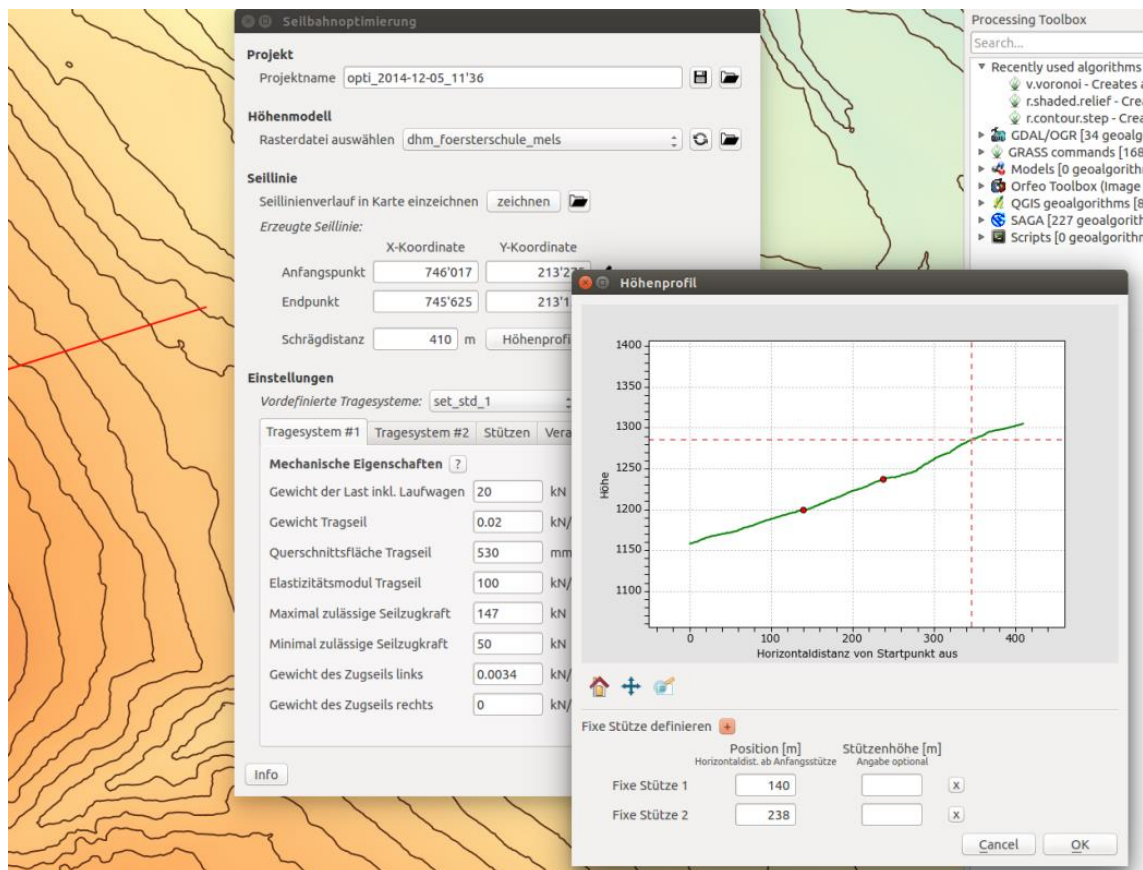


Dokumentation

SEILAPLAN V3.6

QGIS Plugin zur Planung von Seilkran-Layouts



Inhaltsverzeichnis

1.	Übersicht Seilaplan.....	3
2.	Hintergrund.....	3
3.	Voraussetzung (Hard- & Software).....	4
4.	Eingangsdaten	4
4.1.	Terrain: Digitales Höhenmodell	4
4.2.	Terrain: Geländeprofil aus Feldaufnahmen	5
4.2.1.	Exportdatei vom Haglöf Vertex Laser Go.....	5
4.2.2.	CSV-Datei mit X, Y, Z-Koordinaten	5
4.2.3.	Feldaufnahmeprotokoll in Excel-Datei (*.xlsx).....	5
4.3.	Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie.....	6
4.4.	Seilkranspezifische Parameter	8
4.4.1.	Parametersets	8
4.4.2.	Seillinie	8
4.4.3.	Maschinendaten	9
4.4.4.	Kopfdaten	10
4.4.5.	Optionale Parameter	10
5.	Manuelle Bearbeitung.....	12
5.1.	Diagramm	12
5.2.	Stützen editieren, löschen und hinzufügen	12
5.3.	Kennwerte der Seilline.....	12
5.4.	Vogelperspektive	13
6.	Ergebnisse	14
6.1.	Kurzbericht.....	14
6.2.	Wichtigste Ausgabedaten des detaillierten technischen Berichts	17
6.3.	Auftretende Kräfte und Geometrie im detaillierten technischen Bericht.....	17
7.	Literatur / weitere Infos:.....	20
8.	Kontakt	20
9.	Realisierung	20

1. Übersicht Seilaplan

Seilaplan steht für Seilkran Layout Planer. 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 3). 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.

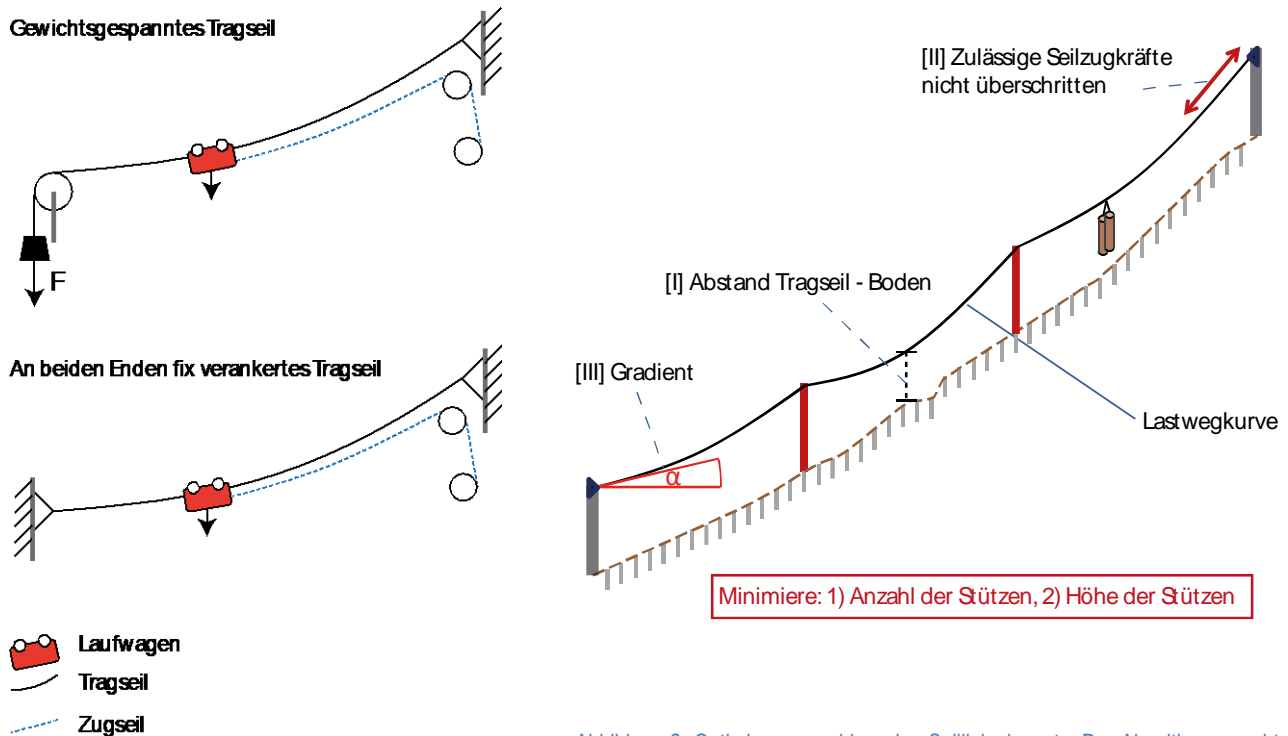


Abbildung 1: Seilsystem mit gewichtsgespanntem Tragseil (oben) und fix verankertem Tragseil (unten). Die Art der Verankerung des Tragseils hat entscheidenden Einfluss auf das mechanische Verhalten des Seils und sollte bei einer Projektierung berücksichtigt werden.

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 3.6 installiert werden kann.

4. Eingangsdaten

Folgende Eingangsdaten müssen definiert werden:

1. Topografie als Digitales Höhenmodell (digital elevation model) oder Profilpunkte aus Feldaufnahmen
2. Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie
3. Seilkranspezifische Parameter

4.1. Terrain: Digitales Höhenmodell

Das Höhenmodell muss als Raster verfügbar sein. Üblicherweise kann es als *.tiff, *.txt oder *.asc Datei in QGIS eingelesen werden, WMS-Dienste von Höhenmodellen können nicht verwendet werden.

Das Raster muss in einem projizierten Koordinatensystem vorliegen, geografische Koordinaten (in Grad) werden nicht unterstützt.

Um genügend genaue Resultate zu erhalten, empfehlen sich Höhenmodelle mit einer Auflösung von mind. 10m, besser jedoch 2m.

Hochaufgelöste Höhendaten des Schweizer Bundesamtes für Landestopografie *swisstopo* können mit dem QGIS Plugin *Swiss Geo Downloader* heruntergeladen werden. Weitere Informationen auf: <http://pimoll.github.io/SEILAPLAN/>.

Seit Version 3.2 können mehrere Raster gleichzeitig ausgewählt werden, so dass Seillinien über Kachelgrenzen hinweg gezeichnet werden können. Im Hintergrund werden die einzelnen Rasterkacheln zu einem virtuellen Raster zusammengefügt.

4.2. Terrain: Geländeprofil aus Felddaten

Die Felddaten müssen im Dateiformat .csv oder .xlsx vorhanden sein. Es werden drei Dateiformate unterstützt:

4.2.1. Exportdatei vom Haglöf Vertex Laser Go

Die Exportdatei des Haglöf Vertex Laser Gerätes enthält sowohl relative Distanz- und Winkelmessungen als auch absolute GPS-Messungen. Da die GPS-Messungen vorwiegend im Wald aufgenommen wurden, ist davon auszugehen, dass diese Messungen weniger genau als die relativen sind (siehe auch Dokumentation des Vertex Laser Go).

Beim Erstellen des Profils werden deshalb die relativen Distanz- und Winkelmessungen benutzt um die Punkte auf der Ebene zu bestimmen. Anschliessend werden die Punkte von diesem relativen Koordinatensystem mit Hilfe der GPS-Messungen in ein globales Koordinatensystem transformiert. Dabei wird auf alle Punkte ein mittlerer Translationsvektor angewandt, so dass die Punkte relativ zueinander gleich bleiben und nur das Koordinatensystem ändert. Schlussendlich wird eine gerade Linie durch die Punkte gelegt (Interpolation) und die Punkte auf diese Linie verschoben.

Die importierten Punkte werden im Koordinatensystem WGS 84 abgespeichert und anschliessend je nach aktuell ausgewähltem Referenzsystem des QGIS-Projektes automatisch transformiert.

Die Werte in der Vertex Exportdatei sollten grundsätzlich nicht manuell angepasst werden. Falls der Import aber nicht funktioniert und eine Warnung angezeigt wird („Mehrere Messreihen vorhanden“), können die überflüssigen Messreihen entfernt und der Import erneut durchgeführt werden. Messreihen sind aufgrund der Nummerierung in der Spalte „SEQ“ erkennbar; eine Messreihe beginnt bei der Nummer 1. Seilaplan kann nur eine Messreihe importieren.

4.2.2. CSV-Datei mit X, Y, Z-Koordinaten

Die CSV-Datei muss die drei Spalten X (Ost-Koordinate), Y (Nord-Koordinate) und Z (Höhe) in genau dieser Reihenfolge enthalten. Im Import-Dialogfenster für Geländeprofile bietet Seilaplan eine CSV-Vorlage zum Download an.

Die Koordinaten der aufgenommenen Geländepunkte müssen entlang der Geländelinie korrekt sortiert sein. Dabei ist es nicht relevant, von welcher Seite (Tal -> Berg oder Berg -> Tal) die Geländepunkte aufgelistet werden. Die Datei darf zudem abgesehen von der Kopfzeile (erste Zeile der Datei) keinen weiteren Text enthalten.

Da die CSV-Datei keine Information über das Referenzsystem enthält, wird das Referenzsystem des QGIS-Projektes angenommen. Falls dieses ein geographisches Referenzsystem (z.B. WGS 84) ist, wird stattdessen das Schweizer Referenzsystem LV95 verwendet.

4.2.3. Felddatenaufnahmeprotokoll in Excel-Datei (*.xlsx)

Unter Felddatenaufnahmen verstehen sich Messungen von Schrägdistanz und Neigung entlang einer Geländelinie. Aus diesen Messwerten und einer Punktkoordinate kann Seilaplan eine Profillinie im Gelände berechnen. Für die Erfassung und den Import der Felddatenaufnahmen bietet Seilaplan eine Protokoll-Vorlage im Excel-Format an. Die Vorlage kann im Import-Dialogfenster für Geländeprofile heruntergeladen werden. Damit der Import funktioniert, dürfen keine Felder in der Excel-Vorlage verschoben werden.

Zur Erfassung einer Geländelinie müssen mindestens folgende Informationen im Protokoll erfasst werden:

- Punktkoordinaten (X, Y) eines Punktes des Protokolls, Koordinaten müssen in einem projizierten Koordinatensystem vorliegen (keine Grad-Angaben)
- Nummer des Punktes im Protokoll, an dem die absoluten Koordinaten gemessen wurden
- Azimut der Geländelinie
- Mindestens 2 Messungen von Schrägdistanz und Neigung

Das Protokoll beginnt mit einer ersten Zeile für Distanz und Neigung (Zeile 21), welche das Gelände VOR dem ersten Geländepunkt beschreibt. Das Ausfüllen dieser ersten Zeile ist freiwillig. Ab Zeile 23 muss mindesten die Schrägdistanz und Neigung erfasst werden.

Bemerkungen können sowohl für Punkte als auch Strecken zwischen Punkten erfasst werden. Seilaplan kann in Version 3.4 nur Punkt-Bemerkungen importieren und darstellen, der Import und Darstellung von Strecken-Bemerkungen wird in einer späteren Version ergänzt.

Im Protokoll-Kopf können Eigenschaften des Projektes und der beteiligten Personen erfasst werden. Diese Eigenschaften werden von Seilaplan importiert und stehen anschliessend im Reiter „Kopfdaten“ und in den Berichten zur Verfügung.

Nach dem Import wird das Geländeprofil in der Karte dargestellt. Mit dem Zeichnungs-Werkzeug kann auf der Linie der Start- und Endpunkt der Seillinie definiert werden.

4.3. Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie

Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes können entweder in der Eingabemaske eingegeben oder direkt im QGIS gezeichnet werden. Wird eine CSV-Datei eingelesen, kann der Anfangs- und Endpunkt entlang der aufgenommenen Seillinie gewählt werden. Die Seillinie wird mit dem Anfangspunkt auf der linken und dem Endpunkt auf der rechten Seite dargestellt, wobei der Anfangspunkt die Seite des Maschinen- oder Seilkranstandorts definiert. Mit dem Anfangs- und Endpunkt wird der Start- und Endpunkt der Seillinien-Optimierung festgelegt. Um verschiedene Seillinienlayouts abzudecken, können als Anfangs- und Endpunkt die folgenden drei Bauelemente ausgewählt werden (Abbildung 3):

Seilkranmast (nur Anfangspunkt): Der Seilkranmast wird in der Optimierung als Stütze mit fixer Höhe definiert. Die Verankerung des Masten wird im Diagramm nicht dargestellt und kann auch nicht aktiviert werden.

Stütze: Die Stütze wird in der Optimierung als Stütze von variabler Höhe definiert. Die Höhe der Anfangsstütze bzw. des Endmasts wird im Rahmen der minimalen und maximalen Stützenhöhen optimiert. Vor der Anfangsstütze bzw. hinter dem Endmast wird ein nicht befahrbares Ankerfeld von 20m gezeichnet, das jedoch keinen Einfluss auf das Resultat der Optimierung hat. Die Verankerung kann nach der Optimierung im Bearbeitungsfeld aktiviert/deaktiviert und verschoben werden.

Verankerung: Die Verankerung wird in der Optimierung als Stütze mit fixer Höhe von 0m definiert, da der Optimierungsalgorithmus nur zwischen zwei Stützen berechnet werden kann. Dadurch wird das Ankerfeld wie ein Spannfeld optimiert und kann vom Laufwagen befahren werden.

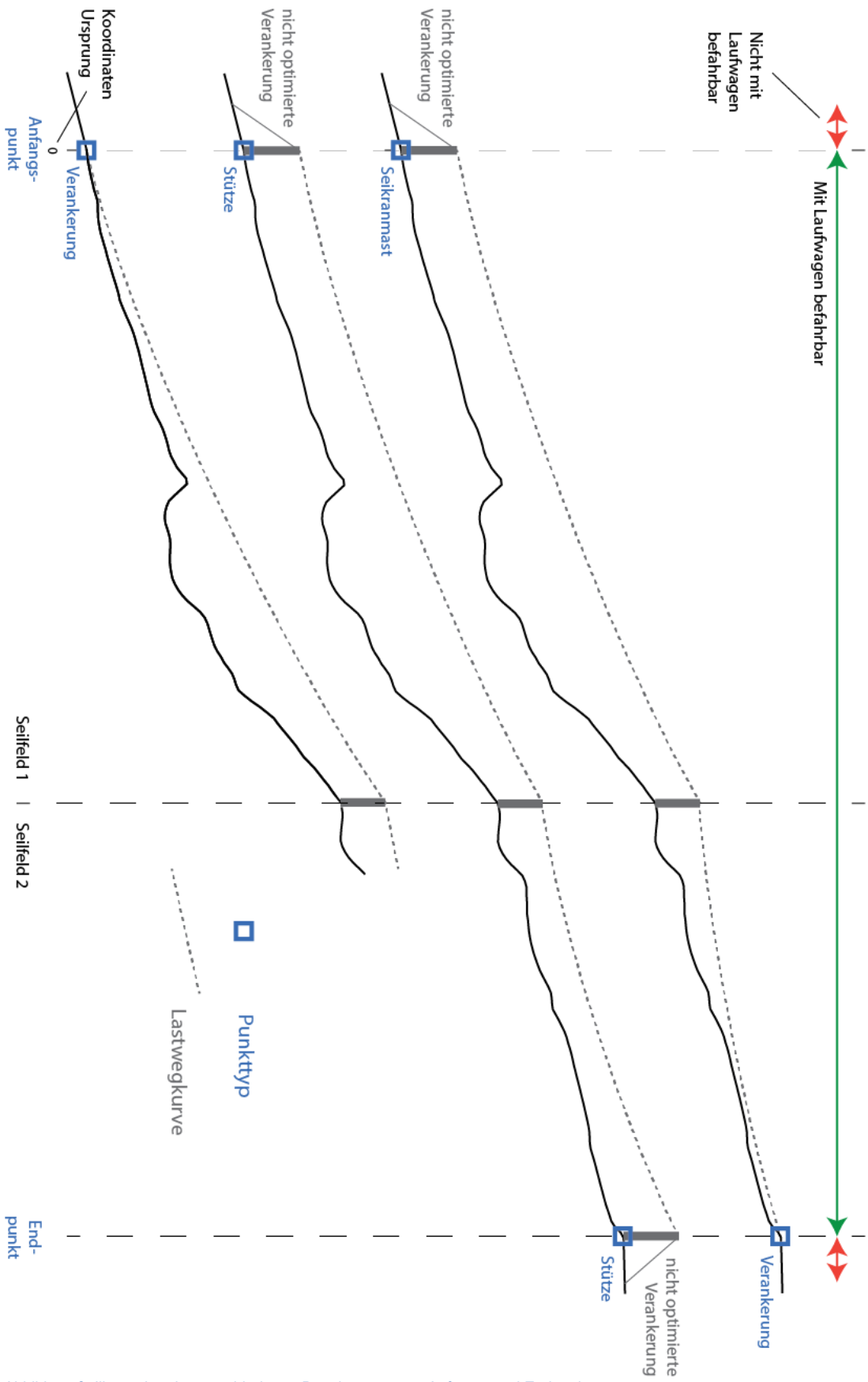




Abbildung 3: Illustration der verschiedenen Bauelemente von Anfangs- und Endpunkt.

4.4. Seilkran-spezifische Parameter

Im Startfenster kann die Berechnung der Seillinie durch die Angabe von seilkran-spezifischen Werten konkretisiert werden. Dadurch können die lokalen Gegebenheiten in der Optimierung und Berechnung der Seillinie berücksichtigt werden.

4.4.1. Parametersets

Im Tool kann aus drei vordefinierten Parametersets ausgewählt werden. Neben dem Standardparameterset ist ein Parameterset für einen Konventionellen Seilkran sowie für einen Mobilseilkran definiert. Das Parameterset «KSK 3t 22.5/10mm» entspricht einem Konventionellen Seilkran mit einer Nutzlast von drei Tonnen, einem Tragseil mit 22.5mm und einem Zugseil mit 10mm Durchmesser. Das Parameterset «MSK 3t 20/11/8mm» entspricht einem Mobilseilkran mit einer Nutzlast von drei Tonnen, einem Tragseil mit 20mm, einem Zugseil mit 11mm und einem Hilfsseil mit 8mm Durchmesser.

Es kann aber auch ein benutzerdefiniertes Parameterset festgelegt werden. Dafür müssen zuerst die Parameter wie gewünscht angepasst und anschliessend mit dem Speicher-Icon  abgespeichert werden. Das benutzerdefinierte Parameterset kann ab dann im Drop-Down-Menü ausgewählt werden. Alle Parametersets bis auf das Standardparameterset können mit einem Klick auf das Papierkorb-Icon  wieder gelöscht werden.

4.4.2. Seillinie

Tabelle 1 zeigt die Parameter, welche für die exakte Beschreibung der Seillinie zu definieren sind. Es kann angegeben werden, ob mit einem Zweiseil- oder Mehrseilsystem gearbeitet wird. Beim Zweiseilsystem wird die Gravitation genutzt, deshalb wird die Seillinie auf einen durchgehenden Gradienten geprüft (Abbildung 4). Im Weiteren kann ein minimaler Abstand des Tragseils vom Boden definiert werden. Es gibt Situationen, bei denen das Spannungsfeld am Anfang oder Ende nur teilweise befahrbar sein muss. In diesem Fall kann eine Distanz angegeben werden, bis zu welcher der minimale Abstand nicht eingehalten werden muss (Abbildung 4).

Tabelle 1: Angabe zur Seillinie

Parameter	Einheit	Bemerkung
Seilsystem	-	Unterscheidung zwischen Zweiseil- und Mehrseilsystem
Höhe Mast Mobilseilkran	m	Kann nur definiert werden, wenn Seilkran als Anfangspunkt gewählt wurde
Tragseil befahrbar ab ... vom Anfangspunkt	m	Ab dieser Distanz vom Anfangspunkt an wird geprüft, ob die Seillinie beim Einsatz eines Zweiseilsystems befahrbar ist
Tragseil befahrbar bis ... vor dem Endpunkt	m	Bis zu dieser Distanz vor dem Endpunkt wird geprüft, ob die Seillinie beim Einsatz eines Zweiseilsystems befahrbar ist
Bodenabstand		
Minimaler Abstand Tragseil - 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

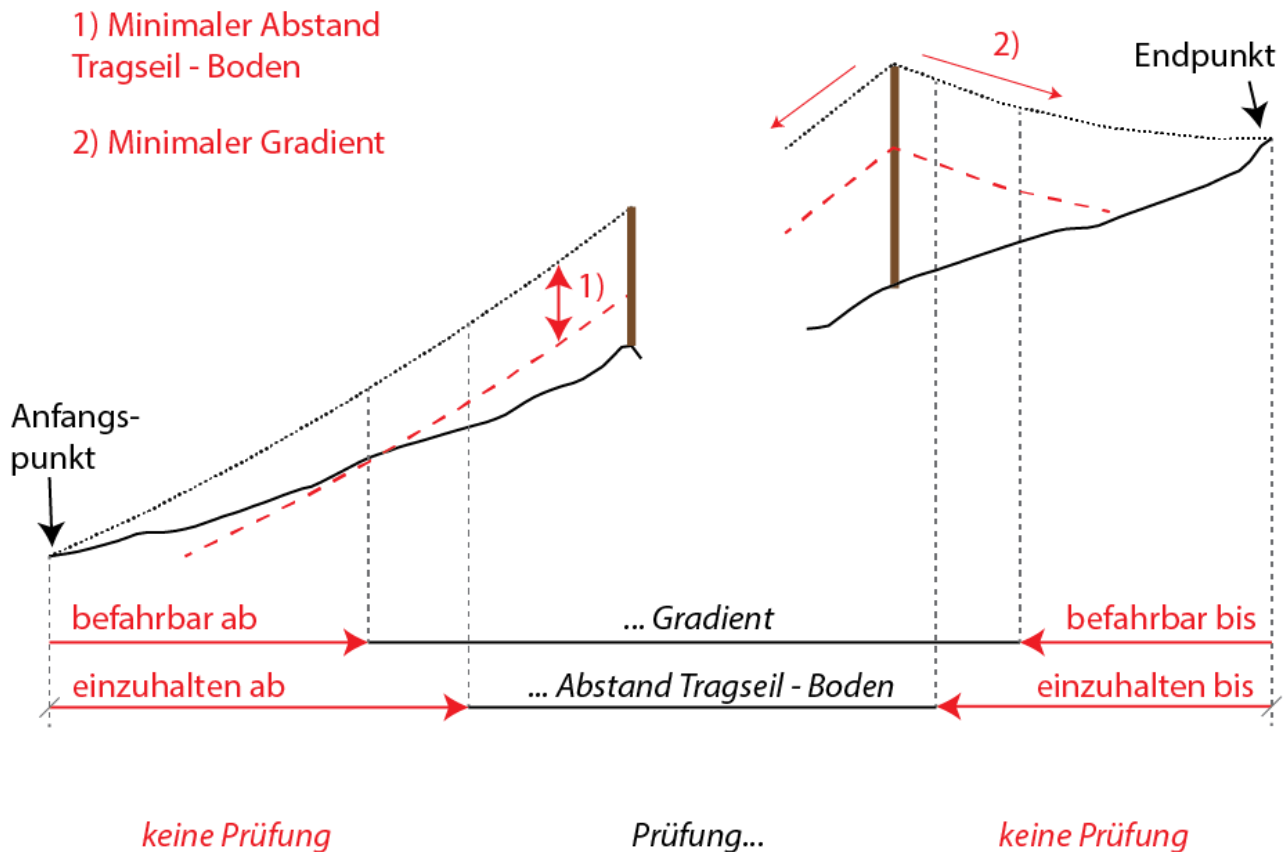


Abbildung 4: Parameter für die Prüfung der Bedingung des minimalen Bodenabstandes und des Seilsystems. Für den Fall, dass als Anfangs- oder Endpunkt eine Verankerung gewählt wird, macht es Sinn, eine Strecke zu definieren, auf welcher die Prüfung des minimalen Bodenabstandes nicht stattfindet.

4.4.3. Maschinendaten

Tabelle 2 zeigt die technischen Parameter des Seilkranes, welche zu definieren sind. Alle Angaben sollten dem Maschinisten bekannt sein oder im Kranbuch stehen. Ansonsten muss beim Hersteller nachgefragt werden.

Tabelle 2: Technische Parameter des Seilkranes

Parameter	Einheit	Bemerkung
Gesamtlast	kN	Gesamtlast aus Anhängelast, Laufwagen und Anschlagmittel.
Metergewicht Tragseil	kN / m	Gemäss Angaben des Seilherstellers
Durchmesser Tragseil	mm	Gemäss Angaben des Seilherstellers
Mindestbruchkraft Tragseil	kN	Gemäss Angaben des Seilherstellers
Metergewicht Zugseil	kN / m	Gemäss Angaben des Seilherstellers
Metergewicht Rückholseil	kN / m	Gemäss Angaben des Seilherstellers
Tragseilspannkraft (Grundspannung)	kN	Grundspannung des Tragseils
Anlagetyp	-	Optionale Angabe des Anlagetyps (nicht relevant für Berechnung)
Sicherheitsfaktor		Europaweit (DIN EN 16517, Stand April 2022) gilt ein Sicherheitsfaktor von 3.0 für das Tragseil, bzw. 2.5 für Tragseile mit einer effektiven Lastbegrenzung im Betrieb.

4.4.4. Kopfdaten

Im Reiter Kopfdaten lassen sich Metadaten des Seillinienprojekts wie Projektverfasser, Projektnummer, Gemeinde, Standort und Bemerkung erfassen. Die Angaben sind optional und haben keinen Einfluss auf die Berechnung.

4.4.5. Optionale Parameter

Mit den Optimierungsparametern (Abbildung 5) im Reiter Optional #1 kann der Optimierungsraum eingeschränkt und dadurch die Rechenzeit verkürzt werden. Insbesondere die Parameter „Minimaler Abstand mögl. Stützenstandorte“ und „Abstufungsintervall“ haben einen grossen Effekt auf die Rechenzeit. Weiter können im Reiter Optional #2 die Parameter Elastizitätsmodul, Füllfaktor und Grenzwerte für Leer- und Lastseilknickwinkel angepasst werden. (Tabelle 3)

Tabelle 3: Optionale Parameter zur Einschränkung des Optimierungsraumes.

Parameter	Einheit	Bemerkung
Minimaler Abstand zwischen Stützen	m	Kleinsten horizontalen Abstand zwischen zwei ausgewählten Stützen im Seillinienlayout
Minimaler Abstand mögl. Stützenstandorte	m	Abstand, in welchem potentielle Stützen gesetzt werden können. Beispiel: Ein minimaler Abstand von 1m bedeutet, dass sich im horizontalen Abstand von 1m potentielle Stützenstandorte befinden dürfen. ➔ 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.
Minimale Sattelhöhe	m	
Maximale Sattelhöhe	m	
Abstufungsintervall	m	Kleinste Abstufung zwischen zwei möglichen Stützenhöhen Beispiel: Bei einem Intervall von 2m, einer minimalen Stützenhöhe von 8m und einer maximalen 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 1-2m 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.
Minimal gewählte Seilzugkraft	kN	Der gewählte Wert schränkt den Optimierungsraum ein, hat aber keinen Einfluss auf das Resultat. Um die Rechenzeit zu reduzieren, soll hier ein möglichst hoher Wert gewählt werden, der aber unter der möglichen Vorspannung liegen muss.
Elastizitätsmodul Tragseil	kN/mm ²	Das Elastizitätsmodul ist ein Materialkennwert des Tragseils, welcher den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung des Seils beschreibt. Der Kennwert ist oftmals nicht bekannt, da er von den Seilherstellern experimentell ermittelt werden muss. Der Default-Wert von 100kN liegt nach Rückmeldung von verschiedenen bekannten Seilherstellern Mitteleuropas im Bereich der E-Module ihrer Seile. Die Abweichungen im Durchhang können bei den üblichen Seilen in Mitteleuropa bis zu 1.5m betragen, wenn das korrekte E-Modul nicht bekannt ist.
Füllfaktor		Der Füllfaktor ist das Verhältnis der metallischen Querschnittsfläche des Seils zum Flächeninhalt seines Umkreises. Der Default-Wert von 0.7 liegt nach Rückmeldung von verschiedenen bekannten Seilherstellern Mitteleuropas im Bereich der E-Module ihrer Seile. Die Abweichungen im Durchhang können bei den üblichen Seilen in Mitteleuropa bis zu 1m betragen.

Grenzwert min. Leerseilknickwinkel (mit / ohne Niederhaltetasche)		Angabe der minimalen Leerseilknickwinkel gemäss Angaben des Sattelherstellers. Der erste Wert gilt für Stützen mit montierter Niederhaltetasche, der zweite für Stützen ohne Niederhaltetasche. Nach Pestal (1961) besteht bei Knickwinkeln unter dem Grenzwert die Gefahr, dass das Tragseil beim Sattel abhebt.
Grenzwert max. Lastseilknickwinkel (Stütze / Endmast)		Angabe des maximalen Lastseilknickwinkels gemäss Angaben des Sattelherstellers. Grössere Knickwinkel reduzieren die Bruchlast des Tragseils und führen zu höheren Sattelkräften (Pestal, 1961).
Bundstelle über Trageiselsattel		Seilaplan berechnet die benötigte Höhe des Tragseils bei einer Stütze (Sattelhöhe). Die Bundstelle befindet sich einige Meter über dem Sattel. Die Höhendifferenz zwischen Trageiselsattel und Bundstelle kann mit diesem Parameter angepasst werden.

Längenoptionen der Stützen

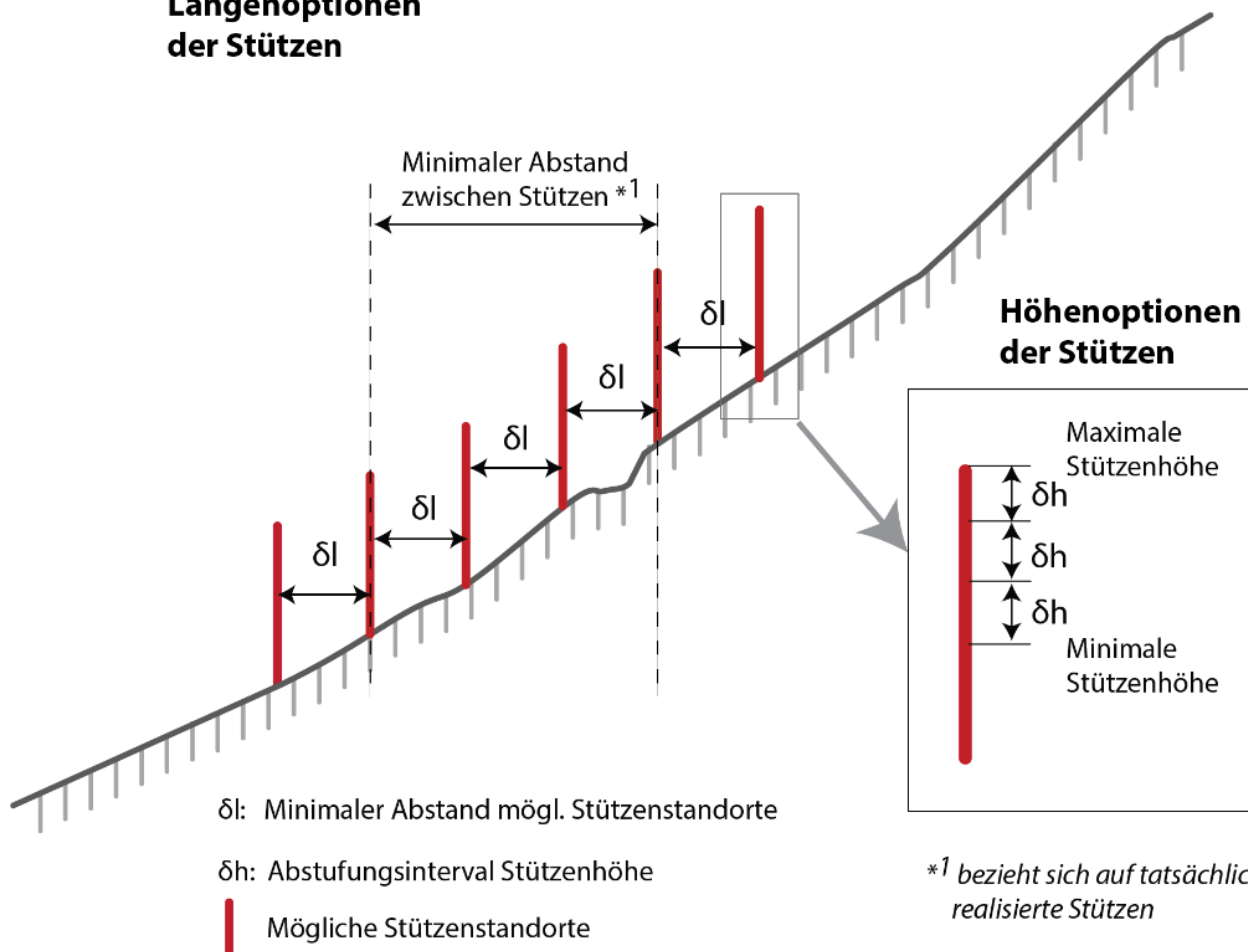





Abbildung 5: Parameter zur Setzung der Zwischenstützen

5. Manuelle Bearbeitung

Die manuelle Bearbeitung der Seillinie dient dazu, das Optimierungsergebnis zu verfeinern und an reale Bedingungen anzupassen. Eine Seillinie kann zudem auch ohne Optimierung direkt bearbeitet und berechnet werden. Das Bearbeitungsfenster enthält in beiden Fällen die in diesem Kapitel beschriebenen Ansichten und Funktionen.

5.1. Diagramm

Das Diagramm zeigt die optimierte Seillinie. Für eine bessere Übersicht kann das Seilaplan-Fenster vergrößert werden. Die drei Buttons unterhalb des Diagramms dienen der Navigation. Das Haus-Icon  setzt die Ansicht auf den ursprünglichen Ausschnitt der gesamten Seillinie zurück, mit dem Kreuz-Icon  kann der aktuelle Ausschnitt verschoben und mit der Lupe  auf einen gewählten Ausschnitt gezoomt werden. Zudem kann der Ausschnitt mit dem Mausrad oder dem Touchpad vergrößert und verkleinert werden. Das Diagramm wird sofort aktualisiert, wenn Stützen oder Kennwerte verändert werden.

5.2. Stützen editieren, löschen und hinzufügen

Die Stützen können auf drei Arten bearbeitet werden.

- Stützen bearbeiten: Die Stützenposition, die Stützenhöhe, wie auch die Neigung der Stütze kann verändert werden, indem der gewünschte Wert ins Feld geschrieben oder mit den Pfeilen der Wert hinauf- oder hinabgesetzt wird.
- Stützen löschen: Mit dem Papierkorb-Icon hinter der jeweiligen Stützenzeile kann die Stütze gelöscht werden.
- Stützen hinzufügen: Mit dem Plus-Icon vor der jeweiligen Stützenzeile kann eine zusätzliche Stütze hinzugefügt werden.

Zudem können Verankerungen nach Wunsch mit einem Häkchen aktivieren und deaktivieren werden. Die Seillinie aktualisiert sich bei jeder Anpassung automatisch.

5.3. Kennwerte der Seillinie

Im zweiten und dritten Reiter können bereits definierte Parameter angepasst und die Kennwerte der berechneten Seillinie angeschaut werden.

Im zweiten Reiter «Tragsystem» können die Maschinendaten sowie die Grundspannung des Trageils und der minimale Abstand zwischen Trageil und Boden angepasst werden. Die Seillinie wird sofort neu berechnet und die Veränderungen sind im Diagramm ersichtlich.

Im dritten Reiter «Kennwerte» wird aufgezeigt, ob die Grenzwerte für das Tragsystem eingehalten werden (Tabelle 4). Es werden die definierten Grenzwerte, welche teilweise auf dem Parameterset basieren, die berechneten Werte der Optimierungslösung sowie die neuen Werte nach einer manuellen Anpassungen aufgelistet. Die aktuellen Werte und deren Position können per Klick auf eine Zeile im Diagramm angezeigt werden. Falls Grenzwerte überschritten werden, sind die Angaben im Diagramm rot hinterlegt.

Tabelle 4: Beschreibung der Grenzwerte.

Kennwert	Einheit	Grenzwert
Minimaler Bodenabstand	m	Es wird der von der benutzenden Person unter «Minimaler Abstand Trageil – Boden» im Reiter «Seillinie» angegebene Wert als Grenzwert verwendet.
Max. auftretende Seilzugkraft	kN	Der Grenzwert für die zulässige Seilzugkraft ist als Mindestbruchkraft des Trageils geteilt durch den Sicherheitsfaktor definiert. Die Seilzugkraft am Lastseil mit der Last in Feldmitte ist massgebend.

Max. Lastseilknickwinkel	z.B. 30° / 60°	Grössere Knickwinkel reduzieren die Bruchlast des Tragseils und führen zu höheren Sattelkräften (Pestal, 1961). Standardmässig werden hier die beiden Grenzwerte 30° für befahrbare und 60° für nicht befahrbare Stützen verwendet (Erfahrungswerte aus der Praxis). Die Grenzwerte sind anpassbar, es sollen die Angaben des Sattelherstellers verwendet werden.
Min. Leerseilknickwinkel (Nachweis erbracht, dass Seil nicht von Sattel abhebt)	z.B. 1° / 3°	Nach Pestal (1961) besteht bei Knickwinkeln unter dem Grenzwert die Gefahr, dass das Tragseil beim Sattel abhebt (rot hinterlegte Werte). Bei Knickwinkeln zwischen erstem und zweitem Grenzwert muss das Tragseil mittels Niederhalte-lasche gesichert werden (orange hinterlegte Werte). Die Grenzwerte sind anpassbar, es sollen die Angaben des Sattelherstellers verwendet werden.

5.4. Vogelperspektive

Im vierten Reiter "Vogelperspektive" kann die Darstellung der Seillinie und Stützen aus der Vogelperspektive konfiguriert werden. Die Vogelperspektive wird in den Speicheroptionen aktiviert. Sie ist Teil des Diagramm-Exports und wird unterhalb der Profilsansicht im PDF ausgegeben.

Jedem Bauelement kann eine Kategorie zugeordnet werden (Abbildung 6). Das Bauelement wird in der Vogelperspektive mit dem entsprechenden Symbol dargestellt. Bei der Position der Stütze kann vom Anfangspunkt aus gesehen, rechts, zentral oder links ausgewählt werden. Die Ausrichtung der Abspannseile kann als dritte Option ausgewählt werden. Sie können in Richtung des Anfangs- oder Endpunkts abgespannt sein oder bei Auswahl von "flach" als dreizackiger Stern dargestellt werden.

Legende Vogelperspektive

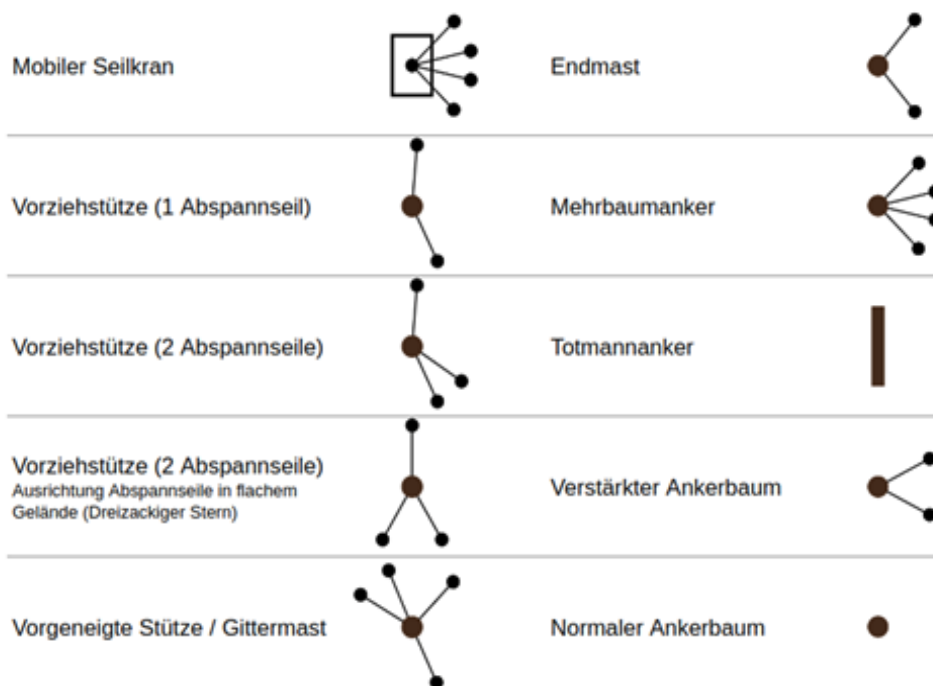


Abbildung 6: Symbole für die verschiedenen Kategorien der Bauelemente

Als Hintergrund für die Vogelperspektive wird die aktuelle Kartendarstellung aus dem QGIS verwendet. Mit Klick auf das Layer-Icon im rechten oberen Bereich des Reiters kann eine farbige Landeskarte als Hintergrund geladen werden.

6. Ergebnisse

Die Ausgabe erfolgt je nach Auswahl in PDF-Dateien, Shape Dateien und CSV-Tabellen. Die Kennwerte der berechneten Seillinie können in einem Kurzbericht und einem detaillierten technischen Bericht ausgegeben werden. Weiter kann eine graphische Darstellung der Seillinie in Seitenansicht ausgewählt werden. Das Seillinien-Layout kann zudem als Shape-, KML- oder CSV-Datei abgespeichert werden.

Die im Bericht aufgeführten Kennwerte werden nachfolgend genauer erläutert.

6.1. Kurzbericht

Der Kurzbericht gibt die wichtigsten Parameter für die Planung und den Bau der Seillinie aus (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ausgabedaten des Kurzberichts

Beschreibung	Masseinheit	Bemerkung
Zeitpunkt der Berechnung	Datum, Zeit	
Diverse Kopfdaten	-	Eigenschaften des Projekts wie Autor, Projektnummer, Ort, etc.
Höhendaten		Dokumentname des verwendeten digitalen Höhenmodells
Azimut	gon, °	Azimut der Seillinie
Eingabewerte		Auflistung der eingegebenen Parameterwerte, welche für die Berechnung verwendet wurden.
Stützen: Bezeichnung, Sattelhöhe, Neigung, Min. BHD	-, m, °, cm	
Maximal berechnete Seilzugkraft	kN	Die Seilzugkraft des Tragseils wird für den höchsten Punkt im Seilsystem bei Last in Spannfeldmitte angegeben.
Kräfte und Winkel: Bezeichnung, Max. Kräfte, Seilwinkel	-, kN, °	Leerseilknickwinkel: Berechnet sich als Differenz der Leerseilwinkel von beiden Stützenseiten. Lastseilknickwinkel: Berechnet sich als Differenz der Leerseilwinkel von einer Stützenseite mit dem Lastseilwinkel der anderen Stützenseite. Angriffswinkel: Winkel zwischen Gelände und Tragseil (Leerseilwinkel) beim Anker. Annahme: Die maximale auftretende Kraft befindet sich nicht im Ankerfeld. Bei maximaler Last im Ankerfeld (das Lastfeld ist das längste Feld) werden zu konservative (hohe) Winkel ausgegeben.
Berechnete Seillänge	m	Länge des Leerseils bei 0kN Seilzugkraft
Anker- und Spannfelder: Dimensionen, Durchhang	m, m	Durchhang des Leerseils und der Lastwegkurve in Feldmitte

Die Berechnung der Stützendimensionen erfolgt folgenderweise:

Sattelhöhe + 1.5m gerechnet (= Höhe Abbundstelle)

Tabelle 6 nachgeschaut (Erforderlicher Durchmesser von Stützenbäumen an der Abbundstelle in Abhängigkeit der Sattelhöhe, nach Pestal (1961))

1. BHD Berechnen: Durchmesserzunahme: 1cm pro 1m Stammlänge, d.h. wenn aus 2.) sich 30cm in 11m Höhe ergibt, dann ist der erforderliche BHD = 40 cm

Folgende Gleichung wurde implementiert:

$BHD = \text{int}(\text{round}(\text{bundst} + (\text{height} - 1.5), 0)) \text{ [cm]}$ (Minus 1.5 da BHD nicht auf 0m ist, sondern angenähert auf 1.5m)

Mit:

$\text{bundst} = \text{Bundstelle aus Tabelle [cm]}$

$\text{height} = \text{Sattelhöhe} + 1.5\text{m}$

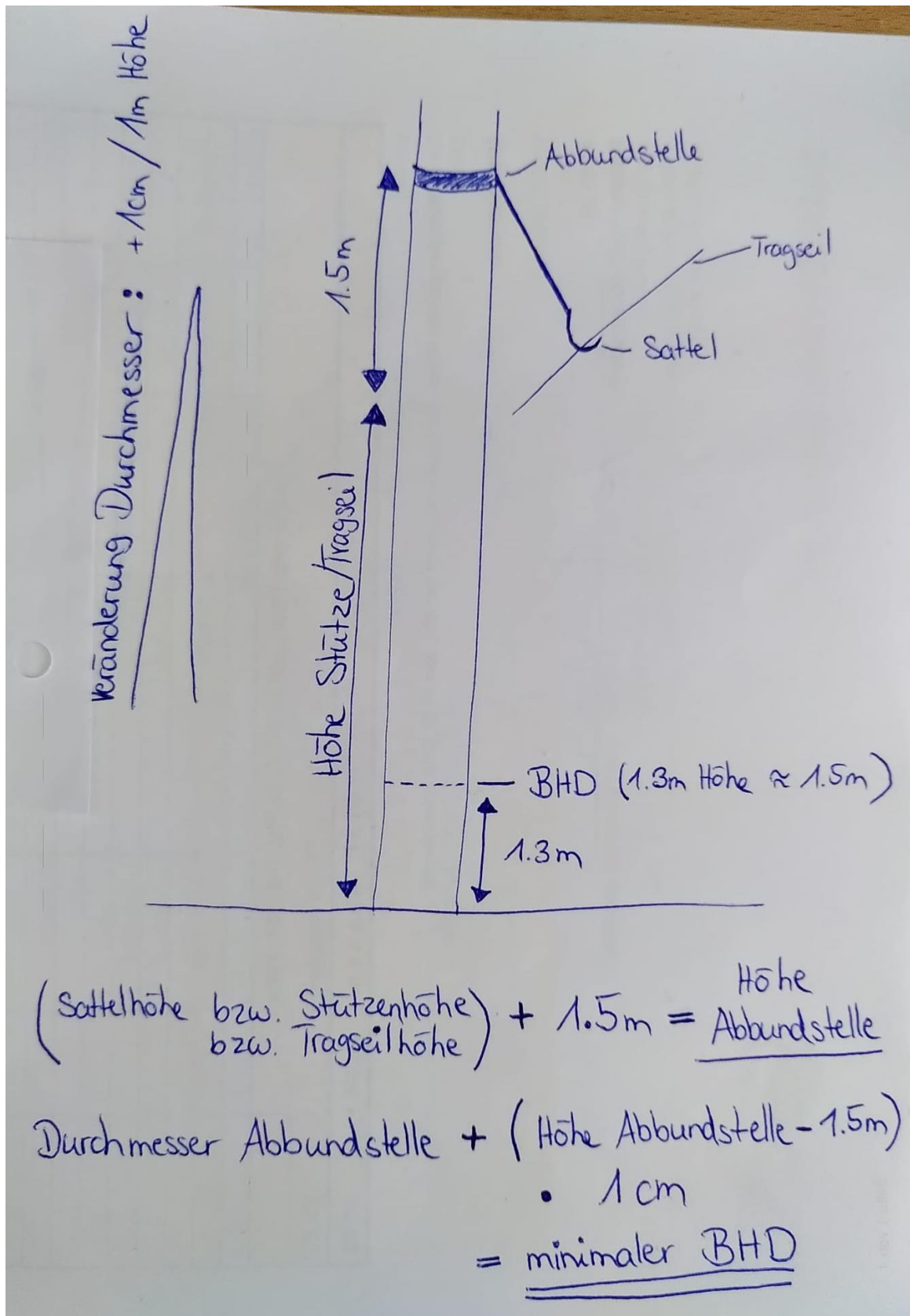


Abbildung 7: Prinzip der Herleitung des minimalen BHD

Tabelle 6: Erforderlicher Durchmesser (in cm) von Stützenbäumen an der Bundstelle (o.R., gesund und waldfrisch, $E = 8 \text{ kN} / \text{mm}^2$), abgeleitet nach Pestal 1961, S. 486f

Sattel- kraft	Höhe der Abbundstelle																					
	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m	13m	14m	15m	16m	17m	18m	19m	20m	22m	24m	26m	28m	30m	
kN	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	
10	11	12	13	13	14	14	15	15	16	16	16	16	17	17	17	17	18	18	18	18	18	
20	14	15	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	21	22	22	22	23	23	24	24	24	
30	16	17	18	19	20	20	21	22	22	23	23	24	24	25	25	26	26	27	28	28	28	
40	17	18	19	20	21	22	23	24	24	25	26	26	27	27	28	28	29	30	31	31	31	
50	18	19	21	22	23	24	25	25	26	27	28	28	29	29	30	30	31	32	33	34	34	
60		20	22	23	24	25	26	27	28	29	29	30	31	31	32	32	33	34	35	36	36	
70		21	23	24	25	26	27	28	29	30	31	31	32	33	33	34	35	36	37	38	38	
80			24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39	40	40	
90			24	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39	40	41	42	
100			25	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	37	38	39	41	42	43	43	
110				27	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	39	41	42	43	44	45	
120				28	29	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	40	42	43	44	45	46	
130				29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	40	41	41	43	44	45	47	47	
140					31	32	34	35	36	37	38	39	40	41	42	42	44	45	47	48	48	
150					31	33	34	35	36	38	39	40	41	41	42	43	45	46	48	49	49	

6.2. Wichtigste Ausgabedaten des detaillierten technischen Berichts

Der detaillierte technische Bericht gibt Auskunft über die verschiedenen Kräfte am Trageil und den Stützen (Tabelle 8). Zudem gibt er wie der Kurzbericht die wichtigsten Daten für die Planung und den Bau der Seillinie aus (Tabelle 7).

Tabelle 7: Wichtigste Ausgabedaten des detaillierten Berichts

Beschreibung	Masseinheit	Bemerkung
Zeitpunkt der Berechnung	Datum, Zeit	
Berechnungsdauer	s	
Höhendaten		Dokumentname des verwendeten digitalen Höhenmodells
Stützen: Höhe der Stützen; Neigung; X-, Y-, Z-Koordinate (Höhe am Grund)	m, Coord	
Grundspannung bei der Anfangsstütze	kN	
Daten für Absteckung im Feld	gon / m	Können mit Vermessungsinstrument oder Messband und Kompass abgesteckt werden
Annahmen		Auflistung der eingegebenen Parameterwerte, welche für die Berechnung verwendet wurden.

6.3. Auftretende Kräfte und Geometrie im detaillierten technischen Bericht

Die im Seilsystem auftretenden Kräfte und die Geometrie des Seilsystems sind in Abbildung 8 illustriert und in Tabelle 8 aufgelistet. Die Abkürzungen in der Tabelle 8 stimmen mit der Abbildung 8 überein. Parameter, welche nicht in Abbildung 8 dargestellt sind, sind schwach orange hinterlegt.

Tabelle 8: Detaillierte Ausgabeparameter

Abkürzung	Beschreibung Grösse	Einheit
Seillänge		
	Länge des Leerseils bei Anfangszugkraft	m
	Länge des Leerseils bei 0 kN Seilzugkraft	m
	Länge der Spannfelder (Schrägdistanz)	m
Durchhang		
yLE	Leerseildurchhang in Feldmitte	m
yLA	Lastseildurchhang in Feldmitte	m
Auf tretende Kräfte am Tragseil (Leerseil)		
T0,A	Seilzugkraft an der Anfangsstütze	kN
T0,E	Seilzugkraft an der Endstütze	kN
T0	Seilzugkraft des Leerseils an den Stützen	kN
HS	Horizontalkomponente der Seilzugkraft an den Stützen (Leerseilverhältnisse)	kN
Auf tretende Kräfte am Tragseil (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	Max. auftretende Seilzugkraft bei Last in Feldmitte, gemessen in Feldmitte	kN
Tm,max	Max. auftretende Seilzugkraft bei Last in Feldmitte, gemessen am höchsten Punkt im Seilsystem	kN
Hm	Horizontalkomponente der max. auftretenden Seilzugkraft bei Last in Feldmitte, gemessen in Feldmitte	kN
Auf tretende Kräfte an befahrbarer Stütze (Laufwagen auf Sattel)		
F_Sa_BefRes	Sattelpunkt, Resultierend	kN
F_Sa_BefV	Sattelpunkt, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_BefH	Sattelpunkt, Horizontal Komponente	kN
FSR	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil), Resultierend	kN
FSV	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil), Vertikal Komponente	kN
FSH	Sattelpunkt (Anteil von Tragseil), Horizontal Komponente	kN
FU	Einwirkung auf Stütze aus Last, Gewicht Trag- und Zugseil	kN
Auf tretende Kräfte an nicht befahrbarer Stütze (Laufwagen unmittelbar links/rechts der Stütze)		
TCS	Seilzugkraft	kN
F_Sa_NBefRes	Sattelpunkt, Resultierend	kN
F_Sa_NBefV	Sattelpunkt, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_NBefH	Sattelpunkt, Horizontal Komponente	kN
Seilwinkel an den Stützen		
α_{LA}	Seilwinkel an den Stützen, Leerseil	° [0...360]
α_{LE}	Seilwinkel an den Stützen, Lastseil	° [0...360]
Nachweis, dass Tragseil nicht vom Sattel abhebt		
	Lastseilknickwinkel	° [0...360]
β	Leerseilknickwinkel bei Stütze	° [0...360]
	Nachweis erfüllt (Leerseilknickwinkel >1°)	[Ja / Nein]

Auftretende Kräfte

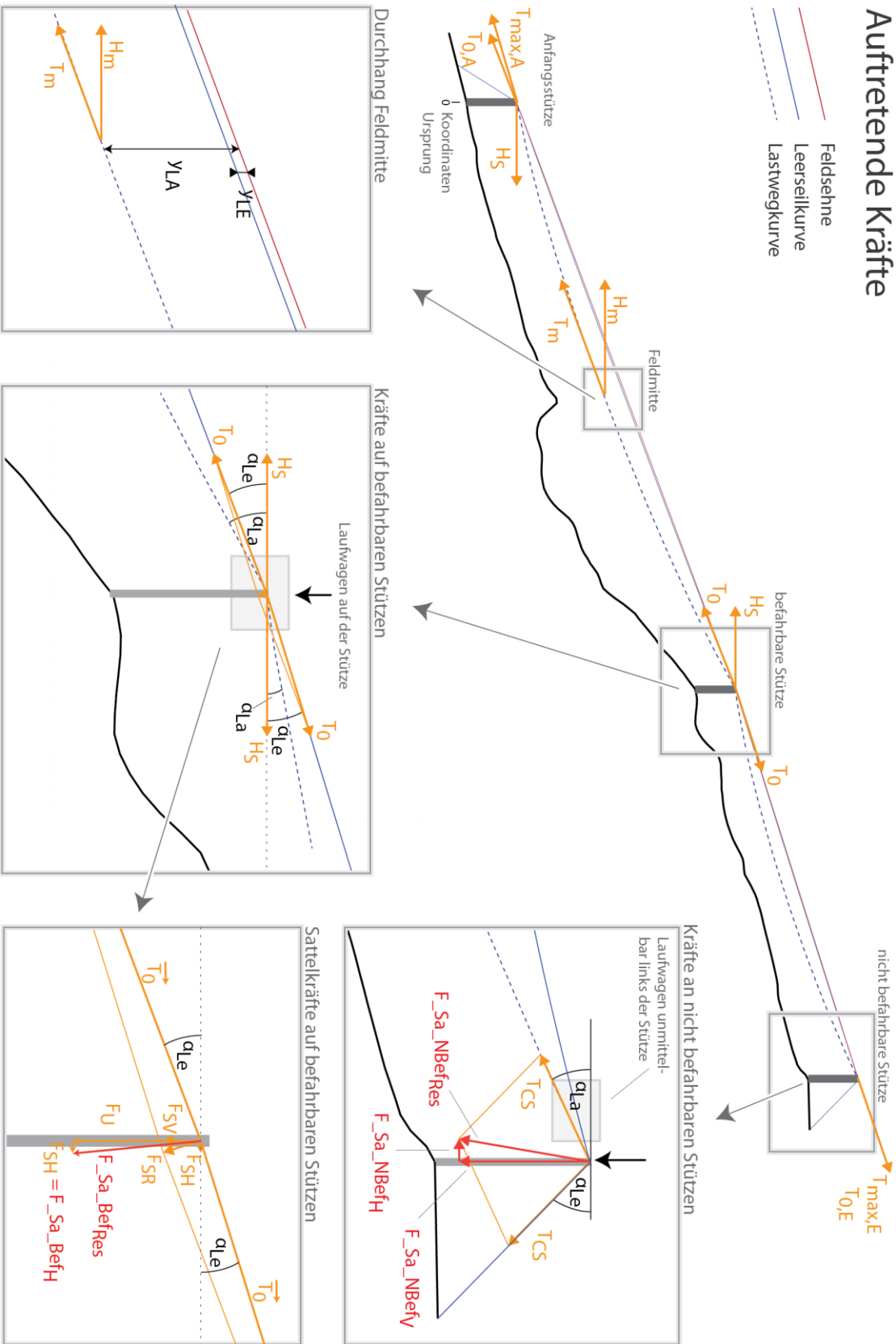


Abbildung 8: Illustration der Ausgabeparameter

7. 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.

PESTAL, E. (1961). Seilbahnen und Seilkrane für Holz- und Materialtransport.

8. Kontakt

Dr. Leo Bont

Waldressourcen und Waldmanagement

Nachhaltige Forstwirtschaft

Eidg. Forschungsanstalt WSL

Zürcherstrasse 111

8903 Birmensdorf

9. Realisierung

Professur für forstliches Ingenieurwesen

ETH Zürich

8092 Zürich

(Konzept, Realisierung Version 1.x für QGIS 2)

Nachhaltige Forstwirtschaft

Eidg. Forschungsanstalt WSL

8903 Birmensdorf

(Realisierung ab Version 2.x für QGIS 3)

Beteiligte Personen

Leo Bont, Patricia Moll, Laura Ramstein, Hans Rudolf Heinemann, Fritz Frutig, Janine Schweizer