



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Bewegungsmonitoring eines Felsturms mithilfe eines drahtlosen Sensorknotennetzwerks – Eine Analyse am Beispiel des Amtmann in Waidhofen an der Ybbs“

verfasst von / submitted by
Lukas Pühringer

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2019 / Vienna, 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 190 456 412

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Lehramtsstudium
UF Geographie und Wirtschaftskunde
UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, am 19. August 2019

Lukas Pühringer

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Univ.- Prof. Dr. Thomas Glade bedanken. Ich bin froh, dass er mir Angeboten hat, das Thema der vorliegenden Arbeit zu behandeln. Außerdem haben mich die gegenseitige Wertschätzung sowie die kompetente und unkomplizierte Betreuung sehr gefreut.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Frau Margherita Stumvoll, M.Sc., die mir einige Hilfestellungen und jederzeit rasche Antworten auf meine Fragen gegeben hat.

Ein sehr großes Dankeschön gebührt Frau Katalin Gillemot, PhD, die mich sehr intensiv bei der statistischen Datenauswertung unterstützt hat. Sie hatte sich oft Zeit für mich genommen und mir bei einigen Herausforderungen weitergeholfen.

Auch der ZAMG möchte ich ein Lob aussprechen, da die Bereitstellung der Klimadaten außerordentlich unkompliziert und rasch vonstattengegangen ist.

Vielen lieben Dank auch an alle meine Freunde und Freundinnen, mit denen ich die schönsten Zeiten meines Studiums genießen durfte.

Abschließend gilt ein besonderer Dank meinen Eltern, die mich im Zuge des Studiums häufig finanziell unterstützt und motiviert haben.

Kurzfassung

Die Überwachung von gravitativen Massenbewegungen, von welchen eine potenzielle Gefahr ausgeht, ist ein wichtiger Vorgang, der möglichen Schäden an Infrastruktur oder auch einer Gefährdung von menschlichem Leben vorbeugen kann. Ein Geomonitoring kann dabei behilflich sein, einen Einblick in den Ablauf von natürlichen Prozessen, wie Massenbewegungen, zu bekommen und ein fundiertes Verständnis über Bewegungstypen zu erlangen. Dies ist die Grundlage, um mit möglichen Naturgefahren, sinnvoll umzugehen. Es ist wichtig, stetig neue, bessere oder auch günstigere Monitoringmethoden zu etablieren. Die vorliegende Arbeit dreht sich um die Frage, ob es sinnvoll ist, Beschleunigungssensoren für die Bewegungsanalyse eines Felssturms einzusetzen.

Um die Nutzung von Beschleunigungssensoren für die Bewegungsanalyse von gravitativen Massenbewegungen zu beleuchten, werden die gesammelten Messungen eines Geomonitorings von einem Felssturms ausgewertet. Die Daten werden seit November 2014 mithilfe von vier 3D- MEMS- Beschleunigungssensoren, die in ein selbstorganisierendes drahtloses Sensorknotennetzwerk eingebunden sind, aufgenommen. Aus den, von den Beschleunigungssensoren, gemessenen axialen Werten der Erdbeschleunigung ist es möglich, die Neigung der Sensorknoten im dreidimensionalen Raum berechnen zu können.

Durch die, in dieser Arbeit durchgeführte, statistische sowie grafische Datenauswertung konnte gezeigt werden, dass zwar die Bewegungsrichtung und die Veränderung der Neigung festgestellt werden kann, jedoch ist es nicht möglich mit den Beschleunigungssensoren und den verwendeten Methoden einen genauen Bewegungsablauf zu rekonstruieren. Aus dem Vergleich der Zeitpunkte, an denen Bewegungen gemessen wurden, mit Klimadaten hat sich herausgestellt, dass alle analysierten Bewegungen durch überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeiten ausgelöst wurden.

Abstract

The monitoring of mass movements is an important process that can prevent possible damage to infrastructure or human life. Monitoring can help to analyse the process of a mass movement and can also gain a new understanding of movement types. It is important to constantly establish new, better or even cheaper monitoring methods. This diploma thesis deals with the question if it does make sense to use acceleration sensors for the movement analysis of a rock tower.

To take a look at the use of acceleration sensors for the motion analysis of mass movements, the collected data of measurements of acceleration sensors installed on a rock tower in Lower Austria are evaluated. The data has been collected since November 2014 using four capacitive 3D- MEMS- acceleration sensors (SCA 3100) embedded in a self-organizing, multi-hop communication wireless sensor network (WSN). From the axial values of the gravitational acceleration measured by the acceleration sensors, it is possible with the mathematical application of rotation matrices to be able to calculate the inclination of the sensor nodes in three-dimensional space.

The statistical and graphical data evaluations carried out in this diploma thesis have shown that although the direction of movement and the change in inclination can be determined, it is not possible to reconstruct an exact sequence of movements with the acceleration sensors and the methods used. From the comparison of the dates at which movements were detected with climate data, it turned out that all the analysed movements were triggered by high above-average wind speeds.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
1.1 Beschreibung der Herausforderung	1
1.2 Hypothesen und Forschungsfragen	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2. Theoretischer Hintergrund	5
2.1 Gravitative Massenbewegungen	5
2.1.1 Definition	5
2.1.2 Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren.....	6
2.1.3 Physikalische und bodenmechanische Parameter der Hangstabilität.....	7
2.1.4 Prozess- und Materialtypen.....	11
2.2 Drahtlose Sensorknotennetzwerke.....	16
2.3 Sensornetzwerk für Massenbewegungen (SLEWS).....	18
2.4 Beschleunigungssensoren	19
2.4.1 Funktionsprinzip.....	19
2.4.2 Neigungsmessung	20
2.4.3 MEMS- Beschleunigungssensoren	21
2.5 Frühwarnsysteme.....	23
2.5.1 Vom Monitoring zur Frühwarnung	23
2.5.2 Prozess der Warnung	25
3. Untersuchungsgebiet.....	27
3.1 Standort.....	28
3.2 Klima	29
3.3 Geologie.....	31
3.4 Gefahrenpotential.....	33

4. Das Sensorknotennetzwerk am Amtmann	34
5. Methodik der Datenanalyse	38
5.1 Physikalisch- mathematische Vorgehensweise.....	38
5.1.1 Koordinatensysteme	38
5.1.2 Anwendung von Rotationsmatrizen	41
5.1.3 Erfassung der Drehwinkel	43
5.1.4 Ableitung des Normalvektors	44
5.1.5 Azimut und Neigungswinkel	46
5.2 Statistische Datenauswertung	47
5.2.1 Beschreibung des Rohdatenformats	47
5.2.2 Ablauf der statistischen Datenauswertung	48
5.3 Grafische Datenauswertung	53
5.4 Bearbeitung der Klimadaten	56
6. Ergebnisse	57
6.1 Mittelwerte und Standardabweichungen der Neigungswinkel	57
6.2 Ausreißer	60
6.2.1 Ausreißer des Neigungswinkels γ	60
6.2.2 Langandauernde Auffälligkeiten von γ	67
6.2.3 Kurzzeitige Auffälligkeiten von γ	68
6.2.4 Ausreißer des Neigungswinkels β	69
6.2.5 Kurzzeitige Auffälligkeiten von β	73
6.2.6 Besondere sensorübergreifende Ereignisse von γ und β	73
6.2.7 Ausreißer des Azimut α	74
6.3 Abgleich der Bewegungsereignisse mit Sensor 5	76
6.4 Analyse der langandauernden Auffälligkeiten	79
6.5 Analyse der kurzzeitigen Bewegungsereignisse	81
6.6 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen	91
7. Interpretation	95
7.1 Vergleich mit Klimadaten.....	95
7.2 Ursachen der Bewegungsereignisse.....	106
7.3 Überprüfung der aufgestellten Hypothesen.....	106
8. Zusammenfassung.....	108
9. Perspektive	111

9.1	Optimierung des aktuellen Systems	111
9.2	Bessere Erfassung der Kinematik	111
9.2.1	Mehr Beschleunigungssensoren	111
9.2.2	Installation von Laserdistanzmessgeräten.....	111
9.2.3	Terrestrische Vermessung mittels Servotachymeter	112
9.3	Mögliche Schutzmaßnahmen	114
9.4	Lokales Frühwarnsystem	116
Literaturverzeichnis		VI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vektorparallelogramm an einem Hang (AHNERT 1996).	8
Abbildung 2: Beispiel für die zeitliche Veränderung der Hangstabilität (FoS) über die Zeit (MÖLK et al. 2011).	11
Abbildung 3: Darstellung des Sturzprozesses mit anschließenden springenden und rollenden Bewegungen (ZANGERL et al. 2008).	13
Abbildung 4: Verteilung der Blockverschiebung beim Kippen aufgrund plastischer Deformationen des Hangfußes (ZANGERL et al. 2008).	14
Abbildung 5: Aufbau und Organisation eines Ad-hoc-Sensorknotennetzwerks (WALTER 2012).	17
Abbildung 6: Neigungsmessung über Fallbeschleunigung (LI et al. 2014).	21
Abbildung 7: MEMS- Beschleunigungssensor (FERNANDEZ- STEEGER 2011).	22
Abbildung 8: Funktionsskizze eines kapazitiven MEMS- Beschleunigungssensors (LI et al. 2016).	23
Abbildung 9: Nördliche Seite des Amtmann mit den vier Sensorknoten (Quelle: NoeSLIDE).	27
Abbildung 10: Standort des Amtmann im Ybbstal, Niederösterreich (Quelle: Basemap).	28
Abbildung 11: Windgeschwindigkeit, Windstärke Waidhofen 1971-2000 (ZAMG 2019).	29
Abbildung 12: Geologische Karte von Niederösterreich (SCHWENK 1992).	31
Abbildung 13: Auszug aus GEOLOGISCHE KARTE VON NIEDERÖSTERREICH (SCHNABEL 2002)	32
Abbildung 14: Längenmaße und Winkelmaß im Untersuchungsgebiet (Quelle: Verfasser). .	33
Abbildung 15: Sensorknoten und Gateway, drahtloses Sensorknotennetzwerk Amtmann (MAUSBACH und MAY 2014).	34
Abbildung 16: „Cycling Sleep“- Modus (MAUSBACH und MAY 2014).	35
Abbildung 17: Gehäuse und Hardware der Sensorknoten (MAUSBACH und MAY 2014).	35
Abbildung 18: Befestigung eines Sensorknotens (Quelle: NoeSLIDE).	36
Abbildung 19: Gehäuse und Hardware des Gateway (MAUSBACH und MAY 2014).	37
Abbildung 20: Erdkoordinatensystem, Amtmann (Quelle: Verfasser).	39
Abbildung 21: Sensorkoordinatensystem, Amtmann (Quelle: NoeSLIDE).	40
Abbildung 22: Transformation des Ausgangskordinatensystem $X_0 Y_0 Z_0$ zum neuen Koordinatensystem $X' Y' Z'$ in der Reihenfolge $X - Y - Z$ (LI et al. 2016).	41
Abbildung 23: Azimut, Neigungswinkel und Ebenen (Quelle: Verfasser)	47
Abbildung 24: Inhalt eines Rohdatensatzes (MAUSBACH und MAY 2014).	48
Abbildung 25: Überblick- statistische Datenauswertung.	49
Abbildung 26: Überblick- grafische Datenauswertung	53

Abbildung 27: Monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen von γ in YOZ.	
Subgrafiken: a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.	58
Abbildung 28: Monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen von β in ZOZ. a) Sensor 1,	
b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.	59
Abbildung 29: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 11.2014 - 4.2015. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	61
Abbildung 30: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 5.2015 - 9.2015. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	62
Abbildung 31: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 2.2016 - 7.2016. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	63
Abbildung 32: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 8.2016 - 12.2016. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	64
Abbildung 33: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 1.2017 - 6.2017. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	65
Abbildung 34: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 7.2017 - 12.2017. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	66
Abbildung 35: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 11.2014 - 9.2015. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	70
Abbildung 36: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 2.2016 - 12.2016. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	71
Abbildung 37: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 1.2017 - 12.2017. Subgrafiken:	
blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.	72
Abbildung 38: Ausreißer des Azimut α , Zeitraum: 11.2014 - 12.2017. Subgrafiken: blau)	
Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4. Ausgewählte	
Bewegungsereignisse(b,c,d,f,h) gekennzeichnet.	75
Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Neigungswinkel von Sensor 5, Zeitraum: 11.2014 –	
7.2016. Subgrafiken: grau) Neigungswinkel γ , schwarz) Neigungswinkel β	77
Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Neigungswinkel von Sensor 5, Zeitraum: 8.2016 –	
12.2017. Subgrafiken: grau) Neigungswinkel γ , schwarz) Neigungswinkel β	78
Abbildung 41: Langandauernde Auffälligkeiten in YOZ, gesamter Zeitraum	79
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung von γ über "normale" 10 Tage. Subgrafiken: a) Sensor 1,	
b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.	80
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung von γ über "auffällige" 10 Tage Subgrafiken: a) Sensor 1,	
b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.	80
Abbildung 44: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer,	
Bewegungsereignis a.	81
Abbildung 45: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt,	
Bewegungsereignis a.	82

Abbildung 46: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis b.....	82
Abbildung 47: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis b.....	83
Abbildung 48: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis c.....	84
Abbildung 49: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis c.....	85
Abbildung 50: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis d.....	85
Abbildung 51: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis d.....	86
Abbildung 52: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis e.....	87
Abbildung 53: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis e.....	87
Abbildung 54: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis f.....	88
Abbildung 55: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis f.....	89
Abbildung 56: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis g.....	89
Abbildung 57: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis g.....	90
Abbildung 58: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis h.....	90
Abbildung 59: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis h.....	91
Abbildung 60: Grafische Darstellung des Amtmann von oben mit Neigungs- und Drehungsrichtungen.....	92
Abbildung 61: Nördliche Seite des Amtmann (Quelle: Verfasser).	93
Abbildung 62: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis a.	96
Abbildung 63: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis b.	96
Abbildung 64: Temperatur in Waidhofen und Schneedecke in Weyer, Bewegungsereignisse a und b (Quelle: ZAMG).	96
Abbildung 65: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignisse a und b (Quelle: ZAMG).....	97

Abbildung 66: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignisse a und b (Quelle: ZAMG).....	97
Abbildung 67: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis c.....	98
Abbildung 68: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis c (Quelle: ZAMG).....	98
Abbildung 69: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis c (Quelle: ZAMG)	98
Abbildung 70: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis d.	99
Abbildung 71: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis d (Quelle: ZAMG)	99
Abbildung 72: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis e.	100
Abbildung 73: Temperatur in Waidhofen und Schneedecke in Weyer, Bewegungsereignis e (Quelle: ZAMG).....	100
Abbildung 74: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis e (Quelle: ZAMG).....	101
Abbildung 75: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis e (Quelle: ZAMG)	101
Abbildung 76: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis f.	102
Abbildung 77: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis f (Quelle: ZAMG).....	102
Abbildung 78: : Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis f (Quelle: ZAMG)	102
Abbildung 79: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis g.	103
Abbildung 80: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis g (Quelle: ZAMG).....	103
Abbildung 81: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis g (Quelle: ZAMG)	104
Abbildung 82: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis h.	105
Abbildung 83: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis h (Quelle: ZAMG).....	105
Abbildung 84: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis h (Quelle: ZAMG)	105
Abbildung 85: Trigonometrische Lage- und Höhenbestimmung mit einem Servotachymeter, der sich über Festpunkte (FP) positioniert und anschließend die Kontrollpunkte (KP) misst; Koordinatenangaben erfolgen über Bundesmeldenetz (BMN) (ZANGERL et al. 2008).	113
Abbildung 86: Betrag und Einfallswinkel des Verschiebungsvektors Δ_{xyz} , der sich aus den Messepochen 1 und 2 ergibt (ZANGERL et al. 2008).	113

Abbildung 87: Darstellung des Untersuchungsgebiets von oben.	115
---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren von Massenbewegungen nach DIKAU und GLADE 2002 (BELL 2007).	7
Tabelle 2: Zusammenhang von Prozess- und Materialtypen von Massenbewegungen (BELL 2007).	12
Tabelle 3: Beaufort- Skala (DWD 2019).	30
Tabelle 4: Sensortypen eines Sensorknotens (MAUSBACH und MAY 2014).	48
Tabelle 5: Von der ZAMG erhaltene Klimadaten.	56
Tabelle 6: Sensorübergreifende, langandauernde Auffälligkeiten in YOZ.	67
Tabelle 7: Sensorübergreifende, kurzzeitige Auffälligkeiten in YOZ.	68
Tabelle 8: Sensorübergreifende, kurzzeitige Auffälligkeiten in ZOX.	73
Tabelle 9: Besondere sensor- sowie ebenenübergreifende Ereignisse in YOZ und ZOX.	74
Tabelle 10: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis a.	81
Tabelle 11: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis a.	81
Tabelle 12: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis b.	82
Tabelle 13: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis b.	83
Tabelle 14: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis c.	84
Tabelle 15: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis c.	84
Tabelle 16: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis d.	85
Tabelle 17: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis d.	86
Tabelle 18: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis e.	86
Tabelle 19: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis e.	87
Tabelle 20: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis f.	87
Tabelle 21: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis f.	88
Tabelle 22: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis g.	89
Tabelle 23: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis g.	90
Tabelle 24: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis h.	90
Tabelle 25: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis h.	91

Abkürzungsverzeichnis

FoS	Factor of Safety
WSN	Wireless Sensor Network
SLEWS	Sensor based Landslide Early Warning System
TDMA	Division Time Multiple Access
LPSR	Low-Power Scatter-Route
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for mobile Communications
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
SPI	Serial Peripheral Interface
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
DWD	Deutscher Wetterdienst
CSV	Comma-Seperated Values

1. Einleitung

Die Untersuchung von gravitativen Massenbewegungen ist ein wichtiger Bestandteil der physischen Geographie. Vor allem die Überwachung und Analyse von solchen Naturereignissen, die in der Nähe von Siedlungsgebieten oder Infrastruktur stattfinden, ist wichtig. Häufig dient die Beobachtung des zeitlichen Verlaufes einer Massenbewegung, um einen wissenschaftlichen Einblick in die Form und den Ablauf des stattfindenden Prozesses zu erlangen. Bei Massenbewegung, die bereits eine potenzielle Gefahr darstellen, ist es notwendig einen möglichen finanziellen Schaden oder gar der Gefährdung von menschlichem Leben vorzubeugen. Das Thema, um welches sich die vorliegende Diplomarbeit dreht, ist die Untersuchung eines Felssturms mithilfe von modernen technischen Hilfsmitteln. Es folgt eine einführende Beschreibung der Herausforderung.

1.1 Beschreibung der Herausforderung

Diese Diplomarbeit kümmert sich um einen kleinen Teil des Projekts NoeSLIDE, welches von der Niederösterreichischen Landesregierung in Zusammenarbeit mit der Universität Wien, durchgeführt wird. Konkret geht es um die wissenschaftliche Auswertung eines Geomonitorings, das mit Beschleunigungssensoren, integriert in einem drahtlosen Sensorknotennetzwerk, seit 2014 Daten aufnimmt. Untersuchungsobjekt ist der Amtmanns, ein 40 m hohen Felssturms in Waidhofen an der Ybbs. Da sich der Amtmann in unmittelbarer Nähe zur stark befahrenen Ybbstal Straße (B31) befindet, stellt er, im Falle eines Umkippens oder Abbrechens, eine potenzielle Gefahr für Mensch und Infrastruktur dar. Der Amtmann ist ein Naturdenkmal und darf nicht gesprengt werden. Aus diesem Grund ist die Niederösterreichische Landesregierung daran interessiert, auf eine andere Lösung des Problems zu stoßen. Um mehr über Bewegungsaktivitäten und damit die potenzielle Gefahr zu erfahren, wurde im Jahr 2014 mit dem Geomonitoring gestartet. Es soll in dieser Arbeit herausgefunden werden ob, mithilfe dieses Monitorings, Bewegungen analysiert werden können. Zu diesem Zweck sollen die von den Sensoren aufgenommenen Daten statistisch aufbereitet werden, um daraus Bewegungen und Bewegungsmuster des Amtmanns, die (möglicherweise) im Laufe der Zeit stattgefunden haben, aufzeigen zu können. Die Bewegungsereignisse werden in Diagrammen und Tabellen festgehalten, um darlegen zu können, wie

stark und in welche Richtung sich die Sensoren bewegt haben. Sobald diese Ergebnisse vorliegen soll interpretiert werden, durch welche Faktoren die detektierten Bewegungen des Amtmanns verursacht werden. Werden bewegungsauslösende Faktoren erforscht, so kann in weiterer Folge eruiert werden, welche Maßnahmen im Falle des Amtmanns zu treffen wären. Dieses Themenfeld wird in der Diplomarbeit aber am Rande behandelt, da der Fokus in erster Linie auf der Bewegungsanalyse mithilfe von Beschleunigungssensoren liegt.

Beispiele für Geomonitoringsysteme oder Frühwarnsysteme, deren Funktion durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren gegeben ist, sind schwer zu finden, da die Forschung in diesem Bereich noch in den Kinderschuhen steckt. Die Anschaffung eines Systems, das mit Beschleunigungssensoren bestückt ist, ist wesentlich günstiger als die von vergleichbaren Systemen. Vor allem für kleinere Projekte erscheint es sinnvoll, ein günstiges Monitoringsystem installieren zu können. Diese Diplomarbeit sollte den Einsatz von Beschleunigungssensoren in Monitoringsystemen überprüfen und im Idealfall dazu beitragen, dass solche Systeme in Zukunft vermehrt installiert werden können.

1.2 Hypothesen und Forschungsfragen

Der Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit widmet sich dem Einsatz von Beschleunigungssensoren bei einem Bewegungsmonitoring eines Felssturms im niederösterreichischen Waidhofen an der Ybbs. Auf Basis von Messungen, die in von November 2014 bis Dezember 2017 alle 30 Sekunden aufgenommen wurden, werden folgende Hypothesen und Fragestellungen untersucht.

Hypothese 1: *Beschleunigungssensoren sind dafür geeignet, Bewegungen eines Felssturms zu analysieren.*

Folgende Forschungsfragen werden auf Grundlage dieser Hypothese bearbeitet:

- Wie funktionieren Beschleunigungssensoren und können diese für die Bewegung von Felsstürmen verwendet werden?
- Lässt sich durch die Datenanalyse eine gerichtete Bewegungsform bestimmen?

Hypothese 2: *Die Ursachen für die Bewegungen des Amtmanns lassen sich direkt durch den Vergleich mit aufgezeichneten lokalen Ereignissen/Faktoren, wie meteorologische Einflüsse (z.B.: extreme Niederschlagsereignisse) oder geophysikalische Faktoren (z.B.: Erdbeben), erklären.*

Zur Überprüfung der Hypothese 2 werden folgende Fragen beantwortet:

- Lassen sich die Ursachen für die detektierten Bewegungen durch eine Korrelation mit aufgezeichneten Faktoren bestimmen?
- Lässt die Art der analysierten Bewegungen am Beispiel des Amtmanns darauf schließen, dass deren Ursache in nicht aufgezeichneten Ereignissen, wie lokalen anthropogen verursachten Erschütterungen/Schwingungen (z.B.: Sprengungen), liegt?
- Was sind die auslösenden Faktoren für die analysierte Bewegungsform des Amtmanns?

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss der, in der Einleitung erfolgten, Vorstellung der Ziele dieser Diplomarbeit wird in Kapitel 2 das wesentlichste theoretische Hintergrundwissen beleuchtet. Inhaltlich bietet dieses Kapitel eine Einführung in die Themengebiete gravitative Massenbewegungen, drahtlose Sensorknotennetzwerke, Beschleunigungssensoren und Frühwarnsysteme. In Kapitel 3 wird das Untersuchungsgebiet, aus dem der Amtmann hervorragt, vorgestellt. Nach einer geographischen Lokalisierung des Gebiets werden meteorologische und geologische Besonderheiten vorgestellt. Außerdem erfolgt eine Analyse des Gefahrenpotenzials, welches das direkte Umfeld des Amtmann betrifft. Im darauf folgenden, dem fünften, Kapitel werden die im Zuge der Erstellung der Diplomarbeit angewandten Methoden vorgestellt und erläutert. Dieser Abschnitt erstreckt sich von der ersten Bearbeitung des Rohdatenformats bis hin zur Erstellung von Diagrammen und Grafiken. Ein großer Teil dieser Diplomarbeit widmet sich der Darstellung der gewonnen Ergebnisse in Kapitel 6. Mit den gewonnen Ergebnissen wird in Kapitel 7 eine Interpretation durchgeführt. Im direkten Anschluss erfolgt die Überprüfung der aufgestellten Hypothesen. Das achte und damit vorletzte Kapitel bietet eine Zusammenfassung der Diplomarbeit mit den wichtigsten Kernaussagen jedes Kapi-

tels. Den Abschluss macht Kapitel 9, in dem Möglichkeiten vorgestellt werden, mit welchen die Forschungstätigkeit zum Thema Amtmann verbessert oder fortgesetzt werden könnte.

2. Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird der theoretische Hintergrund erläutert, auf dem die Diplomarbeit und die darin verwendeten Methoden aufgebaut sind. Die folgenden Definitionen und Theorien im Bereich der gravitativen Massenbewegungen sowie der Sensornetzwerke und der Beschleunigungssensoren sind im Rahmen dieser Arbeit als Basiswissen zu betrachten. Die technische bzw. physikalische Theorie dient auch als Grundlage für das Verständnis der Datenauswertung.

2.1 Gravitative Massenbewegungen

2.1.1 Definition

Gravitative Massenbewegungen werden im englischsprachigen Raum als „mass movements“ oder „landslides“ bezeichnet. Die folgende Definition für eine gravitative Massenbewegung von CRUDEN (1991) ist sehr prägnant und wird oft verwendet: „A movement of a mass of rock, earth or debris down a slope“. Eine deutschsprachige und etwas ausführlichere Definition kommt von GLADE und STÖTTER (2007: 151): *„Gravitative Massenbewegungen sind hangabwärts gerichtete, der Schwerkraft folgende Verlagerungen von Fels, Schutt und Feinsubstrat. Die Verlagerungsprozesse beinhalten das Kippen, Fallen, Rutschen, Fließen und die kombinierte, komplexe Bewegung.“*

Da sich eine gravitative Massenbewegung aus diesen Einzelbewegungen (Kippen, Fallen, ...) zusammensetzen kann, liegt es oft am Bearbeiter den übergeordneten Bewegungsmechanismus festzustellen und das bewegte Material zu klassifizieren. Erst danach kann der Bewegungstyp festgelegt werden. Gesondert zu betrachten sind Murengänge. Da sie hydraulischen Fließgesetzen folgen sind sie von den anderen gravitativen Massenbewegungen zu differenzieren. Bei einer detaillierten Untersuchung muss zwischen vorbereitenden Faktoren der Bewegung (Disposition), prozessauslösenden Faktoren (Trigger) und kontrollierenden Faktoren unterschieden werden. Sehr wichtig für die Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen auf den Menschen ist die Geschwindigkeit der bewegten Masse. Auf sehr schnell ablaufende Prozesse (z.B. Bergstürze, Felsgleitungen, Murengänge), deren Geschwindigkeiten bis zu Hunderten von Kilometern pro Stunde erreichen, kann der Mensch kaum noch reagieren.

Im starken Gegensatz dazu kann auf gravitative Massenbewegungen, die sich mit Geschwindigkeiten von Millimetern oder Zentimetern pro Jahr bewegen gut reagiert werden. (vgl. GLADE und DIKAU 2001)

2.1.2 Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren

Vorbereitende Faktoren beeinflussen die Stabilität eines Hanges, wobei die eigentliche Bewegung noch nicht stattfindet. Man spricht hierbei davon, dass diese Grunddispositionen (z.B. Hanggeometrie, Materialeigenschaften des Substrats, Vegetationsbedeckung) und deren Änderung (z.B. Entwaldung) einen instabilen Zustand herbeiführen können. Prozessauslösende Faktoren können anthropogener (z.B. Sprengungen, künstliche Hangabschnitte) oder natürlicher (z.B. Erdbeben, intensive Niederschläge, langanhaltende Niederschläge, schmelzende Schneedecken) Herkunft sein. (vgl. GLADE und STÖTTER 2007)

Tabelle 1 fasst die vorbereitenden, die auslösenden und die kontrollierenden Faktoren zusammen. Bei vorbereitenden Faktoren handelt es sich zumeist um langsame Prozesse, die die Stabilität eines Hanges vermindern. Beispiele für natürliche Dispositionen sind Verwitterung, Schneeschmelze, Frost-Tau Zyklen oder schmelzender Permafrost. Aber auch anthropogen Verursachte Faktoren, wie Entwaldung oder Bewässerung können vorbereitende Faktoren sein. Dispositionen destabilisieren den Hang aber lösen die Massenbewegung nicht aus. Der, den Bewegungsprozess auslösende, Trigger ist meist ein kurzfristiges Ereignis. Beispiele hierfür sind Erdbeben, Niederschlag oder anthropogen durchgeführte Hanganschnitte. Kontrollierende Faktoren können den Ablauf der bereits eingetretenen gravitativen Massenbewegung beeinflussen.

Tabelle 1: Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren von Massenbewegungen nach DIKAU und GLADE 2002 (BELL 2007).

Ursache	Vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	kontrollierende Faktoren
Geologie	Diskontinuität ¹ (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität ¹ (z.B. Streichen/Fallen, tektonische Störungen) Verwitterung Isostasie	Erdbeben Vulkanausbrüche	Gesteinstypen Diskontinuität ¹ (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität ¹ (z.B. Streichen, Fallen, tektonische Störungen)
Klima	Lang anhaltender Vorregen Schneeschnmelze Frost-Tau Zyklen	Niederschlag ¹ (Intensität, Menge) Schnelle Schneeschnmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)
Boden	Verwitterung Geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen Subterrane Erosion (z.B. Tunnelerosion)	Nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
Vegetation	Natürliche Vegetationsänderung ¹ (z.B. Waldbrand, Trockenheit)	Nicht zutreffend	Vegetation
Hydrologie	Schmelzender Permafrost	Schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauhigkeit Weitertransport bewegter Massen
Topographie	Hangexposition ¹ Hanghöhe ¹	Nicht zutreffend	Hangneigung ¹ Hangwölbung ¹ Tiefenlinien ¹
Anthropogen	Entwaldung Staudammbau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhangs Bewässerung Bergbau Künstliche Bewegung (z.B. Sprengung) Undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte ¹ Hangunterschneidung ¹ Auflast ¹	Künstliche Verbauungen Dämme Gerinnebegradigung, -verkleinerung, -vergrößerung

¹ diese Faktoren können, je nach Stabilitätszustand des Hanges, sowohl vorbereitend, auslösend als auch kontrollierend wirken

2.1.3 Physikalische und bodenmechanische Parameter der Hangstabilität

2.1.3.1 Hangneigung und Schwerkraftwirkung

Die auf einen Hang einwirkenden Kräfte sind von seinem Neigungswinkel α [°, Grad] abhängig, da dieser über den Einfluss der Gravitationskraft (Masse m multipliziert mit Fallbeschleunigung g) die Größe der treibenden Kraft oder Scherkraft (proportional zur Scherspannung τ [N/mm²]) sowie der Normalkraft (proportional zur Druckspannung σ) beeinflusst. Die treibende Kraft verläuft hangabwärts, parallel zur Hangneigung und im rechten Winkel Normalkraft (siehe Abbildung 1). Bei größerem Neigungswinkel wird die treibende Kraft größer, wobei die Normalkraft kleiner wird.

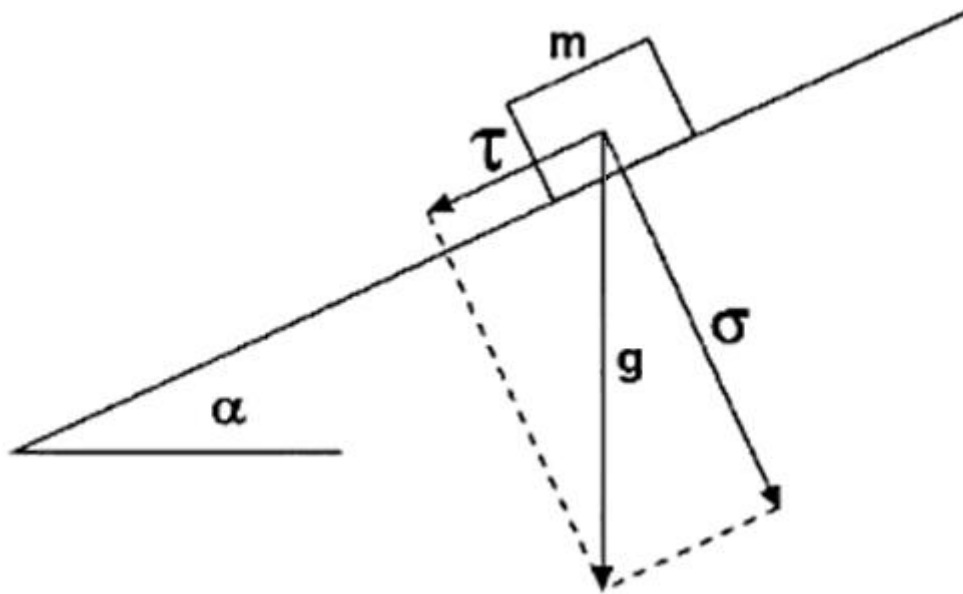


Abbildung 1: Vektorparallelogramm an einem Hang (AHNERT 1996).

2.1.3.2 Kohäsion und Scherwinkel

Weitere wichtige physikalische Parameter für die Stabilität eines Hanges sind Kohäsion und Scherwinkel. Die Kohäsion c ist ein Maß für die Bindung (oder Haftfestigkeit) zwischen den einzelnen Körnern des Bodens oder Lockermaterials. Die Kohäsion (als stabilisierende Kraft) ist ein Ausdruck für die Stärke der Bindung zwischen den Bodenteilchen, welche großteils vom Wassergehalt abhängig ist. Befindet sich zu viel Wasser im Boden, so können die Körner nicht zusammengehalten werden. Die Kohäsion ist die Grenzscherspannung des betrachteten Materials und ist deshalb als eine Schubspannung einzustufen. (vgl. AHNERT 1996)

Der Scherwinkel φ (oder Winkel der inneren Reibung), ist jener Winkel, bei dem Lockermaterial oder ein Festkörper gerade noch belastet werden kann, ohne zu versagen oder abzurutschen (vgl. KRÄTTLI und SCHWARZ 2015). Er stimmt mit dem natürlichen Böschungswinkel überein, welcher größer ist, je unterschiedlicher, eckiger und dichter die im jeweiligen Material enthaltenen Körner sind (vgl. AHNERT 1996). Der Scherwinkel kann somit als Maß für die maximale (stabile) Hangneigung angesehen werden.

Kohäsion, Druckspannung und Scherwinkel bestimmen die Scherfestigkeit eines Hanges. Dieser Zusammenhang lässt sich durch das Mohr- Coulomb Gesetz erklären (vgl. ZANGERL et al. 2008).

Mohr- Coulomb Gesetz:

$$\tau_f = c + \sigma^{eff} * \tan(\Phi)$$

τ_f ... Scherfestigkeit [N/mm²]

c ... Kohäsion [N/mm²]

σ^{eff} ... effektive Druckspannung [N/mm²]

Φ ... Scherwinkel [°, Grad]

Die Scherfestigkeit und damit die Stabilität bzw. Bewegungsaktivität eines Hanges ist stark vom Wassergehalt des Materials und somit von den Niederschlags- und Grundwasserverhältnissen abhängig. Es gibt dabei einen Prozess, der die treibende Kraft in einem Hang erhöhen kann. Dieser Prozess wird Prinzip der „effektiven Spannungen“ genannt. (vgl. Zangerl et al. 2008)

Prinzip der effektiven Spannungen (TERZAGHI 1950):

$$\sigma^{eff} = \sigma^{tot} - p$$

σ^{eff} ... effektive Druckspannung [N/mm²]

σ^{tot} ... totale Druckspannung [N/mm²]

p ... Porenwasserdruck [N/mm²]

Wenn der Porenwasserdruck steigt, reduziert sich die effektive Druckspannung in den Trennflächen. Dadurch reduziert sich, unter Annahme des Mohr-Coulomb Bruchkriteriums, die Scherfestigkeit τ_f und ein Versagen des Materials kann eintreten. Der Wasserdruck beeinflusst also direkt die Stabilität. Je intensiver der Niederschlag zu Boden kommt und je länger ein Niederschlagsereignis andauert, desto stärker wird sich der Porenwasserdruck ausbilden (vgl. KRÄTTLI und SCHWARZ 2015).

Wasser kann neben den Spannungszuständen auch die mechanischen Gesteinseigenschaften sowohl chemisch als auch physikalisch beeinflussen. Dies kann durch Lösungs-, Verwitterungs- und Erosionsprozesse geschehen. Beispielsweise kann es in tonreichen Gesteinen zur Festigkeitsreduktion durch Quellerscheinungen und Volumszunahmen kommen. Passieren Massenbewegungen unmittelbar nach Nieder-

schlagereignissen, so ist der Einfluss des Wassers leicht erkennbar. Durch unmittelbare Abfolge von Niederschlag und Hangversagen ist ein kausaler Zusammenhang gegeben. Dies ist eher bei flach verlaufenden Massenbewegungen im Lockergestein, stark verwitternden Festgesteinen oder Steinschlagereignissen der Fall. Bei tiefgründigen Massenbewegungen hingegen gibt es typischerweise eine Zeitverzögerung zwischen dem Niederschlag und dem Start des Ereignisses. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

2.1.3.3 Factor of Safety

Das zugrundeliegende physikalische Konzept der Hangstabilität ist, dass Kräfte auftreten, die entweder einer Bewegung entgegenstehen oder die Bewegung fördern können. Aus dem Verhältnis zwischen Scherfestigkeit und Scherspannung lässt sich ein Sicherheitsfaktor bilden. Die Stabilität eines Hanges kann durch Berechnung des Factor of Safety (FoS) beurteilt werden, der das Verhältnis der Widerstands- und Antriebskräfte innerhalb eines Hanges darstellt (vgl. CROZIER 1989). Der FoS ist ein ausschlaggebender Faktor für die Instabilität von Hängen und die Auslösung von Massenbewegungen.

Factor of Safety:

$$FoS = \frac{\text{Scherfestigkeit}}{\text{Scherspannung}} = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \left(\frac{m \cdot g \cdot \cos(\alpha)}{A} - p \right) \cdot \tan(\Phi)}{\frac{m \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{A}}$$

Grundsätzlich ist ein instabiler Hang durch einen $FoS \leq 1$ gekennzeichnet, während ein stabiler Hang einen $FoS > 1,0$ besitzt. GLADE und CROZIER (2005) betonen jedoch, dass der FoS nur ein relatives Maß für die Stabilität ist, da er keine Informationen über das Ausmaß der Destabilisierung liefert, die bis zum Auftreten eines Böschungsversagens erforderlich ist. Eine Destabilisierung von Hängen tritt in der Regel immer dann auf, wenn das Zusammenspiel von Geologie, Hydrologie, Klima und menschlichem Eingreifen entweder zu einer Verringerung der Scherfestigkeit oder zu einer Förderung der Scherspannung führt (vgl. WIECZOREK 1996).

In Abbildung 2 ist ein Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Hangstabilität dargestellt. Ausgang ist ein stabiler Zustand des Hanges. Im Laufe der Zeit wirken verschiedene

vorbereitende Faktoren, wie Verwitterung und starker- sowie langanhaltender Niederschlag, auf den Hang ein. Die Dispositionen beeinflussen die Hangstabilität bis die Grenze zur Instabilität erreicht wird. Danach führt ein auslösender Faktor dazu, dass der Factor of Safety auf einen Wert unterhalb von 1 sinkt, womit die Instabilität erreicht ist und es zu einem Versagen des Hanges kommt.

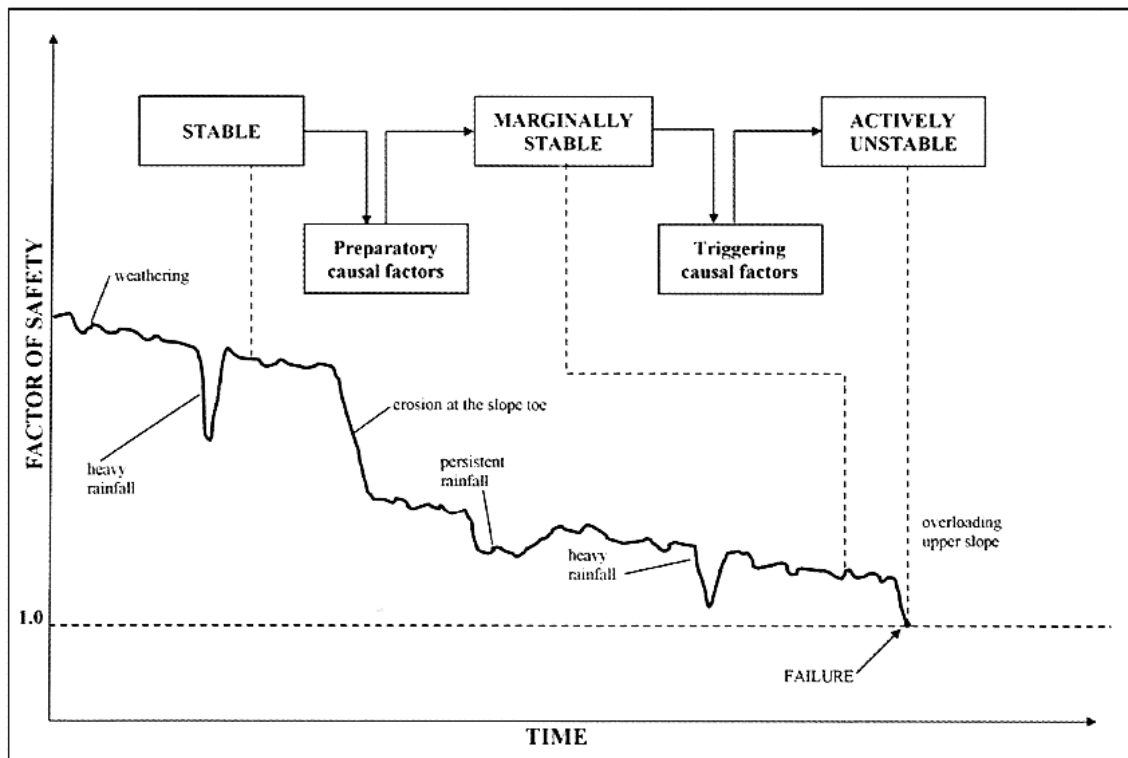


Abbildung 2: Beispiel für die zeitliche Veränderung der Hangstabilität (FoS) über die Zeit (MÖLK et al. 2011).

2.1.4 Prozess- und Materialtypen

In der Literatur lassen sich verschiedene Ansätze finden, um unterschiedliche gravitative Massenbewegung einordnen zu können. International durchgesetzt hat sich die Klassifikation von CRUDEN und VARNES (1996) und DIKAU et al. (1996), welche Prozesse und Materialien in Verbindung setzt. Diese Klassifikation ist mit englisch- sowie deutschsprachigen Bezeichnungen in Tabelle 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für alle drei Materialtypen (Festgestein, Schutt und Erde) die Gesamtheit der angeführten Prozessstypen von Massenbewegung eintreten kann. Es folgt eine detaillierte Beschreibung dieser Prozessstypen.

Tabelle 2: Zusammenhang von Prozess- und Materialtypen von Massenbewegungen (BELL 2007).

Process Prozess	Material Material		
	Rock <i>Festgestein</i>	Debris <i>Schutt</i>	Earth <i>Erde/Boden</i>
Fall <i>Fallen</i>	Rock fall <i>Bergsturz, Felssturz, Steinschlag</i>	Debris fall <i>Schuttsturz</i>	Earth fall <i>Erdsturz</i>
Topple <i>Kippen</i>	Rock topple <i>Felskippen</i>	Debris topple <i>Schuttkippung</i>	Earth topple <i>Erdkippen</i>
Slide (rotational) <i>Gleiten</i> (rotationsförmig)	Rock slide <i>Bergrutschung, Felsrutschung</i>	Debris slide <i>Schuttrutschung</i>	Earth slide <i>Erdrutschung</i>
Slide (translational) <i>Gleiten</i> (translatorisch)	Rock block slide <i>Felsblockgleitung</i> Rock slide <i>Felsgleitung</i>	Debris block slide <i>Schuttblockgleitung</i> Debris slide <i>Schuttgleitung</i>	Earth block slide <i>Erdblockgleitung</i> Earth slide <i>Erdgleitung</i>
Spread <i>Driften</i>	Rock spreading <i>Felsdriften</i>	Debris spreading <i>Schuttdriften</i>	Earth spreading <i>Erddriften</i>
Flow <i>Fließen</i>	Rock flow <i>Sackung, Talzus Schub</i>	Debris flow <i>Schuttfließen, Mure, Murgang</i>	Earth flow <i>Erdfließen, Mure, Murgang</i>
Complex <i>Komplex</i>	e.g. Rock avalanche <i>z.B. Sturzstrom, Steinlawine</i>	e.g. flow slide <i>z.B. plötzliche und schnelle Fließbewegung in kohäsionslosem Lockergestein</i>	e.g. rotational slide-earthflow <i>z.B. kombinierte Rotationsrutschung mit Erdfließen</i>

2.1.4.1 Stürzen, Fallen

Bei Sturzprozessen löst sich Gestein von einer steilen Hangfläche ab. Dabei treten keine oder nur sehr geringe Scherbewegungen auf. Beim Stürzen bewegt sich das Material im freien Fall, springt oder rollt sehr schnell den Abhang hinunter (siehe Abbildung 3). Das Ablösen des Materials vom Gesteinsverband kann mit den Prozessen Gleiten oder Kippen verbunden sein. Sturzprozesse können eine große Reichweite haben und deshalb ist ein hohes Zerstörungspotential gegeben. Stein- und Blockschlag sowie Fels- und Bergsturz sind Sturzprozesse. Bei Stein- und Blockschlag gibt es nur wenig bis keine mechanische Interaktion zwischen den einzelnen Steinen oder Blöcken. Bei Fels- und Bergsturz kommt es zu einem Zerschlagen einer sich lösenden zusammenhängenden Gesteinsmasse in viele Steine und Blöcke. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

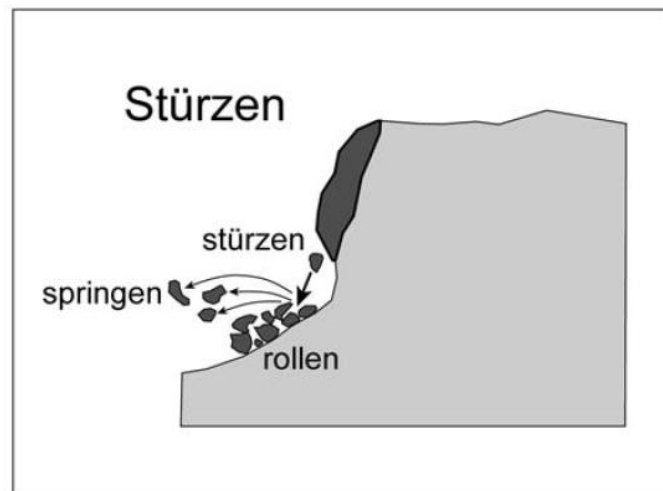


Abbildung 3: Darstellung des Sturzprozesses mit anschließenden springenden und rollenden Bewegungen (ZANGERL et al. 2008).

2.1.4.2 Kippen

Liegt der Massenschwerpunkt eines Gesteinspakets über der Rotationsachse so kann es passieren, dass sich dieses Paket in Form einer Rotation aus dem Hang herauslöst und zu kippen beginnt. Auch plastische Verformung des unterliegenden Materials oder Wasser- bzw. Eisdruck können Kippprozesse auslösen. Folgeprozesse des Kippens können Gleiten oder Stürzen sein. Sehr oft sind beim Prozess des Kippens auftretende beschleunigte Bewegungen der Grund für plötzliches Bruchversagen. Kippprozesse passieren in Gesteinen mit einem steil stehenden, dominanten Trennflächensystem. Ein idealer Kippprozess ist durch kontinuierliche Geschwindigkeitsabnahme in Richtung des Rotationspunktes und zunehmend steiler einfallende Bewegungsvektoren im zeitlichen Verlauf der Rotation charakterisiert (siehe Abbildung 4). Grundsätzlich wird zwischen Biegekippen (flexural toppling) und Blockkippen (block toppling) unterschieden. Der Auslöser von Biegekippen sind Biegezugrisse, die normal auf die Haupttrennflächen entstehen. Blockkippen tritt meist an bestehenden Kluftkörpern auf. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

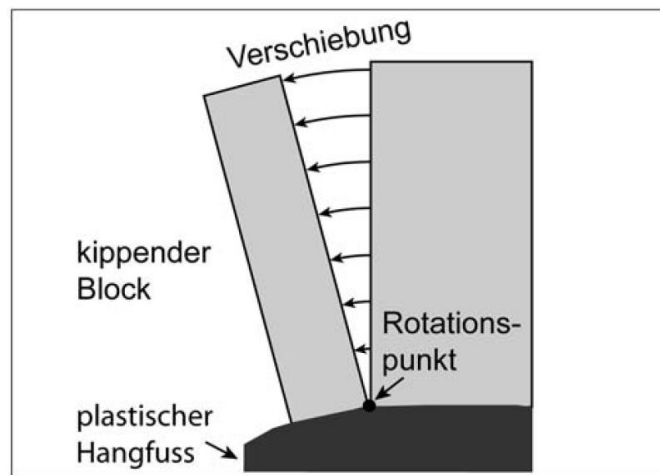


Abbildung 4: Verteilung der Blockverschiebung beim Kippen aufgrund plastischer Deformationen des Hangfußes (ZANGERL et al. 2008).

2.1.4.3 Gleiten

Bei Gleitungen bzw. Rutschungen bewegt sich das Fest und/oder Lockermaterial entlang einer oder mehreren Bewegungsflächen abwärts. In den Bewegungsflächen findet der Hauptanteil der Hangdeformation statt. Im Idealfall verhält sich die bewegte Masse als Block mit nur geringen Interdeformationen. Dies ist der Fall, wenn nur eine planare aktive Bewegungszone auftritt. Im Normalfall sind Bewegungszonen aber nicht durchgehend planar oder glatt ausgebildet und es herrschen unterschiedliche mechanische Eigenschaften entlang dieser Zonen. Außerdem können sich Kluft- bzw. Porenwasserdrucke entlang der Bewegungsflächen verändern. Somit können im Laufe des Prozesses interne Deformationen (Stauchungen, Dehnungen, ...) der bewegten Masse entstehen, wobei Teilschollen unterschiedlicher Bewegungsaktivität und Geometrie ausgebildet werden. Eine Bewegung über einer zusammenhängenden Gleitzone setzt progressive Bruchprozesse, die von lokalen Schwächezonen ausgehen, voraus. Bei zunehmender Hangverschiebung durch einen Gleitungsprozess wird die ursprüngliche Geländeoberfläche im Bereich des Hangfußes zu einer Trennfläche zwischen bewegter Masse und stabilem Hang. Diese Trennfläche wird damit Teil der Bewegungszone. Gleitungen können wenige Millimeter pro Jahr bis mehrere (10er) Meter pro Sekunde schnell werden. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

Rotationsgleitung

Dieser Typ der Gleitung tritt vorwiegend in mechanisch isotropen Gesteinen auf. Bei der Rotationsgleitung bewegt sich die Masse entlang einer konkaven Bewegungszone. Die interne Deformation bleibt, außer im Hangfußbereich, eher gering. Während im oberen Bereich der Bewegungszone steile bis vertikale Verschiebungen auftreten, sind diese im Hangfußbereich flach oder sogar aufwärtsgerichtet (Hebung) orientiert. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

Translationsgleitung

Bei diesem Typ der Gleitung werden die Materialpakete entlang planarer Bewegungszonen verschoben. Eine Translationsbewegung setzt sich ungehindert fort, solange die Neigung der Bewegungszone steil genug ist. Meistens sind einzelne Haupttrennflächen oder Trennflächensysteme (spröde Störungszonen, Klüfte, Schichtungsflächen, ...) für Translationsgleitungen verantwortlich. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

Die Bewegungszone ist häufig an der Grenzfläche von Bodenhorizonten oder in Schichten mit geringer Scherfestigkeit zu finden (vgl. DIKAU et al. 1996).

2.1.4.4 Fließen

Bei Fließprozessen besitzen die bewegten Massen eine hohe interne Teilbeweglichkeit. Gleitzonen treten entweder gar nicht auf oder sind dicht angeordnet und kurzlebig. Die Geschwindigkeiten des Prozesses reichen von sehr langsam (Hangkriechen) bis sehr schnell (Sturzströme oder Muren) und decken dabei einen Bereich von kleiner 10^{-7} bis größer 10^3 Millimeter pro Sekunde ab. Die Geschwindigkeitsverteilung der fließenden Masse ist ähnlich wie bei einer viskosen Flüssigkeit. Die Geschwindigkeit nimmt mit der Tiefe kontinuierlich ab. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

Im Idealfall kommt es beim Fließen nicht zu „Geschwindigkeitssprüngen“ (= Entwicklung diskreter Gleitzonen). In der Natur ist dies jedoch häufig der Fall. Hierbei kommt es zu einer Kombination von Fließ- und Gleitprozessen, die nur schwer voneinander abgegrenzt werden können. Fließprozesse können Locker- und Festgesteine betreffen und sind, auch wegen des ausgeprägten Geschwindigkeitsspektrums, sehr vielfältig. Sehr langsames Fließen im Festgestein wird als „Sackung“ oder Felskriechen bezeichnet. (vgl. LOTTER und HABERLER 2013)

2.1.4.5 Driften

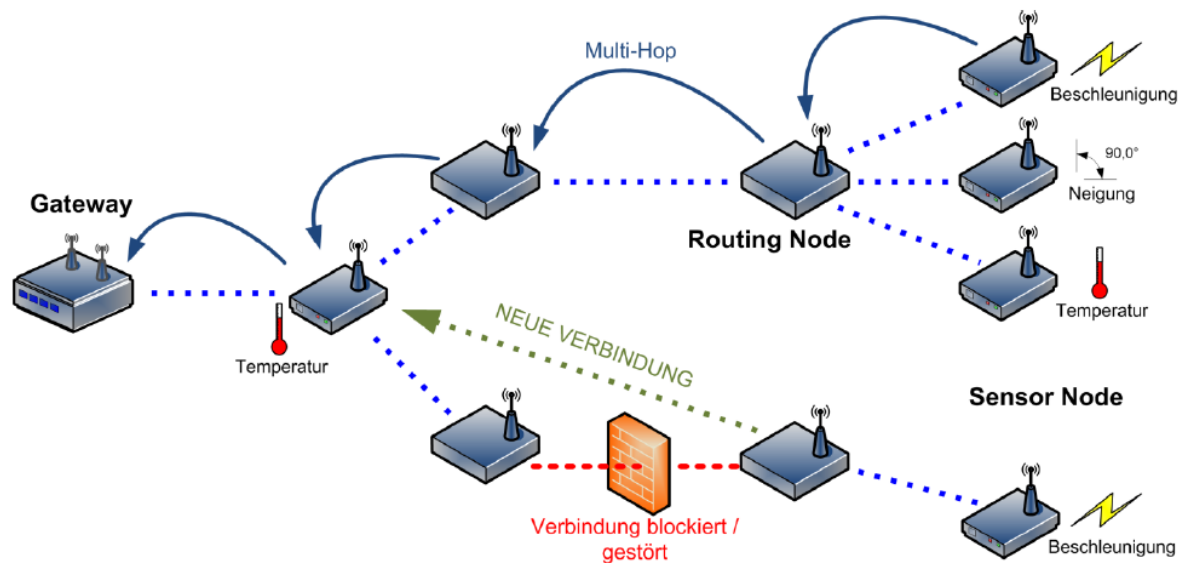
Driften ist das Auseinanderbewegen einer kohäsiven Lockergesteins- oder Felsmasse auf einem weichen Untergrundmaterial. Neben der horizontalen Verschiebung können auch Setzungen auftreten. Die kompetente Masse kann aufgrund der Dehnungs- und Setzungsmechanismen entlang von Spalten und steilstehenden Zugspitzen zerbrechen. Das plastisch deformierbare Substrat kann sich bei fortgeschrittener Dehnung von unten in den Spalten ausdehnen oder Blöcke und Schutt füllen die Spalten von oben aus. Meist entsteht Driften ohne Ausbildung einer merkbaren Bewegungszone (Bruchfläche). Driften ist durch Bodenverflüssigungsprozesse (ground liquefaction) oder plastische Deformationen dominiert. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

2.2 Drahtlose Sensorknotennetzwerke

Ein Sensorknotennetzwerk, auch als WSN (Wireless Sensor Network) bezeichnet, besteht aus mehreren Sensorknoten (Kleinstrechnern mit angeschlossenen Sensoren), welche an einem bestimmten Platz, an einer für das Vorhaben wesentlichen Stelle im Raum, sensorisch messbare physikalische Ereignisse entgegennehmen. Diese Ereignisse werden im Anschluss zu einer digitalen Information (Daten) verarbeitet und zu einem Zentralrechner gesendet.

Meistens erfolgt die Stromversorgung der Knoten über Batterien, die oftmals über Anschluss an externe Energiequellen wieder aufgeladen werden können (PINK 2007). Sensorknoten haben die Fähigkeit, sich spontan zu vernetzen, um ihre Messwerte dem Gateway (Zentralrechner) zu übermitteln (vgl. BILL 2010).

Insbesondere die fortschreitende Miniaturisierung von Prozessoren, Funkmodulen und Prozessoren führte zur Jahrtausendwende zum Umstieg auf drahtlose Sensornetze. Das sind Netzwerke, die zwischen den Sensorknoten selbst sowie den Endgeräten (Gateway) keine feste Infrastruktur besitzen. Der Ursprung waren Ad-hoc Netze. Bei Ad-hoc Netzen können die Sensorknoten und Endgeräte spontan mit einem oder mehreren ihrer benachbarten Knoten Befehle oder Daten austauschen. Dies ermöglicht auch eine Multi-hop-Kommunikation, bei welcher der Datentransfer von Knoten zu Knoten, bis die Daten ihr Ziel erreichen, erfolgt (siehe Abbildung 5). Diese Netze zeich-



Die Drahtloskommunikation dient sowohl zur Übertragung der Sensordaten zur Basisstation als auch zur Steuerung des Netzwerks. Die Daten werden über den Gateway zur Kontrolleinheit (Server) weitergeleitet. Moderne Messmodule sind mit verschiedenen offenen Schnittstellen zur Anbindung von unterschiedlichen Sensoren ausgestattet. Somit können verschiedene Sensoren flexibel integriert werden. Wesentliche Vorteile von modernen drahtlosen Sensornetzwerken sind ihre Selbstheilungsfähigkeiten, ihre ad-hoc und multi-hop Fähigkeiten, bidirektionale Kommunikation, der autonome intelligente Betrieb, ihre Fähigkeit zur Sensorfusion, gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und Energieeffizienz. (vgl. FERNANDEZ- STEEGER 2011)

Die Art der verwendeten Sensoren ist vom jeweiligen Typ des drahtlosen Sensorknotennetzwerks (WSN) abhängig und somit modular. Sensorknoten müssen sehr kompakt (um die zu untersuchenden Phänomene nicht zu beeinflussen) und robust (um schwierige äußere Bedingungen zu überstehen) gebaut sein um den (oftmals) nötigen

Anforderungen gerecht zu werden. Die allgemeinen Anwendungsgebiete von Sensor-knotennetzwerken sind Datenerfassung mit dem Ziel der (a) Steuerung besonderer Aufgaben, (b) Bildung eines Modells und (c) Überwachung eines bestimmten Sachverhalts. Sensorknotennetzwerke vom Typ (b) und (c) werden häufig parallel genutzt, wenn neben der Generierung von Warnungen auch eine Prognose über künftige Ereignisse erforscht werden soll. (vgl. PINK 2007)

Von Modellierungssystem in diesem Zusammenhang wird gesprochen, wenn ein WSN Messdaten zur Modellierung eines zu untersuchenden Sachverhalts aufnehmen soll. Es können Modelle von unterschiedlichsten Sachverhalten, wie zum Beispiel dem Verhalten natürlicher Phänomenen, erstellt werden. Eine solche Modellierung wird angestrebt, um den Sachverhalt besser verstehen zu können. Aus der Analyse des erstellten Modells können zukünftiges Verhalten prognostiziert sowie Ursachen von Veränderungen erkannt werden. (ebd.)

Sensorknotennetzwerk können auch als Überwachungssysteme installiert werden. Da unterschiedlichste Naturgefahren (Erdbeben, Felssturz,...) eine potenzielle Gefahr für Mensch und Infrastruktur darstellen können, werden in manchen Fällen Überwachungssysteme oder Frühwarnsysteme installiert. (ebd.)

2.3 Sensornetzwerk für Massenbewegungen (SLEWS)

SLEWS (Sensor based Landslide Early Warning System) ist ein vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprojekt. Der Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der Universität RWTH Aachen (LIH), die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR), die ScatterWeb GmbH Berlin (SWB) und die Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock (GGR) sind die an dem Projekt beteiligten Einrichtungen. Das Projekt „SLEWS- Entwicklung einer Geodateninfrastruktur als Grundlage von Frühwarnsystemen für Massenbewegungen durch die Integration von Echtzeitsensoren“ wurde in den Jahren 2007 bis 2010 durchgeführt. Das Ziel war Erforschung, Konzeption und Aufbau eines prototypischen Alarm- und Frühwarnsystems zur Echtzeitüberwachung von Hangrutschungsereignissen mithilfe von Drahtlosen Sensornetzwerken. (vgl. WALTER 2012)

Die grundlegende Infrastruktur eines SLEWS- Sensornetzes stellt ein drahtloses Netzwerk des Herstellers ScatterWeb dar, welches aus einzelnen Sensorknoten (ScatterNodes) besteht. Die Sensorknoten sind mit Energieversorgung, Sensorschnittstellen und Funkmodulen (Frequenz von 868 MHz) ausgestattet. Daten werden per Multi-hop-Kommunikation im TDMA (Division Time Multiple Access) Zugriffs- und LPSR (Low-Power Scatter-Route) Routingverfahren von Knoten zu Knoten übertragen. Somit können große Entfernungen zwischen Sensorknoten und Gateway energieeffizient überwunden werden. Es können auch Netzknoten ohne Sensoren, die nur der Kommunikation dienen, in das Netzwerk eingebaut werden. (ebd.)

Das Netzwerk kann, wie im allgemeinen Teil zu Sensornetzwerken bereits beschrieben, mittels Selbstheilung und ad-hoc Selbstorganisation auf Knotenausfälle und Störungen reagieren. Der Gateway (ScatterGate) stellt die Schnittstelle zwischen Sensornetz und externen Empfängern/Anwendungen per GPRS/GMS oder Kabelverbindung dar. (ebd.)

2.4 Beschleunigungssensoren

Ein Beschleunigungssensor ist ein Sensor, der seine eigene Beschleunigung misst. Beschleunigungssensoren finden sich in vielen unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Auch im Alltag ist ihre Funktion sehr nützlich. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Sensor in einem Auto, der Airbags auslösen kann. Weiters werden Beschleunigungssensoren als Teil des Steuerungselements in Videospiel- Konsolen und in Smartphones verwendet.

2.4.1 Funktionsprinzip

Die Funktionsweise von Beschleunigungssensoren basiert auf dem physikalischen Prinzip der Trägheit. Ein Beschleunigungssensor misst die auf eine Probemasse wirkende Trägheitskraft, in Form einer linearen Beschleunigung, bezüglich einer bestimmten Achse. Der Sensor misst die Beschleunigung also nur indirekt über die wirkende Kraft. Es folgt eine kurze Beschreibung der relevanten physikalischen Größen (vgl. WILD-PFEIFFER und SCHÄFER 2011).

Zweites Newton'sches Gesetz – Trägheitsprinzip:

$$F = m * a$$

F... Trägheitskraft [N]

m... Masse [kg]

a... Beschleunigung [m/s²]

Für die Federkraft gilt:

$$F = k * \Delta l$$

k... Federkonstante [N/m]

Δl ... Ablenkung der Probemasse [m]

Die Beschleunigung entlang der bestimmten Achse kann durch Gleichsetzen der Trägheitskraft und der Federkraft ausgedrückt werden:

$$a = \frac{k}{m} * \Delta l$$

2.4.2 Neigungsmessung

Als ein weit verbreiteter Sensortyp in geotechnischen Überwachungssystemen kann der Beschleunigungssensor nicht nur dynamische Beschleunigungskräfte, die durch Vibrationen oder Bewegungen verursacht werden, sondern auch statische Kräfte wie die konstante Schwerkraft, die auf die Erde gerichtet ist, erfassen. Im Wesentlichen kann über die Schwerkraft, die Neigung des Sensors bestimmt werden (siehe Abbildung 6).

Berechnung des Neigungswinkels α [°, Grad]:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{g'}{g} \right)$$

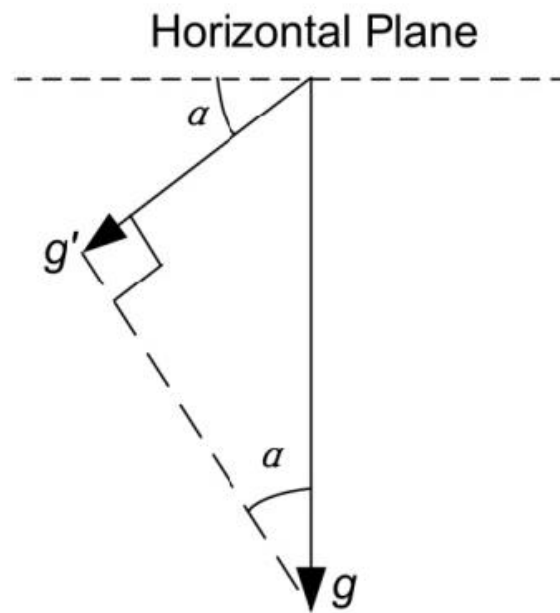


Abbildung 6: Neigungsmessung über Fallbeschleunigung (Li et al. 2014).

2.4.3 MEMS- Beschleunigungssensoren

Als geeignete Sensoren für WSN wurden im Rahmen des SLEWS- Projekts Detektoreinheiten auf Basis der MEMS-Technologie identifiziert. MEMS steht für Micro-Electro-Mechanical-System. Sie sind als massentauglich, preisgünstig und energieeffizient einzustufen. MEMS- Sensoren haben die Eigenschaft, dass sie elektrische sowie mechanische Komponenten in einer Einheit verbinden. Die Messung erfolgt durch Bewegung an bzw. in der Messeinheit. Solche Sensoren bestehen im Inneren aus einer Kombination aus mechanischen Elementen, die auf einem Mikrochip integriert sind. Neigungs-, Beschleunigungs-, Temperatur-, Drucksensoren und Gyroskope sind typische Beispiele für MEMS- Sensoren. Die Messeinheiten werden meist aus Silizium gefertigt. Ihre Größe liegt im Mikrometerbereich. (vgl. FERNANDEZ- STEEGER 2011)

Es gibt einige Vorteile von MEMS-Sensoren, die für den Einsatz in Geosensornetzwerken sprechen. Diese sind geringe Größe (siehe Abbildung 7), gute Qualität durch standardisierte Produktion (ISO 9001:2008), Robustheit, hohe Genauigkeit und Auflösung, vermehrt standardisierte Schnittstellen, Kostenvorteil und einfache Verfügbarkeit großer Stückzahlen. (ebd.)



Abbildung 7: MEMS- Beschleunigungssensor (FERNANDEZ- STEEGER 2011).

Das Projekt SLEWS hat bestimmte MEMS Sensoren aus dem low-cost Massenmarkt-bereich für Hangrutschungsereignisse verwendet. Diese sind Neigungs-, Beschleunigungs- und Drucksensoren. Diese Mikrosensoren sind millimetergroß und werden in der Medizintechnik sowie der Autoindustrie intensiv verwendet. Diese Sensoren sind qualitativ hochwertig, kostengünstig und lassen sich über eine SPI (Serial Peripheral Interface) Schnittstelle ansprechen. Solche Sensoren sind Massenprodukte und im Preissegment unter 50 € zu erhalten. Die konkrete Auswahl innerhalb des Projekts SLEWS fiel auf den Neigungssensor SCA-100T-D01, den kapazitiven Beschleunigungssensor SCA-3000-D01 und den Drucksensor SCP-1000-D01 von VTI Technologies. (vgl. WALTER 2012)

MEMS-Beschleunigungssensoren lassen sich aufgrund der verwendeten Messtechnik in verschiedene Typen unterscheiden. Es folgt eine Aufzählung der Sensortypen (vgl. WILD-PFEIFFER UND SCHÄFER 2011).

- Kapazitiv: Hier wird die Änderung der Kapazität (bzw. Spannung) zweier Kondensatoren aufgrund der Auslenkung der Probemasse gemessen.
- Vibrationsmessung: Hier wird die Frequenzdifferenz von zwei schwingenden Quarzen aufgrund der Beschleunigung einer Probemasse gemessen.
- Piezoelektrisch: Hier kommt es zur Deformation der Oberfläche eines piezoelektrischen Materials durch Krafteinwirkung. Dabei wird die Ladungstrennung bzw. elektrische Spannung gemessen.
- Piezoresistiv: Hier wird die Änderung des spezifischen Widerstands eines Materials (meist Halbleitermaterialien, wie Silizium) durch mechanische Belastung gemessen.

Der Einsatz der kapazitiven Messung in Beschleunigungssensoren ist weit verbreitet (auch bei SLEWS und beim Geomonitoring des Amtmann). Es folgt eine kurze Beschreibung eines kapazitiv funktionierenden MEMS-Beschleunigungssensors. In Ab-

bildung 8 ist das Funktionsprinzip eines kapazitiv funktionierenden MEMS- Beschleunigungssensors angedeutet. Zu beachten gilt, dass in diese Skizze nur eine der drei Achsen eines dreidimensionalen Beschleunigungssensors darstellt. Die bewegliche Probemasse ist an den Rückstellfedern aufgehängt, während die Abtastplatten auf der Sensorplatine befestigt sind.

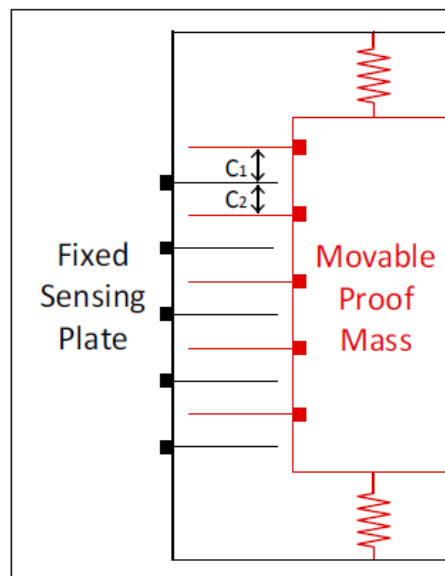


Abbildung 8: Funktionsskizze eines kapazitiven MEMS- Beschleunigungssensors (Li et al. 2016).

Der Beschleunigungsmesser reagiert auf die Linearbeschleunigung des Sensors und das Erdschwerefeld, wobei sowohl das Gravitationsfeld als auch die Linearbeschleunigung zu einer Auslenkung der Probemasse führen können. Wenn die Abtastplatte von der ursprünglichen Position abweicht, kann die Änderung der Kapazität (C_1 und C_2) zwischen den Fingern der Probemasse und den Abtastplatten durch ein Spannungssignal ausgegeben werden, das anschließend in einen digitalen Wert umgewandelt werden kann. Die Beschleunigung entlang der betrachteten Achse wird durch die Umrechnung des digitalen Werts mit einer gegebenen Formel ausgedrückt. (vgl. Li et al. 2016)

2.5 Frühwarnsysteme

2.5.1 Vom Monitoring zur Frühwarnung

Monitoringsysteme können für alle Gebiete des menschlichen Forschungshorizontes angewandt werden, solange Messungen durchgeführt werden können, durch welche

eine zeitliche Entwicklung erkennbar ist und Forschungserkenntnisse sinnvoll erscheinen. Auch Frühwarnsysteme können in allen wissenschaftlichen Zweigen eine Anwendung finden, solange im betrachteten Fall ein spezielles Ereignis auftreten kann, vor dem gewarnt werden soll. Die Grenze zwischen Monitoringsystem und Frühwarnsystem ist oft als fließend zu betrachten.

MAYER und GLADE (2010: 20) unterscheiden, auf einer übergeordneten Ebene, drei Typen von Frühwarnsystemen:

„1. Das ‚Monitoringsystem‘ ermöglicht das Verständnis der physischen Prozesse. Es wird dazu verwendet, um einen natürlichen Prozess besser zu verstehen und darauf aufbauend weitere Maßnahmen zu planen.

2. Eine dieser weiterführenden Maßnahmen könnte ein ‚Expertensystem‘ sein, welches den Entscheidungsträgern hilft, eine eventuell kritische Situation besser einzuschätzen. Das System stellt dabei ein effektives Monitoring zur Entscheidungsunterstützung bereit.

3. Der Systemtyp ‚Alarmsystem‘ alarmiert automatisch bei der Überschreitung eines kritischen Schwellenwertes.“

Diese Anschauungsweise zeigt, dass ein „einfacheres“ Monitoringsystem auch schon als Frühwarnsystem gesehen werden kann. Diese Betrachtung macht auch Sinn, wenn man sich vor Augen führt, dass sich ein „Monitoringsystem“ über die Zeit zu einem vollautomatisch funktionierenden „Alarmsystem“ entwickeln kann. In diesem Fall kann man sich vorstellen, dass sich, durch die anfängliche Betrachtung der physischen Prozesse über die Zeit, die Maßnahme zum Ausbau des Monitoringsystems aufgedrängt hat. Jedoch ist ein Frühwarnsystem im Allgemeinen als „Alarmsystem“ aufzufassen. THIEBES et al. (2010: 23) schreiben diesbezüglich: *„Frühwarnsysteme bauen auf Monitoringsystemen auf und zeichnen sich durch ein großes Maß an Automatisierung des Warnprozesses aus. Um dem ‚Früh‘ in Frühwarnung gerecht zu werden, sollte eine Warnung bereits vor dem eigentlichen Auftreten einer gravitativen Massenbewegung erfolgen können. Dies kann durch die Warnung bei ersten Anzeichen von Bewegungen geschehen oder auf Daten beruhen, welche die Auslösung charakterisieren und den Auslösezeitpunkt bestimmen. In den meisten Fällen sind dies der Niederschlag oder Bewegungsgeschwindigkeiten, die in Form von Schwellenwerten integriert werden.“*

Frühwarnsysteme können somit als weiterentwickelte Monitoringsysteme verstanden werden, dessen vorrangige Aufgabe in der zeitgerechten Warnung vor bestimmten (vorwiegend gefährdenden) Ereignissen besteht. Ausschlaggebend für die Sinnhaftigkeit eines Frühwarnsystems ist, dass es in der Lage ist, das Risiko für das Eintreten des Ereignisses rechtzeitig zu erkennen und die relevanten Akteure zu warnen.

Bei der Frühwarnung spielt die Dimension der Zeit eine entscheidende Rolle, da vermeintlich sehr langsame Prozesse sich in kürzester Zeit zu sehr schnell ablaufenden Ereignissen entwickeln können. Beispielweise kann sich ein langsam kriechender Hangabschnitt, durch ein Niederschlagsereignis oder ein Erdbeben, extrem beschleunigen und immense Schäden verursachen. (vgl. MAYER und GLADE 2010)

Bei der Entwicklung von Frühwarnsystemen muss darauf geachtet werden, dass den Warnungen vor unterschiedlichen Prozessen, auch unterschiedliche Reaktionen folgen müssen. Es gibt Fälle, bei denen die Warnung erst unmittelbar vor dem Ereignis auftreten kann. In so einem Fall muss sofort reagiert werden.

Um das Verhalten von gravitativen Massenbewegung auf Grundlagen von Monitoringdaten einschätzen zu können, ist es von entscheidender Wichtigkeit, alle beteiligten Prozesse zu kennen. Die räumliche Skale und die zeitliche Abfolge der Prozesse sind ebenso entscheidend. Ein Monitoringsystem kann entweder die gravitativen Massenbewegungen selbst oder deren auslösende Faktoren (Niederschlag, Schneeschmelze, Porenwasserdruck oder Erdbeben) überwachen. (vgl. THIEBES et al. 2010)

Die Frage, ob es sinnvoll ist ein Frühwarnsystem einzusetzen, sollte von einer ganzheitlichen Betrachtung der vorliegenden Situation abhängig gemacht werden, da mehrere Variablen ausschlaggebend sein können. (vgl. MAYER und GLADE 2010)

Die Schäden von gravitativen Massenbewegungen verursachen meist nur private ökonomische Verluste, was dazu führt, dass der öffentliche Sektor nur geringe Investitionen in Frühwarnsysteme tätigt und es deshalb auch nicht zur Standardisierung dieser kommt. (THIEBES et al. 2010).

2.5.2 Prozess der Warnung

Frühwarnung wird meist in die drei Phasen Vorhersage, Warnung und Reaktion gegliedert. Die Vorhersage soll Eintrittszeit, Zeitdauer, Größe und räumliche Ausbreitung des Ereignisses möglichst genau angeben. Die Warnung ist eine kritische Stelle im

Frühwarnungsprozess, da die Verantwortung für mögliche Fehlalarme getragen werden muss, welche unter Umständen sehr teuer werden können. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig, richtig einzuschätzen, in welchen Fällen eine Warnung erfolgt. Die Effektivität eines Frühwarnsystems ist stark von der Umwandlung der Vorhersage in eine Warnmitteilung abhängig. Eine Warnung sollte glaubhaft und deutlich formuliert sein. Außerdem muss sie von der Zielgruppe verstanden werden und klare Anweisungen für Schutzmaßnahmen enthalten. Dabei ist zu unterscheiden ob vorbereitete ExpertInnen einen noch nicht interpretierten Situationsbericht (Rohdaten) erhalten oder ob breite Bevölkerungsschichten gewarnt werden. Die dritte und unberechenbarste Komponente ist die Reaktion, in Folge der Warnung. In diesem Schritt müssen sofort (Schutz-) Handlungen umgesetzt werden, wobei auf organisatorische Bedingungen geachtet werden muss. Zuständigkeiten und Verantwortungsgefüge sind wichtige Aspekte und es kommt hier besonders auf funktionierende Kommunikation und Koordination an. (vgl. MAYER und GLADE 2010)

3. Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel wird die geographische Lage des Gebietes, in dem sich der Amtmann befindet, vorgestellt und gibt ein kurzer Überblick über die meteorologischen und geologischen Merkmale gegeben. Außerdem werden Besonderheiten in der direkten Umgebung des Amtmann vorgestellt. Insbesondere sind auch mögliche Gefahren, die durch den 40m hohen Felsturm ausgehen können, zu betrachten. Der Überblick über das Untersuchungsgebiet wird mit einer Beschreibung des lokalen drahtlosen Sensorknotennetzwerks am Amtmann und dessen Installation vervollständigt. In Abbildung 9 ist die nördliche Seite des Amtmann zu sehen, auf welcher vier Sensorknoten befestigt wurden.



Abbildung 9: Nördliche Seite des Amtmann mit den vier Sensorknoten (Quelle: NoeSLIDE).

3.1 Standort

Der Amtmann liegt geographisch gesehen im Ybbstal, am östlichen Rand des Gemeindegebiets von Waidhofen an der Ybbs. Das Untersuchungsgebiet liegt somit im Südwesten von Niederösterreich, nahe an der Grenze zu Oberösterreich. Die Statutarstadt Waidhofen an der Ybbs ist einer von neun politischen Bezirken des niederösterreichischen Mostviertels. Der genaue Standort ist Abbildung 10 zu entnehmen.

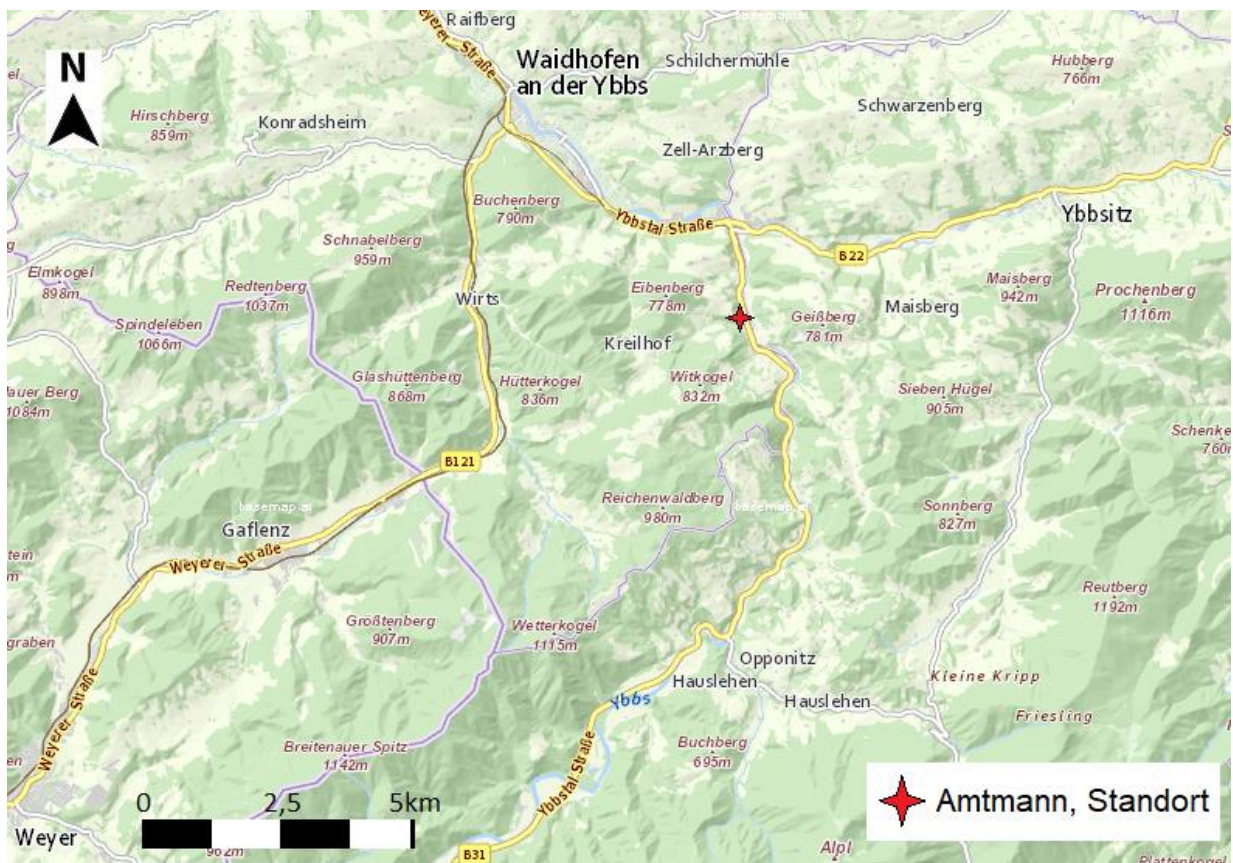


Abbildung 10: Standort des Amtmann im Ybbstal, Niederösterreich (Quelle: Basemap).

Entlang der Ybbs, auf der westlichen Seite, verläuft die Ybbstal Straße (B31), die somit westlich vom Amtmann vorbeiführt. Das Tal ist im Bereich des Untersuchungsgebiets beidseitig durch eine eindeutige Voralpenlandschaft geprägt, jedoch kann nicht mehr von einer Schlucht gesprochen werden. Die Ybbs tritt in diesem Bereich, von Süden nach Norden, aus den Kalkalpen aus und geht in die Flyschzone über, weswegen das Tal beständig breiter wird.

3.2 Klima

Die nächste ZAMG- Wetterstation zum Standort des Amtmanns befindet sich in Waidhofen an der Ybbs. Laut der Zusammenfassung der Klimadaten des Zeitraums von 1971 bis 2000 liegt das größte Temperaturtagesmaximum bei 37,3°C und das kleinste Temperaturtagesminimum bei -27,8°C. Im Durchschnitt gab es von 1971 bis 2000 in etwa 100 Frosttage (Temperaturtagesminimum < 0,0 °C), 25 Eistage (Temperaturtagesmaximum < 0,0 °C) und 43 Sommertage (Temperaturtagesmaximum ≥ 25,0 °C) im Jahr. (vgl. ZAMG 2019)

In Waidhofen regnete es von 1971 bis 2000 durchschnittlich am stärksten im Monat Juli. Die mittlere Monatssumme des Niederschlags beträgt für Juli 144,4 mm. Ein Millimeter Niederschlag entspricht einem Liter pro Quadratmeter. Für Februar beträgt die mittlere Monatssumme des Niederschlags nur 66,5 mm, womit es im Februar durchschnittlich am wenigsten Niederschlag gab. Die größte Tagesniederschlagssumme in der Zeit von 1971 bis 2000 beträgt 84 mm. Die Zahl der Tage mit einer Niederschlagssumme ≥ 10 mm liegt durchschnittlich bei 37 Tagen pro Jahr. (ebd.)

Am meisten Neuschnee gab es in Waidhofen an der Ybbs im Zeitraum 1971 bis 2000 in den Monaten Dezember, Jänner und Februar mit durchschnittlich 30,2; 29,7 und 30,8 cm. Die höchste Schneedecke gab es hingegen im Dezember und im März mit 84 und 72 cm. Im Jänner und Februar war die maximale Schneedecke nur 42 bzw. 49 cm dick. Durchschnittlich gab es von 1971 bis 2000 ca. 12 Tage mit einer Schneedecke dicker als 20 cm im Jahr. (ebd.)

Das Monatsmittel der Windgeschwindigkeit ist, wie in Abbildung 11 zu sehen, über alle 12 Monate relativ konstant auf einem Wert von 3 m/s anzutreffen. (ebd.)

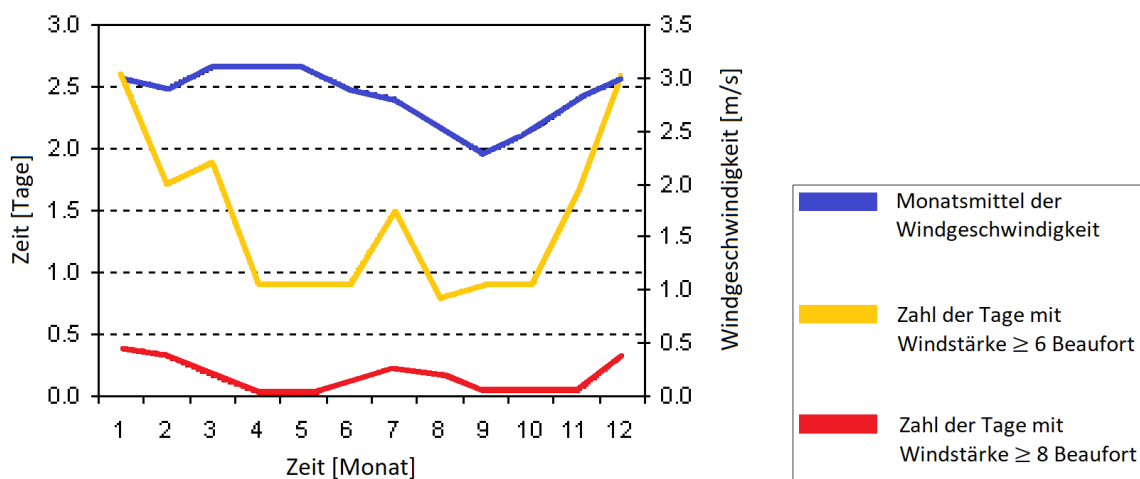


Abbildung 11: Windgeschwindigkeit, Windstärke Waidhofen 1971-2000 (ZAMG 2019)

Nur in den Monaten August, September und Oktober ist das Mittel der Windgeschwindigkeit mit 2,5; 2,3 und 2,5 m/s etwas niedriger. Die meisten Tage mit einer Windstärke über 6 Beaufort (siehe Tabelle 3) gibt es im Jänner und im Dezember mit jeweils einem Wert von 2,6. Auch im Februar, März, Juli und November gab es mehr solcher Tage als in den restlichen Monaten. (ZAMG 2019)

Tabelle 3: Beaufort- Skala (DWD 2019).

Beaufort-grad	Bezeichnung	Mittlere Windgeschwindigkeit in 10m Höhe in m/s	Beispiele für die Auswirkungen des Windes im Binnenland
0	Windstille	0 - 0,2	Rauch steigt senkrecht auf
1	leiser Zug	0,3 - 1,5	Windrichtung angezeigt durch den Zug des Rauches
2	leichte Brise	1,6 - 3,3	Wind im Gesicht spürbar, Blätter und Windfahnen bewegen sich
3	schwache Brise schwacher Wind	3,4 - 5,4	Wind bewegt dünne Zweige und streckt Wimpel
4	mäßige Brise mäßiger Wind	5,5 - 7,9	Wind bewegt Zweige und dünnere Äste, hebt Staub und loses Papier
5	frische Brise frischer Wind	8,0 - 10,7	kleine Laubbäume beginnen zu schwanken, Schaumkronen bilden sich auf Seen
6	starker Wind	10,8 - 13,8	starke Äste schwanken, Regenschirme sind nur schwer zu halten, Telegrafleitungen pfeifen im Wind
7	steifer Wind	13,9 - 17,1	fühlbare Hemmungen beim Gehen gegen den Wind, ganze Bäume bewegen sich
8	stürmischer Wind	17,2 - 20,7	Zweige brechen von Bäumen, erschwert erheblich das Gehen im Freien
9	Sturm	20,8 - 24,4	Äste brechen von Bäumen, kleinere Schäden an Häusern (Dachziegel oder Rauchhauben abgehoben)
10	schwerer Sturm	24,5 - 28,4	Wind bricht Bäume, größere Schäden an Häusern
11	orkanartiger Sturm	28,5 - 32,6	Wind entwurzelt Bäume, verbreitet Sturmschäden
12	Orkan	ab 32,7	schwere Verwüstungen

Die Beaufort-Skala ist das weltweit weitest verbreitete System zur Beschreibung der Stärke des Winds. Die Skala (Tabelle 3) reicht von 0 bis 13 bzw. von Windstill bis Orkan.

Der Wind kam in Waidhofen im Zeitraum von 1971 bis 2000 zu 36% aus Westen und zu 13,8% aus Nordwesten. In der entgegengesetzten Richtung, nämlich aus Osten und Südosten, wehte der Wind nur zu 16,2% bzw. 9 %. (ZAMG 2019)

3.3 Geologie

Das Gebiet „Waidhofen an der Ybbs und Umgebung“ befindet sich auf drei unterschiedlichen geologischen Einheiten (siehe Abbildung 12). Von Norden nach Süden sind diese die Flyschzone, die Klippenzone und Buntmergelserie sowie die Nördlichen Kalkalpen. Die Klippenzone und Buntmergelserie ist der Übergangsbereich zwischen Flyschzone und Nördlichen Kalkalpen. Diese geologischen Einheiten sind Teil des übergeordneten geologischen Bereichs der Alpen und Karpaten

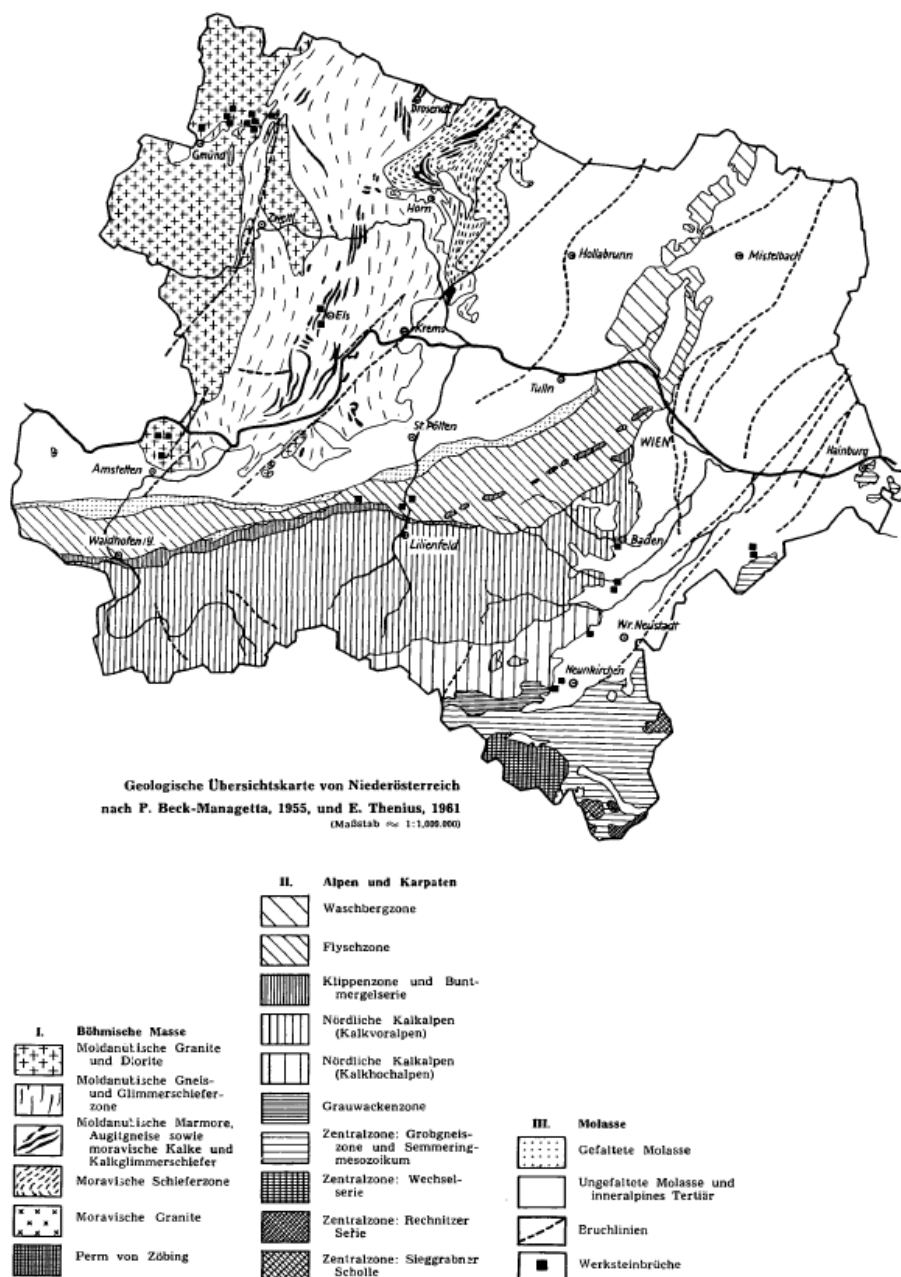


Abbildung 12: Geologische Karte von Niederösterreich (SCHWENK 1992).

Der Amtmann befindet sich in den nördlichen Kalkalpen an der Übergangszone der Lunzer-Decke und der Frankenfeser-Decke. Die dominierenden Gesteinsarten sind Kalk und Mergel. Das Gebiet ist tektonisch ungestört mit seltenen Erdbeben (vgl. SCHNABEL 2002, WESSELY 2006).

Das Material des Amtmanns, wie aus Abbildung 13 nachvollziehbar, ist Rauhwacke (auch Zellenkalk oder Zellendolomit), eine poröse Calcit-Brekzie mit verschiedenen Zusatzmineralien (vgl. MÜLLER 1982).

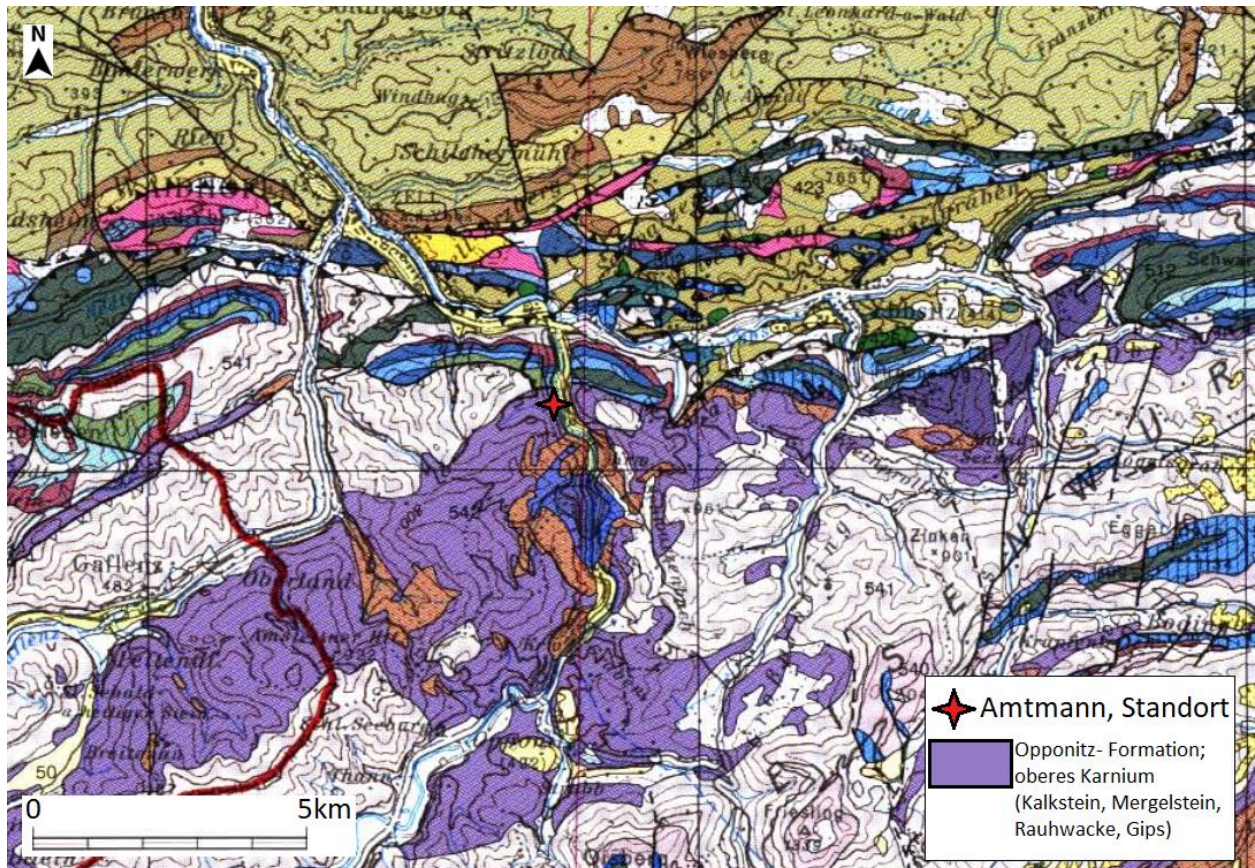


Abbildung 13: Auszug aus GEOLOGISCHE KARTE VON NIEDERÖSTERREICH (SCHNABEL 2002)

Die Rauhwacke erhält ihr Aussehen erst durch Verwitterungsprozesse, weshalb sich diese Bezeichnung auf die Gesteinsoberfläche bezieht. Die Poren sind durch chemische Lösung und Ausschwemmung von eingelagerten Kalk- oder Gipsfragmenten entstanden. Die starke Porosität der Rauhwacke ist dadurch zu erklären, dass ein großer Teil des ursprünglichen Materials durch chemische Lösung kontinuierlich abgeführt wurde. (vgl. MÜLLER 1982)

3.4 Gefahrenpotential

Der Amtmann ragt bis zu ca. 40 m über der starkbefahrenen Ybbstal Straße zwischen Baumwipfeln heraus (siehe Abbildung 14). Der Felssturm erreicht eine Höhe von ca. 30 m. Die horizontale Entfernung des Amtmanns zur Straße beträgt ca. 35 m. Weiters ist zu beachten, dass sich der Amtmann auf bzw. in einem Hang mit einer Neigung von ca. 25° befindet.

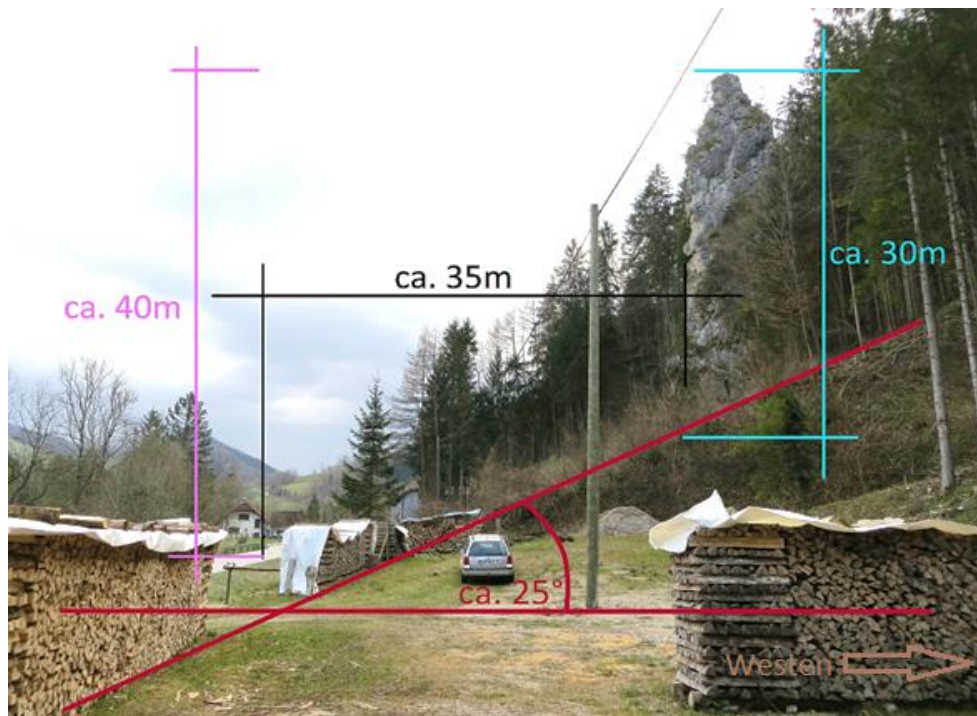


Abbildung 14: Längenmaße und Winkelmaß im Untersuchungsgebiet (Quelle: Verfasser).

In der obigen Abbildung ist ebenfalls zu erkennen, dass zwischen Straße und Amtmann eine Stromleitung verläuft. Am südlichen Rand des Untersuchungsgebiets befindet sich ein Haus, welches sich aber schon außerhalb des gefährdeten Bereichs befinden sollte. Im Falle eines Umkippen oder Abbrechens des Amtmanns Richtung Norden, Osten oder Süden besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass große Felsbrocken auf die Straße gelangen. Aber auch wenn sich im oberen Bereich größere Felssteile lösen sollten, ist die Gefahr für vorbeifahrende AutofahrerInnen gegeben, da diese durch den Abhang bis auf die Straße rollen oder springen könnten.

4. Das Sensorknotennetzwerk am Amtmann

Das drahtlose Sensorknotennetzwerk des Amtmann verfügt über 5 Sensorknoten und einen Gateway (siehe Abbildung 15). Die Sensorknoten 1 bis 4 wurden im oberen Bereich des Amtmann, auf nördlicher Seite, angebracht. Der Sensorknoten 5 wurde an einem Strommast, der zwischen dem Amtmann und der Ybbstal Straße steht, befestigt. Beim WSN des Amtmann handelt sich um ein sich selbstorganisierendes, über WLAN verbundenes Netzwerk, das über Multi-hop-Kommunikation verfügt (MAUSBACH und May 2014). Jeder Sensorknoten hat die gleiche Funktionalität.

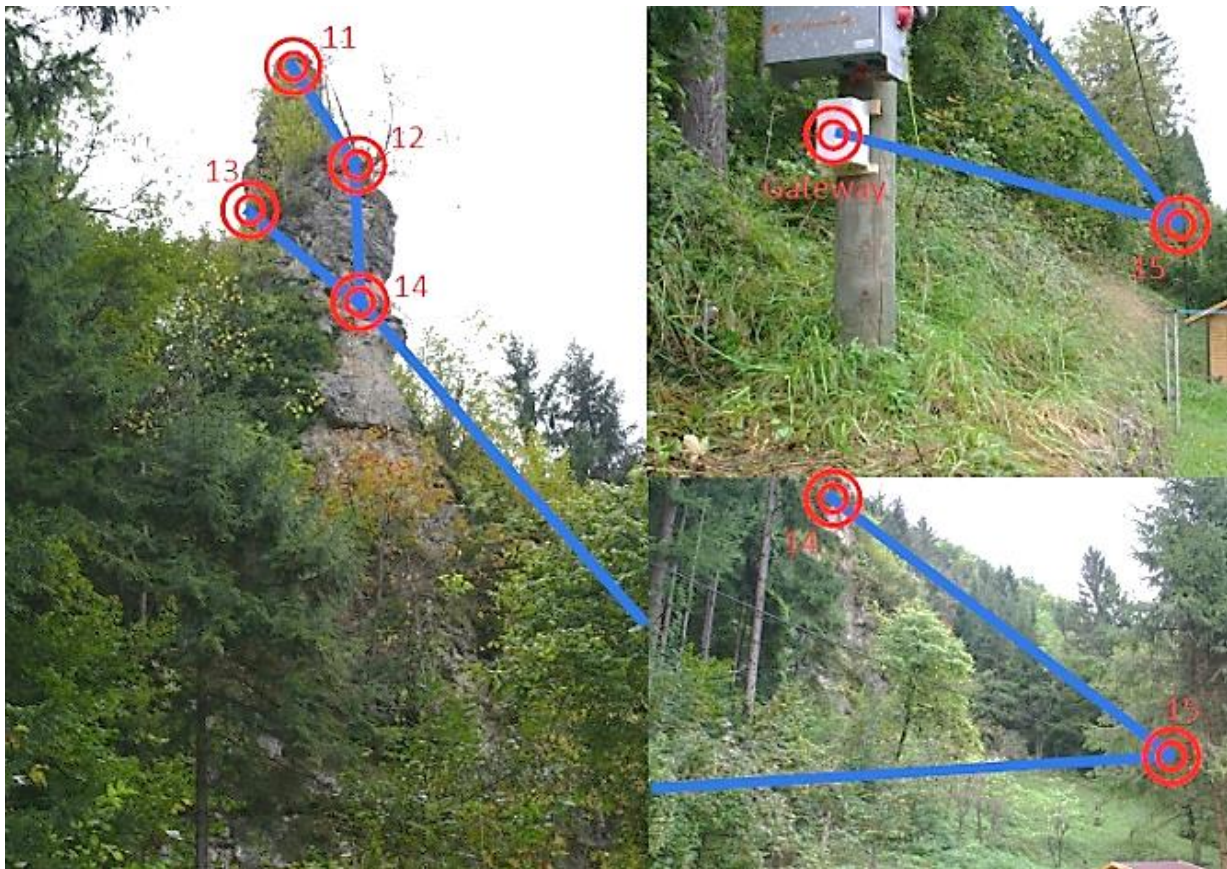


Abbildung 15: Sensorknoten und Gateway, drahtloses Sensorknotennetzwerk Amtmann (MAUSBACH und MAY 2014).

Das Netzwerk verfügt über hohe Reichweite und Flexibilität. Die Datenübertragung erfolgt über ein GSM (Global System for Mobile Communications) Netz. Die Daten werden in „Echtzeit“ übertragen. Die Funkkommunikation verfügt über einen „Cycling Sleep“- Modus, das bedeutet, dass die Funkkommunikation im Wachmodus eingeschaltet ist und im Schlafmodus ausgeschaltet ist. Dabei erfolgen die Messungen und

der Datentransfer bei allen Sensorknoten synchron und während des Wachzustandes (siehe Abbildung 16). Alle 30 Sekunden findet eine Messung statt. (vgl. MAUSBACH und MAY 2014)

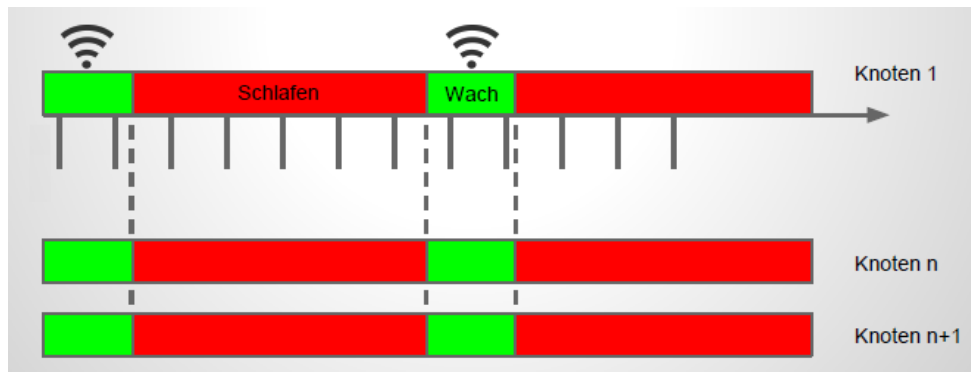


Abbildung 16: „Cycling Sleep“- Modus (MAUSBACH und MAY 2014).

Das Gehäuse der Sensorknoten besteht aus Kunststoff, ist staub- und wasserdicht und verfügt über ein Druckausgleichsventil. Die quadratische Stirnfläche (Deckel) besitzt, wie in Abbildung 17 dargestellt, eine Seitenlänge von 12,5 cm. Die Tiefe eines Sensorknotens beträgt 9 cm. (vgl. MAUSBACH und MAY 2014)

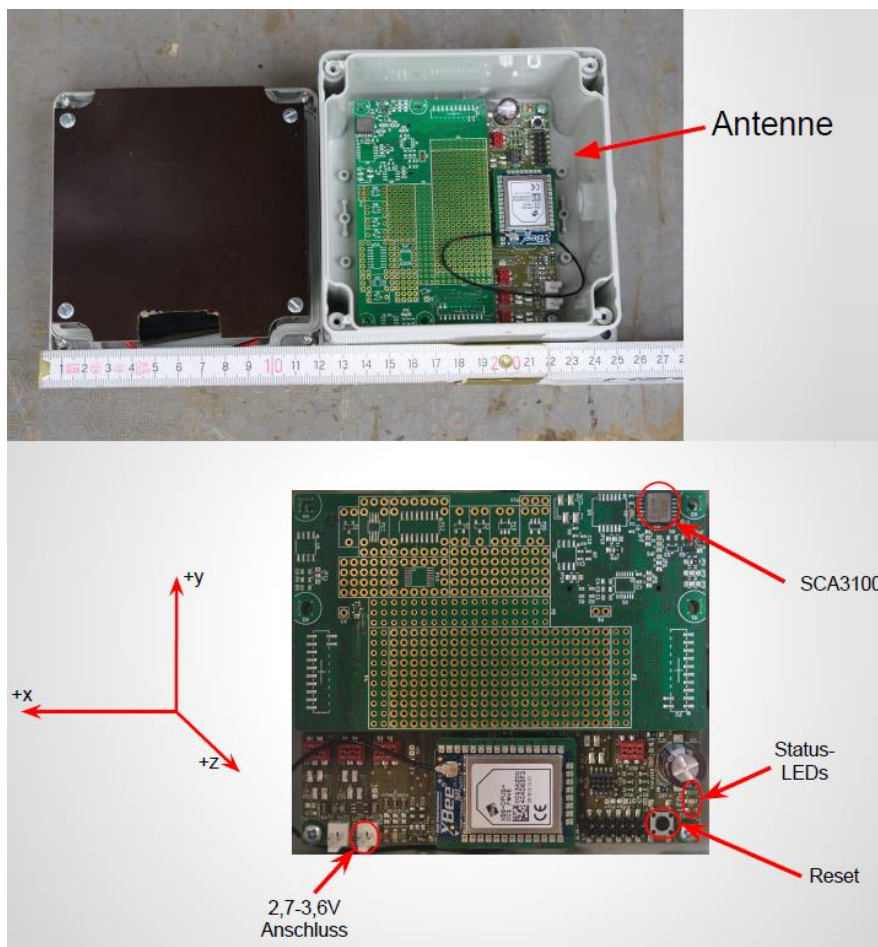


Abbildung 17: Gehäuse und Hardware der Sensorknoten (MAUSBACH und MAY 2014).

Abbildung 17 zeigt das Gehäuse eines Sensorknotens und die Hardware, die sich innerhalb eines Gehäuses eines Sensorknotens befindet. Rechts oben befindet sich der Beschleunigungssensor SCA3100 der Firma Murata, welcher über ein linkshändiges Koordinatensystem funktioniert. Der SCA3100 ist ein kapazitiver, dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensor der in einem Bereich von -2g bis + 2g messen kann und über eine Auflösung von 0,0011g verfügt. Die Stromversorgung erfolgt über eine Lithiumbatterie (LiSOCL2) mit einer Nennspannung von 3,6 Volt. (vgl. MAUSBACH und MAY 2014)

Die Sensorknoten sind mit vier Schrauben an eine zurechtgebogene Metallplatte angebracht (siehe Abbildung 18). Die Metallplatte wiederum ist mit einer Mutter über einer dicken Schraube, die zuvor im Gestein verankert wurde, befestigt.



Abbildung 18: Befestigung eines Sensorknotens (Quelle: NoeSLIDE).

Das Gehäuse des Gateway ist größer als das der Sensorknoten (siehe Abbildung 19). Der Gateway besteht aus einem Funkmodul, einer Steuerung und einem Linux PC. Die Stromversorgung erfolgt über Netzstrom.

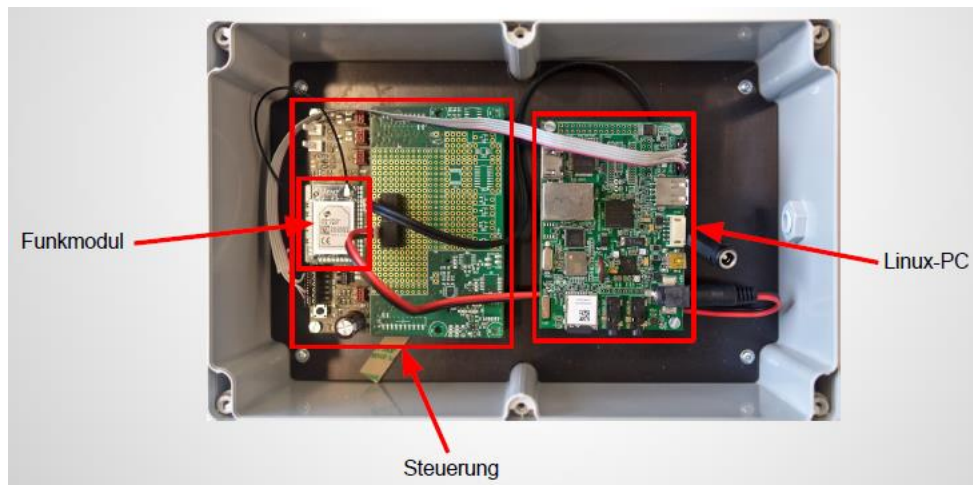


Abbildung 19: Gehäuse und Hardware des Gateway (MAUSBACH und MAY 2014).

5. Methodik der Datenanalyse

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, welche Physik bzw. Mathematik hinter der Verwertung der Rohdaten der Beschleunigungssensoren steckt und wie diese verarbeitet werden, um die relevanten Neigungswinkel zu erhalten. Danach erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs der statistischen Datenauswertung, ohne jedoch dabei genau auf die verwendete Programmiersprache einzugehen. Ebenso wird der Ablauf der graphischen Datenauswertung und die Darstellung der, für die Interpretation der Bewegungsereignisse wichtigen, Klimadaten erläutert.

5.1 Physikalisch- mathematische Vorgehensweise

5.1.1 Koordinatensysteme

Um die Neigung, der am Amtmann angebrachten, Sensorknoten (Abbildung 9) betrachten zu können ist es grundsätzlich von Nöten, mit zwei unterschiedliche Bezugssystemen zu arbeiten. Zum einen, das Koordinatensystem des Beschleunigungssensors mit seinen drei Koordinatenachsen. Zum anderen, das Erdkoordinatensystem, dessen Achsenausrichtung sich über den Erdmittelpunkt und über die Himmelsrichtungen orientiert.

5.1.1.1 Erdkoordinatensystem

Wie in Abbildung 20 dargestellt, wird der Koordinatenursprung zentral unter dem Felsen angenommen. Die positive X- Achse zeigt nach oben, also in genau die entgegengesetzte Richtung der Erdbeschleunigung. Die positive Y- Achse zeigt Richtung Norden und verläuft somit gewissermaßen parallel zum, neben dem Amtmann verlaufenden, Abschnitt der Ybbstal Straße. Die positive X- Achse zeigt nach Osten und quert damit die Straße.

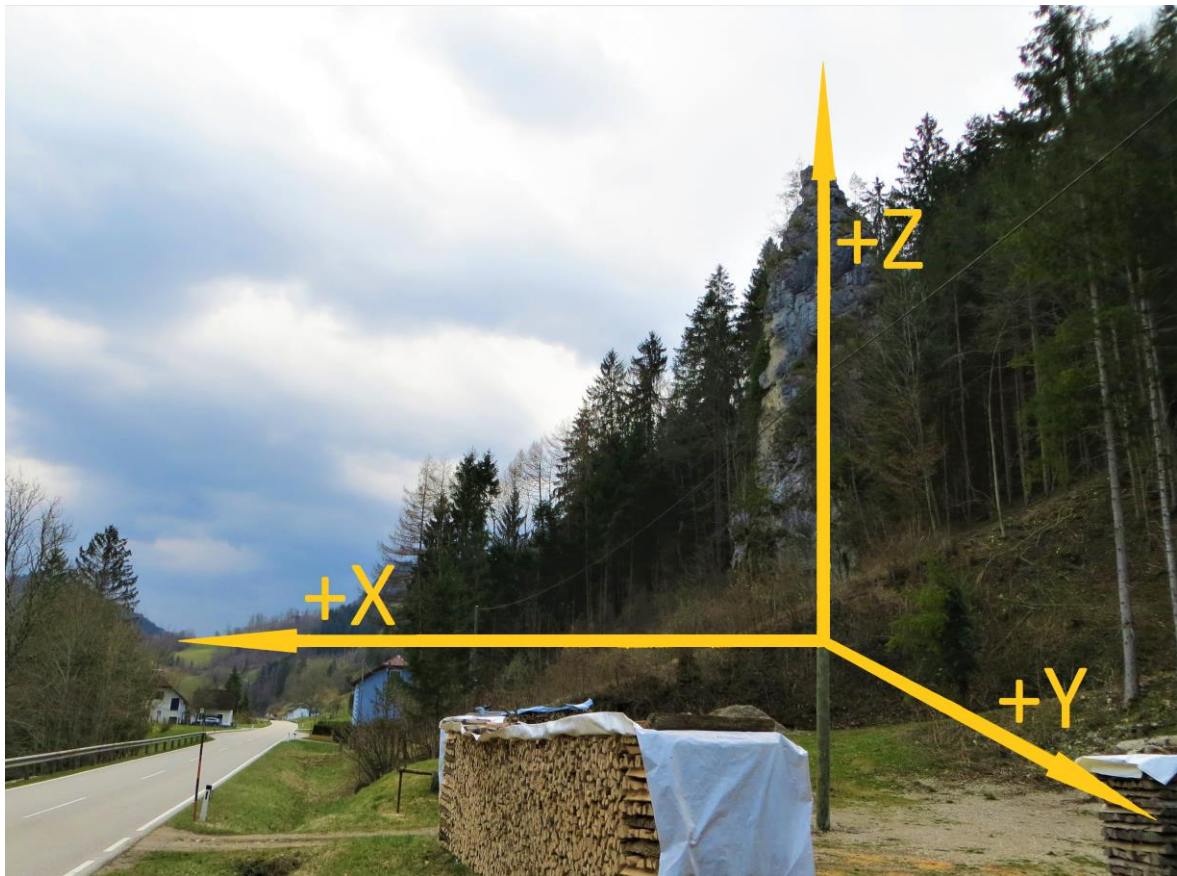


Abbildung 20: Erdkoordinatensystem, Amtmann (Quelle: Verfasser).

5.1.1.2 Sensorkoordinatensystem

Jeder der Beschleunigungssensoren besitzt ein eigenes „linkshändiges“ Koordinatensystem, dessen Ursprung sich im Zentrum der Sensorplatine befindet. Die Sensorknoten wurden, wie in Abbildung 21 erkennbar, so befestigt, dass die Stirnseite (Deckel des Gehäuses) vom Gestein weg zeigt und „parallel zur Gesteinsoberfläche“ liegt. Die z- Achse zeigt immer senkrecht von der Stirnseite vom Gestein weg. Die y- Achse ist bei allen Sensorknoten jene Achse, welche näher an der Erdbeschleunigung liegt. Die x- Achse zeigt gemäß der Ordnung eines Linkssystems aus der yz- Ebene heraus.

Aus Aufzeichnungen von der Installation der Sensorknoten ist ersichtlich, dass die x- Achse von

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
----------	----------	----------	----------

... im Verhältnis zur X- Achse des Erdkoordinatensystems, die genau nach Osten zeigt, um einen Winkel von

10°	20°	15°	40°
-----	-----	-----	-----

... in Richtung

Norden	Süden	Süden	Süden
--------	-------	-------	-------

... gedreht ist. Somit ergeben sich die Ausrichtungen der Sensoren in der XY- Ebene des Erdkoordinatensystems. Der maximale Unterschied der Ausrichtung bezüglich der Himmelsrichtungen bzw. der XY- Ebene beträgt also (zwischen den Sensoren 1 und 4) 50°.



Abbildung 21: Sensorkoordinatensystem, Amtmann (Quelle: NoeSLIDE).

Sensor 5 wurde am Strommast so angebracht, dass seine x- Achse parallel zur Ybbstal Straße liegt. Das bedeutet, dass hier, im Gegensatz zu den anderen Sensoren, die x- Achse Richtung Norden zeigt.

5.1.2 Anwendung von Rotationsmatrizen

Es wird von einem Koordinatensystem $X_0 Y_0 Z_0$, welches unserem Erdkoordinatensystem entspricht, ausgegangen. Durch Drehen der x-, y- und z- Achse um die Winkel ϕ , Θ und ψ wird das Erdkoordinatensystem in ein neues Koordinatensystem $X' Y' Z'$ transformiert (Li et al. 2014).

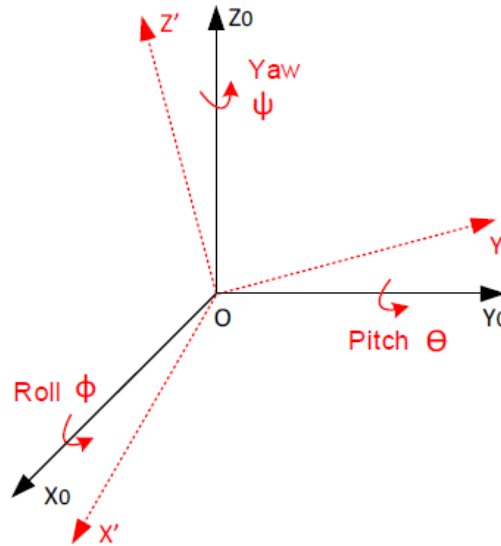


Abbildung 22: Transformation des Ausgangskordinatensystem $X_0 Y_0 Z_0$ zum neuen Koordinatensystem $X' Y' Z'$ in der Reihenfolge X - Y - Z (Li et al. 2016).

Das Koordinatensystem $X' Y' Z'$ entspricht der Ausrichtung des Sensorkoordinatensystems, welches durch das Drehen um die Winkel ϕ , Θ und ψ entstanden ist (siehe Abbildung 22). Die ϕ -, Θ - und ψ - Rotationsmatrizen, die zum Ableiten eines gedrehten Vektors verwendet werden, sind folgend aufgelistet.

Rotationsmatrizen für Drehung gegen den Uhrzeigersinn:

$$\mathbf{R}_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_y(\Theta) = \begin{pmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Variablennamen mit fettgedruckten Großbuchstaben (z.B. **R**) stellen Matrizen dar, während fettgedruckte Kleinbuchstaben für Vektoren stehen. Vektoren mit einem Strich (z.B. **v'**) repräsentieren Vektoren im Sensorsystem, während Vektoren ohne Stern (z.B. **v**) Vektoren im Erdsystem repräsentieren.

Um ein beliebiges **v** in **v'** umzuwandeln, müssen die Rotationsmatrizen in einer vordefinierten Reihenfolge auf den Vektor einwirken. Es gibt 6 mögliche Reihenfolgen für die Rotation des Koordinatensystems und im Prinzip sind sie gleichermaßen gültig.

PEDLEY (2013) hat alle sechs Reihenfolgen für die Rotation berechnet und herausgefunden, dass die vier Rotationsordnungen $X - Z - Y$, $Y - Z - X$, $Z - X - Y$ und $Z - Y - X$ ungeeignet für die Bestimmung der Orientierung sind, da alle drei Rotationswinkel für deren Berechnung gebraucht werden und dies nicht möglich ist. Der Winkel Ψ kann nicht berechnet werden, da im Ausgangskoordinatensystem die z-Achse senkrecht, in Richtung des Erdschwerefeldes, steht und daher zum Winkel Ψ kein Bezugssystem vorherrscht. Der Beschleunigungssensor ist völlig unempfindlich gegenüber Drehungen der z-Achse und kann auch nicht zur Bestimmung des Ψ -Winkels verwendet werden. Der unbekannte Winkel ψ stellt die Rotation des Sensors bezüglich der Himmelsrichtungen dar und muss daher anders gelöst werden. Die Rotationsordnungen $X - Y - Z$ und $Y - X - Z$ hängen von den Winkeln ϕ und Θ ab und können daher verwendet werden. (vgl. PEDLEY 2013)

Im Folgenden wird die Rotationsordnung $X - Y - Z$ verwendet.

$$\mathbf{v}' = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{v}$$

Die „Gesamtrotationsmatrix“ $\mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z$ ist jene Rotationsmatrix, die die Ausrichtung des Sensors, relativ zum Ausgangskoordinatensystem, beschreibt.

Anwendung der Rotationsmatrizen auf den Gravitationsbeschleunigungsvektor **g** um den „Rotationsvektor des Erdschwerefeldes“ **g'** zu erhalten:

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_y(\Theta) \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{g} = \begin{pmatrix} -\sin \Theta \\ 0 \\ -\cos \Theta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g}' = \mathbf{R}_x(\varphi) \mathbf{R}_y(\Theta) \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{g} = \begin{pmatrix} -\sin \Theta \\ \cos \Theta \sin \varphi \\ -\cos \Theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$|\mathbf{g}'| = |\mathbf{g}| = 1$$

Die Sensoren messen die Beschleunigung $\mathbf{G}'$ [cm/s²]. Die Beschleunigungssensoren messen nur die Gravitationsbeschleunigung und werden nicht auf andere Weise beschleunigt ($\mathbf{a}' = 0$).

$$\frac{\mathbf{G}'}{|\mathbf{G}'|} = \mathbf{a}' + \mathbf{g}' = \mathbf{g}'$$

$$\mathbf{g}' = \frac{\mathbf{G}'}{|\mathbf{G}'|} = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{G}'_x{}^2 + \mathbf{G}'_y{}^2 + \mathbf{G}'_z{}^2}} \begin{pmatrix} \mathbf{G}'_x \\ \mathbf{G}'_y \\ \mathbf{G}'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \Theta \\ \cos \Theta \sin \varphi \\ -\cos \Theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

5.1.3 Erfassung der Drehwinkel

In diesem Zwischenschritt, der auf den äquivalenten Beziehungen zwischen dem Sensorausgabewert und den entsprechenden Komponenten des Vektors $\mathbf{g}'$ basiert, können die Werte der Winkel ϕ und Θ [°, Grad] berechnet werden. Der Beschleunigungsmesser reagiert auf die Erdbeschleunigung und andere Beschleunigungen, die zu einer Auslenkung der Prüfmasse führen können. Die Kapazität zwischen den Fingern der Probemasse und der Abtastplatte kann für die Erdbeschleunigung in einen Ausgabewert umgewandelt werden. Da die Gravitationskraft (statische Kraft) nach unten gerichtet ist, zeigt die Probemasse, bezüglich der Abtastplatten, auch nach unten.

Aus den Rohdaten ist ersichtlich, dass die Werte in der negativen Achsenrichtung positiv ausgegeben werden. Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, ist die positive z- Achse nach oben, also entgegen der Erdbeschleunigung, ausgerichtet und trotzdem wird ein positiver Wert ausgegeben. Außerdem ist zu beachten, dass es sich beim Sensorkoordinatensystem um ein Linkssystem bzw. ein linkshändiges Koordinatensystem handelt, welches nicht mit dem Rechtssystem unseres Erdkoordinatensystems zusammenpasst. Es muss somit, für die weitere Berechnung, beachtet werden, dass die positive y- Achse des Sensorkoordinatensystems (vor der Rotation) der positiven y- Achse des Erdkoordinatensystems genau entgegengesetzt war. Aus diesen zwei Gründen muss $\mathbf{g}'$, vor der Berechnung der Winkel, mit $(-1 \ 1 \ -1)^T$ multipliziert werden.

$$\mathbf{g}' = \begin{pmatrix} -\sin \Theta \\ \cos \Theta \sin \varphi \\ -\cos \Theta \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \Theta \\ \cos \Theta \sin \varphi \\ \cos \Theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Daraus folgt wiederum:

$$\frac{1}{\sqrt{\mathbf{G}'_x{}^2 + \mathbf{G}'_y{}^2 + \mathbf{G}'_z{}^2}} \begin{pmatrix} \mathbf{G}'_x \\ \mathbf{G}'_y \\ \mathbf{G}'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \Theta \\ \cos \Theta \sin \varphi \\ \cos \Theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Somit können die Winkel φ und Θ wie folgt ausgedrückt werden:

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{\mathbf{G}'_y}{\mathbf{G}'_z}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{G}'_y}{\mathbf{G}'_z} \right)$$

$$\sin \Theta = \frac{\mathbf{G}'_x}{\sqrt{\mathbf{G}'_x{}^2 + \mathbf{G}'_y{}^2 + \mathbf{G}'_z{}^2}}$$

$$\Theta = \sin^{-1} \left(\frac{\mathbf{G}'_x}{\sqrt{\mathbf{G}'_x{}^2 + \mathbf{G}'_y{}^2 + \mathbf{G}'_z{}^2}} \right)$$

Obwohl der Wert für φ und der Wert für Θ berechnet werden können, ist es nicht möglich, ohne einen zusätzlichen Sensortyp (Magnetometer, Gyroskop), einen Wert für ψ zu erhalten.

Da die Einheiten der gemessenen $\mathbf{G}'$ - Werte [cm/s^2] sind, muss jeder eingehende Wert durch 100 dividiert werden, um die richtigen SI-Einheiten [m / s^2] zu erhalten.

5.1.4 Ableitung des Normalvektors

Nachdem bekannt ist, mit welchen Winkeln das Erdsystem gedreht werden muss, um es auf das Sensorsystem auszurichten, sollen die Rotationsmatrizen jetzt umgekehrt angewandt werden. Dabei wird beabsichtigt, den Normalvektor aus dem transformierten Koordinatensystem in eine Beschreibung gemäß dem Erdkoordinatensystem zu konvertieren.

Der Normalvektor eines Sensorknotens, $\mathbf{n}' = (0 \ 0 \ 1)^T$, ist jener Vektor, der der Aufwärtsrichtung senkrecht zur Sensorplatinenebene entspricht. Er zeigt also in die posi-

tive z- Richtung des Sensorkoordinatensystems (Abbildung 20). Der Normalvektor repräsentiert Neigungsrichtung und Neigungswinkel der Sensorplatte, welche sich bei geotechnischen Ereignissen mit den überwachten Objekten mitbewegen (Li et al. 2014).

Jetzt muss der Normalvektor in eine Beschreibung des Erdkoordinatensystems umgewandelt werden. In den vorherigen Schritten wurde das Erdsystem in das Sensorsystem ($\mathbf{g} \rightarrow \mathbf{g}'$) transformiert. Um das Gegenteil zu erreichen, müssen die Rotationsmatrizen in genau entgegengesetzter Reihenfolge auf $\mathbf{n}'$ einwirken, um sie zurück in das Erdsystem zu transformieren ($\mathbf{n}' \rightarrow \mathbf{n}$). Um dies zu erreichen, kann, wie in folgenden Berechnungen dargestellt, immer mit der inversen Matrix von links multipliziert werden.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{n} &= \mathbf{n}' & | & * \mathbf{R}_x^{-1} \\ \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{n} &= \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{n}' & | & * \mathbf{R}_y^{-1} \\ \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{n} &= \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{n}' & | & * \mathbf{R}_z^{-1} \\ \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{R}_z \mathbf{n} &= \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{n}' \\ \mathbf{n} &= \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{n}' \end{aligned}$$

Da Rotationsmatrizen orthogonale Einheitsmatrizen sind, gilt $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$. Unter Verwendung dieses Sachverhaltes und weil $\mathbf{n}' = (0 \ 0 \ 1)^T$ wird die Berechnung folgendermaßen fortgesetzt:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x^T \mathbf{n}' &= \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_y^T \mathbf{R}_x^T \mathbf{n}' &= \begin{pmatrix} -\cos \varphi \sin \Theta \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \cos \Theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Weil davon ausgegangen wird, dass $\phi = 0$ ist, ist $\cos \phi = 1$ und $\sin \phi = 0$ kann man $\mathbf{R}_z^T$ folgendermaßen formulieren:

$$\mathbf{R}_z^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

So ergibt sich für den Normalvektor im Erdkoordinatensystem:

$$\mathbf{n} = \mathbf{R}_z(\psi)^T \mathbf{R}_y(\Theta)^T \mathbf{R}_x(\varphi)^T \mathbf{n}' = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \sin \Theta \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \cos \Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_y \\ \mathbf{n}_z \end{pmatrix}$$

Aus den Werten des Normalvektors können dessen Winkel im Erdkoordinatensystem berechnet werden.

5.1.5 Azimut und Neigungswinkel

Azimut α : Rotation um die z-Achse, also die Projektion in der XOY-Ebene. Damit kann bestimmt werden, um wie Grad [°] sich der Felsturm um seine eigene Achse gedreht hat.

$$\tan \alpha = \frac{n_y}{n_x}$$
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{n_y}{n_x} \right)$$

Der Azimut kann jedoch nicht als Winkel in Bezug zum Erdkoordinatensystem betrachtet werden, da es für die Ausrichtung der Sensoren in der XOY Ebene des Erdsystems kein Bezugssystem, wofür zum Beispiel ein Kompasssensor sorgen könnte, gibt.

Neigungswinkel β : Rotation um die y-Achse, also die Projektion auf die ZOX-Ebene. Dies zeigt uns die Neigung [°, Grad] des Felsturms zur Straße hin oder von dieser weg. Beta beginnt an bei der z- Achse (siehe Abbildung 23).

$$\tan \beta = \frac{n_x}{n_z}$$
$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{n_x}{n_z} \right)$$

Neigungswinkel γ : Rotation um die x-Achse, also die Projektion auf die YOZ-Ebene. Dies zeigt uns das „seitliche“ Absinken des Felsturms, also die Neigung [°, Grad] Richtung Norden bzw. Süden. Gamma beginnt an der y- Achse (siehe Abbildung 23).

$$\tan \gamma = \frac{n_z}{n_y}$$
$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{n_z}{n_y} \right)$$

In Abbildung 23 sind alle Ebenen des Erdkoordinatensystem, der Azimut und die beiden Neigungswinkel dargestellt. Außerdem ist zu erkennen, wo die positiven bzw. negativen Drehrichtungen der Winkel verlaufen.

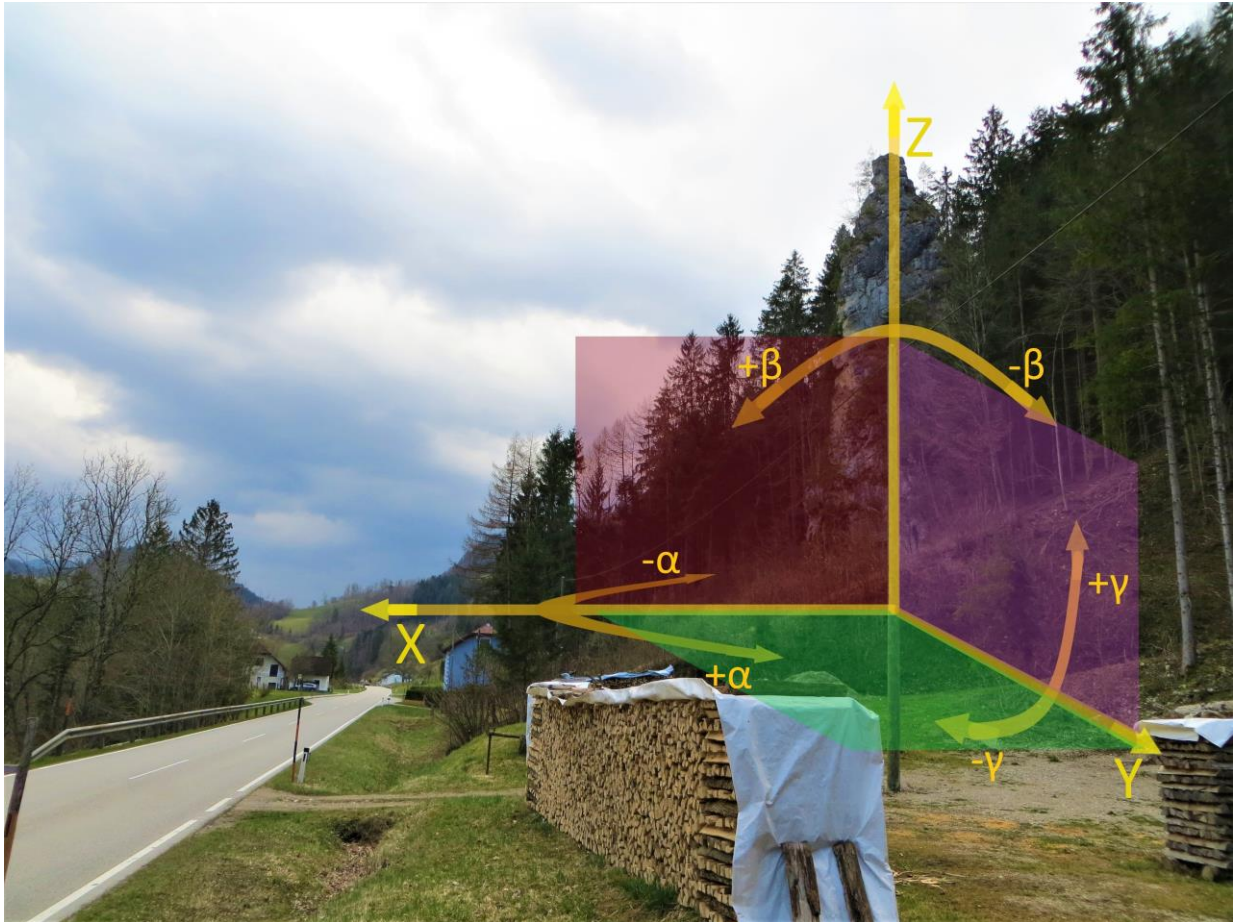


Abbildung 23: Azimut, Neigungswinkel und Ebenen (Quelle: Verfasser)

5.2 Statistische Datenauswertung

Die Datenaufbereitung wurde mithilfe eines Accounts auf einer Datenanalyseplattform (<https://kooplex.vo.elte.hu>) durchgeführt. Diese Plattform verfügt über ein privates Cloud-Dateisystem und ermöglicht hochgeladenen Datensätze mit der Programmiersprache PYTHON zu analysieren.

5.2.1 Beschreibung des Rohdatenformats

Jeder der fünf Sensoren nimmt alle 30 Sekunden eine Messung vor. Das Sensornetzwerk legt für alle 10 Minuten einen Datensatz an. Somit umfasst ein Rohdatensatz alle Messungen, die in 10 Minuten gemacht wurden, was bedeutet, dass ein Rohdatensatz

20 Messungen pro Sensor enthält. Die Rohdatensätze (z.B. filtered-20150101T023001) befinden sich im TXT-Format. Der Aufbau des Inhalts eines Datensatzes ist aus Abbildung 24 zu entnehmen.

```
ID,DateTime,Type,Value
11,2014-09-26T04:16:39,1,3480
11,2014-09-26T04:16:39,2,162
```

Knoten-ID Zeitstempel in UTC (ISO 8601) Sensor-Typ Wert

Abbildung 24: Inhalt eines Rohdatensatzes (MAUSBACH und MAY 2014).

„Knoten-ID“ steht für den jeweiligen Sensorknoten, wovon es fünf (11 bis 15) gibt. Der „Zeitstempel“ gibt exakt das Datum und die Uhrzeit der Messung wieder. „Sensor-typ“ steht für die jeweilige Art der Messung eines Sensors (siehe Tabelle 4) und „Wert“ gibt den Messwert des jeweiligen Sensor-Typs an.

Tabelle 4: Sensortypen eines Sensorknotens (MAUSBACH und MAY 2014).

Nummer	Sensor-Typ
1	Batteriespannung in mV
2	Temperatur in °C/10 (Mikrocontroller)
3	Beschleunigung x-Achse in mg
4	Beschleunigung y-Achse in mg
5	Beschleunigung z-Achse in mg
6	Temperatur in °C/10 (Beschleunigungssensor)

Leider sind die Temperaturmessungen unbrauchbar, da die Sensoren diesbezüglich nicht kalibriert wurden. Die relevanten Sensortypen sind 3, 4 und 5, da sie für die jeweilige Beschleunigung in mg für die x-, y- und z- Achse stehen.

5.2.2 Ablauf der statistischen Datenauswertung

Es folgt eine Beschreibung des Ablaufs der statistischen Datenauswertung. Jeder Schritt (siehe Abbildung 25) wird oberflächlich beleuchtet und auch die Gliederung der

Befehle, die durch die Programmiersprache formuliert werden müssen, wird anschließend aufgelistet.

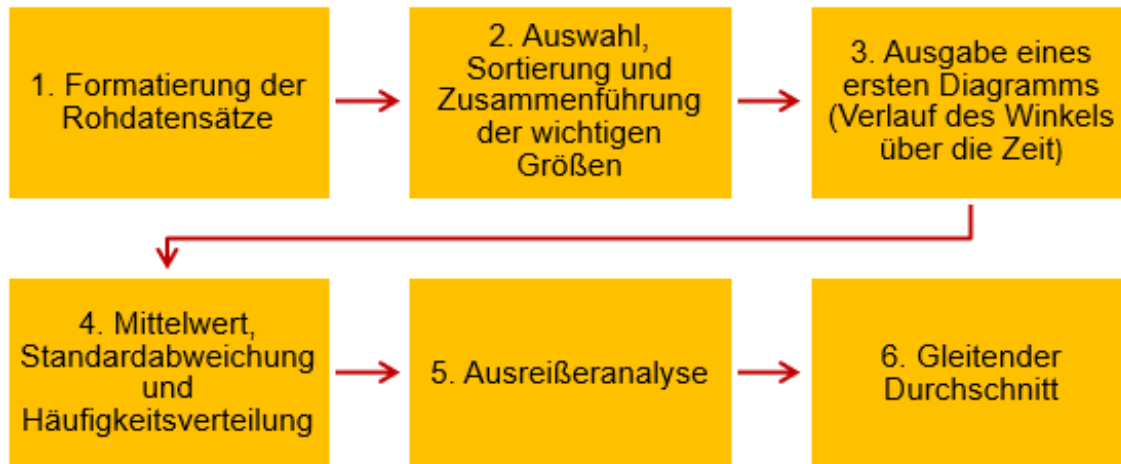


Abbildung 25: Überblick- statistische Datenauswertung.

5.2.2.1 Formatierung der Rohdatensätze

Es sollen hier die wichtigen Inhalte herausgefiltert und so gegliedert werden, dass jede Zeile für einen bestimmten Zeitpunkt steht. Außerdem werden die wichtigen Größen ϕ , Θ , n_x , n_y , n_z , α , β , und γ berechnet und in der jeweiligen Zeile hinzugefügt. Für jeden Sensor wird eine eigene Datei angelegt. Diese Datenformatierung kann jeweils für einen beliebigen Zeitraum durchgeführt werden. Hier wird ein Zeitraum von 3 Monaten gewählt, da das Durchlaufen des gesamten Befehlssatzes bereits für diese Datenmenge etwa sechs Stunden dauert. Die Datenverfügbarkeit beginnt mit 15. November 2014 und endet mit 31. Dezember 2017. Die neuen Datensätze werden im CSV-Format (Comma-separated values) ausgegeben. Dieses Format lässt sich als ein Textformat mit einem Beistrich zwischen den einzelnen Werten beschreiben.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Automatisches Einlesen der auf der Plattform gespeicherten Rohdatensätze
- Eingabe des Zeitraums (3 Monate)
- Verschieben der Rohdaten in eine Tabelle
- Sortieren der Größen in eine eigene Tabelle für jeden Sensor
- Berechnung der beiden Neigungswinkel und des Azimut
- Speicherung der Tabellen im CSV-Format

Der Inhalt der Zeilen der neuen (erstformatierten) Datensätze ist wie folgt gegliedert:

ID1,DateTime1,Type11,ID2,DateTime2,Type12,Ay,ID3,DateTime3,Type13,Az,fi,teta,n_x,n_y,n_z,XOZ,YOZ,XOY

5.2.2.2 Auswahl, Sortierung und Zusammenführung der wichtigen Größen

In diesem Schritt geht es darum, für jeden Sensor und für jedes Jahr (2014/15, 2016 und 2017) eine eigene Datei (einen eigenen Datensatz) zu erstellen. Dabei sollte nur mehr Datum und Uhrzeit (=Date) sowie die ausschlaggebenden Werte von α (=XOY), β (=XOZ), und γ (=YOZ) stehen bleiben. Dieses Format bildet die Ausgangsbasis für weitere Analysen.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Einlesen der benötigten (dreimonatigen) Datensätze
- Aneinanderreihen der Datensätze
- Auswahl und Gliederung der benötigten Größen
- Speicherung der Tabellen im CSV- Format

Der Inhalt der neuen Datensätze ist wie folgt gegliedert:

Date,XOZ,YOZ,XOY

5.2.2.3 Ausgabe eines ersten Diagramms

Um sich einen ersten Überblick verschaffen zu können ist es ratsam sich noch vor der weiteren Datenanalyse den Verlauf der Winkel über die Zeit anzusehen.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Einlesen der einjährigen Datensätze
- Eingabe des benötigten Zeitraums
- Löschen der Datenzeilen ohne Werte
- Ermittlung der Diagramme
- Speicherung der Diagramme im HTML- Format

5.2.2.4 Mittelwert, Standardabweichung und Häufigkeitsverteilung

Für den Verlauf der Datenanalyse sowie für die spätere Betrachtung der Ergebnisse ist es wichtig die Mittelwerte und Standardabweichungen zu kennen. Häufigkeitsverteilungen der Winkelwerte innerhalb eines bestimmten Zeitraums können für die Bewegungsanalyse einen wichtigen Beitrag leisten. Es gilt zu beachten, die (einjährigen) Datensätze, die bei diesem Analyseschritt eingelesen werden müssen, im Vorhinein so zu bearbeiten, dass extreme Werte ausgeschieden werden. Das können extreme Ausreißer oder Fehlwerte, die unrealistisch groß sind, sein. Der Grund dafür ist, dass aufbauend auf dieser Analyse ein allgemeiner Trend erkennbar sein sollte und extreme Ausreißer würden bei der späteren Betrachtung der Mittelwerte, der Standardabweichung oder der Häufigkeitsverteilungen einen starken Störfaktor ergeben und die Ergebnisse verzerren.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Einlesen der einjährigen Datensätze
- Eingabe des benötigten Zeitraums (z.B. monatlich)
- Löschen der Datenzeilen mit unnatürlichen Werten (0, 45, ...)
- Löschen der doppelten Datenzeilen (mit den exakt gleichen Werten)
- Eingabe der benötigten Anzahl an Klassen für die Häufigkeitsverteilung (Histogramm)
- Ermittlung und Ausgabe der Mittelwerte, der Standardabweichungen, der Klassenbreiten und deren Häufigkeiten
- Speicherung der Klassenbreiten im TXT- Format
- Speicherung der Häufigkeiten im TXT- Format

5.2.2.5 Ausreißeranalyse

Die Filterung der Ausreißer aus den großen Datenmengen ist der wichtigste Schritt in der Datenaufbereitung. Für diesen Schritt müssen die Mittelwerte bekannt sein. Es muss von Fall zu Fall entschieden werden, ab welcher Abweichung des Winkelwerts ein Ausreißer angezeigt werden soll.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Einlesen der einjährigen Datensätze
- Eingabe des benötigten Zeitraums

- Löschen der Datenzeilen mit unnatürlichen Werten (0, 45, ...)
- Löschen der doppelten Datenzeilen (mit den exakt gleichen Werten)
- Eingabe eines (winkel- und sensorspezifischen) Wertebereichs um den Mittelwert, der aus den Datenreihen herausgelöst werden soll
- Ermittlung der Ausreißer
- Speicherung der Ausreißer-Tabellen im CSV- Format

Der Inhalt der Zeilen ist wie folgt gegliedert:

Date,XOZ,YOZ,XOY

5.2.2.6 Gleitender Durchschnitt

Dieser Schritt ist für die Betrachtung des zeitlichen Bewegungsverlaufs wichtig. Der gleitende Durchschnitt wird benötigt, um die zeitlichen Veränderungen der Winkel ohne das starke Rauschen der ursprünglichen Werte betrachten zu können. Der gleitende Durchschnitt ist ein Verfahren zur Glättung von Datenreihen. Dabei wird ein Datenpunkt durch den arithmetischen Mittelwert von dem Datenpunkt selbst und einer bestimmten Anzahl von vorherigen Datenpunkten berechnet. Dieser Vorgang kann über einen beliebigen Zeitraum durchgeführt werden. Das Ergebnis ist eine neue geglättete Datenreihe.

Aufbau des Befehlssatzes mit Python:

- Einlesen der einjährigen Datensätze
- Eingabe des benötigten Zeitraums
- Löschen der Datenzeilen mit unnatürlichen Werten (0, 45, ...)
- Löschen der doppelten Datenzeilen (mit den exakt gleichen Werten)
- Eingabe der benötigten Fenstergröße (Anzahl der Werte, die gemittelt werden sollen) in Sekunden
- Ermittlung der gleitenden Durchschnitte
- Speicherung der Tabellen im CSV- Format

Der Inhalt der Zeilen ist wie folgt gegliedert:

Date,XOZ,YOZ,XOY,MovingAvgXOZ,MovingAvgYOZ,MovingAvgXOY

5.3 Grafische Datenauswertung

Die Grundlage für die grafische Datenauswertung sind die von der statistischen Auswertung erhaltenen Daten. Diese Daten, die in Listenform (CSV-Format) vorhanden sind, werden in einer Tabellenkalkulationssoftware eingefügt. Anschließend ist es notwendig, die Liste in eine Tabelle umzuwandeln und die Daten passend zu formatieren. Sobald die Daten in eine nützliche Form gebracht wurden (Datums- und Zeitformat, Nachkommastellen der Werte, ...) können mit der Tabellenkalkulationssoftware Diagramme gezeichnet werden. Die fertigen Diagramme werden manuell bearbeitet, was bedeutet, dass Auffälligkeiten per Hand in eine Tabelle eingetragen bzw. niedergeschrieben werden. Mit den daraus folgenden Ergebnissen kann eine Bewegungsanalyse erfolgen.

Es ist sinnvoll, die grafische Datenauswertung in einer bestimmten Reihenfolge durchzuführen (siehe Abbildung 26). Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die einzelnen Schritte erläutert.

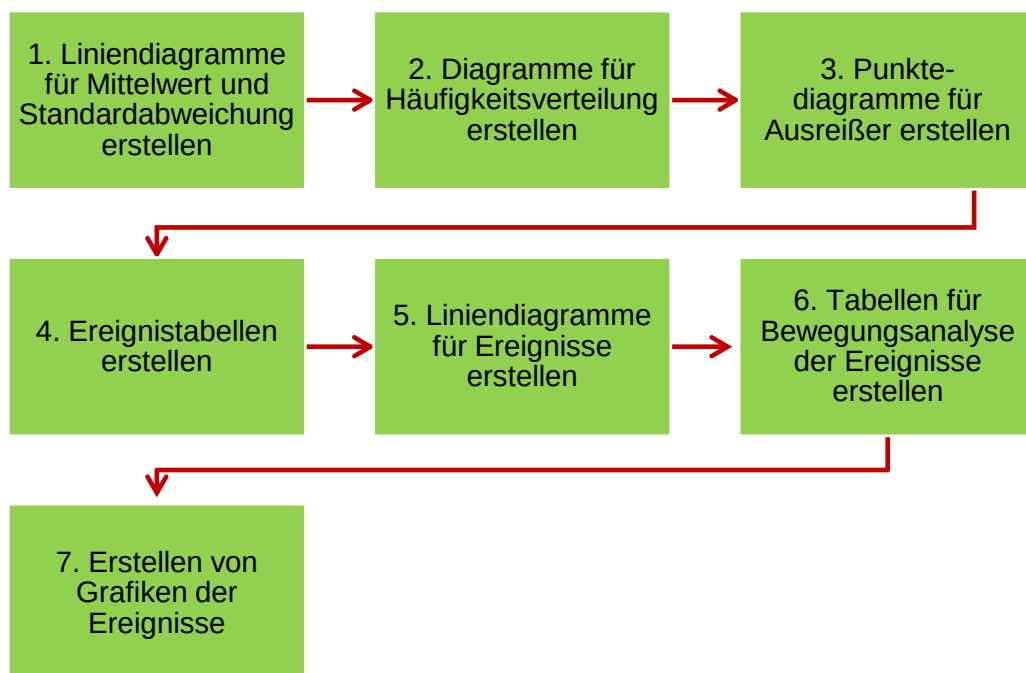


Abbildung 26: Überblick- grafische Datenauswertung

5.3.1.1 Liniendiagramme für Mittelwerte und Standardabweichungen

Hierzu müssen alle Mittelwerte und Standardabweichungen bekannt sein, für die ein zeitlicher Verlauf dargestellt werden soll. Das heißt, es muss bei der statistischen Datenauswertung für jeden gewünschten Zeitbereich (z.B. Monat) der Befehlssatz für Mittelwert und Standardabweichung durchlaufen werden.

5.3.1.2 Diagramme für Häufigkeitsverteilung

Die Klassenbreiten und Häufigkeiten können nach dem Durchlaufen des Befehlssatzes nur jeweils als eigene TXT- Datei abgespeichert werden. Aus diesem Grund müssen für jedes Histogramm die Klassenbreiten und Häufigkeit extra in eine Mappe der Tabellenkalkulationssoftware eingefügt werden. Danach kann formatiert und ein Histogramm ausgegeben werden. Häufigkeitsverteilungsdiagramme stellen, im vorliegenden Fall, die Häufigkeitsverteilung der Winkelwerte dar. Grundsätzlich werden Histogramme mit senkrechten Balken, den sogenannten Klassen, gezeichnet. Die Breite eines Balkens kennzeichnet einen Wertebereich. Die Höhe eines Balkens zeigt, wie häufig die Werte innerhalb des zugehörigen Bereichs vorgekommen sind. In dieser Arbeit werden Linien statt den Balken genutzt, was der besseren Übersicht dient.

5.3.1.3 Punktediagramme für Ausreißer

Um zu sehen wo, wann, wie viele und wie starke Ausreißer, die in den meisten Fällen mit Bewegungsereignissen gleichzusetzen sind, es gegeben hat, können Diagramme erstellt werden. Diese Punktediagramme (ein Ausreißer = ein Punkt) erweisen sich als nützlich um eine Auswahl der relevanten Bewegungsereignisse treffen zu können. Es ist wichtig zu beachten, dass es Ausreißer gibt, welche unrealistisch groß sind. Dass diese Werte nicht in die Diagramme einfließen dürfen, muss bei der Formatierung der Diagramme dementsprechend beachtet werden.

5.3.1.4 Ereignistabellen

Sobald die Punktediagramme für Ausreißer vorliegen, können Zeiträume, bei denen viele abweichende Datenpunkte erkennbar sind, markiert werden. Anschließend wer-

den Tabellen erstellt, in denen der jeweilige Zeitraum und die Sensoren, die von Ausreißern betroffen sind, eingetragen werden. Möglicherweise müssen die Ereignisse gefiltert werden, da eventuell sehr viele Ereignisse detektiert wurden und nicht alle diese Auffälligkeiten weiter analysiert werden können.

5.3.1.5 Liniendiagramme für Ereignisse

Um einen genauen Blick auf den Ablauf eines Ereignisses werfen zu können, sollten Liniendiagramme erstellt werden, bei denen auf der horizontalen Achse genau der Zeitraum aufgetragen ist, in welchem es zu Ausreißern kommt. Da die Ausgabe eines Liniendiagramms mit den „rohen“ Winkelwerten das vollständige „Rauschen“ enthält, ist es sinnvoll die Daten mit dem Verfahren des „gleitenden Durchschnitt“ zu filtern. Es ist wichtig zu beachten, dass beide Datenreihen in einem Diagramm veranschaulicht werden, da bei der Datenfilterung mit dem „gleitenden Durchschnitt“ die Ausreißer verloren gehen. Nun hat man die Möglichkeit in der Tabellenkalkulationssoftware jeden einzelnen Ausreißer zu begutachten und durch den genauen Winkelwert sowie den genauen Zeitpunkt zu erfassen.

5.3.1.6 Tabellen für Bewegungsanalyse

Es sollen für die einzelnen Ereignisse jeweils die Bewegungen analysiert werden. Dabei soll festgestellt werden, in welche Richtung sich die Sensoren geneigt bzw. gedreht haben. Um dies zu bewerkstelligen, ist es sinnvoll jeweils zwei Tabellen zu erstellen. Eine Tabelle, in der die Tendenz der Ausreißer, sprich in welcher Richtung mehr oder stärkere Abweichungen vorgekommen sind, eingetragen wird und eine Tabelle, in der alle Ausreißer eingetragen werden, die exakt zum gleichen Zeitpunkt passiert sind. Eine Tendenz ergibt sich, wenn in einer der beiden möglichen Neigungsrichtungen mehr Ausreißer vorliegen. Herrschen in beiden Neigungsrichtungen gleich oder ähnlich viele Ausreißer vor, so entscheidet die Stärke der Ausreißer über eine Tendenz. Mit dem Eintragen von Ausreißern, die von einem oder mehreren Sensoren zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgenommen wurden, in eine Tabelle, sollen die jeweiligen Bewegungen möglichst genau nachvollziehbar gemacht werden.

5.3.1.7 Grafiken der Ereignisse

Um die Bewegungen, die bei den Ereignissen passiert sind, grafisch zu veranschaulichen, können Zeichnungen erstellt werden. Es ist wichtig, die verwendeten Sensoren und die jeweiligen Achsen darzustellen. Anschließend können die Neigungs- bzw. Drehungsrichtungen, die aus den vorher erstellten Tabellen abzulesen sind, in die Graphiken eingezeichnet werden. Aus dieser grafischen Betrachtungsweise sollte es möglich sein, eine bestimmte Bewegungsorientierung feststellen zu können.

5.4 Bearbeitung der Klimadaten

Von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik wurden, für eine Bearbeitungsgebühr, verschiedenste Klimadaten für den Zeitraum November 2014 bis Dezember 2017 zur Verfügung gestellt.

Tabelle 5: Von der ZAMG erhaltene Klimadaten.

	Klimastation Waidhofen an der Ybbs Seehöhe: 365 m Breite: 47.95777778° Länge: 14.78444444°	Klimastation Weyer Seehöhe: 426 m Breite: 47.85722222° Länge: 14.66583333°
Temperaturmessungen (täglich)	✓	
Schneemengenmessungen (täglich)		✓
Niederschlagsmengen- messungen (stündlich)	✓	
Windgeschwindigkeits- messungen (stündlich)	✓	

Aus diesen Klimadaten können Liniendiagramme erstellt werden, die der Interpretation der Bewegungsereignisse dienen. Bei der Durchführung dieser Analyse können die Liniendiagramme der Bewegungsereignisse direkt mit den Klimadiagrammen verglichen werden.

6. Ergebnisse

6.1 Mittelwerte und Standardabweichungen der Neigungswinkel

Mittelwerte und Standardabweichung des Neigungswinkels in YOZ

Es ist zu erkennen, dass sich die Sensoren 1, 2 und 4 (a,b und d) von November 2014 bis Dezember 2017 Richtung der positiven y- Achse des Koordinatensystems bzw. Norden geneigt haben. Lediglich der Sensor 3 (c) hat sich minimal in die Gegenrichtung geneigt. Weiters ist ersichtlich, dass sich die Mittelwerte und Standardabweichungen von Sensor 2 und Sensor 4 (b und d) sehr ähnlich zeigen. Der Unterschied zwischen erstem und letztem Mittelwert ist bei Sensor 2 (b) offensichtlich ein wenig größer als bei Sensor 4 (d). Der Neigungswinkel γ hat sich somit bei Sensor 2 (b), über den gesamten Untersuchungszeitraum, mit einer Neigung von minus $0,2^\circ$ am stärksten verändert. Außerdem ist bei den Neigungswinkeln von Sensor 2 und 4 (b und d) das Verhalten erkennbar, dass die Neigung Richtung positiver y- Achse in den Wintermonaten ausgeprägter ist. Die Standardabweichung ist bei den Sensoren 2 und 3 (b und c) durchgehend wesentlich höher als bei Sensoren 1 und 4 (a und d). Die monatliche Veränderung der Standardabweichung verläuft bei Sensor 1 bis 3 (a bis c) identisch. Der Verlauf der Standardabweichung ist bei Sensor 4 (d) genau umgedreht.

In den Abbildungen 27 und 28 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Neigungswinkel γ und β aller Sensoren für jedes Monat des Untersuchungszeitraums über die Zeit aufgetragen.

Mittelwerte und Standardabweichung des Neigungswinkels in ZOX

Die Mittelwerte von β haben sich über den gesamten Zeitraum kaum verändert. Die Standardabweichungen von β sind ca. 25-mal kleiner als die Standardabweichungen der γ - Werte.

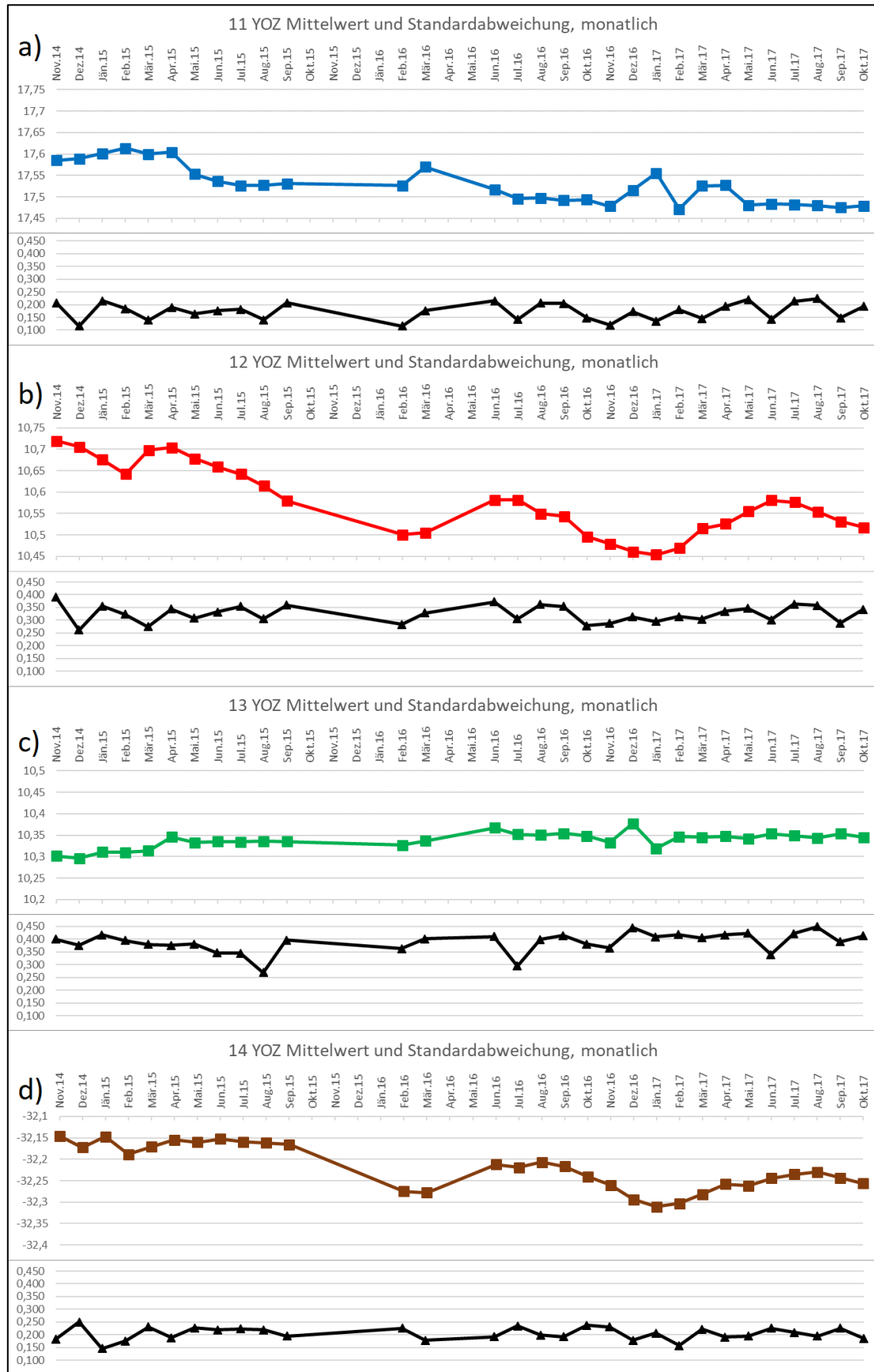


Abbildung 27: Monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen von γ in YOZ. Subgrafiken: a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.

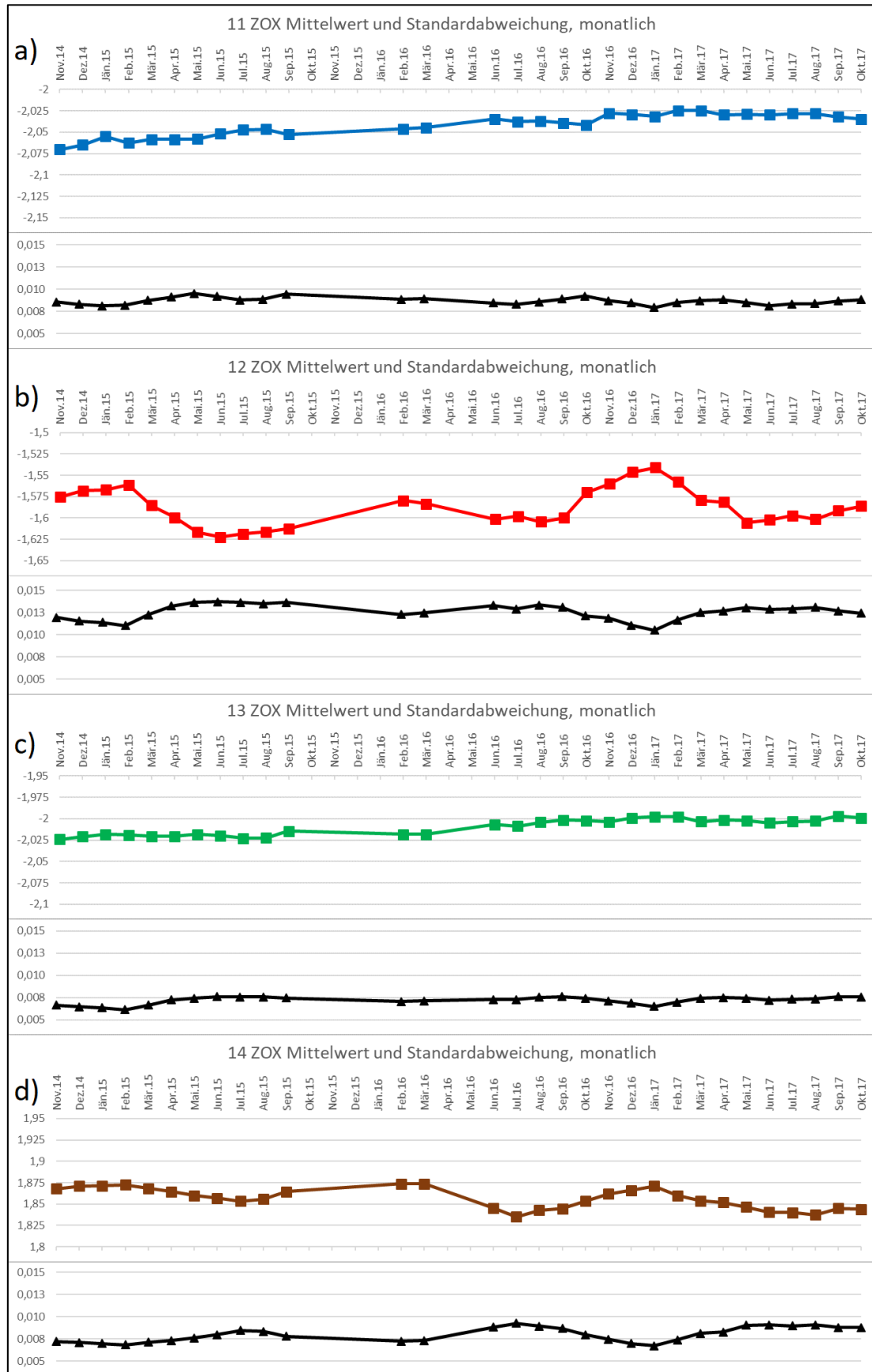


Abbildung 28: Monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen von B in ZOX. a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.

6.2 Ausreißer

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Ausreißeranalyse vorgestellt. Dabei werden zuerst die jeweiligen Diagramme abgebildet und im Anschluss erfolgt deren Auswertung. Die horizontale Achse (Zeitachse) der Diagramme ist in einzelne Tage gegliedert. Die vertikale Achse gibt den absoluten Winkel (γ , β oder α) in Grad an. Eingezeichnet sind jeweils alle (kurze, sowie längere) Zeiträume, bei denen bei mindestens zwei Sensoren „extreme“ oder besonders viele Ausreißer erkennbar sind. Zeitpunkte, bei welchen nur Ausreißer eines einzelnen Sensors erkennbar sind, werden nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um vernachlässigbare Einzelereignisse handelt.

Die Abweichungen der Winkelwerte vom Mittelwert und damit auch die Stärke und Menge der Ausreißer variieren stark zwischen den Sensoren. In der Darstellung der folgenden Diagramme wurde jeweils (für jeden der drei Winkel) ein einheitlicher Wert genommen, um den Unterschied zwischen den Sensoren deutlich machen zu können.

γ in der YOZ- Ebene: Ausreißer sind Winkelwerte abseits $\pm 1^\circ$ vom Mittelwert.

β in der ZOX- Ebene: Ausreißer sind Winkelwerte abseits $\pm 0,4^\circ$ vom Mittelwert.

α in der XOY- Ebene: Ausreißer sind Winkelwerte abseits $\pm 0,1^\circ$ vom Mittelwert.

6.2.1 Ausreißer des Neigungswinkels γ

Es folgen sechs Abbildungen (über sechs Seiten) der Ausreißerdiagramme vom Neigungswinkel γ in der YOZ- Ebene. Die Diagramme bestehen aus vier Teildigrammen, die für die Sensoren stehen. Der Zeitraum beträgt jeweils ungefähr ein halbes Jahr. Insgesamt ist der gesamte Zeitraum (November 2014 bis Dezember 2017) abgebildet. Die Markierungen unter den Diagrammen stellen eine farbliche Kennzeichnung dar, die die betroffenen Sensoren zeigt (siehe Abbildungen 29 bis 34).

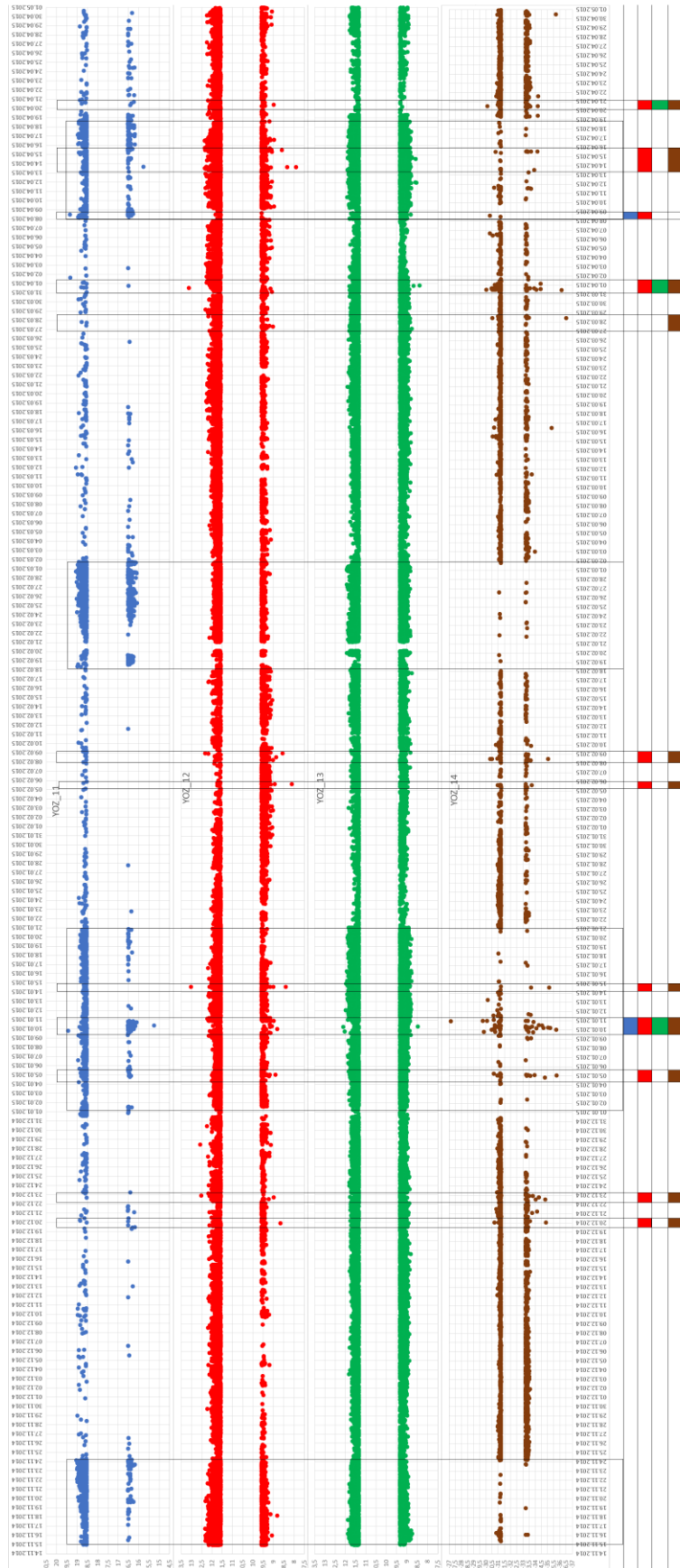


Abbildung 29: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 11.2014 - 4.2015. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

6. Ergebnisse

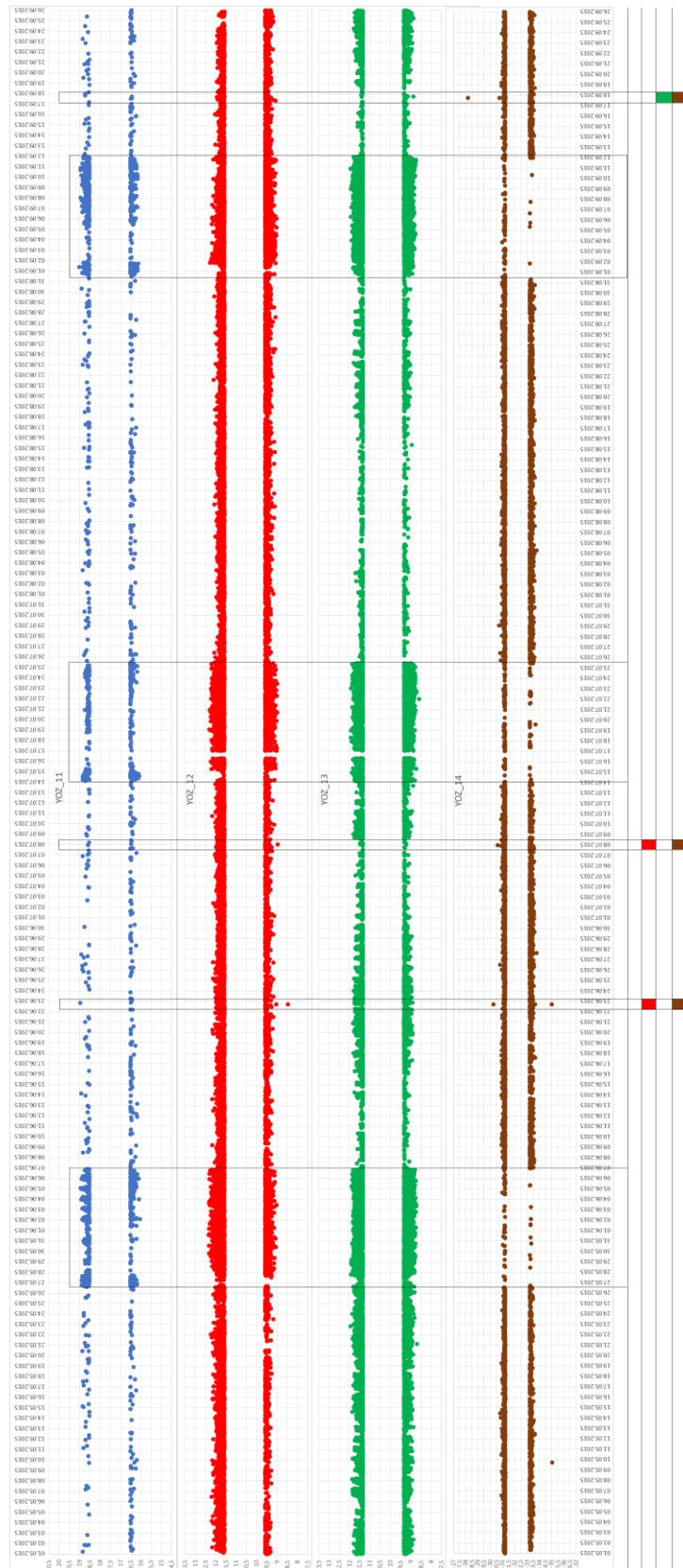


Abbildung 30: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 5.2015 - 9.2015. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

6. Ergebnisse

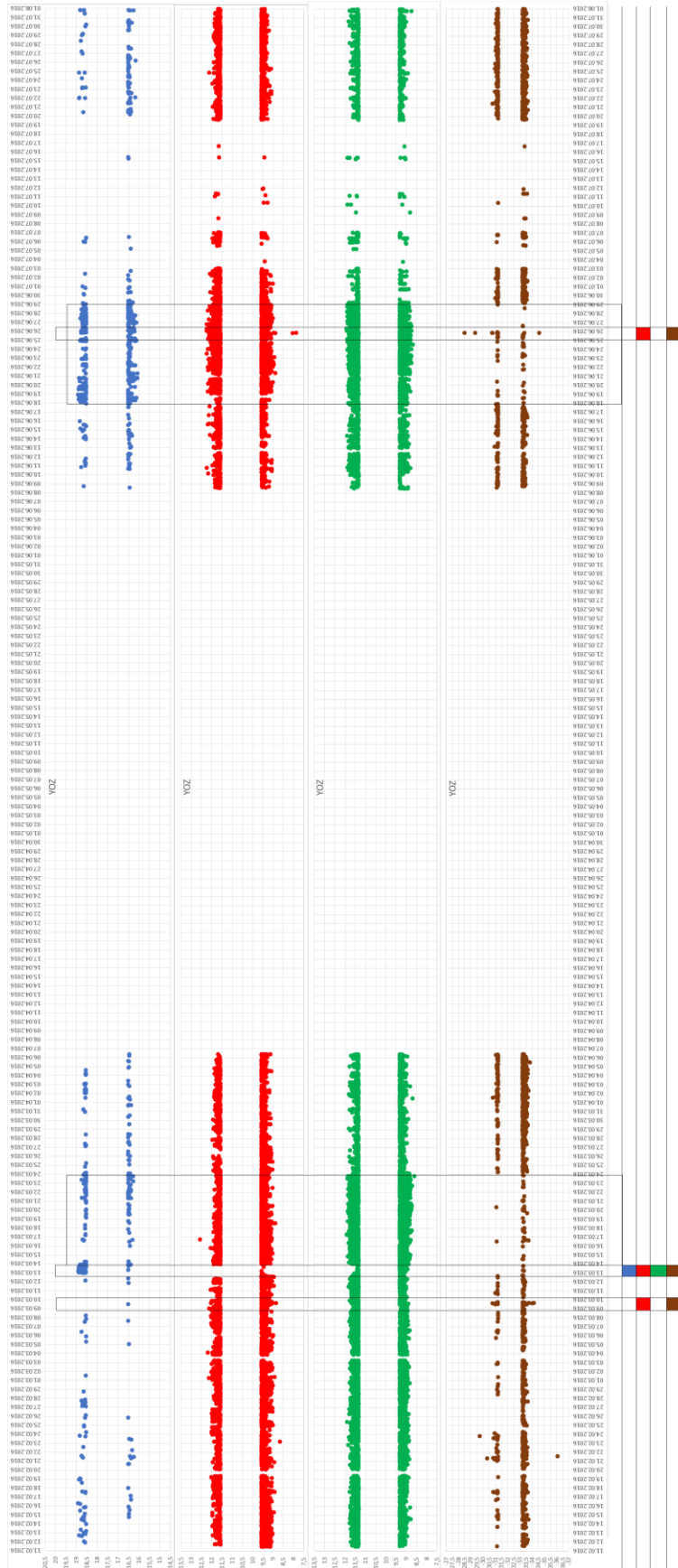


Abbildung 31: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 2.2016 - 7.2016. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

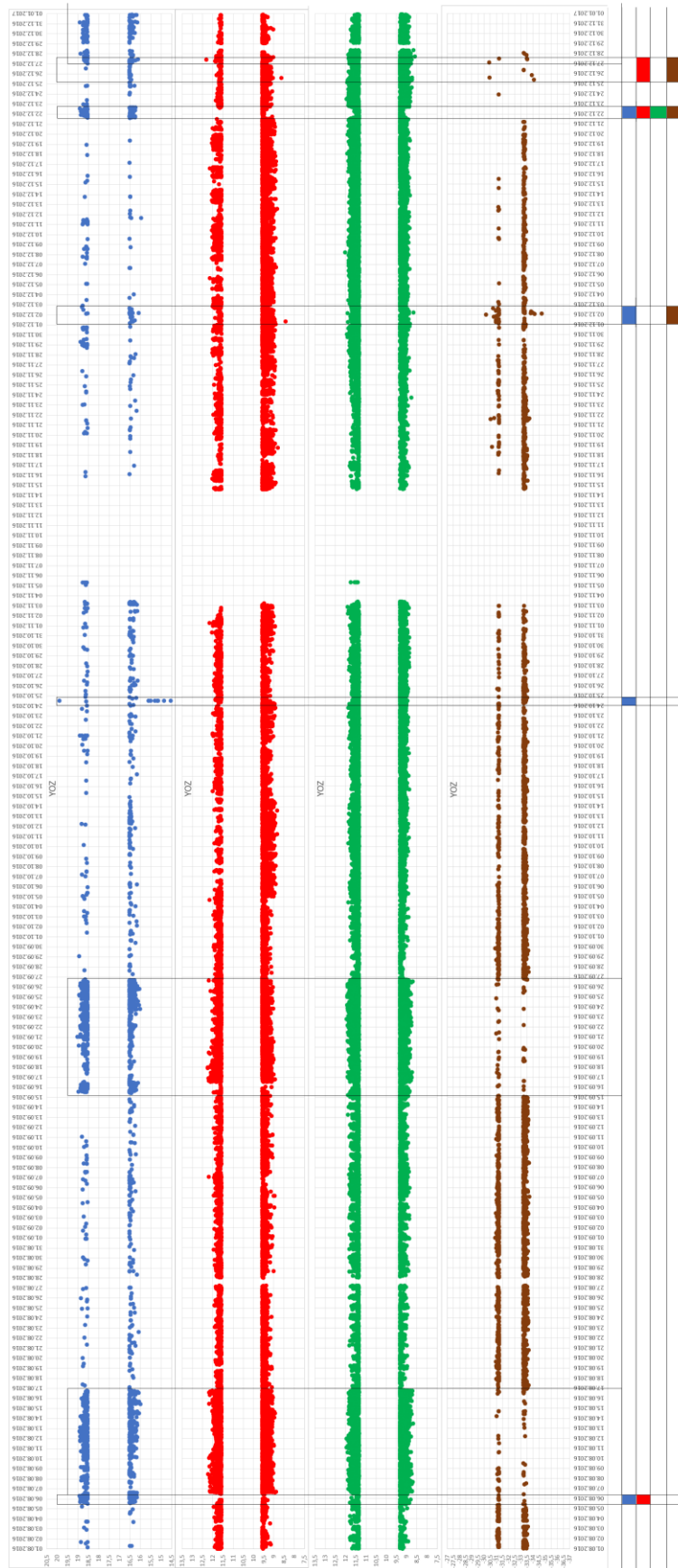


Abbildung 32: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 8.2016 - 12.2016. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

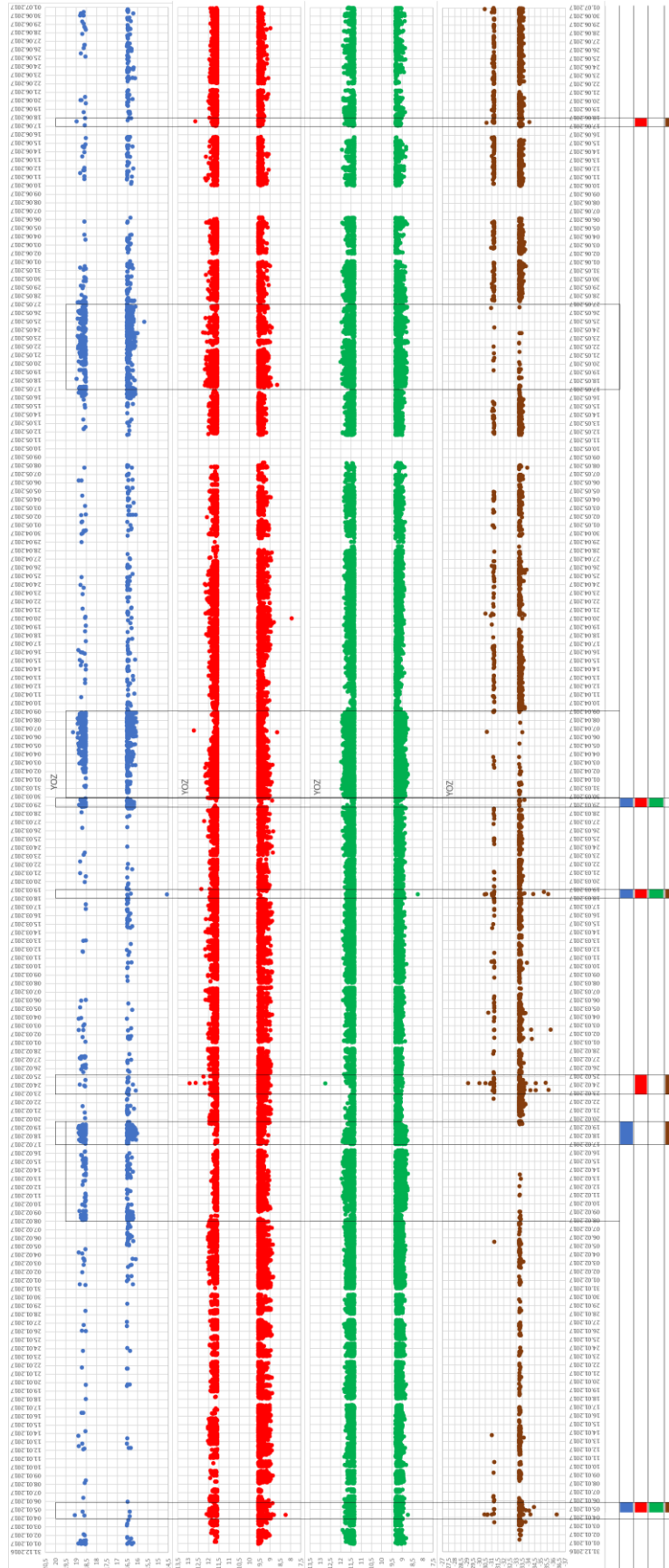


Abbildung 33: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 1.2017 - 6.2017. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

6. Ergebnisse

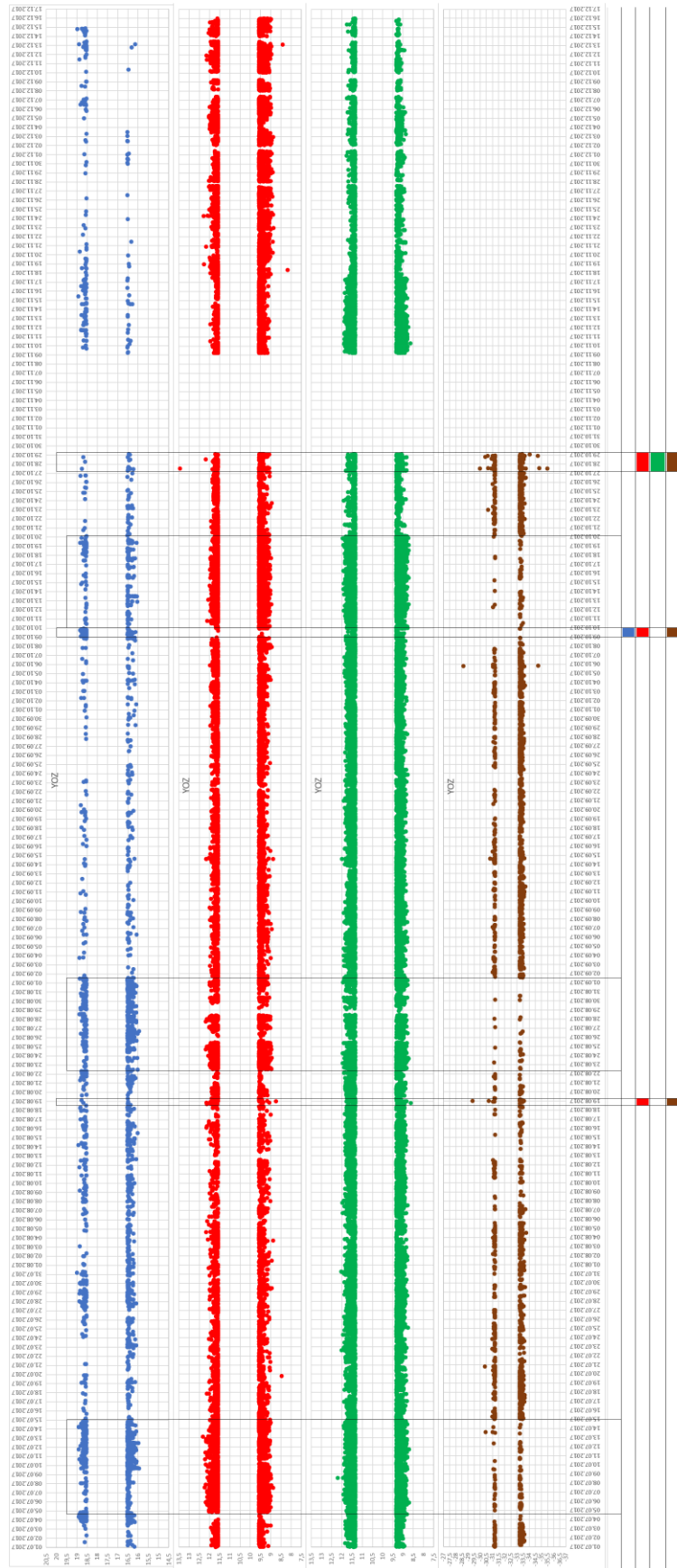


Abbildung 34: Ausreißer des Neigungswinkels γ , Zeitraum: 7.2017 - 12.2017. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

Aus den Abbildungen 29-34 ist erkennbar, dass sich die regulären Winkelwerte von

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
----------	----------	----------	----------

...ungefähr zwischen

16,5° und 18,5°	9,25° und 12°	9° und 11,75°	-33,5 und -31,5°
-----------------	---------------	---------------	------------------

... aufhalten, was bedeutet, dass sich γ von

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
----------	----------	----------	----------

...in einer Schwankungsbreite von ca.

2°	2,75°	2,75°	2°
----	-------	-------	----

...bewegt.

6.2.2 Langandauernde Auffälligkeiten von γ

Es kommt beim Neigungswinkel γ auffällig oft (über den gesamten Zeitraum gesehen) zu langandauernden Auffälligkeiten, die bei allen vier Sensoren erkennbar sind. In diesen Zeiträumen sind bei Sensor 1, 2 und 3 besonders viele Ausreißer und bei Sensor 4 besonders wenige Ausreißer zu beobachten. Bei Sensor 1 und 4 sind die Unterschiede wesentlich eindeutiger. In der folgenden Tabelle sind Zeitraum und Dauer dieser Auffälligkeiten eingetragen.

Tabelle 6: Sensorübergreifende, langandauernde Auffälligkeiten in YOZ.

Zeitraum	Dauer (Tage)
14.11. – 23.11.2014	10
1.1. – 20.1.2015	20
18.2. – 1.3.2015	12
11.4. – 18.4.2015	10
27.5. – 6.6.2015	11
14.7. – 25.7.2015	12
31.8. – 11.9.2015	12
Keine Daten vorhanden (26.9.2015 – 10.2.2016)	
14.3. – 23.3.2016	10
Keine Daten vorhanden (7.4.2016 – 7.6.2016)	
18.6. – 28.6.2016	11
Keine Daten vorhanden (3.7.2016 – 18.7.2016)	
6.8. – 16.8.2016	11
15.9. – 26.9.2016	12
Keine Daten vorhanden (4.11.2016 – 13.11.2016)	
27.12. – 31.12.2016	5
8.2. – 19.2.2017	12

30.3. – 8.4.2017	10
17.5. – 26.5.2017	10
4.7. – 14.7.2017	11
22.8. – 1.9.2017	11
9.10. – 19.10.2017	11
Datenmangel (ab 29.10.2017)	

6.2.3 Kurzzeitige Auffälligkeiten von γ

In der folgenden Tabelle sind Zeitraum und betroffene Sensoren von den detektierten kurzzeitigen Auffälligkeiten bzw. Ereignissen eingetragen.

Tabelle 7: Sensorübergreifende, kurzzeitige Auffälligkeiten in YOZ.

Zeitraum	Auffälligkeiten +... starke oder viele Ausreißer -... besonders wenige Ausreißer			
	11	12	13	14
19.12.-20.12.2014		+		+
22.12.2014		+		+
4.1.-5.1.2015		+		+
9.1.-10.1.2015	+	+	+	+
14.1.2015		+		+
5.2.2015		+		+
8.2.-9.2.2015		+		+
31.3.-1.4.2015		+	+	+
8.4.2015	+	-		
13.4.-15.4.2015		+		+
20.4.2015		+	-	+
22.6.2015		+		+
17.9.2015			+	+
9.3.2016		+		+
12.3.-13.3.2016	+	-	-	-
25.6.2016		+		+
5.8.-6.8.2016	+	-		
24.10.2016	+			
1.12.-2.12.2016	+			+
21.12.-22.12.2016	+	-	-	-
25.12.-27.12.2016		+		+
4.1.2017	+	+	+	+
17.2.-18.2.2017	+	-	+	-
23.2.-24.2.2017		+	+	+
18.3.2017	+		+	+
29.3.2017	+	-	-	
17.6.2017		+		+
18.8.-19.8.2017		+		+
9.10.2017	+	-		-
27.10.-29.10.2017	+	+		+

6.2.4 Ausreißer des Neigungswinkels β

Es folgen drei Abbildungen (über drei Seiten) der Ausreißerdiagramme vom Neigungswinkel β in der ZOX- Ebene. Die Diagramme bestehen aus vier Teildiagrammen, die für die Sensoren stehen. Der Zeitraum beträgt jeweils ungefähr ein Jahr. Insgesamt ist der gesamte Zeitraum abgebildet. Die Markierungen unter den Diagrammen stellen eine farbliche Kennzeichnung dar, die die betroffenen Sensoren zeigt (siehe Abbildungen 35 bis 37).

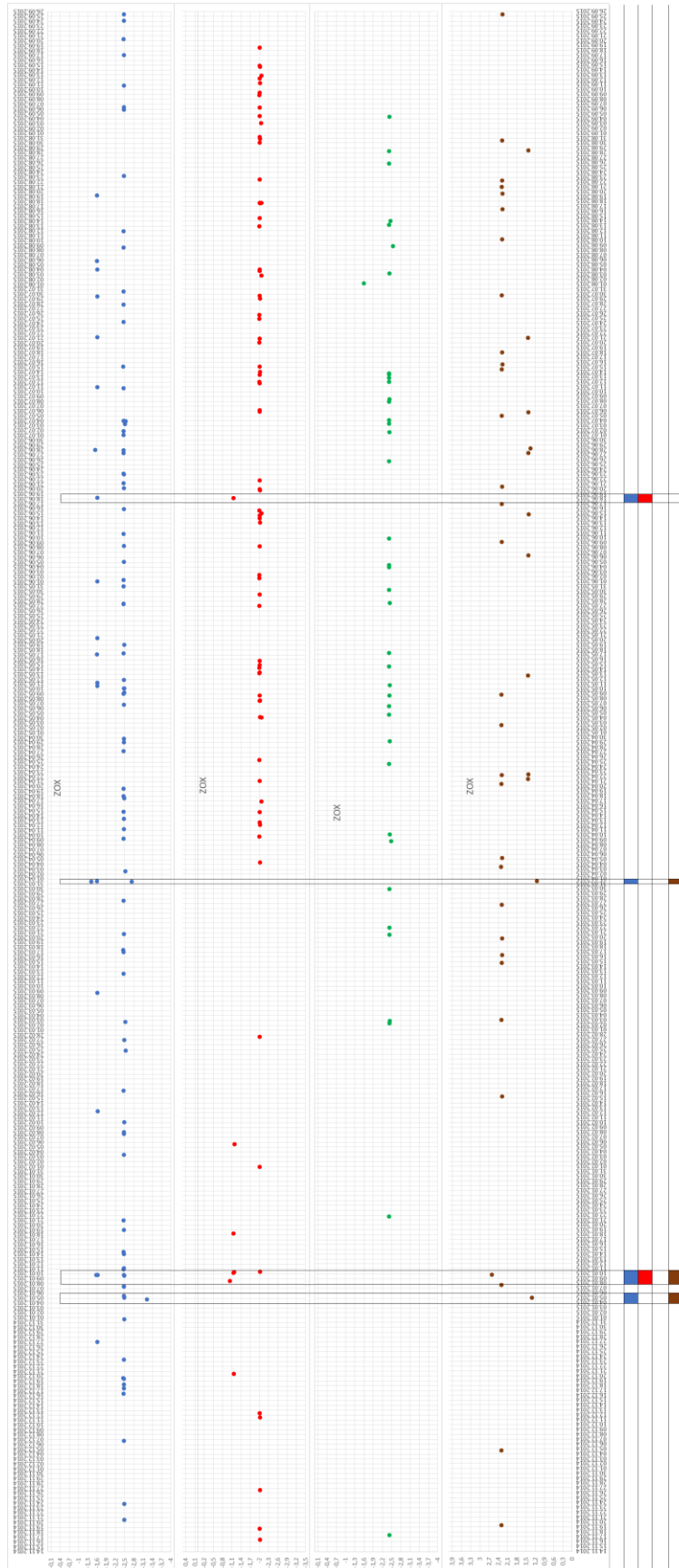


Abbildung 35: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 11.2014 - 9.2015. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

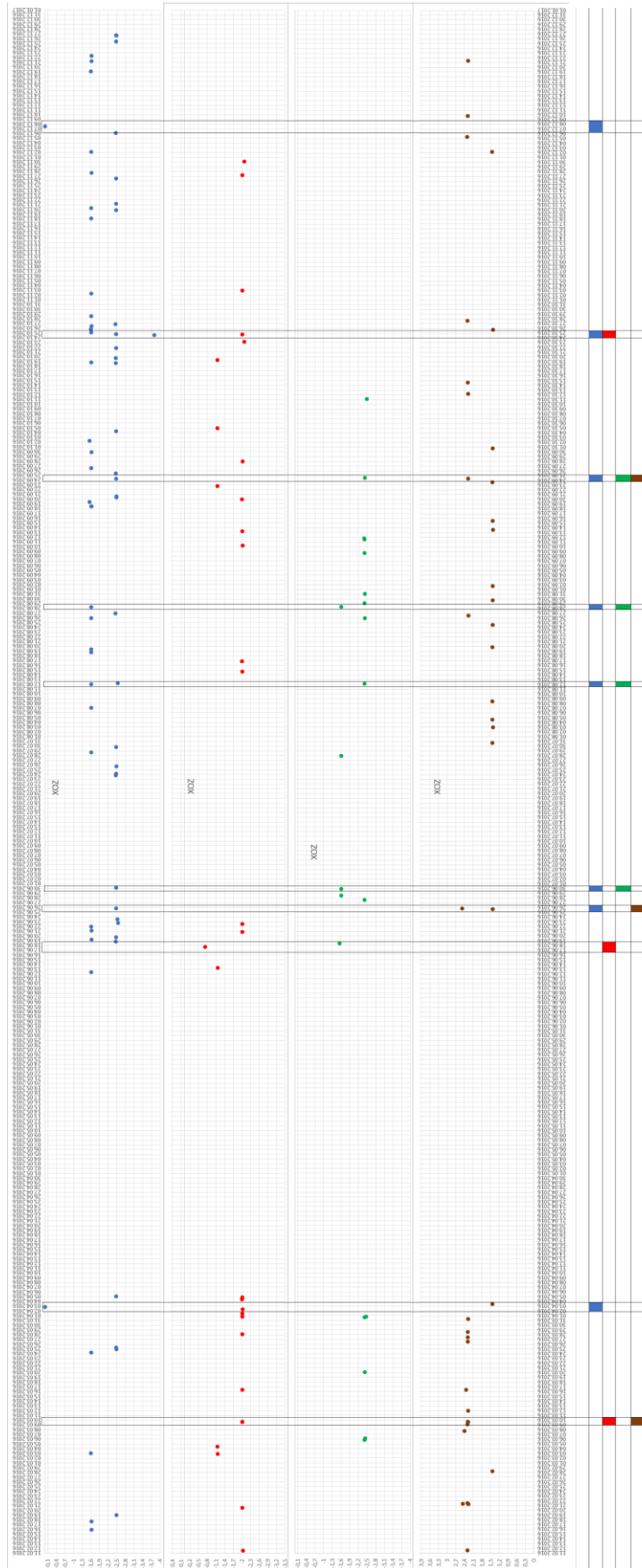


Abbildung 36: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 2.2016 - 12.2016. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

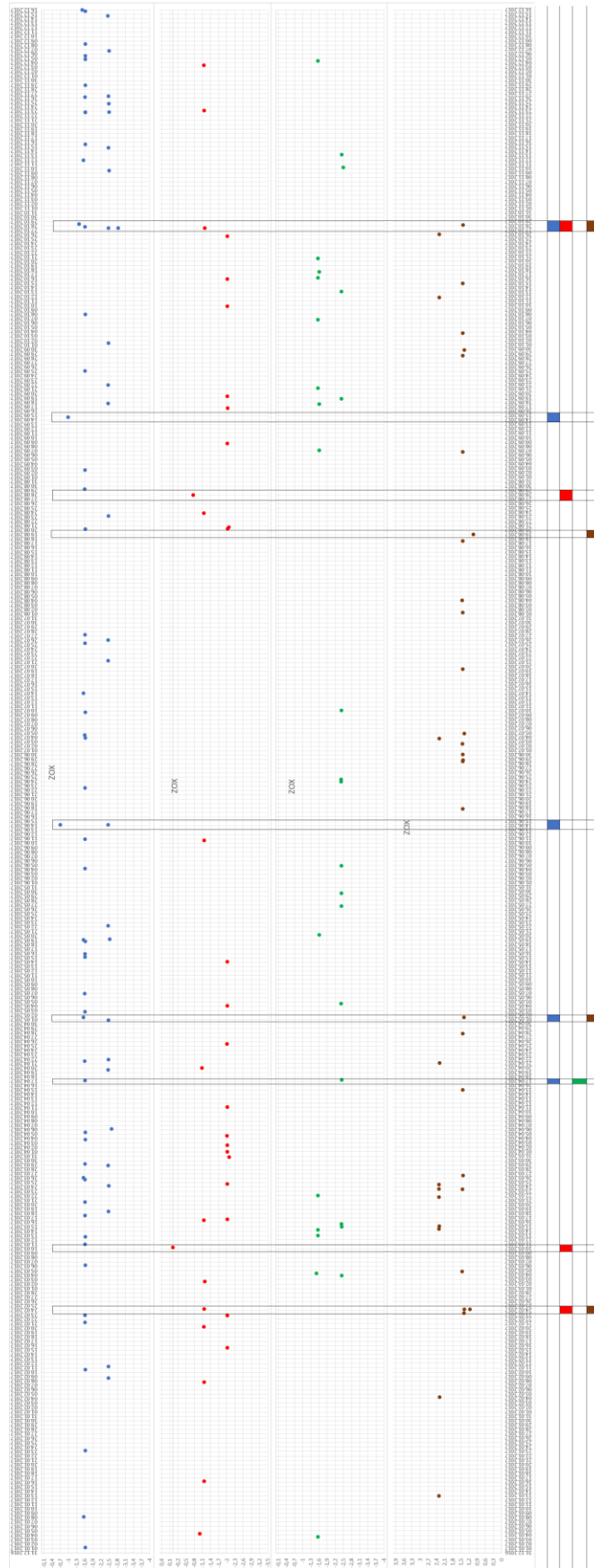


Abbildung 37: Ausreißer des Neigungswinkels β , Zeitraum 1.2017 - 12.2017. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4.

Aus den Abbildungen 29-34 ist erkennbar, dass sich die regulären Winkelwerte von Beta aller vier Sensoren in einer Schwankungsbreite von ca. $0,7^\circ$ bewegen.

6.2.5 Kurzzeitige Auffälligkeiten von β

In der folgenden Tabelle sind Zeitraum und betroffene Sensoren von den detektierten kurzzeitigen Auffälligkeiten bzw. Ereignissen eingetragen.

Tabelle 8: Sensorübergreifende, kurzzeitige Auffälligkeiten in ZOx.

Zeitraum	Auffälligkeiten + ... starke oder viele Ausreißer			
	11	12	13	14
4.1.-5.1.2015	+			+
9.1.-10.1.2015	+	+		+
31.3.2015	+			+
17.6.-18.6.2015	+	+		
9.3.2016		+		+
2.4.2016	+			
17.6.2016		+		
25.6.2016	+			+
12.8.2016	+		+	
28.8.2016	+		+	
24.10.2016	+	+		
7.12.2016	+			
24.2.2017		+		+
10.3.2017		+		
14.6.2017	+			
19.8.2017				+
27.8-28.8.2017		+		
14.9.2017	+			
27.10-28.10.2017	+	+		+

6.2.6 Besondere sensorübergreifende Ereignisse von γ und β

Hier werden alle bisher detektierten, kurzzeitigen Auffälligkeiten zu Bewegungsereignissen zusammengefasst. Die folgende Tabelle zeigt die wesentlichen Ereignisse, die gleichzeitig in den beiden Ebenen (YOZ und ZOx) stattgefunden haben oder besonders stark waren.

Tabelle 9: Besondere sensor- sowie ebenenübergreifende Ereignisse in YOZ und ZOX

Zeitraum	Auffälligkeiten ●... starke oder viele Ausreißer								Er- eig- nis:
	Sensor								
	11		12		13		14		
	YOZ	ZOX	YOZ	ZOX	YOZ	ZOX	YOZ	ZOX	
22.12.2014			●				●		
4.1.- 5.1.2015		●	●				●	●	a
9.1.- 10.1.2015	●	●	●	●	●		●	●	b
31.3.- 1.4.2015		●	●		●		●	●	c
13.4.- 15.4.2015			●				●		
9.3.2016			●	●			●	●	
25.6.2016		●	●				●	●	d
24.10.2016	●	●		●					
1.12.- 2.12.2016	●						●		
4.1.2017	●		●		●		●		e
23.2.- 24.2.2017			●	●	●		●	●	f
18.3.2017	●				●		●		g
18.8.- 19.8.2017			●				●	●	
27.10.- 29.10.2017	●	●	●	●			●	●	h

Für die weitere Bewegungsanalyse wurden acht Ereignisse, aufgrund hoher Relevanz, ausgewählt (blau markiert in Tabelle 9). Die ausgewählten Ereignisse weisen einen hohen Zusammenhang der Bewegungen der einzelnen Sensoren in den jeweiligen Ebenen auf, oder die Ausreißer sind besonders stark bzw. zahlreich.

6.2.7 Ausreißer des Azimut α

Es folgen die Ausreißerdiagramme vom Azimut α in der XOY- Ebene (Abbildung 38). Die Diagramme bestehen aus vier Teildiagrammen, die für die Sensoren stehen. Der Zeitraum beträgt jeweils ungefähr ein Jahr. Insgesamt ist der gesamte Zeitraum abgebildet. In der Abbildung 38 ist ersichtlich, dass bei den Ereignissen b, c, d, f und h, auch beim Azimut α , Bewegungen stattgefunden haben. Die jeweiligen Ausreißer werden auch in die Bewegungsanalyse einfließen.

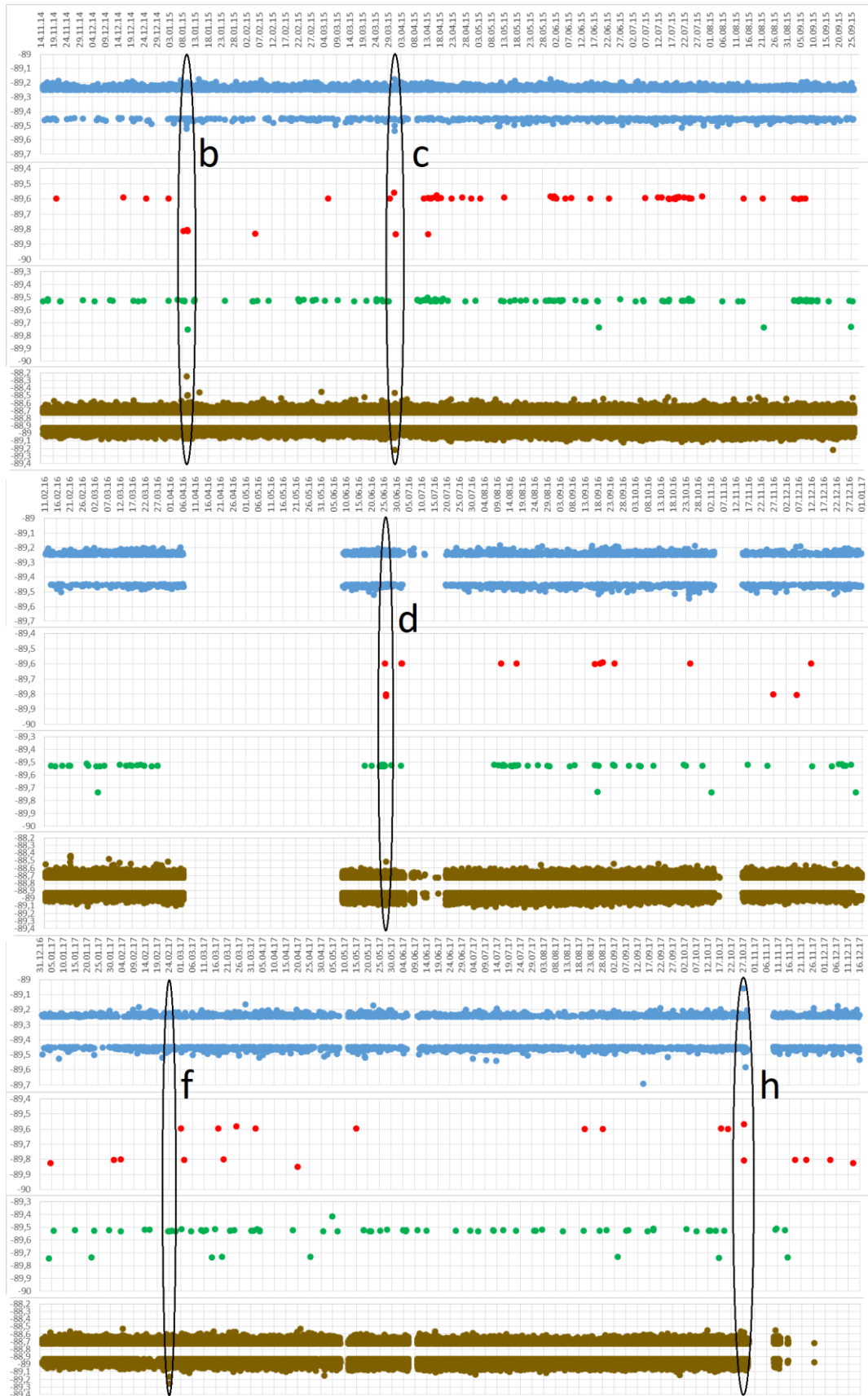


Abbildung 38: Ausreißer des Azimut α , Zeitraum: 11.2014 - 12.2017. Subgrafiken: blau) Sensor 1, rot) Sensor 2, grün) Sensor 3, braun) Sensor 4. Ausgewählte Bewegungsereignisse(b,c,d,f,h) gekennzeichnet.

Aus den Abbildung 38 ist erkennbar, dass sich die regulären Winkelwerte von

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
----------	----------	----------	----------

...ungefähr zwischen

-89,45° und -89,2°	-89,8° und -89,6°	-89,75° und -89,55°	-89,05° und -88,6°
--------------------	-------------------	---------------------	--------------------

... aufhalten, was bedeutet, dass sich α von

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
----------	----------	----------	----------

...in einer Schwankungsbreite von ca.

0,25°	0,2°	0,2°	0,45°
-------	------	------	-------

...bewegt.

Aufgrund der (im Vergleich zu Gamma und Beta) geringen Abweichungen der α - Ausreißer vom Mittelwert werden aus Abbildung 38 keine weiteren Bewegungsereignisse aufgenommen. Das Diagramm dient der Kontrolle, ob zu den Ereignissen, die aus den Bewegungen in γ und β detektiert wurden, ein Zusammenhang besteht.

6.3 Abgleich der Bewegungsereignisse mit Sensor 5

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob sich der fünfte Sensor, der an einem Strommast zwischen dem Amtmann und der vorbeiführenden Straße befestigt ist, während der ausgewählten Bewegungsereignisse (siehe Tabelle 9) auch bewegt hat.

Aus den Abbildungen 39 und 40 ist abzuleiten, dass sich Sensor 5 beim Großteil der ausgewählten Bewegungsereignisse auch bewegt hat. Bei sechs der acht Ereignisse sind auch vom Sensor 5 Bewegungen aufgenommen worden. Sogar die langanhaltenden Auffälligkeiten finden sich in der YOZ- Ebene wieder. Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass sich bei fast allen Ereignissen nicht nur der Amtmann bewegt hat, sondern auch der naheliegende Strommast. Außerdem hat Sensor 5 irgendwann zwischen 6.April und 8.Juni 2016 deutlich seine Position verändert.

Es folgen zwei Abbildungen (39 und 40) von den Diagrammen, die den Verlauf der beiden Neigungswinkel γ und β von Sensor 5 über den gesamten Zeitraum zeigen.

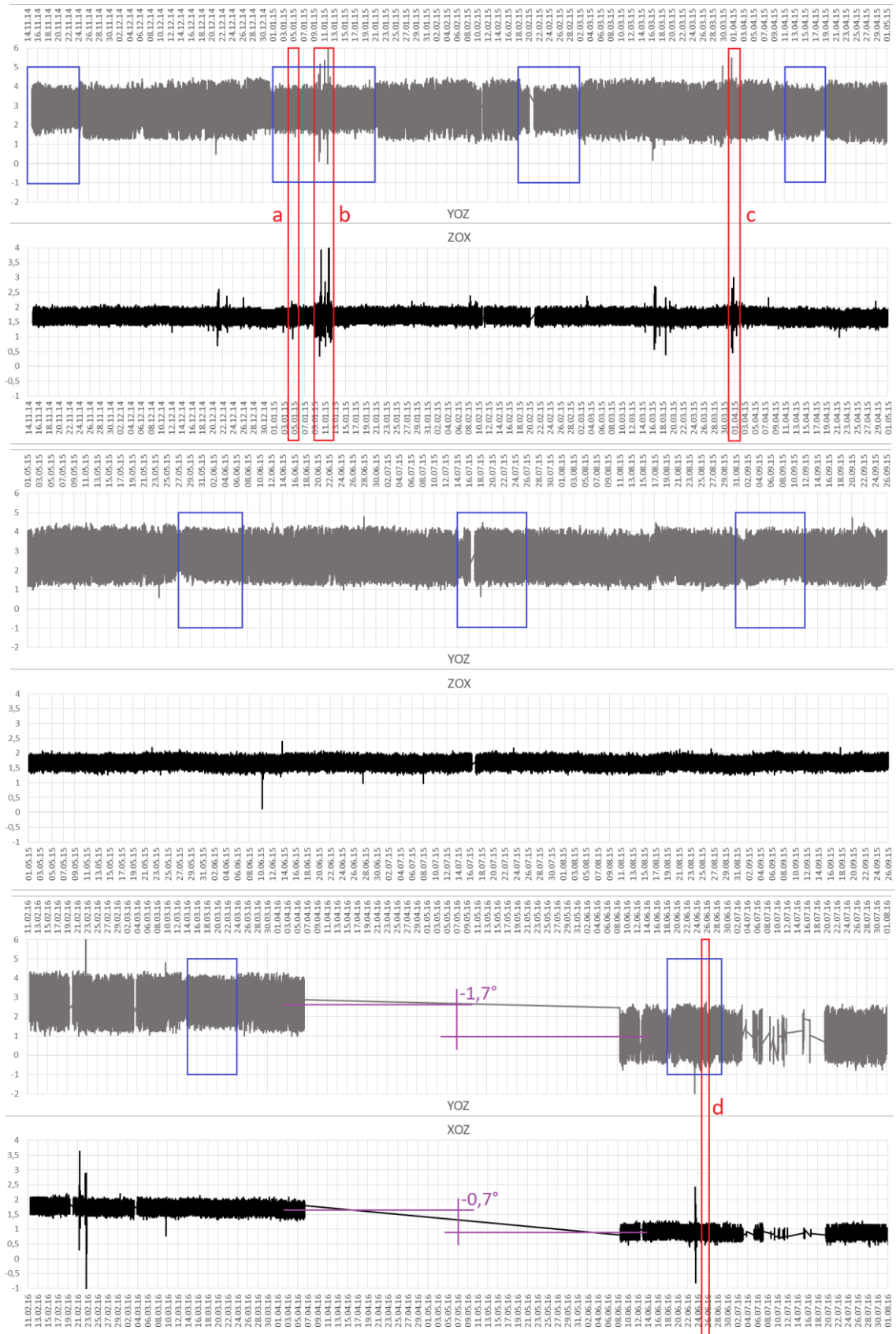


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Neigungswinkel von Sensor 5, Zeitraum: 11.12.14 - 7.2016.
Subgrafiken: grau) Neigungswinkel γ , schwarz) Neigungswinkel β .

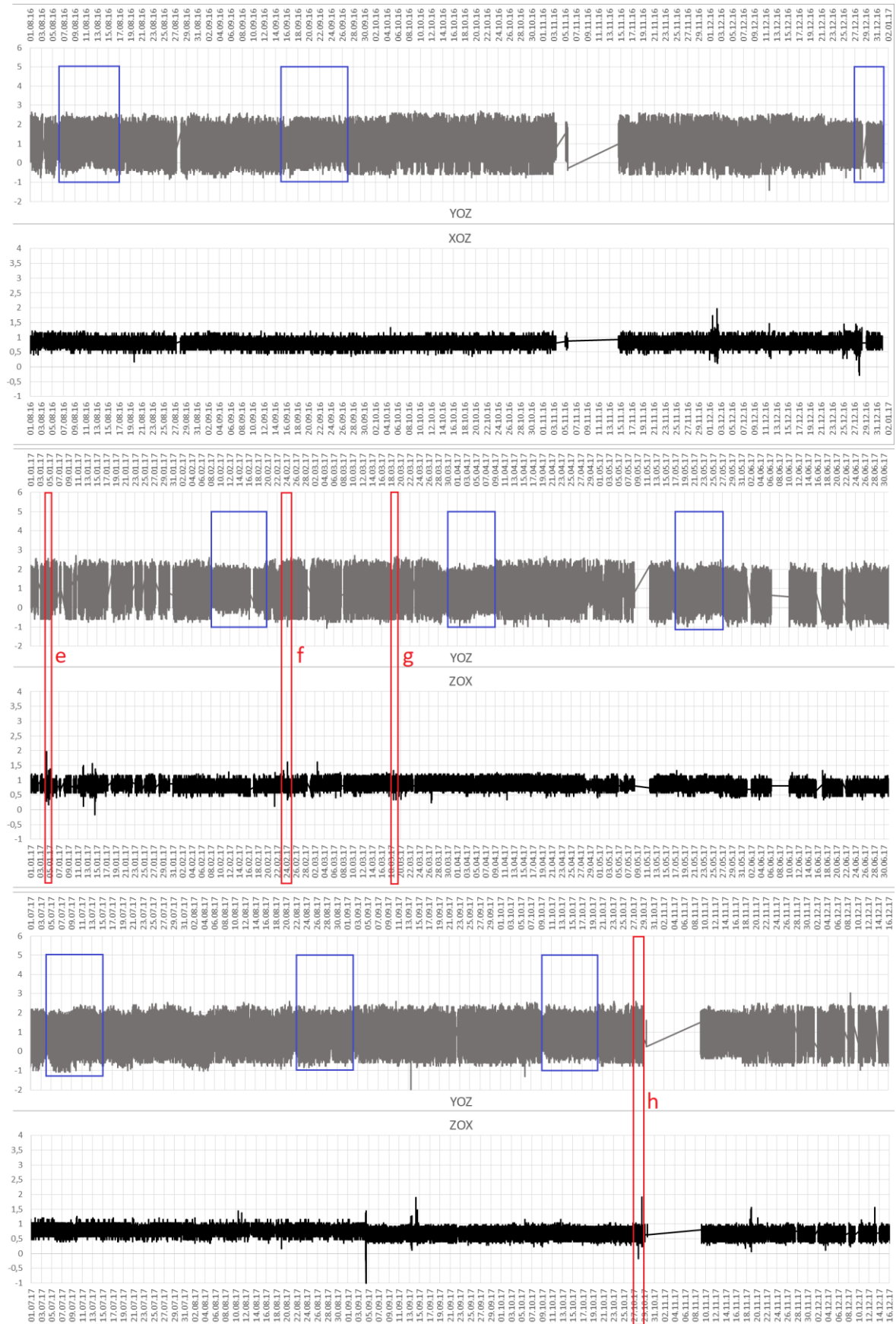


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Neigungswinkel von Sensor 5, Zeitraum: 8.2016 - 12.2017.
Subgrafiken: grau) Neigungswinkel γ , schwarz) Neigungswinkel β .

6.4 Analyse der langandauernden Auffälligkeiten

Die folgende Abbildung stellt die Zeiträume der langandauernden Auffälligkeiten in Form eines Liniendiagrammes dar.

Sensorübergreifende Ereignisse in YOZ (langandauernde Ereignisse)

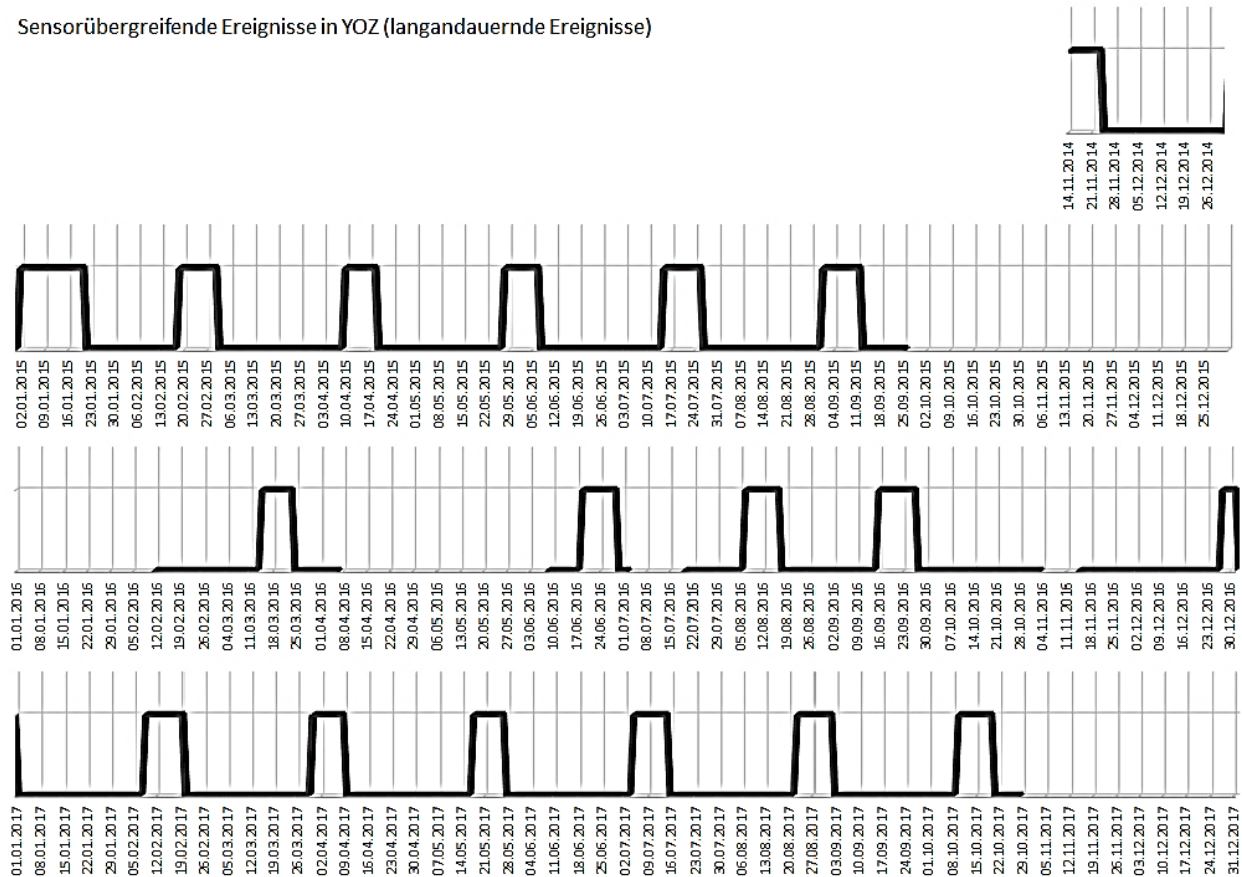


Abbildung 41: Langandauernde Auffälligkeiten in YOZ, gesamter Zeitraum

In nahezu perfekt periodischen Zeitabständen kommt es, vor allem bei Sensor 1 und 4 zu einer Veränderung der Häufigkeitsverteilung der Winkelwerte von γ . Diese Ereignisse dauern, mit ein paar Ausnahmen immer 10 bis 12 Tage lang an und der zeitliche Abstand zwischen den Auffälligkeiten beträgt, auch mit Ausnahmen, meistens genau 38 Tage. Während dieser 10 bis 12 Tage neigt sich Sensor 1 in der YOZ- Ebene stärker hin und her, während sich die Sensoren 4 und 5 weniger neigen.

In Abbildung 42 sind Diagramme der Häufigkeitsverteilung der γ - Winkelwerte aller vier Sensoren in einem Zeitraum von 10 Tagen, an denen die Aufzeichnungen „normal“ waren, sprich nicht wie bei den in Abbildung 41 dargestellten langandauernden Ereignissen, zu sehen. Abbildung 43 zeigt Diagramme der Häufigkeitsverteilung der γ - Win-

kelwerte aller vier Sensoren in einem Zeitraum von 10 Tagen langandauernder Auffälligkeiten. Die Werte von Sensor 1 sind während des Ereignisses wesentlich breiter gestreut. Bei Sensor 4 passiert genau das Gegenteil.

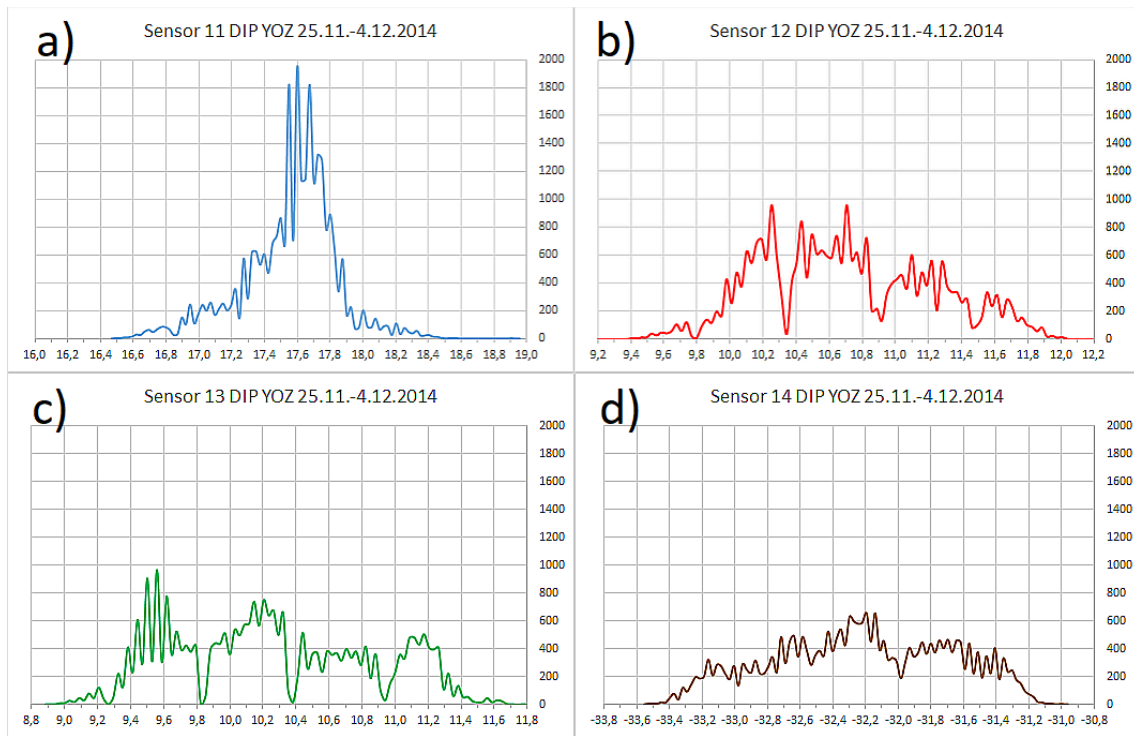


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung von γ über "normale" 10 Tage. Subgrafiken: a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.

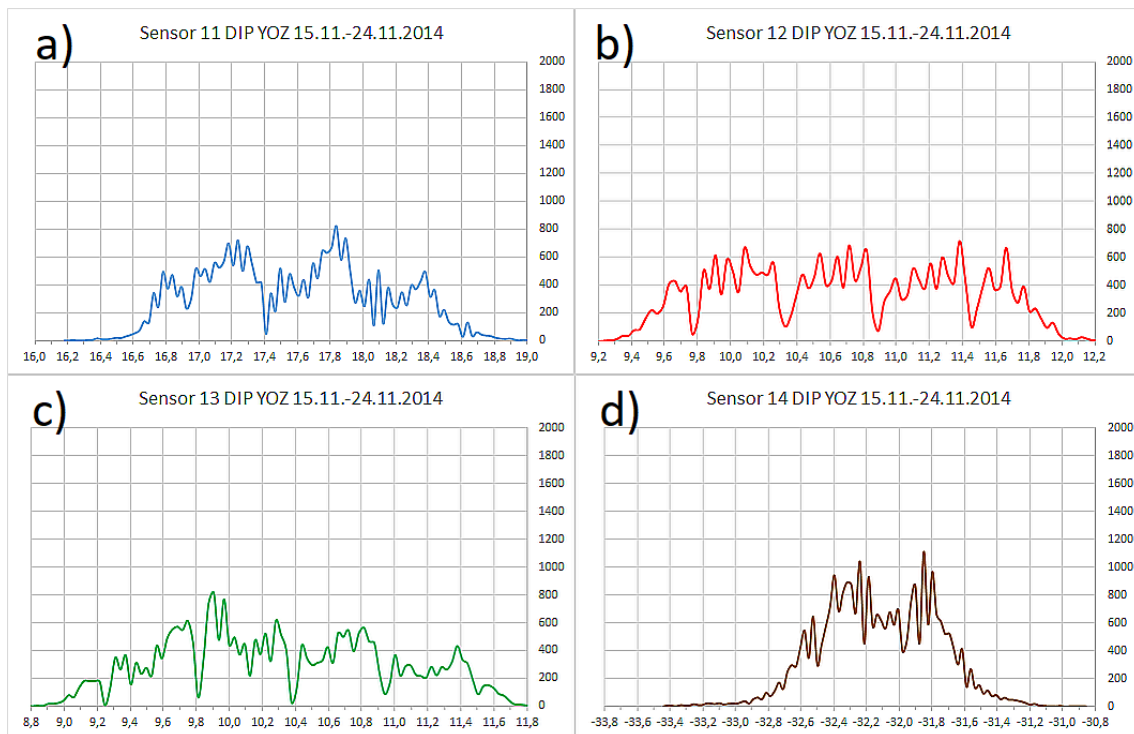


Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung von γ über "auffällige" 10 Tage Subgrafiken: a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3, d) Sensor 4.

6.5 Analyse der kurzzeitigen Bewegungsereignisse

Es folgen die Ergebnisse Bewegungsanalyse der acht ausgewählten Ereignisse. Dabei wird jeweils zuerst betrachtet, ob es bei den Neigungswinkeln (γ und β) und beim Azimut (α) der ausgewählten Bewegungsereignisse eine Richtungstendenz gibt. Im direkten Anschluss werden jeweils sensorübergreifende Ausreißer, die exakt zum gleichen Zeitpunkt passiert sind, betrachtet. In beiden Fällen werden jeweils zuerst die Ereignistabelle und danach die grafische Darstellung wiedergegeben. Die, in den Abbildungen 44 bis 59, eingezeichneten Pfeile geben Auskunft über die Neigungsrichtung. Die Länge der Pfeile spielt keine Rolle.

a) 4.1.-5.1.2015

Tabelle 10: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis a.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
	$-\beta$		$-\gamma$						$-\gamma$	$-\beta$	

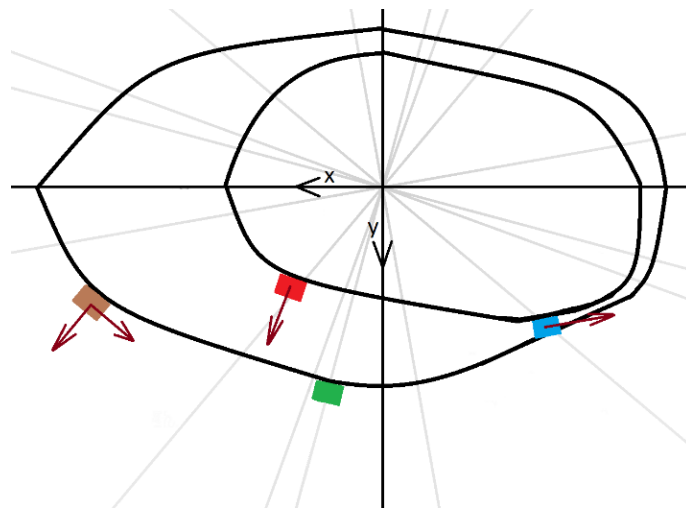


Abbildung 44: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis a.

Tabelle 11: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis a.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
5.1.2015	00:54		YOZ: 9,18		YOZ: -35,73 XOY: -89,05
			$-\gamma$		$-\gamma$ $-\alpha$

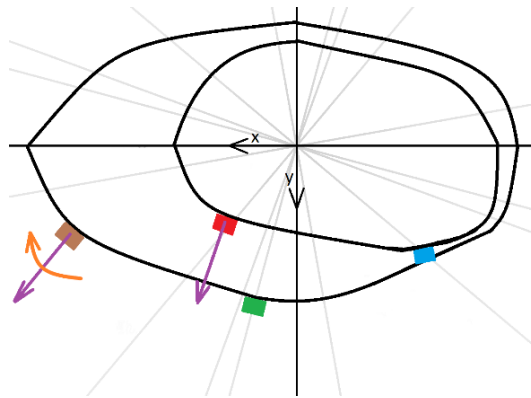


Abbildung 45: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis

a.

b) 9.1.-10.1.2015

Tabelle 12: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis b.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
- γ					$-\alpha$				- γ	$+\beta$	$+\alpha$

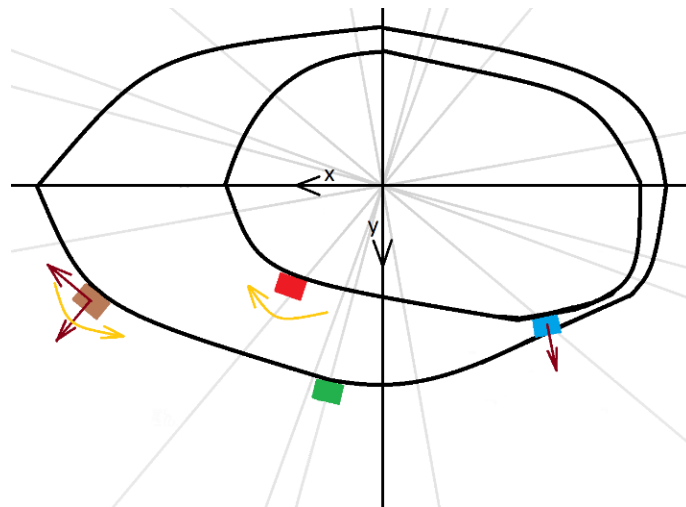


Abbildung 46: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis b.

Tabelle 13: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis b.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
9.1.2015	17:59	ZOX: -1,57 XOY: -89,49		YOZ: 12,03	YOZ: -33,84 ZOX: 2,62 XOY: -88,24
		+ β - α		+ γ	- γ + β + α
10.1.2015	05:53			YOZ: 12,11	YOZ: -30,71
				+ γ	+ γ
	06:26			YOZ: 8,47	YOZ: -35,03 XOY: -88,59
				- γ	- γ + α
	08:05	XOY: -89,46	YOZ: 9,08 ZOX: -1,18 XOY: -89,81		
		- α	- γ + β - α		

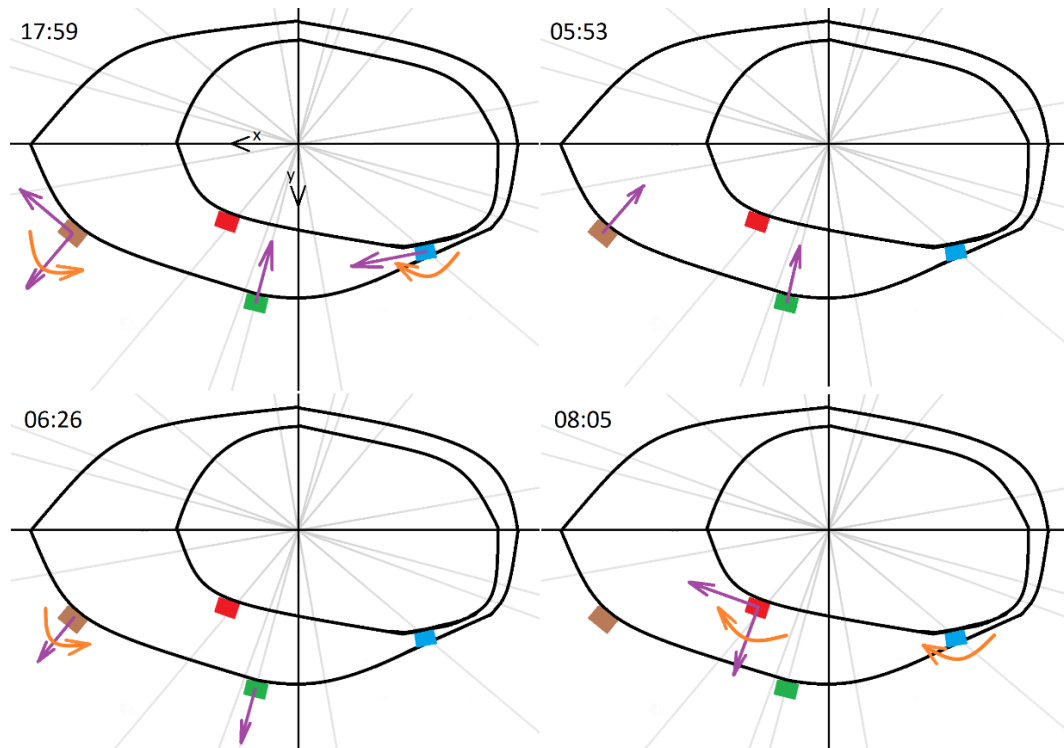


Abbildung 47: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis b.

c) 31.3.-1.4.2015

Tabelle 14: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis c.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
		$-\alpha$	$+\gamma$			$-\gamma$			$-\gamma$	$-\beta$	

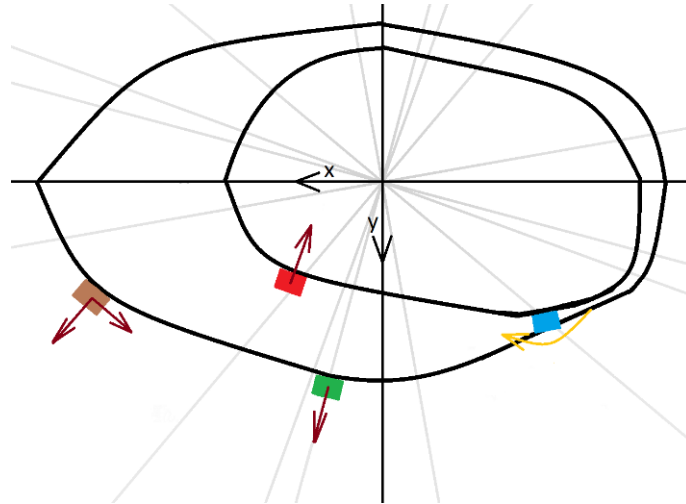


Abbildung 48: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis c.

Tabelle 15: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis c.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
31.3.2015	11:50	ZOX: -1,41 XOY: -89,54			YOZ: -36,15 XOY: -88,47
		$+\beta$ $-\alpha$			$-\gamma$ $+\alpha$
					YOZ: - 34,10 ZOX: 1,15 XOY: -89,22
	12:15				$-\gamma$ $-\beta$ $-\alpha$

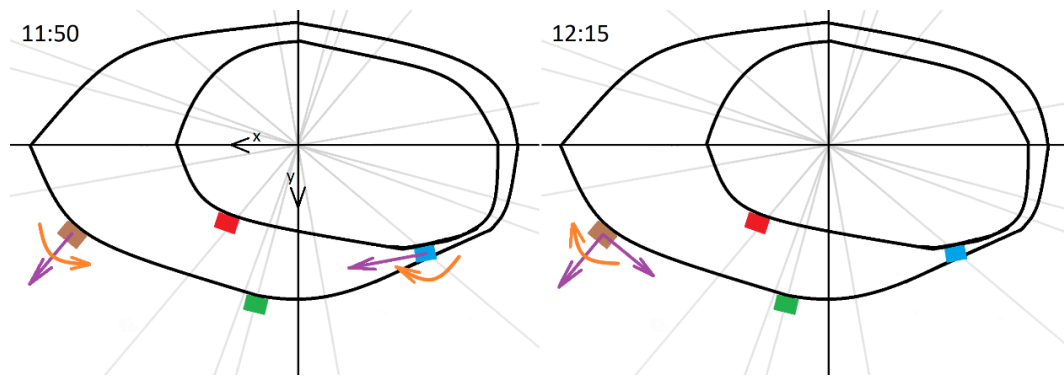


Abbildung 49: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis

c.

d) 25.6.2016

Tabelle 16: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis d.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
			-y					+a	+y		

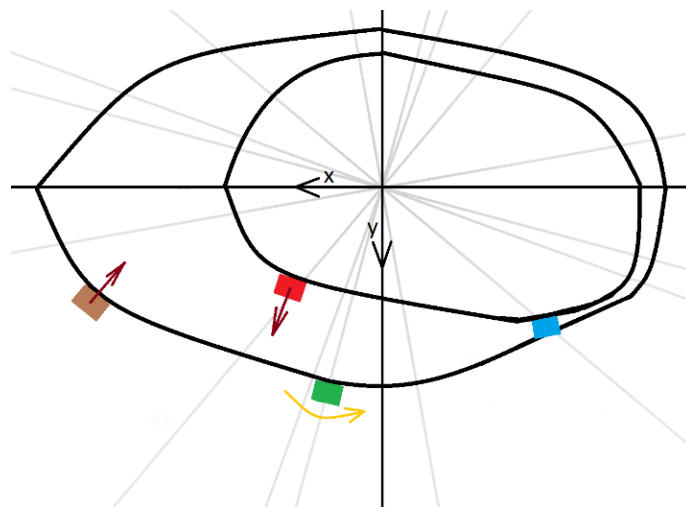


Abbildung 50: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis d.

Tabelle 17: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis d.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
25.6.2016	20:15				YOZ: -30,76 ZOX: 2,50 XOY: -88,52
					+ γ + β + α
	20:17		YOZ: 8,89 XOY: -89,81		YOZ: -33,35
			- γ - α		- γ

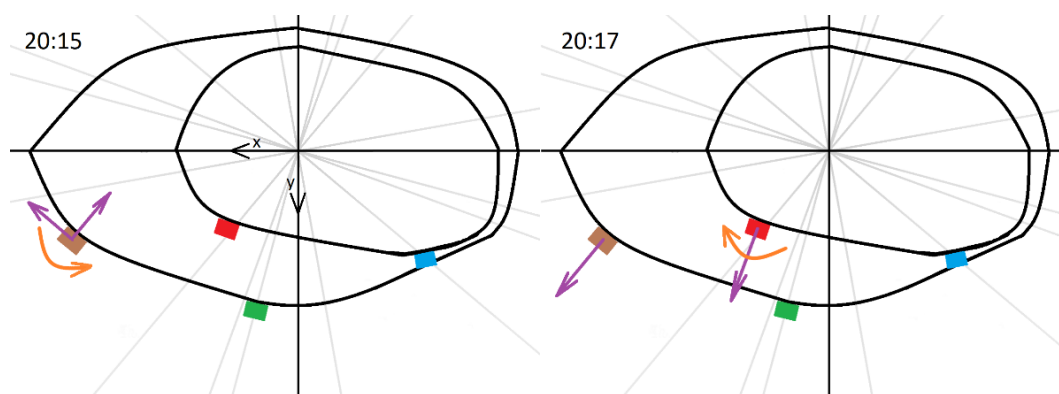


Abbildung 51: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis d.

e) 4.1.2017

Tabelle 18: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis e.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
+ γ			- γ						- γ		

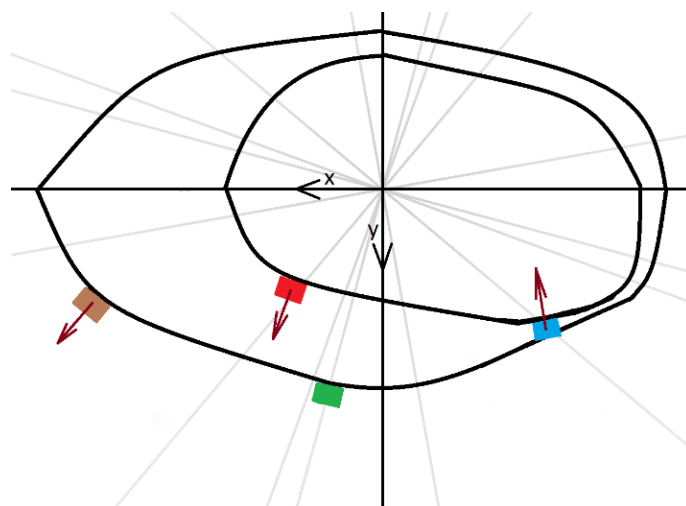


Abbildung 52: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis e.

Tabelle 19: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis e.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
4.1.2017	09:03			YOZ: 8,74	YOZ: -30,99
				-y	+y
	09:12	YOZ: 19,08			YOZ: -33,58
		+y			-y

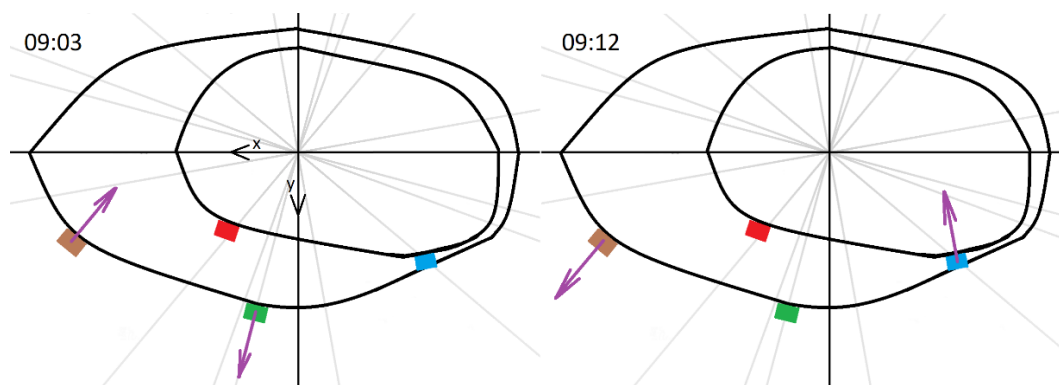


Abbildung 53: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis e.

f) 23.2.-24.2.2017

Tabelle 20: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis f.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
			+y			+y				-β	-α

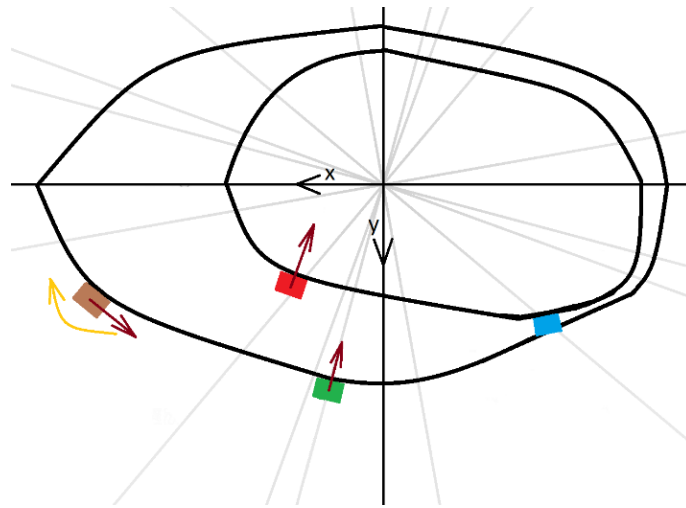


Abbildung 54: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis f.

Tabelle 21: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis f.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
23.2.2017	09:45				YOZ: -34,58 ZOX: 1,39 XOY: -89,04
					- γ - β - α
24.2.2017	05:34			YOZ: 12,76	ZOX: 1,38 XOY: -89,17
				+ γ	- β - α
	06:04		YOZ: 12,64		ZOX: 1,16 XOY: -89,26
			+ γ		- β - α

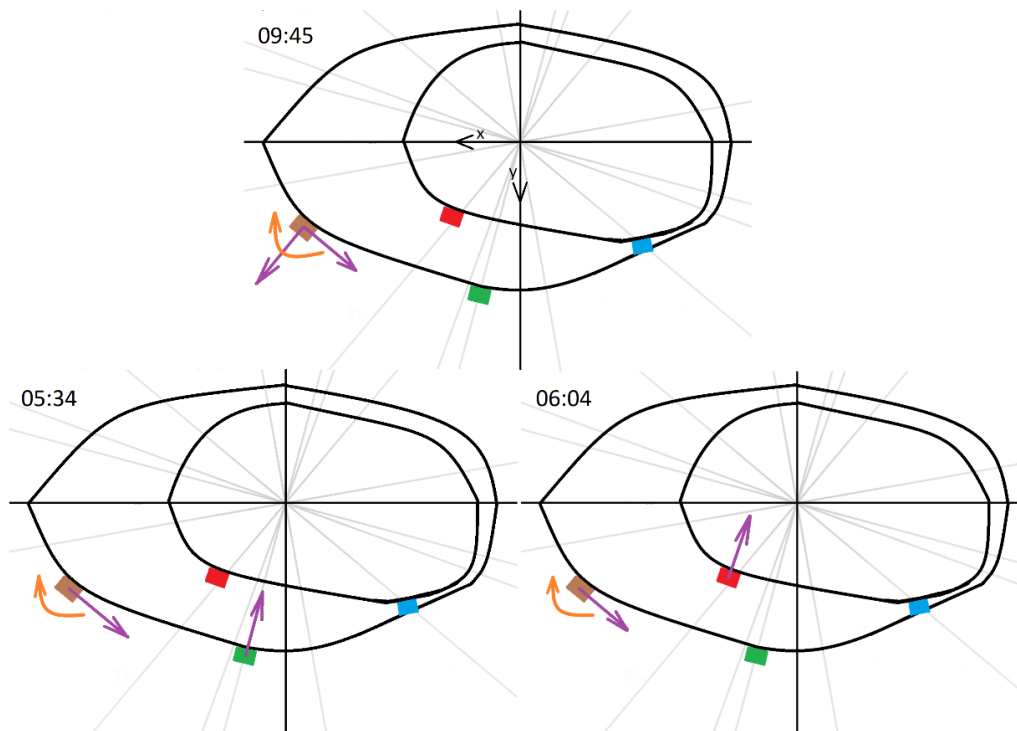


Abbildung 55: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis f.

g) 18.3.2017

Tabelle 22: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis g.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
-Y						-Y			-Y		

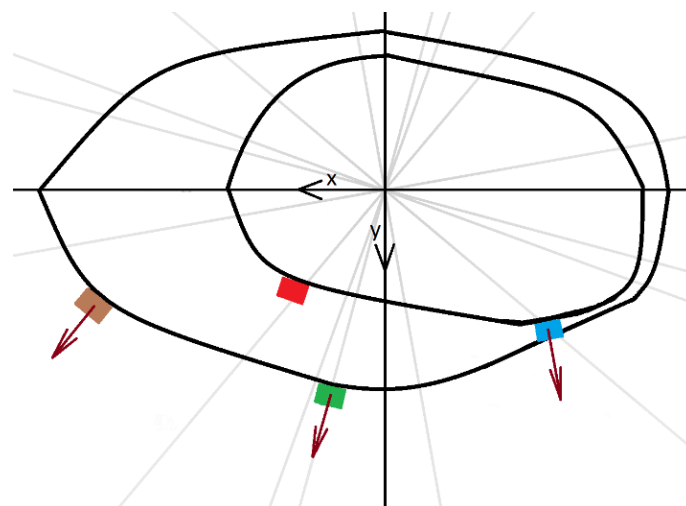


Abbildung 56: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis g.

Tabelle 23: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis g.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
18.3.2017	14:27	YOZ: 16,34			YOZ: -33,66 XOY: -88,67
		-y			-y +α

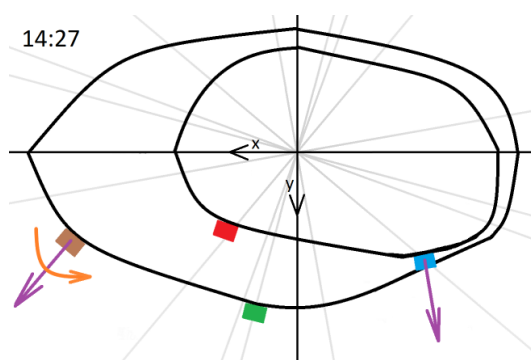


Abbildung 57: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis g.

h) 27.10.-28.10.2017

Tabelle 24: Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis h.

11			12			13			14		
YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY	YOZ	ZOX	XOY
			+y						-y		

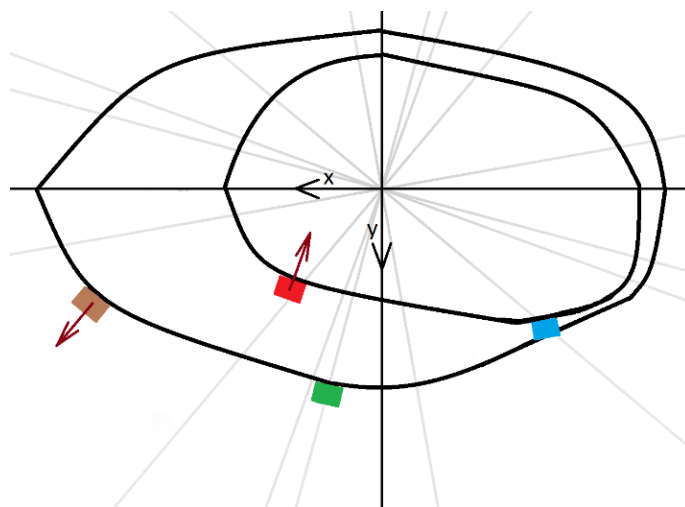


Abbildung 58: Grafische Darstellung der Richtungstendenz der Ausreißer, Bewegungsereignis h.

Tabelle 25: Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis h.

		11	12	13	14
		Mittelwerte			
		YOZ: 17,53 ZOX: -2,04 XOY: -89,35	YOZ: 10,58 ZOX: -1,59 XOY: -89,70	YOZ: 10,34 ZOX: -2,10 XOY: -89,63	YOZ: -32,22 ZOX: 1,86 XOY: -88,83
Datum	Zeitpunkt (Minute)	Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt			
27.10.2017	12:17	YOZ: 18,76			YOZ: -35,49 XOY: -89,00
		+ γ			- γ - α
	12:52	ZOX: -2,83 XOY: -89,06			YOZ: -34,80
		- β + α			- γ

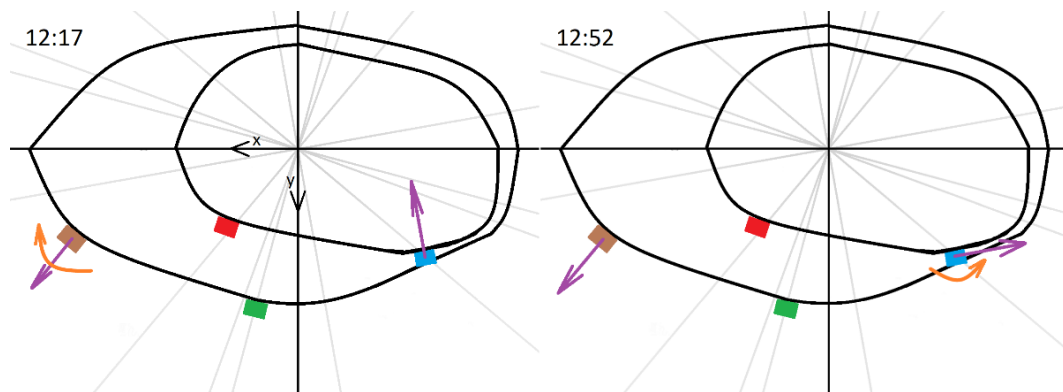


Abbildung 59: Grafische Darstellung der Ausreißer zum gleichen Zeitpunkt, Bewegungsereignis h.

6.6 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Aus der Betrachtung der Mittelwerte kann man feststellen, dass sich drei der vier Sensoren über den gesamten Untersuchungszeitraum um einen Wert von maximal $0,2^\circ$ Richtung Norden geneigt haben. Außerdem ist bei den Neigungswinkeln von Sensor 2 und 4 das Verhalten erkennbar, dass die Neigung Richtung Norden in den Wintermonaten ausgeprägter ist. Die folgende Grafik (Abbildung 60) stellt den Amtmann, wie auch die Grafiken im vorigen Kapitel, von oben dar. Im Gegensatz zu den bisherigen Grafiken, wurden hier Zonen eingeteilt, für welche die Messungen der einzelnen Sensoren stehen. Abbildung 60 dient zur Veranschaulichung der Zusammenfassung der gesamten Bewegungsanalyse, wobei die Richtung der violett-rosa gefärbten Pfeile für eine etwas schwächere Ausprägung der gemessenen Neigungswinkel steht. Die Länge der Pfeile soll die tendenzielle Stärke der Neigungsbewegungen unterstreichen.

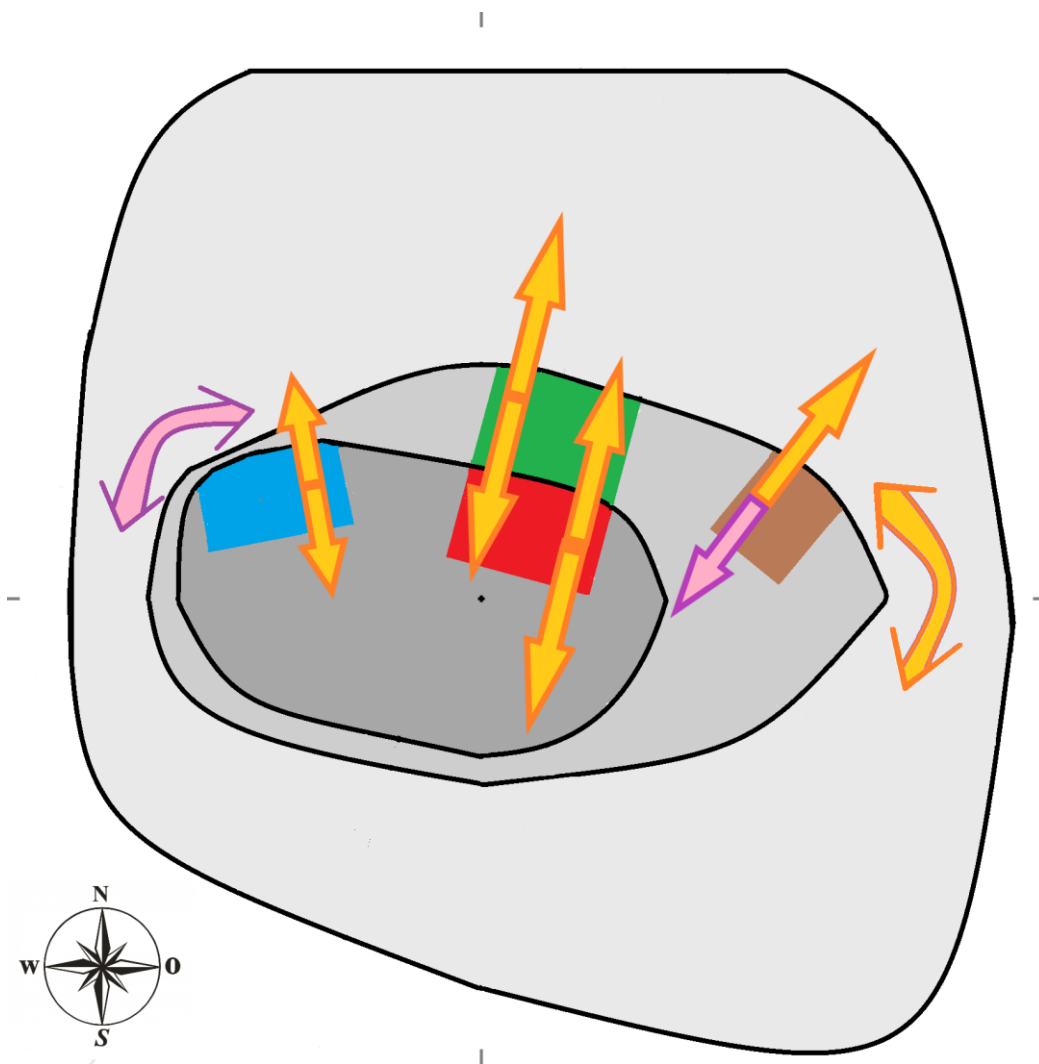


Abbildung 60: Grafische Darstellung des Amtmann von oben mit Neigungs- und Drehungsrichtungen.

Der Amtmann bewegt sich im grünen und roten Bereich permanent in Nord Süd Richtung hin und her, da der Neigungswinkel hier um ca. $2,75^\circ$ schwankt. Weniger stark schwankt (permanenter Wechsel der Messwerte) das Gestein im blauen und braunen Bereich, was daran liegen könnte, dass die Neigungsrichtung eine andere ist (siehe Kapitel – 5.1.1.2), weil die y-Achse von Sensor 1 (blauer Bereich) leicht gegen Westen geneigt ist und die y-Achse von Sensor 4 (brauner Bereich) gegen Osten geneigt ist. Es besteht die Möglichkeit, dass die Neigung Richtung Norden von Sensor 1 und 4 deswegen nicht so stark wahrgenommen wird. Im Gegensatz dazu steht die Schwankungsbreite des, die Drehung des Amtmann anzeigenden, Azimut. Hier bewegt sich der braune Bereich am stärksten hin und her ($0,45^\circ$). Auch der blaue Bereich bewegt sich minimal hin und her. Der rote und grüne Bereich hingegen drehen sich gar nicht. Durch diese Erkenntnis ist anzunehmen, dass sich in der Mitte des Felsturms, möglicherweise in der Nähe des roten bzw. grünen Bereichs, eine „Drehachse“ (bzw. ein

Rotationspunkt) befinden könnte, um die das Gestein leicht rotiert. Der Amtmann bewegt sich in der West- Ost Richtung bei weitem nicht so stark wie in der Nord- Süd Richtung. Die Bewegungen in dieser Ebene wurden in Abbildung 60 nicht beachtet.

Aus der Analyse der Bewegungsereignisse ist festzuhalten, dass die stärksten kurzfristigen Neigungen im braunen Bereich stattgefunden haben, und zwar genau in der Nordost-Südwest Richtung. Aus dieser Analyse ist außerdem zu erkennen, dass sich der blaue und der rote Bereich bei manchen Ereignissen in die gleiche Richtung bewegen, während sich der grüne und braune Bereich völlig anders verhalten. Der Grund dafür könnte sein, dass der blaue und rote Bereich sich auf einer anderen Höhe befinden und sich zwischen den Bereichen eine Kluft befindet. Es könnte sein, dass Sensor 1 und 2 ein ähnliches kinematisches Verhalten zeigen, da sie auf dem selben „Gesteinspaket“ befestigt sind. Gleiches könnte für Sensor 3 und 4 gültig sein. In Abbildung 61 sind die Klüfte und Risse, die sich zwischen und unterhalb der angebrachten Sensorknoten befinden, gut erkennbar.



Abbildung 61: Nördliche Seite des Amtmann (Quelle: Verfasser).

Aus den erhaltenen Ergebnissen ist nicht abzuleiten ob die Gefahr besteht, dass der Amtmann umkippen oder abbrechen könnte. Es kann nicht festgestellt werden, wo sich der Ausgangspunkt der Rotationsbewegungen befindet. Es ist aber anzunehmen, dass sich dieser irgendwo im oberen Bereich, also in der Nähe der Sensoren, befindet. Würde sich jedoch bei den Bewegungsereignissen der gesamte Felsturm bewegen (Rotationspunkt = Zentrum des lokalen Erdkoordinatensystems), gäbe es, auf Grundlage der aufgenommenen Neigungswinkel, im oberen Bereich des Amtmann (bei Sensor 4) eine horizontale Bewegung von bis zu 1,5 m in beide Richtungen (Norden sowie Süden). Dies ist jedoch insbesondere aufgrund der Breite des Amtmann im unteren Bereich nicht anzunehmen. Die Gefahr, dass der Amtmann irgendwo in der Mitte abbrechen könnte ist als größer einzustufen. Abschließend soll noch betont werden, dass es sich um ein sehr kompliziertes Bewegungsverhalten (wie aus den Abbildungen 44 bis 59 nachzuvollziehen ist) handelt, die mit genaueren Methoden untersucht werden müssten. Die genaue Kinematik ist mit den in dieser Arbeit erfolgten Analysen nicht ausreichen zu erfassen.

7. Interpretation

In diesem Kapitel werden die ausgewählten Bewegungsereignisse mit den Klimadaten (Quelle: ZAMG) verglichen. Es soll herausgefunden werden, ob zwischen den detektierten Ausreißern und den meteorologischen Faktoren ein Zusammenhang besteht. Im Anschluss an die eben beschriebene Analyse erfolgt die Überprüfung der Hypothesen.

Vorerst ist zu erwähnen, dass bereits aus dem Vergleich der Bewegungsereignisse mit Sensor 5 (Kapitel 6.3) ersichtlich wurde, dass es sich bei den Bewegungsereignissen wahrscheinlich nicht um klassische gravitative Massenbewegungen handelt. Weiters soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass es sich bei den langandauernden Auffälligkeiten (Kapitel 6.4), wegen der starken Synchronität und Periodizität in der YOZ- Ebene aller fünf Sensoren, vermutlich um einen technischen Fehler handelt.

7.1 Vergleich mit Klimadaten

In diesem Schritt, welcher der Interpretation der aufgenommenen Bewegungen dient, werden jeweils ein Diagramm des Verlaufes des Neigungswinkels γ (von Sensor 4) und anschließend relevante Klimadiagramme, des jeweils betroffenen Zeitraums, vorgestellt. Danach folgt jeweils eine kurze Zusammenfassung der meteorologischen Geschehnisse.

4.1.-5.1.2015 (a) und 9.1.-10.1.2015 (b)

Die Schneedecke hatte zum Zeitraum des Ereignisses a eine Höhe von 20 cm und die Temperatur betrug 0°C (Abbildung 64). In der Nacht vom 4. auf den 5. Jänner gab es um Mitternacht relativ hohe stündliche Windgeschwindigkeiten von 7-8 m/s (Abbildung 66). Gleichzeitig gab es hohe Niederschlagsmengen, in Form von Schnee (Abbildung 65). Zur selben Zeit kam es zu Bewegungsereignissen (Abbildung 62).

Von 9. Auf 10. Jänner stieg die Maximaltemperatur auf 18°C und die Minimaltemperatur auf 8°C, was dazu führte, dass die Schneedecke vollständig geschmolzen ist (Abbildung 64). Außerdem kam es in der Nacht vom 9. auf 10. Jänner zu Niederschlägen (Abbildung 65). Es ist von einem starken Sturm auszugehen, da über beide Tage hohe

Windgeschwindigkeiten herrschten. Das Maximum wurde am 10. Jänner um 6 Uhr, mit einer stündlichen Windgeschwindigkeit von über 9 m/s erreicht (Abbildung 66). Die Windspitze erreichte in dieser Zeit eine Geschwindigkeit von 27 m/s, was einer Windstärke von 10 Beaufort entspricht und als „schwerer Sturm“ klassifiziert wird. Zu dieser Zeit wurden auch die meisten Ausreißer detektiert (Abbildung 63).

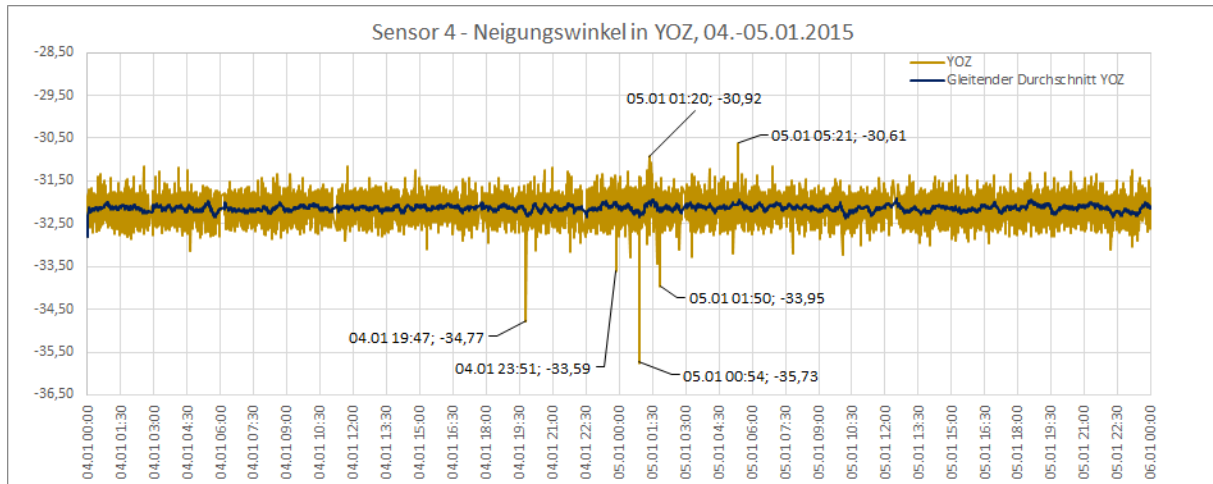


Abbildung 62: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungseignis a.

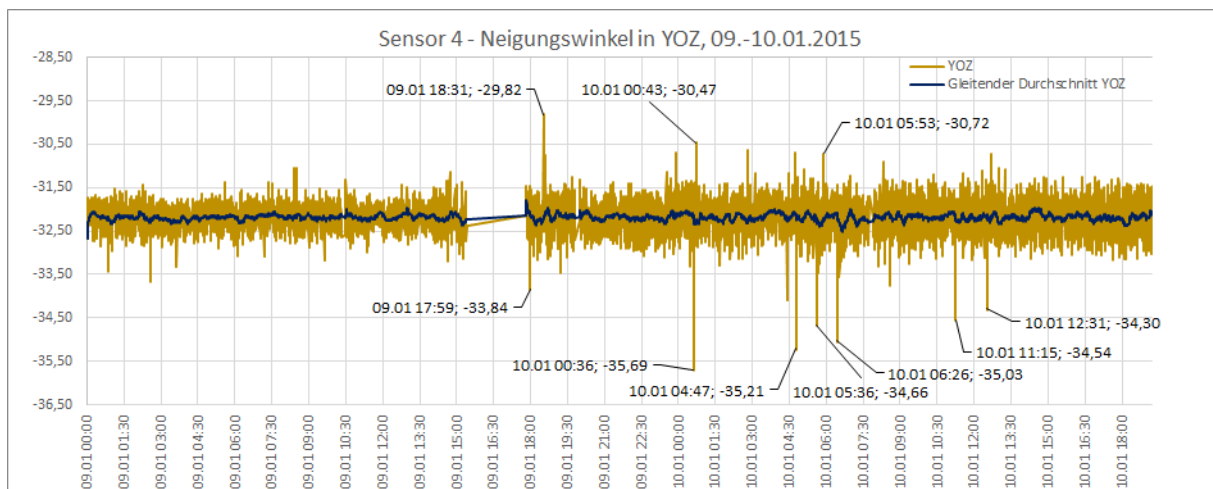


Abbildung 63: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungseignis b.

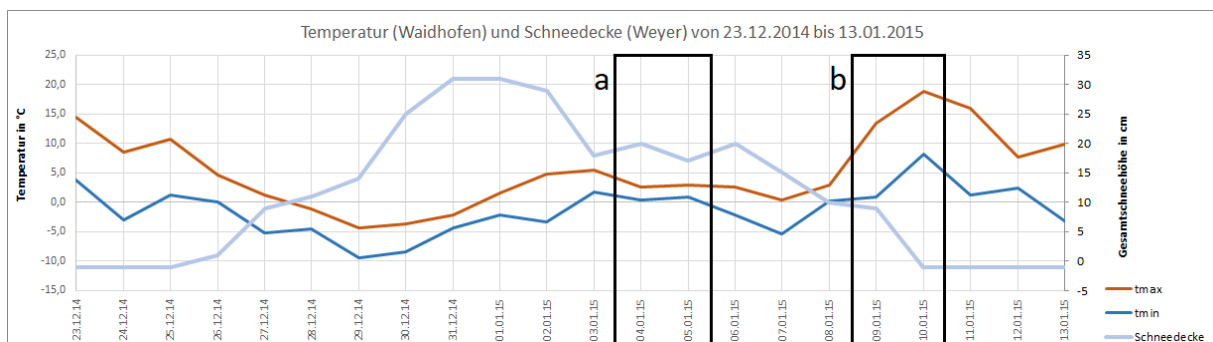


Abbildung 64: Temperatur in Waidhofen und Schneedecke in Weyer, Bewegungseignisse a und b (Quelle: ZAMG).

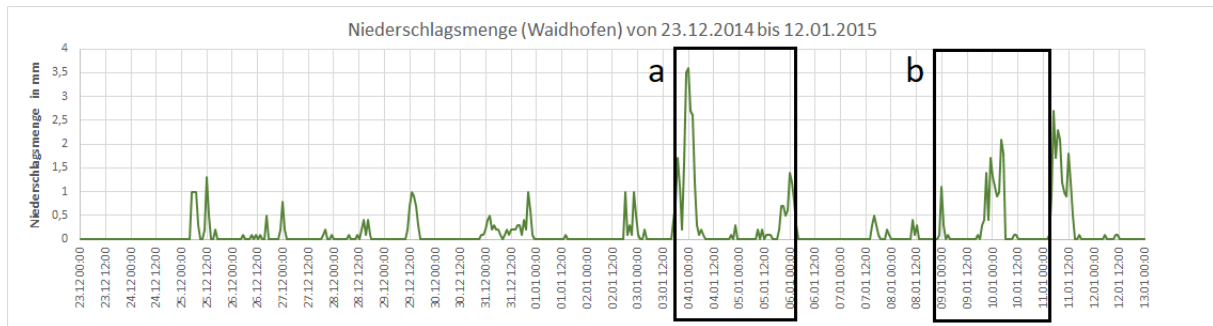


Abbildung 65: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsergebnisse a und b (Quelle: ZAMG).

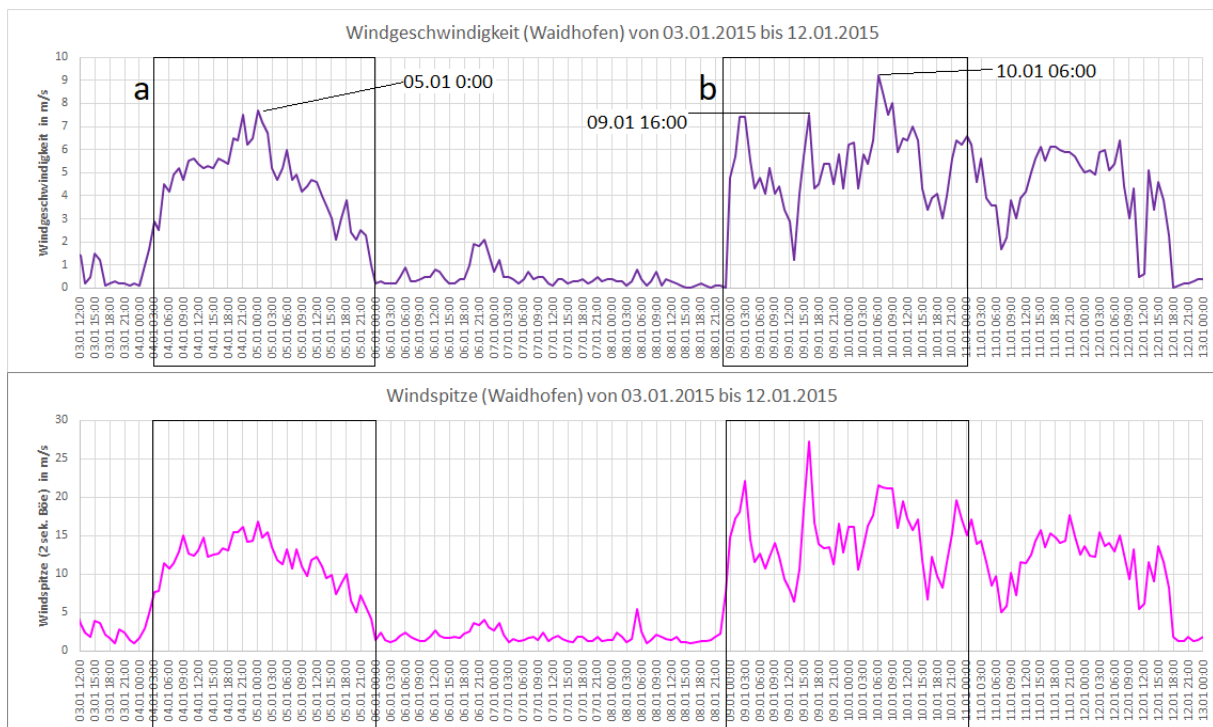


Abbildung 66: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsergebnisse a und b (Quelle: ZAMG)

31.3.-1.4.2015 (c)

Der 31. März und der 1. April 2015 scheinen „Schlechtwettertage“ gewesen zu sein, da ab der zweiten Hälfte des 31. März die Windgeschwindigkeiten plötzlich stark angestiegen und erst am späten Nachmittag des 1. April wieder zurückgegangen sind (Abbildung 68). Die größten Windgeschwindigkeiten herrschten am 31.3. von 12 bis 15 Uhr (Abbildung 68). In diesem Zeitraum, in dem auch die meisten Ausreißer detektiert wurden (Abbildung 67), erreichte die Windgeschwindigkeit eine Spitze von 9 Beaufort, was als „Sturm“ klassifiziert wird. Bei solchen Windspitzen kann es zum Abheben von Dachziegeln kommen.

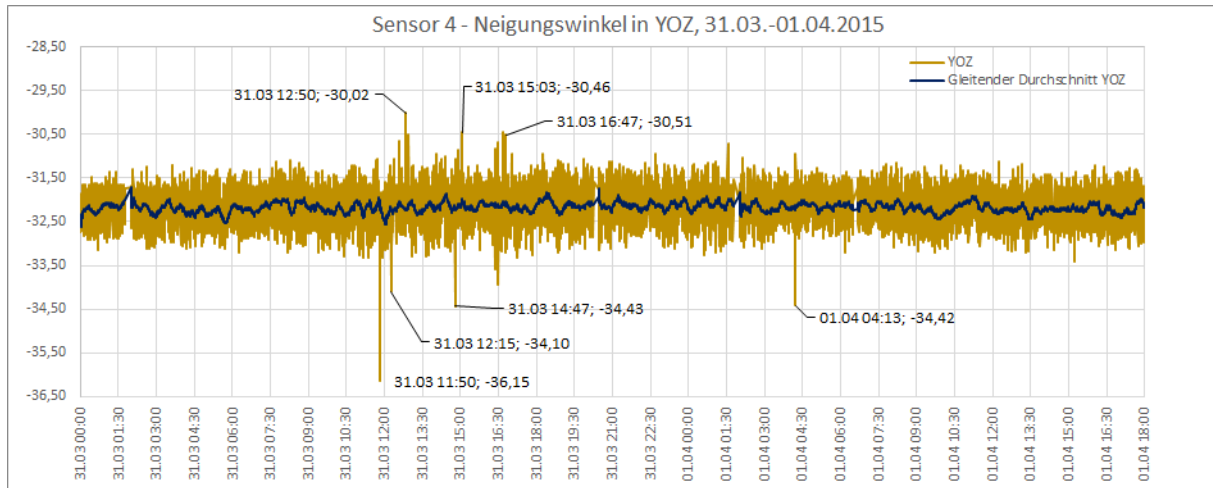


Abbildung 67: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis c.

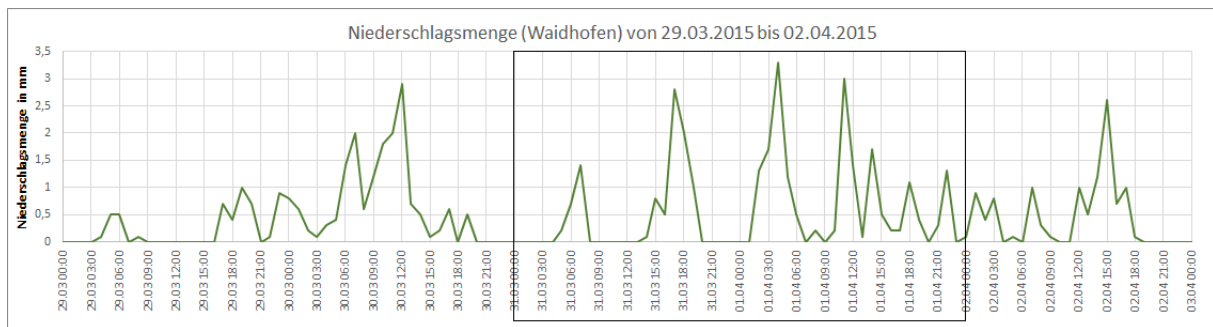


Abbildung 68: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis c (Quelle: ZAMG).

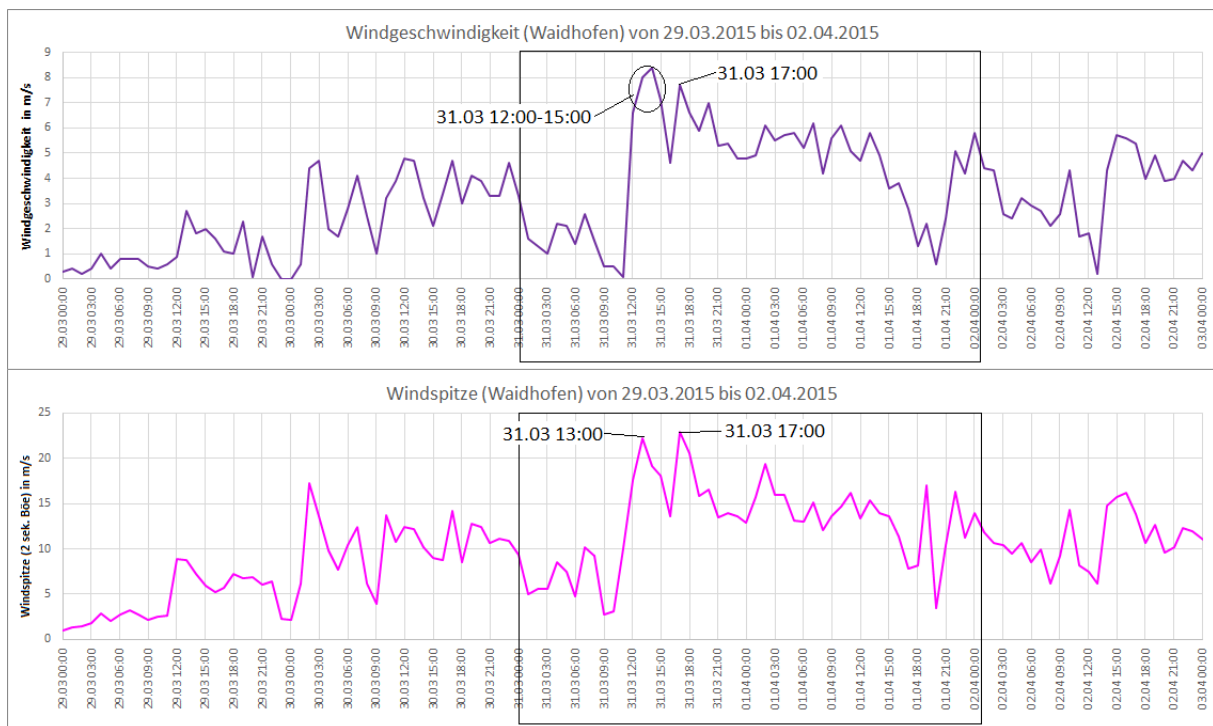


Abbildung 69: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis c (Quelle: ZAMG)

25.6.2016 (d)

Am 25. Juni 2016 sowie an den Tagen davor gab es keinen Niederschlag und die stündliche Windgeschwindigkeit war mit einem Maximalwert von 4,5 m/s auch nicht so hoch wie bei allen anderen Ereignissen, jedoch kam es um 20 Uhr zu einer sehr starken Windspitze mit einem Wert von 21 m/s (Abbildung 71). Genau zu dieser Zeit wurden ebenfalls sehr starke Bewegungsereignissen detektiert (Abbildung 70).

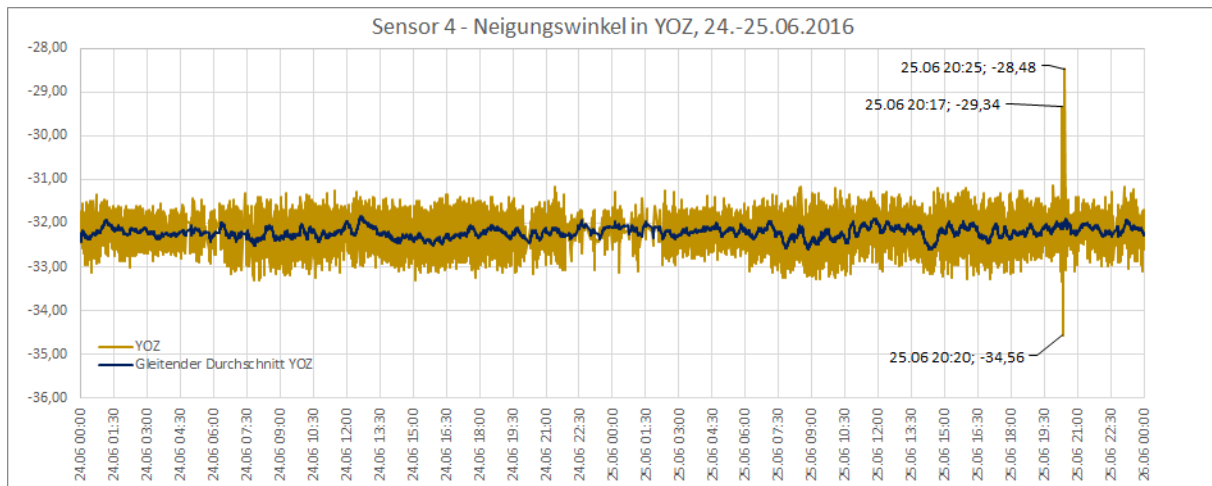


Abbildung 70: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis d.

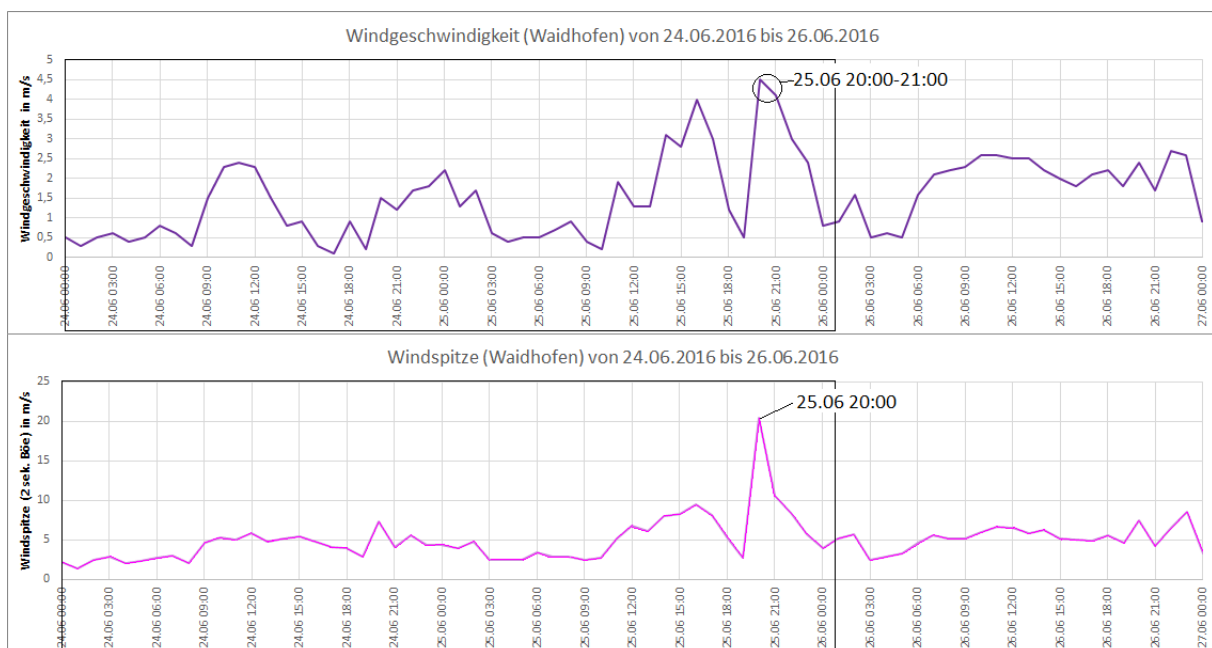


Abbildung 71: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis d (Quelle: ZAMG)

4.1.2017 (e)

Am 4. Jänner 2017 herrschten Temperaturen um 0°C und die Schneedecke war 5 cm hoch (Abbildung 73). In den frühen Morgenstunden stieg die stündliche Windgeschwindigkeit rapide an bis sie um 8 Uhr einen Wert von 5,5 m/s erreichte. Rund um 8 Uhr wurde eine Windspitze mit einer Geschwindigkeit von 17m/s gemessen (Abbildung 75). Zur selben Zeit begannen Niederschläge einzusetzen (Abbildung 74). In der Zeit von 8 bis 9 Uhr wurden Bewegungsereignisse detektiert (Abbildung 72).

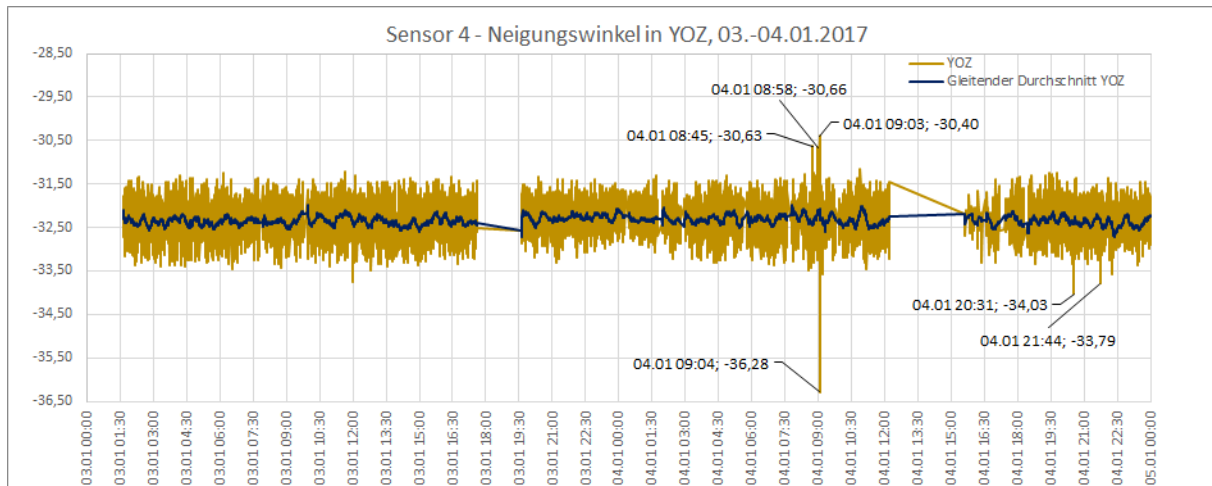


Abbildung 72: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis e.

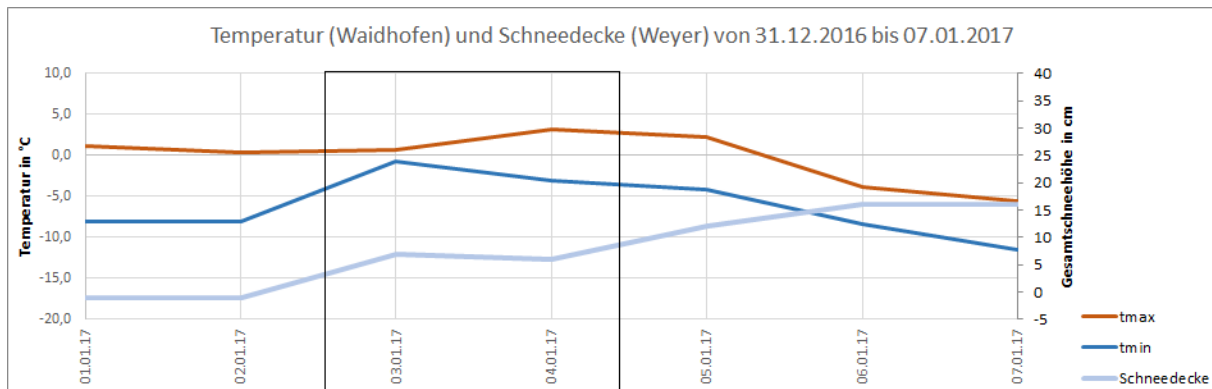


Abbildung 73: Temperatur in Waidhofen und Schneedecke in Weyer, Bewegungsereignis e (Quelle: ZAMG).

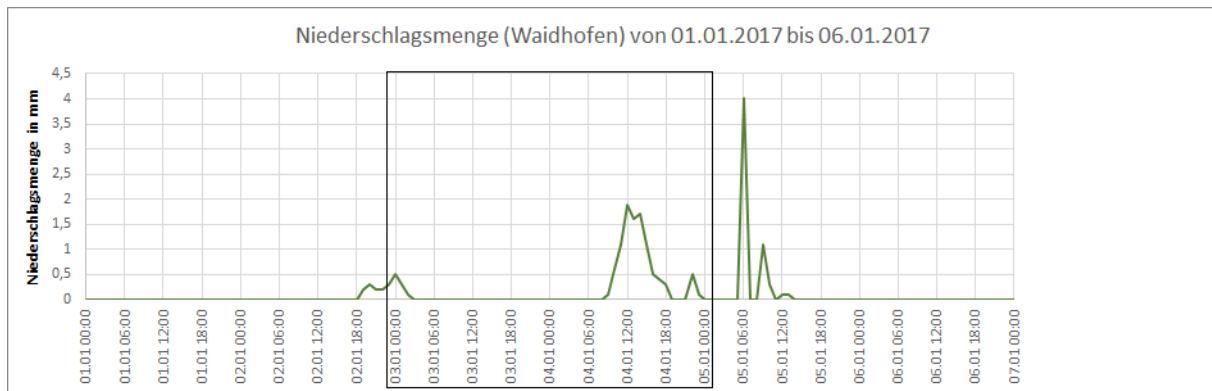


Abbildung 74: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignisse (Quelle: ZAMG).

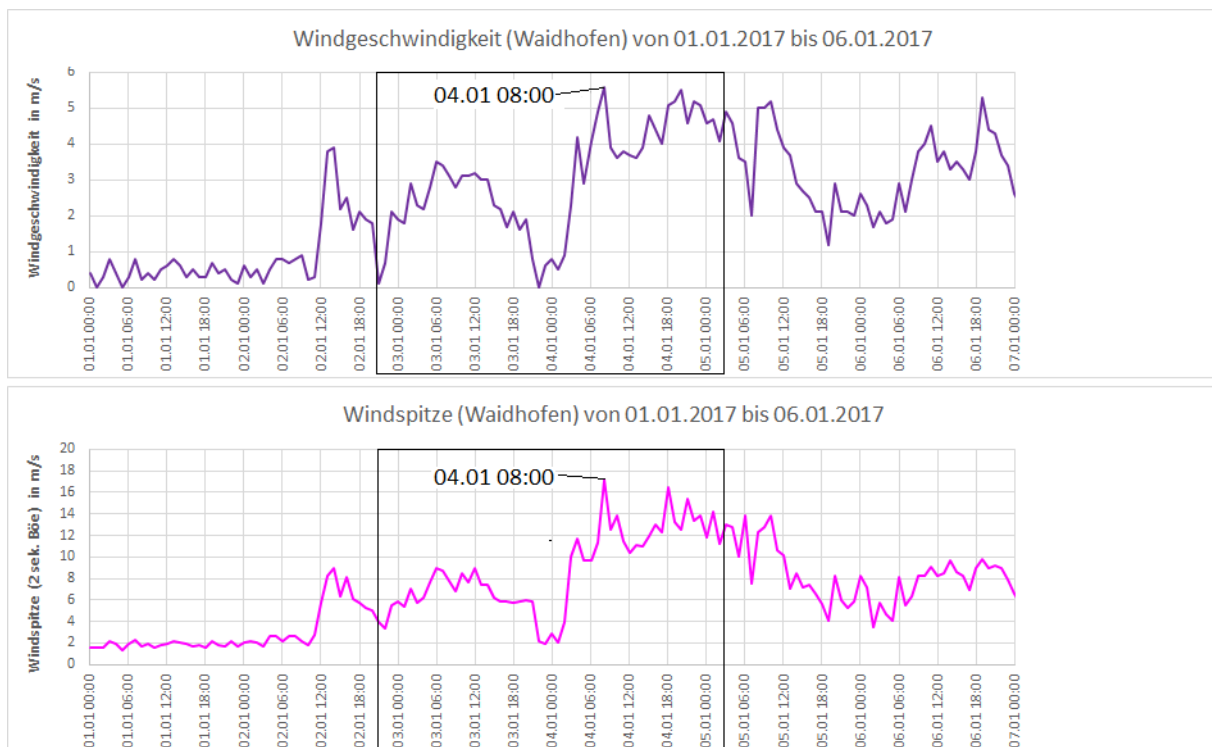


Abbildung 75: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignisse (Quelle: ZAMG)

23.2.-24.2.2017 (f)

In den Tagen vor dem 23. Februar kam es zu starken Niederschlägen in Form von Regen (Abbildung 77). Generell herrschten in diesem Zeitraum hohe stündliche Windgeschwindigkeiten vor. Die höchsten Windspitzen, von 16 m/s und über 18 m/s wurden am 23. Februar um 9 Uhr sowie am 24. Februar von 3 bis 6 Uhr gemessen (Abbildung 78). Genau zu diesen Zeiten wurden auch die Bewegungsereignisse aufgenommen (Abbildung 76).

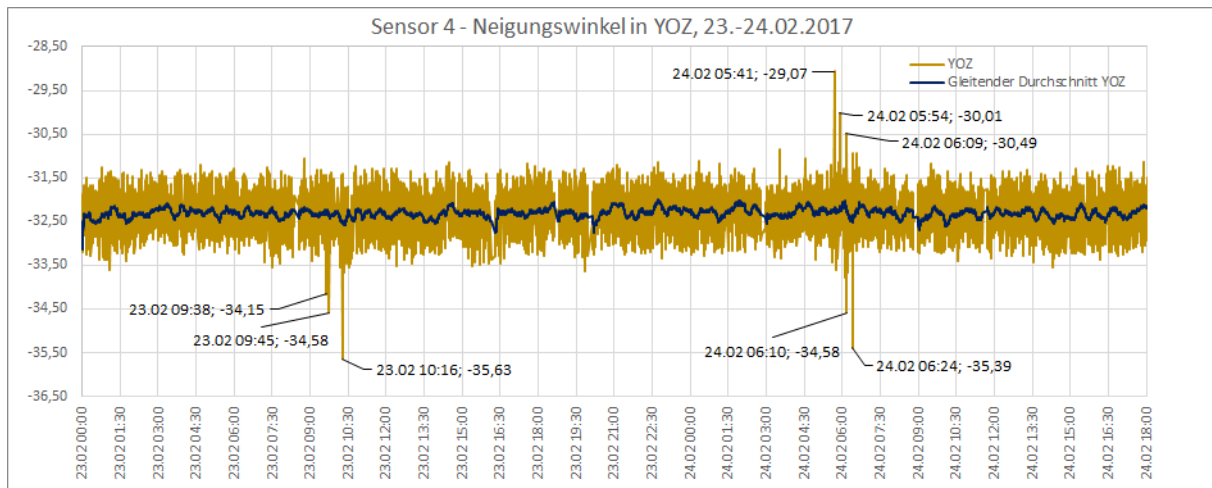
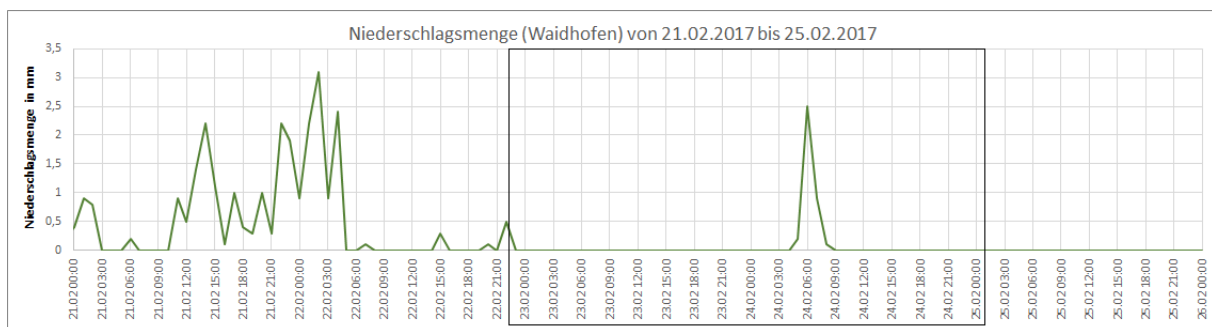
Abbildung 76: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis f.

Abbildung 77: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis f (Quelle: ZAMG).

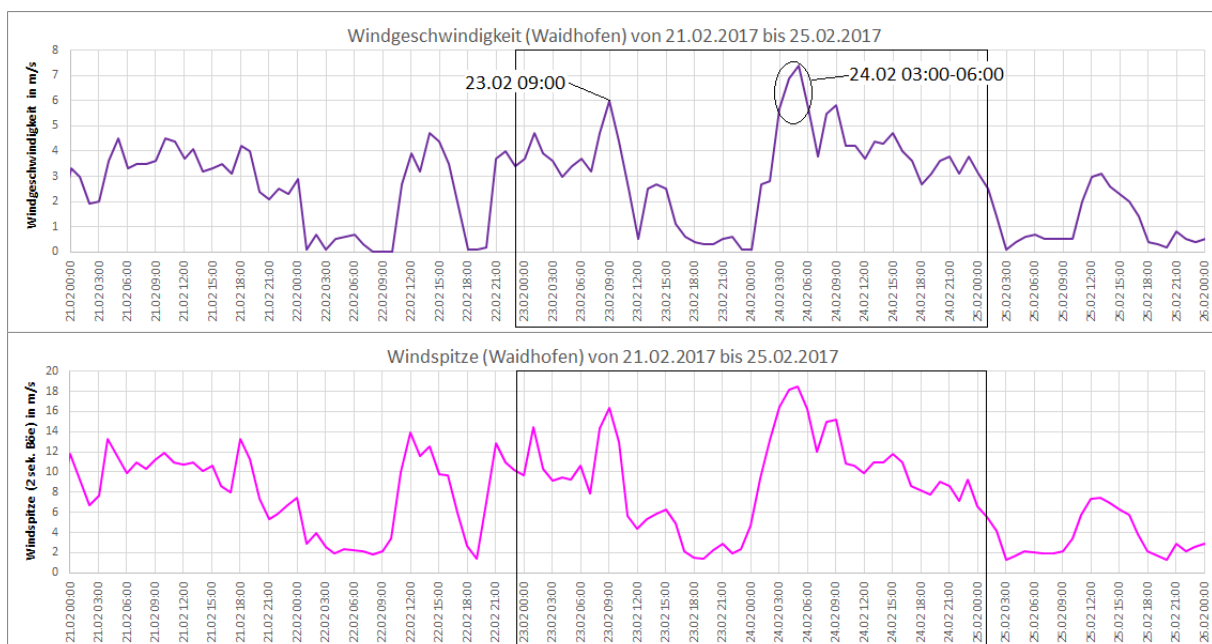


Abbildung 78: : Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis f (Quelle: ZAMG)

18.3.2017 (g)

In der Nacht von 17. auf 18. März gab es starken Niederschlag (Abbildung 80). Am 18. März kam es ab 9 Uhr erneut zu starken Niederschlägen, während die stündliche Windgeschwindigkeit immer weiter nach oben kletterte. Die Geschwindigkeit des Windes erreichte von 12 bis 14 Uhr, mit Windspitzen von 17 bis 19 m/s, ihre maximale Ausprägung (Abbildung 81). Die meisten Ausreißer passierten von 12 bis 13 Uhr (Abbildung 79).

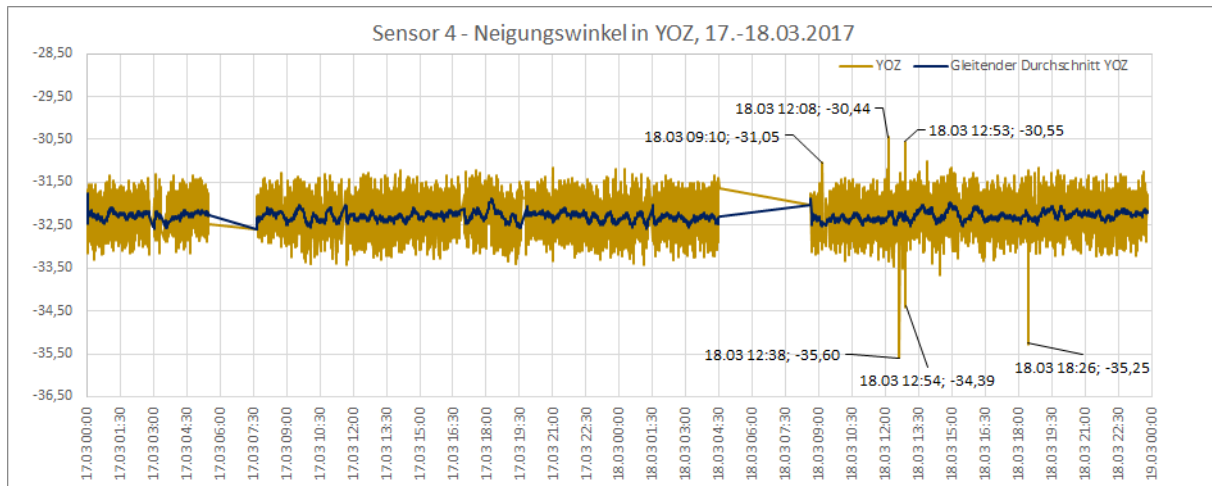


Abbildung 79: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis g.

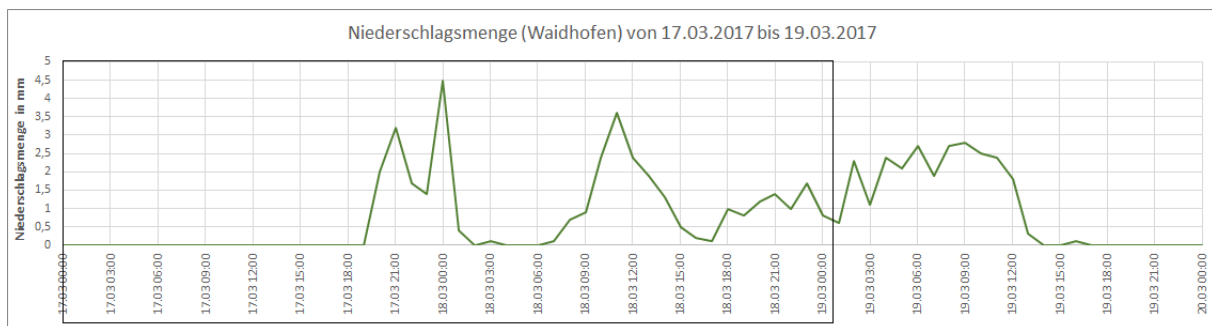


Abbildung 80: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis g (Quelle: ZAMG).

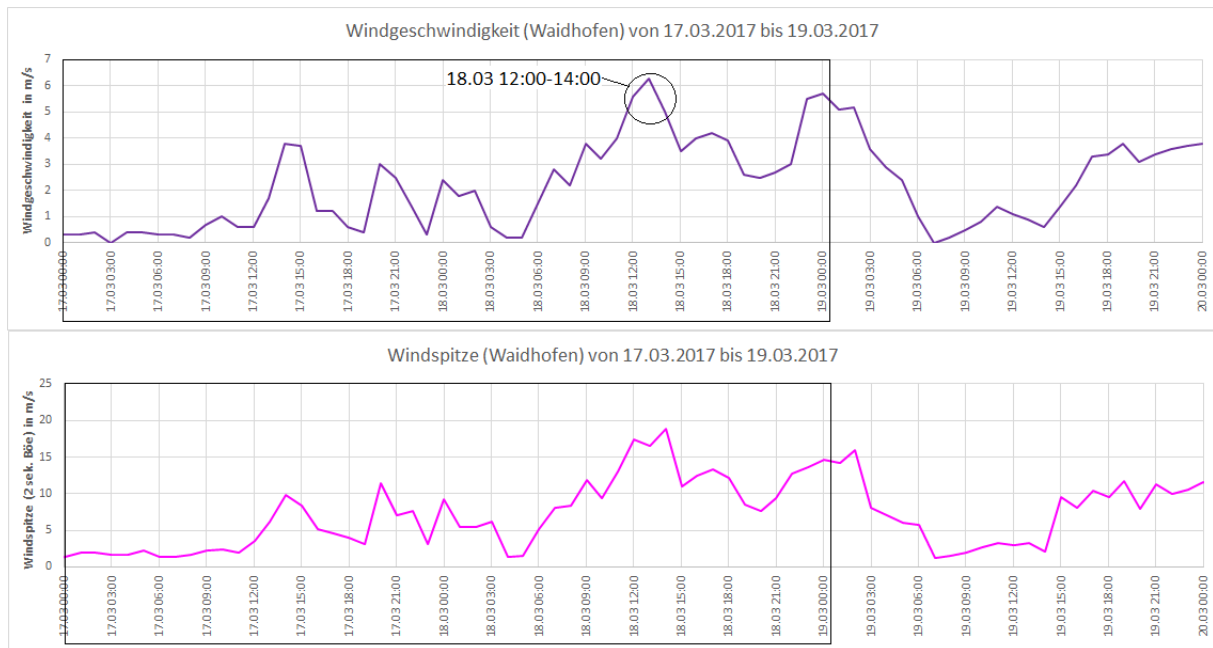


Abbildung 81: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis g (Quelle: ZAMG)

27.10.-28.10.2017 (h)

Am 27. Oktober gab es von 4 bis 9 Uhr starken Niederschlag in Form von Regen. Um 6 sowie um 8 Uhr wurden stündliche Niederschlagsmengen von über 5mm gemessen. Einige Stunden später regnete es noch stärker, da um 12 Uhr eine stündliche Niederschlagssumme von über 6 mm aufgezeichnet wurde (Abbildung 83). Zur selben Zeit erreichte auch die stündliche Windgeschwindigkeit einen Wert von über 4 m/s (Abbildung 84). Von 12 bis 13 Uhr wurden beim Amtmann einige Bewegungen festgestellt (Abbildung 82). Im weiteren Verlauf des Tages regnete es nicht mehr sehr viel, jedoch stieg die Windgeschwindigkeit ab 21 Uhr auf über 5 m/s und blieb bis 00:00 vom 29.10. auf ähnlichen Werten. Jedoch wurden in dieser Zeitspanne keine Ausreißer festgehalten.

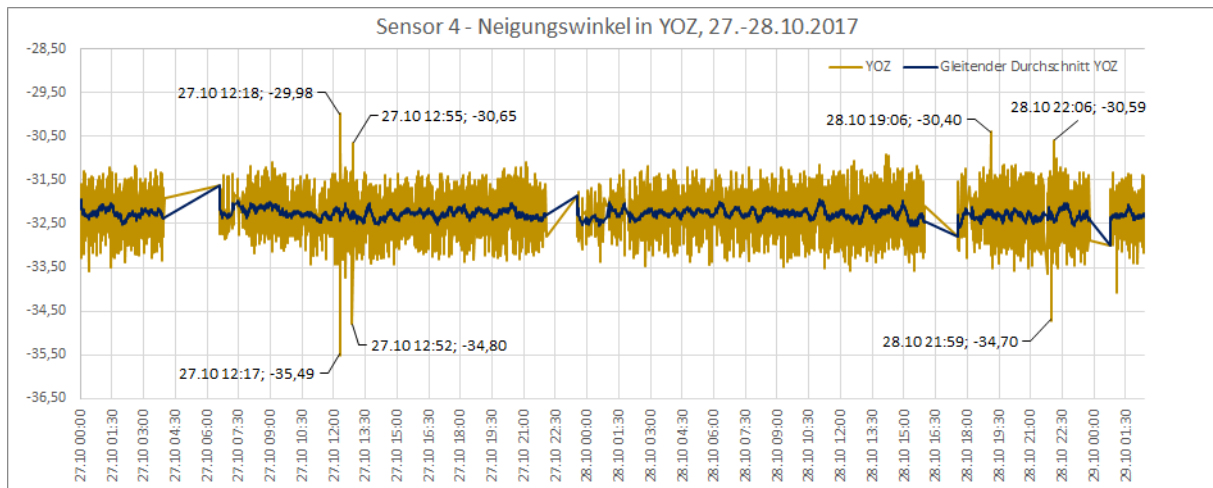


Abbildung 82: Neigungswinkel γ von Sensor 4, Bewegungsereignis h.

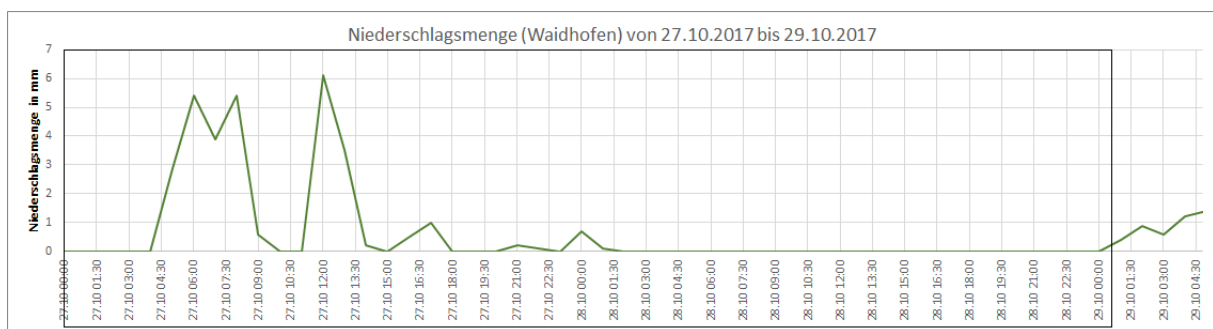


Abbildung 83: Stündliche Niederschlagsmenge in Waidhofen, Bewegungsereignis h (Quelle: ZAMG).

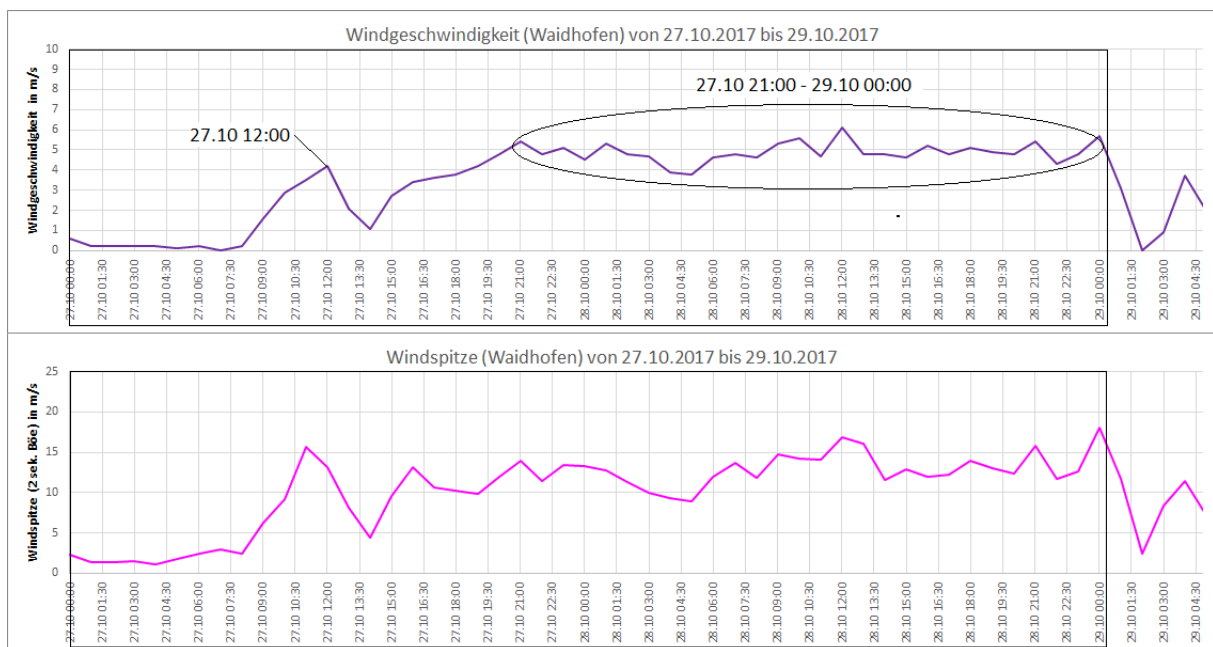


Abbildung 84: Stündliche Windgeschwindigkeit und Windspitze in Waidhofen, Bewegungsereignis h (Quelle: ZAMG)

7.2 Ursachen der Bewegungsereignisse

Bei allen untersuchten Bewegungsereignissen herrschten überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeiten oder Windspitzen, aus Westen kommend, vor. Erwähnenswert ist außerdem, dass es in fast allen Zeiträumen vor oder während der Ereignisse zu mehr oder weniger starken Niederschlägen gekommen ist. Der direkte und unübersehbare Zusammenhang zwischen detektierten Ausreißern und hohen Windspitzen lässt darauf schließen, dass Windstürme bzw. starke Böen der Hauptauslöser für Bewegungen des Amtmann sind. Es besteht die Möglichkeit, dass es bei gleichzeitigen starken Niederschlägen möglicherweise zu ausgeprägteren Bewegungen kommt. Dieser Zusammenhang ist aber durch diese Analyse nicht verifizierbar. Mit den Erkenntnissen aus dem Vergleich mit den Klimadaten kann eine klassische gravitative Massenbewegung, zumindest im Fall der detektierten Bewegungsereignisse, ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Neigungswinkelveränderungen in der in Abbildung 60 gekennzeichneten Südwest- Nordost Richtung ab einer gemessenen Windspitze von 16 bis 17m/s begonnen haben ein ungefähres Ausmaß von maximal 2-3° in jede der beiden Neigungsrichtungen aufzuweisen. Die starken Bewegungen, also ungefähr 4-5° in jede Richtung, wurden bei gemessenen Windspitzen erst ab ca. 20 m/s aufgenommen. Daraus kann abgeleitet werden, dass bestimmte Bereiche des Amtmann schon ab einer Windspitze von 15 m/s leicht zu schwanken beginnen. Diese Windgeschwindigkeit entspricht einem Wert von 7 Beaufort, was der Klassifizierung „steifer Wind“ entspricht. Windgeschwindigkeiten von 20,8 bis 24,4 m/s werden als „Sturm“ bzw. einem Stärkegrad von 8 Beaufort zugeteilt. Höhere Windspitzen wurden im Zeitraum von November 2014 bis Dezember 2017, außer am 9.1.2015 (27 m/s), in Waidhofen an der Ybbs nicht gemessen.

7.3 Überprüfung der aufgestellten Hypothesen

Im Folgenden die zuvor aufgestellten Hypothesen der Arbeit, aufgrund der Ergebnisse der Datenanalyse und des Vergleichs mit Klimadaten, überprüft und anschließend verifiziert oder falsifiziert.

Hypothese 1: *Beschleunigungssensoren sind dafür geeignet, Bewegungen eines Felssturms zu analysieren.*

Dreiachsige Beschleunigungssensoren können über die Wirkung der Gravitation die Erdbeschleunigung erfassen. Dabei nimmt jede Achse des Sensors den jeweiligen Anteil der Erdbeschleunigung auf, durch den sie (über die Gravitation) beeinflusst wird. Aus der Beziehung, die die drei Achsen zueinander haben und der Tatsache, dass die Erdbeschleunigung nur in Richtung Erdmittelpunkt wirkt, kann mithilfe von Winkelfunktionen die momentane Neigung eines Beschleunigungssensors exakt berechnet werden. Je nach Messintervall, mit dem ein Sensor die Daten (also den Anteil der Erdbeschleunigung pro Achse) aufnimmt, kann ein Verlauf seiner Neigungsveränderung rekonstruiert werden. Diese Methode ist überall dort sinnvoll einzusetzen, wo Positionsveränderung über einen längeren Zeitraum untersucht werden sollen. Erfolgt eine Bewegung bzw. Positionsveränderung nicht mit einer gleichzeitigen Winkelveränderung, so macht dieses Verfahren keinen Sinn. Bei Felstürmen, die drohen zu kippen, abzubrechen oder dergleichen kann dieses Verfahren verwendet werden, da diese Bewegungen mit einer gleichzeitigen Winkelveränderungen erfolgen. Jedoch wäre es für die Sinnhaftigkeit des Verfahrens sehr nützlich, einen Rotationspunkt zu kennen, von dem die Winkelveränderung ausgeht. Ist dieser Punkt unbekannt, so ist es schwer abzuschätzen, ob und wie weit sich der Sensor von seinem ursprünglichen Standpunkt entfernt hat. Durch die Datenanalyse eines solchen Geomonitorings, das auf Neigungsmessung mithilfe der Schwerkraft basiert, kann bestimmt werden in welche Richtung sich ein Sensor gedreht hat. Somit kann Hypothese 1 verifiziert werden.

Hypothese 2: *Die Ursachen für die Bewegungen des Amtmanns lassen sich direkt durch den Vergleich mit aufgezeichneten lokalen Ereignissen/Faktoren, wie meteorologische Einflüsse (z.B.: extreme Niederschlagsereignisse) oder geophysikalische Faktoren (z.B.: Erdbeben), erklären.*

Um die Ursachen für detektierte Bewegungen zu finden, sollte man vorerst sicherstellen, ob sich nur das unter Untersuchung stehende Objekt oder auch seine Umgebung bewegt. Im Fall des Amtmann hat sich seine Umgebung zu den gleichen Zeitpunkten auch mitbewegt, wodurch ausgeschlossen werden kann, dass sich nur der Felsturm bewegt hat. Diese Erkenntnis erlaubt einen Ausschluss von einigen auslösenden Faktoren. Es kann sich bei den detektierten Bewegungen beispielsweise nicht um Bewegungen handeln, die allein durch Niederschlag oder Schneeschmelze ausgelöst worden sind. Durch den Vergleich mit meteorologischen Daten wurde herausgefunden, dass die Bewegungen durch hohe Windgeschwindigkeiten ausgelöst wurden, womit Hypothese 2 ebenfalls verifiziert werden kann.

8. Zusammenfassung

Gravitative Massenbewegungen sind der Schwerkraft folgende Fels-, Schutt- oder Feinsubstrat-Verlagerungen (vgl. GLADE und STÖTTER 2007). Beim Ablauf einer gravitativen Massenbewegung können viele Faktoren eine Rolle spielen. Grundsätzlich wird zwischen vorbereitenden, prozessauslösenden und kontrollierenden Faktoren unterschieden. Vorbereitende Faktoren (Verwitterung, schmelzender Permafrost, Entwaldung, ...) beeinflussen die Stabilität des Materials, wobei die Massenbewegung noch nicht stattfindet. Prozessauslösende Faktoren (intensive Niederschläge, Sprengungen, ...) hingegen sind die direkte Ursache, also Auslöser von gravitativen Massenbewegungen und die kontrollierenden Faktoren beeinflussen den Ablauf der Bewegung. Die Scherfestigkeit, und damit die Stabilität, eines Hanges ist von seiner Neigung, der Kohäsion sowie des Scherwinkels des Materials und des vorliegenden Porenwasserdrucks abhängig. Die Stabilität eines Hanges kann durch einen Sicherheitsfaktor (FoS) ausgedrückt werden, der das Verhältnis zwischen Scherfestigkeit und Scherspannung, also zwischen Widerstands- und Antriebskräften, angibt. Der Bewegungsablauf einer gravitativen Massenbewegung kann sich wie ein einzelner Bewegungstyp (Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen) verhalten oder er setzt sich aus mehreren Bewegungstypen zusammen.

Drahtlose Sensorknotennetzwerke bestehen aus mehreren kabellos miteinander verbundenen Sensorknoten, die Messungen durchführen und Daten erzeugen können, und einem Gateway, der die elektronischen Signale der Messungen zu Daten verarbeitet und diese zu einem Zentralrechner senden kann. Ein solcher Prozess kann vollautomatisch erfolgen und die Daten können in Echtzeit abgerufen werden.

Im Fall dieser Diplomarbeit sind, die eben erwähnten Sensorknoten mit dreiachsigen kapazitiven MEMS- Beschleunigungssensoren bestückt. Diese Sensoren sind nur ein paar Millimeter groß, robust, preisgünstig und verfügen über standardisierte Schnittstellen. Kapazitive Beschleunigungssensoren messen die Änderung der Kapazität aufgrund einer durch die Erdbeschleunigung verursachten Auslenkung einer Probenmasse. Da diese Änderung in jeder Achse gemessen wird, gibt der Beschleunigungssensor drei axiale Anteile, der nach unten gerichteten Erdbeschleunigung, aus. Aus den gemessenen axialen Werten der Erdbeschleunigung ist es möglich, die Neigung der Sensorknoten im dreidimensionalen Raum berechnen zu können.

Der Amtmann, ein 40 m hoher Felsturm aus Rauhwacke, befindet sich im niederösterreichischen Waidhofen an der Ybbs, direkt im Ybbstal. Zwischen der Ybbs und dem Amtmann verläuft die Ybbstal Straße, wodurch für vorbeifahrende Autos vom Amtmann eine Gefahr, durch Umkippen oder Abbrechen von Felsbrocken, ausgehen könnte. Um Bewegungen des Amtmann festhalten und damit eine mögliche Gefahr einschätzen zu können wurde im Zuge des Projekts NoeSLIDE im Jahr 2014 ein drahtloses Sensorknotennetzwerk mit Beschleunigungssensoren installiert. Das Netzwerk besteht aus 4 Sensorknoten, die am Amtmann befestigt wurden und einem Sensorknoten, der an einem nahe gelegenen Strommast angebracht wurde.

Für die Analyse der im Zeitraum von November 2014 bis Dezember 2017 aufgenommenen Daten war es notwendig, das Koordinatensystem der Sensoren mit einem Erdkoordinatensystem zu vergleichen. Durch die Anwendung von Rotationsmatrizen ist es möglich, die Neigung der einzelnen Sensoren, bezogen auf das fix positionierte Erdkoordinatensystem, zu berechnen. Bei der statistischen Datenauswertung wurden die Rohdaten mithilfe der Programmiersprache PYTHON in mehreren Schritten ausgewertet. Der Ablauf dieser Analyse beinhaltete die Berechnung der Drehungs- bzw. Neigungswinkel für jeden Messpunkt, die Auswertung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkel, der Feststellung der Stärke und der Zeitpunkte von außergewöhnlichen Messungen (Ausreißer) sowie anderen Verfahren. Außerdem mussten die ausgewerteten Daten in eine Form gebracht werden, die es erlaubt, mit einer Tabellenkalkulationssoftware weiter zu machen, sprich die grafische Auswertung durchzuführen. Im Zuge der grafischen Datenauswertung wurden, aus den vorher ausgewerteten Daten, Diagramme erstellt. Die Diagramme wurden in einer Form ausgegeben, die es ermöglichte durch manuelles (nicht computergestütztes) Auswerten die wesentlichen Winkelveränderungen aufzuspüren und in Tabellen einzutragen. Durch gezieltes Filtern der detektierten Ereignisse wurden acht wesentliche Bewegungsereignisse ausgewählt. Um die Bewegungen der Sensorknoten während dieser acht Ereignisse nachvollziehen zu können, wurden Zeichnungen angefertigt, in welchen die, während der Ereignisse, gemessenen Drehungs- bzw. Neigungsrichtungen der Sensoren eingetragen wurden.

Die Bewegungsanalyse hat ergeben, dass sich die Drehungs- bzw. Neigungswinkel der Sensorknoten über den Verlauf des Untersuchungszeitraums kaum verändert haben. Bei den ausgewählten Bewegungsereignissen jedoch haben, in einem der vier untersuchten Bereiche des Amtmann, kurzfristige Neigungsveränderungen von bis zu

5° stattgefunden. Es ist jedoch festzuhalten, dass mit den verwendeten Methoden keine genauen Bewegungsabläufe analysiert werden konnten.

Durch die Interpretation der Bewegungsereignisse, sprich dem Vergleich mit den Klimadaten, konnte ein eindeutiger Auslöser der Bewegungen festgestellt werden. Die Ursache der kurzfristigen Neigungsveränderungen liegt in überdurchschnittlich starken Windböen. Auffällige Bewegungen haben stattgefunden, während, an der Klimastation Waidhofen an der Ybbs, Windspitzen ab 15 m/s gemessen wurden.

9. Perspektive

9.1 Optimierung des aktuellen Systems

Die Sensorknoten sind aktuell nur über eine Seite der Metalplatte am Gestein befestigt. Ein Verbesserungsvorschlag wäre, Metallplatten zu verwenden, die auf beiden Seiten gebogen sind und über Bohrungen verfügen. Damit könnte man die Sensorknoten beidseitig am Gestein befestigen und somit mehr Stabilität garantieren. Damit wäre folglich ausgeschlossen, dass die Sensoren eine mögliche Biegung oder Schwingung der Metallplatte mit aufnehmen.

9.2 Bessere Erfassung der Kinematik

9.2.1 Mehr Beschleunigungssensoren

Momentan sind die Sensorknoten in einem, offensichtlich, stark gefährdeten Gebiet, nämlich in oberen Bereich des Amtmann, befestigt. Der Grund dafür, liegt höchstwahrscheinlich darin, dass der Felsturm in diesem Bereich, nach oben hin, deutlich schmaler wird und sich dort auch einige stark ausgeprägte Klüfte befinden. Jedoch wäre es interessant herauszufinden, ob sich in einem etwas tiefergelegenen Bereich auch Bewegungen abspielen. Zum Beispiel könnte man unter der Kluft von, dem sich am stärksten bewegendem, Sensor 4 einen weiteren Sensor anbringen. So würde sich überprüfen lassen ob in der Kluft, die direkt unter dem Sensor 4 liegt ein Rotationspunkt vorliegt. Mit dieser Verbesserung kann Bewegungsverhalten des Amtmann allerdings auch nicht vollständig untersucht werden.

9.2.2 Installation von Laserdistanzmessgeräten

Um eine genauere Analyse des Bewegungsverhaltens der Gesteinsmassen durchführen zu können, benötigt es eine weitere Messgröße. Würde man die Distanzen kennen, um die sich bestimmte Punkte am Amtmann, während den detektierten Winkelveränderungen der Gesteinsoberfläche, verändern, so könnte man die Kinematik der Abschnitte des Felsturms besser bestimmen. Angenommen, ein Oberflächenpunkt, von dem man die räumliche Positionsveränderung bei einem Bewegungsereignis wissen möchte, befindet sich (Abstand ist bekannt) oberhalb eines Sensors. Wird nun zur

selben Zeit eine Winkelveränderung und eine Distanzveränderung gemessen, so können in weiterer Folge Rückschlüsse über das Rotationsverhalten des Bereichs zwischen Sensor und Messpunkt geschlossen werden. Auf jeden Fall würde eine solche Erweiterung die Möglichkeit schaffen, einige grundsätzliche Fragen an die Kinematik des Amtmann zu klären.

Zu realisieren wäre dieser Ansatz mit Laserdistanzometern, die relativ günstig zu erwerben sind. Ein Laserdistanzmessgerät misst die Distanz zwischen sich selbst und einem Reflektor durch Impulsmessverfahren. Das Messgerät muss an einem unbewegten Ort aufgestellt werden. Ein Reflektor wird an einem, zu untersuchenden, Punkt an der Gesteinsoberfläche befestigt. Die Messgenauigkeit der Laserdistanzmessung kann durch Witterungsbedingungen (schlechte Sicht) beeinflusst werden. (ZANGERL et al. 2008)

Das Verfahren der Laserdistanzmessung kann einfach automatisiert werden und würde sich daher auch gut für die Weiterentwicklung des bestehenden Monitoringsystems hin zu einem Frühwarnsystem eignen.

9.2.3 Terrestrische Vermessung mittels Servotachymeter

Eine weitere Möglichkeit wäre eine Vermessung mit einem Tachymeter. Diese Variante ist als wesentlich aufwändiger und teurer einzustufen, jedoch könnte man damit die Kinematik gut erfassen.

Mit einem Servotachymeter ist es möglich automatische terrestrische Messungen durchzuführen. Man kann damit Richtungen, Distanzen sowie Horizontal und Vertikalwinkel messen. Aus den, mit dem Servotachymeter aufgenommenen, Messgrößen können Lage von Punkten in Form von dreidimensionalen Koordinaten bestimmt werden. An den Stellen, die untersucht werden sollen, müssen Reflektoren angebracht werden (Abbildung 85). Diese Stellen müssen vom Tachymeter erfasst werden können, d.h. es muss eine Sichtverbindung vorhanden sein. Der Tachymeter muss, um korrekte Messungen liefern zu können, in einem Bereich stehen, der sich nicht bewegt. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

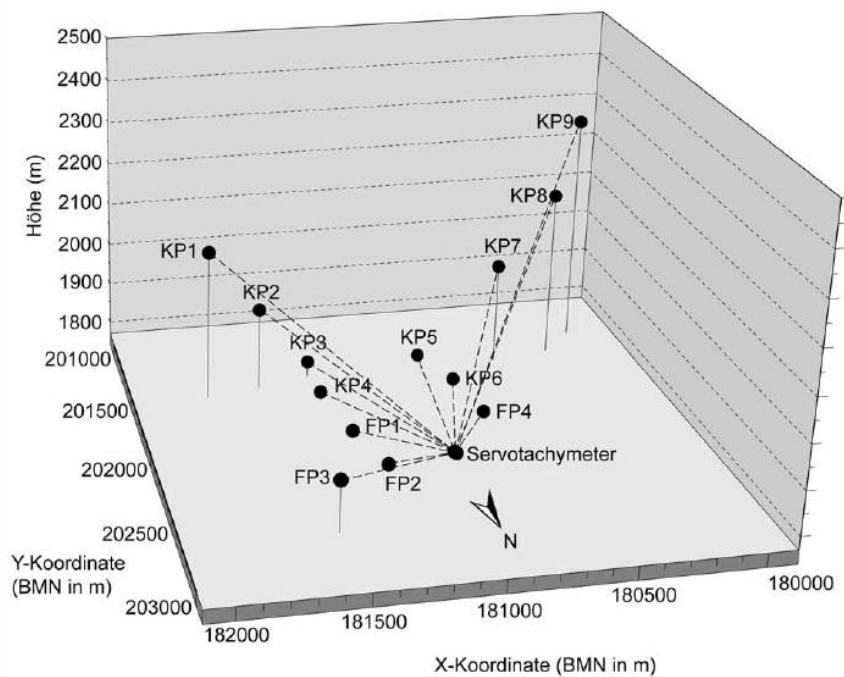


Abbildung 85: Trigonometrische Lage- und Höhenbestimmung mit einem Servotachymeter, der sich über Festpunkte (FP) positioniert und anschließend die Kontrollpunkte (KP) misst; Koordinatenangaben erfolgen über Bundesmeldenetz (BMN) (ZANGERL et al. 2008).

Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur Abschätzung der Kinematik, da absolute oder relative Koordinaten der Messpunkte bestimmt werden können (siehe Abbildung 86). Aus den Koordinaten können Verschiebungsvektoren inklusive deren Einfallswinkel berechnet werden, was sich zur Erfassung der Kinematik gut eignet. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

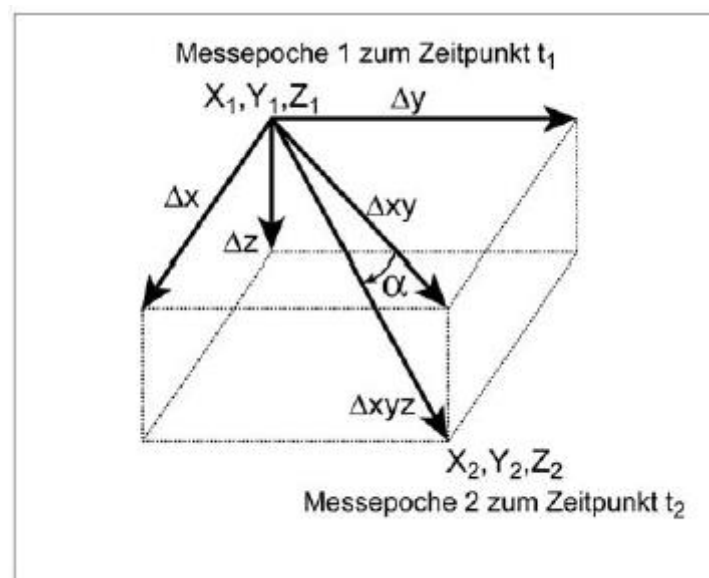


Abbildung 86: Betrag und Einfallswinkel des Verschiebungsvektors Δxyz , der sich aus den Messepochen 1 und 2 ergibt (ZANGERL et al. 2008).

Durch die Verwendung von Servotachymetern kann eine permanente Überwachung einer großen Anzahl von Messpunkten realisiert werden. Die Messteuerung und Ergebnisberechnung übernimmt ein lokal angeschlossener, über geeignete Steuerungssoftware verfügender, Computer. Der Computer und idealerweise auch der Servotachymeter sollten vor Witterungseinflüssen geschützt werden. Die Daten lassen sich über ein Kommunikationsnetz (z.B. GSM) auf einen Server weitergeben und sind online abrufbar. Leider können diese Systeme bei schlechten Sichtverhältnissen, wie Nebel oder Schneefall, ausfallen. Weiters muss beachtet werden, dass es bei großen Distanzen aufgrund der Brechung des Lichts beim Durchschreiten von Luftschichten mit unterschiedlicher Dichte zu Messungenauigkeiten kommen kann. (vgl. ZANGERL et al. 2008)

Die angesprochenen Messungenauigkeiten bei großen Distanzen dürften im Fall des Amtmann keine Rolle spielen. Mit dieser Methode sollte es möglich sein das genaue Bewegungsverhalten des Amtmann zu bestimmen. Sobald bekannt ist wo Rotationspunkte zu finden sind, wo und wie verschiedene Bereiche des Felsturms zu kippen drohen ist es auch einfacher eine sinnvolle Frühwarnungserkennung über Grenzwerte, die direkt die Bewegung betreffen, zu benutzen

9.3 Mögliche Schutzmaßnahmen

Mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit ist weder auszuschließen noch zu bestätigen, dass es in nächster Zeit oder überhaupt zu einem Abbrechen bzw. Kippen von Gesteinselementen des Amtmann kommt. Da es jedoch bei hohen Windgeschwindigkeit durchaus zu Rotationsbewegung bzw. Neigungen im untersuchten Bereich kommt, besteht das Risiko weiterhin. In Abbildung 83 ist das Untersuchungsgebiets von oben dargestellt. Aus dieser Grafik kann abgeleitet werden, wo sich Gefahrenzonen befinden bzw. wo Schutzmaßnahmen errichtet werden könnten.

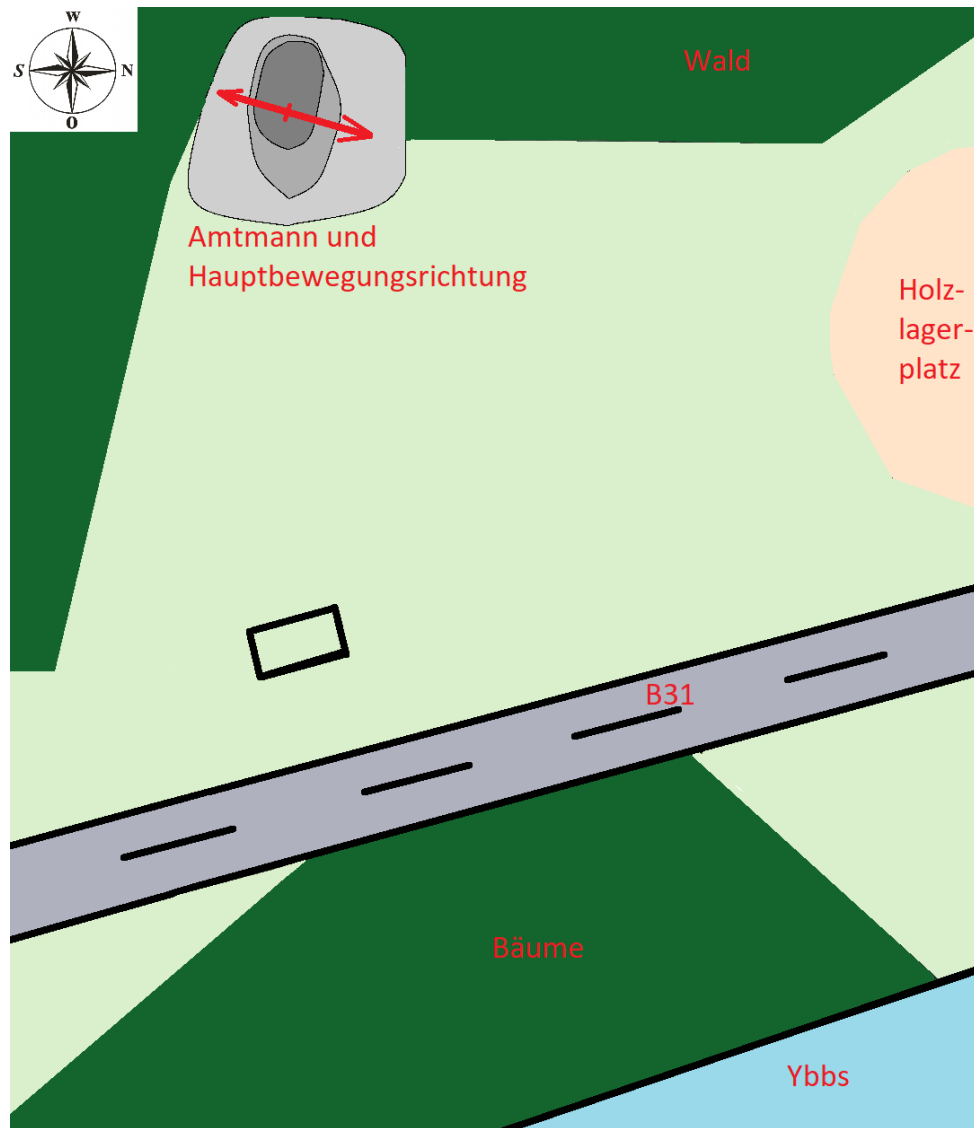


Abbildung 87: Darstellung des Untersuchungsgebiets von oben.

Nun werden Handlungsmöglichkeiten vorgestellt, die für Schutz von Mensch und Infrastruktur in Betracht gezogen werden können. SCHUSTER und HIGHLAND (2007) nennen vier Möglichkeiten, um ein Risiko von gravitativen Massenbewegungen zu vermindern:

1. Erstellen von Gefahrenhinweis- oder Gefahrenzonenkarten. Diese Methode ist nicht möglich, wenn das betroffene Gebiet bereits besiedelt ist.
2. Abtragen der mobilisierten Masse oder die Modifikation der Geländeoberflächen.
3. Bau von Schutzinfrastruktur (Rückhaltemauern, Bodenvernagelungen oder Steinschlagnetze). Schutzinfrastruktur ist meist sehr teuer in der Anschaffung.

4. Installation von Frühwarnsystemen.

Auf die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten wird hier nicht weiter eingegangen, da das Gebiet bereits besiedelt ist bzw. eine Straße sowie eine Stromleitung am gefährdeten Bereich vorbeiführt. Das Abtragen der mobilisierten Masse ist generell nicht möglich, da der Amtmann ein vom Land Niederösterreich gesetzlich geschütztes Naturdenkmal darstellt. Der Bau von Schutzinfrastruktur könnte viele unterschiedliche Formen annehmen. Von Errichten von Schutzwänden neben der Straße (vergleiche mit Abbildung 87), die aus unterschiedlichsten Materialien gefertigt werden können, bis zum Spannen von Auffangnetzen gäbe es hier viele Möglichkeiten. Die Errichtung einer Schutzwand, könnte aufgrund der nötigen Mächtigkeit und Höhe, möglicherweise sehr teuer werden. Außerdem würde ein Schutzwall, der direkt neben der Straße steht, das Landschaftsbild stark (negativ) beeinflussen und die Sicht auf den Amtmann wäre verdeckt.

Die einfachste und günstigste Methode um im Fall „Amtmann“ weiter zu machen, wäre ein Warnschild aufzustellen. Damit würden vorbeifahrenden AutofahrerInnen zumindest vor einer möglichen Gefahr gewarnt werden. In jedem Fall sollte eine zusätzliche Geschwindigkeitsbeschränkung (von z.B. 20 km/h) aufgestellt werden. Nun werden Geschwindigkeitsbeschränkungen von einem großen Teil der Bevölkerung nicht sonderlich ernst genommen und auch wenn ein großes Warnschild damit verbunden wird, ist wohl kaum anzunehmen, dass eine mögliche Gefahr während des Vorbeifahrens richtig eingeschätzt werden kann. Außerdem ist es für von Süden vorbeifahrende AutofahrerInnen wegen des sichtverdeckenden Waldes sehr schwer zu erkennen, ob, in jenem Moment, vom Amtmann eine Gefahr ausgeht. Die Einführung eines Frühwarnsystems wäre wahrscheinlich eine vernünftige Lösung.

9.4 Lokales Frühwarnsystem

Lokale Frühwarnsysteme warnen vor der Auslösung einer einzelnen Massenbewegung, so dass daraufhin zum Beispiel Abschnitte von Straßen und Schienenverbindungen gesperrt werden können (vgl. THIEBES et al. 2010).

Das aktuelle Sensorknotennetzwerk auf ein Frühwarnsystem upzudaten wäre möglich, jedoch ist schwer einzuschätzen ab wann eine Warnung erfolgen sollte, da nicht be-

kannt ist, ab welchen gemessenen Neigungswinkeln eine Warnung ausgegeben werden soll. Vielleicht wäre es, auch wenn nicht klar ist, wie stark die Bewegungen würden, dennoch sinnvoll bei sehr starken Stürmen eine Warnung auszugeben. Die Warnung könnte in der Dimension einer Windstärke ab 10 Beaufort (siehe Tabelle 3), sprich einer Windgeschwindigkeit ab 25 m/s, erfolgen. Ab dieser Windgeschwindigkeit treten, laut den Erkenntnissen dieser Arbeit schon relativ starke Winkelveränderungen auf von bis zu 5° (in eine Richtung) auf. Das Auftreten dieser Neigungen ist auf jeden Fall kritisch zu hinterfragen, egal wo sich der Rotationspunkt befindet. Die Einschätzung, dass eine Frühwarnung ab 10 Beaufort erfolgen sollte, ist eine Einschätzung, die aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit getroffen wurde und muss auf jeden Fall weiter überprüft werden.

Dennoch könnte in Betracht gezogen werden ein Frühwarnsystem zu installieren, dass über die Messung von Windgeschwindigkeit funktioniert. Durch den Abruf von Windgeschwindigkeiten, die von der Messstation Waidhofen an der Ybbs aufgenommen werden, könnte anschließend bei zwei Ampelanlagen (vor bzw. nach dem betroffenen Gebiet), im Falle eines überschrittenen Grenzwertes, Rotlicht eingeschalten werden. Damit würde der Straßenabschnitt beim Untersuchungsgebiet abgesperrt werden. Gleichzeitig kann das Frühwarnsystem Textnachrichten und Emails an zuständige Organe (Straßenmeisterei, Polizei, Feuerwehr, geologische Bundesanstalt, ...) verschicken. Das Gebiet bleibt dann so lange gesperrt, bis die Gefährdungslage überprüft wurde. Anschließend können (im Gefährdungsfall) dementsprechende weitere Sicherungsmaßnahmen erfolgen oder die Straße wieder freigegeben werden. Um zuverlässigere Werte für aktuelle Windgeschwindigkeiten zu erhalten, sollte ein lokal positioniertes Anemometer aufgestellt und direkt am Standort gemessen werden.

Literaturverzeichnis

- AHNERT F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. – Stuttgart.
- BELL R. (2007): Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitative Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb. – Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- BILL R. (2010): Geosensornetzwerke – neue Technologien und interessante Herausforderungen für die mathematische und datenverarbeitende Geodäsie und Geoinformatik. – In: GEODÄTISCHES INSTITUT (Hrsg.): Vernetzt und ausgeglichen. Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Günther Schmitt. – Karlsruhe. (= Abhandlungen zur Geodäsie und Geoinformatik), 41-53.
- CROZIER M.J. (1989): Landslides: Causes, Consequences and Environment. – Routledge
- CRUDEN D.M. (1991): A simple definition of a landslide. – In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43, 27-29.
- CRUDEN D.M. und VARNES D.J. (1996): Landslide Types and Processes. – In: TURNER A.K. und SCHUSTER R.L. (Hrsg.): Landslides, Investigations and Mitigation. National Academy Press. – Washington D.C., 36-75.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L. und IBSEN M.L. (1996): Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes. – Chichester.
- DIKAU R. und GLADE T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. – In: Geographische Rundschau 54 (1): 38-45.
- DWD (2019): Wetterlexikon: Beaufort- Skala; <http://www.dwd.de>
- FERNANDEZ-STEEGER T. (2011): Technik und Anwendung von drahtlosen Sensornetzwerke in der Ingenieurgeologie am Beispiel des SLEWS-Systems. – In: RWTH AACHEN (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Rafiq Azzam. – Aachen. (= Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie), 9-25.
- GLADE T., CROZIER M.J. (2005): A review of Scale Dependency in Landslide Hazard and Risk Analysis. – In: GLADE T., ANDERSON M. und CROZIER M. (Hrsg.): Landslide hazard and risk. – Chichester, 75-138.
- GLADE T. und DIKAU R. (2001): Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. – In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145, 42-53.
- GLADE T. und STÖTTER H. (2007): Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. – In: FELGENTREFF C. und GLADE T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. – Heidelberg, 151-164.
- LI C., AZZAM R., TOMAS M. und FERNANDEZ-STEEGER T. (2016): Kalman Filters in Geotechnical Monitoring of Ground Subsidence Using Data from MEMS Sensors. – In: Sensors 16 (7), 1-15.

- LI C., FERNANDEZ-STEEGER T., LINK J., MAY M. und AZZAM R. (2014): Use of Mems Accelerometers/Inclinometers as a Geotechnical Monitoring Method for Ground Subsidence. – In: *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 11 (4), 337-349.
- KRÄTTLI W. und SCHWARZ M. (2015): Stabilisierung rutschender Hänge. – In: *Fachstelle für forstliche Bautechnik* (Hrsg.) – Bovel.
- LOTTER M. und HABERLER A. (2013): Geogene Naturgefahren – Gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. – In: NÖ GEOTAGE (Hrsg.): "Geogene Gefahren und Raumordnung". Berichte der Geologischen Bundesanstalt. Band 100. – Rabenstein an der Pielach, 4-17.
- MAUSBACH T. und MAY M. (2014): Wireless Sensor Networks- Geomonitoring. – Interne Präsentation an der Universität Wien. Zur Verfügung gestellt von der Universität Wien.
- MAYER J. und GLADE T. (2010): Integrative Frühwarnsysteme- Konzeption der Frühwarnung. – In: BELL R., MAYER J., POHL J., GREIVING S. und GLADE T. (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. Klartext Verlag, Essen, 17-22.
- MÖLK M., SAUSGRUBER T., BAK R. und KOCIU A. (2011): Standards and Methods of Hazard Assessment for Rapid Mass Movements (Rock Fall and Landslide) in Austria, 88-99. – In: SKOLAUT C. (Hrsg.): *Gefahrendarstellungen für Massenbewegungen*. Verein der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs.
- MÜLLER W. H. (1982): Zur Entstehung der Rauhacke. – In: *Eclogae Geologicae Helveticae* 75 (3), 481-494.
- PEDLEY M. (2013): Tilt sensing using a three-axis accelerometer. – In: *Free Scale Semiconductor Inc., Application Note, AN3461, Rev. 6*, 1-22.
- PINK S. (2007): Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo Sensornetzwerkes für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. – Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Universität der Bundeswehr München.
- POISEL R. und EPPENSTEINER W. (1989): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems "Hart auf Weich". – In: *Felsbau* 7 (1), 16-20.
- SCHNABEL W. (2002): Geologische Karte von Niederösterreich 1:200 000. – Wien.
- SCHUSTER R. L. und HIGHLAND L. M. (2007): The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. – In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66, 1-27.

- SCHWENK H. (1992): Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990. (mit einem Beitrag von SPENDLINGWIMMER R. und SALZER F.). – In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 135 (2), 597-660. – Wien.
- TERZAGHI K. (1950): Mechanism of landslides. – In: The Geological Society of America, Engineering Geology (Berkey) Volume, 83-123.
- THIEBES B., BELL R., und GLADE T. (2010): Integrative Frühwarnsysteme- Stand der Forschung. – In: BELL R., MAYER J., POHL J., GREIVING S. und GLADE T. (2010): In integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. Klartext Verlag, Essen, 22-31.
- WALTER K. (2012): Untersuchungen räumlicher Dienststandards zur Umsetzung einer Geodateninfrastruktur eines sensorbasierten Frühwarnsystems. – Dissertation an der Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät. Universität Rostock.
- WESSELY G. (2006): Geologie der österreichischen Bundesländer: Niederösterreich. – Wien.
- WIECZOREK G.F. (1996): Landslide triggering mechanisms. – In: TURNER A.K. und SCHUSTER R.L. (Hrsg.): Landslides: Investigation and Mitigation (Special Report). – National Research Council, Transportation and Research Board Special Report 247, Washington, D.C., USA, 76-90.
- WILD-PFEIFFER F. und SCHÄFER B. (2011): MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie. – In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 1/2011, 30-39.
- ZAMG (2019): Klimadaten von Österreich 1971 - 2000: Waidhofen an der Ybbs; <http://www.zamg.ac.at>.
- ZANGERL C., PRAGER C., BRANDNER R., BRÜCKL E., EDER S., FELLIN W., TENTSCHERT E., POSCHER G. und SCHÖNLAUB H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. – In: Geo.Alp 5 (1), 1-5-