

## Methoden zur Beobachtung von Geländedeformationen in der Alpen Kryosphaere

Jan Beutel

*Institut für Informatik, Universität Innsbruck*

We review a decade of detailed observation of the surface kinematics of large-scale mass movements with the help of in-situ Global Navigation Satellite Systems (GNSS) instruments. We cover the instruments and methods developed and applications in process monitoring as well as natural hazard warning and mitigation in the Mattertal, CH. We focus on a study area on the orographic right side of the Matter Valley above the communities of Täsch, Randa, Herbruggen and St. Niklaus, CH where numerous slope movements exist endangering the livelihood in the areas on the valley floor. The area is dominantly situated in permafrost and is very feature rich. Specifically, there exist active and relict rock-glaciers, landslides, solifluction, fractures, saggings etc. Furthermore, we will illustrate selected case studies of successful hazard management using near-real time kinematic observations.

In den vergangenen zehn Jahren wurden Methoden zur detaillierten Beobachtung von Oberflächendeformationen mittels in-situ Global Navigations Satelliten System (GNSS) Instrumenten erforscht und zur Anwendung gebracht (Wirz et al., 2013, Buchli et al., 2012). Im Vergleich zu manuellen Verfahren erlaubt diese Methode eine kontinuierliche Messung mit täglicher, stündlicher oder sogar noch höherer zeitlicher Auflösung. Dadurch ist es möglich geworden nicht nur die Magnitude einer Bewegung zu erfassen, sondern auch detaillierte Prozessstudien unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren durchzuführen oder Warnanlagen in Echtzeit effizient zu betreiben. Im Gegensatz zu stationären Methoden der Fernerkundung wie z.B. In-SAR, Laserscan oder Photogrammetrie sind in-situ GNSS Sensoren nicht von einem geeigneten Beobachtungspunkt oder einer direkten Sichtverbindung abhängig, erfassen Bewegungen voll und eindeutig in 3 Achsen und können in so unabhängig von der Geländeform eingesetzt werden. Weiterhin ist bei der permanenten Überwachung keine aufwendige Schutzbehausung der oft teuren und empfindlichen Fernerkundungs Geräte notwendig.



**Abb.1.** Zwei GNSS Instrumente die auf großen Felsblöcken montiert sind. Breithorn Hangrutschung auf 2982 m a.s.l., Herbruggen (Switzerland) (Links); Largario Blockgletscher 2355 m a.s.l., Blenio (Switzerland) (Rechts). © PermaSense Project

Es ist heute möglich mit kostengünstigen GNSS Empfängern die z.B. auch in Mobiltelefonen oder Navigationssystemen für Automobile Verwendung finden (Paziewski et al., 2020) im Millimeterbereich und mit einer zeitlichen Auflösung von Minuten Positionen zu berechnen. Hierzu wird ein Differenzverfahren angewendet bei dem die mobile Station jeweils als Basislinie zu einer stationären Referenz gerechnet wird (Theunissen and Montenbruck, 2017). Je nach Anforderungen an die Genauigkeit, die zeitliche Auflösung sowie die Verzögerung bis zur Bereitstellung der Positionslösungen müssen jeweils Empfänger Paare zeitgleich, kontinuierlich und mit der entsprechend notwendigen Kommunikationsbandbreite betrieben werden und der jeweilige Betrieb optimiert werden. Der aus diesen Anforderungen resultierende Energieverbrauch stellt das prinzipielle Limit der Methode dar, so z.B. bei eingeschränkter Verfügbarkeit von Solarenergie im Winter oder in polaren Regionen (Buchli et al., 2012).



**Abb.2.** In sehr stark aktiven Bewegungszonen kann es schwierig sein einen geeigneten Fußpunkt zu finden der groß genug ist das Instrument aufzunehmen, lange genug stabil und repräsentativ für die Bewegung der Landmasse ist. Hier dargestellt sind zwei frontale Zonen von sehr aktiven Blockgletschern im Mattertal: Dirruhorn Blockgletscher (Links) und Breithorn/Bielzug Blockgletscher (Rechts). © PermaSense Project

Ausgehend vom initialen X-Sense Projekt (Beutel et al., 2011) in dem diese Methodik und die zugehörigen Instrumente entwickelt wurden sind im Laufe der Zeit mit verschiedenen Partnern weitere hochalpine Standorte ausgerüstet und erprobt worden. Heute besteht im Matter- und Saastal, CH sowie an ausgewählten Standorten des schweizerischen Permafrost Monitoring Netzwerkes (PERMOS) eine Infrastruktur mit über 50 Messpunkten. Weiterhin wird die Methode breit im Monitoring von hochalpinen Massenbewegungen und zum Management von Naturgefahren eingesetzt, so z.B. an der Großrutschung „Spitze Stei“ in Kandersteg, CH. Im Jahr 2019 hat PERMOS diese Methodik als weiteres

Beobachtungselement in sein Portfolio aufgenommen, um den Status und die Veränderungen im Gebirgsperrmafrost zu erfassen. Diese Daten werden weiterhin an das Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), Teil des weltweiten Klimabeobachtungsnetzwerks GCOS/GTOS weitergeleitet. Ausgehend von einem Mandat der World Meteorological Organization (WMO) erarbeitet eine Arbeitsgruppe der International Permafrost Association (IPA) derzeit Richtlinien zur zukünftigen Nutzung dieser Daten als standardisierte Explanatory Climate Variable (ECV).

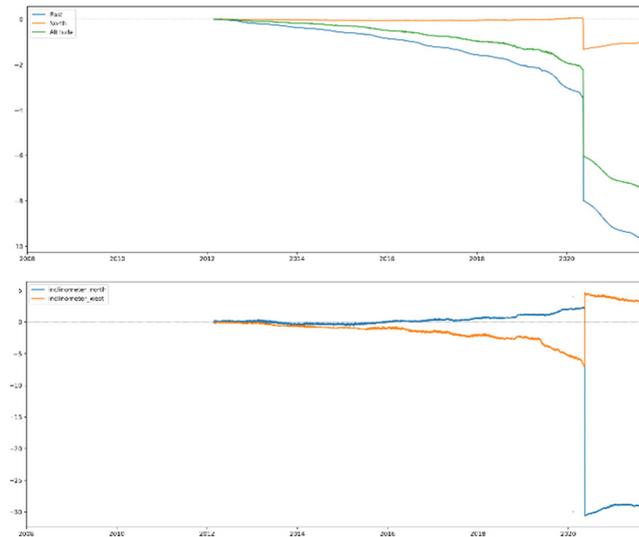
### **Technologie**

Das Messsystem besteht aus GNSS Instrumenten die dauerhaft auf einem geeigneten Fußpunkt installiert werden. Hierzu eignet sich z.B. ein großer Stein/Felsen es ist jedoch zu beachten das die Form und Art des Geländes und die ausgewählten Fußpunkte Einfluss auf die Ergebnisse und die Interpretationsfähigkeit haben. Die GNSS Instrumente basieren auf einem gebräuchlichen GNSS Empfänger (z.B. u-blox LEA-\*T Serie) jedoch ist es unabdingbar das die prozessierten Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen. Weiterhin ist eine aktive Antenne (Trimble Bullet III) zur Erhöhung der empfangenen Signalqualität notwendig. Die im Projekt entwickelten Instrumente enthalten weiterhin eine Überwachung von Spannungen, Temperatur und Feuchtigkeit, ein 2-Achsen Inklinometer (Murata SCA830), einen internen Datenlogger sowie eine drahtlose Datenübertragung mit einem Sensornetzwerk. Hiermit können die Messdaten dann in Echtzeit übertragen werden.

Um einen Betrieb auch im Winter zu gewährleisten, muss die GPS-Antenne auf einem Mast über der zu erwarteten maximalen Schneedecke positioniert werden. Eine 12 Volt Solaranlage liefert den Strom. Je nach Anwendung kann der Beobachtungszeitraum entweder statisch nach einer vorgegebenen Zeit eingestellt werden oder dynamisch durch die verfügbare Energie bestimmt. Eine Beobachtungsdauer von wenigen Stunden pro Tag hat sich in den meisten Fällen als ausreichend erwiesen, um eine Genauigkeit im mm-Bereich zu erzielen. Im Datencenter werden dann die Positionen mithilfe einer GNSS Prozessierungssoftware (Bernese, rtklib, etc.) verarbeitet und via Web/Datenbank zur Verfügung gestellt.

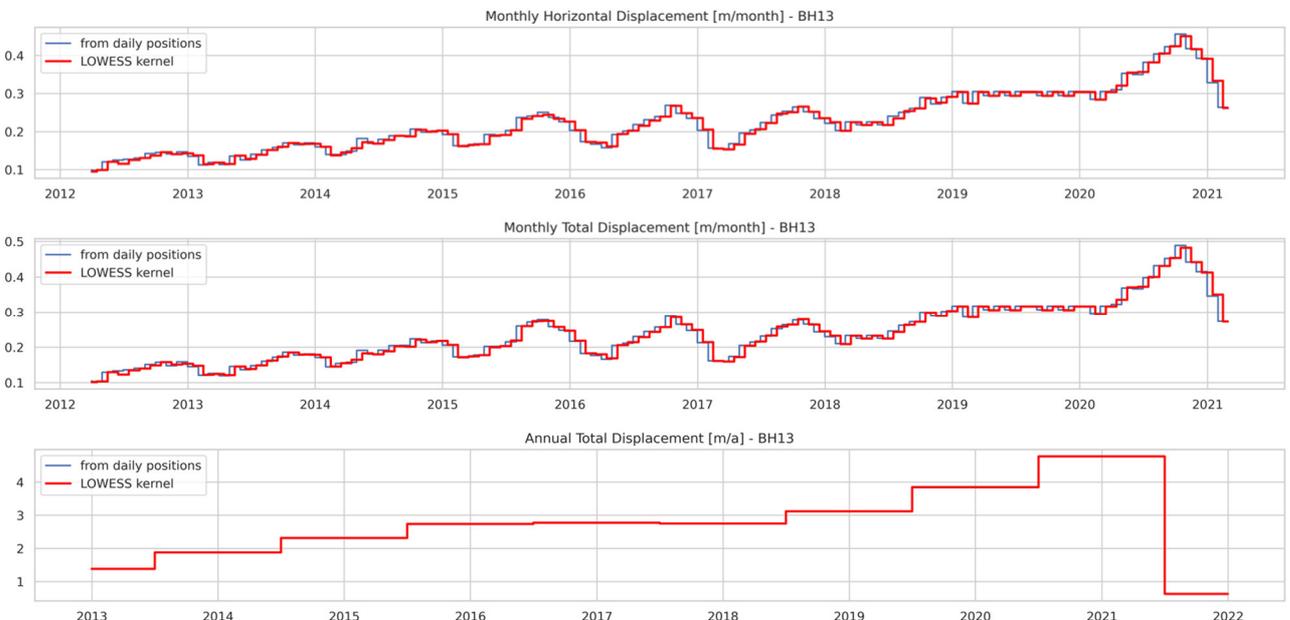
### **Datenprodukte**

Das primäre Datenprodukt der vorgestellten Methode sind hochaufgelöste Koordinatenzeitreihen. Weiterhin sind aus den von uns entwickelten Geräeten auch Inklinometerzeitreihen verfüegbar. Daraus lassen sich dann verschiedene hoehwertige Datenprodukte und Darstellungen generieren.

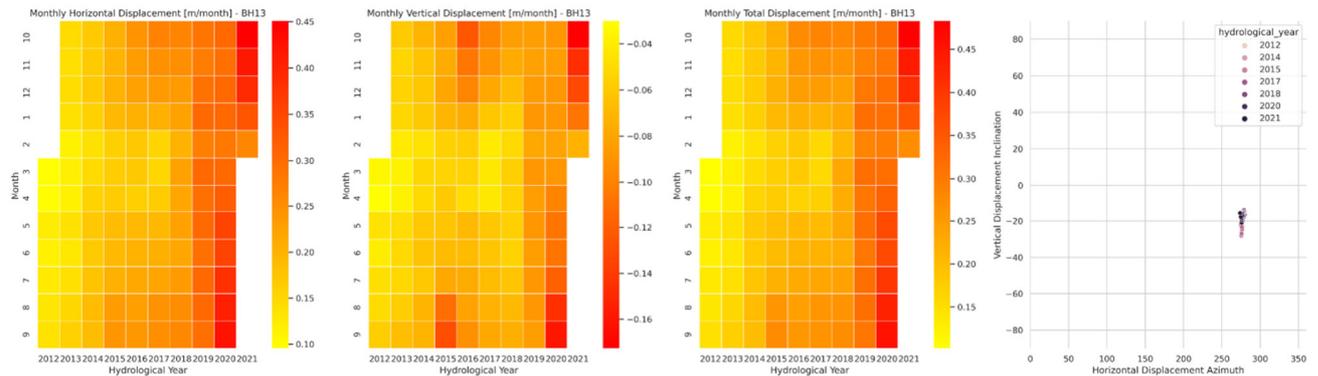


**Abb.3.** Die Positions- (links) und Inclinometerdaten (rechts) ermöglichen eine detaillierte Interpretation. Der Sprung der hier in den Daten der Position LS05 in der Breithorn Hangrutschung Herbriggen (Switzerland) sichtbar ist rührt von einem spontanen Versatz durch oberflächliches Gleiten des Blockes her.

Als geeignet für die allgemeine Interpretation haben sich Monats- und Jahresaggregate der Verschiebungen herausgestellt. Insbesondere bei der Gegenüberstellung mit Differenzdaten aus manueller Kampagnenbasierter Erhebung ist jedoch Vorsicht geboten, da die manuell erhobenen Daten typischerweise nicht am gleichen Tag erhoben werden und so einmal größere und einmal kleinere Zeitintervalle abdecken.



**Abb.4.** Die Monats- bzw. Jahresaggregate der Verschiebungen zeigen die stetige Beschleunigung der Bewegungen die auf dem Breithorn/Bielzug Blockgletscher, Gemeinde Herbriggen (Switzerland) beobachtet werden.



**Abb.5.** Eine alternative Darstellung erlaubt es visuell auf die kritischen Aspekte hinzuweisen. Weiterhin lässt sich durch Darstellung der Horizontalen, der Vertikalen, der totalen Verschiebungskomponenten bzw. der Richtungsstabilität der Bewegung differenziertes Prozesswissen erarbeiten. Breithorn/Bielzug Blockgletscher, Gemeinde Herbriggen (Switzerland)

## Anwendungsbeispiele

Die Erprobung der permanenten Instrumentierung mit GNSS Instrumenten zum detaillierten Erfassen von Hangbewegungen startete im Sommer 2010 auf der orographisch rechten Seite des Mattertales im Bereich des Dirruhorn Blockgletschers über dem Dorf Herbriggen (Wirz et al., 2014b). In diesem Bereich gibt es verschiedene Hangbewegungen, teils mit einer langen Historie bezüglich der von ihnen ausgehenden Naturgefahren und Maßnahmen: Hangrutschungen und Sackungen, große Felsstürze, aktive sowie inaktive Blockgletscher, Murgänge etc. (Wirz et al., 2013). Die frühesten Dokumentierten Maßnahmen bzgl. Naturgefahren datieren auf das Jahr 1945 zurück als am Grabengufer Gemeinde Randa Verbauungen erstellt wurden sowie 1959 als das Dorf Herbriggen auf Grund von festgestellten tiefen Rissen in der Schneedecke sowie im Boden im Bereich der Längschnee evakuiert wurde. Während des Studienzeitraumes des ersten Forschungsprojektes X-Sense (2010-2013) gab es weitere Naturgefahren Vorkommnisse: Auf Grund der schnellen Schneeschmelze im Sommer 2013 gab es erhebliche Murgang Ereignisse unterhalb des Bielzug/Breithorn Blockgletschers auf Grund derer erneut ein Teil der Gemeinde Herbriggen evakuiert werden musste. Die Entscheidungsgrundlage für diese Maßnahmen basierte zum Teil auf den Daten der Prototyp Instrumentierung mittels GNSS.

Im Bereich des Grabengufer, Gemeinde Randa wurde im Sommer 2010 eine Fußgänger Hängebrücke nach nur 3 Monaten Betrieb durch Steinschlag zerstört. Die 2017 neu erbaute Brücke hat eine Spannweite von 494 m und wurde weiter unten im Tal platziert, um die Überquerung des Grabengufer für den Europaweg zu ermöglichen. Im oberen Bereich wird der Grabengufer Blockgletscher von einer starken Sackung mit Material befüllt. Dort sind 4x GNSS Instrumente zur Überwachung platziert um die Bewegungen zu überwachen. Im Sommer 2018 wurde ein 2000 m<sup>3</sup> großer freistehender Felsblock mittels Sprengung entfernt.

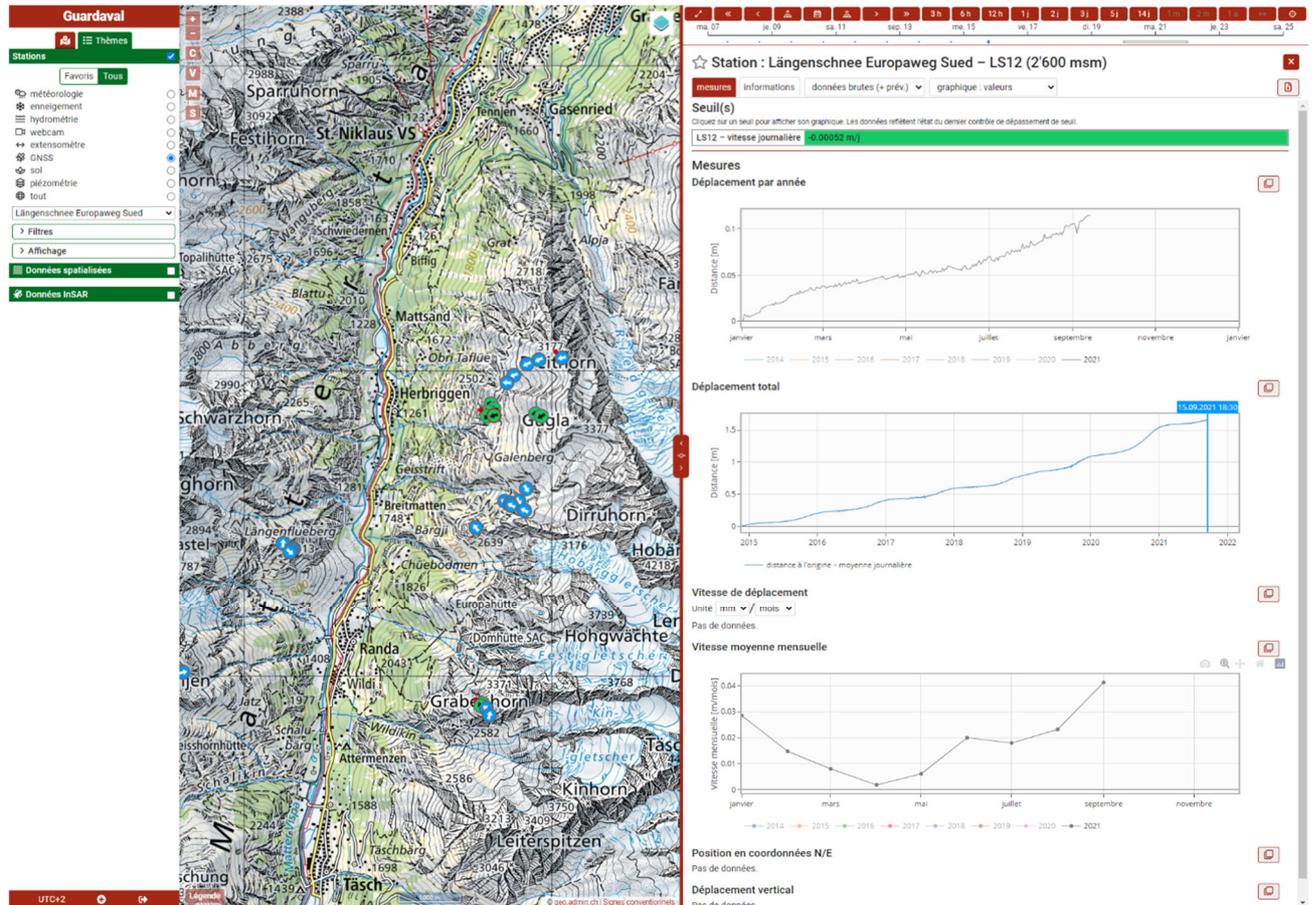


**Abb. 6.** Der freistehende Block im oberen Grabengufer Blockgletscher, Gemeinde Randa (Switzerland) wurde 2018 als Vorsichtsmaßnahme durch Sprengung entfernt. Oberhalb überwachen mehrere GNSS Sensoren die Bewegungen im Detail © PermaSense Project

Im Bereich Längschnee oberhalb von Herbriggen befinden sich auch mehrere GNSS Instrumente. Dort wurde 2016 ein großer Block auf 2524 m a.s.l. mit Ankern und Betonunterfüllung befestigt. Zur Überwachung dient ebenfalls ein GNSS Instrument. Auf Grund der festgestellten Beschleunigungen der Geländebewegungen im gesamten Gebiet wurde der Zonenplan von Herbriggen revidiert und 2019/2020 ein System aus mehreren Schutzdämmen gebaut.

Im Bereich des Ritigraben, Gemeinde Grächen hat der gleichnamige Blockgletscher zu mehreren Murgang Ereignissen mit erheblichem Schaden geführt (Totalschaden Kläranlage 2018). Auch dort wird heute mit GNSS überwacht (Kenner et al., 2017, 2018).

Der Grossgufer oberhalb von Randa ist einer der größten Felsstürze aus jüngerer Zeit in den gesamten Alpen mit einem Volumen von ca.  $30 \times 10^6 \text{m}^3$  (Willenberg et al., 2008b, a). In einer Zusammenarbeit zwischen lokalen Ingenieurbüros und den Kantonalen Behörden wurde die obere Kante dieses Felssturzes mit 3x GNSS Instrumenten ausgerüstet. Auf der Wyssen Schije überwacht ein GNSS Sensor Hangbewegungen und Steinschlagereignisse oberhalb von Lawinenverbauungen.



**Abb.7.** Heute werden alle Daten automatisch in das Datenportal GUARDAVAL des Kantons Wallis eingespeist.

Der Erfolg dieser im Rahmen des X-Sense-Projekts entwickelten kinematischen In-situ-Monitoring-Methoden und -Instrumente zeigt sich auch darin, dass diese Technologie gewählt wurde, um weitere Standorte in anderen Regionen der Schweiz zu überwachen. Sie ist heute im Standardrepertoire der Geo-Ingenieurfirmen fest verankert und wird erfolgreich eingesetzt, um Naturgefahren zu managen. Eine detaillierte Beschreibung inklusive der erhobenen Daten ist derzeit in review (Beutel et al., 2021).

**Referenzen**

Beutel, J., Biri, A., Buchli, B., Cicoira, A., Delaloye, R., Da Forno, R., Gaertner-Roer, I., Gruber, S., Gsell, T., Hasler, A., Lim, R., Limpach, P., Mayoraz, R., Meyer, M., Noetzli, J., Phillips, M., Pointner, E., Raetz, H., Scapoza, C., Strozzi, T., Thiele, L., Vieli, A., Vonder Mühl, D., Weber, S., and Wirz, V.: Kinematic observations of the mountain cryosphere using in-situ GNSS instruments, Earth Syst. Sci. Data Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-176>, in review, 2021.

Beutel, J., Buchli, B., Ferrari, F., Keller, M., Thiele, L., and Zimmerling, M.: X-Sense: Sensing in Extreme Environments, Proceedings of Design, Automation and Test in Europe (DATE 2011), pp. 1460–1465, <https://doi.org/10.1109/DATE.2011.5763236>, 2011.

Buchli, B., Sutton, F., and Beutel, J.: GPS-equipped Wireless Sensor Network Node for High-accuracy Positioning Applications, Lecture Notes on Computer Science 7158. Proc. of 9th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2012), pp. 179–195, 2012.

Kenner, R., Phillips, M., Beutel, J., Hiller, M., Limpach, P., Pointner, E., and Volken, M.: Factors Controlling Velocity Variations at Short-Term, Seasonal and Multiyear Time Scales, Ritigraben Rock Glacier, Western Swiss Alps, Permafrost and Periglacial Processes, 28,655675–684, <https://doi.org/10.1002/ppp.1953>, 2017.

Kenner, R., Phillips, M., Limpach, P., Beutel, J., and Hiller, M.: Monitoring mass movements using georeferenced time-lapse photography: Ritigraben rock glacier, western Swiss Alps, Cold Regions Science, and Technology, 145, 127–134, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.018>, 2018.

Noetzli, J., Pellet, C., and Staub, B., eds.: PERMOS 2019. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018, Glaciological Report (Permafrost) No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), <https://doi.org/10.13093/permos-rep-2019-16-19>, 2019.

Paziewski, J., Fortunato, M., Mazzoni, A., and Odolinski, R.: An analysis of multi GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results, Measurement, 175, 109–162, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109162>, 2021.690

Teunissen, P. J. and Montenbruck, O., eds.: Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>, 2017.

Willenberg, H., Evans, K. F., Eberhardt, E., Spillmann, T., and Loew, S.: Internal structure and deformation of an unstable crystalline rock mass above Randa (Switzerland): Part II — Three-dimensional deformation patterns, Engineering Geology, 101, 15–72032, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.016>, 2008b.

Wirz, V., Beutel, J., Buchli, B., Gruber, S., and Limpach, P.: Temporal Characteristics of Different Cryosphere-Related Slope Movements in High Mountains, pp. 383–390, Springer, Berlin, Heidelberg, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0_49), 2013.

Wirz, V., Beutel, J., Gruber, S., Gubler, S., and Purves, R. S.: Estimating velocity from noisy GPS data for investigating the temporal variability of slope movements, Natural Hazards and Earth System Sciences, 14, 2503–2520, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2503-2014>, 2014a.

Wirz, V., Geertsema, M., Gruber, S., and Purves, R. S.: Temporal variability of diverse mountain permafrost slope movements derived from multi-year daily GPS data, Mattertal, Switzerland, Landslides, 13, 67–83, <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0544-3>, 2014b.