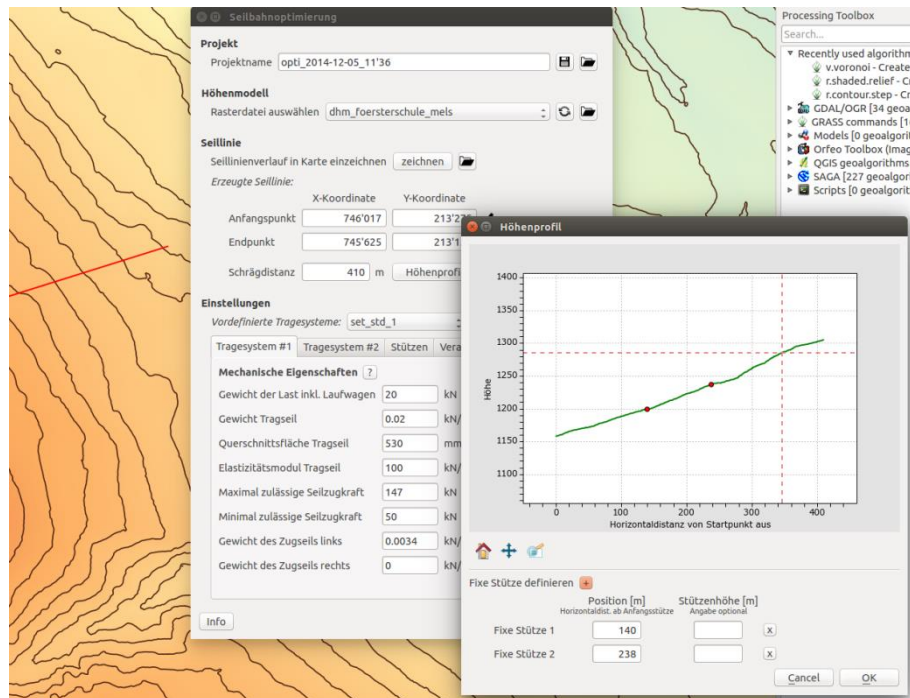


Dokumentation QGIS-Plugin V2.0

Seilaplan (Seilkran Layout Planer)



Inhaltsverzeichnis

1. Übersicht Seilaplan	3
2. Hintergrund	3
3. Voraussetzung (Hard- & Software).....	4
4. Eingangsdaten	5
4.1. Topographie: Digitales Höhenmodell.....	5
4.2. Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie	5
4.3. Seilkransspezifische Parameter.....	7
4.3.1. Technische Parameter des Tragsystems	7
4.3.2. Bodenabstand und Gravitationsseilkran	7
4.3.3. Verankerung	8
4.3.4. Stützen.....	10
5. Ergebnisse.....	12
5.1. Wichtigste Ausgabedaten.....	12
5.2. Auftretende Kräfte und Geometrie.....	12
6. Literatur / weitere Infos:	15
7. Kontakt	15
8. Realisierung	15

1. Übersicht Seilaplan

Seilaplan steht für **Seil**kran **L**ayout **P**laner. Seilaplan ist fähig, auf Grund eines digitalen Höhenmodells (DEM) zwischen definierten Anfangs- und Endkoordinaten das optimale Seillinienlayout zu berechnen (Position und Höhe der Stützen).

Das Programm ist für mitteleuropäische Verhältnisse konzipiert und geht von einem an beiden Enden fix verankertem Tragseil aus. Für die Berechnung der Eigenschaften der Lastwegkurve wird eine iterative Methode verwendet, welche von Zweifel (1960) beschrieben und speziell für an beiden Enden fix verankerte Tragseile entwickelt wurde. Bei der Prüfung der Machbarkeit der Seillinie wird darauf geachtet, dass 1) die maximal zulässigen Spannungen im Tragseil nicht überschritten werden, 2) ein minimaler Abstand zwischen dem Tragseil und dem Untergrund gegeben ist und 3) bei einem Einsatz eines Gravitationssystems eine minimale Neigung im Tragseil gegeben ist. Es wird diejenige Lösung gesucht, welche in erster Priorität eine minimale Anzahl an Stützen aufweist und in zweiter Priorität die Stützenhöhe minimiert.

2. Hintergrund

Die neu entwickelte Methode berechnet den Verlauf der Lastwegkurve und die darin auftretenden Kräfte genauer als bisher auf dem Markt erhältliche Tools (Stand 2015) und ist in der Lage, die optimale Position und Höhe der Stützen zu ermitteln.

Der Grund für die genaueren Resultate des neuen Tools, besteht in der Annahme der Verankerung des Tragseils an den jeweiligen Endpunkten. Abbildung 1 zeigt zwei Grundprinzipien von verschiedenen Verankerungen. In Europa eingesetzte forstliche Seilkräne weisen ein Tragseil auf, das an beiden Enden fix verankert ist. Das Verhalten von fix verankerten Tragseilen ist mathematisch sehr schwer zu beschreiben und lässt sich nicht analytisch lösen. Deshalb wurde bis anhin im Forstbereich mit vereinfachten linearisierten Annahmen gerechnet, was dem Verhalten eines gewichtsgespannten Tragseils entspricht und als Methode von Pestal (1961) bekannt ist. Gewichtsgespannte Tragseile werden für den Personentransport eingesetzt.

Wir verwenden für die Berechnung der Lastwegkurve eine iterative Methode, welche von Zweifel (1960) beschrieben und speziell für fix verankerte Tragseile entwickelt wurde. Dies macht die Mathematik wesentlich anspruchsvoller, führt aber zu genaueren realistischeren Resultaten. Bei der Prüfung der Machbarkeit der Seillinie wird darauf geachtet, dass 1) die maximal zulässigen Spannungen im Tragseil nicht überschritten werden, 2) ein minimaler Abstand zwischen dem Tragseil und dem Untergrund gegeben ist und 3) bei einem Einsatz eines Gravitationssystems eine minimale Neigung im Tragseil gegeben ist (Abbildung 2). Da aktuelle Modelle fehlen, welche die Installationskosten in angemessener Genauigkeit beschreiben, wird diejenige Lösung gesucht, welche in erster Priorität eine minimale Anzahl an Stützen aufweist und in zweiter Priorität die Stützenhöhe minimiert (Abbildung 2). Die vorgestellte Methode ist die erste, welche von einem fix verankerten Tragseil ausgeht und gleichzeitig das mathematisch optimale Stützenlayout identifiziert. Im Gegensatz zu Methoden, die ein gewichtsgespanntes Tragseil annehmen, erzielt dieser Ansatz realistischere Lösungen mit längeren Seilfeldern und tieferen Stützenhöhen, was schlussendlich zu tieferen Installationskosten führt. Hintergrundinfos zur Seilmechanik und zur Berechnungsmethodik sind in Bont und Heinemann (2012) dokumentiert.

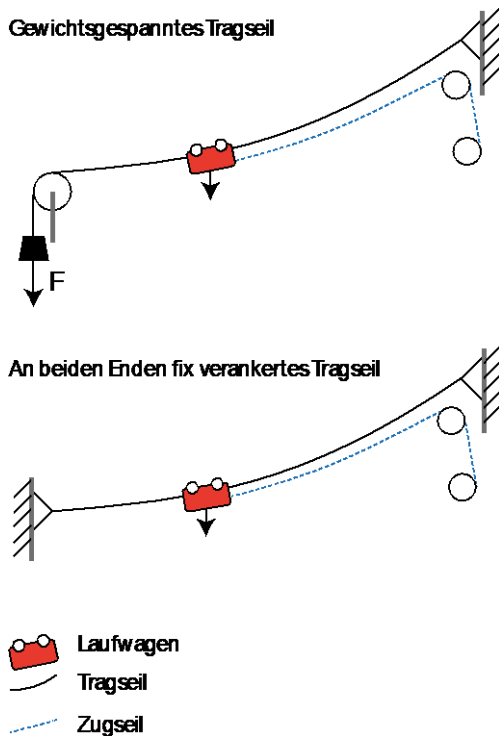


Abbildung 1: Seilsystem mit gewichtsgespanntes Tragseil (oben) und fix verankertem Tragseil (unten). Die Art der Verankerung des Tragseils hat entscheidenden Einfluss auf das mechanische Verhalten des Seils und sollte bei einer Projektierung berücksichtigt werden.

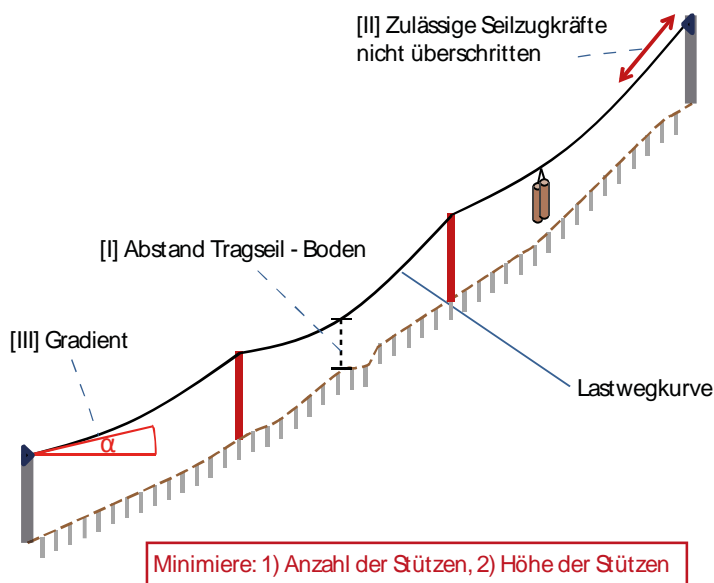


Abbildung 2: Optimierungsproblem des Seillinienlayouts: Der Algorithmus sucht die Position der Stützen und deren Höhen, so dass die Anzahl der Stützen und die Höhen minimal sind. Geprüft wird dabei, ob (I) ein minimaler Abstand zwischen dem Boden und dem Tragseil gegeben ist, (II) die zulässigen Seilzugkräfte nicht überschritten sind und (III) bei einem Gravitationsbetrieb ein minimaler Gradient im Tragseil gegeben ist.

3. Voraussetzung (Hard- & Software)

Seilaplan ist ein QGIS Plugin und läuft auf allen Computern auf welchen QGIS in Version 3.x installiert werden kann.

4. Eingangsdaten

Folgende Eingangsdaten müssen definiert werden:

1. Topographie als digitales Höhenmodell (digital elevation model)
2. Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie
3. Seilkranspezifische Parameter

4.1. Topographie: Digitales Höhenmodell

Das Höhenmodell muss als Raster verfügbar sein. Üblicherweise kann es als *.tiff, *.txt oder *.asc Datei in QGIS eingelesen werden. Der Header sollte bei einer Textdatei (*.txt oder *.asc) wie folgt strukturiert sein:

ncols	100	Zellen West-Ost
nrows	100	Zellen Süd-Nord:
xllcorner	678000	Koordinaten des Eckpunktes westlich
yllcorner	246250 bzw. südlich (lower-left)
cellsize	10	Zellgrösse
nodatavalue	-9999	

Beachte: Zellgrösse kann beliebig variiert werden, um genügend genaue Resultate zu erhalten, empfiehlt sich jedoch eine Auflösung von mind. 10m, besser jedoch 2m. Die Einheit der einzelnen Höhenwerte muss Meter [m] sein. Ebenso ist es vorteilhaft, wenn das Raster in einem metrischen Koordinatensystem vorliegt.

4.2. Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie

Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes können entweder in der Eingabemaske eingegeben werden, oder direkt im QGIS gezeichnet werden. Die Seillinie verläuft immer von links nach rechts, d.h. links befindet sich der Installationsplatz (Anfangskoordinate) und rechts die Endkoordinate

Es gilt dabei die folgende Terminologie:

Anfangspunkt: Anfang der Seillinie, welche vom Laufwagen befahren werden kann. In der Regel derjenige Punkt auf welchem sich das Prozessorkippmastgerät befindet (Installationsplatz).

Endpunkt: Ende der Seillinie. Bis hierhin kann in der Regel mit dem Laufwagen gefahren werden.

Anfangsstütze: Erste Stütze, ist immer identisch mit dem Anfangspunkt.

Endstütze: Letzte Stütze, ist immer identisch mit dem Endpunkt.

Verankerung: Das Verankerungsfeld kann vom Laufwagen nicht befahren werden und beginnt bereits vor der Anfangsstütze (analog gilt das gleiche für die Endstütze). Es kann separat definiert werden. Falls die Anfangsstütze oder die Endstütze die Höhe 0 aufweisen kann kein Verankerungsfeld definiert werden. In diesem Fall dient das Seilfeld zugleich als Verankerungsfeld.

Abbildung 3 zeigt zwei Fälle einer Seillinie zwischen dem Anfangs- und Endpunkt. Der Laufwagen kann grundsätzlich zwischen dem Anfangs- und Endpunkt verkehren, jedoch nicht im Verankerungsfeld. Die obere Seillinie zeigt den klassischen Fall. Hier haben sowohl die Anfangs- als auch die Endstütze eine Höhe > 0. Ein Verankerungsfeld kann hier zusätzlich noch definiert werden. Die untere Seillinie zeigt den Fall, in welchem die Endstütze eine Höhe von 0m aufweist, in diesem Fall kann bei der Endstütze kein Verankerungsfeld mehr definiert werden.

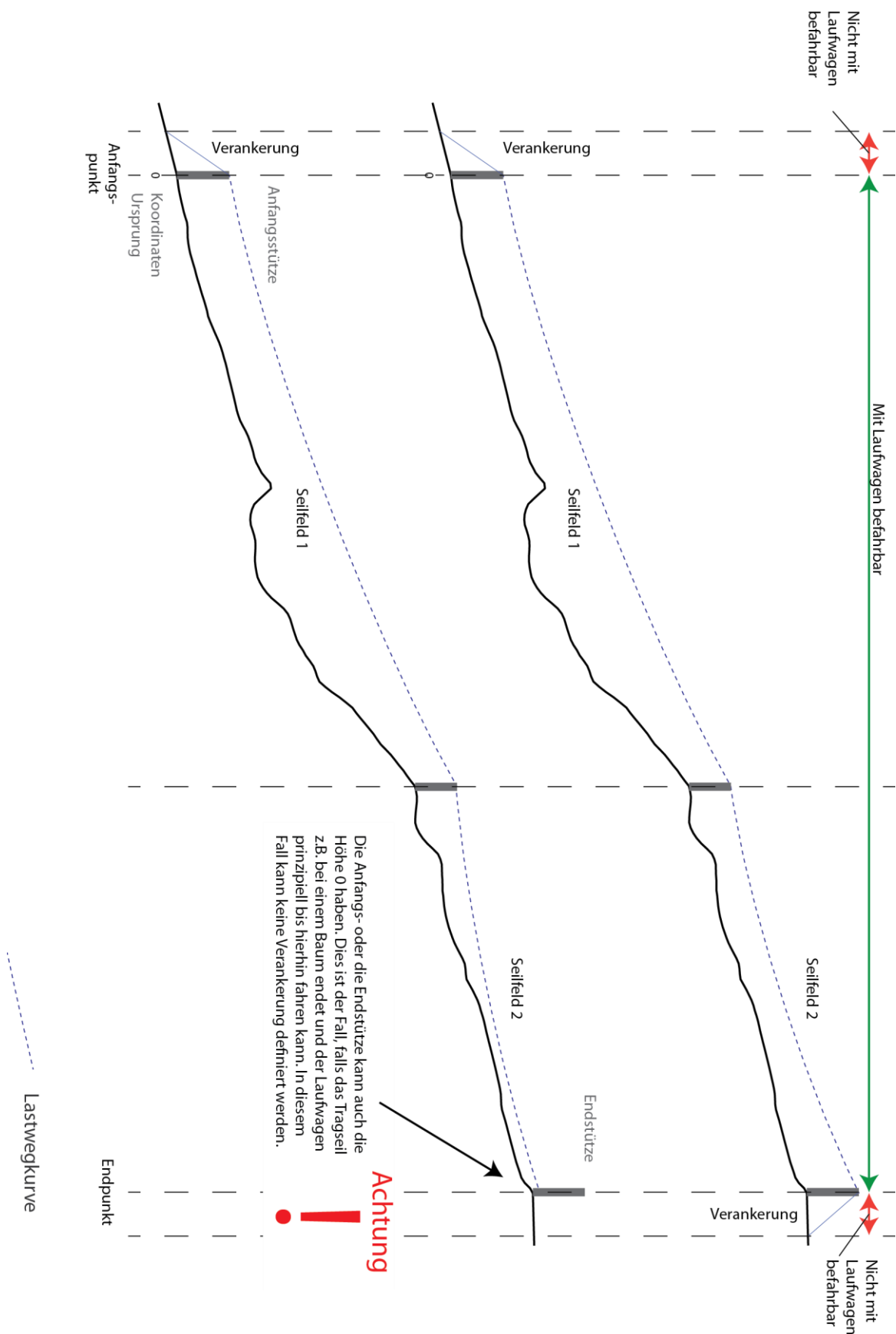


Abbildung 3: Illustration der wichtigsten Begriffe von Seilaplan. Die obere Seillinie zeigt den klassischen Fall. Hier haben sowohl die Anfangs- als auch die Endstütze eine Höhe > 0 . Ein Verankerungsfeld kann hier zusätzlich noch definiert werden. Die untere Seillinie zeigt den Fall, in welchem die Endstütze eine Höhe von 0m aufweist, in diesem Fall kann bei der Endstütze kein Verankerungsfeld mehr definiert werden.

4.3. Seilkranspezifische Parameter

4.3.1. Technische Parameter des Tragsystems

Tabelle 1 zeigt die technischen Parameter des Tragsystems, welche zu definieren sind.

Tabelle 1: Technische Parameter des Tragsystems

Parameter	Einheit	Bemerkung
Gewicht der Last inkl. Laufwagen	kN	
Gewicht Tragseil	kN / m	
Querschnittsfläche Tragseil	mm ²	
Elastizitätsmodul Tragseil	kN / mm ²	
Maximal zulässige Seilzugkraft	kN	Berechnet sich aus der Mindestbruchkraft (MBK) des Tragseils geteilt durch den Sicherheitsfaktor, Bsp.: MBK = 453 kN, Sicherheitsfaktor = 2.5 → max. zul. Seilzugkraft = 453 kN/2.5 = 181 kN
Gewicht Zugseil links	kN / m	Links: links vom Laufwagen, Grundsätzlich befindet sich immer links vom Laufwagen der Installationsplatz.
Gewicht Zugseil rechts	kN / m	Rechts: rechts vom Laufwagen. Bei 2 Seil Systemen ist in der Regel rechts vom Laufwagen kein Zugseil oder Rückholseil vorhanden.

4.3.2. Bodenabstand und Gravitationsseilkran

In Seilaplan kann ein minimaler Abstand des Tragseils vom Boden definiert werden. Insbesondere für den Fall, dass die Anfangs- oder die Endstütze die Höhe 0 aufweist, macht es keinen Sinn, dies durchgängig zu testen. In diesem Fall kann eine Distanz definiert werden, bis zu welcher der minimale Abstand nicht eingehalten werden muss (vgl. dazu Abbildung 4). Im Weiteren kann angegeben werden, ob mit einem Gravitationsseilkran gearbeitet wird und wo deshalb die Seillinie auf einen durchgehenden Gradient geprüft werden soll, vergleiche dazu auch Abbildung 5 unten.

Tabelle 2: Parameter zu Bodenabstand und Gravitationsseilkran

Parameter	Einheit	Bemerkung
Minimaler Abstand Seil - Boden	m	Stellt einen genügenden Bodenabstand sicher (Holz schleift nicht dem Boden nach)
einzuhalten ab (vom Anfangspunkt)	m	Ab dieser Distanz vom Anfangspunkt an wird die Bedingung des minimalen Bodenabstand geprüft
einzuhalten bis (vor dem Endpunkt)	m	Bis zu dieser Distanz vom Endpunkt entfernt wird die Bedingung des minimalen Bodenabstand geprüft
Gravitationsseilkran	Ja / Nein	Ja bedeutet, dass der Gradient der Seillinie geprüft wird, d.h. es muss immer entweder ein nur positiver oder nur negativer Gradient im Tragseil vorhanden sein (2 Seil System). Bei einem Nein wird davon ausgegangen, dass mit einem selbstfahrenden Laufwagen oder mit einem 3 oder 4 Seil System gearbeitet wird.
Befahrbar ab		Ab dieser Distanz vom Anfangspunkt an wird die Bedingung der Befahrbarkeit mit Gravitationsseilkran geprüft
Befahrbar bis		Bis zu dieser Distanz vom Endpunkt entfernt wird die Bedingung der Befahrbarkeit mit Gravitationsseilkran geprüft

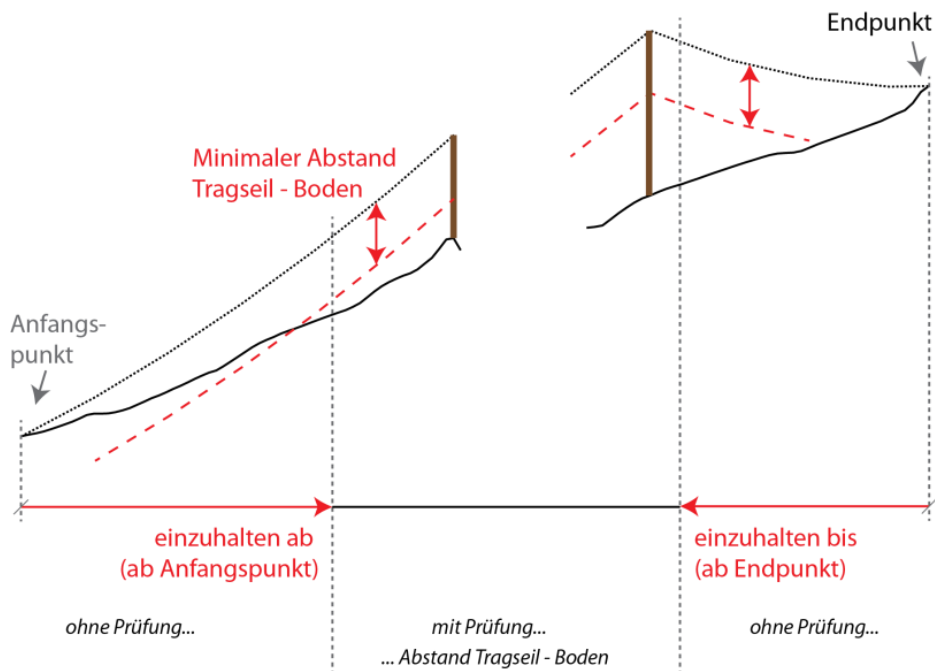


Abbildung 4: Parameter für die Prüfung der Bedingung des minimalen Bodenabstandes. Für den Fall, dass die Anfangs- oder die Endstütze die Höhe 0 aufweisen, macht es Sinn, eine Strecke zu definieren, auf welcher die Prüfung des minimalen Bodenabstandes nicht stattfindet.

4.3.3. Verankerung

Die Verankerung sowie die Eigenschaften der Anfangs- und Endstütze kann gemäss den Parametern in Tabelle 3 definiert werden. Abbildung 5 zeigt die zwei verschiedenen Fälle, wie die Verankerung definiert werden kann. Einerseits mit einer Anfangs- / oder Endstütze (Höhe > 0) und einem Verankerungsfeld (Fall1) oder einer Höhe der Anfangs-/ Endstütze gleich 0 und keinem Verankerungsfeld (Fall 2).

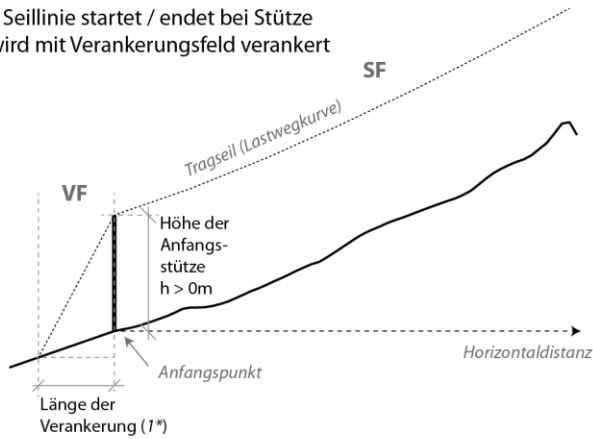
Tabelle 3: Parameter der Verankerung und Höhendefinition der Anfangs- und Endstütze

Parameter	Einheit	Bemerkung
Anfangspunkt		
Höhe der Anfangsstütze	m	Höhe der Anfangsstütze
Länge der Verankerung	m	Gibt die Länge (Horizontaldistanz) der Verankerung des Tragseils durch ein Abspannseil an.
Endpunkt		
Höhe der Endstütze [Min] [Max]	m	Höhe der Endstütze
Länge der Verankerung	m	Gibt die Länge (Horizontaldistanz) der Verankerung des Tragseils durch ein Abspannseil an.

Anfang der Seillinie

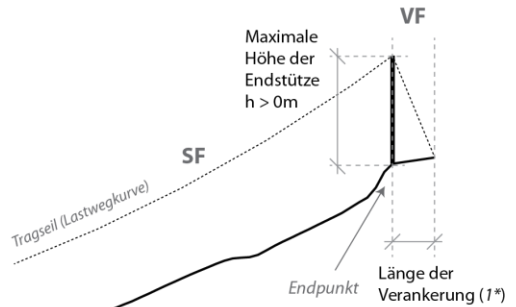
Steuerungsgrößen / Input Felder
 --> "Höhe der Anfangsstütze"
 --> "Länge Verankerung"

Fall 1: Seillinie startet / endet bei Stütze und wird mit Verankerungsfeld verankert



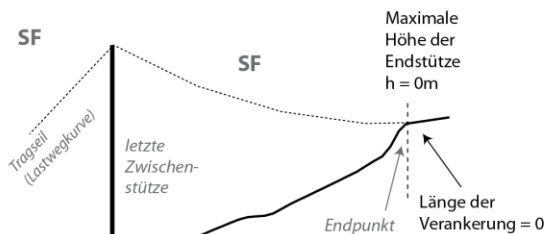
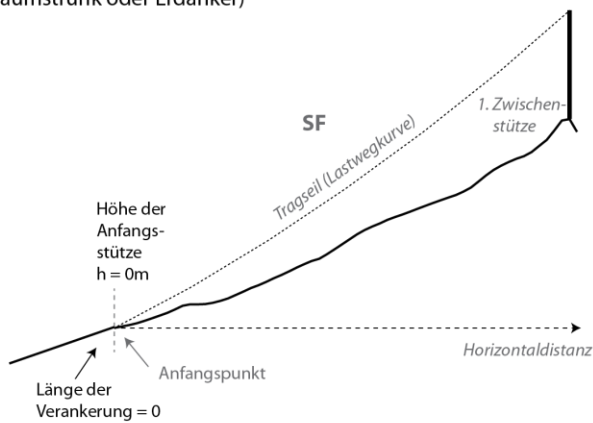
Ende der Seillinie

Steuerungsgrößen / Input Felder
 --> "Minimale Höhe der Endstütze"
 --> "Maximale Höhe der Endstütze"
 --> "Länge Verankerung"



(1*) Bem.: Länge der Verankerung kann auch in diesem Fall 0 betragen

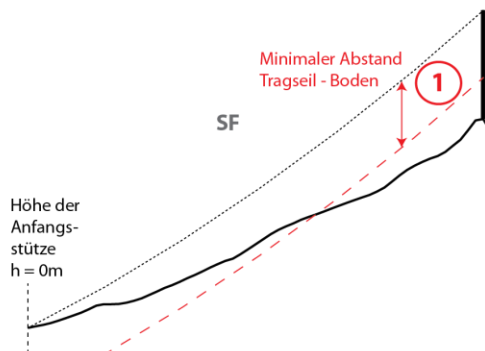
Fall 2: Seillinie endet bei Verankerung (z.B. Baumstrunk oder Erdanker)



SF: Seilfeld: Für Laufwagen befahrbar

VF: Seilfeld: Für Laufwagen nicht befahrbar

Achtung



① Falls Höhe Anfangs- / Endstütze < Minimalabstand Tragseil - Boden
 --> Input "einzuhalten ab" & "einzuhalten bis" bei "Minimaler Abstand Seil - Boden" anpassen

② Bei Einsatz von Gravitationsseilkran:
 --> Input "Befahrbarkeit ab" & "Befahrbarkeit bis" bei "Gravitationsseilkran?" anpassen

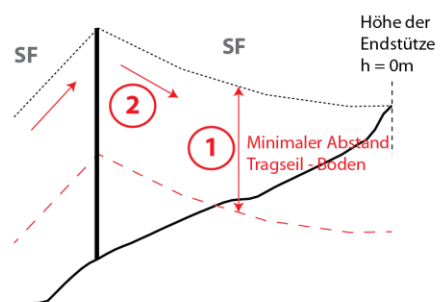


Abbildung 5: Prinzipien und Steuerungsgrößen der Verankerung

4.3.4. Stützen

Die Parameter, welche die Positionen und Höhen der Stützen bestimmen sind in Abbildung 6 und Tabelle 4 aufgelistet. Die Einstellungen steuern den Optimierungsalgorithmus und sind relevant für die Rechenzeit, insbesondere die Parameter „Horizontale Auflösung der mögl. Stützenstandorte“ und „Abstufungsintervall“.

Tabelle 4: Parameter der Stützen

Parameter	Einheit	Bemerkung
Positionierung der Zwischenstützen		
Minimaler Abstand zwischen Stützen	m	Kleinsten horizontalen Abstand zwischen zwei ausgewählten Stützen im Seillinienlayout
Horizontale Auflösung der mögl. Stützenstandorte	m	Abstand in welchem potentielle Stützen gesetzt werden können, z.B. 1m bedeutet dass sich im horizontalen Abstand von 1m potentielle Stützenstandorte befinden ➔ Diese Einstellung hat einen grossen Einfluss auf die Rechenzeit! Je kleiner der Wert desto grösser die Rechenzeit. Als guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit sollte hier der Wert 10m eingegeben werden
Maximale Anzahl an Zwischenstützen	[]	Maximale Anzahl an Zwischenstützen, welche gesetzt werden können
Höhe der Zwischenstützen		
Minimale Stützenhöhe	m	
Maximale Stützenhöhe	m	
Abstufungsintervall	m	Kleinste Abstufung zwischen zwei möglichen Stützenhöhen, Bsp.: Bei einem Intervall von 2m bei einer min Stützenhöhe von 8m und einer max. Stützenhöhe von 14m sind die Stützenhöhen 8, 10, 12 und 14m möglich ➔ Diese Einstellung hat einen grossen Einfluss auf die Rechenzeit! Je kleiner der Wert desto grösser die Rechenzeit. Als guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit sollte hier der Wert 1m eingegeben werden
Künstliche Stütze ab Stützenhöhe von	m	Bis zum hier eingegebenen Wert sind natürliche Stützen (Baumstützen möglich). Stützen die höher sind, sind möglich, bedingen jedoch eine künstliche Stütze. Für künstliche Stützen werden 5x höhere Installationskosten angenommen.

Längenoptionen der Stützen

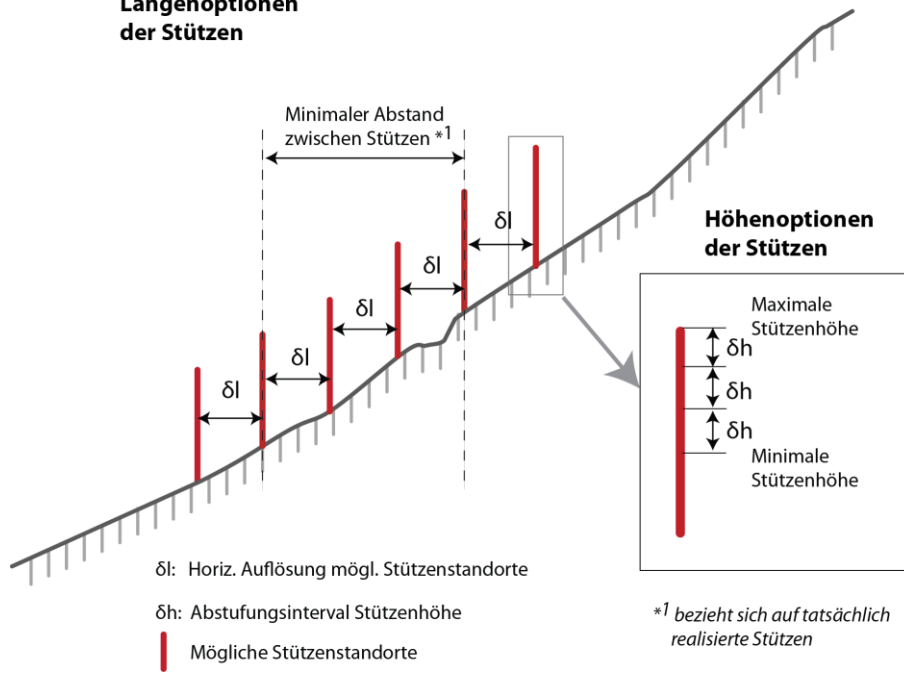


Abbildung 6: Parameter zur Setzung der Zwischenstützen

5. Ergebnisse

Die Ausgabe erfolgt je nach Wahl in eine PDF-Datei, Shape Datei, sowie CSV-Tabellen.

5.1. Wichtigste Ausgabedaten

Tabelle 5: Wichtigste Ausgabedaten

Beschreibung	Masseinheit	Bemerkung
Zeitpunkt der Berechnung	Datum, Zeit	
Berechnungsdauer	s	
Stützen: Höhe der Stützen; Koordinaten: X, Y, Z (Höhe am Grund)	m, Coord	
Maximal auftretende Seilzugkraft im Tragseil bei Last in Feldmitte	kN	Seilzugkraft wird für den höchsten Punkt im Seilsystem angegeben
Durchhang des Leerseils und der Lastwegkurve in Feldmitte	m	
Wertebereich der optimalen Vorspannung der Seilzugkraft [kN]:	kN	Wichtig: Damit die Seillinie wie vorgeschlagen gebaut werden kann, muss die tatsächliche Vorspannung des Tragseils (Seilzugkraft bei Leerverhältnissen) der vorgeschlagenen optimalen Vorspannung entsprechen.
Daten für Absteckung im Feld	gon / m	Können mit Vermessungsinstrument oder Messband und Kompass abgesteckt werden
Annahmen		Auflistung der verwendeten Parameter für die Berechnung

5.2. Auftretende Kräfte und Geometrie

Die im Seilsystem auftretenden Kräfte und die Geometrie des Seilsystems sind in Abbildung 7 illustriert und in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Detaillierte Ausgabeparameter

Abkürzung (stimmt überein mit Abbildung 7)	Beschreibung Grösse	Einheit
XX = nicht auf Abbildung		
Auftretende Kräfte (Leerseil)		
T0,A	Anfangs Seilzugkraft an der Anfangsstütze	kN
T0,E	Anfangs Seilzugkraft an der Endstütze	kN
T0	Seilzugkraft des Leerseils an den Stützen	kN
Hs	Horizontalkomponente der Seilzugkraft an den Stützen (Leerseilverhältnisse)	kN
Auftretende Kräfte (Lastseil)		
Tmax	Maximal Auftretende Seilzugkraft am höchsten Punkt im Seilsystem	kN
Tmax,A	Maximal Auftretende Seilzugkraft am Anfangsanker	kN
Tmax,E	Maximal Auftretende Seilzugkraft am Endanker	kN
Tm	Seilzugkraft bei Last in Feldmitte, gemessen in Feldmitte	kN
Tm,max	Seilzugkraft bei Last in Feldmitte, am höchsten Punkt im Seilsystem	kN
Hm	Horizontalkomponente der Seilzugkraft in Feldmitte (bei Last in Feldmitte)	kN

Durchhang		
yLE	Leerseildurchhang in Feldmitte	m
yLA	Lastseildurchhang in Feldmitte	m
Geometrie		
	Länge des Leerseils bei Anfangs Seilzugkraft	m
	Länge des Leerseils bei 0 kN	m
	Länge der Spannfelder	m
Seilwinkel an den Stützen		
α_{LA}	Seilwinkel an den Stützen, Lastseil	° [0...360]
α_{LE}	Seilwinkel an den Stützen, Leerseil	° [0...360]
Nachweis, dass Tragseil nicht vom Sattel abhebt		
β	Leerseilknickwinkel bei Stütze	° [0...360]
	Nachweis dass Tragseil nicht vom Sattel abhebt	[1 / 0]
Kräfte an einer befahrbaren Stütze		
F_Sa_BefRes	Sattelpunkt an den Stützen bei Laufwagen auf Stütze, Resultierend	kN
F_Sa_BefV	Sattelpunkt an den Stützen bei Laufwagen auf Stütze, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_BefH	Sattelpunkt an den Stützen bei Laufwagen auf Stütze, Horizontal Komponente	kN
FSR	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil) bei Laufwagen auf Stütze, Resultierend	kN
FSV	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil) bei Laufwagen auf Stütze, Vertikal Komponente	kN
FSH	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil) bei Laufwagen auf Stütze, Horizontal Komponente	kN
FU	Einwirkung auf Stütze aus Last, Gewicht Zug- & Tragseil	kN
Kräfte an einer nicht befahrbaren Stütze		
TCS	Seilzugkraft bei Last (Laufwagen) unmittelbar bei Stütze	kN
F_Sa_NBefRes	Sattelpunkt bei Last (Laufwagen) unmittelbar bei der Stütze, Resultierend	kN
F_Sa_NBefV	Sattelpunkt bei Last (Laufwagen) unmittelbar bei der Stütze, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_NBefH	Sattelpunkt bei Last (Laufwagen) unmittelbar bei der Stütze, Horizontal Komponente	kN

Auftretende Kräfte

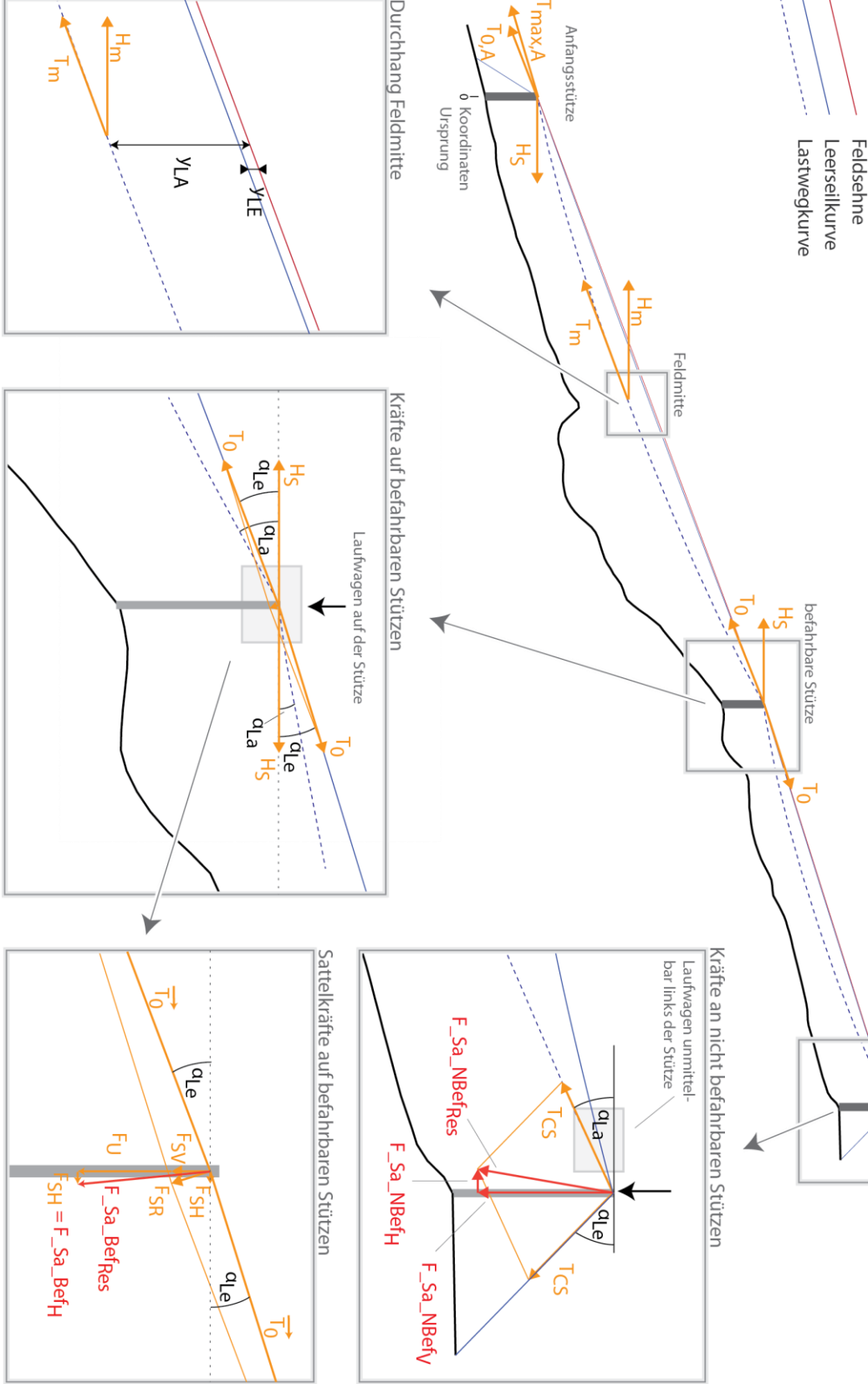


Abbildung 7: Illustration der Ausgabeparameter

6. Literatur / weitere Infos:

Die Software basiert auf den Ergebnissen der Dissertation von Bont (2012). In folgenden Publikationen können weitere Infos gefunden werden:

BONT, L. (2012). Spatially explicit optimization of forest harvest and transportation system layout under steep slope conditions. Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20515,

BONT, L., & HEINIMANN, H. (2012). Optimum geometric layout of a single cable road. European Journal of Forest Research, 1-10, doi:10.1007/s10342-012-0612-y.

7. Kontakt

Dr. Leo Bont

Waldressourcen und Waldmanagement

Forstliche Produktionssysteme

Eidg. Forschungsanstalt WSL

Zürcherstrasse 111

8903 Birmensdorf

8. Realisierung

Realisierung: Professur für forstliches Ingenieurwesen, ETH Zürich, 8092 Zürich, Schweiz;

Beteiligte Personen: Leo Bont (Konzept, Mechanik), Patricia Moll (Implementation in Python / QGIS)