



Die neuen Grundlagen zur Berechnung von Durchhängen und Tragseilzugkräften wurden an mehreren Seillinien in der Praxis überprüft. Kombiseilgerät Koller K507 in Kriens LU. Fritz Frutig

Neue Grundlagen für ein genaueres Seillinien-Layout

Leo Bont, Laura Ramstein, Fritz Frutig, Patricia Moll, Janine Schweier, WSL* | Die Berechnung von Durchhängen und Tragseilzugkräften bei forstlichen Seilkrananlagen auf der Grundlage der sogenannten Kettenlinie liefert genaue Ergebnisse, wie Überprüfungen in der Praxis gezeigt haben. Weiter wurde untersucht, wie moderne Fernerkundungsmethoden den Planungsprozess beim Anlegen der Seillinien sowie beim automatischen Berechnen des Seillinien-Layouts (Längenprofil) unterstützen könnten. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Im kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt «Neue Grundlagen für eine effiziente Seillinienplanung» wurde untersucht, wie wissenschaftliche Erkenntnisse der Seilmechanik, Entwicklungen in der Fern-

erkundung sowie mathematische Optimierungsalgorithmen in ein modernes Tool für die Planung des Seillinien-Layouts integriert werden können. Dieses soll folgende Hauptanforderungen erfüllen: Integration in ein Geografisches Informationssystem (GIS), Abbildung einer möglichst realistischen Seilmechanik für Durchhang und Kräfte, intuitiv bedienbare Benutzeroberfläche sowie vollständige Transparenz und Open Source. Hierfür wurde das ursprünglich an

der Professur für forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich entwickelte QGIS-Plug-in «Seilaplan» (Seilkran Layout Planer) weiterentwickelt und mit einer benutzerfreundlichen Benutzeroberfläche ausgerüstet.

Berechnungstool Seilaplan

Abbildung 1 auf Seite 33 (links) zeigt die Benutzeroberfläche mit dem Startfenster, in welchem das Geländeprofil mittels Höhenmodell oder eines aufgenommenen

*Leo Bont [leo.bont@wsl.ch], Laura Ramstein [laura.ramstein@wsl.ch], Fritz Frutig und Janine Schweier arbeiten an der Forschungsanstalt WSL auf dem Gebiet der nachhaltigen Waldbewirtschaftung, Patricia Moll ist selbstständige Softwareentwicklerin und hat die Benutzeroberfläche von Seilaplan programmiert.

Längenprofils definiert wird und die Eigenschaften der Seillinie eingegeben werden können. Abbildung 1 (rechts) zeigt das manuelle Bearbeitungsfenster, in welchem die Feinjustierung der berechneten Seillinie vorgenommen werden kann. Weiter ist in Seilaplan auch ein Optimierungsalgorithmus implementiert, welcher für eine Seillinie bei gegebenem Anfangs- und Endpunkt die Position und die Höhe der Stützen automatisch vorschlägt. Das Ergebnis dieser automatisierten Berechnung kann ebenfalls von Hand nachjustiert werden (Stützenpositionen, Höhe der Stützen).

Bis anhin wurde zur Berechnung der Lastwegkurve von Seillinien die Parabelmethode nach Pestal (1961) verwendet. Diese ist einfach durchführbar, hat aber den Nachteil, dass die Trage seildurchhänge zum Teil deutlich überschätzt werden und die auftretenden Kräfte nur ansatzweise berechnet werden können. Letzteres ist auf die Annahme von Pestal zurückzuführen, dass die Horizontalkomponente der Trage seilzugkraft bei der Fahrt des Laufwagens über das gesamte Spannfeld konstant bleibt, was bei einem beidseitig fix verankerten Trage seil jedoch nicht der Fall ist. Der Fokus bei Seilaplan lag deshalb auf der Verbesserung des Berechnungsalgorithmus für die Seilmechanik.

Messungen des Durchhangs und der Zugkräfte des Trage seils

Genauere Berechnungen der Trage seilzugkräfte 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 Trage seilzugkräften und Lastwegkurven unter realen Lastbedingungen an forstlichen Seilkränen

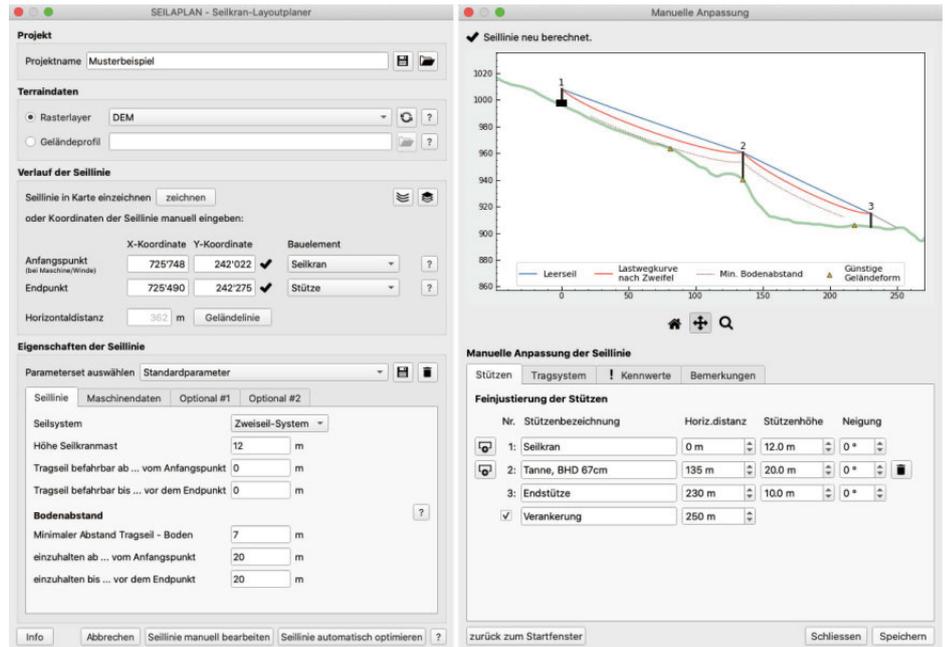


Abbildung 1: Startfenster (links) und Bearbeitungsfenster (rechts) von Seilaplan.

WSL

gefunden werden. Aus diesem Grund führten wir aufwendige, eigene Messungen durch, um die Berechnungen nach der Kettenlinien-Methode zu überprüfen. Die Ergebnisse der Berechnungen nach Zweifel wurden mit denjenigen nach Pestal und mit den realen Werten aus den Feldmessungen an vier verschiedenen Seillinien verglichen. Das Messlayout wurde vorgängig bei verschiedenen Seillinien des Forstbetriebs Mayr-Melnhof in der Steiermark (Österreich) getestet und entsprechend angepasst.

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 Seilneigungen der einzelnen Spannfelder zwischen 24 und 65%. 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 ca. 1 t, 1,5–2 t und 2,5 t gebildet. Die vierte Lastvariante bildete der leere Laufwagen.

In jedem Spannfeld wurde zudem der Leerseildurchhang des Trage seils gemessen, dazu wurde der Laufwagen möglichst nahe an den Seilkrankippmast gefahren. Somit standen für jedes Spannfeld insgesamt fünf Lastkonfigurationen zur Verfügung (Leerseil, Laufwagen ohne Last und Laufwagen mit drei verschiedenen Lasten).

Mit jeder einzelnen Last wurde bis in die Mitte eines Spannfeldes gefahren und dann sowohl der Durchhang (Abbildung 2, Seite 34) als auch die Trage seilzugkraft (Abbildung 3, Seite 34) gemessen. Der Laufwagen wurde dabei nur durch das Zugseil in Position gehalten und wurde nicht am Trage seil geklemmt, um eine horizontale Kraftwirkung des Zugseils auf das Trage seil zu vermeiden. Schlussendlich standen 50 Lastfälle (fünf Lastkonfigurationen in zehn Spannfeldern) für die Auswertungen zur Verfügung.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich zwischen den berechneten Werten für den Durchhang nach den Methoden von Pestal und Zweifel

Spannfeld [Länge, Neigung]	Lastgewicht leicht=ca.2t schwer=ca. 3t	Durchhang in Spannfeldmitte [m]		
		Eigene Messung	Berechnung Methode Zweifel	Berechnung Methode Pestal
kurz [64m, 27%]	leicht	2.7	2.5	2.7
	schwer	3.6	3.6	4.2
mittel [175m, 24%]	leicht	7.2	7.6	9.6
	schwer	8.3	8.9	12.2
lang [356m, 25%]	leicht	11.7	12.2	16.5
	schwer	14.8	15.3	23.9

Tabelle 1: Durchhangmessungen und Vergleich mit den berechneten Werten für 3 unterschiedliche Spannfelder und 2 verschiedene Lastgewichte (Auszug aus der Messreihe).

WSL

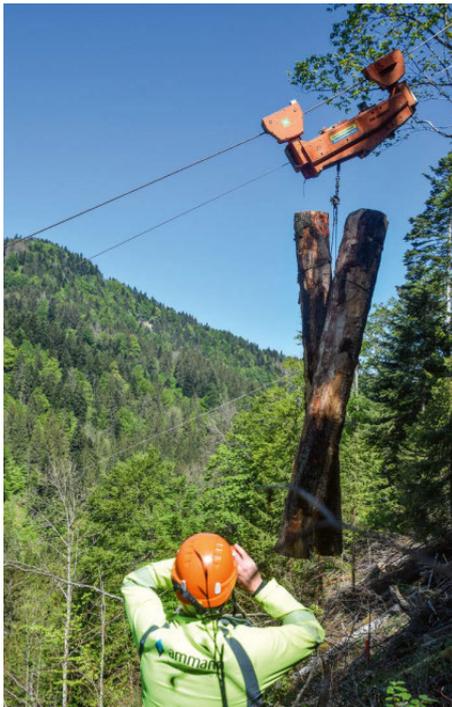


Abbildung 2: Messung des Durchhangs bei einer Lastkonfiguration mit zwei Trämeln in Spannfeldmitte

Laura Ramstein, WSL

sowie die entsprechenden Ergebnisse der Messungen in der Praxis. Über die gesamte Messreihe (hier nicht dargestellt) 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.

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% überschätzt, vor allem in den steilen Spannfeldern, jedoch nur um maximal 3,5% 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.

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.

Identifikation von Stützen- und Ankerbäumen mittels Fernerkundungsdaten

Ein weiterer Teil des einleitend erwähnten Projektes umfasste die Untersuchungen zur Nutzung neuer Fernerkundungsdaten für die Planung der Seillinienanlage und des Seillinienlayouts. Zum optimalen Anlegen von Seillinien im Gelände könnte es hilfreich sein, wenn mögliche Stützen- und Ankerbäume bereits vor dem Abstecken anhand von Luftbildern oder ähnlichen Grundlagen identifiziert werden könnten. Dazu wurden verschiedene Einzelbaum-Detektionsmethoden verglichen und die geeignetsten Methoden mit schweizweit verfügbaren Geodaten (LIDAR) getestet.

Mit der besten Methode konnten die meisten potenziellen Stützen- und Ankerbäume identifiziert werden. Jedoch ist die Genauigkeit noch nicht so gut, um die zeitintensiven Geländebegehungen stark zu reduzieren. Für einen schweizweiten Einsatz der Einzelbaumdetektion müssten genauere LIDAR-Daten mit einer höheren Punktdichte

vorhanden sein, oder die Methoden müssten abhängig von Merkmalen wie z.B. der Höhenlage, dem Mischungsgrad oder der Entwicklungsstufe verfeinert werden.

Wir beurteilen die heutige Genauigkeit der Einzelbaumidentifikation als noch ungenügend, um diese in den Optimierungsalgorithmus für eine automatische Lösungsfindung in Seilaplan zu integrieren. Abbildung 4 (Seite 35) zeigt jedoch, wie die Ergebnisse der Einzelbaumdetektion bereits heute mit der erstellten Schnittstelle manuell in den Planungsprozess eingebunden werden können.

Fazit

Das Zusammenführen der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse in einem Seillinienplanungstool hat gezeigt, dass die Berechnungsmethode nach Zweifel zu genaueren Voraussagen der Seildurchhänge und der Tragseilzugkräfte führt. Dank der Integration des Tools Seilaplan ins QGIS ist es möglich, verschiedene Fernerkundungsdaten und GIS-Layer zu nutzen. Die Ausgabe der wichtigsten Angaben zur Seillinie in grafischer Form und als Kurzbericht eignet sich für die Dokumentation des Seillinien-Projekts nach den neuen EKAS-Richtlinien sowie als Bauanleitung.

Eine Herausforderung und ein entsprechender Arbeitsaufwand bedeutete für die Forstpraxis bisher die Beschaffung der benötigten Geodaten, insbesondere wenn, wie im Falle der Forstunternehmer, in vielen verschiedenen Regionen gearbeitet wird. Da seit März 2021 fast alle Geodaten der Swisstopo frei verfügbar sind, darunter auch die hochaufgelösten Höhenmodelle, sind sie viel leichter zugänglich. Um die Integration



Abbildung 3: Ins Tragseil eingebaute Kraftmessdose zur Messung der Tragseilzugkräfte

Fritz Frutig, WSL

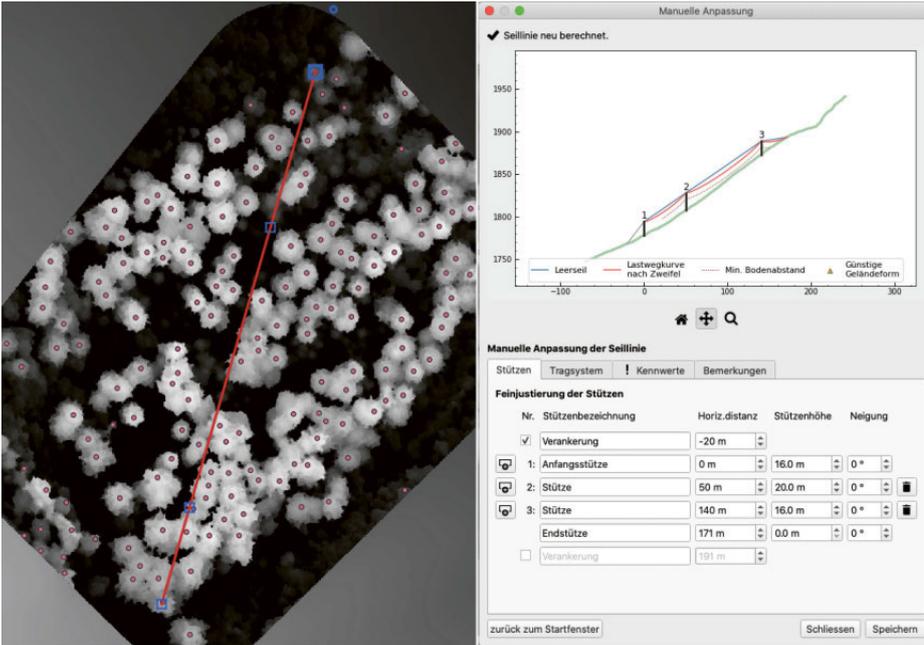


Abbildung 4: Manuelle Verwendung der Einzelbaumdetektion in Seilaplan. Links: Vegetationshöhenmodell mit identifizierten Einzelbäumen (orange Punkte). Die rote Linie zeigt den Verlauf der Seiltrasse mit den Stützen (blaue Quadrate). Rechts: Bearbeitungsfenster zur manuellen Seillinienplanung. Während der Feinjustierung einer Stützenposition im Bearbeitungsfenster (rechts) sieht man gleichzeitig die Position der Stütze in der Geodatenansicht (links). Damit lässt sich eine Stütze so setzen, dass sie sich mit der Position eines potenziellen Stützenbaumes deckt.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass weitere Forschungsarbeiten zu statischen und dynamischen Kräften im Seilsystem und zur Ermittlung von Informationen zu potenziellen Stützenbäumen aus Fernerkundungsdaten notwendig sind, um die Seillinienplanung noch besser zu unterstützen und zu optimieren.

Download

Eine Installationsanleitung sowie eine technische Dokumentation des QGIS-Plug-in Seilaplan kann auf <http://pimoll.github.io/SEILAPLAN/> gefunden werden. Seilaplan funktioniert auf QGIS-Versionen ab 3.6 und kann in vier Sprachen (de, fr, it, en) bedient werden.

VERWENDETE GRUNDLAGEN

Pestal, E. [1961]: Seilbahnen und Seilkrane für Holz- und Materialtransport. Georg Fromme, Wien und München. 511 S.

Zweifel, O. [1960]: Seilbahnberechnung bei beidseitig verankerten Tragseilen. Schweizerische Bauzeitung, Vol. 78, Heft 1: 1-4 und Heft 2: 15-20.

von Swisstopo-Geodaten für die Seillinienplanung weiter zu vereinfachen, wurde ein weiteres QGIS-Plug-in, der «SwissGeoDownloader», entwickelt, welches im offiziellen QGIS-Repository heruntergeladen werden kann. Ein digitales Höhenmodell ist jedoch

nicht Voraussetzung für die Anwendung von Seilaplan, das Längenprofil kann alternativ auch aus Feldaufnahme-Daten erstellt werden. Die Längenprofil-Daten müssen als *.csv-Tabelle vorliegen und können so in Seilaplan eingelesen werden.

Wir danken den beiden beteiligten Forstunternehmen Nüesch und Ammann AG sowie Abächerli AG für ihr engagiertes Mitwirken bei der Durchführung der Messfahrten sowie ihre wertvollen Anregungen zur Verbesserung auch der Benutzerführung von Seilaplan. Unser Dank gilt der WHFF-CH und der ETHZ, welche das Forschungsprojekt mitfinanziert haben.

Partnerschaftlich.

Unser Qualitätsprodukt – die Fensterkante! – stellt hohe Anforderungen an uns und das Rundholz. Wir freuen uns auf eine partnerschaftliche Zusammenarbeit und auf Ihr Qualitätsrundholz.



sägerei trachsel ag **SCHWEIZER HOLZ**