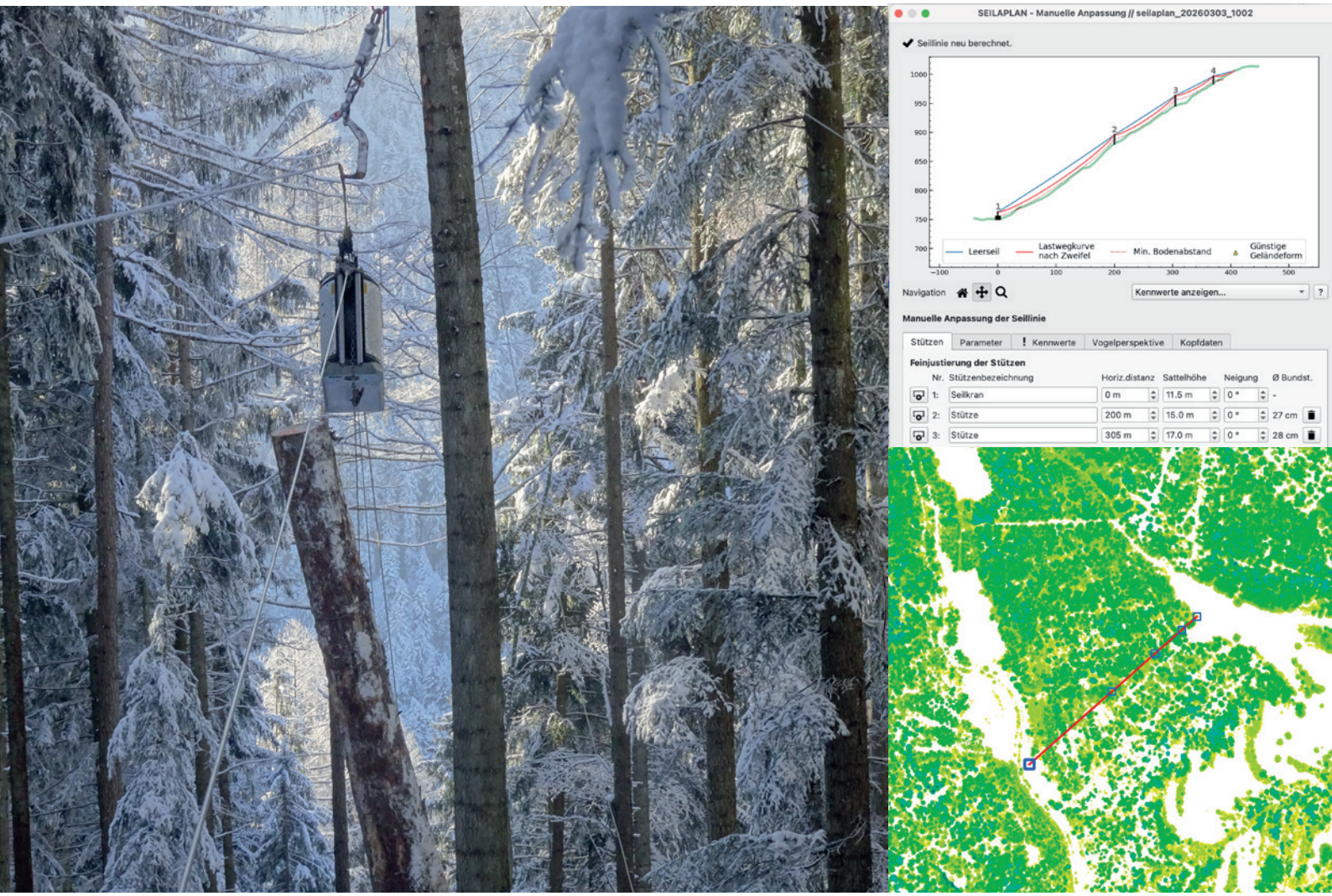
WSL Berichte | Heft 187, 2026

Digitale Seillinienplanung mit Seilaplan

SEILAPLAN Version 3.7



Laura Ramstein, Patricia Moll, Janine Schweier, Leo Bont

WSL Berichte | Heft 187, 2026

Digitale Seillinienplanung mit Seilaplan

SEILAPLAN Version 3.7

Laura Ramstein
Patricia Moll
Janine Schweier
Leo Bont

Herausgeberin
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Marco Ferretti, Leiter Forschungseinheit Waldressourcen und Waldmanagement

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, Teamleiterin Publikationen, WSL

Kontakt
Dr. Leo Bont
Waldressourcen und Waldmanagement
Nachhaltige Forstwirtschaft
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf

Layout: Jacqueline Annen, WSL

Zitiervorschlag:
Ramstein L., Moll P., Schweier J., Bont L. (Eds) (2026). Digitale Seillinienplanung mit Seilaplan. SEILAPLAN Version 3.7. WSL Ber. 187. 43 S. doi.org/10.55419/wsl:42826
PDF Download: wsl.ch/berichte

ISSN 2296-3448 (Print)
ISSN 2296-3456 (Online)

Bildnachweis Umschlag: Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft, WSL

Ziel
Dieses Handbuch richtet sich an die AnwenderInnen des QGIS-Plugins Seilaplan. Es dient zusammen mit den Tutorials auf der Seilaplan-Webseite seilaplan.wsl.ch als Einstieg in die Benutzung von Seilaplan.
Das erste Kapitel ist eine kurze Einführung ins Plugin und seine Entstehungsgeschichte. Die Installationsanleitung in Kapitel 2 und die Kurzanleitung in Kapitel 3 helfen bei den ersten Schritten. In Kapitel 4 werden die wichtigsten Grundlagen betreffend Geodaten vermittelt. Kapitel 5 beschreibt die Funktionalitäten des Plugins sowie dessen Anwendung. Die theoretischen Grundlagen und praktischen Erkenntnisse aus den Testungen können im Kapitel 6 nachgelesen werden. Abschliessend ist im Kapitel 7 eine Auswahl relevanter Literatur zu finden.
Kapitel 1 – Einleitung
Kapitel 2 – Installationsanleitung
Kapitel 3 – Kurzanleitung
Kapitel 4 – Geodaten
Kapitel 5 – Beschreibung Plugin
Kapitel 6 – Theoretische Grundlagen
Kapitel 7 – Literatur

Die Kapitel sind unabhängig voneinander und werden auf der Seilaplan-Webseite regelmässig aktualisiert. Zudem sind weitere Kapitel in Planung, welche auf der Seilaplan-Webseite publiziert werden. Das Handbuch ist im Rahmen der 1. Seilaplan-Tagung vom 30. August 2023 an der WSL in Birmensdorf entstanden.

2. Auflage März 2026

Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL forscht lösungsorientiert zu Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren sowie Schnee und Eis in einer Welt im Wandel. Als Forschungsinstitut des Bundes und Teil des ETH-Bereichs verpflichtet sie sich der Exzellenz in Forschung und Umsetzung.

Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **5**
1.1 Einführung 5
1.2 Entwicklungsgeschichte 5
1.3 Realisierung 5

2 Installationsanleitung **7**
2.1 Voraussetzungen Hard- und Software 7
2.2 Installation 7
2.3 Aktualisierungen 8
2.4 Lizenz und Haftung 8

3 Kurzanleitung **9**
3.1 Übersicht 9
3.2 Projekt erstellen 10
3.3 Hauptfenster 10
3.4 Bearbeitungsfenster 11
3.5 Speichern und Output-Produkte 12

4 Geodaten **13**
4.1 Begriffe 13
4.2 QGIS-Projekt erstellen 14
4.2.1 Koordinatensystem anpassen 14
4.2.2 Layer hinzufügen 14
4.3 Geodaten herunterladen 16
4.3.1 Herunterladen eines digitalen Höhenmodells mit Swiss Geo Downloader 16
4.3.2 Herunterladen eines digitalen Höhenmodells von der Swisstopo Webseite 17
4.4 Hilfreiche QGIS-Funktionen 17
4.4.1 Virtuelles Raster 18
4.4.2 Verschmelzen 19
4.4.3 Temporäre Layer als permanente Layer speichern 19
4.5 WMS-Layer einbinden 19

5 Beschreibung Plugin **21**
5.1 Projekt starten oder öffnen 21
5.2 Eingangsdaten 21
5.2.1 Terraindaten: Rasterlayer 21
5.2.2 Terraindaten: Geländeprofil aus Feldaufnahmen 21
5.2.3 Anfangs- und Endkoordinate der Seillinie 23
5.2.4 Seilkranspezifische Parameter 24
5.3 Manuelle Bearbeitung 28
5.3.1 Diagramm 28
5.3.2 Stützen editieren, löschen und hinzufügen 29
5.3.3 Kennwerte der Seilline 30
5.3.4 Vogelperspektive 30
5.3.5 Kopfdaten 30
5.4 Ausgabedaten 30
5.4.1 Diagramm 31
5.4.2 Kurzbericht 31
5.4.3 Technischer Bericht 33
5.4.4 CSV-Dateien 35
5.4.5 Weitere Dateiformate 35

6 Theoretische Grundlagen **37**
6.1 Seilmechanik 37
6.1.1 Tragseilkonfigurationen 37
6.1.2 Berechnungsmethoden nach Pestal (1961) und nach Zweifel (1960) 38
6.2 Verifikation der Berechnungen nach Zweifel 40
6.2.1 Feldmessungen 40
6.2.2 Ergebnisse 40
6.3 Optimierungsalgorithmus 41
6.3.1 Grenzen der Optimierung 42

7 Literatur **43**

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung zum QGIS-Plugin Seilaplan sowie seiner Entstehungsgeschichte gegeben.

1.1 Einführung

Das QGIS-Plugin Seilaplan ist ein GIS-basiertes Tool zur Unterstützung der Waldbewirtschaftung für das Entwerfen und die Optimierung von Seillinien-Layouts. Die Berechnungsgrundlagen wurden im Rahmen der Dissertation von Leo Bont (2008–2012) an der Professur für forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich entwickelt und werden unter seiner Leitung seit 2017 an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in der Praxis verifiziert und weiterentwickelt. Die Benutzeroberfläche wurde über die gesamte Zeit von Patricia Moll programmiert.

Die Abkürzung «Seilaplan» steht für Seilkran Layout Planer. Anhand von definierten Anfangs- und Endkoordinaten, Maschinendaten und weiteren technischen Seillinien-Parametern berechnet das Tool, basierend auf einem digitalen Höhenmodell, das optimale Seillinienlayout. Es werden Position und Höhe der Stützen sowie die wichtigsten Kennwerte der Seillinie bestimmt. Die Lastwegkurve wird mit dem Algorithmus von Zweifel (1960), einer Kettenlinien-Methode, berechnet. Im von Leo Bont geleiteten Forschungsprojekt «Neue Grundlagen für eine effiziente Seillinienplanung» (2020) der Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft (WSL) erzielten die Berechnungen der Lastwegkurven nach Zweifel (1960) deutlich genauere Ergebnisse als die Berechnungen mit der weit verbreiteten Methode von Pestal (1961).

1.2 Entwicklungsgeschichte

2008–2012:	Algorithmen als Teil der Doktorarbeit von Leo Bont (ETH LUE)
2013–2015:	QGIS-Plugin Seilaplan Prototyp (ETH LUE)
2019–2020:	Weiterentwicklung Seilaplan Version 2 im Rahmen des Projekts «Neue Grundlagen für eine effiziente Seillinienplanung» (WSL)
2020:	Feldmessungen in Zusammenarbeit mit Nüesch & Ammann Forstunternehmung AG und Abächerli Forstunternehmen AG
September 2020:	Seilaplan Version 3.0
November 2020:	Seilaplan Version 3.1
Juni 2021:	Seilaplan Version 3.2
Januar 2022:	Seilaplan Version 3.3
Mai 2022:	Feldmessungen in Zusammenarbeit mit der BOKU Wien und Abächerli Forstunternehmen AG
Mai 2022:	Seilaplan Version 3.4
August 2023:	Seilaplan Version 3.5
August 2024:	Seilaplan Version 3.6
Juli 2025:	Seilaplan Version 3.7

1.3 Realisierung

Professur für Forstliches Ingenieurwesen
ETH Zürich
8092 Zürich
(Konzept, Realisierung Version 1.x für QGIS 2)

Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft
Eidg. Forschungsanstalt WSL
8903 Birmensdorf
(Realisierung ab Version 2.x für QGIS 3 und QGIS 4)

Beteiligte Personen
Leo Bont (Projektleitung, Entwicklung, Konzept, Mechanik, Finanzierung)
Laura Ramstein (Koordination Weiterentwicklung)
Patricia Moll (Implementation in Python/QGIS, Benutzeroberfläche)
Janine Schweier (Begleitgruppe, Finanzierung, Webseite)
Hansrudolf Heinimann (Konzept, Mechanik, Finanzierung)
Fritz Frutig (Übersetzungen, Begleitgruppe)
Konrad Wyss, ibW Bildungszentrum Wald Maienfeld (Rückmeldungen aus der Praxis, Lehre, Seilkranfachtagung)

Wir danken den Praxispartnern, insbesondere Ken Flury, Konrad Wyss, den Forstunternehmen Nüesch & Ammann Forstunternehmung AG sowie Abächerli AG für ihr engagiertes Mitwirken bei der Durchführung der Messfahrten sowie ihre wertvollen Anregungen zur Verbesserung der Benutzerführung von Seilaplan.

Des Weiteren bedanken wir uns bei Christian Kanzian und Stephan Böhm (BOKU Wien) sowie Marc Werder, Susanne Senn, Sandra Gurzeler und Jaqueline Annen (WSL) für die Inputs und die Mithilfe bei der Ausarbeitung und der Gestaltung des Handbuchs.

2 Installationsanleitung

Dieses Kapitel führt durch den Installationsprozess vom QGIS-Plugin Seilaplan. Zudem wird beschrieben, wie das Plugin aktualisiert werden kann.

2.1 Voraussetzungen Hard- und Software

Voraussetzung für die Verwendung von SEILAPLAN ist QGIS, ein frei verfügbares geografisches Informationssystem zur Betrachtung und Analyse von Geodaten.
Es wird empfohlen, eine aktuelle Langzeitversion (LTS) von QGIS zu benutzen und diese regelmässig zu aktualisieren. Seilaplan kann mit QGIS Version 3 (>3.22) verwendet werden und ist kompatibel mit der Version 4. Das Plugin kann unter Linux, Windows und OS X ausgeführt werden.

2.2 Installation

1. In QGIS den Plugin-Manager öffnen: Menü Erweiterungen > Erweiterungen verwalten und installieren
2. Im Reiter Alle nach «SEILAPLAN» suchen (Abb. 1)
3. Eintrag auswählen und Erweiterung installieren klicken
4. Das Seilaplan Icon (Abb. 2) sollte in der Werkzeugleiste sichtbar werden. Falls nicht, Rechtsklick auf die Werkzeugleiste und Eintrag Erweiterungswerkzeugleiste aktivieren.

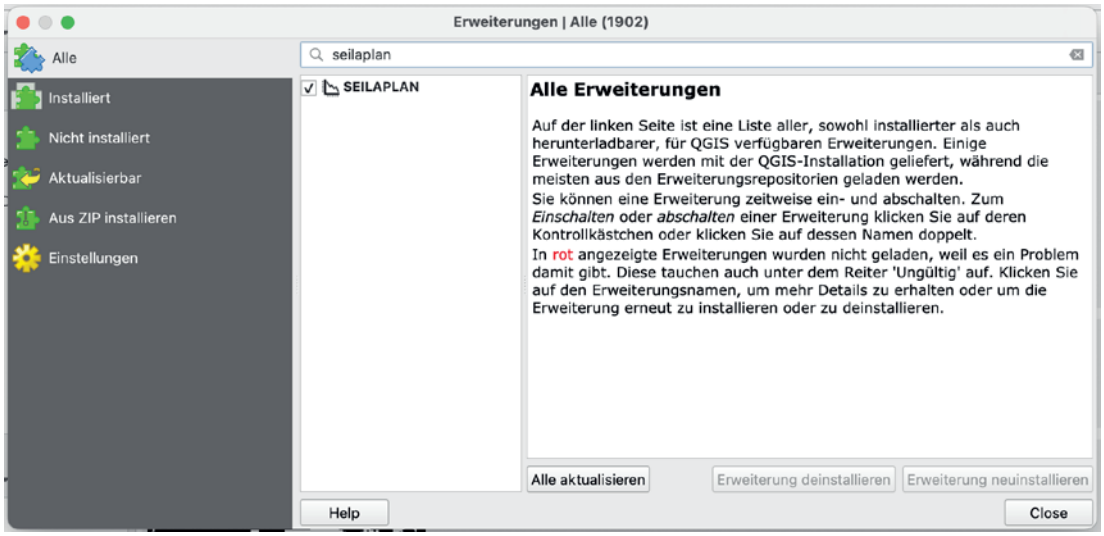


Abb. 1: Plugin SEILAPLAN per Suchabfrage installieren.

Abb. 2: Seilaplan-Icon

2.3 Aktualisierungen

QGIS kann automatisch überprüfen, ob für ein Plugin Aktualisierungen vorhanden sind; dazu muss die Überprüfung aktiviert werden *(Erweiterungen verwalten und installieren > Einstellungen > Beim Start nach Aktualisierungen suchen)*. Auf dem unteren Rand der QGIS-Oberfläche erscheint dann ein Hinweis in Form eines Puzzle-Teils, dass neue Versionen von Plugins vorhanden sind und installiert werden können (Abb. 3).

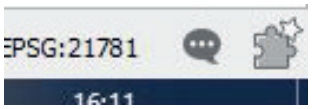


Abb. 3: Hinweis auf ein neues Update in Form eines Puzzle-Teils.

2.4 Lizenz und Haftung

Jegliche Haftung wird im Rahmen der GNU General Public Licence Version 2 oder neuer ausgeschlossen (gnu.org/licenses). Die implementierte Berechnungsmethode basiert auf der Methode von Zweifel (1960). Zur Berechnung der Seillinie wurde eine beidseitig fixierte Verankerung angenommen.

3 Kurzanleitung

In diesem Kapitel wird das QGIS-Plugin Seilaplan kurz beschrieben. Eine ausführlichere Anleitung findet sich im Kapitel 5. Auf der Webseite seilaplan.wsl.ch sind zudem Tutorials auf Deutsch zu finden.

3.1 Übersicht

Abbildung 4 zeigt den Arbeitsablauf und die Hauptkomponenten von Seilaplan. Nach der Installation kann Seilaplan durch einen Klick auf das Seilaplan-Symbol in der QGIS-Symbolleiste gestartet werden. Der Benutzer wird dann in zwei Hauptschritten, dem Haupt- und dem Bearbeitungsfenster, durch den Entwurfsprozess geführt. Im Hauptfenster werden der Verlauf der Seiltrasse (inkl. Anfangs- und Endpunkt) definiert, das Längenprofil geladen und die Eigenschaften des Seilsystems sowie die Anforderungen an den Entwurf festgelegt. Darüber hinaus können die Parameter für die Optimierung festgelegt werden. Sind alle relevanten Eigenschaften definiert, kann entweder direkt zur manuellen Bearbeitung im Bearbeitungsfenster übergegangen oder die Optimierung gestartet werden, die automatisch eine Lösung vorschlägt. Das Bearbeitungsfenster ist der Arbeitsplatz für die Detailplanung. Dort müssen die Höhe und die Position der Bauelemente definiert werden. Gleichzeitig wird angezeigt, ob der Nachweis bezüglich Gebrauchstauglichkeit und struktureller Sicherheit erfüllt ist. Die Lösung kann zur weiteren Bearbeitung exportiert oder gespeichert werden.

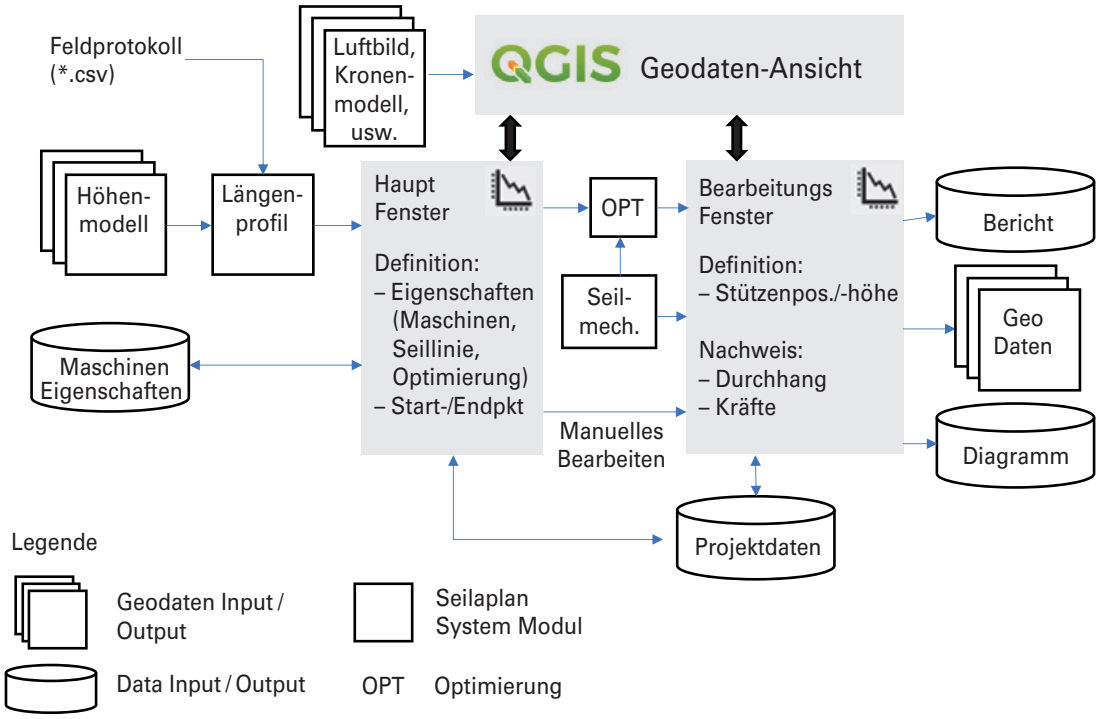


Abb. 4: Konzeptionelles Modell und Arbeitsablauf von Seilaplan.

3.2 Projekt erstellen

In QGIS kann unter *Projekt > Neu* ein neues Projekt für die Seillinienplanung erstellt werden. Unter *Layer > Layer hinzufügen > Rasterlayer hinzufügen* kann das digitale Höhenmodell (Kap. 4 Geodaten), auf dessen Basis die Seillinie berechnet werden soll, hinzugefügt werden. Soll als Grundlage ein Geländeprofil dienen, muss kein digitales Höhenmodell hinzugefügt werden. Das Projekt kann unter *Projekt > Speichern* als QGIS-Projekt gesichert werden.

3.3 Hauptfenster

Per Klick auf das Seilaplan-Icon wird das Hauptfenster des Plugins geöffnet.

Projektname und Projektdatei
Alle Einstellungen im Hauptfenster können über das Speicher-Icon oben rechts in eine Textdatei mit dem Projektnamen als Dateinamen abgespeichert und über das Ordner-Icon zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen werden. Werden in der Zwischenzeit die dazugehörigen Terraindaten verschoben oder umbenannt, müssen diese über die Schaltfläche aktualisiert und neu hinzugefügt werden. Die Seillinie muss jedoch nicht neu gezeichnet werden.

Terraindaten
Seilaplan benötigt Höheninformationen, die das Terrain entlang der geplanten Seillinie beschreiben. Terraindaten können entweder einem digitalen Höhenmodell in Form eines QGIS-Rasterlayers, Feldaufnahmen in Form einer CSV-Datei, einem Excel-Feldprotokoll oder einer Haglöf Vertex-Exportdatei (*.csv) entnommen werden.

Rasterlayer
Im Drop-Down Menü werden alle digitalen Höhenmodelle aufgelistet, die momentan in QGIS als Rasterlayer geladen sind. Als Höhenmodell sind alle gängigen Rasterformate möglich, die von QGIS unterstützt werden, z. B. txt, tiff, streamed tiff (COG, Kap. 4.1 Begriffe) oder asc. WMS-Dienste können nicht benutzt werden. Raster innerhalb einer ArcGIS Geodatabase müssen erst in ein unterstütztes Format exportiert werden, damit sie in QGIS geladen und vom Plugin verarbeitet werden können.

Über die Schaltfläche kann die Liste der in QGIS vorhandenen Raster aktualisiert werden. Dies ist nützlich, wenn ein neues Raster zu QGIS hinzugefügt wird.

Geländeprofil
Alternativ zu einem Rasterlayer können Feldaufnahmen eines Geländeprofils geladen werden. Unterstützt werden drei Dateiformate:
- Das Export-Format des Messgerätes Vertex (Firma Haglöf Sweden).
- Generische CSV-Dateien mit den Spalten X (Ost-Koordinate), Y (Nord-Koordinate) und Z (Höhe). Die Datei darf keine Texte enthalten (ausser in der Kopfzeile) und die Koordinaten müssen in korrekter Reihenfolge vorliegen.
- Feldaufnahmeprotokoll im Excel-Format, enthält Schrägdistanzen und Neigungen entlang einer Geländelinie. Eine Protokoll-Vorlage kann in Seilaplan mit Klick auf das Ordner-Symbol hinter Geländeprofil heruntergeladen werden.

Verlauf der Seillinie
Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes können entweder in der Eingabemaske eingegeben oder direkt in QGIS gezeichnet werden. Seillinie in Karte einzeichnen zeichnen Wird eine CSV-Datei eingelesen können 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. Wird ein Mobilseilkran eingesetzt, muss als Anfangspunkt die Position des Seilkranmasts eingegeben werden. Ist die erste bzw. letzte Stütze nicht befahrbar, muss die Position dieser Stütze als Anfangs- bzw. Endpunkt

definiert werden. Soll der Laufwagen bis zum Anker fahren können, muss die Position der Verankerung als Anfangs- bzw. Endpunkt gewählt werden.

Bei der Wahl von Anfangs- und Endpunkt ist ein gewisser Höhenunterschied notwendig, um automatisch (mit Optimierung) eine Seillinie berechnen zu können. Das Gelände darf nicht zu viele Gegensteigungen besitzen.

Der Geländeverlauf kann durch zusätzliche Layer besser visualisiert werden:

= Schweizer Landeskarte von swisstopo oder ausserhalb des Schweizer Koordinatensystem Open Street Map

= aus dem Höhenmodell erzeugte Höhenlinien

Geländelinie
Der Verlauf des Geländes zwischen Anfangs- und Endpunkt lässt sich in einem Diagramm darstellen. Die Definition von fixen Stützenpositionen ist nur für die Optimierung relevant. Wenn bspw. ein geeigneter Stützenbaum oder eine geeignete Position für eine künstliche Stütze bereits bekannt ist, kann diese hier definiert werden. Zudem kann ein Bereich eingezeichnet werden, in welchem vom Optimierungsalgorithmus keine Stützen platziert werden sollen.

Eigenschaften der Seillinie/Parametersatz
Für die Eigenschaften der Seillinie können vordefinierte Parametersätze gewählt und/oder von Hand eigene Werte definiert und in ein neues Set abgespeichert werden. Es müssen in allen Parameterfeldern gültige Werte stehen, ansonsten kann der Berechnungsalgorithmus nicht ausgeführt werden.

Seillinie manuell bearbeiten
Die Optimierung wird übersprungen. Die Stützenstandorte werden in einem neuen Fenster von Hand platziert. Falls eine Projektdatei geladen wurde, wird stattdessen das darin gespeicherte Seillinien-Layout im Bearbeitungsfenster gezeigt.

Seillinie automatisch optimieren
Der Optimierungsalgorithmus wird gestartet. Stützenpositionen und -höhen werden optimiert.

3.4 Bearbeitungsfenster

Im Bearbeitungsfenster kann das Optimierungsresultat verfeinert oder die Seillinie ohne Optimierung direkt bearbeitet und berechnet werden.

Diagramm
Das Diagramm zeigt die berechnete Seillinie. Die drei Buttons unterhalb des Diagramms dienen der Navigation. Das Diagramm wird automatisch aktualisiert, wenn Stützen oder Kennwerte verändert werden. Über eine Auswahlliste können zusätzliche Kennwerte (BHD, Durchhang, Knickwinkel usw.) im Diagramm angezeigt werden.

Stützen und Verankerungen bearbeiten
Die Stützenposition, die Stützenhöhe und auch die Neigung der Stütze können verändert werden (u. a. mit dem Mausrad). Mit dem Plus- und dem Papierkorbsymbol vor bzw. hinter der jeweiligen Stützenzeile kann eine Stütze hinzugefügt bzw. gelöscht werden. Für jede Stütze wird der minimal benötigte Durchmesser der Bundstelle gemäss Pestal (1961) berechnet. Verankerungen können aktiviert bzw. deaktiviert werden, sofern sie nicht Teil der Optimierung sind.

Parameter
Die Maschinendaten sowie die Vorspannung des Tragseils, der minimale Bodenabstand (Boden – Tragseil) sowie der Sicherheitsfaktor können im Bearbeitungsfenster angepasst, und die Seillinie kann neu berechnet werden.

Kennwerte
Im Reiter «Kennwerte» wird aufgezeigt, ob die Grenzwerte für das Tragsystem eingehalten werden. Rot hinterlegte Werte überschreiten den aus den Parameterwerten berechneten Grenzwert. Mit einem Klick auf die entsprechende Zeile wird im Diagramm angezeigt, wo dieser Wert überschritten wird.

Vogelperspektive
Das Diagramm kann beim Abspeichern mit einer Vogelperspektive der Seillinie ergänzt werden. Unter «Vogelperspektive» kann die Darstellung der Seillinie, Stützen und Abspannseile aus der Vogelperspektive konfiguriert werden. Dafür können die Stützenkategorie und -position sowie die Ausrichtung der Abspannseile ausgewählt werden.

Kopfdaten
Unter «Kopfdaten» können die wichtigsten Informationen zum geplanten Projekt festgehalten werden, sofern diese nicht bereits im Hauptfenster erfasst worden sind. Die Informationen werden in den Bericht übertragen.

3.5 Speichern und Output-Produkte

Das Plugin erstellt einen Kurzbericht, einen detaillierten technischen Bericht, ein Diagramm und verschiedene Geodaten und Tabellen. Optional kann das Diagramm mit einer Darstellung der Seillinie aus der Vogelperspektive ergänzt werden. Beim Klick auf «Speichern» im Bearbeitungsfenster lassen sich die verschiedenen Outputs und der Speicherort bestimmen. Bei jedem Speichern wird eine Projektdatei erstellt (Projekteinstellungen.json), die unter anderem den Parametersatz, den Anfangs- und den Endpunkt sowie das aktuelle Stützenlayout enthält. Das manuell angepasste Stützenlayout lässt sich damit zu einem späteren Zeitpunkt wieder öffnen. Hierfür muss im Hauptfenster die Projektdatei geöffnet werden und die Schaltfläche «Seillinie manuell bearbeiten» gewählt werden.

4 Geodaten

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie man Geodaten für die Seillinienplanung mit dem QGIS-Plugin Seilaplan beschafft und diese in ein QGIS-Projekt einbindet.

4.1 Begriffe

Geodaten
Geodaten sind digitale Informationen, denen auf der Erdoberfläche eine bestimmte räumliche Lage zugewiesen werden kann (swisstopo, 2020: Geodaten für alle, Wabern). Seit 2020 stellt das swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) eine Vielfalt an Schweizer Geodaten gratis zur Verfügung.

Vektor- und Rasterdaten
Geodaten können als Vektor- oder Rasterdaten zur Verfügung stehen. Vektordaten speichern räumliche Objekte als Punkte, Linien oder Polygone ab. Rasterdaten hingegen bestehen aus quadratischen Rasterzellen. Jede Zelle enthält einen durchschnittlichen Wert (z. B. Geländehöhe oder Bildinformation) für die Fläche, welche sie abdeckt. In der Forstwirtschaft sind Bestandeskarten ein Beispiel für Vektor- und digitale Höhenmodelle ein Beispiel für Rasterdaten.

Digitales Höhenmodell / digitales Geländemodell
In der Wissenschaft gibt es keine allgemeingültige Unterscheidung zwischen digitalem Höhen- (DHM) und Geländemodell (DGM). Häufig wird der Begriff DHM als generelle Bezeichnung für ein Höhenmodell verwendet und DGM für den Beschrieb der Erdoberfläche inklusive Wasserkörper und ohne Bewuchs (Abb. 5). Oft wird auch die englische Abkürzung DTM für Digital Terrain Model verwendet. Das swisstopo verwendet für das swissalti3D-Modell (Geländeoberfläche ohne Objekte und Vegetation) jedoch den Begriff DHM. Wir werden daher in diesem Handbuch den Begriff DHM für die Geländeoberfläche ohne Objekte und Vegetation verwenden.

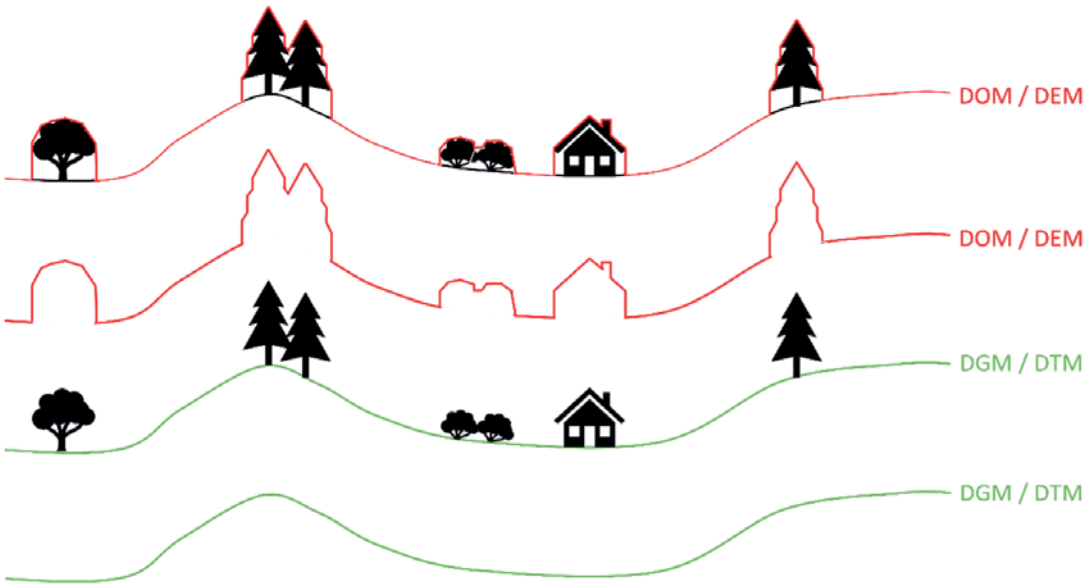


Abb. 5: Bildliche Darstellung der Definitionen von digitalen Höhenmodellen (DHM). In Rot dargestellt ist das Digitale Oberflächenmodell (DOM, englisch digital elevation model [DEM]). In Grün dargestellt ist das Digitale Geländemodell (DGM, englisch digital terrain model [DTM], Quelle: Stephan Böhm, BOKU).

Digitales Oberflächenmodell
Das digitale Oberflächenmodell (DOM) beschreibt die Oberfläche, die durch Bebauung und Vegetation definiert wird. Im Englischen spricht man vom Digital Elevation Model (DEM).

Koordinatensystem
Ein Koordinatensystem ist ein Bezugssystem, mithilfe dessen die Position von Objekten präzise beschrieben werden kann. Es besteht aus einem Punkt als Ursprung mit zwei bis drei Achsen. Bei drei Achsen kommt zur Information in der Fläche noch eine Information zur Höhe dazu. Da die Erdoberfläche gekrümmt ist, ist die Abbildung der Erdoberfläche bei einer Projektion in die Fläche leicht verzerrt – umso stärker, je grösser die Distanz zum Ursprung des Koordinatensystems ist. Deshalb ist es wichtig, für Schweizer Geodaten das nationale Koordinatensystem CH1903 +/ LV95 mit dem EPSG-Code 2056 zu verwenden.

Layer
Ein Layer enthält ein Datenset. Er beschreibt, wie dieses in einem geographischen Informationssystem beschriftet und dargestellt ist.

Cloud-optimized GeoTIFF
Ein Cloud-optimized GeoTIFF (COG) ist eine speziell strukturierte Rasterdatei, welche auf einem WebServer gehosted wird und so optimiert ist, dass Benutzer gezielt nur die benötigten Ausschnitte streamen können.

Beim Einsatz digitaler Höhenmodelle (DHM) bietet dieses Format erhebliche Vorzüge, da für Analysen nicht mehr der gesamte Datensatz heruntergeladen werden muss.

4.2 QGIS-Projekt erstellen

4.2.1 Koordinatensystem anpassen

Für die Benutzung von Seilaplan muss ein QGIS-Projekt erstellt werden (Abb. 6). Nach dem Öffnen der Software QGIS kann per Doppelklick auf das Blatt-Icon (1) ein neues, leeres Projekt gestartet werden. Im neuen Projekt muss das Koordinaten-Referenzsystem an das Schweizer Koordinatensystem angepasst werden. Mit einem Klick auf das aktuelle Koordinatensystem unten rechts im Fenster (2) öffnet sich ein Fenster zur Auswahl des Koordinatensystems. Unter «Filter» kann nach «EPSG:2056» gesucht (3) und das Schweizer Koordinatensystem LV95 ausgewählt werden (4).

4.2.2 Layer hinzufügen

Vektor- und Rasterdaten können unter dem Menüpunkt *Layer > Layer hinzufügen* einem QGIS-Projekt hinzugefügt werden. Alternativ können die Geodaten auch in die Mitte des QGIS-Fensters gezogen werden. Die Dateien werden jetzt automatisch in QGIS angezeigt. Je nach Grösse der Datei kann das eine Weile dauern.

Die Layerdarstellung kann mit einem Rechtsklick auf den gewünschten Layer bearbeitet werden. In der Liste erscheint zuunterst die Option «Eigenschaften». In diesem Bearbeitungsfenster kann unter «Symbolisierung» die «Darstellungsart» angepasst werden. Für ein Höhenmodell eignet sich die Auswahl «Schummerung», um einen räumlichen Eindruck des Höhenmodells zu erhalten (Abb. 7). In den Eigenschaften können auch diverse andere Darstellungsoptionen gewählt werden.

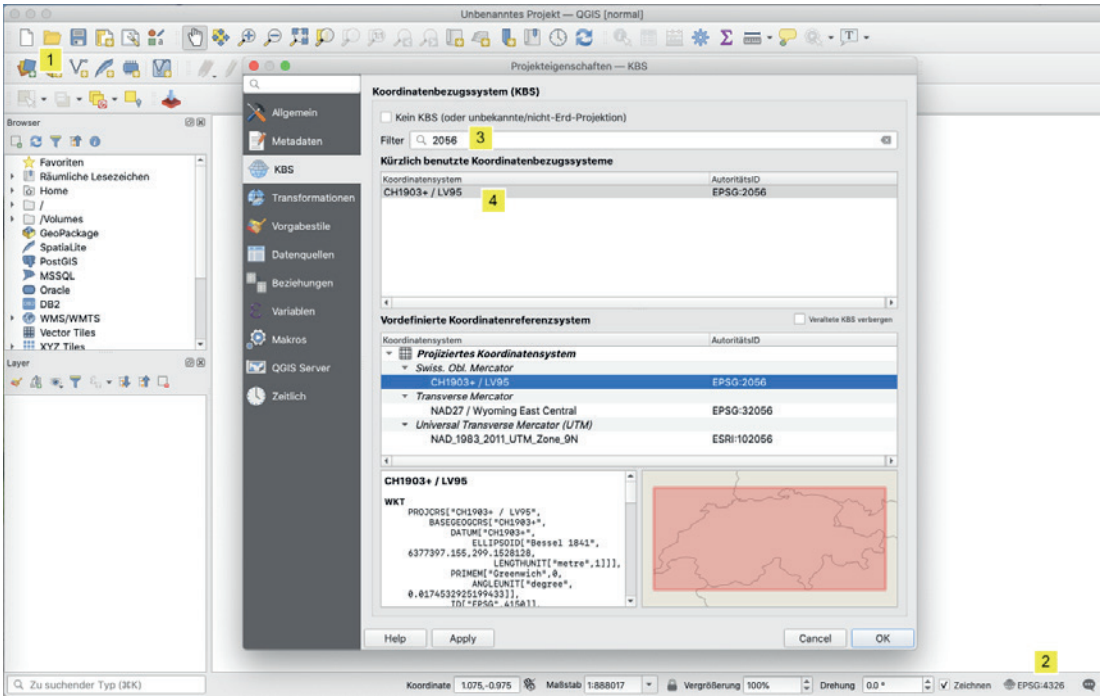


Abb. 6: Anpassen des Default-Koordinatensystems an das Schweizer Koordinatensystem.

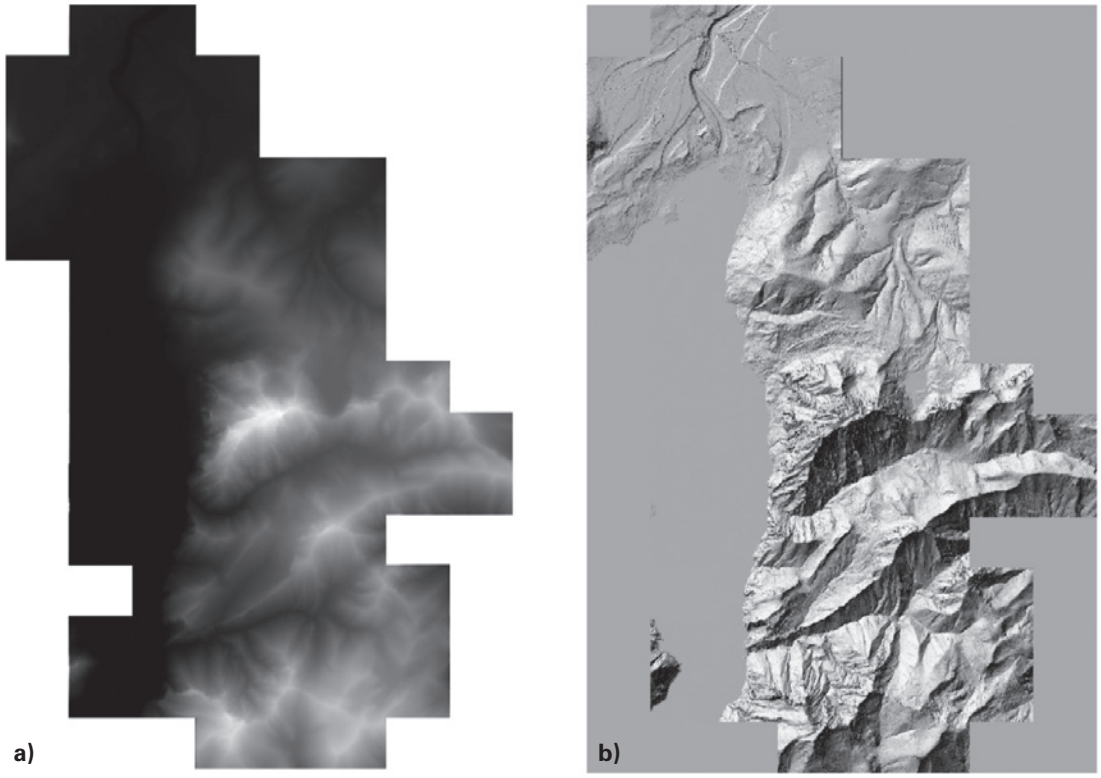


Abb. 7: Darstellung (a) eines verschmolzenen DGMs und (b) der Schummerung des DGMs (Quelle: Stephan Böhm, BOKU).

4.3 Geodaten herunterladen

Seilaplan braucht Geländedaten (Terraindaten) als Inputdaten für die Seillinien-Berechnungen. Es können entweder ein Feldaufnahme-Protokoll mit Profil-Messpunkten (Kap. 5, Abschnitt 2) eingelesen oder ein digitales Höhenmodell (DHM, Abschnitt 3.1) verwendet werden. Des Weiteren gibt es verschiedene Hintergrundkarten, die für die digitale Planung von Seillinien hilfreich sind (Abschnitt 4).

Als nationale Behörde für Geodaten stellt das swisstopo auf seiner Webseite eine Vielzahl an Datensätzen gratis zur Verfügung, die gleich wie das Schweizer Höhenmodell auf zwei verschiedene Arten bezogen werden können.

4.3.1 Herunterladen eines digitalen Höhenmodells mit Swiss Geo Downloader

Swisstopo stellt mit dem Datensatz «swissALTI3D» ein sehr präzises digitales Höhenmodell (DHM) zur Verfügung, welches die Oberfläche der Schweiz ohne Bewuchs und Bebauung beschreibt. Das DHM ist ein Rasterdatensatz mit einer Auflösung von 0,5 m oder 2 m und kann als Kacheln mit einer Grösse von 1 km^2 heruntergeladen werden. Beide Auflösungen sind für die Berechnungen mit Seilaplan präzise genug.

Der Datensatz «swissALTI3D» sowie alle weiteren frei verfügbaren Geodaten von swisstopo können mit dem QGIS-Plugin Swiss Geo Downloader (Moll 2021) direkt in QGIS heruntergeladen und angezeigt werden. Das QGIS-Plugin kann unter dem Menüpunkt «Erweiterungen», «Erweiterungen verwalten und installieren» installiert und aktualisiert werden. In der Suchzeile oben kann nach «Swiss Geo Downloader» gesucht und das Plugin mit einem Klick auf «Erweiterung installieren» heruntergeladen werden. In der Anzeigeleiste erscheint nun ein neues Symbol für das Plugin Swiss Geo Downloader (1).

Mit dem Swiss Geo Downloader kann nun ein digitales Höhenmodell für die Seillinienplanung mit Seilaplan heruntergeladen werden (Abb. 8). Öffnet man das Plugin, kann mit einem Klick auf das kleine Schweiz-Symbol (2) die Schweizer Landeskarte in grau als Hintergrundkarte zur Orientierung angezeigt werden. Im Suchfeld des Plugins wird «swissalti3d» eingegeben (3) und der vorgeschlagene Datensatz mit einem Mausklick angewählt. Unter dem Menüpunkt «Ausdehnung» kann das Gebiet ausgewählt werden, für welches das Höhenmodell heruntergeladen werden soll. Dafür wird mit dem

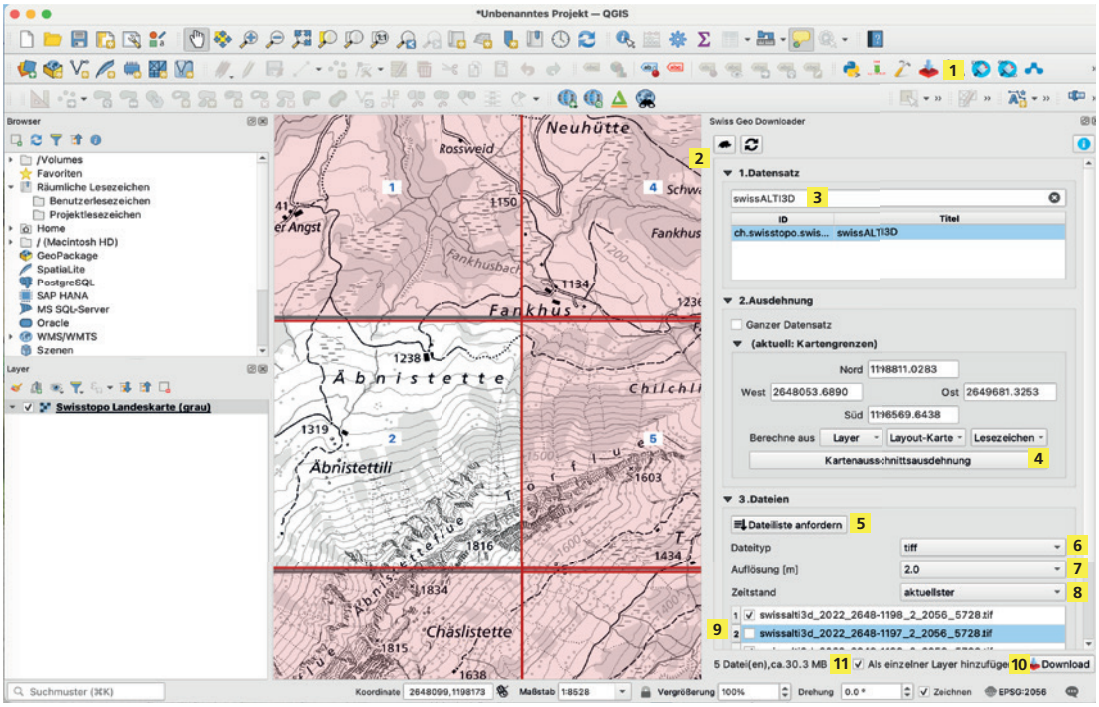


Abb. 8: Hinzufügen von Geodaten mit dem Swiss Geo Downloader.

Mausrad so weit in die Karte hineingezoomt, bis nur noch das gewünschte Gebiet sichtbar ist, und danach auf «Kartenausdehnung» geklickt (4). Mit einem weiteren Klick auf «Datenliste anfordern» (5) erscheinen die gewünschten Höhenmodell-Kacheln in unserem Gebiet (in der Liste und auf der Karte als rote, nummerierte Quadrate dargestellt).

Als Dateityp empfiehlt sich «tiff» oder «streamed tiff (COG)» (Kap. 4.1 Begriffe) auszuwählen (6). Bei der Auflösung [m] kann 2,0 oder 0,5 gewählt werden (7), da beide Auflösungen präzise genug sind. Der Zeitstand wird bei aktuell belassen (8). Mit einem Häkchen können nun die Kacheln in der Liste ausgewählt werden (9), die tatsächlich heruntergeladen werden sollen. Werden Kacheln abgewählt, sind sie auch in der Karte nicht mehr als rote Quadrate sichtbar. Seit Februar 2026 besteht die Möglichkeit, Rasterkacheln direkt zu einem virtuellen Layer (Kap. 4.4.1 Virtuelles Raster) zusammenzufassen. Dadurch wird im QGIS-Projekt nur noch ein einzelner Layer hinzugefügt. Diese Option ist bei allen gekachelten Datensätzen standardmässig aktiviert (11). Mit einem Klick auf den «Download»-Button werden die ausgewählten Dateien heruntergeladen (10). Beim Abspeichern werden sowohl die Kacheln (.tiff) als auch ein virtuelles Raster (.vrt) im gewählten Ordner gespeichert. Nach dem Speichern sollten das virtuelle Raster bzw. die Kacheln direkt im QGIS angezeigt werden. Falls dies nicht der Fall ist, können die Dateien am gewählten Speicherort markiert und mit der Maus gemeinsam in das Kartenfenster von QGIS gezogen werden. Der Graustufenverlauf von Weiss nach Schwarz entspricht den verschiedenen Geländehöhen. Schwarz entspricht standardmässig dem minimalen Rasterwert (tiefster Punkt) des Rasterlayers und Weiss dem maximalen Wert (höchster Punkt). Da jeder Rasterlayer einen unterschiedlichen minimalen und maximalen Höhenwert aufweist, werden die Höhen nicht in allen Kacheln durch die gleiche Graustufe dargestellt. Damit das Höhenmodell auch optisch als solches erkennbar ist, kann die Darstellungsart auf «Schummerung» geändert werden (Abschnitt 2.2).

Das Höhenmodell kann nun im Seilaplan-Plugin unter dem Menüpunkt «Terraindaten» als Rasterlayer ausgewählt und eingelesen werden.

4.3.2 Herunterladen eines digitalen Höhenmodells von der Swisstopo-Webseite

Das digitale Höhenmodell «swissALTI3D» kann alternativ zum Download mit dem Swiss Geo Downloader auch von der Website des Schweizer Bundesamts für Geodaten heruntergeladen werden: www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html

Auf der Webseite können unter dem Reiter «Geodaten und Applikationen» die Kategorien «Höhenmodelle» und «swissALTI3D» ausgewählt werden. Zuunterst auf dieser Seite befindet sich der Geodaten-Bezug des Datensatzes «swissALTI3D». Das Höhenmodell ist in kleine Kacheln aufgeteilt, die als einzelne Datensätze heruntergeladen werden können. Für die Auswahl des Datensatzes bestehen verschiedene Varianten. Die einzelnen Kacheln können angeklickt, die Koordinaten eines Rechtecks eingegeben, ein Gebiet in die Karte eingezeichnet, ein Kanton oder eine Gemeinde ausgewählt oder das Höhenmodell für die gesamte Schweiz heruntergeladen werden. Da jede einzelne Kachel eine relativ grosse Datei ist, kann das Herunterladen je nach Anzahl Kacheln dementsprechend lange dauern. Eine grosse Datei braucht auch beim Verarbeiten in QGIS lange. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, nur die benötigten Kacheln herunterzuladen.

Ist das gewünschte Gebiet ausgewählt, kann unter Format «Cloud Optimized GeoTIFF» angeklickt werden. Als Auflösung stehen 0,5 m und 2 m zur Verfügung. Je kleiner die Auflösung, desto genauer, aber auch grösser, ist der Datensatz. Als Eingabe in Seilaplan können wir beide Auflösungen verwenden. Unter Koordinatensystem muss «LV95» ausgewählt sein. Mit einem Klick auf «Suchen» wird eine Liste der Kacheln angezeigt, die das gewünschte Gebiet abdecken. Die Kacheln können einzeln heruntergeladen werden.

4.4 Hilfreiche QGIS-Funktionen

QGIS verfügt über eine Vielzahl von Funktionen zur Verarbeitung und Darstellung von Raster- und Vektordaten. Nachfolgend werden ein paar Funktionen vorgestellt, die im Zusammenhang mit Seilaplan hilfreich sein können.

Manchmal werden für die Seillinienplanung mehrere Kacheln eines Höhenmodells gebraucht, um ein gewünschtes Gebiet abzudecken. Die benötigten Kacheln können in einem Verarbeitungsschritt zu einem einzigen Raster virtuell (Abschnitt 4.4.1) oder vollständig (Abschnitt 4.4.2) zusammengefügt werden. Für den neuen Rasterdatensatz kann entweder ein Speicherort angegeben werden oder er wird als temporärer Layer dem Projekt hinzugefügt. Ein temporärer Layer kann zu einem späteren Zeitpunkt permanent abgespeichert werden (Abschnitt 4.4.3).

Die Zusammenführung mehrerer Kacheln zu einem Rasterdatensatz ist für die Planung mit Seilaplan nicht nötig, hat aber v. a. zwei Vorteile: (I) In Seilaplan muss nur ein Datensatz ausgewählt werden. (II) Die Darstellung der einzelnen Kacheln in QGIS ist einheitlich.

4.4.1 Virtuelles Raster

Das Erstellen eines virtuellen Rasters aus mehreren Rasterkacheln ist keine Voraussetzung für die Benutzung von Seilaplan. Die nachfolgenden Erläuterungen dienen vielmehr als Zusatzinformation für Benutzerinnen, die die Arbeit mit einem einzelnen Rasterlayer statt mehreren Rasterkacheln bevorzugen.

Mit der Funktion «Virtuelles Raster generieren» können mehrere Rasterdatensätze zu einem virtuellen Datensatz zusammengeführt werden. Dazu müssen zuerst alle gewünschten Kacheln im QGIS-Projekt als Layer hinzugefügt werden. In der Werkzeugkiste sind sämtliche QGIS-Werkzeuge zu finden. Sie kann über den Menüpunkt «Verarbeitung» in der obersten Menüleiste geöffnet werden. In der Werkzeugkiste kann nach der Funktion «Virtuelles Raster generieren» gesucht werden (Abb. 9, 1). Als «Eingabelayer» müssen alle gewünschten Kacheln ausgewählt werden (2). Im Abschnitt «Virtuell» kann mit einem Klick auf die drei Punkte rechts ein Speicherort für den neuen Rasterdatensatz angegeben werden (3). Bei der Option «Öffne Ausgabedatei nach erfolgreicher Ausführung» soll ein Häkchen gesetzt werden (4), sodass die neue Rasterdatei dem aktuellen QGIS-Projekt hinzugefügt wird. Nach erfolgreicher Ausführung des Tools (5) kann die Darstellung in den Eigenschaften angepasst werden.

Der temporäre Layer «virtuelles Raster» ist kein neuer Rasterdatensatz, sondern eine virtuelle Anordnung und Organisation der existierenden Raster. Gegenüber der Funk-

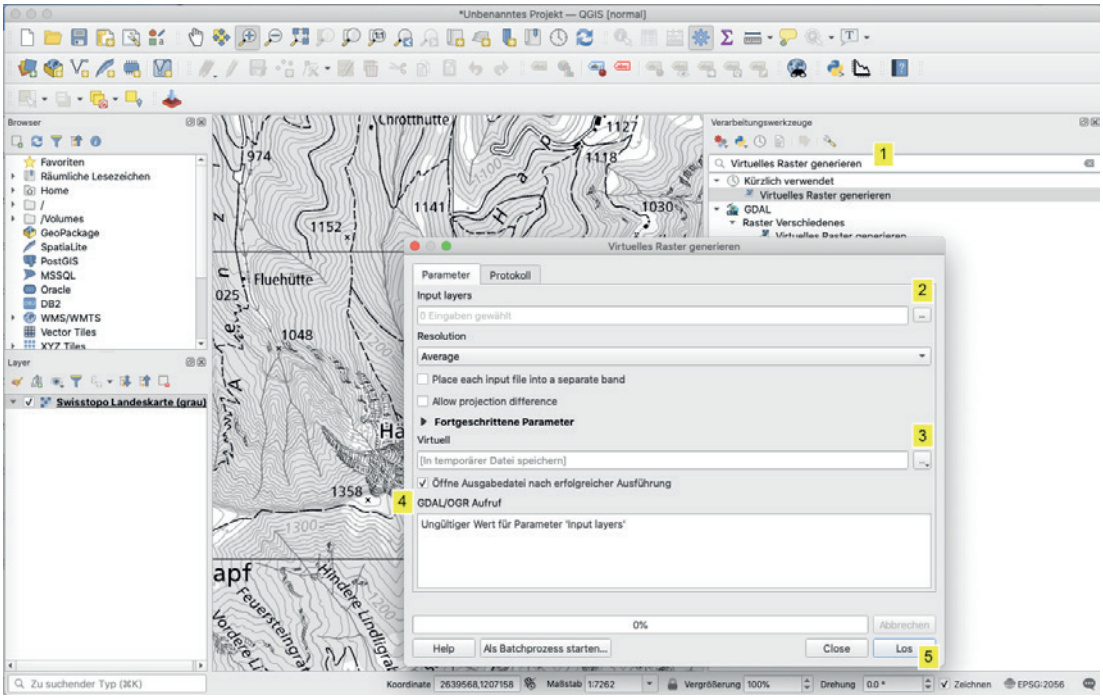


Abb. 9: Virtuelles Raster generieren.

tion «Verschmelzen» (Kap. 4.4.2) hat dies den Vorteil, dass kein neuer Rasterdatensatz gespeichert werden muss, der gegebenenfalls viel Speicherplatz beansprucht. Möchte man den temporären Layer aber permanent abspeichern (Kap. 4.4.3), wird er in einen neuen Rasterdatensatz wie bei der Funktion «Verschmelzen» umgewandelt.

4.4.2 Verschmelzen

Mit dem QGIS-Tool «Verschmelzen» können verschiedene Rasterdatensätze zu einem neuen Datensatz zusammengefügt werden. Dazu müssen wie beim virtuellen Raster alle gewünschten Kacheln im QGIS-Projekt als Layer hinzugefügt werden. In der Werkzeugkiste, zu finden unter dem Menüpunkt «Verarbeitung», kann nach der Funktion «Verschmelzen» gesucht werden. Als «Eingabelayer» müssen alle gewünschten Kacheln ausgewählt werden. Im Abschnitt «Zusammengeführt» kann mit Klick auf die drei Punkte rechts ein Speicherort für den neuen Rasterdatensatz angegeben werden. Bei der Option «Öffne Ausgabedatei nach erfolgreicher Ausführung» soll ein Häkchen gesetzt werden, sodass die neue Rasterdatei dem aktuellen QGIS-Projekt hinzugefügt wird. Nach erfolgreicher Ausführung des Tools kann die Darstellung in den Eigenschaften angepasst werden.

4.4.3 Temporäre Layer als permanente Layer speichern

Ein temporärer Layer wird beim Schliessen des Projekts gelöscht. Möchte man diesen behalten, muss er in einen permanenten Layer umgewandelt werden. Mit Rechtsklick auf den Layer wird dazu die Option *Exportieren > Speichern als* ausgewählt. Im geöffneten Fenster kann das Dateiformat, der Dateiname sowie der Speicherort angegeben werden. Als Default-Dateiformat erscheint «GeoTIFF», welches für die Verwendung mit Seilaplan geeignet ist. Mit Klick auf die drei Punkte hinter dem Abschnitt «Dateiname» kann ein Speicherort angegeben werden. Wird zuunterst bei «Gespeicherte Datei der Karte hinzufügen» ein Häkchen gesetzt, wird der gespeicherte Layer dem aktuellen QGIS-Projekt hinzugefügt.

4.5 WMS-Layer einbinden

WMS bedeutet Wep Map Service, frei übersetzt Internet-Kartendienst. Es bezeichnet einen technischen Vorgang, wie man eine Karte aus dem Internet via einer Internetadresse in QGIS darstellen kann. Konkret bedeutet das, dass QGIS eine Verbindung mit dem Internet herstellt und eine Karte von dort in unserem QGIS anzeigt. Wichtig zu wissen ist hierbei, dass diese Karte nicht lokal auf dem Computer gespeichert wird. Sie ist sozusagen nur ein Foto, das angezeigt wird. Es sind in diesem Foto keine Daten hinterlegt, weshalb man mit diesem auch keine Berechnungen anstellen kann. Für die Seillinienplanung mit dem Plugin Seilaplan können WMS-Karten also nicht zur Berechnung verwendet werden. Sie sind aber äusserst nützlich als Hintergrundkarten und um sich einen Überblick zu verschaffen oder weitere Informationen zum Gebiet zu erhalten. Zudem brauchen sie nicht viel Speicherplatz, nur eine gute Internetverbindung.

In der Schweiz können fast alle Daten des Swisstopo und auch weiterer Bundesämter als WMS-Daten in QGIS eingebunden werden. Infos dazu findet man auf der Swisstopo-WMS-Webseite: geo.admin.ch/de/wms-verfuegbare-dienste-und-daten
WMS-Layer können wie Vektor- und Rasterlayer unter dem Menüpunkt *Layer > Layer hinzufügen* dem QGIS-Projekt hinzugefügt werden. Ein Klick auf die Option «WMS/WMTS Layer hinzufügen» öffnet das Verbindungsfenster (Abb. 10). Es muss eine neue Verbindung zu einer Internetadresse angelegt werden (1). Der neuen Verbindung kann ein beliebiger Name gegeben werden (2). Unter «URL» muss die Internetadresse des Datensatzes eingegeben werden (3). Die URL zu den Swisstopo-Datensätzen ist wms.geo.admin.ch. Mit Klick auf «OK» wird die Verbindung gespeichert (4) und kann nun verbunden werden (5). QGIS speichert die Verbindungen, sodass diese bei nächsten

Projekten nur noch verbunden werden müssen. Nach einer erfolgreichen Verbindung werden alle vorhandenen Layer unter dieser Adresse angezeigt. Mit einem Klick auf «Titel» kann die Liste alphabetisch geordnet und nach den gewünschten Datensätzen gesucht werden. Zwei für die Seillinienplanung interessante Datensätze sind bspw. «Vegetationshöhe LFI» und «Waldmischungsgrad LFI». Als Bildkodierung soll «TIFF» und als Koordinatensystem das Schweizer LV95-System mit dem Code EPSG:2056 ausgewählt werden. Der WMS-Layer wird nun in der linken Spalte unter Layer mit der passenden Legende aufgeführt.

Der Vorteil dieser Variante ist, grosse Datensätze einfach und schnell als Foto aus dem Internet in GIS darstellen zu können. Es braucht allerdings eine stabile Internetverbindung und es können keine Berechnungen damit angestellt werden.

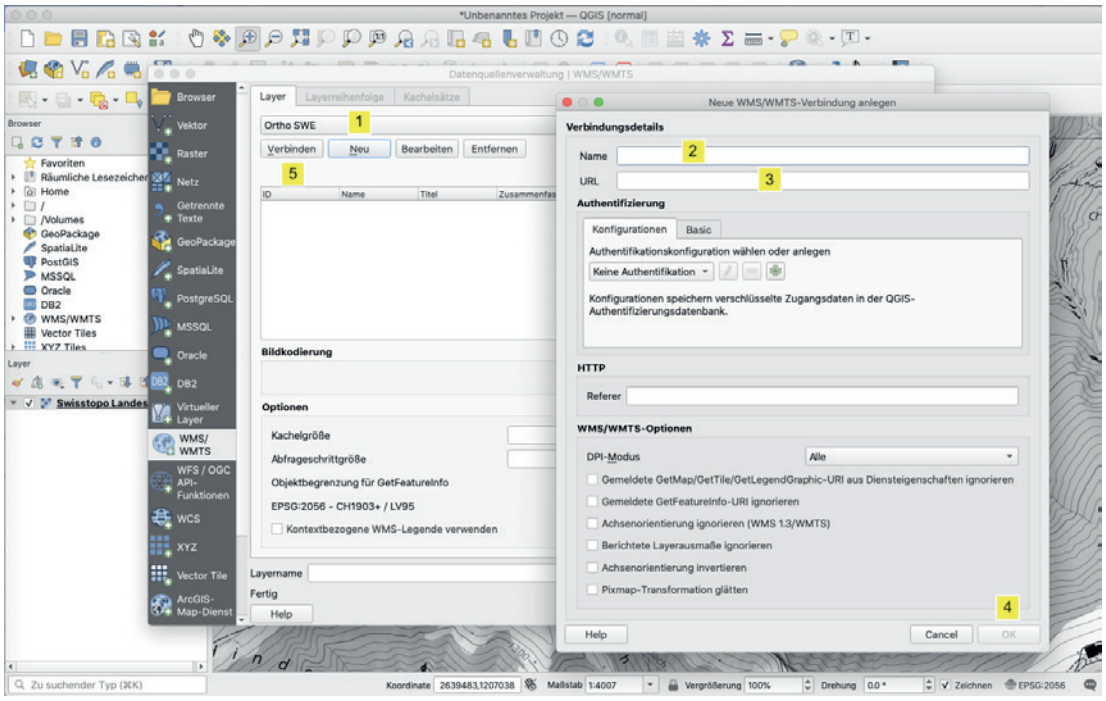


Abb. 10: Hinzufügen eines WMS-Layers.

5 Beschreibung Plugin

In diesem Kapitel werden die benötigten Eingangsdaten, die verschiedenen Funktionen sowie die Ausgabedaten beschrieben.

5.1 Projekt starten oder öffnen

Mit einem Klick auf das Seilaplan-Icon in der Menüleiste wird das Hauptfenster von Seilaplan geöffnet. Dort kann dem neuen Projekt ein Name gegeben werden oder mit Klick auf das Ordner-Icon ein bereits bestehendes Seilaplan-Projekt geladen werden. Zum Öffnen eines bestehenden Projekts muss die JSON-Datei «Projekteinstellungen» ausgewählt werden. Die gespeicherten Eingangsparameter werden geladen und es kann mit Klick auf «Seillinie manuell bearbeiten» direkt ins Bearbeitungsfenster gewechselt werden.

Die Speicherfunktion steht erst zur Verfügung, wenn ein Anfangs- und ein Endpunkt definiert wurden.

5.2 Eingangsdaten

Folgende Eingangsdaten müssen definiert werden:
- Terraindaten als Rasterlayer (Digitales Höhenmodell) oder Geländeprofil (Profilpunkte aus Feldaufnahmen)
- Anfangs- und Endkoordinaten der Seillinie
- Seilkranspezifische Parameter

5.2.1 Terraindaten: Rasterlayer

Terraindaten können als Rasterlayer eingegeben werden, sofern das Höhenmodell als Raster verfügbar ist. Üblicherweise kann es als *.tiff, *.txt oder *.asc-Datei in QGIS eingelesen werden. WMS-Dienste von Höhenmodellen können nicht verwendet werden, da diese keine Höheninformationen enthalten. Das Raster muss in einem projizierten Koordinatensystem vorliegen, geografische Koordinaten (in Grad) werden nicht unterstützt.

Um ausreichend genaue Resultate zu erhalten, empfehlen sich Höhenmodelle mit einer Auflösung von mind. 5 m, besser jedoch 2 m. Hochaufgelöste Höhendaten des Schweizer Bundesamtes für Landestopografie swisstopo können mit dem QGIS-Plugin Swiss Geo Downloader heruntergeladen werden (siehe Kapitel 4 Geodaten).

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

5.2.2 Terraindaten: Geländeprofil aus Feldaufnahmen

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

Exportdatei vom Haglöf Vertex Laser Go
Die Exportdatei des Haglöf Vertex-Lasergeräts 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, sodass die Punkte relativ zueinander gleichbleiben und sich nur das Koordinatensystem ändert. Schlussendlich wird eine gerade Linie durch die Punkte gelegt (Interpolation) und die Punkte werden 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.

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-Projekts angenommen. Falls dieses ein geographisches Referenzsystem (z. B. WGS 84) ist, wird stattdessen das Schweizer Referenzsystem LV95 verwendet.

Feldaufnahmeprotokoll in Excel-Datei (*.xlsx)

Unter Feldaufnahmen verstehen wir 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 Feldaufnahmen 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 mindestens die Schrägdistanz und Neigung erfasst werden.

Bemerkungen können sowohl für Punkte als auch für Strecken zwischen Punkten erfasst werden. Seilaplan kann nur Punkt-Bemerkungen importieren.

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 können auf der Linie der Anfangs- und der Endpunkte der Seillinie definiert werden.

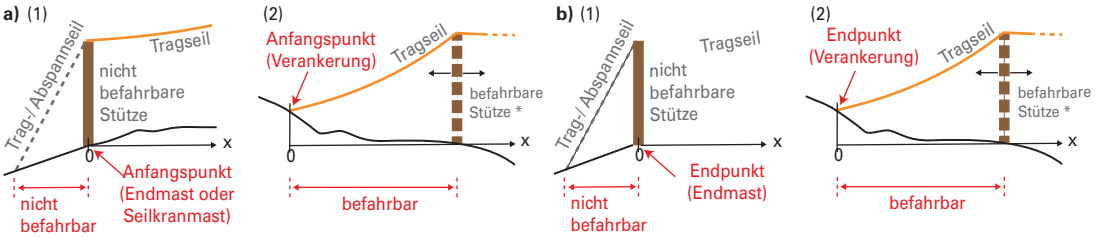
5.2.3 Anfangs- und Endkoordinaten der Seillinie

Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes können entweder in der Eingabemaske eingegeben oder direkt im QGIS gezeichnet werden. Wird ein Geländeprofil eingelesen, können 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 (Abb. 11). Mit dem Anfangs- und Endpunkt wird der Start- und Endpunkt der Seillinien-Berechnung und -Optimierung festgelegt. Zwischen diesen beiden Punkten soll der Laufwagen fahren können. Um verschiedene Seillinienlayouts abzudecken, können als Anfangs- und Endpunkt die folgenden drei Bauelemente ausgewählt werden (Abb. 12).

Seilkranmast (nur Anfangspunkt)
Bei einem mobilen Seilkran oder einem Kombiseilgerät muss das Bauelement «Seilkran» als Anfangspunkt gewählt werden. Der Seilkranmast wird in der Optimierung als Stütze mit fixer Höhe definiert. Die Verankerung des Mastes wird im Diagramm nicht dargestellt und kann auch nicht aktiviert werden. Bei einem konventionellen Seilkran muss zwischen Stütze und Verankerung gewählt werden.

Stütze
Wenn das Tragseil zwischen Verankerung und Stütze nicht befahren wird, muss als Anfangs- oder Endpunkt das Bauelement «Stütze» gewählt werden. 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 20 m gezeichnet, dass jedoch keinen Einfluss auf das Resultat der Optimierung hat. Die Verankerung kann nach der Optimierung im Bearbeitungsfeld aktiviert/deaktiviert und verschoben werden.

Verankerung
Soll das Tragseil zwischen Anker und Stütze befahrbar sein, muss das Bauelement «Verankerung» gewählt werden. Die Verankerung wird in der Optimierung als Stütze mit fixer Höhe von 0 m 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.
Durch das Festlegen von Anfangs- und Endpunkt wird automatisch das Längsprofil der Seillinie erstellt. Mit Klick auf «Geländelinie» kann das Längsprofil angezeigt und geprüft werden. Falls mit der Optimierung gearbeitet werden soll, kann hier der Lösungsraum eingeschränkt werden:
– Ist die Position einer oder mehrerer Stützen bereits bekannt, können fixe Stützen mit einem Klick auf «Fixe Stütze definieren» angegeben werden.
– Geländeabschnitte, in denen keine Stütze stehen soll oder kann, können definiert werden (z. B. Seillinie verläuft über eine Wiese, Jungwuchs ohne potenzielle Stützenbäume).



Der Anfangspunkt entspricht dem Startpunkt der Seillinien-Optimierung. Falls das Tragseil zwischen Anker und erster Stütze nicht befahren wird, muss der Endmast oder der Seilkranmast (1), andernfalls die Verankerung (2) als Anfangspunkt gewählt werden.

*Die genaue Position und die Höhe der Stützen werden durch die Optimierung bestimmt, können aber auch manuell festgelegt werden.

Der Endpunkt entspricht dem Ende der Seillinien-Optimierung. Falls das Tragseil zwischen letzter Stütze und Anker nicht befahren wird, muss der Endmast (1), andernfalls die Verankerung (2) als Endpunkt gewählt werden.

*Die genaue Position und die Höhe der Stützen werden durch die Optimierung bestimmt, können aber auch manuell festgelegt werden.

Abb. 11: Erklärung zu (a) Anfangspunkt und (b) Endpunkt der Seillinie. Diese Fenster öffnen sich durch Klick auf das Fragezeichensymbol im Seilaplan-Plugin.

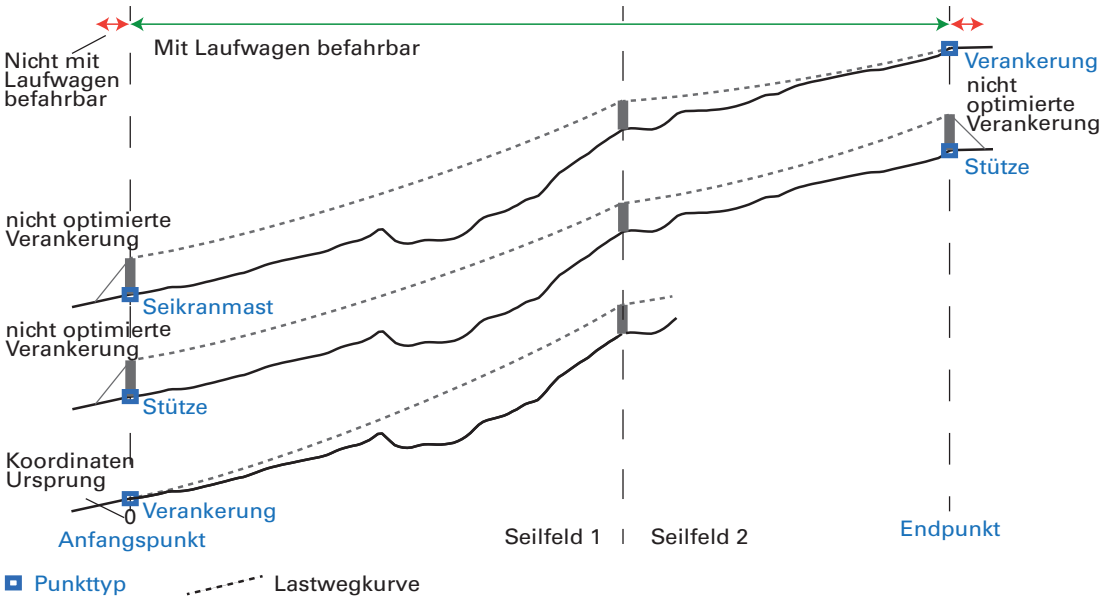


Abb. 12: Illustration der verschiedenen Bauelemente von Anfangs- und Endpunkt.

5.2.4 Seilkranspezifische Parameter

Im Hauptfenster kann die Berechnung der Seillinie durch die Angabe von seilkranspezifischen Werten konkretisiert werden. Dadurch können die lokalen Gegebenheiten in der Berechnung der Seillinie berücksichtigt werden.

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 22,5/10 mm» entspricht einem konventionellen Seilkran mit einer Nutzlast von drei Tonnen, einem Tragseil mit 22,5 mm und einem Zugseil mit 10 mm Durchmesser. Das Parameterset «MSK 3t 20/11/8 mm» entspricht einem Mobilseilkran mit einer Nutzlast von drei Tonnen, einem Tragseil mit 20 mm, einem Zugseil mit 11 mm und einem Hilfsseil mit 8 mm 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 benutzerdefinierten Parametersets können mit einem Klick auf das Papierkorb-Icon wieder gelöscht werden.

Seillinie

Tabelle 1 zeigt die Parameter, welche für die exakte Beschreibung der Seillinie zu definieren sind. Es kann angeben werden, ob mit einem Zweiseil- oder Mehrseilsystem gearbeitet wird. Beim Zweiseilsystem wird die Gravitation genutzt, weshalb die Seillinie auf einen durchgehenden Gradienten geprüft wird (Abb. 13). Im Weiteren kann ein minimaler Abstand des Tragseils vom Boden definiert werden. Es gibt Situationen, bei denen das Spannfeld 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 (Abb. 13). Die Berechnungen beziehen sich auf Seilungen, bei denen die Ladung frei schwebt. Bei Kopf-hoch-Seilungen, also wenn die Ladung den Boden berührt, werden die Kräfte und der Durchhang überschätzt.

Tab. 1: Seilkranspezifische Eingabeparameter.

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 (Kriterium Neigung) 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 (Kriterium Neigung) befahrbar ist
Bodenabstand		
Minimaler Abstand Tragseil – Boden	m	Stellt bei schwebender Last einen ausreichenden Bodenabstand sicher
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

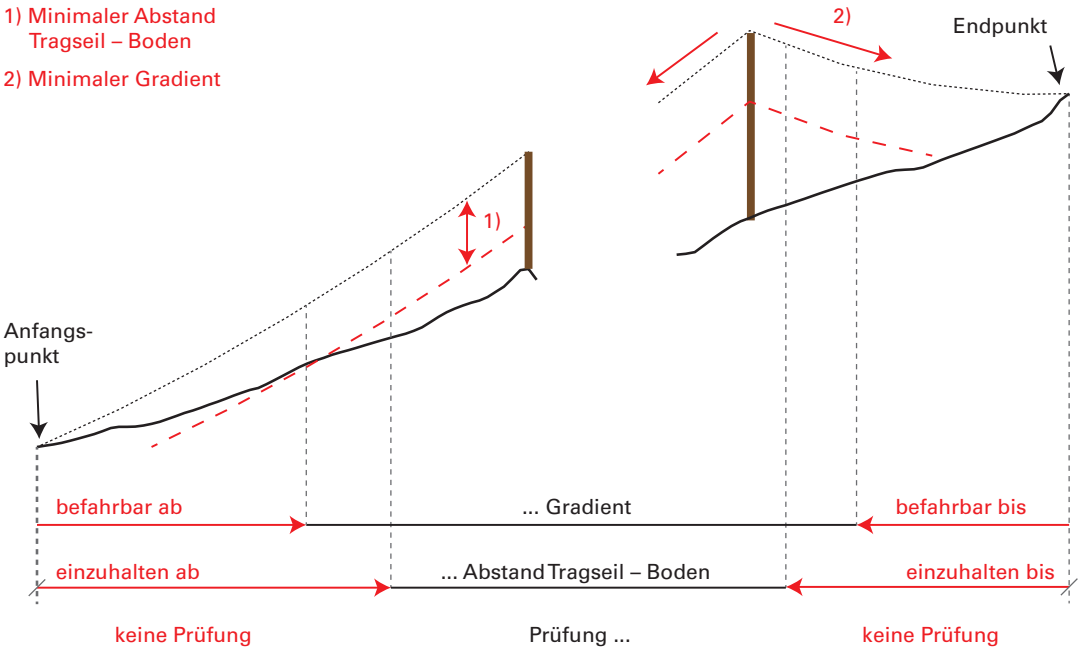


Abb. 13: Parameter für die Prüfung der Bedingung des minimalen Bodenabstandes und des Seilsystems. Für den Fall, dass als Anfangs- oder Endpunkt eine Verankerung gewählt wird, macht es Sinn, eine Strecke zu definieren, auf welcher die Prüfung des minimalen Bodenabstandes nicht stattfindet.

Tab. 2: Technische Parameter des Seilkrans.

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 (*Rutsch-Überlastkupplung, bei den meisten Seilgeräten verbaut). Die lokal geltenden rechtlichen Vorgaben sind zu berücksichtigen.

Maschinendaten

Tabelle 2 zeigt die technischen Parameter des Seilkrans, welche zu definieren sind. Alle Angaben sollten dem Maschinisten bekannt sein oder im Kranbuch stehen. Ansonsten muss beim Hersteller nachgefragt werden. Für die Umrechnung von Tonnen in kN kann näherungsweise mit dem Faktor 10 (gerundete Erdbeschleunigung) gerechnet werden. Ein Gesamtgewicht von 3,2 t entspricht rund 32 kN.

Die Angaben zu Tragseil und Zugseil müssen immer gemacht werden. Beim Rückholseil (2) wird eine 0 eingesetzt, wenn mit einem Zweiseilsystem gearbeitet wird. Die Tragseilspannkraft entspricht der Grundspannung ohne Last und fliesst in die Berechnung der Lastwegkurve ein. Bei der automatischen Optimierung dient die eingegebene Tragseilspannkraft nur als Startwert. Der Algorithmus berechnet die optimale Grundspannung, die beim Seilen eingestellt werden kann, sofern das Seilgerät über ein Spannungsmessgerät verfügt.

Der Sicherheitsfaktor kann maschinenspezifisch angepasst werden. Dabei müssen die lokalen gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden.

Kopfdaten

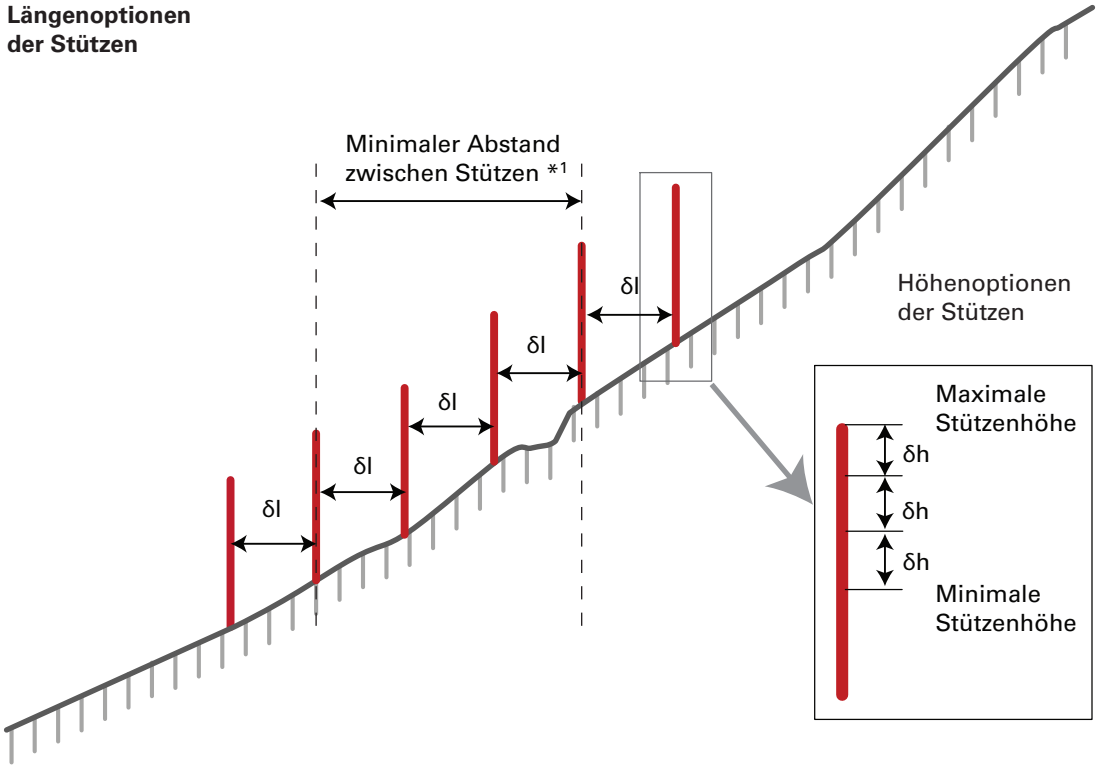
Im Reiter «Kopfdaten» lassen sich Metadaten des Seillinienprojekts wie Projektverfasser, Projektnummer, Gemeinde, Waldort und Bemerkung erfassen. Die Angaben sind optional und haben keinen Einfluss auf die Berechnung.

Optionale Parameter

Mit den Optimierungsparametern (Abb. 14) im Reiter «Optional #1» kann der Optimierungsraum bei der automatischen Lösungssuche 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, Bundstelle über Tragseilsattel sowie die Default-Grenzwerte für Leerseil- und Lastseilknickwinkel anpasst werden (Tab. 3).

Tab. 3: Optionale Parameter zur Einschränkung des Optimierungsraumes.

Parameter	Einheit	Bemerkung
Minimaler Abstand zwischen Stützen	m	Kleinster horizontaler Abstand zwischen zwei ausgewählten Stützen im Seillinienlayout
Minimaler Abstand möglicher Stützenstandorte	m	Abstand, in welchem potentielle Stützen gesetzt werden können. Beispiel: Ein minimaler Abstand von 1 m bedeutet, dass sich im horizontalen Abstand von 1 m 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 10 m eingegeben werden.
Minimale Sattelhöhe	m	
Maximale Sattelhöhe	m	
Abstufungsintervall	m	Kleinste Abstufung zwischen zwei möglichen Stützenhöhen Beispiel: Bei einem Intervall von 2 m, einer minimalen Stützenhöhe von 8 m und einer maximalen Stützenhöhe von 14 m sind die Stützenhöhen 8, 10, 12 und 14 m 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 1–2 m 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.
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 100 kN 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 1,5 m 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 Füllfaktor-Werte ihrer Seile. Die Abweichungen im Durchhang können bei den üblichen Seilen in Mitteleuropa bis zu 1 m betragen.
Grenzwert min. Leerseilknickwinkel (mit/ohne Niederhaltelasche)	°	Die Grenzwert sind gemäss Angaben des Sattelherstellers festzulegen. Im ersten Eingabefeld kann der Grenzwert mit montierter Niederhaltelasche, im zweiten Eingabefeld denrGrenzwert ohne montierte Niederhaltelasche angegeben werden.
Grenzwert max. Lastseilknickwinkel (Stütze /Endmast)	°	Der Grenzwert ist gemäss Angaben des Sattelherstellers anzugeben.
Bundstelle über Tragseilsattel	m	Seilaplan berechnet die benötigte Höhe des Tragseils bei einer Stütze (Sattelhöhe). Die Bundstelle befindet sich einige Meter über dem Sattel. Die Höhendifferenz zwischen Tragseilsattel und Bundstelle kann hier angepasst werden.



δl: Horiz. Auflösung mögl. Stützenstandorte
δh: Abstufungsinterval Stützenhöhe
Mögliche Stützenstandorte
*1 bezieht sich auf tatsächlich realisierte Stützen

Abb. 14: Parameter zur Setzung der Zwischenstützen.

Weitere Infos zur Funktionsweise des Optimierungsalgorithmus sowie seinen Grenzen sind in Kapitel 6 (Theoretische Grundlagen) zu finden. Der Optimierungsalgorithmus ist ein Hilfsmittel. Wir raten eindringlichst davon ab, eine automatisch erzeugte Lösung 1:1 zu übernehmen.

Jede Lösung muss durch eine entsprechend geschulte Person geprüft und allenfalls manuell angepasst werden.

5.3 Manuelle Bearbeitung

Mit der manuellen Bearbeitung kann die Seillinie von Grund auf geplant, berechnet und bearbeitet werden. Das Bearbeitungsfenster verfügt über die nachfolgenden Funktionen.

5.3.1 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. Die Lastwegkurve wird automatisch neu berechnet.

5.3.2 Stützen editieren, löschen und hinzufügen

Stützen können auf drei Arten bearbeitet 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 aktiviert und deaktiviert werden. Die Aktivierung und Deaktivierung einer Verankerung hat keinen Einfluss auf die Seillinienberechnung, sondern nur auf die Darstellung der Seillinie. Die Seillinie aktualisiert sich bei jeder Anpassung automatisch.

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 erhöht oder reduziert wird.

Stützen löschen
Mit dem Papierkorb-Icon hinter der jeweiligen Stützenzeile kann die Stütze gelöscht werden. Anfangs- und Endpunkt können nicht gelöscht werden. Dafür kann die Seillinie mit oder ohne Verankerung angezeigt werden, je nachdem ob ein Häkchen gesetzt wird. Bei der Verankerung können die Sattelhöhe und die Neigung nicht verändert werden, da die Verankerung immer am Boden ist.

5.3.3 Kennwerte der Seilline

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

Im zweiten Reiter «Parameter» können die Maschinendaten sowie die Grundspannung des Tragseils und der minimale Abstand zwischen Tragseil 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 (Tab. 4). Es werden die definierten Grenzwerte, welche teilweise auf dem Parameterset basieren, die berechneten Werte der Optimierungslösung sowie die neuen Werte nach einer manuellen Anpassung aufgelistet. Die aktuellen Werte und deren Positionen können per Klick auf einen Kennwert im Diagramm angezeigt werden. Falls Grenzwerte überschritten werden, sind die Angaben im Diagramm rot hinterlegt.

Tab. 4: Beschreibung der Grenzwerte.

Kennwert	Einheit	Grenzwert
Minimaler Bodenabstand	m	Es wird der von der benutzenden Person unter «Minimaler Abstand Tragseil – Boden» im Reiter «Seillinie» angegebene Wert als Grenzwert verwendet.
Max. auftretende Seilzugkraft	kN	Der Grenzwert für die zulässige Seilzugkraft ist als Mindestbruchkraft des Tragseils geteilt durch den Sicherheitsfaktor definiert. Die Seilzugkraft am Lastseil mit der Last in Feldmitte ist massgebend.
Max. Lastseilknickwinkel	30°/60°	Grössere Knickwinkel reduzieren die Bruchlast des Tragseils und führen zu höheren Sattelkräften (Pestal, 1961). Die beiden Grenzwerte 30° für befahrbare und 60° für nicht befahrbare Stützen sind Erfahrungswerte aus der Praxis.
Min. Leerseilknickwinkel (Nachweis erbracht, dass Seil nicht von Sattel abhebt)	1°/3°	Nach Pestal (1961) besteht bei Knickwinkeln unter 1° die Gefahr, dass das Tragseil beim Sattel abhebt (rot hinterlegte Werte). Bei Knickwinkeln zwischen 1° und 3° muss das Tragseil mittels Niederhaltelasche gesichert werden (orange hinterlegte Werte).

5.3.4 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 Profilansicht im PDF ausgegeben.

Jedem Bauelement kann eine Kategorie zugeordnet werden (Abb. 15). Das Bauelement wird in der Vogelperspektive mit dem entsprechenden Symbol dargestellt. Bei der Position der Stütze kann, vom Anfangspunkt aus gesehen, rechts, Mitte 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.

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.

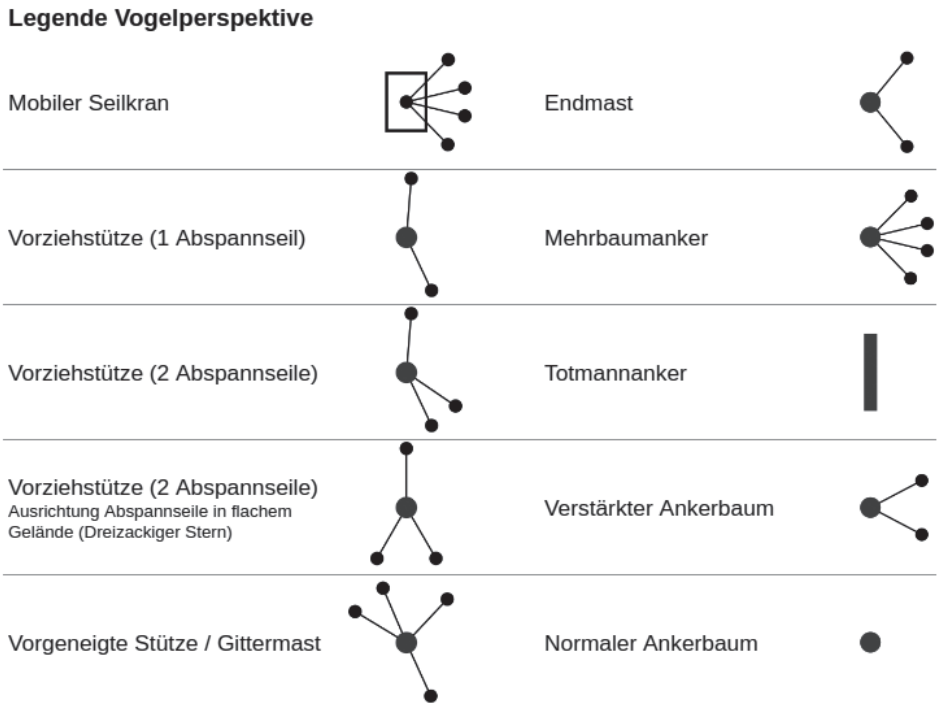


Abb. 15: Symbole für die verschiedenen Kategorien der Bauelemente.

5.3.5 Kopfdaten

Im letzten Reiter «Kopfdaten» können Zusatzinformationen für den Bericht, wie Verfasser, Projektnummer oder Waldort eingegeben werden. Falls diese Angaben bereits bei der Eingabe gemacht wurden, werden sie übernommen.

5.4 Ausgabedaten

Die Ausgabe des Seilaplan-Entwurfs erfolgt je nach Auswahl in PDF-, Shape-, KML-, CSV- oder DXF-Dateien. 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 dxf- (CAD), Shape-, KML- oder CSV-Datei abgespeichert werden.

5.4.1 Diagramm

Das Diagramm zeigt die grafische Darstellung des Seilinienlayouts. Der Leerseilverlauf, die Lastwegkurve nach Zweifel (1960) und der minimale Bodenabstand werden dargestellt. Ausserdem werden der Anfangs- und der Endpunkt sowie die berechneten Zwischenstützen inklusive Angaben zur jeweiligen Sattelhöhe dargestellt. Die X-Koordinaten sind auf der horizontalen Achse aufgetragen, die Z-Koordinaten als Höhe auf der vertikalen Achse.

5.4.2 Kurzbericht

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

Tabelle 5: Ausgabedaten des Kurzberichts.

Beschreibung	Masseinheit	Bemerkung
Zeitpunkt der Berechnung	Datum, Zeit	
Div. Kopfdaten	–	Eigenschaften des Projekts wie Autor, Projektnummer, Ort usw.
Eingabewerte		Auflistung der eingegebenen Parameterwerte, welche für die Berechnung verwendet wurden.
Stützen: Bezeichnung, Sattelhöhe, Neigung, Min. BHD, Ø Bundstelle	–, m, °, cm, cm	Die Bezeichnung, die Neigung sowie die Sattelhöhe der Stützen können im Bearbeitungsfenster angegeben bzw. angepasst werden. Der minimale BHD und der Durchmesser der Bundstelle werden wie folgt berechnet: Annahme 1: Sattelhöhe + Höhe der Bundstelle über dem Tragseilsattel = Höhe der Bundstelle Annahme 2: Durchmesserzunahme von 1 cm pro 1 m Stammlänge Annahme 3: Die Höhe des BHDs wird auf 1,5 m gerundet. 1. Schritt: Berechnung des erforderlichen Durchmessers von Stützenbäumen an der Bundstelle in Abhängigkeit der Sattelkraft nach Pestal (1961, Tab. 6) 2. Berechnung des minimalen BHDs: Erforderlicher Durchmesser der Bundstelle + ([Höhe der Bundstelle in Metern – 1,5 m] x 1 cm/1 m) Der BHD wird auf ganze Zahlen gerundet. Bei den Angaben handelt es sich um Richtwerte. Die Stabilität und Vitalität des Baumes müssen fachkundlich im Feld überprüft werden.
Max. 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 (Seil ohne Last) von beiden Stützenseiten. **Lastseilknickwinkel:** Berechnet sich als Differenz der Leerseilwinkel von einer Stützenseite mit dem Lastseilwinkel (Last unmittelbar vor der Stütze) 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.
Azimut	gon, °	Azimut der Seillinie in Blickrichtung vom Anfangs- zum Endpunkt
Länge Leerseil gespannt (Anfangs- bis Endpunkt)	m	Länge des Leerseils bei 0kN Seilzugkraft
Max. Abstand Leerseil – Boden	m	Maximale Differenz zwischen dem Leerseil und dem Gelände
Anker- und Spannfelder: Dimensionen, Durchhang	m, m	Die Dimensionen der Spannfelder werden anhand der Horizontal- und Schrägdistanz sowie der Höhendifferenz beschrieben. Der Durchhang des Leerseils und der Lastwegkurve wird in Feldmitte angegeben.

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

	Höhe der Abbundstelle																				
Sattelkraft	**5 m**	**6 m**	**7 m**	**8 m**	**9 m**	**10 m**	**11 m**	**12 m**	**13 m**	**14 m**	**15 m**	**16 m**	**17 m**	**18 m**	**19 m**	**20 m**	**22 m**	**24 m**	**26 m**	**28 m**	**30 m**
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

5.4.3 Technischer Bericht

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

Tab. 7: Wichtigste Ausgabedaten des detaillierten Berichts.

Beschreibung	Masseinheit	Bemerkung
Zeitpunkt der Berechnung	Datum, Zeit	
Berechnungsdauer	s	
Höhendaten		Dokumentname des verwendeten digitalen Höhenmodels
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.

Die im Seilsystem auftretenden Kräfte und die Geometrie des Seilsystems sind in Abbildung 16 illustriert und in Tabelle 8 aufgelistet. Die Abkürzungen in der Tabelle 8 stimmen mit der Abbildung 16 überein.

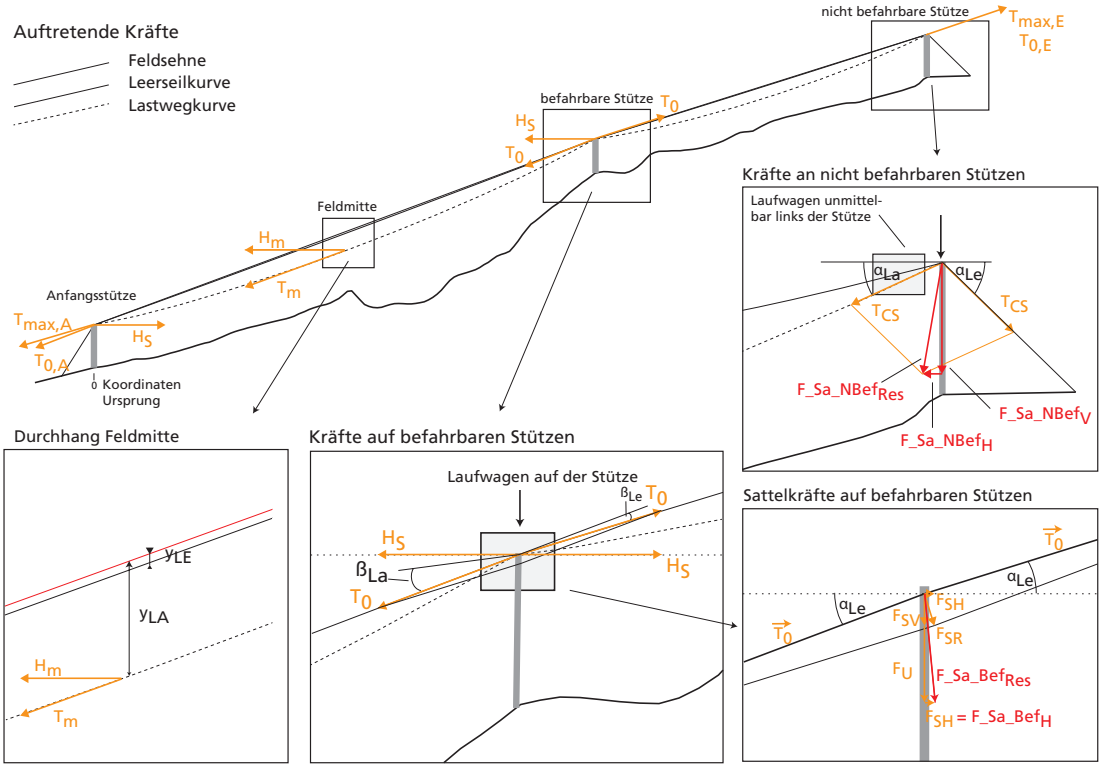


Abb. 16: Illustration der Ausgabeparameter.

Tab. 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
Auftretende 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 (Leerseil-verhältnisse)	kN
Auftretende 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
Auftretende Kräfte an befahrbarer Stütze (Laufwagen auf Sattel)		
F_Sa_BefRes	Sattelkraft, Resultierend	kN
F_Sa_BefV	Sattelkraft, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_BefH	Sattelkraft, Horizontal Komponente	kN
FSR	Sattelkraft (Anteil von Tragseil), Resultierend	kN
FSV	Sattelkraft (Anteil von Tragseil), Vertikal Komponente	kN
FSH	Sattelkraft (Anteil von Tragseil), Horizontal Komponente	kN
FU	Einwirkung auf Stütze aus Last, Gewicht Trag- und Zugseil	kN
Auftretende Kräfte an nicht befahrbarer Stütze (Laufwagen unmittelbar links/rechts der Stütze)		
TCS	Seilzugkraft	kN
F_Sa_NBefRes	Sattelkraft, Resultierend	kN
F_Sa_NBefV	Sattelkraft, Vertikal Komponente	kN
F_Sa_NBefH	Sattelkraft, Horizontal Komponente	kN
Seilwinkel an den Stützen		
αLE	Seilwinkel an den Stützen, Leerseil	° [0...360]
αLA	Seilwinkel an den Stützen, Lastseil	° [0...360]
Nachweis, dass Tragseil nicht vom Sattel abhebt		
β LA	Lastseilknickwinkel bei Stütze	° [0...360]
β LE	Leerseilknickwinkel bei Stütze	° [0…360]
	Nachweis erfüllt (Leerseilknickwinkel >1°)	[Ja/Nein]

5.4.4 CSV-Dateien

In der CSV-Datei «Koordinaten_Seil» werden die Koordinaten von Lastseil, Leerseil und Gelände sowie der Abstand vom Lastseil zum Boden für jeden Meter Horizontaldistanz, beginnend beim Anfangspunkt, dargestellt. Die X- und Y-Koordinaten sind für Lastseil, Leerseil und Gelände dieselben und daher nur einmal dargestellt.

Die CSV-Datei «Koordinaten_Stuetzen» zeigt die Koordinaten der in Seilaplan erstellten Stützen, sowie die Sattelhöhe und gegebenenfalls die Neigung und unterscheidet nach den definierten Bauelementen. Die Sattelhöhe wird in Excel als Datum dargestellt.

5.4.5 Weitere Dateiformate

Neben der Ausgabe als CSV-Datei können die Geodaten auch als SHP-, KML- oder DXF-Datei abgespeichert werden. Das SHP-Format wird für GIS-Anwendungen gebraucht. Mit dem KML-Format kann die geplante Seillinie in Google Earth geladen und betrachtet werden. Das DXF-Format kann mit CAD-Software gelesen und für technische Zeichnungen verwendet werden.

6 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen der Seilmechanik beschrieben. Die in Seilaplan verwendete Berechnungsmethode der Lastwegkurve wurde mit Feldmessungen verifiziert. Zudem gibt das Kapitel Auskunft zum Optimierungsalgorithmus, der in Seilaplan implementiert ist.

6.1 Seilmechanik

Bei Ingenieurprojekten müssen mehrere Ziele erreicht werden. Für forstliche Seilsysteme gehören dazu das sichere Tragen einer Last (Tragsicherheit) und die Sicherstellung einer minimalen Bodenfreiheit (Gebrauchstauglichkeit). Die Wahl der Methode zur Berechnung der auftretenden Kräfte und der dazugehörigen Geometrie (Lastwegkurve) hängt stark von der Art der Verankerung des Tragseils ab.

6.1.1 Tragseilkonfigurationen

Für forstliche Seilsysteme existieren mehrere Systeme zur Verankerung des Tragseils, von denen die wichtigsten als «einseitig fix», «beidseitig fix» oder «running» bezeichnet werden (Heinimann *et al.* 2001, Abb. 17). In einer «einseitig fixen» Konfiguration wird das Tragseil nur an einem Endanker fest verankert und am anderen Ende ist es beispielsweise durch ein Gewicht gespannt. In einer «beidseitig fixen» Konfiguration ist das Tragseil an beiden Endpunkten fix verankert, während es bei einer «running» Konfiguration an keinem Ende fix verankert ist und die Seilzugkräfte kontrolliert werden können. In Nordamerika sind einseitig fixe oder running-Tragseilsysteme üblich, während europäische Seilkransysteme in der Regel eine beidseitig fixe Verankerung des Tragseils aufweisen.

Die Vorteile der beidseitig fixen Verankerung kommen insbesondere bei Durchforstungen und bei der einzelbaumweisen Holzernte zum Tragen. Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit wie z. B. eine freischwebende Last zur Schonung von Boden und Bestand können damit erfüllt werden. Bei anderen Verankerungskonfigurationen

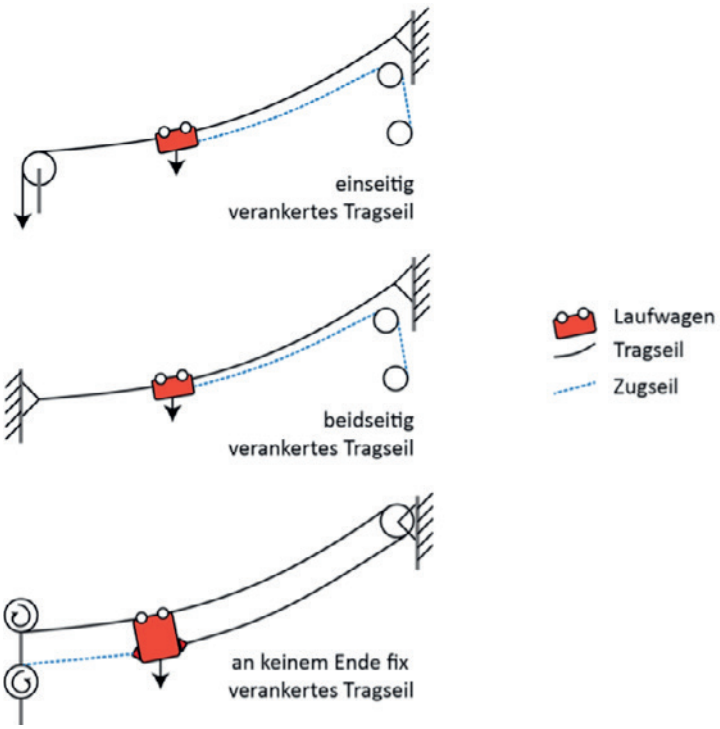


Abb. 17: Systeme zur Verankerung der Tragseile bei forstlichen Seilkrananlagen (eigene Darstellung).

müssten schwerere Seilkräne verwendet und höhere Stützen gebaut werden, um die Gebrauchstauglichkeit in gleichem Masse zu garantieren. Dies würde wiederum höhere Kosten mit sich bringen.

Seilaplan geht von einem beidseitig fixierten Tragseil aus.

6.1.2 Berechnungsmethoden nach Pestal (1961) und nach Zweifel (1960)

In der europäischen Forstwirtschaft haben mehrfeldrige, beidseitig fix verankerte Seilkrananlagen eine lange Tradition. Während die Gesamtlänge des Tragseils für eine bestimmte Konfiguration konstant gehalten wird, variiert die Länge innerhalb der einzelnen Seilfelder je nach Lage des Laufwagens. Wenn sich eine Last von einem Seilfeld zum nächsten bewegt, rutscht das Tragseil über die Stütze und verkürzt damit das Tragseil im ersten Seilfeld und verlängert es im zweiten. Dies bedeutet, dass sich die Seilzugkräfte entlang des Tragseils mit der Position des Laufwagens ändern. Unter diesen Bedingungen müssen für eine genaue Analyse des Tragseils (Lastwegkurve, Zugkräfte) Kettenliniengleichungen verwendet werden. Aufgrund der Nichtlinearität ist es jedoch nicht möglich, eine explizite Lösung zu erhalten, sondern nur eine numerische. Die Berechnungen mittels Kettenlinien-Ansatz sind mathematisch aufwändig, erfordern eine hohe Rechenleistung und wurden deshalb in der Praxis bislang kaum durchgeführt.

Die Bemessung der Seilsysteme wird weit verbreitet anhand der sogenannten Pestal-Formel vorgenommen. Die Formel basiert auf einer ursprünglich für den Seilbahnbau entwickelten Gleichung (Findeis 1923), die von Hauska (1933) für die Untersuchung von forstlichen Seilsystemen übernommen wurde. Sie beruht auf mehreren vereinfachten Annahmen, wie etwa eine lineare Verteilung des Eigengewichts des Tragseils entlang eines Spannfeldes, eine konstante horizontale Komponente der Zugkräfte und ein unelastisches Kabel. Diese Vereinfachungen führen zu einer Gleichung mit sechs Parametern, die zur Berechnung der Durchbiegung herangezogen werden können. Der Durchhang in der Mitte des Spannfelds ym kann so mithilfe der Eigenschaften der Seilfelder (horizontale Spannweite zwischen den Stützen b und Sehnenabstand zwischen den Stützen c), zweier Lastkenngrössen (bewegte Last Q und Eigengewicht des Tragseils q_s) und einer Kraftkomponente H (horizontale Komponente der Zugkraft des Tragseils) berechnet werden (Formel 1). Für die Analyse von Spannungen und Dehnungen wird die horizontale Komponente der Zugkraft als konstant angenommen.

$$y_m = \frac{q_s * b * c}{8H} + \frac{Q * b}{4H} \qquad (1)$$

Aufgrund der oben genannten Vereinfachungen kann die Methode Pestal (1961) verwendet werden, um die Eigenschaften eines einseitig fix verankerten Tragseils zu beschreiben. Die Methode bildet das Verhalten von beidseitig fix verankerten Tragseilen jedoch nicht korrekt ab, weil sich die Horizontal-Komponente der Zugseilkraft bei Überfahrt eines Laufwagens in einem Spannfeld ändert, mit maximalem Wert nahe der Spannfeldmitte.

Zweifel (1960) führte einen Kettenlinien-Ansatz für mehrfeldrige Seilbahnen ein, der heute umgangssprachlich als «Kettenlinien-Methode» bekannt ist. Dort geht man davon aus, dass die Verankerung an beiden Enden fix ist und das Tragseil elastische Eigenschaften hat sowie beim Fahren der Last von einem Spannfeld zum nächsten über die Stützen nachrutschen kann. Zweifel näherte die Kettenlinien durch eine Taylor-Reihe an und entwickelte einen Algorithmus zur manuellen Lösung des Gleichungssystems. Dieser Algorithmus liefert einen Bemessungswert für die Horizontalkomponente der Zugkraft eines belasteten Tragseils, sodass man für alle Spannfelder die Kräfte und Durchhänge berechnen kann. Obwohl dieser Kettenlinien-Ansatz in der Seilbahnindustrie weit verbreitet ist, wurde er bisher kaum für die Analyse forstlicher Seilsysteme verwendet. Bont und Heinimann (2012) zeigten, dass bei Verwendung der Methode von Zweifel im Vergleich zur Methode von Pestal Lösungen mit weniger oder tieferen Stützen realisiert

werden können. Tabelle 9 zeigt den Vergleich der Annahmen der Berechnungsmethoden von Pestal und Zweifel mit der Realität.

In Seilaplan ist der Kettenlinien-Ansatz von Zweifel (1960) zur Berechnung der Lastwegkurve implementiert.

Tab. 9: Vergleich der Annahmen der Berechnungsmethoden von Pestal und Zweifel und der Vergleich mit der Realität.

	Eigenschaften des Tragseilsegments							Mehrfeld Effekt			Last-Boden Interaktion		Hilfsseile	
	Spannprinzip		Verteilung Eigengewicht		Material Eigenschaften			Nicht nachrutschend	Nachrutschend	Reibung Sattel / Seil	Kein	Schleifend	Gewicht	Zugeinfluss
	Fix	Gewicht	Linear	Kettenlinie	Starr	Elastisch								
Pestal		x	x		x			x			x			
Zweifel	x			x		x			x		x		x	
Realität	(x)			x		x			x	x	(x)	(x)	x	x

6.2 Verifikation der Berechnungen nach Zweifel

Genauere Berechnungen der Tragseilzugkräfte und der Geometrie einer Seillinie, insbesondere der Lastwegkurve, werden mittels der Methode der Kettenlinie erreicht, welche mit dem Algorithmus von Zweifel (1960) in Seilaplan implementiert wurde. Allerdings konnten in der Literatur keine dokumentierten Messungen von Tragseilzugkräften und Lastwegkurven unter realen Lastbedingungen an forstlichen Seilkränen gefunden werden. Aus diesem Grund führte die Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft der WSL aufwendige eigene Messungen durch, um die Berechnungen nach der Kettenlinienmethode zu überprüfen.

6.2.1 Feldmessungen

Die Ergebnisse der Berechnungen nach Zweifel wurden mit denjenigen nach Pestal und mit den realen Werten aus Feldmessungen an vier verschiedenen Seillinien verglichen. Die Seillinien wurden so ausgewählt, dass eine möglichst grosse Vielfalt berücksichtigt werden konnte: bergauf, bergab, steil und weniger steil sowie unterschiedliche Spannfeldlängen. Alle Linien wiesen mehrere Spannfelder auf (2 bis 4 pro Linie) und hatten eine Linienlänge (Schrägdistanz) zwischen 397 und 522 m, mit Sehnenneigungen der einzelnen Spannfelder zwischen 24 und 65 Prozent. Das längste Spannfeld hatte eine Länge von 356 m. Die Messfahrten wurden mit unterschiedlichen Lasten durchgeführt. Für die Bildung der Lasten wurden geeignete Trämel ausgewählt und mit der Kranwaage eines Lastwagens gewogen. Daraus wurden drei Lasten von etwa 1 t, 1,5 bis 2 t und 2,5 t gebildet. Die vierte Lastvariante bildete der leere Laufwagen. In jedem Spannfeld wurde zudem der Leerseildurchhang des Tragseils gemessen, dazu wurde der Laufwagen möglichst nahe an den Seilkrankippmast gefahren. Somit standen für jedes Spannfeld insgesamt 5 Lastkonfigurationen zur Verfügung (Leerseil, Laufwagen ohne Last und Laufwagen mit 3 verschiedenen Lasten). Mit jeder einzelnen Last wurde bis in die Mitte eines Spannfeldes gefahren und dann sowohl der Durchhang als auch die Tragseilzugkraft gemessen. Der Laufwagen wurde dabei nur durch das Zugseil in Position gehalten und wurde nicht am Tragseil geklemmt, um eine horizontale Kraftwirkung des Zugseils auf das Tragseil zu vermeiden. Schlussendlich standen 50 Lastfälle (5 Lastkonfigurationen in 10 Spannfeldern) für die Auswertungen zur Verfügung.

6.2.2 Ergebnisse

Über die gesamte Messreihe lagen die maximalen Abweichungen zwischen der Berechnung nach Zweifel (Seilaplan) und den effektiven Messwerten im Bereich von 0,7 bis 0,9 m, wobei sowohl Überschätzungen als auch Unterschätzungen festgestellt wurden. Im Schnitt betrug die Abweichung 0,4 m. Die Berechnungen nach Zweifel (Seilaplan) liefern also für den Durchhang in Spannfeldmitte eine Genauigkeit von rund ± 1 m über alle Spannfeldlängen, was ein sehr gutes Ergebnis darstellt. Tabelle 10 zeigt einen Auszug aus der Messreihe.

Gleichzeitig mit der Messung des Durchhangs in Spannfeldmitte wurde jeweils auch die zugehörige Tragseilzugkraft gemessen. Die mittlere Abweichung zwischen der Berechnung nach Zweifel und den effektiven Messwerten betrug bei der statischen Tragseilzugkraft 4,6 kN (0,46 t). Die Tragseilzugkraft wurde bei der Berechnungsmethode nach Zweifel um bis zu 12 Prozent überschätzt, vor allem in den steilen Spannfeldern, jedoch nur um maximal 3,5 Prozent unterschätzt. Da in den meisten Fällen die berechneten Werte für die Tragseilzugkraft also leicht höher liegen als die gemessenen, ist man bei der Planung auf der «sicheren Seite». Die Abweichungen können damit erklärt werden, dass Effekte wie das Nachgeben der Anker (Ankerbäume sind nicht ganz fix, sondern leicht elastisch), Reibungseffekte zwischen den Seilsätteln und dem Tragseil und die Kraftwirkung des Zugseils auf das Tragseil bei der Zweifel-Methode nicht berücksichtigt werden.

Tab. 10: Durchhangmessungen und Vergleich mit den berechneten Werten für 3 unterschiedliche Spannfelder und 2 verschiedene Lastgewichte (Auszug aus der Messreihe).

Spannfeld (Länge, Neigung)	**Lastgewicht leicht = etwa 2t schwer = etwa 3t**	**Durchhang in Spannfeldmitte [m]**		
		Eigene Messung	**Berechnung Methode Zweifel (Seilaplan)**	**Berechnung Methode Pestal**
kurz (64 m, 27 %)	leicht	2,7	2,5	2,7
	schwer	3,6	3,6	4,2
mittel (175 m, 24 %)	leicht	7,2	7,6	9,6
	schwer	8,3	8,9	12,2
lang (356 m, 25 %)	leicht	11,7	12,2	16,5
	schwer	14,8	15,3	23,9

Für beidseitig fix verankerte Tragseile, wie dies bei Seilkränen der Fall ist, liefert die Methode auf der Grundlage der Kettenlinie (Zweifel) gegenüber der Methode nach Pestal deutlich genauere Werte für Tragseildurchhang und Tragseilzugkräfte, mit denen auch bei schweren Lasten und langen Spannfeldern ein realitätsnahes Seillinien-Layout berechnet werden kann.

Besten Dank an dieser Stelle an unsere Praxispartner Forstbetrieb Franz Mayr Melnhof-Saurau (Testung des Messlayouts), Nüesch & Ammann Forstunternehmung AG (Feldmessungen) und Abächerli Forstunternehmen AG (Feldmessungen).

6.3 Optimierungsalgorithmus

Im QGIS-Plugin «Seilaplan» ist ein Optimierungsalgorithmus implementiert, welcher für eine Seillinie bei gegebenem Anfangs- und Endpunkt die Position und die Höhe der Stützen optimiert. Der Optimierungsalgorithmus wurde für mitteleuropäische Verhält-

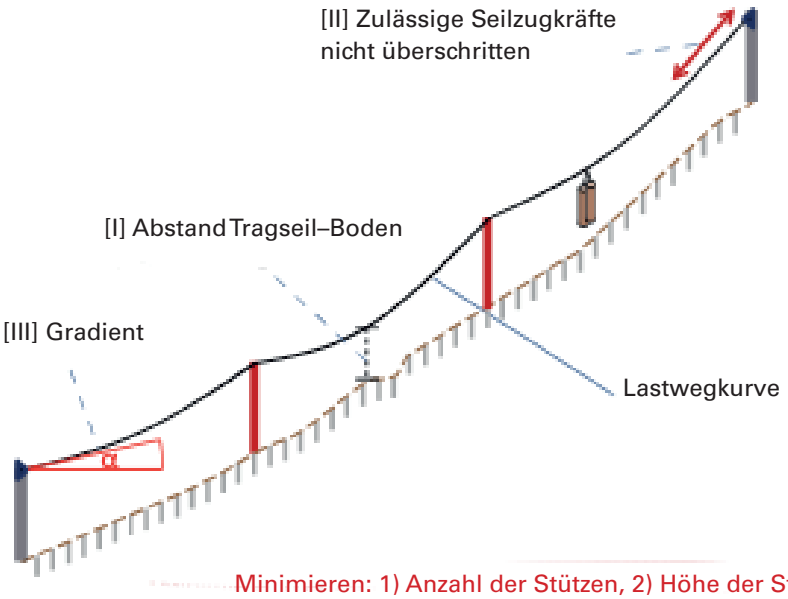


Abb. 18: Optimierungsproblem des Seillinienlayouts: Der Algorithmus sucht die Position der Stützen und deren Höhen, sodass die Anzahl der Stützen und die Höhen minimal sind. Geprüft wird dabei, ob (I) ein minimaler Abstand zwischen dem Boden und dem Tragseil gegeben ist, (II) die zulässigen Seilzugkräfte nicht überschritten werden und (III) bei einem Gravitationsbetrieb ein minimaler Gradient im Tragseil gegeben ist.

nisse konzipiert. Für die Berechnung der Eigenschaften der Lastwegkurve wird die iterative Methode nach Zweifel (1960, Abschnitt 2) verwendet, welche speziell für an beiden Enden fix verankerte Tragseile entwickelt wurde. Bei der Prüfung der Machbarkeit der Seillinie wird darauf geachtet, dass die maximal zulässigen Spannkräfte im Tragseil nicht überschritten werden, ein minimaler Abstand zwischen Tragseil und Boden gegeben ist und beim Einsatz eines Gravitationssystems eine minimale Neigung des Tragseils sichergestellt ist.

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 (Abb. 18). 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 Heinimann (2012) dokumentiert.

6.3.1 Grenzen der Optimierung

Die Optimierung berücksichtigt nicht alle notwendigen Kriterien, beispielsweise werden der Leer- oder der Lastseilknickwinkel nicht geprüft. Ausserdem ist es für das Zuziehen einer Last im Bestand manchmal besser, wenn die Stützen eine gewisse Höhe aufweisen, welche die theoretisch mögliche Minimalhöhe übersteigt. Zudem muss sichergestellt werden, dass sich an den vorgeschlagenen Stützenstandorten auch tatsächlich geeignete Stützenbäume befinden. Für erfahrene Seiler bietet die automatische Optimierung nur einen sehr kleinen Mehrwert, da der automatisch erstellte Output im Bearbeitungsfenster ohnehin geprüft und angepasst werden muss.

Der Optimierungsalgorithmus ist ein Hilfsmittel. Wir raten eindringlichst davon ab, eine automatisch erzeugte Lösung 1:1 zu übernehmen. Jede Lösung muss durch eine entsprechend geschulte Person geprüft und allenfalls manuell angepasst werden.

7 Literatur

Die Software basiert teilweise auf den Ergebnissen der Dissertation von Bont (2012). In den nachfolgenden Publikationen können weitere Informationen rund um das QGIS-Plugin Seilaplan und die theoretischen Grundlagen der Seilmechanik 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, research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/59983

Bont, L., Heinimann, H.R. (2012) Optimum geometric layout of a single cable road. Europ. J. For. Res. 1439–1448. doi.org/10.1007/s10342-012-0612-y.

Bont L.; Moll P.E.; Ramstein L.; Frutig F.; Heinimann H.R.; Schweier J. (2022) SEILAPLAN, a QGIS plugin for cable road layout design. Croatian Journal of Forest Engineering: J. Theor. Appl. For. Eng. 43, 2: 241–255.

Bont L.; Ramstein L.; Frutig F.; Schweier J. (2022) Tensile forces and deflections on skylines of cable yarders: comparison of measurements with close-to-catenary predictions. Int. J. For. Eng. doi.org/10.1080/14942119.2022.2051159

Bont L.; Ramstein L.; Frutig F.; Moll P.E.; Schweier J. (2021) Neue Grundlagen für ein genaueres Seillinien-Layout. Wald Holz (10/21) (PDF).

Bont L.; Ramstein L.; Frutig F.; Schweier J. (2020) Neue Grundlagen für eine effiziente Seillinienplanung – Schlussbericht an die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 71 S. (PDF).

Pestal E. (1961) Seilbahnen und Seilkrane für Holz- und Materialtransport. Georg Fromme & Co, Wien und München.

Zweifel O. (1960) Seilbahnberechnung bei beidseitig verankerten Tragseilen. Schweiz. Bauztg. 78, 1/2: 11.

Verzeichnis der neusten WSL Berichte

Geschäftsbericht. Eidg. Forschungsanstalt WSL 2025. Eidg. Forschungsanstalt WSL (2026) WSL Ber. 186. 76 S. doi.org/10.55419/wsl:42734

Météo, manteau neigeux et danger d'avalanche dans les Alpes suisses. Année hydrologique 2024/25. Haberkorn A., Zweifel B., Techel F., Marty C., Stucki T. (2025) WSL Ber. 185. 41 p. doi.org/10.55419/wsl:42250

Sampling with partial replacement in the Swiss National Forest Inventory (NFI6)? Stoll P. (2025) WSL Ber. 184. 32 p. doi.org/10.55419/wsl:42248

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2024/25. Haberkorn A., Zweifel B., Techel F., Marty C., Stucki T. (2025) WSL Ber. 183. 81 S. doi.org/10.55419/wsl:42150

Lawinen und Recht. Tagungsband zum Internationalen Seminar vom 11.–13. Juni 2025 in Davos. Harvey S., Schweizer J. (Eds.) (2025) WSL Ber. 182. 148 S. doi.org/10.55419/wsl:41920

WSL Research Program Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements – CCAMM: Project Report. Bast A., Phillips M., Bründl M. (Eds.) (2025) WSL Ber. 181: 174 S. doi.org/10.55419/wsl:41891

WSL-Forschungsprogramm Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements – CCAMM: Synthesebericht. Bründl M., Bast A. (2025) WSL Ber. 180. 44 S. doi.org/10.55419/wsl:41978

Hören und stören? Akustische und visuelle Einflüsse auf die wahrgenommene Erholung in periurbanen Landschaften. Allemann C., Wartmann F., Bauer N. (2025) WSL Ber. 179. 122 S. doi.org/10.55419/wsl:41888

Panel analysis and annual reporting of the Swiss National Forest Inventory. Stoll P. (2025) WSL Ber. 178. 19 p. doi.org/10.55419/wsl:41752

Pro-Mo: probabilistische Gefahren- und Risikomodellierung für gravitative Naturgefahren. Schlussbericht zum Pilotprojekt. Kleinn J., Berger C., Aller D., Rinderer M., Hählen N., Peter A., Singeisen C., Jordi M. (2025) WSL Ber. 177. 109 S. doi.org/10.55419/wsl:41550

Two-phase sampling for stratification in the Swiss National Forest Inventory. Concepts, implementation in the Data Analysis Application, and mathematical foundations. Portier J., Rohner B., Traub B., Lanz† A., Herold A. (2025) WSL Ber. 176. 122 p. doi.org/10.55419/wsl:41516

Aufwertungskonzept Moorlandschaft Hilferenpass. Modellvorgehen für die partizipative Erarbeitung eines Aufwertungskonzeptes basierend auf lokalen Ansprüchen. Fankhauser M., Torregroza L., Hunziker M. (2025) WSL Ber. 175. 62 p. doi.org/10.55419/wsl:40913

Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz (WBS): Zustand und Veränderungen in den Biotopen von nationaler Bedeutung nach zwei Erhebungsperioden. Bergamini A., Ginzler C., Schmidt B.R., Boch S., Ecker K.T., Pichon N.A., … (2025) WSL Ber. 174. 207 S. doi.org/10.55419/wsl:40802

Re-Evaluation der Kampagne «Aufs Wasser mit Rücksicht» 2024. Gattiker S., Hunziker M. (2025) WSL Ber. 173. 33 S. doi.org/10.55419/wsl:40609

Situazione fitosanitaria dei boschi 2024. Dubach V., Blaser S., Dennert F., Beenken L., Stroheker S., TreeNet, Hölling D., Queloz V. (2025) WSL Ber. 172: 49 p.

Protection des forêts – Vue d'ensemble 2024. Dubach V., Blaser S., Dennert F., Beenken L., Stroheker S., TreeNet, Hölling D., Queloz V. (2025) WSL Ber. 171: 49 S.

God da Tamangur – ein Wald und seine Geschichte(n). Bürgi M., Lock S. (2025) WSL Ber. 170. 104 S. doi.org/10.55419/wsl:40468

PDF Download: wsl.ch/berichte
ISSN 2296-3448 (Print)
ISSN 2296-3456 (Online)