



DIPLOMARBEIT Master Thesis

Monitoring von Massenbewegungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel

E220

Institut für Geotechnik
(Ingenieurgeologie)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Martin Rapp

05 25 213

Fünfhausgasse 20/10

1150 Wien

Wien, im Mai 2011

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit und durch das Studium begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel, der trotz seines straffen Terminplans immer für mich Zeit fand und mich durch wertvolle Anregungen und Ratschläge bei der Entstehung dieser Arbeit sehr unterstützt hat.

Weiters möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Professoren des Ingenieurgeologieinstituts für die stets freundliche und angenehme Atmosphäre und die Hilfsbereitschaft bei Problemen bedanken.

Meinen Dank möchte ich ebenfalls Herrn Dipl.-Ing. Dr. Rudolf Schmidt, von der Gebietsbauleitung Flach- und Tennengau aussprechen, der die Arbeit ermöglichte.

Meine größte Dankbarkeit gilt jedoch meiner Familie, die mich in der gesamten Ausbildungs- und Studienzeit unterstützt hat. Sie waren auch in schwierigen Zeiten stets geduldige Zuhörer und Ratgeber und ermöglichten mir damit den erfolgreichen Abschluss dieses Studiums. Besonders herausheben möchte ich in diesem Zusammenhang meine Eltern Margit und Wilhelm, meinen Großvater Alfred und meine beste Freundin und Cousine Maria.

Abschließend möchte ich mich noch bei all jenen Freunden und Bekannten bedanken, die zwar hier nicht namentlich erwähnt wurden, jedoch ebenfalls wichtige Begleiter auf meinem Lebensweg sind.

Kurzfassung

Massenbewegungen sind weltweit auftretende Naturereignisse, die ein erhebliches Risiko für den Menschen und die Infrastruktur darstellen. Massenbewegungen können durch die unterschiedlichsten Einflüsse ausgelöst werden. Daher ist die rechtzeitige Erkennung wesentlich. Für sämtliche nachfolgende Maßnahmen – wie Modellversuche, Risikoberechnungen, Szenarienentwicklungen, Stabilisierungsmaßnahmen usw. – müssen Monitoringergebnisse die Grundlage sein.

Für das Monitoring von Massenbewegungen steht eine Vielzahl von Messsensoren und Messsystemen zur Verfügung. Die Wahl der Messverfahren ist unter anderem vom Untersuchungsgebiet, den Bewegungsmechanismen, der Bewegungsgeschwindigkeit, den Untersuchungszielen (Messgenauigkeit, Messintervall,...) und den verfügbaren finanziellen Mitteln abhängig.

Der Darstellung der Messergebnisse und deren Interpretation kommt entscheidende Bedeutung zu. Für Plausibilitätsprüfungen sowie zur schnellen Erkennung von Trends und Ausreißern sind grafische Darstellungen unumgänglich.

Ziel der Arbeit ist es, einen Überblick über verfügbare Monitoringverfahren zu geben, diese zu erläutern und anhand von Beispielen mögliche Anwendungen aufzuzeigen. Außerdem werden an den Beispielen Gschliefgraben und Murau Datenauswertungen durchgeführt. Dabei wird die in der Realität erreichbare Messabweichung von Monitoringsystemen aufgezeigt sowie am Beispiel Murau der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Verschiebungsgeschwindigkeit untersucht.

Abstract

Mass movements are worldwide occurring natural events, which entail a significant risk to people and their infrastructure. They can be triggered by a big variety of influences. Therefore it is important to detect them timely, because all following measures – such as model tests, risk calculations, scenario developments, counter-measures, etc. – have to be based on monitoring results.

A wide range of sensors and measurement systems for monitoring is existing. The choice of the most adequate system depends on the study area, the movement mechanisms, the displacement rates and the available financial resources.

Appropriate representations of the monitoring results as well as their interpretation are of exceptional importance. Graphical representations are the best option for plausibility checks and for quick identifying trends and outliers.

The thesis is to give an overview and a description of the mode of operation of available monitoring systems. Examples demonstrate, how the systems work and can be used. Data analyses of examples show the measurement accuracy of monitoring systems obtainable in reality and the relation between precipitation and displacement rate.

Inhaltsverzeichnis

1. Massenbewegungen.....	7
1.1 Allgemeines.....	7
1.2 Bearbeitungsgebiet.....	8
2. Ablöse- und Bewegungsmechanismen.....	9
2.1 Ablösemechanismen und Versagensmechanismen im Festgestein.....	10
2.2 Ablösemechanismen und Versagensmechanismen im Lockergestein.....	14
3. Auslöser von Massenbewegungen.....	16
4. Monitoring von Massenbewegungen.....	18
5. Sensoren und Messsysteme.....	22
5.1 Beobachtungen des Wetters und von Quellen.....	23
5.1.1 <i>Temperaturmessung</i>	23
5.1.2 <i>Niederschlagsmessung</i>	24
5.1.3 <i>Quellbeobachtung</i>	25
5.1.3.1 <i>Schüttmengenbestimmung</i>	25
5.1.3.2 <i>Trübungsmessung</i>	26
5.2 Messung von Relativverschiebungen an der Oberfläche.....	27
5.2.1 <i>Crackmeter und Plomben</i>	27
5.2.2 <i>Manuelle Messung von Bolzenmessstrecken (mechanisches Fissurometer)</i>	27
5.2.3 <i>Fissurometer</i>	28
5.2.4 <i>Drahtextensometer</i>	29
5.2.5 <i>Laserdistanzer</i>	30
5.3 Messung von Höhenverstellungen und Neigungsänderungen an der Oberfläche.....	31
5.3.1 <i>Nivellement</i>	31
5.3.2 <i>Hydrostatisches Nivellement</i>	32
5.3.3 <i>Klinometer</i>	34
5.4 Messung von Lageveränderungen mittels trigonometrischen Methoden.....	35
5.5 Messung von Lageveränderungen mittels GPS.....	46
5.6 Messung von Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bohrloch.....	47
5.6.1 <i>Extensometer</i>	47
5.6.2 <i>Inklinometer</i>	49
5.6.3 <i>Trivec Sonde</i>	50
5.6.4 <i>Time Domain Reflectometry</i>	50
5.7 Messung von Kräften und Spannungen.....	51
5.7.1 <i>Piezometer</i>	52
5.7.2 <i>Druckkissen</i>	54
5.7.3 <i>Ankerkraftgeber</i>	54
5.8 Messung von Erschütterungen mittels Geophonen (Mikroseismik).....	55
5.9 Messung durch Fernerkundungen.....	56
5.9.1 <i>Laserscan</i>	57
5.9.2 <i>Radarmessungen</i>	59
5.9.3 <i>Luftbildauswertung</i>	60
5.10 Zusammenfassende Übersicht und manuelle Temperaturkorrektur.....	61

6. Darstellung der Messergebnisse.....	67
6.1 Darstellung von Daten einzelner Messsensoren in einer Grafik.....	67
6.2 Darstellung und Zusammenführung mehrerer Messsensoren in einer Grafik.....	68
7. Interpretation der Messergebnisse.....	70
7.1 Ausreißer.....	70
7.2 Datenausfall.....	72
7.3 Erkennung des Versagensmechanismus.....	72
7.4 Prognosen.....	73
7.5 Alarmwerte.....	74
8. Beispiele für Monitoring von Massenbewegungen.....	74
8.1 Aknes (N).....	74
8.2 Randa (CH).....	76
8.3 Beauregard (I).....	78
8.4 Gschlifgraben (A).....	80
8.4.1 <i>Ermittlung der Messabweichung eines GPS-Systems am Beispiel des</i> <i>Gschlifgrabens</i>	82
8.5 Murau (A).....	89
8.5.1 <i>Untersuchung des Niederschlagseinflusses auf die Bewegungsraten im Beispiel</i> <i>Murau</i>	91
9. Zusammenfassung.....	96
10. Verzeichnisse.....	97
10.1 Abbildungsverzeichnis.....	97
10.2 Tabellenverzeichnis.....	100
10.3 Literaturverzeichnis.....	101

1. Massenbewegungen

Massenbewegungen sind weltweit auftretende Naturereignisse, die Menschenleben gefährden und/oder fordern und katastrophale Auswirkungen auf die Infrastruktur haben können.

Ziel der Diplomarbeit ist es, eine Übersicht über Massenbewegungen zu geben und die Aufgaben, die Sensoren, die Handhabung sowie die Auswertung der Ergebnisse von Monitoringsystemen zu erläutern. Dabei wird auf die Anwendbarkeit der Messverfahren als Teil eines Frühwarnsystems besonders Bedacht genommen. Abschließend werden an Fallbeispielen die Ergebnisse von Datenauswertungen dargelegt.

1.1 Allgemeines

In der Literatur werden Massenbewegungen unterschiedlich definiert. Durch folgende Auszüge soll ein Überblick darüber gegeben werden, was unter Massenbewegungen in dieser Arbeit zu verstehen ist. Beispielsweise können diese wie folgt definiert werden:

„Massenbewegungen sind hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- und/oder Lockergesteinen (sowie Bodenmaterial). Sie umfassen zur Hauptsache Sturzprozesse (Stein- und Blockschlag, Fels- und Bergsturz), Rutschungen und Hangmuren. Sie können schnell und plötzlich auftreten (z.B. Sturzprozesse) oder als langsame, kontinuierliche Prozesse ablaufen (z.B. Rutschungen).“ (Lateltin, 1997)

Von Genske (2008) wird eine Massenbewegung folgendermaßen beschrieben:

„Unter Massenbewegung versteht man die talabwärts gerichtete Verlagerung von Gebirgsmassen. Massenbewegungen unterliegen Mechanismen (die im Kapitel 2 aufgelistet und erläutert werden), die zu erkennen eine Untersuchung des geologischen Aufbaus des Hangs und seiner Umgebung sowie die Erfassung der wirksamen Kräfte voraussetzt.“

Eine genauere Gliederung der Massenbewegungen kann durch die Definition der „Verlagerungsart“ in Massenselbstbewegung (durch Gravitation) und Massentransport (durch Wasser, Wind und Gletscher) gegeben werden (Bunza, 1992).

Zusammenfassend wird im vorliegenden Text unter einer Massenbewegung eine hangabwärts gerichtete Massenselbstbewegung aus Fest- oder Lockergestein verstanden, die sich aus – im Kapitel 2 erläuterten – unterschiedlichen Ablöse- und Bewegungsmechanismen, oder Kombinationen aus diesen Mechanismen zusammensetzt und sowohl langsam als auch schnell ablaufen kann.

Massenbewegungen fanden immer wieder statt. Als Beispiele sind Flims vor ~10.000 Jahren, Tschirgat vor ~5.000 Jahren, Schönau vor ~850 Jahren, Goldau vor ~200 Jahren, usw. anzuführen. Der zum Teil subjektiv empfundene Anstieg der Ereignisse ist auch auf die globale mediale Berichterstattung zurückzuführen. Zu einer tatsächlichen Häufung von Massenbewegungen kann es jedoch lokal durch Bevölkerungszuwachs und fortschreitenden Tourismus kommen. Da dies meist zur Erschließung gefährdeter Gebiete und zu anthropogenen Eingriffen, die die Standsicherheit eines Hanges beeinträchtigen, führt. Weitere Ursachen könnten das verstärkte Auftreten von extremen Witterungseinflüssen – wie Starkregenereignisse – sein.

Es ist zu beachten, dass es neben den direkten Zerstörungen durch Massenbewegungen auch erhebliche sekundäre Schäden geben kann. Beispielsweise kam es beim Bergsturz von Randa (1991) durch das abgelagerte Material zum Aufstau des Matter Visper Baches und somit zu Überschwemmungen in tiefer gelegenen Ortsteilen. Weiters können durch schnell ablaufende Massenbewegungen, die in stehende oder fließende Gewässer stürzen oder gleiten, Flutwellen ausgelöst werden. Dies geschah bei Vajont (1963) in Südtalien und forderte etwa 2.000 Menschenleben. Daher ist die frühe Erkennung und Beobachtung von Bewegungen dieser Art sehr wichtig.

1.2 Bearbeitungsgebiet

Das Monitoring von Massenbewegungen ist, besonders im Hinblick auf eine Kombination des Überwachungssystems mit einer Frühwarnung, nicht bei jeder Bewegungsgeschwindigkeit sinnvoll. Daher befasst sich die vorliegende Arbeit vorwiegend mit den Geschwindigkeitsklassen 1 – 3 der Tabelle 1-1.

Velocity class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical velocity	Human response	Monitoring der Massenbewegung
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec	Nil	
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min	Nil	
5	Rapid	5×10^{-1}	1,8 m/hr	Evacuation	
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Evacuation	
3	Slow	5×10^{-5}	1,6 m/year	Monitoring	X
2	Very Slow	5×10^{-7}	16 mm/year	Monitoring	X
1	Extremely Slow			Monitoring	X

Tab. 1-1: Zusammenstellung der Geschwindigkeitsklassen von Massenbewegungen
(nach: Cruden & Varnes, 1996)

Es ist zu beachten, dass es durch den Übergang eines Versagensmechanismus in einen anderen oft auch zu einer Erhöhung der von der Bewegung ausgehenden Gefahr kommt. Beispiele dafür sind etwa der Übergang von Kriech- in Gleitbewegungen oder Gleit- in Fallmechanismen. Das Monitoring wird daher im idealen Fall bei den anfänglich langsam ablaufenden Vorgängen angewendet, um die Eintrittswahrscheinlichkeit, das Schadenspotenzial und die Folgen der Bewegung einschätzen zu können. Erst anschließend können sinnvolle Maßnahmen festgelegt werden. Weiters ist es möglich, die gemessenen Daten für Zukunftsprognosen der Massenbewegung und für Frühwarnsysteme zu verwenden. Eine ausführliche Übersicht der Aufgaben von Monitoringsystemen wird im Kapitel 4 gegeben. Die Wahl der für die Beobachtung zu verwendenden Monitoringsysteme ist von den vorhandenen Ablöse- und Bewegungsmechanismen, die im anschließenden Kapitel dargelegt werden, abhängig zu machen.

2. Ablöse- und Versagensmechanismen

In der Literatur ist eine Vielzahl von Klassifizierungsvarianten für Bewegungsmechanismen zu finden. Diese unterscheiden verschiedene Materialzusammensetzungen, die Geschwindigkeit der Prozesse, deren Aktivität und weitere Parameter. Die hier gewählte Einteilung klassifiziert nach den der Bewegung zugrunde liegenden mechanischen Modellen und den Gesteinsarten. Es wird daher in Mechanismen, die im Festgestein und jenen, die im Lockergestein vorkommen, unterschieden.

2.1 Ablöse- und Versagensmechanismen im Festgestein

	Fallen von Kluffkörpern	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	Gleiten eines Kluffkörpers auf einer oder zwei Trennflächen (Translationsgleitung)	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche	P. GUSSMANN Kinematical Elements in Geomechanics. NUMOG (1990)
	Rückwärtsrotation von Kluffkörpern (Rock slumping)	D.S. KIEFFER Ph.D Thesis University of California- Berkeley (1998)
	Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neu gebildeten Gleitfläche (Rotationsgleitung)	A.W. BISHOP Geotechnique 5 (1955)
	Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluffkörper am Rand eines kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel („Hart auf Weich“)	R. POISEL & W. EPPENSTEINER Proc. 5 th Int.Symp. Landslides (1988)

Abb. 2-1: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 1
(aus: Poisel & Preh, 2004)

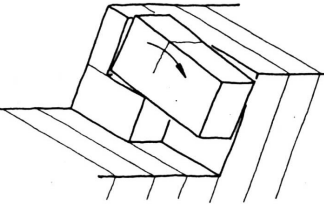
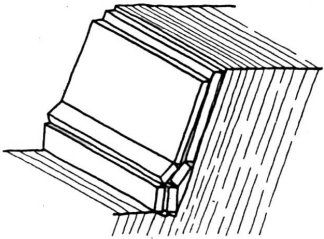
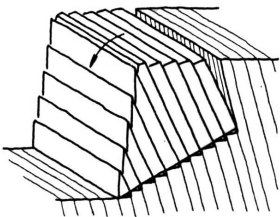
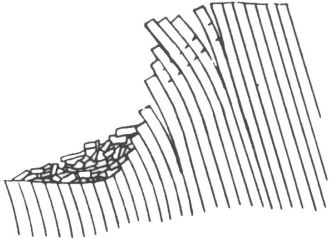
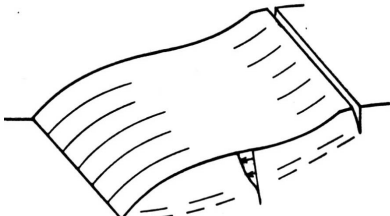
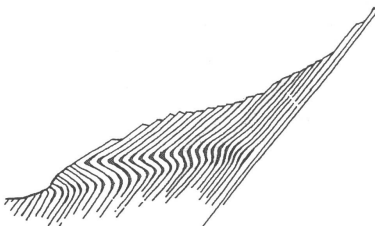
	<p>Rotation einzelner Kluffkörper (Torsionsbruch)</p>	<p>W. WITTKE Rock Mechanics. Springer (1990)</p>
	<p>Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern</p>	<p>D. S. CAVERS Rock Mechanics 14 (1981)</p>
	<p>Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern</p>	<p>R.E GOODMAN & J.W. BRAY Proc. Conf. Rock Eng. for Foundations and Slopes (1976)</p>
	<p>Biegekippen</p>	<p>M. HITTINGER University of California, Berkeley (1978)</p>
	<p>Hangkriechen</p>	<p>O.C. ZIENKIEWICZ, C. HUMPHESON & R.W. LEWIS Geotechnique 25 (1975)</p>
	<p>Knickbandsackung (Kink band slumping)</p>	<p>A. PREH PhD Dissertation, Vienna University of Technology (2004)</p>

Abb. 2-2: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 2
(aus: Poisel & Preh, 2004)

- **Fallen von Klufftkörpern:**

Das Fallen ist ein aus Überhängen stattfindender Ablösevorgang von Fels. Er findet entlang einer Ebene mit nur geringen oder keinen Scherbewegungen statt. In den meisten Fällen wird das Fallen durch einen anderen Ablösevorgang (Gleiten, Kippen, Rotieren) herbeigeführt und das Gestein bewegt sich stürzend, das heißt fallend, springend und rollend, fort.
- **Gleiten eines Klufftkörpers auf einer oder auf zwei Trennflächen**

Das Gleiten ist ein Bewegungsmechanismus, bei dem mehr oder weniger zusammenhängende Klufftkörper mit gleicher Geschwindigkeit auf einer bestehenden Gleitfläche oder einer geringmächtigen Scherverformungszone hangabwärts rutschen. Diese Art der Gleitung wird auch Translationsgleitung oder Translationsrutschung genannt.
- **Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche**

Das Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche entspricht weitgehend dem Prozess des Gleitens auf einer Trennfläche. Der Unterschied besteht darin, dass es durch die verschiedenen Neigungen der Gleitfläche zu einem höhenmäßigen Versatz der Teilkörper gegeneinander kommt.
- **Rückwärtsrotation von Klufftkörpern**

Beim Rückwärtsrotieren im Festgestein kommt es durch die spezielle Lage des Trennflächengefüges zum Gleiten von Klufftkörpern ähnlich jenem einer zu flach an die Wand angelehnten Leiter. Dies hat zur Folge, dass sich die Klufftkörper im Anbruchbereich absenken. Eine Trennflächenschar muss für diese Art der Bewegung steil und die andere flach in Richtung der Hangneigung einfallen.
- **Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neugebildeten Gleitfläche**

Dieser Versagensmechanismus tritt im Festgestein bei stark verwitterten und bei stark geklüftetem Fels durch die Bildung einer neuen Bruch- bzw. Gleitfläche auf. Bei der Gleitung kommt es zur Rotation der Gleitmasse, die nur gering deformiert wird. Der Anriss wird durch eine Abschiebung gebildet und der Fuß meist aufgestaucht. In der Literatur wird dieser Mechanismus auch als Rotationsgleitung beschrieben.
- **Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Klufftkörper am Rand eines kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel („Hart auf Weich“)**

Wie die Kurzbezeichnung „Hart auf Weich“ beschreibt, kommt der Ablösemechanismus bei spröden, kompetenten Deckschichten, die auf einem plastischen, weichen (inkompetenten) Sockel lagern, vor. Dabei wird im Randbereich Felsmaterial aus der inkompetenten, unteren Schicht ausgepresst. Dies führt zu Zugspannungsrissen in der Deckschicht und somit zur Bildung turm- oder plattenförmiger Großklufftkörper aus kompetentem Gestein, die abfahren, abgleiten oder kippen können.

- Rotation einzelner Klufkörper (Torsionsbruch)

Der Ablösemechanismus kommt im Festgestein, das eine Klüftung mit großem Druchtrennungsgrad aufweist, vor. Die Rotation wird durch das Ablösen des Klufkörpers an einer Trennfläche und zufolge einer außermittigen oder nachgiebigen Auflagerung ausgelöst.
- Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Klufkörpern

Das Knickversagen kommt bei Klufkörpern vor, deren Dicke um ein Vielfaches geringer ist als deren Höhe. Es handelt sich hierbei um das auch von anderen Baustoffen bekannte Knickproblem, bei dem die Auflast oder die Eigenlast die maximal aufnehmbare Druckkraft überschreitet und es daher zu einem Ausweichen des säulen- oder tafelförmigen Klufkörpers kommt.
- Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Klufkörpern

Das Kippen entsteht durch ein Vorwärtsrotieren von Klufkörpern mit hohen Gesteinsfestigkeiten, die durch Trennflächen mit wesentlich geringerer Festigkeit gebildet sind. Die Haupttrennflächen fallen steil in den Hang ein. Die Bewegung läuft ähnlich der von umfallenden Dominosteinen ab und kommt vor allem bei gebankten und säulenartigen Gesteinen vor.
- Biegekippen

Das Biegekippen entsteht bei einscharig geklüfteten Festgesteinen. Die Trennflächen streichen parallel zum Hang und fallen steil in diesen ein. Die Klufkörper werden daher ähnlich wie Kragträger beansprucht, wodurch Biegezugrisse entstehen. Diese Biegezugrisse ermöglichen in weiterer Folge ein Abkippen der neugebildeten Klufkörper.
- Hangkriechen

Kriechen mit in relativ kurzer Zeit messbaren Deformationen kommt vor allem in Festgesteinen mit geringer Festigkeit vor. Beim Hangkriechen handelt es sich um einen Verlagerungsprozess, bei dem mit zunehmender Tiefe die Bewegungsgeschwindigkeit abnimmt und keine Gleitfläche vorhanden ist. Das Hangkriechen wurde früher auch als Sackung bezeichnet.
- Knickbandsackung

Der Begriff „kink band slumping“ wurde von Kieffer (1998) eingeführt und beschreibt eine S-förmige Verformung von annähernd hangparallel und steiler als die Hangneigung einfallenden Gesteinslagen. Numerische Untersuchungen von Preh (2004) zeigten, dass dieser Prozess von plastischen Deformationen des Gesteins und Gleiten in den Klüften bestimmt wird (Preh & Poisel, 2004; Sausgruber, 2010).

2.2 Ablöse- und Versagensmechanismen im Lockergestein

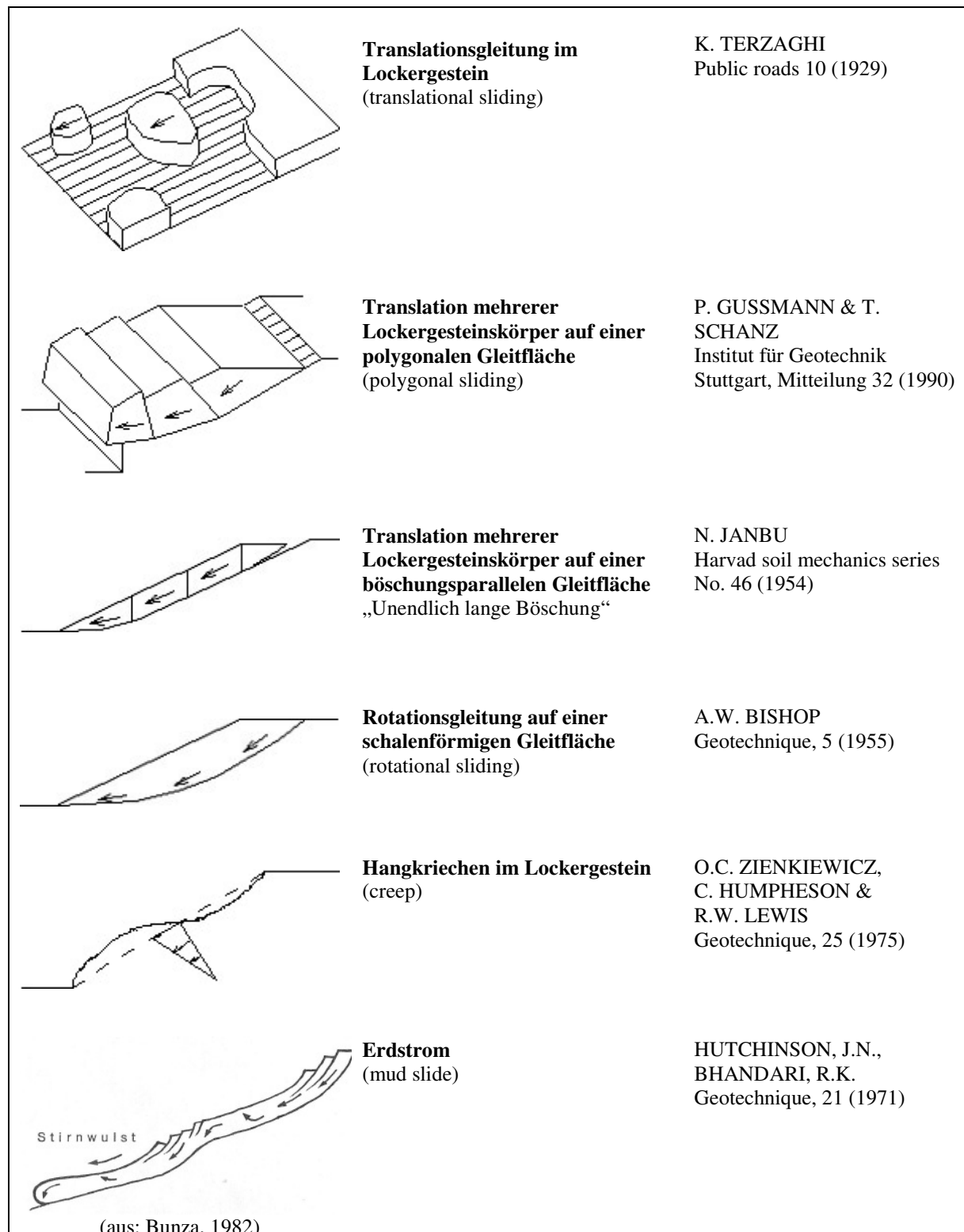


Abb. 2-3: Ablöse- und Versagensmechanismen im Lockergestein
(aus: Hofmann & Poisel, 2010)

- Translationsgleitung im Lockergestein
Im Gegensatz zum Gleiten eines Klufftkörpers aus Festgestein erfolgt die Translationsgleitung im Lockergestein meist schollen- oder partienweise.
- Translation mehrerer Lockergesteinskörper auf einer polygonalen Gleitfläche
Die Translation mehrerer Lockergesteinskörper auf einer polygonalen Gleitfläche wird maßgeblich von den Trennflächen zwischen den Lockergesteinskörpern beeinflusst.
- Translation mehrerer Lockergesteinskörper auf einer böschungsp parallelen Gleitfläche
Bei der Bildung böschungsp paralleler Gleitflächen handelt es sich meist um bereits bestehende Schichtgrenzen innerhalb des Lockergesteinskörpers. Die Translation erfolgt vorwiegend schollenweise und kann durch die Erhöhung des Wassergehalts in eine erdstromartige Bewegung übergehen. Neben dem von Janbu (1954) beschriebenen Rechenmodell hat auch Morgenstern (1963) Berechnungsansätze dazu geliefert.
- Rotationsgleitung auf einer schalenförmigen Gleitfläche
Eine der häufigsten Versagensmechanismen im Lockergestein ist die Rotationsgleitung. Sie ist durch die Ausbildung einer schalenförmigen Gleitfläche gekennzeichnet. Neben dem von Bishop (1955) beschriebenen Rechenmodell haben auch Fellenius (1926) und Fröhlich (1963) Berechnungsansätze dazu geliefert.
- Hangkriechen von Lockergestein
Beim Hangkriechen im Lockergestein handelt es sich um eine langsame Bewegung, bei der die Verschiebungen mit zunehmender Tiefe kontinuierlich abnehmen.
- Erdstrom (mud slide)
Erdströme sind überwiegend gleitende Bewegungen von feinkörnigen Massen. Die Bewegungsgeschwindigkeit ist vom Wassergehalt im bewegten Material abhängig. Erdströme können bereits bei Hangneigungen von 6° auftreten (Bunza et al., 1982). Wie Beobachtungen gezeigt haben sind Erdströme zyklische Prozesse, bei denen es in Abständen von etwa 100 Metern wiederholt zu Aufschiebungen der gleitenden Erdkörpern kommt (Poisel et al., A), 2011).

Zu den Ablöse- und Bewegungsmechanismen ist allgemein festzustellen, dass es oft nicht möglich ist, klare Grenzen zwischen den Mechanismen zu ziehen und es daher teilweise zu Überschneidungen und Kombinationen aus diesen kommt. Weiters sind Übergänge zwischen den Mechanismen möglich. Diese zu prognostizieren und zu erkennen, ist eine der Hauptaufgaben des Monitorings, da Übergänge von einem Mechanismus in einen anderen oft Beschleunigungen zur Folge haben.

3. Auslöser von Massenbewegungen

Die beschriebenen Ablöse- und Bewegungsmechanismen werden immer durch eine Veränderung der für die Standsicherheit wesentlichen Faktoren ausgelöst. Die Auslöserereignisse werden auch als „Trigger“ bezeichnet.

Die wichtigsten Trigger sind:

- Veränderungen der Hanggeometrie

Hanggeometrien können sowohl durch natürliche als auch durch anthropogene Prozesse verändert werden.

Eine natürliche Versteilung von Hangflanken entsteht meist durch den Abtransport von Gestein durch Flüsse. Weiters können übersteile Täler durch Gletscher entstehen. Dabei kommt es jedoch erst nach dem Abschmelzen dieser zum Verlust der stabilisierenden Gegenkräfte.

Für destabilisierende anthropogene Eingriffe in die Hanggeometrie gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten z.B.: die Unterschneidung von Hängen zur Schaffung von Nutzräumen und Infrastruktur, den Abbau von Rohstoffen (Fest- und Lockergestein, Erze, usw.) und – vor allem in Entwicklungsländern – die durch den Bevölkerungszuwachs unkontrollierte Bebauung von Hanglagen rund um Großstädte (Favelas).

Jede ungünstige Veränderung der Geometrie hat unabhängig von der Art der Entstehung die Folge, dass die stabilisierenden Kräfte geringer werden und damit die Standsicherheit abnimmt. Dies kann ausreichen, um Zugrissen und Auflockerungen entstehen zu lassen oder initiale Bewegungen auszulösen.

- Erhöhungen von Auflasten

Im Festgestein können durch Zusatzlasten die aufnehmbaren Scherkräfte überschritten werden. Im Lockergestein kommt es durch die schnelle Aufbringung von Lasten zu erhöhten Porenwasserdrücken, die ebenfalls zu einer Herabsetzung der Scherfestigkeit führen.

- Erschütterungen und Vibrationen

Erschütterungen und Vibrationen können sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein. Sie werden durch Erdbeben, Sprengungen, Verkehr, Maschinen und Bauarbeiten verursacht und können mehrere Auswirkungen auf das Kräftegleichgewicht eines Hanges haben.

So kann eine dynamische Beanspruchung als zusätzliche Kraft interpretiert werden, die eine Massenbewegung auslösen kann (Genske, 2008). Weiters können Erschütterungen die Bergwasserverhältnisse verändern und Auflockerungen im Festgestein verursachen. Im – vor allem feinkörnigen – Lockergestein kommt es durch die wiederholten Spannungsänderungen zu einer Herabsetzung der Kohäsion. Dies kann im Extremfall zur Bodenverflüssigung führen.

- Niederschlag, Berg- und Grundwasser

Wasser ist einer der häufigsten Faktoren, die Massenbewegungen auslösen. Es kommt als Niederschlags-, Berg- und Grundwasser vor. Obwohl Bewegungen auch durch Bewässerungen anthropogen ausgelöst werden können, handelt es sich vorwiegend um einen natürlichen Trigger. Nach dem Ort der Einwirkung hat das Wasser unterschiedliche Einflüsse auf die Hangstabilität.

Niederschlags- und Schmelzwasser beeinflusst durch das Eindringen in Klüfte und Poren sowohl den Bergwasserspiegel im Festgestein als auch den Grundwasserstand im Lockergestein. Wie sich gezeigt hat, wirken sich vor allem eine schnelle Schneeschmelze und Niederschläge in der vegetationsfreien Zeit negativ auf die Standsicherheit eines Hanges aus.

Das Kluftwasser übt sowohl durch den hydrostatischen Druck als auch – bei fließendem Bergwasser – durch Strömungsdrücke Einfluß auf die Standsicherheit aus. Durch den Auftrieb (nach oben gerichteter hydrostatischer Druck) kommt es zur Verringerung der Normalkräfte in den Klüften und somit zu geringeren Scherfestigkeiten in diesen. Hydrostatische und/oder hydrodynamische Wasserdrücken stellen somit zusätzliche angreifende Kräfte dar.

Das Porenwasser führt durch die Abnahme der Kohäsion zu verringerten Scherwiderständen zwischen den Materialbestandteilen. Durch zusätzliche Belastungen sowie durch schnelle Änderungen im Wasserhaushalt oder Erschütterungen kann es außerdem zu erhöhten Porenwasserdrücken kommen, die die Scherwiderstände weiter verringern. Wird das Material durchströmt, wirken zusätzlich Schleppkräfte auf die Bestandteile, die die Standsicherheit weiter reduzieren.

Durch die Sprengwirkung des Wassers – bedingt durch die Volumszunahme – bei der Änderung des Aggregatzustands von flüssig auf fest, kommt es, durch in Klüfte und Risse eindringendes Wasser, bei Frost zu einer beschleunigten mechanischen Zerlegung des Gesteins. Durch die vermehrten Klüfte sinkt die Festigkeit und die Oberfläche für angreifende Verwitterung vergrößert sich.

- Reduktion von Festigkeiten (z.B. durch Verwitterung)

Die Reduktion von Festigkeiten ist für das Auslösen einer Massenbewegung meist ein vorbereitender Faktor und nur sehr selten ein Trigger.

Bei der Verwitterung handelt es sich um einen langsam ablaufenden Prozess, der zur Auflockerung und Zerlegung des Gesteins sowie zur Reduktion der Festigkeit führt. Werden die stabilisierenden Kräfte durch diese Auflockerungen so gering, dass die treibenden Kräfte diese überschreiten, kommt es zum Abgehen der Massenbewegung. Grundsätzlich ist die Verwitterungsgeschwindigkeit von der Angriffsfläche abhängig. Das heißt, dass sich die Verwitterung mit zunehmenden Zerlegungsgrad beschleunigt. Zerlegungsprozesse durch Temperaturschwankungen, Salzkristallbildungen und Frostsprengungen sind der mechanischen Verwitterung zuzuordnen. Löse-, Zersetzungs- und Umwandlungsmechanismen sind der chemischen und Zerkleinerungen durch Pflanzen und Mikroorganismen der organischen Verwitterung anzurechnen. Meist kommen die unterschiedlichen Verwitterungsformen in Kombination vor. Beispielsweise können Risse im Gestein durch thermische Spannungen – infolge von

Temperaturschwankungen – entstehen, da Gesteine meist aus mehreren Mineralien mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zusammengesetzt sind. Diese Risse können etwa durch Eisbildung und/oder Pflanzenwurzeln vergrößert werden und bilden eine zusätzliche Angriffsfläche für die chemische Verwitterung.

Um eine Massenbewegung tatsächlich auszulösen sind meist mehrere vorbereitende Faktoren und ein Trigger notwendig. Tabelle 3-1 führt die wichtigsten Einflussgrößen, die eine Massenbewegung vorbereiten, auslösen und kontrollieren können, an.

vorbereitende Faktoren (Dispositionen)	auslösende Faktoren (Trigger)	bewegungskontrollierende Faktoren
Schichtung	Hanganschnitte	Hangneigung
Änderung der Hydrogeologie	Hangunterschneidungen	Hanggeometrie
Vorregen	Auflasten	Vegetation
Schneesmelze	Erschütterungen	Oberflächenrauigkeit
schmelzender Permafrost	Erdbeben	Transportmechanismus der bewegten Masse
Bodentyp und -art	Vulkanausbrüche	
geotechnische Materialeigenschaften	Niederschlag	
Verwitterung	schnelle Schneesmelze	
Entwaldung	schnelle Wasserspiegel- schwankungen	

Tab. 3-1: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren für Massenbewegungen
(nach: Dikau et al., 2001)

4. Monitoring von Massenbewegungen

Eine allgemeine Definition für „to monitor“ lautet:

„to watch or listen to (something) carefully over a certain period of time for a special purpose“
(Moore, 1992)

Beim Monitoring (Überwachung) einer Massenbewegung handelt es sich grundsätzlich um die zahlenmäßige Erfassung von Verschiebungen und Druckänderungen. Zusätzlich werden mögliche Beschleunigungsfaktoren wie z.B. Niederschlag, Temperatur usw. gemessen, aufgezeichnet und ausgewertet.

Aufgabe des Monitorings ist, durch die Aufzeichnung von Umwelteinflüssen, Druckänderungen und Verschiebungen die Kinematik der Bewegung und Interaktionen zu erkennen. Die Ergebnisse können zur Risikoanalyse, zur Kalibrierung von Rechenmodellen sowie für Prognosen über den zukünftigen Verlauf der Bewegung verwendet werden. Sind Massenbewegungen z.B. durch geomorphologische Beobachtungen bekannt, kann durch das Monitoring festgestellt werden ob diese aktiv, also im bewegten Zustand, sind oder nicht. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Beobachtung von Hangstabilisierungsmaßnahmen in Bezug auf deren Wirksamkeit und Auslastung.

Da es sich bei Massenbewegungen um singuläre Ereignisse handelt, sind die verwendeten Monitoringsysteme und Sensoren jeweils auf die vorhandenen Gegebenheiten abzustimmen. Zu Beginn einer Beobachtung müssen die Untersuchungsziele und die erforderlichen Messgenauigkeiten möglichst präzise angegeben werden, da diese für eine richtige Systemwahl entscheidend sind. Zusätzlich sind noch logistische sowie finanzielle Faktoren und Einschränkungen zu berücksichtigen. Der Aufbau eines Monitoringsystems sollte

darüber hinaus ein dynamischer Prozess sein, bei dem die Auswahl zusätzlicher Sensoren von den bereits vorhandenen Daten und deren Interpretation abhängig gemacht wird. Bei der Neuerstellung eines Monitoringprogrammes sind einige Vorinformationen einzuholen:

1. Vorhandene Unterlagen und Daten sammeln

Diese können z.B. Laserscans, Luftbilder, geologische Karten, Angaben zu hydrologischen Verhältnissen und dergleichen sein. Weiters können historische Katastrophenereignisse in Dorfchroniken dokumentiert und nachlesbar sein.

2. Geländebegehung durchführen

Geländebegehungen müssen mit einer Betrachtung vom Gegenhang aus beginnen, um einen Überblick zu gewinnen und nicht in Details unterzugehen. Die Geländebegehung dient zum einen zur ersten Einschätzungen der Bewegungsmechanismen und des Untersuchungsgebiets, zum anderen, um weitere Informationen durch die geologische Aufnahme (Kartierung) zu sammeln.

3. Felsfreilegungen/Schichtungsgrenzen auffinden

Festgestein: Falls eine deutliche Felsoberkante vorhanden ist, sollte diese freigelegt werden, da sich der Ablösevorgang größerer Felsmassen immer durch Verschiebungen an Klüften oder durch das Aufgehen von Zugrissen ankündigt.

Lockergestein: Durch das Anlegen von Schürfen kann die Schichtung des Untergrunds erkannt und die Deutung von z.B. Rammsondierungen erleichtert werden. Die Untersuchungen können Hinweise auf mögliche Gleitebenen geben und ermöglichen eine Probenahme in verschiedenen Tiefen.

4. Wahl der Messverfahren nach Auswertung der Punkte 1. - 3. und Festlegung der Untersuchungsziele

Die Auswahl und Positionsbestimmung der Monitoringsysteme sollte nach der Zusammenstellung und der Interpretationen der ermittelten Informationen getroffen werden. Besonders wichtig ist dies für linienförmige Messungen im Bohrloch, da diese bei einer falschen Standortwahl nicht die erforderlichen Daten liefern und relativ hohe Herstellungskosten vergebens getragen werden müssen.

5. Messende Beobachtung

Da sich die Dauer des Monitorings von einigen Monaten bis zu Jahrzehnten erstrecken kann, sollten die Messmittel folgenden Grundsätzen entsprechen (Fecker, 1997):

- Sie sollten möglichst einfach und robust gebaut sein,
- eine Kontrolle sowohl im Raum als auch in der Zeit zulassen,
- die Messung sollte rasch ausführbar sein und
- eine sofortige Interpretation der Ergebnisse zulassen.

Eine der wichtigsten Messung des gesamten Monitoringvorgangs ist die Nullmessung. Sie stellt die erste Datenerfassung nach der Installation des Beobachtungssystems dar und dient für die Folgemessungen als Referenz. Daher ist diese mit besonderer Sorgfalt

durchzuführen. Werden Sensoren nachgestellt (z.B. Seilverlängerung) und ein neuer Nullpunkt festgelegt, ist nach der Justierung sofort eine erneute Nullmessung durchzuführen. Wird dies vergessen und sind die Zeitintervalle zwischen den Messvorgängen groß, können Verschiebungen über lange Zeiträume nicht erfasst werden. Abb. 4-1 verdeutlicht die Wichtigkeit der sofortigen Nullmessung und stellt einen Vergleich zwischen Systemen mit langen und kurzen („kontinuierliche Messung“) Messintervallen bei der Verlängerung eines Seilextensometers her.

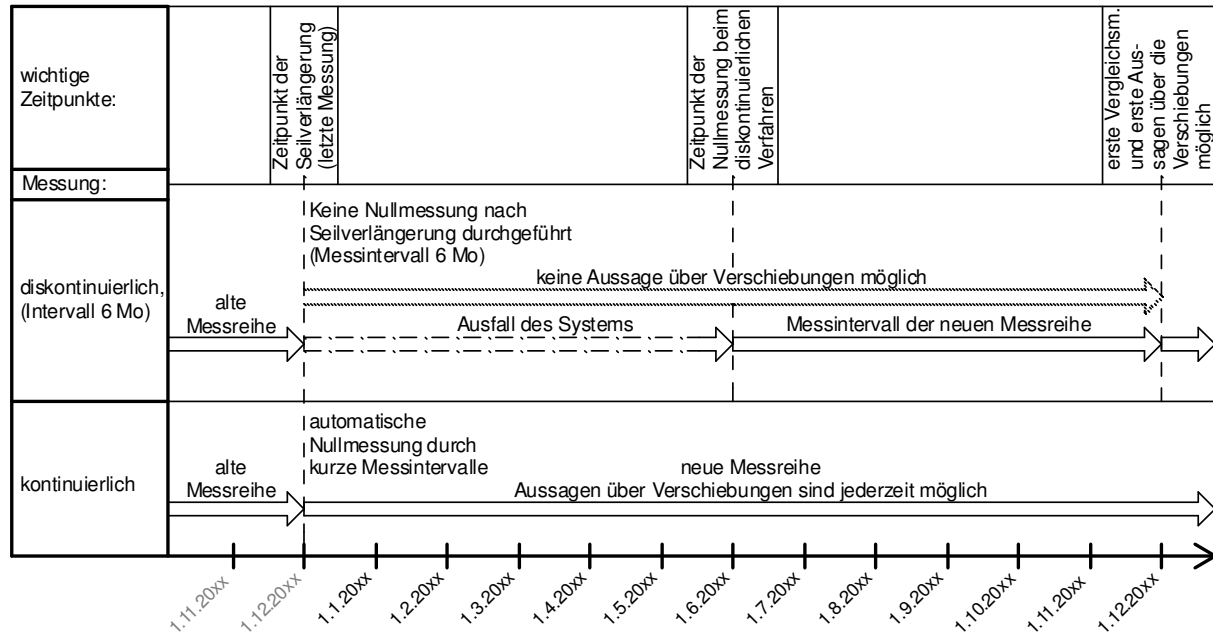


Abb. 4-1: Folge einer nicht sofort durchgeführten Nullmessung nach einer Seilverlängerung

Zusätzlich zu den verlorenen Messdaten hat die erneute Nullmessung zu einem späteren Zeitpunkt die Folge, dass die beiden Messreihen nicht mehr vergleichbar sind. Um einen Vergleich herstellen und die Verschiebungen kontinuierlich auftragen zu können, müssen die letzte Messung der alten Messreihe und die Nullmessung der neuen Messreihe unmittelbar hintereinander durchgeführt werden. Es darf also zwischen den beiden Datenerfassungen zu keinen Verschiebungen der Massenbewegung kommen.

Grundsätzlich können alle Monitoringsysteme und Sensoren manuell oder automatisch abgelesen werden, wobei vor allem bei der manuellen Variante auf die Ablesehäufigkeit zu achten ist. Nach *Fecker* (1997) empfiehlt es sich bei Messungen von Hand, die Messintervalle nach einer progressiven Kurve festzulegen. Das heißt, dass die Zeitabstände zwischen den Messungen zu Beginn kurz gewählt und erst mit zunehmender Messdauer verlängert werden sollten. Dies hat zum einen den Vorteil, dass durch die erhöhte Anzahl der Messungen am Anfang der Beobachtung ein aufgestelltes Versagensmodell überprüft werden kann, zum anderen können Messfehler bei der Nullmessung relativ schnell erkannt werden. Bei automatisierten Systemen besteht dieses Problem durch die selbstständige Erfassung einer großen Anzahl von Daten in kurzen Messperioden nicht.

In der Tabelle 4-1 sind Faktoren, die für die Wahl einer manuellen oder automatisierten Ablesung ausschlaggebend sein können, zusammengestellt.

Faktoren:	Gegenüberstellung der Ablesungsarten	
	manuell	automatisiert
Messgenauigkeit	geringer	höher
Messwerterfassung	diskontinuierlich	permanent (im kurzen Abstand)
Datenverarbeitung	meist Digitalisierung notwendig	Ergebnisse sind bereits digital
Zeitaufwand für Datenerfassung	unterschiedlich hoch	gering bis kein Zeitaufwand
Fernübertragung	meist nicht möglich	nahezu immer möglich
Anfälligkeit für Messausfälle	gering	höher (z.B. Strom)
Wartungsarbeiten	wenig	aufwändiger
Bauart (der Systeme)	einfacher, robuster	aufwändiger, filigraner
Aufenthalt im Gefahrenbereich	bei jeder Ablesung	nur zur Installation
Kosten	geringer	höher

Tab. 4-1: Faktoren für die Wahl der Ablesungsart

Letztlich ist die erforderliche Häufigkeit der Messwerterfassung jedoch vom Versagensmechanismus, der Bewegungsgeschwindigkeit, der Eintrittswahrscheinlichkeit, dem Risiko und dem Schadenspotenzial abhängig zu machen.

Für das Monitoring von Massenbewegungen sind eine Vielzahl von Messsystemen und Sensoren verfügbar. Die Abbildung 4-2 stellt einen Überblick der im nächsten Abschnitt erläuterten Verfahren dar und kann somit als Orientierungshilfe verwendet werden.

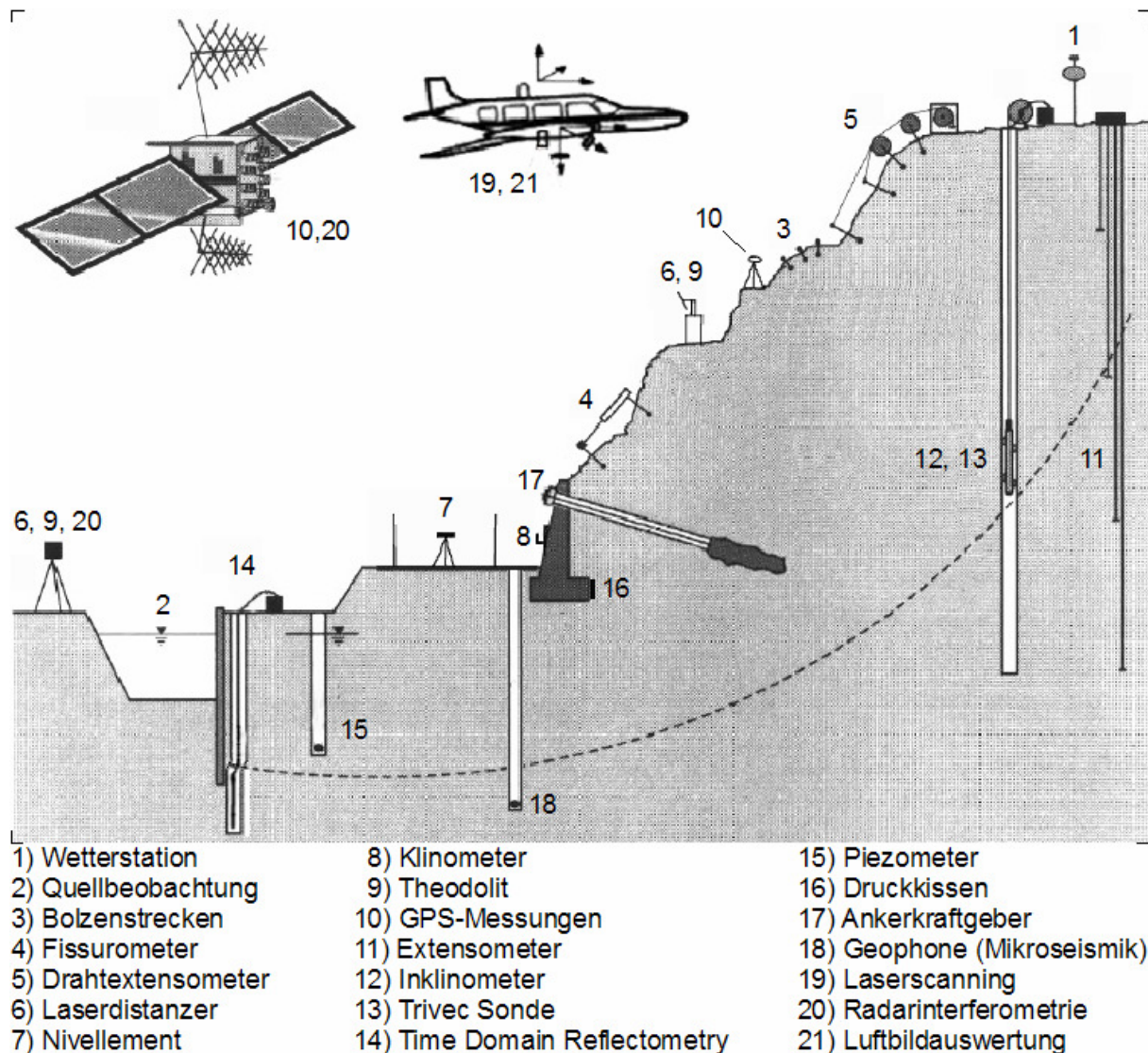


Abb. 4-2: Übersicht der im Abschnitt 5 erläuterten Monitoringsysteme und Sensoren

(nach: Kuntsche, 2000)

5. Sensoren und Messsysteme

Im Folgenden werden Sensoren und Messsysteme für das Monitoring von Massenbewegungen aufgelistet und ihre Funktionsweise dargelegt. Bei der Reihenfolge der Bearbeitung wurde, mit den einfachsten und billigsten begonnen. Mit fortschreitender Reihung nehmen die Komplexität der Geräte sowie deren Einbau und die dafür benötigten finanziellen Mittel sukzessive zu. Da gewöhnlich in den ersten Projektphasen des Monitorings einer Massenbewegung, der verfügbare Kostenrahmen gering ist, ist diese Reihenfolge ebenfalls als Anhaltspunkt, welche Sensoren und Messsysteme zu Beginn der Beobachtung und welche erst in späteren Projektphasen eingesetzt werden, zu verstehen. Dabei ist aber darauf hinzuweisen, dass die Wahl der einzelnen Sensoren und Systeme immer von den jeweils vorliegenden Versagensmechanismen abhängig gemacht werden muss.

5.1 Beobachtungen des Wetters und von Quellen

Die allgemeinen Messungen durch Wetterstationen und Quellbeobachtungen sind zwar nicht den eigentlichen Monitoringsystemen von Massenbewegungen zuzuordnen. Da die gemessenen Parameter jedoch große Auswirkungen auf die Messergebnisse und möglicherweise auf die Bewegungsraten haben können, werden diese ebenfalls aufgelistet.

5.1.1 Temperaturmessung

Da die Temperatur wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse (zum Beispiel durch Längenänderungen von Messgestängen bei Temperaturschwankungen) hat, ist es notwendig, diese zu erfassen, um notwendige Korrekturen der Messwerte durchführen zu können. Die Messung erfolgt grundsätzlich durch Thermometer oder Temperatursensoren. Zum Messen der Lufttemperatur werden Ausdehnungsthermometer verwendet, die mit Alkohol oder Quecksilber gefüllt sind. Durch Temperaturschwankungen kommt es zu Volumenänderungen der in einen Glaszylinder gefüllten Flüssigkeit, die dann abgelesen werden können.

Für berührende Temperaturmessungen werden Temperatursensoren, wie Widerstandsthermometer, Thermoelemente und Schwingresonanzsensoren verwendet, die eine digitale Weiterverarbeitung der Messwerte ermöglichen. Bei den Widerstandsthermometern wird der Zusammenhang zwischen dem Widerstand des elektrischen Leiters und der Temperatur für die Messung genutzt, da der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur zunimmt. Die dadurch entstehenden Spannungsänderungen werden durch einen Messumformer oder direkt zur Ableseeinrichtung übertragen.

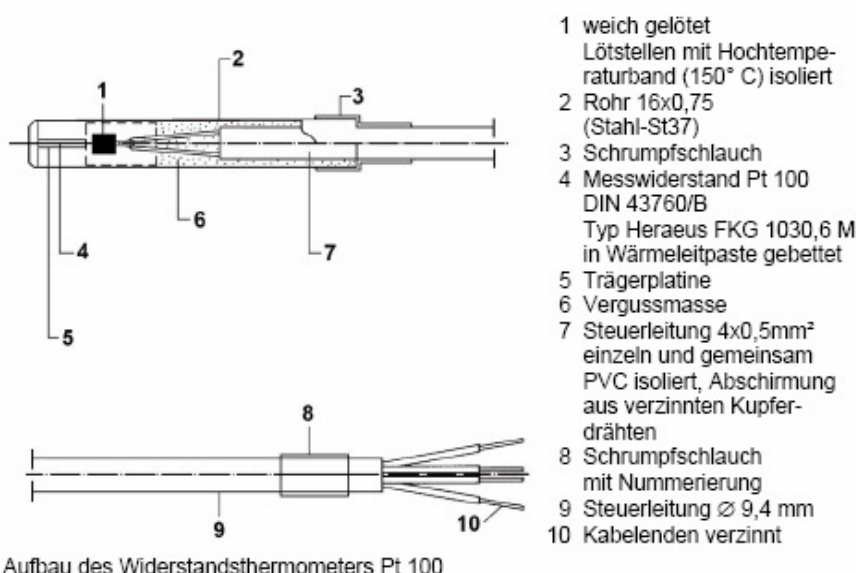


Abb. 5-1: Aufbau eines Widerstandsthermometers

(aus: Fecker, 1997)

Die Temperaturmessung durch Thermoelemente beruht auf dem Seebeck-Effekt. Dieser besagt, dass sich an den Enden zweier Drähte aus unterschiedlichen Metallen eine Spannung bildet, wenn verschiedene Temperaturen an der Verbindungsstelle der beiden

Drähte und an den Klemmen des Messgerätes herrschen. Diese wird dann in eine Temperaturdifferenz umgerechnet und kann mit einer zusätzlich gemessenen Vergleichstemperatur als Absolutwert angegeben werden. In der Baupraxis werden vor allem NiCr-Ni Thermoelemente verwendet, da diese sowohl kostengünstig als auch robust sind.

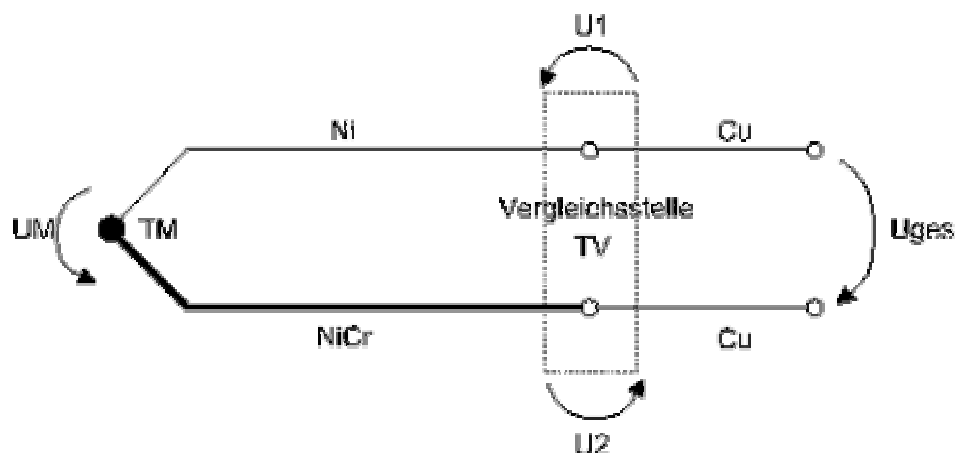


Abb. 5-2: Schema Thermoelement

(aus: Lufft, 2011)

Schwingresonanzsensoren bestehen aus einem sehr kleinen, speziell geformten Schwingquarz, der sich in einem angedichteten gasgefüllten Röhrchen befindet. Zur Temperaturmessung wird die Resonanzfrequenz des Quarzes ausgenutzt, die sich linear zu der Temperaturcharakteristik des Quarzkörpers verhält. Schwingresonanzsensoren stellen eine sehr genaue Messmethode dar.

5.1.2 Niederschlagsmessung

Da Niederschlagsereignisse zum einen Auslöser sein können und zum anderen die Bewegungsraten einer Massenbewegung erheblich beeinflussen können, ist es wichtig, diese zu messen um eine mögliche Korrelation der Phänomene feststellen und beobachten zu können. Bei der Messung wird zusätzlich zur Niederschlagsmenge auch deren Intensität aufgezeichnet, da diese für Massenbewegungen meist wesentlicher ist als die Menge. Die Niederschlagsintensität berechnet sich als Quotient, der Niederschlagsmenge und der Zeit, in der die jeweilige Niederschlagsmenge fiel.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Niederschlagsmessern, auch Ombrometer genannt, die von einem Beobachter in bestimmten Zeitabständen abgelesen werden müssen und Ombrographen, die mittels Datenlogger die Niederschlagsereignisse digital verarbeiten und speichern. Außerdem ist es möglich, Niederschläge mit Laser-optischen Geräten, Distrometer genannt, zu erfassen. In der Regel werden Ombrographen und Laser-optische Geräte verwendet, da diese eine automatische Verarbeitung und eine Auswertung nach der Niederschlagsintensität ermöglichen. Zur Verringerung von Fehlmessungen durch Windbeeinflussung können die beschriebenen Systeme mit verschiedensten Windschutzschirmen oder Windschutzzäunen umgeben werden.

Bei den Ombrographen erfolgt die Bestimmung der Niederschlagsmenge entweder durch eine elektronische Waage, mit der der Niederschlag gewogen wird, oder durch das Wippenprinzip. Bei diesem kippt eine, durch den Niederschlag gefüllte, bewegliche Schale

nach unten und entleer sich. Die Anzahl der Kippbewegungen wird registriert und in die Niederschlagsmenge rückgerechnet.

Die Bestimmung der Niederschlagsmenge bei den Distrometern erfolgt mittels eines optischen Lasersensors durch die Zählung der Lichtbogenunterbrechungen. Zusätzlich zur Niederschlagsmenge und der Intensität können diese Geräte noch die Partikelgröße, die Geschwindigkeit des Niederschlages sowie die Niederschlagsart (Regen, Schnee, Hagel) messen.



Abb. 5-3: Messwaage
(aus: Ott, 2011)



Abb. 5-4: Wippprinzip
(aus: FH-Offenburg, 2011)



Abb. 5-5: optischer Lasersensor
(aus: Ott, 2011)

5.1.3 Quellbeobachtung

In fast jeder Art von Massenbewegung spielt Wasser eine wichtige Rolle. Eine Möglichkeit, Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt im zu untersuchenden Gebiet, ziehen zu können, stellt die Quellbeobachtung dar. Die im Zusammenhang mit Massenbewegungen zu messenden Parameter sind die Schüttmenge (Wassermenge) und die Trübung (Feinteiltransport) einer Quelle. Weiters kann die Lage des Quellaustritts Anhaltspunkte über den Bergwasserspiegel geben; dies ist jedoch durch weitere Untersuchungen zu überprüfen. Zur Bestimmung der Schüttmenge einer Quelle bieten sich mehrere Methoden an. Die Wahl der geeigneten Messmethode für die Untersuchung ist von den örtlichen Begebenheiten und der Wassermenge des zu untersuchenden Objektes abhängig.

5.1.3.1 Schüttmengenbestimmung

Bei der Schüttmengenmessung mit Hilfe eines Pegels wird mit einer kontinuierlichen Messung des Wasserstandes und mit der Bestimmung des Pegelprofils der Durchflussquerschnitt berechnet. Mit der diskontinuierlich gemessenen Durchflussgeschwindigkeit wird dann eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung erstellt. Mit dieser ist es möglich, jederzeit den Durchfluss rückzurechnen, auch wenn zu diesem Zeitpunkt keine Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wurde. Die für diese Methode Anfangs notwendigen Geschwindigkeitsmessungen werden in der Regel mit Hilfe von hydraulischen Flügelschrauben durchgeführt. Weitere Messmethoden zur Geschwindigkeitsfeststellung, die vor allem in Sonderfällen Anwendung finden, bedienen sich der Akustik- oder Ultraschalltechnik und magnetisch-induktiven Messverfahren. Die Messung der Pegelhöhe kann in Ausnahmefällen durch Lattenpegel manuell erfolgen. Für die automatische Ablesung des Wasserstandes werden schwimmerbetriebene Winkelkodierer, Piezometer, auf die unten genauer eingegangen wird, oder Radarsensoren verwendet. Für die Berechnung des Durchflussquerschnittes ist neben der Pegelhöhe die

Beschaffenheit des Pegelprofils ausschlaggebend. Die Anforderungen, die an dieses gestellt werden, sind, dass eine stabile Sohle vorhanden sein muss, dass es keine Verkrautungen oder Einbauteile enthält, dass es zu keinen Rückstauungen kommt und dass es gleichmäßig angeströmt wird. Dieses Messverfahren wird aufgrund der Komplexität nur für große Wassermengen angewendet.

Einfachere Schüttmengenmessungen sind mit hydraulischen Bauwerken zu erreichen. Hierzu kommen Messbehälter, Messwehre und Messkanäle zum Einsatz. Bei der Messbehältermethode wird ein Behälter mit bekanntem Volumen mit dem austretenden Quellwasser gefüllt und die dafür benötigte Zeit gestoppt. So kann auf die Schüttmenge pro Zeiteinheit zurückgerechnet werden. Diese Methode ist jedoch nur für kleine Wassermengen brauchbar. Bei mittelgroßen Quellen werden Messwehre oder Venturikanäle verwendet. Beide Messprinzipien beruhen darauf, dass bei ersterem die Überfallhöhe über das Wehr, bei zweiterem die Pegelhöhe vor der Einengung des Kanals eine Funktion der Durchflussmenge darstellt und somit auf die Schüttmenge geschlossen werden kann.

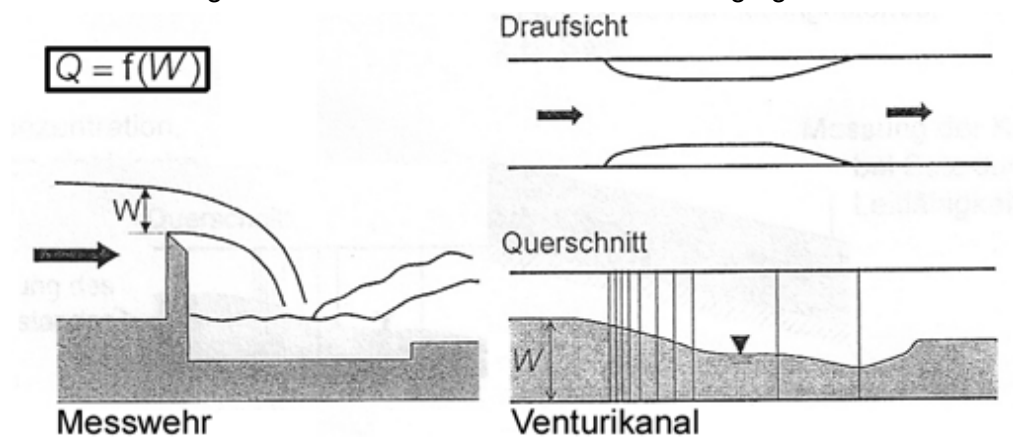


Abb. 5-6: Messwehr und Venturikanal

(aus: Blöschl, 2008)

5.1.3.2 Trübungsmessung

Durch die Trübungsmessung kann festgestellt werden, ob im austretenden Wasser Feststoffe enthalten sind. Durch das Ausschwemmen von Feinteilen in Form von innerer Erosion kann es sowohl in Locker- (Schwächung des Korngerüstes) als auch in Festgesteinen (Minderung des Kontakts in Klüften) zum Versagen des Gesamtsystems kommen. Bei der Messung werden entweder die Schwächung des durchgehenden Lichtstrahls (liefert bessere Ergebnisse bei größerer Trübung) oder dessen Seitwärtsstreuung (bei geringerer Trübung) gemessen.

5.2 Messung von Relativverschiebungen an der Oberfläche

Die Messung von Relativverschiebungen an der Oberfläche ist eine relativ einfache, rasch einsetzbare und wenig aufwändige Möglichkeit Verschiebungen zahlenmäßig zu erfassen und kann dazu beitragen, die vorhandenen Bewegungsmechanismen richtig einschätzen und interpretieren zu können. Dies ist vor allem für die Wahl der richtigen Sensoren für den weiteren Ausbau des Monitoringsystems wesentlich. Für diese Aufgabe stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, auf die im Weiteren genauer eingegangen wird.

5.2.1 Crackmeter und Plomben

Auch wenn von Firmen immer wieder Glas- oder Plomben aus anderen Materialien, die an beiden Seiten eines Risses an Gebäuden oder Festgesteinen zu befestigen sind, beworben werden, sollte von deren Verwendung abgesehen werden. Zum einen ist bei diesen nur die Aussage möglich, ob eine Bewegung stattgefunden hat oder nicht, zum anderen ist die Befestigung der Plomben mittels Klebstoffen an der Oberfläche, die um eine Bewegungszone oft eine Auflockerung des Gesteins aufweist, nicht zufriedenstellend. Dies gilt im gleichen Ausmaß für Crackmeter, die zwar eine grobe Ableseskala besitzen, die aber auf die gleiche Weise befestigt werden.

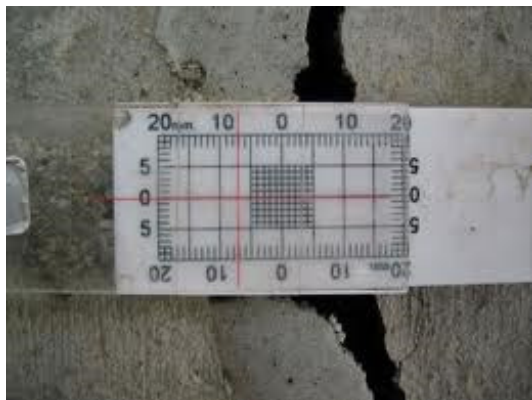


Abb. 5-7: Crackmeter

(aus: Terrapac, 2011)

In der Literatur werden Fissurometer bisweilen auch als Crackmeter bezeichnet, diese stellen brauchbare Sensoren dar und werden weiter unten genauer beschrieben.

5.2.2 Manuelle Messung von Bolzenmessstrecken (mechanisches Fissurometer)

Die Messung von Bolzenstrecken ist die am schnellsten herstellbare und einfachste Methode zur Messung von Relativverschiebungen, die mit einer ausreichenden Genauigkeit durchführbar ist. Dabei werden an den beiden Seiten des Risses oder der Spalte Löcher in das Gestein gebohrt und Messbolzen eingeklebt oder mittels Dübel eingeklemmt. Wird pro Seite nur jeweils ein Bolzen verwendet, ist in einem entsprechenden Zeitintervall lediglich eine Längenänderung bestimmbar. Installiert man an jedem Bruchufer jeweils zwei, bilden sie ein Messviereck. Durch Messungen der Änderungen der Abstände aller Bolzen zueinander können die Normal- und die Scherverschiebung am Riss bestimmt werden. Die Messung der Abstände der Bolzen auf derselben Seite des Risses dient zur Erfassung der

Messgenauigkeit. Die Abstände der Messstellen von der Gesteinsoberfläche sollten gleich sein und die Relativverschiebungen der Rissufer normal auf die Gesteinsoberfläche sollten gering sein. Die Distanzmessungen werden in den erforderlichen Zeitintervallen und in Anpassung auf die Größe des Messvierecks durchgeführt. Als Messverfahren dafür kommen im dm-Bereich Schublehren, im m-Bereich Stahlmaßbänder oder Handlasermessgeräte zu Einsatz. Bei größeren Abständen müssen bei Verwendung von Stahlmaßbändern deren Temperaturdehnungen berücksichtigt werden.

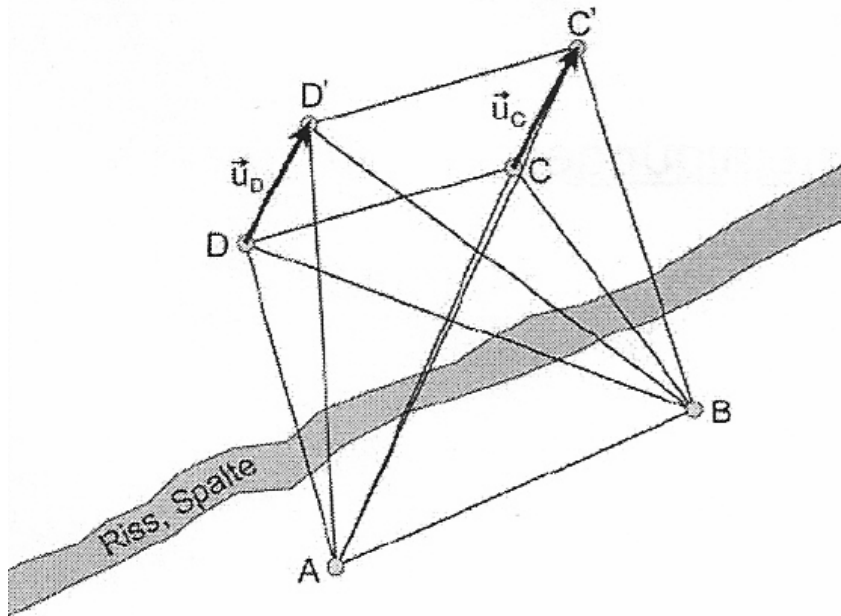


Abb. 5-8: Messanordnung 2-D Verschiebungen

(aus: Zangerl et al., 2008)

5.2.3 Fissurometer

Unter Fissurometern versteht man Messeinrichtungen, die beiderseits eines Risses oder einer Spalte mit dem Gebirge fest verbunden sind und Relativverschiebungen erfassen. Ein Fissurometer besteht aus mindestens zwei Gewindebolzen mit aufgeschraubten Gelenkköpfen, auf denen sich das eigentliche Messgerät befindet. Die Gelenkköpfe haben die Aufgabe, Messwertverfälschungen durch Zwangsspannungen im Messgerät zu verhindern und werden auf die im Gestein fixierten Gewindebolzen aufgeschraubt. Das Messgerät setzt sich aus dem mit dem Gelenkkopf fix verbundenen, teleskopierbaren Messgestänge und dem auf der anderen Seite fixierten Messkopf zusammen. Die Verschiebung wird durch die Längenänderung des Messgestänges erfasst. Die Ablesung kann analog und mechanisch mit einer aufgeschraubten Messuhr, oder digital mit einem elektrischen Wegaufnehmer erfolgen. Weiters ist es möglich, durch die Kombination von Fissurometern Verschiebungen zwei- oder dreidimensional zu erfassen. Der mögliche Messweg dieser Sensoren erstreckt sich je nach Messaufgabe vom mm- bis in den dm-Bereich, wobei der Abstand der Ankerpunkte zwischen etwa 10 cm bis zu einigen Metern - wenn entsprechende Abstützpunkte vorhanden sind - umfassen kann. Im Hinblick auf eine Kombination des Sensors mit einem Frühwarn- oder Alarmierungssystem ist eine

automatische digitale Ablesung jedenfalls der mechanischen vorzuziehen, da diese kontinuierliche Messergebnisse liefert, auf die sofort reagiert werden kann.



Abb. 5-9: Ablesung mit Messuhr
(aus: Geodata, 2011)



Abb. 5-10: Fissurometer mit Wegaufnehmer
(aus: Geodata, 2011)

5.2.4 Drahtextensometer

Mit Drahtextensometern können Längenveränderungen über größere Distanzen als mittels Fissurometern gemessen werden. Ein Drahtextensometer besteht im einfachsten Fall aus einem Draht oder einem Seil, das an einem Ende verankert ist und am anderen Ufer z.B. einer Kluftgasse über eine Umlenkrolle läuft und mittels eines Gewichts gespannt wird. Die Ablesung der Längenänderung erfolgt dabei mittels einer am Draht oder am Seil befestigten Messmarke und einem am Rissufer befestigten Maßstab. Automatisierte Systeme hingegen bestehen aus einem Wegaufnehmergehäuse, das einen elektronischen Drehsensor und eine Drahtspannvorrichtung enthält, dem Messdraht und einem Verbindungsanker. Zur Messung wird bei diesen Systemen der Wegaufnehmer auf einer Seite z.B. der Störung fixiert und an der gegenüberliegenden der Anker angebracht und durch den Messdraht mit dem Wegaufnehmergehäuse verbunden. Zum Schutz des Drahtes und für die Steigerung der Messergenauigkeit kann der Messdraht in einem Schutzrohr geführt werden. Wenn keine direkte und gerade Messstrecke vorhanden ist, ist es möglich, den Messdraht über bewegliche Umlenkrollen zu führen, um vorhandene Hindernisse zu umgehen. Die Ablesung der Längenänderung erfolgt über den Drehsensor im Wegaufnehmergehäuse, der die Messung automatisch über die Winkelverstellung der Wickelrolle aufnimmt. Wenn die Spannkraft des Messdrahtes immer konstant ist, ist auch der Messfehler zufolge des Durchhangs des Drahtes nahezu immer gleich. Bei der Bildung der Differenzen der Ablesungen zur Ermittlung der Längenänderung fällt dieser Fehler aus dem Ergebnis heraus. Der Messbereich der automatisierten Systeme beträgt einige Zentimeter pro Umdrehung. Mit Drahtextensometern können in jedem Fall Messlängen von einigen 10er-Metern erreicht werden. Die Robustheit, die Einfachheit und die Möglichkeit der flexiblen Montage bei Hindernissen stellen Vorteile des Systems dar. Bei kontinuierlicher elektronischer Ablesung ist eine Kombination des Monitoring- mit einem Frühwarnsystem möglich.



Abb. 5-11: Drahtextensometer
(aus: GeoMessTec, 2011)



Abb. 5-12: Schutzrohr
(aus: GeoMessTec, 2011)

5.2.5 Laserdistanzer

Laserdistanzer werden für die berührungslose Messung von Relativverschiebungen zwischen dem Standpunkt des Lasers und einem Reflektorstandpunkt benützt. Auf dem Markt werden die verschiedensten Systemvarianten von Handlasermessgeräten bis zu hochpräzisen fest installierten Laserentfernungsmessern angeboten. Handlasergeäte werden meist ohne Reflektoren benützt und können Messdistanzen von bis zu 200 m erfassen. Für das Monitoring von Massenbewegungen weisen diese jedoch auf längeren Distanzen eine zu geringe Genauigkeit auf. Bei fest installierten Laserdistanzern wird am Untersuchungspunkt ein Reflektor angebracht, der die Messgenauigkeit erhöht und das Anpeilen des Zieles erleichtert. Weiters ist es bei permanenten Messsystemen möglich, die Reflektoren zu beheizen, um Schnee- und Eisablagerungen zu verhindern und auch im Winter Messungen durchführen zu können. Die Messstrecken können sich bis zu einigen 100 Metern erstrecken. Als Vorteile des Systems sind die Möglichkeiten der Automatisierung und die der berührungslosen Ablesungen zu nennen, die auch für den Einsatz in Frühwarnsystemen von Bedeutung sind.

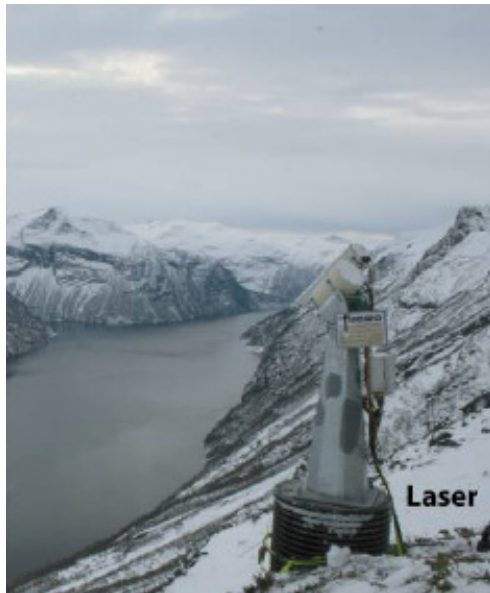


Abb. 5-13: Fest installierter Laserdistanzer
(aus: Blikra, 2008)

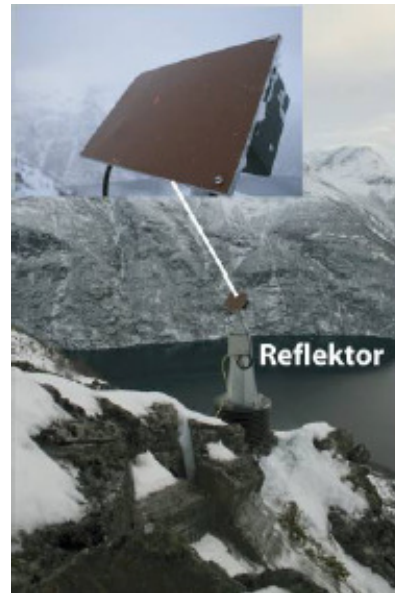


Abb. 5-14: Beheizbarer Reflektor
(aus: Blikra, 2008)

5.3 Messung von Höhenverstellungen und Neigungsänderungen an der Oberfläche

Wie die Messungen der Relativverschiebungen stellen auch die Messungen der Höhenverstellungen und der Neigungsänderungen relativ kostengünstige Untersuchungsmethoden dar. Dies liegt zum Teil daran, dass die Sensoren und Systeme an der Oberfläche relativ einfach zu installieren sind und dass sie teilweise als Monitoringsensoren und Systeme in oder an Stabilisierungsbauwerken eingebaut werden und daher keine gesonderten Baumaßnahmen nötig machen.

5.3.1 Nivellement

Nivellements dienen zur Feststellung der relativen Höhenverstellung zwischen zwei Punkten. Ist die Höhenlage eines Punktes bekannt, kann mit dem Ergebnis der Messung die absolute Höhenlage des gemessenen Punktes berechnet werden. Grundsätzlich unterscheidet man bei den optischen Nivellements zwischen dem geometrischen und dem trigonometrischen Nivellement. Die Messungen werden im Regelfall diskontinuierlich von einem Vermessungstechniker ausgeführt.

Das geometrische Nivellement wird mit einem Nivelliergerät, das auf ein dreibeiniges Stativ aufgeschraubt wird, und mit geeigneten Messlatten durchgeführt. Dazu wird das Nivelliergerät auf dem drehbaren Stativ befestigt und in der Mitte der Strecke zwischen den Messlatten waagrecht ausgerichtet. Mit dem horizontal nicht verstellbaren Fernrohr werden die vertikalen Messlatten, die auf den Messbolzen der zu messenden Punkten sitzen, anvisiert. Bei mechanischen Verfahren erfolgt die Ablesung mit einer Zielvorrichtung im Fernrohr und dem Abzählen der Teilung an der Messlatte. Für genauere Messungen, die zum Beispiel für Setzungsbeobachtungen notwendig sind, stehen elektrische Nivelliere zur Verfügung. Die Ablesung erfolgt bei diesen auf einer Strichcodelatte und die Ergebnisse werden auf dem Gerät digital angezeigt. Ist eine direkte Anpeilung der Ziele durch Hindernisse oder einem zu großen Höhenunterschied nicht möglich, können Messstrecken

mit Zwischenpunkten erstellt werden. Der Messweg kann somit fast unbegrenzt erweitert werden, die Messgenauigkeit wird dadurch jedoch negativ beeinflusst. Bei Präzisionsnivelements sollten die Visierlängen jedenfalls unter 20 m gehalten werden. Bei trigonometrischen Höhenmessungen werden Nivelliere mit drehbaren Fernrohren eingesetzt. Für die Messung werden die gewünschten Punkte anvisiert und mit Hilfe der gemessenen Winkel und der Entfernung die Höhenlage der Punkte bestimmt. Der Messweg dieser Methode ist ebenfalls fast unbegrenzt. Bei der Wahl der Entfernung zwischen dem Gerät und den zu bestimmenden Messpunkten muss beachtet werden, dass die Messgenauigkeit mit zunehmender Distanz abnimmt. Dies liegt zum Beispiel an der werkseitigen Messgenauigkeit der Geräte, deren Aufstellung und an atmosphärischen Einflussfaktoren, wie z.B. der unterschiedlichen Dichte der Luftschichten. Bei beiden Verfahren ist zur Bestimmung der Höhenverstellung ein wiederholtes Messen der Punkte durch einen geschulten Vermessungstechniker notwendig. Ist die Nutzung der Ergebnisse für ein Frühwarnsystem erwünscht, können digitale Nivelliere mit einem motorisierten Seitenfeintrieb und Autofokus ausgestattet werden, um kontinuierliche vollautomatisierte Messungen durchführen zu können.

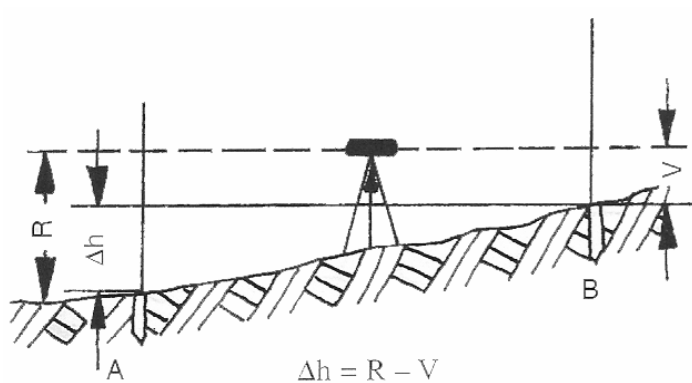


Abb. 5-15: Geometrisches Nivellement
(aus: Egger et al., 1995)

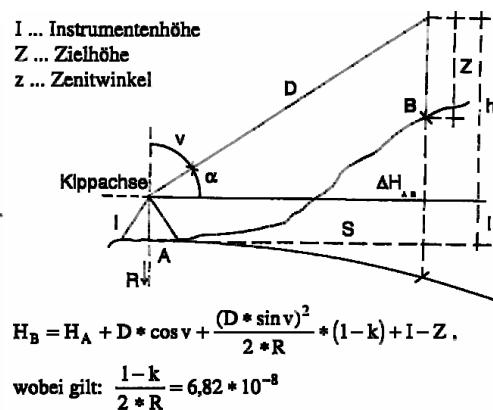


Abb. 5-16: Trigonometrisches Nivellement
(aus: Egger et al., 1995)

5.3.2 Hydrostatisches Nivellement

Hydrostatische Nivellements nutzen die Tatsache, dass sich in mit Flüssigkeit gefüllten, kommunizierenden Röhren überall der gleiche Flüssigkeitsspiegel einstellt. Diese Erkenntnis wird in den Messverfahren der Schlauchwaage und der hydrostatischen Drucksysteme unterschiedlich angewandt, wobei bei den Schlauchwaagensystemen die Lage der Flüssigkeitsoberflächen mit Abtastsensoren bestimmt werden und bei den Drucksystemen die Druckdifferenz zwischen zwei verbundenen Messbehältern gemessen wird. Das Schlauchwaagensystem besteht aus mindestens zwei Messbehältern, einem Verbindungsschlauch und einem Sensor, der durch Abtasten der Flüssigkeitsoberfläche die Bewegung erfasst. Die Höhendifferenz, die sich zwischen zwei Ablesungen eingestellt hat, wird durch Abzug eines Messergebnisses vom anderen ermittelt. Die Absoluthöhe kann ebenfalls wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben berechnet werden. Die Ablesung der Messergebnisse erfolgt entweder als berührende Messung mit Messspitzen, Kontaktstiften oder Schwimmern, oder mit berührungslosen Abtastsensoren. Um genauere

Messergebnisse zu erhalten, werden heute meist berührungslose Sensoren verwendet. Diese basieren auf akustischen, elektrischen, oder optischen Messprinzipien. Dadurch ist eine vollkommene Automation des Systems und somit eine kontinuierliche Messung möglich. Der Messweg einer Freiburger Schlauchwaage beträgt bis zu 100 mm, wobei die Messbehälter einige 10er-Meter voneinander entfernt sein können. Hydrostatische Drucksysteme bestehen ebenfalls aus zwei gefüllten Behältern und einem Verbindungsstück. Die Bestimmung der Höhenverstellung erfolgt über die Messung der Druckdifferenz zwischen den Behältern. Da diese durch eine Messmembran getrennt sind, müssen sie sich im Gegensatz zur Schlauchwaage nicht auf derselben Ebene befinden. Durch Druckänderungen, die durch Höhenverstellungen eines Behälters entstehen, wird die Messmembran verformt. Diese Auslenkungen werden mit entsprechenden Sensoren aufgenommen und mit Umformern in ablesbare Messwerte umgewandelt. Es können unterschiedliche Differenzdrucksensoren angewendet werden. Die Sensoren für Niederdruck (0-10 mbar) weisen einen Messbereich von bis zu 100 mm auf. Der Abstand zwischen den Monitoringpunkten kann ebenfalls einige 10er-Meter betragen. Bei Sensoren für größere Differenzdrücke nimmt die Messgenauigkeit entsprechend ab. Die Vorteile dieses Systems im Vergleich zu dem der Schlauchwaage ist die geringere Temperaturempfindlichkeit und die Verkürzung der Einschwingzeit nach einer Störung der Flüssigkeitsoberfläche. Beide Verfahren können automatisiert werden und liefern kontinuierliche Messergebnisse. Weiters ist für die Messungen kein direkter Sichtkontakt zwischen den Messbehälter erforderlich, daher sind keine zusammengesetzten Messlinien wie bei den optischen Nivellements notwendig und die Messgenauigkeit ist größer. Sie eignen sich deshalb gut für eine Integration in ein Frühwarnsystem.

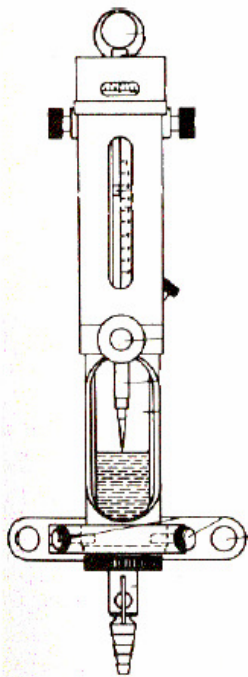


Abb. 5-17: Schlauchwaage
(aus: Thierbach, 1979)

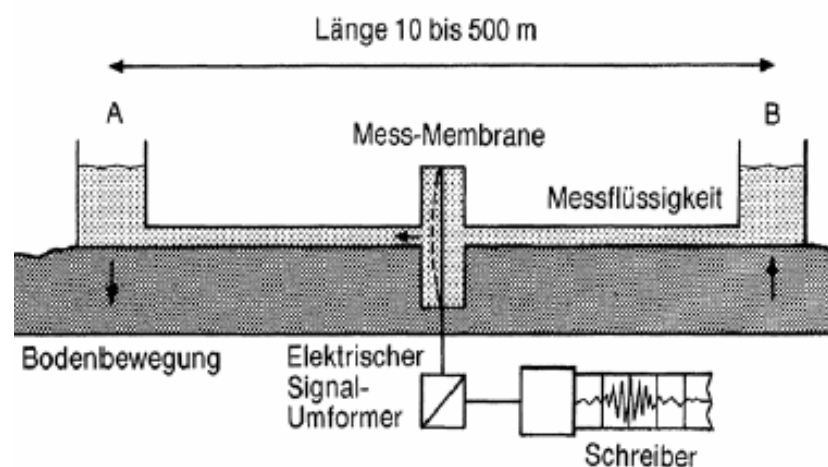


Abb. 5-18: Schema hydrostatisches Drucksystem
(aus: Meier et al., 1998)

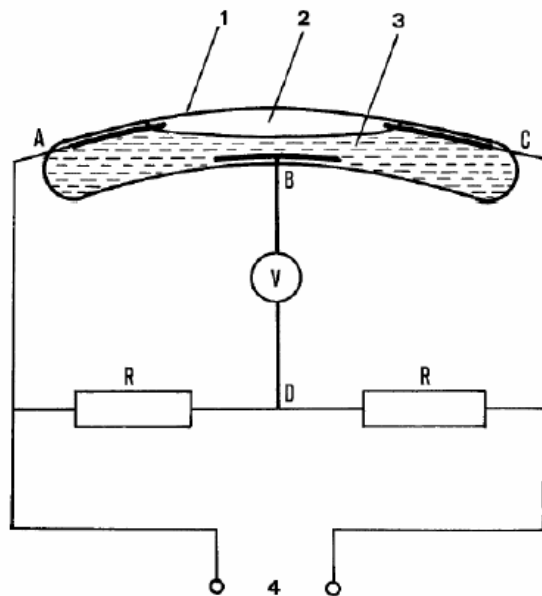
5.3.3 Klinometer

Mittels Klinometern (oder auch Tiltmeter), werden Neigungsänderungen an Gesteinsoberflächen oder von Gebäuden gemessen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Flüssigkeits- und Pendelsystemen.

Zu den einfachsten Sensoren zählt die Flüssigkeitslibelle, die nach dem Prinzip einer Wasserwaage funktioniert. Durch die geringe Messgenauigkeit ist diese für das Monitoring von Massenbewegungen jedoch ungeeignet oder lediglich als Plausibilitätsprüfung für andere Verfahren einsetzbar. Elektrolytische Flüssigkeitslibellen messen die Änderung des elektrischen Widerstandes, wenn sich die Luftblase durch eine Neigungsänderung in der Libelle verschiebt. Sie sind automatisierbar und weisen eine größere Genauigkeit auf. Ein weiteres Messsystem ist der elektronische Tiltmeter, der mit Hilfe einer

Flüssigkeitsoberfläche, die als horizontale Bezugsebene verwendet wird, arbeitet. Durch Neigungsänderungen verändert sich der Winkel zwischen dem Lichtsensor und dem Flüssigkeitshorizont, der dann gemessen werden kann. Es ist zusätzlich möglich, die Messung zweiaxial durchzuführen, um Verkippungen in 2 Richtungen zu erfassen. Messungen dieser Art sind auch mittels Pendelsystemen möglich. Da diese jedoch vorwiegend zur Neigungsmessung in hohen Bauwerken verwendet werden (z.B. bei Staudämmen, Brücken und dergleichen) wird nicht weiter auf diese eingegangen.

Die für das Monitoring von Massenbewegungen beschriebenen Klinometer können sowohl als tragbare, periodisch messende als auch als permanente, kontinuierlich messende Sensoren eingesetzt werden. Bei den tragbaren sollte immer in beiden Lagen gemessen werden. Dazu wird die Sonde nach der ersten Messung um 180 Grad gedreht und eine Umschlagmessung durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass durch die Ergebnisse der zweiten Messung grobe Fehler sofort erkannt werden. Weiters ist es möglich den mittleren Fehler der einzelnen Messabschnitte zu berechnen und wenn dieser zu groß sein sollte, eine Korrekturmessung vorzunehmen. Die Messgenauigkeit wird dadurch ebenfalls gesteigert, da durch die Bildung des Mittelwerts systematische Fehler aufgehoben werden. Für Monitoringaufgaben sind Klinometer eher als überprüfende, zusätzliche Sensoren einzusetzen da es nicht bei allen Bewegungsmechanismen zu Neigungsänderungen der Oberfläche kommt und diese nur sehr gering sein können.



1. Libelle
2. Luftblase
3. Elektrolytische Flüssigkeit
4. Stromzufuhr
- A, B, C Elektroden
- R Widerstände
- V Voltmeter

Bei Neigungsänderung verschiebt sich die Luftblase und die Widerstandsverhältnisse zwischen AB und BC verändern sich und können mit dem Prinzip der Wheatstone-Brücke gemessen werden



Abb. 5-19: Elektrolytische Flüssigkeitslibelle
(aus: Schweizer Talsperrenkomitee, 2005)

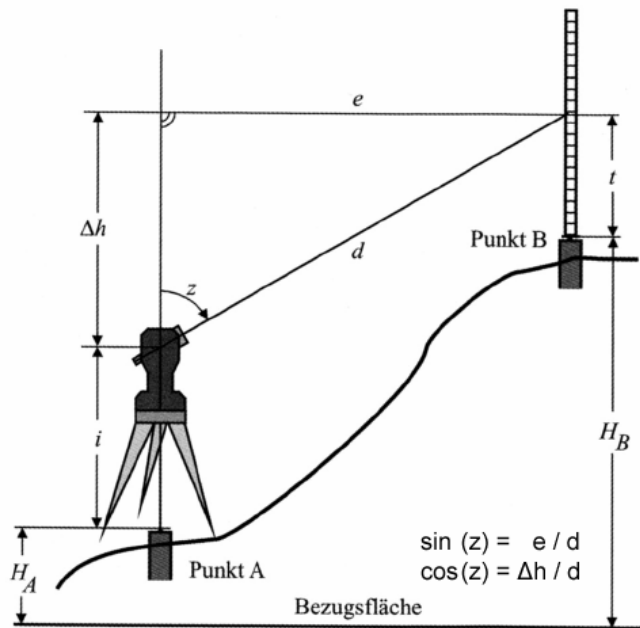
Abb. 5-20: Elektrisches Tiltmeter (2-axiale Messung)
(aus: Schweizer Talsperrenkomitee, 2005)

5.4 Messung von Lageveränderungen mittels trigonometrischen Methoden

Theodoliten und Tachymeter sind Messgeräte zur trigonometrischen Bestimmung von Lageveränderungen. Der Unterschied zwischen diesen beiden ist, dass bei letzterem eine direkte Messung der Entfernung möglich ist. Wenn - wie bei modernen Theodoliten üblich - diese auch mit Laserdistanzmessern ausgestattet sind, werden sie Totalstationen genannt. Da in der Literatur und von den Herstellerfirmen für Totalstationen oder Tachymeter meist die Bezeichnung Theodolit verwendet wird, werden diese im Folgenden ebenfalls so bezeichnet.

Theodoliten können im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Messsensoren und Systemen Bewegungen in x-, y- und z-Richtung messen. Somit können mit den Ergebnissen aus mindestens 2 Messungen 3-dimensionale Verschiebungsvektoren errechnet werden. Werden wie üblich mehrere Punkte gemessen, erleichtert das die Erkennung von Versagensmechanismen und ermöglicht eine bessere Modellierung der Massenbewegung. Das Messsystem besteht aus dem Theodolit, der auf einem Stativ oder auf einem permanenten Instrumentenstandpunkt befestigt ist, und den zu messenden Punkten. Diese sind mit im Gestein verankerten Messbolzen markiert, auf denen wiederum Reflektoren angebracht werden. Für die Berechnung der Verschiebungen der Monitoringpunkte ist es wesentlich, dass entweder der Standpunkt des Theodoliten oder messbare Fixpunkte außerhalb des bewegten Bereiches liegen, um bei einer Verschiebung die neue Position des

Theodoliten feststellen zu können. Da unverschiebliche Standpunkte oft nicht einfach zu erkennen sind, ist es gegebenenfalls notwendig, einen Geologen für die Standortwahl beizuziehen. Die Bestimmung der Lageveränderung der Monitoringpunkte erfolgt, indem deren Verschiebungen in einem 3-D Koordinatensystem errechnet werden. Diese Messungen müssen in bestimmten Zeitintervallen wiederholt werden, um die Verschiebungen der Punkte zu erhalten. Für die eigentliche Messung sind unterschiedliche Verfahren möglich. Bei älteren oder diskontinuierlichen Messsystemen wird im Zweimannbetrieb gearbeitet, indem eine Person mit einem transportablen Reflektor die einzelnen Messpunkte abgeht und die andere diese mit dem Theodolitfernrohr anpeilt und die Messung vornimmt. Bei motorisierten Geräten ist dieses Verfahren auch als Einmannbetrieb möglich. Dabei wird der Reflektor mit einer automatischen Zielerfassung anvisiert und mit dem Messstrahl verfolgt. Die Feineinstellung und Fokussierung ist automatisiert und die Mess- und Speicherfunktion wird funkgesteuert ausgelöst. So kann die Person am Theodolit eingespart werden. Bei permanent eingesetzten Theodoliten ist eine vollkommene Automatisierung der Messungen möglich. Diese Geräte suchen die dauerhaft montierten Reflektoren in gewünschten Zeitabständen selbstständig und führen eine Messung durch. Solche Systeme werden Servotheodolite genannt. Die Ablesung des gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkels und der Entfernung zum Zielpunkt erfolgt mittlerweile bei allen Verfahren digital, wobei im automatisierten Betrieb die Daten an einen gewünschten Arbeitsplatz weitergeleitet werden können. Die Messentfernung der Theodolite ist auf etwa zwei Kilometer eingeschränkt, wobei die Messgenauigkeit mit zunehmender Entfernung zu den Monitoringpunkten abnimmt. Dies liegt an der Brechung des Lichtstrahls durch unterschiedlich dichte Luftschichten, an geräteseitigen Ungenauigkeiten oder an Abweisungen bei der Aufstellung. Bei automatisierten Systemen ist zusätzlich mit witterungsbedingten Ausfällen durch Nebel oder Schneefall zu rechnen. Trotz allem sind diese Systeme für Monitoringaufgaben sehr gut einsetzbar, da die Messungen in kurzen Zeitintervallen wiederholt und viele Messpunkte zu einem Messraster oder Messnetz zusammengefügt werden können. Die Berechnung und Darstellung der Verschiebungsvektoren kann die Bestimmung des Versagensmechanismus der Massenbewegung erleichtern, da diese aufgrund ihrer Kinematik unterschiedliche Verteilungen und Richtungen aufweisen. Theodolitmessungen sind trotz einer Messungenauigkeit von bis zu 2,5 Zentimetern auf größere Entfernungen ebenfalls für Frühwarnsysteme einsetzbar, wenn größere Bewegungsraten zu erwartet sind.



d.....durch den Theodolit gemessene Länge zw. A u. B
 e.....horizontale Messlänge
 Δh ...Höhenunterschied zw. A u. B

Abb. 5-21: trigonometrische Höhenmessung

(nach: Witt, 2008)



Abb. 5-22: Leica Totalstation TPS 1200+

(aus: Leica-Geosystems, 2011)

Die bei einer Messung auftretende, maximale Abweichung von der Mittellage der gemessenen Punkte zeigt die folgende Auswertung der Daten des Beispiels Murau. Es wurden dafür die Messdaten einer Zeitspanne von 6 Monaten im Jahr 2004 herangezogen, da in diesem Zeitraum eine große Anzahl von Messungen durchgeführt wurde und die Messergebnisse in dieser Zeitspanne (mit relativ geringen Bewegungen) einen annähernd linearen Anstieg aufwiesen (siehe Abb.5-23).

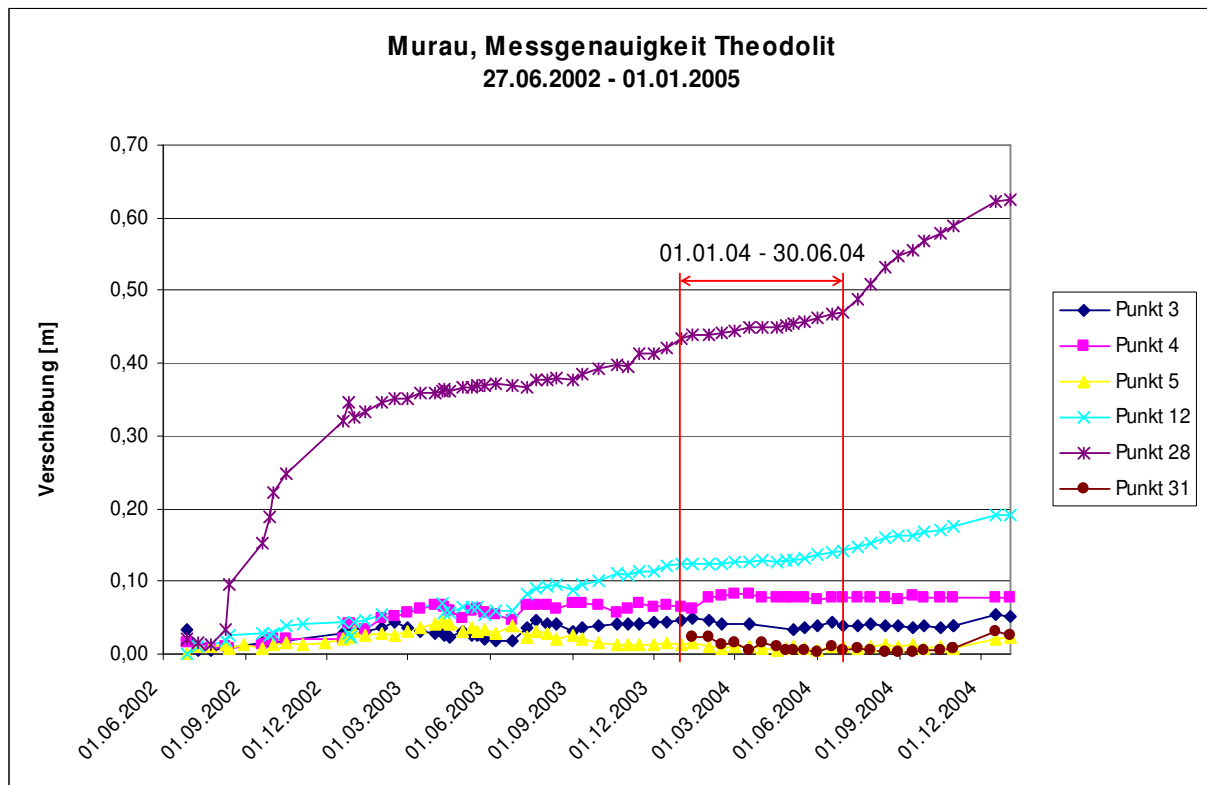


Abb. 5-23: Verschiebungen (dV) der Punkte 3, 4, 5, 12, 28, 31 von 01.06.02 bis 01.01.2005

Die Auswertungen der Messabweichungen der Punkte 12 und 28 erfolgte durch die Bestimmung der maximalen Differenz zwischen der Trendlinie der Verschiebung und den Verschiebungsvektoren dV, die mit der Formel:

$$dV = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2} \quad (5.1)$$

berechnet wurden. Dies war notwendig, da sich die Punkte in Bewegung befanden und somit nicht wie die unbewegten Punkte getrennt nach Lage und Höhe ausgewertet werden konnten.

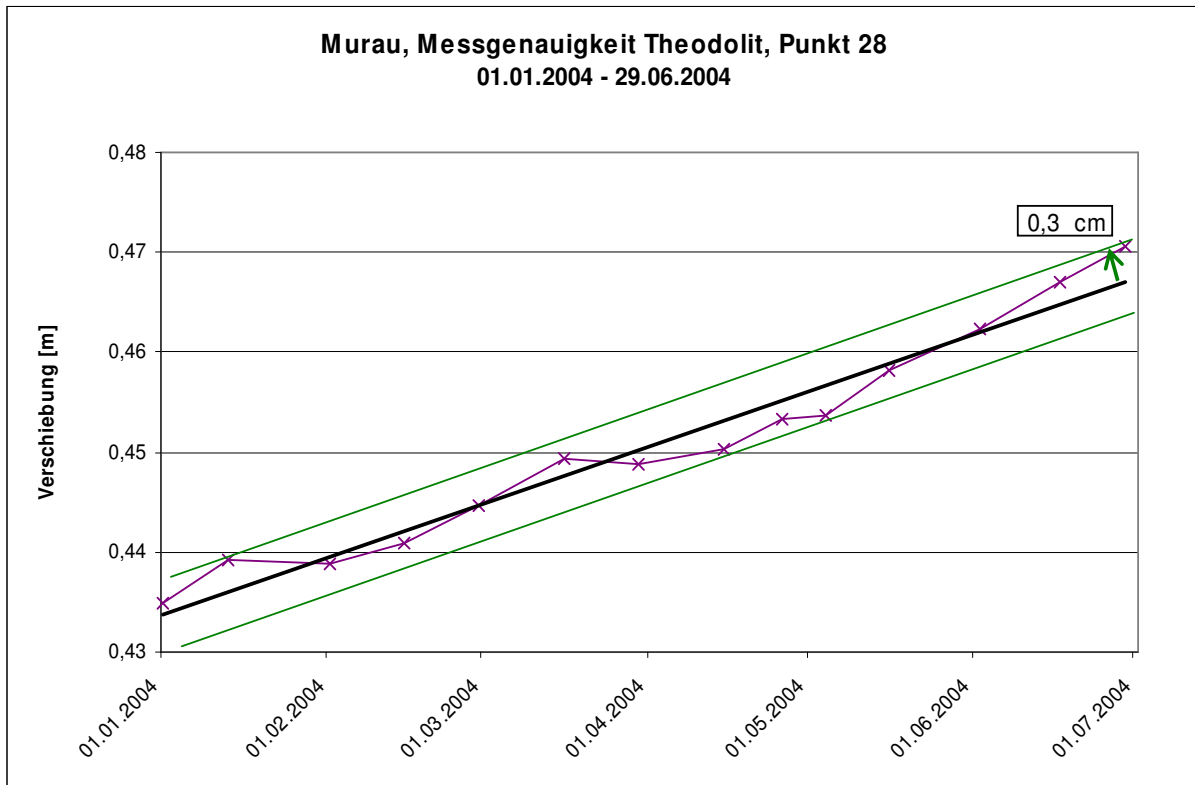


Abb. 5-24: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 28

Die Einzelmessergebnisse des Punktes 28 liegen innerhalb eines Bereiches von +/- 0,3 cm um die Trendlinie.

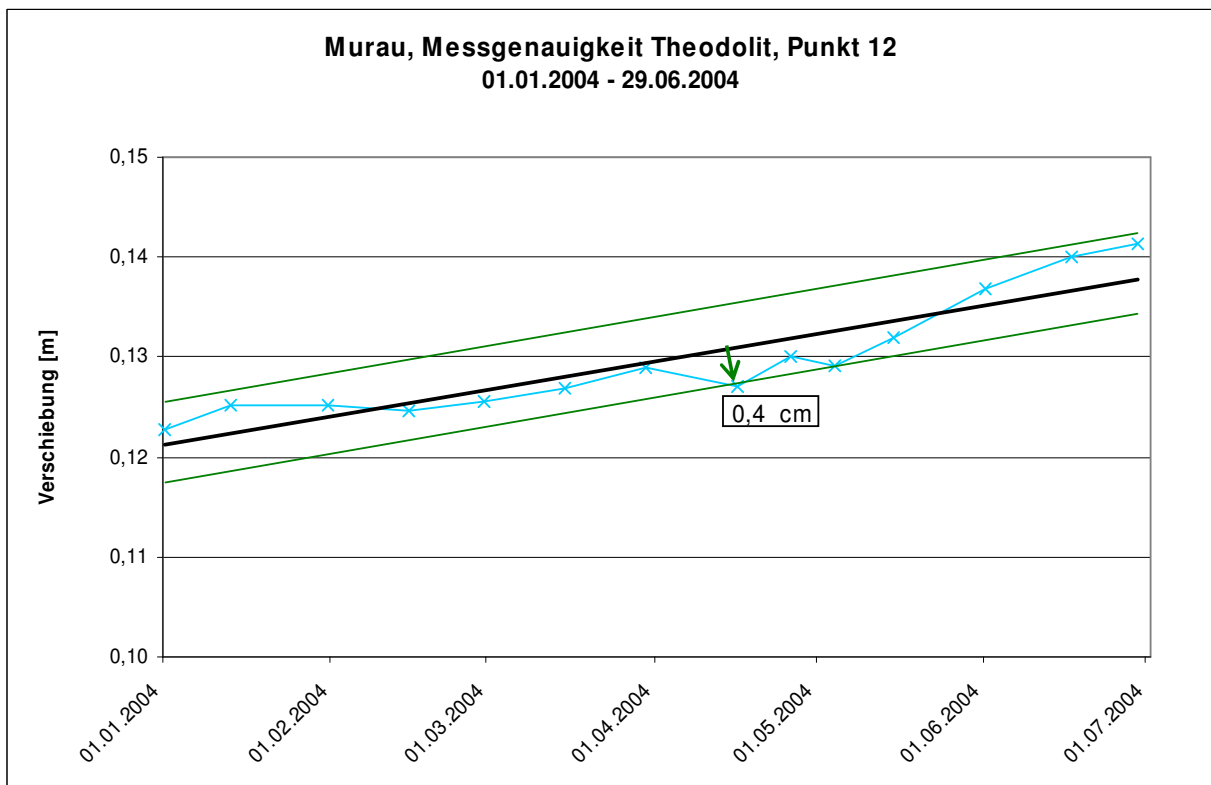


Abb. 5-25: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 12

Die maximale Abweichung von dV am Punkt 12 beträgt 0,4 cm.

Die Verschiebungen des Punktes 4 (Abb.5-26) wurden sowohl getrennt nach Lage und Höhe als auch nach dV ausgewertet, um einen Vergleich der nach beiden Verfahren ermittelten Abweichungen zu ermöglichen.

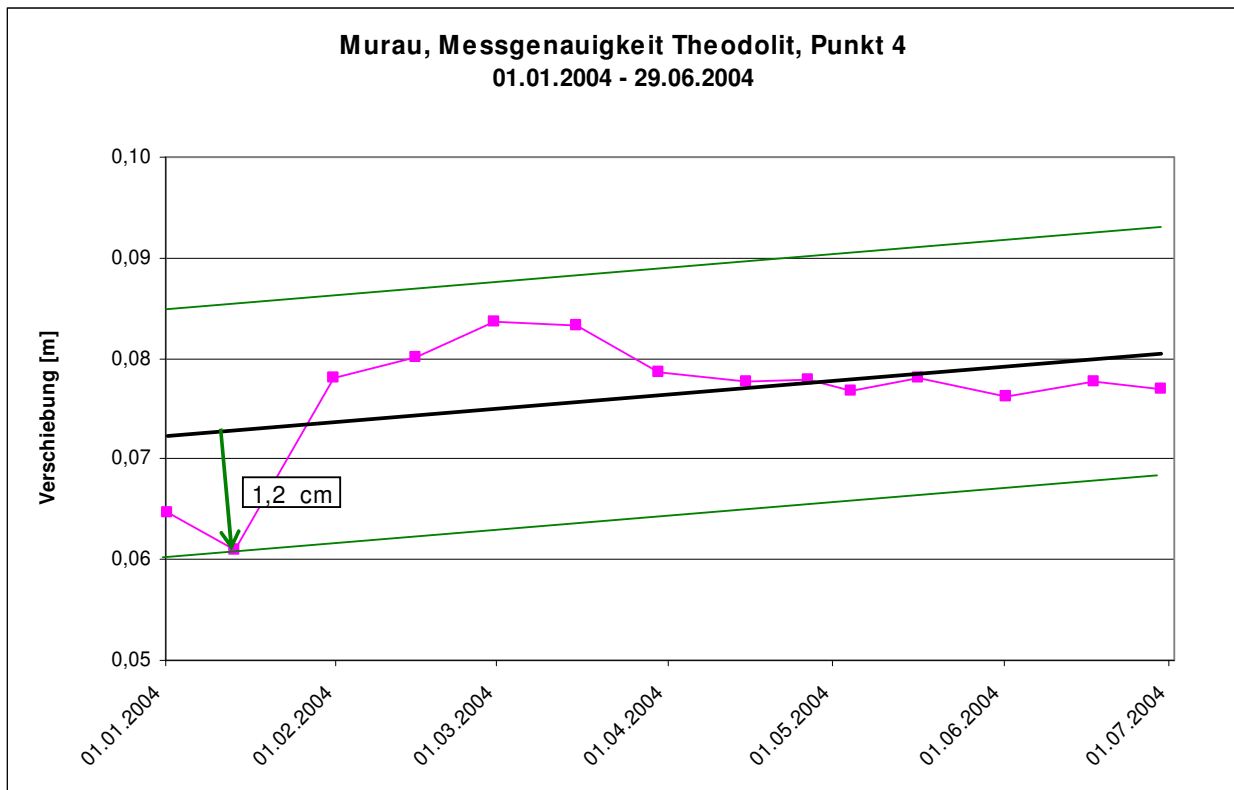


Abb. 5-26: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 4

Die Abb.5-24 bis 5-26 zeigen, dass die Abweichungen von der Mittellage mit zunehmender Messentfernung (Abbildung 8-16) zunehmen.

Die im Untersuchungszeitraum annähernd unbewegten Punkte 3, 4, 5, 31, 104 wurden getrennt nach der Lage- und Höhenabweichung ausgewertet und können daher für einen Vergleich mit den Messgenauigkeiten der Herstellerangaben verwendet werden. Für die Bestimmung der Lageabweichung wurde die Differenz zwischen der wahrscheinlichsten Position des Punktes (großer, schwarzer Punkt), die durch Mittelung der Messdaten berechnet wurde, und der Einzelmessungen (kleine farbige Punkte) bestimmt. Einzelmessungen innerhalb eines Monats wurden mit der gleichen Farbe (weinrot, gelb, blau,...) darstellt.

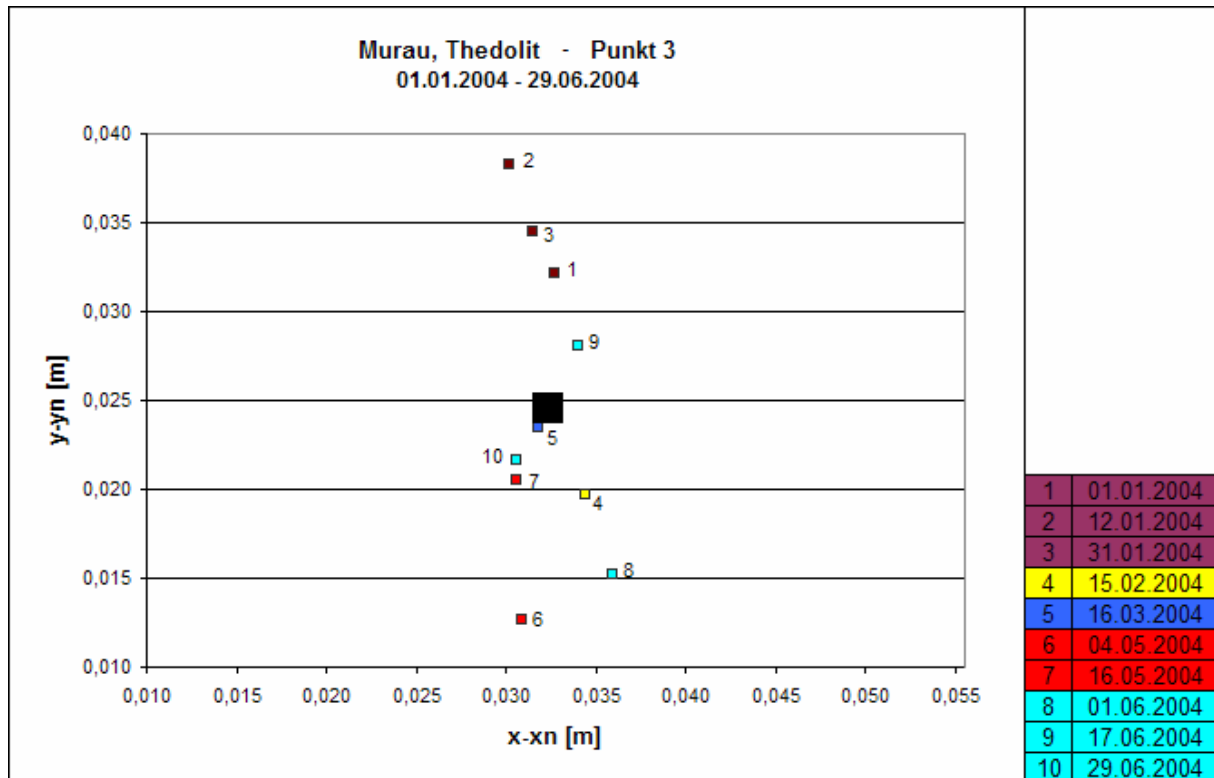


Abb. 5-27: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 3

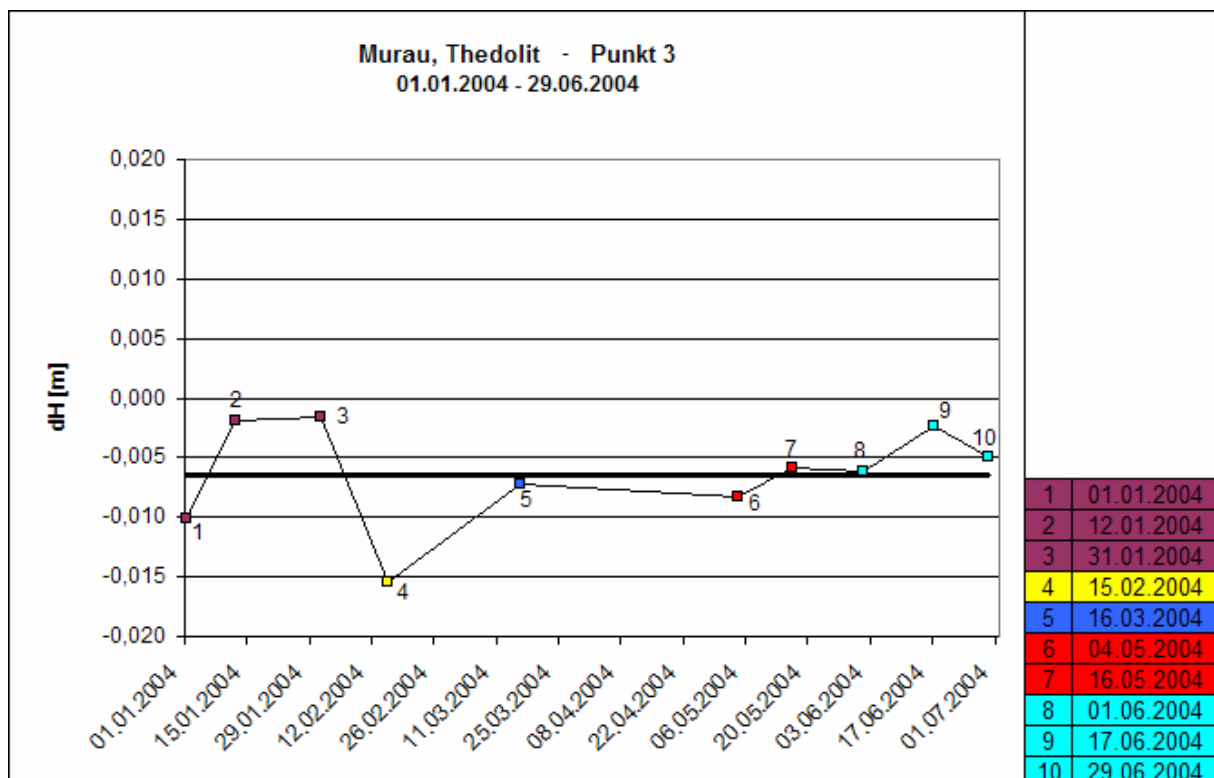


Abb. 5-28: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 3

Die Ergebnisse des Punktes 3 weichen maximal um 1,4 cm (Messung 2) vom Mittelwert der Lage und 0,9 cm (Messung 4) vom Mittelwert der Höhe ab.

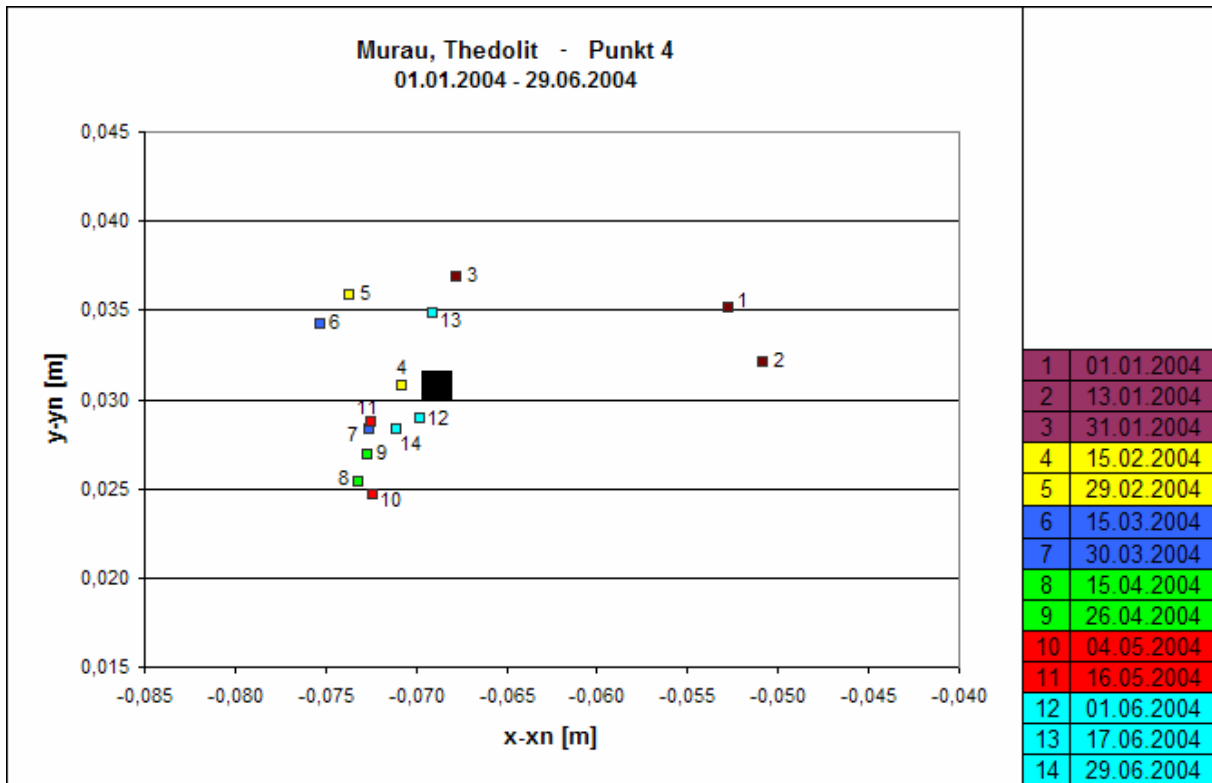


Abb. 5-29: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 4

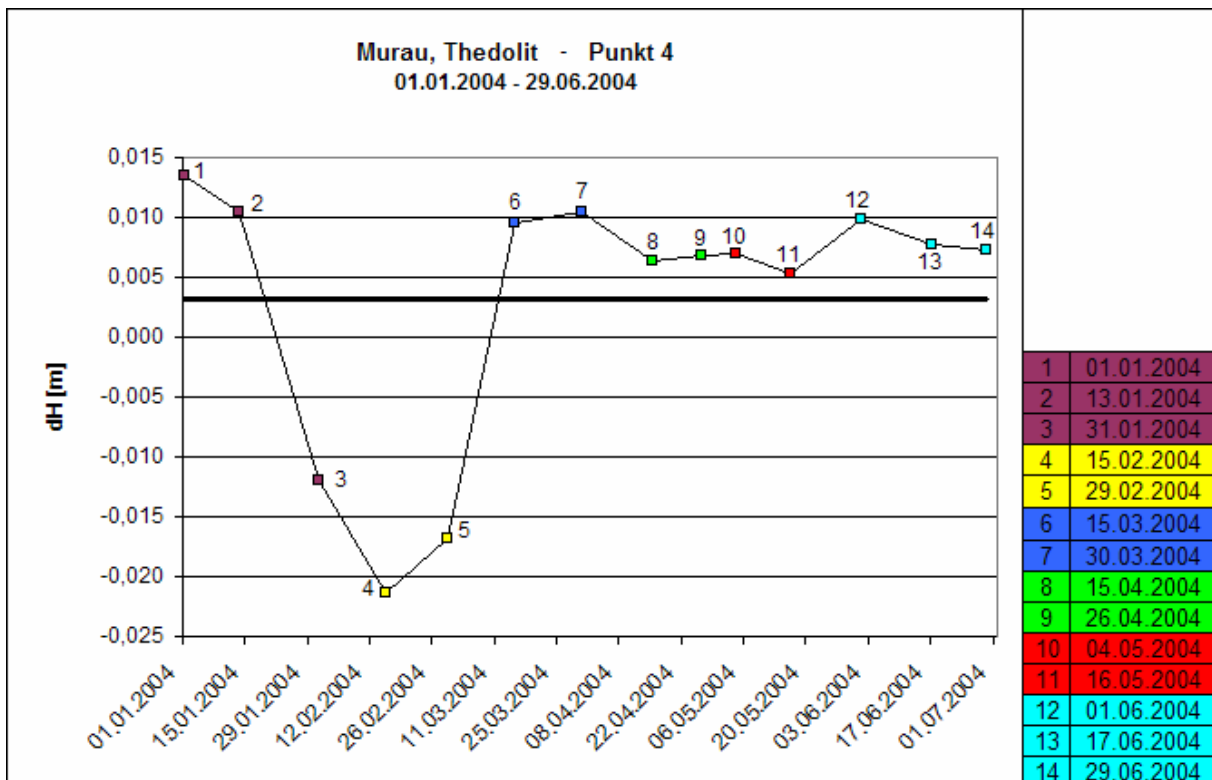


Abb. 5-30: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 4

Die Abweichungen der Messergebnisse der Lage bzw. Höhe von der wahrscheinlichsten Position des Punktes 4 befinden sich innerhalb eines Bereiches von +/- 1,8 cm bzw. +/- 2,5 cm. Die größten Differenzen traten bei den Messungen 2 (Lage) und 4 (Höhe) auf. Die maximale Abweichung bei der Auswertung von dV betrug bei diesem Punkt 1,2 cm. Dies zeigt, dass durch die Auswertungen mittels dV geringe Messabweichungen entstehen und

diese somit für einen Vergleich mit Messgenauigkeitsangaben aus der Literatur ungeeignet sind.

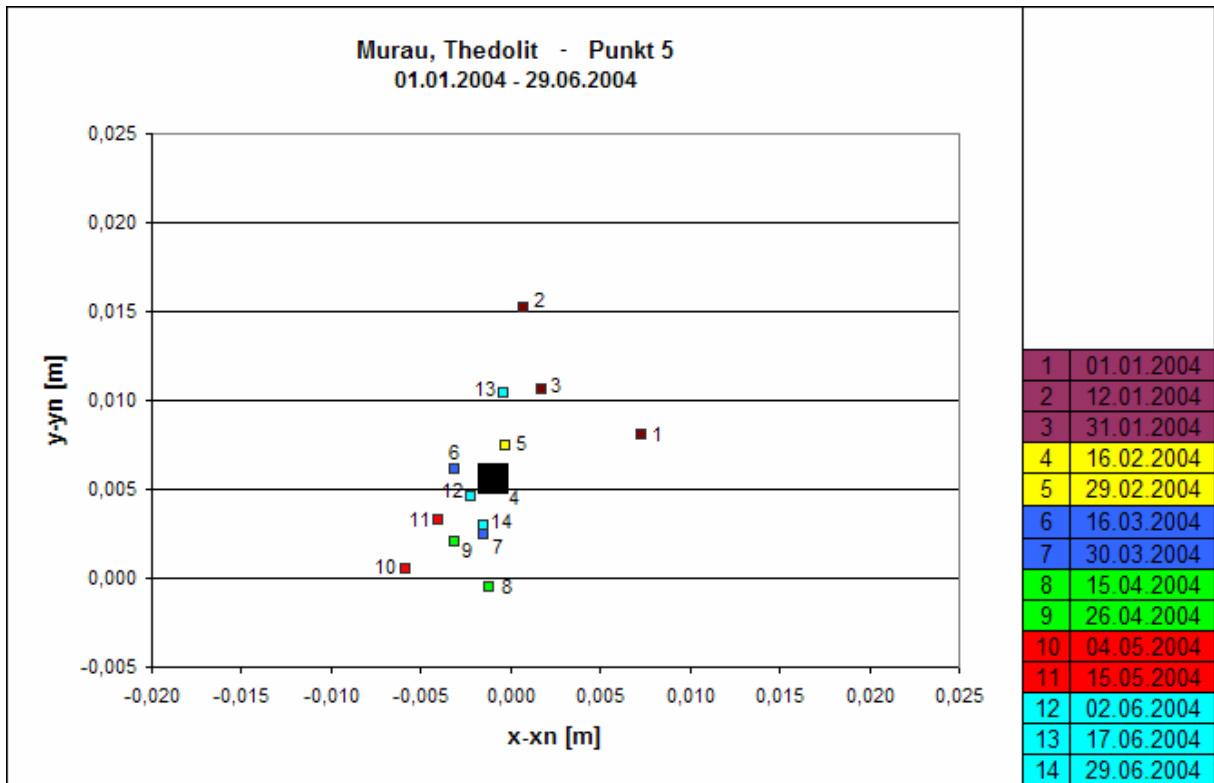


Abb. 5-31: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 5

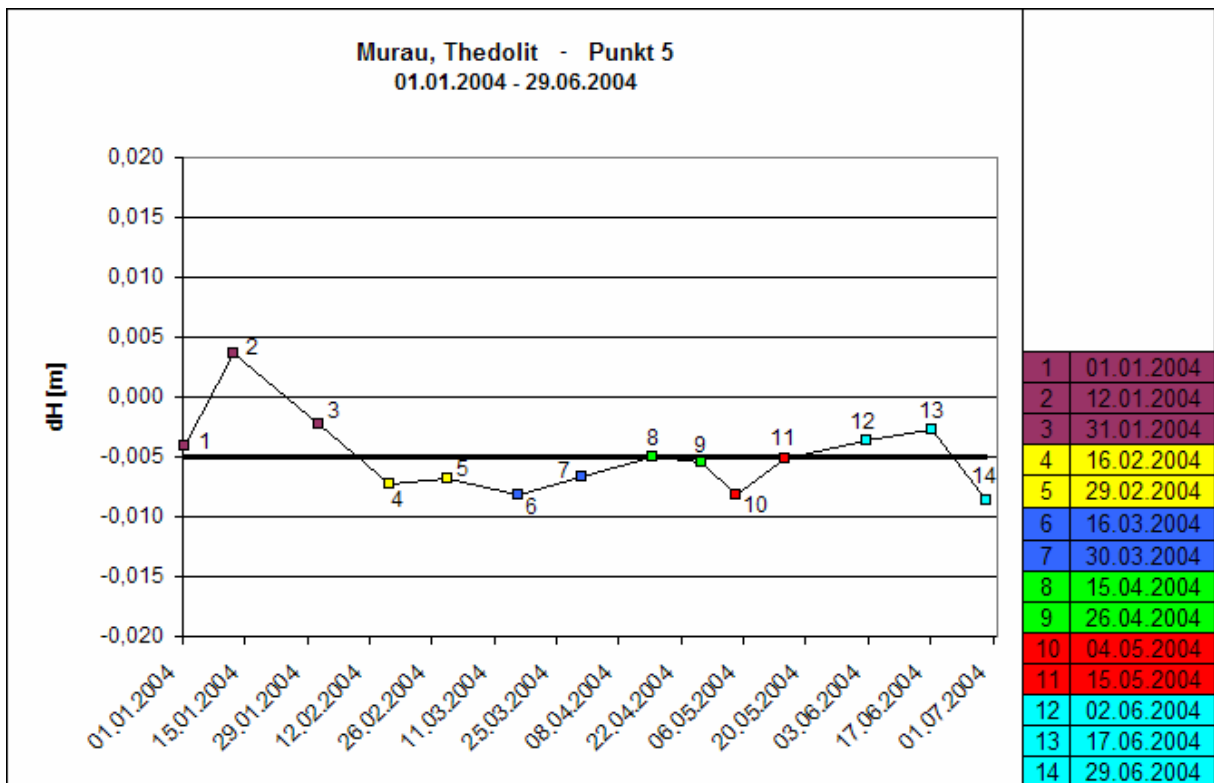


Abb. 5-32: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 5

Der Punkt 5 weist die größte Abweichung vom Mittelwert der Lage bei der Messung 2 mit 1,0 cm auf. Die maximale Messabweichung der Höhe beträgt 0,9 cm und tritt ebenfalls bei Messung 2 auf.

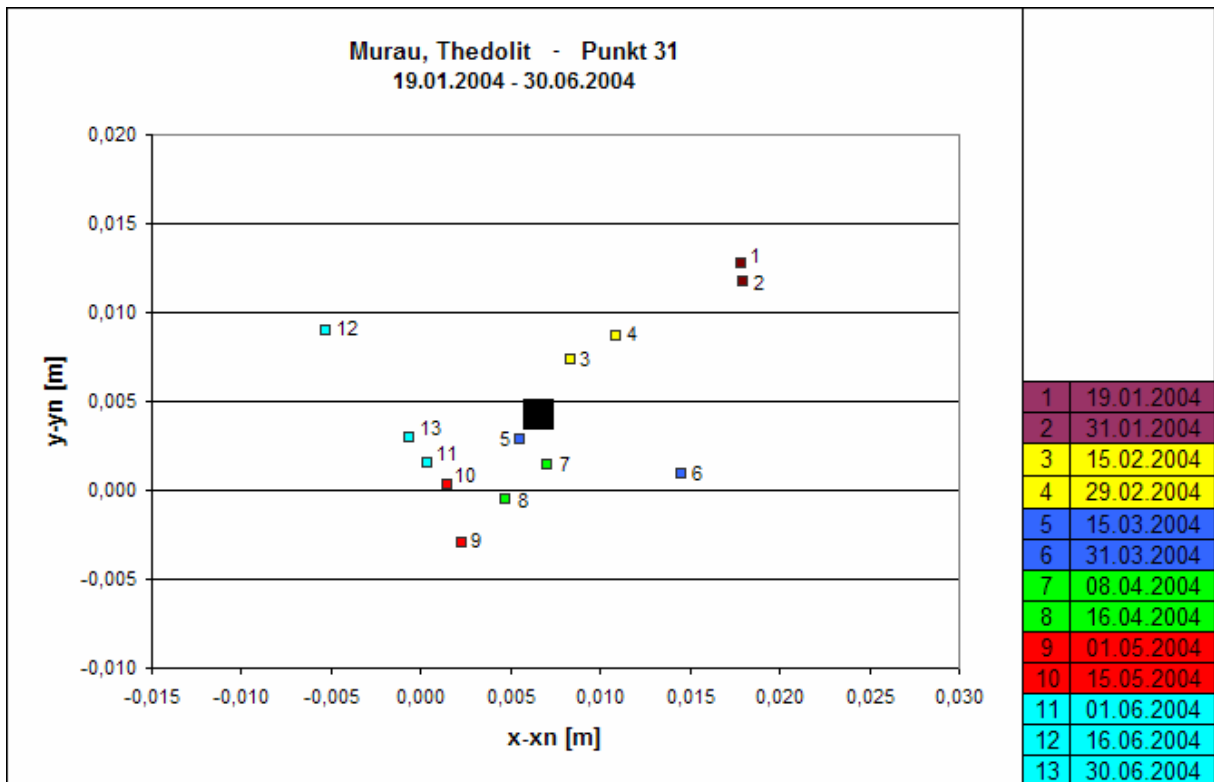


Abb. 5-33: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 31

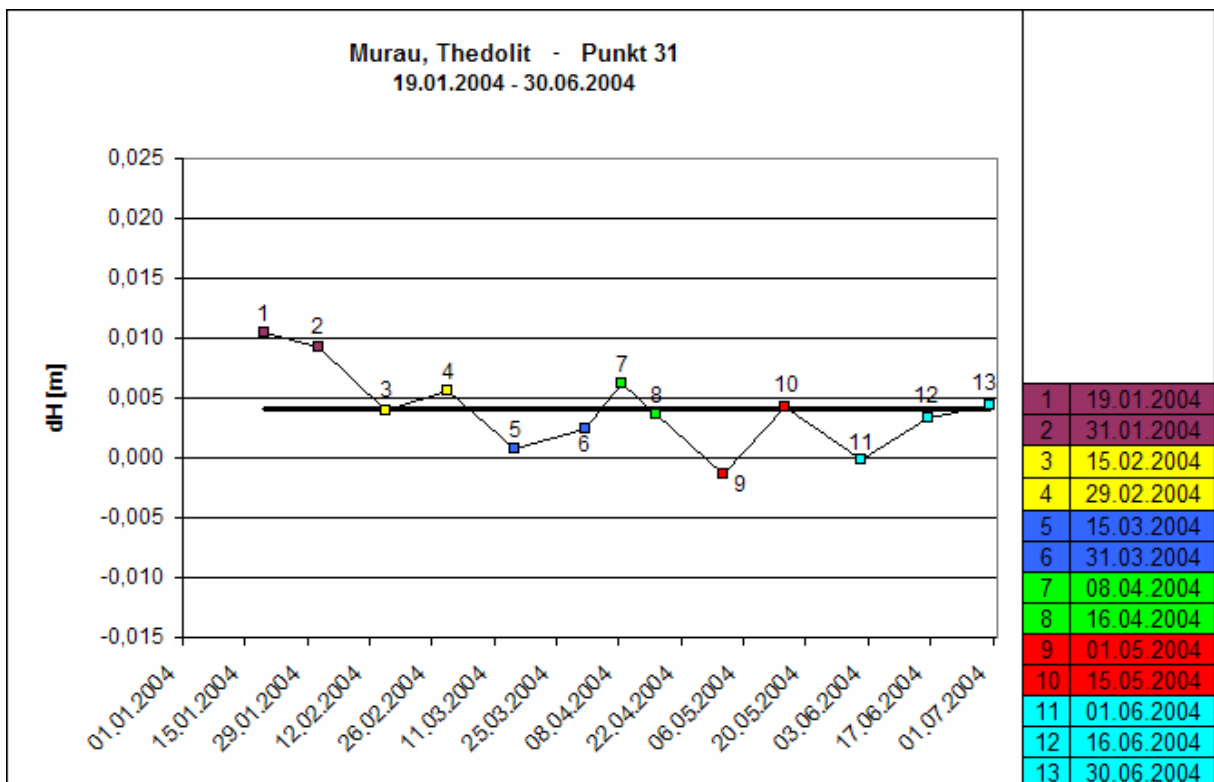


Abb. 5-34: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 31

Die größten Lage- und Höhenabweichungen des Punktes 31 traten bei der Messung 1 mit 1,4 cm und 0,6 cm auf.

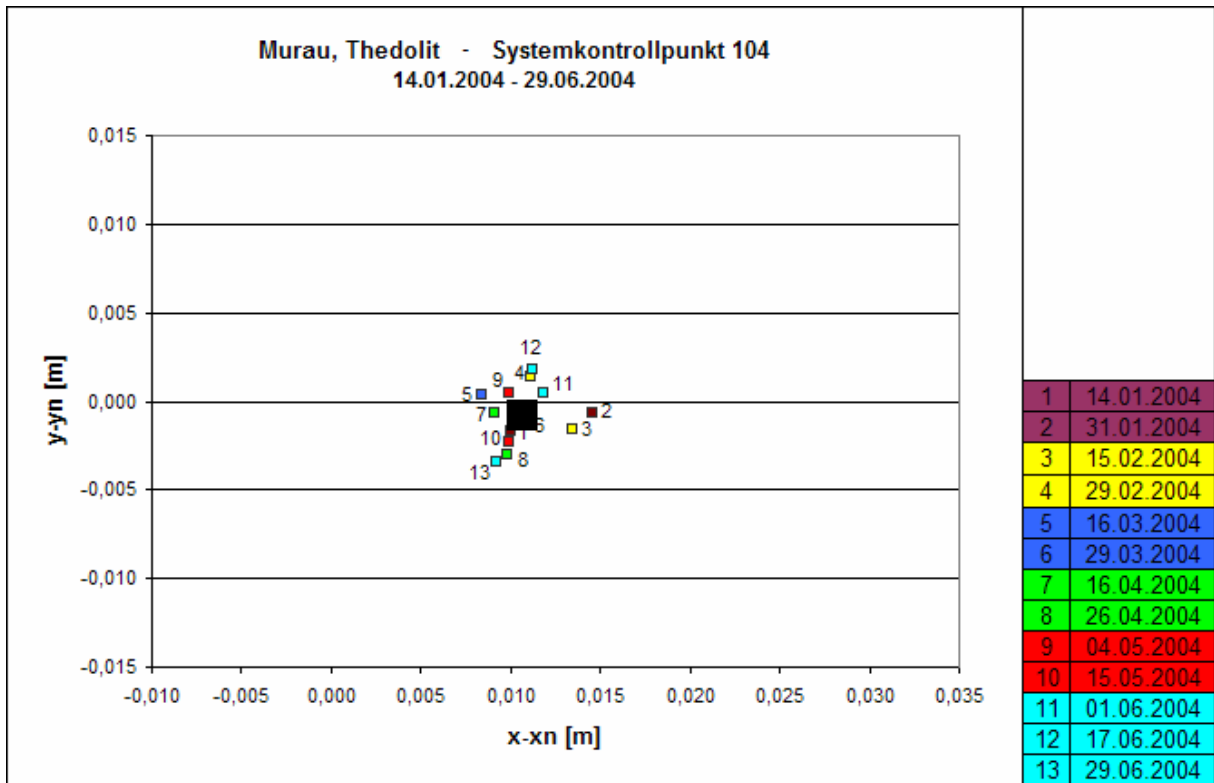


Abb. 5-35: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 104

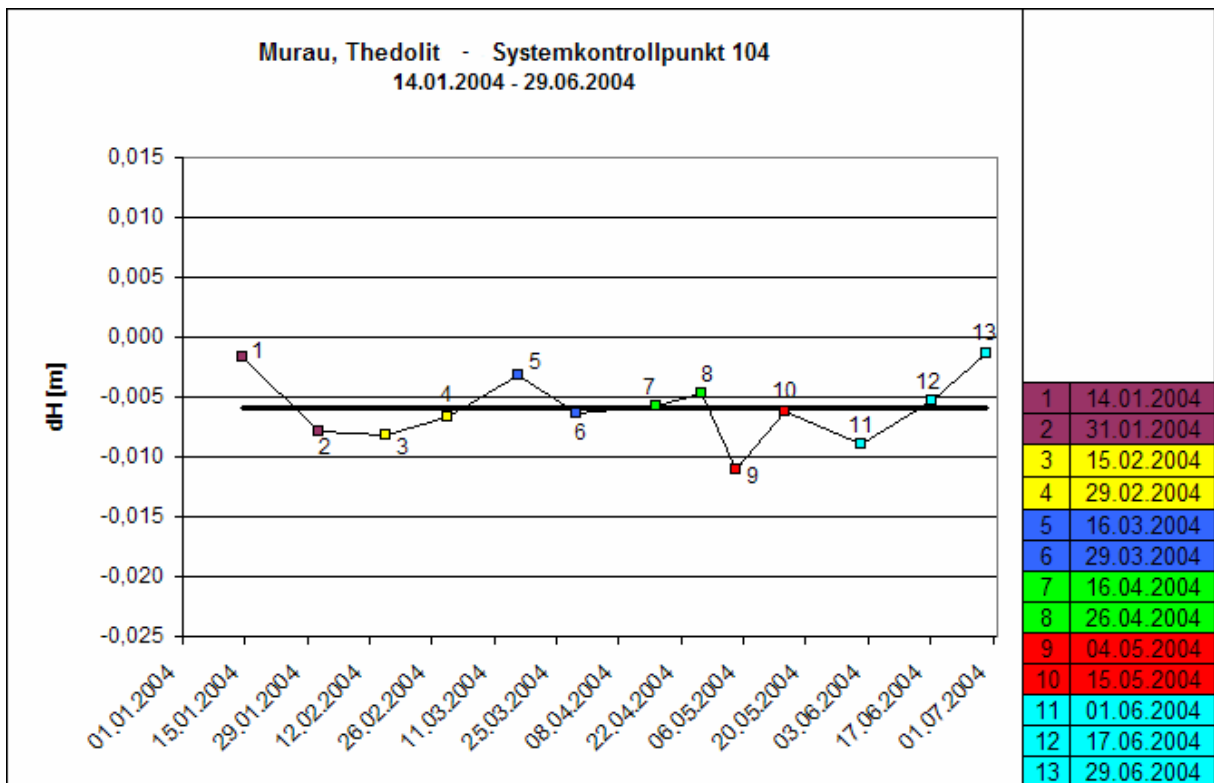


Abb. 5-36: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 104

Der Systemkontrollpunkt 104 hat die geringsten Abweichungen von der wahrscheinlichsten Lage des Punktes. Die Abweichungen betragen 0,4 cm (Lage) und 0,2 cm (Höhe).

In der Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Punkt	Messdauer	Messabweichung [cm]	
		Lage	Höhe
Punkt 3	6 Monate	1,4	0,9
Punkt 4	6 Monate	1,8	2,5
Punkt 5	6 Monate	1,0	0,9
Punkt 31	6 Monate	1,4	0,6
Punkt 104	6 Monate	0,4	0,2
Erreichte Abweichung [cm]:		2,0	2,5

Tab. 5-1: Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse

Der Schwankungsbereich der gesamten Messabweichungen kann mit +/- 2,0 cm für die Lage und 2,5 cm für die Höhe angegeben werden. Dies entspricht in etwa der Messgenauigkeit nach den Erfahrungswerten für Theodolitmessungen (Zangerl et al., 2008).

5.5 Messung von Lageveränderungen mittels GPS

Der Grundgedanke bei der Positionsbestimmung durch das Global Positioning System (GPS) ist die Distanzmessung zu Satelliten, deren Bewegungsbahnen bekannt sind. Das Gesamtsystem besteht aus drei Segmenten. Diese sind:

- das Weltraumsegment aus 24 Satelliten, die in einer Höhe von 20.000 km in 6 Bahnen in 12 Stunden um die Erde kreisen,
- das Kontrollsegment, das die Satellitenbahnen überwacht, und
- das Benutzersegment, das aus einer GPS-Antenne und dem Empfänger besteht.

Zur Lagebestimmung eines gewünschten Punktes in brauchbarer Genauigkeit muss dieser gleichzeitig durch 4 Satelliten beobachtet werden können. Das GPS-Koordinatensystem beruht auf dem World Geodetic System. Daher werden die Daten meist in ein lokales Koordinatensystem umgewandelt. Für Monitoringaufgaben werden hochgenaue GPS-Messungen mit differentiellen Messverfahren (DGPS) eingesetzt.

Differentielle Messverfahren bestehen aus den oben aufgezählten Segmenten, wobei sich das Benutzersegment aus Mehrkanalempfängern und aus spezieller Auswertsoftware zusammensetzt. Einer der mindestens zwei Empfänger wird als Referenzstation außerhalb der Bewegung positioniert und in ein lokales Koordinatensystem eingemessen. Der zweite Empfänger wird auf dem zu beobachtenden Punkt in der Massenbewegung fixiert. Durch die Signale der Satelliten und der Referenzstation können die Koordinaten des Messpunktes mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Die Anzahl der Monitoringpunkte ist beliebig wählbar. Für die Auswertung der gemessenen Daten werden diese auf einen Computer mit geeigneter Spezialsoftware übertragen und bearbeitet. Es können Verschiebungen, Geschwindigkeitsänderungen und Relativverschiebungen zwischen den Monitoringpunkten berechnet werden. Das erleichtert die Erkennung der Kinematik und des Versagensmechanismus. GPS-Systeme können zwar diskontinuierlich angewendet werden, durch die gute Eignung der Systeme zur Automatisierung kommen diese jedoch meist kontinuierlich und vollautomatisiert auch für Frühwarnsysteme zum Einsatz. Da GPS-Systeme günstige, genaue und einfach herstellbare Monitoringsysteme darstellen, wird im Folgenden noch auf einige zu beachtende Faktoren eingegangen. Um eine hohe

Messgenauigkeit zu erreichen, ist es wie beschrieben notwendig, Signale von mindestens vier Satelliten zu empfangen. Dies kann vor allem in abgelegenen Gebieten schwierig sein. Baumbewuchs oder steile Felsböschungen können die Signale abschatten oder verzerren. Da sich die Referenzstation auf einer nicht bewegten Position befinden sollte, stellt dies bei Monitoringaufgaben, die mehrere Jahre dauern können, eine Schwierigkeit dar und es ist ratsam, bei der Wahl dieser einen Geologen beizuziehen. Die Vorteile des GPS-Verfahrens sind:

- es muss keine Sichtverbindung zwischen den Benutzersegmenten bestehen,
- der Einfluss von Wetter und Tageszeit auf die Messergebnisse ist geringer als bei anderen terrestrischen Methoden und
- die Messgenauigkeit bleibt auch bei größeren Abständen zwischen den Monitoringpunkten unverändert.

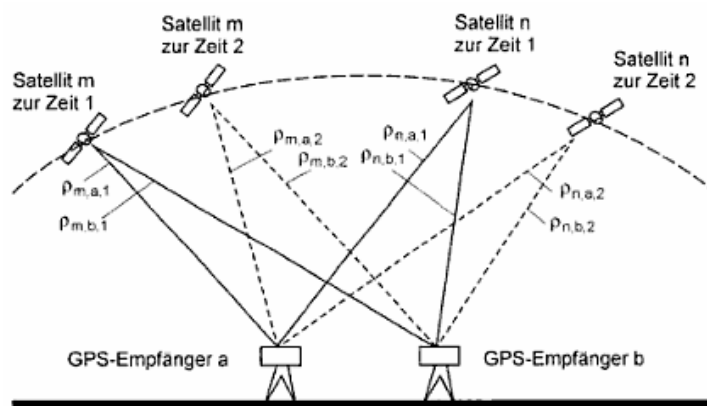


Abb. 5-37: Prinzip differenziertes GPS

(aus: Mansfeld, 2010)



Abb. 5-38: Leica GPS-Antenne

(aus: Leica-Geosystems, 2011)

5.6 Messung von Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bohrloch

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Sensoren und Messsystemen, die die Verformungen an der Oberfläche messen, werden in diesem Abschnitt solche zur Bestimmung der Verschiebungen innerhalb der Massenbewegung beschrieben. Sie tragen zum besseren Verständnis der Versagensmechanismen bei, indem sie z.B. die Tiefe einer Gleitfläche bestimmen. Zum Einbringen der Messsensoren ist in allen Fällen ein Bohrloch notwendig, das die Kosten erhöht. Daher werden die Verfahren punktwise in besonders interessanten Bereichen angeordnet. Obwohl einige der Systeme vorgefertigt zum Verwendungsort gebracht werden können, ist vom Einbau durch fachfremde Personen aufgrund der Komplexität der Systeme abzusehen.

5.6.1 Extensometer

Extensometer dienen zur Messung von Längenänderungen in Richtung der Bohrlochachse, die beliebig geneigt sein kann. Grundsätzlich unterscheidet man Stangen-, Draht- und Sondenextensometer.

Stangen- und Drahtextensometer bestehen aus mindestens einem Verankerungspunkt, wenigstens einem Messgestänge oder Messdraht und dem Messkopf mit der Messeinrichtung. Das Messgestänge oder der Messdraht wird beweglich in einem Hüllrohr

aus Kunststoff geführt und kann aus Stahl, Glasfaser oder Karbon bestehen. Das Messgestänge oder der Messdraht leitet die Relativverschiebungen zwischen Verankerungspunkt und Messkopf zum Messkopf, wo die Relativverschiebungen mit Messuhren oder elektronischen Wegaufnehmern abgenommen werden können. Bei größeren Bohrlochdurchmessern können Mehrfachextensometer aus bis zu 13 Einzelextensometern in verschiedenen Tiefen verankert werden, um differenzierte Aussagen über die Längenänderungen in den einzelnen Abschnitten zu erhalten.

Mit Gleitmikrometern, auch Sondenextensometer genannt, können auch Längenänderungsmessungen in Richtung der Bohrlochachse in einem Inklinometerrohr durchgeführt werden. Dazu wird die mobile Sonde in das Rohr eingeführt und schrittweise im Abstand von einem Meter eine Messung vorgenommen. Nach Beendigung der Arbeiten wird der Sensor wieder entfernt.

Der Messweg dieser Systeme ist durch die Wegaufnehmer und die Hüllrohre beschränkt, wobei die Messlänge der Bohrlochlänge entspricht. Für Frühwarnsysteme sind Extensometer nur bei bestimmten Versagensmechanismen, wie z.B. dem Fallen, einsetzbar. Sie liefern jedoch wichtige Anhaltspunkte für die Interpretation einer Massenbewegung.

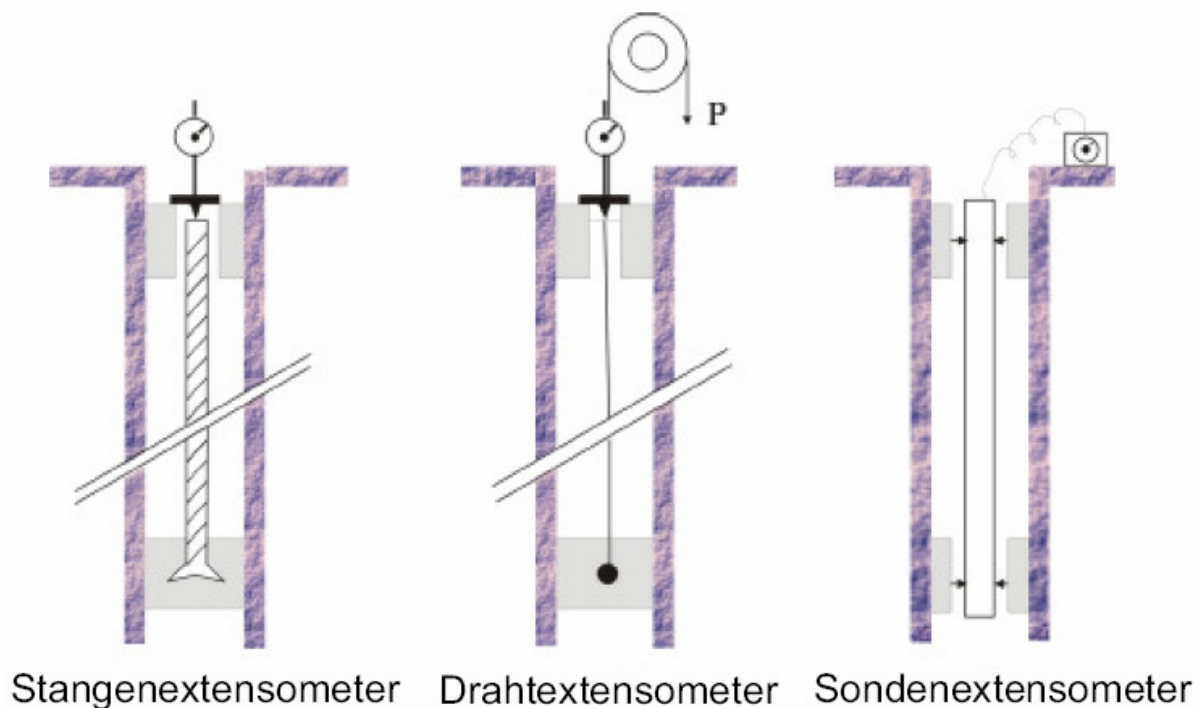


Abb. 5-39: Extensometervarianten

(aus: gif-ettlingen, 2011)

5.6.2 Inklinometer

Inklinometer sind Neigungsmessgeräte, mit denen Verschiebungen in zwei orthogonale Richtungen normal zur Bohrlochachse bestimmt werden können. Sie werden zum Monitoring von rutschungsgefährdeten Baugruben, Dämmen, Böschungen, Hängen usw. eingesetzt. Werden mehrere Inklinometer in der Falllinie eines Hanges angeordnet, kann die Gleitflächentiefe genau bestimmt werden.

Das Messsystem setzt sich aus der Messsonde, dem vergüteten Verbindungskabel, einem Datenaufzeichnungsgerät und dem Führungsrohr zusammen. Die Messsonde besteht aus einem 50 oder 100 cm langen zylindrischen Neigungsmesser, der auf zwei gefederten Wippen mit Laufrädern im Inklinometerrohr gehalten wird und die Messung durchführt (Abb.5-40). Das Verbindungskabel gibt die Messdaten an das digitale Aufzeichnungsgerät weiter und ermöglicht durch aufgebrachte Markierungen die Feststellung der Höhenlage der Sonde. Die Segmente des Führungsrohres aus HPVC (Hart-PVC) oder Aluminium mit einer Länge von drei oder sechs Metern werden durch verklebte oder genietete Verbindungsstücke zusammengefügt und in eine Bohrung versetzt. Zur Gewährleistung der kraftschlüssigen Verbindung mit dem umgebenden Boden wird der Ringraum zwischen Bohrlochwand und Führungsrohr mit Zementmörtel verfüllt. Bei diesem Vorgang sollte das Rohr mit Wasser gefüllt werden, um Verunreinigungen durch eintretende Zementsuspension zu verhindern. Das Inklinometerrohr besitzt an der Innenseite vier Rillen, die im 90° Winkel angeordnet sind. Diese haben die Aufgabe, die Laufräder der Messsonde zu führen. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass es zu keiner Verdrehung des Rohres kommt und dass ein Rillenpaar in Richtung der Hauptbewegung zeigt. Nach der Installation des Rohres wird die Nullmessung durchgeführt. Für die Messung wird die Inklinometersonde am Verbindungskabel zum Bohrlochtieftsten geführt und in 50 oder 100 cm Abständen - je nach Länge der Sonde - eine Messung der Bohrlochachsenneigung durchgeführt. Nach dem ersten Durchgang wird die Sonde um 180° gedreht und von neuem begonnen, um die Messgenauigkeit, wie im Kapitel Klinometer beschrieben, zu erhöhen. Die Messdaten werden vom Aufzeichnungsgerät gespeichert und grafisch ausgewertet. Zeigt die Verschiebungslinie über die Tiefe einen tangentialen Übergang zur Nulllinie, kann angenommen werden, dass sich der Fußpunkt im unbewegten Bereich unter der Bewegung befindet. Zur Kontrolle sollte der Inklinometerkopf mit geodätischen Verfahren eingemessen und durch Rückrechnung kontrolliert werden, ob der Fußpunkt in Ruhe ist. Der Messweg dieses Systems ist von der Verformbarkeit des Führungsrohres bis zum Reißen und der Länge der Sonde bis zum Einkeilen abhängig und wird somit von der Kinematik der Bewegung bestimmt. Da diese Systeme periodisch angewendet werden, sind sie ausschließlich für Monitoringaufgaben zu verwenden.

Sind Inklinometermessungen für ein Frühwarnsystem notwendig, können In-Place oder Ketteninklinometersysteme verwendet werden. Diese Systeme bestehen aus mehreren Inklinometersonden. Diese werden über die gesamte Bohrlochlänge aneinandergereiht angeordnet und verbleiben permanent im Inklinometerrohr. Die Messung erfolgt nach den oben angeführten Prinzipien, sie wird jedoch kontinuierlich durchgeführt.

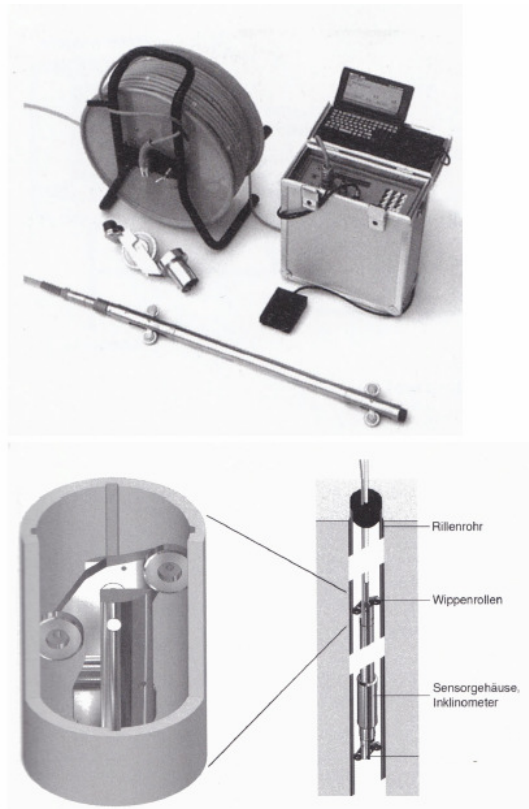


Abb. 5-40: Inklinometerausrüstung und Messprinzip (aus: Witt, 2008)

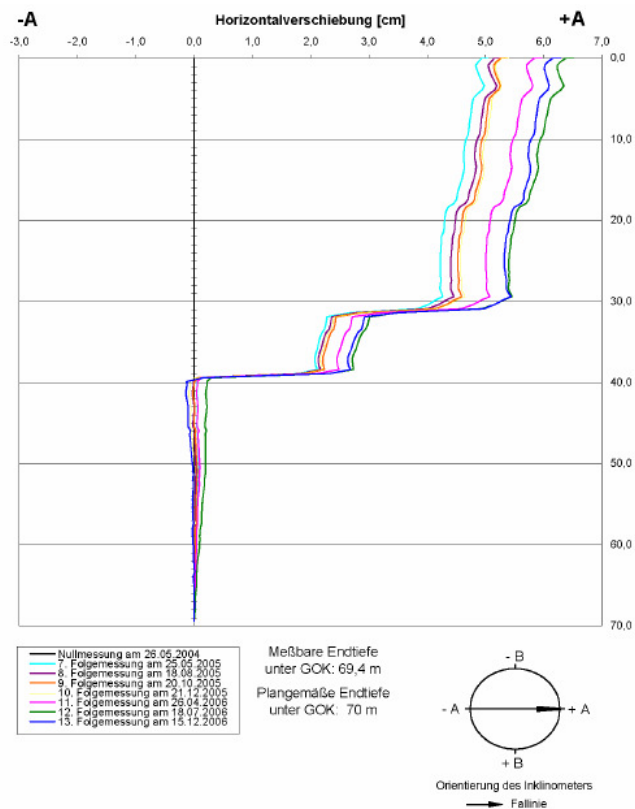


Abb. 5-41: Auswertungsdiagramm (aus: Adam et al., 2009)

5.6.3 Trivec Sonde

Trivec Sonden sind eine Kombination aus Inklinometer und Extensometer und können sowohl Verschiebungen in Bohrlochrichtung als auch normal auf die Bohrlochrichtung mit hoher Genauigkeit messen.

Die Bestandteile und die Funktionsweise sind mit denen des Sondenextensometers und des Inklinometers vergleichbar, lediglich die Beschaffenheit des Führungsrohres weicht ab. Es besitzt im Abstand von einem Meter Messmarkierungen, in denen sich die Sonde durch eine Drehung um 45° verspannen lässt. Die Messwege sind in Bohrlochrichtung mit ±10 mm und die Neigungsänderung der Achse mit 14,5° beschränkt. Es handelt sich um ein diskontinuierlich anzuwendendes System und ist für Frühwarnaufgaben daher nur bedingt verwendbar.

5.6.4 Time Domain Reflectometry

Diese Verfahren befinden sich in Bezug auf das Monitoring von Verschiebungen in Massenbewegungen erst in der Entwicklungsphase. Gegenwärtig wird das System zur Bestimmung der Tiefenlage diskreter Scherbahnen benützt. Eine Aussage über den Betrag der Verschiebung ist nur bedingt möglich, die Orientierung der Verstellung kann gegenwärtig noch nicht bestimmt werden. Forschungsarbeit in diese Richtung wird derzeit von der TU-München und der UniBw-München geleistet.

Das TDR-System besteht aus einem Koaxialkabel und einem Messgerät und kann als kabelgebundenes Radar bezeichnet werden. Zur Messung werden durch das in ein Bohrloch einzementierte Kabel mit dem Messgerät elektrische Impulse geschickt. Treffen diese, wie in Abbildung 5-42 erkennbar, an eine Deformation des Koaxialkabels werden die Signale teilweise an das Messgerät zurückgeworfen. Die Bestimmung der Tiefenlage erfolgt durch die Laufzeitmessung der Reflektionen. Durch weitere Analysen des empfangenen Signals können Anhaltspunkte über die Art und den Betrag der Verstellung gegeben werden. Die Messwerte werden im Messgerät gespeichert und durch geeignete Software grafisch ausgewertet. Es gibt vielversprechende Versuche, die Systeme automatisiert in Monitoringnetzwerke zu integrieren. Der Nachteil der TDR ist, dass langsame Biegungen des Kabels auf langen Strecken nicht erfasst werden können. Vorteilhaft ist, dass das System in stark bewegten Gleitzonen wesentlich größere Verschiebungen als Inklinometer aufnehmen können. Weiters ist es möglich, Messkabel nachträglich in teilweise abgescherte und somit unbrauchbare Inklinometerrohre einzubauen, um weiter Messungen durchführen zu können und somit Kosten für zusätzliche Bohrungen zu sparen.

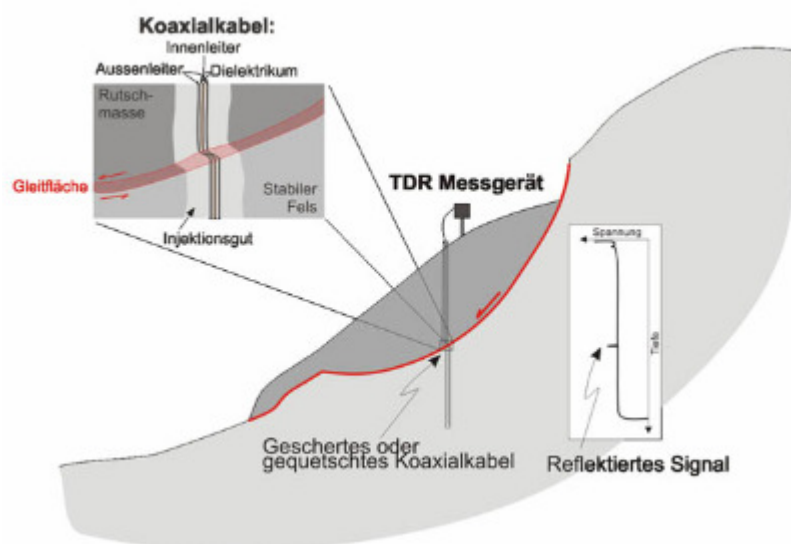


Abb. 5-42: Messprinzip TDR-Methode

(aus: Singer & Thuro, 2007)

5.7 Messung von Kräften und Spannungen

Da Umlagerungen von Kräften und Spannungen Auswirkungen auf die Kinematik von Massenbewegungen haben, wird versucht, diese mit unterschiedlichen Verfahren in situ zu messen. Dabei spielen durch Grund- oder Kluftwasser verursachte Kräfte eine besondere Rolle, da sich durch das Vorhandensein von Wasser auch andere physikalische Größen - z.B. der innere Reibungswinkel einer Kluftfüllung - ändern. Einige dieser Messverfahren werden auch zur Kontrolle von Hangstabilisierungen mittels verankerter Bauwerke eingesetzt, oder sollen Kräfte, die auf diese wirken, messen.

5.7.1 Piezometer

Mit Piezometern ist es möglich, den Berg- oder Grundwasserspiegel in Bohrlöchern zu beobachten. Diese haben wesentlichen Einfluss auf die Verformungsraten oder können gar den auslösenden Faktor einer Massenbewegung darstellen. Im einfachsten Fall wird mit einem Lichtlot die Höhe des Wasserspiegels in einem Steigrohr (Standrohr) gemessen. Das Rohr wird dazu in ein Bohrloch eingebracht und im perforierten Bereich mit Filterkies umgeben. Zur Verhinderung des Einflusses von Oberflächenwasser wird der Ringraum im oberen Bereich mit Tonkugeln oder Injektionsgut verfüllt. Für die Messung wird das auf eine Rolle gewickelte Kabel mit dem daran befestigten Lichtlot in das Steigrohr abgesenkt. Berührt das Lichtlot den Wasserspiegel, leuchtet eine Signallampe auf - es sind auch Varianten mit akustischen Signalen möglich - und es kann mit der auf dem Verbindungskabel angebrachten Messskala die Höhe des Pegels abgelesen werden. Die Wasserdrücke lassen sich durch die gemessene Pegelhöhe berechnen. Sind mehrere wasserführende Schichten vorhanden, können auch mehrere Steigrohre in eine Bohrung eingebaut werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Aquifere sorgfältig gegeneinander abgedichtet werden. Wenn Schichten mit artesischem Wasser beobachtet werden sollen und die Steigrohrhöhe unter der piezometrischen Druckhöhe liegt, wird das Rohr verschlossen und der Wasserüberdruck mit einem Manometer gemessen. Der Unterschied zwischen der üblichen Bauweise und der für artesisches Wasser notwendigen wird in Abbildung 5-43 aufgezeigt.

Es ist auch möglich, kontinuierliche Messungen mit einem Druckaufnehmer durchzuführen. Dieser wird entweder in ein Bohrloch versenkt oder in den Boden eingepresst. Die gemessenen Daten werden über ein Kabel an ein Anzeigegerät weitergeleitet und aufgezeichnet. Es kommen dafür Sensoren, die auf pneumatischen und elektrischen Messverfahren beruhen, zum Einsatz.

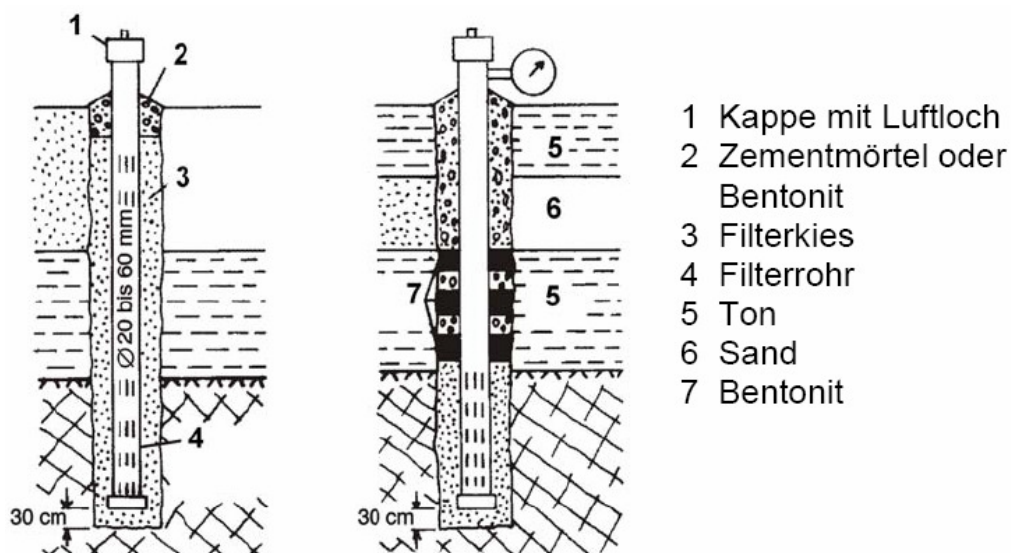


Abb. 5-43: Wasserstandsbeobachtung im Pegelrohr ohne und mit begrenztem Horizont

(aus: gif-ettlingen, 2011)

Für Böden aus feinkörnigen Materialien, die größere adsorptive Bestandteile enthalten, müssen spezielle Porenwasserdruckgeber verwendet werden. Dies ist notwendig, da die

Messergebnisse durch das adsorptiv gebundene Wasser verfälscht werden würden. Porenwasserdruckgeber werden entweder in ein Bohrloch eingebaut oder in den Untergrund eingepresst. Sie bestehen aus einem Filter, der eine dahinterliegende, mit entspanntem Wasser gefüllte Kammer schützt, sowie einer Druck- und einer Überdruckleitung (Abb.5-44). Die Kammer ist mit einer Membran abgeschlossen und bildet mit den Rohrleitungen ein Überdruckventil. Steigt oder fällt der Porenwasserdruck, wird die Druckänderung über den Filter und die Kammer auf die Membran übertragen. Zur Messung mit einem pneumatischen Porenwasserdruckgeber wird der Druck in der Zuleitung (in der Abb. rechts) so lange erhöht, bis sich die Membran abhebt und die Überdruckleitung (links) freigibt. Der dafür benötigte Druck entspricht dem Porenwasserdruck. Die Messung des für die Abhebung der Membran benötigten Druckes erfolgt mit einem Manometer.

Bei elektrischen Porenwasserdruckgebern ist eine Edelstahlmembran mit einem Dehnmessstreifen bestückt, der über die unterschiedliche Dehnung der Membran bei verschiedenen Drücken den Porenwasserdruck misst. Bei den elektrischen Verfahren werden anstelle der Druckleitungen elektrische Kabel zur Membran geführt.

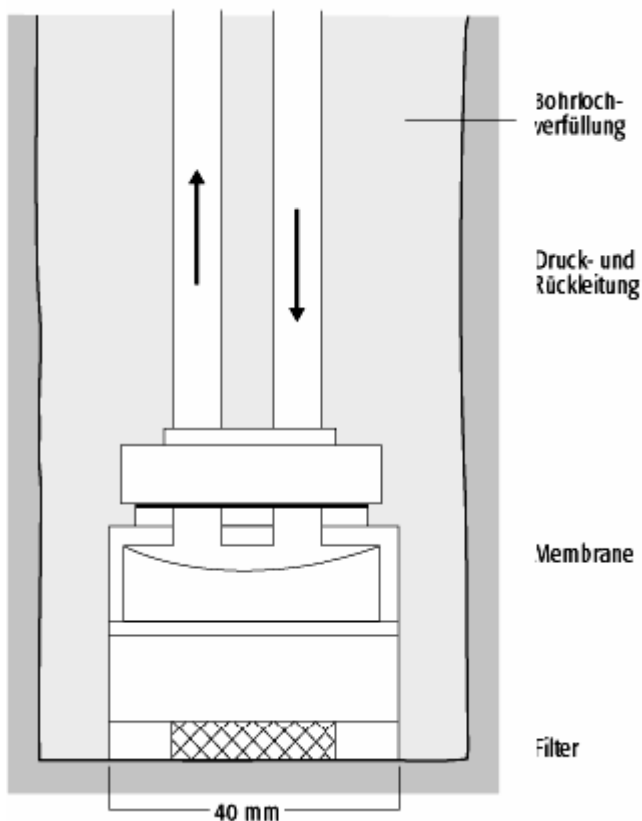


Abb. 5-44: Funktionsweise Porenwasserdruckgeber

(aus: GeoDZ, 2011)

Allgemein ist es für die Bestimmung von Bergwasserniveaus notwendig, in mehreren abgedichteten Tiefenbereichen eines Bohrlochs zu messen und die Messsensoren so zu positionieren, dass die maßgebenden Kluftsysteme erfasst werden. Automatisierte Methoden eignen sich vor allem dazu, einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Wasserhaushalt und einer Beschleunigung der Massenbewegung zu erkennen und ermöglichen eine permanente Datenaufzeichnung. Vor Versuchen, Frühwarnsysteme ausschließlich auf Basis von Niederschlagsmessungen und/oder Berg- oder

Grundwasserpegeln zu betreiben, muss gewarnt werden, da ein Hangversagen oft nicht nur von den Bergwasserverhältnissen abhängt.

5.7.2 Druckkissen

Druckkissen oder Druckdosen sind Messsysteme, die Spannungen erfassen. Sie werden meist zwischen Boden/Fels und einem Bauwerk eingesetzt. Es ist aber auch möglich, sie in Felsklüfte oder in Lockergesteinschüttungen einzubauen und Spannungen in einem Fels- oder Lockergesteinskörper zu messen. Die Systeme bestehen aus dem Druckkissen, dem Überdruckventil, den Rohrleitungen, einer hydraulischen Pumpe und dem Ablesemanometer (Abb. 5-45).

Das Druckkissen besteht aus zwei druckdicht miteinander verbundenen Metallplatten, die in geringem Abstand zueinander angeordnet und mit einer Flüssigkeit gefüllt sind. Dieses Kissen wird im Zuge der Bauarbeiten an einem Bauwerk befestigt. Bildet sich durch eine Belastung oder Verschiebung eine Spannung an der Kissenoberfläche, steigt oder sinkt die Spannung der Flüssigkeit im Inneren gleichermaßen. Zur Messung dieser wird mit der hydraulischen Pumpe der Druck so lange erhöht, bis der Druck in der Druckleitung geringfügig höher als im Druckkissen ist und sich die Membran im Überdruckventil abhebt. Dadurch öffnet sich die Rücklaufleitung, die Flüssigkeit strömt in diese und der Druck in der Druckleitung kann nicht weiter ansteigen. Die Ablesung des Drucks erfolgt durch einen Manometer zwischen der Pumpe und dem Ventil. Für Erddruckmessungen kann ein Messbereich bis zu 200 bar benötigt werden. Es handelt sich um diskontinuierlich arbeitende Systeme, die nur bedingt mit Frühwarnsystemen gekoppelt werden können.

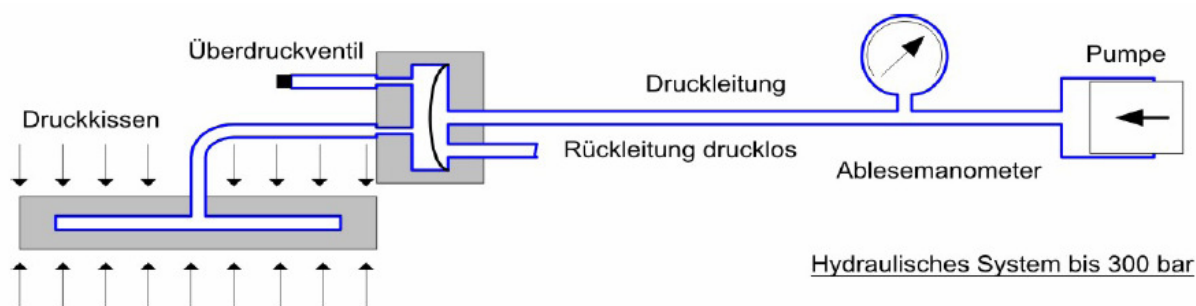


Abb. 5-45: Schema einer Druckmessdose

(aus: GLÖTZL, 2008)

5.7.3 Ankerkraftgeber

Ankerkraftgebern werden zur Beobachtung von Ankerkräften vorgespannter oder verankerter Konstruktionen verwendet. Bei Hangsicherungen dienen sie zur Überwachung der Funktionstüchtigkeit und der Auslastung der Sicherungsmaßnahmen. Sie können aus elektrischen oder hydraulischen Messsensoren bestehen und werden am Ankerkopf installiert.

Elektrische Ankerkraftgeber bestehen aus Dehnmessstreifen, die an einem kurzen Spezialstahlrohr angebracht sind. Sie werden – wie in Abbildung 5-46 – zwischen der Anker Mutter oder der Lastverteilerplatte und der Unterlegsplatte eingebaut. Somit wird die Ankerkraft vollständig auf das Stahlrohr übertragen. Durch die Dehnung der

Dehnmessstreifen kann mit bekanntem E-Modul des Spezialstahlrohres die vorhandene Ankerkraft ermittelt werden. Durch die Anordnung mehrerer Messstreifen am Umfang des Rohres sind auch unsymmetrische Kräfteinleitungen erkennbar, die unweigerlich immer vorhanden sind.

Hydraulische Ankerkraftgeber beruhen auf dem Messprinzip der Druckkissen. Sie bestehen aus runden, ölgefüllten, druckdichten Kissen mit einem zentralen Loch für den Anker und werden wie oben beschrieben angebracht. Über die bekannte Grundfläche kann mit dem gemessenen Flüssigkeitsdruck die Ankerkraft berechnet werden. Der Druck wird bei guter Zugänglichkeit direkt mit einem Manometer gemessen. Ist dies nicht möglich oder wird eine automatisierte Mess- und Registrieranlage gewünscht, können die Drücke mit elektrischen Drucksensoren abgelesen werden. Für Frühwarnaufgaben werden Ankerkraftgeber nur in Ausnahmefällen eingesetzt.

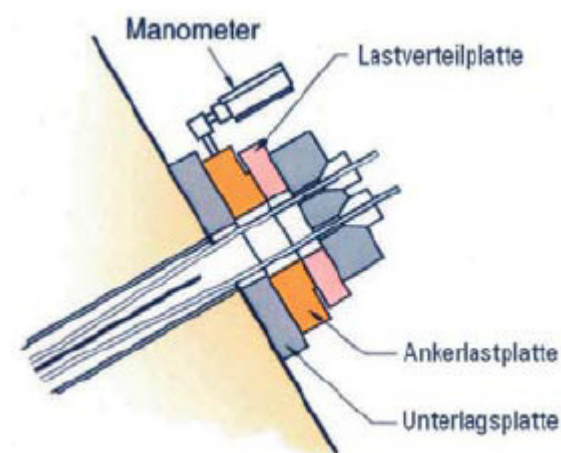


Abb. 5-46: Schema hydraulischer Ankerkraftgeber

(aus: Geodata, 2011)

5.8 Messung von Erschütterungen mittels Geophonen (Mikroseismik)

Geophone werden in der allgemeinen Seismik angewandt, um Schallwellen, die durch Hammerschläge, Vibrationen oder Explosionen ausgelöst werden, zu messen und um über die Laufgeschwindigkeit zwischen der Anregung des Untergrundes und dem am Geophon ankommenden Signal Rückschlüsse auf physikalische Bodenkennwerte und den Bodenaufbau treffen zu können. Diese Verfahren werden für das Auffinden von z. B. Erdöllagerstätten oder für Baugrunduntersuchungen angewandt und können als aktive Seismik bezeichnet werden. Für Monitoringaufgaben wird hingegen ein passives seismisches Messsystem, das ohne äußere Anregungen des Bodens auskommt, verwendet. Das Prinzip der Mikroseismik besteht darin, dass Mikrobeben - die durch die Aktivierung einer Bewegung auslöst werden - Schallwellen erzeugen, die durch mehrere angebrachte Geophone geortet werden können. Die Positionierung der Geophone kann an der Oberfläche und für die genauere Bestimmung der Herdtiefe in Bohrlöchern erfolgen. Geophone bestehen aus einer mit einer Feder verbundenen Spule und einem Permanentmagneten (Abb. 5-47) Wird durch eine Bewegung des Bodens der Abstand zwischen den Bauteilen verändert, entsteht in der Spule eine zur Geschwindigkeit proportionale Spannung, die gemessen wird. Die Messdaten werden automatisiert an ein

Anzeigegerät übertragen und Störeinflüsse - z.B. durch Fernbeben - durch die Untersuchung unterschiedliche Frequenzinhalte eliminiert. Am Ende der Datenbearbeitung kann ein dreidimensionales Bild, auf dem die Lage und die zeitliche Verteilung der Mikrobeben ersichtlich sind, entstehen. Ein Anstieg der Anzahl der seismischen Ereignisse bedeutet immer eine Aktivierung der Bewegung. Ein Abfall kann eine Verlangsamung aber auch eine Intensivierung bedeuten, wenn die Gleitfläche durch die Bewegungen zunehmend geglättet wird (Diese Tendenz ist z.B. bei den Ergebnissen von Erschütterungsmessungen in Vajont beobachtbar). Die Ergebnisse von sind daher nur bedingt interpretierbar. Trotzdem sind diese Systeme Stand der Technik und sollten daher in kritischen Fällen eingesetzt werden.

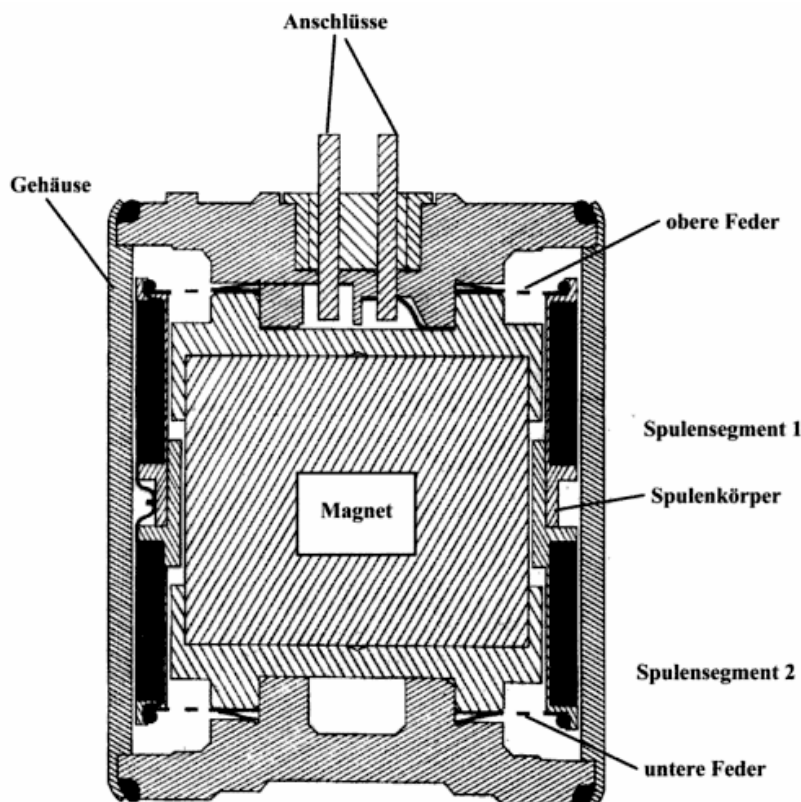


Abb. 5-47: Aufbau eines Geophons, Typ SM4

(aus: Knödel et al., 2005)

5.9 Messung durch Fernerkundungen

Fernerkundungen werden beim Monitoring bevorzugt zur flächenhaften Beobachtung angewandt. Da es sich um berührungs- und reflektorlose Messungen handelt, werden sie vor allem zu Untersuchungen in nicht begeharen Gebieten oder zu flächigen Verschiebungsmessungen eingesetzt. Die Messungen können terrestrisch, flug- und satellitengestützt durchgeführt werden. Bei den fluggestützten Beobachtungssystemen erfolgt die Datenerfassung mittels Aufnahmegeräten, die an Flugzeugen oder Helikoptern angebracht sind. Dies stellte bisher im Bezug auf die Verfügbarkeit und die entstehenden Kosten oft einen wesentlichen Ausschlussgrund dar. Durch Weiterentwicklungen der Messgeräte können diese nunmehr aber an kleineren Air-Quad-Drohnen befestigt eingesetzt und somit kostengünstiger betrieben werden.

5.9.1 Laserscan

Laserscanning Verfahren eignen sich zur direkten Lagebestimmung von Punkten in dreidimensionalen Koordinatensystemen. Für die Messung sendet der Scanner einen Laserimpuls über einen drehbaren Spiegel auf die Erdoberfläche. Durch die Drehung des Spiegels wird der Laserstrahl quer zur Bewegungsrichtung abgelenkt und das Gelände somit streifenweise gescannt (Abb. 5-48). Durch das Anfügen mehrerer Scanlinien hintereinander entsteht ein zweidimensionales Bild, in dem alle gemessenen Punkte durch Lagekoordinaten bestimmt sind. Die Höhenmessung erfolgt durch die Laufzeitmessung zwischen dem Aussenden des Impulses und dem Empfang des von der Oberfläche reflektierten Laserstrahls. Über die Intensität des reflektierten Strahls kann auf die Beschaffenheit der Oberfläche geschlossen werden (z.B. Schnee oder Fels). Die Rohdaten bilden eine dreidimensionale Punktwolke, die mit geeigneter Software ausgewertet wird. Dabei werden Störpunkte, die z.B. keine Oberflächenpunkte darstellen und z.B. von Bewuchs verursacht werden, entfernt und aus den bereinigten Daten die Geländeoberfläche rekonstruiert. Die Oberfläche kann als dreidimensionales Oberflächenmodell (DSM) oder als Terrainmodell (DTM), das auch Höhenmodell (DHM) genannt wird, wiedergegeben werden. Die Modelle DSM und DTM unterscheiden sich durch den Inhalt der Darstellung, wobei erstere anthropogene Objekte und Bewuchs beinhalten, und zweitere die Erdoberfläche zeigen (siehe Abb. 5-49).

Zur Erkennung von Verformungen wird der erste Scan als Referenz (Nullscan) für die später durchgeführten Scans verwendet. Nach mindestens zwei Messungen können somit Verformungsvektoren zwischen der Referenzfläche und der neuen Lage der Punkte dargestellt werden. Die Größe der Verschiebungen wird durch farbliche Kennzeichnung ersichtlich gemacht. Auf diesem Prinzip beruhen alle Laserscanningsysteme.

Terrestrische Systeme (TLS) dienen zur Erstellung von kleineren Geländemodellen und werden mit mehr oder weniger horizontalen Blickrichtungen (z.B. vom Gegenhang) aufgenommen. Die Laserscanner sind dafür auf einem Stativ befestigt und werden bei der Aufstellung wie Theodoliten gehandhabt. Die Genauigkeit der Systeme ist von der Entfernung zwischen Laser und Messoberfläche, die bis zu 800 m betragen kann, abhängig. Es können Messgenauigkeiten von unter 10 mm erreicht werden, oft liegen die tatsächlich erreichbaren Genauigkeiten aber weit darüber.

Luftgestützte Laserscanner oder Airborne Laserscanner (ALS oder LiDAR) werden zur Messung an Fluggeräten befestigt. Sie werden meist für großflächigere Untersuchungsgebiete eingesetzt. Für die Messung ist es außerdem notwendig, die Position der Messplattform und die Fluglage zu ermitteln, um die absolute Lage der Punkte feststellen zu können. Die Flughöhen können bis zu 3500 m betragen, dann sinken die Messgenauigkeiten aber auf etwa 10 cm. Daher sollte für Monitoringaufgaben die Flughöhe möglichst gering gehalten werden.

Der Nachteil des Laserscanning ist bei großen Distanzen der Einfluss von atmosphärischen Faktoren. Vorteile sind, dass für die Erstellung das Gefahrengebiet nicht betreten werden muss, bei großen Gebieten eine große Zeitersparnis erzielt werden kann und dass durch die

Messung der Reflektivitätsintensität und der Bearbeitung der Daten eine virtuelle „Entwaldung“ des Untersuchungsgebiets möglich ist.

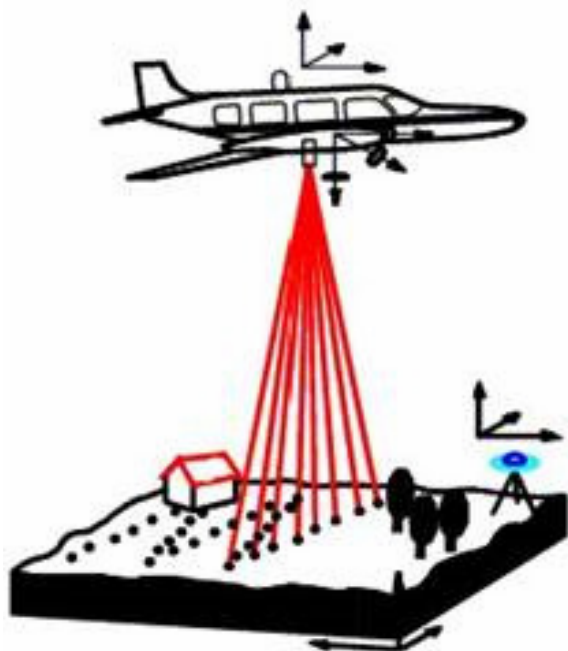


Abb. 5-48: Prinzip ALS
(aus: LAIV-MV, 2011)

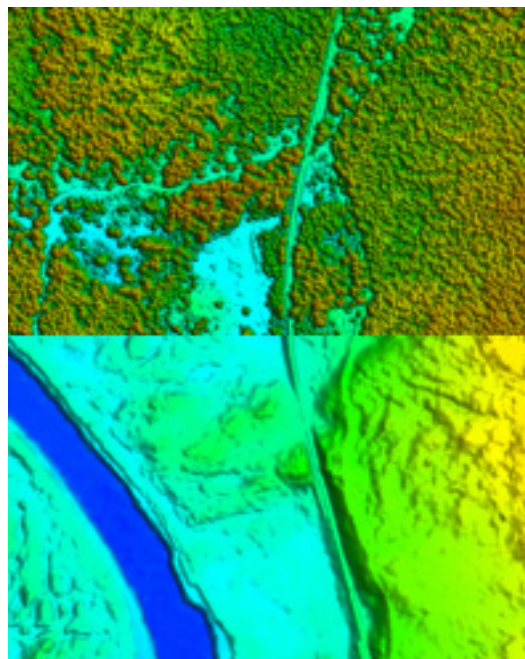


Abb. 5-49: DSM (oben), DTM (unten)
(aus: AVT-ZT, 2011)

5.9.2 Radarmessungen

Bei allen Radarsystemen, die für Monitoringaufgaben benützt werden, handelt es sich um aktive Radarverfahren. Das bedeutet, dass von einer Radarantenne aktiv elektromagnetische Wellen (im Mikrowellenbereich) ausgesendet werden. Durch Laufzeit-, Phasen- und Intensitätsmessungen des von der Messoberfläche reflektierten Signals ist es möglich, die Lage und Höhe von Messpunkten zu bestimmen. Die Radarverfahren haben durch die aktive Aussendung von Signalen den Vorteil, dass sie von der Tageszeit unabhängig eingesetzt werden können. Mittels Berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse (z.B. Bewölkung, Niederschlag) kann die Messgenauigkeit erhöht werden. Radarmessungen können terrestrisch, luft- oder satellitengestützt durchgeführt werden. Grundsätzlich erfolgt die Auswertung über eine farbige Darstellung der Verschiebungsbeträge auf einem Geländemodell (2- oder 3-D).

Bei der einfachsten und günstigsten Radarmessung, dem terrestrischen Radar, ist es auch möglich, ausschließlich Längenmessungen zu ausgewählten Monitoringpunkten durchzuführen. Dafür sind an den gewünschten Messpunkten Reflektoren – die bei anderen Radarmessungen nicht notwendig sind – anzubringen. Beim Längenmessverfahren wird von einer Radarantenne ein Signal kontinuierlich ausgesendet, vom Reflektor zurückgeworfen und durch eine zweite Antenne wieder aufgefangen. Die Messung erfolgt permanent und eignet sich gut für eine Kombination mit Frühwarnsystemen. Ein Beispiel dafür ist die Radarmesseinrichtung (Abb. 5-50), die im Fall "Aknes (N)" (s. Kapitel 8) als Teil des Frühwarnsystems angewendet wird. Werden für die Ausgangssignale hohe Frequenzen

gewählt, können sehr große Messgenauigkeiten (im 0,01 mm – Bereich) erreicht werden. Die Messlängen können bis zu 4 Kilometer betragen.

Darüber hinaus ist es möglich, mit terrestrischen Radarverfahren flächig Verschiebungen zu messen. Dieses Verfahren funktioniert analog den luftgestützten und satellitengestützten Messsystemen (SAR-Interferometrie). Dabei wird durch die Analyse zweier Radarbilder aus unterschiedlichen Blickwinkeln über die Phasendifferenz der reflektierten Radarsignale die Oberflächengeometrie abgeleitet. Die notwendigen Aufnahmen können durch das Verschieben einer kombinierten Sende- und Empfangsantenne auf einem Balken (Abb. 5-51) oder durch eine zusätzliche Empfangsantenne entstehen (bei satelliten- oder luftgestützten Radarsystemen üblich). Außerdem ist es möglich, das betreffende Gebiet zweimalig und versetzt zu überfliegen. Sind die Zeitabstände zwischen diesen Aufnahmen größer, führen Veränderungen der Oberfläche (Gletscherschmelze, veränderte Vegetation, Erosion,...) jedoch zu Fehlern in der Datenauswertung und zu sinkenden Messgenauigkeiten. Aus den beiden erhaltenen Radarbildern wird ein digitales Geländemodell (DGM) erzeugt. Durch weitere, zeitversetzte Aufnahmen des Untersuchungsgebietes ist es möglich, auf dem DGM Verschiebungsbeträge darzustellen. Dieses Verfahren wird als differenzierte Interferometrie (D-InSAR) bezeichnet und wird für Monitoringaufgaben – vor allem in un bebauten Bereichen mit wenig Vegetation – eingesetzt. Probleme können bei diesem Verfahren durch unterschiedliche Witterungsverhältnisse bei den Messungen (Wassergehalt in der Atmosphäre), jahreszeitliche Veränderungen der reflektierenden Oberfläche (Fels, Schnee), Vegetationsänderung usw. auftreten. Um diese Faktoren auszuschließen, wurde die Methode der „Permanent Scatterer“ auf Basis der differenzierten InSAR entwickelt. Dabei wird nicht die gesamte Oberfläche des Untersuchungsgebietes für die Auswertung herangezogen, sondern ausschließlich besonders stabile Punkte, die eine hohe Rückstreuintensität gegenüber der Umgebung aufweisen. Die Punkte müssen daher in den Radaraufnahmen immer wieder erkennbar sein. Hierzu bieten sich vor allem Hausdächer und andere Gebäudeteile an. Aus diesen permanenten Scatterern wird ein Messnetzwerk gebildet, das für die Auswertung verwendet wird. Es können Messgenauigkeiten im mm – Bereich erreicht werden. Die Voraussetzung ist jedoch, dass für eine flächige Interpretation 25 - 30 Bildaufnahmen (Colesanti et al., 2002) und mehr als 10 permanente Scatterer (Allievi et al., 2003) pro km² vorhanden sind.

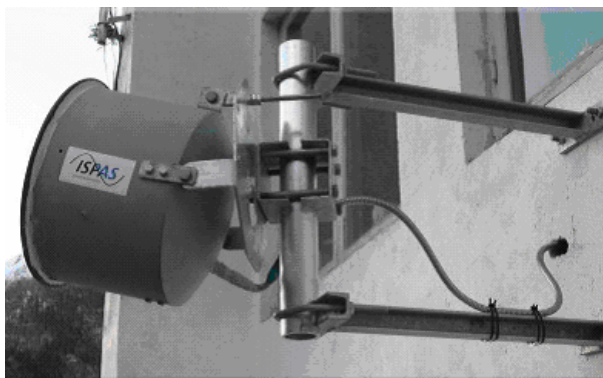


Abb. 5-50: Längenmessung mittels Radar (Aknes)
(aus: ISPAS, 2011)



Abb. 5-51: bew. terrestrischer Radar auf Balken
(aus: IDSCOMPANY, 2011)

5.9.3 Luftbildauswertung

Bei der Luftbildauswertung werden zwei verzerrungsfreie Orthofotos des gleichen Gebietes zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten verglichen, um Verformungen der Oberfläche zu erkennen. Die Messmethode wird in hochalpinen Lagen mit geringem Bewuchs, schwer zugänglichen oder sehr großflächigen Untersuchungsgebieten angewandt. Für die Erstellung der Orthofotos wird eine früher analoge, heute digitale Kamera an einem Fluggerät, das eine Lagebestimmung mittels GPS ermöglicht, befestigt. Die Datenerfassung erfolgt durch den Bildflug in genau geplanter Lage und Höhe. Es besteht die Möglichkeit, Einzelbilder kleinräumiger Gebiete, oder durch mehrere Aufnahmen größere Bereiche zu erfassen (Abb. 5-52). Dabei sollten sich die entstehenden Bildstreifen um 30-60% überdecken, um größere Bildverzerrungen zu vermeiden. Für das Monitoring von Bewegungen sind mindestens zwei zeitversetzte Aufnahmen notwendig, da die erste als Referenz dient. Durch verschiedene Auswerteverfahren können Verschiebungen als dreidimensionale Vektoren dargestellt werden. Das einfachste Prinzip hierfür ist die Punkt- oder Objektbestimmung, bei der die Lageänderung wiedererkennbarer Punkte gemessen wird. Diese Punkte können zum Beispiel Hütten, Steinplatten, Felsblöcke oder einzeln stehende Bäume sein. Weiters können Linienelemente, wie z.B. Abrisskanten, in gleicher Weise für die Messung herangezogen werden. Dabei ist vor allem bei scheinbar bergwärts wandernden Linienelementen auf eine mögliche Verschiebung durch Erosion zu achten. Es ist auch darauf Bedacht zu nehmen, dass Verschiebungen von Punkten, die durch bauliche Maßnahmen oder sonstiger Einflüsse – die von der Massenbewegung unabhängig erfolgten – aus der Auswertung eliminiert werden. Als Ergebnis der Bearbeitung können mit Zeichenprogrammen die Bewegungen der Punkte und Linienelemente in Lageplänen (2- dimensional) oder Geländemodellen (3- dimensional) dargestellt werden. Die Messgenauigkeit der Luftbildauswertung ist stark von der Flughöhe abhängig und kann im cm – oder dm – Bereich liegen.

Es sind folgende Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz erforderlich:

- die Verschiebungen müssen größer als die Messungenauigkeiten sein,
- es dürfen nicht alle Vergleichspunkte durch Oberflächenumgestaltungen verloren gehen,
- es darf nicht die gesamte Oberfläche durch Bewuchs verdeckt sein, und
- es muss ein, der Bewegungsrate angepasstes Zeitintervall zwischen den Luftbildaufnahmen liegen.

Letzteres ist teilweise durch alte Luftbilder in verschiedenen Bundes- und Landesbildarchiven gewährleistet. Für Frühwarnsysteme ist dieses Verfahren eher ungeeignet.

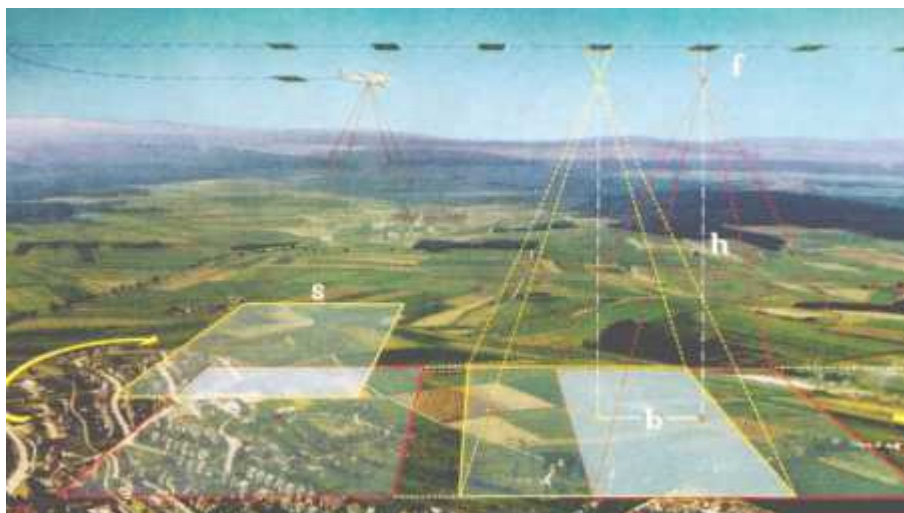


Abb. 5-52: Prinzip der systematischen Landschaftsaufnahme

(aus: GEOdynamics, 2011)

5.10 Zusammenfassende Übersicht und manuelle Temperaturkorrektur

In der tabellarischen Übersicht (Tab. 5-2) wird, soweit möglich, eine Zusammenfassung über den Messbereich, die mögliche Messstrecke und die Messgenauigkeit der beschriebenen Monitoringsysteme und Sensoren gegeben. Die angegebenen Messgenauigkeiten beziehen sich auf Angaben der Herstellerfirmen und müssen daher als optimistisch bewertet angesehen werden.

SENSOR/SYSTEME	Messweg / Messbereich	Messstrecke von - bis	Mess- genauigkeit
Temperaturmessungen			
Ausdehnungsthermometer	-50° bis +50 °C	-	± 0,50 °C
Widerstandsthermometer (Ni)	-60° bis +180 °C	-	± 0,30 °C
Thermoelemente (NiCr-Ni)	-200° bis +1.370 °C	-	± 0,04 °C
Schwingresonanzsensor (Quarz)	-70° bis +300 °C	-	± 30 ppm
Niederschlag			
Ombrometer	-	-	~
Ombrographen	-	-	± 1 %
Distrometer	-	-	± 3 %
Quellbeobachtung			
Schüttmengenbestimmung	-	-	± 0,3 %
Trübungsmessung	-	-	± 1 %
Relativverschiebungen an der Oberfläche			
Plomben	-	-	~
Crackmeter	bis 2 cm	10 mm	~
Bolzenstrecken	einige cm - m	10 cm - einige m	± 0,10 mm
Fissurometer (elektrisch)	bis 15 cm	10 cm - einige m	± 0,02 mm
Drahtextensometer	25 cm/Umdreh.	2 m - 30 m	± 0,03 mm
Laserdistanzer (ohne Reflektor)	20 cm - 200 m	20 cm - 200 m	± 1,00 mm
Messung von Höhenverstellungen an der Oberfläche			
geometrische Nivellement	unbegrenzt	unbegrenzt	± 1,00 mm
trigonometrisches Nivellement	unbegrenzt	unbegrenzt	± 3,00 mm
Schlauchwaagensystem (elektronisch)	10 cm	bis ~ 150 m	± 0,01 mm
hydrostatisches Drucksystem	10 cm	bis ~ 150 m	± 1,00 mm

SENSOR/SYSTEME	Messweg /	Messstrecke von - bis	Mess- genauigkeit
	Messbereich		
Messung von Neigungsänderungen an der Oberfläche			
Flüssigkeitslibelle	-	punktuell	$\pm 0,10^\circ$
elektrolytische Flüssigkeitslibelle	-	punktuell	$\pm 0,05^\circ$
elektronische Tiltmeter	-	punktuell	$\pm 0,03^\circ$
Pendelsysteme	-	punktuell	$\pm 0,01^\circ$
Messung von Lageveränderungen mittels trigonometrischen Methoden			
Theodolit	unbegrenzt	1 m - 2 km	
Distanzmessung (bei 2 km)			± 10 mm
Winkelmessung			$\pm 0,15$ mgon
Messung von Lageveränderungen mittels GPS			
D-GPS	unbegrenzt	unbegrenzt	
Lagebestimmung (X- u. Y-Achse)			$\pm 0,50$ cm
Höhenbestimmung (Z-Achse)			$\pm 1,50$ cm
Messung von Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bohrloch			
Extensometer (Werte für 30 m)	bis 10 cm	bis 100 m	$\pm 0,05$ mm
Sondenextensometer (Inkrex)	100 cm	mehrmals 1 m	$\pm 0,02$ mm
Inklinometer (Werte für 30 m)	$\pm 0,30^\circ$	mehrmals 1 m	$\pm 6,00$ mm
Trivec Sonde (Werte für 30 m)	± 10 mm / $\pm 14,5^\circ$	mehrmals 1 m	$\pm 1,50$ mm
Messung von Kräften und Spannungen			
Piezometer (abhängig von Messart)	20 bar	bis 200 m	$\pm 1 - 10$ cm
Druckkissen (für 200 bar)	bis 400 bar	-	$\pm 0,20$ bar
Ankerkraftmessgeber	250 - 6.000 kN	-	$\pm 0,50$ %
Messung von Erschütterungen mittels Geophonen (Mikroseismik)			
	-	-	-
Messungen durch Fernerkundungen			
terrestrischer Laserscan	-	bis 800 m	$\pm 0,50$ cm
luftge. Laserscan (abh. Flughöhe)	-	bis 2.000 m	$\pm 1 - 5$ cm
terrestrischer Radar (Längenm.)	-	bis 4.000 m	$\pm 0,01$ mm
Radarinterferometrie (Satellit)	-	unbegrenzt	$\pm 1,00$ mm
Luftbildauswertung (abh. Flughöhe)	-	bis 3.500 m	$\pm 5 - 25$ cm

Tab. 5-2: Zusammenfassende Übersicht der Monitoringsysteme und Sensoren

Für ausgesuchte Messverfahren sind in Tabelle 5-3 die tatsächlich erreichbaren Messgenauigkeiten aus Erfahrungswerten angegeben. Es wurden dabei Wertebereiche genannt, da durch veränderliche Faktoren (Einbau, Ablesungsart, Messentfernung,...) eine genaue Zahlenangabe nicht zielführend ist.

SENSOR/SYSTEME	Messgenauigkeit		Literaturverzeichnis
	HERSTELLER- ANGABEN	ERREICHBARER MESSWERT	
Relativverschiebungen an der Oberfläche			
Fissurometer (elektrisch)	± 0,02 mm	2/100 mm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Drahtextensometer (abh. von Länge)	± 0,03 mm	mm - cm - Bereich	(Keusen, 1998)
Laserdistanzer (ohne Reflektor)	± 1,00 mm	mm - cm - Bereich	(Heunecke et al., 2008)
Messung von Höhenverstellungen an der Oberfläche			
geometrische Nivellement	± 0,10 mm	< 0,5 mm - Bereich	(Ingensand, 2002)
trigonometrisches Nivellement	± 3,00 mm	cm - Bereich	(siehe Theodolit)
Schlauchwaagensystem (elektr.)	± 0,01 mm	1/100 mm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Messung von Neigungsänderungen an der Oberfläche			
elektrolytische Flüssigkeitslibelle	± 0,05°	0,1°	(Zangerl et al., 2008)
elektronische Tiltmeter	± 0,03°	0,1°	(Zangerl et al., 2008)
Messung von Lageveränderungen mittels trigonometrischen Methoden			
Theodolit			
Distanzmessung (bei 2 km)	± 10 mm	cm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Winkelmessung	± 0,15 mgon	< 0,20 mgon	(Zangerl et al., 2008)
Messung von Lageveränderungen mittels GPS			
D-GPS			
Lagebestimmung (X- u. Y-Achse)	± 0,50 cm	cm - Bereich	(siehe Kap.8.4.1)
Höhenbestimmung (Z-Achse)	± 1,50 cm	2-3 x die Höheabw.	(siehe Kap.8.4.1)
Messung von Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bohrloch			
Extensometer (Werte für 30 m)	± 0,05 mm	mm - Bereich	(Fecker, 1997)
Sondenextensometer (Inkrex) (pro m)	± 0,02 mm	0,02 mm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Inklinometer (Werte für 30 m)	± 6,00 mm	cm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Trivec Sonde (Werte für 30 m)	± 1,50 mm	mm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Messungen durch Fernerkundungen			
terrestrischer Laserscan	± 0,50 cm	mm - cm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
luftge. Laserscan (abh. Flughöhe)	± 1 - 5 cm	cm - dm - Bereich	(Zangerl et al., 2008)
Radarinterferometrie (Satellit)	± 1,00 mm	mm - cm - Bereich	(Heunecke et al., 2008)
Luftbildauswertung (abh. Flughöhe)	± 5 - 25 cm	cm - dm - Bereich	(Brückl et al., 2006)

Tab. 5-3: Gegenüberstellung der praktisch erreichbaren Messgenauigkeiten und der Herstellerangaben

Durch temperaturbedingte Längenänderung von Messmitteln können Messergebnisse soweit verfälscht werden, dass eine Korrektur dieser notwendig ist. Einige Messsysteme sind daher mit Temperatursensoren ausgerüstet und korrigieren Längenänderungen zufolge Temperaturschwankungen automatisch. Bei einfachen Systemen ist jedoch eine nachträgliche Korrektur durch die auswertende Person notwendig. Solche Monitoringverfahren sind beispielsweise Bolzenstrecken- und Drahtextensometermessungen. Die Drähte und die Seile von solchen Extensometern bestehen meist aus Stahl, da z.B. Invar sehr empfindlich gegen mechanische Beanspruchung ist und dies sehr leicht zu Fehlmessungen führen kann. Dies macht die Berücksichtigung der Temperaturdehnungen erforderlich.

Die Längenänderung ist nach der Formel (5.2) zu berechnen und von den Messergebnissen abzuziehen oder auf diese aufzuschlagen. Dabei gilt, dass z.B. bei einem Drahtextensometer durch die Verlängerung des Drahtes oder des Seils zufolge einer Erwärmung eine kürzere Messlänge vorgetäuscht wird und der mittels (5.2) berechnete Korrekturfaktor daher zum Ablesewert zu addieren ist.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

ΔL = Längenänderung [mm oder m]

α = Wärmeausdehnungskoeffizient (für das Material des Messmittels) [K^{-1}]

L_0 = Ausgangslänge des Messmittels [mm oder m]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen der Nullmessung und der neuerlichen Messung [$^{\circ}K$]

Die bei Berücksichtigung der Temperaturdehnung erreichbare Messabweichung von Seilextensometermessungen zeigt die Auswertung des Beispiels Murau. Für die Untersuchung wurden Messdaten des Seils 10 in den Jahren 2001 bis 2003 herangezogen, da in diesem Zeitraum ein kurzes Messintervall eingehalten wurde. Um einen ersten Überblick zu erhalten und mögliche Auswertungszeiträume zu erkennen, wurden die Längenänderungen über 30 Monate in einer Datenreihe (Abb.5-53) dargestellt. Da die Verschiebungen im ersten Halbjahr relativ gering sind und die eigentliche Bewegung erst im zweiten Halbjahr stattfindet, wurden die Auswertungszeiträume so gewählt, dass beide Bewegungsphasen vollständig – über 6 Monate – berücksichtigt werden konnten. Die gewählten Untersuchungszeiträume sind in der Abbildung 5-53 rot gekennzeichnet.

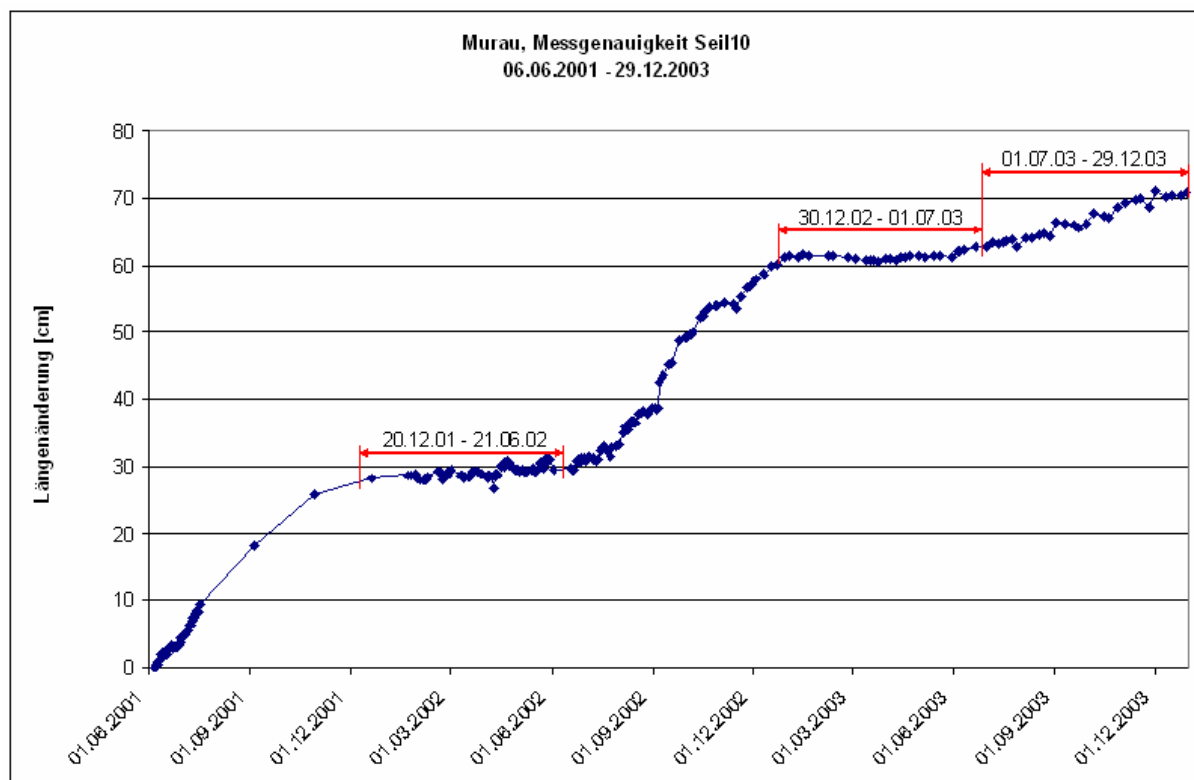


Abb. 5-53: Längenänderungen des Seils 10 (2001-2003)

In den Abbildungen 5-54 bis 5-56 sind die Auswertungsergebnisse der angegebenen Zeiträume grafisch dargestellt. Die dicke schwarze Linie zeigt die Trendlinie der Längenänderung, die am wahrscheinlichsten der tatsächlichen Verlängerung entspricht. Die beiden grünen Linien stellen die maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie dar und können als erreichte „Messgenauigkeit“ angesehen werden.

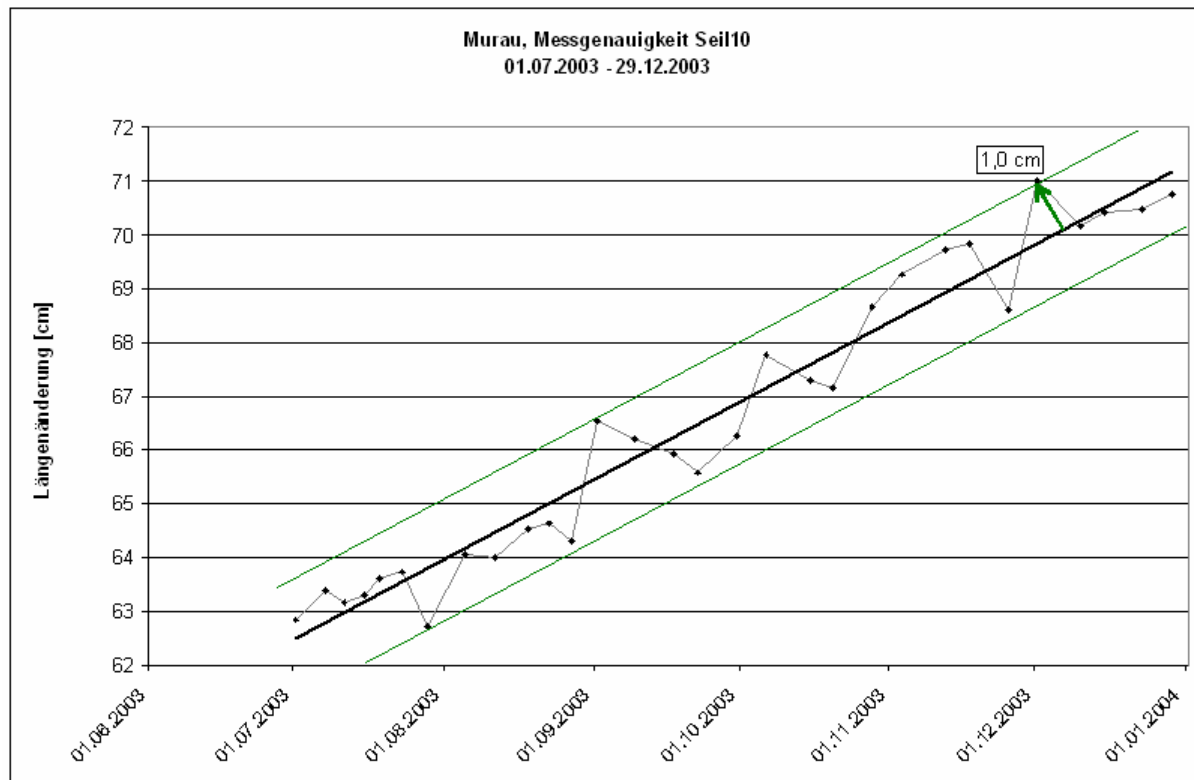


Abb. 5-54: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (01.07.03 – 29.12.03)

Die Abweichungen der Messergebnisse von der Trendlinie im zweiten Halbjahr 2003 befinden sich, nach erfolgter Temperaturkorrektur mit der Formel (5.2), innerhalb eines Bereiches von +/-1 cm.

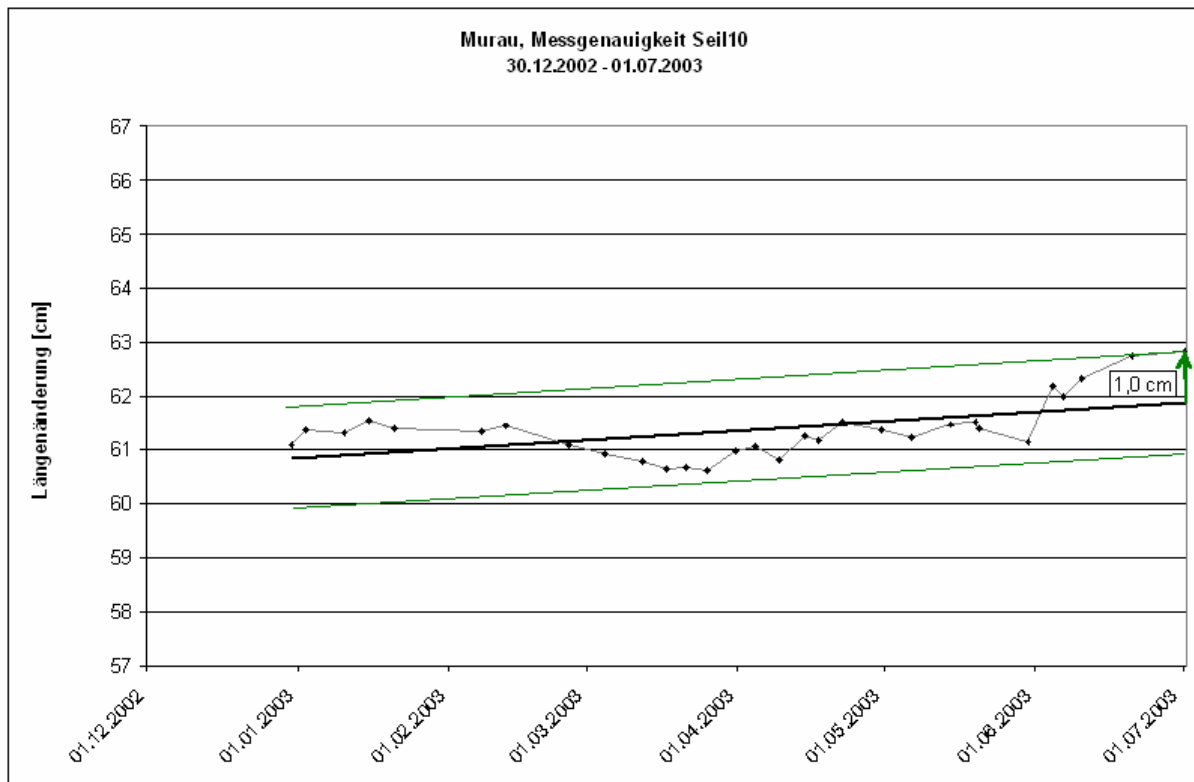


Abb. 5-55: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (30.12.01 – 01.07.03)

Im ersten Halbjahr 2003 (im relativ verschiebungsfreien Zeitraum) betragen die Abweichungen ebenfalls maximal 1 cm von der Trendlinie.

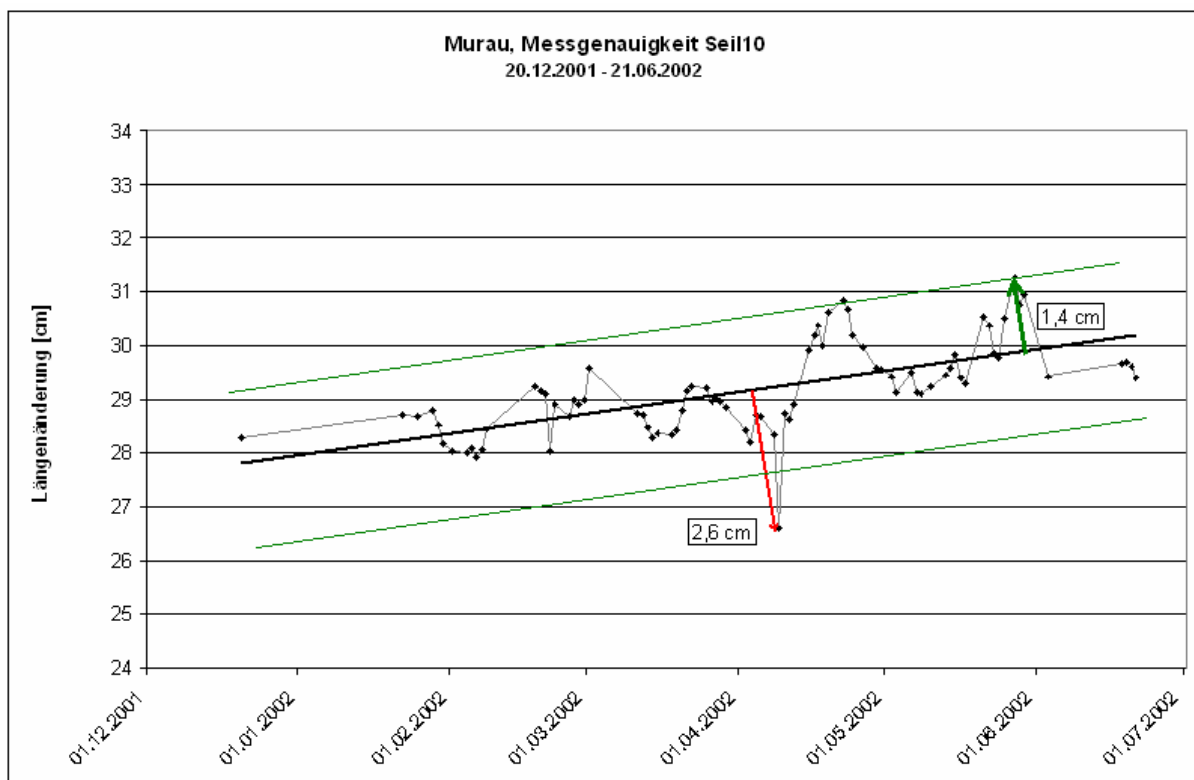


Abb. 5-56: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (20.12.01 – 21.06.02)

Im Auswertungszeitraum 20.12.01 bis 21.06.02 beträgt die maximale Abweichung 2,6 cm. Aufgrund der Ergebnisse aus Abb.5-54 und 5-55 und der Tatsache, dass keine andere

Messung in dieser Größenordnung abweicht, kann der Bereich, in dem die Messabweichungen liegen, mit $\pm 1,4$ cm angegeben werden. Abbildung 5-56 zeigt aber, dass in seltenen Fällen „Ausreißer“ auftreten können und daher Interpretationen von Einzelmessungen immer problematisch sind.

Die erreichbare Messabweichung für das Seilextensometer 10 mit einer Länge von 18 Metern kann daher mit $\pm 1,5$ cm angegeben werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass bei größeren Seillängen und außergewöhnlichen Witterungseinflüssen auch größere Abweichungen auftreten können.

6. Darstellung der Messergebnisse

Nach der Messung der Daten ist für die weitere Interpretation die Auswertung und Darstellung erforderlich. Bei aktiven Bewegungen mit hohem Schadenspotential ist besonders auf eine Aktualisierung der Auswertung unmittelbar nach der Messung zu achten, da andernfalls Anzeichen für ein Versagen - z.B. die exponentielle Beschleunigung der Bewegung - nicht oder zu spät erkannt werden.

Bei Systemen und Sensoren, die manuell abgelesen werden, können die gemessenen Daten in eine geeignete Software (z.B. EXCEL) eingegeben werden. Bei automatisierten Systemen erfolgt die Datenerfassung über einen Datenlogger, der sämtliche Messergebnisse mittels Übertragungsmethoden (Funk, Telefonverbindung,...) direkt an einen Computerarbeitsplatz weiterleitet. Für die Auswertung müssen die Daten ohne weitere Bearbeitung in eine Auswertsoftware eingelesen werden können.

Für die Überprüfung von Berechnungsmodellen und zur Kontrolle der Plausibilität von Messergebnissen (Ausreißer) ist die grafische Darstellung zu bevorzugen, da Trends und gegenseitige Abhängigkeiten besser und rascher erkennbar sind.

6.1 Darstellung von Daten einzelner Messsensoren in einer Grafik

Bei der Datenreihenerstellung einzelner Messsensoren sollte z.B. der Messachsenmaßstab etwa 10-mal größer als die Ungenauigkeit der Datenerfassung sein, da - wie in Abbildung 6-1 ersichtlich - andernfalls der Eindruck einer Bewegung entstehen könnte, obwohl die Abweichung lediglich durch die Ungenauigkeit der Messung verursacht wurde (Fecker, 1997). Die Ungenauigkeit einer Messung (subjektiv und objektiv) ist erst nach einigen Messungen angebar, weil sie vom Messgerät, vom Einbau, vom Beobachter, von den Witterungsbedingungen usw. an der jeweiligen Messstelle abhängt. Die tatsächliche Ungenauigkeit ist immer ein Vielfaches der vom Messgeräteerzeuger angegebenen. Weiters müssen die Maßeinheiten der Achsen sowie ihre Skalierung (linear, quadratisch, logarithmisch,...) leicht erkennbar sein, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Bei der Wahl von Diagrammen zur Darstellung von Ergebnissen ist auf deren Brauchbarkeit für die vorhandene Datenlage Bedacht zu nehmen. Kreisdiagramme sind beispielsweise lediglich für prozentuelle Aufteilungen eines Ganzen (100%) zu gebrauchen. Für die Darstellung von zeitlichen Entwicklungen sind jedenfalls Liniendiagramme zu bevorzugen, da sie den Verlauf der Messergebnisse kontinuierlich darstellen. Besonders wichtig ist eine Darstellung der Zeitachse, bei der gleiche Zeiträume gleich lang dargestellt werden. Ungleiche Zeiträume

müssen proportional zueinander sein. Bei einem Abstand von der Nullmessung zur ersten Messung von einer Woche und von der ersten Messung zur 2. Messung von 2 Wochen muss der zweite Zeitraum doppelt so lange wie der erste sein, damit Beschleunigungen und Verzögerungen erkannt werden können. Weiters ist immer der Schlichtheit eines Diagramms den Vorzug vor der künstlerischen Gestaltung zu geben, da eine zu aufwendige, überladene Grafik den Vorteil der besseren Interpretierbarkeit gegenüber einer Tabelle einbüßt. Aus diesem Grund sollten Analysen und sonstige Begleitinformationen in Form eines Textes beigelegt werden.

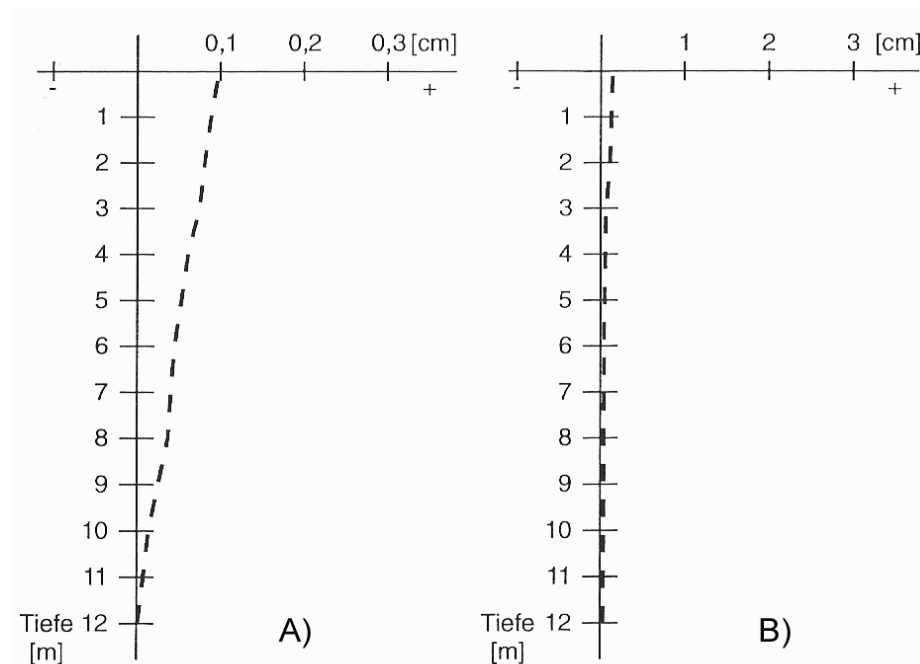


Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Messergebnisse einer Inclinometerbohrung mit zwei unterschiedlichen Maßstäben: A) Darstellung mit "scheinbarer" Bewegung B) Darstellung mit realistischem Maßstab "ohne" Bewegung

(aus: Fecker, 1997)

6.2 Darstellung und Zusammenführung mehrerer Messsensoren in einer Grafik

Zur Erkennung des Versagensmechanismus sowie zur besseren Interpretation können mehrere gemessene Datenreihen zusammengefasst werden. Dies kann in Form von Diagrammen (Abb. 6-2) oder von Geländemodellen (Abb. 6-3) geschehen.

Für den Vergleich von zeitlichen Entwicklungen, wie es etwa für die Erkennung von Kausalitäten zwischen Witterungseinflüssen und Bewegungsraten notwendig ist, sind Liniendiagramme am besten geeignet. Diese sollten den oben angeführten Kriterien im Bezug auf die Maßstäbe, der Einfachheit und der Beschriftung der Achsen entsprechen.

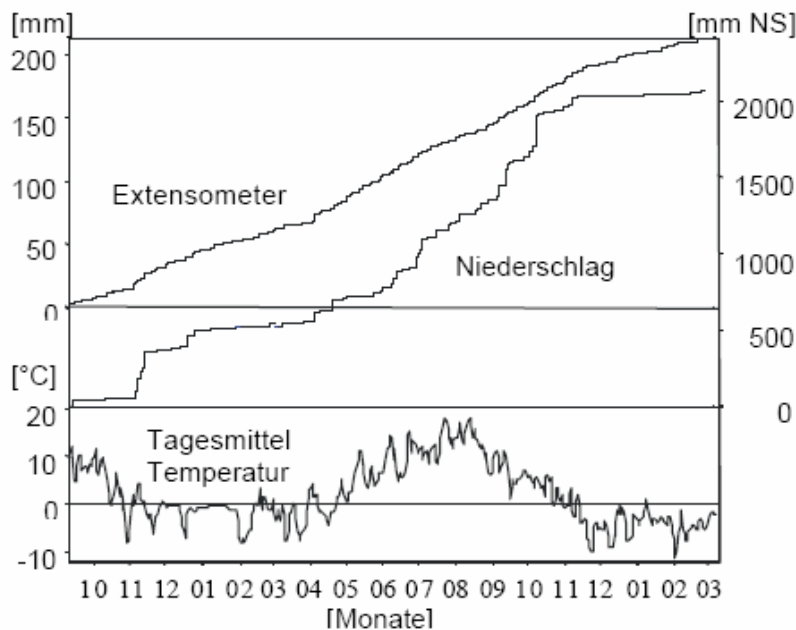


Abb. 6-2: Korrelation Extensometer - Niederschlag

(aus: Moser et al., 2002)

Zur Analyse von Mechanismen werden geologisch-geotechnische Modelle aus der Hanggeometrie, des Trennflächengefüges usw. erstellt. Die Modelle können je nach Datenlage zwei- oder dreidimensional sein und beinhalten aktive und inaktive Bewegungszonen sowie geologische und geometrische Elemente der Massenbewegung. Sind Verschiebungsvektoren bekannt, sollten diese ebenfalls in die Darstellung eingefügt werden.

Ein Beispiel für ein Modell dieser Art ist in Abbildung 6-3 dargestellt. In diesem Fall wurden einzelne Zonen der Bewegung nach den dort stattfindenden Mechanismen unterteilt. Durch die Angabe der Verschiebungsvektoren ist außerdem zu erkennen, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeiten zum Hangfuß hin (zwischen Zone III und IV) erhöhen. Weiters zeigen die Vektoren, dass sich der letzte Felsturm (main pinnacle) – über der Höhenbezeichnung 1040 – in einer Kippbewegung befindet, da der Vektor am Fuß kleiner ist als der am Gipfel. Durch die Angaben zum Trennflächengefüge, das zum Hangfuß hin immer steiler einfällt, und die Einzeichnung der – an der Zone IV ersichtlichen – Schichtgrenze zwischen der härteren Hallstatt - Formation und dem weicheren Haselgebirge ist der Bewegungsmechanismus des Gesamtsystems leicht zu erkennen. Es handelt sich hierbei um den im Kapitel 2 beschriebenen Mechanismus "Hart auf Weich" oder genauer, um das

Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluffkörper am Rand eines kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel (nach Poisel & Eppensteiner, 1988).

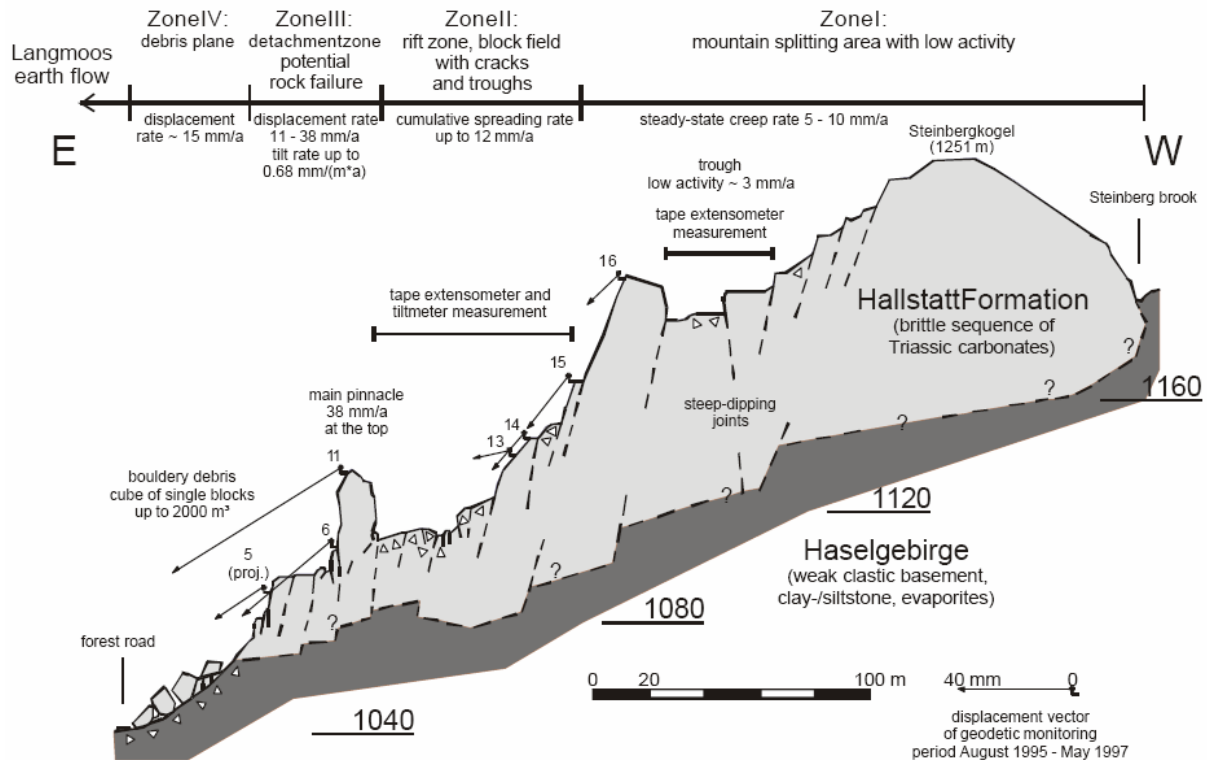


Abb. 6-3: Geologisch-geotechnisches Modell (Steinbergkogel-Scholle)

(aus: Moser et al., 2002)

7. Interpretation der Messergebnisse

Die richtige Interpretation der Messdaten ist eine der schwierigsten Aufgaben des Monitoringprozesses und setzt viel Erfahrung voraus. Sie setzt sich aus verschiedenen Teilinterpretationen zusammen. So müssen beispielsweise Messergebnisse in Bezug auf Ausreißer oder Systemausfälle bewertet, aus geologisch-geotechnischen Modellen der Versagensmechanismus abgeleitet, Prognosen über den weiteren Verlauf der Bewegungen getroffen und Alarmwerte festgelegt werden.

7.1 Ausreißer

Ausreißer sind Messergebnisse, die innerhalb einer Messreihe erheblich abweichen. Gründe für Fehlmessungen können Witterungseinflüsse, Aufstellfehler, defekte Messgeräte, Fehlbedienungen oder ähnliches sein. Die Schwierigkeit, einen Ausreißer als solchen zu erkennen, liegt darin, dass – wie in Abbildung 6-4 ersichtlich – die Messergebnisse (in diesem Fall eines Inklinometers) eine gewisse Bandbreite aufweisen. Die zufolge Verunreinigungen und/oder durch die ungenaue Einhaltung des Messabstandes (von 0,5 oder 1 m) erzielbare Messgenauigkeit beträgt etwa $\pm 1^\circ$.

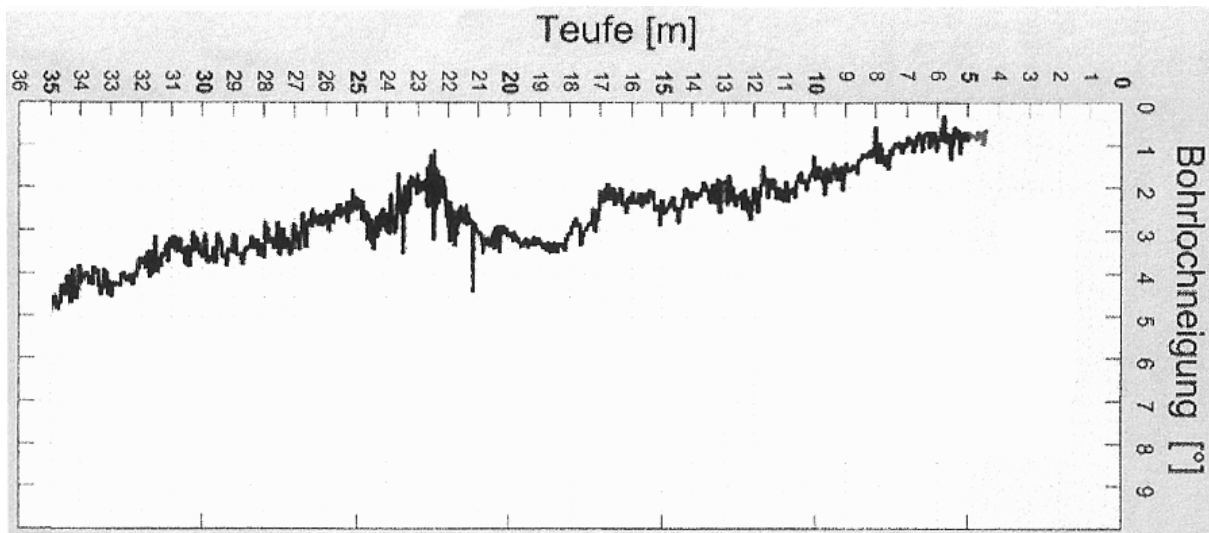


Abb. 6-4: Messergebnis Inclinometer

(aus: Willenberg et al., 2002)

Da Ausreißer die statistische Auswertung der gemessenen Daten – beim üblicherweise angewendeten Regressionsverfahren der Methode der kleinsten Quadrate – erheblich beeinflussen können, sollten Verfahren und Methoden eingesetzt werden, die gegenüber Ausreißer unempfindlicher reagieren. Dazu gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Vorgangsweisen.

1. Eine mögliche Methode ist die Erstellung einer Ausreißer-Diagnose. Dabei werden aus der Menge der Daten die einflussreichsten Beobachtungen lokalisiert. Danach muss entschieden werden, ob diese korrigiert oder entfernt werden müssen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass bei dieser Arbeit sachlich korrekt vorgegangen wird und keine „unliebsamen“ Messwerte gelöscht, oder zur Interpretation „passend“ verändert werden. Die bearbeiteten Daten werden danach mit der „üblichen“ *Methode der kleinsten Quadrate*, nach den Formeln des linearen Modells

$$y_i = x_{i1}\theta_1 + \dots + x_{ip}\theta_p + e_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7.1)$$

und mit dem Regressionsschätzer

$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (7.2)$$

mit dem Residuum r_i aus der Differenz der tatsächlichen Messung und der Schätzung

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (7.3)$$

ausgewertet.

Dabei werden die Variablen der Gleichung (7.1) bis (7.3) folgendermaßen verwendet:

y_i = die abhängige Variable oder Zielgröße

x_{i1}, \dots, x_{ip} = die unabhängige Variable oder Einflussgröße

$\theta_1, \dots, \theta_p$ = unbekannte Parameter

- e_i = Fehlerterm
 n = Anzahl der Messungen
 \hat{y}_i = vorhergesagter oder geschätzter Wert

(Formeln (7.1) - (7.3) aus: Rousseeuw & Leroy, 1987)

Die Methode eignet sich gut, wenn nur wenige Ausreißer vorhanden sind, da bei mehreren fehlerhaften Daten der Rechenaufwand erheblich steigt.

2. Ein anderes Regressionsverfahren, das auch durch eine größere Menge von Fehlern zuverlässig bleibt, stellt die *robuste Regression* dar. Ausreißer werden dabei durch ihr hohes Residuum erkannt. Liegt dieses über einer zuvor definierten Grenze w oder über einer anderen gewählten Auslesefunktion w , wird der Ausreißer aus der Auswertung eliminiert. Die Auswertung wird durch die gewichteten kleinsten Quadrate nach der Formel

$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^n w_i r_i^2 \quad (7.4)$$

durchgeführt. (Formel (7.4) aus: Rousseeuw & Leroy, 1987)

Mit diesem Verfahren können Ausreißer bis zu einem Maximum von $n/2$ (n = Anzahl der Daten) bewältigt werden.

7.2 Datenausfall

Kommt es zu Ausfällen eines Messsystems, müssen die fehlenden Daten interpoliert werden. Handelt es sich um längere Ausfallszeiten am Beginn einer Messreihe, kann das ein Problem darstellen, da die Bewegung nur selten linear abläuft. Sind längere Datenreihen vorhanden und ist eine Korrelation mit Witterungseinflüssen bekannt, sollte versucht werden, sich bei der Interpolation an den Bewegungsverteilungen der Vorjahre und den gemessenen Witterungseinflüssen (z.B.: Starkregenereignisse) zu orientieren. Die Ausfallzeiten sollten jedenfalls gut ersichtlich gekennzeichnet werden.

7.3 Erkennung des Versagensmechanismus

Die Erkennung der Versagensmechanismen erfolgt aufgrund des geologisch-geotechnischen Modells, das im Kapitel 6-1 behandelt wurde. Es können jedoch auch Kombinationen verschiedener Bewegungsarten auftreten, die eine Bestimmung des Mechanismus erschweren. Wenn keine eindeutige Zuordnung möglich ist, ist zu klären, ob weitere Untersuchungen zur Erkennung notwendig sind. Ist ein erweitertes Monitoring unmöglich oder nicht gewollt, können mehrere mögliche Szenarien den weiteren Überlegungen zu Grunde gelegt werden. Zu beachten sind auch, dass es Übergänge von einem, zu einem anderen Bewegungsmechanismus geben kann.

7.4 Prognosen

Prognosen über zukünftige Entwicklungen von Massenbewegungen sind nur möglich, wenn der ablaufende Prozess erkannt wurde und daraus auf die zukünftige Entwicklung geschlossen wird. Keusen (1998) unterscheidet dabei drei Deformationstypen (Abbildung 6-5 bis 6-7). Der Typ A stellt eine beschleunigte Bewegung dar und bildet sich meist durch den Bruch von Materialbrücken, wobei der Durchtrennungsgrad von Klüften erhöht wird. Durch verschiedene Berechnungsansätze (z.B. Fukuzono, 1990 und Voight, 1988) kann nach längerem Monitoring versucht werden, den Zeitpunkt des Hangversagens einzuschätzen. Beim Typ B handelt es sich um eine abklingende Deformation. Dabei ist der stabilisierende Faktor zu untersuchen, um Aussagen über eine eventuelle zukünftige Reaktivierung treffen zu können. Der überwiegende Anteil der Massenbewegungen ist dem Typ C zuzuordnen. Dieser stellt eine Bewegung mit Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen dar. Die Beschleunigungen werden meist durch Änderungen im Wasserhaushalt, Spannungsumlagerungen oder Veränderungen in der Gleitebene ausgelöst. Bei diesem Deformationstyp Zukunftsprognosen über längere Zeiträume zu machen, ist sehr schwierig bis unmöglich. Für die Vorhersage des Gesamtversagens ist es wesentlich, den Übergang des Typs C zu einer ausschließlich beschleunigten Bewegung (Typ A) zu erkennen. Dies ist nur durch permanentes Monitoring, Auswertung der Ergebnisse und Interpretation möglich. Zur Überprüfung und Verbesserung von Prognosen sowie zur Szenarienentwicklung können numerische Berechnungsmodelle herangezogen werden. In vielen Fällen folgen die Messergebnisse nicht den in Abbildung 6-5 bis 6-7 dargestellten Typen. Falls Messergebnisse keinen Trend zeigen, kann die Größenordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit z.B. über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Erdbeben abgeschätzt werden, die zur Auslösung der Massenbewegung führen könnten.

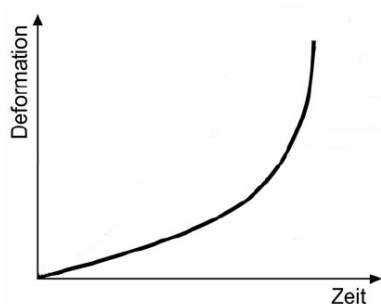


Abb. 6-5: Typ A
(nach: Keusen, 1998)

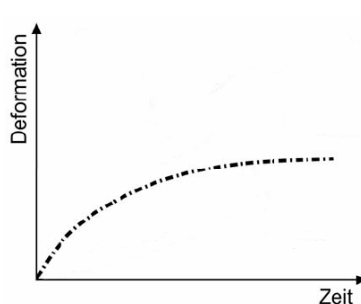


Abb. 6-6: Typ B
(nach: Keusen, 1998)

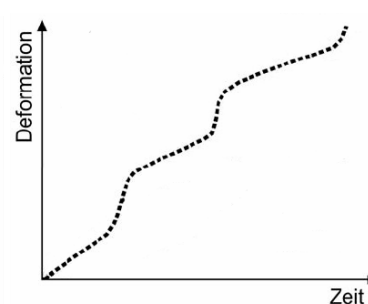


Abb. 6-7: Typ C
(nach: Keusen, 1998)

7.5 Alarmwerte

Die Festlegung von Alarmwerten für Frühwarnsysteme ist erst nach der Messdateninterpretation eines längeren Beobachtungszeitraums möglich, da es sich bei Massenbewegungen um singuläre Ereignisse handelt, die meist nicht vergleichbar sind. Ein Grund dafür sind unter anderem der unterschiedliche geologische Aufbau und der unterschiedliche Temperatureinfluss auf die Messgrößen. Alarmwerte sollten daher erst nach einer Beobachtungsdauer von mindestens einem Jahr (einer kompletten Witterungsperiode) festgelegt werden. In ein Frühwarnsystem sollten alle zur Verfügung stehenden Daten einfließen, um einen Überblick über das gesamte Untersuchungsgebiet zu gewährleisten und Fehlinterpretationen durch Ausreißermessungen ausschließen zu können. Wie Abbildung 6-8 zeigt, können Alarmwerte für einzelne Gefahrenstufen festgelegt werden, die verschiedene Maßnahmen, die in einem Katastrophenplan ausgearbeitet sind, nach sich ziehen.

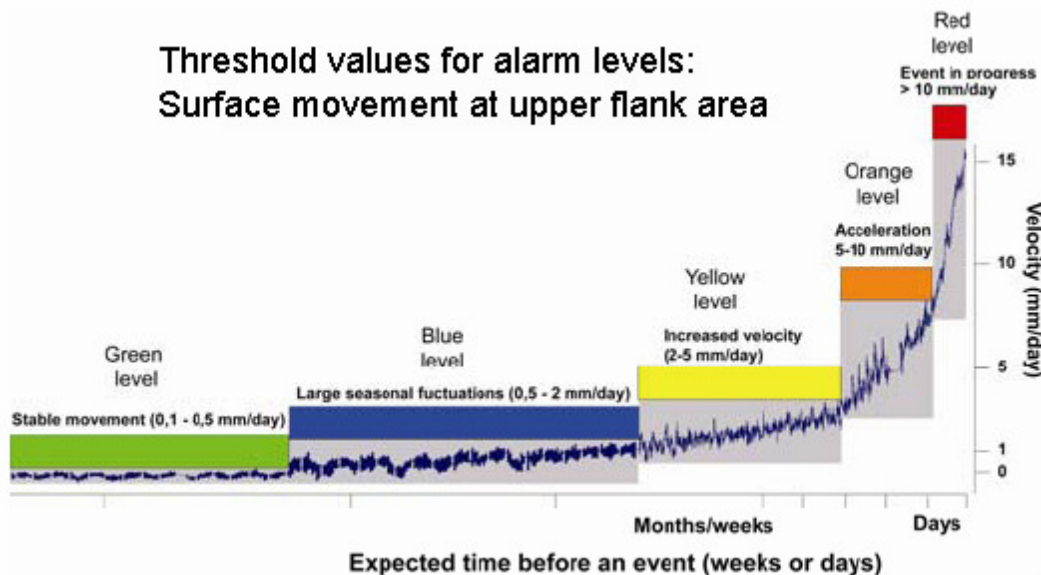


Abb. 6-8: Gefahrenstufen mit Schwellenwerten am Beispiel Aknes (N)
(aus: Blikra, 2008)

8. Beispiele für das Monitoring von Massenbewegungen

8.1 Aknes (N)

Beim Beispiel „Aknes“ handelt es sich um eine im Geirangerfjord, an der Westküste Norwegens stattfindende Massenbewegung mit einem geschätzten Volumen von 30-40 Mill. m³ Festgestein. Durch die Lage der bewegten Massen wird befürchtet, dass die Sturzmassen eine Tsunamiwelle mit einer Höhe von bis zu 40 Metern auslösen könnten (Blikra, 2008). Um die Gefährdung von bis zu 10.000 Menschenleben (in der Tourismussaison) minimieren zu können, wird im Bewegungsbereich ein Monitoringnetzwerk mit einem kombinierten Frühwarnsystem betrieben.

Es werden dazu folgende Sensoren und Systeme angewendet:

- Wetterstation
(Temperatur, Niederschlag, Schneehöhenmessung, Windgeschwindigkeit, Bodentemperatur, Sonneneinstrahlung)
- Fissurometer
- Laserdistanzer
- Klinometer
- Theodolit
- GPS
- Inklinometer
- Piezometer
- Geophone (Mikroseismik)
- terrestrischer Laserscanner
- terrestrisches Radar (Längenmessung)

Die Anordnung der Messsysteme wurde nach dem folgenden Schema (Abb. 8-1) durchgeführt. Fissurometer und Geophone wurden im Bereich der oberen Anbrüche installiert. Zwei Laserdistanzmesser überwachen die Bewegungen in den oberen Flankenbereichen. Die Bohrlöcher für Piezometer und Inklinometer wurden nahezu in der Fallrichtung des Hanges angeordnet und möglichst gleichmäßig über die gesamte Länge verteilt. GPS- und Theodolitmessungen werden an mehreren Punkten über den gesamten bewegten Bereich durchgeführt und mit flächigen Laserscans der Anbruchbereiche ergänzt. Durch die Messergebnisse konnte abgeleitet werden, dass es sich um eine – auf einer Schieferungsfläche gleitende – Bewegung aus zwei unterschiedlich schnellen Bereichen handelt. An der südwestlichen Flanke werden Verschiebungen von 5-15 cm pro Jahr erreicht, die anderen Bereiche bewegen sich durchschnittlich mit 2-4 cm/Jahr. (Kveldsvik, 2008) Weiters konnte mit Hilfe der Piezometer der Einfluss des Schmelzwassers auf die Verschiebungsgeschwindigkeiten nachgewiesen werden. Es werden beispielsweise im Frühjahr Geschwindigkeiten gemessen, die das 10-fache des Jahresdurchschnitts darstellen. Diese Beschleunigungen konnten außerdem durch eine Zunahme von Mikrobeben – mit Hilfe der Seismik – bestätigt werden (Roth & Blikra, 2009).

Das Frühwarnsystem für die betroffene Region ist in fünf Gefahrenstufen (siehe Abb. 6-8) eingeteilt und nutzt die Daten des permanenten Monitorings. Es wurde außerdem die Möglichkeit einer direkten Warnung der Anrainer durch Sirensignale und telefonischer Warnungen verwirklicht.

Das Beispiel Aknes stellt eine der am besten überwachten Massenbewegungen dar. Durch sich überschneidende Monitoringverfahren können mögliche Fehlmessungen schnell erkannt und Ausfälle einzelner Sensoren leichter verkraftet werden.

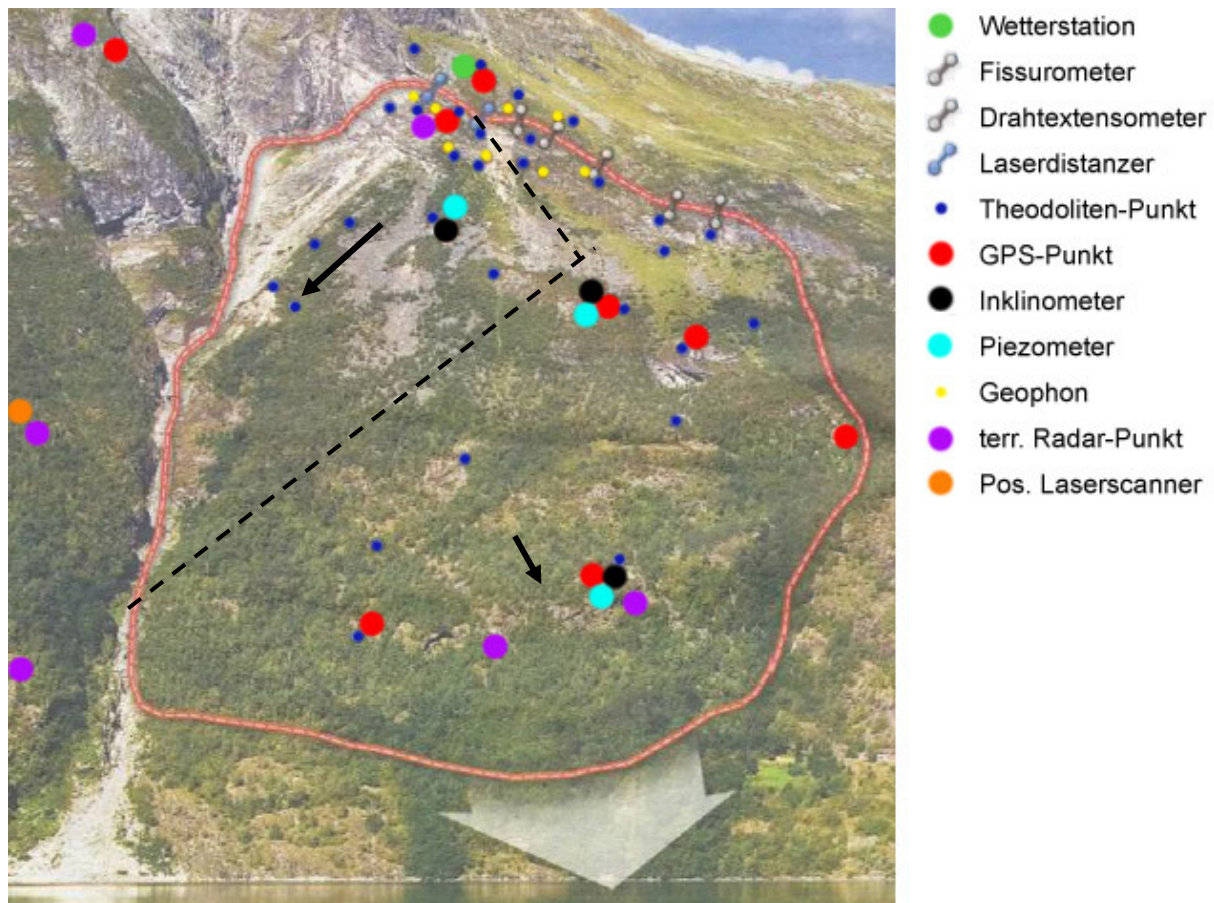


Abb. 8-1: Anordnung der Messsensoren u. -systeme am Beispiel Aknes
(nach: Kveldsvik, 2008)

8.2 Randa (CH)

Das Monitoringbeispiel „Randa“ befindet sich im Mattertal in der südwestlichen Schweiz. Das derzeitige Monitoringprojekt befindet sich oberhalb der Abbruchkante des 1991 abgegangenen Bergsturzes. Dieser fand in zwei Hauptereignissen mit einem geschätzten Gesamtvolumen von 30 Mill. m³ statt. Das zweite Ereignis konnte durch ein Monitoring- und Frühwarnsystem vorhergesagt werden. Es wurden durch den Bergsturz 33 Häuser zerstört, die gefährdeten Menschen konnten jedoch rechtzeitig evakuiert werden. Das derzeitige Projekt – oberhalb des abgegangenen Bergsturzes – umfasst ein Volumen von etwa 2,7 - 9,2 Mill. m³ (Spillmann, 2007) und wird von der ETH-Zürich betreut. Das Ziel des Monitorings ist die Erforschung eines sich ankündigenden Bergsturzes in der Frühphase. Es werden außerdem immer wieder neue Monitoringsysteme in Kombination mit bereits bewährten Verfahren eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit der Weiterentwicklungen überprüfen zu können. Die eingesetzten Messverfahren sind daher einem kontinuierlichen Wandel unterzogen, was eine genaue Protokollierung der Übergänge von einem Verfahren zum nächsten erforderlich macht.

Derzeit werden folgende Systeme und Sensoren verwendet:

- Wetterstation
(Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Bodentemperatur)
- Fissurometer
- Theodolit
- Inklinometer
- Time Domain Reflectometry (TDR)
- Piezometer
- Geophone
- Extensometer aus Fiber-Optic-Sensoren an der Oberfläche und im Bohrloch (zur Probe)
- terrestrisches Radar

Nicht mehr verwendete Systeme sind:

- Trivec-Sonde
- In-Place Inklinometer

Sie wurden entfernt, da das Bohrloch SB 120 für den Einbau der Fiber-Optic-Sensoren verpresst wurde.

Die Messsysteme und Sensoren sind, wie in Abbildung 8-2 dargestellt, angeordnet. Zwei Fissurometer messen im oberen Bereich des Untersuchungsgebiets die Verschiebungen an Klüften. Messungen durch Theodolite werden seit 1995 an einem großflächigen Netzwerk durchgeführt, wobei ein halbjährliches bis jährliches Messintervall eingehalten wird. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wird seit 2008 zusätzlich ein kleinflächigeres geodätisches Netzwerk betrieben, bei dem monatliche Messungen durchgeführt werden. Die Lage der Bohrlöcher für Inklinometer, Time Domain Reflectometry, einem Teil der Geophone und der Piezometer wurde so gewählt, dass die beiden Bohrlöcher SB 50 und das Bohrloch SB 120 (Abb. 8-2) in Bereichen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten liegt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche konnten durch zuvor durchgeführte Theodolitmessungen ermittelt werden. Um Kosten zu sparen, wurden mehrere Sensoren pro Bohrloch eingebaut. Die Piezometer sind jeweils im Bohrlochtiefsten angeordnet, danach folgen die Geophone. Die Koaxialkabel der TDR wurden in den Ringraum eingebaut und durch den üblichen Verpressvorgang einzementiert. Die im Bohrloch SB 120 eingebrachten In-Place Inklinometer wurden 2008 entfernt, da das Inklinometerrohr für den Einbau der Fiber-Optic-Sensoren verpresst wurde (ETH-Z, 2011). Weitere Geophone wurden in zusätzlichen, bis zu 4 m tiefen Bohrlöchern angeordnet, um Mikrobeben genauer detektieren zu können. Um Verschiebungen flächig darstellen zu können, wurde ein D-InSAR (terrestrisches Radar) am Gegenhang installiert. Es handelt sich dabei um eine kombinierte Sende- und Empfangsantenne, die bewegliche auf einer Schiene befestigt ist.

Die Auswertung der Messungen ergab, dass es zu jährlichen Verschiebungen von bis zu 2 cm kommt (ETH-Z, 2011). Weiters konnte der Zusammenhang zwischen Mikrobeben und Verschiebungen bestätigt werden. Die Beben konzentrieren sich an der oberen Anbruchkante und in Bereichen mit verstärkter Klüftung. Da sich der Großteil der Mikrobeben bis zu einer Tiefe von 100 m ereignen, kann davon ausgegangen werden, dass es unter dieser Grenze zu keinen Bruchvorgängen mehr kommt.

Am Beispiel Randa wird vor allem bei der Anordnung der Sensoren im Bohrloch (Abb.8-2) ersichtlich, dass durch eine Kombination mehrerer Sensoren kostensparend unterschiedlichste Messwerte erfasst werden können. Außerdem kann abgeleitet werden, dass neu entwickelte Messverfahren anfangs immer in Kombination mit bewährten Systemen eingesetzt werden sollten, um die Empfindlichkeit und Messgenauigkeit einschätzen und deren Funktion überprüfen zu können.

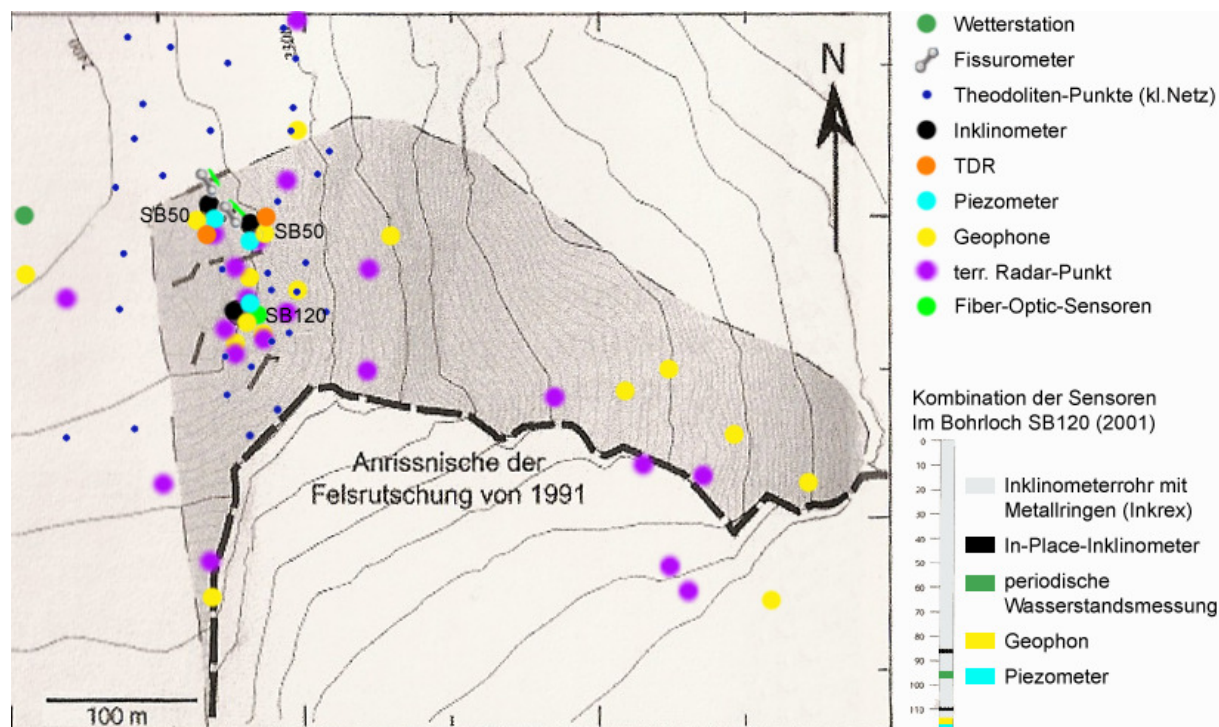


Abb. 8-2: Anordnung der Messsensoren u. -systeme im Beispiel Randa

(nach: Willenberg et al., 2002)

8.3 Beaugard dam (I)

Die Beaugard – Talsperre befindet sich im Aostatal in Norditalien. Es handelt sich um eine bis zu 132 m hohe Bogenstützmauer. Die messende Beobachtung wurde durch großflächige Bewegungen (1,7 x 2,4 km) der linken Talflanke, die seit der Aufstauphase (ab 1959) im Bereich der Sperre stattfinden, notwendig. Obwohl die Bewegungen nur gering sind, könnte in Zukunft die Stabilität des Bauwerks gefährdet werden. Aus diesem Grund wurde das ursprüngliche Stauziel auch niemals vollständig erreicht. Durch das Monitoring sollten die Bewegungsmechanismen und die Abhängigkeiten der Bewegungsgeschwindigkeiten von den Wasserverhältnissen im Untergrund erforscht werden. Im weiteren Verlauf sollte das Messnetzwerk auch dazu dienen, die Funktion von Stabilisierungsmaßnahmen – vor allem einer Drainagierung des Bereiches – zu überprüfen.

Das Monitoringnetzwerk setzt sich aus den Komponenten,

- Theodolit
- GPS
- Klinometer im Bohrloch (Lot)
- Piezometer
- terrestrisches Radar (periodisch verwendet), zusammen.

Abbildung 8-3 zeigt die Positionierung der Messsysteme. In diesem Beispiel konzentrieren sich die Theodolitmesspunkte im Bereich des linken Widerlagers der Talsperre. Dies verringert die Messentfernungen und erhöht somit die Genauigkeit, da die Messung von der stabilen rechten Talflanke aus ausgeführt wird. Im Gegensatz dazu sind GPS-Empfänger über den gesamten Hangbereich verteilt, um einen möglichst vollständigen Gesamtüberblick zu gewährleisten. Klinometer (Lote) wurden im Nahbereich um und in der Talsperre angebracht. Um Zusammenhänge zwischen den natürlich (durch die Witterung) und künstlich (durch das Aufstauen) beeinflussten Wasserverhältnissen und den Verschiebungsgeschwindigkeiten feststellen zu können, wurden Piezometer im gesamten linken Talbereich verteilt. Zur flächigen Auflösung der Verschiebungen und zur Verdichtung des Messnetzwerks wurden 2008 und 2009, jeweils für 4 Monate, Radaraufnahmen der gesamten linken Talflanke im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

Durch die Ergebnisse konnte der Bewegungsmechanismus als Hangkriechen gemäß Abbildung 2-2 klassifiziert werden, wobei sich im unteren Bereich bereits eine Scherzone ausbildet. Aus den Messdaten konnte außerdem ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schneeschmelze und dem Anstieg des Bergwasserspiegels nachgewiesen werden. Durch einen Vergleich der Wasserverhältnisse mit Verschiebungsmessungen wurde ebenfalls erkennbar, dass in Jahren mit hohen Bergwasserständen die größten Verschiebungen stattfanden. Dies konnte durch terrestrische Radaraufnahmen bestätigt und konkretisiert werden. So war es beispielsweise möglich, das Untersuchungsgebiet in zwei Bereiche unterschiedlicher Bewegungsgeschwindigkeiten einzuteilen (siehe Verschiebungsraten in Abb.8-3). Der obere Hangabschnitt bewegt sich mit etwa 10-13 mm/Jahr, der unter Teil mit 4-6 mm/Jahr. Als Folge der Untersuchungen wurde eine Drainagierung - oberhalb der sich ausbildenden Scherzone - vorgeschlagen. Durch die Ableitung des Wassers sollen die ungünstig wirkenden Faktoren (Wasserdruck, verringerter Reibungswinkel, Auftrieb, usw.) verringert und dadurch die Bewegungsraten minimiert werden. (Barla, 2010)

Anhand der Beauregard – Talsperre sind die Vorzüge eines Messverfahrens, das Verschiebungen flächig misst, gut zu erkennen. Durch die Entwicklung transportabler Messsysteme dieser Art können diese – auch durch periodisch angewandte Messungen – wichtige und ergänzende Messdaten liefern. Weiters ermöglichen sie eine einfache Überprüfung anderer Verschiebungsmessungen und erleichtern durch die flächige Darstellung die Erkennung der Bewegungsmechanismen.

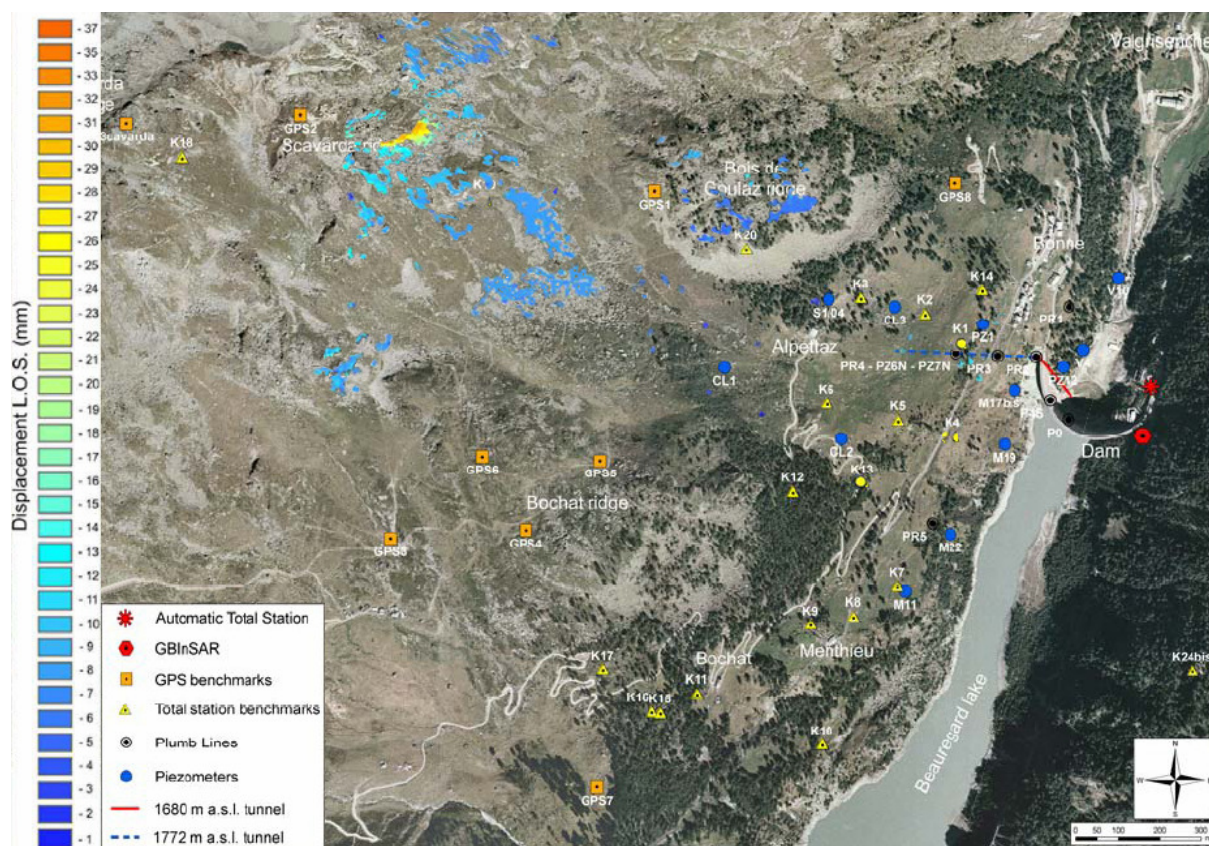


Abb. 8-3: Anordnung der Messsysteme im Beispiel der Talsperre Beaugard mit DInSAR - Auswertung (nach: Barla, 2010)

8.4 Gschlifegraben (A)

Der Gschlifegraben liegt in Oberösterreich, am Ostufer des Traunsees und entwässert ein etwa 3 km² großes Einzugsgebiet. Durch die besonderen geologischen Verhältnisse eines tektonischen Fensters aus leicht verwitterbaren Gesteinen (Ultrahelvetikum) und überlagernden massigen Kalksteinen an einer und Flyschgestein an der anderen Seite des Grabens kam es in der Vergangenheit im Gschlifegraben immer wieder zu Massenbewegungen (Weidinger, 2009). Ausgelöst wurden diese durch die Verwitterung des Gesteins und durch Auflasten im oberen Bereich des Grabens. Die Auflasten entstanden durch Felsstürze oder Murengänge, die sich vom Traunstein kommend im oberen Bereich des Grabens ablagerten. Die Bewegungen konnten als Erdströme klassifiziert werden. Bei der letzten Großhangbewegung 2007/2008 setzten sich etwa 4 Mill. m³ Material mit einer Geschwindigkeit von bis 4,7 m pro Tag in Bewegung (Marschallinger et al., 2009). Das Monitoringnetzwerk wurde zur Dokumentation der Bewegung, als Grundlage zur richtigen Wahl der Stabilisierungsmaßnahmen und zu deren Funktionskontrolle, errichtet.

Es beinhaltet:

- Wetterstation
(Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Abflussmessung)
- Manuelle Messung von Bolzenstrecken
- Theodolit
- GPS
- Inklinometer
- Piezometer
- luftgestützte Laserscans

Durch die Auswertung der Messdaten und durch zusätzliche Echolotmessungen der Oberfläche des Schwemmkegels unter dem Seespiegel konnten unterschiedlich schnell bewegte Bereiche im Erdstrom erkannt und in Form von Schnitten durch diesen dargestellt werden. Durch die mehrfache Befliegung des Grabens mit einem Laserscanner war es möglich, die bewegten Bereiche in unterschiedliche Zonen – nach deren Größenordnung und Aktivität – einzuteilen und diese in ein 3-D Geländemodell einzutragen (Abb. 8-4).

Da Theodolitmessungen lange Messstrecken zu Fixpunkten benötigt hätten und durch die schlechte Einsehbarkeit in den Graben erschwert wurden, wurde für den Großteil der punktförmigen Messungen ein differenziertes GPS-Beobachtungssystem verwendet. Am Schwemmkegel wurde zur Verdichtung des Messnetzes, im Bereich der bedrohten Häuser, das GPS-System zusätzlich mit Theodolitmessungen ergänzt. (Gruber et al., 2008)

Durch Inklinometermessungen konnte erkannt werden, dass sich die oberen, weniger durchlässigen Schichten kriechend bewegten. Gleichzeitig glitten, in einer Tiefe von etwa 20 Metern, die oberen Schichten auf einer durchlässigeren Zone. Die Piezometermessungen und später die Brunnenbohrungen (für die Drainage) zeigten, dass in der durchlässigen Schicht gespanntes Wasser, das in höheren Bereichen eindrang, vorhanden war. Dieses Wasser verursachte einen Anstieg der Porenwasserdrücke, verringerte durch Konsistenzänderungen des Feinkornanteils die Scherfestigkeit und erzeugte Auftriebskräfte. Dies führte zu Scherbrüchen und in weiterer Folge zu Überschiebungen der unterhalb liegenden Bereiche. Die Überschiebungen stellten zusätzliche Auflasten, die die Porenwasserdrücke weiter steigerten, dar und führten somit zu einer fortschreitenden Bewegung. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte ein umfassendes Sanierungspaket zusammengestellt werden. Dessen Ziel war und ist es, durch Entwässerungsmaßnahmen mittels Querdrainagen, Absenkungen der Porenwasserdrücke mittels Längsdrainagen und Materialabfuhren eine Verlangsamung und Stabilisierung des Erdstroms zu erreichen und eine Gefährdung der Häuser zu verhindern (Poisel et al., B), 2011).

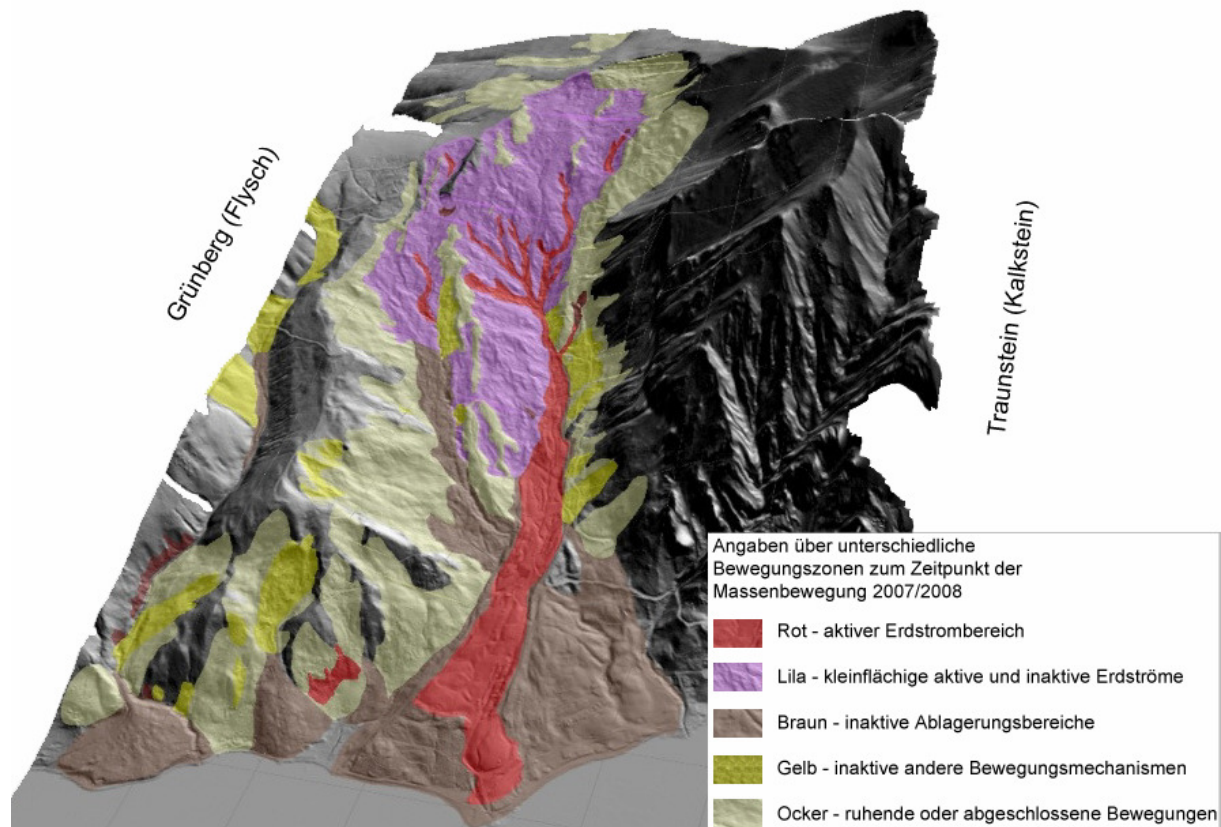


Abb. 8-4: Bewegungszonen im Gschlifgraben 2007/2008 (aus Laserscan - Daten erstellt)

(nach: Supper et al., 2010)

8.4.1 Ermittlung der Messabweichung eines GPS-Systems am Beispiel des Gschlifgrabens

Das verwendete GPS-System (5800 RTK Rover mit integrierter GSM und TSC2 w/SCb Kontrolleinheit) sollte nach Herstellerangaben Messgenauigkeiten von 10 mm für Lage- und 20 mm für Höhenangaben erreichen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass durch die Mehrwegeausbreitung, die Satellitengeometrie und atmosphärische Störungen die Genauigkeit beeinträchtigt werden kann. (Trimble, 2011)

Zur Feststellung der tatsächlich erreichten Messgenauigkeit wurden Daten ausgewählter GPS-Punkte ausgewertet. Die erforderlichen Messdaten wurden von der Sektion Oberösterreich des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung, unter der Leitung von Hofrat DI Wolfgang Gasperl, zur Verfügung gestellt. Bei der Wahl der Punkte wurde darauf geachtet, dass diese möglichst über das gesamte Untersuchungsgebiet (Abb. 8-5) verteilt sind. Weiters sollten die Punkte eine möglichst stabile Lage aufweisen, um die Auswertung der Messgenauigkeit nicht durch die Verschiebung der Punkte zu verfälschen. Da durch Baggerarbeiten und Überschiebungen immer wieder Punkte zerstört wurden, musste der Auswertungszeitraum für die einzelnen Punkte unterschiedlich gewählt werden. So konnten für die Punkte S33 und N34 die Auswertung über 29 Monate, für den Punkt N124 über 22 Monate, für Punkt N134 über 20 Monate und für den Punkt N152 über 21 Monate erfolgen.

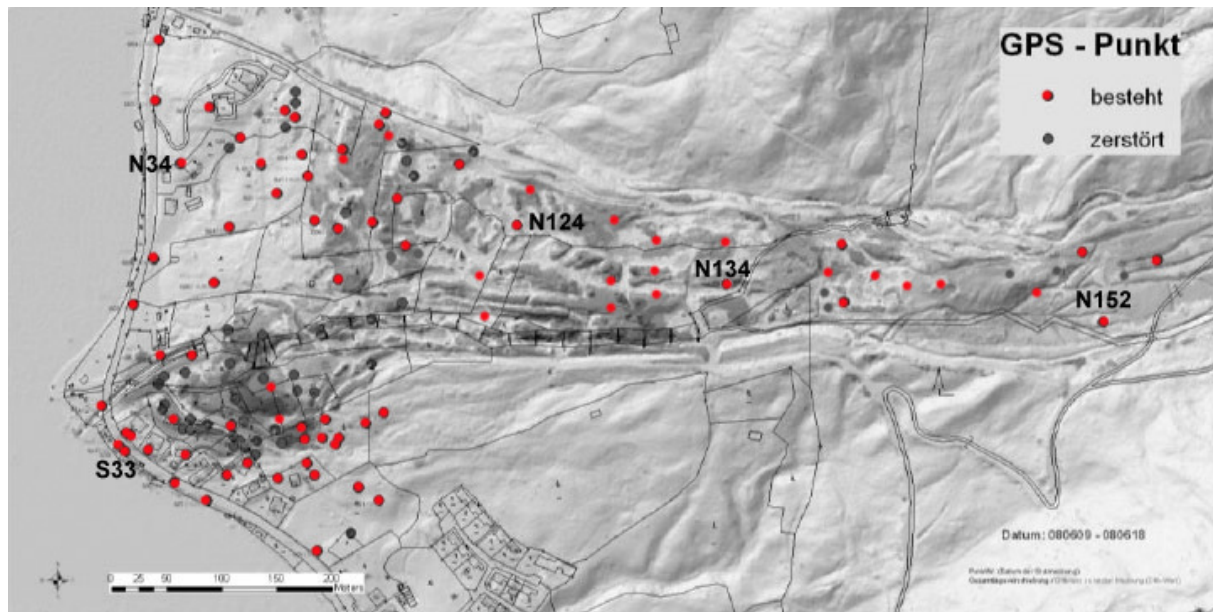


Abb. 8-5: Anordnung der für die Auswertung verwendeten Punkte

(nach: Gruber et al., 2008)

In den Abb. 8-6 bis 8-15 werden die Abweichungen der Einzelmessungen (kleine, farbige Punkte) zur tatsächlichen Lage des Punktes (großer, schwarzer Punkt) gemäß der Mittelung aller verwendeter Messwerte dargestellt. Die farbigen, mittelgroßen Punkte setzen sich aus den errechneten Mittelwerten aus Einzelmessungen über einen bestimmten Zeitraum zusammen. Sie dienen dazu festzustellen, ob sich der Punkt in Bewegung befand oder nicht. Um einen guten Überblick über einen möglichst großen Zeitraum zu gewährleisten und die Diagramme übersichtlich zu halten, wurde jeweils die erste Messung eines Monats für die Auswertung verwendet.

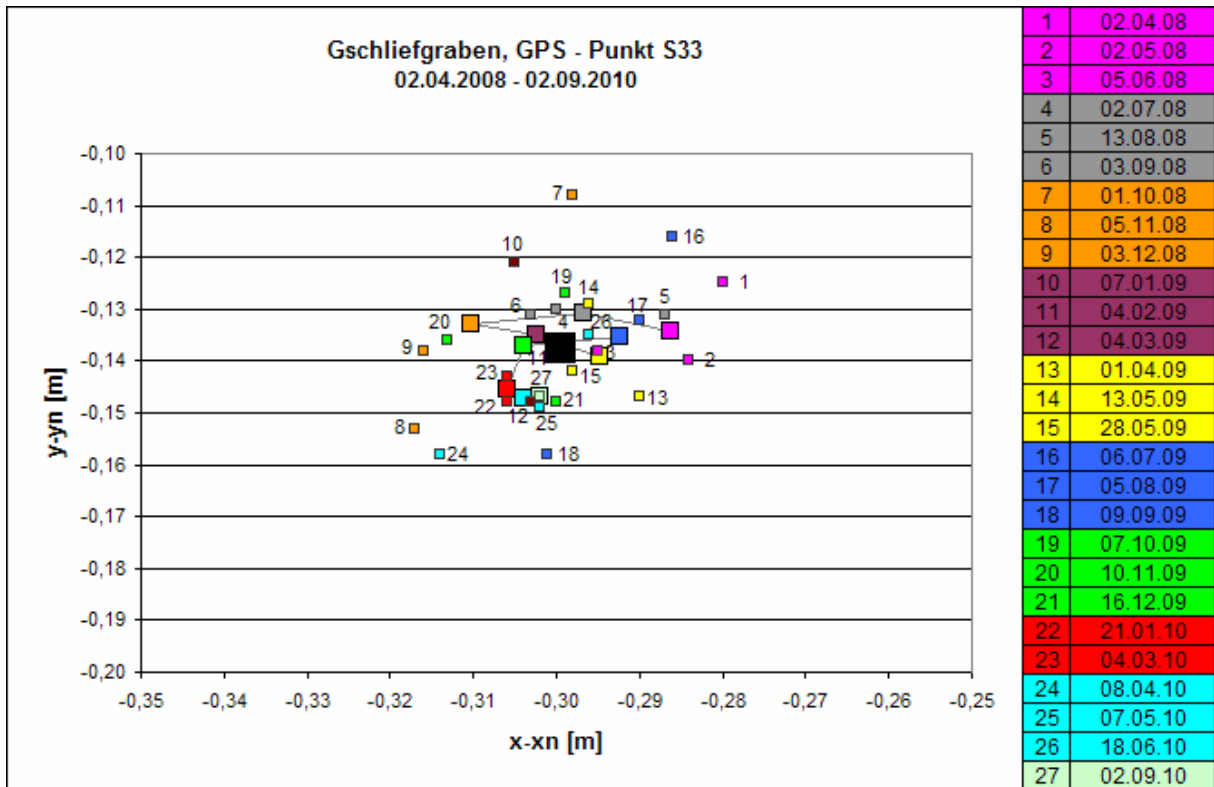


Abb. 8-6: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes S33

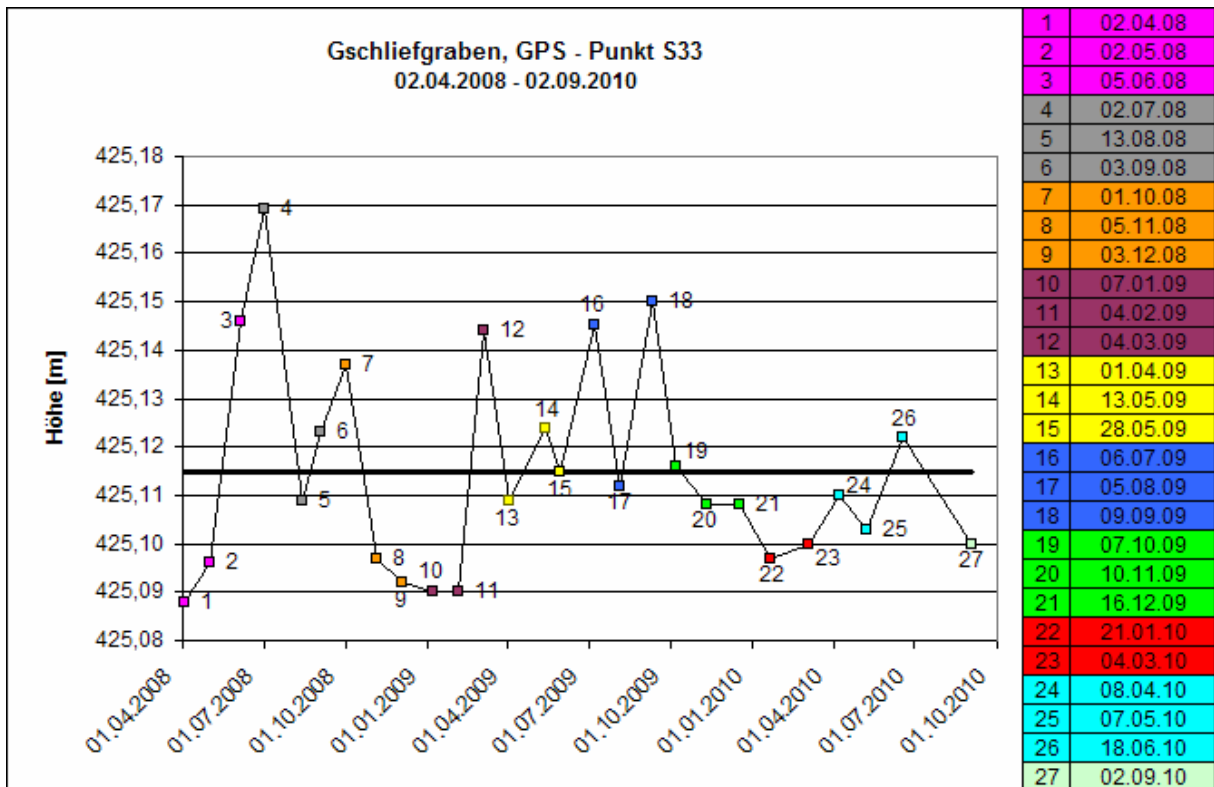


Abb. 8-7: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes S33

Der GPS-Punkt S33 weist die größte Abweichung vom Mittelwert der Lage bei der Messung 7 auf, diese beträgt 3,0 cm. Die maximale Messabweichung der Höhe beträgt 5,4 cm und wird durch die Messung 4 verursacht.

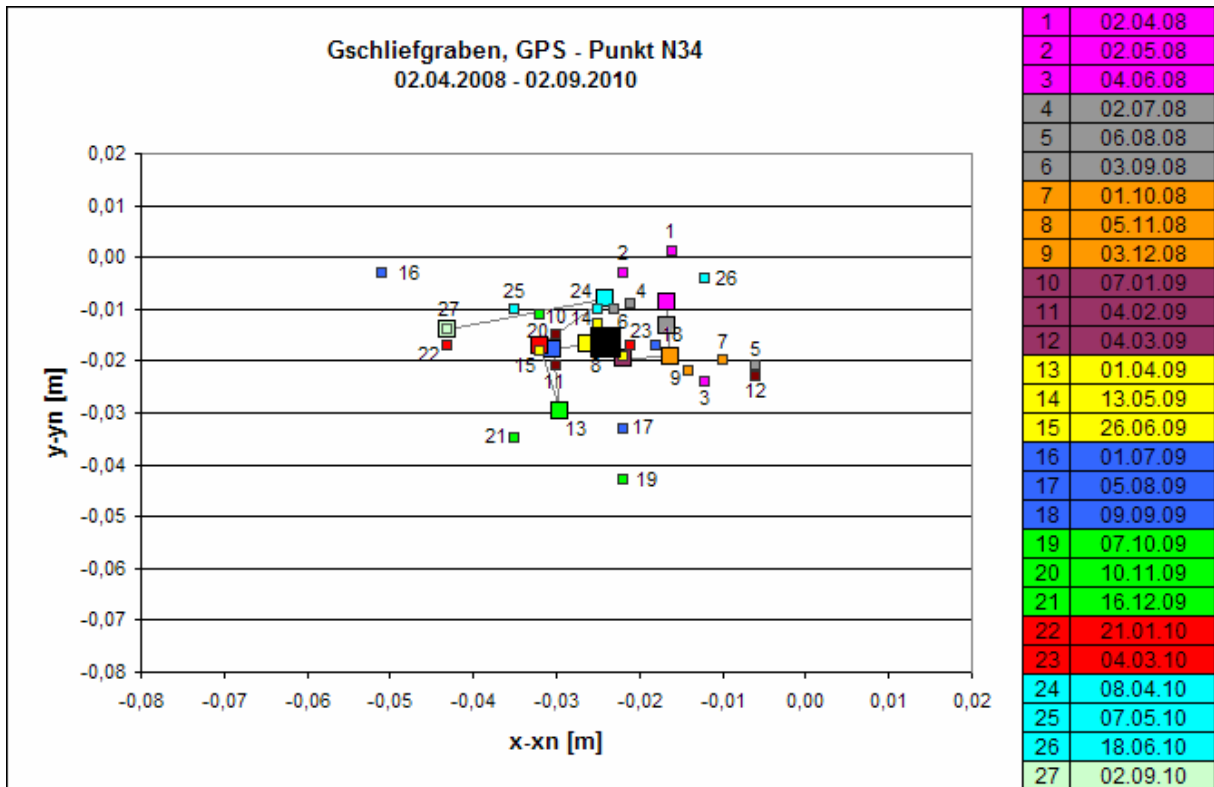


Abb. 8-8: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N34

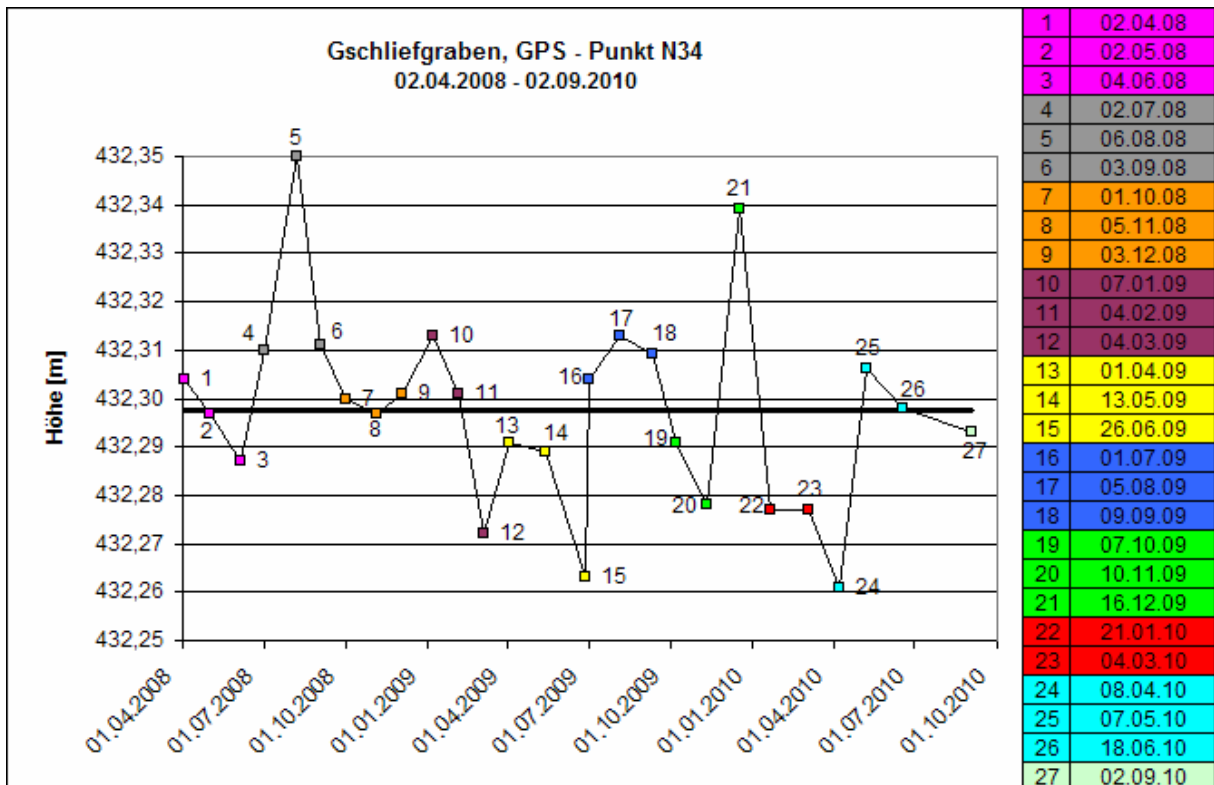


Abb. 8-9: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N34

Die Ergebnisse des Punktes N34 weichen maximal um 3,0 cm (Messung 16) vom Mittelwert der Lage und 5,3 cm (Messung 5) vom Mittelwert der Höhe ab.

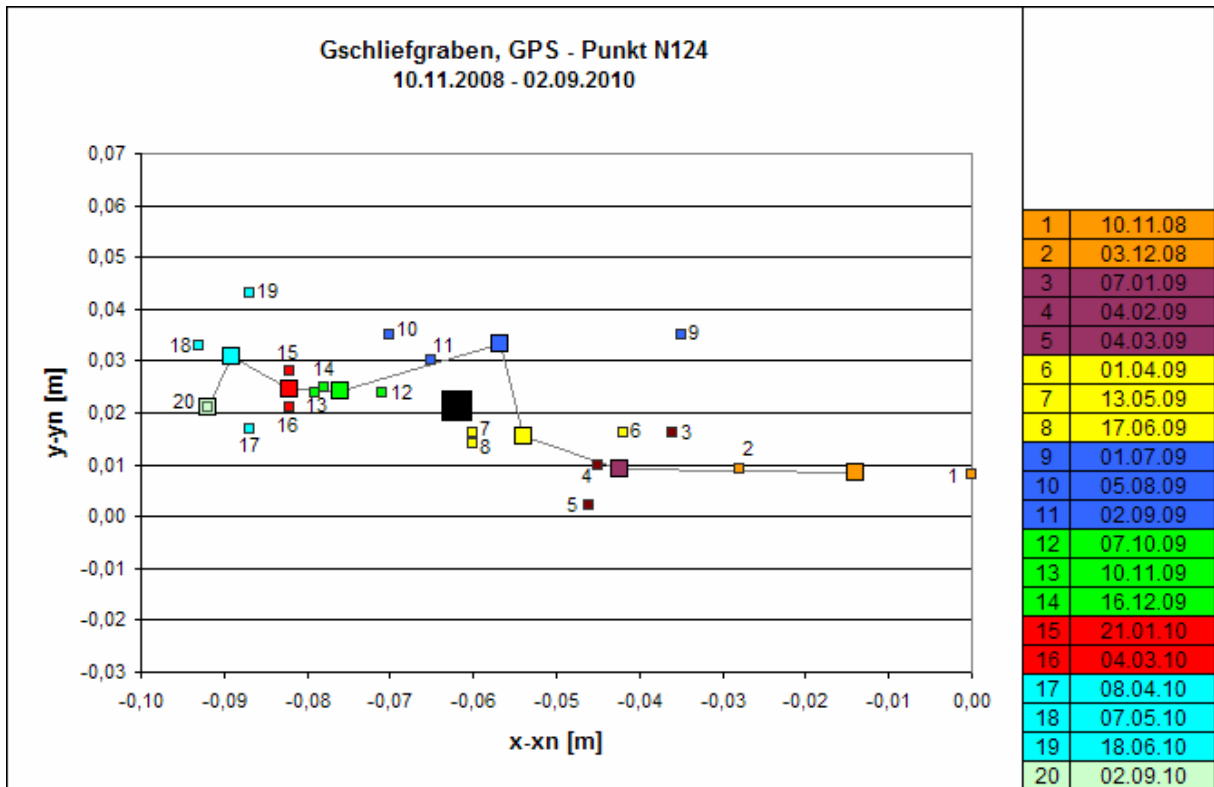


Abb. 8-10: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N124

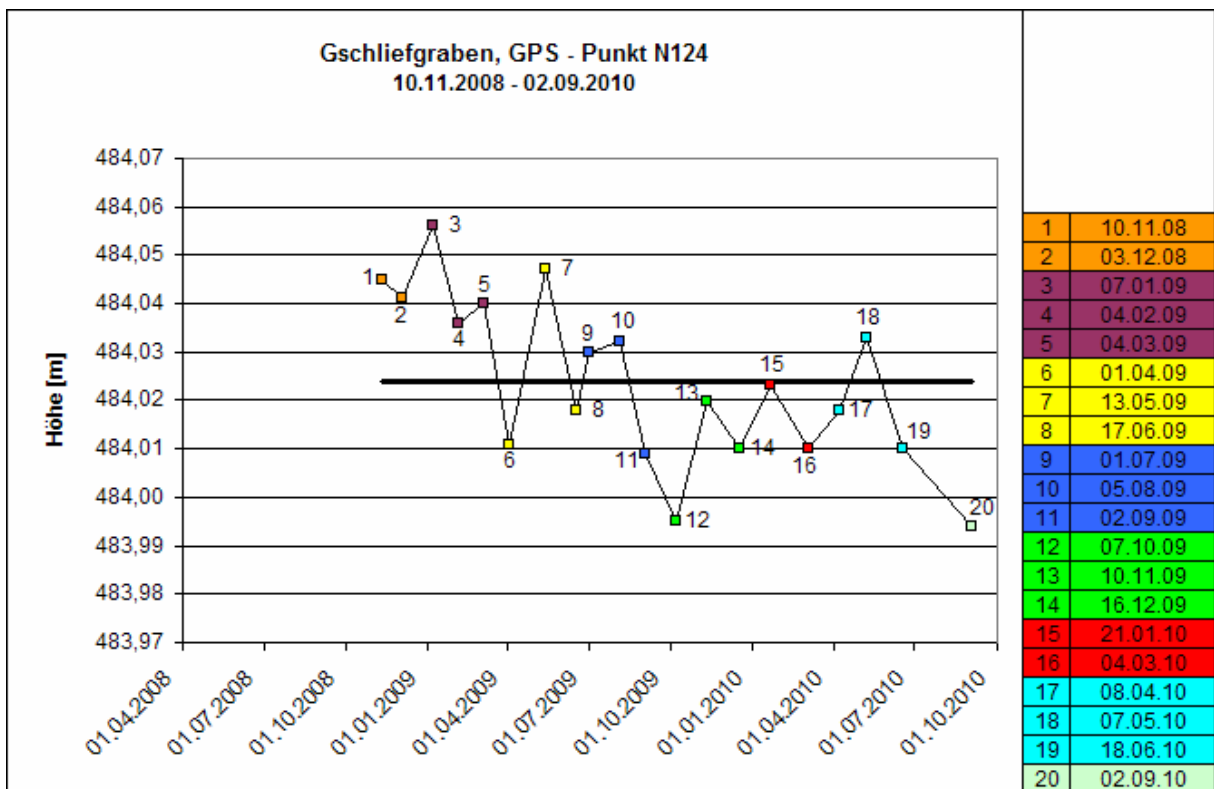


Abb. 8-11: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N124

Durch die Anordnung der vierteljährlichen Mittelwerte (mittelgroße Punkte) der Abb. 8-10 ist zu erkennen, dass sich der Punkt N124 in einer eindeutigen Bewegung befindet. Da durch die Verschiebung des Punktes das Ergebnis verfälscht werden würde, kann der Punkt N124 für die Bestimmung der Messabweichung des GPS-Systems nicht verwendet werden.

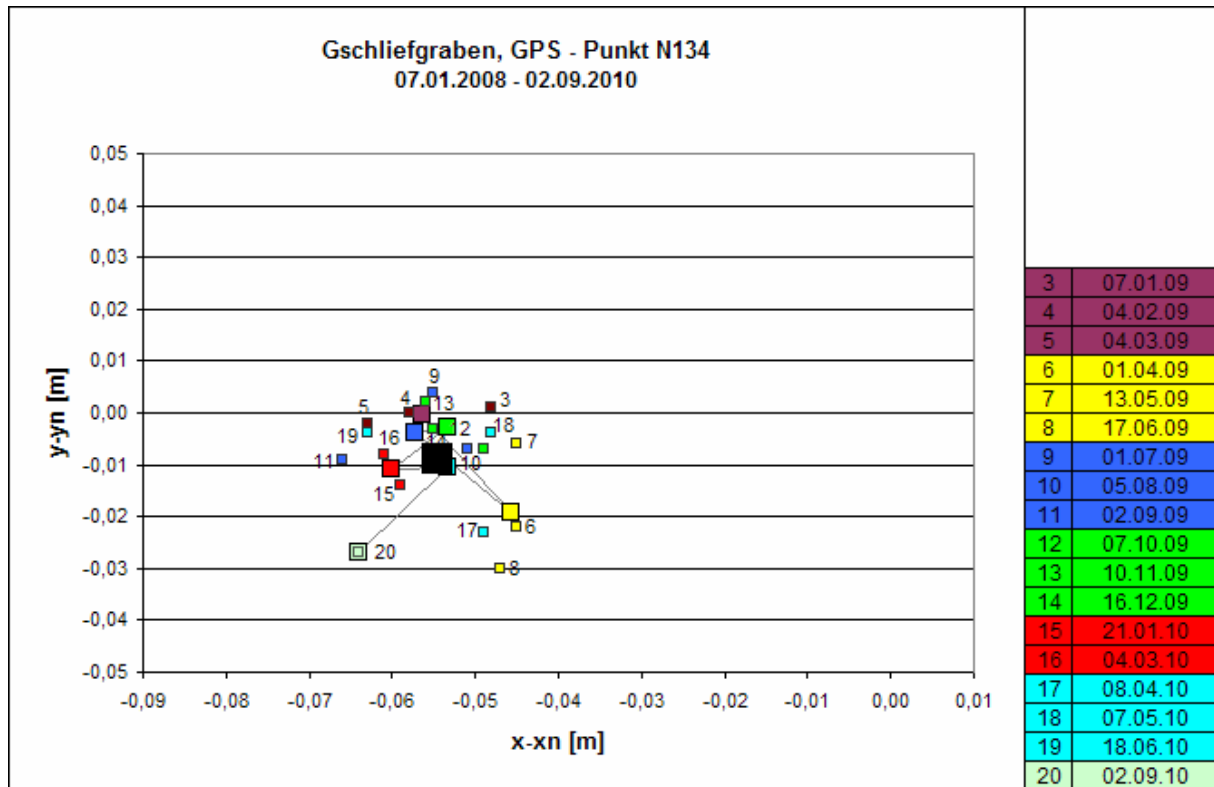


Abb. 8-12: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N134

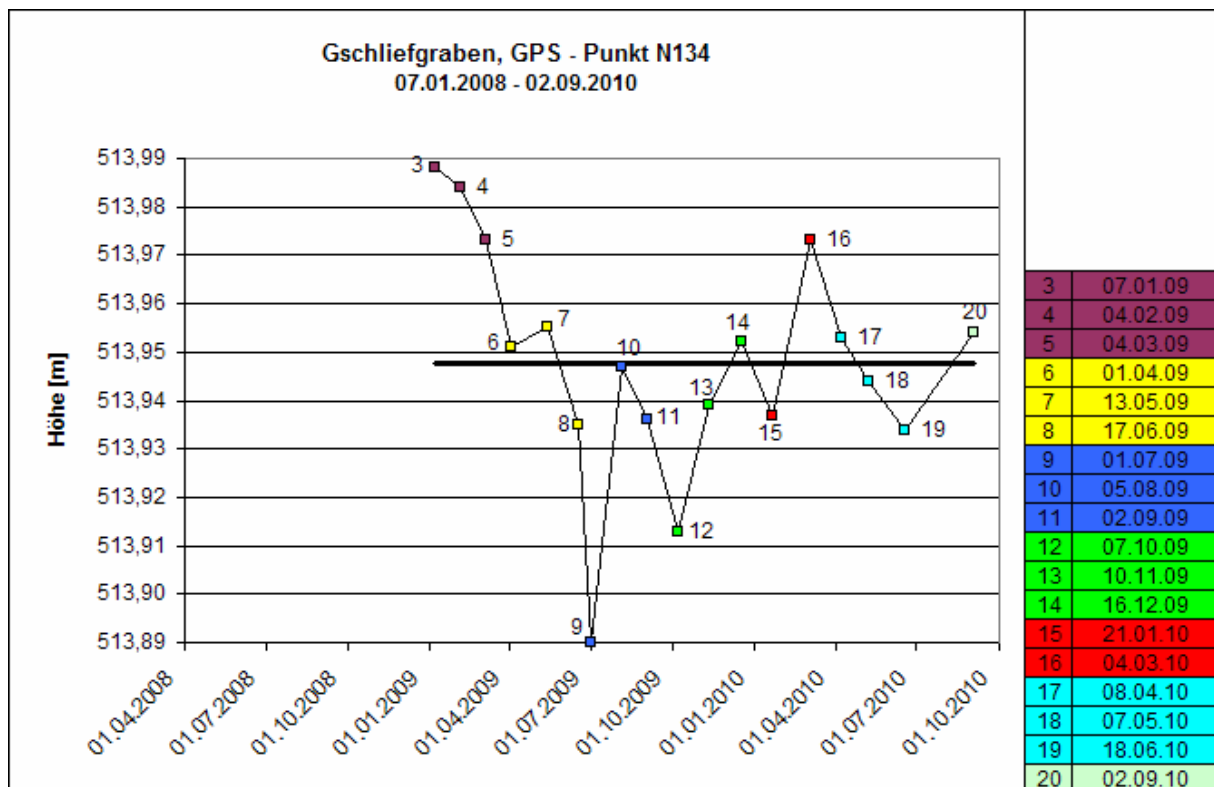


Abb. 8-13: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N134

Die Abweichungen der Messergebnisse der Lage bzw. Höhe von der wahrscheinlichsten Lage des Punktes N134 befinden sich innerhalb eines Bereiches von +/- 2,2 cm bzw. +/- 5,8 cm. Die größten Differenzen trat bei den Messungen 8 (Lage) und 9 (Höhe) auf.

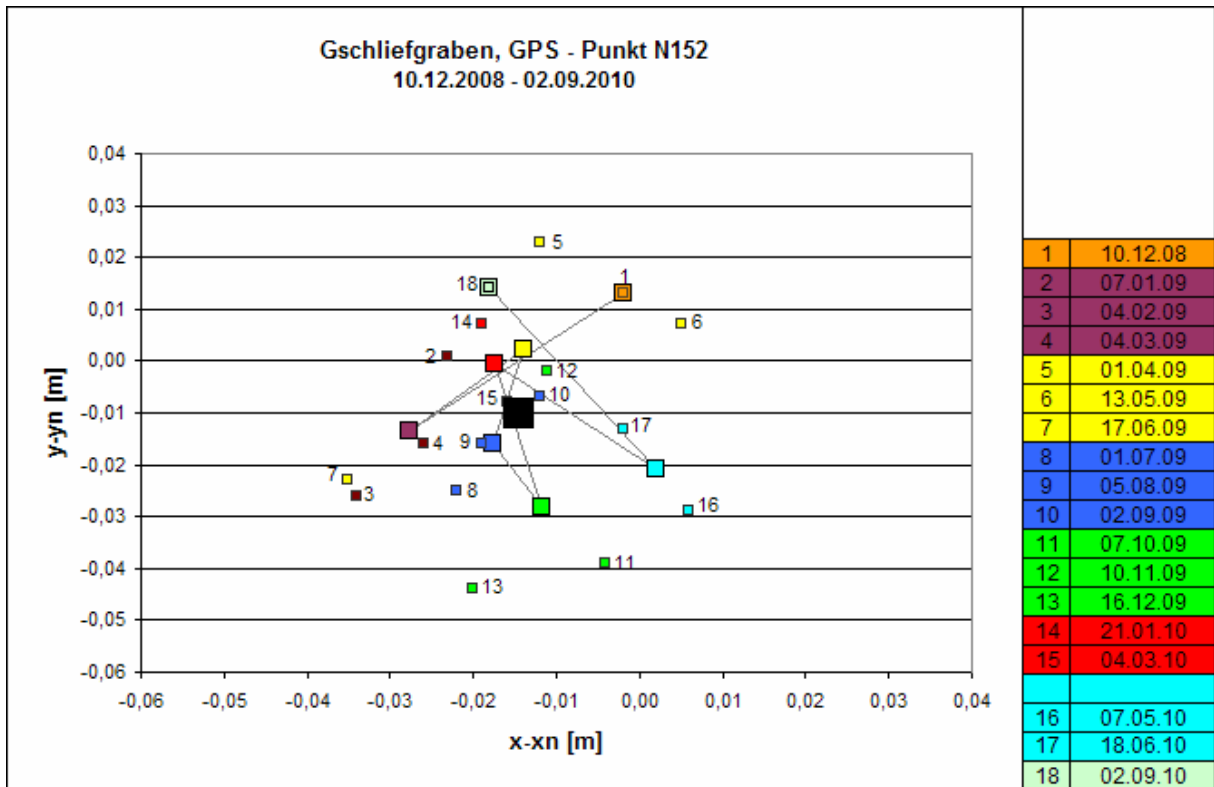


Abb. 8-14: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N152

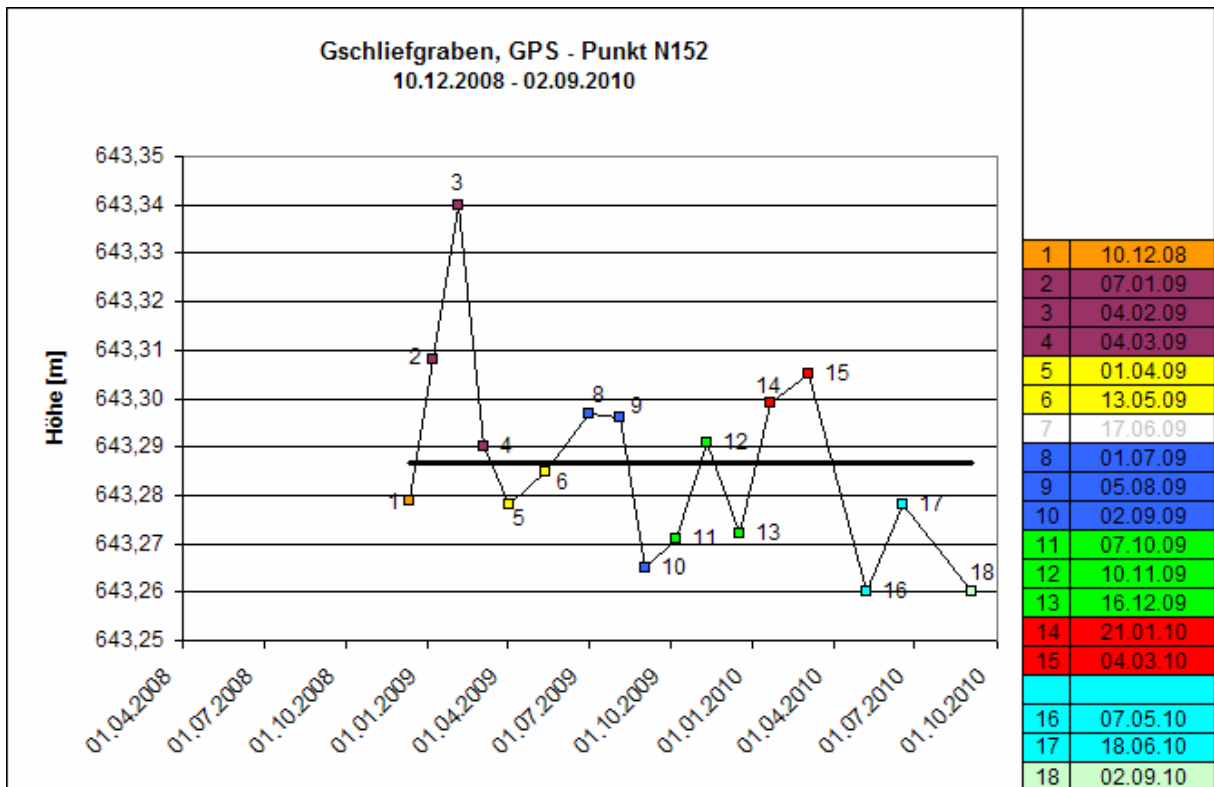


Abb. 8-15: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N152

Die größten Lageabweichungen des Punktes N152 traten bei der Messung 13 mit 3,4 cm auf. Bei der Höhenauswertung des Punktes N152 wurde ein offensichtlicher Ausreißer (Messung 7) aussortiert. Dies war möglich, da der Ausreißer in der Lageauswertung zwischen der davor und der danach durchgeführten Messungen lag, die Höhenabweichung

zu diesen jedoch über 15 cm betrug. Dies stellt mehr als doppelte bis dreifache der sonst vorkommenden Abweichungen dar. Die Messergebnisse der Höhe streuen nach der Eliminierung des Punktes in einem Bereich von $\pm 5,3$ cm. Sollten bei einer Messung Verschiebungen von einem Mehrfachen der oben angeführten möglichen Abweichungen festgestellt werden, ist diese Messung unbedingt zu wiederholen, um die Messwerte entweder zu bestätigen oder zu berichtigen.

In der Tabelle 8-1 sind die Auswertungsergebnisse zusammengefasst:

Punkt	Messdauer	Messabweichung [cm]	
		Lage	Höhe
S 33	29 Monate	3,0	5,4
N 34	29 Monate	3,0	5,3
N 124	22 Monate	?	?
N 134	20 Monate	2,2	5,8
N 152	21 Monate	3,4	5,3
Herstellerangaben (5800 RTK Rover)		1,0	2,0
Die erreichbare Messabweichung beträgt [cm]:		3,5	6,0

Tab. 8-1: Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse

Die bei einer Messung auftretende, maximale Abweichung von der Mittellage der gemessenen Punkte kann in diesem Beispiel mit $\pm 3,5$ cm für die Lage und einem Bereich von $\pm 6,0$ cm für die Höhe angegeben werden.

Aus diesem Beispiel kann abgeleitet werden, dass die Herstellerangaben zu den Messgenauigkeiten auf Laborwerte und/oder bestmögliche Bedingungen zurückzuführen sind. Die tatsächlich ermittelten Werte entsprechen in diesem Fall etwa dem 3-fachen der Herstellerangaben. Bei der Wahl von Monitoringsystemen ist daher darauf zu beachten, dass die Messgenauigkeit bei realen Bedingungen ein Vielfaches der Herstellerangaben beträgt.

8.5 Murau (A)

Die Großhangbewegung Lärchberg - Galgenwald ist nahe der Stadt Murau in der süd-westlichen Steiermark situiert. Der Hang befindet sich etwa 2 km flussaufwärts von Murau am Rantenbach. Der Lärchberg besteht im Bereich der Bewegung – an der Basis – aus einem 140 m hohen inkompetenten Phyllitsockel, auf dem eine etwa 300 m mächtige Kalkmarmorsequenz lagert. Durch das Auspressen und Ausweichen des Phyllitgesteins wird der spröde Kalkmarmor durch Zugbeanspruchungen zerlegt. Das System kann somit dem Bewegungsmechanismus „Hart auf Weich“ (Poisel & Eppensteiner, 1988) zugeordnet werden.

Ein Monitoring der Verschiebungen wurde nach einem Felssturz 2001 zur Einschätzung der Situation und der Bestimmung des Risikos für Murau notwendig. Die Risikoeinschätzung war erforderlich, da bei größeren Sturzmassen die Gefahr besteht, dass das Ablagerungsmaterial – zusätzlich zur Zerstörung der Murtalstraße – den Rantenbach aufstaut und es nach einem "Dammbruch" zu Überflutungen oder Murgängen, die Murau bedrohen, kommt. Nach Untersuchungen des Gebiets und der Interpretation erster Messergebnisse konnte von Becker und Hermann (2002) das Untersuchungsgebiet in drei Aktivitätszonen (Abb. 8-16) eingeteilt werden. Diese Zoneneinteilung beeinflusste auch die Positionierung von später installierten Messpunkten.

Die drei Zonen stellen sich folgendermaßen dar (Becker & Hermann, 2002):

- Aktivitätszone 1 – Rotationsgleitung, Zustand: hoch aktiv, Menge: ~ 90.000 m³
- Aktivitätszone 2 – Hangkriechen, Zustand: aktiv, Menge: 6-10 Mill. m³
- Aktivitätszone 3 – Sackung, Zustand: ruhend, Menge: gesamter nördlicher Hang

Nach den ersten Messungen mittels Seilextensometern (2001) und einer Niederschlagsmessstation wurde aufgrund der Ergebnisse das Messnetzwerk erweitert, sodass dieses gegenwärtig aus einer:

- Wetterstation
(Temperatur, Niederschlag, Quellschüttung)
- mehrere Seilextensometer und einem
- Servotheodolit (2010) am Gegenhang besteht.

Die Lage der Messpunkte sowie der Seilextensometer ist der Abbildung 8-11 zu entnehmen. Die Theodolitmesspunkte wurden über alle Aktivitätszonen verteilt, konzentrieren sich jedoch am Randbereich der Aktivitätszone 1, da diese die größte Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist. Eine weitere Häufung von Messpunkten (vorwiegend Seilextensometern) befindet sich im oberen Bereich der Aktivitätszone 2, um auch diese Bewegung mit ausreichender Genauigkeit auflösen zu können.

Durch die fortlaufenden Messungen konnten schwankende Bewegungsraten von bis zu ~ 35 cm pro Jahr (2001-2010) gemessen werden. Durch Bestimmung der Verschiebungsvektoren mittels Theodolit war es möglich, den Bewegungsmechanismus einer Rotationsrutschung in der Aktivitätszone 1 zu bestätigen. (Poisel, 2010)

Bis 2004 wurde durch die Beobachtungen nachgewiesen, dass Verschiebungen vorwiegend in den Monaten Juli bis Dezember stattfanden, wobei diese – im besagten Zeitraum – von Niederschlägen beeinflusst wurden (Angerer et al., 2004).

Aus dem Beispiel kann eine mögliche schrittweise Erweiterung eines Monitoringnetzwerks abgeleitet werden, das mit günstig und einfach zu verwendenden Seilextensometern begonnen, mit Theodolitmessungen fortgesetzt wurde und in Zukunft mit Bohrloch- oder Fernerkundungsmessverfahren (luftgestützte Laserscan- oder Radaraufnahmen) ergänzt werden könnte. Außerdem wird erkennbar, dass ohne eine beobachtende Messung Risiko- und Eintrittswahrscheinlichkeitseinschätzungen unmöglich sind.

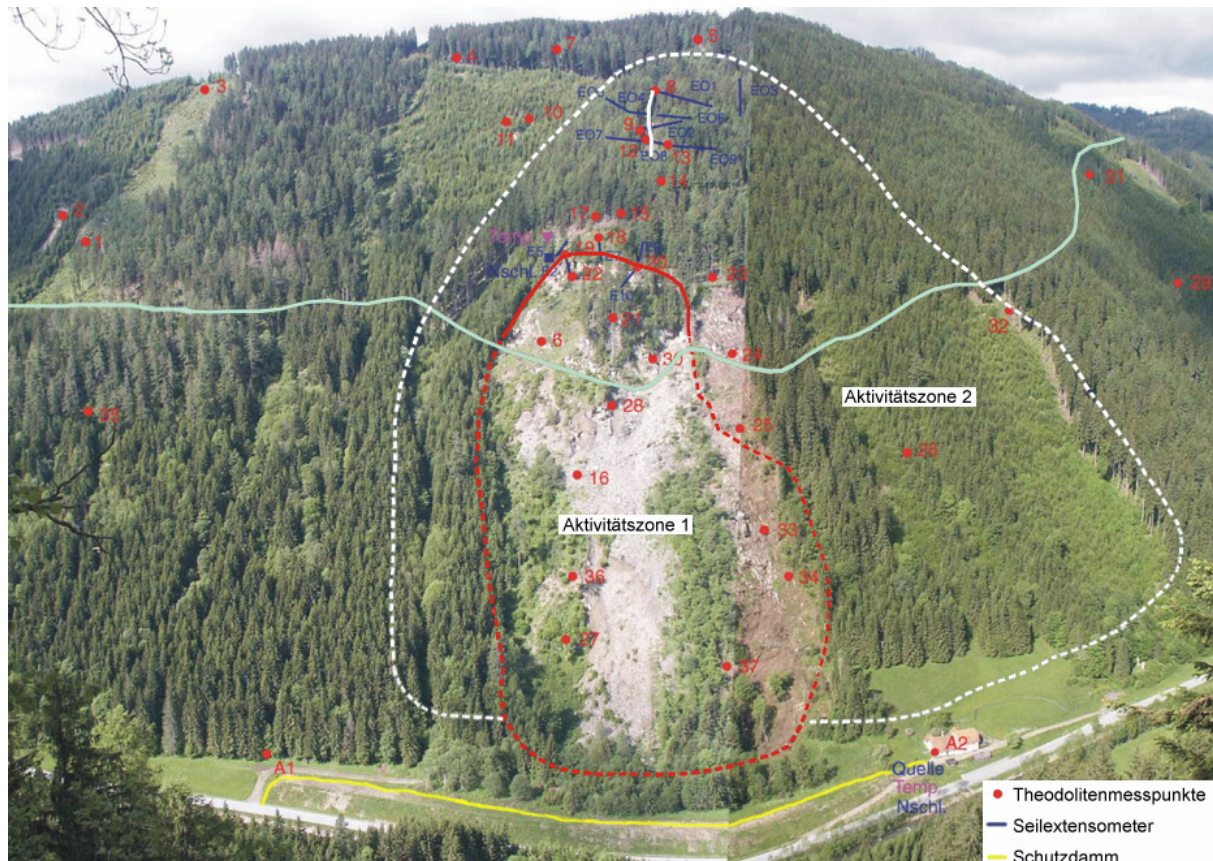


Abb. 8-16: Aktivitätszonen und Anordnung der Messpunkte und Seilextensometer
(nach: Gillarduzzi, 2003)

8.5.1 Untersuchung des Niederschlagseinflusses auf die Bewegungsraten im Beispiel Murau

Abb. 8-17 und 8-18 zeigen die Längenänderungen der Seile 2 und 10, die den Abriss der Aktivitätszone 1 überspannen. Bei der Auswertung wurden die Längenänderungen infolge von Temperaturschwankungen mithilfe der Formel (5.2) korrigiert. Es zeigte sich, dass es beim Seil 2 im letzten Monat zu einer Verlängerung kam, sich die Messstrecke des Seils 10 nach einer Verlängerung in den Vormonaten, im Februar jedoch verkürzte. Da diese Verkürzung im Streubereich der Messgenauigkeit liegt (vgl. Kapitel 5), kann davon ausgegangen werden, dass der bisherige Trend einer zunehmenden Verlängerung anhält. Eine Bestätigung dieser Annahme werden die nächsten Messungen erbringen.

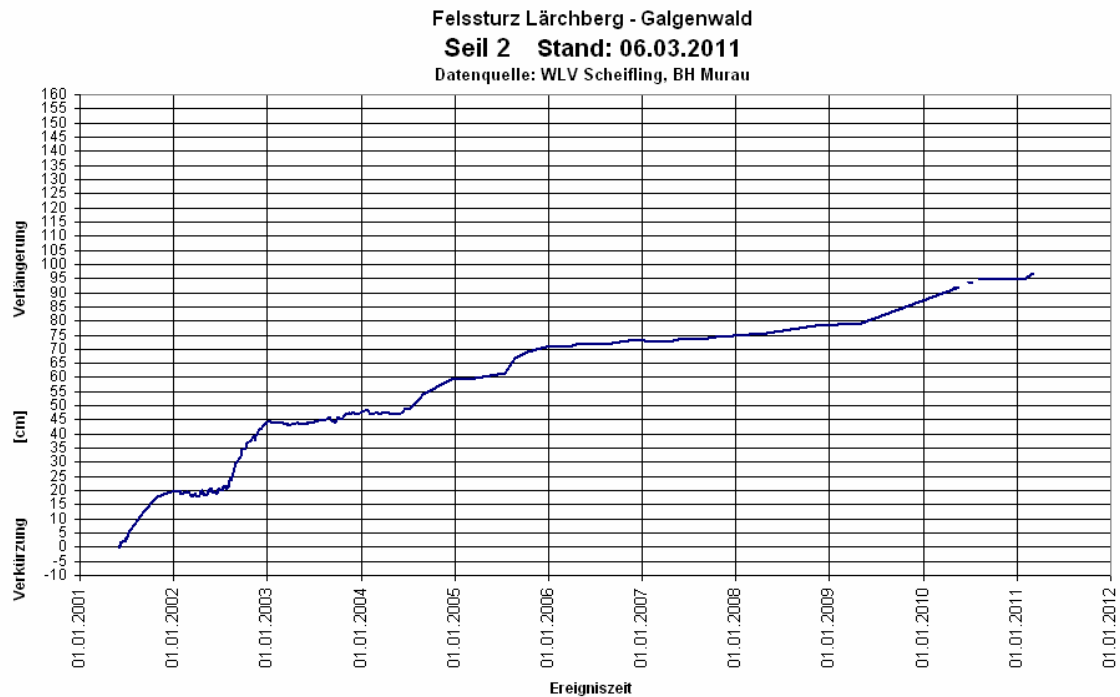


Abb. 8-17: Verlängerung des Seils 2

(nach: Poisel, 2010)

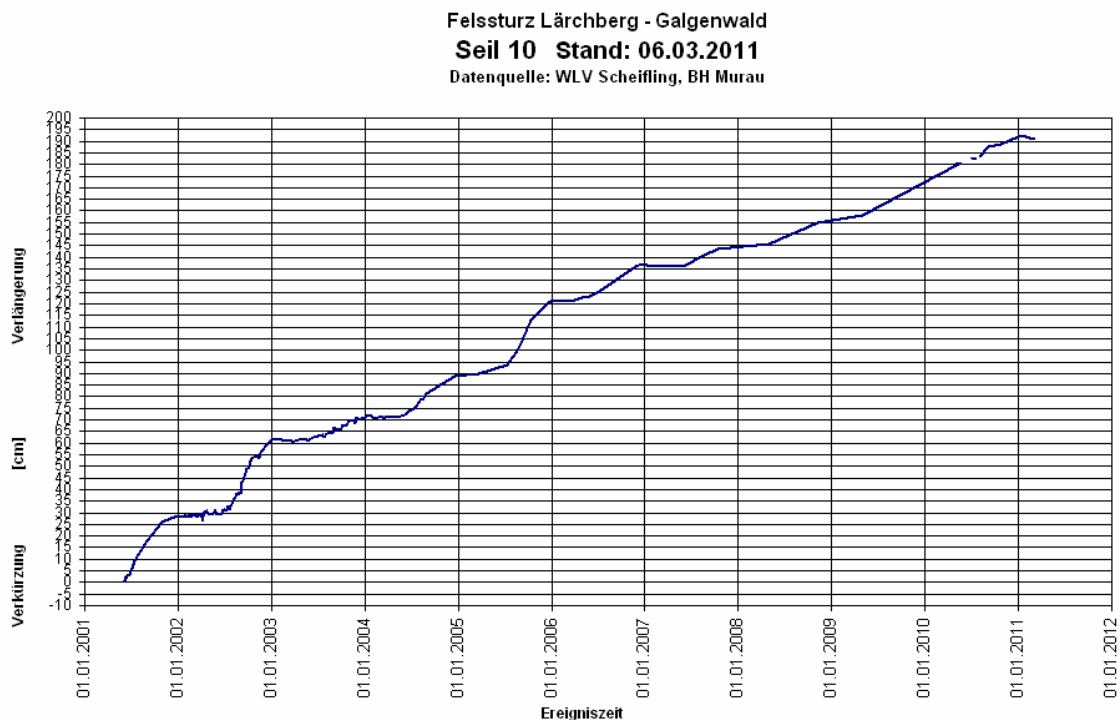


Abb. 8-18: Verlängerung des Seils 10

(nach: Poisel, 2010)

Der direkte Vergleich der Längenänderungen des Seils 10 mit der Summenlinie der Niederschläge (Abb. 8-19) lässt keinen eindeutigen Zusammenhang erkennen.

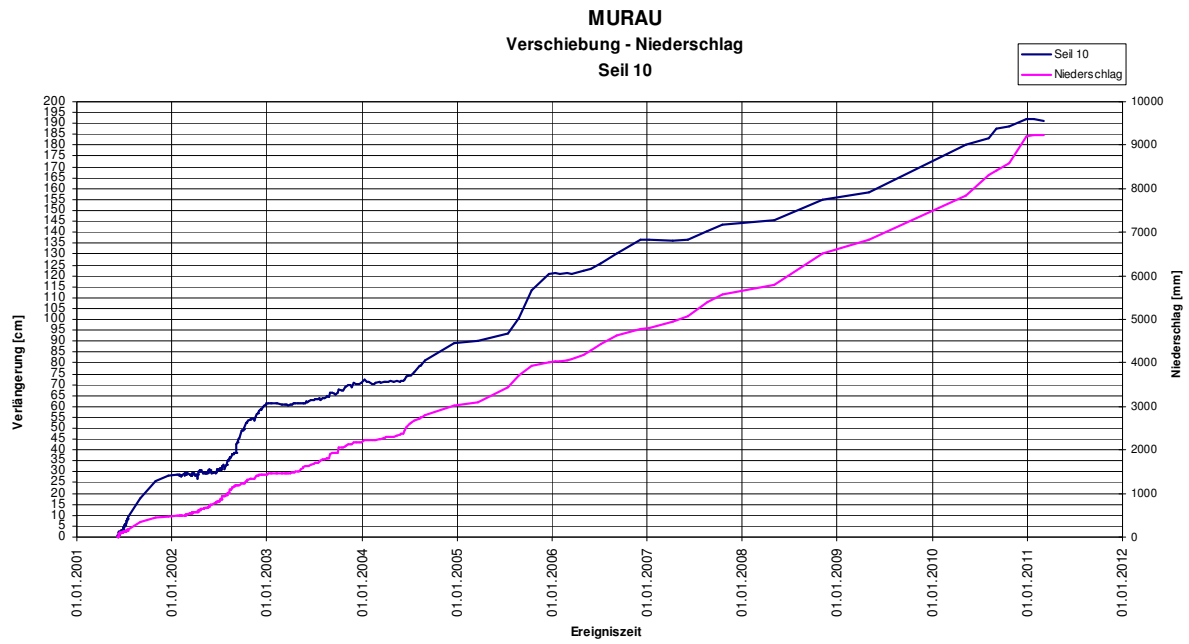


Abb. 8-19: Verlängerung des Seils 10 und Summenlinien der Niederschläge

Daher wurden die Längenänderungen des Seils 10 innerhalb eines Jahres mit den Niederschlägen in verschiedenen Zeiträumen verglichen.

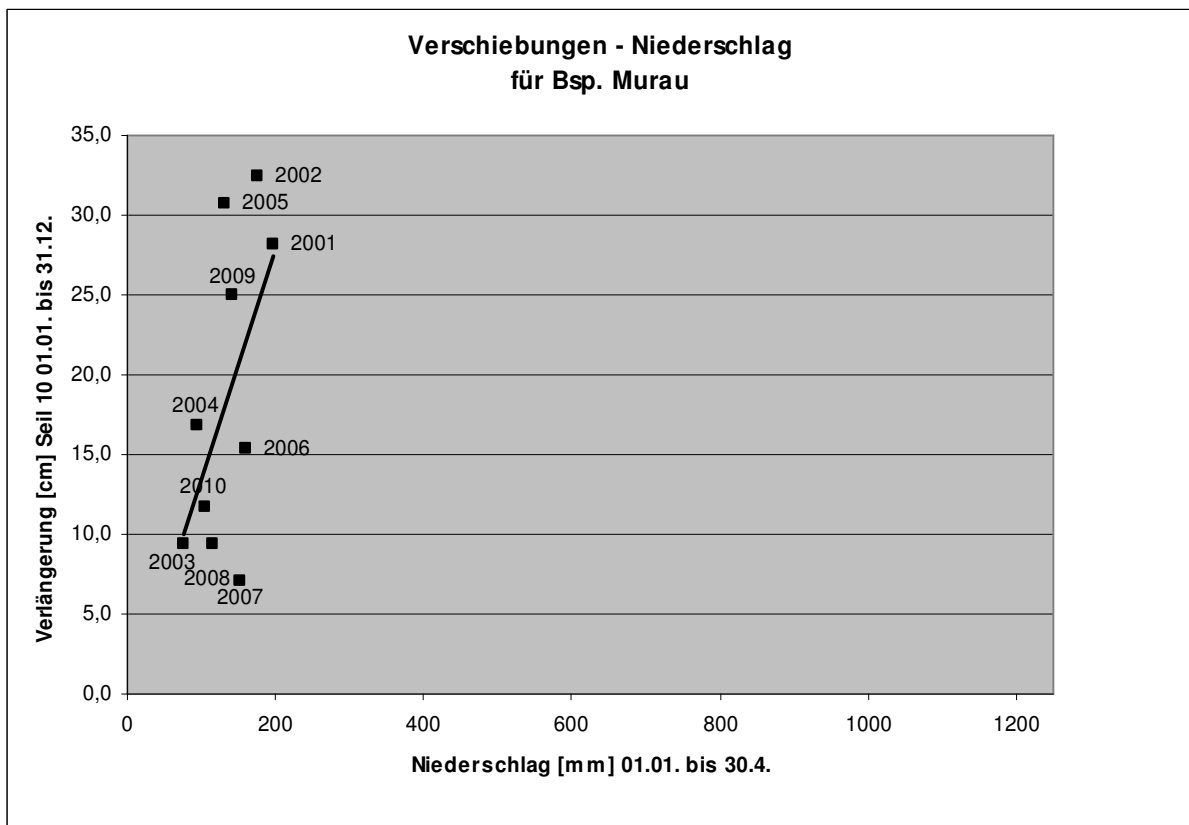


Abb. 8-20: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 01.01 und 30.04.

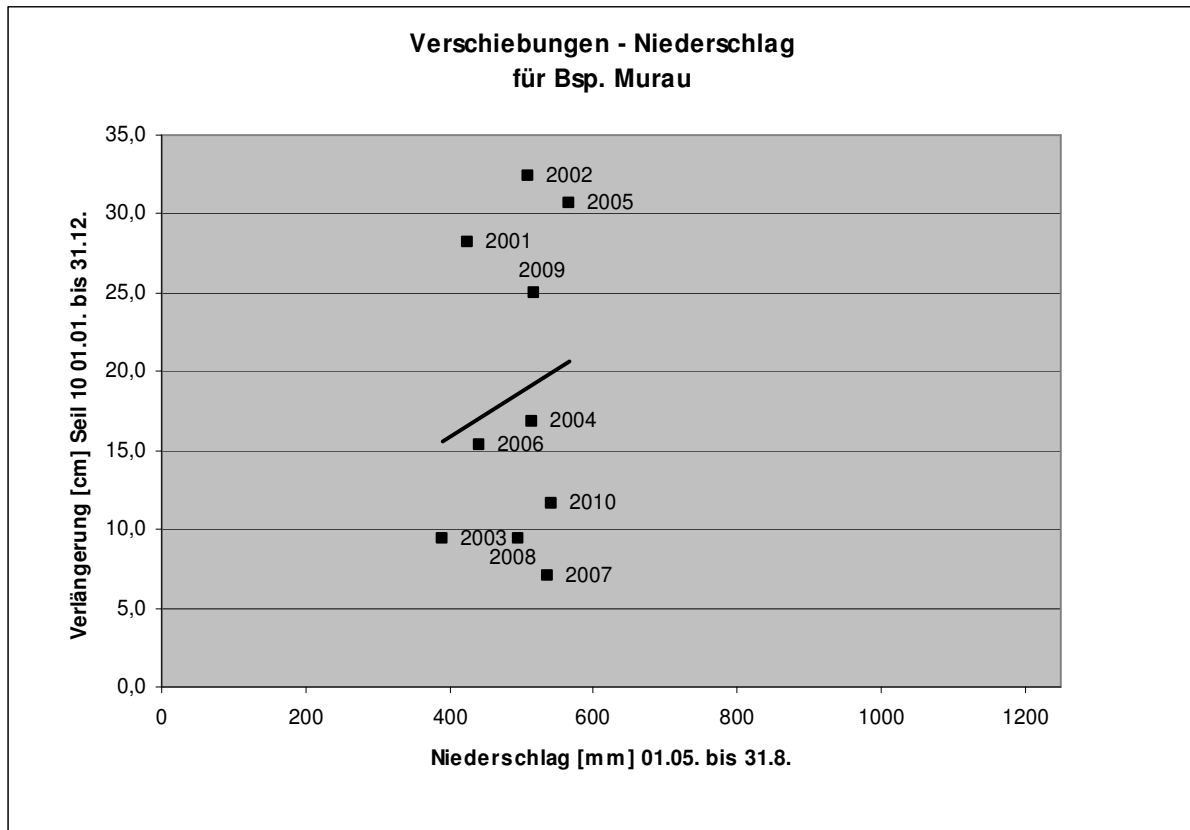


Abb. 8-21: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 01.05 und 31.08.

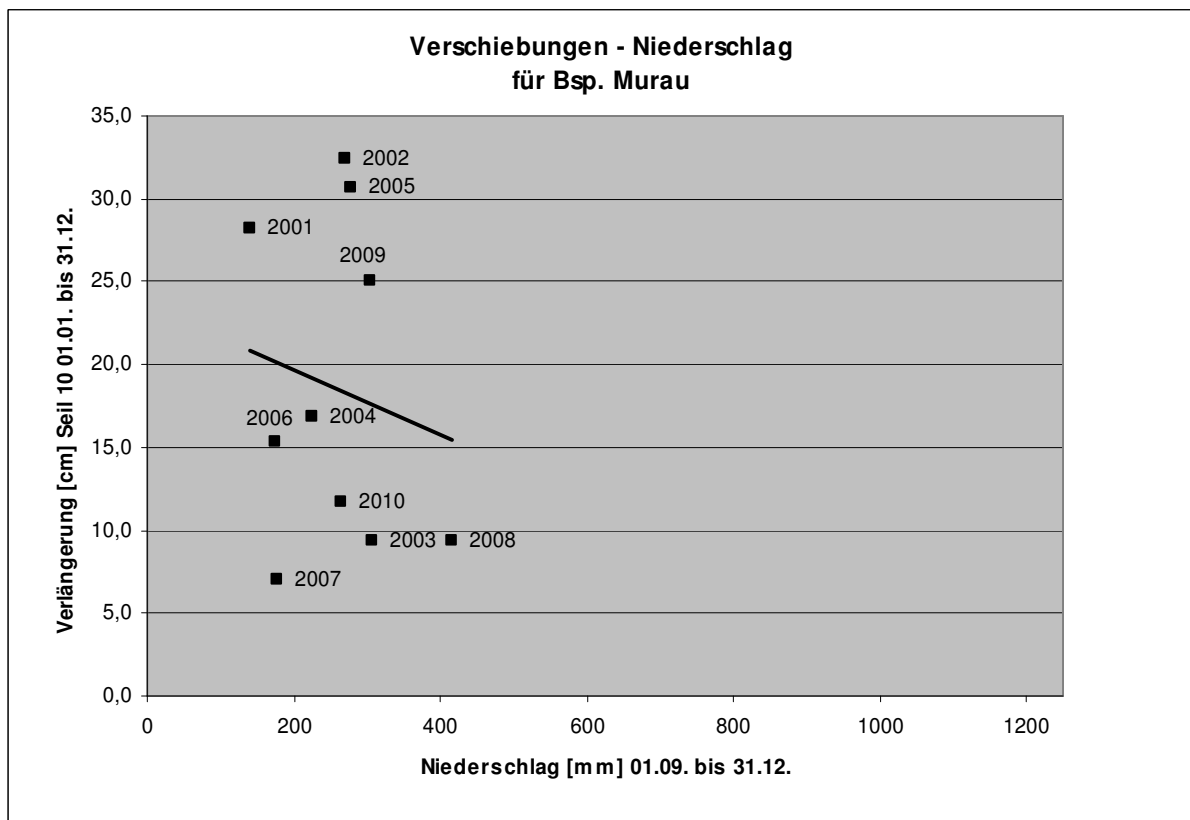


Abb. 8-22: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 31.08 und 31.12.

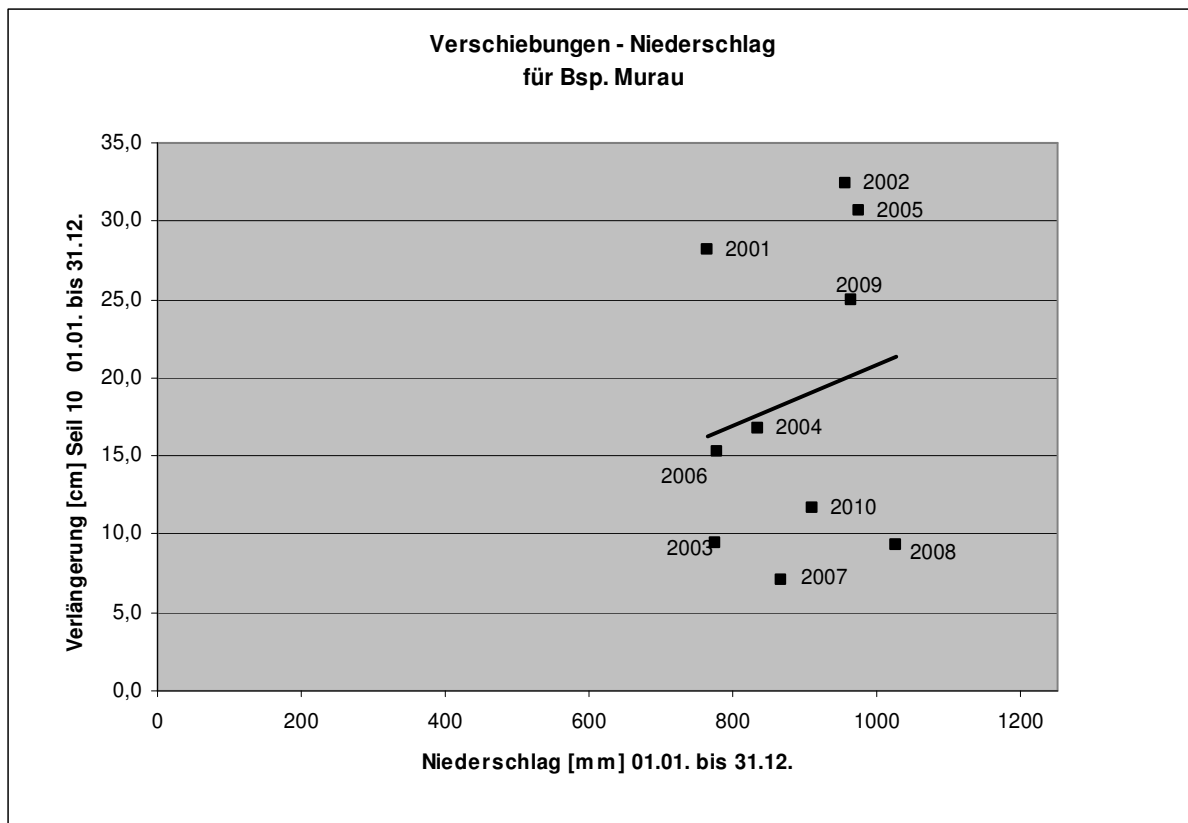


Abb. 8-23: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Jahresniederschlägen

Sowohl die Vergleiche der Verschiebungen innerhalb eines Jahres mit den Niederschlägen in 4 Monaten (Abb. 8-20 bis Abb. 8-22) als auch mit jenen im ganzen Jahr (Abb. 8-23) lassen keinen ausgeprägten Zusammenhang erkennen. Beispielsweise ist aus Abbildung 8-23 ersichtlich, dass es bei Jahresniederschlägen von etwa 770 mm zu Jahresverschiebungen von 9,5 cm (2003) aber auch von 28 cm (2001) kam. Daher kann die Summe der Jahresniederschläge nicht im direkten Zusammenhang mit der Bewegungsrate stehen. Die Aussage von Angerer et al. (2004), dass die Niederschläge zwischen Jänner und April die Verschiebungsraten über ein Jahr stark beeinflussen (Abb. 8-20), konnte daher in den Folgejahren nicht bestätigt werden. Auch die Niederschläge zwischen Mai und September (Abb. 8-21) und die Niederschläge zwischen September und Dezember (Abb. 8-22) wirken sich auf die Bewegungsraten nicht nach einem erkennbaren Schema aus. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Niederschlägen auf den Verschiebungsraten konnte somit durch die Auswertungen nicht hergestellt werden.

9. Zusammenfassung

Massenbewegungen sind weltweit auftretende Naturereignisse mit großem Schadenspotenzial und stellen ein erhebliches Risiko für den Menschen und die Infrastruktur dar. Als Auslöser kommen eine Vielzahl von Faktoren, wie Witterungseinflüsse, Bergwasserverhältnisse, Eingriffe in die Hanggeometrie, Auflasten usw. in Frage. Da sich größere Massenbewegung immer ankündigen, ist es die Aufgabe von Monitoringsystemen, diese zu überwachen und vor einem Großereignis zu warnen. Anzeichen für einen bevorstehenden Abgang größerer Massen können beispielsweise ein vermehrter Steinschlag, sich schnell vergrößernde Zugrisse im Anbruchsbereich, vermehrte Mikroeben und eine progressive Beschleunigung der Bewegung sein. Spätestens nach solchen Ereignissen muss ein Monitoringsystem installiert werden, wenn Menschen oder Sachwerte gefährdet sind.

Die Wahl des Monitoringsystems ist jeweils von der zu untersuchenden Massenbewegung und den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln abhängig. Daher ist es zweckmäßig, am Beginn einer Untersuchung mit günstigen, einfachen Messverfahren erste Ergebnisse zu gewinnen und Interpretationen durchzuführen und auf Grundlage dieser das Messnetzwerk gegebenenfalls anzupassen. Um die gewünschten Daten zu erhalten, ist es erforderlich, bereits zu Beginn der Überwachung die Ziele der Untersuchung und die benötigten Messgenauigkeiten festzulegen. Die grundsätzlichen Anforderungen an Messsysteme und Sensoren wurden von Fecker (1997) folgendermaßen festgelegt: Monitoringsysteme müssen einfach und robust sein, eine Kontrolle der Messdaten und eine rasche Messung zulassen und eine sofortige Interpretation der Daten ermöglichen. Für die schnelle Interpretation und für Plausibilitätsüberprüfungen sind grafische Auswertungen erforderlich, da Trends und Ausreißer leichter und schneller erkannt werden können. Wird die Festlegung von Alarmwerten für ein Frühwarnsystem gewünscht, ist eine Messreihe von mindestens einem Jahr erforderlich. Dies ist notwendig, da die Witterung großen Einfluss auf Massenbewegungen und die Genauigkeit von Messungen hat. Wie Datenauswertungen an mehreren Beispielen gezeigt haben, ist die in der Praxis auftretende, maximale Abweichung von der Mittellage ein Mehrfaches der von den Herstellern angegebenen Messgenauigkeiten.

Abschließend ist festzuhalten, dass ohne ein ausreichendes Monitoring weder gesicherte Aussagen über den Bewegungsmechanismus und die Eintrittswahrscheinlichkeit getroffen werden noch Zukunftsprognosen erstellt werden können. Außerdem wird nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei jeder Massenbewegung um ein singuläres Ereignis handelt, auf das ein Monitoringnetzwerk abgestimmt werden muss.

10. Verzeichnisse

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 1 (nach: Poisel & Preh, 2004).....	10
Abb. 2-2: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 2 (nach: Poisel & Preh, 2004).....	11
Abb. 2-3: Ablöse- und Versagensmechanismen im Lockergestein (nach: Hofmann & Poisel, 2010).....	14
Abb. 4-1: Folge einer nicht sofort durchgeführten Nullmessung nach einer Seilverlängerung.....	20
Abb. 4-2: Übersicht der im Abschnitt 5 erläuterten Monitoringsysteme und Sensoren (nach: Kuntsche, 2000).....	22
Abb. 5-1: Aufbau eines Widerstandsthermometers (aus: Fecker, 1997).....	23
Abb. 5-2: Schema Thermoelement (aus: Luftt, 2011).....	24
Abb. 5-3: Messwaage (aus: Ott, 2011).....	25
Abb. 5-4: Wippprinzip (aus: FH-Offenburg, 2011).....	25
Abb. 5-5: optischer Lasersensor (aus: Ott, 2011).....	25
Abb. 5-6: Messwehr und Venturikanal (aus: Blöschl, 2008).....	26
Abb. 5-7: Crackmeter (aus: Terrapac, 2011).....	27
Abb. 5-8: Messanordnung 2-D Verschiebungen (aus: Zangerl et al., 2008).....	28
Abb. 5-9: Ablesung mit Messuhr (aus: Geodata, 2011).....	29
Abb. 5-10: Fissurometer mit Wegaufnehmer (aus: Geodata, 2011).....	29
Abb. 5-11: Drahtextensometer (aus: GeoMessTec, 2011).....	30
Abb. 5-12: Schutzrohr (aus: GeoMessTec, 2011).....	30
Abb. 5-13: Fest installierter Laserdistanzer (aus: Blikra, 2008).....	31
Abb. 5-14: Beheizbarer Reflektor (aus: Blikra, 2008).....	31
Abb. 5-15: Geometrisches Nivellement (aus: Egger et al., 1995).....	32
Abb. 5-16: Trigonometrisches Nivellement (aus: Egger et al., 1995).....	32
Abb. 5-17: Schlauchwaage (aus: Thierbach, 1979).....	33
Abb. 5-18: Schema hydrostatisches Drucksystem (aus: Meier et al., 1998).....	33
Abb. 5-19: Elektrolytische Flüssigkeitslibelle (aus: Schweizer Talsperrenkomitee, 2005).....	35
Abb. 5-20: Elektrisches Tiltmeter (2-axiale Messung) (aus: Schweizer Talsperrenkomitee, 2005).....	35

Abb. 5-21: trigonometrische Höhenmessung (nach: Witt, 2008).....	37
Abb. 5-22: Leica Totalstation TPS 1200+ (aus: Leica-Geosystems, 2011).....	37
Abb. 5-23: Verschiebungen (dV) der Punkte 3, 4, 5, 12, 28, 31 von 01.06.02 bis 01.01.2005.....	38
Abb. 5-24: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 28.....	39
Abb. 5-25: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 12.....	39
Abb. 5-26: Auswertung der Theodolit – Messabweichung (dV) des Punktes 4.....	40
Abb. 5-27: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 3.....	41
Abb. 5-28: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 3.....	41
Abb. 5-29: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 4.....	42
Abb. 5-30: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 4.....	42
Abb. 5-31: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 5.....	43
Abb. 5-32: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 5	43
Abb. 5-33: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 31.....	44
Abb. 5-34: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 31	44
Abb. 5-35: Auswertung der Theodolit - Lageabweichung des Punktes 104.....	45
Abb. 5-36: Auswertung der Theodolit - Höhenabweichung des Punktes 104.....	45
Abb. 5-37: Prinzip differenziertes GPS (aus: Mansfeld, 2010).....	47
Abb. 5-38: Leica GPS-Antenne (aus: Leica-Geosystems, 2011).....	47
Abb. 5-39: Extensometervarianten (aus: gif-ettlingen, 2011).....	48
Abb. 5-40: Inklinometerausrüstung und Messprinzip (aus: Witt, 2008).....	50
Abb. 5-41: Auswertungsdiagramm (aus: Adam et al., 2009).....	50
Abb. 5-42: Messprinzip TDR-Methode (aus: Singer & Thuro, 2007).....	51
Abb. 5-43: Wasserstandsbeobachtung im Pegelrohr ohne und mit begrenztem Horizont (aus: gif-ettlingen, 2011).....	52
Abb. 5-44: Funktionsweise Porenwasserdruckgeber (aus: GeoDZ, 2011).....	53
Abb. 5-45: Schema einer Druckmessdose (aus: GLÖTZL, 2008).....	54
Abb. 5-46: Schema hydraulischer Ankerkraftgeber (aus: Geodata, 2011).....	55
Abb. 5-47 : Aufbau eines Geophons, Typ SM4 (aus: Knödel et al., 2005).....	56
Abb. 5-48: Prinzip ALS (aus: LAIV-MV, 2011).....	58
Abb. 5-49: DSM (oben), DTM (unten) (aus: AVT-ZT, 2011).....	58
Abb. 5-50: Längenmessung mittels Radar (Aknes) (aus: ISPAS, 2011).....	59

Abb. 5-51: bew. terrestrischer Radar auf Balken (aus: IDSCOMPANY, 2011).....	59
Abb. 5-52: Prinzip der systematischen Landschaftsaufnahme (aus: GEOdynamics, 2011)..	61
Abb. 5-53: Längenänderungen des Seils 10 (2001-2003).....	64
Abb. 5-54: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (01.07.03 – 29.12.03).....	65
Abb. 5-55: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (30.12.01 – 01.07.03).....	66
Abb. 5-56: Maximale Abweichung der Messergebnisse von der Trendlinie (20.12.01 – 21.06.02).....	67
Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Messergebnisse einer Inklinometerbohrung mit zwei unterschiedlichen Maßstäben: A) Darstellung mit "scheinbarer" Bewegung B) Darstellung mit realistischem Maßstab "ohne" Bewegung (aus: Fecker, 1997).....	68
Abb. 6-2: Korrelation Extensometer - Niederschlag (aus: Moser et al., 2002).....	69
Abb. 6-3: Geologisch-geotechnisches Modell (Steinbergkogel-Scholle) (aus: Moser et al., 2002).....	70
Abb. 6-4: Messergebnis Inklinometer (aus: Willenberg et al., 2002).....	71
Abb. 6-5: Typ A (nach: Keusen, 1998).....	73
Abb. 6-6: Typ B (nach: Keusen, 1998).....	73
Abb. 6-7: Typ C (nach: Keusen, 1998).....	73
Abb. 6-8: Gefahrenstufen mit Schwellenwerten am Beispiel Aknes (N) (aus: Blikra, 2008).....	74
Abb. 8-1: Anordnung der Messsensoren u. -systeme am Beispiel Aknes (nach: Kveldsvik, 2008).....	76
Abb. 8-2: Anordnung der Messsensoren u. -systeme am Beispiel Randa (nach: Willenberg et al., 2002).....	78
Abb. 8-3: Anordnung der Messsysteme im Beispiel der Talsperre Beauregard mit DInSAR - Auswertung (nach: Barla, 2010).....	80
Abb. 8-4: Bewegungszonen im Gschlifgraben 2007/2008 (nach: Supper et al., 2010).....	82
Abb. 8-5: Anordnung der für die Auswertung verwendeten Punkte (nach: Gruber et al., 2008).....	83
Abb. 8-6: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes S33.....	84
Abb. 8-7: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes S33.....	84
Abb. 8-8: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N34.....	85
Abb. 8-9: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N34.....	85

Abb. 8-10: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N124.....	86
Abb. 8-11: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N124.....	86
Abb. 8-12: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N134.....	87
Abb. 8-13: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N134.....	87
Abb. 8-14: Auswertung der GPS-Lageabweichung des Punktes N152.....	88
Abb. 8-15: Auswertung der GPS-Höhenabweichung des Punktes N152.....	88
Abb. 8-16: Aktivitätszonen und Anordnung der Messpunkte und Seilextensometer (nach: Gillarduzzi, 2003).....	91
Abb. 8-17: Verlängerung des Seils 2 (nach: Poisel, 2010).....	92
Abb. 8-18: Verlängerung des Seils 10 (nach: Poisel, 2010).....	92
Abb. 8-19: Verlängerung des Seils 10 und Summenlinien der Niederschläge.....	93
Abb. 8-20: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 01.01 und 30.04.....	93
Abb. 8-21: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 01.05 und 31.08.....	94
Abb. 8-22: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Niederschläge zw. 31.08 und 31.12.....	94
Abb. 8-23: Zusammenhang zw. Verschiebungen über 1 Jahr und den Jahresniederschlägen.....	95

10.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Zusammenstellung der Geschwindigkeitsklassen von Massenbewegungen (nach: Cruden & Varnes, 1996).....	8
Tab. 3-1: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren für Massenbewegungen (aus: Dikau et al., 2001).....	18
Tab. 4-1: Faktoren für die Wahl der Ablesungsart.....	21
Tab. 5-1: Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse.....	46
Tab. 5-2: Zusammenfassende Übersicht der Monitoringsysteme und Sensoren.....	61-62
Tab. 5-3: Gegenüberstellung der praktisch erreichbaren Messgenauigkeiten und der Herstellerangaben.....	63
Tab. 8-1: Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse.....	89

10.3 Literaturverzeichnis

ADAM, D. & SZABO, M.: Vorlesungsskript *2.Felsbau*, Stand: 11.2009

ALLIEVI, J.; AMBROSI, M.; CERIANI, M.; COLESANTI, C.; CROSTA, G.; FERRETTI, A. & FOSSATI, D.: *Monitoring slow mass movements with the Permanent Scatterer technique*, In: Proceedings of IGARSS, 2003

ANGERER, H.; KALCHER, T.; KITTL, H.; POISEL, R. & PÖLLINGER, M.: *Prozessanalyse und Risikobeurteilung im Fall der Großhangbewegung Lärchberg – Galgenwald bei Murau (Steiermark)*, Internationales Symposium: Interpraevent 2004 – Riva / Trient

AVT-ZT, 2011: Fa. Vermessung AVT-ZT GmbH: *Vegetationsanalysen*, www.avt.at/de/vermessungswesen/154625/vegetationsanalysen.html, Stand: 03.2011

BARLA, G.: *Long term behaviour of the Beauregard dam (Italy) and its interaction with a deep-seated gravitational slope deformation*, In: 5th Colloquium “Rock Mechanics - Theory and Practice”, 2010

BECKER, L. & HERMANN, S., 2002: *Geologisch – geotechnische Kartierung des Felssturzes Lärchberg – Galgenwald (Murau/Steiermark)*, Unveröffentlichter Bericht: Stadt Murau, 2002

BISHOP, A.W.: *The use of the slip circle in the Stability Analysis of Earth Slopes*, In: Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes, Geotechnique, 1955

BLIKRA, L.: *The Åknes rockslide; monitoring, threshold values and early-warning*, In: Landslides and Engineered Slopes, From the Past to the Future Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 2008

BLÖSCHL, G.: Vorlesungsskript *Ingenieurhydrologie*, Stand: SS 2008

BRÜCKL, E.; BRUNNER, K. & KRAUS, K.: *Kinematics of a deep-seated landslide derived from photometric, GPS and geophysical data*, In: Engineering Geology, 88, 2006

BUNZA, G.; KARL, J.; MANGELSDORF, J. & SIMMERSBACH, P.: *Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde*, In: Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 17, 1982

BUNZA, G.: *Instabile Hangflanken und Ihre Auswirkungen für die Wildbachkunde*, 1992

CAVERS, D.S.: *Simple methods to analyze buckling of rock slopes*, In: Rock Mechanics 14, 1981

- CRUDEN, M. & VARNES J.: *Landslide types and processes*, In: Turner A.K.; Shuster R.L. (eds) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transp Res Board, Spec Rep 247, 1996
- COLESANTI, C.; LOCATELLI, R. & NOVALI, F.: *Ground deformation monitoring exploiting SAR Permanent Scatterers*, In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002
- DIKAU, R.; STÖTTER, J.; WELLMER, F. & DEHN, M.: *Massenbewegungen*, In: *Naturkatastrophen (Ursachen - Auswirkungen - Vorsorge)*, Hrsg.: Plate, J. & Merz, B., 2001
- EGGER, H.; Ettl, H.; GUGGENBERGER, W. & LEXE, E.: *Vermessungskunde*, 1995
- ETH-Z, 2011: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: *Borehole InclinoMeters*, www.rockslide.ethz.ch/Sensors/inclinometer, Stand: 04.2011
- FECKER, E.: *Geotechnische Messgeräte und Felsversuche im Fels*, 1997
- FELLENIUS, W.: *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion*, 1926
- FH-OFFENBURG, 2011: Hochschule Offenburg: *Messwertgeber der Wetterstation*, mv-sirius.fh-offenburg.de/Wetterstation/WetterSensoren_neu.html#Niederschlag, 2011, Stand: 02.2011
- FRÖHLICH, O.K.: *Grundzüge einer Statik der Erdböschungen*, In: *Bauingenieur* 38, 1963
- FUKUZONO, T.: *Recent studies on time prediction of slope failure*, In: *Landslide News* 4, 1990
- GENSKE, D.: *Massenbewegungen*, In: *Grundbuch – Taschenbuch*, Hrsg.: WITT, K., 2008
- GEODATA, 2011: Fa. GEODATA Group:
Datenblatt Hardware Fissurometer, www.geodata.at/deu/_company/download/Fissurometer.pdf, Stand 02.2011
Datenblatt Hardware Ankerlastplatte, http://www.geodata.com/deu/_company/download/Ankerlastplatten.pdf, Stand 02.2011
- GEODYNAMICS, 2011: Fa. GEOdynamics: *Photogrammetrie*, www.geodynamics.de, Stand: 03.2011
- GEODZ, 2011: Das Lexikon der Erde, GeoDataZone: *Porenwasserdruckgeber*, <http://www.geodz.com/deu/d/Porenwasserdruckgeber>, Stand: 04.2011
- GEOMESSTEC, 2011: Fa. GeoMessTec: *Drahtextensometer*, www.geomesstec.de/extenso_d.html, Stand 02.2011

- GIF-ETTLINGEN, 2011: Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker & Partner GmbH,
Extensometer, www.gif-ettlingen.de/pdf/deutsch/Kap._02.4.pdf, Autor: Fecker, E.
(2004), Stand 02.2011
Piezometer, www.gif-ettlingen.de/pdf/deutsch/Kap._05.1.pdf, Autor: Fecker, E.
(2004), Stand 02.2011
- GILLADUZZI, K.: *Ergebnisse der Beobachtung der Großhangbewegung Lärchberg - Galgenwald mittels Servotheodolit*, Unveröffentlichter Bericht: Stadt Murau, 2003
- GLÖTZL, 2008: Fa. GLÖTZL Gesellschaft für Baumeßtechnik mbH: *Druckmessdose*,
www.gloetzl.de/web/index.php?id=99, Stand: 03.2008
- GOODMAN, R.E. & BRAY, J.W.: *Toppling of rock slopes*, In: Proc. Conf. Rock Engineering for foundations and slopes Vol. 2, 1976
- GOODMAN, R.E. & SHI, G.H.: *Block theory and its application to rock engineering*, New Jersey: Prentice Hall (1985)
- GRUBER, H. & MARSCHALLINGER, R.: *Erfassung und raum-zeitliche Interpretation von Hangbewegungen am Beispiel Gschlifgraben*, In: FE - Modellierung, Sturzprozesse und Massenbewegungen, Beiträge zur COG - Fachtagung, 2008
- GUSSMANN, P. & SCHANZ, T.: *Beiträge zur Anwendung der Kern – Erddruck, Grundbruch, Standsicherheit von Böschungen*, Institut für Geotechnik Stuttgart, In: Mitteilung 32, 1990
- HEUNECKE, O.; LINKWITZ, K. & SCHWARZ W.: *Geotechnische Überwachung von geotechnischen Bauwerken*, In: Grundbuch – Taschenbuch, Hrsg.: WITT, K., 2008
- HITTINGER, M.: *Numerical analysis of toppling failures in jointed rock*, Ph.D. thesis University of California, 1978
- HOFMANN R. & POISEL R.: Unveröffentlichter Bericht, 2010
- HUTCHINSON, J.N., BHANDARI, R.K.: *Undrained lading, a fundamental mechanism of mudflows and other mass movements*, In: Geotechnique 21, 1971
- IDSCOMPANY, 2011: Fa. IDS INGEGNERIA DEI SISTEMI: *IBIS-L*,
www.idscopy.com/page.php?f=179&id_div=4, Stand: 04.2011
- INGENSAND, H.: *Einführung in die geodätische Messtechnik*, ETH-Zürich, Band 1 und 2
- ISPAS, 2011: Fa. ISPAS AS: *Rock-slide Radar Monitoring*, www.ispas.no, Stand: 03.2011

- JANBU, N.: *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*, In: Harvard soil mechanics series No. 46, 1954
- KEUSEN, R.: *Warn- und Überwachungssysteme*, In: Frühwarndienste, Stand der Kenntnisse und Anwendungsbeispiele, Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (Fan-Forum, Planat), 1998
- KIEFFER, D.S.: *Rock slumping: A compound failure mode of jointed hard rock slopes*, PhD Dissertation, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., University of California, 1998
- KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H. & LANGE, G.: *Handbuch Zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Band 3, 2005
- KRAUTER, E.: *Marginalsiedlungen und deren Gefährdung durch Rutschungen*, In: Geo-International, 2003
- KUNTSCHE, K.: *Geotechnik, Erkunden - Untersuchen - Berechnen - Messen*, 2000
- KVELDSVI, V.: *Case study: The Åknes rock slope*, (NGI), 2008, irasmos.slf.ch/Presentations/vidar-kveldsvik.pdf, Stand: 04.2011
- LAIV-MV, 2011: Landesamt für innere Verwaltung, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen: *Laserscanning*, www.laiv-mv.de/land-mv/LAiV_prod/LAiV/AfGVK/ATKIS/Digitale_Gelaendemodelle/Laserscanning/index.jsp, Stand: 03.2011
- LATELTIN, O.: *Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*, BRP, BWW, BUWAL, 1997
- LEICA-GEOSYSTEMS, 2011: Fa. Leica:
Leica AR 25, www.leica-geosystems.com/de/Leica-AR25_70988.htm,
Stand: 02.2011
Leica TPS 1200+, www.leica-geosystems.com/de/Leica-TPS1200_4547.htm,
Stand: 02.2011
- LUFFT, 2011: Fa. Lufft: *Messprinzipien und Sensoren zur Temperaturmessung*, www.lufft.com/de/support/temperatur/, Stand: 02.2011
- MANSFELD, W.: *Satellitenortung und Navigation, Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*, 3. Auflage, 2010
- MARSCHALLINGER, R.; EICHKITZ, C.; GRUBER, H. & HEIBL, K.: *The Gschlifgraben Landslide (Austria): A Remediation Approach involving Torrent and Avalanche Control, Geology, Geophysics, Geotechnics and Geoinformatics*, In: Austrian Journal of Earth Sciences, 102(2), 2009

- MEIER, E.; HUGGENBERGER, P. & INGENSAND, H.: *Precision monitoring of displacement over large areas*, Hydropower & Dams, Issue 6, 1998
- MOORE, J.F.A.: *Monitoring building structures*, 1992
- MORGENSTERN, N.: *Stability charts for earth slopes during rapid drawdown*, In: Geotechnique Vol. 13, 1963
- MOSER, M.; LOTTER, M. & MEIER, H.: *Deformationsanalyse felssturzgefährdeter Hangbereiche*, In: Geoforum Tirol, 2002
- OTT, 2011: Fa. Ott: *Niederschlag*, www.ott.com/web/ott_de.nsf/id/pa_produkte_niederschlag.html, Stand: 02.2011
- POISEL, R.: *Großhangbewegung Lärchberg – Galgenwald bei Murau*, Unveröffentlichter Bericht: Stadt Murau, 2010
- POISEL, R. & EPPENSTEINER, W.: *Gang und Gehwerk einer Massenbewegung, Teil 1 Geomechanik des Systems „Hart auf Weich“*, Felsbau 6, 1988
- POISEL, R.; HOFMANN R.; PREH A.; SAUSGRUBER T. & SCHIFFER, M.; A₁.: *Gschlifgraben mud slide (Austria) – bazard valuation and risk mitigation. Natural Hazards*, In Press, 2011
- POISEL, R.; HOFMANN, R.; PREH, A.; SAUSGRUBER, T. & SCHIFFER, M.; B₁.: *Die Lehren aus dem Erdstrom im Gschlifgraben (Österreich)*, Im Druck, 2011
- POISEL, R. & PREH, A.: *Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models*, In: Felsbau 22, Nr. 2, 2004
- PREH, A.: *Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes*, PhD Dissertation, Vienna University of Technology, 2004
- PREH, A. & POISEL, R.: *A UDEC model for "Kink Band Slumping" type failures of rock slopes*, In: Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering and Earth Sciences, 2004
- ROTH M. & BLIKRA, L.: *Seismic monitoring of the unstable rock slope at Aaknes, Norway*, In: Geophysical Research Abstract 11, 2009
- ROUSSEEUW, J.P. & LEROY M.A.: *Robust Regression and Outlier Detection*, 1987
- SAUSGRUBER, J.T.: *Ingenieurgeologische und geotechnische Untersuchungen von Massenbewegungen im Gebiet des Bunzkögeles bei Matrei in Osttirol*, PhD Dissertation, Vienna University of Technology, 2010

- SCHWEIZER TALSPERRENKOMITEE, 2005: Schweizer Talsperrenkomitee (2005):
Messanlagen zur Talsperrenüberwachung,
www.swissdams.ch/monitoring/Messanlagen - Teil_1,
www.swissdams.ch/monitoring/Messanlagen - Teil_2,
www.swissdams.ch/monitoring/Messanlagen - Teil_3, Stand: 03.2011
- SINGER, J. & THURO, K.: *Monitoring mit Time Domain Reflectometry (TDR)*, TU-München, 2007
- SPILLMANN, T.: *Borehole radar experiments and microseismic monitoring on the unstable Randa rockslide*, 2007
- SUPPER, R.; BARO, I.; JOCHUM, B.; ITA, A.; MOTSCHKA, K. & WINKLER E.: *Airborne Geophysics and Geoelectric and Inclino-metric Monitoring at the Gschlifgraben Landslide*, In: Bericht der Geologischen Bundesanstalt, 82, 2010
- TERRAPAC, 2011: Fa. TerraPacific Consulting: *Crack Meter Showing Movement*,
www.terrapac.net/enlargements/instrumentation6.htm, Stand 02.2011
- TERZAGHI, K.: *The mechanism of shear failures on clay slopes and the creep of retaining walls*, In: Public roads 10, (1929)
- THIERBACH, H.: *Hydrostatische Messsysteme - Entwicklungen und Anwendungen*, 1979
- TRIMBLE, 2011: Datenblatt der Firma Trimble für das Gerät, *Trimble 5800 GPS-System*
- VOIGHT, B.: *A relation to describe rate-dependent material failure*, In: Science 243, 1988
- WEIDINGER, J.: *Das Gschlifgraben-Rutschgebiet am Traunsee-Ostufer (Gmunden/OÖ)- Ein Jahrtausende altes Spannungsfeld zwischen Mensch und Natur*, In: Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Band 149, Heft 1, 2009
- WILLENBERG, H.; LADNER, F.; SPILLMANN, T.; LÖW, S.; SAMBETH, U.; EVANS, K. & EBERHARDT, E.: *Aufbau eines Multi-Parameter-Überwachungssystems für Felsrutschungen*, In: Felsbau 20, Nr.3, 2002
- WITT, J.: *Grundbau - Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, Auflage 7, 2008
- WITTKE, W.: *Rock Mechanics*, 1990

ZANGERL, C.; PRAGER, C.; BRANDNER, R.; BRÜCKL, E.; EDER, S.; FELLIN, W.; TENTSCHERT, E.; POSCHER, G. & SCHÖNLAUB, H.: *Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen*, In: Geo.Alp, Vol.5, 2008

ZIENKIEWICZ, O.C.; HUMPHESON, C. & LEWIS, R.W.: *Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics*, In: Geotechnique 25, 1975