

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	98 (2000)
Heft:	7
Artikel:	GPS am Seil herunterlassen : das Global Positioning System im Dienste des Seilbahnwesens
Autor:	Kistler, M. / Geiger, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-235662

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

GPS am Seil herunterlassen:

Das Global Positioning System im Dienste des Seilbahnwesens

GPS-Messungen ermöglichen in erster Linie genaue Positionsbestimmungen. Daneben können aber auch noch eine Vielzahl anderer Informationen abgeleitet werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Geodesy and Geodynamic Lab (GGL) und des Instituts für Kartographie der ETH Zürich wurde untersucht, inwieweit sich GPS für die Aufzeichnung von Schwingungen eignet. Während einiger Tagen wurde die Position einer Luftseilbahn auf der Basis von differentiellen GPS-Phasenmessungen mit einer Aufzeichnungsrate von vier Hertz registriert. Es gelang, das Verhalten der Kabine während eines Nothaltes aufzuzeichnen und die Pendelbewegung in einer 3D-Computeranimation darzustellen. Mittels einer Frequenzanalyse konnten die charakteristischen Eigenfrequenzen des Zug- und des Tragseils ermittelt werden. Für das Seilbahnwesen wurden verschiedene Anwendungen entwickelt, welche es erlauben, eine Anlage unter unterschiedlichen Aspekten zu analysieren: Neben den auftretenden Beschleunigungen und Geschwindigkeiten kann der Durchhang des Tragseiles bei verschiedenen Lasten, die sogenannte Lastwegkurve, analysiert und modelliert werden. Letzteres ist insbesondere in steilem Gelände mit konventionellen Mitteln beinahe unmöglich. Auch kann der Abstand über Boden über die ganze Strecke für die Ausarbeitung von Rettungsplänen berechnet werden.

Les mesures GPS permettent en premier lieu une définition précise de la position. A côté de cela, de nombreuses informations peuvent être dérivées des mesures originales. Dans le cadre d'un travail de diplôme au GGL (Geodesy and Geodynamics Lab) et à l'Institut de cartographie de l'EPF de Zurich, une étude a été menée afin de déterminer jusqu'à quel point le GPS se prêtait à la mesure des balancements d'une cabine de téléphérique. Durant quelques jours, la position de cette cabine a été mesurée sur la base d'observations GPS différentielles de la phase, utilisant une fréquence de mesure de 4 Hz. Cela a permis la détermination du comportement de la cabine lors d'un arrêt d'urgence ainsi que la modélisation tri-dimensionnelle numérique du mouvement pendulaire qui s'ensuit. L'analyse des oscillations des câbles porteur et tracteur a aussi permis la détermination des fréquences propres de ces derniers. Plusieurs applications spécifiques au transport par câble ont été développées, permettant l'analyse d'une installation sous différents aspects. En plus des accélérations et vitesses, il est possible de modéliser et d'analyser la distance à la corde du câble porteur en fonction des charges utiles, ce qui, dans un terrain accidenté, est presque impossible par des moyens conventionnels. En combinaison avec un modèle numérique de terrain, il est aussi possible de déterminer la hauteur de la cabine par rapport au sol en fonction de la position du véhicule. Cette information est extrêmement précieuse lors de la planification des procédures de secours.

Oltre ad una precisa determinazione della posizione, le misure GPS forniscono una vasta gamma di ulteriori informazioni. In un lavoro di diploma svolto presso il Politecnico federale di Zurigo, in collaborazione tra il laboratorio di geodesia e geodinamica e l'istituto di cartografia, si è analizzato fino a che punto il GPS si addice alla registrazione di oscillazioni. Tramite misurazioni GPS differenziali della fase e con una frequenza di registrazione dei dati di quattro Hertz si è determinata, durante alcuni giorni, la posizione di una funivia. È stato possibile registrare il comportamento della cabina durante una fermata d'emergenza e simularne poi il movimento oscillatorio in una animazione 3D su computer. Inoltre si è riusciti, tramite l'analisi dettagliata delle

M. Kistler, A. Geiger

Messverfahren

Während vier Tagen wurden die Positionen einer Kabine der Luftseilbahn Adliswil-Felsenegg mit drei GPS-Empfängern permanent aufgezeichnet. Mittels einer Station des AGNES-Netzes¹ sowie einer lokalen Referenzstation wurde zuerst die Position der Antenne auf dem Laufwerk bestimmt. Dieser Sensor diente dann selber als (dynamische) Referenzstation für die Berechnung der anderen beiden Antennenpositionen auf dem Dach der Kabine (Abb. 1). Die kurzen Basislinien sowie über das Internet bezogene präzise Ephemeriden erlaubten trotz der teilweise sehr kurzen Messzeit (reguläre Fahrt 5 Minuten) eine genauest möglich Positionierung. Für die Analyse der Lage der Kabine im Raum werden drei Antennen benötigt. Hingegen hätten für die Aufzeichnung des Schwingungsverhaltens des Trag-, respektive Zugseils ein GPS-Empfänger auf dem Laufwerk ausgereicht. Alle Messungen wurden im Postprocessing Modus ausgewertet [2]. Es musste bei der Verarbeitung der Daten darauf geachtet werden, dass jede Fahrt einzeln ausgewertet wird, da die Verbindungen zu den Satelliten in den Stationen teilweise unterbrochen und durch Multipath verfälscht wurden.

Datenauswertung

Die einzelnen Berechnungen erforderten das Arbeiten mit verschiedenen Koordinatensystemen: Vom GPS-Datum «WGS84» wurden die Messungen über Landeskoordinaten in ein lokales System mit der x-Achse in Fahrrichtung umgerechnet. Damit die Aufzeichnungen mit den Anlagedaten übereinstimmten, musste zusätzlich zur Berücksichtigung der Geoidundulation noch die Projektionskorrektur rückgängig gemacht werden. Die Computeranimationen wiederum entstanden wegen der Kombination mit dem Digitalen Geländemodell DHM25 und VECTOR25 des Bundesam-

oscillazioni, a determinare con precisione le frequenze caratteristiche proprie della fune trainante e della fune portante. Sono poi state sviluppate diverse applicazioni in questo ambito, che permettono di analizzare diversi aspetti di un impianto. Per mezzo di queste applicazioni è possibile analizzare la velocità e le accelerazioni così come creare dei modelli per la fune portante sotto l'influsso di carichi diversi, determinandone la distanza dalla corda. Quest'ultimo aspetto è quasi irrealizzabile con i metodi tradizionali, soprattutto in zone con forti pendenze. Inoltre è possibile calcolare, lungo tutto il tracciato, l'altezza della cabina rispetto al suolo, permettendo così un pianificazione ottimale delle operazioni di salvataggio in caso d'incidenti.

tes für Landestopographie in Landeskoordinaten.

Der Überprüfung der Genauigkeit dienen, neben den Auswerteprotokollen und Fehlerrechnungen, die Distanz zwischen den einzelnen Antennen. Unter der Voraussetzung, dass sich die Gondel wie ein starrer Körper verhält und die Position der Antenne auf dem Laufwerk richtig ins

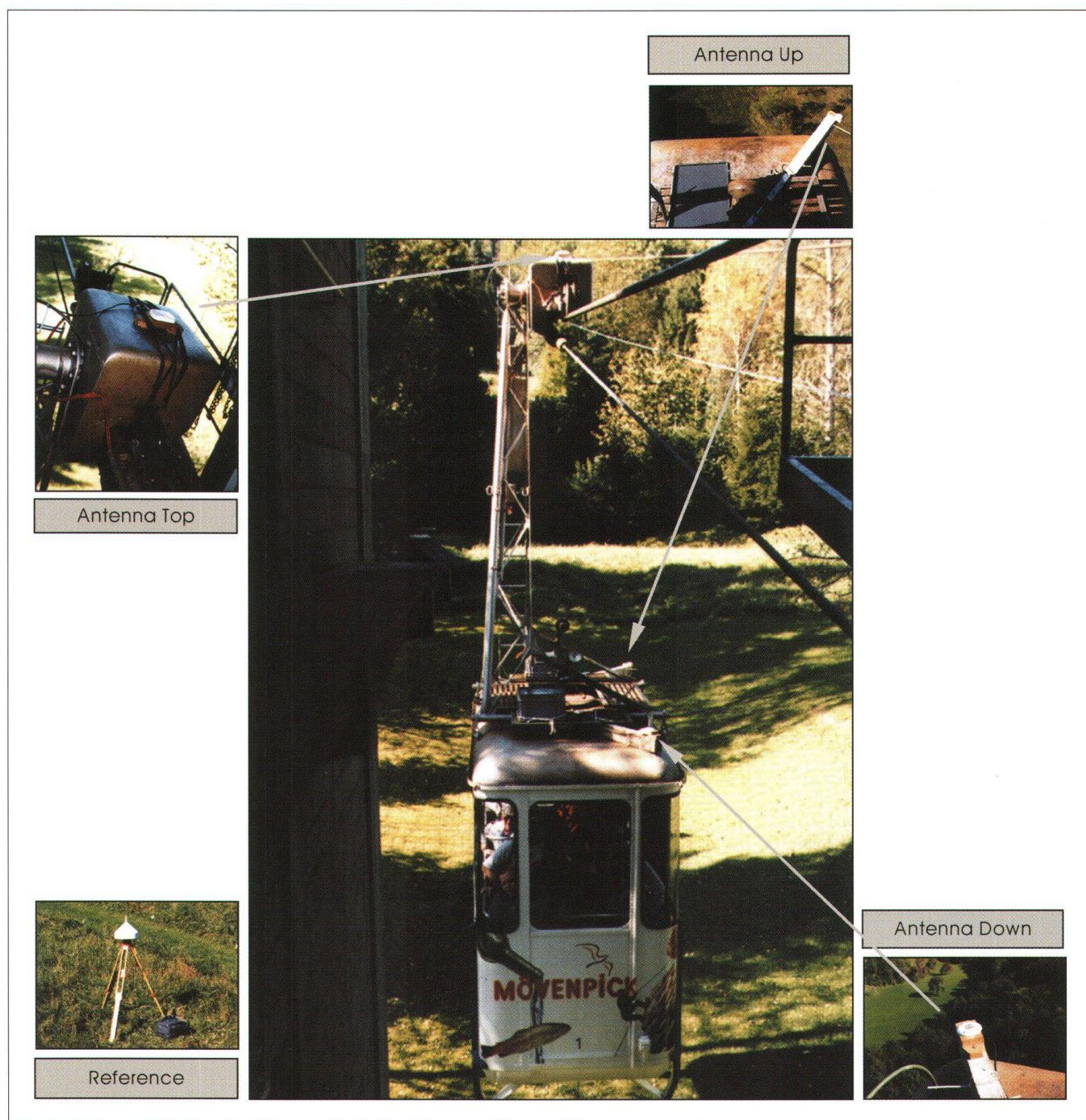


Abb. 1: GPS-Ausrüstung auf der Kabine.

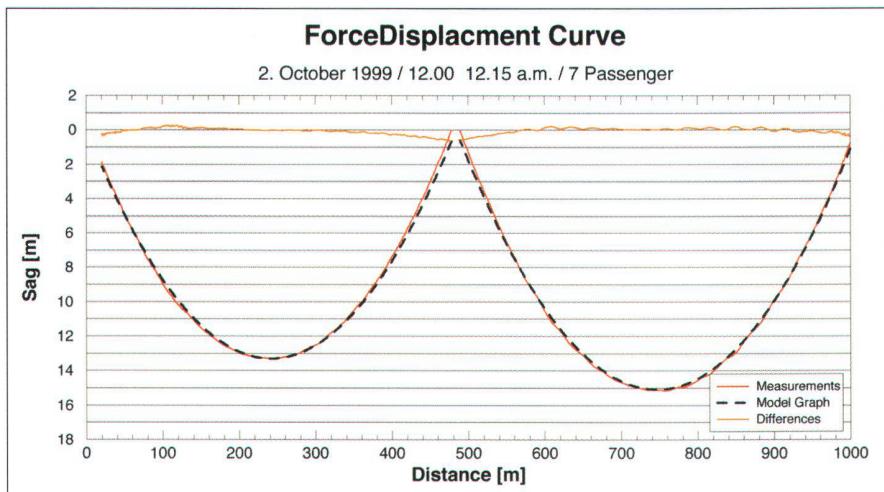


Abb. 2: Lastwegkurve. Die Modellkurve (schwarz gestrichelt) wurde mit den Sollparametern der Anlage berechnet. Die Differenzen (gelb) zeigen gegen die Auflagepunkte hin systematische Abweichungen der Messungen (rot) vom Modell. Dies ist vornehmlich durch die Modell-Näherung (kubische Parabel) bedingt.

Drehzentrum reduziert wurde, bleiben diese konstant. Während einer regulären Fahrt konnte die Position der Kabine mit einer Genauigkeit von ungefähr 1 cm bestimmt werden. Nach einem Nothalt verschlechterte sich diese Genauigkeit allerdings aufgrund der starken Schwingungen zeitweise auf über 5 cm.

Lastwegkurve

GPS-Messungen dreier Tage wurden für die Überprüfung des funktionalen Modells der Lastwegkurve, des Durchhangs bei verschiedenen Belastungen, verwendet. Die Lastwegkurve ist wesentlich für die Auslegung von Seilbahnen. Sie muss

mit der geplanten Streckenführung dem natürlichen Gelände angepasst werden, und aus ihr werden wichtige Erkenntnisse für die Dimensionierung der Auflagen an den Stützen gewonnen [1]. In zweiter Näherung lässt sich die Kurve durch eine kubische Parabel mit acht Parametern beschreiben (siehe Abb. 2). An Hand der gemessenen Lastwegkurven können diese Parameter bestimmt und mit den Modellgrößen verglichen werden.

Die Ausgleichung wurde so programmiert, dass jeder Parameter einzeln gezwängt oder frei mit individueller Gewichtung definiert werden konnte. Wie sich zeigte, sind die einzelnen Unbekannten stark korreliert, so dass nicht al-

le gleichzeitig geschätzt werden können. Es müssen mindestens vier Variablen bekannt sein, damit die Parameterschätzung noch zuverlässige Resultate liefert. Dennoch können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, wie zum Beispiel der Betrag der horizontalen Seilkraft.

Schwingungsverhalten

Bei der Untersuchung des Verhaltens einer Luftseilbahn bei einem Nothalt gilt es zu beachten, dass einerseits am Laufwerk Schwingungen auftreten, und andererseits die Kabine selber hin und her pendelt. Seilschwingungsprobleme beinhalten komplexe Fragestellungen, für die es teilweise analytische Lösungen gibt. Bei der Beschreibung des Schwingungsverhaltens einer Seilbahn hingegen müssen so viele Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, dass eine geschlossene analytische Lösung nicht mehr möglich ist [4]. Die durch Trag- und Zugseil verursachten Schwingungen am Laufwerk wurden direkt aus den GPS-Messungen eines Empfängers, dessen Position auf die Höhe des Tragseiles reduziert wurde, gewonnen (siehe Abb. 3).

Für die Aufzeichnung der Lage im Raum (Attitude) wurden die Messungen dreier GPS-Empfänger ausgewertet. Mittels einer dreidimensionalen Helmerttransformation (Translation, Rotationen, Massstab) wird die aktuelle Lage der Kabine in Bezug zu einer vorgängig eingemessenen Ruhelage der Kabine bestimmt. Die drei Rotationswinkel entsprechen den Pendel-

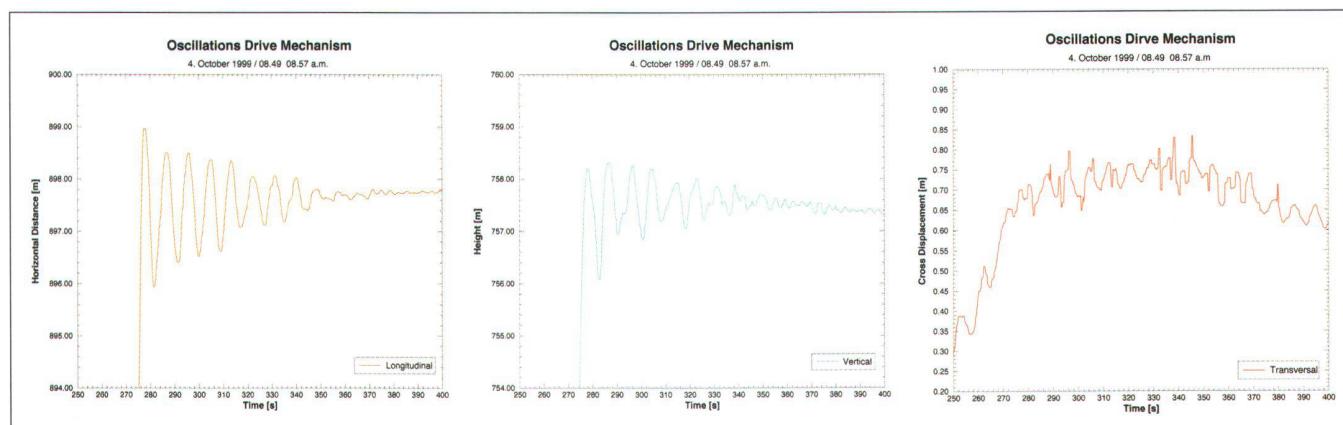


Abb. 3 a,b,c: Längs-, Höhen- und Querschwingungen des Laufwerkese bei einem Nothalt.

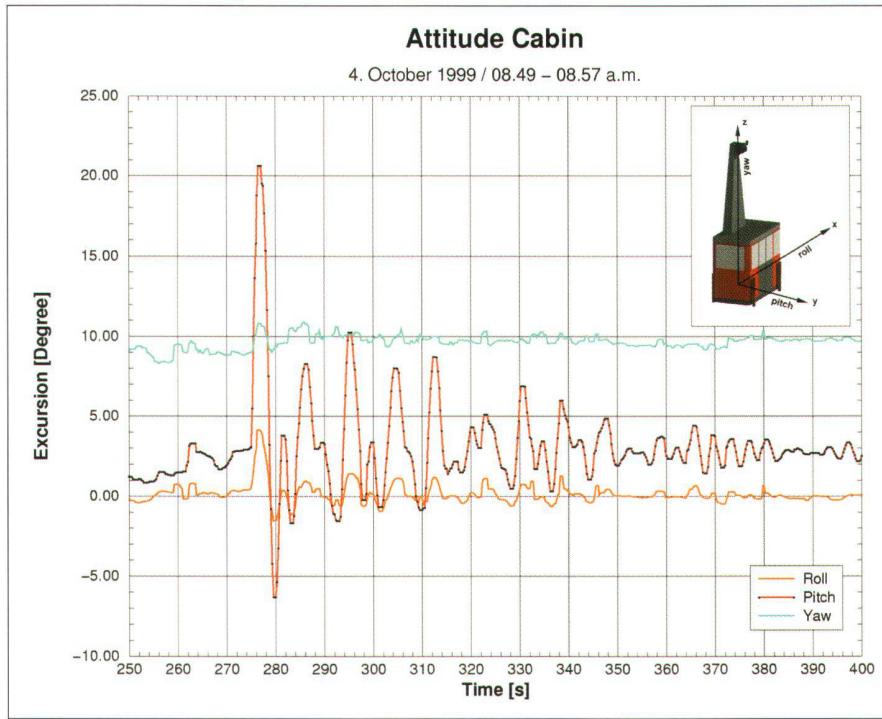


Abb. 4: Pendelbewegungen der Kabine beim Nothalt (der Halt erfolgte etwa zum Zeitpunkt $t = 275$ s).

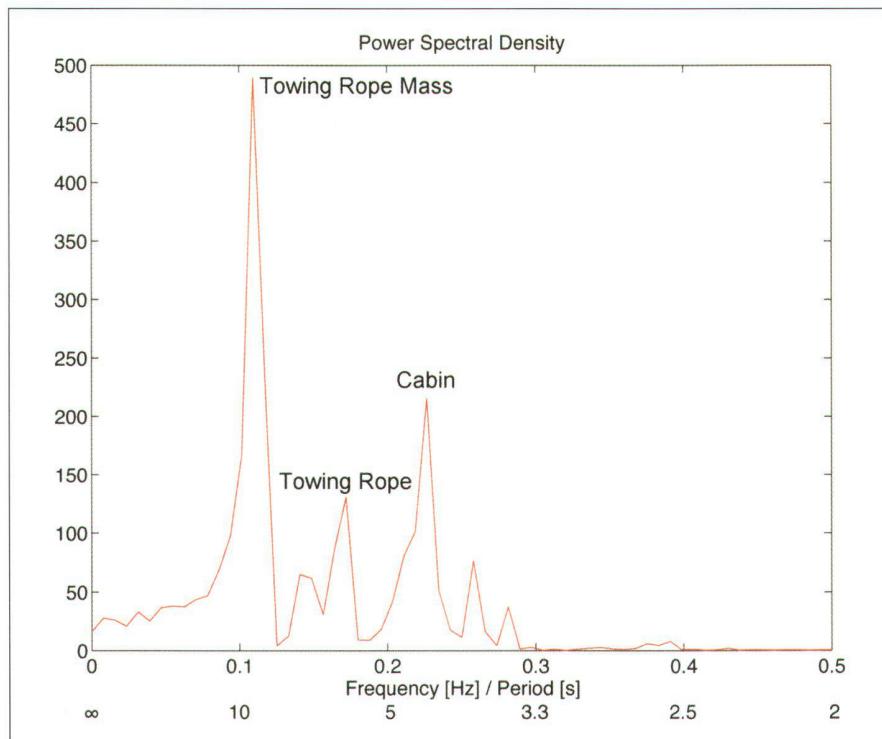


Abb. 5: Frequenzspektrum der Schwingungen des Laufwerkes beim Nothalt: Der stärkste Ausschlag mit einer Periodendauer von 9.1 Sekunden wird durch die bewegliche Spannmasse des Zugseils verursacht. Die Schwingung mit einer Frequenz von 0.17 Hertz wird vermutlich durch das Zugseil selber angeregt. Die Periode der Längspendelung der Kabine beträgt 4.4 Sekunden.

ausschlägen um die Hochachse (yaw), quer zur Fahrtrichtung (roll) und längs der Fahrtrichtung (pitch). Die ermittelten Auslenkungen wurden teilweise durch einen lokalen Medianfilter leicht geglättet. Für einen Nothalt ergab sich folgendes Schwingungsverhalten der Kabine (siehe Abb. 4).

Frequenzanalyse

Mittels einer Spektralanalyse können die Frequenzen der einzelnen Schwingungsanteile eruiert werden. Zu diesem Zwecke wurde während dem Bremsmanöver die Längspendelung als Funktion der Zeit ausgewertet. Beim Nothalt konnte auf diese Weise longitudinal eine Überlagerung von drei starken und drei schwächeren Schwingungen nachgewiesen werden (siehe Abb. 5).

Geschwindigkeit und Beschleunigung

Mittels einer lokalen Polynomregression wurden aus den GPS-Messungen die Geschwindigkeits- und Beschleunigungs komponenten sowie die horizontale Lauf distanz abgeleitet. Ein Vergleich mit der bei der Antriebsscheibe in der Talstation registrierten Geschwindigkeit bestätigte die berechneten Werte (siehe Abb. 6).

Profil und Bodenabstand

Für die Erarbeitung eines Bergungsplanes ist für den Betreiber der Luftseilbahn der Abstand zwischen Kabine und Boden von Interesse. Mit dem Digitalen Höhenmodell DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie kann ein Längsschnitt entlang der Fahrstrecke erstellt und daraus der Bodenabstand ermittelt werden. Die Auswertung der Lastwegkurve ergab für die rote Kurve eine Last von 210 kg. Aus der Fahrgastzählung (Frequenzrap port) der Luftseilbahn Adliswil-Felsenegg wurde für den blauen Graph eine Last von einer Person entnommen (siehe Abb. 7).

Computeranimationen

Da bei einem Nothalt eine Vielzahl überlagerter Schwingungen auftreten und die Pendelbewegung der Kabine mitunter nicht mehr einfach so nachvollzogen wer-

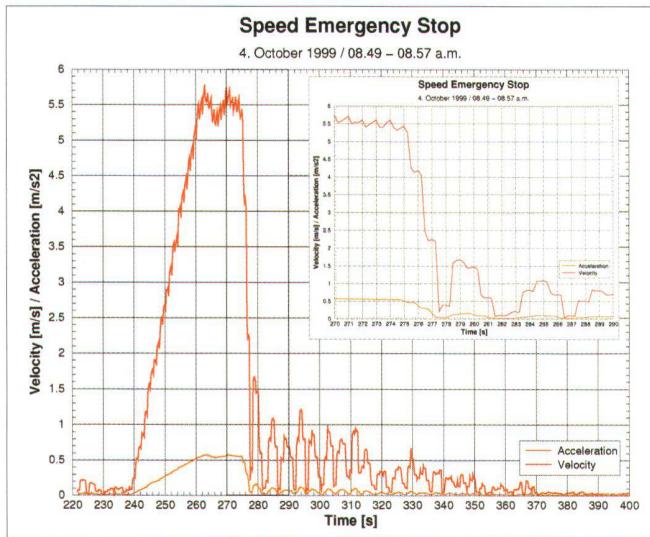


Abb. 6: Geschwindigkeitsprofil beim Nothalt (Ausschnitt mit höherer Zeitauflösung um den Zeitpunkt des Bremsvorgangs zentriert).

den kann, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kartographie der ETHZ eine Computeranimation realisiert. In diesem Film werden die ersten 45 s nach einem Notstopp, während dem die Kabine in 2.5 s von 6 m/s auf 0 m/s abgebremst wird, visualisiert. Daneben wurde auch noch eine virtuelle Berg- und Talfahrt in 3D mit den heute zur Verfügung stehenden digitalen Grundlagedaten des Bundesamtes für Landestopographie (Pixelkarte, VECTOR25 und digitales Höhenmodell) realisiert. Der aus den GPS-Messungen abgeleitete Film mit dem Nothalt ist auf dem Internet unter www.ggl.baug.ethz.ch/research/ abrufbar.

Schlussfolgerungen und Perspektiven

Mit dem heute zur Verfügung stehenden Instrumentarium ist es bei optimalen Bedingungen möglich, mit GPS Schwingungen aufzuzeichnen. Die Anwendung von Filtern kann zusätzlich noch eine Verbesserung der Resultate bewirken. Bei kürzeren Überwachungszeiten (Beobachtungsdauer kleiner als 10–15 Minuten) ist eine «Initialisierungsphase», während der die Satellitensignale einwandfrei empfangen werden können, vorteilhaft. Bisher wurde GPS im Seilbahnwesen ne-

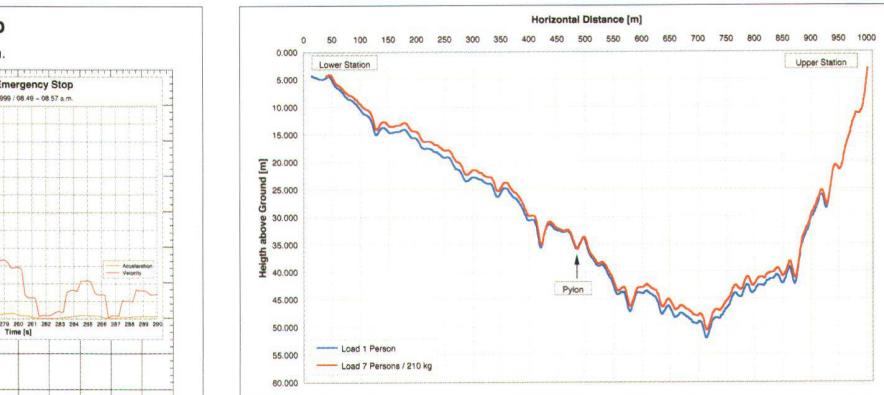


Abb. 7: Bodenabstand Luftseilbahn Adliswil-Felsenegg.

ben wenigen kinematischen Versuchen vor allem für statische Messungen, z.B. Überwachung von Stützen in Rutschgebieten, eingesetzt [3]. Kinematische Messungen geben jedoch dem Seilbahnhfachmann ein Instrument in die Hand, mit dem er verschiedene Auswertungen vornehmen kann: Bei Nothalten können die Beschleunigungen, die Veränderung des Durchhanges, die Pendelbewegung der Kabine und die auftretenden Schwingungen analysiert werden. Bei Wind kann die Querpendelung der Kabine aufgezeichnet werden. Die Auswertung der Lastwegkurve erlaubt eine Modellierung des Durchhanges unter verschiedenen Lasten. Im praktischen Einsatz ist darauf zu achten, dass die beiden Antennen auf dem Kabinendach wegen der Abdeckung durch die Aufhängung so weit als möglich abgesetzt werden. Die Kombination von GPS und Inertialsystem würde das Verfahren noch universeller einsetzbar machen.

Anmerkung:

¹ Das Bundesamt für Landestopographie in Bern plant die Verbreitung von GPS-Phasenmessungen in Echtzeit ab Spätsommer 2000. Das Projekt «AGNES» (Automatisches GPS Netz Schweiz) steht zur Zeit in der Pilotphase mit ungefähr zehn in Betrieb stehenden Stationen. Eine davon befindet sich auf dem

Dach des Geodesy and Geodynamics Lab der ETH Zürich.

Referenzen:

- Der vollständige technische Bericht kann unter www.karto.ethz.ch/teaching/students-work.html abgerufen werden.
- [1] Bötcher, S.; Winkler G. (1991): Zur experimentellen Lastwegkurvenbestimmung an Seilschwebebahnen, Internationale Seilbahnpraxis SR 5/1991.
- [2] Cocard, M. (1995): High Precision GPS Processing in kinematic Mode, Schweizerische Geodätische Kommission.
- [3] Schärli, M. (1999): Überwachung von Bahntrassen, Vereinigung technisches Kader, Information 109/99.
- [4] Winkler, G. (1993): Rechenmodell zur Simulation der Statik und Dynamik von Tragseilen bei Grosskabinen-Seilschwebebahnen, Dissertation Lehrstuhl für Förderwerken, Technische Universität München.

Dr. Alain Geiger
Geodesy and Geodynamics Lab
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich
e-mail: geiger@geod.baug.ethz.ch

Dipl. Ing. Matthias Kistler
Bundesamt für Landestopographie
Bereich Geodäsie
CH-3084 Wabern
e-mail: matthias.kistler@lt.admin.ch