

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

## Evaluation und zeitliche Entwicklung von Niederschlagsschwellenwerten zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen

Eine Untersuchung drei ausgewählter Rutschungen in St.Pantaleon-Erla,  
Behamberg und Wilhelmsburg

verfasst von / submitted by

Stefan Kammerer, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Education (MEd)

Wien, 2020 / Vienna 2020

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

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

Betreut von / Supervisor:

UA 199 510 520 02

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Lehrverbund  
UF Geographie und Wirtschaft Lehrverbund  
UF Mathematik Lehrverbund

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

## Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema 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 01.10. 2020

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                             |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Abbildungsverzeichnis.....                                                                  | IV          |
| Tabellenverzeichnis.....                                                                    | V           |
| Kurzzusammenfassung.....                                                                    | VI          |
| Abstract.....                                                                               | VII         |
| <b>Danksagung.....</b>                                                                      | <b>VIII</b> |
| 1. Einleitung .....                                                                         | 1           |
| 2. Forschungsfragen und Hypothesen.....                                                     | 2           |
| 3. Theoretischer Hintergrund .....                                                          | 4           |
| 3.1 Definition und Klassifikation gravitativer Massenbewegungen.....                        | 4           |
| 3.1.1 Fallen.....                                                                           | 8           |
| 3.1.2 Kippen .....                                                                          | 10          |
| 3.1.3 Gleiten .....                                                                         | 11          |
| 3.1.4 Fließen .....                                                                         | 13          |
| 3.1.5 Driften.....                                                                          | 15          |
| 3.1.6 Hybrid-komplexe Bewegungen .....                                                      | 16          |
| 3.2 Ursachen von gravitativen Massenbewegungen .....                                        | 17          |
| 3.2.1 Kräfte und Spannungen im Untergrund .....                                             | 17          |
| 3.2.2 Beeinflussende und auslösende Faktoren von gravitativen Massenbewegungen .....        | 21          |
| 3.2.2.1 Hangstabilität .....                                                                | 22          |
| 3.2.2.2 Geologische Einflüsse .....                                                         | 24          |
| 3.2.2.3 Geomorphologische Einflüsse.....                                                    | 25          |
| 3.2.2.4 Hydrologische Einflüsse .....                                                       | 26          |
| 3.2.2.5 Einflüsse durch die Vegetation .....                                                | 26          |
| 3.3 Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen.....                                     | 27          |
| 3.4 Vorhersage von gravitativen Massenbewegungen mittels Niederschlagsschwellenwerten ..... | 29          |
| 3.4.1 Prozessbasierte Modelle .....                                                         | 30          |
| 3.4.2 Empirische Modelle .....                                                              | 31          |
| 4. Beschreibung der Untersuchungsgebiete .....                                              | 34          |
| 4.1 Geographische Lage.....                                                                 | 34          |
| 4.2 Geologie der Gebiete.....                                                               | 36          |
| 4.2.1 Geologie der Flyschzone .....                                                         | 36          |
| 4.2.2 Geologie der Molassezone .....                                                        | 37          |
| 4.3 Hydrologie .....                                                                        | 40          |
| 4.3.1 Hydrologie der Flyschzone.....                                                        | 40          |
| 4.3.2 Hydrologie der Molassezone.....                                                       | 40          |
| 4.4 Klima .....                                                                             | 41          |
| 4.5 Böden.....                                                                              | 44          |
| 4.6 Rutschungen in den Untersuchungsgebieten.....                                           | 46          |
| 5. Datengrundlage.....                                                                      | 51          |
| 5.1 Rutschungsdaten .....                                                                   | 51          |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2 Niederschlagsdaten .....                                                           | 52 |
| 5.3 Durchflussdaten .....                                                              | 52 |
| 6. Methodik.....                                                                       | 53 |
| 6.1 Das Antecedent Daily Rainfall Modell im Überblick.....                             | 53 |
| 6.2 Berechnungsschritte des Antecedent Daily Rainfall Modells .....                    | 53 |
| 6.2.1 Berechnung des vorhergehenden Niederschlags.....                                 | 53 |
| 6.2.2 Berechnung des Decay-Faktors.....                                                | 54 |
| 6.2.3 Berechnung der Niederschlagschwellenwerte zur gegebenen Wahrscheinlichkeit ..... | 55 |
| 7. Ergebnisse .....                                                                    | 57 |
| 7.1 Ergebnisse des Decay-Faktors.....                                                  | 57 |
| 7.1.1 Decay-Faktor St. Pantaleon-Erla 1991-2018 .....                                  | 58 |
| 7.1.2 Decay-Faktor Behamberg 1991-2018.....                                            | 58 |
| 7.1.3 Decay-Faktor Wilhelmsburg .....                                                  | 59 |
| 7.2 Ergebnisse der binären logistischen Regression .....                               | 59 |
| 7.2.1 Ergebnisse St. Pantaleon-Erla 1991-2018.....                                     | 59 |
| 7.2.2 Ergebnisse Behamberg 1991-2018 .....                                             | 61 |
| 7.2.3 Ergebnisse Wilhelmsburg 1991-2018 .....                                          | 63 |
| 7.2.4 Ergebnisse Wilhelmsburg 13.2.2008-29.3.2017 .....                                | 64 |
| 8. Diskussion.....                                                                     | 65 |
| 9. Résumé.....                                                                         | 69 |
| 10. Ausblick.....                                                                      | 71 |
| 11. Literatur .....                                                                    | 73 |

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1 - Darstellung eines Fallprozesses im Festgestein unter Entstehung eines Anrisses in der Wand und Bildung einer Sturzhalde – Quelle: Dikau et al. 2019: 204.....             | 9  |
| Abbildung 2 - Darstellung eines Kippprozesses – Quelle: Dikau et al. 2019: 207 .....                                                                                                    | 11 |
| Abbildung 3 - Schematische Darstellung einer Translationsrutschung mit der typischen zum Hang parallelen Scherfläche - Quelle Highland und Bobrowsky 2008: 13.....                      | 12 |
| Abbildung 4 - Schematische Darstellung einer Rotationsrutschung mit der typischen löffelförmigen Scherfläche – Quelle: Highland und Bobrowsky 2008: 10 .....                            | 13 |
| Abbildung 5 - Schematischer Überblick über den Zusammenhang der Stadien der Hangstabilität und der darauf einwirkenden Faktoren - Quelle: Glade und Crozier 2006: 45 24                 |    |
| Abbildung 6 - Schematische Darstellung der Hangformen - Quelle: Sidle und Ochiai 2006: 59 .....                                                                                         | 25 |
| Abbildung 7 - Übersichtskarte der drei Rutschungsgebiete in den Gemeinden St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg - Kartengrundlage: Land Niederösterreich o.J. – NÖ-Atlas ..... | 35 |
| Abbildung 8 - Geologische Karte Niederösterreichs - Quelle: Wessely 2006: 12f. ....                                                                                                     | 39 |
| Abbildung 9 - Übersichtskarte der Jahressumme des Niederschlags im Bundesland Niederösterreich 2019 – Quelle: Höfler et al. 2020: 4 .....                                               | 42 |
| Abbildung 10 - Übersichtskarte der mittleren Jahrestemperatur im Bundesland Niederösterreich 2019 - Quelle: Höfler et al. 2020: 4 .....                                                 | 42 |
| Abbildung 11 - Gegenüberstellung der flächenmäßigen Ausdehnung und dem Auftreten von Rutschungen. - Quelle: Schwenk et al. 1992: 621 .....                                              | 47 |
| Abbildung 12 – Rutschung St. Pantaleon-Erla - Damm und Bach am Fuße der Rutschung - eigene Aufnahme .....                                                                               | 48 |
| Abbildung 13 - Rutschung Behamberg – oberer Bereich der Rutschung - eigene Aufnahme .....                                                                                               | 49 |
| Abbildung 14 - Rutschung Behamberg – unterer Bereich der Rutschung - eigene Aufnahme .....                                                                                              | 49 |
| Abbildung 15 - Rutschung Wilhelmsburg – oberer Bereich – eigene Aufnahme .....                                                                                                          | 50 |
| Abbildung 16 - Rutschung Wilhelmsburg – Messpfeiler – eigene Aufnahme .....                                                                                                             | 50 |
| Abbildung 17 - Ergebnisse des ADRM angewendet in der Region Wairarapa, Neuseeland - Quelle: Glade et al. 2000: 1073 .....                                                               | 56 |
| Abbildung 18 - Antecedent Daily Rainfall Modell 10 Tage (Behamberg 1991-2018). ....                                                                                                     | 62 |

# Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1 - Stadien des Aktivitätsgrades - Quelle: Glade und Zangerl 2020: 376.....                                                                                             | 5  |
| Tabelle 2 - Überblick über die Geschwindigkeitsklassen gravitativer Massenbewegungen -<br>Quelle: Zangerl et al. 2008: 18 .....                                                 | 6  |
| Tabelle 3 - Beispiele für dispositive, auslösende und kontrollierende Faktoren - Quelle: Dikau<br>et al. 2001: 120.....                                                         | 7  |
| Tabelle 4 - Klassifikation des Fallprozesses nach Korngröße (K) und Magnitude (M) – Quelle:<br>Dikau et al. 2019: 207.....                                                      | 9  |
| Tabelle 5 - Die in Körpern wirkenden Kräfte bzw. Spannungen. A bezeichnet hier die Fläche<br>der Krafteinwirkung. – Quelle: Dikau et al. 2019: 191 .....                        | 18 |
| Tabelle 6 - Einflüsse der Vegetation auf gravitative Massenbewegungen, unterteilt nach<br>hydrologischen und mechanischen Mechanismen – Quelle: Sidle und Ochiai 2006: 90 ..... | 27 |
| Tabelle 7 - Bodentypen der Rutschungsgebiete St. Pantaleon-Erla, Behamberg und<br>Wilhelmsburg - Datengrundlage: BFW (o.J.) .....                                               | 44 |
| Tabelle 8 - Übersicht über die Datengrundlage.....                                                                                                                              | 51 |
| Tabelle 9 - Berechneter Decay-Faktor für die Region St. Pantaleon-Erla – Messstationen:<br>Haid und Schwertberg .....                                                           | 58 |
| Tabelle 10 - Berechneter Decay-Faktor für die Region Behamberg – Messstation: Steyr.....                                                                                        | 58 |
| Tabelle 11 - Berechneter Decay-Faktor für die Region Wilhelmsburg – Messstation:<br>Windpassing.....                                                                            | 59 |
| Tabelle 12 - Klassifizierungstabelle - St. Pantaleon-Erla 1991-2018.....                                                                                                        | 60 |
| Tabelle 13 - Variablen in der Gleichung - St. Pantaleon-Erla 1991-2018 .....                                                                                                    | 61 |
| Tabelle 14 - Klassifizierungstabelle - Behamberg 1991-2018 .....                                                                                                                | 61 |
| Tabelle 15 - Variablen in der Gleichung - Behamberg 1991-2018 .....                                                                                                             | 62 |
| Tabelle 16 - Klassifizierungstabelle – Wilhelmsburg 1991-2018 .....                                                                                                             | 63 |
| Tabelle 17 - Variablen in der Gleichung – Wilhelmsburg 1991-2018.....                                                                                                           | 63 |
| Tabelle 18 - Klassifizierungstabelle - Wilhelmsburg 2008-2017 .....                                                                                                             | 64 |
| Tabelle 19 - Variablen in der Gleichung - Wilhelmsburg 2008-2017 .....                                                                                                          | 64 |

# Kurzzusammenfassung

Die folgende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Zusammenhang von Niederschlagsschwellenwerten und dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen. Ziel der Arbeit ist es, auf die zeitliche Veränderung von Niederschlagsschwellenwerten einzugehen. Zu diesem Zweck wurden die drei Untersuchungsgebiete St. Pantaleon-Erla (NÖ), Behamberg (NÖ) und Wilhelmsburg (NÖ) ausgewählt, da in diesen Regionen, teilweise bereits seit den 60er Jahren, von immer wiederkehrenden Rutschungen berichtet wird.

In der Arbeit werden zunächst die theoretischen Hintergründe gravitativer Massenbewegungen und der Niederschlagsschwellenwerte geklärt. Anschließend werden verschiedenste Berechnungen durchgeführt, um die aufgestellten Hypothesen zu beantworten. Die Basis bildet dabei das Antecedent Daily Rainfall Modell (ADRM) nach Glade et al. (2000). Mit Hilfe dieses Modells kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer gravitativen Massenbewegung in Abhängigkeit vom täglichen maximalen Niederschlag und dem vorhergehenden Niederschlag berechnet werden. Die Berechnungen wurden für alle drei Regionen im Zeitraum 1991-2018 durchgeführt.

In der Arbeit selbst war es jedoch nicht möglich, eine Aussage über die aufgestellten Hypothesen zu treffen. Grund dafür war, dass das Antecedent Daily Rainfall Modell bei dieser Untersuchung nicht griff und die Ergebnisse dieser Berechnung als nicht sinnvoll erachtet werden können. In weiterer Folge wurde darüber diskutiert, warum eine Anwendung des Antecedent Daily Rainfall Modells nicht möglich war. Zusammenfassend können hier als wichtigste Punkte die überaus schlechte Dokumentation der Rutschungsereignisse, der damit verbundene schlechte Rutschungsdatensatz und die überaus langsame Bewegungsrate der Rutschungen in den drei Gebieten genannt werden.

## Abstract

This master thesis deals with the connection between rainfall thresholds and the occurrence of landslides. The aim of the work is to deal with the temporal change of rainfall thresholds. Therefore, three study areas with reoccurring slope movement in St. Pantaleon-Erla (Lower Austria), Behamberg (Lower Austria) and Wilhelmsburg (Lower Austria) were selected.

In this research, the theoretical background of landslides and rainfall thresholds will be discussed. Further, calculations are carried out to answer the hypotheses that have been made. The calculations are based on the Antecedent Daily Rainfall Model (ADRM) according to Glade et al. (2000). With the help of this model, the probability of the occurrence of landslides can be determined, depending on the daily maximum precipitation and the antecedent rainfall. The calculations were carried out for all three regions in the period 1991-2018.

However, it was not possible to make a statement about the hypotheses made, since the Antecedent Daily Rainfall model did not apply to this investigation and the results of this calculation cannot be further considered for the study. Subsequently, it was discussed why an application of the Antecedent Daily Rainfall model was not possible. In summary the poor documentation of the landslide events, the associated poor landslide dataset and the extremely slow rate of movement of the landslides in the three areas can be listed as the main influence factors.



## Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinen **Eltern** und **Großeltern** bedanken, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt und mir dies alles erst ermöglicht haben.

Besonders möchte ich meinen „**Fußballopa**“ **Kurt Kammerer** nennen, welcher die Leidenschaft für die Mathematik in mir geweckt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen besten Freunden **Manuel**, **Patrick** und **Philipp H.**, die mich bereits seit der Schulzeit durchs Leben begleiten.

Meinem wohl besten Studienkollegen **Julian**, der seit der ersten Vorlesung an meiner Seite war, möchte ich für die gute Zusammenarbeit über all die Jahre danken.

Meiner Kollegin **Jana** danke ich für ihre geschickte Nähfertigkeit, mit welcher sie mir durch die vielen angefertigten Schiggys immer wieder ein Lächeln aufs Gesicht zaubern konnte.

Ich bedanke mich auch bei meinen KollegInnen **Johannes**, **Philipp R.** und **Martina**, die in meiner gesamten Studienzeit immer ein offenes Ohr für mich hatten.

## Vielen Dank euch allen!

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade und Frau Mag. Nina Marlovits, die es mir ermöglicht haben, mich im Zuge meiner Masterarbeit mit diesem Thema auseinanderzusetzen. Zudem bedanke ich mich beim Geologischen Dienst Niederösterreich, beim Hydrographischen Dienst Niederösterreich und beim Hydrographischen Dienst Oberösterreich, welche mir die Daten für diese Arbeit zur Verfügung gestellt haben.

# 1. Einleitung

In Zeiten des sich ständig ändernden Klimas und damit auch des sich verändernden Niederschlags entsteht immer wieder der Eindruck, dass es vermehrt zu gravitativen Massenbewegungen kommt.

Treten gravitative Prozesse in besiedelten Gebieten auf, so sind fast ausnahmslos Konsequenzen für den Menschen und seine Umwelt zu erwarten. Diese können sowohl direkter Natur, z.B. durch die Zerstörung ganzer Häuser, oder aber auch indirekter Natur sein, beispielsweise wenn durch eine Rutschung ein Fluss aufgestaut wird, der anschließend wichtige Infrastrukturen überschwemmt. (vgl. Glade und Zangerl 2020: 368)

Um präventive Maßnahmen gegen die Folgen gravitativer Massenbewegungen frühzeitig setzen zu können, ist es wichtig genaue Aussagen darüber treffen zu können, wann diese stattfinden werden und wie sich deren Auftreten im Laufe der Zeit verändert. Ein solches Prognoseinstrument stellen in diesem Zusammenhang die sogenannten Niederschlagsschwellenwerte dar. Mittels dieser Schwellenwerte ist es möglich, die Auftrittswahrscheinlichkeiten von gravitativen Massenbewegungen in Abhängigkeit vom Niederschlag zu bestimmen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine mögliche zeitliche Veränderung der Niederschlagsschwellenwerte in drei ausgewählten Gebieten zu diskutieren.

Dazu werden in dieser Masterarbeit zunächst die theoretischen Hintergründe gravitativer Massenbewegungen behandelt, welche definiert und in weiterer Folge anhand der Prozessmechanismen und der verschiedenen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien in die verschiedenen Bewegungsformen eingeteilt werden. Anschließend werden die wichtigsten Ursachen und Folgen von Massenbewegungen näher beschrieben. Am Ende des theoretischen Teils wird auf die Vorhersagemöglichkeit mittels der Niederschlagsschwellenwerte eingegangen.

Um die Forschungsfragen und Hypothesen, welche im Kapitel 2 vorgestellt werden, beantworten zu können, werden verschiedene Berechnungen mit bereits zur Verfügung stehenden Daten durchgeführt. Als grundlegende Basis dient dazu das Antecedent Daily Rainfall Modell nach Glade et al. (2000). In der Masterarbeit werden die Daten von drei ausgewählten Standorten in Behamberg (NÖ), St.Pantaleon-Erla (NÖ) und Wilhelmsburg (NÖ) zwischen 1991 und 2018 ausgewertet. Die drei Gebiete wurden ausgewählt, da hier seit den 1960er Jahren immer wieder von gravitativen Massenbewegungen berichtet wird.

## 2. Forschungsfragen und Hypothesen

Wie bereits geschildert, ist das Hauptziel dieser Masterarbeit eine zeitliche Analyse der Niederschlagsschwellenwerte zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen von ausgewählten Gebieten durchzuführen. Zur Bearbeitung der Thematik leiten sich die folgenden Hypothesen und Forschungsfragen ab:

**H1: In den untersuchten Gebieten existiert ein Zusammenhang zwischen den bereits erforschten Niederschlagsschwellenwerten und der Anzahl an ausgelösten Rutschungen.**

*Inwiefern besteht ein Zusammenhang zwischen der absoluten Häufigkeit des Auftretens von gravitativen Massenbewegungen und dem Niederschlagsschwellenwert in den untersuchten Gebieten?*

*Ist in den untersuchten Gebieten ein Niederschlagsschwellenwert zu erkennen, ab welchem es zuverlässig/häufig zu einer Auslösung von gravitativen Massenbewegungen gekommen ist?*

Anhand dieser Hypothese und der dazugehörenden Forschungsfragen soll geklärt werden, inwiefern sich die absolute Häufigkeit von gravitativen Massenbewegungen und die dazugehörigen Niederschlagschwellenwerte in den Gebieten St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg im Zeitraum 1991-2018 verändert haben. Auf Basis dieser Hypothese wurden weitere Hypothesen formuliert.

**H2: Aufgrund der durchschnittlichen Zunahme der Regentage und deren Intensität werden die Niederschlagsschwellenwerte in einem kürzeren Zeitraum erreicht als bisher.**

*Haben sich die Niederschlagschwellenwerte, ab denen eine gravitative Massenbewegung ein sicheres Ereignis darstellt, im Laufe der Zeit verschoben?*

*Welche Faktoren haben zur Verschiebung der Niederschlagsschwellenwerte, ab denen eine gravitative Massenbewegung ein sicheres Ereignis darstellt, beigetragen?*

In den vergangenen Jahren wurde durch verschiedenste Studien, auch wenn nicht signifikant, gezeigt, dass Starkniederschläge in Mitteleuropa eher zugenommen haben dürften. (vgl. Pistonik et al. 2020: 154) Aufbauend auf der Annahme, dass es vermehrt zu Starkregenereignissen kommt, soll überprüft werden, ob es dadurch auch vermehrt zu Rutschungen kommt. Dabei soll auch diskutiert werden, ob sich die Niederschlagsschwellenwerte im Laufe der Zeit verschoben haben.

**H3: Die Untersuchungsgebiete Behamberg, St. Pantaleon-Erla und Wilhelmsburg weisen aufgrund der räumlichen Distanz und den damit verbundenen unterschiedlichen Verhältnissen im Untergrund ein unterschiedliches Rutschungsverhalten in Hinblick auf die Auslösung durch Niederschlag auf.**

*Gibt es Abweichungen in Bezug auf die absolute Häufigkeit von gravitativen Massenbewegungen und dem Niederschlagsschwellenwert in den drei untersuchten Gebieten?*

Hier soll geklärt werden, wie weit sich die Niederschlagsschwellenwerte und die damit verbundene Auftretswahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen in den drei Untersuchungsgebieten unterscheiden.

### 3. Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel der Arbeit sollen die theoretischen Hintergründe geklärt werden, die für das weitere Verständnis der später durchgeführten Berechnungen grundlegend sind. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Definitionen und Klassifikationen von gravitativen Massenbewegungen gegeben. Danach werden die Ursachen und Folgen von Massenbewegungen behandelt. Am Schluss des Kapitels werden Vorhersagemöglichkeiten mittels Niederschlagsschwellenwerten aufgezeigt.

#### 3.1 Definition und Klassifikation gravitativer Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen beschreiben hangabwärts gerichtete Verlagerungsprozesse, deren Bewegungsenergie großteils auf Basis der Erdanziehungskraft beruht. Sie unterscheiden sich von fluvialen, äolischen oder glazialen Prozessen dadurch, dass kein Medium, wie beispielsweise Wind oder Wasser, vorhanden ist, um das Material zu transportieren. (vgl. Zepp 2017: 103) Häufig werden gravitative Massenbewegungen auch als Hangrutschungen oder Massenschwerebewegungen bezeichnet. Im angelsächsischen Raum konnten sich die Begriffe „mass movements“ und „landslides“ als übergeordnete Terminologie dieser Prozessgruppe durchsetzen. (vgl. Dikau und Glade 2001: 42; Zepp 2017: 103)

Nach Dikau et al. (2019: 200) lassen sich gravitative Massenbewegungen anhand der verschiedenen Eigenschaften der Prozesse unterscheiden. Da vor allem die unterschiedlichen Prozesseigenschaften, wie der Aktivitätsgrad, die Geschwindigkeit, die dispositiven, auslösenden und kontrollierenden Faktoren, in der Geomorphologie eine wichtige Rolle einnehmen, werden diese in weiterer Folge genauer beschrieben.

##### Aktivitätsgrad der gravitativen Massenbewegung

Nach Glade und Zangerl (2020: 375) nimmt der Aktivitätsstatus bei der Betrachtung einer gravitativen Massenbewegung einen hohen Stellenwert ein. Sie unterteilen dabei, in Anlehnung an Cruden und Varnes (1996), den Grad der Aktivität in die drei Hauptgruppen *aktiv*, *momentan inaktiv* und *dauerhaft inaktiv*, welche wiederum in acht Klassen geteilt werden (siehe dazu Tabelle 1).

*Aktiv* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich das Objekt momentan in Bewegung befindet, ganz gleich ob es sich um nur wenige Zentimeter pro Jahr oder mehrere Meter in nur wenigen Sekunden handelt (siehe dazu Klasse 1 und 2, Tabelle 1). Die *momentan inaktiven* Massenbewegungen werden von jenen Bewegungen gebildet, bei denen in den letzten zwölf Monaten keine Bewegungen nachgewiesen werden konnten, sich im letzten Jahreszyklus bewegt haben, dies aktuell aber nicht mehr tun oder jene, die sich momentan in einer inaktiven Phase befinden, jedoch das Potential besitzen, wieder in eine aktive Phase überzutreten.

(siehe dazu Klasse 3, 4 und 5, Tabelle 1) Die letzte übergeordnete Gruppe der *dauerhaft inaktiven* Massenbewegungen wird von jenen Bewegungen gebildet, die durch ihre ursprünglichen auslösenden Faktoren nicht mehr in Bewegung versetzt werden können, die durch Sanierungsmaßnahmen stillgelegt werden konnten und jene inaktiven Bewegungen, welche ursprünglich durch Faktoren einer längst vergangenen Zeit ausgelöst wurden. (vgl. Glade und Zangerl 2020: 375)

*Tabelle 1 - Stadien des Aktivitätsgrades - Quelle: Glade und Zangerl 2020: 376*

| Klasse   | Aktivitätsstatus | Beschreibung                                                                                                                       |
|----------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b> | Aktiv            | Massenbewegungen, welche sich gegenwärtig in Bewegung befinden                                                                     |
| <b>2</b> | Reaktiv          | Massenbewegungen, welche nach einer inaktiven Phase abermals aktiv sind                                                            |
| <b>3</b> | Inaktiv          | Massenbewegungen, bei denen seit zwölf Monaten keine Bewegungen festgestellt werden konnten                                        |
| <b>4</b> | Blockiert        | Massenbewegungen, welche sich im Zyklus des letzten Jahres bewegt haben, momentan aber keine Bewegungen aufweisen                  |
| <b>5</b> | Latent           | Inaktive Massenbewegungen, welche jedoch das Potential besitzen, durch eine Veränderung der Umwelteinflüsse wieder aktiv zu werden |
| <b>6</b> | Abgeschlossen    | Inaktive Massenbewegungen, die durch die ursprünglichen Faktoren nicht weiter beeinflusst werden                                   |
| <b>7</b> | Stabilisiert     | Massenbewegungen, deren Bewegungen durch Sanierungsmaßnahmen reduziert oder beendet wurden                                         |
| <b>8</b> | Relikt           | Inaktive Massenbewegungen, die unter vergangenen Umwelteinflüssen entstanden sind und das aktuelle Landschaftsbild prägen          |

## Bewegungsgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeiten von gravitativen Massenbewegungen weisen, wie in Tabelle 2 zu sehen ist, eine enorme Spannweite von  $10^{-7}$  mm/s bis hin zu  $10^3$  mm/s auf. Sie reichen daher von wenigen Millimetern pro Jahr bis hin zu rasanten Ereignissen, bei denen das bewegte Material mehrere Meter in nur wenigen Augenblicken zurücklegen kann. Die Geschwindigkeit ist dabei, mit

*Tabelle 2 - Überblick über die Geschwindigkeitsklassen gravitativer Massenbewegungen - Quelle: Zangerl et al. 2008: 18*

| Klasse | Beschreibung                    | Geschwindigkeit                    | Kinematik (Art der Bewegung) |                 |                 |                |                  |
|--------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
|        |                                 |                                    | Fallen (Fall)                | Kippen (Topple) | Gleiten (Slide) | Fließen (Flow) | Driften (Spread) |
| 7      | extrem rasch (extremely rapid)  |                                    |                              |                 |                 |                |                  |
| 6      | sehr rasch (very rapid)         | $5 \times 10^3$ mm/s<br>5 m/s      |                              |                 |                 |                |                  |
| 5      | rasch (rapid)                   | $5 \times 10^1$ mm/s<br>3 m/min    |                              |                 |                 |                |                  |
| 4      | mäßig (moderate)                | $5 \times 10^{-1}$ mm/s<br>1.8 m/h |                              |                 |                 |                |                  |
| 3      | langsam (slow)                  | $5 \times 10^{-3}$ mm/s<br>158 m/a |                              |                 |                 |                |                  |
| 2      | sehr langsam (very slow)        | $5 \times 10^{-5}$ mm/s<br>1.6 m/a |                              |                 |                 |                |                  |
| 1      | extrem langsam (extremely slow) | $5 \times 10^{-7}$ mm/s<br>16 mm/a |                              |                 |                 |                |                  |

Ausnahme der Fallprozesse, nicht an die Art des Bewegungsprozesses gebunden. (vgl. Zangerl et al. 2008: 17)

Nach Zangerl et al. (2008: 17) liegt ein besonders wichtiger Grenzwert zwischen den „sehr raschen“ und „extrem raschen“ Massenbewegungen, da die Grenze zwischen diesen zwei Kategorien darüber entscheidet, ob es einer Person möglich ist die Flucht zu ergreifen. Die Geschwindigkeit einer Massenbewegung ist auch insofern wichtig, da diese maßgeblich für das Zerstörungspotential sind. So ist es nicht unüblich, dass eine kleinere, aber extrem schnelle gravitative Massenbewegung mehr Zerstörung nach sich zieht als eine vergleichsweise riesige, aber extrem langsame Bewegung. (vgl. Zangerl et al. 2008: 17)

## Einwirkung durch dispositive, initiierende und kontrollierende Faktoren

Gravitative Massenbewegungen werden auch anhand der Faktorengruppen untergliedert, welche sich auf die Hangstabilität auswirken. Der erste Typ der einwirkenden Faktoren ist der sogenannte dispositive Faktor, also der vorbereitende Faktor. Dieser destabilisiert den Hang, ist jedoch nicht für das Auslösen einer Massenbewegung verantwortlich. Der dispositive Faktor beschreibt einen Hang hinsichtlich seiner Eigenschaften, welche für gravitative Massenbewegungen von Bedeutung sind, wie z.B. bodenmechanische, felsmechanische oder hydrologische Eigenschaften. (vgl. Dikau et al. 2019: 202)

Die sogenannten auslösenden Faktoren leiten durch das Überschreiten eines Grenzwertes die gravitative Massenbewegung ein. (vgl. Dikau et al. 2019: 202)

Zu guter Letzt gibt es noch die sogenannten kontrollierenden Faktoren, zu denen beispielsweise die Neigung oder Struktur des Hanges zählen. Sie prägen den Pfad, den eine

Rutschung nimmt und haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ausmaß und die Geschwindigkeit einer Rutschung. (vgl. Dikau et al. 2019: 202)

In der folgenden Tabelle 3 werden nun typische Beispiele für dispositive, auslösende und kontrollierende Faktoren gelistet:

*Tabelle 3 - Beispiele für dispositive, auslösende und kontrollierende Faktoren - Quelle: Dikau et al. 2001: 120*

| dispositive Faktoren                | auslösende Faktoren       | kontrollierende Faktoren       |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Verwitterung                        | Niederschlag              | Hangneigung                    |
| Geotechnische Materialeigenschaften | Schnelle Schneeschmelze   | Hangwölbung                    |
| Schichtung                          | Hanganschnitte            | Vegetation                     |
| Vorregen                            | Hangunterschneidungen     | Gerinnerauhigkeit              |
| Schneeschmelze                      | Erdbeben                  | Weitertransport bewegter Masse |
| schmelzender Permafrost             | Vulkanausbrüche           |                                |
| Bodentypen und Vegetationsbedeckung | Auflast                   |                                |
| Entwaldung                          | Schnelle                  |                                |
| Änderung der Bodenhydrologie        | Wasserspiegelschwankungen |                                |

### Klassifikationsschema

Das nun folgende Klassifikationsschema der gravitativen Massenbewegungen basiert laut Dikau et al. (2019: 190,200) auf einer Kombination von Prozessmechanismen und der verschiedenen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien, welche wiederum in Fest- und Lockergestein untergliedert werden:

- **Fallen (fall):** Das Untergrundmaterial stürzt größtenteils im freien Fall, springend oder rollend ab. Das Material löst sich an jenen Flächen ab, an denen geringe bis gar keine Scherbewegung stattfindet.
- **Kippen (topple):** Das sogenannte Kippen bezeichnet eine Vorwärtsrotation um einen Punkt oder eine Achse unterhalb des Schwerpunktes des Untergrundmaterials.
- **Gleiten (slide):** Unter Gleiten sind jene Bewegungen zu verstehen, bei denen das Material eine abwärts gerichtete Bewegung auf Gleitflächen oder dünnen Arealen mit intensiver Scherverformung vollzieht.
- **Driften (spread):** Driften beschreibt eine seitliche Bewegung von Untergrundmaterial, bei der es zusätzlich zu einem Einsinken in Schichten ohne intensiver Scherung auf Gleitflächen kommt.
- **Fließen (flow):** Fließen beschreibt eine kontinuierliche, irreversible Deformation des Untergrundmaterials, bei der die Verteilung der Geschwindigkeit innerhalb der bewegten Masse der einer Flüssigkeit gleicht.



- **Hybrid-komplex (complex):** Diese Form der gravitativen Massenbewegung liegt dann vor, wenn die Prozesse in Kombination oder zeitlichen Abschnitten auftreten und dabei der initiiierende Prozess im Zuge der Hangabwärtsbewegung in andere Prozesse übergeht.

Die in der Natur anzutreffenden Massenbewegungen können in den meisten Fällen nicht nur einem einzigen der oben angeführten Bewegungsmechanismen zugeschrieben werden, viel mehr können diese als eine Kombination der verschiedenen Bewegungsformen aufgefasst werden. (vgl. Dikau und Glade 2001: 42; Zepp 2017: 103)

Um nun eine bessere Vorstellung der unterschiedlichen oben angeführten Prozesstypen zu bekommen, werden diese nun in weiterer Folge genauer beschrieben.

### 3.1.1 Fallen

Unter fallenden gravitativen Massenbewegungen sind jene Prozesse zu verstehen, bei denen eine feste oder lockere Gesteinsmasse den Großteil der zurückgelegten Distanz im freien Fall, springend oder rollend zurücklegt. (vgl. Dikau et al. 2019: 203) Nach Zepp (2017: 106) ist das Fallen von Gestein auf Verwitterungsprozesse innerhalb des festen Gesteinsverbandes zurückzuführen und wird überwiegend an steilen Felswänden angetroffen. Am Fuße der Steilwand bildet sich anschließend die sogenannte Sturzhalde (vgl. dazu Abbildung 1), die je nach Größe des losgelösten Materials einen Böschungswinkel von 25°-35° aufweist und sich anhand einer typischen Korngrößenverteilung erkennen lässt. Je größer die abgetragenen Blöcke sind, desto eher sind diese am Ende der Sturzhalde anzutreffen, da sie wegen ihrer vorhandenen Masse große Sprünge vollziehen können. Aufgrund dieser Eigenschaft können Fallprozesse von rein fluvialen Abtragungen abgegrenzt werden, da bei Letzteren die kleinsten Partikel die weitesten Distanzen zurücklegen bis sie zum Erliegen kommen. (vgl. Zepp 2017: 106)

In der untenstehenden Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung eines typischen Fallprozesses verdeutlicht.

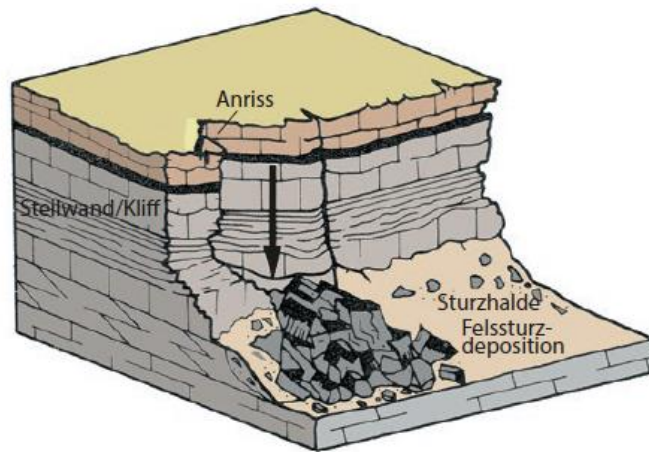


Abbildung 1 - Darstellung eines Fallprozesses im Festgestein unter Entstehung eines Anrisses in der Wand und Bildung einer Sturzhalde – Quelle: Dikau et al. 2019: 204

Anhand der Geomorphometrie können Sturzhalden in die verschiedenen Unterkategorien Schutthalde, Sturzkegel und zusammenwachsende Sturzkegel unterteilt werden. (vgl. Dikau et al. 2019: 203) Die zusammenwachsenden Sturzkegel werden nach Zepp (2017: 107) auch als Haldenhang bezeichnet und unter der Bedingung, dass dieser nicht durch Folgeprozesse zerstört wird, geht die Steilwand im Endstadium endgültig in einen reinen Schutthang über. Der Fallprozess wird weiters nach der Größe des sich gelösten Materials und seiner mit sich bringenden Magnitude klassifiziert. (vgl. Dikau et al. 2019: 204) Die untenstehende Tabelle 4 liefert einen Überblick über die Klassen.

Tabelle 4 - Klassifikation des Fallprozesses nach Korngröße (K) und Magnitude (M) – Quelle: Dikau et al. 2019: 207

| Typisierung des Fallprozesses        | Korngröße des Materials (K) und Magnitude (M)      | Beschreibung                                       |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Steinschlag, Sturz von Lockergestein | K: <50 cm<br>M: <10 m <sup>3</sup>                 | Ablösen und Sturz einzelner Steine                 |
| Blocksturz                           | K: >50 cm<br>M: 10-100 m <sup>3</sup>              | Ablösen und Sturz einiger weniger, großer Blöcke   |
| Großer Blocksturz                    | M: >100 m <sup>3</sup>                             | Ablösen und Sturz mehrerer großer Blöcke           |
| Felssturz                            | M: 10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | Ablösen und Sturz einer konsistenten Gesteinsmasse |
| Bergsturz                            | M: >10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>                 | Hybrid-komplexer gravitativer Prozess              |

### 3.1.2 Kippen

Unter dem sogenannten Kippen wird eine vorwärts gerichtete Rotation des Fest- bzw. Lockergesteins verstanden, welche um einen Punkt bzw. eine Achse unterhalb des eigenen Schwerpunktes erfolgt. Eine Eigenheit der Kippprozesse ist, dass die Rotation des Körpers ohne einen plötzlichen Schwächeanfall des Materials initiiert wird. Das Ausgangsmaterial von Kippungen ist in den meisten Fällen in Form von Säulen oder Pfeilern anzutreffen, welche vom Gestein mehr oder weniger abgekoppelt wurden. Das Ablösen dieser Materialsäulen wird durch zur Hangfläche parallele Klüfte begünstigt und stellt die primäre Kraft einer Kippung dar. In diesem Zusammenhang sind die Neigung des Hanges und die Größe der Basisfläche der abgelösten Säule entscheidende Faktoren. (vgl. Dikau et al. 2019: 205)

Das Ablösen von Säulen geschieht aufgrund von Verwitterungsprozessen im Untergrund, durch Auspressung und der Deformation des zugrundeliegenden Materials. Dabei spielt vor allem das Aufquellen und Schrumpfen von Tonmineralen eine tragende Rolle. Unterschneidungen und Versteilungen der Hänge, sowohl durch fluviale als auch marine Erosionen, oder auch anthropogene Hangeinschnitte stellen ebenso wichtige dispositive Prozesse dar. Das Entfernen von Material kann durch die plötzliche Entlastung die Bildung von Dehnungsklüften begünstigen, welche wiederum Kippungen auslösen können. Das Auftreten von Kippungen ist stark an das Ausgangsmaterial gebunden. Besteht der Hang überwiegend aus Lockergestein, so sind Hangrutschungen schon bei niedrigeren Hanghöhen möglich. Ist das Ausgangsmaterial Festgestein, so sind höhere Hänge notwendig, damit eine Kippung stattfinden kann. Aus diesem Grund kann in Kippungen, welche aus Festgestein bestehen, weit mehr Material in Bewegung gesetzt werden als dies mit lockerem Material möglich wäre. (vgl. Dikau et al. 2019: 205f.)

Kippungen können nach Dikau et al. (2019: 205f.) in einen Fallprozess übergehen, wobei das gekippte Gestein in kleine Teile zerspringt, welche dann das Material der Sturzhalde bilden. Die Geschwindigkeit eines solchen Prozesses kann von Fall zu Fall stark variieren. So ist es möglich, dass es über mehrere Jahrtausende zu einer exponentiellen Steigung der Bewegungsgeschwindigkeit kommt. Eine solche kontinuierliche Kippung kann unter Umständen in einen Fallprozess übergehen, aber auch zum Stillstand kommen. (vgl. Dikau et al. 2019: 206)

Die untenstehende Abbildung 2 verdeutlicht den Kippprozess.

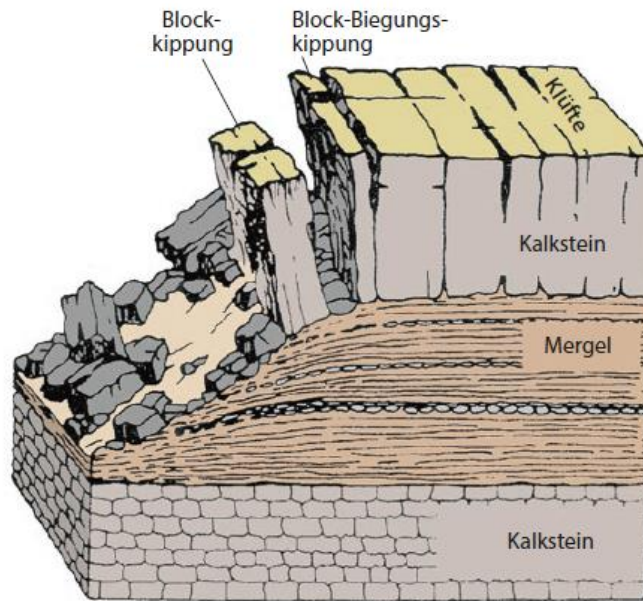


Abbildung 2 - Darstellung eines Kippprozesses – Quelle: Dikau et al. 2019: 207

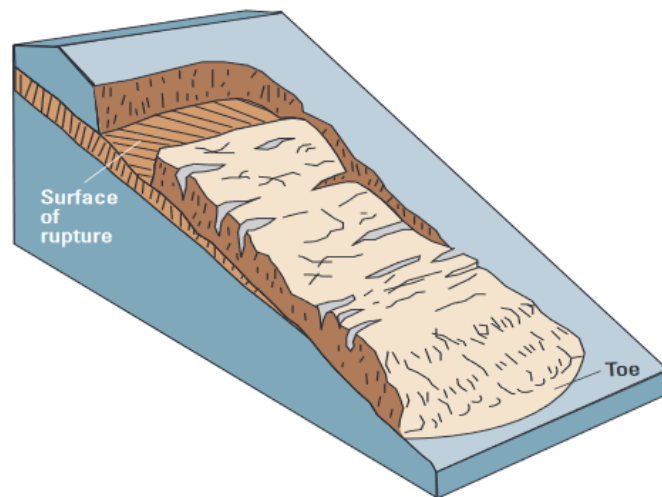
### 3.1.3 Gleiten

Innerhalb der gravitativen Massenbewegungen bezeichnet das Gleiten jene Bewegungsprozesse, bei denen sich die bewegte Masse über einer darunter befindlichen Gleitfläche hinwegbewegt. (vgl. Dikau et al. 2019: 207) Als Gleitfläche dient dabei nach Zepp (2017: 110) meistens eine für Wasser undurchlässige Tonschicht. Eine wichtige Eigenschaft dabei ist, dass sich diese Masse als eine kompakte Einheit hangabwärts bewegt und die Lagerungsverhältnisse während des Verlagerungsprozesses in ihrer anfänglichen Form erhalten bleiben. (vgl. Zepp 2017: 110)

Varnes (1978: 12) gliederte die Gleitprozesse in zwei Typen. Auf der einen Seite wurden jene Prozesse zusammengefasst, in denen sich das bewegte Material überwiegend nicht verformt und sich meist aus einer Einheit zusammensetzt. Auf der anderen Seite listet er die Prozesse auf, welche einen hohen Verformungsgrad haben und sich aus einer Vielzahl von Bruchstücken zusammensetzen. Später wurde das Gleiten in die Translationsrutschung und die Rotationsrutschung unterteilt, da dieser Unterschied nicht weniger wichtig für die Analyse der Stabilität und das Entwerfen von Kontrollmechanismen ist. Letztere Unterteilung findet sich auch heute noch in der aktuellen Fachliteratur und soll daher in weiterer Folge näher erläutert werden.

### Translationsrutschung

Unter Translationsrutschungen, welche die häufigste Form des Gleitens darstellen, werden jene Rutschungen verstanden, die eine zum Hang parallel ausgerichtete Scherfläche aufweisen. Bei der Translationsrutschung bewegt sich der sogenannte Rutschungsblock entlang der hangparallelen Scherfläche (siehe Abbildung 3), wobei sich am Rutschungsfuß sekundäre Rotationsrutschungen bilden können. (vgl. Dikau et al. 2019: 207f.)



*Abbildung 3 - Schematische Darstellung einer Translationsrutschung mit der typischen zum Hang parallelen Scherfläche - Quelle Highland und Bobrowsky 2008: 13*

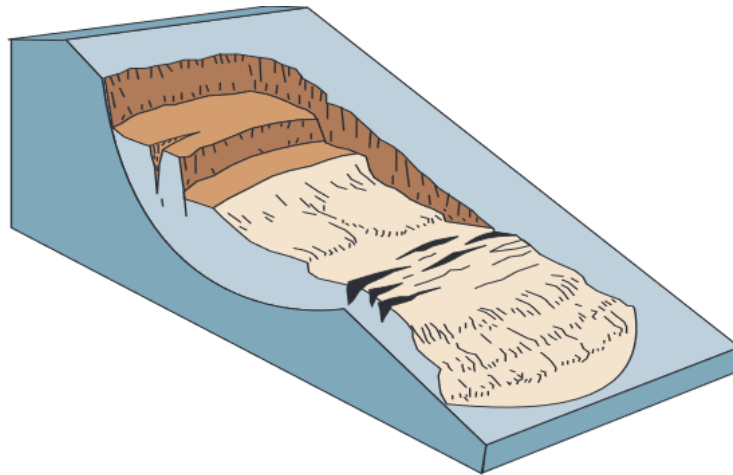
Ein Charakteristikum der Translationsrutschungen ist, dass deren Größenordnungen stark variieren können. Setzt man die Mächtigkeit einer solchen in Verhältnis zu ihrer Längen- bzw. Breitenausdehnung, so ist diese in den meisten Fällen als eher gering einzustufen. Die typische Bewegungsrate einer Translationsrutschung ist mit 50-150 mm pro Jahr anzugeben, wobei in Einzelfällen auch mehrere Meter pro Tag möglich sind. (Dikau et al. 2019: 208)

Typischerweise treten Translationsrutschungen vorzugsweise in Gebieten auf, in denen der Untergrund aus oberflächenparallelen Gesteinsschichten besteht. Als auslösende Faktoren werden Versteilung, Erosion, anthropogene Eingriffe, zu hohe Grundwasserstände oder Porenwasserdruck genannt. Die Translationsrutschungen können in die folgenden Typen untergliedert werden: Blockrutschungen, Schollenrutschungen, Felsgleiten und Schuttrutschungen. In verschiedensten Studien konnte ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Felsgleiten und der Menge des Niederschlags festgestellt werden. (vgl. Dikau et al. 2019: 208)

### Rotationsrutschungen

Wie der Name bereits vermuten lässt, unterscheiden sich die Rotationsrutschungen von den Translationsrutschungen dadurch, dass es sich hierbei um Rutschungen handelt, die eine rotationsförmige Bewegung um eine gedachte Achse durchführen. Den initiiierenden Auslöser stellt dabei ein Gleitprozess dar, welcher eine konkave Scherfläche ausbildet. (vgl. Dikau et al.

2019: 210) Varens (1978: 13) bezeichnet diese Fläche aufgrund ihres charakteristischen Aussehens auch als löffelförmig (siehe Abbildung 4). Die dabei versetzte Masse kann sich unter bestimmten Umständen als kohärente Einheit bewegen, ohne dass es zu größeren Verformungen der inneren Struktur kommt. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 10)



*Abbildung 4 - Schematische Darstellung einer Rotationsrutschung mit der typischen löffelförmigen Scherfläche – Quelle: Highland und Bobrowsky 2008: 10*

Die Geschwindigkeit und das Größenausmaß einer Rotationsrutschung weisen große Spannweiten auf. So kann sich eine solche Rutschung nur wenige Zentimeter pro Jahr bewegen oder gar einige Meter in einem kurzen Augenblick zurücklegen. Dabei kann die Größe des sich lösenden Materials von nur wenigen Quadratmetern bis hin zu mehreren Hektar Land reichen. (vgl. Dikau et al. 2019: 2010)

### 3.1.4 Fließen

Unter den gravitativen Fließprozessen sind jene kontinuierlichen Bewegungen der Oberfläche zu verstehen, in welcher die Scherflächen nahe beieinander liegen, äußerst kurzlebig sind und in den meisten Fällen auch nicht erhalten bleiben. Die Geschwindigkeit der fließenden Masse ist dabei mit jener von viskosen Flüssigkeiten zu vergleichen. Abhängig vom jeweiligen Wassergehalt, der Geschwindigkeit und der weiteren Entwicklung des Prozesses, gibt es häufig eine Reihe von Abstufungen zwischen Rutschen und Fließen. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 16)

Nach Zepp (2017: 110) tritt das sogenannte Übersättigungsfließen genau dann ein, wenn sich das aus Feinerde bestehende Bodenmaterial vollständig mit Wasser gesättigt hat und sich dadurch die Kohäsion des Materials bis zu jenem Punkt verringert hat, an dem die Fließgrenze erreicht wird.

Gravitative Fließprozesse können in der Natur in zahlreichen Erscheinungsformen auftreten. In weiterer Folge sollen nun ausgewählte Beispiele angeführt werden.

### Schuttströme

Ein Beispiel für in der Natur vorkommende gravitative Fließprozesse ist der sogenannte Schuttstrom. Dabei handelt es sich um schnelle Massenbewegungen, die sich im Wesentlichen aus lockerem Sediment und Gestein zusammensetzen und in Kombination mit Wasser einen zähflüssigen Schlamm bilden, welcher hangabwärts fließt. Schuttströme können sich aus Translationsrutschungen oder Rotationsrutschungen entwickeln, wenn deren Masse an Kohäsion verliert, an Geschwindigkeit zunimmt oder zusätzliches Wasser hinzugeführt wird. Innerhalb von kohäsionslosem Sand kann es zu sogenannten Sandflüssen kommen. Anzutreffen sind Schuttströme überwiegend in steilen Schluchten und Canyons und können durch das Fehlen von Vegetation an der Oberfläche begünstigt werden. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 16)

### Trümmerlawinen

Unter Trümmerlawinen werden im Wesentlichen große Ströme an meist offenen Hängen bezeichnet, die sich durch ihre enorme Geschwindigkeit auszeichnen. Trümmerlawinen entstehen beim Kollaps eines instabilen Hanges, wobei die dabei entstehenden Bruchstücke rasant abtransportiert werden. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 20)

### Erdfließen

Beim sogenannten Erdfließen handelt es sich um einen plastischen Fluss des Untergrundes, welcher sich durch einen hohen Verformungsgrad der inneren Struktur kennzeichnen lässt. Dieser Prozess ist überwiegend an flachen bis moderaten Hängen anzutreffen, deren Untergrund sich aus feinkörnigem Material, wie z.B. Schluff und Ton, zusammensetzt oder bereits stark verwittert ist. Die Geschwindigkeit kann dabei drastisch variieren. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 22)

Äußerst langsame Fließbewegungen des Bodens werden dabei häufig als Erdkriechen bezeichnet. Diese Erscheinung zeichnet sich durch ihre langsame, aber stetige Hangabwärtsbewegung aus. Verursacht wird dies durch eine Scherspannung, welche genug Kraft aufweist, um das Untergrundmaterial zu verformen, jedoch nicht stark genug ist, um einen plötzlichen Kollaps zu verursachen. Beobachten lässt sich dieser Prozess durch den Säbelwuchs von Bäumen, verbogenen Zäunen und durch das Bilden von Wellen an der Oberfläche. (vgl. Highland und Bobrowsky 2008: 22f.)

## Muren

Unter Murgängen wird das Fließen einer Nichtnewtonschen-Flüssigkeit bezeichnet, welche sich überwiegend aus den Komponenten Sediment, Wasser und Luft zusammensetzt. Gesteuert wird das Abflussverhalten auf der einen Seite vom Wassergehalt und auf der anderen Seite durch den Anteil von Feststoffen innerhalb des Gemisches. Aufgrund der Kohäsion, dem Auftrieb und der Spannung, die durch den Reibungswiderstand zwischen den Partikeln entstehen, weisen Murgänge eine Scherfestigkeit und ein viskoses Fließverhalten auf. Durch diese Eigenschaften sind Murgänge von reinen Wasserabflüssen abzugrenzen und diese Form des Fließens wird in der Literatur auch als Bingham-Fließen bezeichnet. Charakterisieren lassen sich Murgänge anhand des Anrissgebietes, der Murrinne, dem Murkopf und dem Murkegel, welcher sich am Ende der Rutschung bildet. (vgl. Dikau et al. 2019: 211)

Ausgelöst durch die hohe Dichte und Auftriebskraft können Muren große Blöcke abtransportieren und weisen somit ein enormes Erosionspotential auf. So sind Abtragungen von bis zu 10 m Tiefe innerhalb weniger Stunden keine Seltenheit. (vgl. Dikau et al. 2019: 213) Zu den Faktoren, die das Auftreten von Murgängen begünstigen, zählen ein hohes Angebot an Wasser und eine starke Durchnässung des Untergrundes, was meist durch intensive Niederschläge oder das Abschmelzen von Schnee hervorgerufen wird. Muren können sich aber auch aus bereits vorhandenen Rutschungen entwickeln, in dem sich durch die Aufnahme von Wasser eine Bingham-Flüssigkeit bildet. (vgl. Dikau et al. 2019: 214)

Ahnert (2015: 103) nennt drei Grundvoraussetzungen für das Auftreten von Murgängen:

- Es muss genug Ausgangsmaterial mit ausreichend Feinmaterial akkumuliert sein.
- Es werden Starkregenereignisse oder Schmelzwasser mit ausreichenden Wassermengen benötigt, um die Porenräume des Schuttmaterials zu füllen und somit für einen positiven Porenwasserdruck zu sorgen.
- Ein hinreichend großes Gefälle muss vorhanden sein.

### 3.1.5 Driften

Das Driften beschreibt eine Bewegungsform von kohäsivem Fest- oder Lockergestein, welches sich durch seine duktilen Eigenschaften auszeichnet. Das Material liegt dabei auf einem deformierbaren Untergrund auf und verformt sich im Zuge dieser Bewegung. Dadurch werden wiederum die brüchigen Zonen der Hänge beansprucht. (vgl. Dikau et al. 2019: 216)

Wie die meisten Formen der gravitativen Massenbewegungen weist auch das Driften eine hohe Spannweite der Geschwindigkeit auf. So reicht diese von nur wenigen Millimetern pro Jahr bis hin zu mehreren Metern in nur wenigen Sekunden. (vgl. Dikau et al. 2019: 216)



Weisen die Schichtungen des Locker- bzw. Festgesteins eine relativ einheitliche Struktur auf, so bricht die Masse in einzelne Fragmente, welche die Ausbildung einer Horst- und Grabenstruktur begünstigt. Nach Dikau et al. (2019: 216f.) ist heutzutage davon auszugehen, dass sich innerhalb des plastischen, liegenden Materials keine Scherflächen ausbilden dürften und der Driftprozess somit ohne dem Auftreten von Gleitmechanismen abläuft. Die Gesteinsdecken dürften beim Driften eher eine passive Rolle einnehmen. Sie sind überwiegend an die Attribute der duktilen Schichten gebunden und an ihren Rändern kann es zu Ausbuchtungen im verformbaren Material kommen. Zudem sind hier mit großer Wahrscheinlichkeit andere gravitative Massenbewegungen, wie Fallen oder Kippen, beteiligt. Beispielsweise kann das Driften in den Oberhängen von Felsfließen angetroffen werden. Dabei spricht man dann meist von der sogenannten Bergzerreißung und die sich dabei bewegendende Masse kann aus mehreren km<sup>3</sup> Untergrundmaterial bestehen. (vgl. Dikau et al. 2019: 216f.)

Innerhalb von Lockergesteinsschichten wird das Driften durch eine plastische Verformung und dem dabei entstehenden Kollaps der sensitiven, mit Wasser gesättigten Ablagerungsschichten eingeleitet. Der Stabilitätsverlust dieser sensiblen Schichten kann sich dabei über Jahrtausende hinweg ausbilden. Charakteristisch für den Prozess, der bereits bei sehr geringer Hangneigung auftreten kann, sind dann das überraschende Auftreten und die kurze Dauer. Meist ist das Spektakel nach nur wenigen Minuten wieder vorbei. (vgl. Dikau et al. 2019: 217)

Ausgelöst durch die kollabierenden Schichten kann es zu weiterführenden Prozessen, wie vertikalem Absenken, dem Bruch von Material oder Fließen kommen. Fließen tritt hier meist in der Form von Quicksand auf. (vgl. Dikau et al. 2019: 217)

### 3.1.6 Hybrid-komplexe Bewegungen

Die in der Natur anzutreffenden gravitativen Massenbewegungen treten in den meisten Fällen nicht in einer der oben angeführten Bewegungen in Reinform auf. Vielmehr sind diese als Kombination der verschiedenen Bewegungsprozesse aufzufassen. (vgl. Varnes 1978: 20f.)

Nach Dikau et al. (2019: 218) stellt ein klassisches Beispiel einer hybrid-komplexen Bewegung ein Prozess dar, welcher als Translationsrutschung startet, dabei in einen Fallprozess übergeht, bis er schließlich in einen Fließprozess mündet. Der Begriff „komplex“ ist daher nicht an ein nichtlineares, unvorhersehbares Verhalten geknüpft, sondern spiegelt die Vielfältigkeit des ablaufenden Prozesses wider. Aus diesem Grund ergänzen Dikau et al. (2019) den deutschsprachigen Begriff um das Wort „hybrid“, um dies besser zu versinnbildlichen. (vgl. Dikau et al. 2019: 218f.)

Ein Beispiel für eine solche Massenbewegung ist der Bergsturz. Für Dikau et al. (2019: 219) stellt dieser den zentralen Prozess schlechthin im Zusammenhang mit hybrid-komplexen Prozessen dar. Als Bergsturz gelten nach Dikau et al. (2019: 2019) jene Massenbewegungen aus trockenem Fest- und Lockersediment, welche eine enorme Masse von über eine Mio. m<sup>3</sup> aufweisen.

Für Ahnert (2015: 96) ist der Übergang zwischen Felssturz und Bergsturz fließend. Sie definiert im Folgenden vier Kriterien, welche erfüllt sein müssen, um von einem Bergsturz sprechen zu können:

- Der Prozess ist nur von kurzer Dauer und ereignet sich binnen weniger Sekunden.
- Das anstehende Gestein muss den größten Teil des Bergsturzes ausmachen und die Abrissfläche muss sich durch das anstehende Gestein ziehen.
- Im Zuge des Prozesses wird die Gesteinsmasse in lose Fragmente zertrümmert.
- Die sich bewegende Masse sollte einen Umfang von nicht weniger als 1 Mio. m<sup>3</sup> Masse aufweisen.

Aufgrund eines Luftkissens, welches sich an der unteren Seite der Rutschung bilden kann und somit die Reibung minimiert, sind Geschwindigkeiten von über 100 km/h möglich. Ein Bergsturz lässt sich vom Bergrutsch genau durch diese enormen Geschwindigkeiten differenzieren. (vgl. Ahnert 2015: 96)

### 3.2 Ursachen von gravitativen Massenbewegungen

Im folgenden Abschnitt soll auf die Entstehung und Ursachen von gravitativen Massenbewegungen eingegangen werden. Dazu wird zunächst ein Überblick über die wichtigsten Kräfte und Spannungen, die im Untergrund vorherrschen und somit beim Ablauf einer gravitativen Massenbewegung beteiligt sind, geliefert. Danach werden unterschiedliche Faktoren behandelt, welche für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen mitverantwortlich sind bzw. die Entstehung dieser begünstigen.

#### 3.2.1 Kräfte und Spannungen im Untergrund

Unter Spannungen in einem Festkörper werden jene Kräfte verstanden, die im Inneren eines Volumens wirken und dabei auf eine Flächeneinheit des Körpers bezogen werden. Die Spannung kann dabei in zwei Teilkräfte zerlegt werden. Auf der einen Seite existiert die sogenannte Normalspannung  $\sigma$ , bei der es sich um jene Kraft handelt, die senkrecht auf die betrachtete Fläche einwirkt. Die zwei Erscheinungsformen der Normalkraft sind die Druckspannung (positiv) und die Zugspannung (negativ). Auf der anderen Seite gibt es die Scherspannung  $\tau$ , bei der es sich um jene Kraft handelt, die tangential zur betrachteten Fläche

wirkt. Durch die auftretenden Spannungen kann der Körper bis zu einem bestimmten Schwellenwert belastet werden, bevor es zu einer irreversiblen Verformung kommt. In diesem Zusammenhang wird zwischen elastischen, plastischen und bruchhaften Verformungen unterschieden. Die untenstehende Tabelle 5 gibt einen Überblick über die in Volumen wirkenden Kräfte bzw. Spannungen. (vgl. Dikau et al. 2019: 190f.)

*Tabelle 5 - Die in Körpern wirkenden Kräfte bzw. Spannungen. A bezeichnet hier die Fläche der Krafteinwirkung. – Quelle: Dikau et al. 2019: 191*

| Kraft            | Spannung      | Gleichung                |
|------------------|---------------|--------------------------|
| Druckkraft $D$   | Druckspannung | $\sigma_D = \frac{D}{A}$ |
| Zugkraft $Z$     | Zugspannung   | $\sigma_Z = \frac{Z}{A}$ |
| Scherkraft $F_S$ | Scherspannung | $\tau = \frac{F_S}{A}$   |

Die Scherspannung kann als lineare Funktion der Normalspannung interpretiert werden und bereits 1776 formulierte der französische Ingenieur Coulomb die dazugehörige Funktionsgleichung:  $\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$  (vgl. Dikau et al. 2019: 192)

Um den Widerstand eines Körpers gegen eine Tangentialverschiebung entlang einer Scherfläche zu beschreiben, wird die sogenannte Scherfestigkeit herangezogen. Diese entspricht dabei der maximalen Scherspannung  $\tau$  mit der ein Körper belastet werden kann bevor er bricht und ist von den sogenannten Scherparametern  $\varphi$  (Reibungswinkel) und  $c$  (Kohäsion) abhängig. Der Reibungswinkel  $\varphi$  ist dabei von der Rauigkeit der Bodenkörner und deren Form, nicht aber von der Normalspannung abhängig. Bei kohäsionslosem Material, wie getrocknetem Sand, bestimmt er praktisch im Alleingang die Scherfestigkeit. (vgl. Dikau et al. 2019: 193)

Innerhalb von bindigem Untergrundmaterial wird die Scherfestigkeit auch von der Kohäsion  $c$  abhängig, welche wiederum durch die Haftkräfte zwischen den Partikeln verursacht wird. Dikau et al. (2019: 192f.) bezeichnen diese Haftkräfte als die „echte Kohäsion“. Innerhalb von Festgestein ist die Kohäsion überwiegend chemisch, in Lockergestein durch Zementierung und in tonreichen Erden durch ionische Bindungen bedingt. In Bezug auf die Scherfestigkeit spielen vor allem der Porenwasserdruck und der Tongehalt entscheidende Rollen. (vgl. Dikau et al. 2019: 192f.)

Diese beiden Faktoren sollen nun in weiterer Folge näher erläutert werden.

### Zusammenhang zwischen Porenwasser und Scherfestigkeit

Abseits der oben beschriebenen echten Kohäsion wirken auch innerhalb der einzelnen Porenräume Kräfte. Diese werden durch das Eindringen von Wasser in die kleinen Hohlräume ausgelöst, wobei durch Überlagerungen von Wassersäulen Druck aufgebaut wird, der als Porenwasserdruck  $u$  definiert wird. Der Porenwasserdruck lässt sich aus der Höhe der Wassersäule  $h_p$ , der Dichte des Wassers  $D_w$ , und der Gravitationskraft der Erde  $g$  berechnen. Eine wichtige Eigenschaft des Porenwasserdrucks ist es, dass er nicht gerichtet ist, daher: der Betrag ist in alle Richtungen gleich. (vgl. Dikau et al. 2019: 194f.)

Sind die Poren des Untergrundes nur unzureichend mit Wasser gefüllt, treten zusätzlich Kapillar- und Absorptionskräfte auf, welche auf das Untergrundmaterial kohäsiv wirken. Diese Kräfte werden als der negative Porenwasserdruck  $-u$  bezeichnet. Bei steigendem Wassergehalt wird die scheinbare Kohäsion des Untergrundmaterials abgebaut, bis sie bei der Übersteigung der maximalen Wassersättigung schlussendlich vollständig zusammenbricht. Wird bei einem vollständig gesättigten System nun die Normalspannung durch eine Auflast erhöht, so kann das Porenwasser in undurchlässigem Gestein nicht schnell genug abfließen. Dadurch wird mehr Kraft vom Korngerüst auf das Porenwasser übertragen, wodurch es zu einer Erhöhung des positiven Porenwasserdrucks  $u$  bei gleichzeitiger Entlassung der Spannungen im Korngerüst kommt. Diese Spannungen können auch als effektive Normalspannung  $\sigma'$  bezeichnet werden (vgl. Dikau et al. 2019: 195)

Dikau et al. (2019: 195) nehmen innerhalb der Beziehung des Wassergehalts und der effektiven Normalspannung eine Fallunterscheidung vor:

- 1.) Innerhalb von vollständig getrocknetem Lockergestein ist der Porenwasserdruck dem Atmosphärendruck gleichzusetzen und für den Porenwasserdruck gilt  $u = 0$ . Dadurch entspricht die effektive Normalspannung der gesamten Normalspannung:

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma' = \sigma - 0$$

$$\sigma' = \sigma$$

- 2.) Im Fall der Wassersättigung des Untergrundes existiert ein positiver Porenwasserdruck. Dies führt zu einer Differenz zwischen totaler Normalspannung  $\sigma$  und dem Porenwasserdruck und in Folge dessen kommt es zu einer Abnahme der effektiven Normalspannung:

$$\sigma' = \sigma - u$$

- 3.) Ist das Untergrundmaterial nicht vollständig gesättigt, so ist der Porenwasserdruck negativ und führt daher zu einer gesteigerten effektiven Normalspannung. Dadurch wird die Scherfestigkeit erhöht:

$$\sigma' = \sigma - (-u)$$

$$\sigma' = \sigma + u$$

Die Coulomb-Mohr'sche Gleichung muss daher wie folgt angepasst werden:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi')$$

Wobei  $\tau$  die Scherfestigkeit,  $c'$  die effektive Kohäsion,  $\sigma'$  die effektive Normalspannung und  $\varphi'$  der effektive Reibungswinkel ist.

#### Zusammenhang zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit

Innerhalb des Untergrundmaterials kommt dem Tongehalt, aufgrund seiner kohäsiven Eigenschaften, eine tragende Rolle zu. Durch diese Eigenschaft wird der Tongehalt auch oft als Bindigkeit bezeichnet. Bei abnehmender Korngröße und gleichzeitiger Zunahme des Tongehalts treten Kräfte auf, welche ausschlaggebende Einflüsse auf die Scherfestigkeit des Untergrundmaterials ausüben. Wird tonreiches Material mit Wasser in Berührung gebracht, so kommt es zum sogenannten „Quellen“. Dies lässt sich überwiegend auf elektrostatische Anziehungen, die Van-der-Waals-Kräfte und die schichtweise Einlagerung von Wasser in quellfähigem Tonmineral zurückführen. Durch das Trocknen von Material ist der Quellvorgang reversibel und geht dadurch in einen Schrumpfprozess über. Diese beschriebene Eigenschaft von tonhaltigen Erden und Steinen kann dazu führen, dass sich das Untergrundmaterial um bis zu 5 % heben bzw. senken kann. Durch den Schrumpfungsprozess kann es zur Bildung von Rissen kommen, wodurch z.B. im Falle eines Regenereignisses das Wasser rapide zur Scherfläche einer Hangrutschung vordringen kann. (vgl. Dikau et al. 2019: 196)

Betrachtet man nun in diesem Zusammenhang die Kohäsion  $c'$  und den Reibungswinkel  $\varphi'$ , so stellt sich heraus, dass die beiden Variablen sehr stark vom Tongehalt bzw. von der Art des Tonminerals abhängig sind. Innerhalb kohäsionsarmer Sande lässt sich mit einer Zunahme des Tongehalts eine Zunahme der Bindigkeit verknüpfen. Steigt jedoch der Anteil an quellfähigen Mineralen, so wirkt sich dies negativ auf die Stabilität eines Hanges aus. (vgl. Dikau et al. 2019: 196)

### 3.2.2 Beeinflussende und auslösende Faktoren von gravitativen Massenbewegungen

Das Auftreten einer gravitativen Massenbewegung kann in den meisten Fällen nicht an einem Faktor allein festgemacht werden, sondern basiert meist auf einem komplexen Zusammenspiel mehrerer Einflüsse, die sowohl einer natürlichen als auch einer anthropogenen Quelle entspringen können. (vgl. McColl: 2015: 17f.)

So geht beispielsweise aus einer Studie über die *Abbotsford Landslide*, welche sich 1979 in Neuseeland ereignete, hervor, dass es im Wesentlichen drei ausschlaggebende Einflüsse gab, welche die Rutschung verursacht haben dürften (vgl. Hancox 2008: 184):

- Das Gebiet wies sowohl eine ungünstige geologische als auch topographische Lage auf. Diese zeichnete sich durch das Vorhandensein einer äußerst schwachen Tonschicht und einer Destabilisierung des Hanges durch fluviale Erosion aus.
- Es kam zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks, was sich dadurch äußert, dass die Stabilität des Hangs auf eine Erhöhung des Grundwasserspiegels sehr sensibel reagierte. Aufgrund von erhöhten Niederschlagsmengen in den Jahren davor wird davon ausgegangen, dass dieser dauerhaft gestiegen war.
- Es kam zu einer anthropogenen Beeinflussung des Hanges durch den Abbau von Sand am Fuße des Hanges.

Hancox (2008: 184) listet zudem noch weitere Faktoren, wie die Entfernung der Vegetation, die Entwicklung der nahegelegenen Stadt und seismische Aktivitäten im Gebiet der Rutschung auf. Diesen weist er jedoch eine weit weniger bedeutende Rolle wie den zuvor angeführten Faktoren zu.

Oft werden in der Fachliteratur die verschiedenen Faktoren, die sich auf die Hangstabilität auswirken, in die drei Gruppen *dispositive*, *auslösende* und *kontrollierende* Faktoren untergliedert. Bei Glade und Crozier (2006: 45f.) werden diese zusätzlich um den Faktor *Veranlagung* ergänzt. In weiterer Folge sollen diese Faktoren nun genauer beschrieben werden. Dazu wird zunächst das Konzept der Hangstabilität behandelt. Anschließend wird ein Überblick über die wichtigsten geologischen, morphologischen, hydrologischen und vegetativen Einflüsse gegeben.

### 3.2.2.1 Hangstabilität

Unter der Stabilität bzw. der Instabilität eines Hangs wird die Tendenz verstanden, dass es zum Auftreten einer gravitativen Massenbewegung kommen kann. Zu beachten ist, dass dabei besonders langsame Erscheinungen, wie das Bodenkriechen, aus dieser Definition ausgeschlossen werden. (vgl. Glade und Crozier 2006: 43f.)

Wie in Kapitel 3.2.1 bereits erläutert, stehen sich in einem Hang jene Kräfte gegenüber, die einerseits das Ablösen einer Hangrutschung begünstigen, wie beispielsweise die Scherspannung, und andererseits Kräfte, welche die Stabilität eines Hanges fördern, wie die Scherfestigkeit. Im Wesentlichen verliert ein Hang genau dann seine Stabilität, wenn die Scherspannung stärker als die Scherfestigkeit ist. Die Scherspannung wird dabei von äußeren Faktoren und inneren Faktoren beeinflusst. (vgl. Sharma 2010: 81)

Unter den äußeren Faktoren werden jene natürlichen oder anthropogenen Einflüsse verstanden, welche die Spannungen im Untergrund z.B. durch eine Veränderung der Hanggeometrie, der Bodenfeuchtigkeit oder des Porendrucks verursachen. Die inneren Faktoren umfassen beispielsweise die Verwitterung und Erosion im Hangboden. (vgl. Sharma 2010: 81)

Mittels der Scherspannung und der Scherfestigkeit kann ein Sicherheitsfaktor berechnet werden. Dabei wird ein Hang als sicher erachtet, wenn die Scherfestigkeit größer als die Scherspannung ist. Der berechnete Sicherheitsfaktor nimmt dabei einen Wert größer als 1 an. (vgl. Glade und Crozier 2006: 44)

Um räumliche Unterschiede besser zu verdeutlichen, kann es jedoch von Vorteil sein mit dem Konzept der „überschüssigen Stabilität“ zu arbeiten, da der Sicherheitsfaktor an dieser Stelle eine Schwäche aufweist. Glade und Crozier (2006) untermauern dies anhand eines Beispiels:

So kann das Verhältnis von Scherfestigkeit zu Scherspannung in einem gedachten Hang A 400 zu 200 betragen und in einem weiteren gedachten Hang B 200 zu 100 betragen. In beiden Fällen würde sich somit der Sicherheitsfaktor 2.0 berechnen lassen. Die überschüssige Stabilität von Hang A beträgt jedoch 200, von Hang B nur 100. Um eine Hangrutschung zu initiieren müsste nun bei Hang A die Stabilität weit mehr gesenkt werden, als dies im Hang B der Fall wäre. (vgl. Glade und Crozier 2006: 44)

Der Stabilitätszustand eines Hanges kann in eine der folgenden drei Kategorien (siehe auch Abbildung 5) eingegliedert werden (vgl. Glade und Crozier 2006: 45ff.):

- **Stabiler Zustand:** In diesem Stadium befinden sich jene Hänge, die eine Stabilität aufweisen, mit der sie den natürlichen, destabilisierenden Faktoren gut trotzen können.
- **Geringfügig anfälliger Zustand:** Dabei handelt es sich um Hänge, deren Stabilität jeder Zeit, beim Erreichen eines bestimmten Schwellenwertes, versagen kann.

- **Aktiv instabiler Zustand:** Hierbei handelt es sich um Hänge, deren Stabilität kaum gegeben ist und sich somit bereits in einer kontinuierlichen oder auch zeitweise unterbrochenen Bewegung befinden.

Die Faktoren, welche die Instabilität eines Hanges hervorrufen, werden von Glade und Crozier (2006: 45f.) wiederum in vier Kategorien (siehe auch Abbildung 5) gegliedert:

- **Veranlagung:** Diese umfasst jene Faktoren, die auf der einen Seite die Stabilität eines Hanges beeinflussen und auf der anderen Seite als eine Art Katalysator für andere Kräfte wirken. Ein klassisches Beispiel stellt hier Untergrundmaterial dar, welches beim Kontakt mit Wasser äußerst sensibel reagiert und somit bei intensiven Regenfällen die Stabilität eines Hanges gefährden kann.
- **Vorbereitende Faktoren:** Die vorbereitenden Faktoren umschließen alle dynamischen Faktoren, welche die Stabilität eines Hanges gefährden, jedoch nicht für das schlussendliche Auslösen einer Rutschung verantwortlich gemacht werden können. Als Beispiele sind hier die Witterungsbedingungen, Hebungen oder erosive Prozesse zu nennen.
- **Auslösende Faktoren:** Diese beschreiben jene Faktoren, die einen Hang von einem geringfügig anfälligen Stadium in einen aktiv instabilen Zustand überführen können. Typische auslösende Faktoren stellen üblicherweise intensive Regenfälle, das plötzliche Abschmelzen von Schnee oder Eismassen, seismische Aktivitäten und Unterschneidungen des Hanges dar und sind somit überwiegend von exogener Natur.
- **Kontrollierende Faktoren:** Zu guter Letzt existieren noch die sogenannten kontrollierenden Faktoren. Dabei handelt es sich um Faktoren, die überwiegend das Verhalten von bereits aktiven Rutschungen, wie z.B. die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Rutschung prägen.

In der folgenden Abbildung wird schematisch der Zusammenhang zwischen den einzelnen Stadien der Stabilität und der einfließenden Faktoren gezeigt.



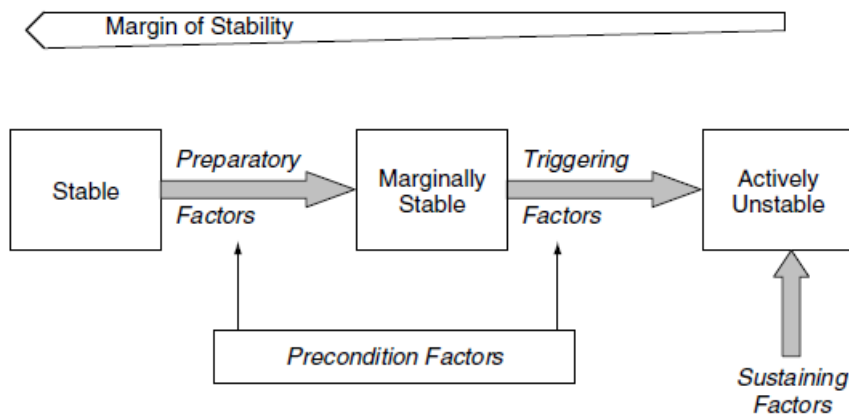


Abbildung 5 - Schematischer Überblick über den Zusammenhang der Stadien der Hangstabilität und der darauf einwirkenden Faktoren - Quelle: Glade und Crozier 2006: 45

### 3.2.2.2 Geologische Einflüsse

Gravitative Massenbewegungen werden in vielen Fällen mit einem bestimmten geologischen Untergrund in Verbindung gebracht. Aus diesem Grund wurden vor allem in vergangener Zeit Massenbewegungen anhand ihrer geologischen Gesichtspunkte charakterisiert und in Gefahrenkarten kartiert. Da in den meisten Ländern bereits großflächig geologische Karten aufliegen, erweist sich dies als besonders effizient und bietet den Vorteil, dass ein schneller Überblick über anfällige Regionen geschaffen werden kann. Ein großer Nachteil besteht jedoch darin, dass weder eine exakte räumliche noch zeitliche Abschätzung getroffen werden kann, wann und wo eine Rutschung genau stattfinden wird. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 41)

Um dies zu präzisieren, ist es nach Sidle und Ochiai (2006: 41f.) wichtig, die unterschiedlichen Verwitterungsprozesse mit einzubeziehen, da diese durch ihren Einfluss auf die Mächtigkeit des Untergrundes und den Abflussweg des Wassers maßgeblich über die Stabilität eines Hanges mitentscheiden und manchmal auch die Gleitfläche prägen.

Die dabei wichtigsten Verwitterungsprozesse nennen die beiden Autoren die physikalische und chemische Verwitterung. Dabei spielt allerdings nicht nur der Verwitterungsprozess per se eine tragende Rolle, sondern auch die Verlagerungen von verwittertem Material, z.B. durch Wind und Wasser, stehen dabei im Fokus. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 41f.)

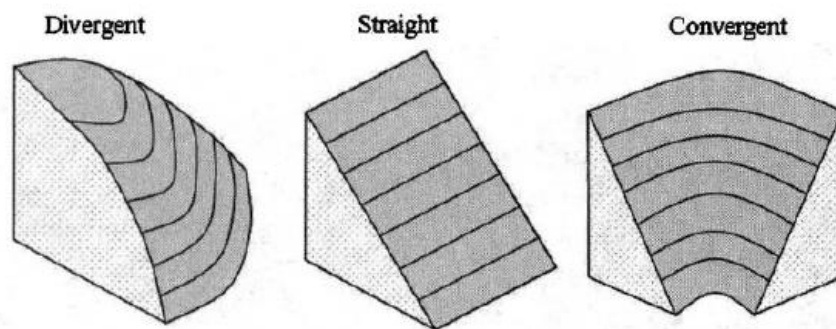
Einen weiteren Einfluss auf die Hangstabilität üben die jetzigen tektonischen Prozesse aus. So ist es nicht unüblich, dass schwache Untergrundmaterialien in jenen Regionen vorherrschen, in denen es immer wieder zu tektonischen Bewegungen kommt. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 47)

### 3.2.2.3 Geomorphologische Einflüsse

Auch wenn die Steigung des Hanges einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität von diesem ausübt und durch das Erstellen eines digitalen Höhenmodells flächendeckend zur Verfügung steht, so wird diese doch häufig überschätzt. Es ist daher wichtig die Steigung in Kombination mit weiteren geomorphologischen, hydrologischen oder geologischen Faktoren zu betrachten. So können z.B. tektonische Bewegungen oder Vergletscherung ihren Beitrag bei der Verteilung eines Hanges leisten, wie dies z.B. in den europäischen Alpen der Fall ist. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 55f.)

Analysen haben gezeigt, dass gerade bei flachgründigen Massenbewegungen der Winkel des Hanges eine entscheidende Rolle spielt. Die Festigkeit des Untergrundmaterials beeinflusst die Steigung des Hanges, welche auch eine wesentliche Rolle bei der Art der gravitativen Massenbewegung spielt. So sind rapide Massenbewegungen, wie z.B. Schuttströme, eher an steilen Hängen und langsame Bewegungen, wie z.B. das Erdkriechen, eher an flachen Hängen anzutreffen. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 56f.)

Innerhalb von steilem Gelände ist auch die Form des Hanges entscheidend, da diese einen wichtigen Stellenwert für dessen Stabilität spielt. Die Form des Hanges wird dabei typischerweise als divergent, konvergent oder eben bezeichnet. (siehe dazu Abbildung 6) Dabei zählen divergente Hänge zu den stabilsten, und konvergente Hänge zu den instabilsten Hängen. Dies lässt sich damit begründen, dass sich in konvergenten Hängen das Wasser an wenigen Bereichen konzentriert, wodurch der Porenwasserdruck im Untergrundmaterial während Ereignissen wie Regen oder Schneeschmelze stark ansteigen kann. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 58f.)



*Abbildung 6 - Schematische Darstellung der Hangformen - Quelle: Sidle und Ochiai 2006: 59*

#### 3.2.2.4 Hydrologische Einflüsse

Nach Sidle und Ochiai (2006: 67f.) handelt es sich bei den hydrologischen Prozessen, wie Niederschlag, Verdunstung oder dem Abfluss von Wasser, um wichtige Faktoren, die vor allem beim Auslösen einer gravitativen Massenbewegung eine tragende Rolle spielen. Gerade der Niederschlag wird unter Anbetracht von vier Merkmalen mit dem Einleiten einer Massenbewegung verknüpft. Dabei ist der gesamte Niederschlag, die Intensität, der vorhergehende Niederschlag und die Dauer eines Sturms von großer Bedeutung. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 68)

Die Einflüsse, welche hydrologische Prozesse auf die Stabilität eines Hanges ausüben, rühren daher, dass diese den Grundwasserspiegel verändern. Nach McColl (2015: 35) kann dies auf drei Wegen erfolgen. Erstens durch eine Erhöhung des Grundwassergradientens, welcher zu Fließen oder Versickerung im Hang führt. Zweitens kann eine Veränderung des Grundwasserspiegels eine Veränderung des Porenwasserdrucks nach sich ziehen. Drittens kann die Sättigung des Untergrundes mit Wasser die Stärke des Materials beeinflussen.

#### 3.2.2.5 Einflüsse durch die Vegetation

Die Vegetationsdecke, sofern vorhanden, ist ein wichtiger Faktor, der zur Stabilität eines Hanges beitragen kann. Vor allem das Vorhandensein von Bäumen gilt in diesem Zusammenhang als besonders entscheidend. Auf der einen Seite stabilisiert die Vegetation den Hang durch das Entfeuchten mittels der Evapotranspiration und auf der anderen Seite erhöht das Wurzelgeflecht die Bindigkeit des Untergrundmaterials. Da die Böden in gemäßigten Klimazonen so gut wie immer nahezu gesättigt sind, spielt die Evapotranspiration eher in den Subtropen und Tropen eine wichtige Rolle und ist in Ländern wie Österreich ein eher zu vernachlässigender Faktor. (vgl. Sidle und Ochiai 2006: 89)

Der Wirkungsmechanismus kann dabei in den hydrologischen Mechanismus und den mechanischen Mechanismus unterteilt werden. Ein Überblick dazu wird in der nachstehenden Tabelle 6 gegeben:

*Tabelle 6 - Einflüsse der Vegetation auf gravitative Massenbewegungen, unterteilt nach hydrologischen und mechanischen Mechanismen – Quelle: Sidle und Ochiai 2006: 90*

| <b>Hydrologischer Mechanismus</b>                                                                                                                                                                     | <b>Mechanischer Mechanismus</b>                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Durch die Abdeckung des Untergrundes, z.B. durch Blätter, wird der Niederschlag abgefangen, was zu einer Erhöhung der Evapotranspiration führt und somit weniger Wasser in den Boden eindringen kann. | Starke Wurzeln binden das instabilere Material an das stabile Material.                                              |
| Durch das Wurzelgeflecht wird dem Untergrund Wasser und somit Feuchtigkeit entzogen.                                                                                                                  | Starke Wurzeln verstärken potenzielle Massenbewegungen entlang der Flanken von schwachem Gestein.                    |
| Stängel, Wurzeln etc. führen zu einer Aufrauung der Oberfläche, was in weiterer Folge die Infiltrationskapazitäten des Bodens erhöht.                                                                 | Wurzeln erhöhen die Scherfestigkeit des Untergrundes, indem sie eine verstärkende Membran zur Verfügung stellen.     |
| Durch das Austrocknen des Bodenmaterials kann dieses rissig werden, was zu einer Erhöhung der Infiltrationskapazität führt.                                                                           | Durch eine Verankerung der Wurzeln in den festen Schichten des Untergrundes werden die oberen Schichten unterstützt. |
|                                                                                                                                                                                                       | Das Gewicht von Bäumen erhöht die Normal- und Hangabtriebskraft.                                                     |
|                                                                                                                                                                                                       | Der Wind überträgt über die Baumstämme Kräfte auf den Untergrund.                                                    |

Mögliche weitere Einflüsse bei der Entstehung gravitativer Massenbewegungen können seismischer und vulkanistischer Natur sein. Da in Österreich und in Folge dessen in den drei Untersuchungsgebieten Behamberg, St. Pantaleon-Erla und Wilhelmsburg kaum bzw. keinerlei Aktivitäten dieser Form ausgeprägt sind, wird im Zuge dieser Arbeit nicht weiter auf diese eingegangen.

### 3.3 Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen

Das Zusammentreffen von gravitativen Massenbewegungen und dem menschlichen Lebensraum ist so gut wie immer mit Kosten verbunden, ganz gleich ob sich diese direkt auf die entstandenen Schäden oder auf die Maßnahmen, welche zur Abschwächung von Massenbewegungen dienen, belaufen. (vgl. Glade und Crozier 2006: 48)

Um die zerstörerische Kraft einer Massenbewegung grob einschätzen zu können, wird meist das Volumen bzw. die Geschwindigkeit, der sich in Bewegung befindenden Masse herangezogen. Dabei spielt, wie bereits erwähnt, vor allem die Geschwindigkeit beim Ausmaß der Zerstörung eine wichtige Rolle. (vgl. Turner: 2018: 5) Angesichts dieser Tatsache empfehlen Glade und Crozier (2006: 61) die Reaktion auf eine Massenbewegung in Abhängigkeit der erwarteten Geschwindigkeit zu fällen. So ist es durchaus möglich, die Wirtschaftlichkeit dabei außer Acht gelassen, dass ein sich sehr langsam bewegnender

Untergrund durchaus bebaut werden kann, indem beispielsweise auf bewegliche Leitungen im Untergrund oder verstärkte Fundamente im Hausbau gesetzt wird. (vgl. Glade und Crozier 2006: 61)

Auch wenn fatale Ereignisse von ungeheurem Ausmaß, wie Bergstürze, die ganze Landstriche und Siedlungen verwüsten, eher selten auftreten, so sind auch jene Gefahren, welche von kleineren gravitativen Prozessen ausgehen, nicht zu unterschätzen. Bereits kleinste Felsstürze können im schlimmsten Fall einen Zug entgleisen lassen. (vgl. Turner 2018: 5)

Die Auswirkungen gravitativer Massenbewegungen können in direkte bzw. indirekte Folgen unterteilt werden und machen sich in bestimmten Fällen nicht immer gleich bemerkbar. (vgl. Crozier et al. 2013: 607) Diese sollen in weitere Folge nun kurz beschrieben werden.

#### Direkte Auswirkungen

Zu den direkten Auswirkungen werden beispielsweise jene Folgen gezählt, die durch den direkten Aufprall der Massenbewegung an Gebäuden, Menschen oder Tieren entstehen. Dabei sind vor allem sehr schnelle, plötzlich auftretende Massenbewegungen lebensbedrohlich. (vgl. Glade und Crozier 2006: 49f.)

Treten gravitative Massenbewegungen direkt unter oder hangabwärts eines Gebäudes auf, kann dies die Stabilität gefährden und in gewissen Fällen kann es dazu führen, dass das gesamte Gebäude verschoben wird. Direkter Kontakt von Mensch oder Tier mit gravitativen Massenbewegungen führen nicht selten zu schweren Verletzungen oder im Ernstfall sogar zum Tod. Dies kann auf der einen Seite z.B. direkt durch einen Steinschlag oder indirekt durch ein kollabierendes Gebäude geschehen. (vgl. Glade und Crozier 2006: 49)

In diesem Zusammenhang können auch direkte Kosten definiert werden. Diese umfassen jene Kosten, welche sich auf den Wiederaufbau, Reparatur- oder Wartungsarbeiten belaufen. (vgl. National Research Council 2004: 10)

#### Indirekte Auswirkungen

Unter den indirekten Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen werden jene Folgen verstanden, die wiederum auf andere Systeme oder Prozesse einwirken. Beispielsweise können Massenbewegungen beim Zusammentreffen mit einem fluvialen oder marinen System Erosionen an der Küstenregion oder im Extremfall einen Tsunami verschulden. (vgl. Glade und Crozier 2006: 50f.) So gehen Tappin et al. (2014: 358f.) davon aus, dass eine submarine Massenbewegung maßgeblich bei der Entstehung des Tohoku-Tsunamis, welcher im Jahr 2011 die Nordostküste Japans verwüstete, beigetragen hat. In den meisten Fällen sind indirekte Schäden jedoch auf die Störung eines fluvialen Systems zurückzuführen. So ist es möglich, dass Massenbewegungen einen Fluss verschütten können und somit einen natürlichen Stausee bilden. Das Problem dabei ist, dass in den meisten Fällen der natürlich

gebildete Staudamm nach bereits einem Jahr versagt, was in Folge zu verheerenden Fluten führen kann. (vgl. Glade und Crozier 2006: 51)

Als Pendant zu den direkten Kosten können auch indirekte Kosten entstehen. Zu diesen zählen beispielsweise der Verfall von Immobilienpreisen in gefährdeten Gebieten, der Verlust an Steuergeldern durch abgewertete Grundstücke, die Erhaltungskosten für Gegenmaßnahmen oder der Verlust der wirtschaftlichen Produktivität einer Region. (vgl. National Research Council 2004: 10f.)

### 3.4 Vorhersage von gravitativen Massenbewegungen mittels Niederschlagsschwellenwerten

Der Niederschlag stellt einen wichtigen auslösenden Mechanismus für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen dar. Diese treten dabei vor allem während sehr intensiver Regenfälle auf. Herrscht ein eher regnerisches Klima über einen längeren Zeitraum, so kann sich eine Massenbewegung auch bei geringeren Niederschlagswerten lösen. Dabei spielen dann vor allem Faktoren wie der vorhergehende Niederschlag oder Schmelzwasser eine tragende Rolle. (vgl. Crozier 1986: 169)

Als Ursache für das Versagen der Hangstabilität, ausgelöst durch das Niederschlagswasser, gilt der Anstieg des Porenwasserdrucks im Untergrund. Die Bestimmung jener Menge an Regen, daher des Niederschlagsschwellenwertes, welche notwendig ist, um ein solches gravitatives Ereignis zu initiieren, ist sowohl aus wissenschaftlicher als auch gesellschaftlicher Perspektive von großer Bedeutung. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 239)

Crozier (1986: 161) unterscheidet bei der Bestimmung von Niederschlagsschwellenwerten zwischen vier verschiedenen Methoden:

1. Theoretisch fundierte Modelle: Bei denen angenommen wird, dass sich die Niederschlagsmenge über die Bodenmasse, zu davor festgelegten Raten, verteilt und davon ausgegangen wird, dass sich dies auf die Standfestigkeit des Bodens auswirkt.
2. Empirisch fundierte Modelle: Dabei wird versucht unter kontrollierten Bedingungen ein Versagen des Hanges herbeizuführen.
3. Räumliche Korrelationen zwischen dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen und den klimatischen Ereignissen.
4. Zeitliche Korrelationen zwischen dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen und den klimatischen Ereignissen.

Je nachdem wie die klimatischen Parameter und die Größe des Untersuchungsgebietes gewählt wurden, wie gut die Datengrundlage ist und wie Massenbewegungen zuvor definiert wurden, sind die berechneten Schwellenwerte als mehr oder weniger zuverlässig anzusehen. (vgl. Crozier 1986: 174)

Im Wesentlichen können zwei Arten von Niederschlagsschwellenwerten unterschieden werden: der sogenannte minimale Schwellenwert und der maximale Schwellenwert. Der minimale Schwellenwert kennzeichnet jenen Wert, unter dem das Auftreten einer gravitativen Massenbewegung ein unmögliches Ereignis darstellt. Ab dem maximalen Schwellenwert stellt eine Massenbewegung hingegen ein sicheres Ereignis dar. Der Bereich zwischen diesen beiden Grenzwerten wird als Wahrscheinlichkeitsspannweite bezeichnet und beschreibt jenen Bereich, in dem eine Massenbewegung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftritt. (vgl. Crozier 1986: 174)

Es ist wichtig, dass Schwellenwerte als einzigartig betrachtet werden, da die Bedingungen, welche vor dem Ereignis in einem Hang herrschen, nie wieder exakt hergestellt werden können. So ist es nicht unüblich, dass der Schwellenwert mit jeder auftretenden Massenbewegung an einem Hang steigt, da sich zuerst das schwächere Material löst und das stabilere Material übergelassen wird. Liegen zwischen den Bewegungen größere Zeitspannen, so kann es in der Zwischenzeit zu einer Destabilisierung des Hanges kommen, wodurch der Schwellenwert für das nächste Ereignis sinkt. Aus diesem Grund ist an dieser Stelle auch auf die Limitation der Vorhersagemöglichkeit von gravitativen Massenbewegungen mittels Niederschlagsschwellenwerten hinzuweisen. (vgl. Crozier 1986: 175)

Guzzetti et al. (2007: 240) unterscheiden bei der Berechnung der Schwellenwerte die prozessbasierten und empirischen Modelle. Diese sollen nun in weiterer Folge genauer beschrieben werden.

### 3.4.1 Prozessbasierte Modelle

Zu den prozessbasierten Modellen können jene Modelle gezählt werden, die versuchen die Hangstabilitätsmodelle, wie das „Infinite Slope Model“, um eine räumliche Komponente zu erweitern. Um dabei den Niederschlag mit den hangstabilisierenden Kräften verbinden zu können, greifen die prozessbasierten Modelle auf sogenannte Infiltrationsmodelle zurück. Dadurch können Wasseransammlungen im Untergrund besser prognostizieren werden. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 240)

Beispielsweise führte Wilson 1989 das „leaky barrel“, zu Deutsch „undichtes Fass-Modell“ ein. Wie der Name bereits vermuten lässt, beruht das Modell auf einem Fass, welches von oben mit Wasser versorgt wird und am unteren Ende durch ein Loch das Wasser wieder abgibt. Dabei soll gezeigt werden, wie sich der Untergrund durch das angesammelte Wasser sättigt. Dieses Modell fand beispielsweise in La Honda zur Vorhersage von Schuttströmen Verwendung. (vgl. Wiezorec und Glade 2005: 337)

Mit Hilfe der prozessbasierten Modelle kann auf Basis der Niederschlagsmenge vorausgesagt werden, wann es an einem bestimmten Ort zu einer Rutschung kommen wird. Aus diesem Grund sind diese Modelle für die Anwendung in Frühwarnsystemen prädestiniert. Guzzetti et al. (2007: 240) weisen jedoch auch auf deren Schwächen hin. So benötigen die prozessbasierten Modelle hochaufgelöste Daten über die vor Ort herrschenden hydrologischen, lithologischen und morphologischen Bedingungen und es ist wichtig die Eigenschaften des Bodenmaterials genauestens zu kennen. Vor allem in größeren Regionen erweist es sich als schwierig, diese Daten in einer ausreichenden Qualität zu erheben. Zudem müssen diese Modelle oft durch Rutschungsereignisse, deren Zeitpunkt und dazugehöriger Niederschlag genauestens dokumentiert wurde, kalibriert werden. In den wenigsten Fällen liegen diese Informationen auf und müssen daher durch sehr kostspielige Prozeduren eingeholt werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass prozessbasierte Modelle vorzugsweise für flache Hangrutschungen angewendet werden sollten, da diese bei tiefgründigen Rutschungen eher unzuverlässig sind. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 240f.)

### 3.4.2 Empirische Modelle

Unter den empirisch basierten Modellen werden jene Modelle zusammengefasst, welche die Niederschlagsschwellenwerte auf Basis jener Regenereignisse definieren, die eine gravitative Massenbewegung nach sich zogen. Dabei werden der Niederschlag und die Ereignistage in einem kartesischen oder (halb-)logarithmischen Koordinatensystem visualisiert. In Bezugnahme auf jene Regentage, welche auch eine Massenbewegung aufwiesen, kann die untere Schwellenwertlinie eingezeichnet werden. Liegen zudem auch jene Tage auf, an denen es zu keinen Rutschungen kam, so kann die Schwellenwertlinie als beste Grenze zwischen Niederschlagswerten erachtet werden, die zu einem Auslösen oder Nicht-Auslösen einer Rutschung führten. Das Einzeichnen dieser Linie erfolgt in den meisten Fällen jedoch nicht auf Basis eines mathematischen, statistischen oder physikalischen Konzepts. Alternativ kann ein Grenzwert auch über die Anzahl der Rutschungsereignisse bestimmt werden. Um das mögliche Auftreten von gravitativen Massenbewegungen vorauszusagen, stellt jedoch vor allem die Definition der Niederschlagsintensität einen wichtigen Kernbereich dar. Die Intensität des Niederschlags bezeichnet dabei jene Menge, die in einer gewissen Zeitperiode niedergegangen ist. Je nachdem wie groß der beobachtete Zeitraum ist, repräsentiert die Intensität einen unmittelbaren oder einen durchschnittlichen Wert. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 241)

Als Beispiel für ein prozessbasierendes Modell kann das Antecedent Daily Water Status Modell (ASWS), welches von Crozier und Eyles (1980), Crozier (1999) und Glade et al. (2000) entwickelt bzw. weiterentwickelt wurde, angeführt werden. Das Modell versucht die



Feuchtigkeit des Untergrundes in das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen miteinzubeziehen und beinhaltet einen Zerfallsfaktor, der Aufschluss darüber gibt, wie stark sich der Niederschlag und die damit verbundene Bodenfeuchtigkeit in einer gewissen Zeitperiode vor dem Rutschungsereignis auswirkt. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 241) Die zugrunde liegende Annahme des ASWS-Modells ist es, dass es genau dann zu einer gravitativen Massenbewegung kommt, wenn ein kritischer Wassergehalt im Boden erreicht wird. (vgl. Crozier 1999: 826)

Salopp gesagt können die empirischen Schwellenwerte nach globalen, regionalen und lokalen Schwellenwerten unterschieden werden. Globale Schwellenwerte versuchen einen weltweiten, minimalen Wert einzuführen, ab welchem es, unabhängig von den lokalen Bedingungen, immer zum Auftreten einer gravitativen Massenbewegung kommt. Die regionalen Schwellenwerte beziehen sich auf Raumeinheiten von mehreren Tausend, lokale auf nur wenige Hundert Quadratkilometer. (vgl. Guzzetti 2007: 241ff.)

Die Schwellenwerte können auch anhand der Messung in die folgenden drei Kategorien unterschieden werden:

1.) Niederschlagsschwellenwerte, welche das Ereigniswasser heranziehen

Dabei handelt es sich um Niederschlagsschwellenwerte, die auf Basis der Niederschlagsmenge gebildet werden. Diese wiederum kann auf vier verschiedene Arten betrachtet werden:

- I. Auf Basis der Dauer und Intensität
- II. Auf Basis der gesamten Niederschlagssumme
- III. Auf Basis der Gesamtdauer des Niederschlagsereignisses
- IV. Auf Basis der Intensität

Die am häufigsten anzutreffenden Schwellenwerte dieser Art sind jene auf Basis der Dauer und Intensität (I.). Üblicherweise sind die Gleichungen zur Berechnung dieser von der folgenden Gestalt:  $I = C + \alpha \cdot D^\beta$ , wobei  $I$  die Intensität,  $D$  die Dauer des Regenfalles,  $c \geq 0$  und  $\alpha$  bzw.  $\beta$  Parameter sind. Die damit berechneten Schwellenwerte liegen meistens zwischen 1-100 h und 1-200 mm/h. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 243)

2.) Niederschlagsschwellenwerte, welche die vorhergehenden Bedingungen miteinbeziehen

Wenn es um die Entstehung von gravitativen Massenbewegungen geht, spielen abseits des täglichen Niederschlages sowohl der Grundwasserspiegel als auch die Bodenfeuchtigkeit als dispositive Faktoren eine tragende Rolle. Da sich diese aufgrund zahlreicher Einflüsse im Laufe der Zeit verändern, erweist es sich als äußerst schwierig, räumliche Muster und zeitliche Entwicklungen präzise zu erfassen. Um diese Einflüsse zu

erforschen, hat sich vor allem der vorhergehende Niederschlag als ein wichtiges Instrument erwiesen. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 250)

Eine der einfachsten Anwendungen für den vorhergehenden Niederschlag besteht darin, dass ein Schwellenwert, aufbauend auf der Menge des Niederschlags, welcher sich in einer gewissen Zeitperiode vor der gravitativen Bewegung ereignet hat, bestimmt wird. Komplexere Modelle versuchen hingegen eine Beziehung zwischen dem Ereignisniederschlag und dem vorhergehenden Niederschlag herzustellen. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 252)

Eines der Kernprobleme bei der Berechnung des vorhergehenden Niederschlags stellt die Wahl der Zeitspanne vor dem Rutschungsereignis dar. Je nach Autor liegt der empfohlene Zeitraum zwischen 3 Tagen und 3-4 Monaten. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 252)

Nach Guzzetti et al. (2007: 252) hängen diese großen Spannweiten auf der einen Seite mit den verschiedenen lithologischen, morphologischen, vegetativen und klimatischen Bedingungen der Untersuchungsgebiete und auf der anderen Seite mit der unterschiedlichen Datenqualität der Massenbewegungen bzw. des Niederschlags zusammen.

### 3.) Andere Niederschlagsschwellenwerte

Abseits der bisher geschilderten Möglichkeiten stehen den empirischen Modellen noch weitere Möglichkeiten zur Schwellenwertbestimmung zu Verfügung. So ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer gravitativen Massenbewegung mit dem Produkt der beiden Relationen „Anzahl der Niederschlagstage mit mehr als 5 mm Regen dividiert durch  $RDs$  (Evapotranspiration)“ und „Summe der Niederschläge bis zum Ereignis dividiert durch  $MAP$  (Effekt der Regendauer auf den Wassergehalt im Untergrund)“ zu verknüpfen. Bei Untersuchungen in Kalifornien, Oregon, Washington, Hawaii und Puerto Rico wurden wiederum die Spitze des Tagesniederschlags, welcher ein Ereignis ausgelöst hat, mit für fünf Jahre vorausgesagten Niederschlagswerten in Verbindung gebracht. In anderen Forschungsprojekten wurden die Massenbewegungen mit den täglichen Abflussraten verglichen. (vgl. Guzzetti et al. 2007: 252)

## 4. Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Im folgenden Kapitel soll nun näher auf die untersuchten Gebiete St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg eingegangen werden. Dabei werden insbesondere die beiden geologische Zonen, nämlich einerseits die Molassezone und andererseits die Flyschzone, in der sich die drei Gebiete befinden, beschrieben. Erläutert wird die geographische Lage, die Geologie, die Böden, das Klima und die Hydrologie.

### 4.1 Geographische Lage

#### St. Pantaleon-Erla

Das erste Untersuchungsgebiet befindet sich in der Gemeinde St. Pantaleon-Erla (siehe Abbildung 7). Die 28 km<sup>2</sup> große Gemeinde zählt ca. 2600 Einwohner und setzt sich aus 17 Ortsteilen bzw. kleineren Ortschaften zusammen. (vgl. St. Pantaleon-Erla.gv.at o.J.) Sie befindet sich im südwestlichen Teil Niederösterreichs, daher im Mostviertel, und ist dem politischen Bezirk Amstetten zuzuordnen. (vgl. Neuer Kozenn Atlas 2009: 12)

Begrenzt wird das Gemeindegebiet im Norden durch die Donau und erstreckt sich südlich von dieser zwischen der Enns-Donau-Mündung bis hin zum Aubach im Südosten. (vgl. Land Niederösterreich o.J.)

Die Rutschung selbst befindet sich westlich des Engelbergs, welcher eine Höhe von 313 m aufweist, und unmittelbar neben der Südseite der Schnellstraße B1. Das Rutschungsgebiet wird dabei vom Engelbergbach durchflossen und befindet sich etwa auf einer Seehöhe von 280 m. (vgl. Land Niederösterreich o.J.)

#### Behamberg

Das zweite Untersuchungsgebiet befindet sich in der 3600 Einwohner zählenden Gemeinde Behamberg (siehe dazu Abbildung 7). So wie St. Pantaleon-Erla liegt diese im Mostviertel bzw. ist dem politischen Bezirk Amstetten zuzuordnen. (vgl. Behamberg.gv.at o. J., Neuer Kozenn Atlas 2009: 12)

Das Gebiet von Behamberg, welches eine Fläche von rund 20 km<sup>2</sup> umfasst, erstreckt sich von der niederösterreichisch – oberösterreichischen Grenze im Westen bis hin zur Gemeindegrenze Haidershofen. Im Norden verläuft die Grenze entlang der Enns, über die Ortschaft Weixelgarten bis zu Anetzberg. Im Süden verläuft die Grenze ausgehend von Raming etwa 2 km in Richtung Osten (vgl. Behamberg.gv.at 2016, Land Niederösterreich o.J.) Die Rutschung befindet sich auf einem Bauernhof, etwa 800 m nordöstlich der Ortschaft Kindlehen. Am Fuße der Rutschung verläuft ein kleiner Bach. Laut dem NÖ-Atlas liegt sie auf einer Seehöhe von etwa 390 m.

## Wilhelmsburg

Das dritte und letzte Untersuchungsgebiet befindet sich in der Gemeinde Wilhelmsburg (siehe dazu Abbildung 7). Diese liegt südlich von St. Pölten und grenzt im Westen an die Gemeinden Hofstetten-Grünau, Weinburg und Ober-Grafendorf an. Im Süden befinden sich die benachbarten Gemeinden Eschenau und St. Veit an der Gölsen und im Osten trifft die Gemeinde Wilhelmsburg auf Pyhra. (vgl. Land Niederösterreich o.J.)

Wilhelmsburg umfasst dabei eine Fläche von 45 km<sup>2</sup>, zählt laut der Gemeindefebsite ca. 7000 Einwohner und ist dem politischen Bezirk St. Pölten-Land zuzuordnen. (vgl. Wilhelmsburg.at o.J., Neuer Kozenn Atlas 2009: 12)

Das Rutschungsgebiet selbst liegt auf einem bewaldeten Hang im Kreisbachtal, laut dem NÖ-Atlas auf einer Seehöhe von ca. 420 m.

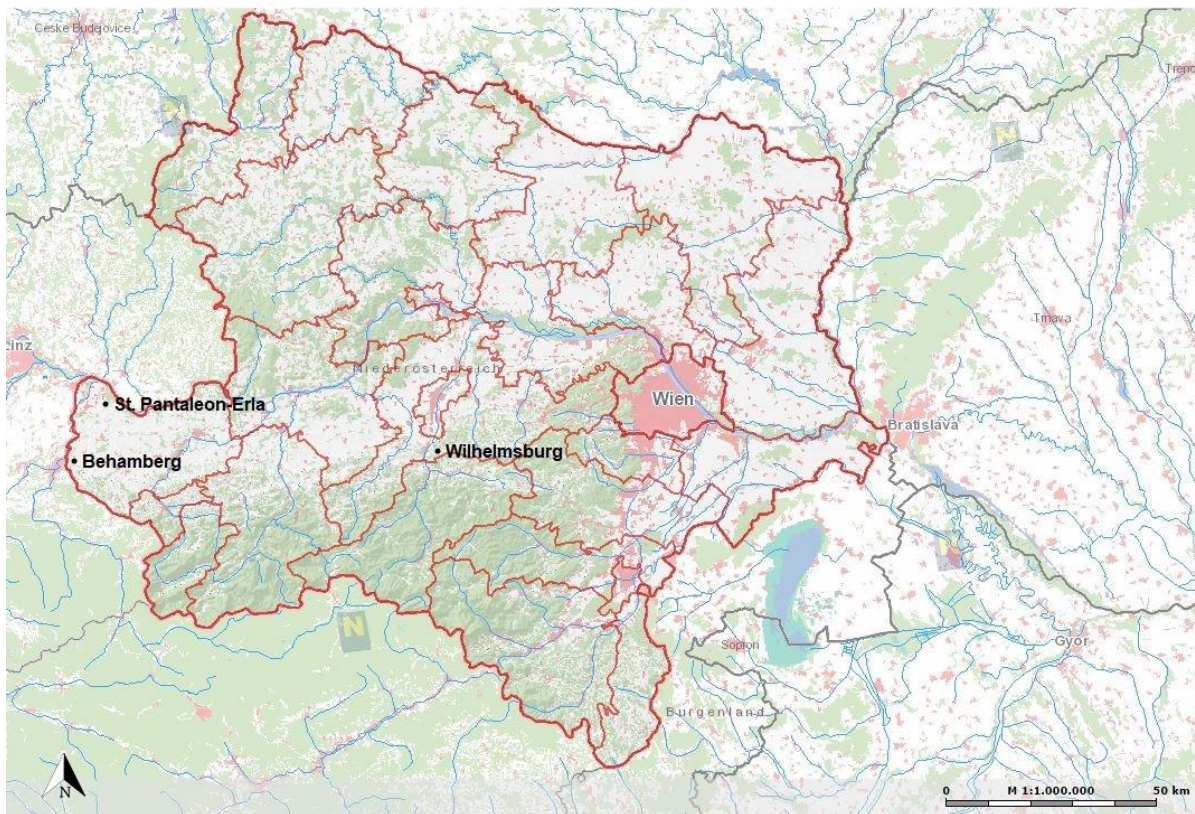


Abbildung 7 - Übersichtskarte der drei Rutschungsgebiete in den Gemeinden St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg - Kartengrundlage: Land Niederösterreich o.J. – NÖ-Atlas

## 4.2 Geologie der Gebiete

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungsgebiete anhand ihrer geologischen Eigenschaften charakterisiert. Aus der geologischen Perspektive liegen die Gebiete Behamberg und Wilhelmsburg in der Flyschzone, St. Panteleon-Erla in der Molasseinheit. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge auf diese beiden geologischen Zonen genauer eingegangen.

### 4.2.1 Geologie der Flyschzone

Beim Wort „Flysch“ handelt es sich ursprünglich um ein Dialektwort aus der Schweiz und es leitet sich vom Wort „Fließen“ ab. (vgl. Wessely 2006a: 85) Nach Maurer (1967: 27) wurde der Begriff 1827 erstmals von Studer B. verwendet, um Gesteine zu beschreiben, die zu Rutschungen neigen.

Der österreichische Anteil an der Flyschzone beginnt im nordöstlichen Teil des Bundeslandes Vorarlberg und kommt nach einer Unterbrechung in Deutschland wieder östlich von Salzburg-Stadt zum Vorschein. Von dort aus zieht sich die Flyschzone nördlich der Kalkalpen wie ein dünnes Band über die Bundesländer Salzburg, Oberösterreich und Niederösterreich, bis sie schließlich den östlichen Rand der Bundeshauptstadt Wien erreicht und im Wiener Becken verschwindet. In den meisten Fällen beträgt die Breite der Flyschzone etwa 5-10 km. Nur am östlichen Anfang im Bundesland Vorarlberg und im Wienerwald wächst ihre Breite auf 20 bzw. 25 km an. Wie in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen, dürfte die Breite der Flyschzone ursprünglich ein Vielfaches betragen haben. Der südliche Teil der Flyschzone wurde im Laufe der Zeit von den nördlichen Kalkalpen überschoben. (vgl. Tollmann 1985: 350)

Jener Teil der Flyschzone, welcher sich östlich der Enns bis Wien erstreckt, gehört zur rhenodanubischen Flyschzone. (siehe dazu Abbildung 8) Dieser Abschnitt spielt für diese Arbeit eine zentrale Rolle, da sich zwei der drei Untersuchungsgebiete, nämlich Behamberg und Wilhelmsburg, darin befinden. Der Name leitet sich aufgrund der geographischen Lage zwischen den Flüssen Rhein und Donau ab. Die Morphologie der niederösterreichischen Flyschzone ist dabei von sanften bis mittelhohen Landschaftsformen, wie beispielsweise dem Wienerwald, gekennzeichnet. (vgl. Wessely 2006a: 85) Beim Untergrund der rhenodanubischen Flyschzone handelt es sich um marine Tiefenwassersedimente, welche sich aus einer abwechselnden Folge von Sandstein, Peliten und Mergel zusammensetzen. Diese Ablagerungen entstanden dabei zwischen der höheren Unterkreide und dem unteren Obereozän. (vgl. Wessely 2006a: 85f.) Die Mächtigkeit dieser Ablagerungen kann dabei von wenigen Zentimetern bis hin zu mehreren Metern ragen. Innerhalb der Mergel- und

Tonmergelschichten finden sich, wie für die rheodanubische Flyschzone typisch, Lebensspuren aus längst vergangenen Tagen wieder. (vgl. Prey 1980: 191)

In früheren Zeiten wurde zunächst davon ausgegangen, dass es sich beim Flysch um eine Seichtwasserablagerung handeln dürfte. Durch zahlreiche Laborversuche und Beobachtung der heutigen Meere wird heute ausgehend von der Theorie der „turbidity currents“ (zu Deutsch Suspensionsstrom/-lawine) davon ausgegangen, dass es sich bei den Ablagerungen in der Flyschzone, wie oben bereits erwähnt, um Tiefseeablagerungen handelt. Die „turbidity current“ Theorie geht davon aus, dass sich im Laufe der Zeit das instabile Sediment an den Küstenlinien, z.B. ausgelöst durch Erdbeben, in Richtung Tiefsee bewegt. Im Zuge dieser Bewegung kommt es zu den sogenannten Suspensionsströmen. Nimmt die Geschwindigkeit dabei ab, was meist mit dem Erreichen des Tiefseebodens verbunden ist, so nimmt auch die Transportkraft stetig ab. Dies führt wiederum dazu, dass die Strömung größeres Material nicht mehr transportieren kann und dieses zu Boden sinkt. Läuft die Strömung dem Ende zu, so setzen sich auch allmählich die kleinsten, tonhaltigen Restsubstanzen ab. Genau dieser Prozess wird für die typische Schichtung der Flyschzone, bei der sich das grobe Material unten und das feine Material oben befindet, verantwortlich gemacht. Durch diesen Entstehungsmechanismus ist Flysch den Turbiditen zuzuordnen. (vgl. Prey 1980: 194)

Nach einer Zeit verfestigt sich die abgelagerte Schicht und durch eine spätere Suspensionsströmung wird die nächste Schicht aufgetragen. Aus den Strömungsmarken kann abgelesen werden, aus welcher Richtung die Strömungen ursprünglich kamen. Vergleicht man die Bildung von diesen Sandbänken mit der Entstehung anderer Sedimentablagerungen, so zeigt sich ganz klar, dass es sich dabei um einen viel kurzweiligeren Prozess handelt. (vgl. Prey 1980: 194)

#### 4.2.2 Geologie der Molassezone

Das Wort Molasse leitet sich vom lateinischen Wort molare ab, was so viel wie zermahlen bedeutet und somit den Abtragungsschutt, die Sande und sonstigen detritären Sedimente dieser geologischen Zone gut beschreibt. Die Molassezone beginnt westlich im französischen Rhônetal, verläuft dabei über die Schweiz in Richtung Süddeutschland und Österreich und setzt sich schließlich über Tschechien und die Slowakei bis nach Polen und Rumänien fort. Morphologisch gesehen lässt sich die Molassezone dabei als ein flachwelliges Hügelland beschreiben (vgl. Thenius 1974: 36f.) Im Bereich des Bundeslandes Niederösterreich erstreckt sich die Molassezone im Westen beginnend von der Enns über Tulln bis nach Laa an der Thaya. Ihre durchschnittliche Breite beträgt dabei meist 10-20 km (siehe Abbildung 8). (vgl. Wessely 2006b: 41)

Bei dieser geologischen Einheit handelt es sich um eine Sedimentfüllung des Parathethys-Meeres. Ursprünglich besaß dieses Vorlandbecken einen asymmetrischen Querschnitt, da es im Nordteil seichter als im Südteil war. Im Laufe der Zeit wurden die südlichen Schichten der Molasseeinheit aufgrund der alpinen Schubkräfte gefaltet und verschoben. Durch Bohrungen konnte nachgewiesen werden, dass sich der Molassekörper über bzw. auch unter den Alpenkörper geschoben hat. (vgl. Wessely 2006b: 41) Die Mächtigkeiten dieser Schichten haben dabei eine enorme Schwankungsbreite. Beispielsweise weist die Dicke der Molassezone am nördlichen Randbereich nur wenige Meter auf, während diese östlich des Mailberger Bruchsystems bis zu 2000 m mächtig wird. (vgl. Thenius 1974: 40)

Nach Wessely (2006b: 41) können drei Arten der Molasse unterschieden werden. Als Erstes beschreibt er die autochthone Molasse, welche ungestört vor oder unter dem Alpenkörper liegt. Beim zweiten Typ handelt es sich um die allochthone Molasse, welche die gestörten Teile der Molasse, daher jene Teile, welche verformt wurden, umfasst. Den dritten und letzten Typ stellt die sogenannte parautochthonische Molasse dar. Diese umfasst jene Teile der Molasseeinheit, welche sich auf bewegenden Sedimentschichten abgelagert haben und anschließend mit diesen gemeinsam weitergeschoben werden. Eine Sonderform der parautochthonen Molasse stellt dabei die inneralpine Molasse dar. (vgl. Wessely 2006b: 41)

Die Ablagerungsschichten der niederösterreichischen Molassezone setzen sich im Wesentlichen aus oligozänen und jungtertiären Sedimenten zusammen, welche aus Ton, Mergel, Schlier, Sand, Schotter, Konglomerat, Kalk, Sandstein, Diatomeenschiefer und manchmal auch Kohle bestehen. Diese zahlreichen Sedimente lassen im Zusammenhang mit ihrem häufigen Wechsel der auftretenden Kreuzschichten und der Fossilien darauf schließen, dass es sich um Flachwasserablagerungen handelt. Der Anteil der älteren Schichten nimmt dabei von Westen nach Osten bzw. von Süden nach Norden hin ab. (vgl. Thenius 1974: 41)

Innerhalb der Molassezone gibt es, besonders im oberösterreichischen Teil, große Vorkommen von Erdgas bzw. Erdöl, die es Österreich ermöglichten bis 1958 von Erdölimporten unabhängig zu sein. (vgl. Schuster et al. 2015: 47)



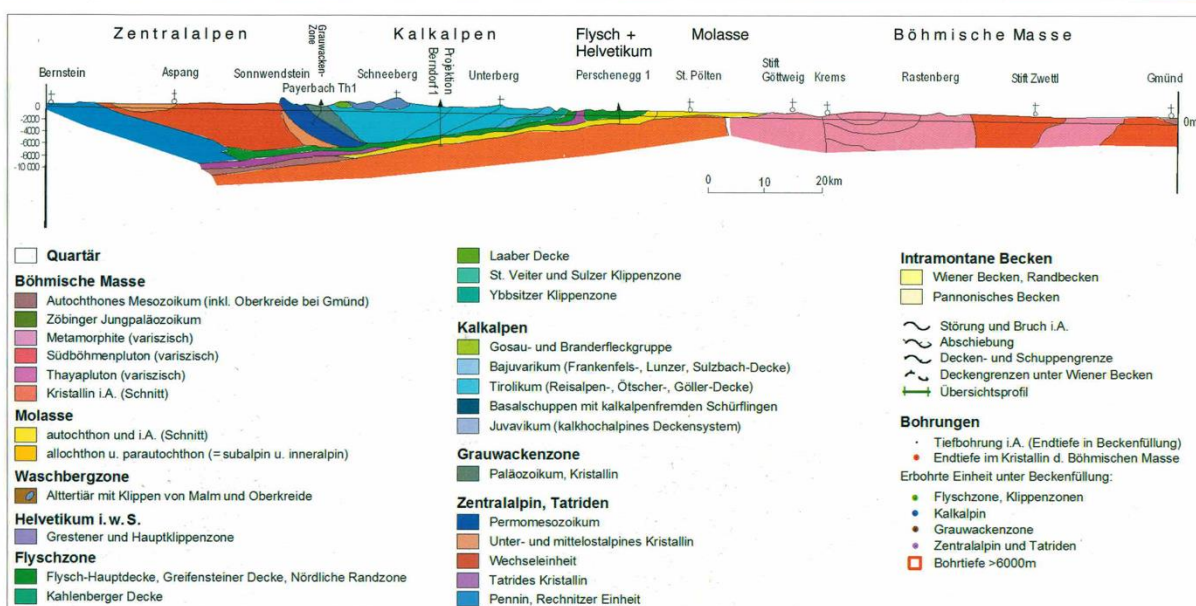
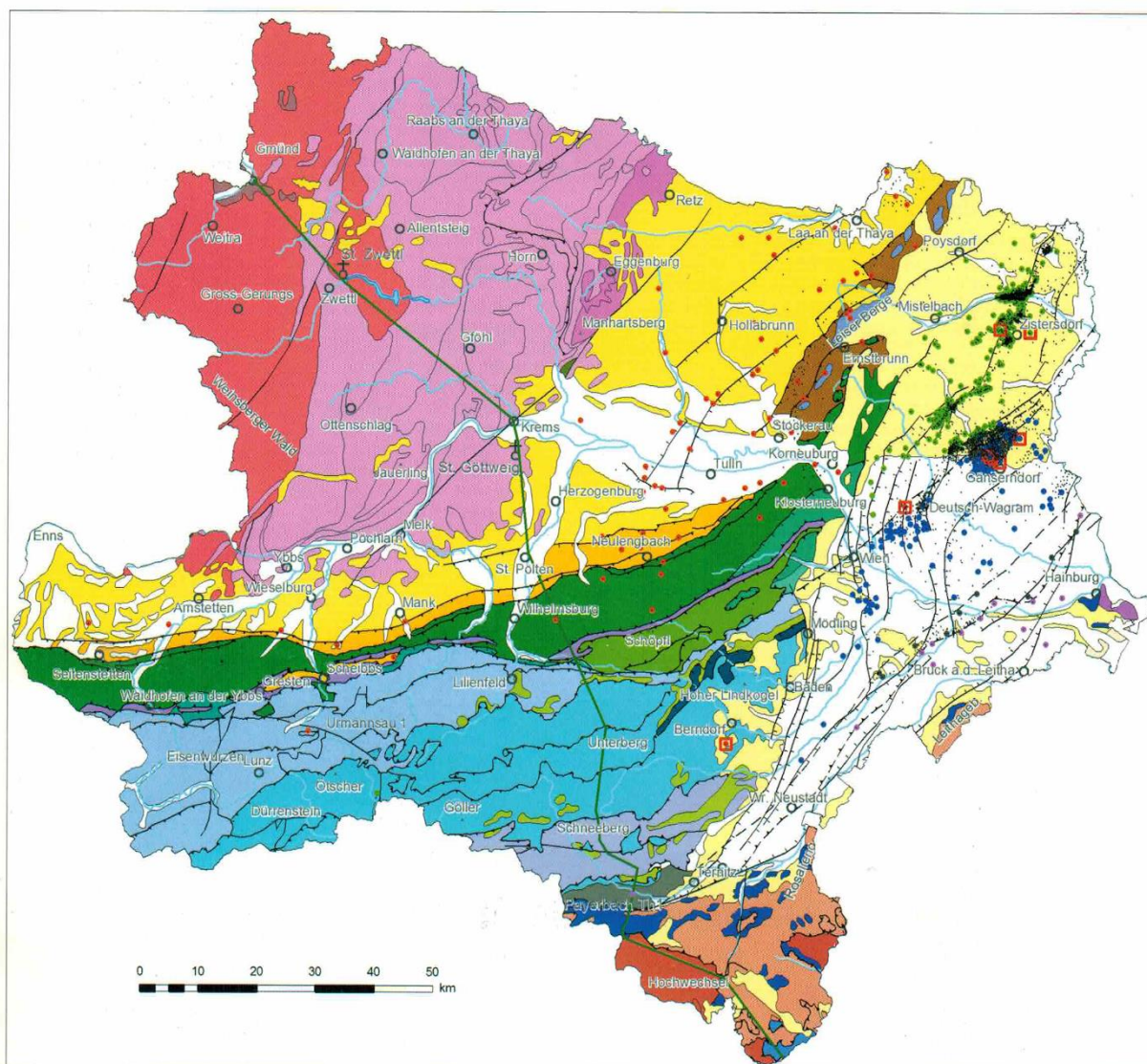


Abbildung 8 - Geologische Karte Niederösterreichs - Quelle: Wessely 2006: 12f.



## 4.3 Hydrologie

Im folgenden Abschnitt soll nun auf die hydrologischen Eigenschaften der Untersuchungsgebiete eingegangen werden. Zu diesem Zweck werden diese abermals nach den beiden oben beschriebenen geologischen Zonen eingeteilt.

### 4.3.1 Hydrologie der Flyschzone

Aus hydrogeologischer Perspektive verhält sich die Flyschzone aufgrund ihrer horizontalen, abwechselnden Gesteinsschichten, bestehend aus Sandstein, Mergel, Mergelkalk und Mergelschiefer relativ einheitlich. (vgl. Thenius 1974: 213) Nach Fink et al. (2000: 32) kommt den Flyschgesteinen dabei eine wasserstauende Wirkung zu. Dadurch beeinflussen diese, bedingt durch ihr geringes Speichervermögen, das Abflussverhalten der Fließgewässer maßgeblich. Geprägt wird die Flyschzone dabei überwiegend von pluvialen Abflussregimen. Eine Charakteristik der Flyschzone bildet das häufige Auftreten von Hangrutschungen bzw. Bodenkriechen, welches durch den Säbelwuchs von Bäumen sichtbar wird. Weiters sind Nassgallen und Wildbäche zu nennen, welche je nach Wetterlage trocken oder gefüllt sein können. (vgl. Thenius 1974: 213; Fink et al. 2000: 33)

Mit letzteren lassen sich typischerweise v-förmige Hanggräben verbinden, welche überwiegend trocken liegen und durch die fluviale Erosion der Wildbäche entstanden sind. Am Ende dieser Gräben finden sich manchmal schwache Quellaustritte, deren Auftreten überwiegend mit dem Sediment, deren wechselnden Schichten bzw. deren Klüftigkeit zusammenhängt. An jenen Hängen, an deren Füßen sich Verwitterungsschutt befindet bzw. deren Untergrundmaterial kriecht, können Schuttquellen austreten. Auffällig ist, dass im Flysch Karsterscheinungen, wie beispielsweise Höhlen, weitgehend fehlen. (vgl. Thenius 1974: 213f.)

### 4.3.2 Hydrologie der Molassezone

Innerhalb des Bereiches der Donau finden sich in der Molasse weit ausgedehnte Schotterfelder, die mit einem entsprechenden Grundwassereintrag verbunden werden können. Eingespeist wird das Wasser dabei von den Talböden der voralpinen Flüsse und es sind immer wieder artesischen Grundwasserquellen anzutreffen. In der Molasse treten Tone, Tegel und Mergel als wasserundurchlässige Schichten und Sedimente wie Sande, Sandstein und Schotter als wasserdurchlässige Schichten auf. Dadurch, dass sich diese Sedimente schon bei geringen Distanzen sehr rasch ändern, variiert die Ergiebigkeit der Brunnen innerhalb der Molassezone sehr stark. Diese Undurchlässigkeit der Sedimente spiegelt sich in der enormen Bodennässe wider, die in manchen Fällen sogar zu einer Versumpfung führen kann. Im Gegensatz dazu weisen die schotterhaltigen Flusstäler einen eher trockenen Untergrund auf. Ist der Untergrund eher durch Schlier geprägt, bilden sich im Laufe der Zeit

Bittersalze und Salpeter aus, welche anschließend durch den Niederschlag als weißlicher Belag ausgeschieden werden und dadurch für ein hartes und schlechtes Trinkwasser sorgen. Jene Gebiete der Molassezone, welche weitgehend von nicht verlehmtem Löß bedeckt sind, weisen eine hohe Durchlässigkeit auf. (vgl. Thenius 1974: 211f.)

#### 4.4 Klima

Das Bundesland Niederösterreich befindet sich in der warm-gemäßigten Zone und weist durch das Zusammenspiel zahlreicher Faktoren große klimatische Unterschiede auf. (vgl. Harlfinger 1999: 106) Nach Machalek et al. (1986: 6) handelt es sich beim Klima Niederösterreichs um ein Übergangsklima, welches eine Brücke zwischen dem vom Atlantik geprägten Klima Westeuropas und dem kontinentalen Klima Osteuropas bildet.

Wie für Mitteleuropa typisch, wird das flächenmäßig größte Bundesland Österreichs überwiegend von Westwinden geprägt. In Abhängigkeit der Großwetterlage können aber auch kontinentale und mediterrane Klimaeigenschaften zur Geltung kommen. Tragende Rollen spielen dabei die Luv- und Lee-Effekte bzw. die Seehöhe, welche in Niederösterreich durchaus eine beachtliche Spannweite von ca. 1900 m aufweist. Das Klima umfasst in dieser Region somit ein eher alpines bzw. subalpines Klima, welches überwiegend an der Alpennordseite auftritt, ein baltisches Hochlandklima im Nordwesten des Bundeslandes und ein pannonisches Klima im Osten. (vgl. Harlfinger 1999: 106)

Ausgelöst durch Staueffekte an den Alpenrändern ist der Niederschlag im Süden des Bundeslandes am größten (siehe dazu Abbildung 9). Hier können Jahresniederschläge von bis zu 2000 mm erreicht werden. Gegen Osten und Westen verlieren die Staukräfte jedoch zunehmend ihre Wirkung, wodurch beispielsweise im Wienerwald maximale Jahresniederschläge von 1000 mm möglich sind. Vergleicht man die Temperatur mit dem Niederschlag, so zeigt sich trotz des eher nach Süden ausgerichteten Temperaturanstiegs, dass diese viel stärker von der Höhenlage abhängig ist (siehe dazu Abbildung 10). Durchschnittlich gesehen werden auf einer absoluten Seehöhe von 1000 m rund 5,5 °C erreicht während es auf 1500 m nur noch 3,5 °C sind. (vgl. Harfinger 1999: 106)

Das im Nordwesten liegende Waldviertel ist geprägt durch ein Temperatur- bzw. Niederschlagsregime, welches oft als baltisches Klima oder auch als Hochlandklima bekannt ist. Stellt man die Höhenlage des Waldviertels mit dem Durchschnitt von Österreich gegenüber, so zeigt sich ganz klar eine klimatische Benachteiligung dieser Region. So liegt die Durchschnittstemperatur der Bezirke Waidhofen an der Thaya, Zwettl oder Gmünd mit ihrer Höhenlage von rund 500 m ca. 1,5 °C unter dem österreichischen Durchschnitt und im gesamten Waldviertel gibt es 14 Vegetationstage weniger pro Jahr. Ausgelöst durch Luv- und

Leewirkungen kommt es gegen Osten hin zu einem deutlichen Rückgang des Niederschlages, welcher jedoch nicht kontinuierlich zurückgeht. Der Niederschlag schwankt im Waldviertel, mit Ausnahmen von Gipfellagen, an welchen 1000 mm erreicht werden können, meist zwischen 500 und 700 mm pro Jahr. (vgl. Harfinger 1999: 106)

Das sich vom Weinviertel über das Marchfeld bis ins Wiener Becken ziehende pannonische Klima zeichnet sich durch seine Niederschlagsarmut und häufige Trockenperioden aus. Durchschnittlich gesehen wird meist nur ein Jahresniederschlag von 600 mm pro Jahr erreicht und mit Kleinriedenthal und Kleinhöflein liegen sogar die niederschlagsärmsten Regionen Österreichs im Pannonikum. Das Klima ist auch für seine kontinuierliche Windbewegung bekannt, welche meist zwischen 2,5 und 4 m/s liegt. Mit Jahresmitteltemperaturen zwischen 9 und 10 °C ist das Pannonikum den wärmsten Gebieten Österreichs zuzuordnen. Die Sonnenscheindauer liegt zwischen 1700 und 1900 Stunden, wobei der Winter eher sonnenarm ausfällt, was durch Nebel bzw. Hochnebel verursacht wird. (vgl. Harfinger 1999: 106ff.)

In weiterer Folge wird nun genauer auf die Bezirke Amstetten und St. Pölten eingegangen, in denen die drei Untersuchungsgebiete liegen.

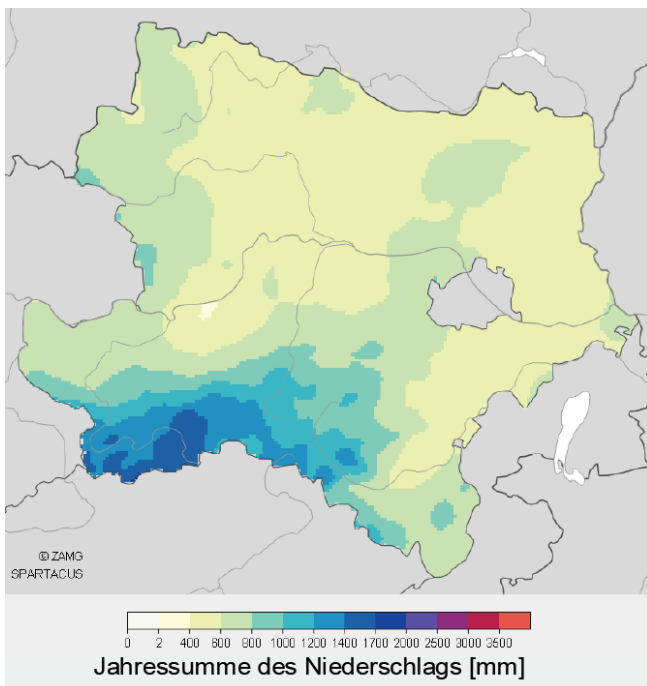


Abbildung 9 - Übersichtskarte der Jahressumme des Niederschlags im Bundesland Niederösterreich 2019 – Quelle: Höfler et al. 2020: 4

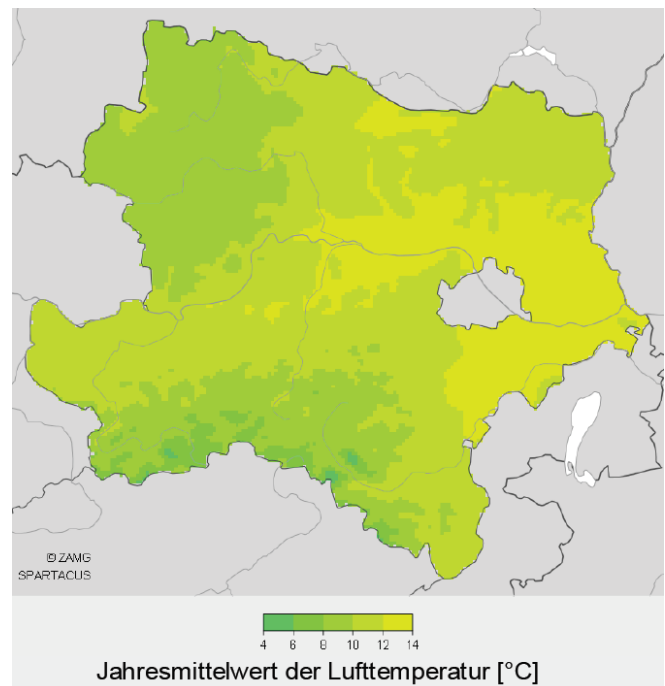


Abbildung 10 - Übersichtskarte der mittleren Jahrestemperatur im Bundesland Niederösterreich 2019 - Quelle: Höfler et al. 2020: 4

### Bezirk Amstetten

Der östlichste Bezirk Niederösterreichs, welcher die Untersuchungsgebiete St.Pantaleon-Erla und Behamberg umfasst, wird vom Atlantik beeinflusst und weist, vor allem am nördlichen Teil der Kalkalpen, durch feuchte Westwinde dessen Prägung auf. Wie auch in Abbildung 9 zu sehen ist, kommt es innerhalb dieser Gebiete dadurch zu den höchsten Niederschlägen des Bezirkes, welche jedoch in Richtung Norden rapide abnehmen. So beträgt beispielsweise der durchschnittliche Jahresniederschlag in Hollenstein 1600 mm, während dieser im Raum Amstetten nur noch etwa 860 mm beträgt. Ein ähnliches Muster lässt sich auch bei der Temperatur im Bezirk Amstetten erkennen. So liegt die durchschnittliche Temperatur in Hollenstein bei ca. 7,2 °C während diese im Raum Amstetten bei 9,8 °C liegt. (vgl. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung 2008a: 45)

### St. Pölten

Der Bezirk St. Pölten weist durch seine Anteile an drei verschiedenen Klimaprovinzen eine große Vielfalt auf. Das Gebiet im Nordwesten ist dem mitteleuropäischen Übergangsklima zuzuordnen, welches durch polare und subpolare Einflüsse mitgeprägt wird. Die Einflüsse des ozeanischen Klimas nehmen dabei von Westen nach Osten ab, während parallel dazu der kontinentale Einfluss steigt. Der nordöstliche Bereich des Bezirks unterliegt den pannonischen Einflüssen, welche sich durch die charakteristischen kalten Winter und heißen Sommer auszeichnen. Südlich von St. Pölten herrscht überwiegend ein alpines Klima, welches von eher kurzweiligen, kühlen Sommern bzw. von langen, kalten Wintern geprägt ist. Ausschlaggebend für das Niederschlagsregime ist dabei sowohl die Höhe als auch der Abstand zu den Gebirgsketten im Süden. Dem Relief der Landschaft kommt dabei eine ebenso wichtige Rolle zu. Durch diese Faktoren bestimmt, liegt der durchschnittliche Jahresniederschlag im Süden in etwa zwischen 1000 und 2000 mm, während dieser im Norden gelegenen Alpenvorland in einzelnen Regionen bis zu 800 mm absinken kann. Im Bereich der Gemeinde Wilhelmsburg lassen sich während windschwachem Schönwetter, unabhängig von der Jahreszeit, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit inverse Wetterlagen beobachten. Durch das Erreichen von 55-60 % der effektiven Sonnenscheindauer, handelt es sich bei St. Pölten um den zweitsonnigsten Bezirk Österreichs. (vgl. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung 2008b: 40f.)

## 4.5 Böden

Im folgenden Unterkapitel soll geklärt werden, welche Bodentypen in den einzelnen Untersuchungsgebieten vorkommen. Dazu wird zunächst mittels der digitalen Bodenkarte Österreichs (eBod) geklärt, welche Bodentypen in den einzelnen Rutschungsgebieten angetroffen werden. Anschließend sollen die auftretenden Typen kurz beschrieben werden.

*Tabelle 7 - Bodentypen der Rutschungsgebiete St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg - Datengrundlage: BFW (o.J.)*

| <b>Rutschungsgebiet</b> | <b>Bodentypen</b>       | <b>Anmerkung</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| St. Pantaleon-Erla      | Gley<br>Braunerde       | Der obere Teil der Rutschung ist nach eBod den Gleyen zuzuordnen. Im unteren Teil der Rutschung wurde der Bodentyp nicht weiter erfasst und wird als Wald gekennzeichnet. Das als Wald gekennzeichnete Gebiet geht Richtung Westen in Braunerde über. Aus diesem Grund muss angenommen werden, dass am Fuße der Rutschung neben Gleyen auch Braunerde angetroffen werden kann. |
| Behamberg               | Braunerde               | Das gesamte Untergrundmaterial des Rutschungsgebietes in Behamberg ist nach eBod vollständig der Braunerde zuzuordnen.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Wilhelmsburg            | Pseudogley<br>Braunerde | Der obere Teil des Rutschungsgebietes Wilhelmsburg besteht nach eBod aus Braunerde. Der mittlere und untere Teil der Rutschung wurde nicht erfasst und wird als Wald gekennzeichnet. Jedoch befindet sich sowohl westlich als auch östlich der Rutschung Pseudogley, wodurch angenommen werden kann, dass sich dieser auch im mittleren Teil der Rutschung findet lässt.       |

### Gley

Unter Gley können jene Gruppen von Böden zusammengefasst werden, die unter dem Einfluss des Grundwassers stehen. (vgl. Leitgeb et al. 2013: 44) Das Wort Gley kommt dabei ursprünglich aus dem norddeutschen Sprachraum und leitet sich vom Wort Klei, was so viel wie Schlick bedeutet, ab. Entstehen können Gleye einerseits in schwereren, tonreichen Untergründen, andererseits aber können sie aber auch in sandigerem und damit leichterem Untergrund vorkommen. In vielen Fällen trifft man beim Gley bereits nach einem Meter Tiefe auf das Grundwasser. In diesem Teil des Bodens herrscht eine Sauerstoffknappheit, was beispielsweise dazu führt, dass viele biologische und chemische Prozesse anders ablaufen, als dies in anderen Böden der Fall wäre. So nimmt das Eisen im Untergrund anstelle seiner typischen orangenen Farbe eine graue oder sogar grünliche bis blaue Färbung an. Bei sehr eisenhaltigem Grundwasser ist es möglich, dass Raseneisensteine entstehen. Dabei handelt

es sich um einzelne Brocken oder sogar ganze Ablagerungsschichten, die aufgrund der zusammenhaltenden Kraft des oxidierenden Eisens hart wie Stein sind. (vgl. Don und Prietz 2019: 64f.)

### Pseudogley

Böden, die vom Einfluss des Wassers geprägt werden, dabei jedoch nicht vom Grundwasser abhängig sind, werden als Pseudogley bezeichnet. In diesen Böden kann das von oben kommende Wasser nicht mehr versickern und staut sich somit an. Dies geschieht an einer undurchlässigen Schicht, welche z.B. aus Ton besteht und in vielen Fällen zusätzlich noch verdichtet ist. Diese Schicht kann dabei schon vorgegeben sein oder erst im Laufe der Zeit entstehen. So können beispielsweise feine Tonpartikel aus den oberen Schichten durch absickerndes Wasser nach weiter unten abtransportiert werden, wo sie dann eine Stauschicht bilden können. Oberhalb dieser Schicht befindet sich jener Bereich, der ähnlich wie beim echten Gley, durch den Einfluss des Wassers bunt eingefärbt wird. Zum Unterschied zum Gley ist der Pseudogley nicht gleichmäßig trocken. Meist staut sich das Wasser in den Wintermonaten, während sich die Sommermonate durch ihre enorme Trockenheit auszeichnen. Pseudogley kann somit als Extremboden bezeichnet werden. (vgl. Don und Prietz 2019: 72f.)

### Braunerde

Für Don und Prietz (2019: 28) stellt die sogenannte Braunerde den klassischen Standardboden dar. Braunerde zeichnet sich dabei durch ihre ABC-Horizonte aus. Die oberste Schichtung (A) wird meist auch Krume oder Mutterboden genannt, da dieser Horizont überwiegend für die Ernährung der sich darüber befindlichen Vegetation verantwortlich ist. In meist 20-30 cm Tiefe folgt dann der sogenannte Unterboden (B). Die Bezeichnung B-Horizont leitet sich dabei von der Braunfärbung des Untergrundmaterials ab. Die letzte Schichtung der Braunerde stellt der C-Horizont dar, welcher aus dem Ausgangsmaterial besteht und dann zum Boden gezählt wird, sobald dessen Verwitterung einsetzt und er durch die Wurzeln erschlossen wird. (vgl. Don und Prietz 2019: 28)

Innerhalb der Braunerde laufen zwei charakteristische Prozesse ab. Den ersten Prozess stellt dabei die sogenannte Verbraunung dar. In Folge dieses Prozesses wird dabei aus dem Ausgangsmaterial des C-Horizontes ein B-Horizont. Die dabei bereits erwähnte braune Färbung des B-Horizonts ist so charakteristisch, dass sie der Namensgeber des gesamten Bodens ist. Den zweiten wichtigen Prozess bildet die Verlehmung des Bodens, welche durch die Verwitterung von Untergrundgestein bedingt ist. (vgl. Don und Prietz 2019: 28)

Sowohl die visuelle, farbliche Struktur, als auch die Mächtigkeit der Braunerde kann stark variieren. Abhängig vom Ausgangsmaterial kann der Boden rötlichen Ausprägungen, tiefdunkle B-Horizonte, bis hin zu eher gelblichen Färbungen aufweisen. Die Mächtigkeit der

verbraunten Schichtung kann dabei zwischen 30 cm und 1 m liegen, wobei sich jedoch häufig Übergänge zu anderen Bodentypen auffinden lassen. Steht Braunerde unter dem Einfluss des Wassers, so können sich oben erwähnte Gleye bzw. Pseudogleye bilden. Die landwirtschaftliche Nutzung von Braunerdeböden hängt sehr stark vom verwitterten Ausgangsmaterial ab. Meist handelt es sich bei Braunerde eher um Böden von mittlerer Qualität. Ist diese jedoch aus nährstoffreichen Gesteinen, wie beispielsweise Basalt, entstanden, kann die Braunerde durchaus eine hohe Fruchtbarkeit aufweisen. Der pH-Wert von Braunerden liegt meist in einem mäßig sauren bis stark sauren Bereich. (vgl. Don und Prietz 2019: 30)

#### 4.6 Rutschungen in den Untersuchungsgebieten

Innerhalb der letzten Jahrzehnte wurde in zahlreichen Untersuchungen aufgezeigt, dass das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen nicht allein auf die Zusammensetzung des Untergrundes bzw. auf Verwitterungsprozesse zurückgeführt werden kann. Vielmehr ist es wichtig, die Ursachen auch in den anthropogenen Einflüssen zu suchen. Jedes Jahr werden zahlreiche Rutschungen durch den Menschen verursacht. Ausgelöst werden diese beispielsweise durch den Bau von Straßen, einer Abänderung des oberflächlichen bzw. unterirdischen Abflusses oder großflächigen Rodungen des Waldes. Die am häufigsten dokumentierte Gruppe von gravitativen Massenbewegungen wird im Bundesland Niederösterreich von den Rutschungen gebildet. Allein zwischen 1965 bis 2006 wurden in Niederösterreich ca. 1100 Rutschungen gemeldet und erfasst. Gefolgt werden die Erdrutsche von Muren, diversen Fallprozessen und Bergzerreißen. (vgl. Gottschling 2006: 335)

Rutschungen sind vor allem in jenen Gebieten anzutreffen, deren Untergrundgestein einen hohen Tonanteil aufweist, wie beispielsweise Tonmergel, Mergel, tonige Sandsteine, Tonschiefer, Phyllite, Glimmerschiefer und Gneis. Diese Gesteine neigen dazu, unter Einfluss des alpingeprägten Klimas zu Ton oder lehmigem Material zu verwittern. Aus diesem Grund ist vor allem die Fyschzone betroffen. Durch ihre Schichtfolgen, welche sich meist aus Ton- und Kalkmergel zusammensetzen, aber auch durch verwitternde Sandsteine im tieferen Untergrund ist sie besonders anfällig für gravitatives Rutschen. (vgl. Gottschling 2006: 335) Rund 40 % der gemeldeten und dokumentierten Rutschungen fanden in der Fyschzone statt. Bedenkt man hier zusätzlich wie klein die Gesamtfläche der Fyschzone in Niederösterreich im Vergleich zu den anderen geologischen Zonen ist, so erkennt man wie anfällig diese für das Auftreten von Rutschungen ist. Zählt man die Fyschzone und die Klippenzone zusammen, so ergibt sich auf einer Fläche von nur rund 9 % ein Rutschungsanteil von 60 %. (siehe dazu Abbildung 10) (vgl. Schwenk et al. 1992: 620)

Aber auch innerhalb der Molassezone kommt es durch ihren tonhaltigen Untergrund immer wieder zu Rutschungen, welche aufgrund der mächtigen Verwitterungsablagerungen bereits bei geringem Gefälle ausgelöst werden können. (vgl. Gottschling 2006: 335f.) Obwohl sowohl die Molassezone, als auch das inneralpine Tertiär einen höheren Anteil an verwitterungsfähigem Material als die Flyschzone aufweisen und zusätzlich einen viel größeren Flächenanteil vom Land Niederösterreich einnehmen, so finden in diesen geologischen Zonen doch eindeutig weniger Rutschungen statt. Dies ist auf die vergleichsweise flache Morphologie der Oberfläche zurückzuführen. (vgl. Schwenk et al. 1992: 621)

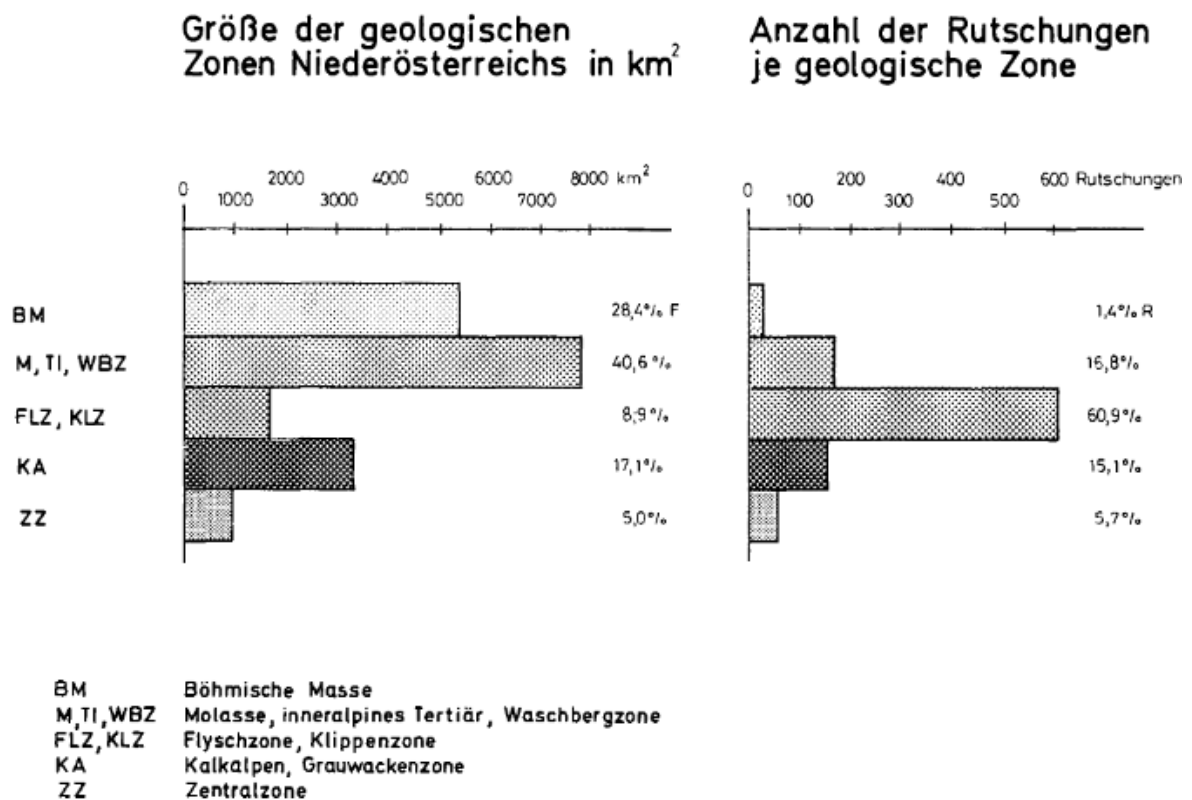


Abbildung 11 - Gegenüberstellung der flächenmäßigen Ausdehnung und dem Auftreten von Rutschungen. - Quelle: Schwenk et al. 1992: 621

#### Untersuchungsgebiet St. Pantaleon-Erla

Die untersuchte Hangrutschung, welche sich in der Gemeinde St. Pantaleon-Erla befindet, kann als Rotationsrutschung eingestuft werden. Sie besteht dabei aus mehreren Teilschollen, Gleitflächen, Rutschkuckeln, Bodenrissen und Quellen. Die Rutschung selbst ist dabei seit längerem bekannt, ein genaues Jahr wird im Baugrunderkaster allerdings nicht angegeben. In der ersten Märzwoche 2017 wurde vom benachbarten Grundstückseigentümer eine größere Bewegung entdeckt und das Schadensdatum wird dabei von der Gemeinde St. Pantaleon-Erla mit dem 01.03.2017 datiert. Durch starke Regenfälle am 18. und 19. März 2017 wurden weitere Bewegungen der Rutschung ausgelöst und dokumentiert. Das Ausmaß des sich



bewegenden Hanges kann mit rund 2 000 m<sup>2</sup> bzw. rund 6 000 m<sup>3</sup> angegeben werden. Das abgelöste und bewegte Material hat dabei ausgehend von der Abrisskannte 2-6 m zurückgelegt. Vertikal betrachtet hat das Material ca. 1-3 m zurückgelegt. Die Rutschung hat bereits den Damm erreicht, über welchen die Bundesstraße B1 verläuft (siehe Abbildung 12). Dadurch wurde der Durchfluss des Engelberdbaches bereits eingengt. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass ein Stromkabel, welches in ca. 1,5 m Tiefe verläuft, abreißt. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)



*Abbildung 12 - Rutschung St. Pantaleon-Erla - Damm und Bach am Fuße der Rutschung - eigene Aufnahme*

### Behamberg

Das untersuchte Rutschungsgebiet, welches der Gemeinde Behamberg zuzuordnen ist, kann in zwei getrennte Rutschungen unterteilt werden. Rutschung I erstreckt sich dabei südlich der Bauernhofgebäude entlang des südwärts gerichteten Hanges. Rutschung II befindet sich ein Stück weiter westlich davon. Das Ausmaß der Rutschung I kann dabei mit 8.300 m<sup>2</sup> bzw. 42.000 m<sup>3</sup> beziffert werden. Die Tiefgründigkeit der Rutschung schwankt dabei zwischen flach- und tiefgründig. Rutschung II umfasst ungefähr ein Gebiet von 11.700 m<sup>2</sup>. Sie ist als eher tiefgründig einzustufen, was sich vor allem in ihrem Volumen von rund 117.000 m<sup>3</sup> widerspiegelt. Eine Besonderheit der Rutschung II gegenüber Rutschung I ist das Vorhandensein eines Erdstroms, welcher Wasseradern enthält. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)

Aufgrund verschiedenster Vorerfahrungen, welche die Niederösterreichische Landesregierung in der Vergangenheit mit ähnlichen Rutschungen sammeln konnte, kann von einer durchschnittlichen Bewegungsrate von 2-5 cm pro Jahr ausgegangen werden. Während

starken Niederschlägen, wie beispielsweise im Juni 2009, kann jedoch von einer Bewegung von 1-2 m in nur 2 Wochen ausgegangen werden. Im Bereich des Erdstroms muss jedoch aufgrund der Vorerfahrungen, die im Flysch gesammelt wurden, mit einer Bewegungsrate von 1-3 m pro Jahr ausgegangen werden. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)

Die überaus langsame Bewegungsrate spiegelt sich auch in der Morphologie des Hanges wider. So kann im oberen Bereich an manchen Stellen eine wellenartige Struktur (siehe Abbildung 13) und am Fuße der Rutschung, im Bereich des Bachs, ein Säbelwuchs der Bäume beobachtet werden (siehe Abbildung 14). Diese Merkmale deuten, wie in Kapitel 3.1.4 erwähnt wurde, auf ein langsames Bodenkriechen hin.



*Abbildung 13 - Rutschung Behamberg – oberer Bereich der Rutschung - eigene Aufnahme*



*Abbildung 14 - Rutschung Behamberg – unterer Bereich der Rutschung - eigene Aufnahme*

Die Rutschungen selbst sind den GrundstückseigentümerInnen bereits seit den 1960er Jahren bekannt und gewannen im Laufe der Zeit massiv an Größe bzw. Volumen dazu. Genauere Rutschungsaufkommen sind seit 1960 jedoch kaum festgehalten. Im Wesentlichen wurden nur zwei konkrete Ereignisse genau dokumentiert: Wie bereits weiter oben erwähnt kam es während des starken Niederschlages im Juni 2009 zu Bewegungen an mehreren Punkten des Hanges. Des Weiteren kam es im Zuge der Niederschläge und der zusätzlichen Schneeschmelze im Februar 2017 zu Rutschungen im Gebiet, die auch zu Rissen im Wohngebäude führten. Ansonsten wurden jedoch keine weiteren Rutschungen gemeldet bzw. genauer aufgezeichnet. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)



## Wilhelmsburg

Die Rutschung im Kreisbachtal (Gemeinde Wilhelmsburg) bereitet den GrundstücksbesitzerInnen bereits seit mehreren Jahrzehnten Probleme. So kann das betroffene Gebiet schon seit längerem sowohl landwirtschaftlich als auch forstwirtschaftlich nicht weiterverwendet werden. 1997 wurde die Rutschung vom geologischen Dienst erstmals näher untersucht. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)

Die erste dokumentierte Rutschung wurde am 15.05.1996 verzeichnet. Diese ist dabei auf die starken Niederschläge im April und Mai zurückzuführen. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)

Eine zweite Rutschung wurde aufgrund der ergiebigen Regenfälle im August 2006 gemeldet. Ein genauer Tag ist hier jedoch nicht näher bekannt. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)

Untersuchungen aus dem Jahr 2018, welche von der Technischen Universität Wien durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich die Rutschung auf vier voneinander getrennte Rutschungen unterteilen lässt. Fasst man alle vier Rutschungen zusammen, so befinden sich rund 25.900 m<sup>2</sup> bzw. 237.500 m<sup>3</sup> des Hangs in Bewegung. Mit Ausnahme von Rutschung I sind alle anderen Rutschungen als tiefgründig einzustufen. Zwischen Februar 2008 und März 2017 wurden Vermessungen an 16 unterschiedlichen Messpunkten durchgeführt. Über den gesamten Beobachtungszeitraum konnte bei den meisten Messpunkten eine deutliche Bewegung des Untergrundes festgestellt werden. Die Bewegungsrate reicht dabei von wenigen cm pro Jahr, was sich durch eine wellenartige Struktur im oberen Bereich bemerkbar macht (siehe Abbildung 15) bis hin zu fast 2 m in nur zwei Wochen. Einer der Messpfeiler wurde auf Grund der Bewegungen aus dem Untergrund gerissen (siehe Abbildung 16). Durchschnittlich gesehen liegt die Bewegungsrate der meisten Messpfeiler bei rund 2,5 cm pro Jahr. Aus diesem Grund wird die Rutschung vom Land Niederösterreich als sehr langsame Rutschung eingestuft. (vgl. Geologischer Dienst Niederösterreich 1998-2019)



*Abbildung 15 - Rutschung Wilhelmsburg – oberer Bereich – eigene Aufnahme*



*Abbildung 16 - Rutschung Wilhelmsburg – Messpfeiler – eigene Aufnahme*

## 5. Datengrundlage

Im nun folgenden Abschnitt soll die Datengrundlage, die für die anschließenden Berechnungen herangezogen wird, geklärt werden. Im Wesentlichen wurden Rutschungsberichte, Niederschlagsdaten und Durchflussdaten verwendet. Die untenstehende Tabelle 8 gibt einen Überblick darüber, welche Daten verwendet wurden.

*Tabelle 8 - Übersicht über die Datengrundlage*

| Art der Daten       | räumliche Auflösung                                                      | zeitliche Auflösung                                                                                                          | Format | Quelle                                                                                                                              |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rutschungen</b>  | Grundstücks- bzw. Baugrundkatasternummer                                 | Dokumentierte Rutschungsereignisse mit Tag- oder Wochenangabe bzw. Bewegungen der Messstationen in angegebenen Zeitabständen | PDF    | Geologischer Dienst<br>Niederösterreich<br>(1998-2019)                                                                              |
| <b>Niederschlag</b> | 3 Messstationen an den Standorten: St. Pantaleon, Behamberg und Pyhra    | Tägliche maximale Niederschlagsdaten in mm zwischen 01.01.1981-31.12.2018                                                    | CSV    | Hydrographischer Dienst<br>Niederösterreich<br>(1981-2018)                                                                          |
| <b>Durchfluss</b>   | 4 Messstationen an den Standorten: Steyr, Haid, Schwertberg, Windpassing | stündliche Durchflussraten in m <sup>3</sup> /s zwischen 01.01.1991-31.12.2018                                               | CSV    | Hydrographischer Dienst<br>Niederösterreich<br>(1981-2018a, 1981-2018b)<br>Hydrographischer Dienst<br>Oberösterreich<br>(1981-2018) |

### 5.1 Rutschungsdaten

Die Rutschungsdaten der drei Untersuchungsgebiete St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg stammen aus dem Niederösterreichischen Baugrundkataster und wurden vom Amt der Niederösterreichischen Landesregierung zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser, als PDF aufliegenden Dokumente, konnten im Zeitraum 01.01.1991-31.12.2018 in Summe 22 Rutschungsereignisse zugeordnet werden. Die Qualität der zeitlichen Dokumentation schwankt dabei enorm. Nur in zwei Fällen liegt ein konkretes Ereignisdatum vor. Für vier weitere Rutschungsereignisse wird der Monat bzw. die Kalenderwoche genannt. Die übrigen 16 Fälle wurden auf Basis der Untersuchung in Wilhelmsburg, welche im Zeitraum 13.02.2008-29.03.2017 erfolgte, zugeordnet. In dieser wurden Messpfeiler installiert, mit denen die Bewegungsraten in bestimmten Zeitabschnitten festgestellt werden konnten. Diese Untersuchung gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, wann die Rutschungen exakt auftraten.

## 5.2 Niederschlagsdaten

Die Niederschlagsdaten, welche im Zuge dieser Arbeit Verwendung fanden, wurden vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich zur Verfügung gestellt. Ausgewählt wurden die Messstationen dabei nach der geringsten Distanz zur jeweiligen Rutschung.

Für die untersuchte Rutschung in der Gemeinde St. Pantaleon-Erla wurde die ca. 3,5 km entfernte Messstation *St. Pantaleon* ausgewählt, die ca. 1,1 km entfernte Station *Behamberg* für Behamberg und für das Untersuchungsgebiet in Wilhelmsburg die ca. 8,5 km entfernte Station *Pyhra*.

Die Niederschlagsdaten werden in mm angegeben und es handelt sich um 24h-Summen, gebildet zwischen 07:00-07:00 Uhr. Verwendet wurden für diese Untersuchung die Daten aus dem Zeitraum 01.01.1991-31.12.2018. Aufbauend auf diesen Niederschlagsdaten wurde auch der vorhergehende Niederschlag berechnet.

## 5.3 Durchflussdaten

Um einen Einblick auf das Abflussverhalten der Untersuchungsgebiete zu erhalten, wurden die Durchflussdaten vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich und vom Hydrographischen Dienst Oberösterreich verwendet. Diese stammen von den Messstationen der am nächst gelegenen Gewässer. Für das Untersuchungsgebiet St. Pantaleon-Erla wäre dies eigentlich die Station *Mauthausen* (Donau), welche von der via Donau betrieben wird. Die via Donau riet allerdings davon ab, diese Daten zu verwenden, da sie durch die Staukraftwerke in Oberösterreich zu sehr verfälscht werden. Aus diesem Grund wurden für St. Pantaleon-Erla die beiden Stationen *Schwertberg* (Aist) und *Haid* (Naarn), welche vom Hydrographischen Dienst Oberösterreich betrieben werden, ausgewählt. Für die untersuchte Rutschung in Behamberg wurde die Station *Steyr* (Enns) und für die untersuchte Rutschung in Wilhelmsburg wurde die Station *Windpassing* (Traisen) herangezogen.

Bei den Daten dieser Stationen handelt es sich um die Durchflussraten, angegeben in m<sup>3</sup>/s, des jeweiligen Gewässers. Die Auflösung dieser Daten liegt dabei im Stundenbereich.

## 6. Methodik

Im nun folgenden Abschnitt der Arbeit geht es darum, das Antecedent Daily Rainfall Modell vorzustellen, daher jene Methodik, auf deren Basis die später angeführten Berechnungen durchgeführt wurden.

### 6.1 Das Antecedent Daily Rainfall Modell im Überblick

Beim Antecedent Daily Rainfall Modell (ADRM), welches im Jahr 1980 von Crozier und Eyles eingeführt wurde und in weiterer Folge von Glade et al. (2000) modifiziert wurde, handelt es sich um ein empirisches Modell, bei dem der auslösende Faktor durch das Zusammenspiel des Ereignisniederschlags und des vorhergehenden Niederschlags (antecedent rainfall) repräsentiert wird. Für den Ereignisniederschlag wird dabei das Tagesmaximum herangezogen. Dies basiert auf der Annahme, dass sich eine Rutschung am wahrscheinlichsten zum Zeitpunkt des Niederschlagsmaximums gelöst hat. Um den vorhergehenden Niederschlag berechnen zu können, wurde von Glade et al. (2000) ein Zerfallsfaktor (decay factor) eingeführt, der auf Basis der Abflussraten des jeweiligen Gebietes ermittelt werden kann. Berechnet wurde der vorhergehende Niederschlag für einen Zeitraum von 10 Tagen. Die Rutschungsereignisse werden gemeinsam mit dem Niederschlag bzw. dem vorhergehenden Niederschlag einer statistischen Analyse unterzogen, mittels derer die Niederschlagsschwellenwerte für das Auftreten einer gravitativen Massenbewegung berechnet werden können. Schlussendlich können durch das Antecedent Daily Rainfall Modell Aussagen über die Auftretswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung in Abhängigkeit vom täglichen maximalen Niederschlag und vom vorhergehenden Niederschlag in Millimetern getroffen werden. (vgl. Glade et al. 2000: 1059ff.)

### 6.2 Berechnungsschritte des Antecedent Daily Rainfall Modells

Im folgenden Subkapitel soll nun eine genaue Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritte gegeben werden. Um die Berechnung durchführen zu können, sind entsprechende Datensätze notwendig. Diese wurden zuvor in Kapitel 5 geschildert.

#### 6.2.1 Berechnung des vorhergehenden Niederschlags

Der vorhergehende Niederschlag des Antecedent Daily Rainfall Modells beruht auf dem Antecedent Daily Rainfall Index (ADRI), welcher 1966 von Bruce und Clark eingeführt wurde. Dieser lässt sich mit der folgenden Summenformel berechnen (vgl. Glade et al. 2000: 1066):

$$r_{a_0} = \sum_{i=1}^n k^i r_i$$

Wobei:

- $r_{a_0}$  = vorhergehender täglicher Niederschlag in mm
- $r_i$  = maximaler täglicher Niederschlag in mm
- $k$  = Abflusskonstante
- $n$  = Anzahl der Tage vor dem Rutschungsereignis

Bei der erstmaligen Einführung des Antecedent Daily Rainfall Modells im Jahr 1980 wurde von Crozier und Clark für die Abflusskonstante  $k$  der Wert 0,84 verwendet, welcher zuvor für das Abflussverhalten von Ottawa (Illinois) berechnet wurde. Da diese Konstante nur eine geringfügige Gültigkeit für andere Untersuchungsgebiete hat, wurde die Berechnung des ADRI von Glade et al. (2000) um den sogenannten „decay factor“ erweitert. Dessen Berechnung wird weiter unten im Abschnitt 6.2.2 angeführt. Die Summenformel zur Berechnung des ADRI muss daher folgendermaßen umgeschrieben werden (vgl. Glade et al. 2000: 1066ff.):

$$r_{a_0} = \sum_{i=1}^n i^d r_i$$

Wobei:

- $r_{a_0}$  = vorhergehender täglicher Niederschlag in mm
- $r_i$  = Niederschlagssumme des entsprechenden Tages
- $d$  = neue Abflusskonstante (Decay-Faktor)
- $n$  = Anzahl der Tage vor dem Rutschungsereignis

### 6.2.2 Berechnung des Decay-Faktors

Um einen Aufschluss über das Abflussverhalten eines Gebiets zu erhalten, analysierten Glade et al. (2000) den Rückgang der Durchflussmenge eines Flusses nach einem Regenereignis. Um das Abflussverhalten nicht zu verfälschen wurde darauf geachtet, nur jene Rückgänge zur Berechnung heranzuziehen, bei denen der Niederschlag vor dem Höhepunkt des Rückgangs stoppte und auch kein weiterer Niederschlag folgte. Der Rückgang des Wasserdurchflusses kann dabei am besten durch eine Exponentialfunktion angenähert werden (vgl. Glade et al. 2000: 1067):

$$y = cn^d$$

Wobei:

- $y$  = Durchflussmenge in Abhängigkeit der Zeit
- $c$  = Höhepunkt der Durchflussdaten
- $n$  = Zeit in Tagen, Stunden, etc.
- $d$  = Decay-Faktor

Der dabei erhaltene Exponent  $d$  der Exponentialfunktion kann anschließend zur oben erwähnten Berechnung des Decay-Faktors herangezogen werden.

### 6.2.3 Berechnung der Niederschlagschwellenwerte zur gegebenen Wahrscheinlichkeit

Im letzten Schritt des Antecedent Daily Rainfalls Modells geht es nun darum, die Niederschlagschwellenwerte zu einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zu berechnen. Schlussendlich soll also eine Aussage darüber getroffen werden können, welcher tägliche maximale Niederschlag bzw. welche ADRI-Menge notwendig ist, um eine gravitative Massenbewegung beispielsweise mit einer 90%igen Wahrscheinlichkeit auszulösen. (vgl. Glade et al. 2000: 1068)

Zu diesem Zweck müssen die Tage des Untersuchungszeitraums nach „Tagen mit Rutschung“ bzw. „Tagen ohne Rutschung“ kategorisiert werden. Jene Tage, an denen möglicherweise eine Rutschung stattgefunden hat, werden ebenfalls als Rutschungstage kategorisiert. Dadurch liegt eine dichotome Variable – Ja/Nein bzw. 0/1 – vor. Dieser aufbereitete Datensatz ermöglicht es nun mit Hilfe der logistischen Regression die Schwellenwerte in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeiten zu berechnen. (vgl. Glade et al. 2000: 1068)

Für die Berechnung der Schwellenwerte wurde für diese Untersuchung die binäre logistische Regression herangezogen. Dieses Verfahren ermöglicht es die Abhängigkeit einer dichotomen Variable – in diesem Fall Rutschung Ja oder Nein – von anderen unabhängigen Variablen – in diesem Fall Niederschlagsmenge bzw. ADRI-Menge – zu untersuchen. Die Formel zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten kann dabei wie folgt angegeben werden (vgl. Bühl 2012: 452):

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

mit  $z := b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a$

Wobei:

- $x_i$  = Werte der unabhängigen Variablen
- $b_i$  = Regressionskoeffizienten
- $a$  = Konstante



In anderen Quellen wird die oben angegebene Gleichung auch in der folgenden Form angeschrieben (vgl. Windzio 2013: 52):

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a$$

Die beiden Gleichungen sind äquivalent und können durch einige Umformungsschritte auf die jeweils andere Form gebracht werden.

Setzt man nun die Wahrscheinlichkeit und die Regressionskoeffizienten bzw. die Konstante  $a$  ein, so können die dazugehörigen Werte der unabhängigen Variablen bestimmt werden. Die Schwellenwertlinien können dann als Funktionsgraph in einem Streudiagramm, so wie beispielsweise bei Glade et al. (2000: 1073) dargestellt werden (siehe Abbildung 17). In

diesem Fall handelt es sich um die Gleichung einer linearen Funktion, da diese von zwei unabhängigen Variablen, dem Niederschlag und dem ADRI, abhängt. Der Funktionsgraph dieser linearen Funktion kann als Schwellenwertlinie für das Auftreten einer Rutschung zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angesehen werden. Gemeinsam mit den Rutschungsdaten kann somit ein Streudiagramm angefertigt werden, aus welchem die Niederschlagsschwellenwerte abgelesen werden können.

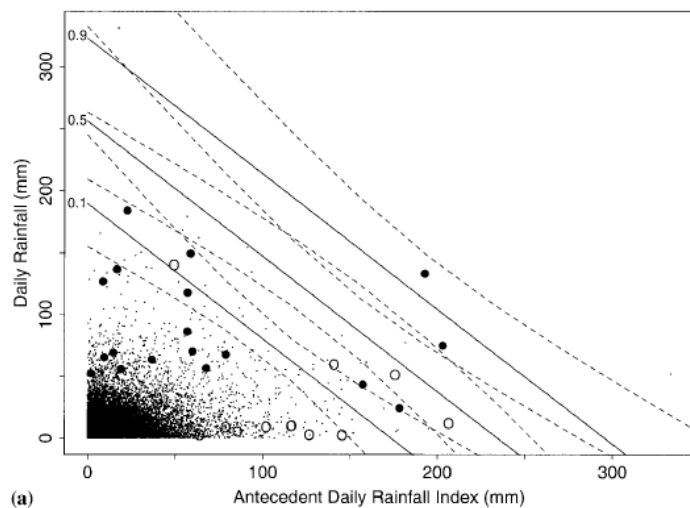


Abbildung 17 - Ergebnisse des ADRM angewendet in der Region Wairarapa, Neuseeland - Quelle: Glade et al. 2000: 1073

## 7. Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden nun die Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells, welches in den drei Gebieten St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg für den Zeitraum 1991-2018 angewendet wurde, aufbereitet. Dazu werden im ersten Schritt die Ergebnisse des berechneten Decay-Faktors präsentiert. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der binären logistischen Regression aufgezeigt. Alle Berechnungen wurden mit Microsoft Excel und SPSS 26 durchgeführt.

### 7.1 Ergebnisse des Decay-Faktors

Wie bereits im Subkapitel 6.2.2 beschrieben wurde, kann der Decay-Faktor, welcher Aufschluss über das Abflussverhalten eines Gebietes gibt, auf Basis von Durchflussdaten naheliegender Fließgewässer berechnet werden. Mittels einer nicht linearen Regression wurden für die Untersuchungsgebiete Exponentialfunktionen für jeweils sechs Durchflussrückgänge im Zeitraum 1981-2018 aufgestellt. Der Decay-Faktor ist dabei der Exponent der Funktionsgleichung.

Im Zuge dieser Arbeit wurde der benötigte Decay-Faktor nicht wie bei Glade et al. (2000) auf Basis täglicher Daten, sondern auf Basis von stündlichen Daten gebildet. Durch die höhere Auflösung der Daten kann der somit berechnete ADRI als präziser angesehen werden. Zuvor muss jedoch die Summenformel entsprechend angepasst werden. Für die Berechnung eines 10-Tages-ADRI ergibt sich somit:

$$r_{a0} = r_1 \cdot 1^d + r_2 \cdot 25^d + r_3 \cdot 49^d + r_4 \cdot 73^d + r_5 \cdot 97^d + r_6 \cdot 121^d + r_7 \cdot 145^d + r_8 \cdot 169^d + r_9 \cdot 193^d + r_{10} \cdot 217^d$$

Wobei:

- $r_{a0}$  = vorhergehender täglicher Niederschlag in mm
- $r_i$  = Niederschlagssumme des entsprechenden Tages
- $d$  = stündliche Abflusskonstante (Decay-Faktor)

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die berechneten Decay-Faktoren gegeben.

### 7.1.1 Decay-Faktor St. Pantaleon-Erla 1991-2018

Der Decay-Faktor für die Region St. Pantaleon-Erla (siehe dazu Tabelle 9) liegt in den sechs ausgewählten Events zwischen -0,106 und -0,316. Durchschnittlich gesehen ergibt sich für diese Region ein Decay-Faktor von -0,212. Die Standardabweichung beträgt dabei 0,068. Das Bestimmtheitsmaß liegt dabei immer in einem hohen Bereich, was für eine gute Annäherung der Exponentialfunktionen an die Realität spricht.

*Tabelle 9 - Berechneter Decay-Faktor für die Region St. Pantaleon-Erla – Messstationen: Haid und Schwertberg*

| Zeitraum            | Decay-Faktor  | R <sup>2</sup> | Messstation |
|---------------------|---------------|----------------|-------------|
| 23.05.-30.05.1981   | -0,251        | 0,816          | Haid        |
| 23.05.-30.05.1981   | -0,242        | 0,841          | Schwertberg |
| 01.08.-05.08.1984   | -0,259        | 0,841          | Haid        |
| 01.08.-05.08.1984   | -0,210        | 0,865          | Schwertberg |
| 06.06.-10.06.1988   | -0,232        | 0,896          | Haid        |
| 06.06.-10.06.1988   | -0,160        | 0,870          | Schwertberg |
| 16.09.-19.09.1995   | -0,221        | 0,916          | Haid        |
| 16.09.-19.09.1996   | -0,140        | 0,827          | Schwertberg |
| 13.09.-16.09.2007   | -0,116        | 0,768          | Haid        |
| 13.09.-16.09.2008   | -0,106        | 0,749          | Schwertberg |
| 10.08.-12.08.2013   | -0,316        | 0,903          | Haid        |
| 10.08.-12.08.2014   | -0,293        | 0,878          | Schwertberg |
| <b>Durchschnitt</b> | <b>-0,212</b> |                |             |

### 7.1.2 Decay-Faktor Behamberg 1991-2018

Der Decay-Faktor für die Region Behamberg (siehe dazu Tabelle 10) liegt im untersuchten Zeitraum zwischen -0,156 und -0,262. Der durchschnittliche Decay-Faktor beträgt -0,196 und die Standardabweichung beträgt 0,044. Das hohe Bestimmtheitsmaß weist auf eine gute Annäherung der Funktion an die realen Daten hin.

*Tabelle 10 - Berechneter Decay-Faktor für die Region Behamberg – Messstation: Steyr*

| Zeitraum            | Decay-Faktor  | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---------------|----------------|
| 18.06.-23.06.1989   | -0,238        | 0,821          |
| 23.07.-23.07.1991   | -0,178        | 0,669          |
| 29.07.-31.07.1993   | -0,180        | 0,834          |
| 28.05.-31.05.1996   | -0,160        | 0,837          |
| 13.10.-15.10.2011   | -0,156        | 0,748          |
| 24.10.-28.10.2014   | -0,262        | 0,830          |
| <b>Durchschnitt</b> | <b>-0,196</b> |                |

### 7.1.3 Decay-Faktor Wilhelmsburg

Im Untersuchungsgebiet Wilhelmsburg liegt der Decay-Faktor zwischen den Werten -0,089 und -0,193 (siehe Tabelle 11). Als arithmetisches Mittel ergibt sich ein Wert von -0,126, wobei die Standardabweichung von diesem 0,04 beträgt. Durch die hohen Werte des Bestimmtheitsmaßes kann von einer guten Annäherung ausgegangen werden.

*Tabelle 11 - Berechneter Decay-Faktor für die Region Wilhelmsburg – Messstation: Windpassing*

| Zeitraum            | Decay-Faktor  | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---------------|----------------|
| 01.10.-04.10.1998   | -0,11         | 0,915          |
| 13.08.-16.08.1984   | -0,128        | 0,623          |
| 19.05.-23.05.1991   | -0,193        | 0,873          |
| 29.06.-02.07.1993   | -0,089        | 0,777          |
| 12.06.-16.06.2001   | -0,089        | 0,776          |
| 24.06.-28.06.2011   | -0,145        | 0,884          |
| <b>Durchschnitt</b> | <b>-0,126</b> |                |

## 7.2 Ergebnisse der binären logistischen Regression

Um die Niederschlagsschwellenwerte zu berechnen, wurde eine binäre logistische Regression durchgeführt. Die abhängige, dichotom ausgeprägte Variable bildet in diesem Fall „Rutschung Ja oder Nein“. Zu diesem Zweck wurde jedem Tag der Wert 1 für „Ja“ bzw. 0 für „Nein“ zugeordnet. Als unabhängige Variablen dienten der tägliche maximale Niederschlag und der vorhergehende Niederschlag (ADRI). Für die Berechnung des ADRI wurden die zuvor in Unterkapitel 7.1 ermittelten durchschnittlichen Decay-Faktoren herangezogen. Da es in dieser Berechnung um den Zusammenhang zwischen Niederschlag und dem Auftreten von gravitativen Prozessen geht, wurden in Anlehnung an Glade et al. (2000) nur jene Tage herangezogen, welche eine Niederschlagssumme von größer-gleich 1 mm aufwiesen. Im Folgenden werden nun die wichtigsten Ergebnisse der binären logistischen Regression dargelegt.

### 7.2.1 Ergebnisse St. Pantaleon-Erla 1991-2018

Im Zuge der binären logistischen Regression führt SPSS einen Omnibus-Test durch, welcher Aufschluss darüber liefert, ob sich das Modell durch das Einbeziehen der unabhängigen Variablen verbessert hat. Da der p-Wert für das Untersuchungsgebiet St. Pantaleon-Erla im Zeitraum 1991-2018 mit einem Wert von 0,403 weit über 0,05 liegt, kann von keiner signifikanten Verbesserung gesprochen werden. (vgl. Bühl 2012: 171, 455)

Zusätzlich führt SPSS die beiden Pseudo-  $R^2$ -Tests nach COX und Snell bzw. Nagelkerkes durch. Diese geben an, wie hoch die Güte des gesamten Modells einzuschätzen ist. Der Pseudo- $R^2$ -Test nach Cox und Snell ergibt in diesem Fall einen Wert von 0,000, der Test nach Nagelkerkes gibt einen Wert von 0,052 an. Diese niedrigen Werte, die sehr nahe bei 0 liegen, sprechen dafür, dass das Gesamtmodell als unpassend einzustufen ist. (vgl. Bühl 2012: 455)

In der untenstehenden Klassifizierungstabelle (Tabelle 12) werden beobachtete Werte und prognostizierte Werte gegenübergestellt. (vgl. Bühl 2012: 45) In diesem Fall kann aus der Tabelle entnommen werden, dass von 4653 Tagen ohne Rutschungen 100 % richtig vorhergesagt wurden. Von den zwei Tagen, an denen es nachweislich zu Rutschungen kam, wurde keiner richtig vorhergesagt. Durch den kleinen Anteil der Rutschungstage rundet SPSS den gesamten Prozentsatz der richtigen Vorhersage auf 100 %.

*Tabelle 12 - Klassifizierungstabelle - St. Pantaleon-Erla 1991-2018*

|            |                   |   | Vorhergesagt           |   | Prozentsatz der<br>Richtigen |
|------------|-------------------|---|------------------------|---|------------------------------|
| Beobachtet |                   |   | Rutschung Ja/Nein<br>0 | 1 |                              |
| Schritt 1  | Rutschung Ja/Nein | 0 | 4653                   | 0 | 100,0                        |
|            |                   | 1 | 2                      | 0 | ,0                           |
|            | Gesamtprozentsatz |   |                        |   | 100,0                        |

a. Der Trennwert lautet ,500

In der letzten Tabelle der binären logistischen Regression (siehe Tabelle 13), werden die berechneten Koeffizienten und deren Signifikanz dargestellt. (vgl. Bühl 2012: 456)

Der noch signifikante Regressionskoeffizient des Niederschlags liegt in diesem Fall mit einem Wert von 0,047 über 0 und deutet darauf hin, dass dieser eine begünstigende Wirkung auf das Auftreten von Hangrutschungen in St. Pantaleon-Erla hat.

Ein anderes Bild zeigt sich beim ADRI: dessen nicht signifikanter negativer Regressionskoeffizient weist darauf hin, dass sich ein hoher vorhergehender Niederschlag negativ auf die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Hangrutschung auswirkt. Aufgrund dessen wurde für die Region St. Pantaleon-Erla darauf verzichtet, die Niederschlagsschwellenwerte zur gegebenen Wahrscheinlichkeit zu berechnen, da diese als nicht sinnvoll erachtet werden können.

Tabelle 13 - Variablen in der Gleichung - St. Pantaleon-Erla 1991-2018

|                        |                    | Regressionsko<br>effizientB | Standardfehler | Wald   | df | Sig. | Exp(B) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|--------|----|------|--------|
| Schritt 1 <sup>a</sup> | Niederschlag in mm | ,047                        | ,023           | 4,105  | 1  | ,043 | 1,048  |
|                        | ADRI               | -,038                       | ,090           | ,179   | 1  | ,672 | ,963   |
|                        | Konstante          | -7,765                      | 1,054          | 54,276 | 1  | ,000 | ,000   |

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: Niederschlag in mm, ADRI.

## 7.2.2 Ergebnisse Behamberg 1991-2018

Der Omnibus-Test der Region Behamberg ergab einen Wert von 0,002. Dieser lässt darauf schließen, dass es zu einer signifikanten Verbesserung des Modells kommt, wenn zusätzlich die unabhängigen Variablen miteinbezogen werden. Die beiden Pseudo-R<sup>2</sup>-Tests nach Cox und Snell bzw. nach Nagelkerkes ergeben einen Wert von 0,002 bzw. 0,348. Die Güte des Modells ist daher als eher gering einzustufen.

Aus der untenstehenden Klassifizierungstabelle (Tabelle 14) ist zu entnehmen, dass von den 4997 Niederschlagstagen ohne Rutschungen alle richtig vorhergesagt werden konnten. Die beiden Rutschungsereignisse konnten jedoch nicht prognostiziert werden. Aufgrund des geringen Anteils der Rutschungstage an der gesamten Grundmenge rundet SPSS den Prozentsatz der korrekt vorhergesagten Ereignisse auf 100 % auf.

Tabelle 14 - Klassifizierungstabelle - Behamberg 1991-2018

|            |                   |   | Vorhergesagt           |   | Prozentsatz der<br>Richtigen |
|------------|-------------------|---|------------------------|---|------------------------------|
| Beobachtet |                   |   | Rutschung Ja/Nein<br>0 | 1 |                              |
| Schritt 1  | Rutschung Ja/Nein | 0 | 4997                   | 0 | 100,0                        |
|            |                   | 1 | 2                      | 0 | ,0                           |
|            | Gesamtprozentsatz |   |                        |   | 100,0                        |

a. Der Trennwert lautet ,500

Für die Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen (siehe Tabelle 15) ergeben sich in diesem Fall die Werte 0,067 und 0,024. Diese liegen daher jeweils im positiven Bereich, was demnach dafür spricht, dass sowohl der tägliche Niederschlag als auch der ADRI eine begünstigende Wirkung auf das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen haben. Jedoch ist zu beachten, dass lediglich der tägliche Niederschlag einen statistisch signifikanten Einfluss ausübt.

Tabelle 15 - Variablen in der Gleichung - Behamberg 1991-2018

|                        |                    | Regressionsko<br>effizientB | Standardfehler | Wald   | df | Sig. | Exp(B) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|--------|----|------|--------|
| Schritt 1 <sup>a</sup> | Niederschlag in mm | ,067                        | ,021           | 10,408 | 1  | ,001 | 1,069  |
|                        | ADRI               | ,024                        | ,023           | 1,145  | 1  | ,285 | 1,024  |
|                        | Konstante          | -9,612                      | 1,291          | 55,405 | 1  | ,000 | ,000   |

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: Niederschlag in mm, ADRI.

Auf Basis der oben angegebenen Koeffizienten konnten für die Region Behamberg Niederschlagsschwellenwerte berechnet werden, welche nun in der folgenden Abbildung 18 visualisiert werden.

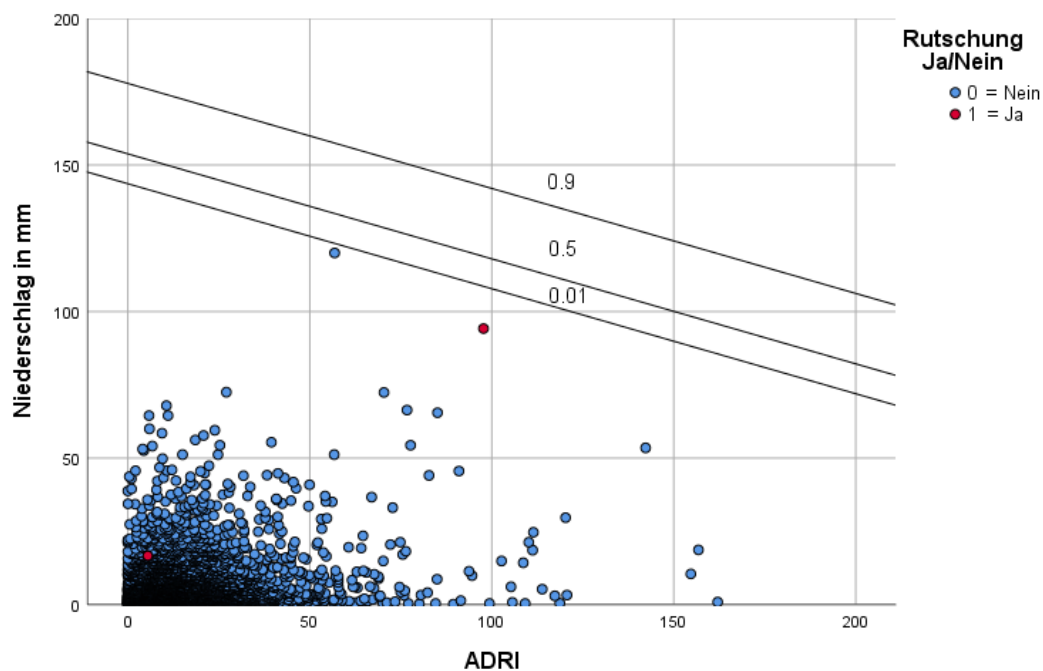


Abbildung 18 - Antecedent Daily Rainfall Modell 10 Tage (Behamberg 1991-2018).

Die obenstehende Abbildung zeigt, wie hoch der tägliche Niederschlag und der ADRI in Millimetern liegen müssen, damit es mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %, 50 % und 1 % zu einer Rutschung im untersuchten Gebiet kommt. Um beispielsweise eine Rutschung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % auszulösen, ist ein täglicher Niederschlag von 178 mm notwendig, sofern es keinen vorhergehenden Niederschlag gibt. Liegt der tägliche Niederschlag bei 0 mm, muss ein ADRI von 496 mm aufliegen, um eine Rutschung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % auszulösen.

### 7.2.3 Ergebnisse Wilhelmsburg 1991-2018

Da das Ergebnis des Omnibus-Tests für die Region Wilhelmsburg im Zeitraum 1991-2018 unter 0,001 liegt, lässt sich daraus schließen, dass es zu einer höchst signifikanten Verbesserung durch das Miteinbeziehen der unabhängigen Variablen kommt. Die Pseudo-R<sup>2</sup>-Tests weisen jedoch durch ihre niedrigen Werte auf ein eher schlechtes Gesamtmodell hin.

Das Modell konnte, wie in der Klassifizierungstabelle (Tabelle 16) zu sehen ist, von 4193 Tagen ohne Rutschungen 4192 richtig vorhersagen. Von den 18 Tagen, an denen es zu einer gravitativen Bewegung des Untergrundmaterials kam, konnten drei richtig zugeordnet werden. In Summe konnten also 99,6 % aller Tage mit oder ohne Rutschung richtig zugeordnet werden.

*Tabelle 16 - Klassifizierungstabelle – Wilhelmsburg 1991-2018*

| Beobachtet |                   |   | Vorhergesagt           |   | Prozentsatz der Richtigen |
|------------|-------------------|---|------------------------|---|---------------------------|
|            |                   |   | Rutschung Ja/Nein<br>0 | 1 |                           |
| Schritt 1  | Rutschung Ja/Nein | 0 | 4192                   | 1 | 100,0                     |
|            |                   | 1 | 15                     | 3 | 16,7                      |
|            | Gesamtprozentsatz |   |                        |   | 99,6                      |

a. Der Trennwert lautet ,500

Für die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 17) ergeben sich für den täglichen Niederschlag der Wert 0,085 und für den ADRI der Wert -0.008. Dabei ist jedoch nur der tägliche Niederschlag als signifikanter Einfluss zu sehen.

Da der Regressionkoeffizient des ADRI kleiner als Null ist, bedeutet dies, dass sich dieser negativ auf die Auftrittswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung auswirkt. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet die Niederschlagsschwellenwerte zu berechnen, da diese als nicht sinnvoll erachtet wurden.

*Tabelle 17 - Variablen in der Gleichung – Wilhelmsburg 1991-2018*

|                        |                    | Regressionsko<br>effizientB | Standardfehler | Wald    | df | Sig. | Exp(B) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|---------|----|------|--------|
| Schritt 1 <sup>a</sup> | Niederschlag in mm | ,085                        | ,010           | 69,517  | 1  | ,000 | 1,089  |
|                        | ADRI               | -,008                       | ,012           | ,477    | 1  | ,490 | ,992   |
|                        | Konstante          | -6,764                      | ,424           | 254,599 | 1  | ,000 | ,001   |

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: Niederschlag in mm, ADRI.



## 7.2.4 Ergebnisse Wilhelmsburg 13.2.2008-29.3.2017

Wie bereits weiter oben erwähnt, wurden 16 der 18 Rutschungsereignisse auf Basis der Ergebnisse der Messstationen, welche vom 13.02.2008 bis 29.03.2017 in gewissen Abständen kontrolliert wurden, jeweils jenem Datum zugeordnet, an welchem der höchste tägliche Niederschlag anzutreffen war. Aufgrund der höheren Ereignisdichte in diesem Zeitraum, wurde entschieden, die Berechnungen auch für diesen Zeitraum durchzuführen.

Mit einem Wert von 0,000 lässt der Omnibus-Test darauf schließen, dass es zu einer äußerst signifikanten Verbesserung des Modells durch das Einbeziehen der unabhängigen Variablen kommt. Jedoch weisen die Pseudo-R<sup>2</sup>-Tests durch ihre eher niedrigen Werte abermals auf ein eher schlechtes Modell hin.

Wie in Tabelle 18 zu sehen ist, wurden von den 1376 Tagen, an denen es zu keiner Rutschung kam, wurden 1374 richtig erkannt. Von den 16 Rutschungstagen konnten fünf Tage richtig zugeordnet werden. In Summe wurden vom Modell 99,1 % aller Tage richtig erkannt.

*Tabelle 18 - Klassifizierungstabelle - Wilhelmsburg 2008-2017*

| Beobachtet |                   |   | Vorhergesagt           |   | Prozentsatz der Richtigen |
|------------|-------------------|---|------------------------|---|---------------------------|
|            |                   |   | Rutschung Ja/Nein<br>0 | 1 |                           |
| Schritt 1  | Rutschung Ja/Nein | 0 | 1374                   | 2 | 99,9                      |
|            |                   | 1 | 11                     | 5 | 31,3                      |
|            | Gesamtprozentsatz |   |                        |   | 99,1                      |

a. Der Trennwert lautet ,500

Für die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 19) ergeben sich für den täglichen Niederschlag der Wert 0,136 und für den ADRI der Wert -0,059. Der Einfluss der beiden unabhängigen Variablen ist in diesem Fall aufgrund der Werte 0,000 und 0,004 als signifikant zu erachten. Der Regressionskoeffizient des ADRI weist jedoch abermals einen negativen Wert auf. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, die Niederschlagsschwellenwerte zu berechnen, da diese als nicht sinnvoll erachtet wurden.

*Tabelle 19 - Variablen in der Gleichung - Wilhelmsburg 2008-2017*

|                        |                    | Regressionsko<br>effizientB | Standardfehler | Wald    | df | Sig. | Exp(B) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|---------|----|------|--------|
| Schritt 1 <sup>a</sup> | Niederschlag in mm | ,136                        | ,020           | 47,935  | 1  | ,000 | 1,146  |
|                        | ADRI               | -,059                       | ,020           | 8,422   | 1  | ,004 | ,942   |
|                        | Konstante          | -6,080                      | ,578           | 110,541 | 1  | ,000 | ,002   |

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: Niederschlag in mm, ADRI.

## 8. Diskussion

Das Ziel des folgenden Kapitels ist es, die oben berechneten Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells zu diskutieren und die dadurch aufgestellten Hypothesen und Forschungsfragen zu beantworten.

Dazu soll zunächst die Hypothese H1: *„In den untersuchten Gebieten existiert ein Zusammenhang zwischen den bereits erforschten Niederschlagsschwellenwerten und der Anzahl an ausgelösten Rutschungen.“* diskutiert werden.

Wie die Berechnungen aus Kapitel 7 zeigen war es, mit Ausnahme von Behamberg, für keines der ausgewählten Untersuchungsgebiete möglich, sinnvolle Schwellenwertberechnungen durchzuführen. Bedingt wurde dies durch die negativen Regressionskoeffizienten des ADRI. Würden mittels dieser negativen Koeffizienten die Schwellenwertlinien berechnet werden, so würden sich keine fallenden Geraden, wie beispielsweise bei Glade et al. (2000), ergeben (siehe dazu Abbildung 17). Stattdessen würden diese eine positive Steigung aufweisen, was demnach bedeuten würde, dass bei einem höheren täglichen Niederschlag ein höherer ADRI notwendig ist, um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Rutschung zu erhöhen. Da diese Aussage für eine Modellbildung in der Praxis als nicht sinnvoll erachtet werden kann, wurde darauf verzichtet die Niederschlagsschwellenwerte dieser Regionen zu berechnen. Für die Region Behamberg konnte aufgrund der positiven Koeffizienten die Schwellenwertberechnung durchgeführt werden (siehe Abbildung 18). Bei näherer Betrachtung dieser Schwellenwerte zeigt sich jedoch, dass auch diese für die Praxis unbrauchbar sind. So ergeben sich für eine Auftrittswahrscheinlichkeit einer Rutschung von 90 % Schwellenwerte von 178 mm täglichen Niederschlags bei völliger Abwesenheit von vorhergehenden Niederschlägen. Liegt der tägliche Niederschlag bei 0 mm, so muss der vorhergehende Niederschlag 496 mm betragen, um eine Rutschung zu 90 % auszulösen.

Dies scheint in Anbetracht der vorliegenden Messdaten der Niederschläge als viel zu hoch angesetzt. Noch klarer zeigt sich dies beim Betrachten der theoretischen Schwellenwertlinie, welche die Auftrittswahrscheinlichkeit von nur 1 % markiert. Keiner der 4999 Tage, welche im Zeitraum 1991-2018 einen Niederschlag von größer-gleich 1 mm aufwiesen, konnte die 1 % Markierung übersteigen. Demnach dürfte es sich beim Untersuchungsgebiet in Behamberg um kein von Hangrutschungen gefährdetes Gebiet handeln, was wiederum in einem Widerspruch zur Aussage der GrundstückseigentümerInnen steht, welche wie in Kapitel 4.6 erwähnt, seit den 1960er Jahren regelmäßig Rutschungen wahrgenommen haben. Darüber hinaus sprechen die äußerst niedrigen Werte der durchgeführten Pseudo-R<sup>2</sup>-Tests für ein schlechtes Gesamtmodell.

Durch die oben dargelegten Gründe war es nicht möglich einen Zusammenhang zwischen den Niederschlagsschwellenwerten und dem Auftreten der gravitativen Massenbewegungen

ausfindig zu machen. Über die aufgestellte Hypothese H1 kann daher keine Aussage getroffen werden und die gestellten Forschungsfragen können nicht beantwortet werden. Dadurch, dass keine sinnvollen Niederschlagswerte berechnet werden konnten, ist in weiterer Folge auch keine Aussage über die beiden anderen Hypothesen – H2: *„Aufgrund der durchschnittlichen Zunahme der Regentage und deren Intensität werden die Niederschlagsschwellenwerte in einem kürzeren Zeitraum erreicht als bisher“*. – und – H3: *„Die Untersuchungsgebiete Behamberg, St. Pantaleon-Erla und Wilhelmsburg weisen aufgrund der räumlichen Distanz und den damit verbundenen unterschiedlichen Verhältnissen im Untergrund ein unterschiedliches Rutschungsverhalten in Hinblick auf die Auslösung durch Niederschlag auf.“* – möglich. Also können auch die dazugehörigen Forschungsfragen nicht beantwortet werden.

An dieser Stelle stellt sich nun die Frage, warum das Antecedent Daily Rainfall Modell in der Untersuchung nicht gegriffen hat. Hatte sich doch dieses Modell, welches 1980 von Crozier und Eyles eingeführt und in weiterer Folge von Glade et al. (2000) erprobt und modifiziert wurde auch in zahlreichen anderen Untersuchungen bewährt. Ausgehend von dieser Problemsituation soll nun in weiterer Folge erörtert werden, welche Gründe bei der scheiternden Schwellenwertberechnung mitgewirkt haben könnten.

Als erster Grund ist hierbei die überaus schlechte Datengrundlage zu nennen. Die Daten, welche für diese Untersuchung zur Verfügung standen, stammen aus dem Niederösterreichischen Baugrundkataster. In diesem waren zwar zahlreiche Berichte und Pläne aus vorhergehenden Vermessungen und Untersuchungen zu finden, jedoch waren in Summe nur sehr wenige konkrete Rutschungen dokumentiert. In manchen Fällen wurden konkrete Ereignistage genannt, meist standen jedoch nur Wochen- oder Monatsangaben zur Verfügung. Für das Untersuchungsgebiet Wilhelmsburg lagen für den Zeitraum 01.01.1991-31.12.2018 Kontrollmessungen vor, welche Aufschluss darüber gaben, ob sich das Gebiet zwischen den Messzeitpunkten bewegt hat. Für diesen Untersuchungszeitraum wurden die Rutschungen jenem Tag zwischen zwei Kontrollmessungen zugeordnet, welcher den höchsten täglichen Niederschlag aufwies. Ein Problem dabei war es jedoch, dass die Zeitabstände zwischen zwei Kontrollmessungen teilweise unterschiedlich groß waren. In Summe konnten den Berichten auf diese Weise 22 Rutschungsereignisse entnommen werden. Von diesen fanden zwei im Gebiet St. Pantaleon-Erla, zwei im Gebiet Behamberg und 18 im Gebiet Wilhelmsburg statt. In Anbetracht der Tatsache, dass die Rutschungen in diesen Gebieten bereits seit Jahrzehnten bekannt sind, ist die Ausbeute der Ereignisdaten als sehr gering einzustufen. Zudem ist die Qualität der verwendeten Datenbasis durch die getroffenen spekulativen Zuordnungen nicht garantiert. Der geringen Anzahl an Rutschungsdaten steht schlussendlich doch eine sehr große Anzahl an Regentagen (größer-gleich 1 mm) gegenüber. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in den Klassifizierungstabellen der Berechnungen, welche

einen Aufschluss darüber geben, wie gut Rutschungen vorhergesagt werden können, wider. Auf den ersten Blick mögen die fast ausschließlich richtig prognostizierten Ereignisse, Rutschung Ja oder Nein, einen guten Eindruck für das Modell erwecken, jedoch sollte diese Information mit Vorsicht genossen werden, da im Wesentlichen nur die Tage ohne Rutschung richtig vorhergesagt werden konnten. Die Tage mit Rutschung konnten hingegen, mit Ausnahme der Region Wilhelmsburg, nie prognostiziert werden.

Betrachtet man andere Arbeiten, welche erfolgreich auf das Antecedent Daily Rainfall Modell zurückgreifen konnten, so zeigt sich, dass diese auf einen weitaus größeren Datensatz von Rutschungen zurückgreifen als es bei dieser Arbeit der Fall ist. Wie beispielsweise aus den Grafiken von Glade et al. (2000: 1073f.) zu entnehmen ist, wurden für die Untersuchungen der neuseeländischen Regionen Wairarapa, Hawkeye Bay und Wellington meist mehr als 50 Rutschungsereignisse herangezogen. Ähnliches gilt für die Untersuchung der chinesischen Region Wudu. Auch hier wurden von Bai et al. (2014: 1284) mehr als 50 Rutschungen für die Berechnung der Niederschlagsschwellenwerte miteinbezogen. Auch im Zuge von Untersuchungen der niederösterreichischen Flyschzone wurden weitaus größere Datensätze herangezogen. So bezog Wallner (2012: 44) 471 Rutschungsereignisse in seine Berechnung mit ein. Marlovits (2018: 59) verwendete zusätzliche 143 Ereignisse, bei denen in 74 Fällen sogar ein geologisches Gutachten vorlag.

Die Gründe für die schlechte Dokumentation der Ereignisse können vielfältig sein. Einerseits handelt es sich bei den untersuchten Rutschungen um äußerst langsame, kriechende Bewegungen, welche sich im Durchschnitt nur wenige Zentimeter pro Jahr bewegen. Dadurch kann es passieren, dass eine Bewegung mit freiem Auge vom GrundstückseigentümerInnen gar nicht oder erst verspätet bemerkt wird. Andererseits kann es auch passieren, dass die Rutschungen zwar bemerkt, jedoch nicht gemeldet werden, da diese keine größeren Schäden verursacht haben und somit außerhalb des Interesses der EigentümerIn liegen. Sind zudem benachbarte Grundstücke oder öffentliche Straßen durch die Rutschungen gefährdet, so besteht möglicherweise aus Angst vor den hohen Sanierungskosten auch kein Interesse darin, die Rutschungen den Behörden zu melden.

Ein weiterer Grund, welcher sich auf die Qualität des Modells ausgewirkt haben könnte, ist die Größe der Untersuchungsgebiete. Während für diese Untersuchung einige wenige dedizierte, wiederkehrende Rutschungen ausgewählt wurden, die nur wenige Hektar Land umfassen, wurden in den meisten anderen Untersuchungen ganze Einzugsgebiete, wie die chinesische Region Wudu oder die Flyschzone Niederösterreichs, gewählt, die oft weit mehr als 100 m<sup>2</sup> umfassen. Dies hat wiederum zur Folge, dass eine hohe Anzahl an Rutschungsdaten weitaus leichter zusammengetragen werden kann. Während es für eine größere Region genügt, dass es an einem unbestimmten Ort innerhalb des Einzugsgebietes zu einer gravitativen

Massenbewegung kam, um dies als Ereignistag zu werten, so musste eine Rutschung in dieser Untersuchung an den explizit ausgewählten Hängen stattfinden, um als Rutschungsereignis zu gelten. Hinzukommt, dass sich eine Schwellenwertberechnung mittels des Antecedent Daily Rainfall Modell möglicherweise nicht gut für wiederkehrende Rutschungen eignet. Bereits Crozier (1986: 175) schreibt, dass Niederschlagsschwellenwerte als einzigartig betrachtet werden müssen. Dadurch, dass die Bedingungen, welche vor einem Ereignis im Untergrund herrschen, nie wiederhergestellt werden können, ist es häufig der Fall, dass sich die Schwellenwerte im Laufe der Zeit verändern.

Möglicherweise liegt ein Problem auch darin, dass sich das Antecedent Daily Rainfall Modell generell für langsame Rutschungen wenig eignet. In den Untersuchungen von Wallner (2012) und Marlovits (2018) wurde, wie bereits erwähnt, die Flyschzone im Raum Niederösterreich untersucht. Nach Schwenk et al. (1992: 619f.) wurden in Niederösterreich zwischen 1953 und 1990 1148 Massenbewegungen dokumentiert, welche in den meisten Fällen mit Schäden an privaten Grundstücken oder der öffentlichen Infrastruktur verbunden sind. Dadurch, dass ca. 60 % der in Niederösterreich dokumentierten Rutschungen auf die Flyschzone allein entfallen, ist es naheliegend, dass diese Daten auch bei den beiden Untersuchungen verwendet wurden. Auch Glade et al. (2000) greifen in Ihrer Studie auf einen Datensatz von Rutschungen zurück, welche meist mit enormen Schäden verbunden waren. Nach Zangerl et al. (2008: 17) verursachen vor allem schnelle Ereignisse enorme Schäden. Dadurch lässt sich also vermuten, dass in den beschriebenen Untersuchungen in Neuseeland und Niederösterreich überwiegend schnelle, schadenbringende gravitative Massenbewegungen in die Berechnungen eingebunden wurden.

## 9. Résumé

Das ursprüngliche Ziel dieser Arbeit war es zu überprüfen, inwiefern es einen Zusammenhang zwischen den bereits vielfach erforschten Niederschlagsschwellenwerten und dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen in drei dedizierten Gebieten gibt. Zu diesem Zweck wurden drei Rutschungen in den niederösterreichischen Gemeinden St. Pantaleon-Erla, Behamberg und Wilhelmsburg ausgesucht, deren immer wiederkehrende Bewegungen seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind. Als Untersuchungszeitraum wurde dabei 1991-2018 festgelegt. Auf Basis dieser Informationen wurden, die für die Forschung interessanten Hypothesen und Forschungsfragen formuliert.

Die Ausgangsbasis bildete dabei das Antecedent Daily Rainfall Modell, welches von Crozier und Eyles (1980), Crozier (1999) und Glade et al. (2000) entwickelt bzw. weiterentwickelt wurde. Die Arbeit orientiert sich dabei vor allem an den Erkenntnissen von Glade et al. (2000). Als Datengrundlage dienten für diese Untersuchung einerseits Niederschlagsdaten und Durchflussdaten, welche vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich bzw. Oberösterreich zur Verfügung gestellt wurden und andererseits die Rutschungsberichte aus dem Niederösterreichischen Baugrundkataster. Aus den Niederschlagsdaten wurden zu diesem Zweck der Antecedent Daily Rainfall Index (ADRI) für 10 Tage berechnet. Für dessen Berechnung wurde dafür aus stündlichen Durchflussdaten nahegelegener Fließgewässer eine Abflusskonstante (Decay-Faktor) bestimmt. Schließlich wurde eine binäre logistische Regression mittels SPSS 26 durchgeführt, um die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Rutschung in Abhängigkeit vom maximalen täglichen Niederschlag und vom ADRI zu bestimmen.

Im Zuge der binären logistischen Regression hat sich herausgestellt, dass eine Anwendung des Antecedent Daily Rainfall Modells für die drei ausgewählten Untersuchungsgebiete nicht praktikabel ist. So konnten für die Regionen St. Pantaleon-Erla und Wilhelmsburg keine sinnvollen Niederschlagswerte berechnet werden. Im Falle der Region Wilhelmsburg wurde aufgrund der im Zeitraum 13.02.2008 bis 29.03.2017 ausgewerteten Messstationen und der damit erhöhten Datendichte versucht, eine weitere Schwellenwertberechnung durchzuführen. Jedoch konnte auch in diesem Fall kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Für die Region Behamberg konnten mittels der binären logistischen Regression die Niederschlagschwellenwerte berechnet werden (siehe dazu Abbildung 12). Allerdings sind diese als viel zu hoch einzustufen. Hinzu kommt, dass die Modellgüte, welche durch die Pseudo-R<sup>2</sup>-Tests nach Cox und Snell bzw. Nagelkerkes berechnet wurden, für alle drei Regionen in einem äußerst niedrigen Bereich liegt.

Aus diesem Grund war es nicht möglich, Aussagen über die aufgestellten Hypothesen zu treffen. Stattdessen wurden im Diskussionsteil mögliche Gründe für das Scheitern des

Antecedent Daily Rainfall Modells erörtert. Diese Möglichkeiten können im Wesentlichen mit den folgenden drei Aussagen zusammengefasst werden. Ein erster Erklärungsansatz für das Scheitern des Modells ist mit dem überaus schlechten Datensatz begründet. Die Rutschungen sind, wie den Berichten zu entnehmen ist, schon seit längerem bekannt, jedoch wurden dennoch sehr wenige konkrete Rutschungstage dokumentiert.

Eine zweite Möglichkeit könnte auch darin bestehen, dass sich das Antecedent Daily Rainfall Modell für die Vorhersage einer Rutschung am selben Hang nicht eignet. Drittens könnte das schlechte Greifen des Modells auch auf die sehr langsamen Rutschungen zurückzuführen sein.

## 10. Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Masterarbeit sollen Perspektiven und Möglichkeiten diskutiert werden, die zum Weiterforschen anregen sollen.

Als erster wichtiger Punkt ist es unabdingbar, dass einerseits die Qualität und andererseits die Quantität der Rutschungsdaten erhöht wird. Denn obwohl die Rutschungen seit Jahrzehnten bekannt sind und in den Berichten davon gesprochen wird, dass diese immer wieder aufkommen, wurden nur zwei Rutschungstage genau dokumentiert. Für vier weitere Rutschungen wurden nur wache Monatsangaben gegeben. Im Untersuchungsgebiet Wilhelmsburg wurden zwar Messstationen installiert, die auch aufzeigen konnten, dass sich der Hang in Bewegung befindet, jedoch konnte auch aus diesen Ergebnissen nur sehr spekulativ der Zeitpunkt der Rutschung festgemacht werden. Hier wären vor allem einheitliche Dokumentationsformen, beispielsweise in Form eines standardisierten Formulars, wünschenswert. Somit könnte gerade für die Zukunft eine qualitativ hochwertige Datenbank für Österreich erstellt werden. Zusätzlich wäre es von Vorteil, wenn Messstationen in kleineren Zeitabständen kontrolliert werden, im Idealfall zumindest wöchentlich. Noch besser wäre es natürlich, wenn an jenen Hängen, an denen seit Jahrzehnten Rutschungen beobachtet werden, Monitoringsysteme installiert werden, welche eine Bewegung des Untergrundes automatisch dokumentieren.

Ein solches überaus modernes und innovatives System wurde beispielsweise von Tao et al. (2019) vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein automatisches Monitoringsystem, welches auf der Annahme aufbaut, dass es zu einer Rutschung kommt, wenn die Gleitkraft größer als die Scherkraft ist. Das System misst daher die Axialkräfte und überträgt die Ergebnisse direkt an eine App eines Mobilgerätes. Die Informationen über einen gefährdeten Hang stehen daher jederzeit zur Verfügung. Ein Nachteil dieses Systems liegt allerdings bei den hohen Kosten und bei einer relativ langen Installationszeit von 15 Tagen (vgl. Tao. et al. 2019: 1209ff.).

Zusätzlich könnten auch Niederschlagsmessstationen vor Ort angebracht werden, um die Qualität dieser Daten nochmals zu erhöhen. Zwar ist das österreichische Netz an Messstationen recht gut ausgebaut, jedoch sind auch zwischen diesen Stationen mehrere Kilometer Abstand. Nach Pistotnik et al. (2020: 143) können intensive Niederschläge sowohl großflächig als auch kleinräumig auftreten. Dadurch kann es passieren, dass gewisse Starkregenereignisse, die auf einen Hang einwirken, gar nicht erst erfasst werden. Messstationen vor Ort würden hier Abhilfe schaffen.

Weiters wäre es interessant, abschmelzendes Wasser, durch Schnee oder Eis, in das Antecedent Daily Rainfall Modell miteinzubeziehen. In der derzeitigen Form wird dieser Faktor nicht berücksichtigt, da das gesamte Modell auf maximalen täglichen Niederschlagsdaten beruht, die jedoch keinen Aufschluss darüber geben in welchem Aggregatzustand das



Wasser zu Boden gelangt. Dadurch kann es passieren, dass das Wasser vorerst gar nicht in den Untergrund eindringt. Erst im Frühjahr schmilzt es ab und wirkt sich somit verspätet auf die Stabilität des Untergrundes aus.

Ein solches Abschmelzen führt zu einem gesteigerten Porenwasserdruck im Untergrund, was aber meist keine Rutschung initiiert. Beim nächsten Niederschlag kann es jedoch passieren, dass die Rutschung dann ausgelöst wird, obwohl der Hang der Niederschlagssumme unter den zuvor herrschenden Bedingungen möglicherweise leicht standgehalten hätte. (vgl. Glade und Stötter 2008: 152)

Im Ernstfall könnte also eine Schneeschmelze eine durch Niederschlag verursachte Rutschung indirekt auslösen, obwohl die Niederschlagsmessstationen am Ereignistag nur einen geringen Wert verzeichnen. Für weiterführende Forschungen wäre es daher interessant, das Antecedent Daily Rainfall Modell durch eine dritte Komponente, den Abfluss, zu erweitern. Somit würde das Schmelzwasser miteinbezogen werden. Zu diesem Zweck könnten die Durchflussdaten, welche ohnehin zu Berechnung des Decay-Faktors benötigt werden, herangezogen werden. Ein Nachteil dabei wäre allerdings, dass aufgrund der dritten unabhängigen Variable, eine anschauliche grafische Darstellung verloren gehen würde.

Eine weitere interessante Fragestellung ergibt sich in Hinblick auf die Größe des Untersuchungsgebietes. Während in den meisten Untersuchungen, wie bei Glade et al. (2000) oder Bai et al. (2014) Rutschungen aus Einzugsgebieten, die weit mehr als 100 km<sup>2</sup> umfassen, herangezogen wurden, sind in dieser Untersuchung drei ausgewählte Rutschungen im Fokus gestanden, deren Hänge nur einige Hektar Land ausmachen. Dabei wäre es interessant zu untersuchen, wie wichtig die Größe des Einzugsgebietes ist bzw. ob sich das Antecedent Daily Rainfall Modell zur Prognose für wiederkehrende Rutschungen eignet. Dazu wäre in erster Linie, wie bereits erwähnt, eine bessere Datengrundlage über die einzelnen Rutschungen von Nöten. Im Hinblick auf die Größe des Gebietes könnte mit einem bereits bewährten Gebiet, wie Wairarapa gestartet werden. Dabei könnte dann die Güte des Modells, bei einer sukzessiven „künstlichen“ Verkleinerung des Gebietes untersucht werden. Dies würde einen Aufschluss darüber geben, ob sich das Antecedent Daily Rainfall Modell auch für dedizierte, wiederkehrende Rutschungen eignet, oder ob dieses eher für die Vorhersage von gravitativen Massenbewegungen in größeren Einzugsgebieten verwendet werden sollte.

## 11. Literatur

Ahnert, F. (2015): Einführung in die Geomorphologie. – Stuttgart.

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (Hrsg.) (2008a): Waldentwicklungsplan. Teilplan über den Bereich des politischen Bezirkes Amstetten und der Statutarstadt Waidhofen/Ybbs. – St. Pölten.

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (Hrsg.) (2008b): Waldentwicklungsplan. Teilplan über den Bereich des politischen Bezirkes und der Statutarstadt St. Pölten. – St. Pölten.

Bai, S., Wang, J., Thiebes, B., Cheng, C. und Yang, Y. (2014): Analysis of the relationship of landslide occurrence with rainfall: a case study of Wudu County, China. – In: Arabian Journal of Geosciences 7, 1277-1285

Behamberg.gv.at (o.J.): Gemeinde Behamberg. Online unter: <https://behamberg.gv.at/gemeinde> (24.7.2020)

Bundesforschungs-und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) (Hrsg.) (o.J.): Digitale Bodenkarte von Österreich, 1km Raster. Online unter: <https://bodenkarte.at/#/center/13.033,47.531/zoom/6.4> (23.9.2020)

Bühl, A. (2012): SPSS 20. Einführung in die moderne Datenanalyse. – München.

Crozier, M. (1986): Landslides: Causes, consequences and environment. – London.

Crozier, J., Preston, N. und Glade, T. (2013): Landslide Impacts. – In: Bobrowsky, T. (Hrsg.): Encyclopedia of Natural Hazards. – Dordrecht, 606-610.

Dikau, R., Eibisch, J., Eichel, J., Meßenzehl, K. und Schlummer-Held, M. (2019): Geomorphologie. – Berlin.

Dikau, R. und Glade, T. (2001): Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. - In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145, 42-53.

Dikau, R., Stötter, J., Wellmer, F. und Dehn, M. (2001): Massenbewegungen. – In: Plate, E. und Merz, B. (Hrsg.): Naturkatastrophen. Ursachen-Auswirkungen-Vorsorge. - Stuttgart, 115-138.

Don, A. und Prietz, R. (2019): Unsere Böden entdecken – Die verborgene Vielfalt unter Feldern und Wiesen. – Berlin.

Fink M., Moog O. und Wimmer, R. (2000): Fließgewässer – Naturräume Österreichs. – Wien.

Geologischer Dienst Niederösterreich (Hrsg.) (1998-2019): Auszug aus dem niederösterreichischen Baugrundkataster. – St. Pölten.

Glade, T. und Stötter, J. (2008): Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. – In: Felgentreff, C. und Glade, T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. – Berlin, 151-163.

- Glade, T., Crozier, M. und Smith, P. (2000): Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds using an Empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". – In: Pure and applied geophysics 157(6-8), 1059-1079.
- Glade, T. und Crozier, M. (2006): The Nature of Landslide Impact. – In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. (Hrsg.): Landslide Hazard and Risk. – Chichester, 43-74.
- Glade, T. und Zangerl, C. (2020): Gravitative Massenbewegungen – Terminologie und Charakteristika. – In: Glade, T., Mergili, M. und Sattler, K. (Hrsg.): Extrema 2019 – Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 365-382.
- Gottschling, G. (2006): Molassezone. – In: Wessely, G. (Hrsg.): Geologie der österreichischen Bundesländer. Niederösterreich. – Wien, 335-340.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. und Stark, C. (2007): Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. – In: Meteorology and Atmospheric Physics 98(3-4), 239-267.
- Hancox, G. (2008): The 1979 Abbotsford Landslide, Dunedin, New Zealand: a retrospective look at its nature and causes. In: Landslides 5, 177-188.
- Harlfinger, O. (1999): Die klimatischen Eigenschaften Niederösterreichs mit besonderer Berücksichtigung des Pannonikums. – In: Geologische Bundesanstalt (Hrsg.): Arbeitstagung der geologischen Bundesanstalt. – Retz, 106-110.
- Highland, L., und Bobrowsky, P. (2008): The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides. – Virginia.
- Höfler, A., Andre, K., Orlik, A., Stangl, M., Spitzer, H., Ressler, H., Hiebl, J. und Hofstätter, M. (2020): Klimarückblick Niederösterreich 2019. – Wien.
- Hydrographischer Dienst Niederösterreich (Hrsg.) (1981-2018a): Niederschlagsdaten der Stationen Behamberg, St. Pantaleon und Pyhra. – St. Pölten.
- Hydrographischer Dienst Niederösterreich (Hrsg.) (1981-2018b): Durchflussdaten der Station Windpassing. – St. Pölten.
- Hydrographischer Dienst Oberösterreich (Hrsg.) (1981-2018): Durchflussdaten der Stationen Haid, Schwertberg und Steyr. – Linz.
- Land Niederösterreich (o.J.): NÖ-Atlas. Online unter: [https://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/\(S\(0le43q5q4qdfqgcog4ed1mec\)\)/init.aspx?karte=atlas\\_gst](https://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/(S(0le43q5q4qdfqgcog4ed1mec))/init.aspx?karte=atlas_gst) (12.9.2020)
- Leitgeb, E., Reiter, R., Englisch, M., Lüscher, P., Schad, P. und Feger, K. (Hrsg.) (2013): Waldböden. Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. – Weinheim.
- Machalek, A. (Hrsg.) (1986): Klima und Bioklima von Niederösterreich. Heft 16. Berichte und Dokumente der Akademie für Umwelt und Energie. – Laxenburg.

Marlovits, N. (2018): Verändern Klimaänderungen das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen? Eine Studie zu Niederschlagsschwellenwerten für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen in der Flyschzone Niederösterreichs im Zeitraum 1971-2016. – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

Maurer, H. (1967): Zur Geologie der Flysch- und Helvetischen Zone zwischen dem Steyr- und Kremstal. – Dissertation, Universität Wien, Wien.

Mccoll, S. (2015): Chapter 2 - Landslide Causes and Triggers. – In: Davies, T. (Hrsg.): Landslide Hazards, Risks, and Disasters. – Elsevier, 17-42.

National Research Council. Committee on the Review of National Landslide Hazards Mitigation Strategy (2004): Partnerships for Reducing Landslide Risk: Assessment of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy. – Washington D.C.

Neuer Kozenn Atlas (2009): Bundesländer und politische Bezirke. – Wien, 12.

Pistotnik, G., Hofstätter, M. und Lexer, A. (2020): Starkniederschlag und Hagel. – In: Glade, T., Mergili, M. und Sattler, K. (Hrsg.): ExtremA 2019 – Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 141-172.

Prey, S. (1980): Helvetikum, Flysche und Klippenzonen von Salzburg bis Wien. – In: Geologische Bundesanstalt (Hrsg.): Der geologische Aufbau Österreichs. – Wien, 189-216.

Schwenk, H., Spendlingwimmer, R., und Salzer, F. (1992): Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990. – In: Geologische Bundesanstalt (Hrsg.): Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt 135 (2), 597-660.

Schuster, R. Daurer, A., Krenmayr, H., Linner, M, Mandl, G., Pestal, G., Reitner, J. (2015): Rocky Austria. Geologie von Österreich – kurz und bunt. – Wien.

Sharma, V. (2010): Introduction to Process Geomorphology. – Boca Raton.

Sidle, R. und Ochiai, H. (2006): Landslides. Processes, Prediction, and Land Use. – Washington D.C.

St-Pantaleon-Erla.gv.at (o.J.): Die jüngere Geschichte von St. Pantaleon-Erla. Online unter: <https://st-pantaleon-erla.gv.at/ueber-die-gemeinde> (24.7. 2020)

Tao, Z., Zhang, H., Zhu, C., Hao, Z. Zhang, X. und Hu, X. (2019): Design and operation of App-based intelligent landslide monitoring system: the case of Three Gorges Reservoir Region. – In: Geomatics, Natural Hazards and Risk 10(1), 1209-1226

Tappin, D., Grilli, S., Harris, J., Geller, R. Masterlark, T., Kirby, J., Shi, F., Ma, G., Thingbaijam, K., Mai. P. (2014): Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?. – In: Marine Geology 357, 344-361

Thenius, B. (1974): Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen. Niederösterreich. – Wien.

Tollmann, A. (1985): Geologie von Österreich. Band 2. Außerzentralalpiner Anteil. – Wien

Turner, A. (2018): Social and environmental impacts of landslides. – In: Innovative Infrastructure Solutions 3(1), 1-25.

Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes. – In: Landslides, analysis and control 176, 11-33.

Wallner, S. (2012): Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen – Eine Analyse in der rhenodanubischen Flyschzone Niederösterreichs. – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

Wieczorek, G. und Glade, T. (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob, M. und Hungr, O. (Hrsg.): Debris-flow Hazards and Related Phenomena. – Chichester, 325-362.

Wilhelmsburg.at (o.J.): Zahlen und Fakten. Online unter:  
<https://www.wilhelmsburg.at/system/web/fakten.aspx?menuonr=218703075> (24.7.2020)

Wessely, G. (2006a): Flyschzone und Klippenzone. – In: Wessely, G. (Hrsg.): Geologie der österreichischen Bundesländer. Niederösterreich. – Wien, 85-103.

Wessely, G. (2006b): Molassezone. – In: Wessely, G. (Hrsg.): Geologie der österreichischen Bundesländer. Niederösterreich. – Wien, 41-67.

Windzio, M. (2013): Regressionsmodelle Für Zustände und Ereignisse. – Wiesbaden.

Zangerl, C., Prager, C., Brandner, R., Brückl, E., Eder, S., Fellin, W. Ewald, T., Poscher, G. und Schönlaub, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. In: Geo.Alp 5, 1-51.

Zepp, H. (2017): Geomorphologie. – Paderborn.