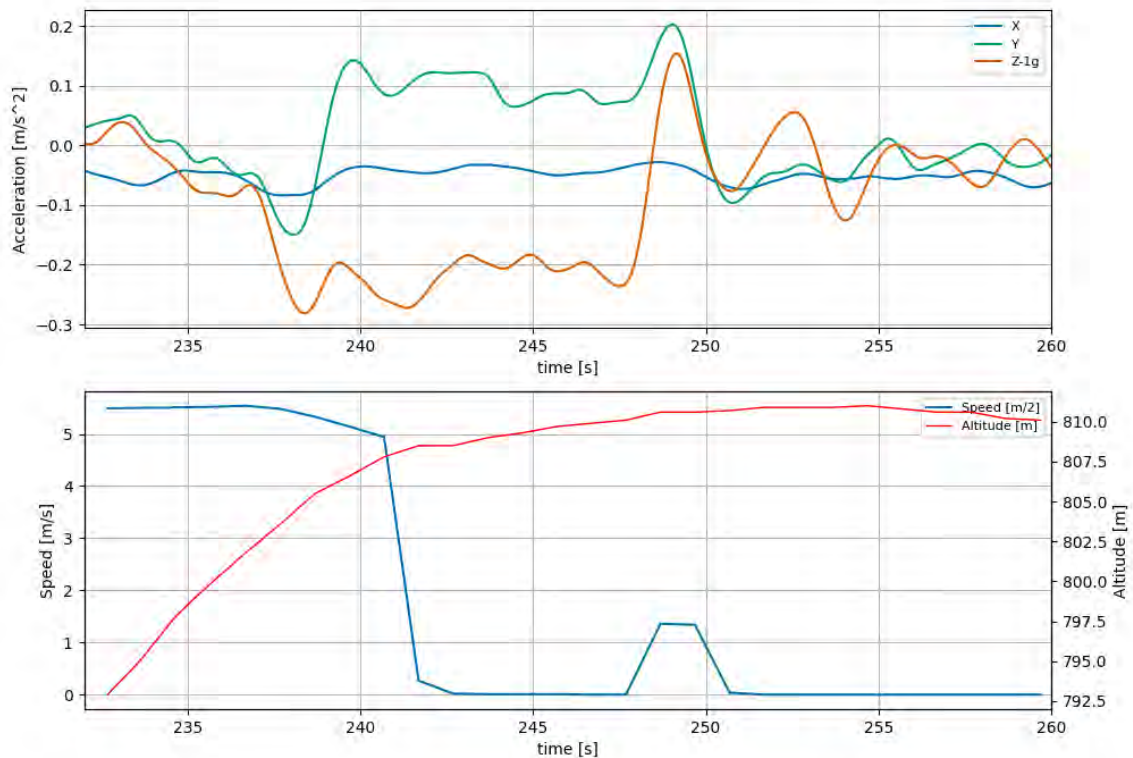


Bild 13: Felsenegg, Betriebsbremsung aufwärts unterhalb Bergstation

7.5 Schlussfolgerungen Pendeln

Die Resultate für die Beschleunigungs-Spitzen gemäss der verschiedenen Methoden sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Resultate für die vertikalen Beschleunigungen in der Betriebsbremsung recht gut mit der Theorie übereinstimmen. Auch die Werte für die horizontale Komponente in den Messungen und Simulationen sind vergleichbar; beide sind allerdings etwa einen Faktor 3 - 6 grösser als der theoretisch erwartete Wert.

Tabelle 8: Betrags-Maxima (m/s^2) der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen bei Einfall der Betriebsbremse. Steigung 44°, Beschleunigung 0.6 (Säntis) bzw. 0.5 (Felsenegg) m/s^2 , Vergleich Theorie-Simulation-Messung

	Theorie	Simulation	Messung Säntis	Messung Felsenegg
Horizontal	0.055	0.17	0.1 – 0.3	0.2 – 0.3
Vertikal, abzgl. Erdbeschleunigung	0.56	0.55	0.5 – 1.3	0.2 – 0.8

Aus technischen Gründen konnten keine Bremsvorgänge mit der Sicherheitsbremse durchgeführt werden. Da aber die Resultate aus der Simulation mit der Betriebsbremse recht gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen, können die gesuchten Beschleunigungen in der Simulation mit hoher Zuverlässigkeit ermittelt werden.


	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt		Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44 Seite: 36


Tabelle 9: Betrags-Maxima (m/s^2) der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen bei Einfall der Sicherheitsbremse. Steigung 44° , Beschleunigung $2 m/s^2$, Vergleich Theorie-Simulation.

	Theorie	Simulation
Horizontale Beschleunigung	0.18	0.90
Vertikale Beschleunigung (abzüglich Erdbeschleunigung)	1.87	1.85

Die theoretischen Rechnungen und die Simulationen beruhen auf ähnlichen Annahmen. Der entscheidende Unterschied ist allerdings, dass in den theoretischen Rechnungen die Reibung im Lager der Aufhängung der Seilbahn-Kabine nicht berücksichtigt wurde. Diese Reibung hat zur Folge, dass das Pendeln der Kabine abgebremst wird und die Kabine sich daher nicht sofort so positionieren kann, dass die Horizontal-Beschleunigung durch das Schrägstehe der Kabine und durch die Erd- und Seilbeschleunigungen genau ausgeglichen werden. Es ist also plausibel, dass die Simulations-Resultate in der horizontalen Komponente grössere Beschleunigungen ergeben als im reibungsfreien Fall theoretisch zu erwarten wäre, während sich die vertikale Komponente kaum unterscheidet. Da die Simulationen weiter die Ergebnisse der Messungen in beiden Komponenten gut bestätigen, kann davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Horizontal-Beschleunigungen vor allem ein Effekt der Dämpfung der freien Pendel-Schwingung sind.


Sowohl in den Simulationen als auch in den Messungen zeigt sich ein starker Ausschlag der x-Beschleunigung unmittelbar nachdem die Seil-Beschleunigung auf 0 abgesunken ist ($t = 11s$ in den BB-Simulationen). Durch den dabei auftretenden Ruck wird anscheinend eine relativ starke Auslenkung der Pendel-Schwingung angeregt. Die Anfangs-Amplitude der horizontalen Beschleunigung übersteigt dabei sogar den Maximal-Wert während des Bremsvorganges. Dieser Effekt geht aus den theoretischen Berechnungen nicht hervor, da dabei nur eine konstante Beschleunigung betrachtet wurde.

Die Ergebnisse der Messungen beziehen sich auf die geregelte Betriebsbremsung der Seilbahn, wobei Seil-Verzögerungen von $0.5 - 0.6 m/s^2$ auftreten. Eine im Notfall angewandte Sicherheits-Bremse wird bei der Säntis- und Felsenegg-Bahn mit $2.0 m/s^2$ durchgeführt; zulässig wären sogar Werte bis zu $2.5 m/s^2$. Ein Testen dieser Bremsung war im Rahmen dieser Versuchsreihe nicht möglich, um den regulären Seilbahn-Betrieb nicht zu gefährden. Die numerischen Simulationen ergeben für eine Sicherheitsbremsung mit $2.0 m/s^2$ maximale Werte der Horizontal-Beschleunigungen von bis zu $0.9 m/s^2$, während die Vertikal-Beschleunigungen um bis zu knapp $1.9 m/s^2$ von g abweichen. Letzterer Wert wird auch von den theoretischen Rechnungen bestätigt, während der horizontale Wert von den theoretischen Rechnungen wiederum aufgrund der fehlenden Lager-Reibung unterschätzt wird. Vergleicht man die Ergebnisse der Simulationen für BB und SB, fällt auf, dass die Horizontal-Beschleunigungen um mehr als den Faktor 3.33 (der dem Verhältnis der Seilbeschleunigungen entspräche) wachsen, während theoretisch im ungedämpften Fall ein lineares Skalieren zu erwarten wäre. Nimmt man eine Skalierung mit demselben Faktor an wie in den Simulationen und extrapoliert die Ergebnisse der Messungen in den Seilbahnen, erhält man als Abschätzung für die Horizontal-Beschleunigung bei einer Sicherheitsbremsung einen Wert von $1.6 m/s^2$.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

Die Grössenordnung der gemessenen und simulierten Horizontal-Beschleunigungs-Werte für die BB sind durchwegs etwa eine Grössenordnung kleiner als die Beschleunigungen, die typischerweise in Bussen und Trams im normalen Betrieb auftreten (bis zu 3 m/s^2). Dies wird bestätigt durch die Beobachtung, dass sich während der Messungen der Rollstuhl auch bei gelöster Feststellbremse relativ zur Kabine nicht wesentlich bewegt hat. Für eine Sicherheitsbremsung nähern sich die Werte zwar denjenigen in Trams an, liegen aber immer noch deutlich unterhalb der dort als kritisch betrachteten Werte (cf. Tabelle 1).

Es kann also davon ausgegangen werden, dass für eine rollstuhlfahrende Person in der getesteten Konfiguration (ohne Kontakt zur Kabinenwand) im normalen Betrieb kein Risiko durch Kippen oder unbeabsichtigte Bewegungen des Rollstuhles besteht. Bei einer Positionierung in Falllinie der Aufhängung wären sogar noch kleinere Längs-Beschleunigungen zu erwarten (siehe theoretische Berechnungen), sodass diese Positionierung für diesen Lastfall auch als sicher betrachtet werden kann.

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

8 Schlussfolgerungen


Bei jeder Geschwindigkeitsänderung wird die Kabine einer Luftseilbahn mehr oder weniger stark in Längsrichtung ins Pendeln geraten. Wir haben die dabei auf einen Rollstuhl (mit darauf sitzender Person) wirkenden Beschleunigungen berechnet und mittels numerischer Berechnungen verifiziert und erweitert. Wenn man die Kabine als ungedämpftes mathematisches Pendel modelliert, treten in dessen Schwerpunkt nur Beschleunigungen auf, welche parallel zur Linie Aufhängung-Schwerpunkt ausgerichtet sind. Ein in diesem Punkt liegender Tennisball würde sich daher nicht bewegen, auch wenn die Kabine über den Aufhänge-Punkt beschleunigt oder gebremst wird. Tatsächlich befinden sich die Passagiere aber auf dem Kabinenboden, weswegen sie in Längsrichtung beschleunigt werden. Betragsmässig sind diese Beschleunigungen, unter Annahme realistischer Dimensionen und Verzögerungswerte, allerdings relativ klein und können einen Rollstuhl nicht aus seiner Ruhelage bewegen.

Wir konnten anhand von Versuchen auf der Säntisbahn und auf der Felsenegg-Bahn zeigen, dass man die Bremsen des Rollstuhls sogar lösen kann, ohne dass dieser sich bei einer Betriebsbremsung mehr als einige Millimeter bewegt. Mittels numerischer Modellierungen konnten wir einerseits analytisch schwierig zu berechnende Effekte wie die Dämpfung der Pendelbewegung einrechnen, andererseits konnten wir das anhand der obengenannten Versuche bei Betriebsbremsung validierte Modell auch auf eine Sicherheitsbremsung erweitert. Auch unter diesen Bedingungen wurden die kritischen Beschleunigungen, welche einen Rollstuhl aus seiner Ruhelage bewegen könnten, nicht überschritten. Allerdings nähern sich die unter ungünstigen Bedingungen zu erwartenden Werte mit 0.9 m/s^2 der kritischen Beschleunigung für Rutschen vorwärts, rund 1.0 m^2 an. Im Hinblick auf die Positionierung des Rollstuhls darf hier nicht vergessen werden, dass die Beschleunigungen in beide Richtungen hin- und herschwingen. Ein instabil gewordener Rollstuhl würde sich somit abwechselnd zur Kabinenmitte und wieder zur Vorder- oder Rückwand hin bewegen.

Insgesamt ergibt sich aber, dass unter normalen Bedingungen und auch unter angenommenen, deutlich stärkeren Seilbeschleunigungen (Nothalt Sicherheitsbremse an ungünstiger Stelle) ein Rollstuhl während des Pendelvorgangs kaum instabil werden wird.

Kollisionen mit Leitvorrichtungen beim Einfahren in Stationen schätzen wir als irrelevant ein, weil die dabei entstehenden Geschwindigkeitsänderungen sehr klein sind und den Rollstuhl höchstens um einige mm bewegen würden.


Wir haben auch andere Lastfälle untersucht. Eine Seilbahnkabine kann, hauptsächlich durch Windeinfluss, aus ihrer normalen Lage ausgelenkt werden. Wenn man die Auslenkungswinkel unterstellt, die durch die Normen (allerdings aufgrund anderer Überlegungen) gefordert werden, kommt man auf Werte für die entgegen der Auslenkung wirkenden Beschleunigungen welche die Stabilitätskriterien überschreiten. Wenn die Kabine beim Passieren einer Stütze stark genug ausgelenkt wird, kann sie zusätzlich gegen Leitvorrichtungen (sog. Abweiser) stossen. Dabei treten Beschleunigungen auf, welche je nach Anprallgeschwindigkeit durchaus auch kritisch werden können. Um mit einem Abweiser zu kollidieren, muss die Kabine aber vorher schon stark ausgelenkt worden sein. Die daraus entstehenden Risiken übersteigen da-

	Titel: Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum: 2022-11-30	
	Autoren: mhm, ak, lt	Vis.: kus	Anzahl Seiten: 44	

bei diejenigen der eigentlichen Kollision, so dass im Wesentlichen lediglich die Auslenkung durch Wind berücksichtigt werden muss. Diese Auslenkung kann prinzipiell in jede Richtung erfolgen, so dass hieraus keine „Idealposition“ für den Rollstuhl abgeleitet werden kann.

Wenn, zum Beispiel durch Überlast, die Kabine am Boden streift oder mit Objekten kollidiert, entsteht ebenfalls eine Auslenkung. Diese kann kritische Ausmasse annehmen, wie dies offenbar beim in [6] beschriebenen Ereignis geschehen ist. Anders als bei den oben diskutierten Lastfällen entstehen hier immer Beschleunigungen des Rollstuhls in Fahrtrichtung. Hier wäre also eine Positionierung wie z.B. im Tram uneingeschränkt zu empfehlen.

Ereignisse, welche dazu führen könnten, dass ein in einer Luftseilbahnkabine transportierter Rollstuhl mit darauf sitzender Person instabil werden kann, sind selten, wenn auch nicht ausgeschlossen. In der Ereignisdatenbank des BAV haben wir in den vergangenen knapp 22 Jahren lediglich etwa zwei solcher Ereignisse pro Jahr gezählt. Hierbei sind Ereignisse, bei welchen z.B. aufgrund Wettereinfluss die Bahn für Passagiere gesperrt war und lediglich Personal in der Kabine war, mitgezählt. Es gibt vermutlich eine gewisse Dunkelziffer, weil Ereignisse, bei welchen Passagiere stürzen, aber nicht verletzt werden und auch kein Sachschaden entsteht, nicht meldepflichtig sind.

	Titel:	Sichere Platzierung von Rollstühlen in Luftseilbahnen		Datum:	2022-11-30	
	Autoren:	mhm, ak, lt	Vis.:	kus	Anzahl Seiten:	44 Seite: 40

9 Empfehlungen

Die Positionierung des Rollstuhls entgegen der Fahrtrichtung, mit den Hinterrädern bündig an einer Rückhaltevorrichtung (Wand), kann auch aufgrund der in diesem Projekt erarbeiteten neuen Erkenntnisse als die sicherste Position bezeichnet werden. Wenn Rollstuhlfahrende in Notsituationen trotz erwarteten seitlichen Windeinflusses transportiert werden müssen, sollte der Rollstuhl wenn möglich in der dem Wind zugewandten in Fahrtrichtung vorderen Ecke stehen. Weil Beschleunigungen aufgrund Windeinflusses und auch aufgrund Pendelns in alle Richtungen auftreten könnten, ist eine Festhaltungsmöglichkeit seitlich an der Wand der Kabine empfehlenswert.

Zu bedenken ist neben den oben ausführlich diskutierten physikalischen Einwirkungen selbst verständlich auch das subjektive Empfinden der Rollstuhlfahrenden. Auch hier gehen wir davon aus, dass eine Position ähnlich wie z.B. in Tram und Bus, d.h. entgegen der Fahrtrichtung bündig an einer Rückhaltevorrichtung, empfehlenswert ist.

ANHANG

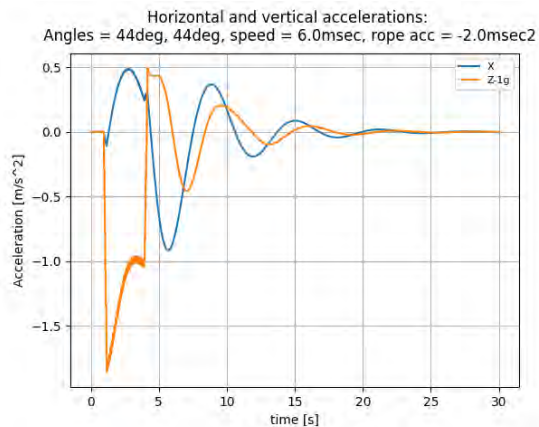
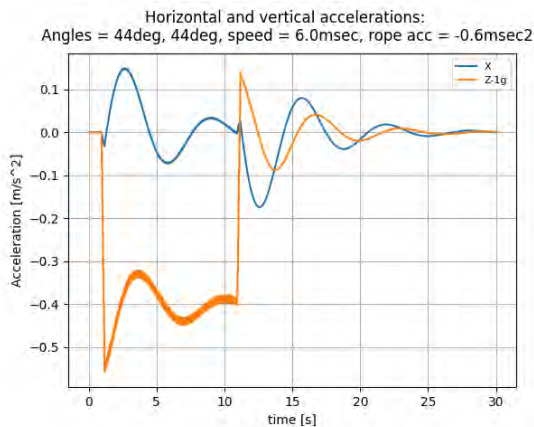
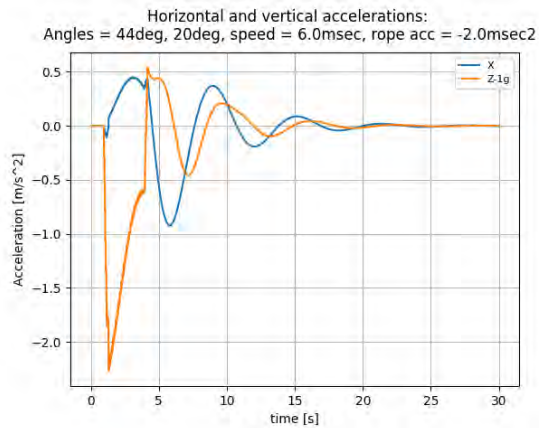
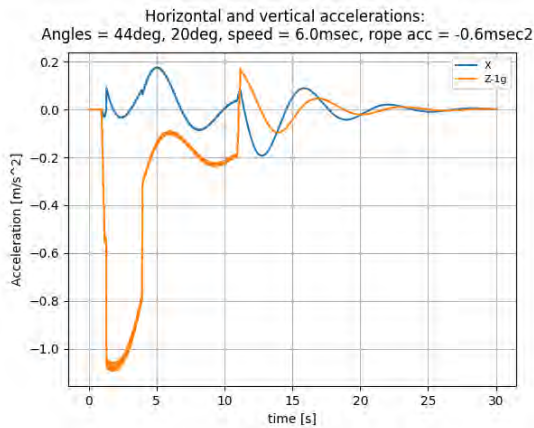
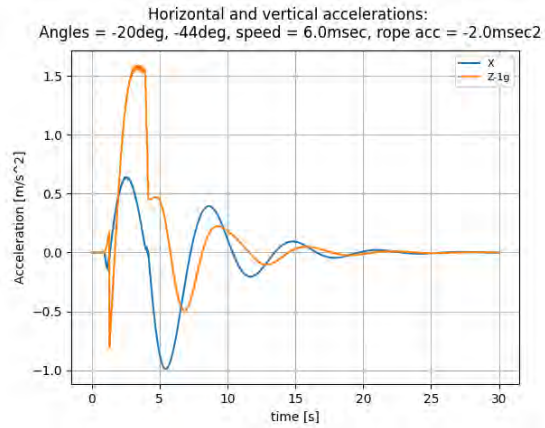
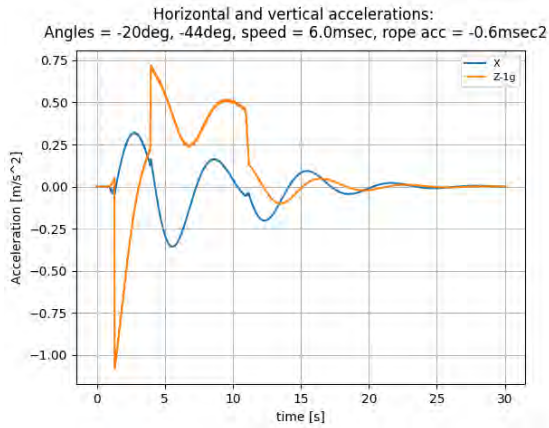
A-1. Messresultate Reibungskoeffizienten

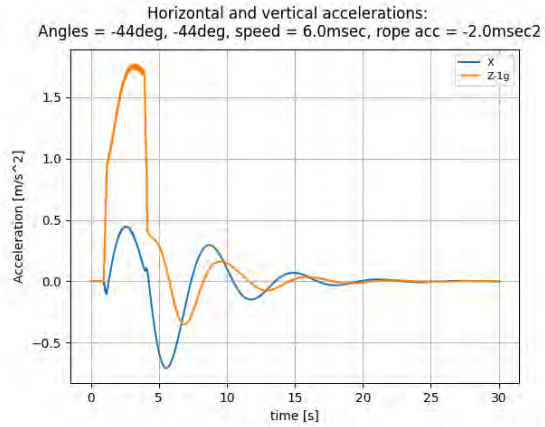
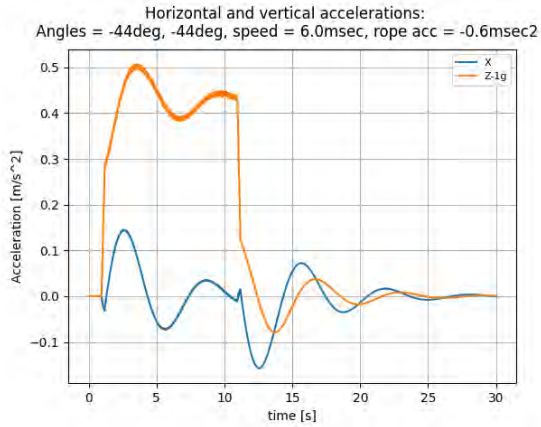
Tabelle 10: Resultate der Reibungsmessungen. Kraft = Gleitreibungskraft in Newton, SA = Standardabweichung. Während bei der Ausrichtung „Vorwärts“ die direkt gemessene Kraft angegeben ist, wurde der Reibungskoeffizient mithilfe der Formel in Kapitel 6.4 umgerechnet.

Ver- such	Belag	Ausrichtung	Nass	Räder auf Boden	Kraft [N] ± SA	Reibungs- koeffizient ± SA
1.1	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Nein	4	169 ± 9.7	0.35 ± 0.02
1.2	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Nein	4	188 ± 17	0.41 ± 0.04
1.3	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Nein	4	174 ± 6.8	0.37 ± 0.01
2.1	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Ja	4	168 ± 4.4	0.35 ± 0.01
2.2	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Ja	4	181 ± 25.6	0.39 ± 0.06
2.3	Altro Stronghold TM 30	Vorwärts	Ja	4	174 ± 5.7	0.37 ± 0.01
3.1	Altro Stronghold TM 30	Quer	Nein	4	372 ± 10.5	0.4 ± 0.01
3.2	Altro Stronghold TM 30	Quer	Nein	4	336 ± 10.3	0.36 ± 0.01
4.1	Altro Stronghold TM 30	Quer	Nein	2	432 ± 26	0.47 ± 0.03
4.2	Altro Stronghold TM 30	Quer	Nein	2	461 ± 9	0.5 ± 0.01
4.3	Altro Stronghold TM 30	Quer	Nein	2	460 ± 8.7	0.5 ± 0.01
5.1	Altro Stronghold TM 30	Quer	Ja	4	380 ± 15.7	0.41 ± 0.02
5.2	Altro Stronghold TM 30	Quer	Ja	4	351 ± 7.4	0.38 ± 0.01
6.1	Altro Stronghold TM 30	Quer	Ja	2	461 ± 24.8	0.5 ± 0.03
6.2	Altro Stronghold TM 30	Quer	Ja	2	439 ± 13	0.48 ± 0.01
7.1	Altro Walkway TM 20	Vorwärts	Nein	4	172 ± 6.6	0.36 ± 0.01
7.2	Altro Walkway TM 20	Vorwärts	Nein	4	181 ± 3.6	0.39 ± 0.01
8.1	Altro Walkway TM 20	Quer	Nein	4	329 ± 16.6	0.36 ± 0.02
8.2	Altro Walkway TM 20	Quer	Nein	4	323 ± 9.9	0.35 ± 0.01
9.1	Altro Walkway TM 20	Quer	Nein	2	453 ± 20.2	0.49 ± 0.02
9.2	Altro Walkway TM 20	Quer	Nein	2	411 ± 17.2	0.45 ± 0.02
10.1	Altro Walkway TM 20	Quer	Ja	4	270 ± 7.9	0.29 ± 0.01
10.2	Altro Walkway TM 20	Quer	Ja	4	300 ± 13.6	0.33 ± 0.01
10.3	Altro Walkway TM 20	Quer	Ja	4	287 ± 6.4	0.31 ± 0.01
11.1	Altro Walkway TM 20	Quer	Ja	2	397 ± 15.1	0.43 ± 0.02
11.2	Altro Walkway TM 20	Quer	Ja	2	397 ± 31.1	0.43 ± 0.03
12.1	Altro Walkway TM 20	Vorwärts	Ja	4	133 ± 4.8	0.26 ± 0.01
12.2	Altro Walkway TM 20	Vorwärts	Ja	4	122 ± 7.3	0.23 ± 0.01
13.1	Riffel	Vorwärts	Nein	4	132 ± 15.8	0.25 ± 0.03
13.2	Riffel	Vorwärts	Nein	4	129 ± 10.4	0.25 ± 0.02
14.1	Riffel	Quer	Nein	4	347 ± 21.7	0.38 ± 0.02
14.2	Riffel	Quer	Nein	4	347 ± 10.7	0.38 ± 0.01
15.1	Riffel	Quer	Nein	2	503 ± 4.2	0.55 ± 0
16.1	Riffel	Quer	Ja	2	506.5 ± 0.7	0.55 ± 0
17.1	Riffel	Quer	Ja	4	310 ± 22.2	0.34 ± 0.02
17.2	Riffel	Quer	Ja	4	321 ± 32.3	0.35 ± 0.04
18.1	Riffel	Vorwärts	Ja	4	121 ± 10.7	0.23 ± 0.02
18.2	Riffel	Vorwärts	Ja	4	134 ± 10.5	0.26 ± 0.02

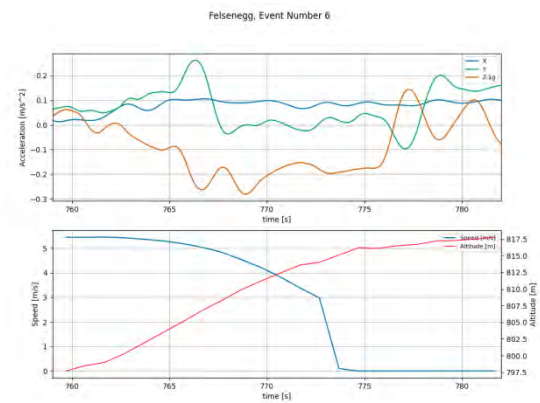
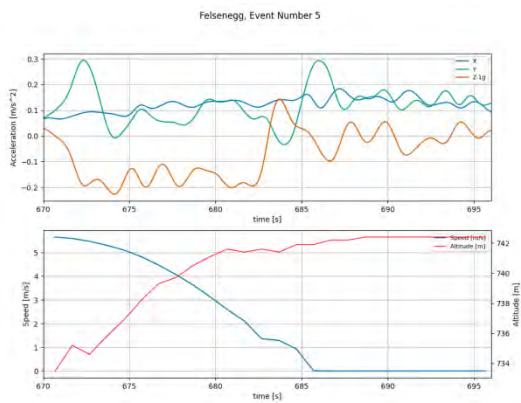
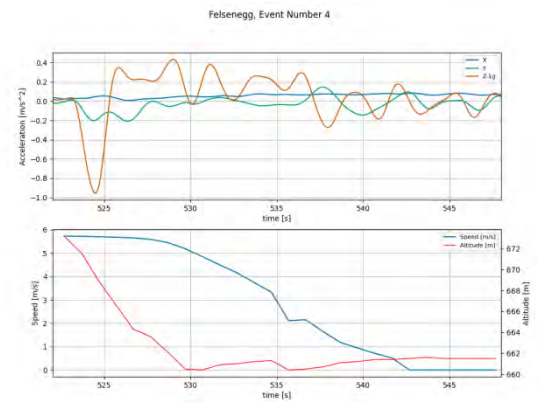
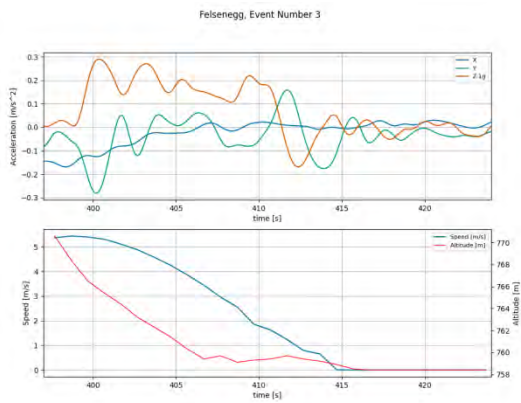
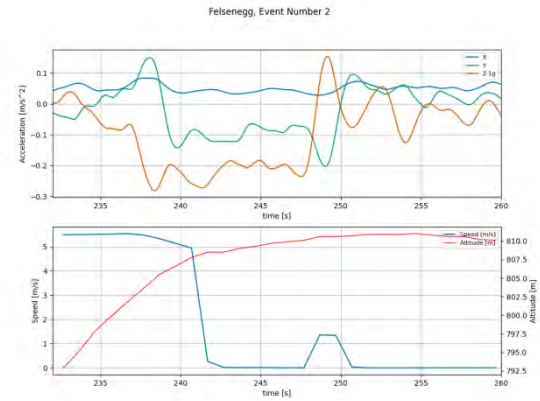
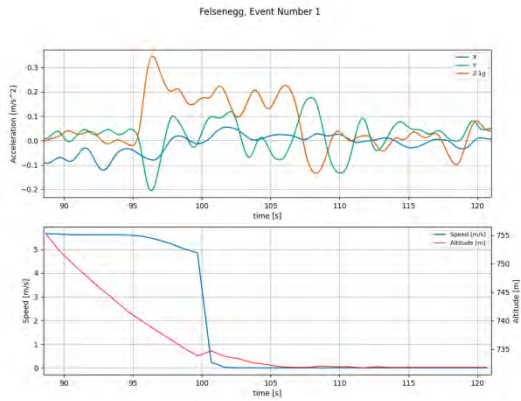
A-2. Plots aller simulierten Ereignisse

Die unten dargestellten Plots beziehen sich auf die Simulation des Pendelns mit den Parametern der Säntisbahn. Die Steigungsänderung von 44° auf 22° entspricht derjenigen der Säntisbahn beim Überfahren der Stütze 1.

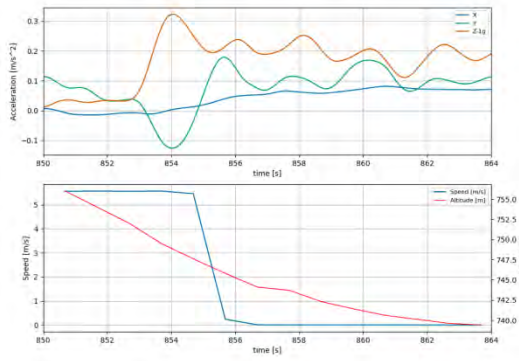




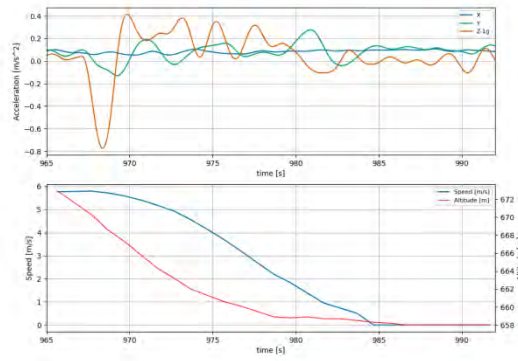
A-3. Plots aller gemessenen Ereignisse



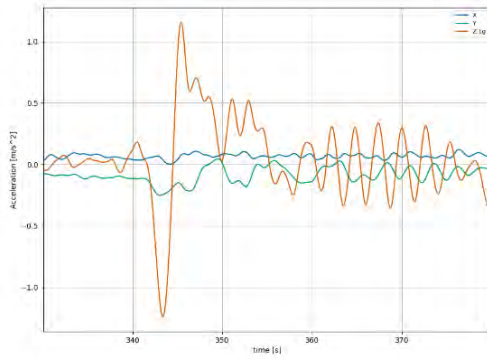
Felsenegg, Event Number 7



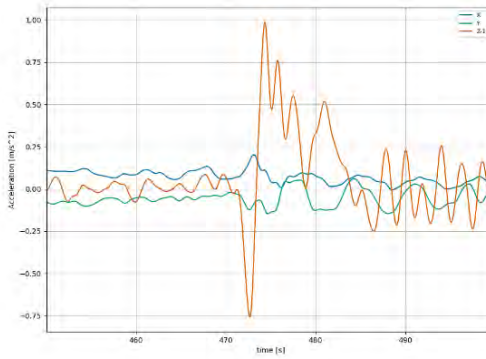
Felsenegg, Event Number 8



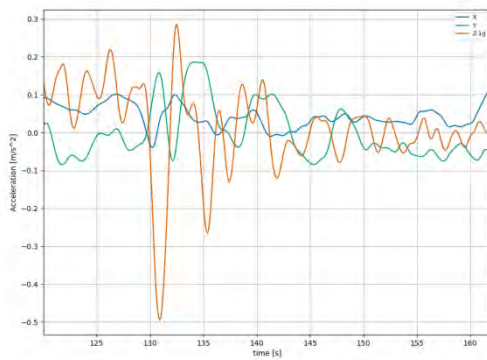
Saentis, event at time 19:08



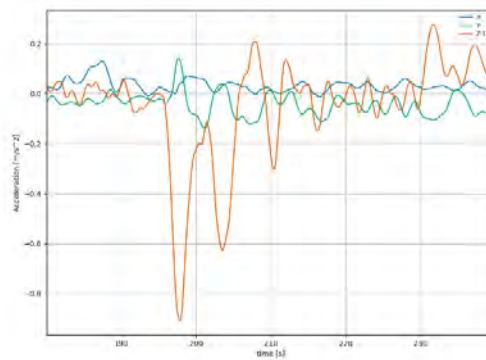
Saentis, event at time 19:10



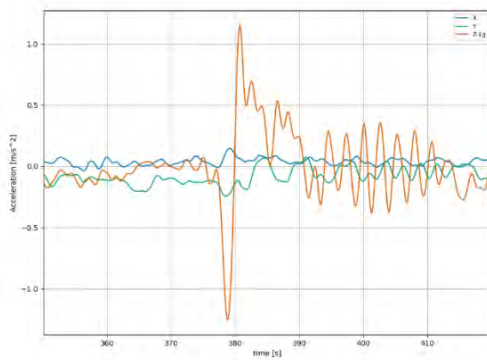
Saentis, event at time 19:14



Saentis, event at time 19:16



Saentis, event at time 19:19



Saentis, event at time 19:21

