

Genauigkeitsuntersuchung eines GNSS-Monitoringsystems für das Geomonitoring am Hochvogel

Accuracy Investigations on a GNSS-based Monitoring System for the Geomonitoring Application on Mt. Hochvogel

Lukas Raffl, René Schnider, Christoph Holst

In diesem Beitrag wird ein innovatives GNSS-basiertes Monitoringsystem vorgestellt und dessen erreichbare Genauigkeit anhand verschiedener Messreihen evaluiert. Das Permanentsystem „Happy Monitoring“ der gleichnamigen Schweizer Firma basiert auf der kontinuierlichen Messung von RTK-Koordinaten, die mittels eines adaptiven Glättungsalgorithmus in Echtzeit zu einer verbesserten Lösung vereint werden. Für jeden Rover werden dabei innerhalb eines wählbaren Zeitfensters RTK-Koordinaten anhand eines sog. Fingerprints in einem statistischen Verfahren gefiltert und die verbleibenden Messungen zu einer präzisen Lösung gemittelt. Wir zeigen mithilfe mehrerer Messreihen, dass die Genauigkeit im Vergleich zur RTK-Einzelpunktgenauigkeit dadurch deutlich gesteigert werden kann. Untersucht werden jeweils in Abhängigkeit von der Länge der Basislinie und des Lösungsintervalls (a) die relative Messgenauigkeit einer bekannten Deformation sowie (b) die absolute Messgenauigkeit der Strecke zwischen zwei Rovern. Mittels eines Kreuzschlittens erzeugte Bewegungen konnten bei einer Basislinie von 1 km und einem Lösungsintervall von 24 h mit einer Genauigkeit von 0,5 mm in der Lage und 1 mm in der Höhe detektiert werden. Auf einer Eichstrecke, ebenfalls bei einer Basislinienlänge von 1 km, konnte die Strecke zwischen zwei Rovern mit einer Abweichung in der Lage von lediglich $0,1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ zur Sollstrecke bestimmt werden. Schlussendlich zeigen wir anhand erster Messdaten vom Gipfel des Hochvogels (2 592 m), dass das System auch unter schweren Bedingungen präzise Ergebnisse liefert.

Schlüsselwörter: RTK-GNSS, Permanentsystem, Echtzeit, Zeitreihe, Glättungsalgorithmus

This paper presents an innovative GNSS-based monitoring system and evaluates its achievable accuracy by carrying out different measurement series. The monitoring system “Happy Monitoring” from the eponymous Swiss company continuously measures RTK coordinates that are combined to a more precise solution using a real time smoothing algorithm. Thereby, within a specific time interval, RTK coordinates are filtered in a statistical procedure using a so-called fingerprint. The remaining measurements are then averaged to a more precise solution. Based on the results of several measurement series, we show that the accuracy can be considerably increased compared to the RTK single point accuracy. Investigated is (a) the relative measurement accuracy of a known deformation and (b) the absolute measurement accuracy of the distance between two rovers, each depending on the length of the baseline and the solution interval. With a baseline of 1 km and a solution interval of 24 h, movements created using a compound slide could be detected with an accuracy of 0.5 mm in the horizontal position and 1 mm in height. On a calibration track, also with a baseline length of 1 km, the distance between two rovers could be determined with a

horizontal deviation of only $0.1 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ from the nominal distance. Finally, we show that the system provides precise results even under difficult conditions analyzing the first measurements from the summit of Mt. Hochvogel (2592 m), where the system is already in use.

Keywords: RTK-GNSS, permanent system, real time, time series, smoothing algorithm

1 EINLEITUNG

Geomonitoring im hochalpinen Bereich hat spezielle Anforderungen an das verwendete Instrumentarium, insbesondere an die Wetterunabhängigkeit, einen niedrigen Energieverbrauch sowie einen geringen Wartungs- und Konfigurationsaufwand. Die wesentlichen Voraussetzungen können durch die Verwendung von GNSS-Sensoren (Global Navigation Satellite System) erfüllt werden. Mit geodätischen Empfängern und relativen Positionierungsverfahren können auftretende Positionsänderungen von bereits wenigen Millimetern bestimmt werden. GNSS zählt damit zu den etablierten Messverfahren im Bereich des Geomonitorings und findet häufig Anwendung bei der Überwachung von Hangbewegungen (siehe z.B. /Gili et al. 2000/, /Pfeiffer et al. 2018/). Ein weiterer Vorteil bei Messungen im Gebirge ist, dass keine direkte Sichtverbindung zwischen den Messpunkten erforderlich ist. Dies ermöglicht die Realisierung großer, raumübergreifender Überwachungsnetze, welche eine geologisch stabile Lagerung gewährleisten.

Aufgrund der einfachen Automatisierung des Messprozesses und des geringen Wartungsaufwands ist zudem eine kontinuierliche Überwachung möglich /Stempfhuber & Alberding 2012/. Dadurch wird – im Unterschied zu periodisch durchgeführten Messkampagnen – eine Echtzeit-Überwachung mit einer hohen zeitlichen Auflösung realisierbar. Allerdings sind dafür zusätzlich eine gesicherte Stromversorgung sowie eine stabile Datenverbindung zur Übertragung der Messdaten in Echtzeit erforderlich. Sowohl bei der periodischen als auch bei der kontinuierlichen Überwachung kommt bei der Auswertung üblicherweise die klassische Basislinienprozessierung auf Grundlage von aufgezeichneten GNSS-Rohdaten zum Einsatz /Kahmen 2005/. Für Permanentssysteme bedingt dies eine hohe zu übertragende Datenmenge, die insbesondere im Hochgebirge eine Herausforderung darstellt.

Als Permanentstationen kommen neben geodätischen Mehrfrequenzempfängern häufig auch Einfrequenzempfänger zum Einsatz /Glabsch et al. 2009/, /Limpach et al. 2016/, /Notti et al. 2020/. Diese sind eine kostengünstige Alternative für Überwachungsaufgaben mit geringeren Genauigkeitsanforderungen. Typischerweise werden durch die Basislinienauswertung der Rohdaten über einen längeren Zeitraum (z.B. 15 min /Glabsch et al. 2009/ oder 24 h /Limpach et al. 2016/, /Notti et al. 2020/) Genauigkeiten im cm-Bereich bzw. im Bereich weniger Millimeter erzielt. Bekanntermaßen nimmt die Unsicherheit der Basislinie bei zunehmendem Abstand der beiden Empfänger zu, da die Störeinflüsse weniger stark korrelieren und durch die Differenzbildung nicht vollständig eliminiert werden /Teunissen & Montenbruck 2017/. Insbesondere gilt dies für Einfrequenzempfänger, bei denen weniger Linearkombinationen gebildet werden können. Für höchste Genauigkeitsanforderungen im Millimeterbereich sollten folglich Mehrfrequenzempfänger zum Einsatz kommen.

Die Bergzerreißung am Hochvogel stellt eine ambitionierte geodätische Überwachungsaufgabe mit höchsten Genauigkeitsanforderungen dar. Hier wird ein echtzeitfähiges GNSS-Monitoringsystem der Schweizer Firma „Happy Monitoring“ erprobt /Schnider 2021/. Das gleichnamige System basiert nicht auf der konventionellen Basislinienauswertung auf Grundlage von GNSS-Rohdaten im Post-processing, sondern auf der Verwendung reiner Koordinaten, welche über das RTK-Verfahren (Real Time Kinematik) mit eigener Basisstation gemessen werden. Dadurch müssen nicht permanent Rohdaten aufgezeichnet und übertragen werden. Um dennoch Deformationen detektieren zu können, die deutlich kleiner sind als die erwartete RTK-Messgenauigkeit, beinhaltet das System einen Glättungsalgorithmus, der alle Messungen innerhalb eines spezifizierten Auswertzeitraums filtert, gewichtet und zu einer Lösung mittelt. Dabei passt sich der Algorithmus adaptiv an die Messsituation an, um auch über einen langen Zeitraum eine bestmögliche Filterung zu gewährleisten.

Obwohl ein Glättungsfilter ein probates Mittel zur Reduktion des Messrauschens ist, ist unklar, welche Genauigkeit mit dem hier vorgestellten System tatsächlich erreicht werden kann. Das System wurde speziell für die Langzeitüberwachung von kontinuierlichen Prozessen mit geringen Änderungsraten entwickelt, bei denen eine zeitliche Glättung unkritisch ist. Vor der Installation des Monitoring-systems auf dem Gipfel des Hochvogels wurde eine Genauigkeitsuntersuchung durchgeführt. In drei Versuchen wurde in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Referenzstation und Rover sowie der Länge des Auswertfensters Folgendes untersucht:

- die Koordinatenpräzision eines statischen Rovers,
- die absolute Genauigkeit der Distanz zwischen zwei Rovern und
- die Messgenauigkeit von Deformationen.

In der vorliegenden Studie werden das genannte System und die Ergebnisse vorgestellt. Anhand der Versuchsergebnisse wird gezeigt:

- Der adaptive Glättungsalgorithmus filtert Ungenauigkeiten innerhalb der GNSS-Zeitreihe zuverlässig.
- Durch die Filterung können Deformationen im Millimeterbereich aufgedeckt werden.
- Das System kommt auch unter den extremen Bedingungen am Hochvogel zurecht.

Dazu wird in Abschnitt 2 zunächst das Funktionsprinzip des Happy-Monitoring-Systems vorgestellt. Hierbei wird zu Beginn das RTK-Verfahren rekapituliert und aufgezeigt, welche Messgenauigkeiten typischerweise erreicht werden können. Anschließend werden die Systemkomponenten und der implementierte Glättungsalgorithmus beschrieben. In Abschnitt 3 werden die durchgeführten Versuche zur Genauigkeitsuntersuchung vorgestellt und deren Ergebnisse zusammengefasst. In Abschnitt 4 werden erste Ergebnisse der Messungen

am Hochvogel gezeigt, bevor Abschnitt 5 mit einem Fazit und Ausblick schließt.

2 HAPPY-MONITORING-SYSTEM

2.1 Real-Time-Kinematik-(RTK)-GNSS

Bei RTK-GNSS handelt es sich um ein relatives GNSS-Positionierungsverfahren, das auf Trägerphasenmessungen basiert. Ziel ist es dabei, Störeinflüsse auf die Positionierung weitgehend zu eliminieren bzw. zu reduzieren. Den größten Einfluss auf die Unsicherheit der Positionsbestimmung mit GNSS haben typischerweise Satellitenuhrabweichungen, Bahnabweichungen, atmosphärische Einflüsse, wie ionosphärische und troposphärische Signalverzögerung, Mehrwegeeffekte (Multipath) und Messrauschen /Teunissen & Montenbruck 2017/. Atmosphärische Einflüsse sowie Uhr- und Bahnabweichungen wirken sich innerhalb eines lokalen Gebiets (10–20 km) sehr ähnlich auf die Positionsbestimmung aus. Bei der gleichzeitigen Messung mit zwei GNSS-Empfängern kann folglich angenommen werden, dass beide gemessenen Positionen dem gleichen Einfluss unterliegen, sofern diese eine kurze Basislinie aufspannen (< 20 km). Relative Positionierungsverfahren machen sich diese Eigenschaft zunutze, indem die Messung auf einem bekannten Punkt (Referenzstation) zur Verbesserung der Messung auf einem unbekannten Punkt (Roverstation) verwendet wird. Tatsächlich verringert sich die Korrelation der Störeinflüsse bei zunehmendem Stationsabstand, sodass die Positionierungsgenauigkeit mit zunehmender Länge der Basislinie abnimmt /Kahmen 2005/.

Bei RTK-GNSS ist dies so realisiert, dass Korrekturdaten, die sich aus der Abweichung zwischen gemessener und bekannter Position berechnen, von der Referenzstation an die Roverstation gesendet und dort in Echtzeit an die Messungen angebracht werden. Dafür wird ein Kommunikationslink zwischen den beiden Empfängern benötigt. Mit diesem Verfahren wird ein Großteil der oben genannten Störeinflüsse eliminiert bzw. reduziert, nicht allerdings Mehrwegeeffekte und Messrauschen. Während das Messrauschen einer zufälligen Verteilung folgt, können Mehrwegeeffekte hingegen durchaus systematisch sein und hängen vor allem vom Zusammenspiel aus Satellitenkonstellation und lokaler Umgebung zusammen. Sie sind individuell für jede Empfängerposition und weisen aufgrund der sich wiederholenden Satellitenkonstellation eine zeitliche Korrelation auf. Sie stellen den größten verbleibenden Störeinfluss bei der RTK-Messung dar, sodass schlussendlich die Einzelkoordinate mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmbar ist /Teunissen & Montenbruck 2017/.

Eine höhere Genauigkeit kann durch statische Langzeitbeobachtung und anschließender Basislinienauswertung basierend auf der Bildung von Doppeldifferenzen und weiterer Linearkombinationen erzielt werden. Der Vorteil von RTK-GNSS gegenüber dem statischen Verfahren ist, dass die Positionsbestimmung in Echtzeit erfolgt und keine Rohdaten aufgezeichnet werden müssen. Dies begünstigt den Einsatz beim kontinuierlichen Monitoring, da hier oftmals Datenübertragungsraten und Speicherkapazitäten begrenzt sind.

Zahlreiche Monitoringaufgaben erfordern allerdings Deformationen, deren Magnitude unter der erreichbaren RTK-Messgenauigkeit

von wenigen Zentimetern liegt, aufzudecken. Ein probates Mittel zur Verbesserung der Empfängerposition ist die Mittelwertbildung mehrerer RTK-Koordinaten über einen bestimmten Zeitraum. Dieser Ansatz wird auch beim Monitoringsystem „Happy Monitoring“ verfolgt, wobei hier ein komplexerer Glättungsalgorithmus implementiert ist, der sich adaptiv an die Messbedingungen und deren zeitliche Veränderung anpasst. Das RTK-System von „Happy Monitoring“ besteht dabei stets aus einer eigenen Referenzstation nahe des Untersuchungsgebiets und einer beliebigen Anzahl an Rovern.

2.2 Systemkomponenten der „Happy Monitoring“-Lösung

Das untersuchte System verwendet Mehrfrequenzempfänger des chinesischen Herstellers SOUTH /South 2022/. Diese können die Signale aller gängigen GNSS-Systeme empfangen (Tab. 1) und erreichen Positionierungsgenauigkeiten (Tab. 2), die mit denjenigen anderer Hersteller vergleichbar sind.

Innerhalb des „Happy Monitoring“-Systems erfolgt der Datentransfer i. d. R. über eine mobile Internetverbindung oder WLAN. Die Empfänger verbinden sich für den Datenaustausch zu einem eigenen Korrekturdatenserver („Eagle Server“) sowie zu einem Datenserver zum Speichern der Messwerte. Die Referenzstation leitet aus ihren Beobachtungen Korrekturdaten für alle vier unterstützten Systeme (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) ab, die im RTCM3.2-Format an den Korrekturdatenserver geschickt werden. Eine beliebige Anzahl von Rovern holt sich jeweils die Korrekturdaten vom Server und bringt sie an die eigenen Beobachtungen an. Die anschließend ermittelten RTK-Koordinaten beziehen sich auf ein frei im Empfänger definierbares Koordinatensystem. Sie werden an den Datenserver gesendet und dort gespeichert. Alle Empfänger messen dabei mit einer Rate von 5 s. Um eine verbesserte Position zu erhalten, muss der Nutzer eine Anfrage im XML-Format an den Datenserver stellen, worin das Zeitfenster spezifiziert wird, über welches die gewichtete Mittelwertbildung erfolgen soll. Ein Berechnungsserver führt daraufhin die entsprechende Auswertung durch und überträgt die gemittelten Koordinaten an den Nutzer. Die Anfrage muss dabei nicht jedes Mal manuell gestellt werden, sondern kann automatisiert durchgeführt werden. Zudem lassen sich Grenzwerte für die Koordinaten definieren, bei deren Überschreitung der Nutzer alarmiert wird.

GPS	L1, L2, L5
GLONASS	L1, L2, L3
Galileo	E1, E5a, E5b, E6
BeiDou	B1, B2, B3

Tab. 1 | Empfangene GNSS-Signale /South 2022/

	Horizontal	Vertikal
Static GNSS	3 mm ± 0,1 ppm	3,5 mm ± 0,4 ppm
RTK GNSS	8 mm ± 1,0 ppm	15 mm ± 1,0 ppm

Tab. 2 | Herstellerangaben zur Messgenauigkeit /South 2022/

Bei einem Ausfall der Referenzstation oder der Internetverbindung scheitert die Übertragung von Korrekturdaten und es kommt zu einem vollständigen Messausfall. Kleinere Unterbrechungen in der Datenübertragung beeinträchtigen die Genauigkeit der Deformationsmessung nicht, sofern der Datenverlust innerhalb des Auswertefensters nicht mehr als 15 % beträgt.

2.3 Auswertalgorithmus

Der implementierte Glättungsalgorithmus führt eine Filterung und Gewichtung der RTK-Koordinaten innerhalb des spezifizierten Messzeitraums durch. Die Berechnung basiert rein auf den finalen RTK-Einzelkoordinaten, sodass keine Rohdaten übertragen und gespeichert werden müssen. *Abb. 1* veranschaulicht den Prozess. Ein Rover bestimmt alle 5 s seine Koordinaten und überträgt diese an den Datenserver, der sie speichert. Aus den Daten der ersten 24 h wird automatisch ein sogenannter Fingerprint für jeden Rover abgeleitet. Beim Fingerprint handelt es sich um eine statistische Stichprobe, die stationsspezifische Genauigkeitsschwankungen über den Tagesverlauf widerspiegelt. Er kann als zeitabhängiger Gewichtungsfaktor angesehen werden, der verwendet wird, um die späteren Koordinaten-Messungen in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt entsprechend zu gewichten. Im Fingerprint ist beispielsweise der Einfluss von Mehrwegeffekten auf die Positionsbestimmung über den Tagesverlauf abgebildet. Mehrwegeffekte sind die größten verbleibenden Unsicherheitseinflüsse bei der RTK-Messung und haben aufgrund der sich wiederholenden Satellitenkonstellation einen wiederkehrenden Charakter. Entsprechend können Messungen zu einem ungünstigen Messzeitpunkt heruntergewichtet werden. Der Fingerprint ist dabei keine feste Größe, sondern wird dynamisch an die aktuellen Messungen angepasst. Durch den laufenden Vergleich der Residuen zum gewichteten Mittelwert, kann eine eventuelle Änderung der Messqualität im Tagesverlauf festgestellt und das Gewicht im Fingerprint entsprechend angepasst werden. Eine Anpassung des Fingerprints kann beispielsweise notwendig sein, wenn sich durch jahreszeitliche Einflüsse (z.B. Belaubung oder Schnee) die lokalen Umgebungsbedingungen des Empfängers und

dadurch auch die Sichtbarkeit von Satelliten oder Mehrwegeffekte ändern. Durch die Adaption wird eine hohe Genauigkeit des Ergebnisses auch über einen längeren Zeitraum von mehreren Jahren gewährleistet /Schnider 2021/.

Nachdem eine Nutzeranfrage gestellt wird, werden alle Koordinaten innerhalb des spezifizierten Auswertefensters vom Datenserver an den Auswerteserver geschickt. Die Länge des Auswertefensters kann zwischen 15 Sekunden und 48 Stunden frei gewählt werden. Ein längeres Auswertefenster verspricht, durch die größere Anzahl an Einzelmessungen, ein genaueres Ergebnis zu liefern, allerdings auf Kosten der Echtzeitfähigkeit. Beim Eintreten einer plötzlichen Bewegungsänderung nimmt man aufgrund der zeitlichen Glättung somit eine gewisse Latenzzeit in Kauf. Es ist zwar möglich, dass sich die Auswertefenster überlappen – beispielsweise kann stündlich eine Lösung aus den letzten 24 h berechnet werden – allerdings korrelieren die einzelnen Lösungen dann stark und der Effekt der zeitlichen Verzögerung wird dennoch nicht aufgehoben.

Bei der Auswertung werden in einem ersten Schritt die Koordinaten gefiltert. Dies geschieht auf Basis eines Schwellenwerts, der sich aus einer a priori erwarteten Genauigkeit ergibt. Alle Messungen, die zu stark vom Mittelwert abweichen, werden eliminiert. Die verbleibenden Koordinaten werden in einem zweiten Schritt anhand ihres Aufnahmezeitpunkts über den Fingerprint gewichtet. Der daraus gebildete gewichtete Mittelwert stellt schließlich das Ergebnis der Berechnung dar. Die gewichteten Koordinaten werden außerdem dazu verwendet, um die a priori vermutete Genauigkeit sowie den Fingerprint zu aktualisieren. Dadurch stimmt sich der Glättungsalgorithmus immer besser auf die Genauigkeit der Messungen ab und kann zudem adaptiv auf Änderungen in den Messgegebenheiten reagieren.

3 GENAUIGKEITSUNTERSUCHUNGEN

Um zu überprüfen, welche Genauigkeit mit dem System tatsächlich erreicht werden kann, wurden drei Genauigkeitsparameter untersucht: die Koordinatenpräzision eines stationären Rovers (Abschnitt 3.1), die Genauigkeit der absoluten Strecke zwischen zwei Rovern

(Abschnitt 3.2) und die Messgenauigkeit von Deformationen (Abschnitt 3.3). Es wird erwartet, dass die Ergebnisse von der Distanz zwischen Referenzstation und Rover sowie von der Länge des gewählten Glättungsfensters abhängig sind. Bei zunehmendem Abstand der GNSS-Empfänger nimmt die Korrelation der Unsicherheitseinflüsse in den beiden Stationen ab, wodurch sich die Genauigkeit i.d.R. verschlechtert. Bei einem längeren Auswertefenster werden mehr Einzelmessungen gemittelt, sodass eine höhere Genauigkeit für statische Einzelpunkte erwartet wird. Alle Versuche werden deshalb für

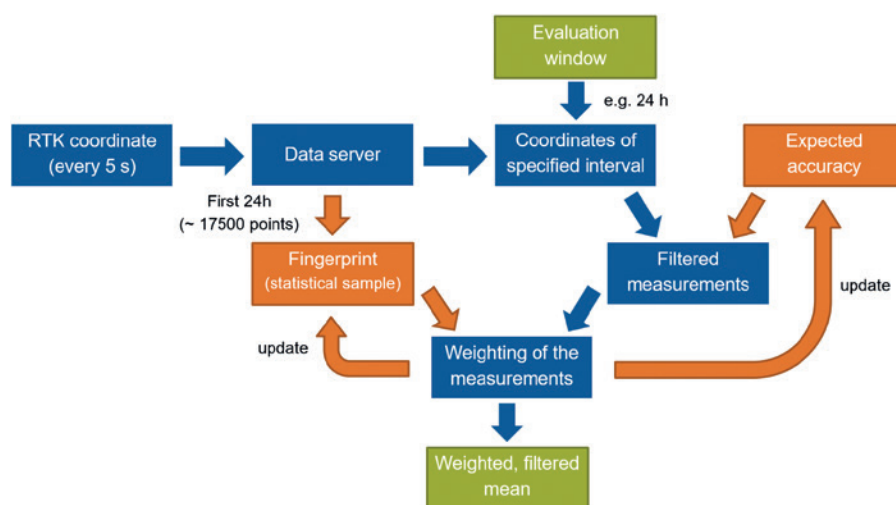


Abb. 1 | Ablaufschema des Glättungsalgorithmus

verschiedene Basislinienlängen wiederholt und bei der Auswertung werden unterschiedliche Zeitfenster definiert.

Im Zeitraum zwischen November 2020 und Februar 2021 wurden mehrere Zeitreihen aufgenommen, um die oben genannten Fragestellungen zu untersuchen. Dabei standen drei Empfänger von „Happy Monitoring“ zur Verfügung: eine Referenzstation und zwei Rover. Angelehnt an die Situation am Hochvogel fanden fast alle Messungen unter idealen Umgebungsbedingungen statt, d.h. absolut freie Sicht nach oben. Dies macht die Messbedingungen bei unterschiedlichen Basislinienlängen, bei denen mehrere Aufstellungen notwendig waren, vergleichbar. Ein großer Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover, wie er bei der Messkonfiguration am Hochvogel auftritt, konnte hingegen nicht realisiert werden. In den Testreihen befanden sich alle Empfänger auf einer vergleichbaren Höhe. Als Koordinatensystem wurde das ETRS89-System mit UTM-Abbildung gewählt. Sämtliche Analysen wurden folglich in diesem Abbildungssystem durchgeführt.

3.1 Koordinatenpräzision eines stationären Rovers

Im ersten Versuchsaufbau steht der Rover unverändert auf einem unbewegten Punkt mit dem Ziel, die Präzision bzw. die Streuung der resultierenden Koordinaten zu bestimmen. Als Maß wird die einfache Standardabweichung (68 %) des Mittelwerts herangezogen. Der Versuch wird für Basislinienlängen von 1 km, 5 km, 10 km und 20 km wiederholt, wobei die Beobachtungsdauer zwischen 6 und 23 Tagen beträgt. Fortlaufend werden die Koordinaten über den gesamten Messzeitraum jeweils mit Auswertefenstern von 1 h, 3 h, 6 h, 12 h und 24 h berechnet und die Standardabweichungen der unterschiedlichen Lösungen verglichen.

Abb. 2 zeigt die resultierende Standardabweichung in Abhängigkeit von der Basislinienlänge bei stündlicher (links) und täglicher (rechts) Auswertung. Erwartungsgemäß hat die Basislinienlänge eine deutliche Auswirkung auf das Ergebnis. Betrachtet man die stündliche Auswertung, so liegt bei einer kurzen Basislinie von 1 km die 3D-Koordinatenpräzision im Bereich eines Millimeters. Für eine lange Basislinie von 20 km resultiert hingegen eine Standardabweichung von 6 mm. Ebenfalls geht aus der Auswertung hervor, dass die Lagekoordinate (2D) genauer bestimmbar ist als die Höhe. Wird anstelle einer stündlichen Lösung eine Tageslösung gerechnet, kann die Präzision gesteigert werden. Für kurze Basislinien liegt die Stan-

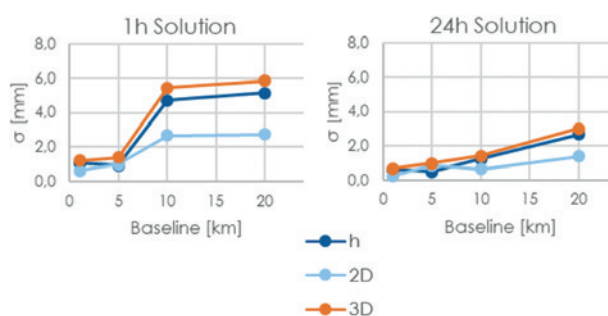


Abb. 2 | Koordinatenpräzision eines stationären Rovers in Abhängigkeit von der Basislinienlänge bei stündlicher (links) und täglicher (rechts) Auswertung

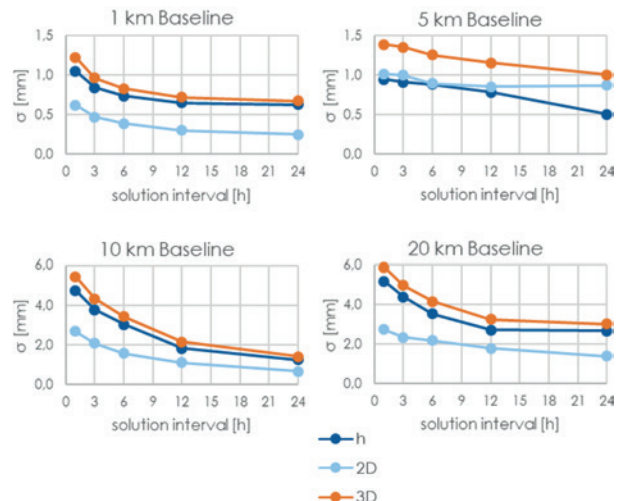


Abb. 3 | Koordinatenpräzision eines stationären Rovers in Abhängigkeit von der Länge des Auswertefensters für verschiedene Basislinienlängen

dardabweichung hierbei deutlich unter 1 mm, für lange Basislinien (20 km) bei etwa 3 mm.

Die Abnahme der Standardabweichung bei zunehmender Länge des Auswertefensters sowie die Abhängigkeit von der Basislinienlänge ist in Abb. 3 verdeutlicht. Anzumerken ist, dass sich bei Berechnungsfenstern von über 24 h kaum noch eine Verbesserung im Vergleich zur Tageslösung ergibt.

Die Messungen des Rovers mit einer Entfernung von 5 km zur Referenzstation zeigt ein leicht abweichendes Verhalten. Dies kann daran liegen, dass hier – im Gegensatz zu den anderen Aufstellungen – der Empfänger Richtung Osten abgeschattet war. Dennoch ist auch hier die deutliche Verbesserung der Präzision mit zunehmender Länge des Auswertefensters zu erkennen.

3.2 Streckengenauigkeit zwischen zwei Rovern

Die absolute Messgenauigkeit der Strecke zwischen zwei Rovern wird auf der präzise eingemessenen Eichstrecke der Universität der Bundeswehr München /Heunecke 2012/ bestimmt. Der Referenzwert der Horizontalstrecke ist mit einer Genauigkeit von unter 1/10 mm bekannt, jener der Höhendifferenz mit einer Genauigkeit von etwa 5/10 mm (Tab. 3). Während der Messung stehen die beiden Rover auf zwei festen Pfeilern, die Referenzstation befindet sich etwa 1 km entfernt. Für jeden Rover wird täglich eine Koordinate aus den Messungen der letzten 24 h bestimmt und daraus die Strecke zwischen den beiden Rovern berechnet. Nach 38 Messtagen weicht der Mittelwert der Strecke um 0,1 mm in der Lage (2D) und um 1,1 mm in der Höhe vom Sollwert ab.

Basis 1 km	Soll-Wert	Gemessen	Differenz
Horiz.-Strecke	101,2373 m	101,2372 m	0,0001 m
Höhendifferenz	-0,0068 m	-0,0079 m	0,0011 m

Tab. 3 | Abweichung zur Sollstrecke bei einer Basislinienlänge von 1 km

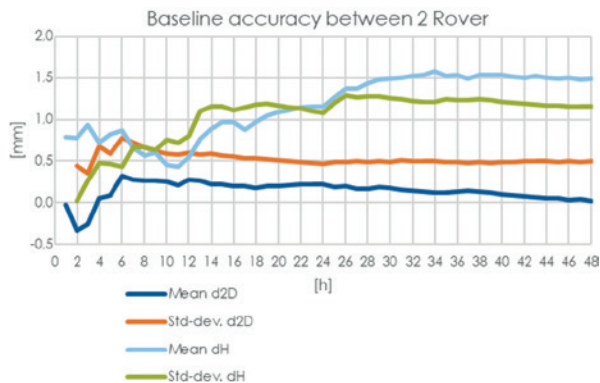


Abb. 4 | Absolute Streckengenauigkeit zwischen zwei Rovern bei stündlicher Auswertung über 48 Stunden

Basis 10 km	Soll-Wert	Gemessen	Differenz
Horiz.-Strecke	101,2373 m	101,2351 m	0,0022 m
Höhendifferenz	-0,0068 m	-0,0058 m	0,0010 m

Tab. 4 | Abweichung zur Sollstrecke bei einer Basislinienlänge von 10 km

Bei stündlicher Auswertung der Messung stellt sich bereits nach 6 h ein Mittelwert in der Horizontalstrecke (2D) ein, der lediglich um 0,3 mm vom Sollwert abweicht (Abb. 4). Die Standardabweichung der Strecke liegt hierbei unter 1 mm und stellt sich nach einigen weiteren Stunden bei etwa 0,5 mm ein. Die Horizontalstrecke aus den 24-h-Lösungen weist über den gesamten Messzeitraum eine Standardabweichung von 0,2 mm auf. Nach etwa 1,5 Tagen weicht der Mittelwert des Höhenunterschieds aus stündlichen Lösungen konstant um etwa 1,5 mm mit einer Standardabweichung von 1,2 mm vom Sollwert ab. Aus den Tageslösungen ergibt sich insgesamt eine Standardabweichung des Höhenunterschieds von 0,7 mm.



Abb. 5 | Aufbau der Referenzstation auf einem Kreuzschlitten und einer Höhenschraube zur Erzeugung präziser Referenzverschiebungen

Dieselbe Strecke wird anschließend erneut mithilfe der beiden Rover bestimmt, nun befindet sich die Basisstation allerdings 10 km entfernt. Die Abweichungen des Mittelwerts der Tageslösungen nach acht Tagen sind in Tab. 4 aufgelistet. Die Standardabweichungen (24-h-Lösungen) sind mit 0,8 mm für die Horizontalstrecke und 2,1 mm für den Höhenunterschied, wie erwartet, größer als bei kurzer Entfernung zur Basisstation. Dennoch ist die Abweichung des Höhenunterschieds sogar etwas geringer, dies lässt aber auf keine repräsentative Aussage schließen.

Aus diesem Versuch geht hervor, dass die Strecke zwischen zwei Rovern über die gewichteten Koordinatenmittel sehr genau bestimmt werden kann. Die erreichte Präzision ist in diesem Versuch vergleichbar mit der Einzelpunktpräzision aus den ersten Versuchen. Allerdings darf diese innere Genauigkeit nicht auf die absolute Genauigkeit übertragen werden, da diese i.d.R. etwas schlechter ist. Unproblematisch ist dies bei Monitoringaufgaben, bei denen absolute Positionen entfallen und es rein auf die relativen Verschiebungen zwischen den Messpunkten ankommt.

3.3 Messgenauigkeit von Deformationen

Zur Evaluierung der Messgenauigkeit von Deformationen werden an einem der Empfänger künstlich Sollverschiebungen mithilfe eines Kreuzschlittens und einer Höhenschraube erzeugt (Abb. 5). Die Sollbeträge können dabei sowohl in der Lage als auch in der Höhe mit einer Genauigkeit von unter 1/10 mm eingestellt werden. Für eine zusätzliche Vergleichbarkeit wird die Referenzstation verschoben, sodass an beiden Rovern gleichzeitig dieselbe Deformation auftreten muss. Es werden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Distanzen zur Referenzstation und unterschiedlichen Verschiebungsbeträgen durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst und es wird repräsentativ auf eine Messreihe genauer eingegangen.

In der in Abb. 6 dargestellten Messreihe wird die Basisstation drei Tage lang täglich zur gleichen Zeit um 1 mm in Ost-West-Richtung und um 1 mm in der Höhe verschoben. Nach einem Tag ohne Verschiebungen wird der Empfänger am fünften Tag in entgegengesetzte Richtung um 5,5 mm in Lage und 5 mm in der Höhe bewegt. Mit zwei Rovern, die beide 1 km entfernt von der Referenzstation aufgebaut sind, werden die Bewegungen gemessen. In der Nacht vom 11.01.2021 auf den 12.01.2021 kam es zu einem Messausfall der Referenzstation, weshalb beide Rover keine Messdaten lieferten. In Abb. 6 sind die 6-h-Lösungen sowie die Soll-Verschiebungen dargestellt.

Die mittlere Abweichung zum Sollbetrag der Verschiebung beträgt in der Lage 0,1 mm ± 0,3 mm und in der Höhe 0,2 mm ± 1,1 mm. Nach dem Messausfall ist keine erkennliche Verschlechterung der Messgenauigkeit erkennbar, sodass ein zwischenzeitlicher Ausfall für den späteren Fortlauf des Monitorings unproblematisch ist. Insgesamt verläuft das Messrauschen in einem ähnlichen Wertebereich wie im statischen Fall und hängt abermals von der Distanz zur Basisstation sowie des Auswertefensters ab. Abb. 7 fasst die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen, in denen Deformationen erzeugt wurden, zusammen.

Unabhängig vom Messrauschen müssen etwaige systematische Abweichungen vom tatsächlichen Deformationsbetrag betrachtet werden. In allen durchgeführten Messreihen liegen die gemessenen Abweichungen zur Sollverschiebung im Mittel zwar innerhalb der Grenzen der Standardabweichung, dennoch wäre eine systematische Abweichung der Messwerte nach einer erfolgten Deformation denkbar. Die hier gesammelte Datengrundlage reicht allerdings nicht aus, um etwaige systematische Abweichungen zum absoluten Deformationsbetrag weiter analysieren zu können. Jedoch kann dies für die absolute Streckengenauigkeit zwischen beiden Rovern gemacht werden. Die in Abb. 6 dargestellten Verschiebungen wurden innerhalb einer insgesamt 38 Tage langen Messreihe ausgeführt, anhand derer die Streckengenauigkeit zwischen den beiden Rovern ausgewertet wurde. Trotz stattfindender Verschiebung der Referenzstation wurde keine signifikante Abnahme der Streckengenauigkeit zwischen den Rovern festgestellt. Auffällig ist allerdings, dass bei größeren, sprunghaften Deformationen darauffolgende Lösungsintervalle unter Umständen keine Ergebnisse liefern. Abhängig vom gewählten Auswertefenster kann es also zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen bei der Detektion einer Bewegung kommen, selbst bei sich überlappenden Auswertefenstern.

4 ANWENDUNG HOCHVOGEL

4.1 Untersuchungsgebiet

Der Hochvogel ist ein bekannter Gipfel in den Allgäuer Alpen und befindet sich direkt auf der Grenze zwischen Bayern und Tirol (Abb. 8). Mit einer Höhe von 2592 m ist er der höchste Gipfel in der näheren Umgebung und dementsprechend starker Erosion ausgesetzt. In Kombination mit einer unstabilen Geologie hat dies zur Folge, dass sich über die letzten Jahrzehnte direkt neben dem Gipfelkreuz ein Spalt aufgetan hat, der sich quer durch den Gipfel zieht. Die gesamte südliche Flanke droht, auf österreichischer Seite ins Tal zu stürzen. Seit 2018 wird der Berg folglich intensiv messtechnisch überwacht, um einen bevorstehenden Felssturz möglichst früh vorhersagen zu können. Die Messungen ergeben, dass sich der Hauptspalt um etwa 2,5 cm pro Jahr öffnet /Raffl & Wunderlich 2020/, /Raffl & Holst 2022/. Mittlerweile hat er eine Breite von etwa 5 m und eine Länge von etwa 35 m. Daneben gibt es noch weitere, kleinere Spalten, die aber ebenfalls hohe Öffnungsgeschwindigkeiten aufweisen. Erste Modellierungen haben ergeben, dass im Fall eines Versagens bis zu 260 000 m³ Fels ins Tal stürzen können /Leinauer et al. 2020/.

Das installierte Frühwarnsystem besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren, die das Bewegungsgeschehen im Gipfelbereich umfassend beobachten. In periodischen Abständen werden beispielsweise klassische geodätische Netzmessungen, bestehend aus GNSS-Basislinien- (unabhängig von „Happy Monitoring“) und Tachymeterbeobachtungen, durchgeführt. Ebenso wird der Gipfel regelmäßig mittels 3D-Laserscanning (TLS) und Photogrammetrie (sowohl terrestrisch als auch luftgestützt) flächenhaft erfasst. Zusätzlich sind auch kontinuierlich messende Sensoren verbaut, die ihre Messdaten in Echtzeit ins Tal senden. Installiert sind beispielsweise Crackmeters, Laserdistanzmesser, Seismometer,

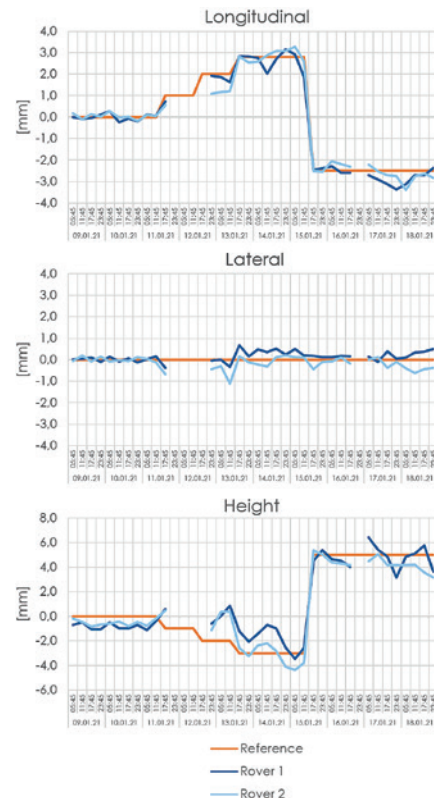


Abb. 6 | Messreihe mit künstlich erzeugten Deformationen

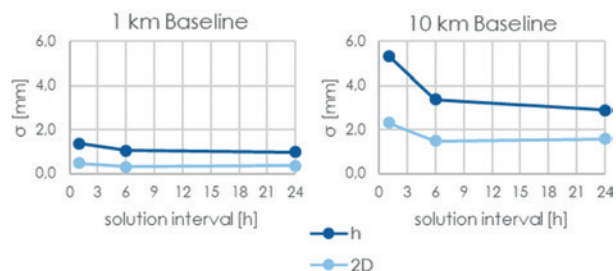


Abb. 7 | Messgenauigkeit von Deformationen in Abhängigkeit von der Länge des Auswertefensters für eine Basislinienlänge von 1 km (links) und 10 km (rechts)



Abb. 8 | Der Gipfel des Hochvogels (2592 m) mit der Spalte, die den Berg teilt. Die südliche Seite (links im Bild) droht, ins Tal zu stürzen.

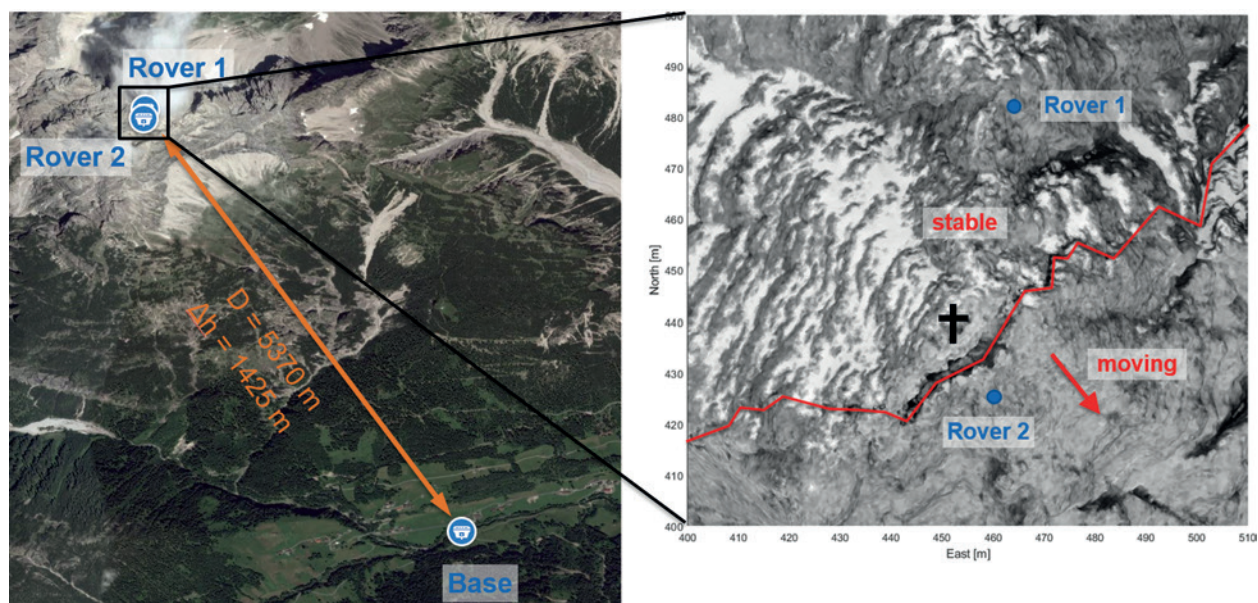


Abb. 9 | Die Position der Referenzstation und der Rover. Es liegt ein Höhenunterschied von über 1 400 m zwischen der Referenz und den Rovern.

meteorologische Sensoren sowie zwei permanent messende GNSS-Empfänger der Firma „Happy Monitoring“.

4.2 GNSS Monitoring

Für die permanente GNSS-Überwachung des Hochvogels mit dem „Happy Monitoring“-System wurden auf dem Gipfel zwei Rover und eine Referenzstation im Tal (Abb. 9) installiert. Rover 1 befindet sich nördlich der Spalte auf der vermeintlich stabilen Seite des Gipfels und Rover 2 auf der südlichen, absturzgefährdeten Flanke. Dieser Aufbau bringt eine besondere Herausforderung mit sich, da zwischen den Empfängern am Berg und der Referenz im Tal einen Höhenunterschied von über 1 400 m liegt. Jedoch kann dadurch beobachtet werden, ob Rover 1 tatsächlich stabil ist oder ob der gesamte Berg einer Bewegung unterliegt. Insgesamt sind die Basislinien jeweils über 5 km lang.

Die Stromversorgung der Rover ist über große Batterien sowie Solarmodule realisiert. Da es auf dem Hochvogel keinen Mobilfunkempfang gibt, wurde mittels zweier Richtantennen (Tal und Berg) eine WLAN-Verbindung realisiert, mit welcher die Rover Korrekturdaten empfangen und ihre Messdaten übertragen können. Nachfolgend werden die ersten Messergebnisse im Zeitraum von knapp drei Monaten zwischen dem 23.07.2021 und dem 18.10.2021 betrachtet und analysiert.

4.3 Ergebnis

Abb. 10a zeigt die geglätteten Lagekoordinaten der beiden Rover. Es wurde jeweils täglich eine Lösung mit einem Auswertefenster von 48 h gerechnet. Farblich codiert ist der zeitliche Verlauf. Die Koordinaten des Rovers 1 streuen zufällig um etwa ± 2 mm um den Mittelwert, wobei die Streuung in Ost-West-Richtung etwas geringer ist als in Nord-Süd-Richtung. Es ist kein zeitlicher Trend zu erkennen, sodass die Nordflanke innerhalb des betrachteten Messzeitraums als stabil angesehen werden kann. Anders verhält sich hingegen Rover 2, der einen eindeutigen Trend Richtung Südosten erkennen lässt. Bildet man die Differenz zwischen den beiden Rovern und betrachtet die relative Änderung zwischen Nord- und Südseite, so ist die Bewegung noch eindeutiger (Abb. 10b). In den betrachteten drei Monaten hat sich die Spalte um etwa 4,5 mm geöffnet.

In Abb. 11 ist die 2D-Distanz (oben) sowie die Höhendifferenz (unten) zwischen den Rovern über die Zeit aufgetragen. In Rot ist die Regressionsgerade für die 2D-Distanz mit einer Steigung von etwa 1,3 mm/Monat dargestellt. Die Residuen liegen hierbei im Millimeterbereich, wobei es auch deutliche Ausreißer von bis zu 4 mm

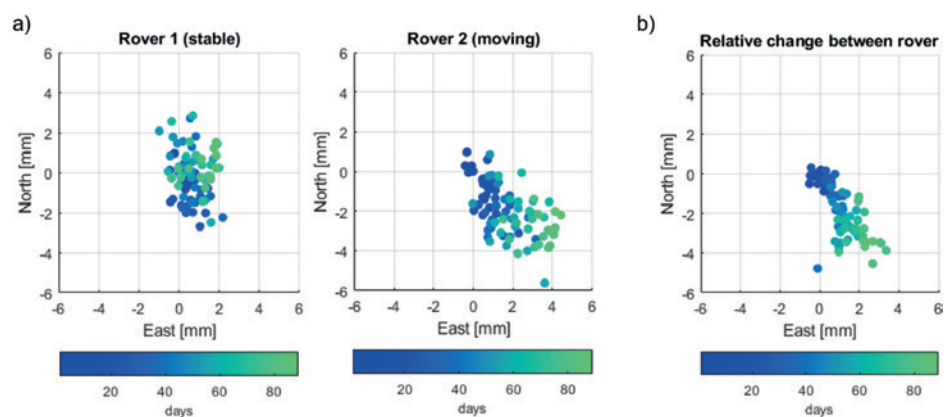


Abb. 10 | a) Roverpositionen und b) relative Änderung zwischen den Rovern, farblich codiert über den Messzeitraum

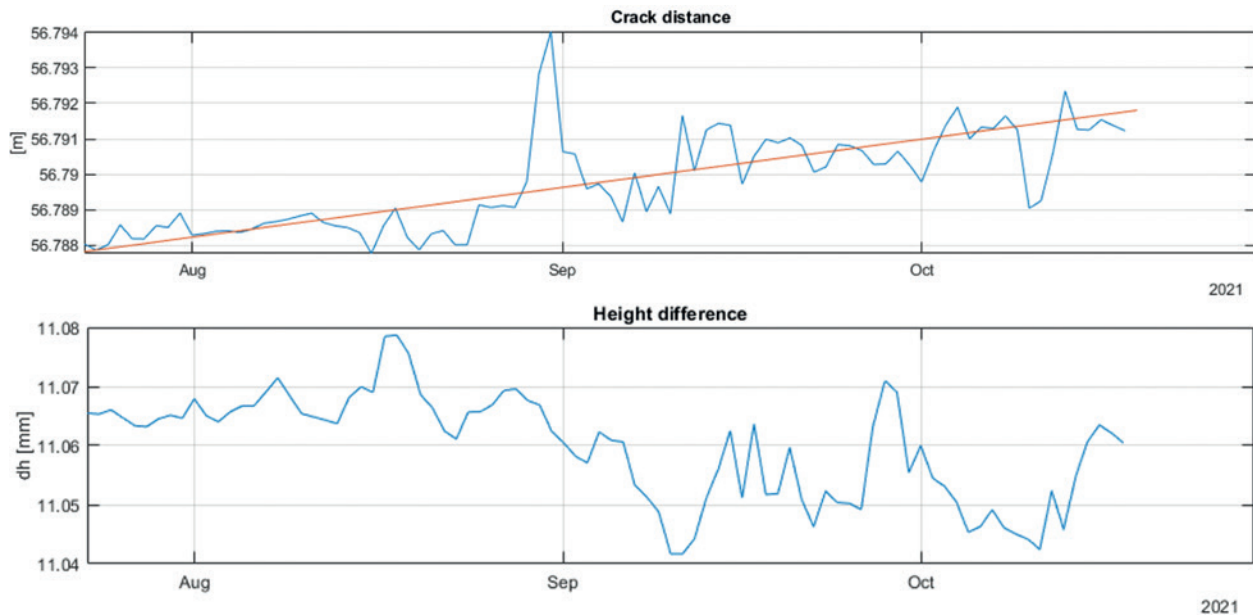


Abb. 11 | Horizontaldistanz mit Regressionsgeraden (oben) und Höhendifferenz über den Messzeitraum

gibt. Die Ursache dafür ist nicht vollständig bekannt. Der Vergleich mit den Aufzeichnungen der Wetterstation zeigt, dass es bei den Ausreißern starke Regenfälle gab, jedoch ist im Umkehrschluss nicht bei jedem Starkregenereignis ein Ausreißer in den Messdaten zu sehen. Trotzdem ist bereits rein aufgrund des großen Höhenunterschieds zwischen Referenzstation und Rovern in der Messkonfiguration davon auszugehen, dass Wetterphänomene Einfluss auf das Ergebnis haben. Insgesamt ist die Lagegenauigkeit vergleichbar mit den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Versuche. Somit ist eine präzise Überwachung der Südflanke gewährleistet.

Der Höhenunterschied zwischen den beiden Rovern kann hingegen deutlich schlechter bestimmt werden. In der Messreihe ist kein klarer Trend zu erkennen und die Werte streuen um ± 2 cm. Dies ist wohl hauptsächlich auf den Troposphäreneinfluss zurückzuführen, der sich bei diesem enormen Höhenunterschied deutlich auf die Qualität der Höhenbestimmung auswirkt. Das Umfunktionsieren von Rover 1 zur Referenzstation würde dem wohl deutliche Abhilfe verschaffen, allerdings kann dann eine mögliche Bewegung der Nordseite nicht mehr aufgedeckt werden.

4.4 Validierung

Eine Validierung der Ergebnisse am Hochvogel kann durch den Vergleich mit den Ergebnissen anderer Messverfahren erfolgen. Zu Beginn und am Ende des betrachteten Zeitraums wurden tachymetrische Netzmessungen am Gipfel durchgeführt. Im Bereich der Spalte befinden sich zahlreiche vermarkte Netzknoten, deren Bewegungen in einer Deformationsanalyse bestimmt werden. In Abb. 12 sind die Deformationsvektoren (nur Lagekomponenten) aus der geodätischen Netzmessung (blau) sowie die Bewegung von Rover 2 (pink) für den betrachteten Zeitraum dargestellt. Sowohl Betrag als auch Richtung der mit dem „Happy Monitoring“-System bestimmten Bewegung stimmen mit den Ergebnissen der geodätischen Netzmessung überein.

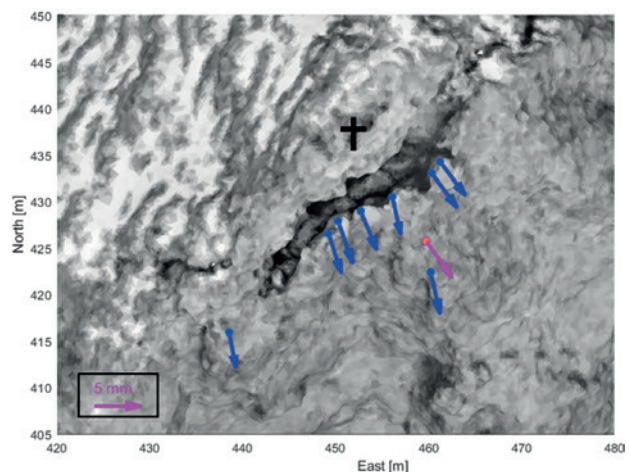


Abb. 12 | Deformationsvektoren aus tachymetrischer Netzmessung (blau) und aus den GNSS-Permanentmessungen (pink), berechnet für den gleichen Zeitraum

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde ein RTK-basiertes permanentes Monitoringsystem zur Bestimmung von Bewegungen in Quasi-Echtzeit vorgestellt. Das System „Happy Monitoring“ beinhaltet einen Glättungsalgorithmus, der mehrere RTK-Koordinaten innerhalb eines spezifizierten Auswertefensters zu einem gewichteten Mittelwert vereint. Dadurch können Positionsgenauigkeiten im Millimeterbereich erreicht werden, ganz ohne Aufzeichnung und Auswertung von Rohdaten. Zu beachten ist allerdings, dass durch die Glättung eine gewisse zeitliche Latenz entsteht. Somit ist das System geeignet, sehr kleine Bewegungen zu messen, bei denen eine unmittelbare Beschleunigung ausgeschlossen werden kann.

In verschiedenen Versuchen wurde die tatsächliche Genauigkeit des Systems untersucht. Diese hängt stark von der Distanz zwischen

Basisstation und Rover sowie von der Länge des Auswertefensters ab. Unter Idealbedingungen konnten wir – mit täglicher Auswertung und für kurze Basislinien (1 – 2 km) – Messgenauigkeiten von deutlich unter 0,5 mm in der Lage und etwa 1 mm in der Höhe erzielen. Dies gilt sowohl im statischen Fall als auch bei vorliegenden Deformationen. Für Basislinien bis 20 km war die Koordinatenpräzision nicht schlechter als 2 mm in der Lage und 3 mm in der Höhe. Für eine Basislinienlänge von 1 km lieferte selbst die stündliche Lösung eine Standardabweichung der 3D-Koordinate von < 2 mm. Ebenfalls bei einer Basislinienlänge von 1 km konnte die Strecke zwischen zwei Rovern in der Lage auf 0,1 mm und in der Höhe auf 1,1 mm genau bestimmt werden, wobei auch eine Verschiebung der Basis während der Messung die Genauigkeit nicht verschlechterte.

Neben weiteren Anwendungsfällen /Schnider 2021/ wird das Monitoringsystem bereits am Hochvogel erfolgreich eingesetzt. Trotz des enormen Höhenunterschieds zwischen Referenzstation und Rover können Lagekoordinaten mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich berechnet werden. Im Zeitraum von drei Monaten konnte so eine horizontale Öffnung der Hauptspalte von rund 4,5 mm gemessen werden. Da sich der Troposphäreinfluss in der Höhenkomponente besonders bemerkbar macht, streut diese hingegen um wenige Zentimeter. Es wird bereits an einer neuen Version des Auswertalgorithmus gearbeitet, welcher durch getrennte Bewertung der Koordinatenkomponenten bessere Ergebnisse auch bei großen Höhenunterschieden liefern soll. Längere Zeitreihen werden noch weitere Evaluierungen und Analysen des Systems erlauben.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke und seinem Team, die uns die Eichstrecke der Universität der Bundeswehr München zur Verfügung gestellt haben. Diese Forschung ist Teil des Projekts „AlpSenseRely“, finanziert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.

LITERATUR

- Gili, J. A.; Corominas, J.; Rius, J. (2000): Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. In: Engineering Geology 55(2000)3, 167 – 192.
- Glabsch, J.; Heunecke, O.; Schuhbäck, S. (2009): Monitoring the Hornbergl landslide using a recently developed low cost GNSS sensor network. In: Journal of Applied Geodesy 3(2009)3, 179 – 192.
- Heunecke, O. (2012): Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)11-12, 380 – 385.
- Kahmen, H. (2005): Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde. 20. Aufl. De Gruyter, Berlin.
- Leinauer, J.; Jacobs, B.; Krautblatter, M. (2020): Anticipating an imminent large rock slope failure at the Hochvogel (Allgäu Alps). In: Geomechanics and Tunneling 13(2020)6, 597 – 603.
- Limpach, P.; Geiger, A.; Raetzo, H. (2016): GNSS for deformation and Geohazard monitoring in the Swiss Alps. In: Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2016), Wien, Österreich.

Notti, D.; Cina, A.; Manzino, A.; Colombo, A.; Bendea, I. H.; Mollo, P.; Giordan, D. (2020): Low-Cost GNSS Solution for Continuous Monitoring of Slope Instabilities Applied to Madonna Del Sasso Sanctuary (NW Italy). In: Sensors 20(2020)1.

Pfeiffer, J.; Zieher, T.; Bremer, M.; Wichmann, V.; Rutzinger, M. (2018): Derivation of Three-Dimensional Displacement Vectors from Multi-Temporal Long-Range Terrestrial Laser Scanning at the Reissenschuh Landslide (Tyrol, Austria). In: Remote Sensing 10(2018)11, 1688.

Raffl, L.; Holst, C. (2022): Including virtual target points from laser scanning into the point-wise rigorous deformation analysis at geo-monitoring applications. In: Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 20 – 22 Juni 2022, Valencia, Spanien.

Raffl, L.; Wunderlich, T. (2020): Challenges and Hybrid Approaches in Alpine Rockslide Prevention – An alarming Case Study. In: Proceedings of the 8th INGEO International Conference on Engineering Surveying & 4th SIG Symposium on Engineering Geodesy. Dubrovnik, Kroatien.

Schnider, R. (2021): Mit Happy Monitoring die Effekte des Klimawandels besser verstehen. In: Geomatik Schweiz 119(2021)1-2, 10 – 13.

South (2022): Specifications „South Galaxy G1 Plus“. <https://www.southinstrument.com/uploads/file/2021-09-27/615180bf9d79b.pdf> (14.01.2022).

Stempfhuber, W.; Alberding, J. (2012): Geodätische Monitoringsysteme mit RTK-Low-Cost-GNSS. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)4, 132 – 139.

Teunissen, P. J. G.; Montenbruck, O. (2017): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham.

M. Sc. Lukas Raffl

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN,
TUM SCHOOL OF ENGINEERING AND DESIGN,
LEHRSTUHL FÜR INGENIEURGEODÄSIE

Arcisstraße 21 | 80333 München
lukas.raffl@tum.de



René Schnider

HAPPY MONITORING GMBH

Via Luganetto 4 | CH-6962 Lugano
rene.schnider@happymonitoring.com



Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN,
TUM SCHOOL OF ENGINEERING AND DESIGN,
LEHRSTUHL FÜR INGENIEURGEODÄSIE

Arcisstraße 21 | 80333 München
christoph.holst@tum.de



Manuskript eingereicht: 16.05.2022 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet