



Gerhard Kleemaier, BSc

Untersuchungen von Fehlereinflüssen bei reflektorlosen Überwachungsmessungen von Felswänden

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, welche mich beim erfolgreichen Abschließen dieser Arbeit sowie meines gesamten Studiums unterstützt haben.

Allen voran bedanke ich mich bei meinen Eltern, welche mir das Studium, sowie meine vorangegangene Ausbildung ermöglicht und mich dabei immer unterstützt haben und selbst dafür einiges an Verzicht in Kauf nehmen mussten.

Ein großes Dankeschön gilt natürlich meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Werner Lienhart, welcher mir nicht nur wertvolle Ratschläge, Tipps und Hinweise für einen erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit gegeben hat, sondern auch dafür gesorgt hat, dass mir alle benötigten Ressourcen zur Verfügung gestellt wurden.

In diesem Zusammenhang möchte ich auch mein herzlichstes Dankeschön an die Mitarbeiter des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz aussprechen. Bei Herrn Ing. Lummerstorfer möchte ich mich hierbei besonders bedanken, der mir nicht nur mit seinem technischen Know-How bei der Bereitstellung und Vorbereitung verschiedener Tests unterstützt sondern mich auch bei meiner mehrtägigen Messkampagne im Jänner 2015 begleitet hat. Auch den Herren Dipl.-Ing. Matthias Ehrhart und Dipl.-Ing. Stefan Lackner gilt mein Dank für zahlreiche Tipps zu den verschiedensten Thematiken der Totalstation.

Auch bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Alexander Trefalt, von der Firma Vermessung AVT ZT-GmbH, für die Unterstützung und Bereitstellung einer Vielzahl an Unterlagen und Informationen rund um die Überwachungsmessung „Biratalwand“ im Jahr 2012.

Ebenso gilt mein Dank dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Wieser für die Bereitstellung seiner Auswertung und weiteren Informationen bzgl. der reflektorlosen Distanzmessungen der Überwachungsmessung „Biratalwand“.

Abschließend möchte ich mich noch bei der Firma Leica Geosystems AG bedanken, welche mir die Software Leica GeoMoS zur Verfügung gestellt hat, sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Johannes Wöllner, der mir die Funktionsweise dieser Software bis ins Detail erläutert hat.

Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird das Fehlerverhalten reflektorloser Überwachungsmessungen an natürlichen Oberflächen, wie Felswänden, am Beispiel des Monitorings „Biratalwand“ in Dürnstein bei Krems, Niederösterreich, analysiert.

Ziel ist es, mögliche Fehlerquellen reflektorloser Punktbeobachtung nicht nur zu detektieren, sondern auch ihre Auswirkung zu untersuchen, da sich bestimmte Einflussgrößen teilweise in unterschiedlicher Form und Größe als bei konventionellen Überwachungsmessungen zu stabilisierten Reflektoren auswirken können.

Bekannte Faktoren, wie Meteorologie, Refraktion und temperaturbedingtes Verhalten des Messinstruments werden daher unter dem Aspekt des reflektorlosen Monitorings näher betrachtet.

Ausgehend von den aufgetretenen Messeffekten, welche während der einjährigen Überwachungsmessung an der Felswand „Biratalwand“ aufgetreten sind, werden mögliche Einflussgrößen untersucht und analysiert. In dem aufgezeichneten Datensatz der Firma Vermessung AVT ZT-GmbH, welche das Monitoring 2012 durchgeführt hat, sind, unter anderem, zyklische Variationen in einzelnen Messdaten in Form eines Tagesganges ersichtlich. Diese Variationen sind bei stabilisierten Punkten jedoch nicht aufgetreten. Aufgrund der detektierten Variationen werden die umweltbedingten Einflüsse der Atmosphäre, welche sich auf Instrument, Messstrahl, Standpunkt und Objekt auswirken können, als Grundhypothese für die Effekte herangezogen. Neben den direkten Einflussgrößen ist es auch notwendig die Messkonfiguration bzw. die Steuer- und Auswertesoftware zu betrachten, um die Auswirkung etwaiger Fehlerquellen auf die einzelnen Messdaten und so auf das Resultat zu eruieren.

Abstract

In this master thesis the error analysis of reflectorless observation measurements on natural objects, with a special focus on rock faces, is discussed. The analysis is based on a deformation measurement carried out at the “Biratalwand” in Lower Austria.

The objective of this work is to detect and analyze the impacts of certain sources of error in prismless distance measurements. This is important as some influence quantities are strongly differing to measurements with stabilized observation points.

Therefore, well known factors, like meteorology, refraction and temperature-depending behaviors of measuring units are considered under the aspect of reflectorless monitoring. Basis of this work is a one-year monitoring campaign of the “Biratalwand”, carried out by “Vermessung AVT ZT-GmbH” in 2012. During this campaign unexpected measuring effects, as cyclic variations with a period of about 24 hours, occurred. Those effects, however, do not appear during measurements to stabilize points and are therefore examined and analyzed in the course of this work.

Because of the observed daily periods, environmental impacts of the surrounding atmosphere, which have an influence on the measuring instrument, the location respectively the pillar, the measuring beam as well as the object, are considered as main impact.

In order to analyze all effects on the results, not only direct influences but also the measurement configuration as well the executing software are part of the investigations.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	viii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Überwachung der Felswand „Biratalwand“.....	1
1.3 Untersuchungen ETH Zürich.....	3
2 Ausgangssituation.....	6
2.1 Aufnahmekonfiguration.....	6
2.2 Steuer- und Auswertesoftware „Leica GeoMoS“.....	10
2.2.1 Definitionen / Begriffe.....	10
2.2.2 Ablauf Messzyklus.....	12
3 Datenanalyse.....	17
3.1 Effekte: nördlicher Standpunkt 2010.....	18
3.1.1 Reflektorlose Messpunkte.....	18
3.1.2 Stabilisierte Messpunkte.....	26
3.2 Effekte: südlicher Standpunkt 1000.....	29
3.2.1 Reflektorlose Messpunkte.....	29
3.2.2 Stabilisierte Messpunkte.....	36
3.3 Überblick: Datenanalyse.....	39
4 Theoretische Untersuchungen.....	41
4.1 Grundhypothese.....	41
4.2 Atmosphärischer Einfluss / Refraktion.....	42
4.2.1 Auswirkung der Temperaturvariationen auf die Distanzmessung.....	44
4.2.2 Auswirkung der Variation des Temperaturgradienten auf die Distanzmessung.....	46
4.3 Stehachsschiefe.....	51
4.3.1 Korrektur der Stehachsschiefe.....	51
4.3.2 Auswirkung einer temperaturbedingten Neigungsdrift auf die Distanzmessung.....	53
4.4 Pfeilerbewegung.....	56
4.4.1 Auswirkungen temperaturbedingter Pfeilerbewegungen.....	56
4.5 Objekteigenschaft.....	58
4.6 Überblick: Theoretische Untersuchungen.....	59
5 Praktische Untersuchungen.....	61
5.1 Konzept Messprogramm.....	61

5.2	Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“	62
5.2.1	Testsetup	63
5.3	Messkampagne „Biratalwand“	64
5.3.1	Profilmessung	65
5.3.2	24h-Monitoring	67
6	Ergebnisse.....	68
6.1	Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“.....	68
6.2	Messkampagne „Biratalwand“	70
6.2.1	24h-Monitoring	70
6.2.2	Profilmessung	72
6.2.2.1	Punkt 54114.....	72
6.2.2.2	Punkt 54231.....	78
6.3	Überblick: Ergebnisse	82
7	Resümee und Ausblick	84
	Literaturverzeichnis.....	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Lage Biratalwand (Hintergrundfoto: [Google Earth(2015)]).....	2
Abbildung 1-2: Änderung der Ost-Koordinate ausgewählter reflektorloser Punkte [ETH Zürich (2013)]	4
Abbildung 1-3: Vergleich der Änderungen der Ost-Koordinate von stabilisierten und berührungslos gemessenen Punkt [ETH Zürich (2013)]	4
Abbildung 1-4: Tägliche Variationen reflektorlos gemessener Punkte (Block 55) [ETH Zürich (2013)]..	5
Abbildung 2-1: südlicher Pfeiler 1000 (Totalstation befindet sich unter dem Witterungsschutz (d)) mit WebCam (a), Recheneinheit (b) und Meteorologie -Sensor (c) [AVT (2012)].....	6
Abbildung 2-2: Aufnahmekonfiguration Monitoring Biratalwand (schematisch) [Hintergrundbild: Atlas NÖ (2014)].....	7
Abbildung 2-3: Schematische Lagedarstellung von einigen Überwachungspunkten und Bereichen (Blöcke) der reflektorlos beobachteten Punkte (links: nördl. Kontrollbereich; rechts: Gefahrenbereich; Aufnahme: 20.12.2011) [AVT (2012)]	8
Abbildung 2-4: südlicher Pfeiler mit Witterungsschutz und geschlitzter Schutzverkleidung Standpunkt: 1000 [AVT (2012)]	9
Abbildung 2-5: nördlicher Pfeiler in gelber Holzverbauung Standpunkt 2010 [AVT (2012)]	9
Abbildung 2-6: Verspeicherte Koordinatenarten eines stabilisierten (Nr.: 435) und eines reflektorlos beobachteten (Nr.:51112) Ziels in der Software Leica GeoMoS.....	12
Abbildung 2-7: Schematischer Ablauf eines Messdurchganges in Leica GeoMoS [Leica (2015)]	12
Abbildung 2-8: "Rohdaten" vom Messinstrument des stabilisierten Punktes 204.....	13
Abbildung 2-9: Ausgewählte Kontrollpunkte zur Bestimmung der Korrekturparametern am Standpunkt 1000	14
Abbildung 2-10: Korrekturwerte im Juli 2012 für den Standpunkt 2010 in Leica GeoMoS	14
Abbildung 2-11: Korrigierte Messdaten des Punktes 204 in Leica GeoMoS	15
Abbildung 2-12: Berechnete Koordinaten des Punktes 204 in Leica GeoMoS	16
Abbildung 3-1: RL-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 2010	18
Abbildung 3-2: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012.....	19
Abbildung 3-3: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012.....	20
Abbildung 3-4: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012	20
Abbildung 3-5: RL-Punkt 54215: Änderungen der Neigungskompensatormessungen - April-Juli.....	21
Abbildung 3-6: RL-Punkt 54215: Vertikalwinkelvariationen (korrigierte Messdaten) Februar-Juli	21
Abbildung 3-7: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Februar 2012	22
Abbildung 3-8: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen April 2012....	23
Abbildung 3-9: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Juli 2012.....	23
Abbildung 3-10: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Februar 2012.....	24
Abbildung 3-11: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen April 2012	25
Abbildung 3-12: RL-Punkt 54216: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Juli 2012	25
Abbildung 3-13: RL-Punkte: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen (Standpunkt 2010) - Juli 2012	26
Abbildung 3-14: IR-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 2010.....	27
Abbildung 3-15: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012	27
Abbildung 3-16: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012	28

Abbildung 3-17: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012 29

Abbildung 3-18: RL-Distanzwertvariationen Standpunkt 1000..... 30

Abbildung 3-19: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012..... 30

Abbildung 3-20: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012..... 31

Abbildung 3-21: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012 32

Abbildung 3-22: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Februar 2012 32

Abbildung 3-23: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen April 2012.. 33

Abbildung 3-24: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Juli 2012 33

Abbildung 3-25: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Februar 2012..... 34

Abbildung 3-26: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen April 2012 35

Abbildung 3-27: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Juli 2012 35

Abbildung 3-28: RL-Punkte: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen (Standpunkt 1000) - Februar 2012..... 36

Abbildung 3-29: IR-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 1000 37

Abbildung 3-30: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012 38

Abbildung 3-31: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012 38

Abbildung 3-32: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012 39

Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Kategorien der Umwelteinflüsse 41

Abbildung 4-2: Refraktionseinfluss auf die Winkelmessung nach [WILLIAMS D. C., KAHMEN H. (1984) S.11]..... 44

Abbildung 4-3: Auswirkung der Meteorologie auf die Distanzmessung..... 45

Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Auswirkung von Temperaturgradienten auf die Vertikalwinkelmessung 46

Abbildung 4-5: Schematische Darstellung der Auswirkung vertikaler Refraktion auf die Zenitdistanzmessung auf Prismen..... 47

Abbildung 4-6: Spannweiten vom 19.07.2012 der Vertikalwinkelvariationen vom Standpunkt 2010. 48

Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Auswirkung vertikaler Refraktion auf die Zenitdistanzmessung auf reflektorlose Ziele 49

Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Berechnung refraktionsbedingter Schrägdistanzvariationen 49

Abbildung 4-9: Auswirkung der Refraktion auf die Distanzmessung (Standpunkt 2010)..... 50

Abbildung 4-10: Auswirkung der Refraktion auf die Distanzmessung (Standpunkt 1000)..... 51

Abbildung 4-11: Auswirkung einer nicht berücksichtigten Längsneigung "n_z" auf die Vertikalwinkelmessung "V" 52

Abbildung 4-12: Leica Nova MS50 in der Klimakammer mit zwei PT100 Temperatursensoren 53

Abbildung 4-13: Drift des Neigungssensors (n_z: longitudinal; n_k: transversal) aufgrund der Umgebungstemperaturänderung 54

Abbildung 4-14: Auswirkung einer temperaturabhängigen Drift der Längsneigung auf die Distanzmessung..... 55

Abbildung 4-15: Maße Pfeiler [mm]..... 56

Abbildung 4-16: Biegelinie infolge von Temperaturbelastung [Balke (2014), S: 114-115]..... 57

Abbildung 4-17: Relative Lageänderung Freie Stationierungen (April 2012) aufgrund von Pfeilerbewegung [AVT (2012)] 57

Abbildung 4-18: Koaxiales Foto des reflektorlosen Punktes 51114..... 58

Abbildung 5-1: Einzelne Module des Monitoringprogramms 61

Abbildung 5-2: Schematischer Ablauf eines Messdurchgangs..... 62

Abbildung 5-3: Testsetup am Prüffeld "Dach Steyrergasse 30" - Aufbau 63

Abbildung 5-4: Testsetup Prüffeld "Dach Steyrergasse 30" – Aufnahmekonfiguration
(Hintergrundbild: [GIS STEIERMARK (2015)]) 63

Abbildung 5-5: Testsetup Prüffeld "Dach Steyrergasse 30": Radiator 64

Abbildung 5-6: Aufbau Profilmessung Standpunkt 1000 65

Abbildung 5-7: Darstellung Profilmessung vom Standpunkt 1000 66

Abbildung 5-8: Ausgewählter Felsblock 43 (links: Blick von Standpunkt 2010; rechts: Blick von
Standpunkt 1000)..... 66

Abbildung 5-9: Leica Nova MS50 am Pfeiler 1000 mit nachgebautem Witterungsschutz 67

Abbildung 6-1: Beobachtete Punkte der Messungen Prüffeld "Dach Steyrergasse 30" 68

Abbildung 6-2: Variationen der Messdaten des stabilisierten Punktes 51 und reflektorlosen Ziels 52 68

Abbildung 6-3: Ergebnisse des "Umgebungsscans" der Zielmarke 52 am Prüffeld "Dach Steyrergasse
30" 69

Abbildung 6-4: Zusätzlich aufgezeichnete Daten – Messkampagne „Biratalwand“ – Standpunkt 1000
..... 70

Abbildung 6-5: Ergebnisse 24h-Monitoring - Messkampagne "Biratalwand" - Standpunkt 1000..... 71

Abbildung 6-6: Ergebnisse 24h-Monitoring - Messkampagne "Biratalwand" - Standpunkt 2010..... 72

Abbildung 6-7: RL-54114: Distanzvariationen der Profilmessung..... 72

Abbildung 6-8: RL-54114: Gegenüberstellung ΔSD vs. ΔV der Profilmessung 73

Abbildung 6-9: RL-54114: Modellierung der Distanzvariationen aus der Beziehung ΔV zu ΔSD aus der
Profilmessung..... 74

Abbildung 6-10: Fotoaufnahmen des Punktes-54114 auf "Felsblock 43" - Blick vom südlichen
Standpunkt 1000 74

Abbildung 6-11: RL 54114 - 3D Darstellung der Profilmessung 2015 75

Abbildung 6-12: RL 54114: Vergleich der Profilmessung mit den Fotoaufnahmen 76

Abbildung 6-13: RL 54114: Modell der Distanzwertvariationen (ΔSD) aus den Messdatenänderungen
(ΔHz und ΔV) 2012 76

Abbildung 6-14: Schematische Darstellung der quadratischen Distanzänderungen..... 77

Abbildung 6-15: RL-54231: Distanzvariationen der Profilmessung..... 78

Abbildung 6-16: RL-54231: Gegenüberstellung ΔSD vs. ΔV der Profilmessung 79

Abbildung 6-17: RL-54231: Modellierung der Distanzvariationen aus der Beziehung ΔV zu ΔSD aus der
Profilmessung..... 79

Abbildung 6-18: Fotoaufnahmen des Punktes-54231 auf "Felsblock 43" - Blick vom nördlichen
Standpunkt 2010 80

Abbildung 6-19: RL 54231 - 3D Darstellung der Profilmessung 2015 80

Abbildung 6-20: RL 54231: Vergleich der Profilmessung mit dem Fotoaufnahmen 81

Abbildung 6-21: RL 54231: Modell der Distanzwertvariationen (ΔSD) aus den Messdatenänderungen
(ΔHz und ΔV) 2012 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Eigenschaften einiger Punktgruppen in Leica GeoMoS [Leica (2010): Leica GeoMoS Manual S: 232 -237]	11
Tabelle 2-2: Koordinatentypen in Leica GeoMoS [Leica (2010). Leica GeoMoS Manual S: 504]	11
Tabelle 2-3: Ausgewählte Kontrollpunkte zur Bestimmung der Korrekturparameter.....	13
Tabelle 3-1: chronologische Auflistung nennenswerter Ereignisse Standpunkt 1000 [AVT(2012)]	17
Tabelle 3-2: chronologische Auflistung ausgewählter Ereignisse Standpunkt 2010 [AVT(2012)]	17
Tabelle 3-3: Effekte Standpunkt 2010	39
Tabelle 3-4: Effekte Standpunkt 1000	40
Tabelle 4-1: Parameter der approximierten Neigungsdrift aufgrund von Temperaturänderungen	54
Tabelle 4-2: Überblick der theoretischen Untersuchungen	59
Tabelle 6-1: Geschätzte Parameter der Distanzwertmodellierung (RL-54114)	77
Tabelle 6-2: Geschätzte Parameter der Distanzwertmodellierung (RL-54231)	82

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Deformationsmessung stellt ein Kerngebiet der Ingenieurgeodäsie dar. Sie bezeichnet die Überwachung bzw. das Monitoring von natürlichen und künstlichen Objekten. Durch die Detektion von Bewegungen bzw. Änderungen des beobachteten Objekts kann das weitere Verhalten prädiziert werden. Damit wird es möglich weitere, vor allem sicherheitstechnische, Fragen in Bezug auf die Umgebung des untersuchten Gegenstandes zu beantworten.

Der Einsatz moderner Messinstrumente und Technologien erlaubt es in diesem Bereich immer wieder neue Beobachtungsgrößen auf verschiedenste Weisen zu ermitteln und zu analysieren. Ebenso ist es durch die Verwendung moderner Totalstationen möglich geworden natürliche Objekte, wie z.B. Felswände, reflektorlos zu überwachen. Dies ermöglicht den Verzicht auf teilweise aufwändige, kostenintensive und manchmal gefährliche Installationen von stabilisierten Punkten (Prismen). Darüber hinaus können unzugängliche Bereiche direkt und mit einer größeren Anzahl von Punkten überwacht werden.

Durch die Erhöhung der Messgenauigkeiten der Instrumente treten jedoch ebenso verschiedene, das Ergebnis beeinflussende Faktoren in den Vordergrund. Diese Störeinflüsse wirken sich nun signifikant auf das Resultat aus. Um die theoretisch möglichen Genauigkeiten der Messinstrumente zu erreichen, gilt es, diese Einflussgrößen bei der Überwachung entsprechend zu berücksichtigen.

Ein von der Firma „Vermessung AVT ZT-GmbH“, durchgeführtes Langzeit-Monitoring der Felswand „Biratalwand“ bei Dürnstein, Niederösterreich, zeigt die Komplexität dieser Aufgabe. Die Überwachung ausgewählter reflektorloser Punkte wies unbekannte, jedoch signifikante Variationen der Distanzwerte auf. Aufgrund dieser Ereignisse war es nicht möglich, allein durch reflektorlose Überwachungsmessungen eine zuverlässige Aussage über das Verhalten der Felswand zu treffen.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es nun die Ursachen und Gründe für diese Änderungen der Distanzwerte zu untersuchen und auf Fehlerquellen aufmerksam zu machen, damit diese bei zukünftigen Überwachungsaufgaben entsprechend berücksichtigt werden können. Dadurch soll es möglich werden, Monitoringaufgaben zukünftig ohne aufwändige und kostenintensive Installationen von Prismen in Gefahrenbereichen, an schwer zugänglichen Stellen, etc. zuverlässig durchzuführen.

1.2 Überwachung der Felswand „Biratalwand“

Die Felswand „Biratalwand“ liegt an der Donau, nördlich der Ortschaft Dürnstein in der Wachau, Niederösterreich (siehe Abbildung 1-1). Diese ungefähr 100 Meter hohe, senkrechte bis überhängende, westlich exponierte Felswand besteht aus feinkörnigem Gneis (Gföhler Gneis/Böhmische Masse) und ist seit einer groß angelegten Sprengung im Jahr 1909 immer wieder Schauplatz von Felsstürzen. Die Ursachen für die Felsstürze sind einerseits auf natürliche Faktoren, andererseits aber auch durch Eingriffe des Menschen zurückzuführen [Müllegger M. (2013)].

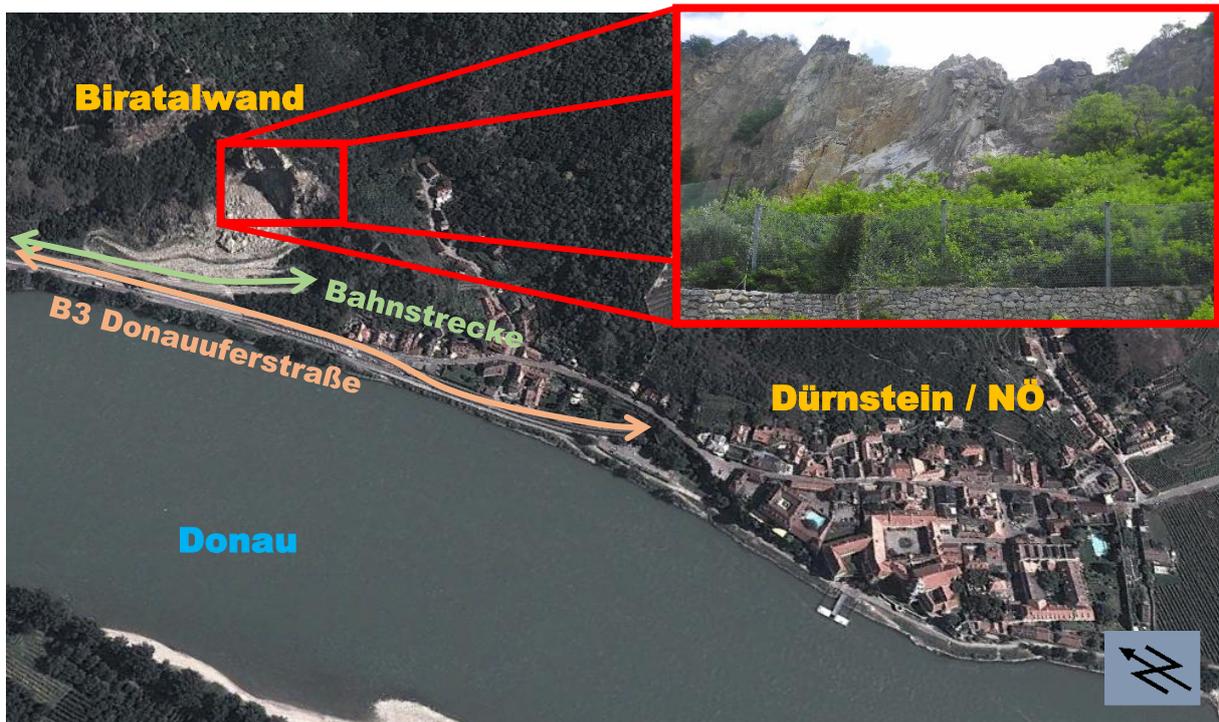


Abbildung 1-1: Lage Biratalwand (Hintergrundfoto: [Google Earth(2015)])

Zum einen verläuft im Süden der Felswand eine NO-SW streichende Störungszone („Diendorfer Störung“). Durch ein weiteres Großstörungssystem, welches NO-SO streicht, entsteht ein Trennflächengefüge, welches sich auch auf den Bereich der Biratalwand ausdehnt. Durch ungünstig verlaufende Trennflächen sowie einen lockeren Gebirgsverband wird so ein Blockgleiten von Felsabschnitten begünstigt.

Zum anderen wurde die starke Auflockerung sowie die ungünstige Form der Felswand durch einen bis 1903 betriebenen Steinbruch verursacht. Nach den ersten Sprengarbeiten im Jahr 1909, welche im Zuge der Errichtung der Lokalbahn Krems-Grein durchgeführt wurden, wurde der Felsverband abermals aufgelockert, bestehende Trennflächen aufgeweitet und neue Risse erzeugt. Aus diesen Gründen fanden fortlaufend Felsstürze, großteils nach stärkeren Regenfällen, im Bereich der Biratalwand statt. [Müllegger M. (2013)].

Aufgrund des Verlaufs der Bundesstraße „B3 Donauuferstraße“ sowie der Bahnstrecke „Krems-Grein“ birgt diese Konstellation ein natürliches Gefahrenpotential. Nach einem größeren Felsabsturz im Jahr 2009 wurden daraufhin ein Steinschlagschutzdamm, ein Sturzraum sowie Steinschlagschutznetze errichtet um einen sicheren Betrieb der Bahnstrecke sowie der Bundesstraße zu gewährleisten [Müllegger M. et al (2011)].

Nach dem vorläufig letzten dokumentierten Felssturz 2011 mussten diese Sicherheitsvorkehrungen (z.B. Ausräumen des Sturzraumes) wiedererrichtet werden. Dafür schrieb das zuständige Arbeitsinspektorat aus arbeitsschutztechnischen Gründen eine permanente Überwachung mit zugehörigem Alarmsystem vor, um weitere Bewegungen der Felswand bzw. einzelner Felsblöcke umgehend feststellen zu können [AVT (2011)].

Diese Überwachung der Felswand „Biratalwand“ fand im Zeitraum vom 19.12.2011 (Aufbau Monitoringsystem) bis zum 14.11.2012 (Abbau Monitoringsystem) statt und wurde von dem Vermessungsunternehmen „Vermessung AVT ZT-GmbH“ durchgeführt. Das Projekt wurde ursprünglich für eine Dauer von ca. 6 Wochen geplant, durch Verzögerungen dehnte sich schrittweise (Verlängerungen jeweils nur um ein paar Wochen) die Überwachung jedoch auf

ungefähr 10 Monate aus. Dies stellte das Equipment, welches anfänglich nicht auf eine solche Dauer ausgelegt war, vor eine große Herausforderung. Das Monitoring-System sollte auf Basis geodätischer Messinstrumente aufgebaut sein. Beobachtet wurden dabei sowohl stabilisierte Punkte (mittels Bohrungen und Dübel verankerte Prismen) als auch berührungslos gemessene Punkte, welche über ein im Vorhinein definiertes Raster über die Felswand verteilt sind. Durch die Definition von bestimmten Toleranzwerten sollten Warnmeldungen automatisiert erfolgen.

Durch die unterschiedlichen Punktgruppen (stabilisiert / berührungslos) wurden unterschiedliche Genauigkeitsgruppen und Toleranzwerte bestimmt. Der Gefahrenbereich der Felswand wurde dabei vorwiegend mit berührungslos gemessenen Punkten und zusätzlich mit 16 stabilisierten Prismenpunkten (Planung Phase 1) überwacht.

Während einer ersten „Einlernphase“ wurden die Messergebnisse zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten sowie der temperaturbedingte Tagesgang der Felswand und der Refraktionseinfluss eingeschätzt werden.

Hierbei wurden für die stabilisierten Punkte einfache Standardabweichungen der drei Koordinatenrichtungen < 1.5 mm ermittelt, während bei den berührungslos beobachteten Punkten einfache Standardabweichungen in Visurrichtung < 3 mm bestimmt wurden.

Nach einer Sprengung, welche das Ausräumen des Sturzraumes ermöglichte, gingen einige Punkte verloren. Aus diesem Grund wurden 37 weitere Prismen im Gefahrenbereich gesetzt. Diese konnten aufgrund der, durch die Sprengung, erhöhten Sicherheit im Bereich der Felswand durchgeführt werden. Da nun ausreichend stabilisierte Punkte zur Deformationsanalyse vorhanden waren, wurde auf eine weitere Aufzeichnung der reflektorlosen Punkte zu Analyse- und Alarmierungszwecke verzichtet [AVT (2012)].

1.3 Untersuchungen ETH Zürich

Wegen der aufgetretenen Systematiken der Distanzwertänderung der berührungslos gemessenen Punkte wurden in weiterer Folge erste Untersuchungen von der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich durchgeführt. Die Monitoringdaten wurden von Prof. Dr. Andreas Wieser untersucht. Analysiert wurden dabei ausschließlich die von der verwendeten Überwachungssoftware „Leica GeoMoS Monitor“ errechneten Punktkoordinaten der Beobachtungspunkte.

Dabei wurden folgende Erkenntnisse in Bezug auf die Distanzwertänderungen gewonnen:

- a) Die Änderung der Distanzwerte besitzt eine Systematik und zeigt kein höheres Rauschen. Diese zyklischen Variationen weisen Amplituden bis zu 1,5 cm und eine Periodendauer von ungefähr 24 Stunden auf (siehe Abbildung 1-2). Die Amplituden untereinander weisen jedoch signifikante Unterschiede in der Größe auf.

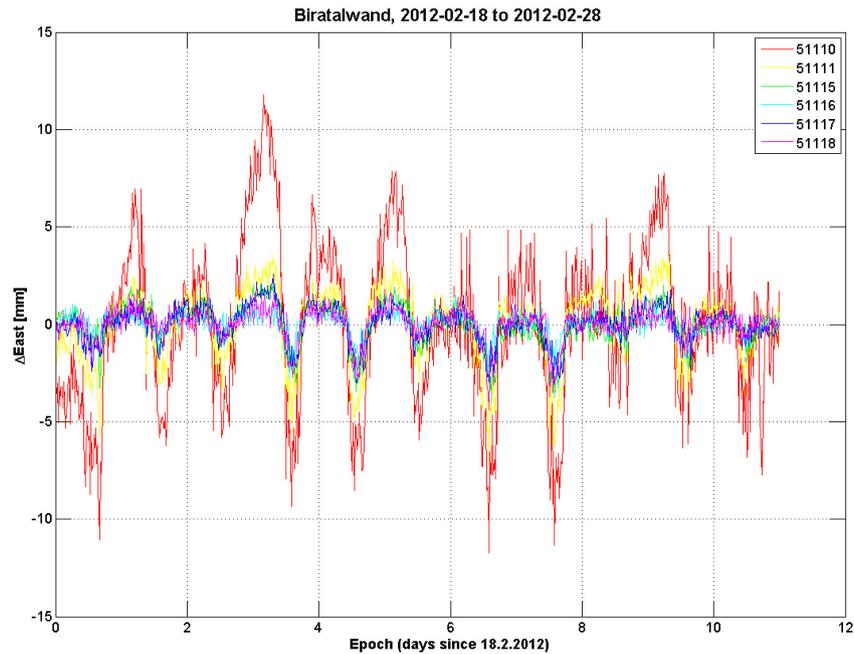


Abbildung 1-2: Änderung der Ost-Koordinate ausgewählter reflektorloser Punkte [ETH Zürich (2013)]

- b) Die Messwerte der stabilisierten Punkte weisen keine solchen signifikanten Änderungen auf, auch obwohl sich Prismen und berührungslos gemessene Punkte, geologisch betrachtet, auf den gleichen Felsblöcken befinden. In Abbildung 1-3 sind die Koordinatenänderungen der Ost-Achse dargestellt. In einem Zeitraum von mehr als zehn Tagen wurden Variationen der Ost-Komponente des Koordinatentripels detektiert. Während sich dabei die zyklischen Schwankungen bei einem stabilisierten Punkt (hier Prisma 115) im Bereich von wenigen Millimetern bewegen, weisen jene bei reflektorlosen Punkten (z.B. Nummer 51110) größere Amplituden auf. Hierbei erreichen die Variationen Größen von zehn Millimetern und mehr.

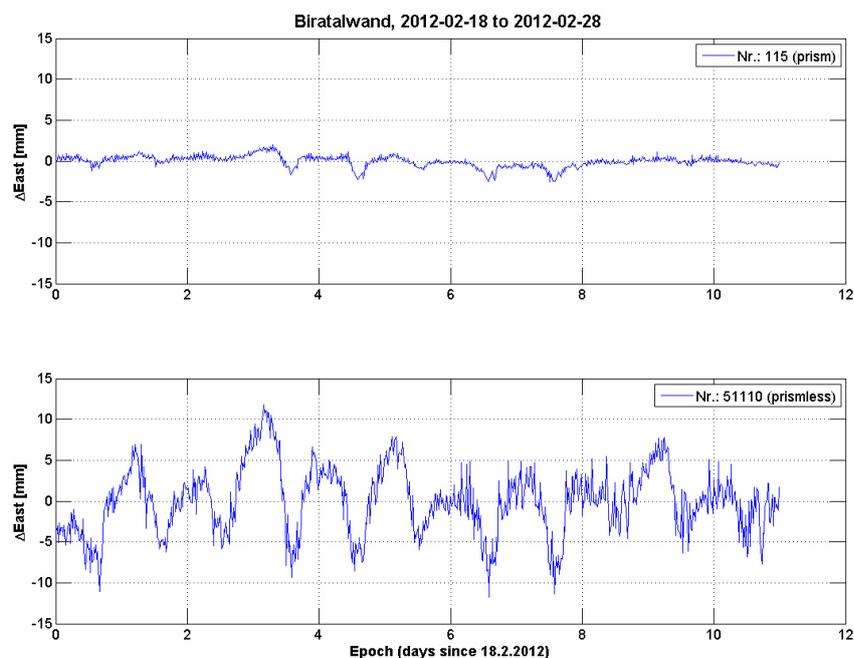


Abbildung 1-3: Vergleich der Änderungen der Ost-Koordinate von stabilisierten und berührungslos gemessenen Punkt [ETH Zürich (2013)]

- c) In Abbildung 1-4 sind die täglichen Variationen der einzelnen reflektorlos gemessenen Punkte eines Blocks dargestellt. Hierbei wurden über den gesamten Beobachtungszeitraum jeweils die Spannweite der Änderungen der Ost-Koordinate über 24 Stunden bestimmt und davon das 90%-Quantil berechnet.

Die Abbildung zeigt keine feststellbare Orientierung von Punkten mit größeren Schrägdistanzvariationen zu einem bestimmten Gebiet auf dem Felsblock. Daher ist keine Systematik in der Verteilung (Lage) der reflektorlosen Punkte erkennbar.

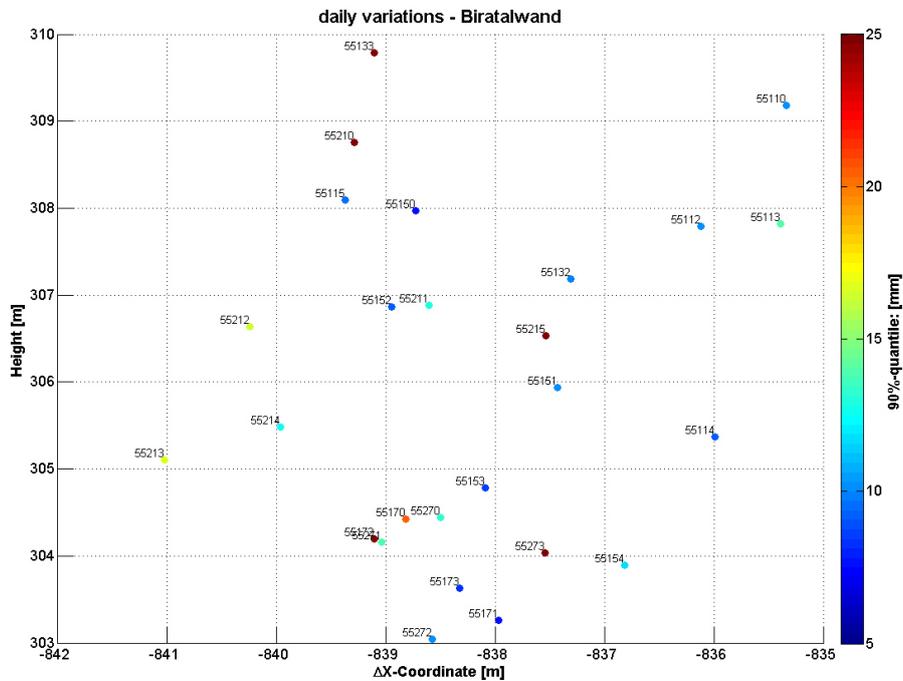


Abbildung 1-4: Tägliche Variationen reflektorlos gemessener Punkte (Block 55) [ETH Zürich (2013)]

Mit diesem Wissensstand wurden die beobachteten Daten und bisherigen Ergebnisse an die Technische Universität Graz (TUG) übergeben.

2 Ausgangssituation

Zunächst wurden die bereits erhobenen Messdaten sowie deren Aufnahmeconfiguration genauer untersucht. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Lokalisierung sowie Abhängigkeiten der aufgetretenen Systematiken gelegt.

2.1 Aufnahmeconfiguration

Um eine Analyse der aufgezeichneten Datensätze durchführen zu können, wurde zuerst die Aufnahmeconfiguration sowie der Messablauf der Überwachungsmessung „Biratalwand“ betrachtet. Während des gesamten Zeitraums (Dezember 2011 – November 2012) wurde das Monitoring von zwei betonierten Pfeilern aus durchgeführt. Diese Standpunkte wurden jeweils mit einer Totalstation „TM30“ von Leica Geosystems AG ausgestattet. Die Stromversorgung wurde extern durchgeführt wobei sich keine internen Batterien in den Messinstrumenten während des Überwachungszeitraums befanden. Weiters wurden in der Nähe eines Pfeilers eine Recheneinheit, eine Meteorologiestation (siehe Abbildung 2-1) sowie eine WebCam montiert. Die Steuerung der Messinstrumente und die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgte mittels der Software „Leica GeoMoS Monitor“ (Version 5.1). Zur Analyse und Visualisierung der Messdaten wurde die Software „Leica GeoMoS Analyzer“ (Version 5.2) verwendet. In diese Software wurden ebenfalls die Auswertung sowie das Alarmierungssystem integriert.



Abbildung 2-1: südlicher Pfeiler 1000 (Totalstation befindet sich unter dem Witterungsschutz (d)) mit WebCam (a), Recheneinheit (b) und Meteorologie -Sensor (c) [AVT (2012)]

Die Monitoringsoftware „Leica GeoMoS Monitor“ zeichnet alle eingestellten Konfigurationen und erfassten Messdaten auf. Diese sind bereits um die am Messinstrument eingestellten Korrekturen verbessert. Jegliche Kalibrierwerte der Neigungssensoren, Kollimationsfehler, Indexfehler, etc. sowie die Neigungswerte sind an den entsprechenden Größen bereits angebracht.

zur Visurrichtung steht. Diese Konstellation war jedoch, aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit, bzw. Ausrichtung, nur selten realisierbar.

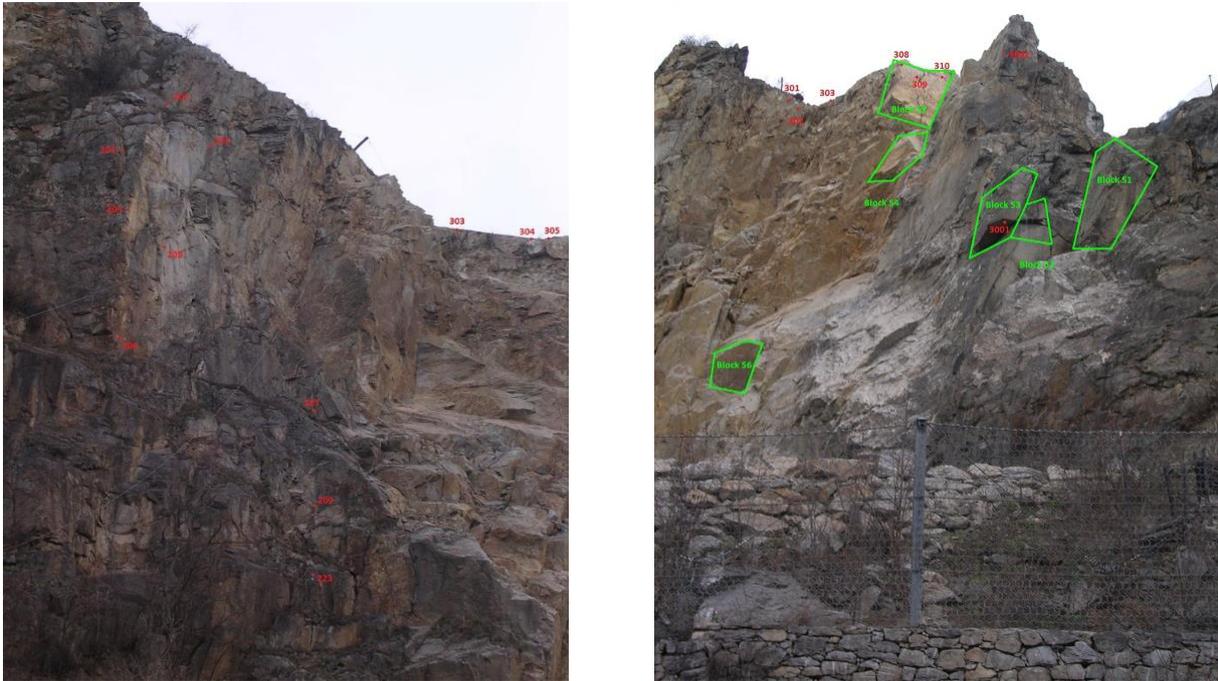


Abbildung 2-3: Schematische Lagedarstellung von einigen Überwachungspunkten und Bereichen (Blöcke) der reflektorlos beobachteten Punkte (links: nördl. Kontrollbereich; rechts: Gefahrenbereich; Aufnahme: 20.12.2011) [AVT (2012)]

Um die atmosphärischen bzw. meteorologischen Einflüsse auf die Beobachtungsgrößen zu ermitteln wurden vor Beginn eines jeden Messdurchgangs (ca. alle 30 Minuten) Korrekturparameter bestimmt. Die Berechnung der atmosphärischen Korrekturen erfolgte dabei sowohl über Referenzstrecken als auch über Referenzwinkel [Leica (2010). GeoMoS Manual: S. 192 bzw. 236]. Im Anschluss an die Ermittlung dieser Parameter wurden die Folgemessungen entsprechend korrigiert. Zur Bestimmung der Korrekturparameter wurden stabilisierte Punkte verwendet, welche an als stabil angenommenen Positionen angebracht waren. Zusätzlich wurde die Orientierung der beiden Standpunkte der Messinstrumente vor jedem neuen Messzyklus durch Messungen zu Versicherungspunkten (siehe Abbildung 2-2) überprüft. Ebenso wurde die wahre Neigung der Pfeiler durch eine 2-Kreislagennmessung der Instrumente in HzO-Richtung bestimmt. Dieser Wert diente jedoch nur zur Kontrolle bezüglich eines definierten Schwellwertes und erhielt bei der Messung selbst, sofern innerhalb der Toleranzen, keine weitere Beachtung. Die Überwachungsmessungen beider Totalstationen erfolgten zeitsynchron (Zeit der Recheneinheit) sowie ausschließlich in Kreislage I.

Am Standpunkt 1000 kam die Totalstation *Leica TM30 0.5"* (Ser.Nr: 361827) zum Einsatz. Das Instrument wurde auf einem betonierte Pfeiler auf einer Anhöhe montiert und durch eine Eigenkonstruktion der Firma „Vermessung AVT ZT-GmbH“ vor der Witterung geschützt siehe Abbildung 2-4). Als Schutz vor einer Überhitzung (Hitzestau) wurde das Kunststoffschutzrohr des Pfeilers am unteren Ende geschlitzt. Ebenso wurde beim Witterungsschutz darauf geachtet, dass eine Luftzirkulation im Inneren möglich war. Hierfür wurden mehrere größere Löcher in die Decke gebohrt und der Boden offen gelassen. Mittels einem Dach wurde zusätzlich, das Instrument vor Regen, Schnee, etc. geschützt.



Abbildung 2-4: südlicher Pfeiler mit Witterungsschutz und geschlitzter Schutzverkleidung Standpunkt: 1000 [AVT (2012)]

In Abbildung 2-4 ist ebenfalls zu erkennen, dass sich der Standpunkt 1000 auf einer kleinen Anhöhe befindet und sich Bäume etc. in der Umgebung befinden. Die zu beobachtenden Punkte befinden sich in einer Entfernung von ca. 80 m – ca. 160 m, wobei unterschiedliche Zenitdistanzen 50 gon – 70 gon angefahren werden. Eine schematische Lagedarstellung ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

Am Standpunkt 2010 wurde das Messinstrument *Leica TM30 0.5"* (Ser.Nr: 362578) eingesetzt. Die Totalstation bzw. der Pfeiler wurde hier neben den Bahngleisen der Donauuferbahn platziert (siehe Abbildung 2-5).

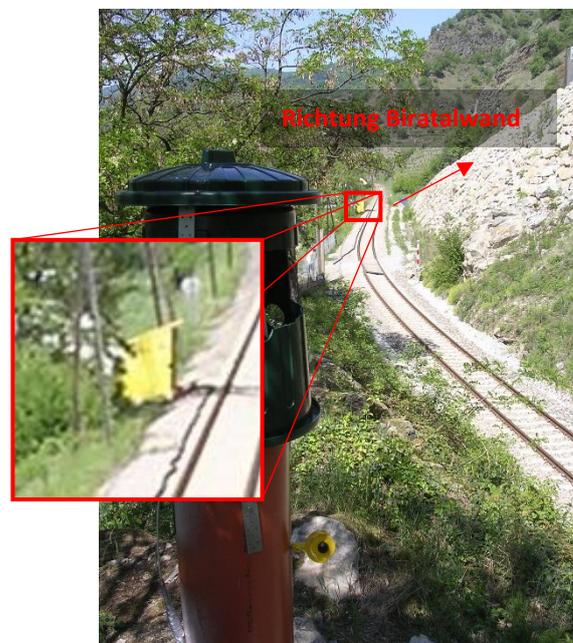


Abbildung 2-5: nördlicher Pfeiler in gelber Holzverbauung Standpunkt 2010 [AVT (2012)]

Die in Abbildung 2-5 zu sehende Holzeinhausung (gelb) wurde erst Anfang Mai 2012 ergänzt, da größere Neigungsvariationen (bis zu 60 mgon) aufgrund der stärker werdenden Sonneinstrahlung bemerkbar waren.

Im Fall des nördlichen Standpunktes befinden sich die zu überwachenden Punkte in Entfernungen von 130 m – 200 m, mit unterschiedlichen Zenitdistanzen von 50 gon – 80 gon. Dieser Pfeiler wurde im Laufe der Überwachungsmessung Ende März 2012 neu gesetzt, da sich Bewegungen des Pfeilers bestätigten. Diese wurden mittels Beobachtung der Variation der Neigungswerte sowie mittels „Freier Stationierung“ berechneter Koordinaten während eines Tageszyklus nachgewiesen.

Neben den ingenieurgeodätischen Datensätzen, welche durch die installierten Totalstationen beobachtet wurden, sind kontinuierliche Aufzeichnungen sowohl der Meteorologiestation, als auch der am Pfeiler 1000 installierten WebCam vorhanden.

Für die weitere Datenanalyse stehen somit folgende Informationen zur Verfügung:

- Totalstationen
 - o Richtungen, Winkel, Schrägdistanzen, Neigungen, etc.
- Meteorologiestation
 - o Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte
- WebCam
 - o Fotoaufnahmen der Biratalwand (alle 30 Minuten von 06:00 Uhr – 21:30 Uhr)

2.2 Steuer- und Auswertesoftware „Leica GeoMoS“

Durch mögliche atmosphärische Einflüsse auf die Messgrößen können auch die Ansteuerungsparameter der einzelnen Messpunkte variieren. Dies gewinnt vor allem an Relevanz wenn Objektpunkte reflektorlos, also ohne automatische Zielerfassung, gemessen werden sollen. Aus diesem Grund soll auch die verwendete Software genauer beleuchtet werden.

Die Steuerung sowie die Auswertung der Messdaten wurde mittels dem Softwarepaket Leica GeoMoS Monitor (Version 5.1) und Leica GeoMoS Analyzer (Version 5.2) durchgeführt. Diese Programme stellen ein Komplettpaket für Monitoringaufgaben dar. Um eine weitere Analyse der Ergebnisse bzw. der Messdaten durchführen zu können, ist es notwendig, das Aufzeichnungsschema der Software genauer zu betrachten. Gemeint ist hierbei vor allem der Ablauf angefangen von der Datenakquirierung einzelner Messwerte (Horizontalrichtung, Vertikalwinkel, Schrägdistanz, etc.) bis hin zur Berechnung der ausgegebenen Koordinatentripel. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf etwaige Korrekturen der Messdaten gelegt, wobei auch der Zeitpunkt der Berücksichtigung dieser Korrekturwerte im Monitoringzyklus zu beachten ist. In weiterer Folge wird der Aufzeichnungsablauf kurz erläutert, ohne jedoch auf alle Möglichkeiten (Einstellungen) im Detail einzugehen. Vielmehr soll ein grober Überblick gegeben werden, wie aus den beobachteten Messgrößen Koordinaten berechnet werden, bzw. wie der Messablauf aussieht.

2.2.1 Definitionen / Begriffe

Mittels der Software Leica GeoMoS können eine Reihe verschiedenster Definitionen und Einstellungen für die benötigte Überwachungsmessung getätigt werden. Grob unterteilt betreffen diese Konfigurationen die Kommunikation, Punkte bzw. Punktgruppen sowie Einstellungen bezüglich des Messablaufs, der Berechnungen (Limits, etc.) und Ausgabe (z.B. Warnungen).

Nach dem Einlesen bzw. „Einlernen“ der zu überwachenden Punkte und dem Einstellen der Punktparameter (Punktnummer, Prisma, Additionskonstante, etc.) können diese zu Punktgruppen (Reflektorlose Punkte, Kontrollpunkte, etc.) zusammengefasst werden. Die während der Überwachungsmessung „Biratalwand“ verwendeten Punktgruppen sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Diesen Punktgruppen können nun zudem unterschiedliche Eigenschaften zugeteilt werden.

Tabelle 2-1: Eigenschaften einiger Punktgruppen in Leica GeoMoS [Leica (2010): Leica GeoMoS Manual S: 232 -237]

Eigenschaft	Beschreibung
Normal	zu überwachende Punkte (Monitoring)
Orientation Only	für Orientierungsberechnung der Totalstation
PPM	zur Bestimmung der atmosphärischen PPM
Vz Correction	Zur Bestimmung des Refraktionseinflusses auf den Vertikalwinkel

Punkte in den Gruppen „Orientation Only“, „PPM“, und „Vz-Correction“ besitzen eine höhere Priorität als Überwachungspunkte (Gruppe „Normal“) und werden zu Kontrollzwecken bzw. zur Berechnung von Korrekturparametern verwendet. Während die Orientierung durch einen robusten Schätzer nach kleinsten Quadraten ermittelt wird, können die atmosphärischen PPM in Leica GeoMoS auf unterschiedliche Arten bestimmt werden. Für die Überwachungsmessung wurde dabei der Weg über Referenzstrecken gewählt, wobei der PPM-Wert aus dem Verhältnis von Referenzstrecken (aus Koordinaten berechnet) zu aktuell gemessenen Strecke berechnet wird. Bei den Punkten der Gruppe „Vz-Correction“ wird aus den Abweichungen (Differenzwert) zwischen Referenzvertikalwinkel (aus Koordinaten berechnet) und gemessenem Vertikalwinkel der Einfluss der Refraktion auf die Zenitdistanz abgeleitet [Leica (2010): Leica GeoMoS Manual S.192 bzw. 236]. In der Punktgruppe „Normal“ werden die einzelnen Punkte wie definiert angefahren und eingemessen. Aus diesen Daten werden letztlich die Bewegungen des beobachteten Gebiets bzw. Objekts abgeleitet.

All diese Punktgruppen werden nun dem Messzyklus zugeführt. In diesem werden der zeitliche Ablauf (Startzeitpunkt, Endzeitpunkt, Intervall) der einzelnen Punktgruppen, der gewünschte Sensor sowie die Anzahl der Kreislagen ausgewählt.

Die Punkte bzw. Punktgruppen werden nun wie im Messzyklus definiert eingemessen. Aus den Messdaten (Richtungen, Winkel, Distanzen, Korrekturwerte, etc.) werden Koordinaten und schließlich Veränderungen der Koordinaten bzw. Punktbewegungen berechnet. Für das weitere Ansteuern bzw. Berechnen von Veränderungen werden verschiedene Arten von Koordinaten-Typen gespeichert. Diese Koordinatentypen sind in Tabelle 2-2 aufgelistet.

Tabelle 2-2: Koordinatentypen in Leica GeoMoS [Leica (2010). Leica GeoMoS Manual S: 504]

Typ	Änderung	Verwendung
Null	Manuell über den Punkteditor	Referenzwerte für Verschiebungsberechnung
Reference	Manuell oder bei Punktimport	Zielpunkt-Koordinaten für Berechnung von Korrekturwerten (PPM, Vz)
Current	Manuell oder nach Messung	Für Limit-, Grenzwertüberprüfungen sowie zur Berechnung von Verschiebungen
Scan	Manuell oder nach Messung	Zielpunkt-Koordinaten für Positionierung des Teleskops und zur Suche des Zielpunkts
Setup	Manuell oder bei Freier Stationierung, etc.	Standpunkt-Koordinaten für Ansteuerung

Jedem beobachteten Punkt werden dabei die vier unterschiedlichen Koordinatenarten, „Null“, „Reference“, „Current“ und „Scan“, zugewiesen (siehe Abbildung 2-6). Während „Null“- bzw. „Reference“-Koordinaten für die Berechnungen von Verschiebungen bzw. Korrekturwerten verwendet werden und in der Regel konstant bleiben, können sich „Current“- und „Scan“-

Koordinaten nach jedem Messdurchgang ändern. Das „Current“-Koordinatentripel stellt dabei die aus den letzten Messungen berechneten Koordinatenwerte des beobachteten Punktes dar. Diese werden gemeinsam mit den „Null“-Koordinaten für die Berechnung des Verschiebungsvektors verwendet. Im Normalfall werden nun die „Scan“-Koordinatenwerte, welche für das Ansteuern der gesuchten Punkte im folgenden Messzyklus verantwortlich sind, mit den „Current“-Koordinaten aktualisiert. So kann verhindert werden, dass sich ein Ziel, sofern kontinuierliche Bewegungen des Objekts in eine Richtung auftreten, nicht außerhalb des eingestellten Suchfensters des Messinstruments bewegt und somit nicht gefunden werden kann. Die „Scan“-Koordinaten sollen somit gewährleisten, dass sich alle beobachteten Ziele im eingestellten Suchfenster des Messinstruments befinden. Wird kein Suchfenster für einen Zielpunkt eingestellt (z.B. bei reflektorlosen Beobachtungsmessungen), so findet keine Aktualisierung des „Scan“-Koordinatentripels statt.

Nr	Name	Easting [m]	Northing [m]	Height [m]	Reflector h...	Reflector co...	Type	PointID	CoordinateID
433	435	-60205.589	362831.187	304.787	0.000	0.018	null	134218055	134345810
434	435	-60205.589	362831.187	304.787	0.000	0.018	reference	134218055	134345811
435	435	-60205.588	362831.189	304.789	0.000	0.018	current	134218055	134345812
436	435	-60205.588	362831.189	304.789	0.000	0.018	scan	134218055	134345813
437	51112	-60219.216	362804.893	271.380	0.000	0.000	null	134217903	134225933
438	51112	-60219.216	362804.893	271.380	0.000	0.000	reference	134217903	134225934
439	51112	-60219.218	362804.892	271.379	0.000	0.000	current	134217903	134225935
440	51112	-60219.216	362804.893	271.380	0.000	0.000	scan	134217903	134225936

Abbildung 2-6: Verspeicherte Koordinatenarten eines stabilisierten (Nr.: 435) und eines reflektorlos beobachteten (Nr.:51112) Ziels in der Software Leica GeoMoS

2.2.2 Ablauf Messzyklus

Am Beginn des Messzyklus stehen das Ansteuern und Messen der einzelnen Punktgruppen (Punktkoordinaten müssen bekannt sein). In Abbildung 2-7 ist ein schematischer Ablauf eines Messdurchganges mittels der Monitoringsoftware Leica GeoMoS dargestellt. Beschrieben wird der Ablauf, angefangen von der Ermittlung der Ansteuerungsparameter bis hin zur Berechnung der zugehörigen Koordinaten.

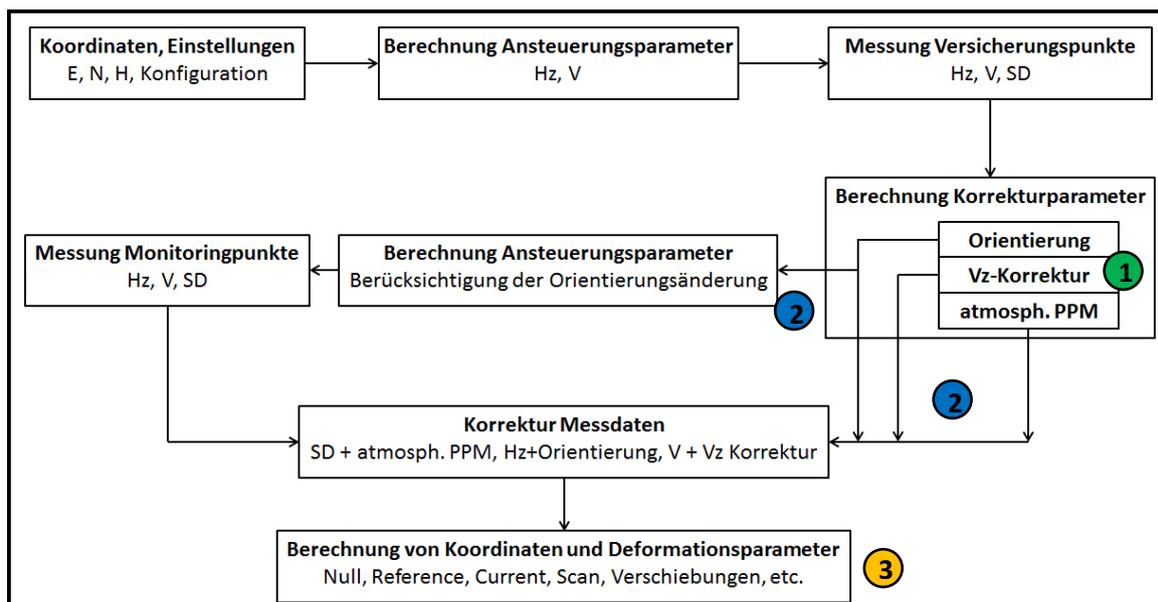


Abbildung 2-7: Schematischer Ablauf eines Messdurchganges in Leica GeoMoS [Leica (2015)]

Der Ablauf, angefangen von der Erfassung Messdaten bis hin zur Berechnung der Koordinaten kann grob in vier Schritten dargestellt werden. Die ersten Korrekturen der Messdaten werden von dem

Messinstrument selbst durchgeführt. Sowohl ermittelte Neigungen (Längs- und Querneigung) der Totalstation, als auch etwaige andere Einstellungen (z.B. atmosphärische PPM) werden, sofern am Messinstrument gesetzt, direkt an die Richtungs-, Winkel- und Steckenbeobachtungen angebracht. Im Fall der Überwachungsmessung Biratalwand war der Kompensator eingeschaltet und die geräteinternen atmosphärischen PPM auf null gesetzt. Die Messdaten Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz (Abbildung 2-8) werden an die Monitoringsoftware Leica GeoMoS weitergeleitet und stellen die Basis für die weiteren Berechnungen dar.

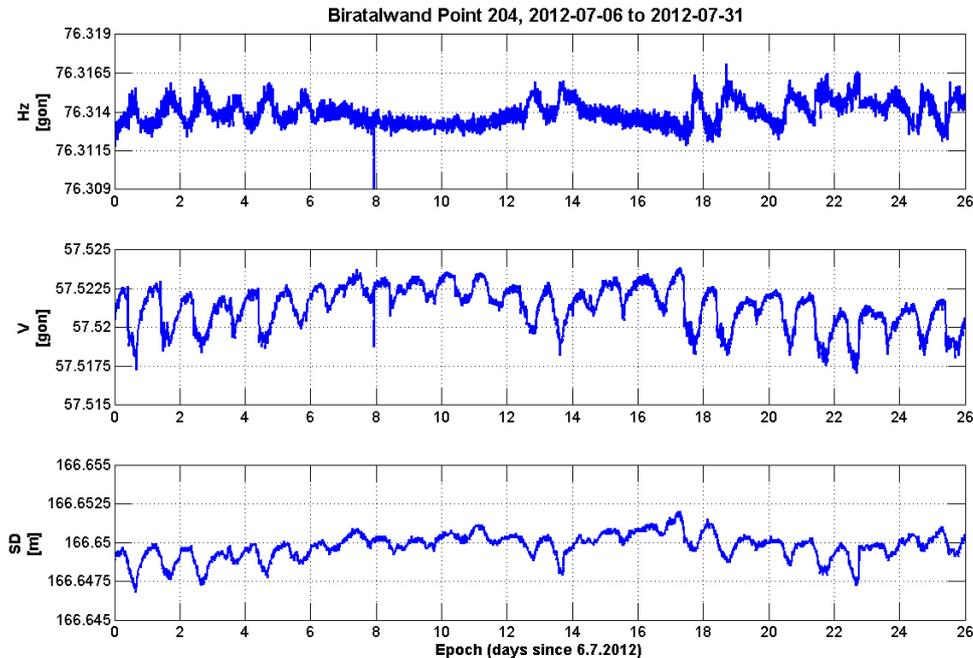


Abbildung 2-8: "Rohdaten" vom Messinstrument des stabilisierten Punktes 204

Aus den Messdaten von im Vorhinein definierten, stabilen Punkten werden nun die Korrekturparameter (Punkt 1 in Abbildung 2-7) abgeleitet. Für die Bestimmung ebendieser werden, wie bereits erwähnt, bestimmte stabile Punkte ausgewählt. Im Fall des Monitorings der Felswand „Biratalwand“ wurden für beide Standpunkte der Totalstationen (1000 und 2010) jeweils vier Ziele zur Bestimmung der Orientierung und zwei Ziele zur Berechnung der atmosphärischen PPM definiert. Ein Vertikalwinkelkorrekturwert wurde jedoch nur vom nördlichen Standpunkt (2010) aus zu einem Prisma ermittelt.

In Tabelle 2-3 sind die ausgewählten Messpunkte der beiden Standpunkte für die Überwachungsmessung „Biratalwand“ aufgelistet und in Abbildung 2-9 sind die Messpunkte des Standpunktes 1000 koordinativ dargestellt. Hierbei befinden sich die Versicherungspunkte zur Bestimmung der Orientierung in einer annähernd horizontalen Ebene mit dem Standpunkt, während die Ziele zur Bestimmung der atmosphärischen Distanzkorrektur in den, als stabil angenommenen Kontrollbereichen zu finden sind. Eine ähnliche Aufteilung der Kontrollpunkte ist auch am nördlichen Standpunkt 2010 ersichtlich, wobei der Kontrollbereich dafür nördlich des Gefahrenbereichs liegt.

Tabelle 2-3: Ausgewählte Kontrollpunkte zur Bestimmung der Korrekturparameter

Standpunkt	Orientierung	Vz-Korrektur	Atmosphärische PPM
1000	1002, 1003, 1004, 2011	---	103, 115
2010	2003, 2004, 2005, 1001	204	204, 221



Abbildung 2-9: Ausgewählte Kontrollpunkte zur Bestimmung der Korrekturparametern am Standpunkt 1000

Die aus den Messungen zu den Kontrollpunkten abgeleiteten Korrekturen (Abbildung 2-10) werden in der Datenbank abgespeichert und an allen Folgemessungen angebracht, bis neue Korrekturwerte vorliegen.

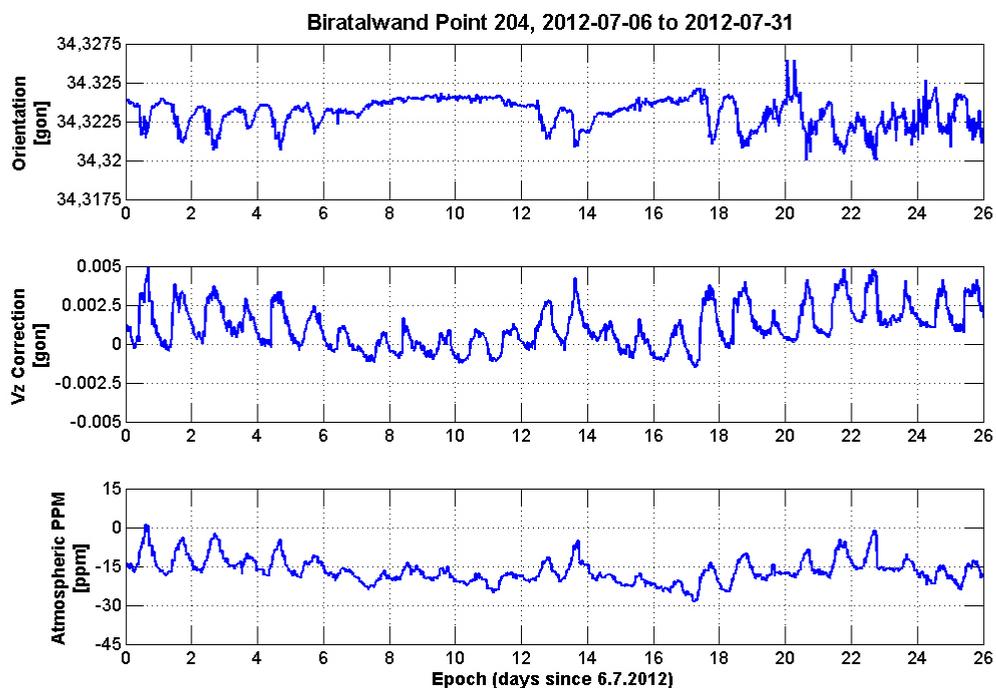


Abbildung 2-10: Korrekturwerte im Juli 2012 für den Standpunkt 2010 in Leica GeoMoS

Der nächste Schritt (2) in Abbildung 2-7 beinhaltet das Anbringen der Korrekturen an den weiteren Messdaten (siehe Abbildung 2-11). In den Formeln 2-1 bis 2-3 ist dieser Ablauf mathematisch dargestellt. Wobei die Korrekturparameter Orientierung „ O “, Vertikalwinkelkorrektur „ V_{corr} “ und atmosphärische Geschwindigkeitskorrektur „ $atmosph. ppm$ “ an die Beobachtungsgrößen

Horizontalrichtung (Hz), Vertikalwinkel (V) und Schrägdistanz (SD) angebracht werden. Dabei ist zu beachten, dass die Orientierung zwei Mal mit unterschiedlichen Vorzeichen berücksichtigt wird. Einerseits bei der Berechnung der Ansteuerungsparameter, um das gesuchte Ziel auch bei Variationen der Orientierung, z.B. durch temperaturbedingte Pfeilerbewegung, auch zu finden. Andererseits wird dieser Korrekturwert der Formel 2-1 entsprechend, vor Berechnung der Koordinaten wieder angebracht [Leica (2015)].

$$Hz = Hz + O \quad \text{Formel 2-1}$$

$$V = V + V_{corr} \quad \text{Formel 2-2}$$

$$SD = SD \cdot (1 + \text{atmosph. ppm} \cdot 10^{-6}) \quad \text{Formel 2-3}$$

Dieser Rechenschritt erfolgt automatisiert mittels der Software Leica GeoMoS und wird nicht in der Datenbank gespeichert. Die korrigierten Messdaten stehen somit nur temporär zur Verfügung. Das Ergebnis (Kombination der Abbildung 2-8 und Abbildung 2-10) ist in Abbildung 2-11 ersichtlich.

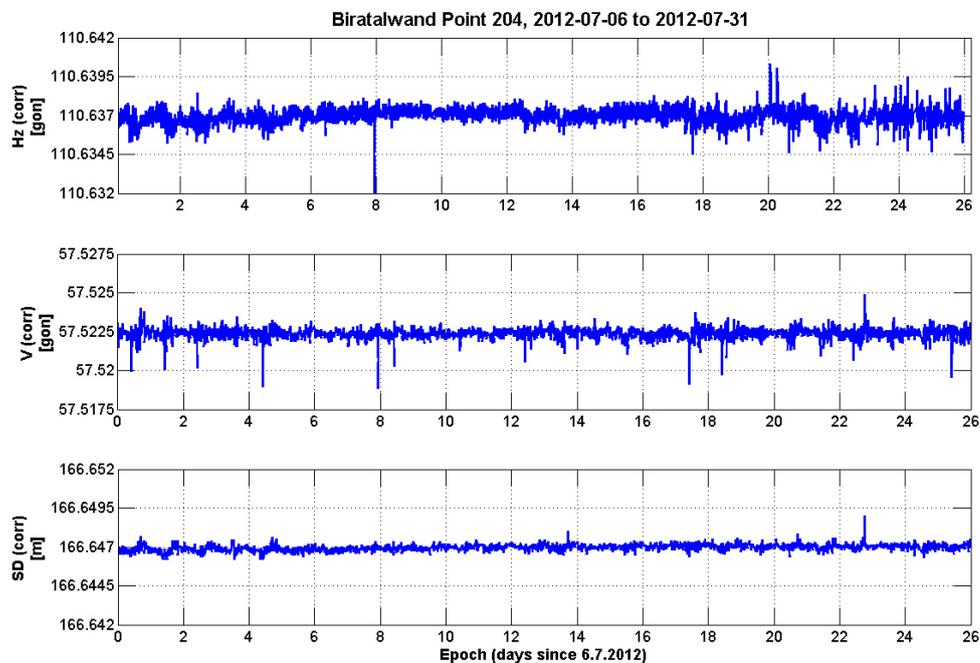


Abbildung 2-11: Korrigierte Messdaten des Punktes 204 in Leica GeoMoS

Mittels dieser korrigierten Messdaten werden nun im letzten Schritt (3) die endgültigen Koordinaten (Abbildung 2-12) der Beobachtungspunkte berechnet. Dieses Koordinatentripel wird wieder in der Datenbank der Auswertesoftware archiviert. Damit lassen sich nun weitere Berechnungen zu Analysezwecken, wie z.B. Verschiebungen durchführen.

Erkennbar ist, dass in den korrigierten Messdaten die zyklischen Effekte (vgl. Abbildung 2-11 mit Abbildung 2-8) verschwunden sind und nur noch einzelne Spitzen verbleiben.

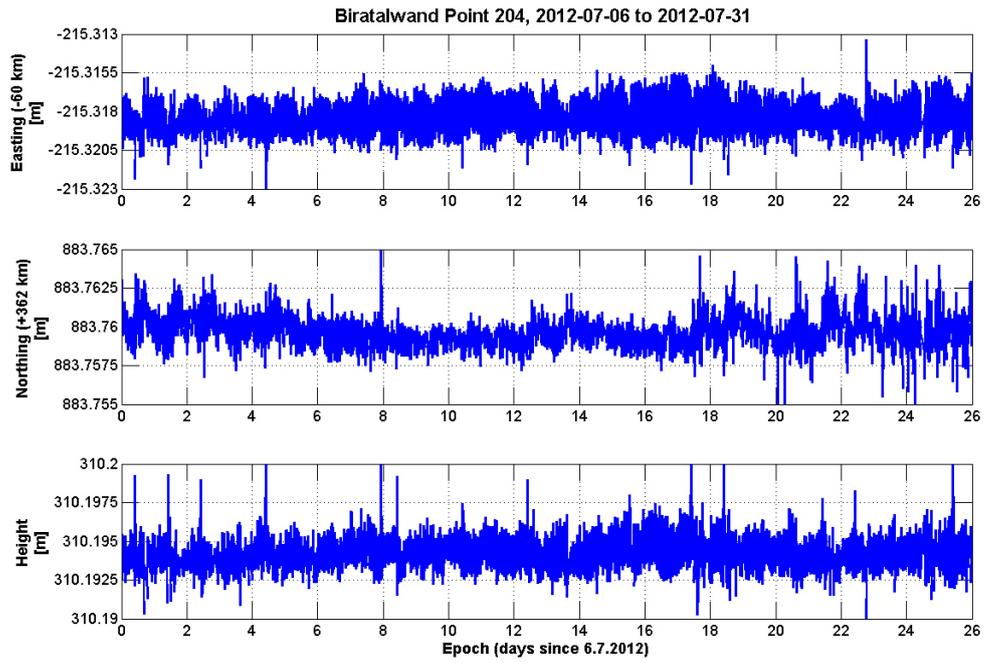


Abbildung 2-12: Berechnete Koordinaten des Punktes 204 in Leica GeoMoS

3 Datenanalyse

Wie schon in den Abschnitten 1.2 und 1.3, sowie im Kapitel 1 Einleitung erwähnt traten bei der Überwachungsmessung „Biratalwand“ signifikante Variationen vor allem in den Datenreihen der reflektorlos beobachteten Messpunkte auf. Da bei berührungslos gemessenen Punkten einzig die Änderung der Schrägdistanz als Parameter für die Bestimmung einer Deformation bzw. Bewegung herangezogen wird liegt der Hauptfokus bei dieser Datenanalyse auf der Beobachtung der Schrägdistanzen. In diesem Abschnitt werden vorrangig jene Messdaten behandelt, die mittels der Monitoringsoftware Leica GeoMoS um die ermittelten Einflussgrößen korrigiert wurden. Da das Monitoring von zwei unterschiedlichen Standpunkten aus und über mehrere Monate hinweg durchgeführt wurde, werden die jeweils zugehörigen Messreihen separat und zu verschiedenen Zeitpunkten untersucht.

Während der Aufzeichnungsdauer der Überwachungsmessung „Biratalwand“ traten, aufgrund des langen Beobachtungszeitraums, verschiedene Ereignisse auf, welche Auswirkungen auf die Messdaten der Totalstationen hatten. Diese wurden von der Firma Vermessung AVT ZT-GmbH dokumentiert und sind in verkürzter Form in der Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 angeführt.

Tabelle 3-1: chronologische Auflistung nennenswerter Ereignisse Standpunkt 1000 [AVT(2012)]

Standpunkt	Ereignis	Datum / Dauer
1000	Inbetriebnahme Monitoringsystem	21.12.2011
	Umstellung Monitoringsystem auf Landessystem	07.02.2012
	Tausch der Totalstationen (Untersuchung Standardabweichung)	10.02.2012
	Start: Bestimmung / Aufzeichnung der Absolutneigung des Pfeilers	April 2012
	Sprengarbeiten	27.-28.06.2012
	Ende der Überwachungsmessungen	08.11.2012

Tabelle 3-2: chronologische Auflistung ausgewählter Ereignisse Standpunkt 2010 [AVT(2012)]

Standpunkt	Ereignis	Datum / Dauer
2010	Inbetriebnahme Monitoringsystem	21.12.2011
	Umstellung Monitoringsystem auf Landessystem	07.02.2012
	Tausch der Totalstationen (Untersuchung Standardabweichung)	10.02.2012
	Auffälligkeiten in den Messdaten (Vermutung: Pfeilerbewegung)	16.03.2012
	Setzen eines neuen Messpfeilers; Koordinatenbestimmung, Inbetriebnahme	23.-27.03.2012
	Start: Bestimmung / Aufzeichnung der Absolutneigung des Pfeilers	April 2012
	Start: Bestimmung / Anwendung Vz-Korrektur	Mitte April 2012
	Neigungsprobleme (Sonneneinstrahlung) mit teilw. Messausfällen	25.04.- 02.05.2012
	Bau Einhausung	04.05.2012
	Weiter Probleme bzw. Auffälligkeiten in den Neigungsdaten	06.-09.05.2012
	Erweiterung der Einhausung Richtung Felswand	16.05.2012
	Sprengarbeiten	27.06.2012
	Ende der Überwachungsmessungen	08.11.2012

3.1 Effekte: nördlicher Standpunkt 2010

Der nördliche Standpunkt befand sich wie in Abschnitt 2.1 Aufnahmekonfiguration beschrieben neben den Bahngleisen der Donauuferbahn und beobachtete Teile des Gefahrenbereiches sowie den nördlichen Kontrollbereich (siehe Abbildung 2-2 in Abschnitt 2.1).

3.1.1 Reflektorlose Messpunkte

Bei Betrachtung der Schrägdistanzvariationen (bereits um atmosphärische PPM korrigiert) sind zyklische Änderungen mit Amplituden von mehreren Millimetern bis zu mehr als einem Zentimeter zu erkennen. In Abbildung 3-1 sind diese Variationen für sechs Tage in den Monaten Februar, April und Juli 2012 dargestellt. Sie zeigen Änderungen der Schrägdistanzwerte von reflektorlosen Überwachungspunkten verschiedener Blöcke während der gleichen Zeiträume, wobei zu beachten ist, dass die Variationen ein ähnliches Verhalten aufweisen. Ebenso ist ersichtlich, dass sich Distanzwertänderungen entgegengesetzt verhalten können (z.B. Punkt 54230).

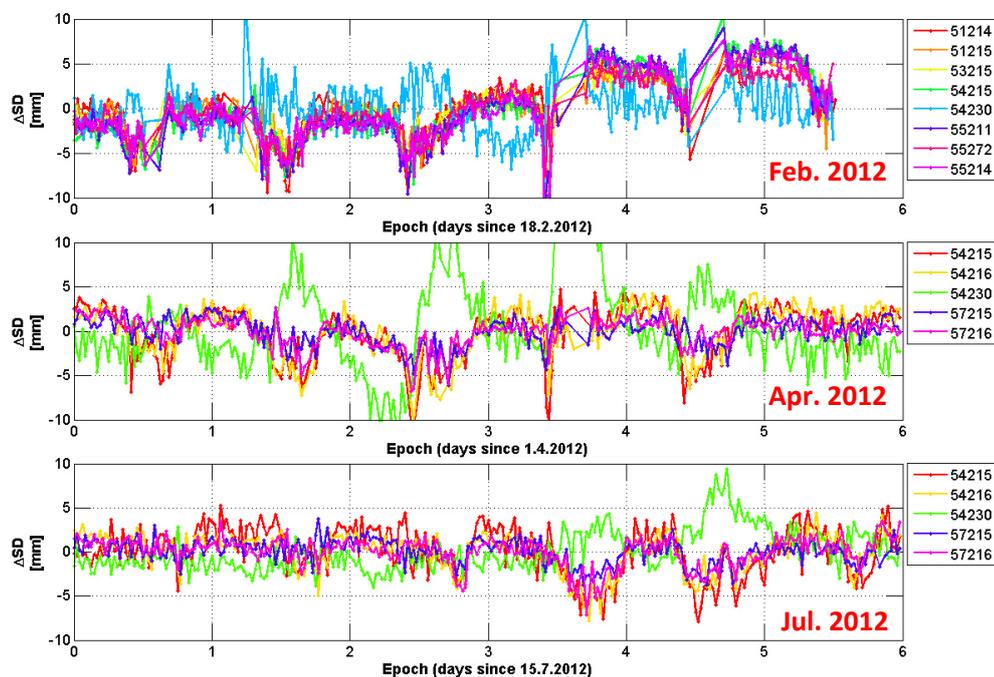


Abbildung 3-1: RL-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 2010

Während die Distanzwertänderungen im Februar zwischen mehreren Millimetern bis zu einem Zentimeter variieren, scheinen sich diese zyklischen Variationen im April zu verstärken. Hier erreichen die Amplituden Größen von über einem Zentimeter. Diese Verstärkung scheint sich im Juli des gleichen Jahres wieder zu verringern, wobei jedoch beachtet werden muss, dass im Mai 2012 der Witterungsschutz des Standpunktes 2010 durch eine Holzverbauung ersetzt bzw. erweitert wurde um eine bessere Abschattung gegenüber der Sonneneinstrahlung zu gewährleisten.

Weiters lassen die in Abbildung 3-1 dargestellten Variationen unabhängig von der Jahreszeit einen Tagesgang erkennen, da sich die Zyklen ca. alle 24 Stunden wiederholen.

Betrachtet man nun in weiterer Folge die Variationen weiterer Messdaten für einen repräsentativen Punkt (54215), so lassen sich weitere Gemeinsamkeiten feststellen. In den folgenden Abbildungen 3-2 bis 3-4 ist nun für die bereits erwähnten Zeitbereiche ein reflektorloser Punkt herausgegriffen worden um die weiteren Messdaten bezüglich der Distanzwertvariationen zu untersuchen. Zu beachten ist abermals, dass die Messwerte Schrägdistanz, Horizontalrichtung und

Vertikalwinkel bereits um die mittels Leica GeoMoS ermittelten Parameter (siehe Abschnitt 2.2) korrigiert sind.

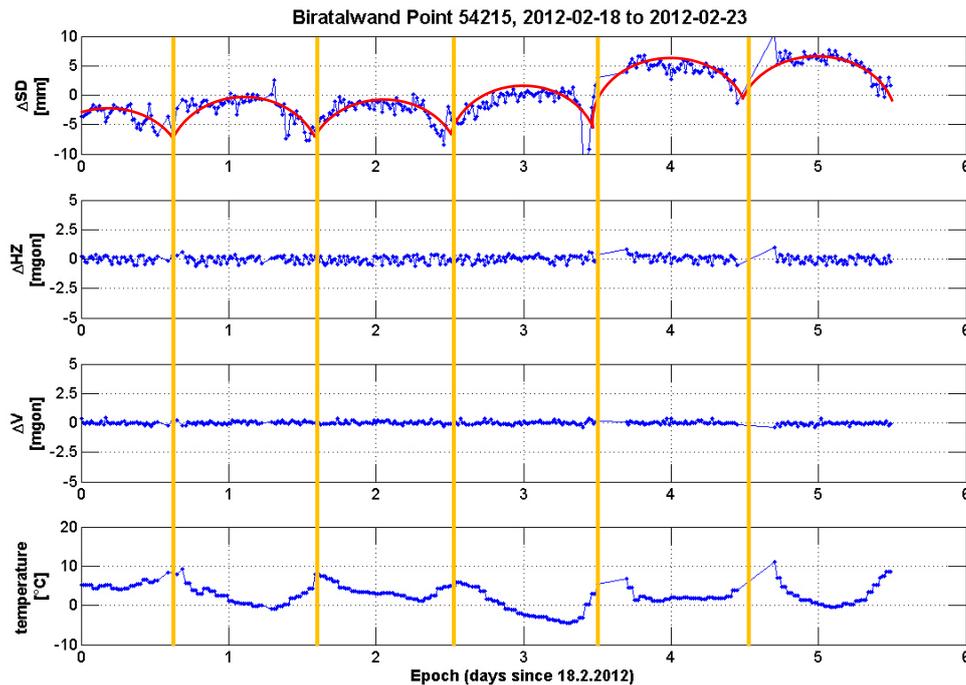


Abbildung 3-2: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012

In Abbildung 3-2 sind die Messdaten vom Februar des Jahres 2012 der Reihe nach aufgelistet. Ebenfalls dargestellt werden die Temperaturänderungen, welche durch die Meteorologiestation kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Während die Schrägdistanzwerte die bereits bekannten Variationen (rot hervorgehoben) durchlaufen, ist in den Richtungs- und Winkelmessungen kein ähnliches Verhaltensmuster erkennbar. Einzig ein höheres Rauschen in der Horizontalrichtungsablesung kann detektiert werden, wohingegen in den Variationen der Vertikalwinkelmessung nur die Positionierungsgenauigkeit ersichtlich ist. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass Änderungen der Orientierung durch Messungen zu stabilen Punkten bestimmt und bei der Ansteuerung berücksichtigt werden. Betrachtet man nun die Spitzen der Temperaturmessungen (orange markiert) so kann man eine negative Korrelation mit den Distanzwertvariationen erkennen.

Ähnliches ist auch in Abbildung 3-3 ersichtlich, in welcher neben den oben genannten Messdaten auch die Neigungsänderung in Längs- und Querrichtung dargestellt wird. Diese wurde erst ab Anfang April mitaufgezeichnet. Bei den dargestellten Neigungswerten handelt es sich jedoch nicht um die gemessenen Werte des Neigungssensors zum jeweiligen Zeitpunkt der einzelnen Messungen sondern um die wahre Neigung des Pfeilers. Diese wurde zu Beginn eines jeden Messdurchgangs durch eine 2-Kreislagenmessung in HzO-Richtung ermittelt und wird lediglich zu einer voreingestellten Grenzwertüberprüfung herangezogen. Die Neigungswerte zu den Zeitpunkten der einzelnen Messungen sind nicht gespeichert, sondern direkt an die Messwerte angebracht worden. Die restlichen Messdaten zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bereits im Februar (siehe Abbildung 3-2).

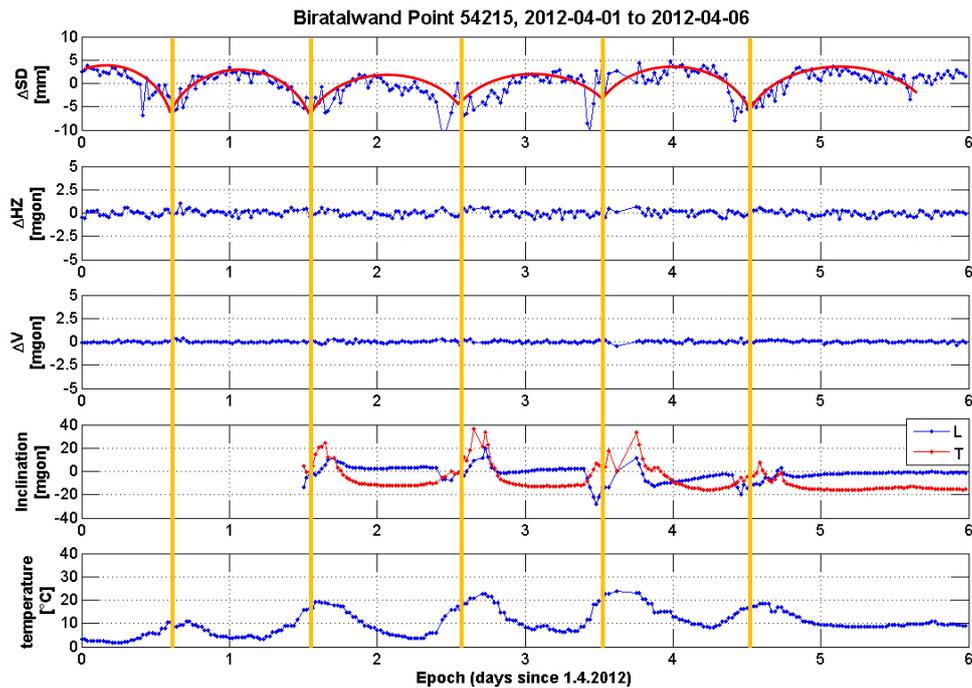


Abbildung 3-3: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012

Auch Abbildung 3-4 bestätigt die Aussage über eine mögliche Korrelation zwischen den Temperaturwerten und der Distanzwertvariation. Zu beachten sind in dieser Abbildung jedoch aufgetretene Vertikalwinkelvariationen, welche ebenfalls mit den beiden anderen Variationen korrelieren.

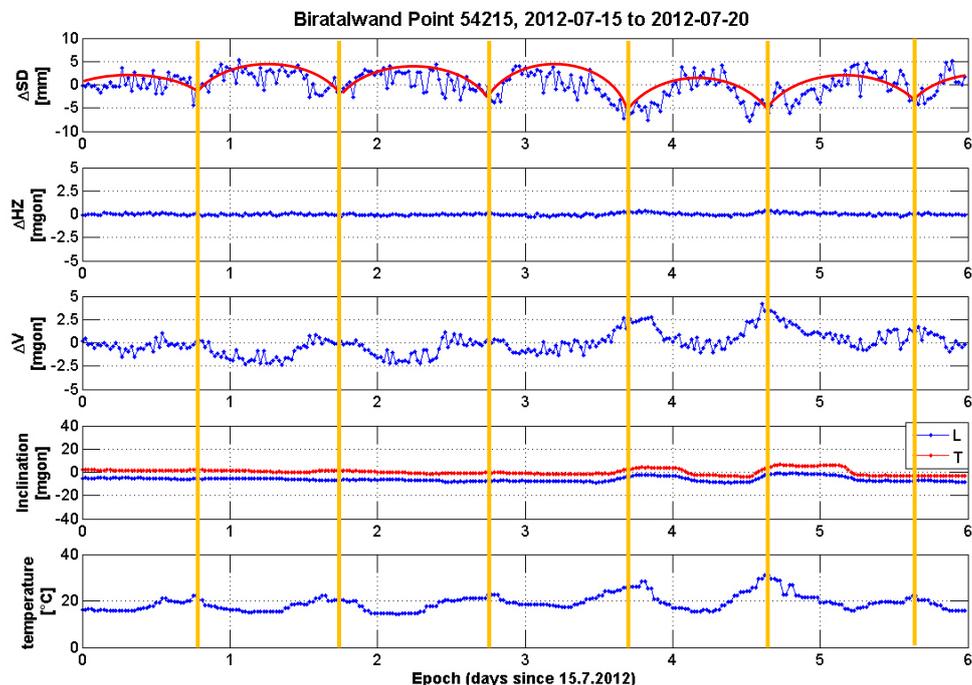


Abbildung 3-4: RL-Punkt 54215: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012

Die Neigungsänderungen treten nicht mehr in derselben Größenordnung auf (siehe Abbildung 3-5). Zu beachten gilt, dass im Mai 2012 eine weitere Holzverbauung am Pfeiler 2010 zum Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung errichtet wurde, was die Verringerung der Neigungswertänderungen erklärt.

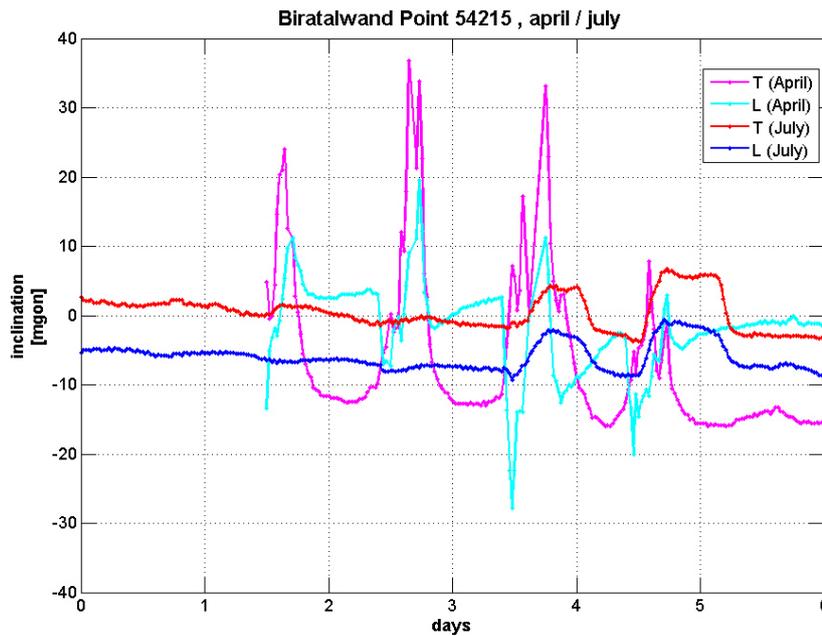


Abbildung 3-5: RL-Punkt 54215: Änderungen der Neigungskompensatormessungen - April-Juli

Die Variationen der beobachteten Zenitdistanz treten durch Anbringen der ermittelten Vz-Korrektur (siehe Abschnitt 2.2) auf. Letztere wird verwendet um den Einfluss der Refraktion auf die Vertikalwinkelbeobachtung abzuschätzen. Anstatt der, in den Abbildungen 3-2 und 3-3 dargestellten Variationen von einigen „cc“ (Positionierungsgenauigkeit) sind hier Änderungen von mehreren Milligon ersichtlich (siehe Abbildung 3-6).

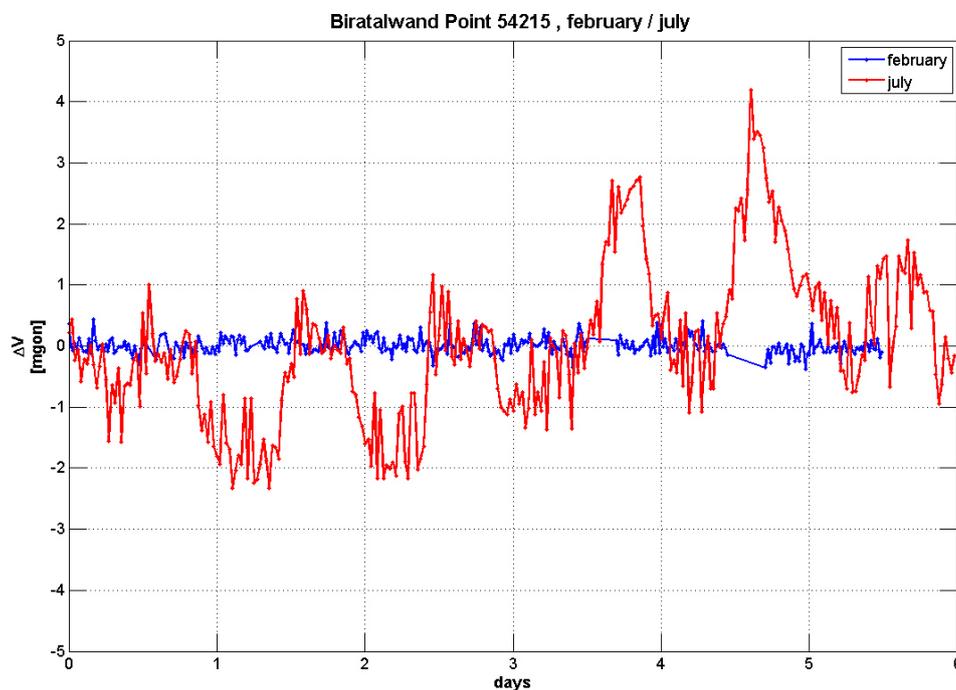


Abbildung 3-6: RL-Punkt 54215: Vertikalwinkelvariationen (korrigierte Messdaten) Februar-Juli

Da im Februar 2012 kein Wert für eine Vertikalwinkelkorrektur berechnet und somit nicht angebracht wurde, ist in der obigen Abbildung 3-6 lediglich die Positionierungsgenauigkeit des Messinstruments ersichtlich. Ab ungefähr Mitte April 2012 (siehe Tabelle 3-2) wurde jedoch eine solche Vertikalwinkelkorrektur durchgeführt, und in weiterer Folge wurden deutliche Änderungen von mehreren Milligon nach der Messung an die Beobachtungen angebracht.

Die Neigungsänderungen treten ebenso nicht mehr in derselben Größenordnung auf. Zu beachten ist, dass im Mai 2012 eine weitere Holzverbauung am Pfeiler 2010 zum Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung errichtet wurde, was die Verringerung der Neigungswertänderungen erklärt.

Obwohl die gemessenen Schrägdistanzwerte bereits um die atmosphärischen Einflüsse, deren Werte mittels in Leica GeoMoS, ermittelt wurden, korrigiert sind, weisen die Abbildungen 3-2 bis 3-4 auf eine Korrelation zwischen den Temperaturänderungen und der Variation der Schrägdistanzwerte hin. Ebenso zeigen die Änderungen des Vertikalwinkels ein ähnliches Verhalten wie die Temperaturvariationen (Abbildung 3-4).

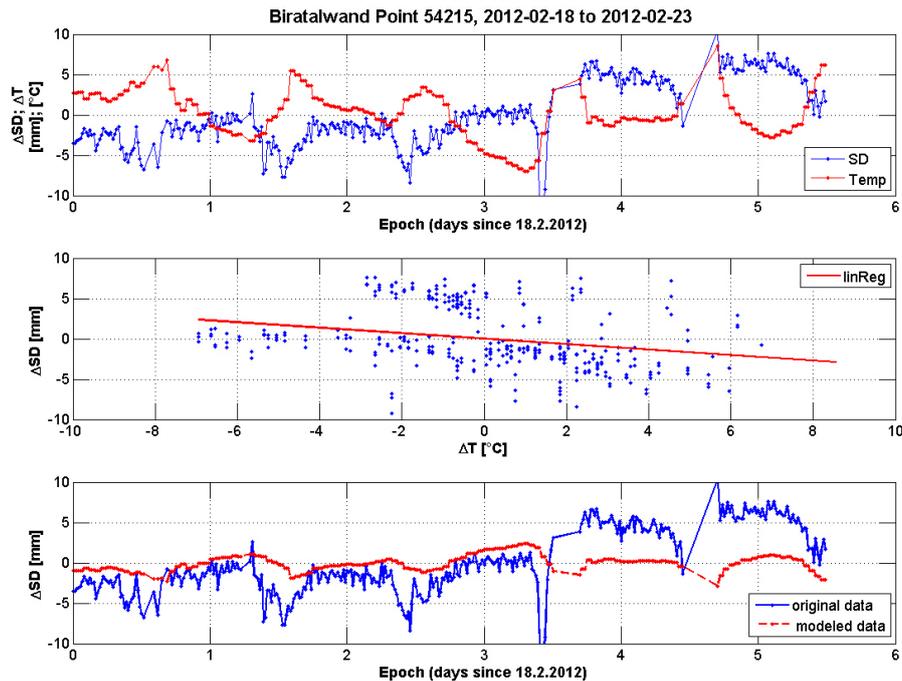


Abbildung 3-7: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Februar 2012

Während die Änderungen der Distanzmesswerte im Februar 2012 nur eine geringe negative Korrelation aufweisen (siehe Abbildung 3-7) sind jene im April 2012 schon deutlicher zu erkennen (siehe Abbildung 3-8). Dargestellt sind in den zuvor erwähnten Abbildungen zum einen die bereits um den atmosphärischen Einfluss (PPM) korrigierten und um deren Mittelwert reduzierten Schrägdistanzvariationen und zum anderen die Temperaturänderungen (reduziert um arithmetisches Mittel). Weiters ist eine Gegenüberstellung dieser beiden Größen mit einer entsprechenden Regressionsgerade abgebildet. Mittels der Parameter (Offset und Steigung) dieser Geraden wird eine mögliche Änderung der Distanzwerte ausschließlich aufgrund der aufgezeichneten Temperaturänderungen nachmodelliert. Je stärker die beiden Datenreihen miteinander korrelieren desto besser passt sich der modellierte Einfluss der beobachteten Distanzwertvariationen an.

Betrachtet man Abbildung 3-8, so ist erkenntlich, dass die modellierten Variationen der Distanzwerte bereits ein ähnliches Verhalten wie die beobachtete Zeitreihe der Schrägdistanzwerte aufweisen. Ebenso sind bereits größere Temperaturänderungen im Tagesverlauf ersichtlich, welche sich auf die Messdaten auswirken.

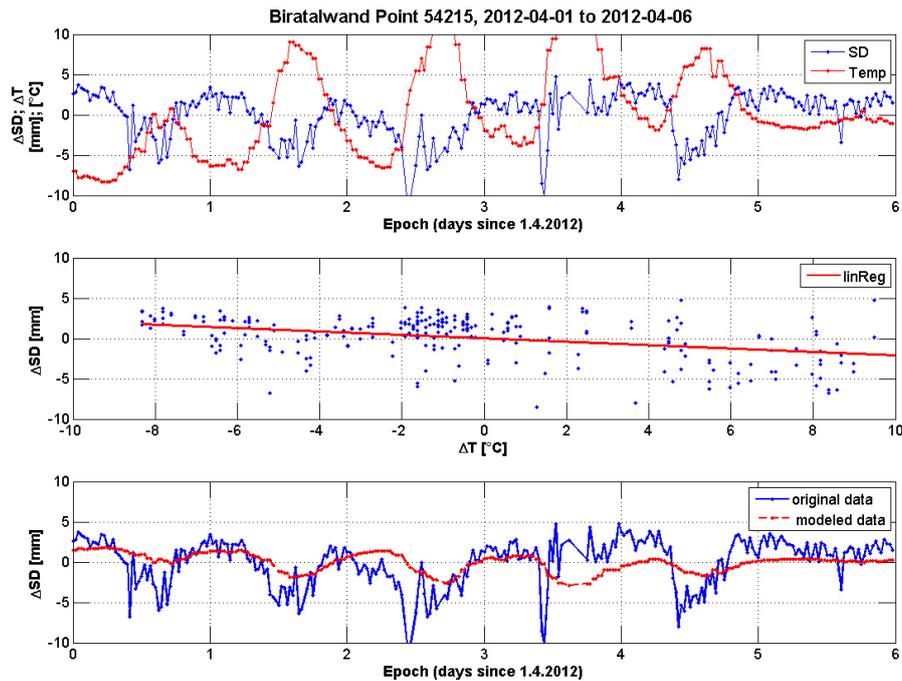


Abbildung 3-8: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen April 2012

Ein ähnliches Verhalten zeigt der reflektorlos beobachtete Punkt im Sommer (Juli) 2012. In Abbildung 3-9 ist eine negative Korrelation zwischen Temperatur- und Distanzwertänderung erkennbar. Dies spiegelt sich auch in der Modellierung mittels einer Regressionsgeraden und Temperaturänderung wieder, welche einen ähnlichen Verlauf und ähnlich große Amplituden wie die beobachtete Datenreihe wiedergibt.

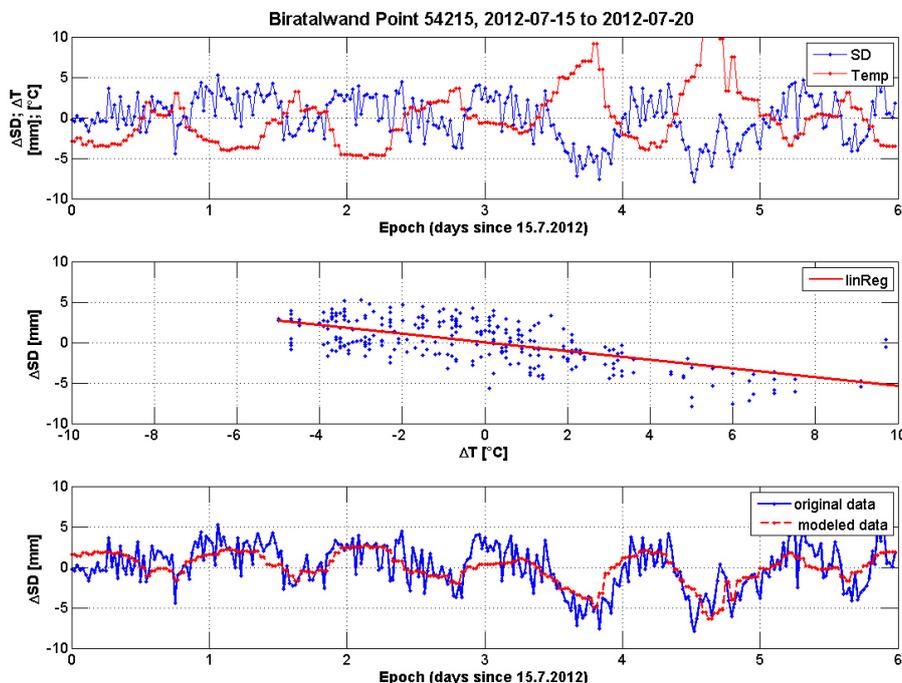


Abbildung 3-9: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Juli 2012

In den Abbildung 3-7 bis Abbildung 3-9 kann somit ein zumindest mittelbarer Einfluss des Temperaturverlaufs auf die Distanzwertänderung detektiert werden. Ein weiterer Parameter welcher

in Verbindung mit den Variationen der Schrägdistanzablesung gebracht werden kann war bereits in Abbildung 3-4 zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die Änderungen der Vertikalwinkelbeobachtung. Der mittels der über die Auswertesoftware Leica GeoMoS bestimmte Korrekturwert für den Vertikalwinkel („Vz-Korrektur“) soll den Einfluss der Refraktion auf die beobachtete Zenitdistanz bestimmen und somit entsprechend berücksichtigen.

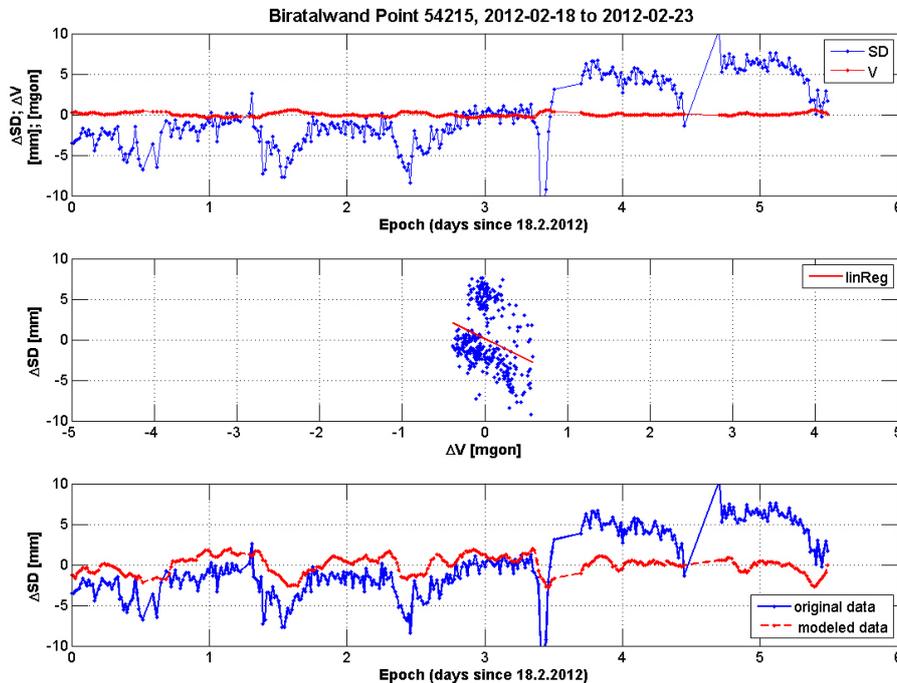


Abbildung 3-10: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Februar 2012

Da die Korrekturwerte für den Vertikalwinkel erst ab Mitte April 2012 bestimmt und berücksichtigt wurden wird in Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 eine solche Korrektur entsprechend aus den Aufzeichnungen zu einem stabilisierten Punkt berechnet. Die Ermittlung dieses Werts erfolgt analog zu Berechnung in Leica GeoMoS (siehe Abschnitt 2.2 Steuer- und Auswertesoftware „Leica GeoMoS“).

Die Variationen des Vertikalwinkels im Februar 2012 (siehe Abbildung 3-10) wirken sich nicht signifikant auf die Änderungen des Distanzwertes aus. Der nachmodellierte Korrekturwert bzw. Distanzwertänderungen zeigen geringere Schwankungen in der Zeitreihe als die beobachteten Daten.

Anders verhält sich jedoch die Korrelation in Abbildung 3-11 im April 2012. Hier wurde ebenfalls wie bei dem Datensatz im Februar 2012 die „Vz-Korrektur“ anhand der beobachteten Daten nacheditiert. In diesem Fall sind bereits Variationen der Zenitdistanz im „mgon“-Bereich ersichtlich. Ebenso passen sich die Form und der Verlauf der nachmodellierten Zeitreihe der Distanzvariationen an die aufgezeichneten Änderungen an, wobei noch etwaige Restabweichungen erkennbar sind.

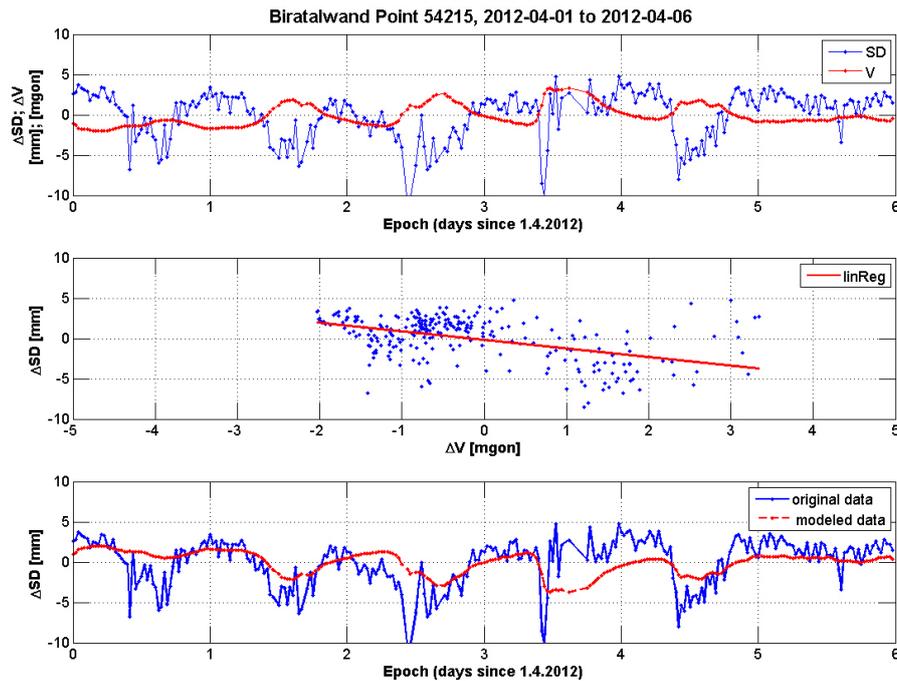


Abbildung 3-11: RL-Punkt 54215: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen April 2012

Da ab Mitte April 2012 der Korrekturwert des Vertikalwinkels im Messablauf der Überwachungsmessung mitinbegriffen war sind in Abbildung 3-12 die durch Leica GeoMoS rechnerisch korrigierten Zenitdistanzvariationen dargestellt. Auch hier ist eine negative Korrelation zwischen den beiden korrigierten Beobachtungsgrößen Schrägdistanz und Vertikalwinkel zu erkennen. Ebenso weist die modellierte Datenreihe der Distanzwertvariationen ein ähnliches Verhalten wie die beobachtete Zeitreihe auf.

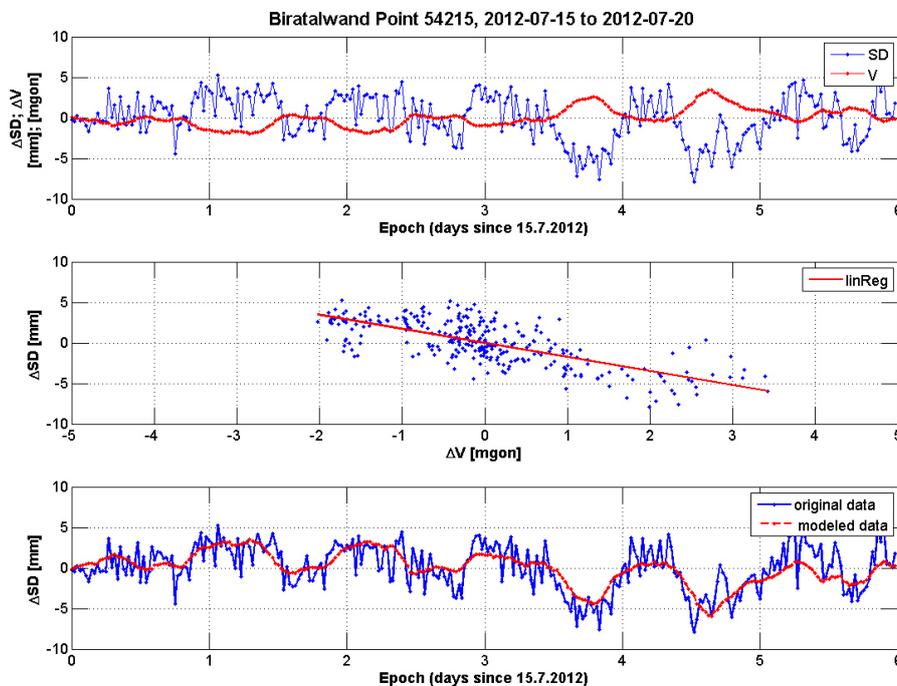


Abbildung 3-12: RL-Punkt 54216: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Juli 2012

Aus den letzten Abbildungen ist erkennbar, dass einerseits eine Korrelation der Temperatur und andererseits eine Verbindung der Schrägdistanzvariationen mit den Änderungen des Vertikalwinkelwertes besteht. Da die Distanzwerte jedoch bereits meteorologisch korrigiert wurden,

wirkt sich die Temperaturänderung mittelbar auf die Distanzwertänderungen aus. Mithilfe der Variationen des Vertikalwinkelwertes können die Schwankungen der Schrägdistanzwerte, vor Allem im Sommer, sehr gut nachmodelliert werden. In Abbildung 3-13 sind hierfür nochmals die Abhängigkeiten der Vertikalwinkeländerungen gegenüber den Schrägdistanzvariationen mehrerer reflektorloser Punkte dargestellt. Auffällig ist dabei, dass die Beobachtungen zweier dargestellter Punkte (54230, 54231) positiv miteinander korrelieren, während bei den restlichen angeführten Punkten eine negative Korrelation ermittelt wurde.

Somit kann zwar eine Abhängigkeit der Vertikalwinkeländerung bezüglich der Schrägdistanzwerte festgestellt werden, jedoch wird die Richtung und Größenordnung der Variationen von weiteren Parametern beeinflusst.

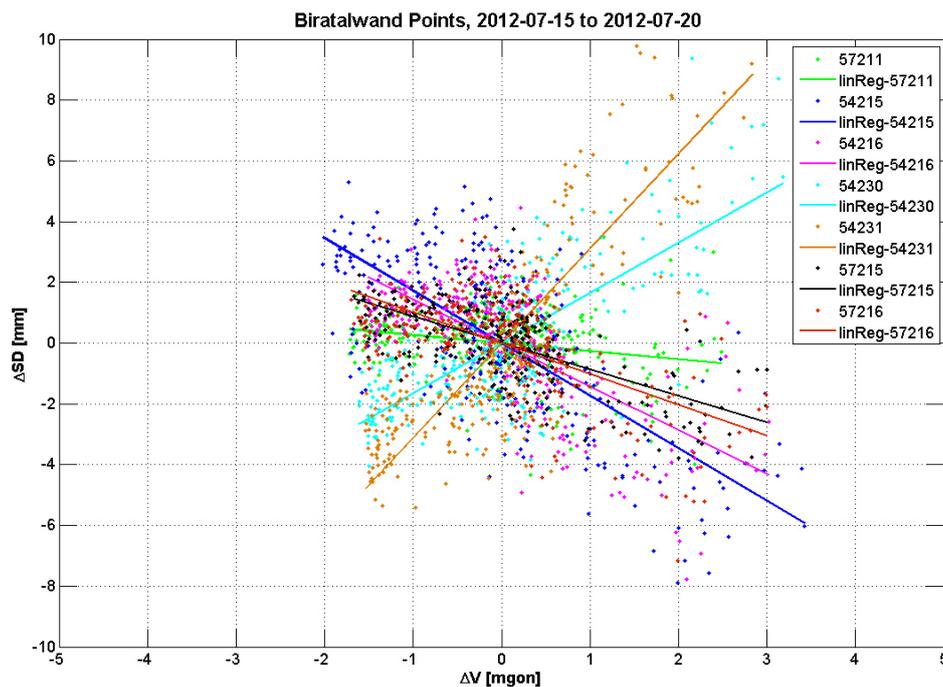


Abbildung 3-13: RL-Punkte: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen (Standpunkt 2010) - Juli 2012

3.1.2 Stabilisierte Messpunkte

Die beobachteten Punkte der Überwachungsmessung „Dürnstein“ waren in zwei unterschiedliche Punktgruppen gegliedert. Neben den reflektorlos eingemessenen Punkten wurden ebenso mittels Prismen in der Felswand stabilisierte Punkte mitbeobachtet. Diese dienten einerseits der Bestimmung der 3D-Verschiebung von Felsblöcken im Gefahrenbereich und andererseits der Kontrolle bzw. der Bestimmung von Korrekturparametern.

Im Gegensatz zu den reflektorlosen Punkten, welche vom nördlichen Standpunkt 2010 aus beobachtet wurden, weisen die meteorologisch korrigierten Schrägdistanzen in Abbildung 3-14 keine solchen Änderungen, wie die Distanzwerte in Abbildung 3-1 auf. Dargestellt (Abbildung 3-14) sind wiederum die um die atmosphärischen PPM korrigierten Schrägdistanzwerte für dieselben Tage in den Monaten Februar, April und Juli. Die Legende rechts von der Abbildung bezieht sich dabei auf die Variationen im Februar und April 2012, während sich die linke Legende auf die unterste Darstellung in Abbildung 3-14 auf den Zeitraum von Juli 2012 bezieht. Die Legenden unterscheiden sich, da aufgrund von festgestellten Bewegungen von Felsblöcken im Gefahrenbereich der Biratalwand eine

Sprengung Ende Juni 2012 vorgenommen wurde. Im Zuge dessen gingen einige Prismen verloren bzw. wurden neue gesetzt. Die Distanzwertvariationen zeigen weder im Frühjahr noch im Sommer signifikante Variationen.

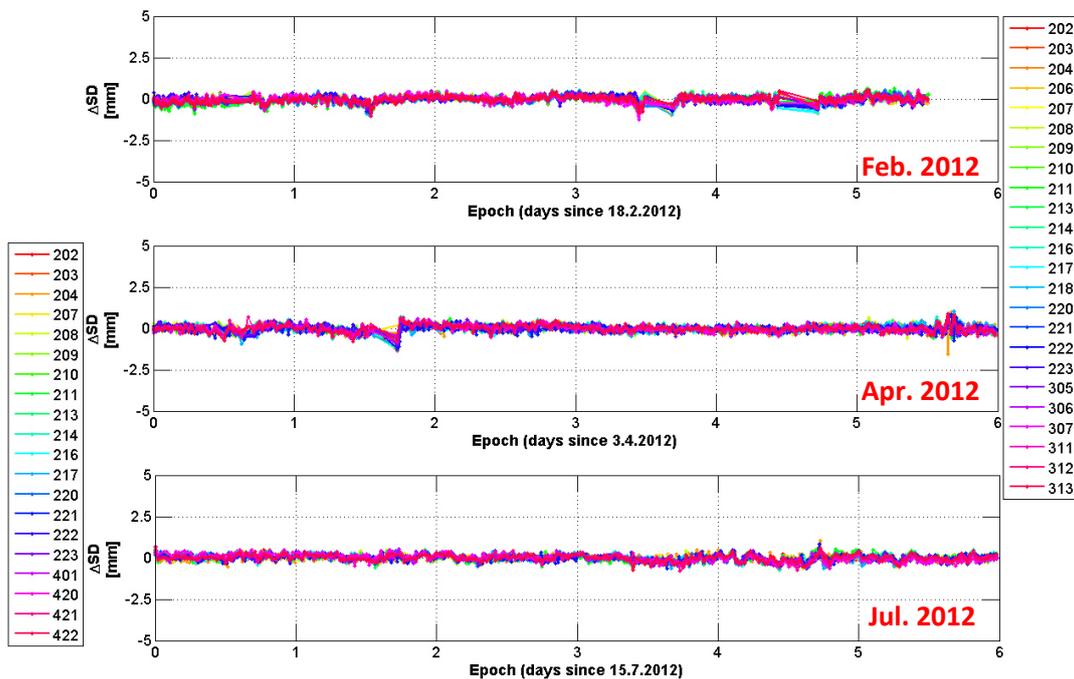


Abbildung 3-14: IR-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 2010

Auch bei Betrachtung der weiteren aufgezeichneten Messdaten eines stabilisierten Punktes (204) im Februar 2012, die in Abbildung 3-15 dargestellt sind, sind keine zyklischen Variationen, wie dies bei den Datenreihen der reflektorlosen Punkte der Fall war, detektierbar. Dargestellt sind wiederum die korrigierten Messgrößen sowie die absoluten Temperaturänderungen. Die Bestimmung der Neigungsebene des Standpunktes wird erst ab April 2012 aufgezeichnet und ist deshalb in Abbildung 3-15 nicht dargestellt.

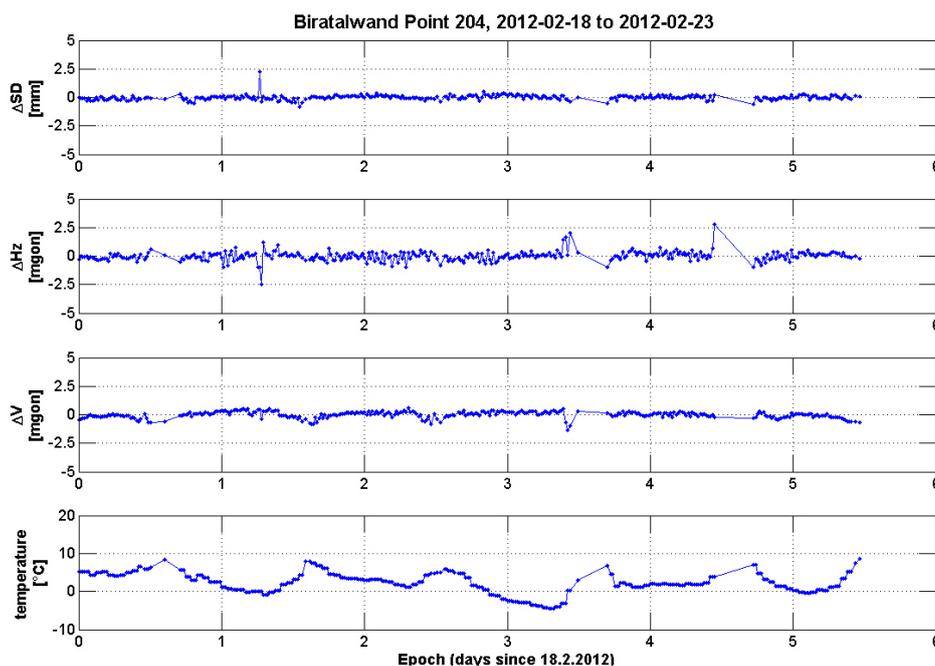


Abbildung 3-15: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012

In Abbildung 3-16 sind zyklische Schwankungen des Vertikalwinkelwertes ersichtlich. Diese erreichen Amplituden von mehreren Milligon. Durch die orangen Markierungen sind ein zeitgleiches bzw. zeitnahes Auftreten der Variationen in der Zenitdistanz mit den Temperaturänderungen sowie Schwankungen in der berechneten Neigungsebene erkennbar. Im Gegensatz zu den reflektorlosen Beobachtungen im Juli 2012 (siehe Abbildung 3-4) verhalten sich die Variationen des Vertikalwinkels invers zu jenen der Temperatur. Zu beachten ist, dass die Vz-Korrektur (siehe Abschnitt 2.2 Steuer- und Auswertesoftware „Leica GeoMoS“) erst ab Mitte April 2012 berechnet und in weiterer Folge an die Messdaten angebracht wurde. Dies geschah aufgrund der zuvor geschilderten Schwankungen der Zenitdistanzbeobachtung [AVT (2012)].

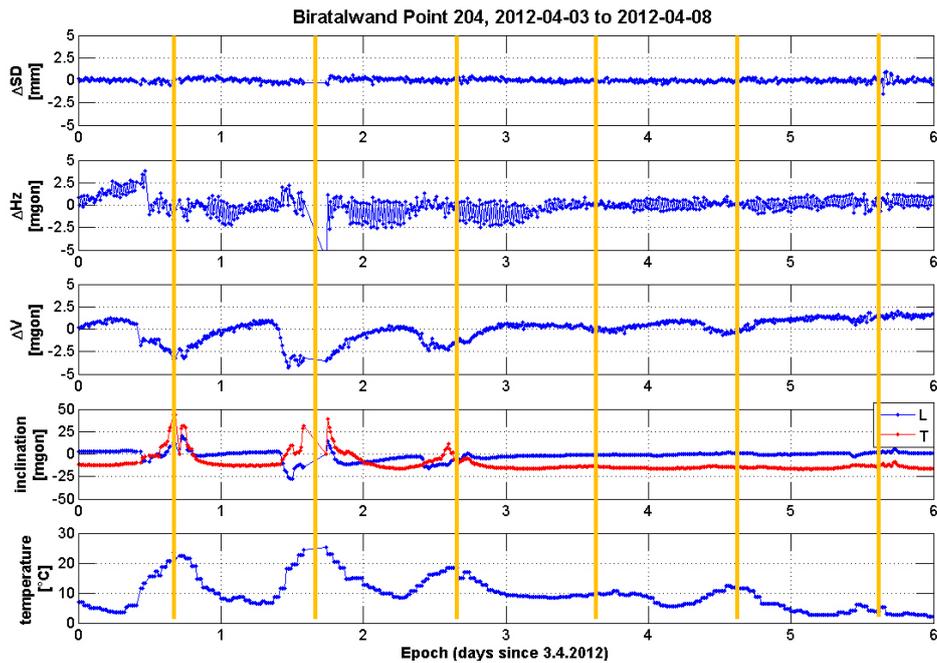


Abbildung 3-16: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012

Da dieser Korrekturwert ab Mitte April 2012 bestimmt und die Messdaten um ebendiesen Wert korrigiert wurden sind diese aufgetretenen Schwankungen bei den stabilisierten Punkten in weiterer Folge nicht mehr ersichtlich. Somit sind auch die detektierten Vertikalwinkelvariationen in Abbildung 3-17 nicht mehr erkennbar.

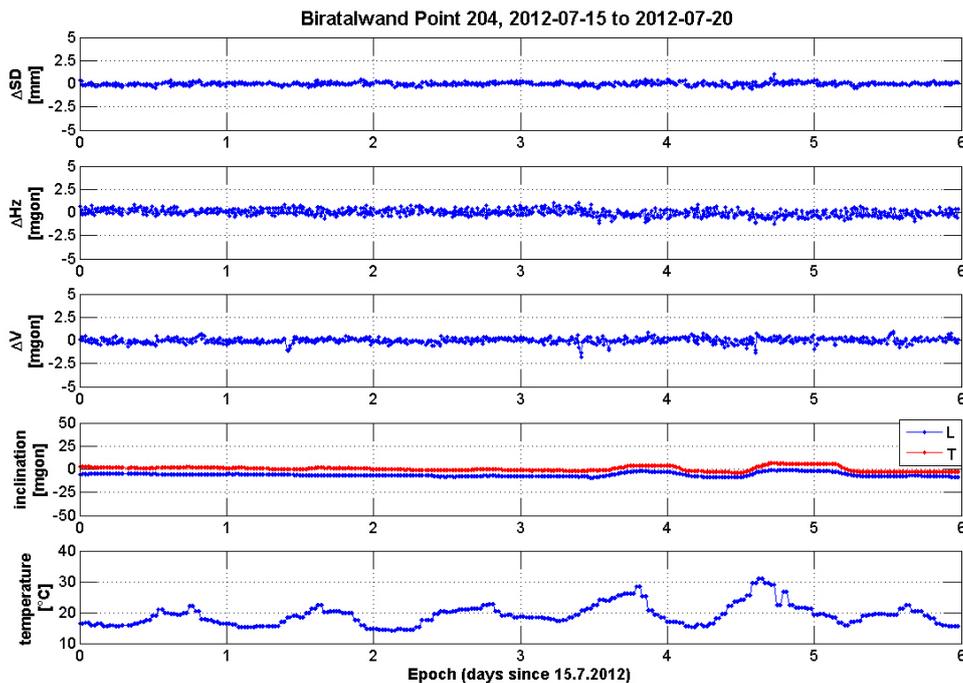


Abbildung 3-17: IR-Punkt 204: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012

Aufgrund der Tatsache, dass in Abbildung 3-14 keine signifikanten Variationen der Schrägdistanzwerte bei den beobachteten stabilisierten Punkten ersichtlich sind, wird eine Untersuchung, wie jene bei den reflektorlosen Punkten (Gegenüberstellung Schrägdistanzvariation zu weiteren Messdatenvariationen), nicht vorgenommen.

3.2 Effekte: südlicher Standpunkt 1000

Der südliche Standpunkt unterscheidet sich hinsichtlich der aufgezeichneten Punkte sowie bezüglich des Standortes vom nördlichen. Der Pfeiler 1000 befindet sich auf einer Erhöhung in der Nähe des Tunnelportals der Donauuferbahn. Eine detaillierte Standpunktsbeschreibung ist dem Abschnitt 2.1 „Aufnahmekonfiguration“ zu entnehmen.

3.2.1 Reflektorlose Messpunkte

Beim südlichen Standpunkt 1000 wurden ebenso wie beim Pfeiler 2010 sowohl reflektorlose als auch mittels Prismen stabilisierte Punkte beobachtet.

In Abbildung 3-18 sind die Schrägdistanzvariationen in den drei Zeiträumen Mitte Februar, Anfang April und Mitte Juli des Jahres 2012 dargestellt. Dabei sind signifikante Schwankungen der Schrägdistanzwerte in allen drei Zeiträumen ersichtlich. Jedoch unterscheiden sich die Amplituden der zyklischen Variationen. Während im Juli 2012 Änderungen der Distanzwerte von fünf bis sechs Millimetern aufgezeichnet wurden, beträgt die Spannweite im Februar 2012 einen Zentimeter und mehr. Auch die Schwankungen der Messwerte der verschiedenen reflektorlos beobachteten Punkte zeigen zum Teil unterschiedlich große Amplituden.

Am Pfeiler selbst wurden laut den Berichten über die Überwachungsmessung Biratalwand [AVT (2012)] keine nennenswerten Änderungen während der Beobachtungszeit, hinsichtlich Verbauung oder Ähnlichem, durchgeführt.

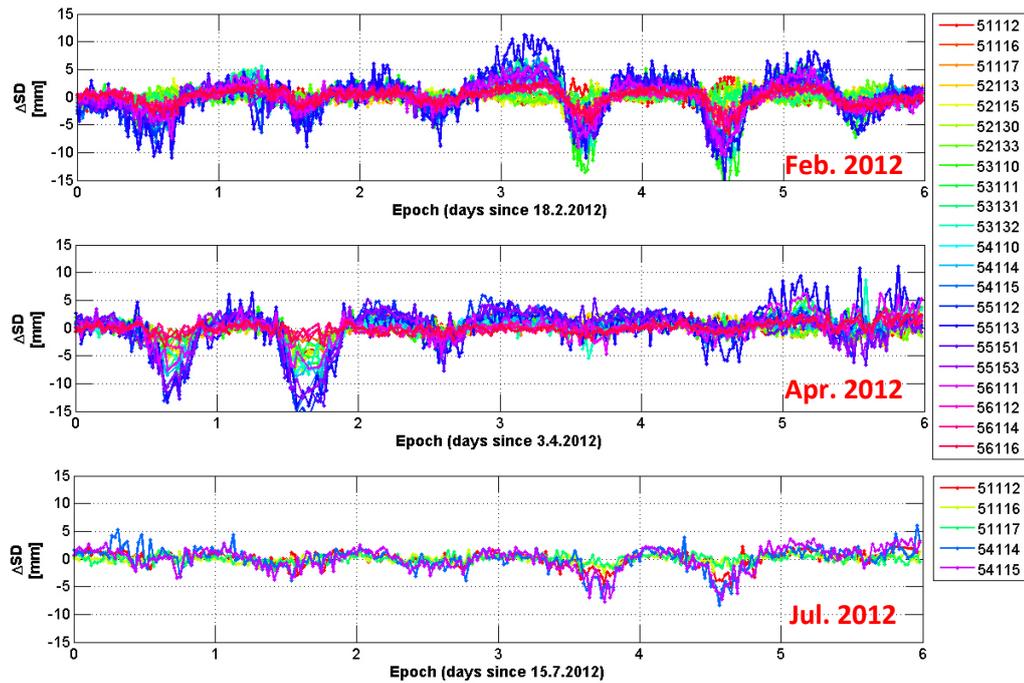


Abbildung 3-18: RL-Distanzwertvariationen Standpunkt 1000

Bei Betrachtung der aufgezeichneten Datenreihen eines reflektorlosen Punktes (54114) in Abbildung 3-19 fällt auf, dass sich bei den Messdaten im Februar 2012 lediglich der beobachtete Wert der Schrägdistanzen ändert, während die Datenreihen der Horizontalrichtung sowie des Vertikalwinkels keine Variationen erkennen lassen. Die Messdaten ähneln den reflektorlosen Beobachtungen, die vom nördlichen Standpunkt 2010 aus durchgeführt wurden (siehe Abbildung 3-2). Zu sehen ist abermals, dass sich die Schwankungen in den Zeitreihen der Schrägdistanzwerte und Temperaturwerte gegengleich verhalten, und somit negativ korreliert sind.

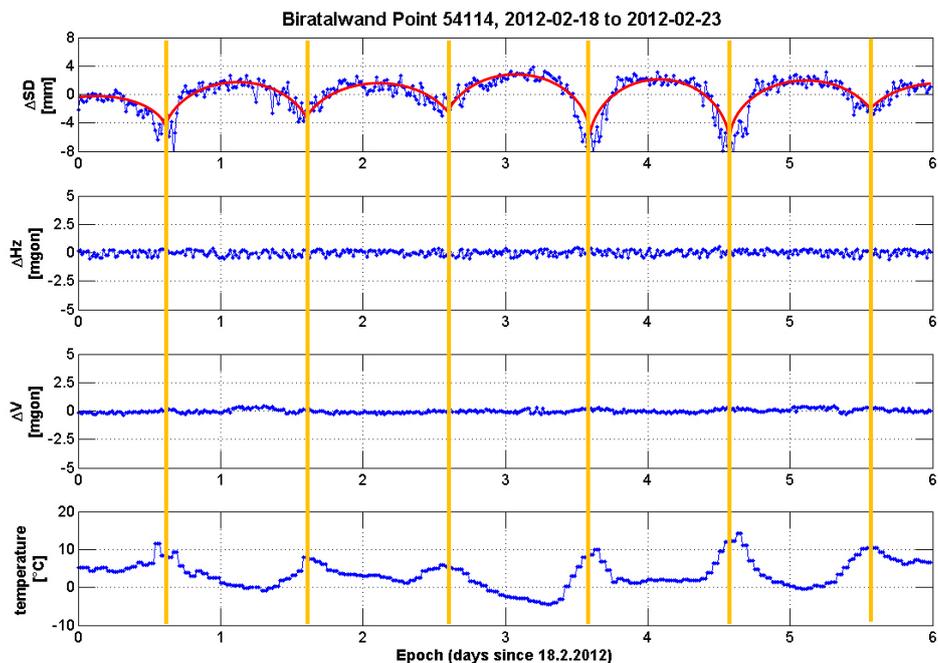


Abbildung 3-19: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012

Die Variationen der Schrägdistanzwerte sind auch in Abbildung 3-20 bei Messdatenaufzeichnungen Anfang April 2012 erkennbar. In den Zeitreihen der Richtungs- und Winkelmessungen sind dabei keine Schwankungen erkennbar. Weiters sind die Neigungswerte der Absolutneigung des Pfeilers in der zuvor erwähnten Abbildung ersichtlich. Auch diese weisen Änderungen zeitgleich bzw. zeitnah mit den Temperaturänderungen auf. An Tagen mit geringeren Schwankungen der Temperatur wurden geringere Variationen in den Schrägdistanzwerten sowie Neigungswerten verzeichnet.

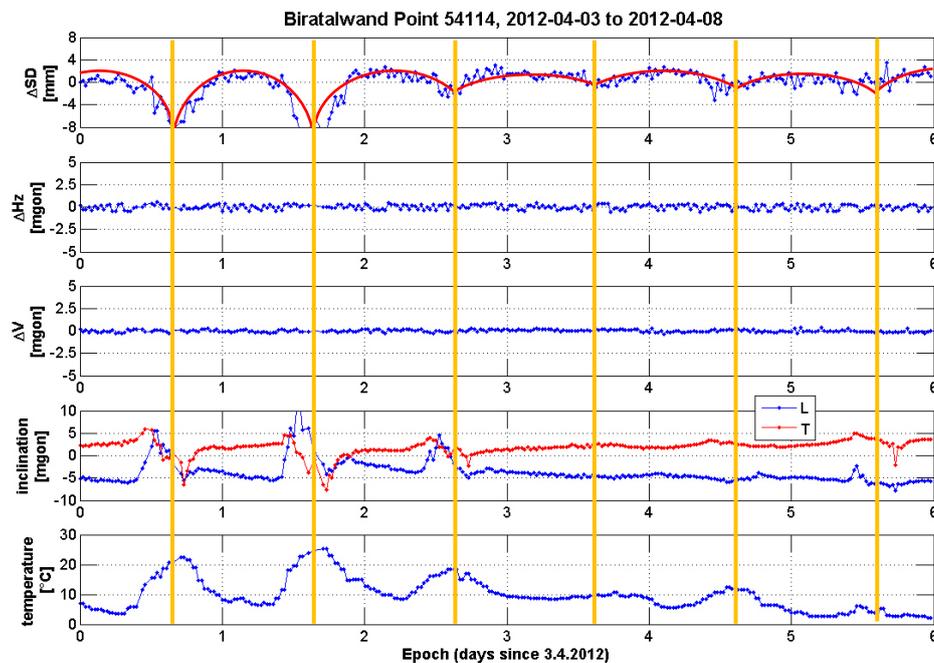


Abbildung 3-20: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012

Auch die Messdaten im Juli 2012 zeigen ein ähnliches Verhalten (siehe Abbildung 3-21). Zu beachten ist, dass im Juli 2012 verglichen mit Abbildung 3-4, in der die Messdatenreihen von einem reflektorlosen Punkt vom nördlichen Standpunkt aus dargestellt sind, keine Variationen in den Vertikalwinkelwerten auftreten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass am Standpunkt 1000 während des gesamten Beobachtungszeitraumes der Überwachungsmessung Biratalwand Vertikalwinkelkorrekturwerte (Vz-Korrektur: siehe Abschnitt 2.2) weder ermittelt noch angebracht wurden.

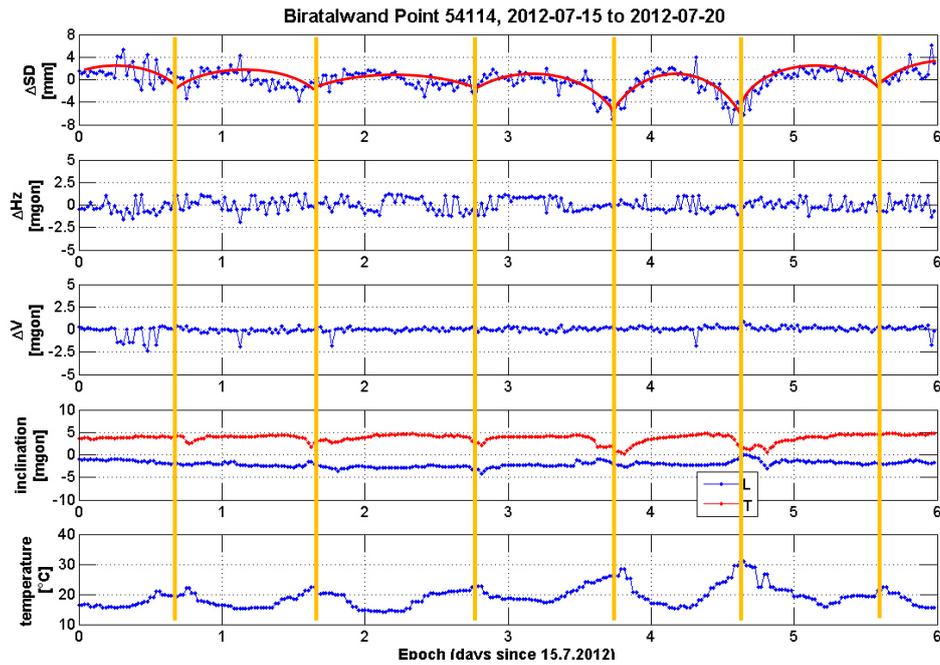


Abbildung 3-21: RL-Punkt 54114: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012

Wie die Abbildungen bezüglich des nördlichen Standpunktes 2010 zeigen auch die Messdaten in Abbildung 3-19 bis Abbildung 3-21, dass trotz der bereits durchgeführten, meteorologischen Korrektur durch die Software Leica GeoMoS eine Korrelation der Distanzwertänderungen mit der Temperaturänderung besteht.

Betrachtet man die Abbildung 3-22 werden die Datenreihen im Zeitraum Mitte Februar 2012 der Temperaturwerte und jener der Schrägdistanzen gegeneinander dargestellt. Mittels der linearen Regression dieser Gegenüberstellung werden mögliche Distanzwertvariationen simuliert und eine entsprechende Zeitreihe nachmodelliert.

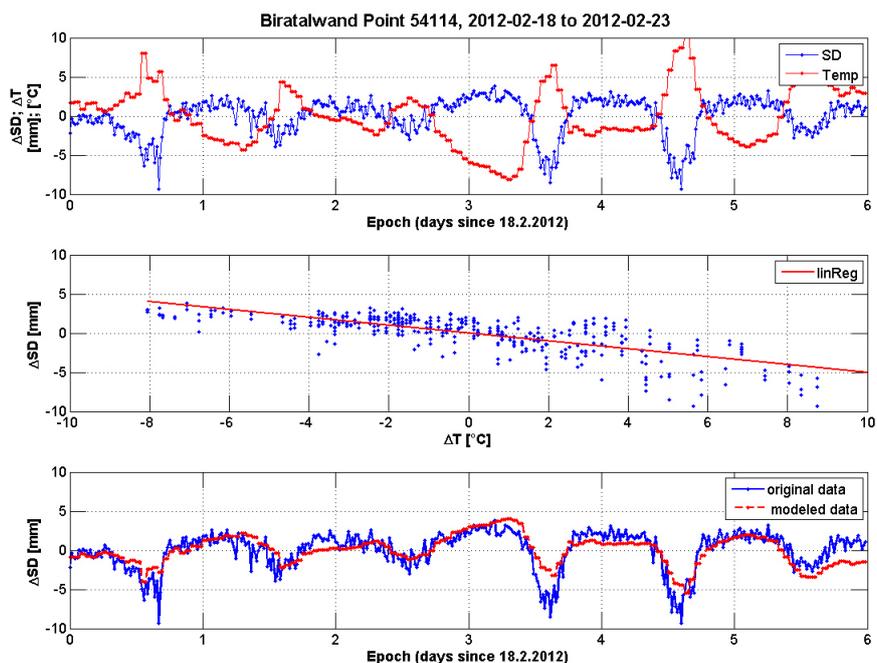


Abbildung 3-22: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Februar 2012

Die beiden Datenreihen weisen eine negative Korrelation auf, wobei sich das Modell der Distanzwertänderungen der Form des aufgezeichneten Datensatzes anpasst. Abweichungen von ein paar Millimetern sind jedoch noch erkennbar.

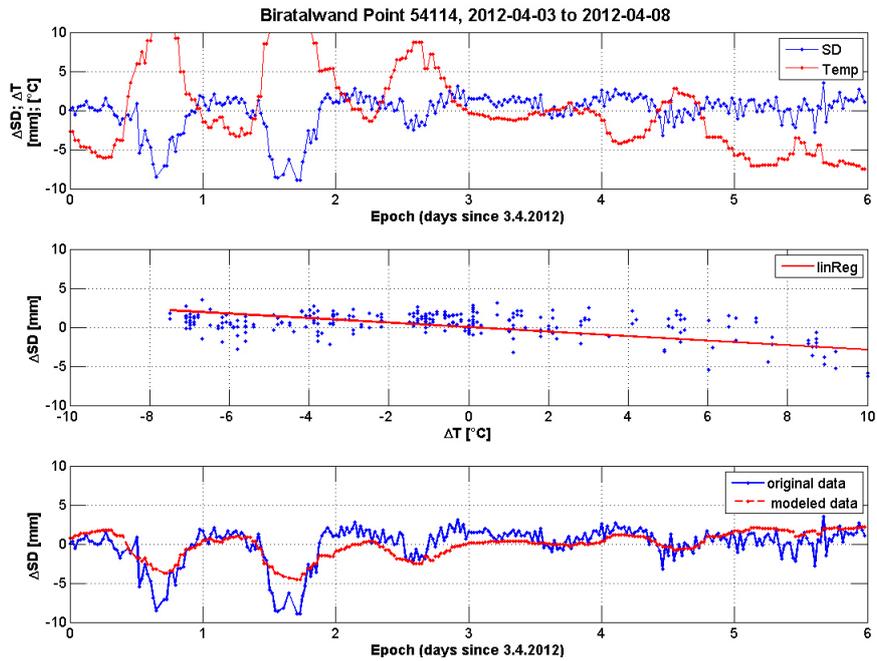


Abbildung 3-23: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen April 2012

Auch die Gegenüberstellungen sowie Nachmodellierung der Distanzwertänderungen in den Zeiträumen April 2012 in Abbildung 3-23 im Juli 2012 in Abbildung 3-24 lassen auf eine negative Korrelation zwischen Temperatur und Schrägdistanzwert schließen.

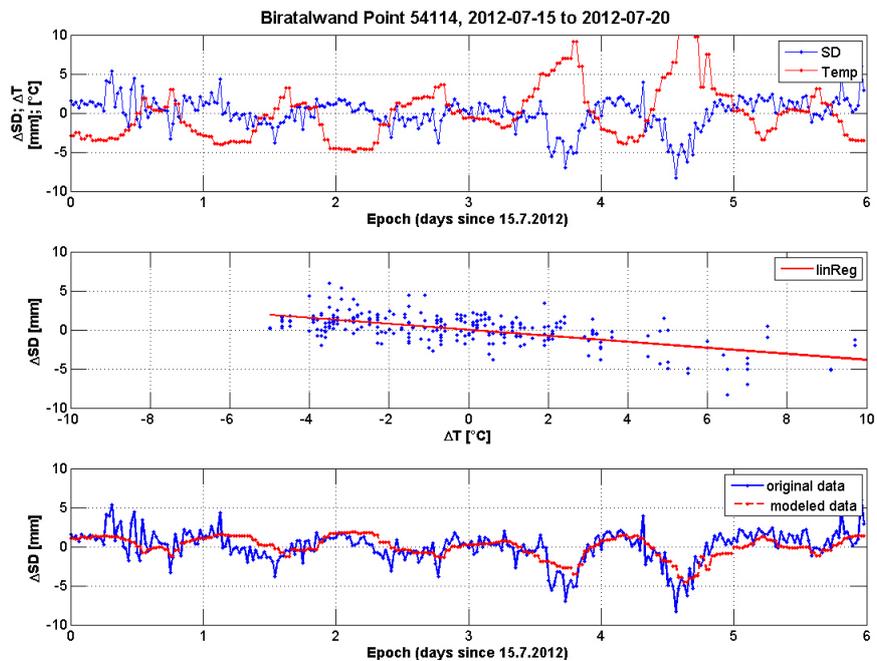


Abbildung 3-24: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Temperaturänderungen Juli 2012

Im Fall des nördlichen Standpunktes wurde bei der Analyse auch eine mögliche Abhängigkeit des Vertikalwinkels von den Distanzwertänderungen untersucht. Dies war möglich, da im Fall der Datenreihen vom Pfeiler 2010 eine sogenannte Vz-Korrektur bestimmt wurde. Am Standpunkt 1000 hingegen wurde dieser Wert jedoch nicht ermittelt, weswegen in Abbildung 3-19 bis Abbildung 3-21 keine zyklischen Variationen der Zenitdistanz erkennbar sind. Da jedoch bekannt ist, wie dieser Wert durch die Software Leica GeoMoS bestimmt wird (siehe Abschnitt 2.2) wird der Korrekturwert entsprechend nachmodelliert und an die Datenreihen angebracht. Hierfür werden mögliche Variationen des Vertikalwinkels bei einer Messung zu einem als stabil angenommenen Prisma (115) während des gleichen Zeitraumes als Refraktionseinfluss deklariert und mit dem entsprechenden Vorzeichen an die beobachteten Zenitdistanzen rechnerisch angebracht.

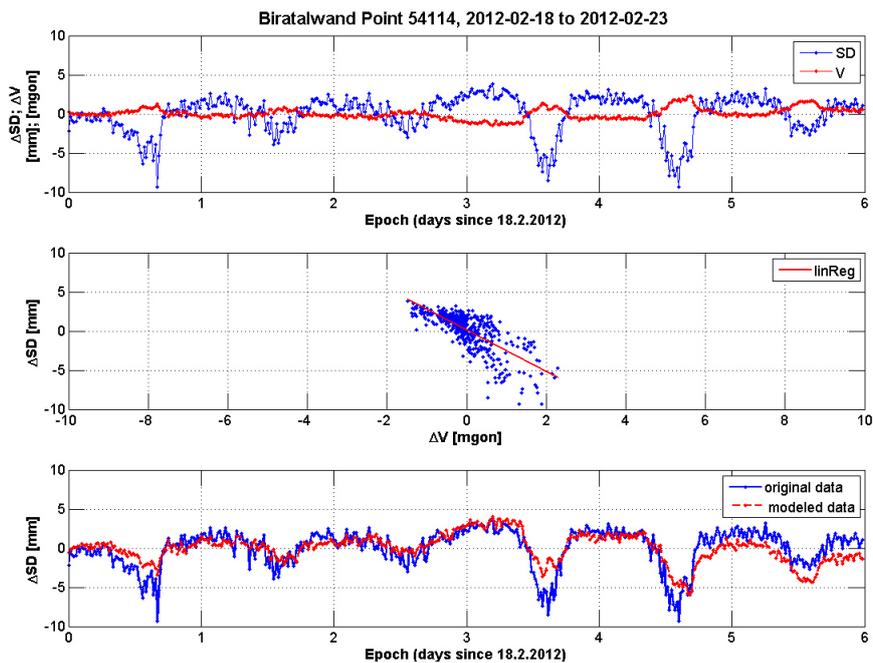


Abbildung 3-25: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Februar 2012

In Abbildung 3-25 sind diese berechneten Variationen des Vertikalwinkels an die beobachteten Daten angebracht (Abbildung 3-25, „oben“). Zu erkennen sind geringe Schwankungen im niedrigen Milligon-Bereich. Diese verhalten sich jedoch invers zu den Änderungen der Schrägdistanzen. In Abbildung 3-25 (Mitte) sind die dargestellten Zeitreihen der Zenitdistanzen und Schrägdistanzwerte gegenübergestellt und weisen ebenfalls eine negative Korrelation auf wobei geringe Vertikalwinkeländerungen (± 1 mgon) große Distanzwertvariationen (± 5 mm) nach sich ziehen.

Eine Nachbildung dieser Distanzwerte durch ein lineares Modell ist in Abbildung 3-25 (unten) dargestellt. Die Änderungen der Distanzwerte können gemäß dem aufgezeichneten Verhalten aus den rechnerisch angebrachten Vertikalwinkelvariationen nachgestellt werden. Doch auch in diesem Fall sind Restabweichungen im Millimeterbereich ersichtlich.

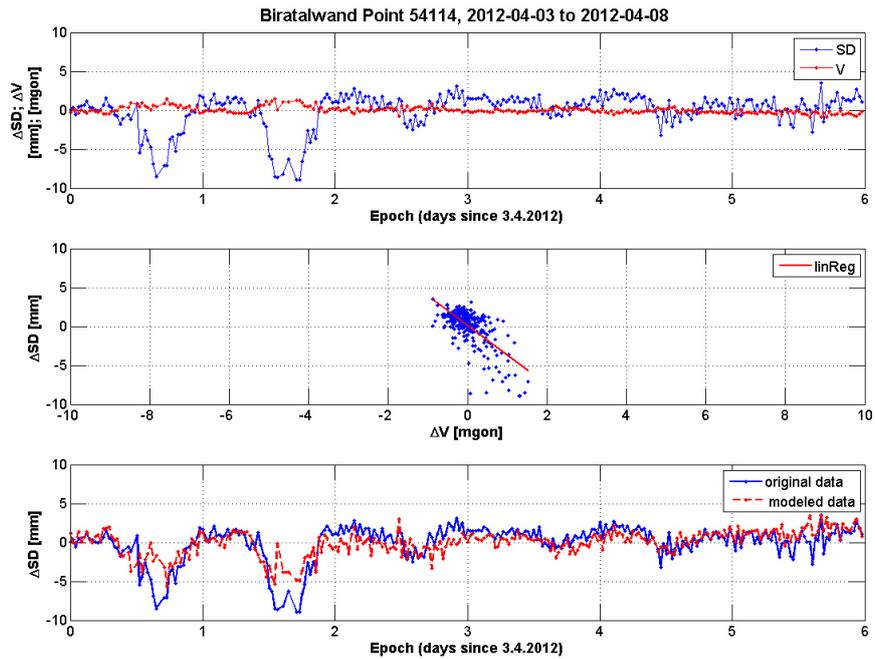


Abbildung 3-26: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen April 2012

Sowohl die Zeitreihen im April 2012 (Abbildung 3-26) als auch jene im Juli 2012 (Abbildung 3-27) zeigen eine negative Korrelation zwischen den berechneten Vertikalwinkelvariationen und den beobachteten Distanzwertänderungen. Hierbei passt sich das Modell in Abbildung 3-26 (unten) bei den geringeren Schrägdistanzwertschwankungen (wenige Millimeter) gut an, bei den größeren Änderungen (> 5 mm) weicht es jedoch von der beobachteten Zeitreihe stärker ab. Auch in Abbildung 3-27 ist dieses Verhalten ersichtlich.

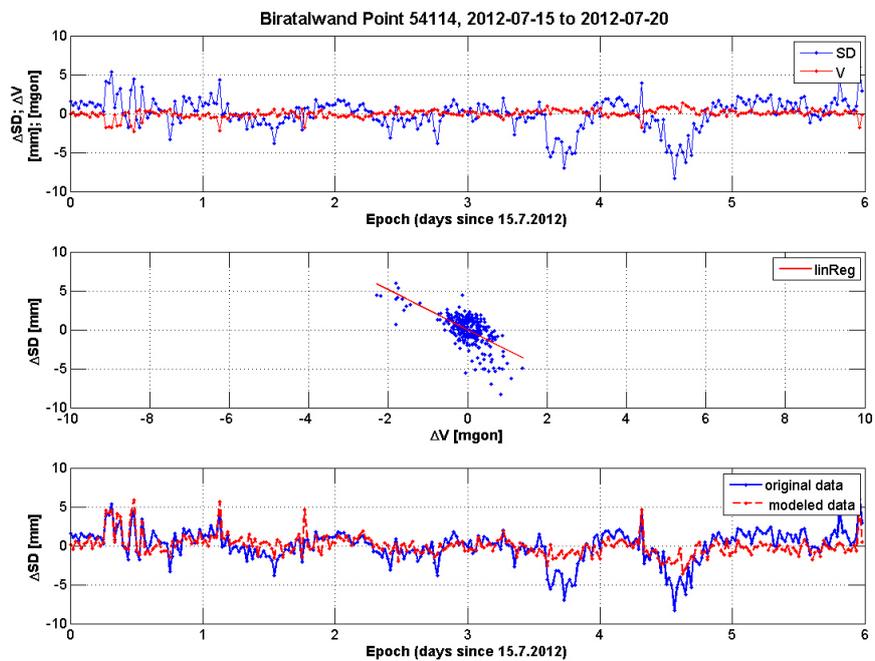


Abbildung 3-27: RL-Punkt 54114: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen Juli 2012

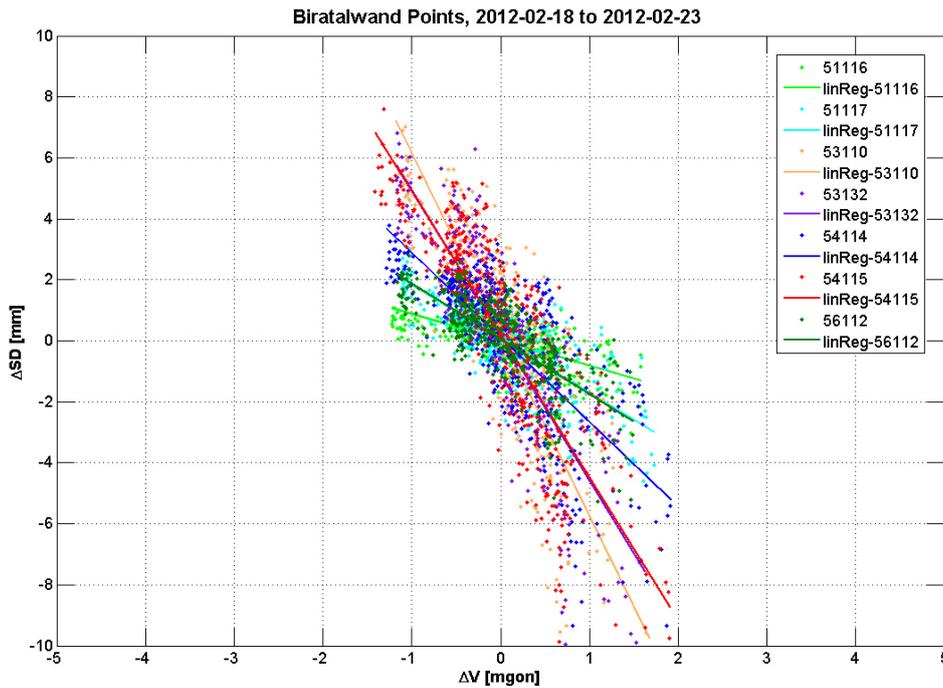


Abbildung 3-28: RL-Punkte: Schrägdistanzvariationen vs. Vertikalwinkeländerungen (Standpunkt 1000) - Februar 2012

Aus der Gegenüberstellung der berechneten Vertikalwinkelvariationen mit den Veränderungen der Schrägdistanzwerte (Abbildung 3-28) ist eine negative Korrelation der beiden Beobachtungsgrößen erkennbar. Jedoch ist ebenso ersichtlich, dass neben den Zenitdistanzänderungen weitere Parameter, welche vor allem die Größe der Schrägdistanzvariationen beeinflussen, vorhanden sein müssen.

3.2.2 Stabilisierte Messpunkte

Vom südlichen Standpunkt aus wurden ebenfalls mehrere mittels Prismen stabilisierte Punkte beobachtet. Neben Prismen im Gefahrenbereich sind ebenso welche im südlichen Kontrollbereich eingemessen worden (siehe Abschnitt 2.1 „Aufnahmekonfiguration“).

Aufgrund einer Ende Juni durchgeführten Sprengung sind hierbei die meisten Prismen im Gefahrenbereich verloren gegangen, jedoch wurden in diesem Abschnitt der Felswand nach dem Ende der Sprengarbeiten neue Punkte gesetzt.

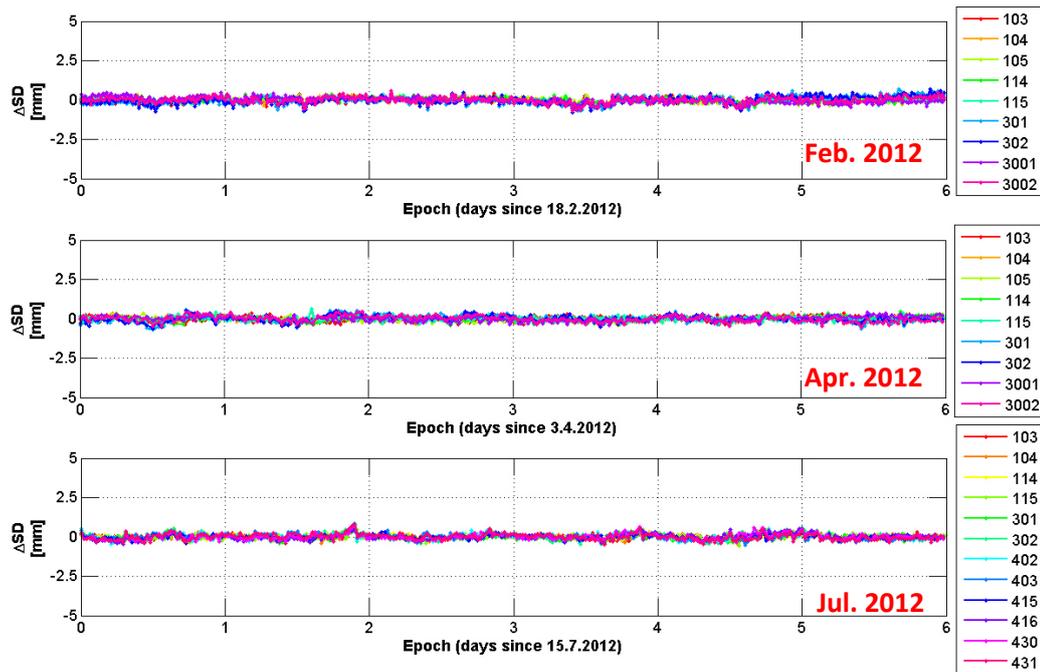


Abbildung 3-29: IR-Distanzwertvariationen (meteorologisch korrigiert) Standpunkt 1000

In Abbildung 3-29 sind wiederum die meteorologisch korrigierten Schrägdistanzvariationen zu den drei Zeiträumen im Februar, April und Juli 2012 dargestellt. In allen drei Zeitspannen befinden sich die Änderungen < 1 mm. Somit sind, im Gegensatz zu den reflektorlos gemessenen Punkten, keine signifikanten Variationen erkennbar.

Betrachtet man in Abbildung 3-30 die aufgezeichneten Messdaten eines repräsentativen Punktes (115) vom Februar 2012 so sind zwar keine Variationen der Schrägdistanzwerte zu erkennen, jedoch zeigen sich Änderungen der beobachteten Zenitdistanz.

Während bei den reflektorlos beobachteten Punkten keine derartigen Schwankungen erkannt werden können (siehe Abbildung 3-19), sind in der erwähnten Abbildung Änderungen des Vertikalwinkels im Milligon-Bereich ersichtlich. Diese verhalten sich, wie dies bereits beim nördlichen Standpunkt erkannt werden konnte, invers zu den aufgenommenen Temperaturvariationen im entsprechenden Zeitraum.

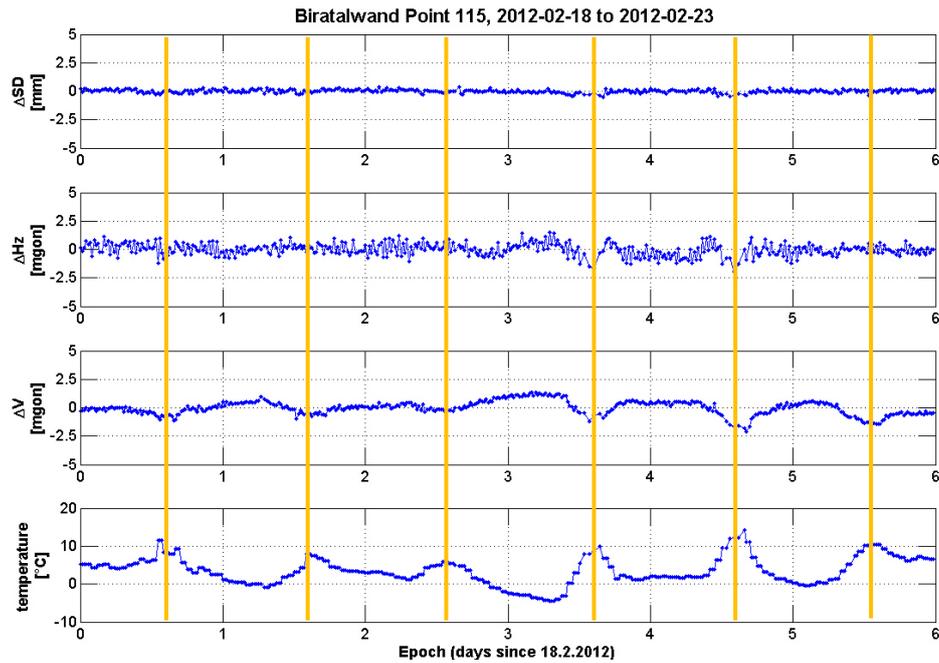


Abbildung 3-30: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Februar 2012

Ähnliche Variationen der Zenitdistanz des stabilisierten Punktes 115 sind im April 2012 (siehe Abbildung 3-31) ersichtlich. Diese fallen hinsichtlich der Amplituden geringer aus als noch im Februar desselben Jahres. Weiters werden die Schwankungen in den Vertikalwinkelmessungen geringer, sobald die Änderungen der Umgebungstemperaturwerte kleiner (wenige °C) werden.

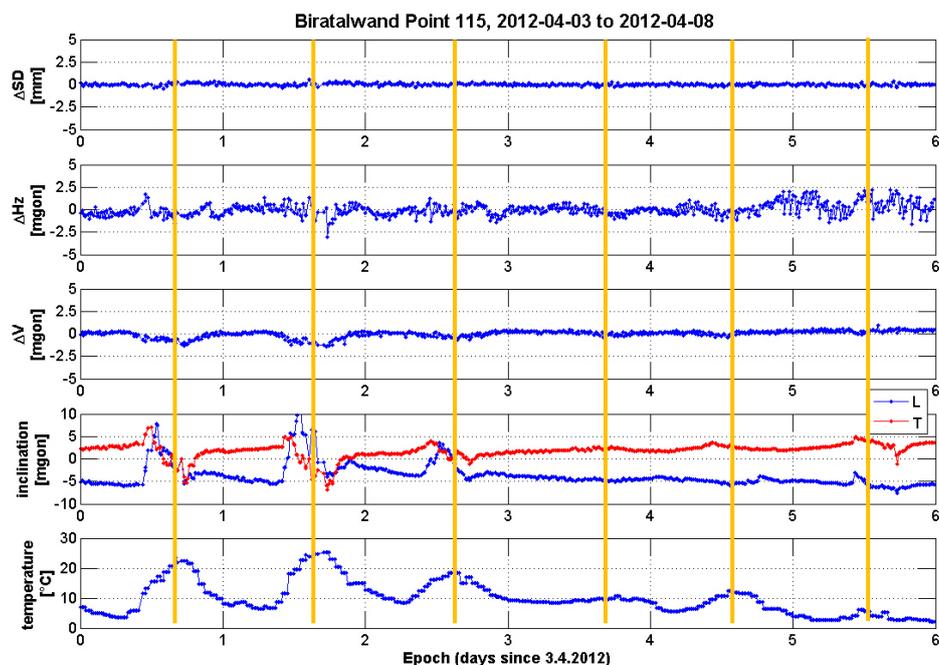


Abbildung 3-31: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) April 2012

Betrachtet man hierbei jedoch die beobachteten Messdaten vom Juli 2012, so sind auch bei stärkeren Temperaturänderungen (> 15°C) keine Variationen in den Datenreihen ersichtlich. Ebenso erreicht die bestimmte Neigungsebene in Abbildung 3-32 geringere Schwankungsbreiten bei einem Temperaturanstieg als noch im April 2012.

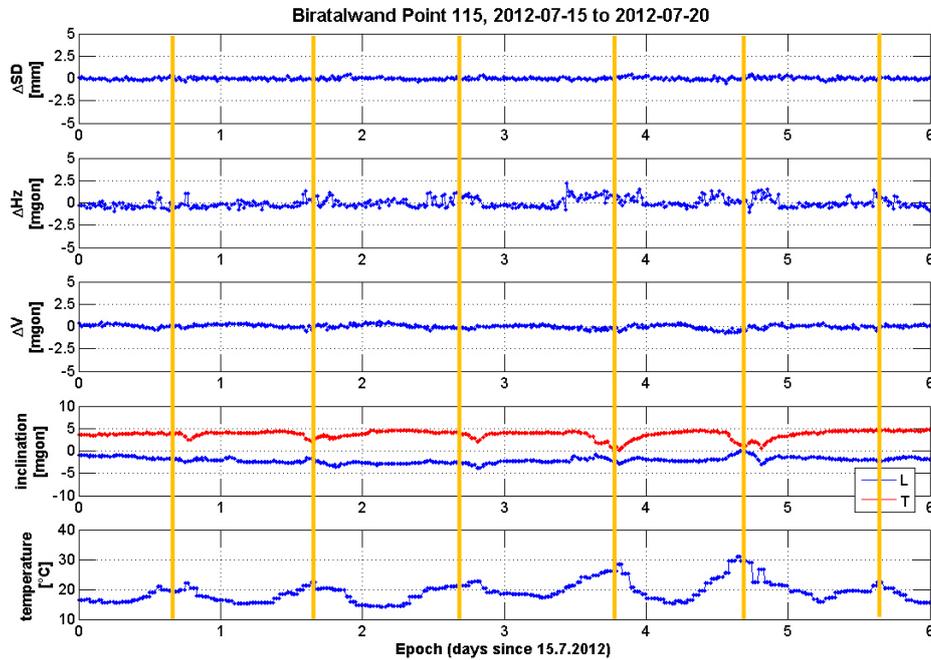


Abbildung 3-32: IR-Punkt 115: Messdatenvariationen (korrigierte Messdaten) Juli 2012

Da in Abbildung 3-30 bis Abbildung 3-32 keine signifikanten Variationen in den Schrägdistanzwerten ersichtlich sind werden die Untersuchungen der Abhängigkeiten einzelner Messdaten von den Distanzwerten, wie dies bei den reflektorlosen Punkten der Fall war, nicht durchgeführt.

3.3 Überblick: Datenanalyse

Hinsichtlich der ersten Analyse der vorhandenen Messdaten der Überwachungsmessung Biratalwand können bereits Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zwischen den einzelnen Zeiträumen, Standpunkten und Punktgruppen festgestellt werden. Ein erster Überblick über die aufgetretenen Effekte wird in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 gegeben.

Tabelle 3-3: Effekte Standpunkt 2010

Punktgruppe	Mitte Februar 2012		Anfang April 2012		Mitte Juli 2012	
	RL	IR	RL	IR	RL	IR
Variationen / Einstellungen						
Spannweite: ΔSD [mm]	~ 10	≤ 1	> 10	≤ 1	~ 10	≤ 1
Spannweite: ΔV [mgon]	~ 0.3	~ 1	~ 0.4	~ 5	~ 5 – 6	≤ 1
Spannweite: L,T [mgon]	Keine Daten	Keine Daten	> 30	> 30	< 10	< 10
Periodendauer [h]	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24
Korrektur (Orientierung)	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN
Korrektur (Vz)	AUS	AUS	AUS	AUS	EIN	EIN
Korrektur (meteo. Distanz)	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN
Erweiterter Witterungsschutz (Holzverbauung)	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA

In den Tabellen sind die Spannweiten der beobachteten Variationen der Messwerte aufgelistet. Es gilt zu beachten, dass die Zahlenwerte den bereits korrigierten Datenreihen entnommen wurden. Etwaige Korrekturparameter, sofern diese während der Überwachungsmessung bestimmt wurden, sind bereits entsprechend angepasst.

Tabelle 3-4: Effekte Standpunkt 1000

Punktgruppe	Mitte Februar 2012		Anfang April 2012		Mitte Juli 2012	
	RL	IR	RL	IR	RL	IR
Variationen / Einstellungen						
Spannweite: ΔSD [mm]	≤ 20	≤ 1	≤ 15	≤ 1	≤ 10	≤ 1
Spannweite: ΔV [mgon]	~ 0.4	~3 – 3.5	~ 0.3	~ 2 – 3	~ 0.4	~ 1
Spannweite: L,T [mgon]	Keine Daten	Keine Daten	~ 20	~ 20	~ 5	~ 5
Periodendauer [h]	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24	~ 24
Korrektur (Orientierung)	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN
Korrektur (Vz)	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS
Korrektur (meteo. Distanz)	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN
Erweiterter Witterungsschutz (Holzverbauung)	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	AUS	AUS

An beiden Standpunkten treten signifikante Schrägdistanzvariationen auf, jedoch verhalten sich die weiteren Parameter nicht zwingend gleich. Die Gründe hierfür ergeben sich einerseits aufgrund der unterschiedlichen Konfiguration der Messwertverarbeitung (z.B. Vz-Korrektur bei Standpunkt 2010) und andererseits aufgrund der unterschiedlichen Standorteigenschaften (z.B. Holzverbauung zusätzlich zu Plastikschutz als erweiterter Witterungsschutz).

4 Theoretische Untersuchungen

Grundsätzlich kann man in Hinblick auf die möglichen Ursachen für das Auftreten solcher Distanzwertvariationen reflektorloser Punkte im Bereich von bis zu zwei Zentimetern zwei Klassifizierungen vornehmen. Voraussetzungen hierfür sind die Annahme keiner tatsächlichen Fels- bzw. Felsblockbewegung und ein korrekt funktionierendes Messinstrument.

- a) Die Schrägdistanz wurde zu einem anderen Punkt bestimmt. Dies kann verschiedene Ursachen haben, wie z.B. äußere Einflüsse auf den Standpunkt, das Instrument oder den Messstrahl.
- b) Die Schrägdistanz wurde zu dem gesuchten Punkt bestimmt jedoch durch äußere Einflüsse auf das Objekt oder fehlerhafte Korrekturparameter verändert.

4.1 Grundhypothese

Angesichts der bisherigen Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass sich die Variationen in den Messdaten aufgrund äußerer Umweltbedingungen ergeben haben. Atmosphärische Einflüsse können in vielerlei Hinsicht zyklische Schwankungen sowie Änderungen von Beobachtungsgrößen hervorrufen, welche größer als die Messpräzision moderner Totalstationen sind. Die Einflussbereiche, welche sich letztendlich auf die Beobachtungsgröße Schrägdistanz auswirken können, können dabei grob in folgende vier Kategorien (siehe auch Abbildung 4-1) unterteilt werden.

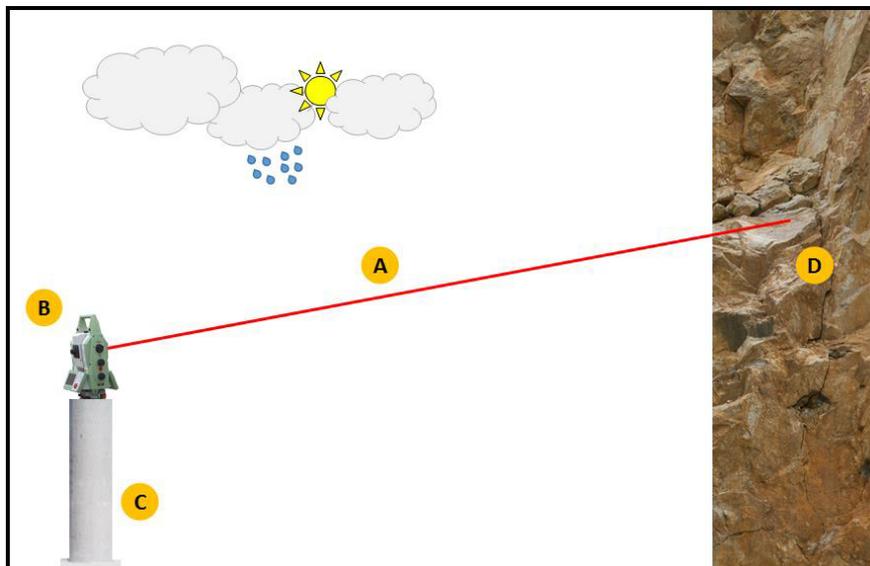


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Kategorien der Umwelteinflüsse

A) Umweltbedingung → Messstrahl → Distanzwert

In diesem Fall beeinflussen atmosphärische Umweltbedingungen den Messstrahl direkt. Durch variierende Brechungsindizes können einerseits der geometrische Verlauf (Refraktion) und andererseits die Geschwindigkeit des Messstrahls (Geschwindigkeitskorrektur) verändert werden. Wie in weiterer Folge gezeigt wird, können beide Effekte Distanzwertvariationen verursachen.

B) Umweltbedingung → Messinstrument → Distanzwert

Das verwendete Messinstrument ist ebenso wie die gesamte Umgebung den atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt. Dabei wirken sich die Umweltbedingungen direkt auf das Messinstrument aus und können so indirekt Einfluss auf die Distanzwertbestimmung haben. Ein Beispiel stellt hierbei temperaturbedingtes Driften von Sensoren, z.B. Neigungssensoren, welche im Messinstrument eingesetzt werden, dar. Durch Driften bzw. die dafür gedachten Korrekturen werden vor allem die Ansteuerungsparameter der jeweiligen reflektorlosen Punkte verändert, womit man Gefahr läuft, einen geometrisch anderen Punkt anzuzielen bzw. zu messen.

C) Umweltbedingung → Standpunkt → Distanzwert

Auch auf den Standort der Totalstation wirken sich die Umweltbedingungen aus. Diese Auswirkungen hängen stark vom verwendeten Material sowie der Verbauung ab. Infolge der materialspezifischen Parameter sowie der Standortwahl können also Bewegungen des Standpunktes auftreten. Bei Nichtbeachtung der Bewegungen entstehen dadurch, wiederum Schwierigkeiten bzw. Fehler hinsichtlich der Ansteuerung der gewünschten reflektorlosen Punkte. Im Fall der Überwachungsmessung Biratalwand wurden betonierete Pfeiler mit einer geschlitzten Kunststoffverkleidung verwendet.

D) Umweltbedingung → Objekt → Distanzwert

Ebenso wie auf den Standpunkt des Messinstruments wirken sich Umwelteinflüsse natürlich auch auf das Zielobjekt aus. Dadurch können zyklische „Bewegungen“, so genannte Tagesgänge, von Objekten entstehen. Diese sind von der spezifischen Zusammensetzung bzw. Ausrichtung des Objekts abhängig. Ebenso können neben solchen relativ einfach zu bestimmenden Zyklen auch Bewegungsüberlagerungen aufgrund der Änderung der Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Felsspalten, Klüfte) und Reflexionseigenschaften (z.B. aufgrund von Tau oder Niederschlag) des Objekts entstehen. Diese Variationen, welche in der geometrischen Umgebung der beobachteten Punkte hervorgerufen werden können, treten nur lokal auf bzw. sind nicht homogen über den Beobachtungsbereich verteilt und können ebenfalls die beobachteten Distanzwerte zu den reflektorlosen Punkten beeinflussen.

Weiters gilt es zu beachten, dass sich die verschiedenen Faktoren auf unterschiedliche Weise auf die beiden Messmodi (reflektorlos, Prisma) auswirken, sofern die automatische Feinanzielung der Totalstation aktiviert ist, was bei der Überwachungsmessung „Biratalwand“ der Fall war.

4.2 Atmosphärischer Einfluss / Refraktion

Eine Möglichkeit der Einflussnahme der Umweltbedingungen auf die Distanzwertbestimmung ist wie bereits erwähnt den Messstrahl bzw. Messung selbst zu verändern.

Die elektronische Distanzmessung mittels Totalstationen kann über Laufzeit- oder Phasenmessung erfolgen. Gemein haben diese Technologien, dass sich beide im umgebenden atmosphärischen Medium bewegen. Bei der terrestrischen Vermessung entspricht dieses Medium der Luft bzw. unterschiedlichen Luftschichten.

Nach [Brunner F.K. (1984a)] gilt als geodätische Refraktion die Gesamtheit der atmosphärischen Effekte auf geodätische Messungen. Wegen meteorologischer Einflüsse weisen einzelne Luftschichten, durch welche sich der Messstrahl bewegt, unterschiedliche Variationen auf. Diese Änderungen beeinflussen die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen, welche zur Distanzmessung verwendet werden. Unter anderem betrifft dies die Geschwindigkeit und die Richtung der sich ausbreitenden Welle.

Während sich das Wegintegral der Refraktionsindexgradienten, mit höchster Gewichtung des Gradienten nahe dem Messinstrument, auf die Winkelmessung auswirkt, beeinflusst das Wegintegral des Refraktionsindex über den gesamten Weg die elektronische Distanzmessung (siehe Formel 4-1 nach [Klaffenböck (2007), S:33]. Da sich die Auswirkungen der Atmosphäre bei modernen Totalstationen signifikant auf die Genauigkeit der Messinstrumente auswirken, ist diese bei Präzisionsmessungen entsprechend zu berücksichtigen bzw. zu modellieren [Brunner (1984b), S: 143-145].

$$D = \int_0^S n(s) \cdot ds \quad \text{Formel 4-1}$$

mit D ...elektronische Weglänge
 S ...Distanz zwischen Empfänger und Sender
 n ...Refraktionsindex

Folglich sind bekannte Dichteveränderungen entlang und in der Umgebung des Messstrahls ausschlaggebend für die Genauigkeit der Beobachtungsgrößen Richtungen und Strecken. Diese Dichteveränderungen sind hauptsächlich von den meteorologischen Größen Temperatur, Luftdruck und Partialdruck des Wasserdampfs bzw. der relativen Luftfeuchte abhängig [Eschelbach (2007)]. Somit nimmt die Refraktion Einfluss auf Richtungs- und Distanzmessung einer Totalstation.

$$\delta = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l \frac{\partial \mu}{\partial z} s \cdot ds \quad \text{Formel 4-2}$$

mit δ ...Refraktionswinkel
 l ...Raumsehne zwischen Standpunkt und Ziel
 $\frac{\partial \mu}{\partial z}$... Indexgradient quer zum Visurstrahl
 s ...Entfernung (Distanz) vom Messinstrument

In Abbildung 4-2 wird dargestellt, wie eine Bewegung ds entlang des Visurstrahls eine Richtungsänderung der Tangente des Strahls um $s \cdot ds$ bewirkt. Die beobachtete Änderung des anvisierten Zielobjekts beträgt dabei $s \cdot s \cdot ds$, wobei die Distanz s vom Messinstrument gemessen wird. Die gesamte Änderung der angezielten Position über den ganzen Weg l zum Messinstrument kann mittels der Formel 4-2 [Williams, Kahmen (1984), S: 9-12] berechnet werden. Damit wird die beobachtete Richtungsänderung im Standpunkt ersichtlich. Dabei gilt es zu beachten, dass der Refraktionsindexgradient proportional zur Entfernung vom beobachteten Objekt gewichtet wird. Gradienten nahe dem Messinstrument haben daher den größten Einfluss bei der Bestimmung des Refraktionswinkels [Williams, Kahmen (1984), S: 9-12].

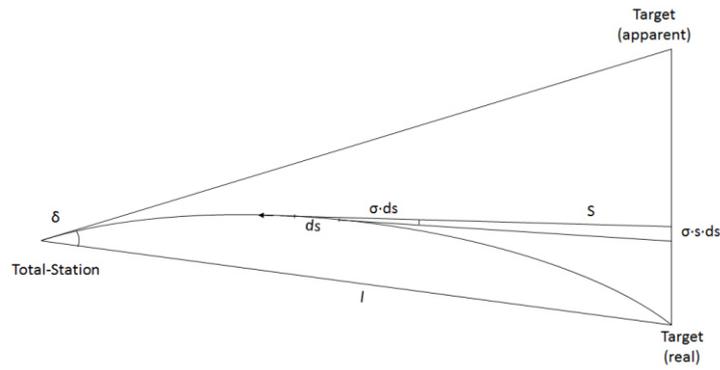


Abbildung 4-2: Refraktionseinfluss auf die Winkelmessung nach [WILLIAMS D. C., KAHMEN H. (1984) S.11]

In dieser Arbeit werden mögliche Auswirkungen der Refraktion, vor allem auf den terrestrischen Fall der elektromagnetischen Distanzmessung und die Vertikalwinkelmessung, behandelt. Für weitere Details in Bezug auf die Ursachen, das Verhalten, die Modellierung und Bestimmung der Refraktion sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur [Brunner (1984)] bzw. [Eschelbach (2007)] verwiesen.

4.2.1 Auswirkung der Temperaturvariationen auf die Distanzmessung

Die Dichtevariationen entlang der Visur nehmen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und geometrische Form der Bahnkurve. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, werden so genannte meteorologische Korrekturen angebracht. Diese erste Korrektur bezieht sich allgemein auf die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch den Brechungsindex der Atmosphäre. Da sich der Brechungsindex jedoch variabel über die gesamte Weglänge des Messstrahls verteilt, wird eine zweite Korrektur benötigt. Die Bestimmung des Brechungsindex sowie dessen Variationen erweisen sich jedoch allgemein als schwierig.

Mittels meteorologischer Daten und bekannter Wellenlänge des EDM-Strahls ist es möglich, die erwähnten Einflüsse zu modellieren. Der Brechungsindex der Atmosphäre kann dabei, z.B. mithilfe der Formel 4-3 nach [Rüeger (1996), S: 54-55] berechnet werden.

$$n_L = 1 + \frac{n_g - 1}{1 + \alpha \cdot T} \cdot \frac{p}{1013.25} - \frac{4.125 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha \cdot T} \cdot e \quad \text{Formel 4-3}$$

- mit
- n_g ... Gruppenbrechungsindex (abh. von der Wellenlänge)
 - p ... Luftdruck [mbar]
 - T ... Lufttemperatur [°C]
 - α ... $\frac{1}{273.15}$... Koeffizient der Luftausdehnung pro °C
 - e ... Partialdruck des Wasserdampfs [hPa]

Das totale Differential der Formel 4-3 zeigt dabei wie stark sich falsche oder nicht berücksichtigte meteorologische Einflüsse auf den Brechungsindex auswirken können. In Formel 4-4 [Rüeger (1996), S: 55-56] wird der dominierende Einfluss der Temperaturänderung veranschaulicht.

$$dn_L = -1.0 \cdot dT + 0.29 \cdot dp - 0.04 \cdot de \quad \text{Formel 4-4}$$

Für die Modellierung der Auswirkungen des Brechungsindex sowie dessen Variationen auf die Streckenmessung gibt es verschiedene Ansätze. In dieser Arbeit wird hierfür eine Gebrauchsformel (Formel 4-5 [Leica (2013), S: 72-78]) verwendet. Für weitere Informationen bezüglich der Korrekturen, Reduktion und Modellierung atmosphärischer Einflüsse wird auf weiterführende

Literatur verwiesen ([Brunner F.K. (1984)], [Rüeger J.M. (1996)], [Joeckel et al (2008)], [Möser et al (2012)]).

$$\Delta D [ppm] = 286.34 - \left[\frac{0.29525 \cdot p}{1 + \alpha \cdot T} - \frac{4.126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{1 + \alpha \cdot T} \cdot 10^x \right] \quad \text{Formel 4-5}$$

mit p ... Luftdruck [mbar]
 T ... Lufttemperatur [°C]
 h ... relative Luftfeuchtigkeit [%]
 α ... $\frac{1}{273.15}$... Koeffizient der Luftausdehnung pro °C
 x ... $\left(7.5 \cdot \frac{T}{237.3 + T} \right) + 0.7857$

Mittels der Formel 4-5 können nun bei bekannter Meteorologie die aufgrund dieser Parameter entstehenden Variationen berechnet werden. Im Fall der Überwachungsmessung Biratalwand wurde der Parameter der atmosphärischen Korrektur über Distanzverhältnisse berechnet und an die Messdaten angebracht. In Abbildung 4-3 sind nun die Distanzwertvariationen aufgrund der Meteorologie dargestellt. Zu beachten ist in diesem Fall, dass es sich bei den Schrägdistanzwerten um die nicht meteorologisch korrigierten Datenreihen handelt, welche direkt vom Messinstrument an Leica GeoMoS gesendet wurden. Außerdem wurden die Variationen mittels eines Moving-Average Filters (MAV) geglättet, um das Rauschen in den Messdaten zu unterdrücken.

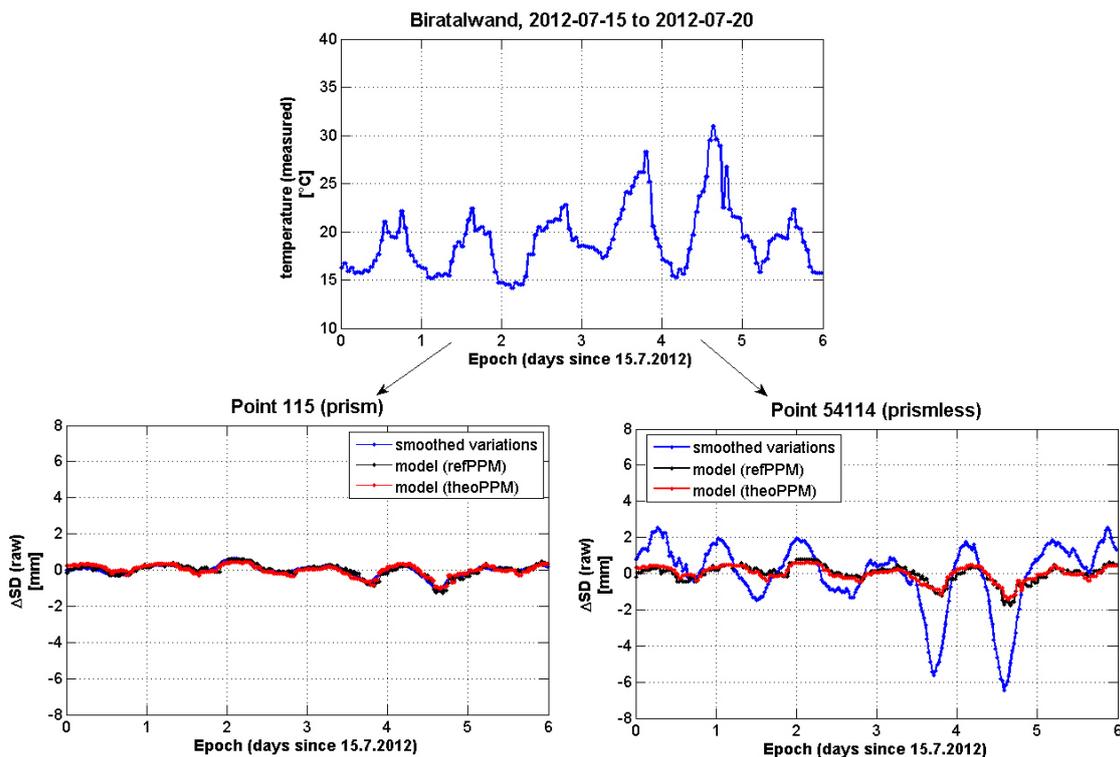


Abbildung 4-3: Auswirkung der Meteorologie auf die Distanzmessung

Während die Variationen der nicht korrigierten Schrägdistanzwerte des stabilisierten Punktes (115) nachmodelliert werden können, zeigen die zyklischen Änderungen der Distanzwerte beim reflektorlos beobachteten Punkt (54114) signifikante Abweichungen von den meteorologischen Korrekturwerten. Sofern die meteorologische Geschwindigkeitskorrektur für die Messwertvariationen in den Schrägdistanzen verantwortlich wäre, müssten diese Änderungen auch

in den Messdaten zu den Prismenpunkten sichtbar sein. Ebenso müssten bei einer falschen meteorologischen Korrektur und den vorliegenden Distanzen von ca. 130 m bis ungefähr 170 m Temperaturunterschiede von etwa 100 °C auftreten, wenn man annimmt, dass sich eine Änderung der Umgebungstemperatur mit ungefähr 1 ppm auf die Distanzwerte auswirkt.

Da sich die Variationsmodelle, die einerseits mittels der Methode der Distanzverhältnisse (refPPM) bestimmt, und andererseits mittels der Formel 4-5 (theoPPM) berechnet wurden, gleichen, kann davon ausgegangen werden, dass die meteorologische Korrektur über den Zeitraum der Überwachungsmessung korrekt angebracht wurde. Damit zeigt sich, dass weitere bzw. andere Effekte für die Variationen der Schrägdistanzwerte verantwortlich sind.

4.2.2 Auswirkung der Variation des Temperaturgradienten auf die Distanzmessung

Neben der Beeinflussung der Geschwindigkeit der ausgesendeten elektromagnetischen Wellen wird auch die Richtung durch den Gradient des Refraktionsindex beeinflusst. Da sich wiederum der Temperaturgradient verglichen mit jenem des Luftdrucks und Partialdrucks des Wasserdampfs, am stärksten auswirkt [Eschelbach C. (2009)], wird hier nur auf diesen Faktor näher eingegangen.

Bei terrestrischen Messungen in der freien Atmosphäre (Luft) wirkt sich der Refraktionsindexgradient vorwiegend auf die vertikale Richtungskomponente aus. Horizontale Richtungsfehler, aufgrund von Seitenrefraktion, wie z.B. im Tunnel, treten in freier Umgebung meist nur in geringer Form auf [Joeckel et al. (2008)].

In Abbildung 4-4 ist eine schematische Darstellung der Auswirkung vertikaler Temperaturgradienten auf die Visur ersichtlich.

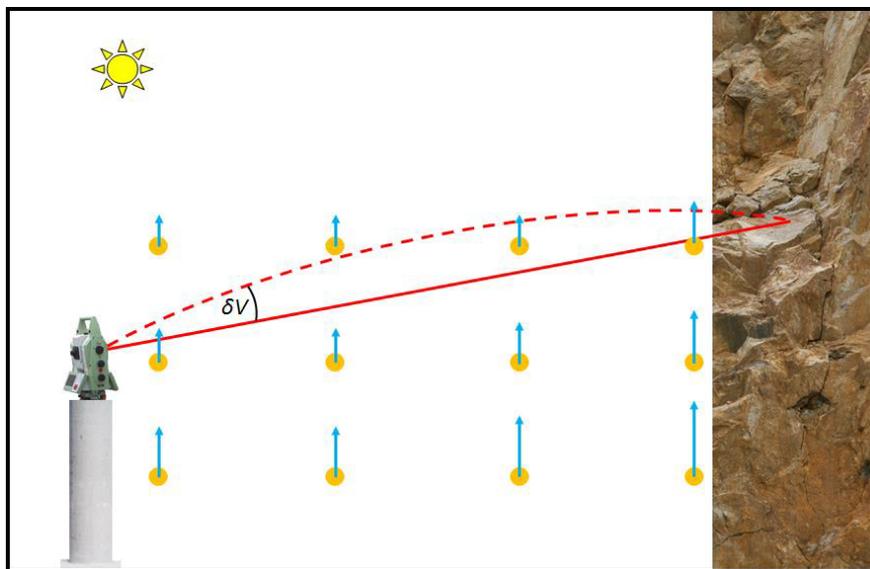


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Auswirkung von Temperaturgradienten auf die Vertikalwinkelmessung

Mithilfe des vertikalen Temperaturgradienten sowie meteorologischer Daten kann der Refraktionskoeffizient k berechnet werden. Dieser Koeffizient stellt das Verhältnis zwischen dem Radius des gekrümmten Visurstrahls und dem Radius der Erdoberfläche zwischen Stand- und Zielpunkt dar. Der Wert hängt sowohl vom vertikalen Temperaturgradienten sowie von weiteren meteorologischen Parametern (Temperatur und Luftdruck), als auch von der beobachteten Zenitdistanz ab. Der Zusammenhang ist nach [Brocks (1950) zitiert nach Joeckel et al (2008), S: 294]] in Formel 4-6 gegeben.

$$k = 501.5 \cdot \sin(\zeta) \cdot \frac{p}{T^2} \cdot \left(0.0342 + \frac{dT}{dh}\right)$$

Formel 4-6

mit ζ ... gemessener Vertikalwinkel
 p ... Luftdruck [hPa]
 T ... absolute Temperatur [°K]
 $\frac{dT}{dh}$... vertikaler Temperaturgradient $\left[\frac{°K}{m}\right]$

Mittels dieses vertikalen Temperaturgradienten kann ebenso nach Formel 4-7 nach [Eschelbach (2007)] der Refraktionswinkel δ abgeschätzt werden. Zur Anwendung dieser Formel müssen jedoch bestimmte Annahmen getroffen werden. Unter Anderem werden stabile Luftschichten und geringe Distanzen (< 30 m) vorausgesetzt. Daher wird die Formel 4-7 hier nur als Hilfsmittel zur Abschätzung der Größenordnung auftretender vertikaler Refraktion verwendet.

$$\delta_{[mgon]} \approx 0.03 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h} \cdot s$$

Formel 4-7

mit $\frac{\Delta T}{\Delta h}$... mittlerer vertikaler Temperaturgradient zw. Stand – und Zielpunkt $\left[\frac{°C}{m}\right]$
 s ... Streckenlänge [m]

Im Fall der Deformationsmessung der Biratalwand, wo Schrägdistanzen von 130 m – 190 m auftreten würde ein vertikaler Temperaturgradient von 1°C / m einen Refraktionswinkel von 3 mgon – 5 mgon verursachen. Dies würde auf die beobachteten Vertikalwinkelvariationen (siehe Abbildung 4-8) zutreffen.

Sofern keine direkte Bestimmung des Refraktionswinkels durchgeführt wird bzw. werden kann, ist es möglich den Effekt der vertikalen Temperaturgradienten auf die Zenitdistanzmessung durch Messungen zu stabilen Prismen abzuschätzen. Mittels automatischer Feinanzielung kann die Auswirkung der Strahlbrechung ermittelt werden, da sie die Refraktion des Visurstrahls entsprechend ausgleicht. Notwendig ist hierbei die Annahme eines stabilen Prismas. Zu beachten ist dabei, dass sich der Refraktionseinfluss hinsichtlich des verwendeten Messmodus unterschiedlich auswirkt. Im Fall der Messung eines, mittels Prisma stabilisierten, Punktes und eingeschalteter, automatischer Feinanzielung (z.B. ATR bei Leica Instrumenten) würde das Szenario der Vertikalwinkeländerung wie in Abbildung 4-5 ablaufen.

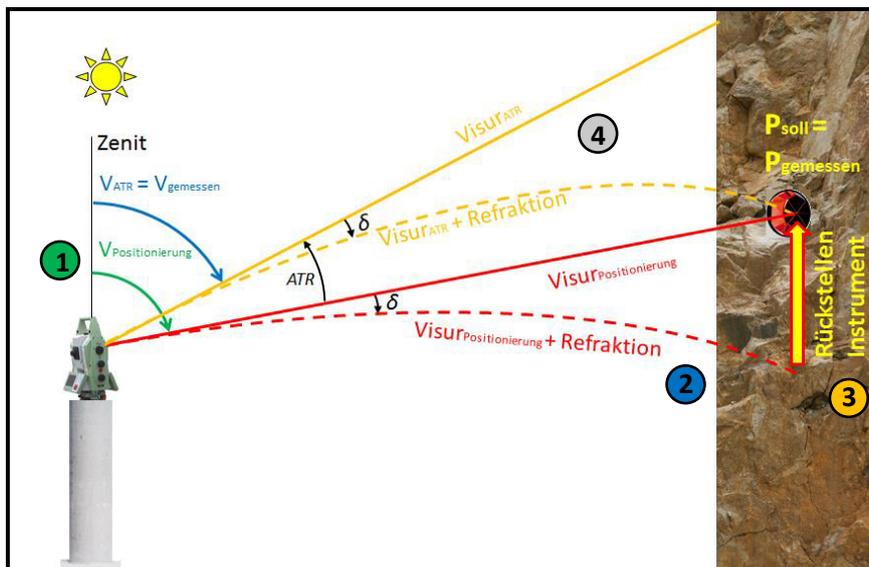


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung der Auswirkung vertikaler Refraktion auf die Zenitdistanzmessung auf Prismen

Im ersten Schritt wird dabei das Prisma über den, aus den bekannten Koordinaten berechneten, Vertikalwinkel angesteuert. Aufgrund des unbekanntem Refraktionseinflusses wird der Visurstrahl jedoch abgelenkt (Schritt 2) und somit nicht der gleiche Punkt anvisiert. Durch die automatisierte Feinanzielung (z.B. ATR) wird die Beobachtungsrichtung wieder auf das Prisma rückgestellt (Schritt 3). Das Prisma wird nun im letzten Schritt (4) über einen veränderten Vertikalwinkel gemessen. Die Änderung der Distanz wegen der Krümmung kann aufgrund der Messpräzision der Distanzmessung heutiger Totalstationen vernachlässigt werden. Das bedeutet, dass trotz verändertem Vertikalwinkel die „wahre“ Distanz gemessen wird.

Eine Brechung des Visurstrahl aufgrund von Refraktion wirkt sich dabei distanzabhängig auf das Messergebnis aus (siehe Formel 4-7). Dieses Merkmal ist auch bei den aufgezeichneten Vertikalwinkelvariationen der Deformationsmessung „Biratalwand“ ersichtlich (siehe Abbildung 4-6).

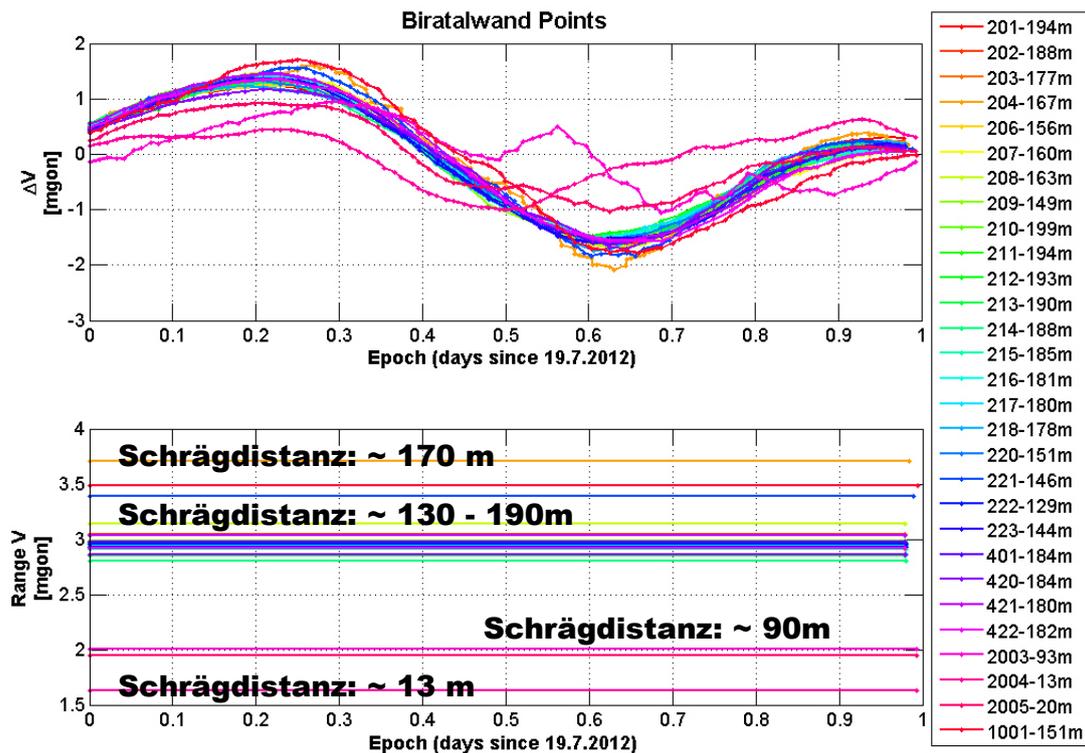


Abbildung 4-6: Spannweiten vom 19.07.2012 der Vertikalwinkelvariationen vom Standpunkt 2010

Dargestellt sind in Abbildung 4-6 dabei einerseits die beobachteten Vertikalwinkelvariationen ΔV zu stabilisierten Punkten vom nördlichen Standpunkt 2010 aus. Gezeigt wird dabei ein Ausschnitt der Variationen während des Tages 19. Juli 2012. In der unteren Darstellung der Grafik in Abbildung 4-6 sind die zugehörigen einzelnen Spannweiten der Zenitdistanzwertänderungen dargestellt. Zu erkennen sind Unterschiede in der Größenordnung der Spannweite der Vertikalwinkelvariationen. Diese Differenzen zwischen den Prismen zeigen dabei eine Distanzabhängigkeit. Weiter entfernte Prismen variieren stärker in den Messwerten als jene mit kurzen Visuren. In der Legende sind diesbezüglich die Punktbezeichnungen der einzelnen Prismen sowie deren Entfernung (Schrägdistanz) vom Standpunkt aufgelistet.

Bei der Beobachtung von reflektorlosen Zielen verhält sich der Ablauf wie in Abbildung 4-7 dargestellt.

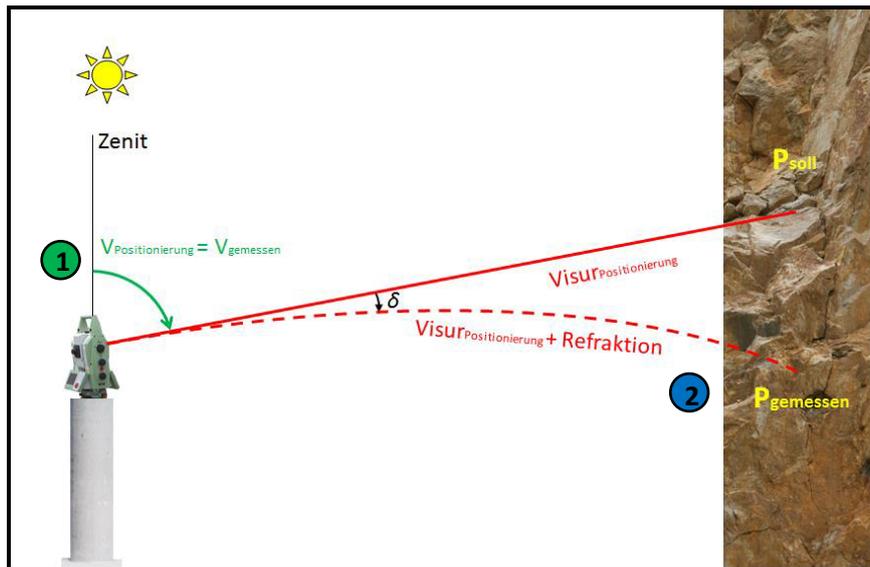


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Auswirkung vertikaler Refraktion auf die Zenitdistanzmessung auf reflektorlose Ziele

Im Fall reflektorloser Messungen entfällt sowohl der dritte (automatisierte Feinanzielung), als auch der vierte Schritt (Messung über veränderten Vertikalwinkel). Der gesuchte Punkt wird wie bekannt angesteuert. Auch hier wird der Messstrahl durch den unbekanntem Einfluss der Refraktion abgelenkt. Da der Refraktionseinfluss δ den, durch die Totalstation angefahrenen, Vertikalwinkel nicht verändert, wird in weiterer Folge ein unterschiedlicher Punkt bei gleichbleibender Zenitdistanz gemessen. Für die nachfolgende Modellierung der Schrägdistanzvariationen aufgrund einer möglichen Refraktion (Abbildung 4-9) wurden die Annahmen getroffen, dass sich die Vertikalwinkelvariationen ΔV rein aufgrund der Refraktion ergeben, und dass auf eine glatte, vertikale Oberfläche gemessen wurde. Die Zenitdistanzen wurden der Leica GeoMoS Datenbank der Überwachungsmessung 2012 entnommen (siehe Abbildung 4-8).

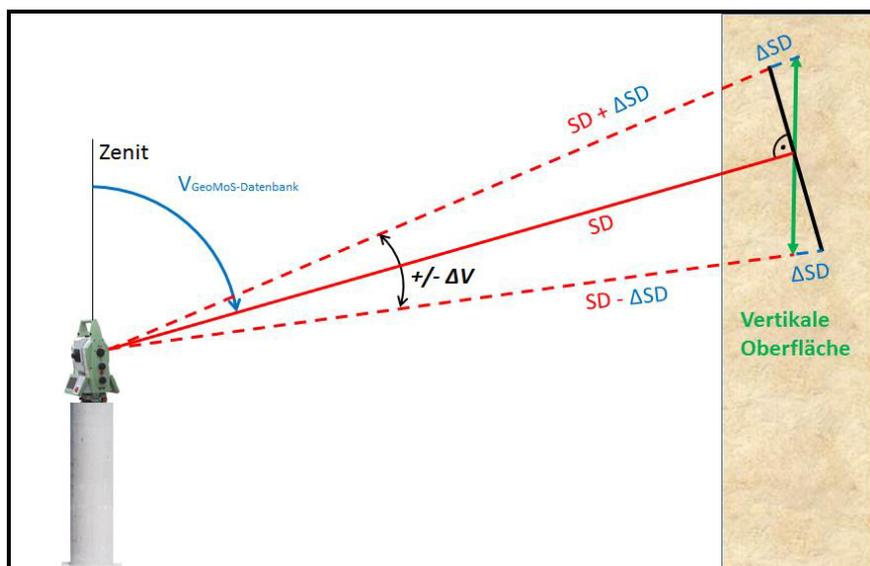


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Berechnung refraktionsbedingter Schrägdistanzvariationen

Durch das Anbringen der Änderungen der Zenitdistanz ΔV an die Vertikalwinkel aus der Leica GeoMoS-Datenbank können mögliche Variationen der Schrägdistanz ΔSD über eine herkömmliche Dreiecksauflösung berechnet werden. Da sich, wie bereits erwähnt, eine refraktionsbedingte

Änderung des Vertikalwinkels unterschiedlich bei Messungen auf Prismen und reflektorlose Beobachtungspunkte auswirkt, werden die beiden Messmodi in Abbildung 4-9 gegenübergestellt.

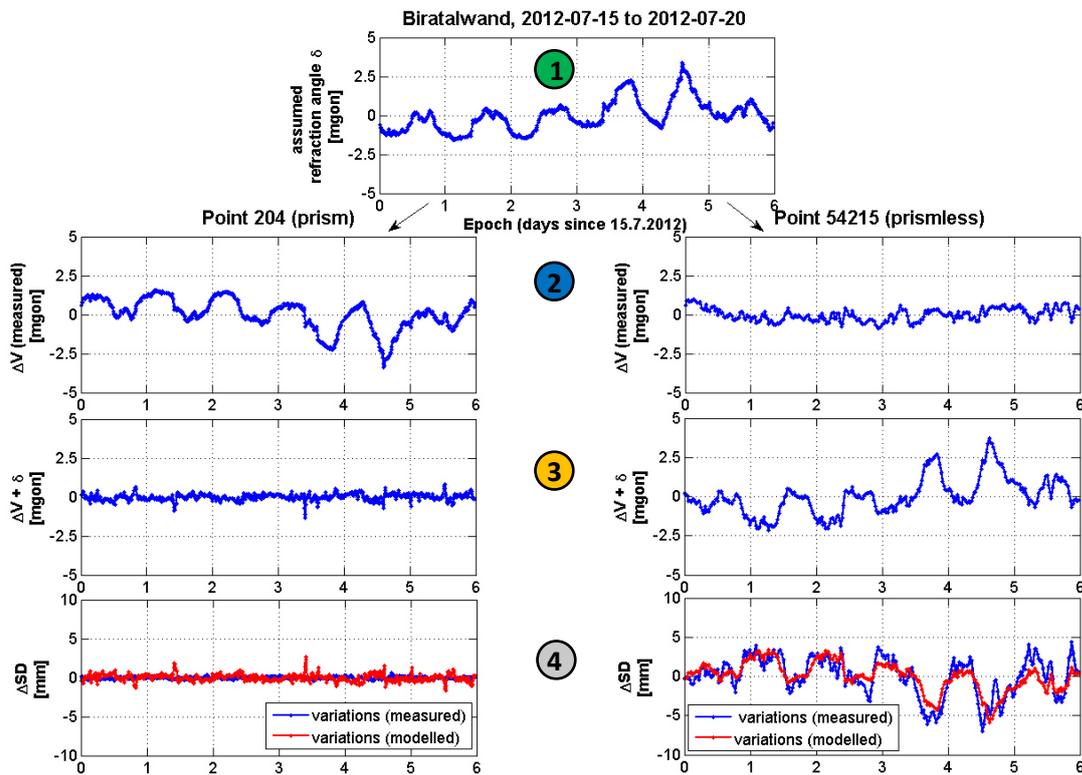


Abbildung 4-9: Auswirkung der Refraktion auf die Distanzmessung (Standpunkt 2010)

Ausgehend von den Vertikalwinkelvariationen zu einem stabilen Prisma wird im ersten Schritt der Refraktionswinkel abgeleitet. Darunter sind die beobachteten, refraktionsbedingten Zenitdistanzänderungen dargestellt (Schritt 2). Werden nun die Refraktionswinkel entsprechend an die Datensätze angebracht (Schritt 3), so sind die refraktionsbereinigten Vertikalwinkel sichtbar. Aus diesen können nun im letzten Schritt (4) die Distanzwertänderungen modelliert werden.

Das berechnete Modell der Schrägdistanzvariationen nähert sich dabei den real beobachteten zyklischen Schwankungen an. Dieses Verhalten kann also nachgebildet werden, jedoch unterscheiden sich v.a. die Größen der Amplituden der beobachteten Datenreihen von jenen der berechneten.

Bei Betrachtung des südlichen Standpunktes (siehe Abbildung 4-10) werden diese Abweichungen zwischen den berechneten Distanzwertvariationen und den beobachteten größer. Zu beachten ist, dass in diesem Fall keine refraktionsbedingte Vertikalwinkelkorrektur während der Überwachungsmessung durchgeführt wurde (siehe Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 im Abschnitt 3.3 „Überblick: Datenanalyse“). Dadurch wurde diese aus dem Prisma 115 geschätzt, weshalb die refraktionsbereinigte Zenitdistanz ($\Delta V + \delta$) zu Null wird. Auch an diesem Standpunkt können die Schrägdistanzvariationen nicht vollständig nachgebildet werden.

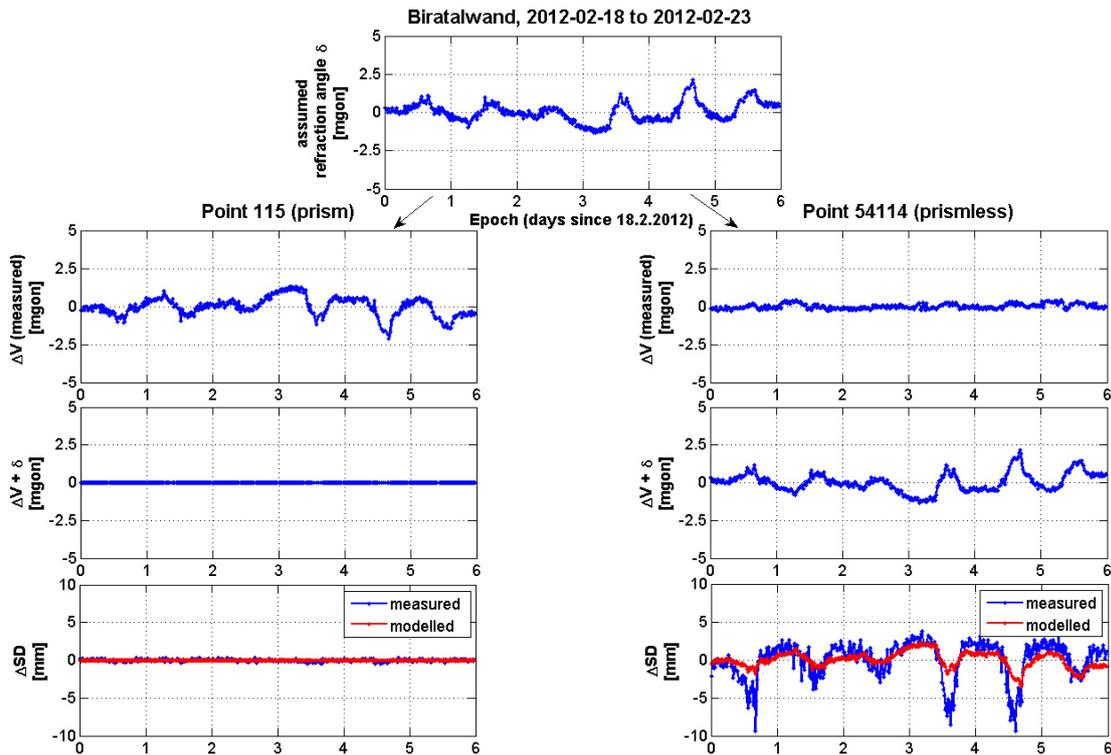


Abbildung 4-10: Auswirkung der Refraktion auf die Distanzmessung (Standpunkt 1000)

Somit wird durch dieses theoretische Modell der Effekt der Schrägdistanzvariationen nicht vollständig beschrieben, da verschiedene Parameter, wie z.B. die Struktur und Orientierung des Ziels, noch nicht berücksichtigt werden.

4.3 Stehachsschiefe

Die Abweichung der Stehachse der Totalstation von der lokalen Lotrichtung wird allgemein als Stehachsfehler oder Stehachsschiefe bezeichnet. Dieser Fehler ist nicht instrumentell bedingt sofern korrekt funktionierende Neigungssensoren bzw. Libellen verwendet werden. Da sich ein solcher Einfluss signifikant auf die Ergebnisse bzw. Beobachtungen auswirken kann, müssen Messinstrumente wie die Totalstation, exakt auf Pfeilern, Stativen oder ähnlichen Halterungen (im Rahmen der Messgenauigkeit) horizontiert werden.

Bei modernen Totalstationen sind bereits Neigungssensoren bzw. Kompensatoren standardmäßig eingebaut. Diese Sensoren berechnen bis zu einem bestimmten Schwellwert (z.B. 70 mgon bei Leica Totalstationen) die Abweichung der Stehachsschiefe von der lokalen Lotrichtung und berücksichtigen diese bei der Winkelmessung.

Als problematisch bei der Verwendung von Neigungssensoren erweist sich jedoch ein temperaturabhängiges Driftverhalten. Um diese Fehlerquelle auszuschließen bzw. weitgehend zu minimieren, sind Temperatursensoren nahe dem Neigungssensor platziert. Diese sollen ein korrektes Ablesen und Anbringen der Restneigung des Instruments gewährleisten.

4.3.1 Korrektur der Stehachsschiefe

Zur Bestimmung der Stehachsschiefe werden in heutigen Totalstationen zweiachsige Neigungssensoren verwendet. Dabei werden die Neigungen in Zielachs- und Kippachsrichtung (in weiterer Folge auch Längs- und Querneigung bezeichnet) aufgezeichnet. Sofern weitere Fehlereinflüsse (Zielachsfehler, etc.) bekannt sind, können die korrigierten Beobachtungsgrößen zum einen mittels einer Messung in beiden Kreislagen und zum anderen mit den Formel 4-8 und 4-9 nach [Kahmen (2006), S: 105-111, 117-121] berechnet werden.

$$V_k = V_{gem} + i + n_z$$

Formel 4-8

mit V_k ... korrigierter Vertikalwinkel
 V_{gem} ... unkorrigierter Vertikalwinkel
 n_z ... gemessene Neigung in Zielachsrichtung
 i ... Indexfehler

$$Hz_k = Hz_{gem} + c + n_k \cdot \cot(V_k)$$

Formel 4-9

mit Hz_k ... korrigierte Hz – Kreisablesung
 Hz_{gem} ... unkorrigierte Hz – Kreisablesung
 n_k ... gemessene Neigung (Stechachsneigung) in Kippachsrichtung
 V_k ... korrigierter Vertikalwinkel
 c ... Zielachsfehler

Aus diesen beiden Formeln ist ersichtlich, dass sich eine Neigung des Instruments in Zielachsrichtung direkt auf den beobachteten Vertikalwinkel auswirkt. Eine nicht, fehlerhaft oder fälschlich korrigierte Neigung beeinflusst daher maßgeblich die Beobachtungsgrößen. Eine graphische Darstellung der Auswirkung einer nicht korrigierten Längsneigung ist schematisch in Abbildung 4-11 ersichtlich.

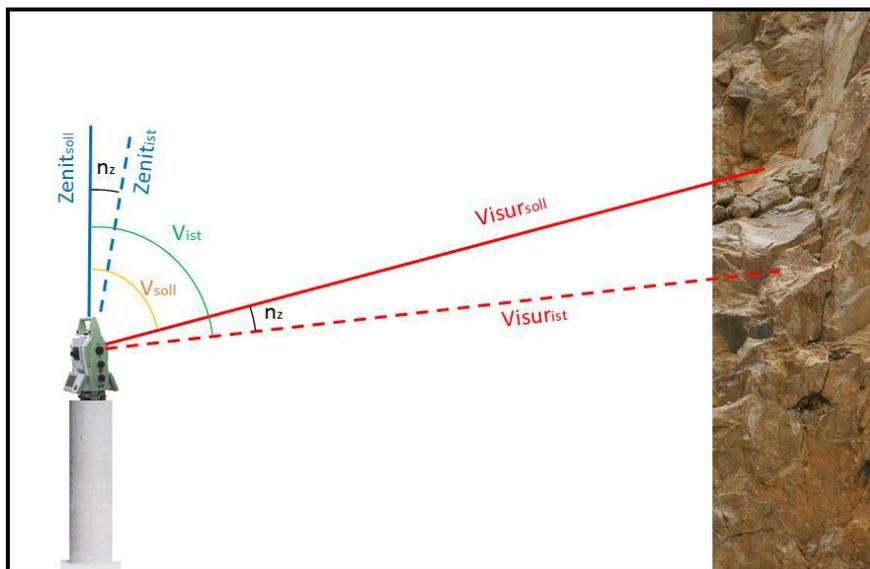


Abbildung 4-11: Auswirkung einer nicht berücksichtigten Längsneigung " n_z " auf die Vertikalwinkelmessung " V "

Während sich eine Längsneigung linear auf den Vertikalwinkel auswirkt, beeinflusst eine Querneigung die Horizontalrichtungsablesung in Abhängigkeit der eingestellten Zenitdistanz. Eine Neigung in Kippachsrichtung wirkt sich demnach bei annähernd horizontaler Visur ($V \sim 100$ gon) kaum, bei einem Vertikalwinkel von ~ 50 gon einfach und ab einer Zenitdistanz < 30 gon mehr als doppelt so groß auf die Horizontalrichtung aus.

Zu beachten ist hierbei, dass eine falsch angebrachte Neigungsänderung aufgrund einer Drift nicht durch die Messung in beiden Kreislagen eliminiert werden kann [Lienhart (2003)].

Fehler, welche durch eine nicht berücksichtigte Drift des Neigungssensors entstehen, können somit größer sein als die Präzision der Teilkreisablesungen und somit das Messergebnis signifikant beeinflussen. Durch diese Veränderung der Winkel- und Richtungsmessung werden im Falle von reflektorlosen Beobachtungen andere Punkte anvisiert, was sich direkt auf die Schrägdistanzmessung auswirken kann.

4.3.2 Auswirkung einer temperaturbedingten Neigungsdrift auf die Distanzmessung

Wird eine fälschlich ermittelte Neigung an die Messdaten angebracht, aufgrund eines Spielpunktes des Sensors ungleich Null, so wirkt sich dies zwar auf die Beobachtungsgrößen aus, jedoch nur in Form eines konstanten Offsets. Da die aufgezeichneten Datenreihen zyklische Schwankungen aufweisen, könnte eine temperaturbedingte Drift des Neigungssensors infrage kommen. Durch mehrere interne Temperatursensoren innerhalb einer Totalstation sollen diese Variationen berücksichtigt bzw. eliminiert werden. Es gilt hierbei zu beachten, dass eine temperaturbedingte Drift ein gleiches Fehlerbild ergibt wie im Falle auftretender Refraktion (Abschnitt 4.2.2).

Zur Überprüfung, wie stark sich Temperaturänderungen auf den Neigungssensor auswirken können, wurde ein Laborversuch durchgeführt. Hierfür wurde die Totalstation Leica Nova MS50 in einer Klimakammer platziert (siehe Abbildung 4-12) und die Umgebungstemperatur des Messinstruments auf verschiedene Temperasturstufen zwischen -15 °C und $+40\text{ °C}$ abgekühlt bzw. erwärmt. Dazwischen wurde die Temperatur auf $\sim 10\text{ °C}$ -Stufen für eine längere Zeitspanne konstant gehalten. Während des Versuchs wurden die Neigungsdaten sowie die interne Temperatur der Totalstation alle zwei Minuten in beiden Kreislagen ausgelesen. Vor jeder Ablesung bzw. nach jedem Kreislagenwechsel wurde vorsorglich noch ungefähr zwei Sekunden abgewartet, um den Neigungskompensator zu beruhigen. Die Lufttemperatur wurde dabei mit zwei PT100-Temperatursensoren kontinuierlich aufgezeichnet.

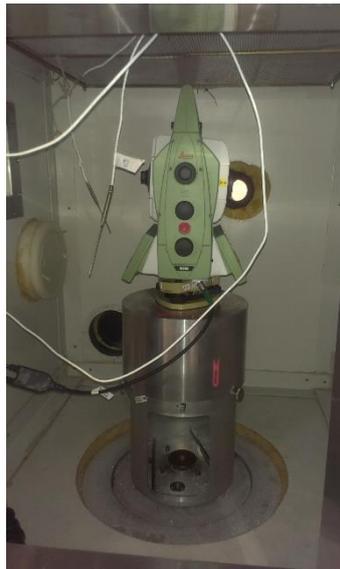


Abbildung 4-12: Leica Nova MS50 in der Klimakammer mit zwei PT100 Temperatursensoren

Aus den aufgezeichneten Daten kann nun eine mögliche Drift der Neigungssensoren aufgrund einer sich ändernden Umgebungstemperatur bestimmt und ein funktionaler Zusammenhang aufgestellt werden. Der Spielpunkt des Neigungskompensators kann hierbei mit der Formel 4-10 [Möser et al (2012), S:373-374] berechnet werden.

$$n_{bubble} = \frac{n_{\alpha} + n_{\alpha+200^{\circ}}}{2}$$

Formel 4-10

mit n_{bubble} ... Spielpunkt des Neigungssensors
 n_{α} ... gemessene Neigung bei Richtungswinkel α
 $n_{\alpha+200^{\circ}}$... gemessene Neigung bei Richtungswinkel $\alpha + 200^{\circ}$

Daraus können nun die Spielpunkte in Längs- und Querneigung bestimmt werden. Diese sind in Abbildung 4-13 grafisch dargestellt, wobei hier der funktionale Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Drift des Neigungssensors durch eine lineare Regression abgebildet wird. Die Abhängigkeiten der linear approximierten Drift sind in Tabelle 4-1 angeführt

Tabelle 4-1: Parameter der approximierten Neigungsdrift aufgrund von Temperaturänderungen

	Abhängigkeit [cc/°C]	Standardabweichung [cc/°C]
Zielachsrichtung (longitudinal)	- 0.2	$3 \cdot 10^{-5}$
Kippachsrichtung (transversal)	+ 0.3	$3 \cdot 10^{-5}$

Bei einer Temperaturänderung von ca. 10°C würde dies einer negativen Drift von ungefähr 2 cc der Längsneigung und einer positiven Drift von 3 cc der Querneigung entsprechen.

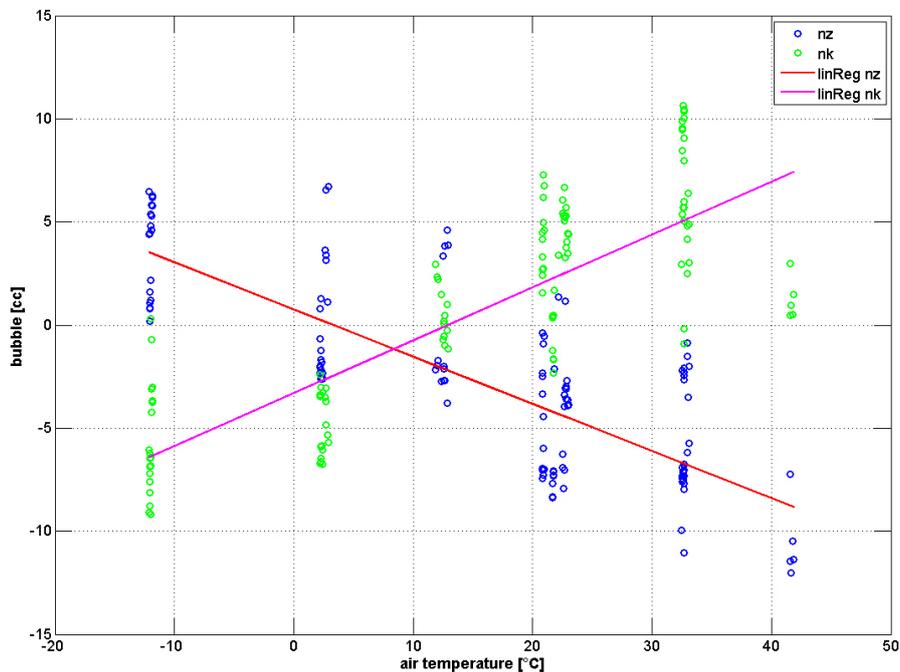


Abbildung 4-13: Drift des Neigungssensors (n_z : longitudinal; n_k : transversal) aufgrund der Umgebungstemperaturänderung

Unter der Annahme, dass die, bei der Überwachungsmessung Biratalwand verwendeten Leica TM30, ein ähnliches temperaturabhängiges Verhalten des Neigungskompensators wie die getestete Leica Nova MS50 besitzen, können nun die Auswirkungen einer möglichen Drift des Neigungssensors auf die Messdaten abgeschätzt werden. Angenommen wird dabei eine vertikale, geradlinig verlaufende Wand. In Abbildung 4-14 sind die Auswirkungen einer Drift des Neigungssensors dargestellt. Hierbei wurde nur eine Neigungsdrift in Längsrichtung untersucht, da sich dieser direkt auf die Vertikalwinkelmessung auswirkt und bei der Zenitdistanzmessung in Kapitel 3 Variationen detektiert wurden.

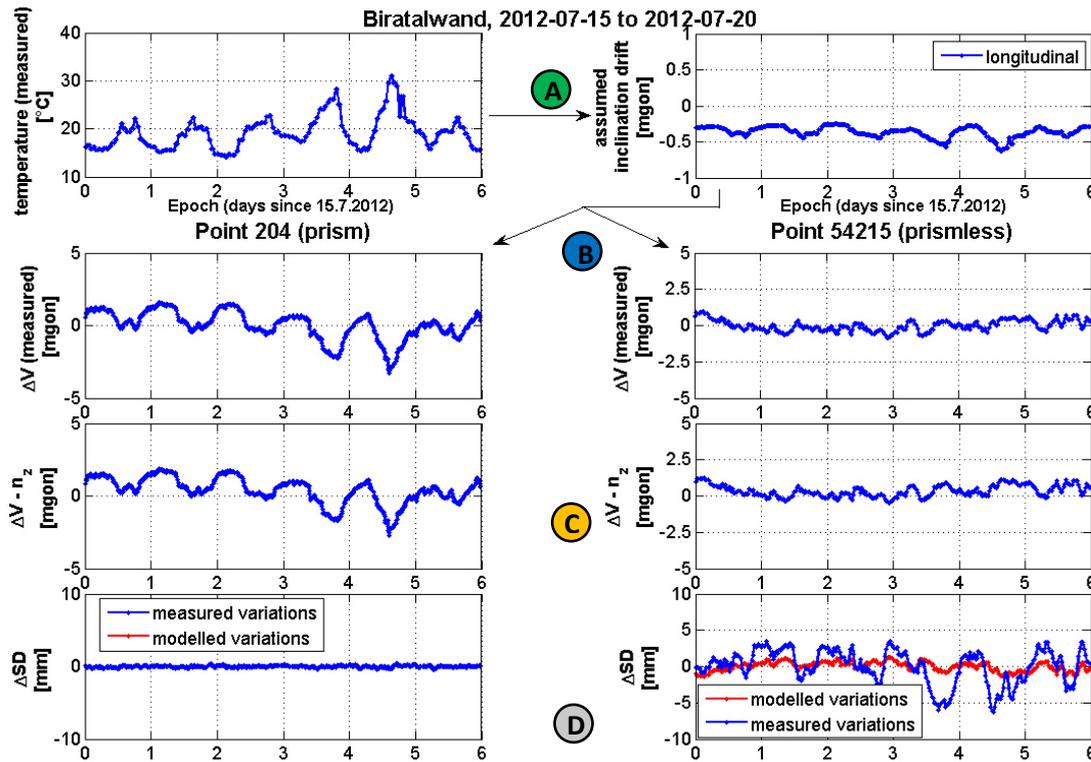


Abbildung 4-14: Auswirkung einer temperaturabhängigen Drift der Längsneigung auf die Distanzmessung

Aus den aufgezeichneten Temperaturvariationen ist eine mögliche Drift des Neigungskompensators in Längsrichtung (A), über die Beziehung in Abbildung 4-13 bzw. Tabelle 4-1, simuliert worden. In weiterer Folge wurde diese Drift, welche in den beobachteten Vertikalwinkelvariationen vorhanden ist, entfernt. Schon hier sind Unterschiede in der Größenordnung (B), im Vergleich zu den Messungen zum Prisma 204, zu erkennen. Durch Entfernen der Neigungssensordrift können die Schwankungen in den gemessenen Vertikalwinkeln beim stabilisierten Punkt (204) nicht eliminiert werden (C). Ebenso werden die Zenitdistanzwerte bei Messungen zum reflektorlosen Punkt 54215 nur sehr gering beeinflusst, was sich bei der Modellierung der Schrägdistanzvariationen (D) zeigt. Für diese Nachbildung wurde ebenfalls wieder die Annahme der Messung auf eine vertikale, glatte Oberfläche getroffen. Durch die Messung zum einem stabilisierten Punkte (Abbildung 4-14) wirken sich Änderungen der Richtungs- und Winkelmessung, aufgrund der automatischen Zielerfassung, nicht auf die Distanzwertbestimmung aus.

Eine mögliche Drift der Größenordnung $\sim 0.2 \text{ cc} / ^\circ\text{C}$ (siehe Tabelle 4-1) wirkt sich bei aufgezeichneten Temperaturänderungen von bis zu 15°C mit Vertikalwinkelwertänderungen von ca. 0.5 mgon aus. Eine mögliche Drift kann daher maximale Schwankungen in den Messdaten von $\sim 0.5 \text{ mgon}$ verursachen. Diese Variationen können die beobachteten Schrägdistanzvariationen nicht verursachen und maximal als zusätzlicher Effekt in Erscheinung treten. Im Fall einer korrekt bzw. ähnlich funktionierenden Temperaturkompensation des Neigungssensors der Messinstrumente, welche bei der Überwachungsmessung Biratalwand eingesetzt wurden, kann eine Drift als Ursache für die detektierten Schrägdistanzvariationen praktisch ausgeschlossen werden.

Sofern jedoch, aufgrund eines hardware- oder softwaretechnischen Problems die Temperaturkorrektur des Neigungskompensators nicht richtig funktioniert hat, kann dies Variationen in der Größenordnung der aufgezeichneten Daten verursachen.

4.4 Pfeilerbewegung

Ein stabiler und geschützter Standpunkt für das Messinstrument ist bei Langzeitmessungen unabhkömmlich. Hinsichtlich der Realisierung gibt es dabei große Unterschiede. Bei der Überwachungsmessung „Biratalwand“ wurden von der Firma „Vermessung AVT ZT-GmbH“ zwei betonierte Pfeiler mit einer Kunststoffverkleidung (siehe Abbildung 4-15) verwendet. Die Schutzverkleidung aus Kunststoff wurde dabei an den unteren Enden „geschlitzt“, um einen Hitzestau zwischen Betonzylinder und Verkleidung zu verhindern.

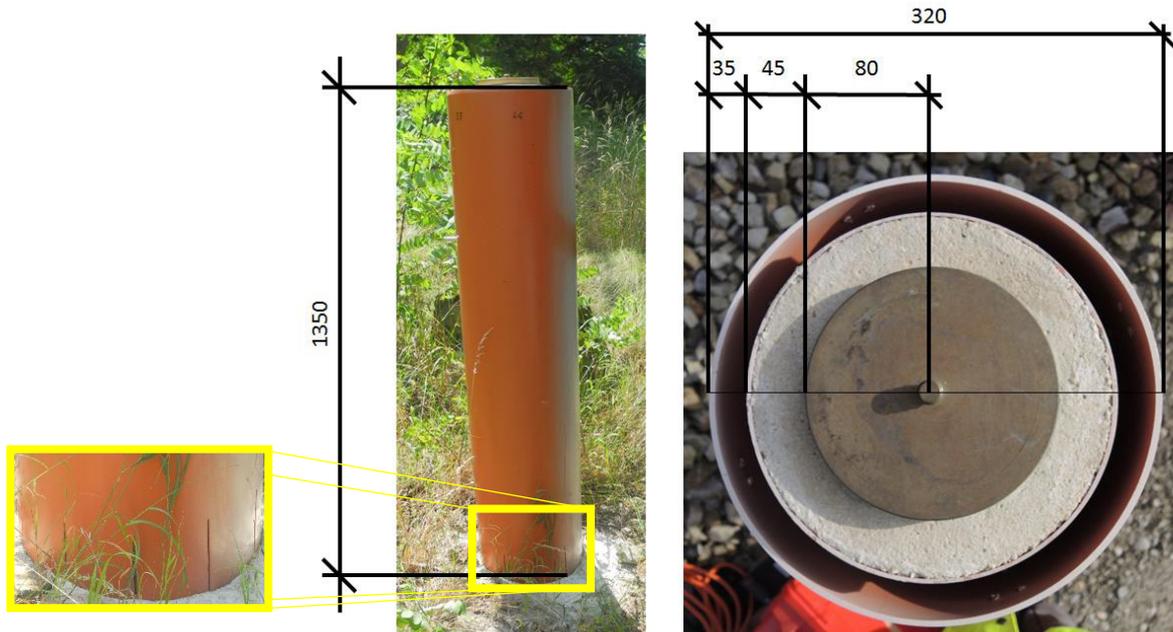


Abbildung 4-15: Maße der Pfeiler [mm]

Abhängig von den gegebenen Örtlichkeiten sind die Pfeiler während der gesamten Überwachungsmessung den Umweltbedingungen ausgesetzt. Auch wenn man davon ausgeht, dass die Standpunkte fest mit dem Untergrund verbunden sind, z.B. durch ein Fundament, kann es, durch den Tagesgang der Sonne bedingt, zu einseitigen Erwärmungen der verwendeten Materialien und somit zu Deformationen dieser kommen. Solche „Bewegungen“ des Pfeilers übertragen sich direkt auf das darauf aufgebaute Messinstrument und können so Einfluss auf die einzelnen Beobachtungsgrößen nehmen.

4.4.1 Auswirkungen temperaturbedingter Pfeilerbewegungen

Eine Temperaturänderung verursacht bei isotropen Materialien gleiche Dehnungen in alle Richtungen. Die relativen Längenänderungen $\Delta l / l_0$ des Objekts besitzen dabei die gleiche thermische Dehnung (auch Wärme- oder Temperaturdehnung) ε^T . Diese Dehnung kann proportional zur Temperaturänderung ΔT gesetzt werden, wobei der Proportionalitätsfaktor α der Materialkonstanten bzw. Wärme- oder Temperaturdehnzahl entspricht (Formel 4-11 nach [Balke (2014), S: 17]) und nur in einem gewissen Temperaturbereich bezüglich der Bezugstemperatur gültig ist [Balke (2014), S: 17].

$$\varepsilon^T = \alpha \cdot \Delta T = \frac{\Delta l^T}{l_0}$$

Formel 4-11

mit $\alpha_{\text{Beton}} \dots$ ungefähr 11 ppm/°K

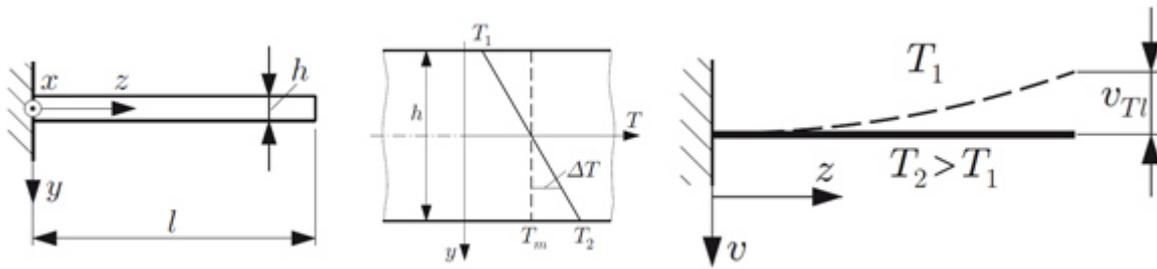


Abbildung 4-16: Biegelinie infolge von Temperaturbelastung [Balke (2014), S: 114-115]

Aus dieser linearen Beziehung kann in weiterer Folge über die Einführung von Biegemomenten und Flächenträgheitsmomenten die Verschiebung des Endes eines einseitig eingespannten Balkens berechnet werden. Für die detaillierte Herleitung wird auf [Balke (2014), S: 113-116] verwiesen.

Die Verschiebung des Balkenendes v_T lässt sich mit Formel 4-12 [Balke (2014), S:115] berechnen. Dabei werden neben den beiden Temperaturen T auch die Breite h sowie die Länge des Balkens l benötigt.

$$v_T(l) = -\alpha \cdot \frac{T_2 - T_1}{2h} l^2 = -v_{Tl} \quad \text{Formel 4-12}$$

mit h ... Breite des Balkens
 l ... Länge des Balkens
 T ... Temperaturen [°C]

Zusammen mit dieser Verschiebung des Pfeilers geht eine Verkippung der Aufsatzfläche des Messinstruments, welches auf dem Pfeiler montiert ist, einher. Diese kann näherungsweise über eine Dreiecksauflösung berechnet werden. Werden Temperaturunterschiede von rund 20 °C angenommen (Differenz zwischen größtem und niedrigstem Tageswert im Juli 2012), betragen die maximalen Verschiebungen der Pfeiler, bei Berücksichtigung der Maße aus Abbildung 4-15, ungefähr 0.8 mm. Eine Untersuchung des nördliche Pfeilers 2010 aufgrund beobachteter Neigungsänderungen und der Vermutung einer Pfeilerbewegung bestätigt die zuvor genannte Größenordnung solcher Bewegungen (Abbildung 4-17). Hierfür wurden im Laufe eines Tages mehrmals die Standpunktskoordinaten mittels einer „Freien Stationierung“ bestimmt und die relativen Änderungen zur Ausgangslage dargestellt. Der Temperaturunterschied zwischen der Tageshöchsttemperatur und der tagesniedrigsten Temperatur betrug im April 2012 ungefähr 16 °C.

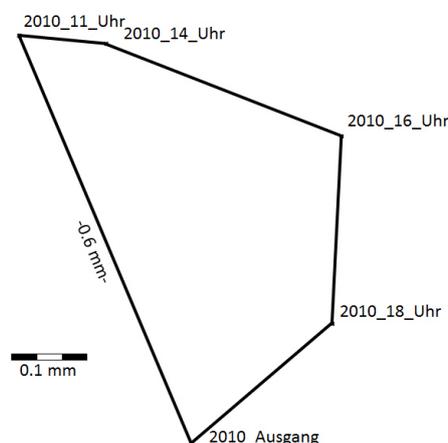


Abbildung 4-17: Relative Lageänderung Freie Stationierungen (April 2012) aufgrund von Pfeilerbewegung [AVT (2012)]

Diese laterale Verschiebung des Pfeilerendes kann somit durch Temperatur zustande kommen. Um solche Änderungen des Standpunktes zu berücksichtigen, wurde die Orientierung in regelmäßigen Intervallen von ca. 30 Minuten überprüft und bei der Ansteuerung der beobachteten Punkte berücksichtigt. Durch laterale Verschiebungen des Pfeilerendes von ca. 0.8 mm können wiederum Verkippungen in der Größe von ungefähr 40 mgon auftreten. Solche Änderungen würden die Winkelmessung deutlich beeinflussen. Diese Variationen, welche über den Tag verteilt in unterschiedlicher Größe und Richtung auftreten, werden jedoch durch den Neigungskompensator berücksichtigt, wobei die Onboard-Software der Messinstrumente sowie die Steuer- und Auswertesoftware Leica GeoMoS das Einhalten des Arbeitsbereiches des Neigungssensors überwacht. Ein korrektes Arbeiten des Neigungskompensators vorausgesetzt (eine mögliche Drift wurde im Abschnitt 4.3 untersucht), kann der Effekt der Pfeilerbewegung nicht für die beobachteten Variationen in Frage kommen.

4.5 Objekteigenschaft

Ein weiterer zu beachtender Aspekt, vor allem bei der reflektorlosen Distanzmessung, sind die Eigenschaften des beobachteten Zielobjekts. Durch sich verändernde Umgebungsbedingungen können unterschiedliche zyklische Änderungen der Oberfläche ebendieses Objekts auftreten. Solche „Bewegungen“ sind im Allgemeinen abhängig von der Ausrichtung, Lage und Zusammensetzung des Objekts. Diese zyklischen Variationen sind in der Regel relativ einfach, bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Umgebungsbedingungen, zu bestimmen.

Weitere Eigenschaften des Objekts bzw. der Objektoberfläche, wie z.B. Reflexionsverhalten aufgrund von Niederschlägen, können die Messpräzision der reflektorlosen Distanzmessung signifikant beeinflussen. Auch der Auftreffwinkel des Messstrahls auf das Objekt spielt hinsichtlich der zuverlässigen Distanzmessung eine gewichtige Rolle.

Neben diesen Möglichkeiten der Beeinflussung der reflektorlosen Distanzmessung, können auch unterschiedliche Strukturen der Oberfläche maßgeblichen Einfluss auf die Messgröße „Schrägdistanz“ nehmen. Durch unterschiedliche Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, sowie Abschattungsgebiete an der Felswand (z.B. Spalten, Klüfte), kann es zu ungleichen Temperaturen bzw. Temperaturänderungen an der Felsoberfläche kommen. Variationen der Felswandoberfläche können sich dabei schneller oder zeitverzögerter als die Änderung der Lufttemperatur verhalten und treten darüber hinaus oft nur lokal und inhomogen über die Felswand verteilt auf.

Durch die vielen einflussnehmenden Parameter dieser „Bewegungen“ können, mit den vorliegenden Datensätzen, keine direkten Abhängigkeiten einzelner, detektierter Variationen von temperaturbedingten Oberflächenbewegungen nachgewiesen werden. Um diesen Einfluss jedoch in den weiteren Untersuchungen zu berücksichtigen, wurden bei Test-, bzw. Überprüfungsmessungen an der „Biratalwand“ koaxiale Fotos der beobachteten Punkte während der Messung gemacht.



Abbildung 4-18: Koaxiales Foto des reflektorlosen Punktes 51114

In Abbildung 4-18 ist eine Fotoaufnahme der OAC („On-Axis-Camera“) der Multistation Leica Nova MS50 dargestellt. Es zeigt einen reflektorlosen Punkt, welcher Variationen in den Schrägdistanzwerten aufwies. Das Abbild bestätigt, dass ebenso Ziele, wo keine Spalten, Klüfte oder ähnliche Strukturänderungen auftreten, signifikante Variationen in den Beobachtungen der Distanz zeigen und Spalten und Klüfte nicht der hauptverursachende Grund für die detektierten zyklischen Schwankungen in den Schrägdistanzwerten sein kann.

4.6 Überblick: Theoretische Untersuchungen

Aus den theoretischen Untersuchungen zu den aufgestellten Hypothesen können nun mehrere Schlussfolgerungen gezogen. Diese sind als Basis für weiterführende Analysen mittels praktischer Untersuchungen notwendig.

Als Grundhypothese wurde angenommen, dass die Ursache für die aufgetretenen Messeffekte, welche sich auf Messstrahl, Messinstrument, Standpunkt oder Objekt in unterschiedlicher Form auswirken, in den Umweltbedingungen liegt. Dabei wurde vor allem der Einfluss der Variationen der Vertikalwinkel auf die sich ändernden Schrägdistanzwerte untersucht. Auch die unterschiedlichen Einflüsse atmosphärischer Effekte auf stabilisierte und reflektorlose Ziele wurden dabei nicht außer Acht gelassen.

Aus den Analysen zeigt sich, dass Modelle bezüglich der Auswirkung vertikaler Temperaturgradienten auf die Brechung des Messstrahls dem Verhalten der aufgezeichneten Messeffekte schon sehr nahekommen, jedoch aufgrund diverser Annahmen der Objektausrichtung, etc. diesen noch nicht völlig entsprechen. Auch die Möglichkeit temperaturbedingter Neigungsdriften, welche ein ähnliches Fehlerbild wie eine vertikale Refraktion aufweisen, kann, anhand der vorhandenen Datensätze, nicht zur Gänze ausgeschlossen werden. Die weiteren Möglichkeiten, welche untersucht wurden, bezüglich der umweltbedingten Variationseinflüsse konnten, aufgrund des Messablaufs (z.B. kontinuierliche Orientierungskontrolle), der Einstellungen (z.B. Neigungskompensator EIN) sowie durch koaxiale Fotos verschiedener Messpunkte, als Ursache für die Schrägdistanzvariationen ausgeschlossen werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Überblick der theoretischen Untersuchungen

Hypothese	Effekt	Mögliche Ursache	Argument
(A) Messstrahl	Meteorologische Geschwindigkeitskorrektur	Unwahrscheinlich	→ Variationen müssten auch bei Prismen auftreten → Aufgetretene Variationen benötigen ca. 100°C Temperaturänderung
(A) Messstrahl	Vertikale Refraktion	Möglich	→ Theoretische Modellierungen korrelieren mit den detektierten Effekten
(B) Instrument	Neigungsdrift	Teilw. möglich	→ Auswirkung zeigt gleiches Fehlerbild wie „(A) Messstrahl: Vertikale Refraktion“ → Temperaturänderungen müssten um ein Vielfaches größer sein → Fehlerhafter Sensor kann nicht ausgeschlossen werden

(C) Standpunkt (Pfeiler)	Pfeilerbewegung	Un- wahrscheinlich	→ Laterale Verschiebungen werden durch Orientierungskontrollen berücksichtigt → Verkippung der Pfeileroberfläche wird durch Neigungskompensator korrigiert
(D) Objekt (Struktur)	Bewegungen aufgrund von Spalten / Klüften / etc.	Un- wahrscheinlich	→ Auch Punkte ohne entsprechende Strukturen (z.B. Spalten) weisen Variationen der Schrägdistanz auf (über koaxiale Fotos nachgewiesen)

5 Praktische Untersuchungen

Aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen wurde ein Messkonzept für ein Felswandmonitoring erstellt, um die theoretischen Ursachen anhand praktischer Testmessungen zu verifizieren.

5.1 Konzept Messprogramm

Das Messkonzept für das Monitoringprogramm mittels reflektorloser Distanzmessungen wurde strukturiert auf fünf unterschiedliche Module aufgeteilt. Als Ausgangspunkt bzw. Basis wurde hierfür die Funktionsweise der Überwachungssoftware Leica GeoMoS herangezogen. In den verschiedenen Modulen (siehe Abbildung 5-1) sind die einzelnen Operationen zusammengefasst.

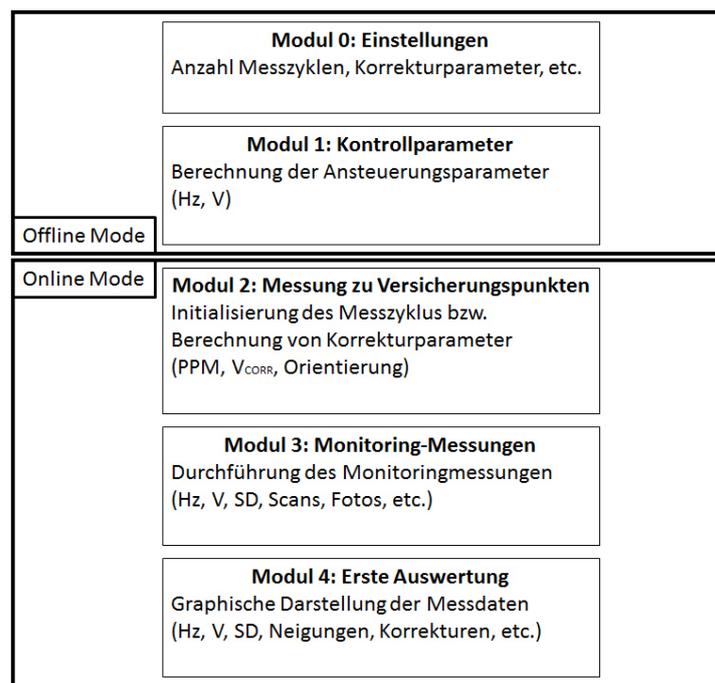


Abbildung 5-1: Einzelne Module des Monitoringprogramms

Die ersten beiden Module werden „offline“, also ohne eine bestehende Verbindung zum Messinstrument (Totalstation), durchgeführt. Darin werden einerseits alle benötigten Einstellungen hinsichtlich des Ablaufs des Programms bzw. der Punkteigenschaften getroffen. Unter anderem können hier die Anzahl der Messzyklen, gewünschte Punkte für die Korrekturbestimmung sowie weitere Daten (Scandefinition, Fotos, Speicherort, etc.) gewählt werden.

Im zweiten Modul werden die benötigten Ansteuerungsparameter (Horizontalrichtung und Vertikalwinkel) für die Totalstation berechnet. Hierbei müssen die dafür notwendigen Koordinaten bereits bekannt sein und in entsprechender Form (csv – Textdatei) vorliegen. In dieser Textdatei werden die Parameter hinsichtlich der stabilisierten Punkte, inklusive der automatischen Zielerfassung, sowie hinsichtlich der reflektorlosen Ziele bereits mitübergeben.

Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau zum Messinstrument werden die weiteren Module durchlaufen. Neben der Initialisierung des nächsten Messzyklus werden in Modul 2 die benötigten Korrekturparameter aus den Messungen zu den voreingestellten Versicherungspunkten berechnet und an das nächste Modul übergeben. In Modul 3 wird hierauf die eigentliche Überwachungsmessung durchgeführt. Nach erfolgreicher Messung werden die Daten in graphischer Darstellung ausgegeben und der nächste Messzyklus gestartet. Eine schematische Darstellung des Ablaufs eines Messzyklus ist aus Abbildung 5-2 ersichtlich, wobei zwei Optionen implementiert

wurden. Mittels der ersten Option soll der Effekt einer möglichen vertikalen Refraktion auf die reflektorlose Distanzmessung nachgestellt und mittels Option 2 entsprechend berücksichtigt werden.

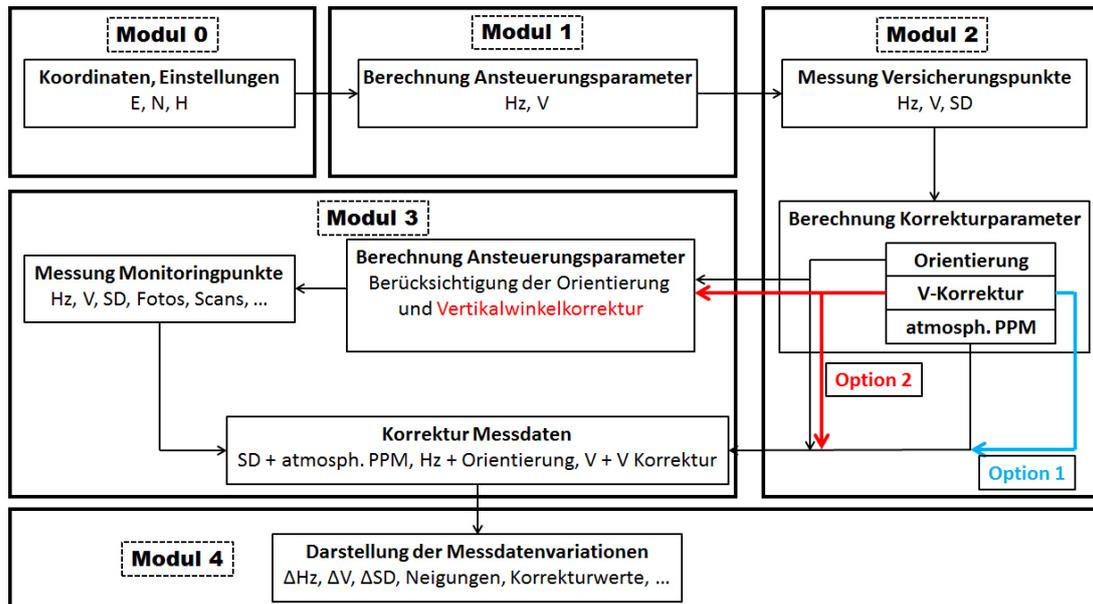


Abbildung 5-2: Schematischer Ablauf eines Messdurchgangs

Neben den allgemeinen Messdaten, welche für Verschiebungsberechnung von Punkten notwendig sind (Koordinatenberechnung aus Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz), können auch weitere Parameter, wie Fotos mittels koaxialer Kamera oder Weitwinkelkamera oder Oberflächenscans, zusätzlich ausgewählt werden. Diese Datensätze sind vor allem für das „post-processing“ interessant, da damit bis dato unbekannte bzw. unerwartete Variationen in den Messdaten durch Mehrinformation untersucht werden können. Unter anderem ist es dadurch möglich, die Oberflächenrauigkeit, bzw. Beschaffenheit sowie die relative Lage, vor allem hinsichtlich reflektorloser Punkte, zu ermitteln, um gewisse Fehlerquellen ausschließen oder als Ursache detektieren zu können. Das zuvor beschriebene Monitoringkonzept wurde in weiterer Folge auch implementiert. Verwendet wurde hierfür die Programmierumgebung MATLAB der Firma „The MathWork Inc.“. Die Ansteuerung der Messinstrumente via Notebook wurde dabei über eine serielle RS232 Schnittstelle realisiert, wobei die einzelnen Befehle hierfür mittels der Leica GeoCOM Schnittstelle erfolgten. Das GeoCOM-Protokoll besteht aus einzelnen ASCII-Befehlen, welche für bestimmte Ausführungen am Messinstrument verantwortlich sind und dabei entsprechende Daten bzw. Fehlermeldungen an die NutzerInnen zurückgeben. Dadurch ist es möglich bestimmte Ereignisse im Messzyklus den einzelnen Messabläufen entsprechend zuzuordnen.

5.2 Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“

In Kapitel 4 wurden bereits die vermuteten Ursachen für die detektierten Variationen in den Schrägdistanzwerten mit den vorhandenen Datensätzen genauer untersucht. Dabei wurde die Möglichkeit des Auftretens einer vertikalen Refraktion während der Überwachungsmessungen sowie einer ungenügenden Beachtung dieses Effekts als sehr wahrscheinlich bewertet. In weiterer Folge wird überprüft, ob sich das Auftreten variierender vertikaler Temperaturgradienten bei realen Messungen entsprechend der in Abschnitt 4.2 dargestellten Weise auswirken kann.

Zu diesem Zweck wurde am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz ein praktischer Test durchgeführt.

5.2.1 Testsetup

Als Standpunkt für die Testmessungen wurde der Pfeiler 4 am Dach des Geodäsiegebäudes „Steyrergasse 30“ (siehe Abbildung 5-3) gewählt. Neben dem Messinstrument, Multistation Leica Nova MS50 (A), wurden zwei Temperatursensoren zur Aufzeichnung der Meteorologie verwendet. Eine Meteostation (B) dient zur Aufzeichnung der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, relative Feuchtigkeit) und wurde dabei mit einem Strahlenschutz (C) ausgestattet, um nicht durch direkte Sonneneinstrahlung erwärmt zu werden. Eine weitere Meteostation (D) befand sich knapp über dem Messstrahl der Multistation. Dieser Sensor diente der unmittelbaren Erfassung der Temperatur in der Umgebung der Visur. Hinter den aufgebauten Abschattungswänden (E) befand sich ein Heizstrahler, um eine künstliche Refraktion in der Nähe des Messinstruments zu erzeugen.



Abbildung 5-3: Testsetup am Prüffeld "Dach Steyrergasse 30" - Aufbau

Die beobachteten Punkte (siehe Abbildung 5-4) lagen jeweils in einer Entfernung von ca. 150 m, um die Auswirkungen vertikaler Refraktion auf ähnliche Strecken wie bei der Überwachungsmessung „Biratalwand“ zu überprüfen. Detaillierte Angaben zum Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ sind [Fleckl (2007)] zu entnehmen.

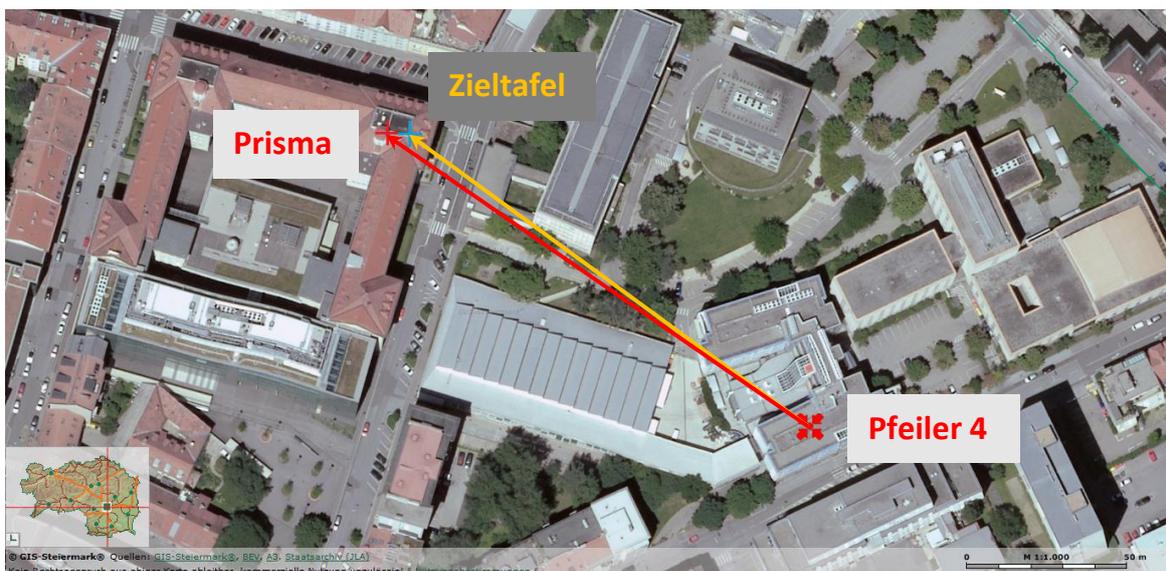


Abbildung 5-4: Testsetup Prüffeld "Dach Steyrergasse 30" – Aufnahmekonfiguration
(Hintergrundbild: [GIS STEIERMARK (2015)])

Um einen künstlichen vertikalen Temperaturgradienten zu erzeugen, wurde, wie bereits erwähnt, ein Heizradiator als Wärmequelle verwendet. Dieser wurde ungefähr 1 m vor dem Messinstrument unter der Visur zu den ausgewählten Punkten aufgestellt. Damit sollte der Einfluss auftretender Refraktion in der Nähe des Messinstruments simuliert werden. Der spezifische Aufbau der Überwachungsmessung „Biratalwand“ 2012 lässt die Vermutung zu, dass Refraktionserscheinungen, in der Nähe der Totalstationen auftreten konnten. Durch den Witterungsschutz (Kübel), sowie den geschlitzten Pfeilerschutz aus Kunststoff, konnte bei starker Erwärmung des Schutzrohres sowie des Kübels zudem der sogenannte Kamineffekt auftreten. Dabei steigt die wärmere Luft durch den Pfeilerschutz empor und kann somit verstärkt vertikale Temperaturgradienten unmittelbar vor dem Messinstrument verursachen. Zum Schutz vor starken Verwirbelungen der Temperaturgradienten durch Wind, etc. wurden links und rechts zwei Schutzwände am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ aufgestellt.



Abbildung 5-5: Testsetup Prüffeld "Dach Steyrergasse 30": Radiator

Als Software wurde das bereits implementierte Monitoringkonzept (Option 1) aus Abschnitt 5.1 verwendet. Dabei wurden die beiden Überwachungspunkte (1x stabilisiert, 1x reflektorlos) über den Zeitraum einiger Stunden kontinuierlich beobachtet, wobei mittels des Heizradiators vertikale Temperaturgradienten erzeugt wurden. Neben den Beobachtungsgrößen Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz wurden die Neigungswerte, koaxiale Fotos und Korrekturwerte hinsichtlich Orientierung, Vertikalwinkelkorrektur und atmosphärischen PPM aufgezeichnet. Auch die Meteorologie wurde kontinuierlich gemessen.

Durch diesen Aufbau sollte es möglich sein die Auswirkung starker Temperaturgradienten auf die Beobachtungsgrößen Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz ersichtlich zu machen.

5.3 Messkampagne „Biratalwand“

Neben den bereits erwähnten Effekten auf den Messstrahl hat auch die relative Lage sowie Oberflächenbeschaffenheit der beobachteten Punkte einen großen Einfluss auf die Variationen der Messergebnisse. Letztere können in unterschiedlichen Größenordnungen, abhängig von den einzelnen Objekten, in verschiedenen Formen auftreten. Natürliche Objekte haben keine einheitlichen Formen und Strukturen und sind im Allgemeinen nur sehr schwer durch mathematische Modelle beschreibbar, da sie vor allem lokal starken Änderungen unterworfen sind.

Aus diesem Grund wurde zur Untersuchung der aufgetretenen Messeffekte eine Messkampagne an der „Biratalwand“ in Dürnstein, Niederösterreich, selbst durchgeführt. Geplant wurde eine mehrtägige (14.01.-16.01.2015) Messkampagne vor Ort, überprüft werden sollte dabei einerseits die relative Lage der beobachteten reflektorlosen Ziele sowie andererseits mögliche weitere Einflussparameter auf ein Langzeitmonitoring der Felswand. Die Messungen erfolgten von beiden Standpunkten aus, welche auch bei der Überwachungsmessung 2012 Verwendung fanden.

5.3.1 Profilmessung

Ziel der Profilmessung der Umgebung reflektorloser Punkte ist es zu überprüfen, ob die detektierten Vertikalwinkelvariationen die beobachteten Änderungen in den Schrägdistanzmessungen hervorrufen können. Zu diesem Zweck wurden am 14.01.2015 die Profile ausgewählter reflektorloser Ziele von beiden Standpunkten aus aufgenommen.



Abbildung 5-6: Aufbau Profilmessung Standpunkt 1000

Verwendet wurde hierfür die Multistation Leica Nova MS50 (siehe Abbildung 5-6), wobei die Ansteuerung über ein Notebook mittels der, in Matlab implementierten, Software, die in Abschnitt 5.1 beschrieben wurde, erfolgte. Für die Berechnung der Ansteuerungsparameter wurde die Option 1 des Monitoringprogrammes gewählt). Aufgezeichnet wurden neben den Beobachtungsgrößen Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz auch koaxiale Fotos der eingebauten Kamera.

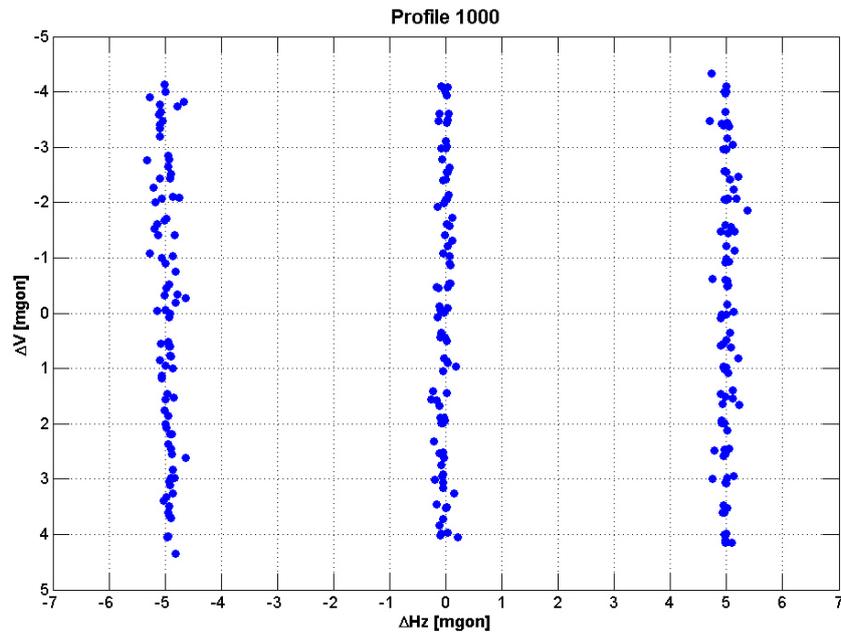


Abbildung 5-7: Darstellung Profilmessung vom Standpunkt 1000

Für die Profilmessung wurden drei vertikale Profile der reflektorlosen Punkte gemessen. In vertikaler Richtung wurde die doppelte Spannweite detektierter Vertikalwinkelvariationen des Jahres 2012 als Grenzwert (Max/Min) ausgewählt. Im Fall des südlichen Standpunktes 1000 waren dies ± 4 mgon im Vertikalwinkel (siehe Abbildung 5-7) mit einer Auflösung von 0.5 mgon. In horizontaler Richtung wurden Abstände von ± 5 mgon gewählt, um einen besseren Eindruck der relativen Lage der Felsoberfläche bezüglich des Messstrahls zu erhalten.

Für die soeben beschriebenen Messungen wurden reflektorlose Ziele, die auf dem, geologisch betrachtet, gleichen Felsblock liegen, ausgewählt (siehe Abbildung 5-8). Ein weiteres Kriterium war, dass die Punkte bis zur Einstellung der Überwachungsmessung 2012 beobachtet wurden, um einen Vergleich zwischen 2012 und 2015 zu ermöglichen.



Abbildung 5-8: Ausgewählter Felsblock 43 (links: Blick von Standpunkt 2010; rechts: Blick von Standpunkt 1000)

Der Felsblock 43 wurde von beiden Standpunkten aus beim Monitoring 2012 reflektorlos überwacht, wobei jedoch unterschiedliche Flächen (blau eingerahmt) beobachtet wurden.

5.3.2 24h-Monitoring

Im zweiten Teil der Messkampagne wurde von beiden Standpunkten aus jeweils ein 24-Stunden Monitoring durchgeführt. Ziel dieses Monitorings war es die aufgetretenen Effekte der Überwachungsmessung zu reproduzieren und durch entsprechende Korrekturen zu eliminieren. Zu diesem Zweck wurde versucht, das Monitoring aus dem Jahr 2012 nachzustellen. Daher wurden neben den gleichen Versicherungspunkten zur Bestimmung der Korrekturparameter (siehe Tabelle 2-3) auch der Witterungsschutz (siehe Abbildung 5-9) nachgebaut.



Abbildung 5-9: Leica Nova MS50 am Pfeiler 1000 mit nachgebaute Witterungsschutz

Für die Nachstellung der Überwachungsmessung wurden die gleichen Einstellungen, Korrekturparameter sowie derselbe Messablauf wie 2012 gewählt (siehe Abbildung 2-7). Über den gesamten Zeitraum wurden, sowohl drei stabilisierte als auch drei reflektorlose Ziele überwacht. Im Fall der stabilisierten Punkte wurde jeweils ein Prisma im Kontrollbereich des jeweiligen Standpunktes, im Gefahrenbereich und am anderen Pfeilers beobachtet (siehe Abbildung 2-9). Neben der Reproduktion der detektierten Effekte beinhaltet das Monitoring auch einen entsprechenden Lösungsansatz für ebendiese. Während bei der Nachstellung der Variationen eine Vertikalwinkelkorrektur erst nach der Messung der vordefinierten Punkte Anwendung findet, wird diese beim erstellten Lösungsansatz bereits bei der Ansteuerung berücksichtigt.

Zusätzlich wurden Fotos mit der koaxialen Kamera des Messinstruments sowie Punkte in der Umgebung der reflektorlosen Ziele aufgezeichnet, um Informationen über die Objektoberfläche zu erhalten. Auch die Meteorologie und Neigungswerte in beiden Kreislagen wurden zu Analysezwecken gespeichert.

6 Ergebnisse

6.1 Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“

Bei den Messungen eines stabilisierten und eines reflektorlosen Zieles (siehe Abbildung 6-1) am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme wurden die Auswirkungen auftretender Refraktion in der Nähe des Messinstruments auf die Winkel- und Distanzmessung auf stabilisierte und reflektorlose Ziele überprüft.



Abbildung 6-1: Beobachtete Punkte der Messungen Prüffeld "Dach Steyrergasse 30"

Beobachtet wurden dabei abwechselnd beide Ziele. Wie bereits bekannt, beeinflussen Temperaturgradienten die Brechung der Visur und somit die Winkelmessung der Totalstation.

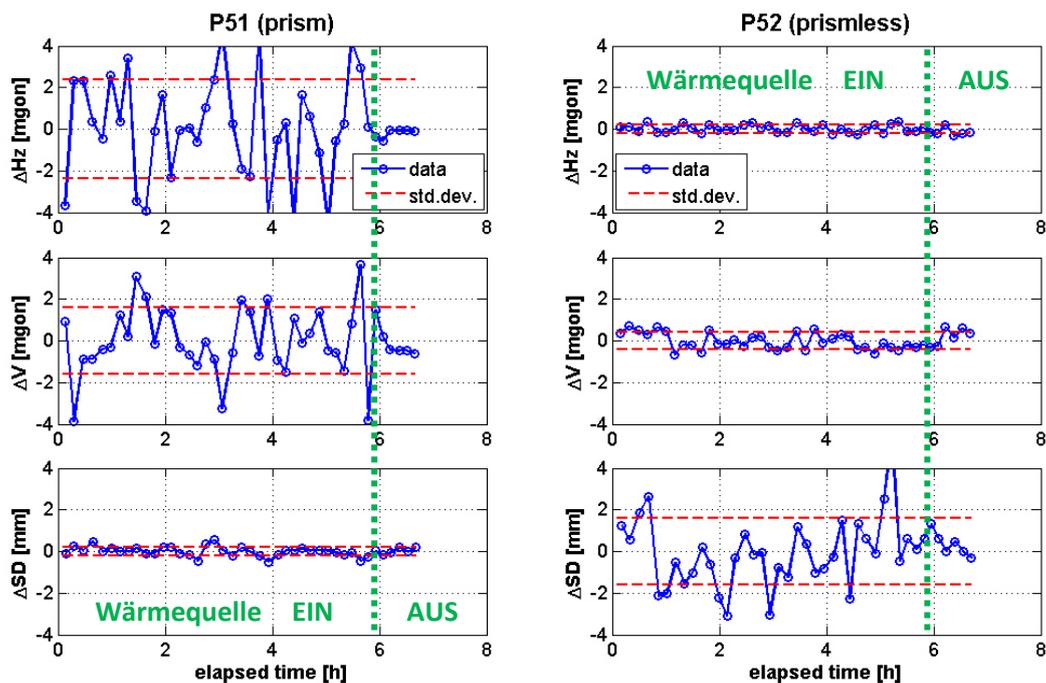


Abbildung 6-2: Variationen der Messdaten des stabilisierten Punktes 51 und reflektorlosen Ziels 52

In Abbildung 6-2 sind die einzelnen Messdatenänderungen abgebildet. Die Auswirkungen der Refraktion auf die Richtungs- und Winkelmessung sind beim stabilisierten Punkt 51 klar ersichtlich. Durch die künstliche punktuelle Wärmequelle findet jedoch anscheinend eine starke Verwirbelung der Temperaturgradienten statt, welche auch durch den Windschutz (Abbildung 5-5) nicht verhindert werden konnte. Dies bewirkt, dass keine Systematik in den Änderungen erkennbar ist und dass Letzteres auf die Horizontalrichtung und den Vertikalwinkel gleichermaßen auswirken. Die Variationen in den Winkelmessungen werden durch die Kombination auftretender Refraktion sowie eingeschalteter automatischer Zielerfassung hervorgerufen. Weiters ist zu erkennen, dass die beobachtete Schrägdistanz (bereits meteorologisch korrigiert) während des gesamten Beobachtungszeitraumes stabil bleibt. Nach Abschaltung der künstlichen Wärmequelle (ca. nach 6 Stunden: siehe Abbildung 6-2) beruhigen sich die starken Fluktuationen der Winkelmessungen und somit auch die Distanzmessung des reflektorlosen Ziels. Die Variationen der reflektorlosen Messungen auf die Zieltafel 52 zeigen das, aus den theoretischen Untersuchungen erwartete Bild. Während die Richtungs- und Winkelmessdaten keinerlei Änderungen aufgrund der auftretenden Temperaturgradienten zeigen, sind deutliche Variationen in den Schrägdistanzwerten (meteorologisch korrigiert) zu erkennen.

Diese Darstellungen bestätigen das vermutete Fehlerbild aufgrund nicht beachteter Refraktion bei der Ansteuerung von stabilisierten und reflektorlosen Zielen. Verglichen mit den aufgetretenen Variationen in den Messdaten der Überwachungsmessung „Biratalwand“ sind diese in der dargestellten Messung gering. Um einen möglichen Einfluss der relativen Lage der beobachteten Oberfläche zu ermitteln, wurde ein „Beobachtungsscans“ (siehe Abbildung 6-3) in Form von Messungen an neun verschiedenen Stellen (5x5 mgon) verteilt um den gesuchten Punkt durchgeführt. Mittels dieses „Scans“ kann nun auf die relative Lage und den Einfluss variierender Winkel auf die Schrägdistanzmessung geschlossen werden. Dabei ist zu erkennen, dass die Oberfläche, hier eine Zieltafel an einer Gebäudewand, schräg gegenüber dem Visurstrahl liegt, wobei die Drehachse der, in die Punkte geschätzte Ebene, annähernd vertikal im beobachteten Punkt verläuft. Dadurch, und durch eine annähernd horizontale Visur, ist ersichtlich, dass sich Schwankungen der Winkelmessungen im 2- mgon Bereich nur gering auf die Schrägdistanzmessung auswirken.

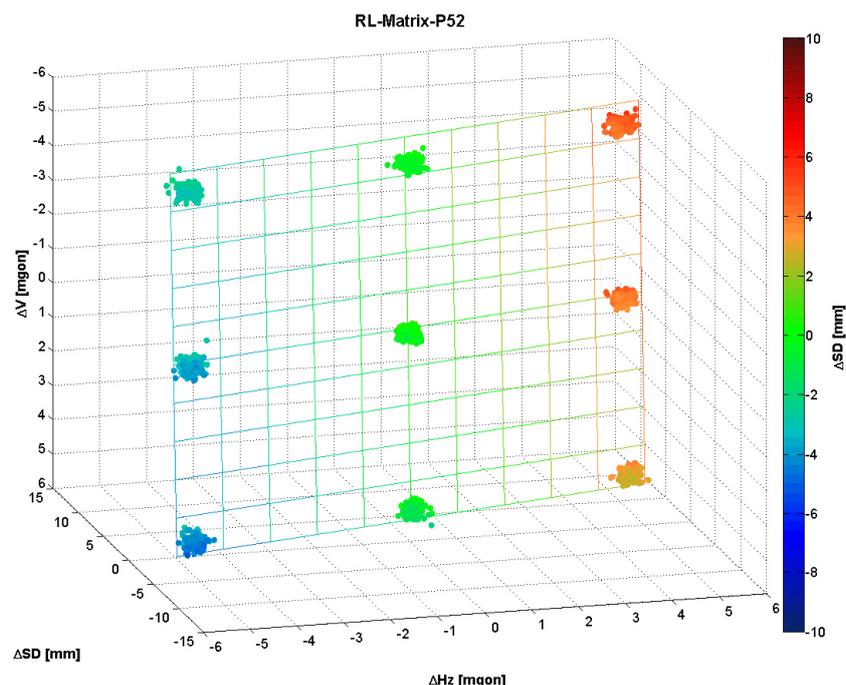


Abbildung 6-3: Ergebnisse des "Umgebungsscans" der Zielmarke 52 am Prüffeld "Dach Steyrergasse 30"

Die Messung am Prüffeld „Steyrergasse 30“ bestätigten somit die Wirkungsweise sowie das Fehlerbild einer möglichen Refraktion bei der Ansteuerung reflektorloser Punkte.

6.2 Messkampagne „Biratalwand“

Die Messkampagne an der Biratalwand bestand aus zwei Teilen: Einerseits aus der Nachstellung und Berücksichtigung der detektierten Variationen im Zuge einer 24-stündigen Dauermessung und andererseits aus einer Überprüfung der Oberflächenumgebung ausgewählter reflektorloser Ziele mit dem Zweck zu erkennen, ob sich (entsprechende) Vertikalwinkeländerungen in der Schrägdistanz auf die beobachteten Größen auswirken können.

6.2.1 24h-Monitoring

Da die detektierten Messeffekte Tagesgänge aufwiesen und an beiden Standpunkten unterschiedlich groß ausfielen, wurde an beiden Pfeilern ein 24-stündiges Monitoring durchgeführt, um einen vollständigen Tageszyklus aufzuzeichnen. Um mögliche Auswirkungen auftretender Umwelteinflüsse auf die Messdaten zu eruieren, wurden zusätzlich Meteorologie, verschiedene Korrekturparameter und die Werte des Neigungskompensators in beiden Kreislagen mitbestimmt.

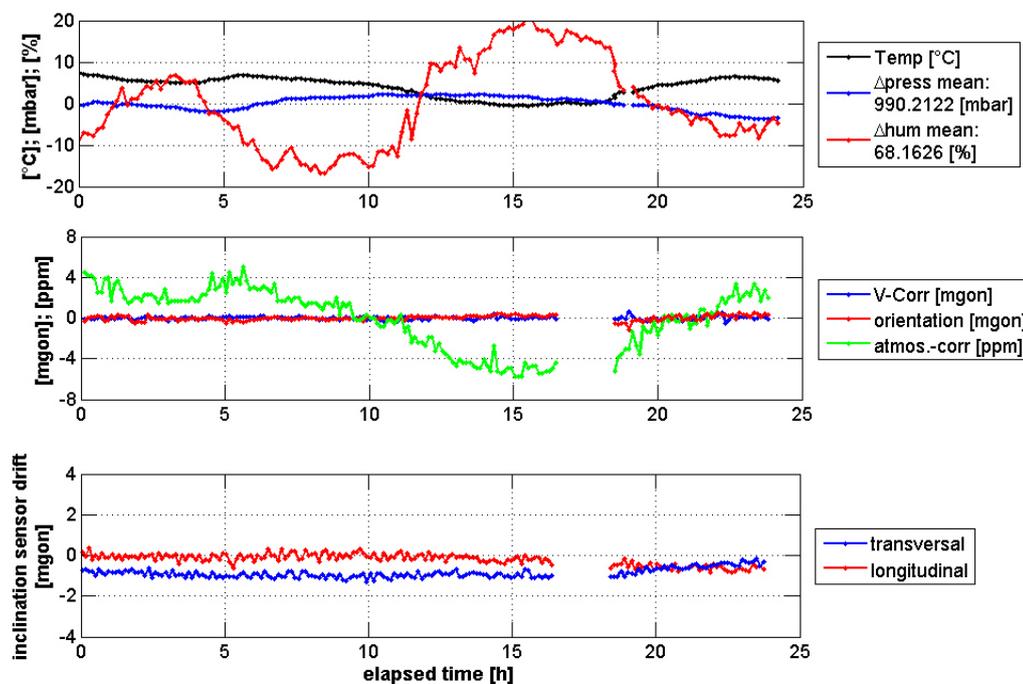


Abbildung 6-4: Zusätzlich aufgezeichnete Daten – Messkampagne „Biratalwand“ – Standpunkt 1000

In Abbildung 6-4 sind diese zusätzlichen Parameter am südlichen Standpunkt 1000 während des 24-stündigen Monitorings dargestellt. Dabei sind neben der absoluten Umgebungstemperatur auch die Variationen des Luftdrucks sowie der relativen Feuchtigkeit ersichtlich. Auch die Änderungen der drei Korrekturparameter, Vertikalwinkelkorrektur, Orientierungsbestimmung und atmosphärische Geschwindigkeitskorrektur, sind abgebildet. Abschließend wurde durch die Messung in beiden Kreislagen und den dabei ermittelten Neigungswerten in Zielachs- und Kippachsrichtung der Spielpunkt des Neigungskompensators in beide Richtungen bestimmt.

Die Darstellungen in Abbildung 6-4 zeigen, dass sich keine starken meteorologischen Änderungen während der Messungen zugetragen haben. Temperaturbedingte Schwankungen von < 10 °C sind erkennbar. Diese Änderungen werden durch die atmosphärische Geschwindigkeitskorrektur, welche einen gleichen Verlauf besitzt, kompensiert. Meteorologische Auswirkungen auf die Winkelkorrekturparameter, Orientierung und Vertikalwinkelkorrektur sind dabei nicht erkennbar und

bleiben über den gesamten Beobachtungszeitraum stabil. Auch eine mögliche Drift des Neigungskompensators ist nicht erkennbar. Der Spielpunkt des Neigungssensors zeigt keine signifikanten Variationen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse werden in den Messdaten, Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägdistanz keine ähnlichen Effekte, wie bei der Überwachungsmessung 2012 erwartet. **Abbildung 6-5** zeigt das Ergebnis dieser Messdaten (mittelwertszentriert) vom südlichen Standpunkt 1000 aus. Diese Beobachtungsgrößen sind bereits um die ermittelten Korrekturwerte korrigiert.

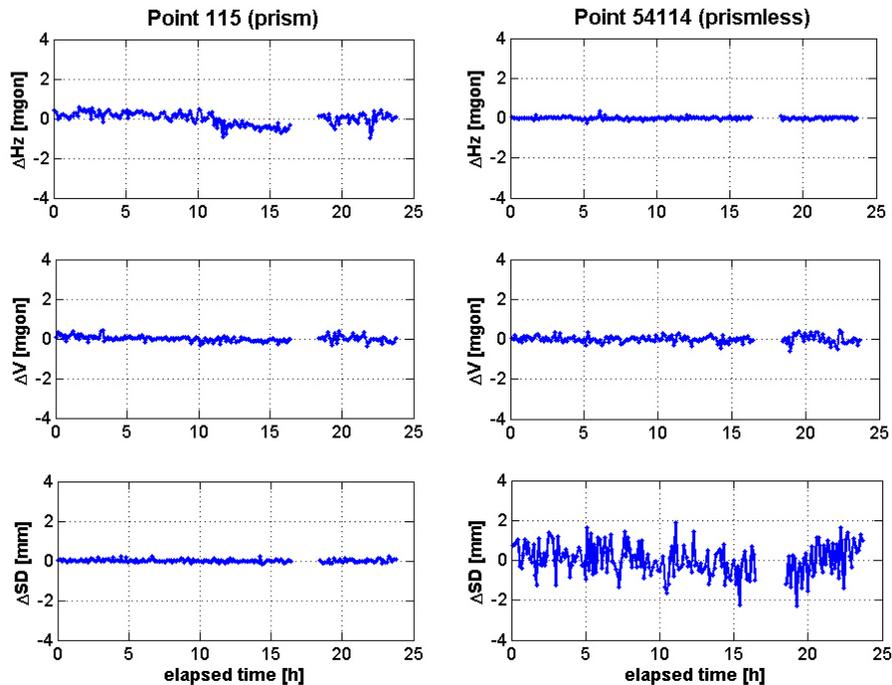


Abbildung 6-5: Ergebnisse 24h-Monitoring - Messkampagne "Biratalwand" - Standpunkt 1000

In den Darstellungen der Abbildung 6-5 sind keine Variationen in den Richtungs- bzw. Vertikalwinkelwerten des stabilisierten Punktes 115 erkennbar. Ebenso zeigt die Zeitreihe der Schrägdistanzen des reflektorlosen Zieles 54114 keine zyklischen Schwankungen. Wie schon nach Betrachtung der Meteorologiedaten sowie Korrekturparameter vermutet wurde, kann kein unmittelbarer Einfluss der Umweltbedingungen in Form von Refraktion auf die Messgrößen beobachtet werden. Vor allem aufgrund der geringen Temperaturschwankungen sowie der größtenteils bedeckten Witterungsverhältnisse während der Messung treten keine Temperaturgradienten in der benötigten Größenordnung auf, sodass die Beobachtungsgrößen signifikant beeinflusst werden. Wie vom südlichen Standpunkt weisen auch die Messdaten vom nördlichen Standpunkt 2010 (siehe Abbildung 6-6) keinerlei zyklische Schwankungen während der gesamten Beobachtungsdauer auf.

Die aufgestellte Hypothese, dass einwirkende Umgebungsbedingungen, allen voran vertikale Refraktion, aufgrund sich ändernder Temperaturgradienten die Ursache für die detektierten Variationen darstellt, konnte nicht nachgewiesen werden. Es ist lediglich die Präzisionsgenauigkeit des Messinstruments ersichtlich.

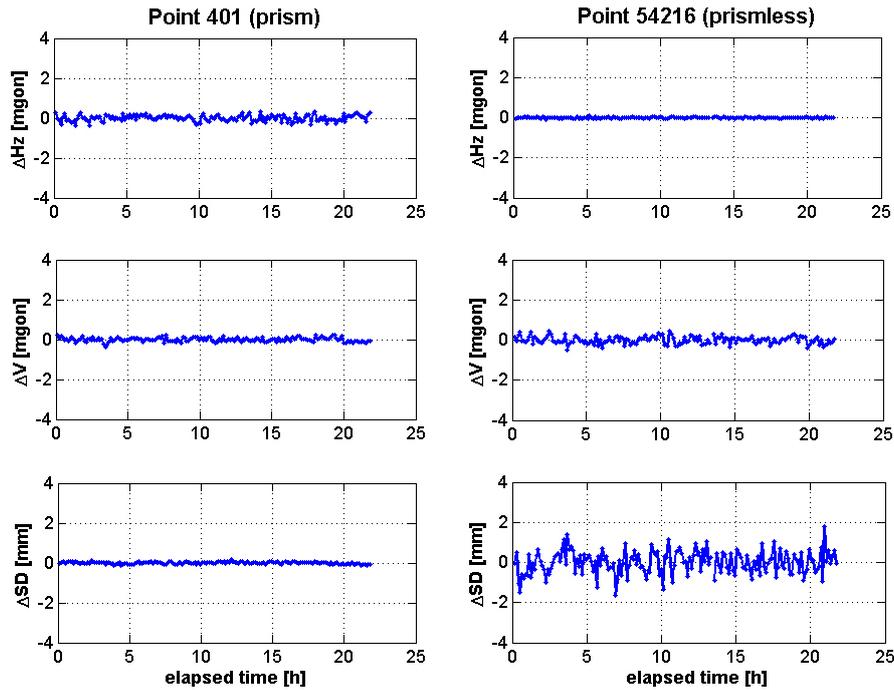


Abbildung 6-6: Ergebnisse 24h-Monitoring - Messkampagne "Biratalwand" - Standpunkt 2010

6.2.2 Profilmessung

Im zweiten Teil der Messkampagne „Biratalwand“ wurden die Profilmessungen von beiden Standpunkten aus vorgenommen. Die Messkonfiguration bzw. weitere Einstellungen können Abschnitt 5.3.1 entnommen werden. In weiterer Folge werden die Ergebnisse zweier repräsentativer Punkte (54114, 54231) herausgegriffen und näher betrachtet, da die weiteren Messpunkte dieselben Schlussfolgerungen zur Profilmessung nach sich ziehen.

6.2.2.1 Punkt 54114

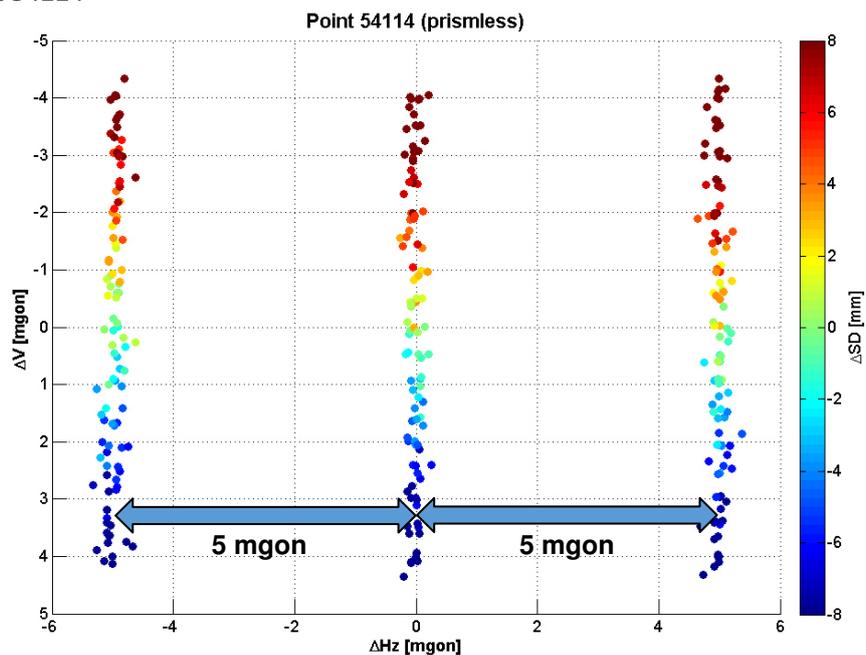


Abbildung 6-7: RL-54114: Distanzvariationen der Profilmessung

In Abbildung 6-7 sind die Schrägdistanzvariationen der Profilmessung des reflektorlosen Ziels 54114 vom Standpunkt 1000 aus dargestellt. Dabei sind die drei vertikalen Profile mit einer Auflösung von 5 mgon in der Horizontalrichtung und 0.5 mgon in vertikaler Richtung ersichtlich. Weiters sind die Schrägdistanzabweichungen vom gesuchten Punkt 54114 farblich abgebildet. Dabei ist ersichtlich, dass Änderungen im Vertikalwinkel signifikante Variationen in der Schrägdistanz hervorrufen, wobei eine Verringerung der Zenitdistanz einen größeren Distanzwert hervorruft und vice versa.

Stellt man die Änderungen der beiden Beobachtungsgrößen ΔV und ΔSD einander gegenüber, so wird diese Beziehung verdeutlicht. In Abbildung 6-8 ist ein solcher Vergleich für das Ziel 54114 angeführt. Darin wird zusätzlich die Gegenüberstellung dieser Größen aus der Überwachungsmessung 2012 der Firma „Vermessung AVT ZT-GmbH“ abgebildet. Im Fall der Messpunkte der Profilmessung 2015 wurden hier alle drei vertikalen Profile gegen die gemessenen Schrägdistanzvariationen aufgetragen.

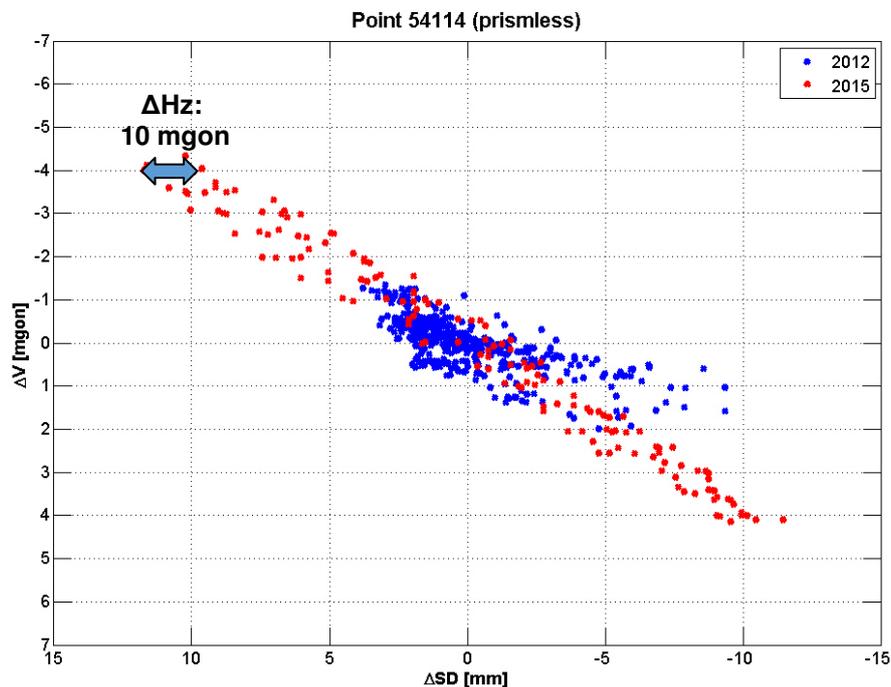


Abbildung 6-8: RL-54114: Gegenüberstellung ΔSD vs. ΔV der Profilmessung

In der Abbildung wird verdeutlicht, dass sich die Variationen der Schrägdistanzen während des Monitorings 2012 ähnlich gegenüber den Vertikalwinkeländerungen verhalten wie bei der Profilmessung 2015. Einzig in den Spitzen der Distanzwertänderungen scheint noch ein weiterer Faktor die Beobachtungsgröße „SD“ zu beeinflussen.

Zur detaillierteren Betrachtung werden die beobachteten Vertikalwinkelvariationen am Standpunkt 1000 des Monitorings 2012 in 0.5 mgon Schritten (vertikale Auflösung der Profilmessung) nachmodelliert (siehe Abbildung 6-9). Mittels dieser Werte werden nun über die ermittelte Beziehung der Vertikalwinkeländerung zur Schrägdistanzvariation aus der Profilmessung die möglichen Variationen der Schrägdistanzwerte nachgebildet.

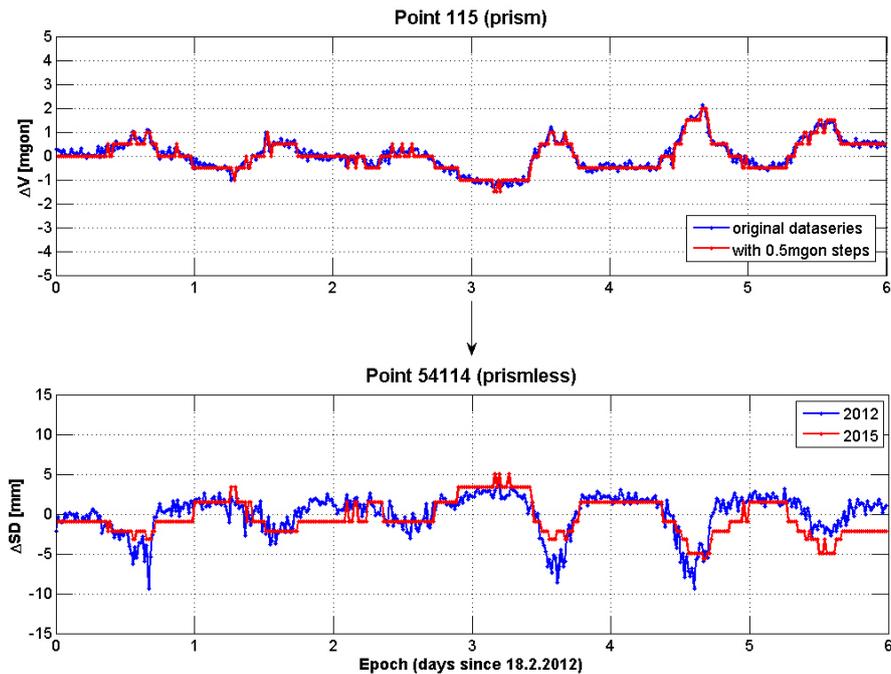


Abbildung 6-9: RL-54114: Modellierung der Distanzvariationen aus der Beziehung ΔV zu ΔSD aus der Profilmessung

Dieses Modell ist in Abbildung 6-9 (unten) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Modell (in Rot gehalten) der aufgezeichneten Datenreihe aus 2012 schon gut anpasst, dass jedoch, wie bei der Betrachtung der Abbildung 6-8 vermutet, die Spitzen der Distanzwertänderungen nicht entsprechend nachmodelliert werden können.

Zur weiteren Analyse muss das Umfeld des reflektorlosen Ziels genauer betrachtet werden. Der Punkt 54114 wurde vom südlichen Standpunkt 1000 aus aufgenommen und befindet sich am Felsblock 43 (siehe Abbildung 5-8).

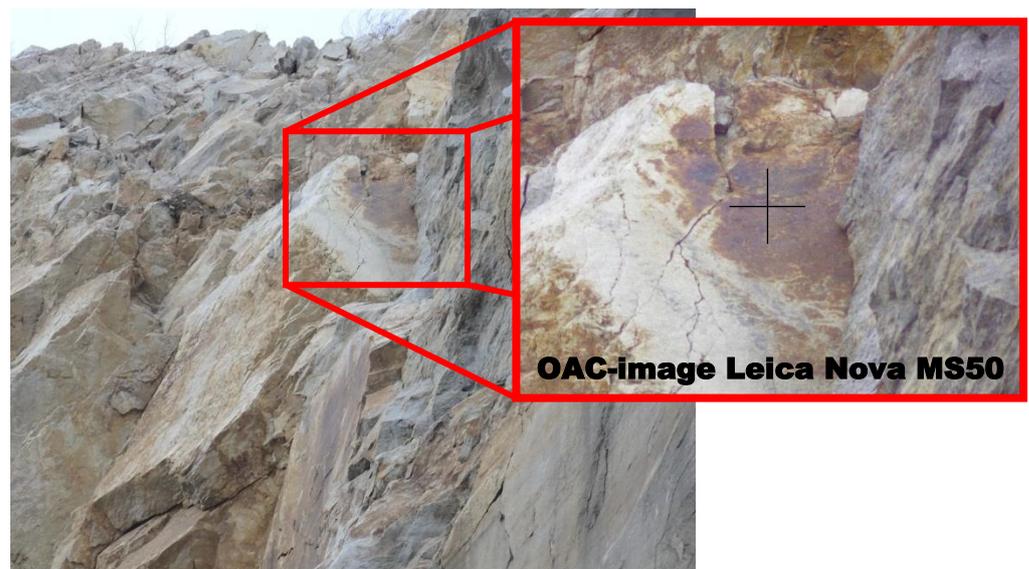


Abbildung 6-10: Fotoaufnahmen des Punktes-54114 auf "Felsblock 43" - Blick vom südlichen Standpunkt 1000

Die Lage des reflektorlosen Ziels 54114 am Felsblock 43 ist in Abbildung 6-10 ersichtlich. Mittels der koaxialen Fotos des Messinstrumentes kann die genaue Lage des reflektorlosen Punktes am Objekt identifiziert werden. Um mögliche Auswirkungen von Winkelvariationen besser zu verdeutlichen,

müssen die Größenverhältnisse auf den Fotos beachtet werden. Die Teleskopkamera der Multistation Leica Nova MS50 besitzt einen Öffnungswinkel von 1.5° (diagonal) [Leica (2013)]. Bei einer Auflösung von 5 Mpixel (2560x1920) wird bei einer Distanz von ca. 130 m (durchschnittliche Entfernung der Ziele am Standpunkt 1000) ein Bereich von ca. $5.1 \times 3.8 \text{ m}^2$ aufgenommen. Der Laserspot für die reflektorlose Distanzmessung besitzt eine Strahldivergenz von $0.2 \times 0.3 \text{ mrad}^2$, was im Fall der Überwachungsmessung (Distanzen: $\approx 130 \text{ m}$) einen Messspot am Felsblock von $26 \times 39 \text{ mm}^2$ ($\approx 10.1 \text{ mm}^2$) verursacht. Das bedeutet, dass der ermittelte Distanzwert einen Mittelwert über diese Fläche darstellt und bei Änderungen in vertikaler oder horizontaler Richtung, aufgrund einer sich ändernden Felsoberfläche, variieren kann.

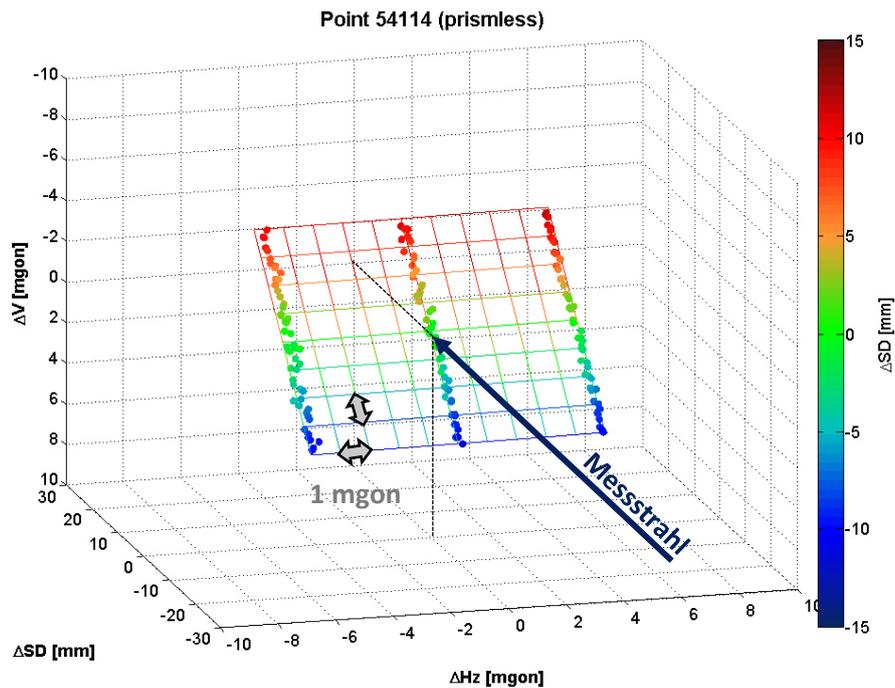


Abbildung 6-11: RL 54114 - 3D Darstellung der Profilmessung 2015

In Abbildung 6-11 werden die ermittelten Schrägdistanzwerte bei der Profilmessung dargestellt. Zusätzlich ist der Visurstrahl vom Messinstrument dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass bereits geringe Schwankungen im geringen Milligon-Bereich vor allem in vertikaler Richtung signifikante Distanzänderungen mit sich bringen können. Der Zusammenhang zwischen der relativen Lage der Oberfläche und den beobachteten Variationen der Schrägdistanz sind nochmals in Abbildung 6-12 dargestellt.

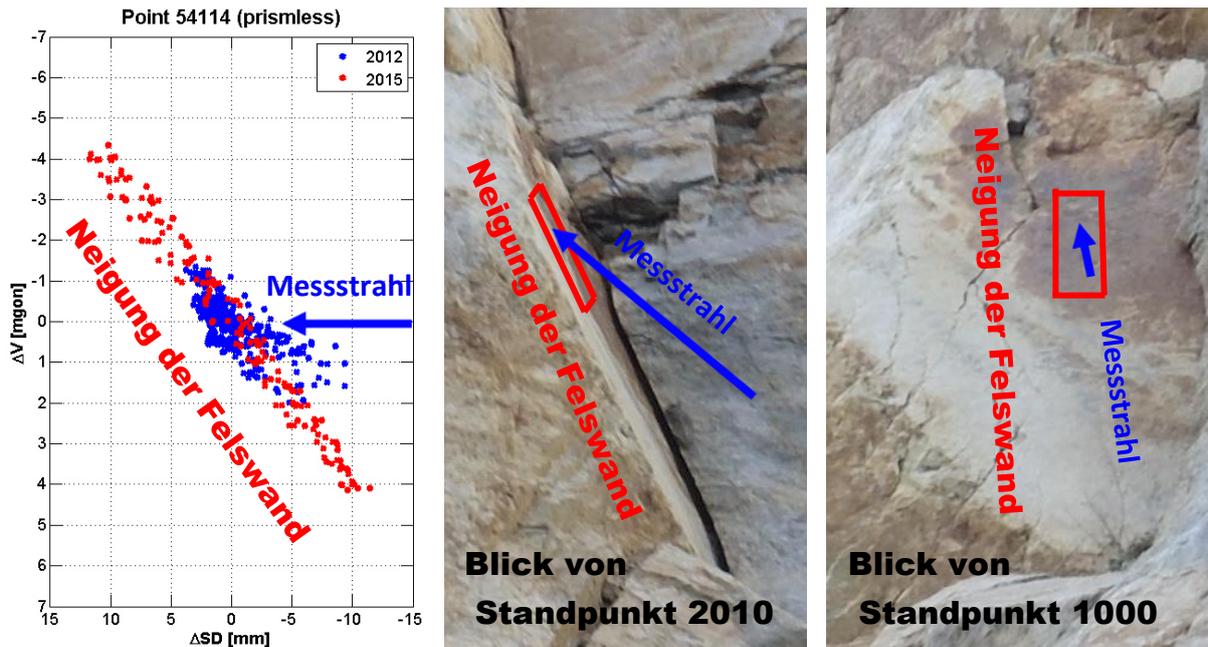


Abbildung 6-12: RL 54114: Vergleich der Profilmessung mit den Fotoaufnahmen

Die ermittelten Schrägdistanzabweichungen lassen sich durch die Lage der Felsoberfläche relativ zum Messstrahl gut erklären. Es gilt zu berücksichtigen, dass sich neben den Variationen im Vertikalwinkel, welche den größten Einfluss auf die Distanzänderungen besitzen, auch Schwankungen in der Horizontalrichtung auswirken können. Dies hängt stark von der Verkippung der Objektoberfläche zur Visur ab.

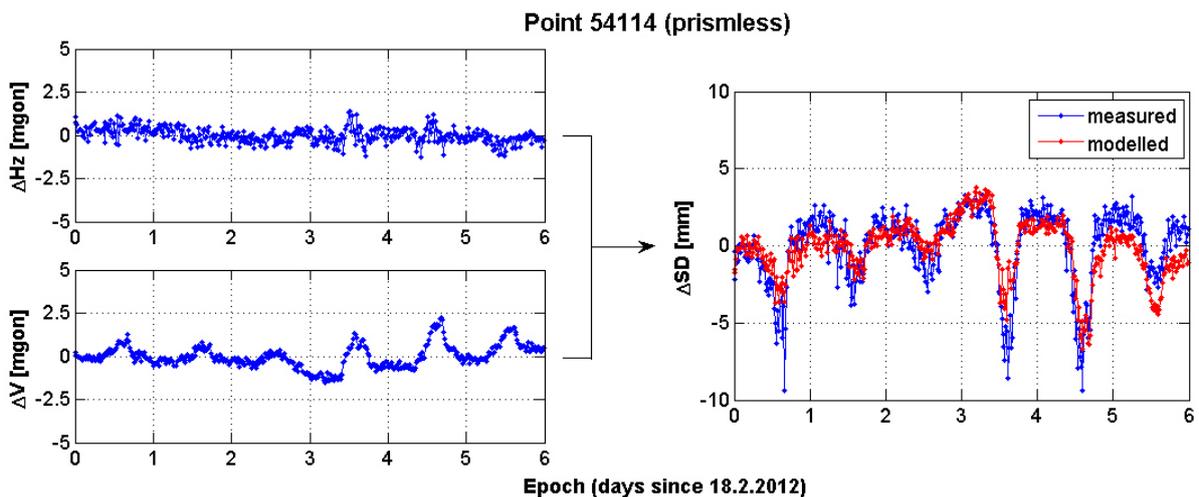


Abbildung 6-13: RL 54114: Modell der Distanzwertvariationen (ΔSD) aus den Messdatenänderungen (ΔHz und ΔV) 2012

Betrachtet man nochmals die Messdatenvariationen des Punktes 54114 aus dem Jahr 2012 und modelliert man die Schrägdistanzvariationen über die Horizontalrichtungs- und Vertikalwinkelschwankungen so können die Änderungen der Distanzwerte gut erfasst werden (Abbildung 6-13). Die Berechnung des Modells erfolgt über einen Ausgleich nach Parametern mittels eines quadratischen funktionalen Zusammenhanges (siehe Formel 6-1).

$$\Delta SD = a_1 \cdot \Delta V + a_2 \cdot \Delta V^2 + b_1 \cdot \Delta Hz + b_2 \cdot \Delta Hz^2$$

Formel 6-1

mit a_1, a_2, b_1, b_2 ... geschätzte Koeffizienten

Trifft der Messstrahl auf eine, zur Visurrichtung, orthogonal stehende Oberfläche so nimmt die Distanzänderung bei Änderungen der Richtung des Messstrahls quadratisch zu (siehe Abbildung 6-14). Aus diesem Grund wird das quadratische Polynom (Formel 6-1) als funktionaler Zusammenhang herangezogen.

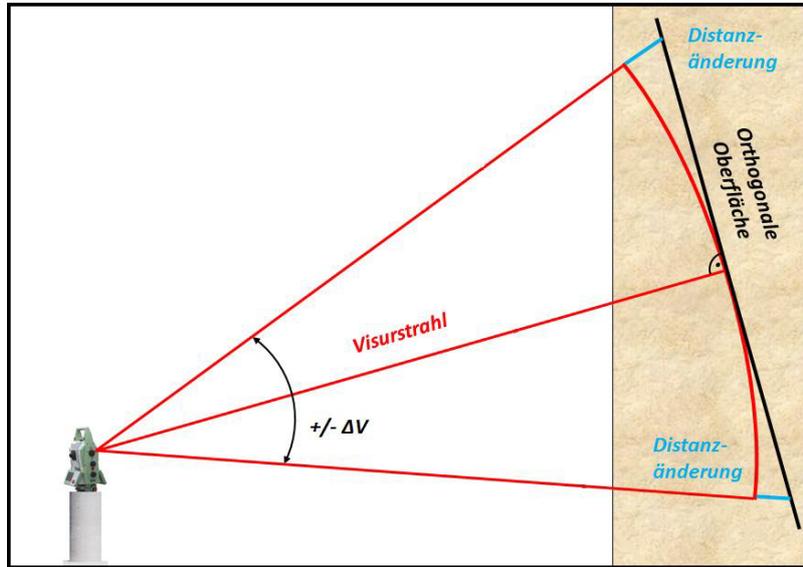


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung der quadratischen Distanzänderungen

Das Resultat des Ausgleichs (siehe Tabelle 6-1) erhärtet die Vermutung, dass neben den Vertikalwinkeländerungen auch die Variationen der Horizontalrichtung eine, wenn auch untergeordnete, Rolle hinsichtlich der Schrägdistanzvariationen spielen. Ebenso ist ersichtlich, dass, sich die quadratischen Anteile auf den Punkt 54114 kaum auswirken und die Änderungen der Distanzwerte hinsichtlich des geringen Variationsbereichs der Winkelmessung (Milligon-Bereich) als annähernd linear angenommen werden können. Die quadratischen Anteile haben keinen signifikanten Einfluss auf die Distanzänderung Dies wurde mittels eines Hypothesentests nachgewiesen (H_0 : Parameter sind nicht signifikant, H_A : Parameter sind signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit 1%).

Tabelle 6-1: Geschätzte Parameter der Distanzwertmodellierung (RL-54114)

Parameter	Standardabweichung „σ“	Signifikanztest (α=1%)	
a_1	-2.5 [mm/mgon]	0.1 [mm/mgon]	Signifikant
a_2	-0.2 [mm/mgon ²]	0.1 [mm/mgon ²]	Nicht signifikant
b_1	-1.0 [mm/mgon]	0.2 [mm/mgon]	Signifikant
b_2	-0.6 [mm/mgon ²]	0.2 [mm/mgon ²]	Nicht signifikant
σ_{Residuen}	---	1.5 [mm]	

Da sich die Koeffizienten der quadratischen Anteile nicht signifikant auf die Distanzwertänderung auswirken wurde ein weiterer Ausgleich mit den linearen Anteilen durchgeführt. Die Ergebnisse weichen nur gering von jenen in Tabelle 6-1 ab (+/- 0.1 mm/mgon) und werden daher nicht explizit angeführt.

6.2.2.2 Punkt 54231

Das reflektorlose Ziel 54231 wurde vom nördlichen Standpunkt 2010 aus beobachtet und befindet sich ebenfalls auf dem Felsblock 43. In Abbildung 6-15 sind die Distanzwertänderungen hinsichtlich der örtlichen Umgebung des gesuchten Punktes dargestellt. Im Gegensatz zum beobachteten Punkt 54114 (siehe Abbildung 6-7) ist hier erkennbar, dass sich die Schrägdistanzwerte nicht ausschließlich bei einer Änderung des Vertikalwinkels ändern, sondern auch bei Variationen in horizontaler Richtung. Außerdem zeigt die Grafik, dass ein verringerter Vertikalwinkel einen kürzeren Distanzwert mit sich bringt (mittleres Profil in Abbildung 6-15).

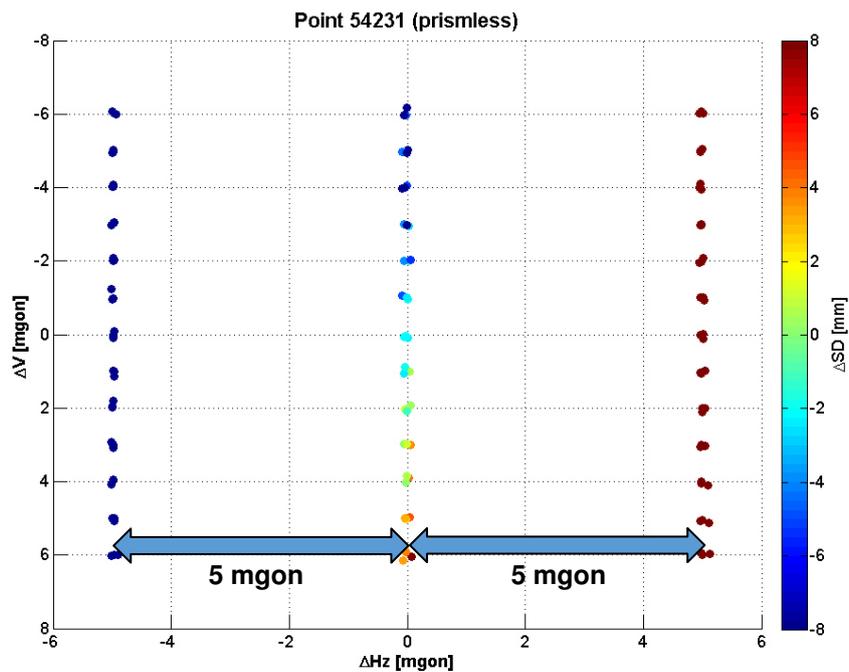


Abbildung 6-15: RL-54231: Distanzvariationen der Profilmessung

Erfolgt eine Gegenüberstellung der Vertikalwinkelvariationen mit den Schrägdistanzänderungen (siehe Abbildung 6-16), so ist deutlich zu erkennen, dass sich die Entfernungen zur Umgebung des Ziels 54231 in der horizontalen Richtung stark bzw. teilweise stärker als in vertikaler Richtung ändern. Die reduzierten Schrägdistanzen stellen dabei die Abweichungen der Messwerte vom Distanzwert zum gesuchten Punkt dar. Der Verlauf der Messabweichungen der Schrägdistanz aus dem Jahr 2012 (blaue Punkte) bezüglich der Vertikalwinkeländerung kann aus den Profilmessungen (roter Datensatz) teilweise nachgebildet werden. Die Spitzen der Distanzänderungen weichen abermals vom vertikalen Verlauf ab. Erkennbar ist dabei jedoch, dass Änderungen der Horizontalrichtung von ein paar Milligon bereits Distanzvariationen von 5 bis 10 Millimetern nach sich ziehen können.

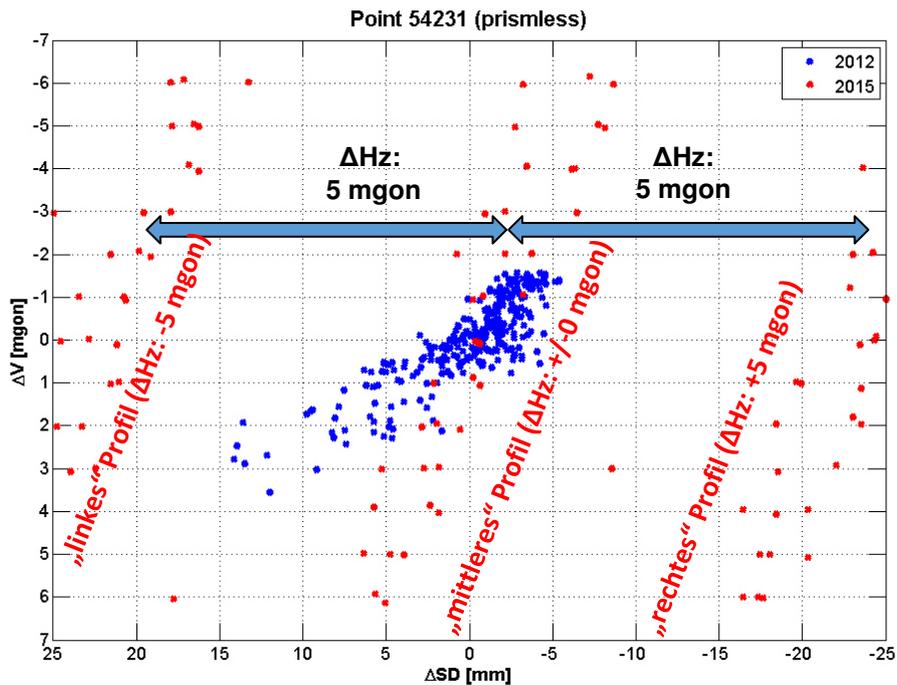


Abbildung 6-16: RL-54231: Gegenüberstellung ΔSD vs. ΔV der Profilmessung

Dass anhand der Vertikalwinkelvariation alleine die Änderungen der Schrägdistanzwerte nicht erklärt werden können, wird auch in Abbildung 6-17 verdeutlicht. Aus den abgegriffenen Zenitdistanzänderungen 2012 in 1 mgon Schritten (vertikale Auflösung der Profilmessung vom Standpunkt 2010) wird über die Beziehung ΔV zu ΔSD aus der Profilmessung 2015 versucht die detektierten Änderungen der Schrägdistanz nachzubilden (Abbildung 6-17 unten). Hierbei liegen die Abweichungen zwischen dem Modell und dem aufgezeichneten Datensatz, vor allem bei starken Änderungen, im Bereich mehrerer Millimeter. Dadurch wird erneut verdeutlicht, dass weitere Einflussgrößen nicht berücksichtigt sind.

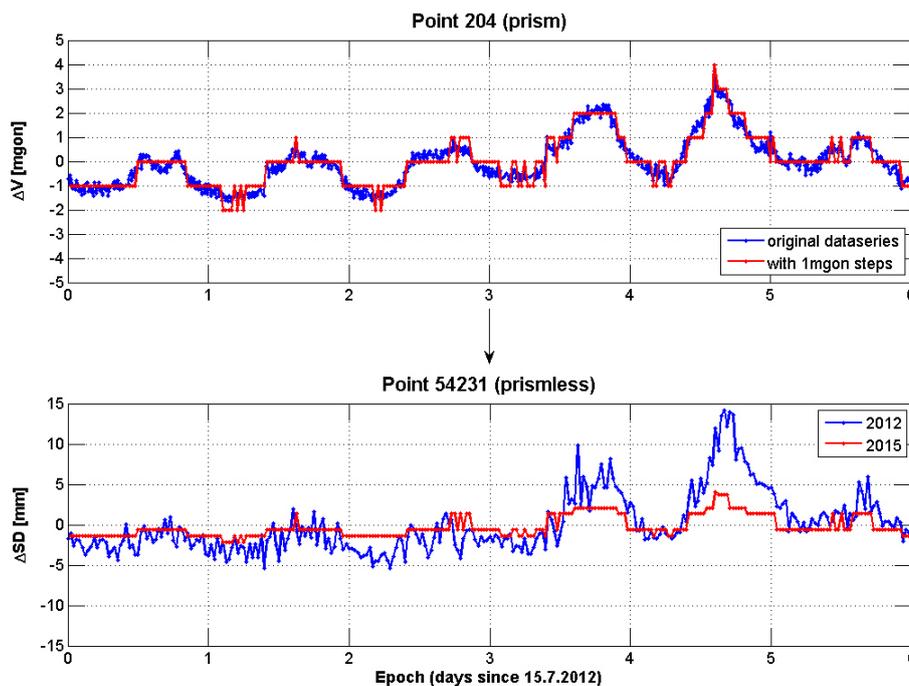


Abbildung 6-17: RL-54231: Modellierung der Distanzvariationen aus der Beziehung ΔV zu ΔSD aus der Profilmessung

Betrachtet man die Fotoaufnahmen (Teleskopkamera der Multistation Leica Nova MS50) in Abbildung 6-18, so wird die spezielle Lage des reflektorlosen Ziels 54231 ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass sich der Punkt auf einer schrägen Felswandoberfläche befindet, wobei diese Oberfläche vor allem in der vertikalen Achse verdreht zu sein scheint.

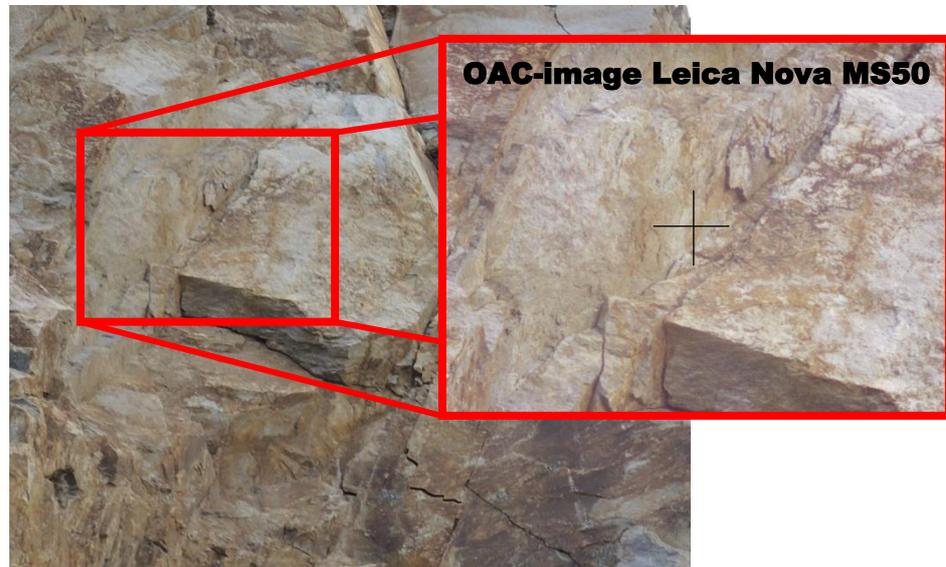


Abbildung 6-18: Fotoaufnahmen des Punktes-54231 auf "Felsblock 43" - Blick vom nördlichen Standpunkt 2010

In Abbildung 6-19 wird das Ergebnis der Profilmessung nochmals dreidimensional mit zugehörigem Visurstrahl dargestellt. Hierbei sind die relative Lage der Objektoberfläche, sowie die Auswirkungen von Variationen in den Winkelmessungen ersichtlich. Die Umgebung (realisiert als Ebene) des Punktes 54231 ist überhängend, was bedeutet, dass eine Verringerung des Vertikalwinkels eine Reduzierung der Schrägdistanz mit sich bringt. Weiters ist die Ebene in horizontaler Richtung stark drehend, wobei eine zunehmende Horizontalrichtung eine Vergrößerung der Distanzwerte von mehreren Millimetern bedeutet.

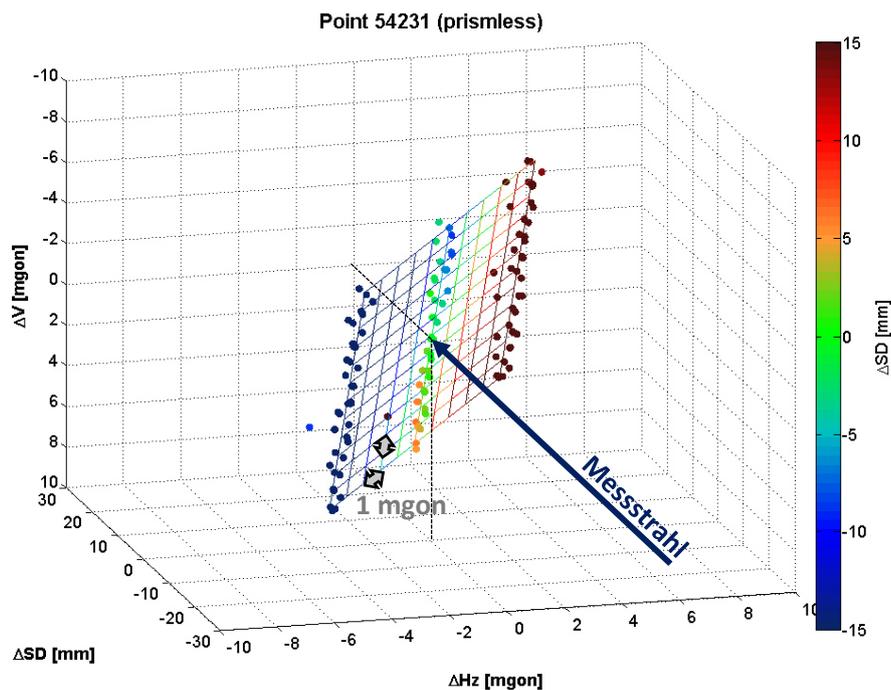


Abbildung 6-19: RL 54231 - 3D Darstellung der Profilmessung 2015

Der Vergleich der Neigung der Felsoberfläche anhand der Fotoaufnahmen vom Standpunkt 1000 und 2010 (siehe Abbildung 6-20) bestätigt die Messergebnisse der Profilmessung 2015. Die relative Lage der umgebenden Felswand ist gut ersichtlich, bezüglich einer reflektorlosen Distanzmessung jedoch nicht optimal gewählt. Stark variierende Oberflächen wirken sich aufgrund der Laserspots des Messinstruments direkt auf den ermittelten Distanzwert auf.

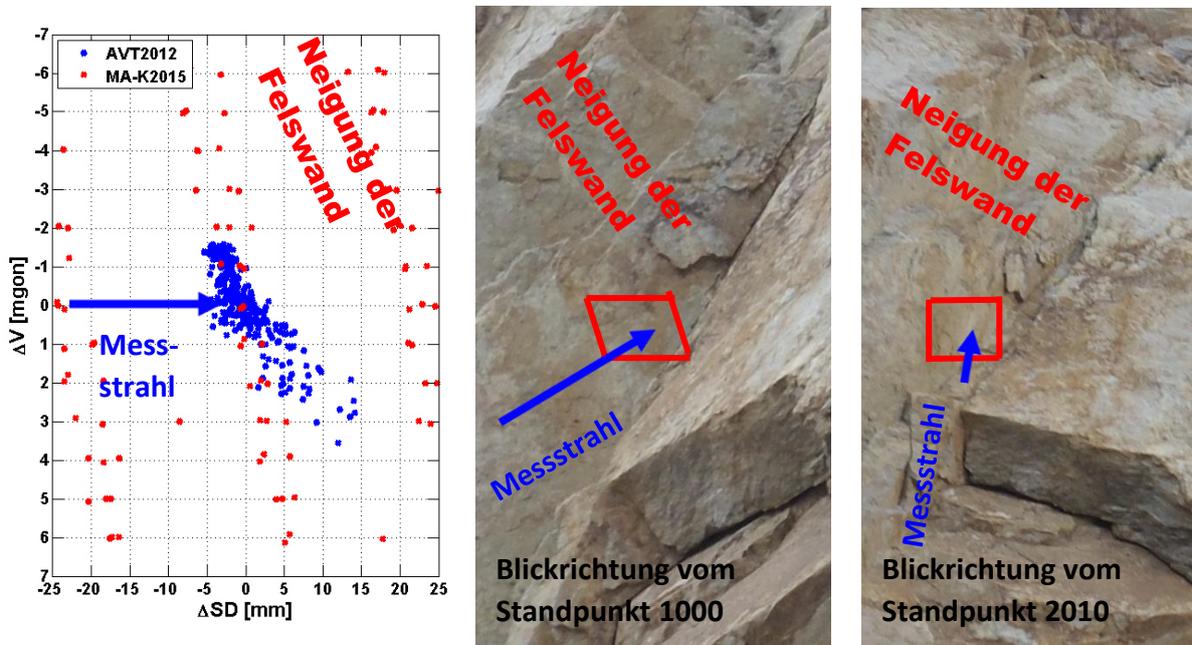


Abbildung 6-20: RL 54231: Vergleich der Profilmessung mit dem Fotoaufnahmen

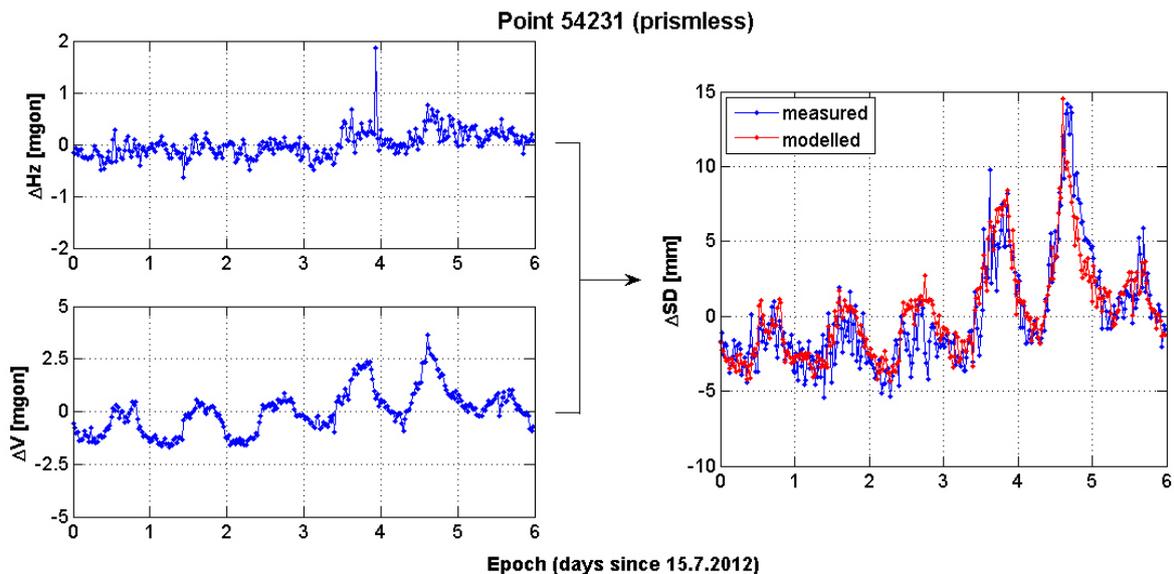


Abbildung 6-21: RL 54231: Modell der Distanzwertvariationen (ΔSD) aus den Messdatenänderungen (ΔHz und ΔV) 2012

Aus den bisherigen Ergebnissen der Profilmessung des reflektorlosen Ziels 54231 ist hervorgegangen, dass die detektierte Vertikalwinkelvariation nicht alleine für die großen (> 10 mm) Schwankungen der Schrägdistanzen verantwortlich ist. Daher sind in Abbildung 6-21 (links) nochmals Variationen der Horizontalrichtung und der Zenitdistanz ersichtlich. Zusätzlich zu den Vertikalwinkeländerungen

werden hier auch Änderungen der Horizontalrichtung als weiterer Parameter für eine Modellierung der Distanzwertvariationen herangezogen. Hierfür wird ein quadratischer, funktionaler Zusammenhang (siehe Formel 6-1) zwischen den Schrägdistanzänderungen und den Winkelvariationen angenommen. Die Einflussgrößen als Parameter (Tabelle 6-2) werden geschätzt. Hierbei zeigt sich, dass sich die Änderungen des Vertikalwinkels zwar mit einem Faktor von ungefähr 2.3 mm pro mgon auswirken, Änderungen der Horizontalrichtung jedoch die ermittelten Distanzwerte noch stärker (ca. 3.5mm / mgon) beeinflussen. Die quadratischen Faktoren spielen abermals, aufgrund der Schwankungen im Milligon-Bereich keine signifikante Rolle bei der Distanzmessung. Dies wurde mittels eines Hypothesentests nachgewiesen (H_0 : Parameter sind nicht signifikant, H_A : Parameter sind signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit 1%).

Tabelle 6-2: Geschätzte Parameter der Distanzwertmodellierung (RL-54231)

	Parameter	Standardabweichung „ σ “	Signifikanztest ($\alpha=1\%$)
a_1	2.3 [mm/mgon]	0.1 [mm/mgon]	Signifikant
a_2	-0.1 [mm/mgon ²]	0.1 [mm/mgon ²]	Nicht signifikant
b_1	3.5 [mm/mgon]	0.6 [mm/mgon]	Signifikant
b_2	-0.7 [mm/mgon ²]	0.6 [mm/mgon ²]	Nicht signifikant
σ_{Residuen}	---	1.8 [mm]	

Wie schon bei der Untersuchung des reflektorlosen Zieles 54114 haben auch hier die Koeffizienten a_2 und b_2 keinen signifikanten Anteil an der Modellierung der Schrägdistanzvariationen. Bei einer rein linearen Modellierung wird das Ergebnis aus Tabelle 6-2 bestätigt. Lediglich die geschätzten Parameter weisen geringe Änderungen von +/- 0.1 mm/mgon auf. Aufgrund dieser nicht signifikanten Änderung werden diese Ergebnisse hier nicht explizit dargestellt.

Da die Orientierungsvariationen bei der Ansteuerung der gesuchten Ziele berücksichtigt werden, wirken sich Fehler in der Bestimmung der Orientierungsunbekannten ebenso wie eine nicht berücksichtigte vertikale Refraktion auf das Resultat aus. Eine fehlerhafte Berechnung dieses Korrekturparameters kann wiederum verschiedene Gründe haben. Einerseits können, wie im Fall der Vertikalwinkelbeobachtung, Temperaturgradienten in horizontaler Richtung auftreten. Andererseits kann sich auch eine Bewegung des Standpunktes bzw. der Orientierungsziele auf die Orientierungsbestimmung auswirken. Die Größenordnung möglicher auftretender Fehler kann durch die Wahl geeigneter (langzeitstabil, weit entfernt) Orientierungsziele und Standpunkte (stabiles Fundament, ausreichender Witterungsschutz) minimiert werden.

6.3 Überblick: Ergebnisse

Ziel der praktischen Untersuchungen war es, die in der Theorie und den vorhandenen Datensätzen aus der Überwachungsmessung 2012 bestimmten und nachgewiesenen Effekte nachzustellen und entsprechend zu berücksichtigen.

Anhand der Messungen am Prüffeld „Dach Steyrergasse 30“ konnte gezeigt werden, dass eine mögliche, stark auftretende Refraktion in der Nähe des Messinstruments, das erwartete Fehlerbild bei der Messung zu stabilisierten und reflektorlosen Zielen wiedergibt. Auch die Variationen der Schrägdistanz von mehreren Millimetern sind dabei durchaus erreichbar.

Die Vermutung, dass sich die Variationen der Winkelmessung aufgrund von auftretender Refraktion ergeben, sollte durch das 24-stündige Monitoring stabilisierter und reflektorloser Punkte an der Biratalwand, von beiden Pfeilern aus nachgewiesen werden. Durch die geringen atmosphärischen Einflüsse während der Messkampagne konnten jedoch keine Messeffekte detektiert werden.

Eine temperaturbedingte Drift des Neigungskompensators würde ein ähnliches Fehlerbild wie eine nicht berücksichtigte vertikale Refraktion aufweisen. Die Untersuchungen der Größenordnung solcher Effekte haben gezeigt, dass ein korrekt funktionierender Neigungssensor des Messinstruments den Einfluss der Pfeiler- bzw. Instrumentneigung kompensiert. Sofern jedoch der Sensor nicht einwandfrei funktioniert hat, könnten entsprechende Änderungen der Winkelmessung aus dieser Problematik resultieren. Da dieser Umstand nicht mehr überprüfbar ist, kann diese Möglichkeit nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Mittels der Profilmessungen verschiedener reflektorloser Punkte wurde die Auswirkung von Vertikalwinkelvariationen auf die Distanzmessung nachgewiesen. Aufgrund der unterschiedlichen Lagen der Felswandoberfläche bezüglich des Messstrahls beeinflussen ein und dieselben Zenitdistanzänderungen die ermittelten Distanzwerte unterschiedlich stark und in verschiedene Richtungen. Ebenso können die Variationen der Horizontalrichtung mehr oder minder starken Einfluss auf das Resultat der Schrägdistanzmessung haben.

Die drei groben Unterteilungen der ersten Untersuchungen der ETH Zürich in Abschnitt 1.3:

- a) Unterschiedlich große Effekte bei verschiedenen reflektorlosen Punkten
- b) Effekte treten nur bei reflektorlosen Zielen auf, nicht bei stabilisierten
- c) Verteilung der Ziele mit ähnlichen Effekten zeigt keine Systematik

können durch die oben beschriebenen Ergebnisse nachgewiesen bzw. erklärt werden.

Das die detektierte Effekt nur bei reflektorlosen Zielen auftreten ist der Tatsache zu verschulden, dass die auftretende Refraktion und somit die Brechung des Messstrahl weg vom gesuchten Punkt durch die automatische Suche bzw. Feinanzielung des Messinstruments ohne zusätzliche Einstellungen berücksichtigt wird. Bei nicht-stabilisierten Zielen, wo kein Prisma installiert ist, müsste folglich die Auswirkung sich ändernder Temperaturgradienten manuell, in Form eines geänderten Ansteuerungswinkels, berücksichtigt werden.

Die unterschiedliche Größe der Effekte sowie die Verteilung der Punkte mit Variationen ähnlicher Größenordnung werden hauptsächlich durch die Lage der Felswandoberfläche relativ zum Messstrahl beeinflusst.

7 Resümee und Ausblick

Die Möglichkeit der automatisierten, reflektorlosen Überwachungsmessung natürlicher Objekte, wie z.B. von Felswänden, stellt einen weiteren Schritt in der Entwicklung der Ingenieurgeodäsie bzw. der Deformationsmessung dar. Neben den vielen Vorteilen, welche diese Methode der Distanzmessung mit sich bringt, sind - verglichen mit der Distanzmessung zu stabilisierten Punkten- eine Vielzahl von Faktoren entsprechend zu berücksichtigten. Aufgrund des Verlustes der automatischen Punktsuche bzw. Feinanzielung müssen Fehlerquellen, welche bei der Überwachung von Prismenpunkten automatisch und ohne weiteres Zutun ausgeglichen werden, „manuell“ beachtet werden. Des Weiteren ist es notwendig, die spezifischen Eigenschaften berührungsloser Distanzmessungen zu kennen und bei der Durchführung zu bedenken.

Messdaten reflektorlos überwachter Objekte besitzen im Gegensatz zu stabilisierten Punkten keine dreidimensionale Information. Die einzige „variable“ Beobachtungsgröße stellt in diesem Fall die Distanzmessung dar. Das bedeutet, dass lediglich Verschiebungen des beobachteten Objekts in Visurrichtung detektierbar sind. Aus diesem Grund kommt der korrekten Ansteuerung reflektorloser Ziele, im Gegensatz zu Prismen, besonderes Augenmerk und Wichtigkeit zu. Wie bereits erwähnt, kann keine automatisierte Feinanzielung durchgeführt werden. Daher müssen Störeinflüsse, welche vom Messinstrument unbemerkt auf die Anzielung der Objektpunkte wirken können, im Vorhinein ausreichend bestimmt und entsprechend berücksichtigt werden. Solche Einflüsse können, unter anderem, atmosphärisch bedingt sein.

Solche atmosphärischen Effekte besitzen eine Vielzahl an Einflussmöglichkeiten auf die Messergebnisse. Durch bestimmte Messkonfigurationen entstehen „Angriffspunkte“, wo sich Änderungen der umgebenden Atmosphäre auswirken können. Neben den direkten Auswirkungen auf den Messstrahl kann auch das Instrument selbst, der Standpunkt bzw. Pfeiler oder das beobachtete Objekt beeinflusst und somit das Ergebnis verfälscht werden. Da sich Deformationsmessungen im Allgemeinen über einen längeren Zeitraum erstrecken, nimmt die Aufgabe der Kontrolle bzw. Berücksichtigung beeinflussender Effekte an Komplexität weiter zu.

Als einer der möglicherweise auftretenden Einflüsse sei hier die geodätische Refraktion genannt. Der Effekt der Refraktion wirkt sich z.B. auf die Geschwindigkeit, Intensität, Frequenz und Richtung der elektromagnetischen Strahlung aus und hängt von der Wellenlänge sowie der Zusammensetzung des Refraktionsindex im durchdringenden Medium ab. Somit beeinflusst dieser Effekt neben der Distanzmessung (Geschwindigkeit des Signals) auch die Anzielung (Brechung des Signals) gesuchter Punkte. Eine solche Brechung bewirkt, dass der Messstrahl zwischen Messinstrument und Objekt abgelenkt wird und somit nicht den gewünschten Punkt anzielt, was im Allgemeinen einer Distanzänderung gleichkommt.

Ebenso wichtig wie die Berücksichtigung auftretender Effekte selbst ist der Zeitpunkt, an welchem etwaige Korrekturen an Messdaten bzw. Steuerparameter angebracht werden. Während es bei stabilisierten Punkten vollkommen ausreichend ist, Störparameter im Zuge der Nachbearbeitung der Daten zu eliminieren, müssen Effekte, welche die Anzielung (Horizontalrichtung, Vertikalwinkel) beeinflussen, bei berührungslos beobachteten Zielen bereits vor der Ansteuerung der Monitoringpunkte bestimmt werden. Dieser Umstand verlangt also eine „Echt-Zeit-“ bzw. „Nah-Echt-Zeit-Bestimmung“ und „-Berücksichtigung“ von Korrekturwerten und erhöht somit die Komplexität der Steuer- und Auswertesoftware bzw. Messkonfiguration für eine zuverlässige Überwachungsmessung.

Einen zusätzlichen, nicht zu vernachlässigenden Faktor stellt die punktuelle Lage der einzelnen Ziele dar. Reflexionseigenschaften des Objekts sowie Messspotgröße spielen hierbei eine wesentliche

Rolle. Je nach Beschaffenheit und/oder Verdrehung der Oberfläche relativ zum Messstrahl können sich vorhandene Restfehler bzw. Unsicherheiten in den Korrekturparametern in unterschiedlicher Form und Größe auf die Messdaten auswirken und so das Messergebnis signifikant beeinflussen. Daher spielt neben der Ermittlung zuverlässiger Korrekturwerte auch die Auswahl der Punkte eine maßgebliche Rolle bei der reflektorlosen Überwachungsmessung.

Zu berücksichtigen ist, dass die Korrekturparameter aus Messungen zu als stabil angenommenen Versicherungspunkten abgeleitet werden. Diese angenommene Stabilität muss in regelmäßigen Abständen verifiziert werden. Die Korrektheit der, vor Ort bestimmten Korrekturparameter ist essentiell bei reflektorlosen Messungen, da diese in die Ansteuerung einfließen und, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, keine nachträglichen (Ausnahme: atmosphärische PPM) Korrekturen möglich sind. Die Korrekturparameter sollten daher aus überbestimmten Messungen mittels robuster Auswertung berechnet werden.

Weiters stellt eine Zwei-Kreislagen-Messung zumindest einiger Kontrollpunkte auch heute noch eine unverzichtbare Messmethode dar, um etwaige Fehler bzw. Einflüsse auf die Messungen zuverlässig zu bestimmen. Empfohlen wird daher die Messung beider Kreislagen bei den Versicherungspunkten (Stabilisierte Punkte zur Bestimmung der Korrekturparameter). Dazu zählen sollte, unter anderem, eine regelmäßige Bestimmung der Standpunktkoordinaten und Orientierung (z.B. mittels „Freier Stationierung“) oder eine Vertikalwinkelkorrektur. Zusätzlich können, neben atmosphärisch bedingtem Driftverhalten, beispielsweise von Neigungssensoren, auch mögliche Restabweichungen bedingt durch Instrumentenfehler ermittelt und berücksichtigt werden.

Obwohl es zurzeit nicht möglich ist, Monitoringaufgaben gänzlich ohne die Verwendung von stabilisierten Reflektoren (für Kontroll- und Korrekturdaten) durchzuführen, können, durch Kenntnis und Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften einer reflektorlosen Überwachungsmessung, vermehrt Prismen durch eine berührungslose Beobachtung ersetzt werden. Dadurch wird es möglich, auch unzugängliche Bereiche kontinuierlich zu überwachen und somit die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Deformationsmessung zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- Atlas NÖ (2014). *Online Geoinformationssystem des Landes Niederösterreich*, <http://atlas.no.e.gv.at/>;
Aufruf am 01.08.2014 - 08:40
- AVT (2011). *Geodätisches Monitoring von Felswänden*. Präsentation, AHORN Tagung 17./18.11.2011,
Imst, Dr. Klaus Legat, DI Roman Markowski / Vermessung AVT ZT-GmbH
- AVT (2012). *Technische Berichte zur Überwachungsmessung Biratalwand*. Dipl.-Ing. Alexander Trefalt,
Vermessung AVT ZT-GmbH, Imst, Tirol.
- BALKE H. (2004). *Einführung in die Technische Mechanik – Festigkeitslehre*. 3. Auflage; Springer
Verlag Berlin-Heidelberg, 321 Seiten
- BRUNNER F. K. (1984a). *Overview of Geodetic Refraction Studies*. Brunner F.K. (Hrsg): Geodetic
Refraction – Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere; Springer
Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984; 231 Seiten
- BRUNNER F. K. (1984b). *Modelling of Atmospheric Effects on Terrestrial Geodetic Measurements*.
Brunner F.K. (Hrsg): Geodetic Refraction – Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through
the Atmosphere; Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984; 231 Seiten
- ESCHELBACH C. (2007). *Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale
Temperaturschwankungen*. Brunner, F.K. (Hrsg): Beiträge zum 15. Internationalen
Ingenieurvermessungskurs, Graz, 19.-20.04.2007, 12 Seiten
- ESCHELBACH C. (2009). *Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und
Wärmeflusses in der Rauigkeitsschicht*. Dissertation, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie
und Geoinformatik 2009; Universität Karlsruhe (TH); Universitätsverlag Karlsruhe; 113 Seiten
- ETH ZÜRICH (2013). *Untersuchungen zu Auffälligkeiten in reflektorlosen Distanzmessungen bei der
Überwachungsmessung Biratalwand 2012*. Prof. Dr. Andreas Wieser, Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- FLECKL J. (2007). *Präzisionsbestimmung des Prüffeldes „Dach, Steyrergasse 30“ zur Überprüfung von
geodätischen Instrumenten*. Masterarbeit; Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme,
Technische Universität Graz, 111 Seiten
- GIS-STEIERMARK (2015). *Online Geoinformationssystem des Landes Steiermark*. [http://www.gis-
steiermark.at/](http://www.gis-steiermark.at/); Aufruf am 09.02.2015 – 19:45
- GOOGLE-EARTH (2015): *Hintergrundfoto: Biratalwand, Dürnstein/NÖ*. Aufruf am 28.01.2015 – 17:00
- JOECKEL R., STOBER M., HUEB W. (2008). *Elektronische Entfernungsmessung und Richtungs- und
Integrationsverfahren in aktuelle Positionierungsverfahren*. 5. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg;
517 Seiten
- KAHMEN H. (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. 20. Auflage, Walter de Gruyter
Verlag, Berlin; 655 Seiten
- KLAFFENBÖCK E. (2007). *Troposphärische Laufzeitverzögerung von GNSS-Signalen – Nutzen aktiver
Referenzstationsnetze für die Meteorologie*. Dissertation, Geowissenschaftliche Mitteilungen,
Heft Nr. 76, 2007, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation,
Technische Universität Wien, 149 Seiten

- LEICA (2010). *Leica GeoMoS Manual, Online Help, Version 5.1*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 701 Seiten
- LEICA (2013). *Leica Nova MS50/TS50/TM50 User Manual*. Version 1.1, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 110 Seiten
- LEICA (2015). *Funktionsweise und Abläufe der Monitoringsoftware Leica GeoMoS Monitor*“. Persönliche Korrespondenz mit Herrn Dipl.-Ing. Johannes Wöllner, Applikationsingenieur, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz
- LIENHART W. (2003). *Temperaturabhängiges Verhalten von Neigungssensoren von Tachymetern*. Technischer Bericht; Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz
- MÖSER M., HOFFMEISTER H., MÜLLER G., SCHLEMMER H., STAIGER R., WANNINGER L. (2012). *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen*. Auflage 4, Wichmann Verlag, Berlin; 605 Seiten
- MÜLLEGGER M., LENZ G., LAIMER H.J. (2011). *Geotechnische Messungen als zentraler Bestandteil des Sicherheitsmanagementplans beim Felssturz Dürnstein/Wachau*. Bericht, iC consulenten Ziviltechniker GesmbH Salzburg/Bergheim bzw. Österreichische Bundesbahnen (ÖBB), Infrastruktur AG, Salzburg
- MÜLLEGGER M. (2013). *Beispiele aus Niederösterreich: Felssturz Dürnstein/Wachau – Das schwere Erbe der Biratalwand*. Berichte Geol. B.-A., 100, NÖ GEOTAGE – 19. & 20.9.2013 in Rabenstein an der Pielach
- RÜEGER J. M. (1996). *Electronic Distance Measurement – An Introduction*. 4th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 257 Seiten
- WILLIAMS D. C., KAHMEN H. (1984). *Two Wavelength Angular Refraction Measurement*. Brunner F.K. (Hrsg): Geodetic Refraction – Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere; Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984; 231 Seiten