Deformationsmessungen Bergsturzgebiet «Schwanderbärgli» in Schwanden bei Brienz

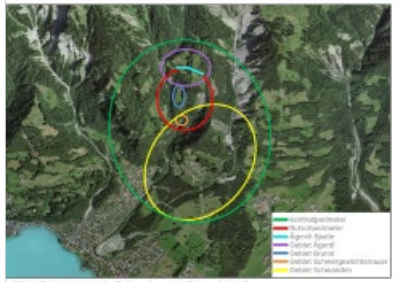


Abb. 1: Gebietsübersicht des Deformationsgebiet Schwanderbärgli

Ausgangslage

Das gesamte Bergsturzgebiet liegt an der Südflanke des Brienzer-Rothorns und dehnt sich ausgehend von der Anrisszone, der sogenannten Ägerdi-Spalte, bis hinunter zur im Jahr 1911 erstellten Schwer-gewichtsmauer aus. Die Fläche der bewegten Masse beträgt rund 60 Hektaren mit einem geschätzten Volumen von 7 Millionen Kubikmeter.

Deformationsmessung:
- Seit dem Jahr 1989 von der FHNW durchgeführt.
- Innerhalb und ausserhalb des Gebietes sind insgesamt 65 Punkte fest versichert.
- Von den Jahren 1989-1999 etwa 10 cm bis 15 cm Verschiebung in der Lage pro Jahr.
- Ab dem Jahr 2000 etwa 2 cm Verschiebung in der Lage pro Jahr.

Differenz V4.0.0.4403 zu V4.3.0.48031			
Session 2			
Punkt	Ost [mm]	Nord [mm]	Ortho. Höhe [mm]
7000	0.1	0.8	4.0
7015	-0.6	-1.0	2.3
7016	-1.0	-1.5	4.0
9000	0.2	0.3	-0.7
9500	0.1	0.2	0.0
TP505	0.8	-0.1	5.0
TP506	0.0	0.0	0.0
TP510	-0.2	-0.1	1.4

Abb. 3: Resultate der Session 2 aus der Exceltabelle «INFINITY-Versionsvergleich»

Versionsvergleich INFINITY

Verschiedene Versionen wurden geprüft und miteinander verglichen:
- Version 4.0.0.44003 (Auswertung 2022)
- Version 4.2.1.45798 (Start der Bachelorarbeit 2025)
- Version 4.3.0.48031 (drei Wochen nach Start der Bachelorarbeit 2025)

Vorgehen:
Auswertung der Basislinien mit Daten aus dem Jahr 2022 und verschiedener Versionen.
Parametereinstellungen müssen identisch sein. Die Koordinaten werden miteinander verglichen.

Werteangabe der Differenzen:
Maximalwerte in Ostrichtung bei -2.4 mm (Session 3)
in Nordrichtung bei -1.5 mm (Session 2, 3)
In der Höhe bei 5 mm, -5 mm (Session 2, 4)

Abb. 4: Gegenseitige-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung mit Leica TS60 (Punkt EXT800)

Refraktionskoeffizient

Problem:
Die Refraktion beeinflusst den Wert der Höhenbestimmungen stark.
Der Standardwert für die Refraktion (0.13 ± 0.06) stimmt selten mit der Realität überein.

Lösungsansatz:
- Bestimmung durch gegenseitige-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung.
- Bestimmung aus meteorologischen Messungen.

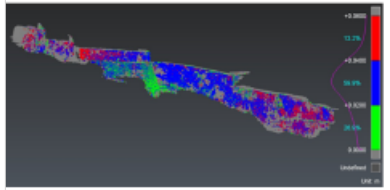


Abb. 7: Flächenhafte Deformationsauswertung der Punktwolken 2022 und 2024 als Vergleich

Phasen der Auswertung

2.5D-Auswertung:
1. Grundlagedaten
2. Mathematisches Modell
3. Versionsvergleich Leica Infinity
4. GNSS-Auswertung mit Leica Infinity
5. GNSS Netzausgleichung
6. Hybride Netzausgleichung
7. Ermittlung und Beurteilung der Verschiebungen

Flächenhafte Auswertung:
1. Georeferenzierung der Punktwolken
2. Bereinigung und Verknüpfung der Punktwolken
3. Flächenvergleich der Punktwolken aus verschiedenen Jahren
4. Ermittlung und Beurteilung der Verschiebungen

Punktnummer	dE [mm]	dN [mm]	dH [mm]	fs [mm]	Signifikant Lage (dE / dN)	Signifikant Höhe (dH)
210	-8	-44	-9	45	Ja	Ja
310	-5	-47	-12	47	Ja	Ja
320	-10	-46	-17	47	Ja	Ja
330	-7	-43	-17	44	Ja	Ja
340	-3	-40	-17	40	Ja	Ja
410	10	-37	-18	39	Ja	Ja
510	9	-35	-4	36	Ja	Nein
520	8	-36	-5	37	Ja	Nein
530	7	-37	-10	37	Ja	Ja
540	2	-30	-8	30	Ja	Ja
610	24	-42	-17	48	Ja	Ja
710	32	-43	-25	54	Ja	Ja
720	32	-40	-24	51	Ja	Ja
730	25	-33	-21	41	Ja	Ja
1000	-4	-5	-5	8	Ja	Nein
2000	26	-26	-6	36	Ja	Ja
3000	Festpunkt in Lage und Höhe					
3501	Neupunkt in Lage und Höhe					
4501	Neupunkt in Lage und Höhe					

Abb. 8: Resultate aus dem Gebiet Schwergewichtsmauer aus der Deformationsanalyse

Resultate

Maximale Verschiebungen in den Gebieten
Gebiet «Ägerdi»:
- Lageverschiebung (fs) = 41 mm
- Höhenverschiebung dH = - 35 mm

Gebiet «Brunni»:
- Lageverschiebung (fs) = 54 mm
- Höhenverschiebung dH = - 30 mm

Gebiet «Schwergewichtsmauer»:
- Lageverschiebung (fs) = 54 mm
- Höhenverschiebung dH = - 25 mm

Gebiet «Schwanden»:
- Lageverschiebung (fs) = 50 mm
- Höhenverschiebung dH = - 18 mm

Abb. 9: Trigonometrische Höhenbestimmung mit Leica TS60 (Punkt TP505)

Fazit & Ausblick

Das Rutschgebiet hat sich leicht beschleunigt, stellt allerdings voraussichtlich bis zur nächsten Folgemessung in ca. 2 Jahren keine erhöhte Gefahr für die Bevölkerung dar.

Die alternative Methode der meteorologischen Messung zur Bestimmung des Refraktionskoeffizienten, weicht nicht signifikant von der bisher bewährten Methode ab. Allerdings muss dieser Vergleich in Zukunft erweitert werden, um eine ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen.

Der Leica INFINITY Versionsvergleich hat aufgezeigt, dass die entstandenen Differenzen durch die unterschiedlichen Rechenkernels grenzwertig für eine Deformationsanalyse mit dieser Genauigkeit sind.

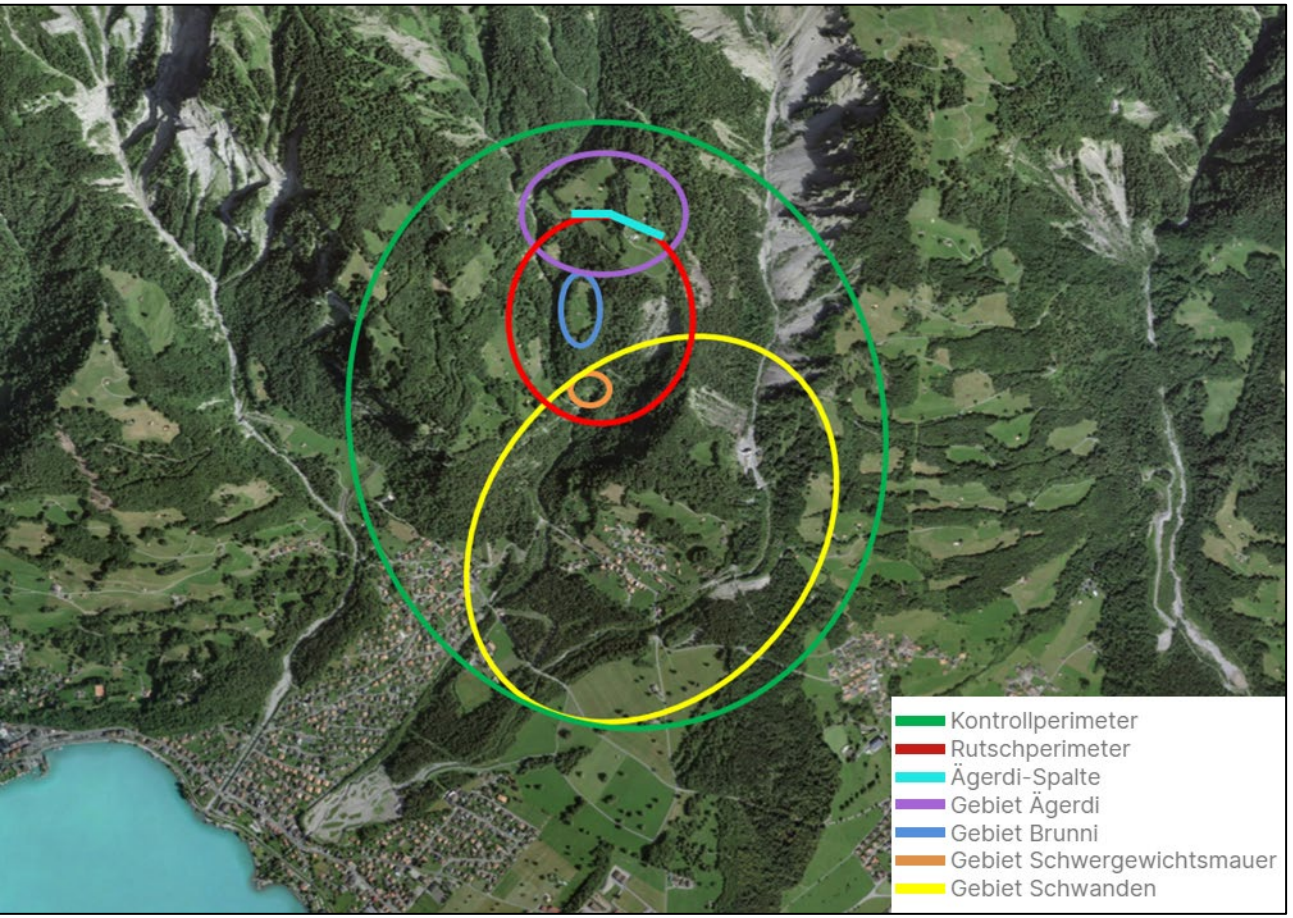


Abb. 1: Gebietsübersicht des Deformationsgebiet Schwanderbärgli

Ausgangslage

Das gesamte Bergsturzgebiet liegt an der Südflanke des Brienzer-Rothorns und dehnt sich ausgehend von der Anrisszone, der sogenannten Ägerdi-Spalte, bis hinunter zur im Jahr 1911 erstellten Schwer-gewichtsmauer aus. Die Fläche der bewegten Masse beträgt rund 60 Hektaren mit einem geschätzten Volumen von 7 Millionen Kubikmeter.

<u>Deformationsmessung</u>:

- Seit dem Jahr 1989 von der FHNW durchgeführt.
- Innerhalb und ausserhalb des Gebietes sind insgesamt 65 Punkte fest versichert.
- Von den Jahren 1989-1999 etwa 10 cm bis 15 cm Verschiebung in der Lage pro Jahr.
- Ab dem Jahr 2000 etwa 2 cm Verschiebung in der Lage pro Jahr.

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Abb. 2: Messung THB mit Leica TS60 oberhalb von Schwanden bei Brienz (EX7000)

Zielsetzungen

Präzise und verlässliche Aussage über Verschiebung des Deformationsgebiets treffen und auf Signifikanz prüfen. Bewegungsverhalten des Gebietes analysieren.

Vergleich zweier Methoden zur Bestimmung des Refraktionskoeffizienten

- Gegenseitig-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung
- meteorologische Messung

Vergleich verschiedener Versionen der Software Leica INFINITY, da diese aufgrund von Aktualisierung der Auswertemodelle zu verschiedenen Ergebnissen der Deformationsauswertung führen können.

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Versionsvergleich INFINITY

Differenz V4.0.0.4403 zu V4.3.0.48031			
Session 2			
Punkt	Ost [mm]	Nord [mm]	Ortho. Höhe [mm]
7000	0.1	0.8	4.0
7015	-0.6	-1.0	2.3
7016	-1.0	-1.5	4.0
9000	0.2	0.3	-0.7
9500	0.1	0.2	0.0
TP505	0.8	-0.1	5.0
TP506	0.0	0.0	0.0
TP510	-0.2	-0.1	1.4

Abb. 3: Resultate der Session 2 aus der Exceltabelle «INFINITY-Versionsvergleich»

Verschiedene Versionen wurden geprüft und miteinander verglichen:

- Version 4.0.0.44003 (Auswertung 2022)
- Version 4.2.1.45798 (Start der Bachelorarbeit 2025)
- Version 4.3.0.48031 (drei Wochen nach Start der Bachelorarbeit 2025)

Vorgehen:
Auswertung der Basislinien mit Daten aus dem Jahr 2022 und verschiedener Versionen. Parametereinstellungen müssen identisch sein. Die Koordinaten werden miteinander verglichen.

Werteangabe der Differenzen:
Maximalwerte in Ostrichtung bei -2.4 mm (Session 3)
in Nordrichtung bei -1.5 mm (Session 2, 3)
In der Höhe bei 5 mm, -5 mm (Session 2, 4)

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Abb. 4: Gegenseitige-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung mit Leica TS60 (Punkt EX7000)

Refraktionskoeffizient

Problem:
Die Refraktion beeinflusst den Wert der Höhenbestimmungen stark.
Der Standardwert für die Refraktion (0.13 ± 0.06) stimmt selten mit der Realität überein.

Lösungsansatz:
- Bestimmung durch gegenseitige-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung.
- Bestimmung aus meteorologischen Messungen.

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

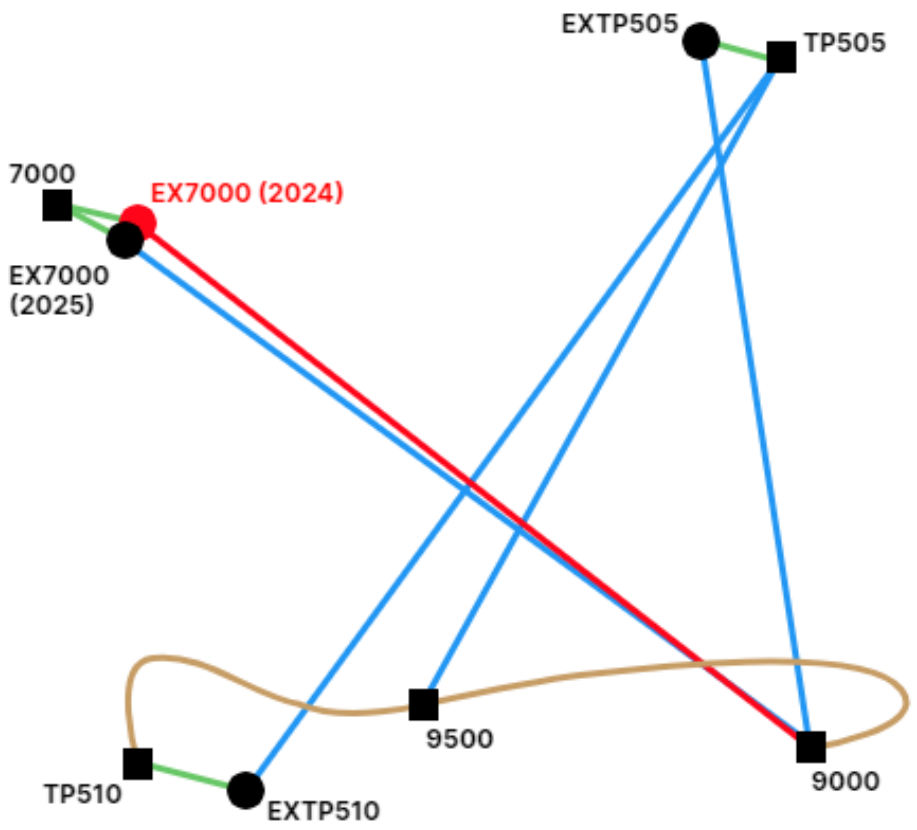


Abb. 5: Gegenseitige-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung aus dem Jahr 2024

Gegenseitig-gleichzeitige Vertikalwinkelmessung

Die trigonometrische Höhenbestimmung wird vor allem verwendet bei grossen Höhenunterschieden, da das geometrische Nivellement sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. Durch gegenseitige und gleichzeitige Vertikalwinkelmessungen lässt sich der geltende Refraktionskoeffizienten berechnen, der dafür benötigt wird.

Meteorologische Messung

Datenlogger zeichnen auf Stand- und Zielpunkt die Werte auf. Er zeichnet Temperatur t, Luftdruck p und weitere Werte auf. Mit der Formel $k = 503 \cdot \frac{p}{t^2} \cdot (0.0342 + \frac{dt}{dh})$ (Skript Ingensand GMT 2011) kann der Refraktionskoeffizient berechnet werden.

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Station	k_ggV	k_mM	Δk
Station 1 EX7000-9000 (2024)	0.14	0.16	0.02
Station 2 EX7000-9000 (2024)	0.14	0.18	0.04
Station 1 EX7000-EXTP9000 (2024)	0.12	0.13	0.01
Station 2 EX7000-EXTP9000 (2024)	0.13	0.13	0.00
Station 1 TP505-EXTP510 (2025)	0.09	0.16	0.07
Station 2 TP505-EXTP510 (2025)	0.10	0.16	0.06
Station 1 EXTP505-9000 (2025)	0.12	0.12	0.00
Station 2 EXTP505-9000 (2025)	0.13	0.13	0.00
Station 1 EX7000-9000 (2025)	0.13	0.20	0.07
Station 1 EX7000-9000 (2025)	0.11	0.19	0.08
Station 1 TP505-9500 (2025)	0.16	0.19	0.03
Station 2 TP505-9500 (2025)	0.15	0.18	0.03
Mittelwert	0.13	0.16	0.03
Standardabweichung Einzel	0.020	0.028	
Standardabweichung Mittel	0.005	0.008	
Mittel mit t-Verteilung	0.006	0.008	

Abb. 6: Vergleich der Methoden ggV und mM zur Berechnung des Refraktionskoeffizienten

Vergleich der Methoden

Die Standardabweichung der meteoroloigischen Messungen (mM) weicht laut dem F-Test mit einem Testrisiko von α = 5% nicht signifikant von der Methode der gegenseitig-gleichzeitigen Vertikalwinkelmessung (ggV) ab.
Ebenso überschreiten die Differenzen der einzelnen Messungen die 2σ-Grenze nicht.

Es ist eine systematische Erhöhung des Refraktionskoeffizienten der mM-Methode erkennbar. Die Differenz von 0.03 macht allerdings rund einen Zentimeter bei der Höhenbestimmung mit 2 Kilometer Distanz aus.

Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

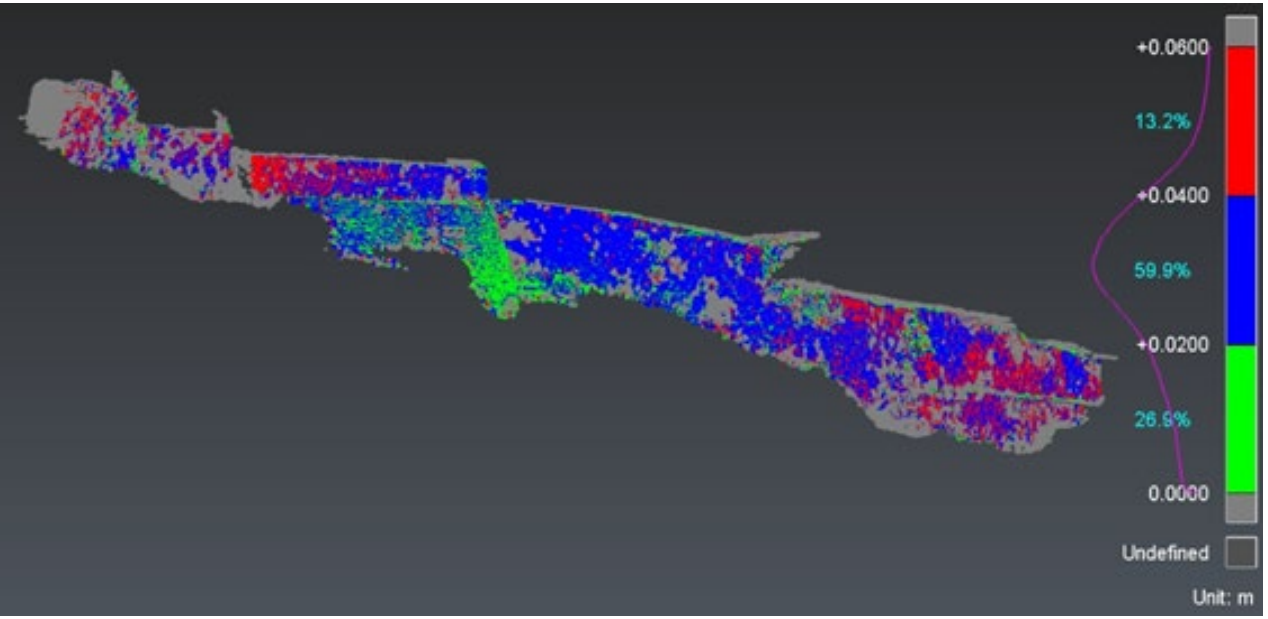


Abb. 7: Flächenhafte Deformationsauswertung der Punktwolken 2022 und 2024 als Vergleich

Phasen der Auswertung

<u>2.5D-Auswertung</u>:

1. Grundlagedaten
2. Mathematisches Modell
3. Versionsvergleich Leica Infinity
4. GNSS-Auswertung mit Leica Infinity
5. GNSS Netzausgleichung
6. Hybride Netzausgleichung
7. Ermittlung und Beurteilung der Verschiebungen

<u>Flächenhafte Auswertung</u>:

1. Georeferenzierung der Punktwolken
2. Bereinigung und Verknüpfung der Punktwolken
3. Flächenvergleich der Punktwolken aus verschiedenen Jahren
4. Ermittlung und Beurteilung der Verschiebungen

© IGEO FHNW

Punktnummer	dE [mm]	dN [mm]	dH [mm]	fs [mm]	Signifikant Lage (dE / dN)	Signifikant Höhe (dH)
210	-8	-44	-9	45	Ja	Ja
310	-5	-47	-12	47	Ja	Ja
320	-10	-46	-17	47	Ja	Ja
330	-7	-43	-17	44	Ja	Ja
340	-3	-40	-17	40	Ja	Ja
410	10	-37	-18	39	Ja	Ja
510	9	-35	-4	36	Ja	Nein
520	8	-36	-5	37	Ja	Nein
530	7	-37	-10	37	Ja	Ja
540	2	-30	-8	30	Ja	Ja
610	24	-42	-17	48	Ja	Ja
710	32	-43	-25	54	Ja	Ja
720	32	-40	-24	51	Ja	Ja
730	25	-33	-21	41	Ja	Ja
1000	-4	-5	-5	6	Ja	Nein
2000	25	-26	-6	36	Ja	Ja
3500	Festpunkt in Lage und Höhe					
3501	Neupunkt in Lage und Höhe					
4501	Neupunkt in Lage und Höhe					

Abb. 8: Resultate aus dem Gebiet Schwergewichtsmauer aus der Deformationsanalyse

Resultate

Maximale Verschiebungen in den Gebieten

Gebiet «Ägerdi»:

- Lageverschiebung (fs) = 41 mm
- Höhenverschiebung dH = - 35 mm

Gebiet «Brunni»:

- Lageverschiebung (fs) = 54 mm
- Höhenverschiebung dH = - 30 mm

Gebiet «Schwergewichtsmauer»:

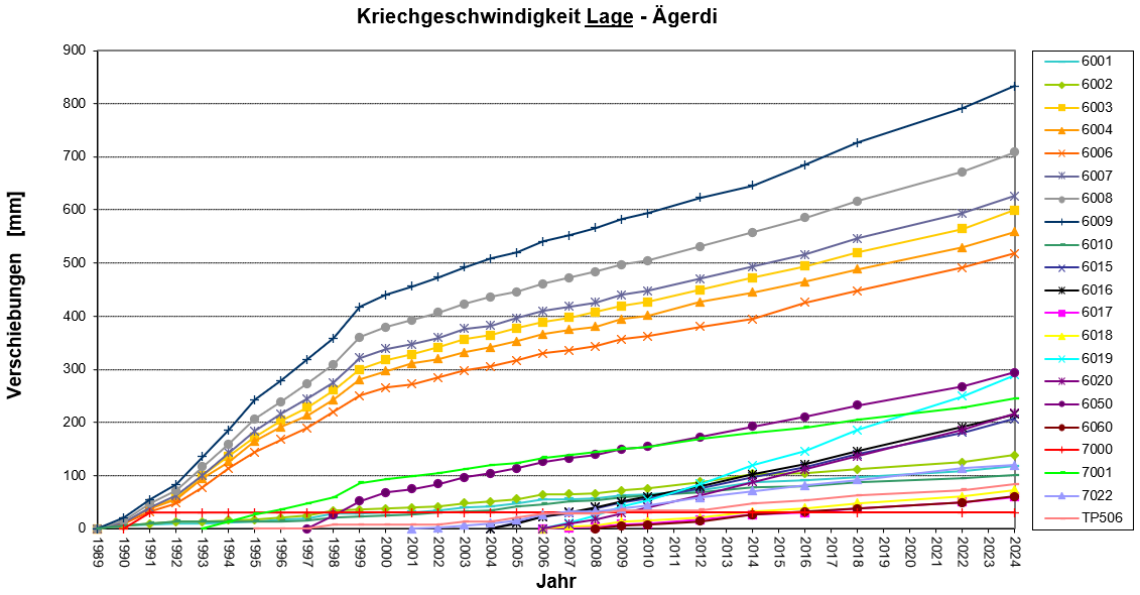
- Lageverschiebung (fs) = 54 mm
- Höhenverschiebung dH = - 25 mm

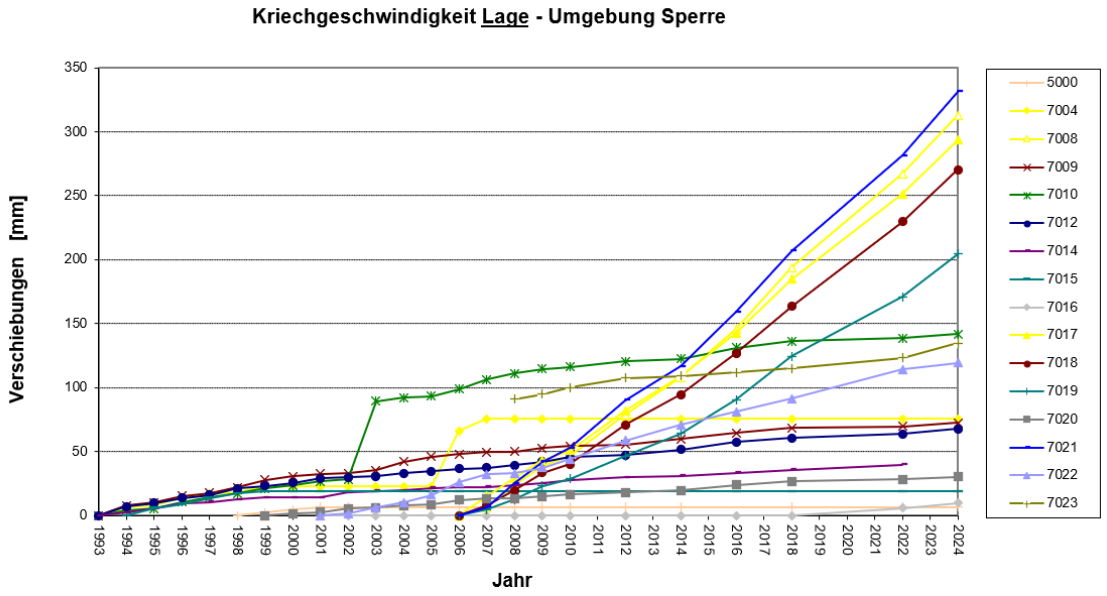
Gebiet «Schwanden»:

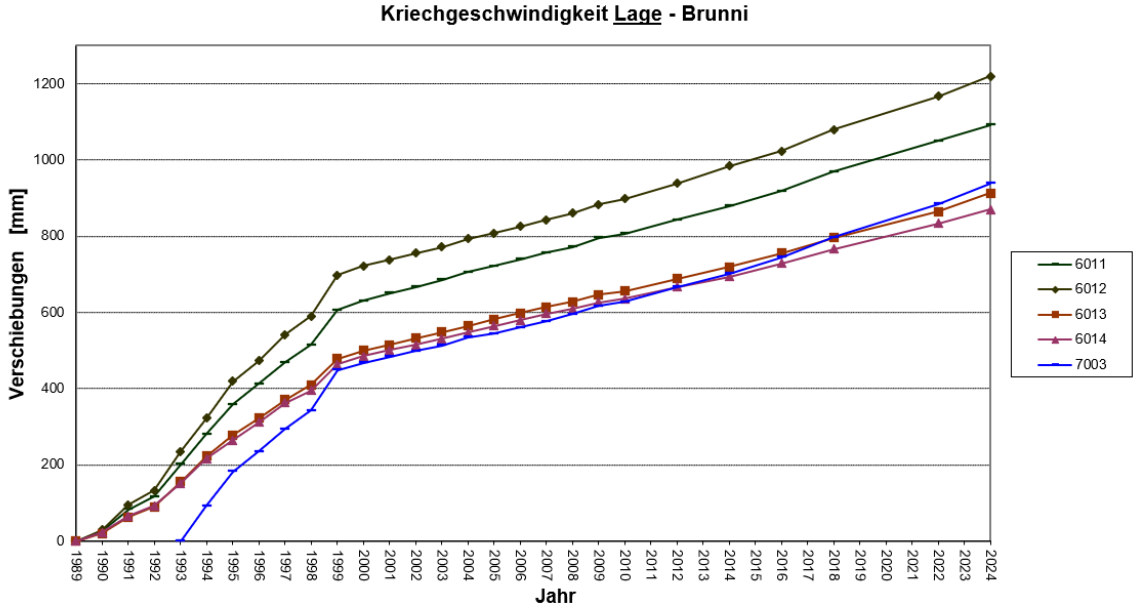
- Lageverschiebung (fs) = 50 mm
- Höhenverschiebung dH = - 18 mm

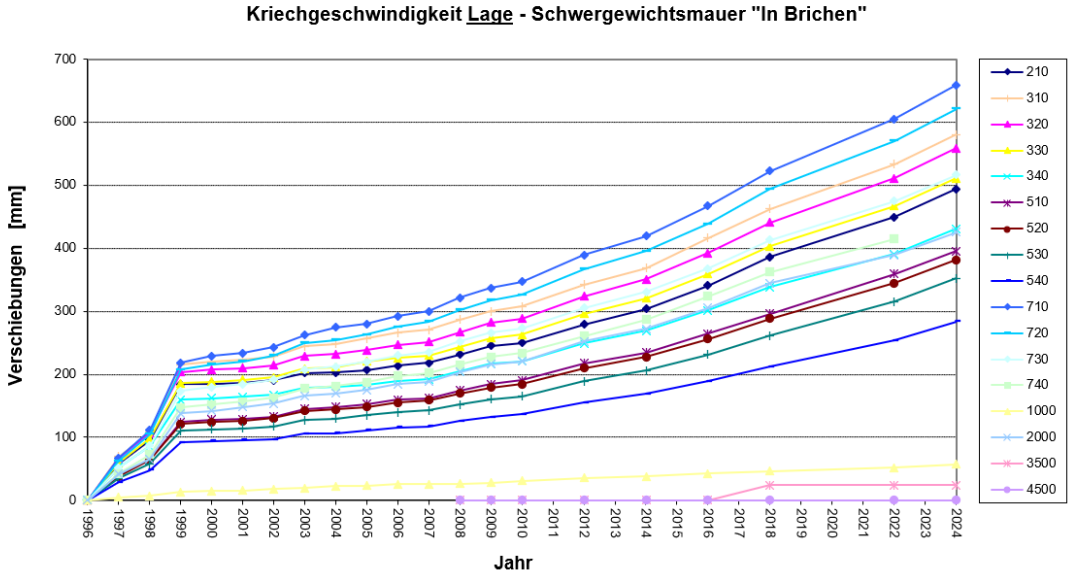
© IGEO FHNW

Kriechgeschwindigkeiten Lage



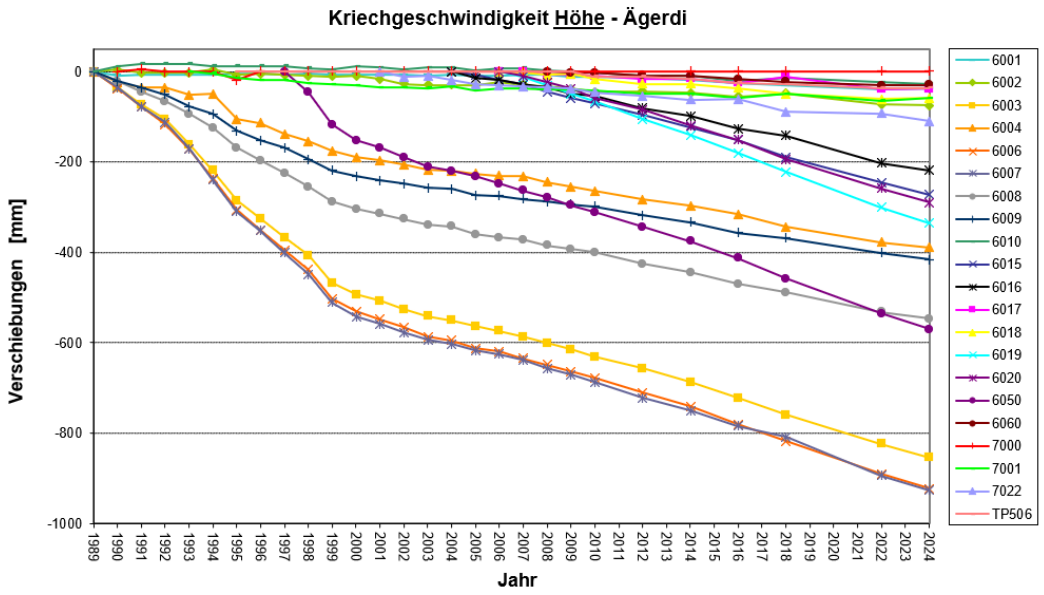


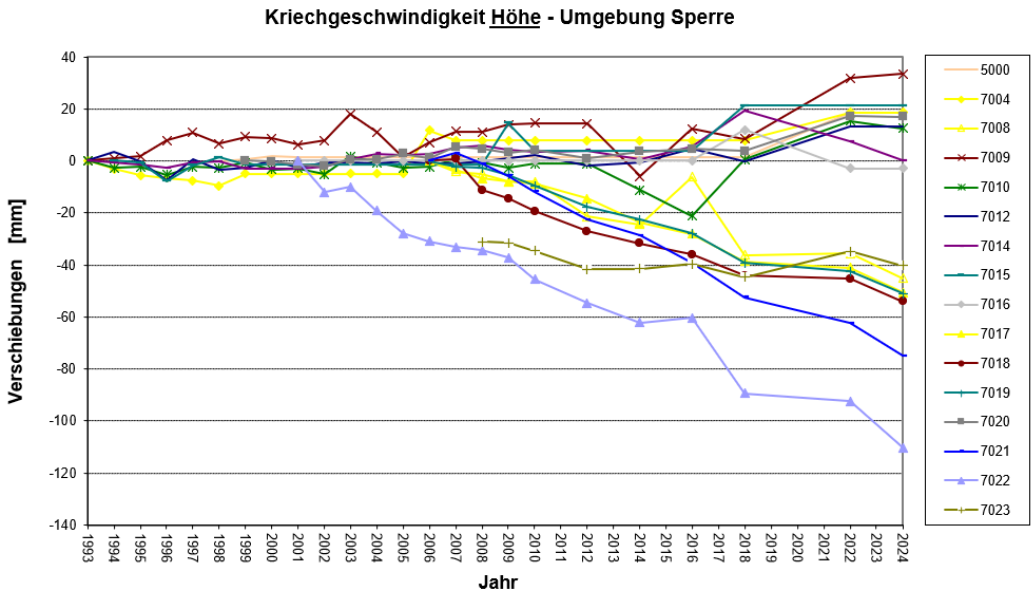


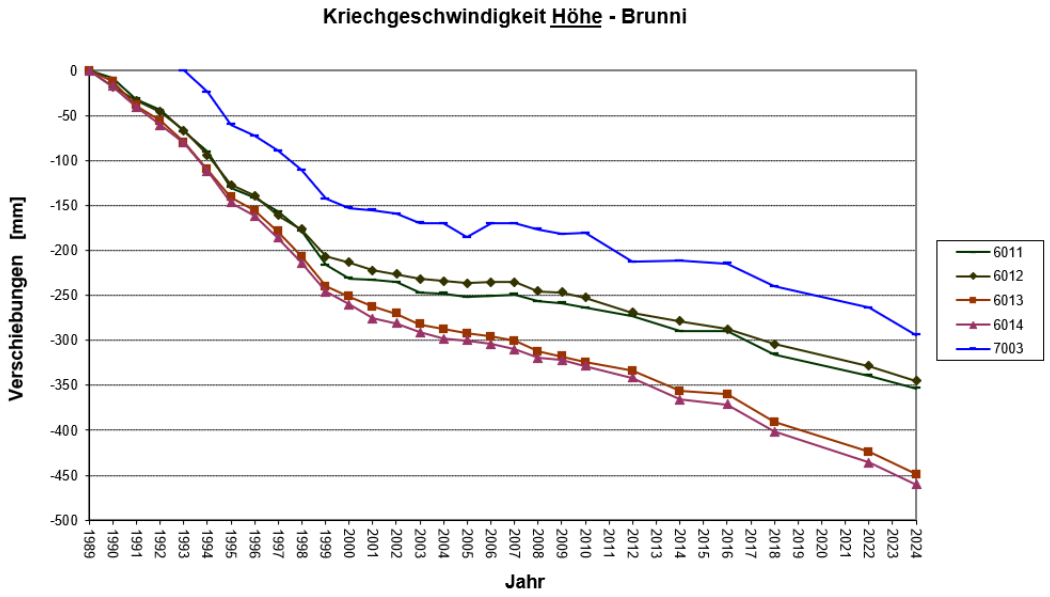


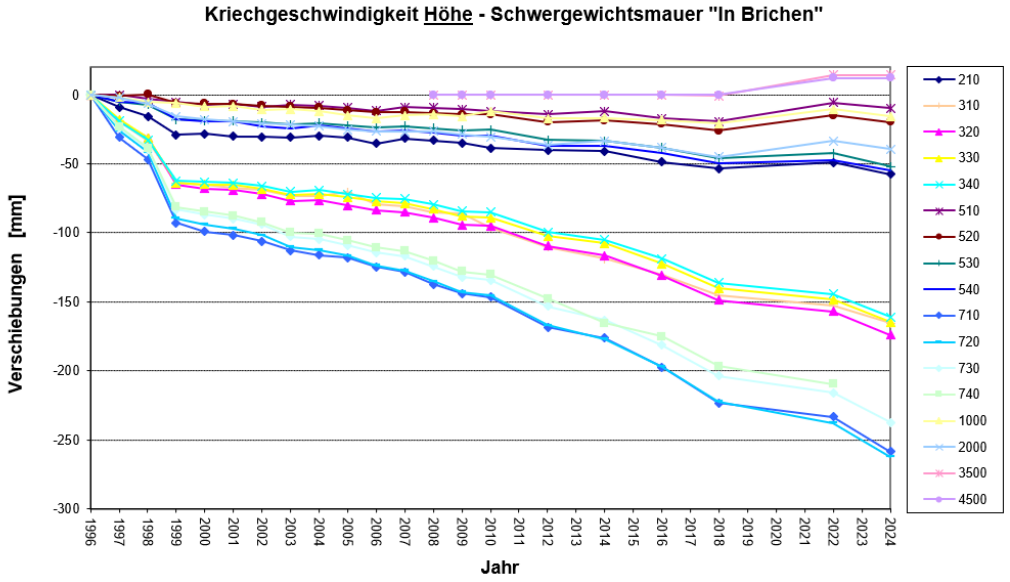
Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Kriechgeschwindigkeiten Höhe









Autor: Hartig Maurice, Erne Joel; Examinatoren: Dipl. Ing. FH Mahler Peter, Prof. Dr. Salvini Dante; Experte: Geomatik-Ing. MSc Condamin Sebastian
© IGEO FHNW

Abb. 9: Trigonometrische Höhenbestimmung mit Leica TS60 (Punkt TP505)

Fazit & Ausblick

Das Rutschgebiet hat sich leicht beschleunigt, stellt allerdings voraussichtlich bis zur nächsten Folgemessung in ca. 2 Jahren keine erhöhte Gefahr für die Bevölkerung dar.

Die alternative Methode der meteorologischen Messung zur Bestimmung des Refraktionskoeffizienten, weicht nicht signifikant von der bisher bewährten Methode ab. Allerdings muss dieser Vergleich in Zukunft erweitert werden, um eine ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen.

Der Leica INFINITY Versionsvergleich hat aufgezeigt, dass die entstandenen Differenzen durch die unterschiedlichen Rechenkernels grenzwertig für eine Deformationsanalyse mit dieser Genauigkeit sind.

© IGEO FHNW