

Untersuchungsbericht
zur Sicherheit
Rollstuhlzugang bei Bahnperrons
mit Längsneigungen > 6% bis ≤ 18%

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

Hauptverfasser: Anton Scheidegger
antwan@bluewin.ch
062 758 16 22

Version 1.0

20. Juli 2022

Inhaltsverzeichnis

1.	Gegenstand der Aufgabe resp. Untersuchung	3
2	Untersuchungsbereich	4
3	Empfehlungen	5
4	Lösungsansatz der Untersuchung	9
5	System Mensch im Rollstuhl als Einheit.....	9
6	Rollstuhlklassifikation für vorliegende Problemstellung	10
7	Systemgewichte	12
7.1	Mensch – Elektrorollstuhl	12
7.2	Mensch – Handrollstuhl	12
8	Gefällsparameter von Perronanlagen	13
8.1	Falllinie	15
9	Referenz-Standard-Rollstuhl	18
10	Rollstuhlstabilität	20
10.1	Statische Stabilität	20
10.2	Dynamische Rollstuhlstabilität	20
10.3	Dynamische Stabilität von Handrollstühlen	20
10.4	Lenkung Rollstühle	20
10.5	Rutschgefahr	21
11	Hangabtriebskräfte	24
12	Schiebekräfte des Menschen	25
13	Theoretischer Kraftaufwand beim Befahren des Perrons	27
13.1	In Längsrichtung mit konstanter Geschwindigkeit	27
13.2	Fahrt quer zur Längsrichtung mit konstanter Geschwindigkeit ...	28
13.3	Vergleich Rechendaten mit Messdaten	29
14	Schnittstellengestaltung Perron – Fahrzeug	30
15	Handrollstuhlausrüstung	31
16	Hilfsperson und Kipp- oder Sturzgefahr	32
Anhang: AGU Bericht		33 - 42
Kraftmessungen bei Rollstuhlhilfestellungen bei Perronneigungen > 6% bis ≤ 18%		

1. Gegenstand der Aufgabe resp. Untersuchung

Punkt 2.2 des Pflichtenheftes

„Für Rollstuhlfahrende ist bei Perrons in Längsneigung, bei denen die maximale Neigung der Falllinie $> 60\text{‰}$ bis 120‰ beträgt, beim Ein- und Ausstieg Hilfestellung durch eine Person des Unternehmens zu gewährleisten, da aus einer Perron-Längsneigung eine Querneigung des Ein-/Ausstiegs resultiert.

Bei Perrons in Längsneigung, bei denen die maximale maximale Neigung der Falllinie $> 120\text{‰}$ bis 180‰ beträgt, ist die Hilfestellung durch zwei Personen des Unternehmens zu gewährleisten.

Die Benutzung von mobilen Liften für den Ein- und Ausstieg von Rollstühlen ist bei Perrons in Längsneigung mit einer maximalen Neigung der Falllinie

$> 60\text{‰}$ nicht zulässig. Die Benutzung von Rollstuhlrampen ist bei Perrons in Längsneigung mit einer maximalen Neigung der Falllinie $> 60\text{‰}$ nur zulässig, wenn diese Rampe der Spaltüberbrückung und der Überwindung einer Höhendifferenz zwischen Perron und Fahrzeug von max. 50 mm dienen.

Perrons in Längsneigung mit einer maximalen Neigung der Falllinie $> 180\text{‰}$ sind für Rollstühle nicht benutzbar. Es ist eine externe Ersatzlösung anzubieten.“

2. Untersuchungsbereich

Beförderung von Personen in Rollstühlen in schienengebundenen Bergbahnen von und nach Haltestellen mit Perronlängsneigungen $> 6 \%$

- von der Haltestellenankunft bis Eintrittsplattform Fahrzeug
 - Befahren von Perronlängsneigungen $> 6 \% \leq 12 \%$
 - Längsrichtung, auf- resp. abwärts
 - Querrichtung
 - Befahren von Perronlängsneigungen $> 12 \% \leq 18 \%$
 - Längsrichtung, auf- resp. abwärts
 - Querrichtung
- Befahren der niveaugleichen* Schnittstelle Perron – Fahrzeugeintrittsplattform
 - * niveaugleich erlaubt zwischen Perron und Fahrzeugeintrittsplattform eine max. Höhendifferenz von 50 mm.

3. Empfehlungen

Auf geneigten / schiefen Ebenen mit Neigungen $> 6\%$ und $\leq 18\%$ wirken Hangabtriebskräfte die wesentlich grösser sind als die Rollwiderstandskräfte. daher:

Auf geneigten / schiefen Ebenen ist Schieben sicherer als Ziehen

Begründung dieser Aussage:

Die schiebende Hilfsperson befindet sich unterhalb der Kraftwirkungsrichtung und der Rollstuhl kann nicht entgleiten.

Die ziehende Hilfsperson befindet sich oberhalb der Kraftwirkungsrichtung und bei einem Krafterleitungsverlust kann der Rollstuhl entgleiten.

Verantwortung für die Sicherstellung der statischen und dynamischen Rollstuhlstabilität

Rollstuhlstabilität statisch und dynamisch Beibehaltung der Sitzhaltung der Person im Rollstuhl (Rumpfstabilität)	
Handrollstuhl	Elektrollstuhl
Die statische und dynamische Rollstuhlstabilität wird durch die Hilfsperson gewährleistet.	Für das sichere Fahren ist primär die Person im Rollstuhl oder deren allfällige Begleitperson zuständig.
<p>Die Beibehaltung der Sitzhaltung (Rumpfstabilität) obliegt der Person im Rollstuhl.</p> <p>Sie gibt allenfalls der Hilfsperson Anweisung, welche Rollstuhlrichtungen zu vermeiden sind</p>	<p>Bei allfälligen Vorwärtsfahrten abwärts in Perronbereichen mit Längsneigung zwischen $12\% \leq 18\%$ sind abrupte Richtungswechsel von 90° infolge Kippgefahr* zu vermeiden.</p> <p>* Überlagerung der Hangabtriebsbeschleunigung mit der Radialbeschleunigung</p>
Das Manöver des aktiven Kippens des Rollstuhles nach hinten durch die Hilfsperson bedarf einerseits der Kenntnis der Hilfsperson und	Warnen bei Kipp- oder Sturzgefahr Die Hilfsperson darf zu keinem Zeitpunkt in die Steuereinheit des

andererseits des Einverständnisses der Person im Rollstuhl	Rollstuhles eingreifen
---	------------------------

- Zum Schieben und Ziehen sind alle Rahmenteile und solche Teile, die fest mit dem Rahmen verbunden sind, erlaubt. Lassen sie sich diese Teile/Punkte primär durch die Person im Rollstuhl oder sekundär deren Begleitperson zeigen.
- Aus Sicherheitsgründen* sollen Personen im Rollstuhl die Perronbereiche mit Längsneigungen $> 6\%$ bis $\leq 18\%$ nur in Anwesenheit und unter Aufsicht von Hilfspersonen der Transportunternehmung befahren.
- Hierfür ist ein Warteort / Übernahmeort zu kennzeichnen, an welchem die Rollstuhlfahrenden auf das Hilfspersonal des Unternehmens warten oder beim Auslad geführt werden. Dieser Warteort kann auf oder ausserhalb der Perronzone angeordnet sein. Diese Fläche soll eine Falllinienneigung von max. 12% aufweisen.
- Hilfspersonen, die nicht in unmittelbarem Kontakt mit dem Rollstuhl sind, positionieren sich immer talseitig zum Rollstuhl.
- In Perronlängsbereichen $> 12\% \leq 18\%$ hat eine der beiden Hilfspersonen auch beim Stillstehen beide Hände immer am Rollstuhl.
- Hilfspersonen, die nicht in unmittelbarem Kontakt mit dem Rollstuhl sind, positionieren sich immer talseitig zum Rollstuhl.
- In Perronlängsbereichen $> 12\% \leq 18\%$ hat eine der beiden Hilfspersonen auch beim Stillstehen beide Hände immer am Rollstuhl.
- Auf Perronlängsbereichen $> 12\% \leq 18\%$ sind der Rollstuhl immer mit dem Rücken talseitig zu befahren.
- Falls Perronlängsgefälle $> 12\% \leq 18\%$ beim Rollstuhlzugang befahren werden müssen, und sich an diesen Bereich talseitig Perronlängsgefälle von $> 18\%$ anschliessen, so ist dieser Bereich zur Minimierung eines Unfallrisikos mit geeigneten Vorkehrungen abzusichern

- In Perronlängsbereichen $\leq 12\%$ darf der Rollstuhl abwärts vorwärts bewegt werden, wenn:
 - die Person im Rollstuhl einverstanden ist,
 - der Rollstuhl über Handgriffe oder gleichwertige Punkte verfügt, und diese kraftschlüssig mit dem Rollstuhlfahmen verbunden sind.
- Die Schnittstelle Perron-Fahrzeug muss so beschaffen sein, dass deren Befahren kaum wahrgenommen wird und beide Antriebsräder immer kraftschlüssigen Bodenkontakt haben.
- Hilfestellung beim Befahren von Perronlängsneigungen erfordern keine spezielle Technik. Es handelt sich um einen einfachen Schiebevorgang.
- Hilfestellung beim Befahren quer zur Perronlängsneigung und Schnittstellenbefahrung erfordert eine Technik die erprobt, erfahren und geübt und werden muss.
- * Sicherheitsgründe: fehlende Randaufbordung
 Perron mit Längsgefällen $> 6\%$ bis $\leq 18\%$ sind Rampen gleichzusetzen.
 Solche müssten gemäss SIA 500 mit einer Randaufbordung als Absturzsicherung versehen sein.
- Hilfspersonen, die nicht in unmittelbarem Kontakt mit dem Rollstuhl sind, positionieren sich immer talseitig zum Rollstuhl.
- In Perronlängsbereichen $> 12\% \leq 18\%$ hat eine der beiden Hilfspersonen auch beim Stillstehen beide Hände immer am Rollstuhl.
- Falls Perronlängsgefälle $> 12\% \leq 18\%$ beim Rollstuhlzugang befahren werden müssen, und sich an diesen Bereich talseitig Perronlängsgefälle von $> 18\%$ anschliessen, so ist dieser Bereich zur Minimierung eines Unfallrisikos mit geeigneten Vorkehrungen abzusichern
- Die Schnittstelle Perron-Fahrzeug muss so beschaffen sein, dass deren Befahren kaum wahrgenommen wird und beide Antriebsräder immer kraftschlüssigen Bodenkontakt haben.
- Hilfestellung beim Befahren von Perronlängsneigungen erfordern keine spezielle Technik. Es handelt sich um einen einfachen Schiebevorgang.
- Hilfestellung beim Befahren quer zur Perronlängsneigung und Schnittstellenbefahrung erfordert eine Technik die erprobt, erfahren und geübt und werden muss.

- * Sicherheitsgründe: fehlende Randaufbordung
Perron mit Längsgefällen $> 6\%$ bis $\leq 18\%$ sind Rampen
gleichzusetzen.
Solche müssten gemäss SIA 500 mit einer Randaufbordung als
Absturzsicherung versehen sein.

4. Lösungsansatz der Untersuchung

- Physikalische Berechnungen
 - Auf geneigter Ebene
 - Schiebekräfte
 - Drehmomente infolge Querneigungen zur Fahrriichtung
 - Zerlegung von Kräften
- Fahrversuche mit einem besetzten manuellen Standard-Rollstuhl der mit einem digitalen Kraftmessgerät versehen war.

5. System Mensch im Rollstuhl als Einheit

Der Rollstuhl dient als Ersatz resp. Ergänzung von reduzierten bis ausgefallenen Körperfunktionen. Er wird in der Fachsprache als ein orthopädisches Hilfsmittel bezeichnet, das der massgeschneiderten Anpassung an die individuellen körperlichen Gegebenheiten der Personen, die ihn verwenden, unter Berücksichtigung der Einsatzbereiche, bedarf.

Der Rollstuhl ist ein „Kleidungsstück“ der ihn benutzenden Person. Er soll bei Hilfestellungen durch Hilfspersonen nur mit Einwilligung der Benutzer an Stellen/Punkten angefasst werden, die primär von der nutzenden Person und sekundär von deren Begleitperson bezeichnet werden.

Von der Wohnung bis zur Teilhabe am öffentlichen Leben.

Im vorliegenden Falle, der Bereich der Benutzung von schienengebundenen Bergbahnen mit Perronlängsgefällen $> 6,1 \% \leq 18 \%$ mit Hilfestellung durch Hilfspersonal.

6. Rollstuhlklassifikation für vorliegende Problemstellung

Es gibt NICHT DEN Rollstuhl

Ausser bei den Standard- und Leichtgewichtsrollstühlen wird man nie zwei identische Rollstühle antreffen.

Die REHADAT.de verzeichnet aktuell (27.06.2022) ca. 350 Rollstuhlgrundtypen. Jeder dieser Grundtypen wird nutzerspezifisch angepasst und entsprechend ausgerüstet, wie zum Beispiel Sitzbreite, Schwerpunktlage, Radgrössen, Bereifung, usw.

vom Handrollstuhl zum Elektrorollstuhl und Scooter

- **Manuelle Rollstühle**

Diese Rollstühle werden manuell, das heisst durch die Körperkraft der Nutzenden via Greifringe oder deren Begleitperson bewegt

- Adaptivrollstuhlrollstuhl
- Standard- und Leichtgewichtsrollstuhl

- **Elektrorollstühle**

- hybrider Handrollstühle
- Antriebsunterstützung /-ergänzung
- an-/abkoppelbare Antriebe

- **Scooter**

- 3-rädrig (kippelig)
- 4-rädrig

Abgrenzung Rollstuhl versus Scooter

Scooter benötigen gegenüber Rollstühlen wesentlich grössere Stand- und vor allem grössere Manövrierräume

Wesentliche Unterscheidungsmerkmale

- Standflächenbedarf

Scooter überschreiten in der Regel die Grundrissflächendimension (Länge und Breite) von Hand- und Elektrorollstühlen gemäss Art. 5 der VböV.

- Manövrierfläche

Rollstühle werden über die Antriebsräder Richtungsgesteuert. Die Antriebsräder können gegenrichtig drehen, womit ein Drehen am Ort, sogenannte „Panzerdrehungen“ möglich sind.

Scooter verfügen über Lenkräder, die über einen Lenker oder Lenkrad angesteuert werden. Ihre Manövrierflächen übersteigen diejenige von Rollstühlen wesentlich.

- 3-rädrige Scooter sollten aus Sicherheitsgründen nicht zugelassen werden,

da ihre Stand- resp. Kippsicherheit infolge nur dreier Auflagepunkte wesentlich geringer ist, als diejenige von 4-rädrigen Scootern.

7. Systemgewichte

7.1 Mensch im Elektrorollstuhl

Gemäss Art.5 Abs. 1 VböV muss der Zugang mit Hilfsmitteln von bis zu 300 kg Gesamtgewicht (Systemmasse) gewährleistet sein.

Sieht man sich einige „Zuladungsdaten“ (Mensch plus allenfalls Gepäck) bei Elektrorollstuhlprospekten an, so liegen diese in einem Bereich von > 120 kg bis < 150 kg.

7.2 Mensch im Handrollstuhl

Bedingt durch die geringere mögliche Sitzbreite bei Handrollstühlen (der Sitz ist zwischen den beiden Antriebsrädern) gegenüber Elektrorollstühlen (der Sitz liegt in der Regel oberhalb der Antriebsräder) dürfte die Obergrenze von 150 kg „Zuladung“ bei Handrollstühlen in der Regel nicht erreicht werden.

Zieht man die Datengrundlage der Perzentile der Körpergewichte und der Hüftbreite im Sitzen hinzu, so scheint eine obere Systemgesamtmasse von 130 kg realistisch.

Das Körpergewicht männlicher Person im 95%- bis 99%-Perzentil liegt im Bereich von 100 kg bis 111 kg. Männer sind schwerer als Frauen.

Demgegenüber ist die Hüftbreite bei weiblichen sitzenden Personen grösser als bei Männern, und beträgt für die unbekleidete 99-Perzentil-Frau 460 mm.

Berücksichtigt man noch die Bekleidung, so ist mit einer Sitzbreite von 500 mm auszugehen, und diese Breite dürfte noch innerhalb der max. zulässigen Rollstuhlgesamtbreite von 700 mm unterzubringen sein.

8. Gefällsparameter von Perronlagen

8.1 Perronlängsneigung + Perronquerneigung = Falllinienneigung

Bezugsebene für Gefälleangaben ist eine horizontale Ebene.

Die Angabe erfolgt in der Regel in Promillen (‰) oder Prozenten (%). Angabe in Winkelgraden sind im Bauwesen nicht üblich.

In der Regel beziehen sich die Perronlängsgefälle auf die Perronkante, die als eine der Gleislage parallele Abstandslinie ausgeführt wird.

Aus Gründen des Ableitens von Meteorwasser werden sie zusätzlich mit einem Quergefälle von max. 2% ausgeführt. Dieses Quergefälle kann zur Perronkante hin oder von der Perronkante weg orientiert sein.

Aus den Parametern des Längs- und Quergefalles können das Fallliniengefälle und die Falllinienrichtung bezogen auf die Perronkante berechnet werden.

Grundlage der Rechnungsbeziehungen ist das rechtwinklige Dreieck mit dem Satz des Pythagoras.

Im Baubereich erfolgen die Umrechnungen mit Prozent- oder Promillewerten.

Die Umrechnung mit Prozent- resp. Promillewerten ist zulässig, wenn die Sinus-Winkelwerte der Gefällsrichtungen geringe Abweichungen von den Prozent- resp. Promillewerten aufweisen.

$a^2 + b^2 = c^2$ c Gefälle der Falllinie in % oder ‰
a, b Gefälle Perronkante in % oder ‰ und
 Quergefälle des Perrons in % oder ‰

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Rechenbeispiel für Berechnung der Falllinie c:

- Längsgefälle 15%
- Quergefälle 2%

$$c = \sqrt{15^2 + 2^2} = 15,13 \quad \text{d.h. die Falllinie hat ein Gefälle von 15,13 \%}$$

Rechenbeispiel für Berechnung des Perronlängsgefälle

- Fallliniengefälle 15%

- Perronquergefälle 2%

$a = \sqrt{15^2 - 2^2} = 14,87$ d.h. das Perronlängsgefälle von 14,87%

8.2 Falllinie

Die steilste Tangente auf einem Punkt einer schiefen Fläche wird als Falllinie bezeichnet.

Sie gibt die für diesen Punkt die Richtung an, in welcher eine Kugel oder Ball wegrollt, oder Wasser auf einer benetzten Fläche abfließt.

Falllinien und Höhenlinien (Verbindungslinien von Punkten gleicher Höhe), oft auch als Schichtenlinien bezeichnet schneiden sich immer rechtwinklig.

Berechnung des Winkels α zwischen Perronkante und Falllinie

$\tan \alpha = a \div b$ (%-Gefälle kürzere Kathete \div %-Gefälle längere Kathete)

oder

$\cot \alpha = b \div a$ (%-Gefälle längere Kathete \div %-Gefälle kürzere Kathete)

Tabellen 1, 2:

Umrechnung Perronlängsgefälle in Fallliniengefälle und Winkel zwischen Falllinie und Perronkante bei einem Perronquergefälle von 2 %

Tabelle 1: Perronlängsgefälle $> 6 \% \leq 12 \%$

Perronlängsgefälle %	6,1	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
Perronquergefälle %	2,0						
Fallliniengefälle %	6,4	7,3	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2
Winkel α °	18,2	15,9	14,0	12,5	11,3	10,3	9,5

Tabelle 2: Perronlängsgefälle $> 12 \% \leq 18 \%$

Perronlängsgefälle	12,1	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
Perronquergefälle	2,0						
Fallliniengefälle	12,3	13,2	14,1	15,1	16,1	17,1	18,1
Winkel α °	9,4	8,7	8,1	7,6	7,1	6,7	6,3

Tabellen 3,4:

Umrechnung Fallliniengefälle in Perronlängsgefälle und Winkel zwischen Falllinie und Perronkante bei einem Perronquergefälle von 2 %

Tabelle 3: Fallliniengefälle > 6 % ≤ 12 %

Fallliniengefälle	6,1	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
Perronquergefälle	2,0						
Perronlängsgefälle	5,8	6,7	7,7	8,8	9,8	10,8	11,8
Winkel α °	19,0	16,6	14,6	12,8	11,5	10,5	9,6

Tabelle 4: Fallliniengefälle > 12 % ≤ 18 %

Fallliniengefälle	12,1	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
Perronquergefälle	2,0						
Perronlängsgefälle	12,0	12,8	13,9	14,9	15,9	16,9	17,9
Winkel α °	9,5	8,9	8,2	7,6	7,2	6,7	6,4

Die Tabellen zeigen, dass im Bereich des Perronquergefälles von 2 % kombiniert mit Perronlängsgefällen von $\geq 6,1$ % bis $\leq 18,0$ % Perronlängsgefälle und Fallliniengefälle theoretisch nur wenig voneinander abweichen. Abweichungen, die in der Genauigkeit von Einzelmessungen nicht erkennbar sind.

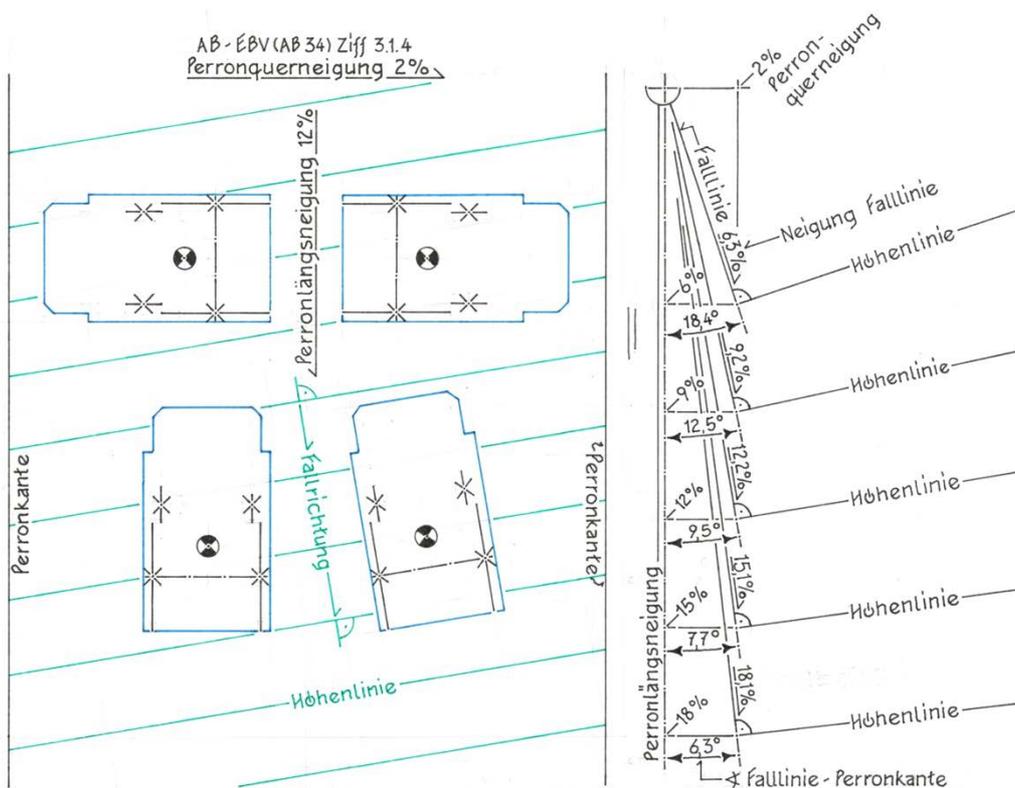


Abbildung 1: Fallrichtungen, Falllinienneigung, Höhenlinien, Perronlängs- und Perronquerneigungen
 linke Seite: Grundrissbeispiel Verlauf und Äquidistanz 50 mm der Höhenlinien und Fallrichtung bei Perronlängsneigung 12 % und Perronquerneigung 2 %
 rechte Seite: Datenkombinationen für Perronlängsneigungen 6 %, 9 %, 12 %, 15 % und 18 % bei Perronquerneigung 2 %

9. Referenz-Standard-Rollstuhl

Der im folgenden für die Berechnungen verwendete Referenz-Rollstuhl ist ein Handrollstuhl des Typs „Standard-“ oder „Transport-“ Rollstuhl.

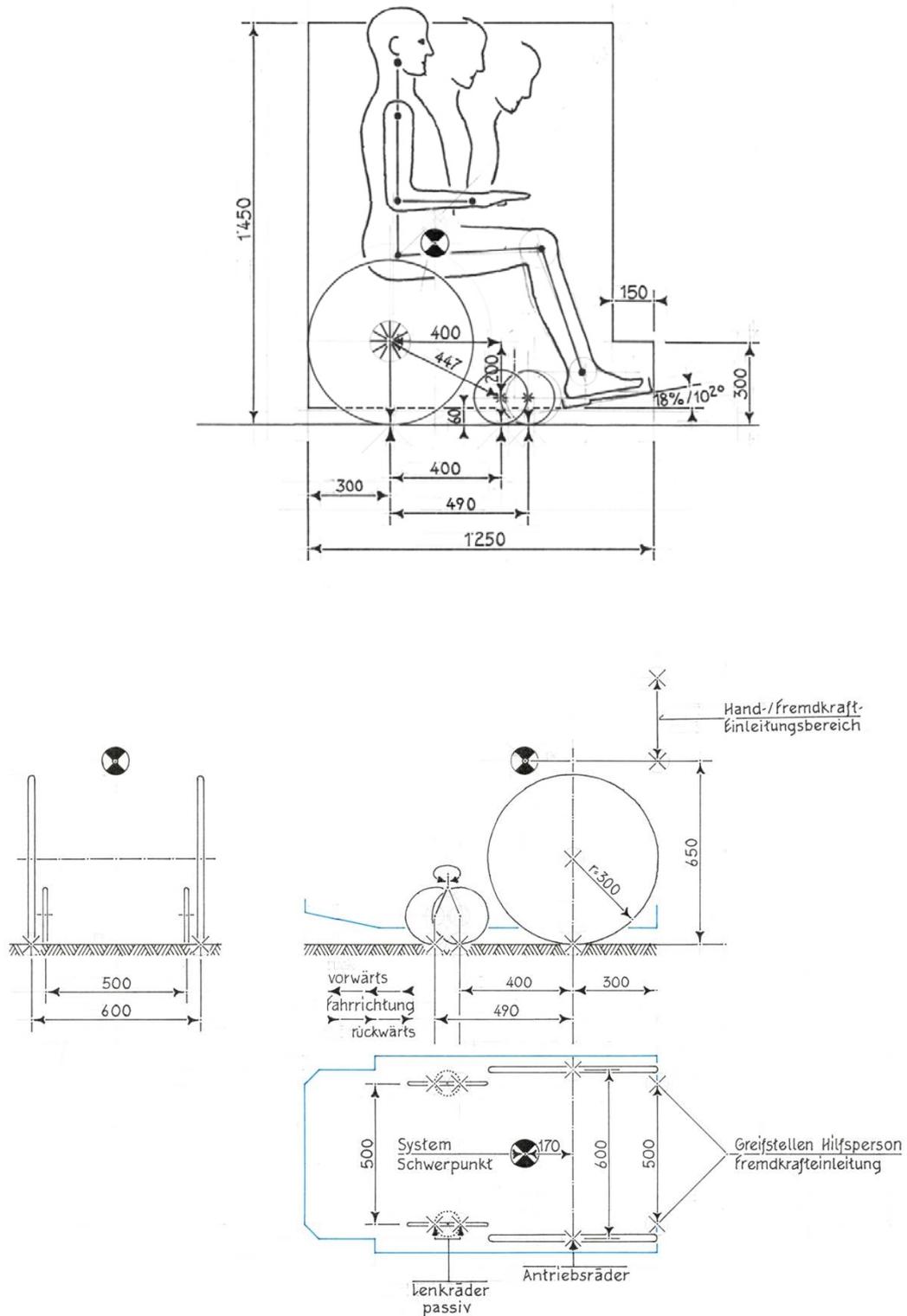


Abbildung 2: Referenzrollstuhl als Grundlage der Rechnungen

Tabelle 5: Daten des Referenz-Standard-Rollstuhl

Radstand	400 mm
Spurbreite Hinterachse	600 mm
Spurbreite Vorderachse	500 mm
Durchmesser Hinterrad	600 mm
Durchmesser Vorderrad	200 mm
Nachlauf Vorderrad	45 mm
Schwerpunkt vor Hinterachse	170 mm
Schwerpunkt über Boden	650 mm
Gewicht resp. Masse	100 kg

Die Berechnungen erfolgen mit einem Handrollstuhl, da dieser durch die Hilfsperson oder durch zwei Hilfspersonen in den untersuchten Perronbereichen aus Gründen der Sicherheit und der erforderlichen Kräfte bewegt werden muss.

Elektrorollstühle haben einen tieferen Systemschwerpunktlage, da die Antriebseinheit und der Energiespeicher in der Regel unterhalb der Sitzfläche angeordnet sind, und daher eine bessere Stabilität aufweisen.

Stellenwert der Rechnungen

„Es gibt nicht den Rollstuhl“ auch nicht bei den Handrollstühlen.

In der Realität kann jedes Mass variieren, und jede Massabweichung hat andere Werte zur Folge.

10. Rollstuhlstabilität

Die SN/EN 12184:1999 unterscheidet nach zwei Stabilitäten, statische Stabilität und dynamische Stabilität.

Die Stabilitätsgrenze ist nach dieser Norm jedes sichtbare Abheben aller bergauflaufenden Räder. D.h. es besteht kein Sicherheitsbereich, denn beim sichtbaren Abheben von bergauflaufenden Rädern ist es eigentlich schon zu spät, denn damit beginnt der Kippprozess, und der kann nur durch ein agiles reagieren der Person im Rollstuhl oder einer Hilfsperson verhindert werden.

10.1 Statische Stabilität

Statische Rollstuhlstabilität bezieht sich auf alle Richtungen eines stehenden Rollstuhles, und bezieht sich auf die Kippsituation.

In Abbildung 2 sind die Stabilitäten bei der Grenzneigung von 18 % für die drei Stabilitätsrichtungen seitwärts, vorwärts und rückwärts dargestellt. Das Lot fällt in keiner der Situation ausserhalb der durch die vier Räder definierten Aufstandebene.

Vorsicht:

Die Variante C hat eine geringe Sicherheit, die allenfalls durch am Rollstuhl rückseitig angehängtes Gepäck beansprucht oder gar überschritten werden kann.

10.2 Dynamische Rollstuhlstabilität

Unter die dynamische Rollstuhlstabilität fallen die folgenden Vorgänge:

- Anfahren vorwärts bergauf
- Anhalten vorwärts bergab

10.3 Dynamische Stabilität von Handrollstühlen

Die dynamische Stabilität von Handrollstühlen wird in der vorliegenden Untersuchung nicht thematisiert, da der Handrollstuhl mit der Kraft der Hilfsperson, also systemexterner Antrieb, bewegt wird.

10.4 Lenkung Rollstühle

Die Lenkung erfolgt durch das Drehen des gesamten Rollstuhles durch asymmetrische Krafteinleitung auf die Antriebsräder, über Handgriffe oder

Rahmenteile. Sie sind wenig Spurtreu. Neigungen quer zur Fahrtrichtung erfordern konstant Kompensation / Korrekturen via Antriebsräder, Handgriffe oder Rahmenteile

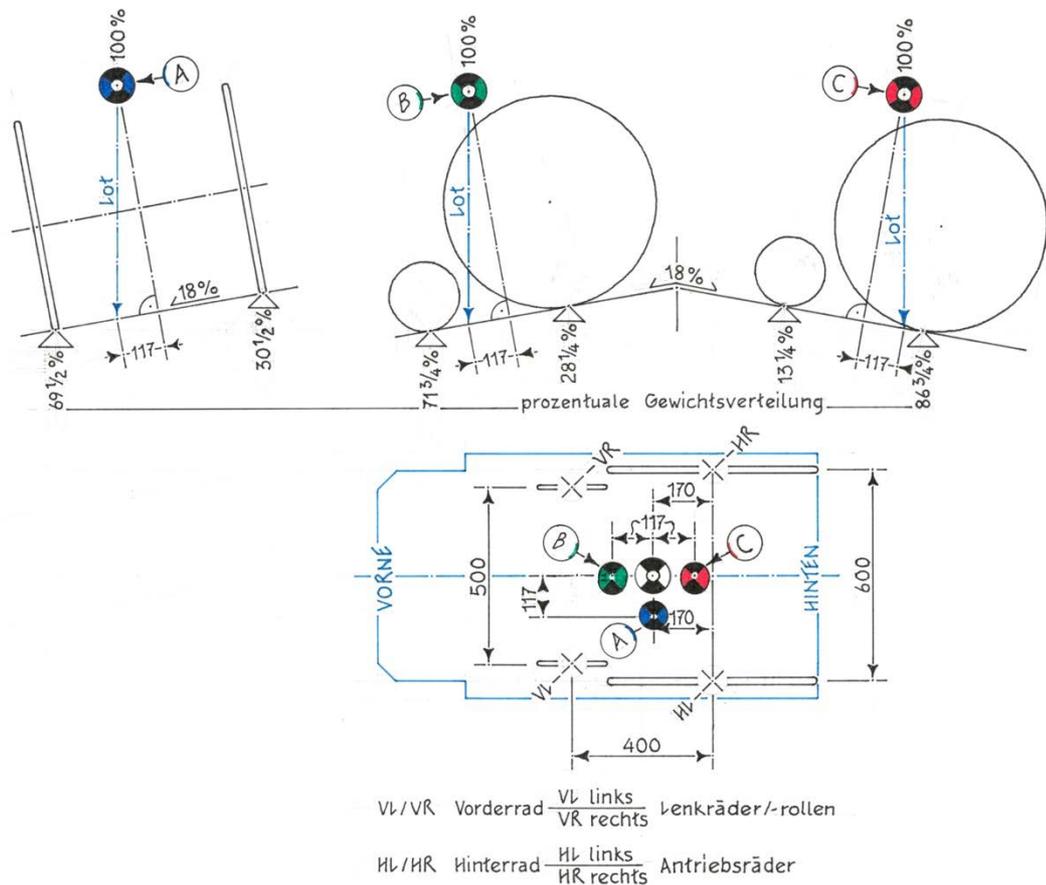


Abbildung 3: Statische Stabilität in Längs- und Querrichtung des Referenzrollstuhles bei einem Gefälle von 18 %

10.5 Rutschgefahr

Die Mechanik des in das Gleiten kommen eines stehenden Rollstuhles muss separat berücksichtigt werden.

Es ist auf den Umstand zurückzuführen, dass ein stehender Rollstuhl auf einer geneigten Fläche infolge der dadurch resultierenden Auflagerkräfteverteilung vom Stand ins Rutschen kommen kann.

Dieser Vorgang muss verhindert werden, da der Haftreibungskoeffizient wesentlich grösser ist als der Gleitreibungskoeffizient, und daher die Gleitreibung durch die im Rollstuhlsitzende Person nicht alleine gestoppt werden kann.

Tabelle 6; Minimal erforderlicher Haftreibungskoeffizient

		F _G Lastanteile in %		F _H	F _N	μ _H
		VR	HR	N	N	
18 %	10,20°	72	28	174	273	0,64
17 %	9,65°	70	30	165	289	0,57
16 %	9,09°	68	32	155	305	0,51
15 %	8,53°	67	33	146	321	0,46
14 %	7,97°	65	35	136	338	0,40
13 %	7,41°	64	36	127	354	0,36
12 %	6,84°	62	38	117	370	0,32

F_G Gewichtskraft

F_H Hangabtriebskraft

F_N Normalkraft

μ_H Reibungskoeffizient = F_H / F_N

VR Lastanteil Vorderachse

HR Lastanteil Hinterachse

Reibungskoeffizient (Kraftschlussbeiwert)

Es wird unterschieden nach Haftreibungskoeffizient (μ_H) und

Gleitreibungskoeffizient (μ_G)

Der Haftreibungskoeffizient ist immer grösser als der
Gleitreibungskoeffizient.

Das heisst: wird bei einem stehenden Objekt der Haftreibungskoeffizient überschritten so verzögert nur noch der Gleitreibungskoeffizient und das Objekt gerät in eine beschleunigende Bewegung, und kann nur noch durch eine äussere Kraft abgebremst werden.

Reibungskoeffiziente aus Tabellen sind immer nur ungefähre Angaben

Tabelle 7: Reibungskoeffizienten

		μ_H	μ_G
Autoreifen auf Beton	trocken	0,8	0,5
	nass	0,5	0,3
Autoreifen auf Asphalt		0,55	0,3
Gummi auf	Asphalt	0,7 – 0,8	0,5 – 0,6
	Beton	0,6 - 0,8	0,5 – 0,7

μ_H Haftreibungskoeffizient

μ_G Gleitreibungskoeffizient

Für Haftreibungskoeffizienten von Rollstuhlantriebsrädern liegen weder für Haftreibung noch Gleitreibung beglaubigte Werte vor. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass bei erforderlichen Haftreibungswerten grösser als 0,5 die Gefahr von Gleitbeginn besteht.

11. Hangabtriebskräfte

$$N = \sin \alpha \cdot g \cdot m$$

Die Hangabtriebskraft wirkt bei Stillstand und konstanter Geschwindigkeit

($v = 0$ oder konstant m/s) und

bei konstanter Fahrgeschwindigkeit ($a = 0 \text{ m/s}^2$)

v Geschwindigkeit m/s

a Beschleunigung m/s^2

Die Berechnung der Hangabtriebskräfte erfolgt mit einer Systemmasse (Mensch im Handrollstuhl) von 100 kg.

Dies entspricht einerseits dem Mittelwert einer männlichen Person und andererseits können andere Systemmasse einfach proportional umgerechnet werden.

Tabelle 8: Hangabtriebskraft bei einer Masse von 100 kg
bei Gefällen $> 6 \% \leq 12 \%$

Gefälle %	6.1	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
Neigungswinkel α	3,49°	4,00°	4,57°	5,14°	5,71°	6,28°	6,84°
$\sin \alpha$	0,061	0,070	0,080	0,090	0,100	0,109	0,119
g	9.81 m/s^2						
$\sin \alpha \cdot g \text{ (m/s}^2\text{)}$	0,597	0,685	0,782	0,879	0,976	1,073	1,169
m	100 kg						
$\sin \alpha \cdot g \cdot m \text{ (N)}$ Hangabtriebskraft	60	69	78	88	98	107	117

Tabelle 9: Hangabtriebskraft bei einer Masse von 100 kg
bei Gefällen $> 12 \% \leq 18 \%$

Gefälle %	12,1	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
Neigungswinkel α	6,90°	7,41°	7,97°	8,53°	9,09°	9,65°	10,20°
$\sin \alpha$	0,120	0,129	0,139	0,148	0,158	0,168	0,177
g	9,81 m/s^2						
$\sin \alpha \cdot g \text{ (m/s}^2\text{)}$	1,178	1,265	1,360	1,455	1,550	1,644	1,739
m	100 kg						
$\sin \alpha \cdot g \cdot m \text{ (N)}$ Hangabtriebskraft	118	127	136	146	155	165	174

12. Schiebekräfte des Menschen

Grundlage:

ISO 11228-2 Ergonomics – Manual Handling- Part 2: Pushing and pulling
Auszug aus den Tabellen A.5 und A.6

Die aufgeführten Werte beziehen sich auf zweihändiges Schieben mittels zweier Schiebegriffen.

Tabelle 10: Maximal akzeptable Schiebekräfte
90 % der Männer (m) resp. 90 % der Frauen(w)

Griffhöhe über Boden		Dauerkraft über Schiebedistanz		Startkraft / Initialkraft in Bewegung bringen oder stoppen	
cm		N			
m	w	m	w	m	w
2 m Schiebedistanz					
95	89	230	130	340	220
64	57	230	120	310	180
8 m Schiebedistanz					
95	89	180	110	300	210
64	57	180	110	260	170
15 m Schiebedistanz					
95	89	160	100	280	170
64	57	150	90	240	150
30 m Schiebedistanz					
95	89	160	90	270	180
64	57	150	80	230	150
45 m Schiebedistanz					
95	89	130	80	230	180
64	57	130	70	200	150

Die Kraftdifferenz zwischen der Startkraft/Initialkraft und Dauerkraft wird für die Beschleunigung resp. Bremsung des Rollstuhles eingesetzt.

Tabelle 11: Einfluss der Griffhöhe über Boden auf die Kraftentfaltung der schiebenden Person für Frauen (w) und Männer (m)

	Griffhöhe über Boden					
	1,15 m	1,00 m	0,85 m	0,70 m	0,55 m	0,40 m
m	99 %	100 %	99%	96 %	90 %	83 %
w	45 %	46 %	46 %	45 %	42 %	38 %

Diese Werte sind abgeleitet aus:

ISO 11228-2 Ergonomics – Manual Handling - Part 2: Pushing and pulling
Auszug aus den Tabellen B.7

In den beiden Normen:

- ISO 11228-2 Ergonomics – Manual Handling –
Part 2: Pushing and pulling

und

- DIN 33411-5 Körperkräfte des Menschen, Teil 5: Maximale statische
Aktionskräfte, Werte

finden sich keine Daten zu asymmetrischen Schiebevorgängen wie sie
beim Befahren von Perronlängsneigungen mit Perronquerneigung
auftreten.

Beim Befahren von Perronlängsneigungen in Querrichtung treten sogar an
den Händen sogar entgegengesetzte Krafrichtungen auf. Bergseitig Zug
und talseitig Schub.

13. Theoretischer Kraftaufwand beim Befahren des Perrons

13.1 In Längsrichtung mit konstanter Geschwindigkeit

Fahren entlang Falllinie und Fahren parallel zur Perronkante

bergwärts: Hangabtriebskraft **plus** Rollwiderstand

talwärts: Hangabtriebskraft **minus** Rollwiderstand

$$\text{Hangabtriebskraft } N = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 100 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin \alpha$$

$$\text{Rollwiderstand } N = m \cdot g \cdot \mu = 100 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,025 = 25 \text{ N}$$

Tabelle 12: Erforderliche Kräfte zum Befahren von Perrons in Längsrichtung

Gefälle	Orientierung der Fahrrichtung									
	Parallel zur Falllinie				parallel zur Perronkante					
	Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt			Talfahrt		
	T	H1 = H2	T	H1 = H2	T	H1	H2	T	H1	H2
1 Hilfsperson										
6 %	84	2 · 42	34	2 · 17	84	50	34	34	20	14
7 %	94	2 · 47	44	2 · 22	94	55	39	44	26	18
8 %	104	2 · 52	54	2 · 27	104	59	45	54	31	23
9 %	113	2 · 57	63	2 · 32	113	64	49	63	35	28
10%	123	2 · 62	73	2 · 37	123	69	54	73	41	32
11%	133	2 · 67	83	2 · 42	133	73	60	83	46	37
12%	142	2 · 71	92	2 · 46	142	78	64	92	50	42
2 Hilfspersonen										
13%	152	2 · 76	102	2 · 51	152	83	69	102	55	47
14%	161	2 · 81	111	2 · 56	161	87	74	111	60	51
15%	171	2 · 86	121	2 · 61	171	92	79	121	65	56
16%	180	2 · 90	130	2 · 75	180	96	84	130	70	60
17%	190	2 · 95	140	2 · 70	190	101	89	140	75	65
18%	199	2 · 100	149	2 · 75	199	106	93	149	79	70

T Totalkraft N

H1 = H2 Handkräfte N beidseitig identisch

H1 ≠ H2 H1 Handkraft N talseitig > H2 Handkraft N bergseitig

Sicherheit Rollstuhlzugang Perron Längsneigung > 6% bis ≤ 18%

13.2 Fahrt quer zur Perronkante mit konstanter Geschwindigkeit

Der wesentliche Unterschied zur Fahrt längs zur Perronkante liegt darin, dass nicht beide Hände beidseitig schieben, sondern die talseitige Hand schiebt und die bergseitige Hand zieht.

Tabelle 13: Erforderliche Kräfte zum Befahren von Perrons in Querrichtung

Gefälle	Hangabtriebskraft	Drehmoment ¹	Kraftkompensation ²	Rollwiderstand	Schiebekräfte Hände	
					bergseitig	talseitig
%	N	Nm	N	N	N	N
6,1	60	10,2	± 21	26 = 2 · 13	+ 8	- 34
7,0	69	11,7	± 24		+ 11	- 37
8,0	78	13,3	± 27		+ 14	- 40
9,0	88	15,0	± 30		+ 17	- 43
10,0	98	16,7	± 34		+ 21	- 47
11,0	107	18,2	± 37		+ 24	- 50
12,0	117	19,9	± 40		+ 27	- 53
12,1	118	20,1	± 41		+ 28	- 54
13,0	127	21,6	± 44		+ 31	- 57
14,0	136	23,2	± 47		+ 34	- 60
15,0	146	24,8	± 50		+ 37	- 63
16,0	155	26,4	± 53		+ 40	- 66
17,0	165	28,1	± 57		+ 44	- 70
18,0	174	29,6	± 60		+ 47	- 73
+ Zugkraft - Druckkraft						

¹ Drehmoment = Hangabtriebskraft multipliziert mit Schwerpunktabstand zur Antriebsachse (0,17 m)

² Kraftkompensation = Drehmoment dividiert durch Handgriffabstand (0,50 m)

Die in der Tabelle aufgeführten Schiebekräfte der Hände sind theoretische Werte, berechnet aus einer idealen Krafteinleitungssituation. Sie zeigen, dass sowohl Druck- als auch Zugkräfte auftreten. Ihre Grösse kann aber je nach der Schiebetechnik der Hilfsperson variieren.

Bei der Fahrt quer zur Perronkante kann das Drehmoment eliminiert werden, wenn der Rollstuhl nach hinten in die Balance-Position gekippt wird. D.h. der System-Schwerpunkt kommt über die Achse der Hinter-/Antriebsräder zu liegen. In der Folge entfällt das Drehmoment und somit die Kräfte die das Drehmoment kompensieren.

Es verbleiben nur noch der Rollwiderstand und die Hangabtriebskräfte infolge der Perronquerneigung

Dieses Manöver bedarf einerseits der nötigen Kenntnisse und praktischer Erfahrung der Hilfsperson als auch des Einverständnisses der Person im Rollstuhl.

13.3 Vergleich Rechen- mit Messdaten

- Messdaten siehe Seite 6, 2. Resultate, Ziff. 2.1, 2.2, 2.3 des agu Berichtes vom 13.5.2022

Erkenntnis:

Messfahrten und entsprechende Rechnungen zeigen eine relativ gute Übereinstimmung

14. Schnittstellengestaltung Perron-Fahrzeug

- Die Fahrzeugeinstiegsskante und die Perronkante müssen als Geraden zueinander parallel verlaufen und dürfen eine maximale Höhendifferenz von 50 mm nicht überschreiten.
 - Das BAV legt fest, innerhalb welcher Betriebszustände der Nachweis zu erfolgen hat.
- Zur Überbrückung von Absätzen infolge Niveaudifferenzen und horizontalen Spalten sind Überbrückungselemente mit beidseitigen Randaufbordungen einzusetzen.
- Die Überbrückungsfläche ist so zu konfigurieren, dass bei deren Befahrung zu jedem Zeitpunkt beide Antriebsräder des Rollstuhles kraftschlüssigen (nicht nur berühren) Bodenkontakt haben.
- Die Übergänge zwischen Überbrückungselement und Perron resp. Fahrzeugboden dürfen die Werte der TRIFOLD-Rampe nicht überschreiten.

15. Handrollstuhlausrüstung zur Erleichterung der Unterstützung durch Hilfsperson(en)

Die im Folgenden aufgeführten Handrollstuhlausrüstungen erleichtern der / den Hilfspersonen ihre Unterstützung beim Bewegen auf dem Perron und beim Befahren der Schnittstelle.

Fehlen einzelne oder alle aufgeführten Elemente, so ist das Improvisationstalent der Hilfsperson(en) gefordert.

Beim Handrollstuhl sollen zwei Handschiebegriffe die Handkräfte der Hilfsperson (Antreiben, Lenken und Bremsen des Rollstuhls), eingeleitet werden können.

Griffform rund, Durchmesser 30 mm – 40 mm

Griffanordnung längs oder quer Fahrrichtung
 Quer zur Fahrrichtung ist besser als längs zur Fahrrichtung

Griffhöhe 650 mm bis 1`000 mm
 Schiebetechnisch liegt die max. Kraft bei einer Höhe von 1`000 mm

Griffabstand je grösser der seitliche Abstand zwischen den beiden Griffen ist, desto kleiner sind die erforderlichen Handkräfte zum Lenken und zum Kompensieren der Querkräfte

Kipphilfen für Fussbetätigung
 Erleichtern der Hilfsperson das Ankippen des Rollstuhls nach hinten. Sie befinden sich in der Regel innenseitig neben den grossen Hinter-/Antriebsrädern.

Traggriffe oder zumindest Kennzeichnungen am Rollstuhlrahmen der Stellen die sichere Krafteinleitungspunkte sind

16. Hilfsperson muss bei Kipp- oder Sturzgefahr warnen

Das Gesamtgewicht von max. 300 kg für Elektrorollstühle kann durch die Kraft von Hilfspersonen auf den zur Diskussion stehenden Perronlängsneigungen nicht bewegt oder gesichert werden. Die motorischen Antriebskräfte sind so gross, dass eine Antriebsunterstützung nicht erforderlich ist, aber bei Fahrfehlern auch nicht aufgefangen werden können.

Rollstuhlhilfestellung bei Perronneigungen $\geq 6\% \leq 18\%$.

Messungen vom 4.5.2022

Auftraggeber: Anton Scheidegger
Dipl. Arch. FH
Oberdorfstrasse 19
6260 Reiden

Hauptverfasser: Markus Muser

e-mail: muser@agu.ch
Tel.: +41 44 251 54 30

Seiten: 1-10

Datum: Zürich, 13.5.2022
Version 1.0

	Name	Ort / Datum	Unterschrift
Autor	Muser	Zürich, 13.5.2022	

AGU Zürich
Arbeitsgruppe für Unfallmechanik
Winkelriedstr. 27
CH-8006 Zürich

Sekretariat:
Tel.: +41 (0) 44 251 54 30
Fax: +41 (0) 44 251 54 31
sekretariat@agu.ch

www.agu.ch

MWSt Nr. CHE-102.202.437

Referenzen

- [1] Untersuchung der Sicherheit von Rollstühlen in Eisenbahnfahrzeugen auf Strecken mit Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen, Schlussbericht, V 1.3, AGU Zürich 30.12.2020

Versionen

1.0 mhm 20220513 Erste Version

	Titel: Rollstuhlhilfestellung bei Perronneigungen $\geq 6\% \leq 18\%$		Version / Datum: 1.0 / 2022-05-13	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 3 von 10	

1. MESSAUFBAU	.....	4
2. RESULTATE.....	.....	6
2.1. Versuch 1, 09:37, Rollstuhl 3 x quer über die Strasse geschoben	.....	6
2.2. Versuch 2, 09:47, Rollstuhl 3 x quer über die Strasse geschoben	.....	6
2.3. Versuch 3, 09:51, Rollstuhl rückwärts bergab fahren, wieder bergauf schieben	.....	6
2.4. Versuch 4, 09:55, Rollstuhl bergauf schieben, quer über die Strasse, wenden und zurück quer über die Strasse	.....	7
2.5. Versuch 5, 10:49, Traverse mit Unterstützung durch Hilfsperson	.....	7
2.6. Versuch 6, 10:52, Rollstuhl gebremst talwärts gerichtet. Erforderliche Kraft um Rollstuhl ins Rutschen zu bringen	.....	7
2.7. Versuch 7, 11:00, Mehrfach hin und her auf und ab	.....	8

1. Messaufbau

Die am Handgriff rechts zum Schieben des Rollstuhls erforderlichen Kräfte werden mit dem folgenden Messaufbau erfasst:

- FH-2k digitales Kraftmessgerät mit externer Messzelle, Sauter GmbH D-Balingen
- RS-232 Verbindung
- Software AFH-FAST/FD V.1.0.9.3, Sauter GmbH D-Balingen
- Rollstuhl wie im Bericht [1] beschrieben, Gewicht 17.2 kg, besetzt mit Versuchsperson (Gewicht 78.1 kg)

Für das Schieben des Rollstuhls quer über ein Perron mit starker Neigung ist am talseitigen Handgriff eine Druck- und am bergseitigen Handgriff eine Zugkraft erforderlich. Da nur eine Messzelle vorhanden ist, wurde der Rollstuhl jeweils quer über die Strasse hin- und zurück geschoben und somit zuerst die Druck-, danach die Zugkraft gemessen.

Die Versuche wurden an der Winkelriedstrasse 27, 8006 Zürich, durchgeführt. Die Strasse weist eine Neigung von rund 15 - 16 % auf.

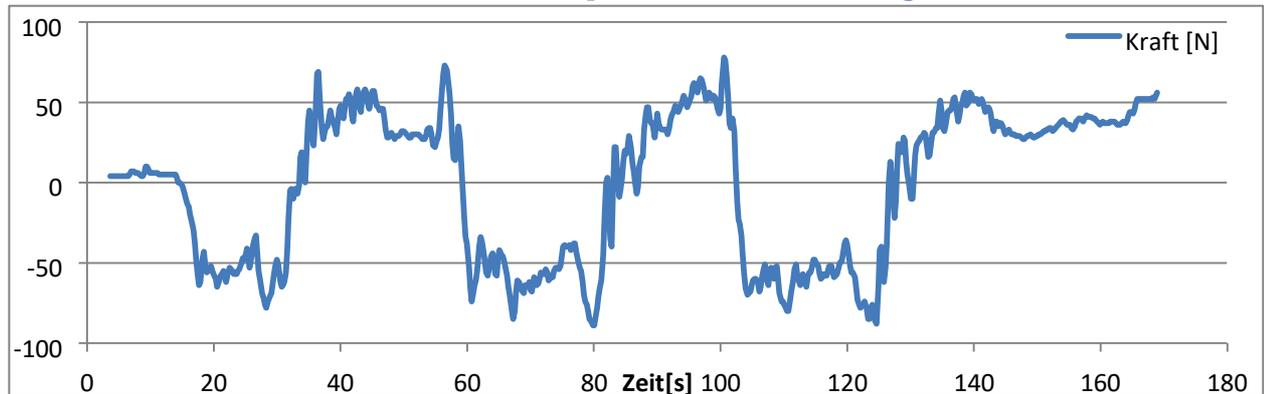
In den Diagrammen ist jeweils eine **Druckkraft mit negativem Vorzeichen** behaftet.



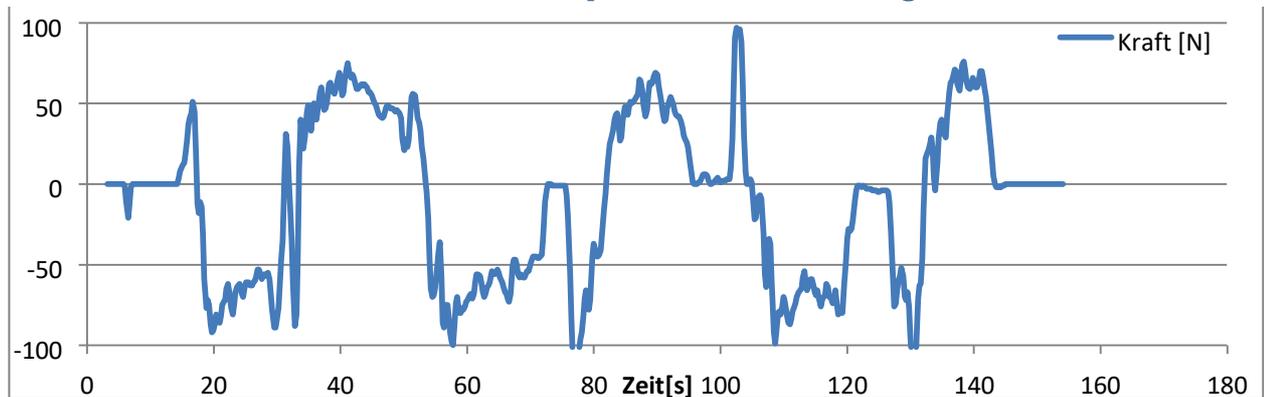
Bild 1: Der Kraftsensor wurde so an den Handgriff des Rollstuhls montiert, dass eine Drehung möglich war und somit die Druckkraft auch in einem Winkel zur Längsachse des Rollstuhls aufgebracht werden konnte.

2. Resultate

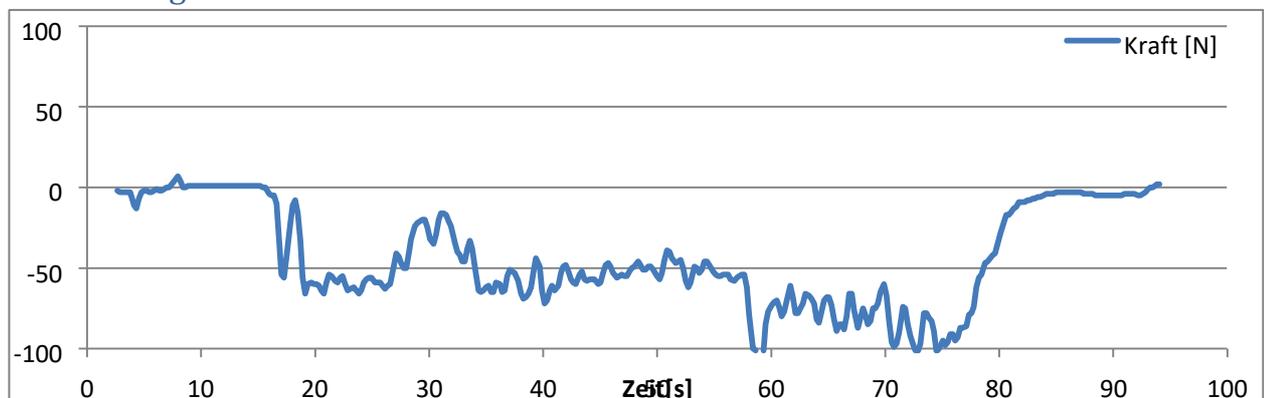
2.1. Versuch 1, 09:37, Rollstuhl 3 x quer über die Strasse geschoben



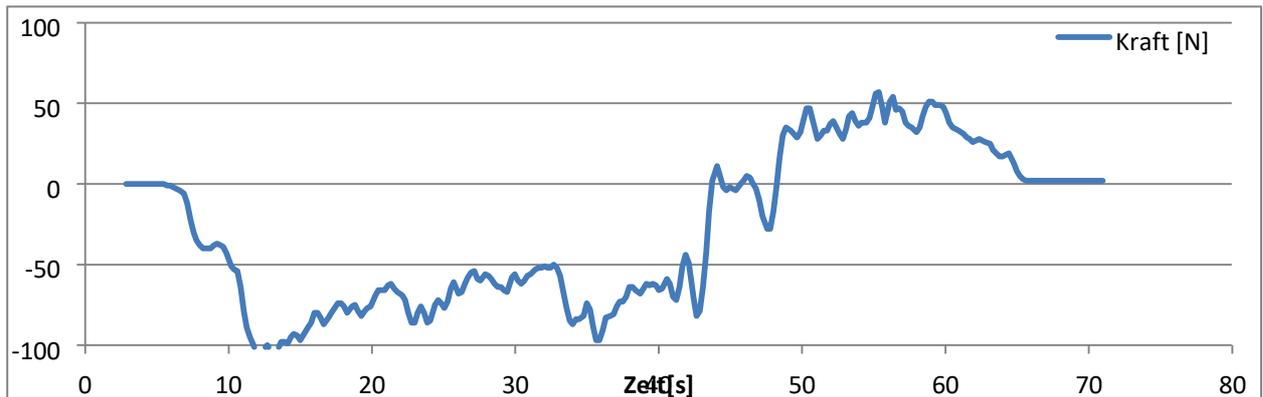
2.2. Versuch 2, 09:47, Rollstuhl 3 x quer über die Strasse geschoben



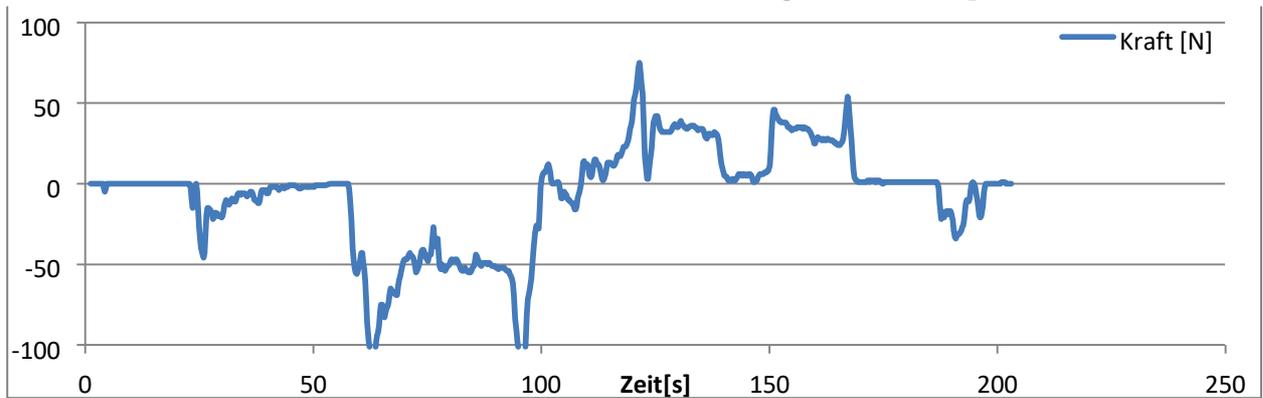
2.3. Versuch 3, 09:51, Rollstuhl rückwärts bergab fahren, wieder bergauf schieben



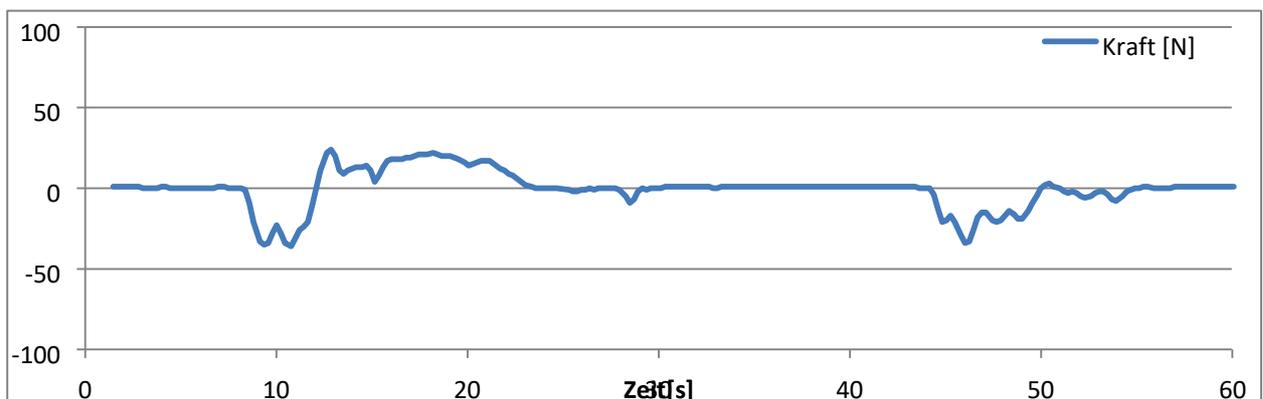
2.4. Versuch 4, 09:55, Rollstuhl bergauf schieben, quer über die Strasse, wenden und zurück quer über die Strasse



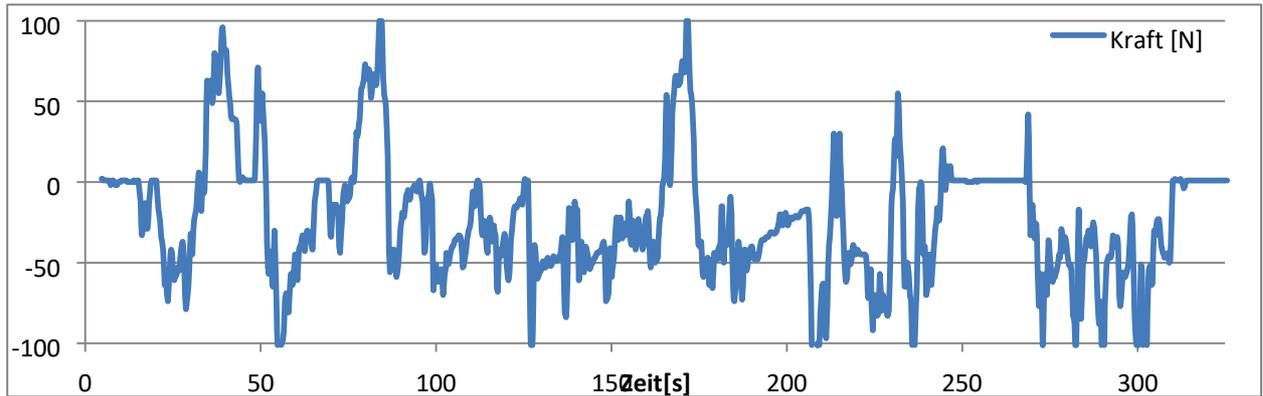
2.5. Versuch 5, 10:49, Traverse mit Unterstützung durch Hilfsperson



2.6. Versuch 6, 10:52, Rollstuhl gebremst talwärts gerichtet. Erforderliche Kraft um Rollstuhl ins Rutschen zu bringen



2.7. Versuch 7, 11:00, Mehrfach hin und her auf und ab



	Titel: Rollstuhlhilfestellung bei Perronneigungen $\geq 6\% \leq 18\%$		Version / Datum: 1.0 / 2022-05-13	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 41 von 42	

Kippen rückwärts

Der Rollstuhl beginnt zu kippen, wenn die normal zur Standfläche an den Vorderrädern angreifende Kraft Null ist. Er beginnt zu rutschen, wenn der Reibungskoeffizient klein genug ist, dass die Bedingung (2) vor der Bedingung (3) erfüllt ist.

- (1) Die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kräfte sind:

$$F_{n1} = \frac{wb - xcg}{wb} mg \cos \alpha + \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha)$$

$$F_{n2} = \frac{xcg}{wb} mg \cos \alpha - \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha)$$

Wobei F_{n1} für das tiefer liegende, F_{n2} für das höher liegende Rad gilt.

- (2) Der kritische Fall für Rutschen ist:

$$F_{n1} \mu = m(a + g \sin \alpha)$$

- (3) nach a aufgelöst erhält man:

$$a = g \cdot \frac{\mu \cdot (wb - xcg) \cdot \cos(\alpha) - (wb - \mu \cdot h) \sin(\alpha)}{wb - \mu \cdot h}$$

- (4) Der kritische Fall für Kippen ist

$$F_{n2} = \frac{wb - xcg}{wb} mg \cos \alpha - \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha) = 0$$

- (5) nach a aufgelöst erhält man:

$$a = g \cdot \frac{xcg \cdot \cos(\alpha) - h \cdot \sin(\alpha)}{h}$$

Drehen / Rutschen seitwärts

Die Gesamtkraft, welche auf den Schwerpunkt des Systems Rollstuhl-Dummy wirkt setzt sich zusammen aus der Bremskraft ma plus der parallelen Komponente der Gewichtskraft (Hangabtriebskraft) $mg\sin(\alpha)$. Diese Kraft erzeugt ein Drehmoment um den Aufstandspunkt des tiefer liegenden Rades. Wenn dieses Moment gross genug wird, um die vom höher liegenden Rad erzeugte Reibungskraft zu kompensieren, beginnt sich der Rollstuhl zu drehen und zu rutschen.

- (1) Die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kräfte sind:

$$F_{n1} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha + \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha)$$

$$F_{n2} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha - \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha)$$

Wobei F_{n1} für das tiefer liegende, F_{n2} für das höher liegende Rad gilt. Wenn man

$$F_{n2} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha - \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha) = 0$$

nach a auflöst erhält man die kritische Beschleunigung für ein allfälliges Kippen.

- (2) Das Drehmoment um den unteren Radaufstandspunkt beträgt:

$$M = xcg \cdot m(a + g\sin\alpha)$$

und erzeugt die Kraft

$$F_r = \frac{M}{b} = \frac{1}{b} \cdot xcg \cdot m(a + g\sin\alpha)$$

am höher liegenden Rad.

- (3) Der Rollstuhl dreht sich wenn

$$F_{n2}\mu k_r < F_r$$

wobei μ der Haftreibungskoeffizient zwischen Rad und Fahrzeugboden ist. k_r ist die Lastverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse, da nur die Hinterachse gebremst ist.

- (4) Der kritische Fall

$$F_{n2}\mu k_r = F_r$$

$$\frac{1}{b} \cdot xcg \cdot m(a + g\sin\alpha) = \frac{1}{2}\mu k_r g\cos\alpha - \frac{h}{b}\mu k_r (a + g\sin\alpha)$$

i.e.

wird nach a aufgelöst:

- (5) Womit sich für die kritische Bremsverzögerung ergibt:

$$a_{ro} = \frac{\frac{b}{2}\mu k_r g\cos\alpha - h\mu k_r g\sin\alpha - xcg \cdot g\sin\alpha}{xcg + h\mu k_r}$$