

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ingenieurgeologie

Numerische Modellierung der geologischen und mechanischen Prozesse der Hangbewegung am Sudelfeld

Gholamreza Tadayonfar

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Rutschmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kurosch Thuro
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Rohn,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 23.02.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 23.03.2011 angenommen.

Kurzfassung

Hangbewegungen gehören zu den zehn bekanntesten Naturkatastrophen weltweit. Sie sind verantwortlich für große materielle und immaterielle Schäden. Trotz aller bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen und vieler Forschungsarbeiten zum Thema Hangbewegungen steigt die Zahl der Schäden ständig weiter an. Es bestehen noch viele Ursachen und Mechanismen von instabilen Hängen, die erforscht werden müssen.

Ein aufgrund seiner Geologie regelmäßig von Hangbewegungen betroffenes Gebiet am nördlichen Rand der Alpen ist das Sudelfeld, in dem die in dieser Arbeit untersuchte Aggenalm-Hangbewegung liegt. Diese wurde soweit bekannt, erstmals 1935 durch schwere Niederschläge ausgelöst, wobei drei Brücken und eine Straße zerstört wurden. 1997 musste nach einer erneuten Hangbewegung eine die Hangbewegung querende Straße gesperrt werden. Seit 2001 wird das Gebiet regelmäßig bis zu zweimal im Jahr durch den Geologischen Dienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt vermessen und überwacht. Die dadurch ermittelten durchschnittlichen Bewegungsraten liegen bei ungefähr zwei Zentimeter pro Jahr.

2008 wurde von der TU München und der Universität der Bundeswehr München ein Monitoringsystem an der Aggenalm Hangbewegung installiert, das mit verschiedenen innovativen Verfahren Deformationen an der Oberfläche und im Untergrund überwacht. Auf Grundlage der so erfassten Messdaten kann vergleichbar viel über die Eigenschaften der auftretenden Bewegungen (Ausdehnung, Richtung, Geschwindigkeit etc.) ausgesagt werden.

Die Auswertung der Daten alleine erlaubt jedoch häufig keine umfassenden Rückschlüsse auf die der Hangbewegung zugrundeliegenden Mechanismen. Hier kommen deshalb häufig numerische Modelle zum Einsatz. Mit Hilfe von mathematischen Verfahren sollen die auftretenden Bewegungen auf ihre zugrundeliegenden physikalischen Prozesse (Ursachen) und auf die äußeren Einflüsse (Trigger) zurückgeführt werden.

In der hier vorliegenden Arbeit wird hierfür eine numerische Modellierung auf Grundlage der finiten Differenzen mit der Software FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) eingesetzt. Diese erlaubt die auftretenden Verformungen an der Oberfläche und im Untergrund entlang von Profilschnitten auf Grundlage von verschiedenen Materialgesetzen zu modellieren und deren Größenordnung und Richtung bestimmen. Die Ergebnisse richten sich nach einer „virtuellen“ Zeit, was zur Folge hat, dass man andere Verfahren benötigt, um die realen Zeiträume zu bestimmen.

Da das Projektgebiet bereits unter ingenieurgeologischen Gesichtspunkten bearbeitet wurde und nach wie vor messtechnisch überwacht wird, stehen viele Informationen über den Betrag und zeitlichen Verlauf der Bewegungen am Sudelfeld zu Verfügung, die zur Kalibrierung der numerischen Modelle verwendet werden können.

In dieser Arbeit wurden die folgenden Aspekte mit Hilfe des FLAC Codes untersucht:

1. Kalibrierung / Rückanalyse:

- Rück-Analyse der bereits stattgefundenen Hangbewegungen zur Ermittlung der geotechnischen Parameter der in dem Hang auftretenden Gesteine (Kalibrierung des Modells).
- Vergleich der Ergebnisse der Rück-Analyse mit den Ergebnissen der geotechnischen Untersuchungen und weiterer Daten aus der Literatur zur weiteren Konsolidierung der geotechnischen Parameter.

2. Modellierung der heutigen Situation:

- Anwendung der in der Rückanalyse ermittelten geotechnischen Parameter auf die Modellierung der momentanen Hangsituation. Dabei Untersuchung folgender Fragestellungen:
 - Ermittlung des Bewegungstiefganges und Bestimmung des bewegten Volumens.
 - Ermittlung der Bewegungsrichtung.
 - Definition der Bewegungsformen für die Bestimmung des Bewegungstyps.
 - Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit und Aktivität der Hangbewegung.
 - Vergleichen der Modellierungsergebnisse mit den Ergebnissen des Monitorings.
 - Bestimmung möglicher Versagens-Szenarien

Anhand der Ergebnisse der Modellierung soll schließlich der genaue Mechanismus, d.h. die Ursache der Hangbewegung, die Lage und Verbreitung der Gleitfläche, die zukünftigen Verformungen des Hangs und ihre Richtungen, die dabei auftretenden Spannungen im Gebirge sowie Standsicherheit des Hangs geklärt werden.

Um das Risiko eines katastrophalen Ereignisses zu bewerten, sind über diese Modellierung hinaus eine Fortsetzung der Beobachtungen der Bodenverformungen und -verschiebungen sowie der auslösenden Einflüsse (z.B. Niederschlag und Steigung des Grundwassers) von großer Bedeutung.

Abstract

Landslides are among the ten most common natural disasters worldwide, and they are responsible for great material and immaterial damages. However, although many scientific investigations and many researches concerning landslides were conducted in the past, the cost of the damages caused by landslides still is rising constantly. There are many causes and mechanisms of the movement of slopes that still need to be investigated.

An area frequently affected by mass movements at the northern edge of the Alps is the Sudelfeld area, wherein the landslide analyzed in this thesis – the Aggenalm Landslide - is situated. The first historical record of movements at the Aggenalm Landslide dates back to 1935, when the slope started to move after heavy rainfall. During this event three bridges and a road were destroyed. In 1997 after a new slide the road again was blocked. Therefore, since 2001, the slope movement was measured regularly up to twice a year by the Geologic Service of the Bavarian Environment Agency. The average movement rate of the Aggenalm Landslide is about two centimeters per year.

2008 an innovative monitoring system was installed at the Aggenalm Landslide, which continuously observes the surface and subsurface deformations with three different new monitoring techniques. The analysis of the data gained with this system can reveal many details of the movement (expansion, direction, speed etc.) in high temporal and spatial resolution.

The data analysis alone however mostly does not allow gaining comprehensive information about the underlying mechanisms of the landslide. Therefore numeric models are commonly used for this task. Mathematical procedures are used to determine the characteristics of the recurrent movements, the physical processes (causes) and the external influences (trigger).

In this thesis the numeric model FLAC (Fast Lagrangian Analysis Of Continua) is used. This model simulates surface and underground deformations along cross sections through the instable slope based on constitutive laws, thereby making the determination of the magnitude and orientation of the deformation possible. The results relate to a virtual model time, thus it needs to be compared with other processes, which allow the estimation of true time spans.

As the Aggenalm Landslide area was analyzed by engineering geological methods and is still continuously observed by the monitoring system, a lot of information about the amount and the temporal characteristics of the movement at the Aggenalm Landslide is available.

In this project, the software FLAC was used for the following tasks:

1. Back analysis / Calibration of the model:

- Back analysis of the historic landslide movements for the determination of plausible geotechnical parameter of the rocks (Calibration).
- Comparison of the results of the back analysis with data from geotechnical tests and literature for a further consolidation of the model parameters.

2. Model of the current landslide situation:

- Simulation of the current landslide situation based on the geotechnical parameters determined during calibration. Thereby the following is analysed:
 - Calculation of the depth of landslide and determination of the displaced volume.
 - Determination of the direction of motion.
 - Definition of the movement type and classification.
 - Calculation of the movement speed for a certain movement activity.
 - Comparisons of the modeling results with the results of the monitoring system.
 - Determination of possible slope failure scenarios

The results show the mechanism of movement, for instance, the cause of the movement, slide or break surface of landslide, amount of deformation and its directions, stresses, factor of safety, etc. In order, around to value the probability of a catastrophic event, uninterrupted observations of the continuous surface and the ground deformation as well as the releasing influences are essential (e. g. precipitation and rise of ground water).

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1. Veranlassung.....	1
1.2. Problemstellung.....	1
1.3. Zielsetzung.....	1
1.4. Aufgaben.....	2
2 Die Aggenalm Hangbewegung	3
2.1. Geographischer Überblick.....	3
2.2. Historische Ereignisse.....	4
2.3. Geologischer Überblick.....	8
2.4. Gesteinsbeschreibung.....	9
2.4.1. Plattenkalk.....	9
2.4.2. Kössener Schichten.....	9
2.4.3. Oberrhätkalk.....	10
2.4.4. Oberrhätdolomit.....	11
2.4.5. Quartäre Ablagerungen.....	12
2.4.5.1. Pleistozäne Ablagerungen.....	12
2.4.5.2. Hangschutt.....	14
2.4.5.3. Blockschutt.....	15
2.5. Geotechnischer Überblick.....	16
2.5.1. Dimensionen der Hangbewegung.....	16
2.5.2. Hangbewegungsprozesse.....	16
2.5.3. Mechanische Eigenschaften der Gesteine.....	17
2.6. Hydrogeologie.....	21
2.6.1. Oberflächlicher Abfluss.....	22
2.6.1.1. Quellen.....	22
2.6.1.2. Bäche.....	22
2.6.1.3. Schluckloch.....	22
2.6.1.4. Vernässungszonen.....	22
2.6.2. Grundwasserverhältnisse.....	22
2.7. Ursachen und Trigger.....	23
2.7.1. Geologische Ursachen.....	24
2.7.1.1. Veränderliche Festigkeit der Mergelgesteine.....	24
2.7.1.2. Verschiedene Wasserdurchlässigkeit der Gesteine.....	24
2.7.1.3. Verwitterung des Materials.....	25
2.7.1.4. Morphologische Ursachen.....	25

2.7.2. Physikalische Ursachen	26
2.7.2.1. Starke Niederschläge.....	26
2.7.2.2. Porenwasserdruck	27
2.7.2.3. Einfluss der Vegetation	28
2.7.2.4. Zerstörung der Vegetation.....	28
2.7.2.5. Taufluten	28
2.7.2.6. Erdbeben	29
3 Monitoring der Aggenalm Hangbewegung	31
3.1. Messverfahren	31
3.1.1. Geodätische Messverfahren.....	31
3.1.2. Geotechnische Messverfahren.....	31
3.1.2.1. Extensometer.....	32
3.1.2.2. Crackmeter	33
3.1.2.3. Inklinometer	34
3.1.2.4. Time Domain Reflectometry	35
3.1.2.5. Piezometer	37
3.1.2.6. Quellschüttungsmessungen	37
3.1.3. Geophysikalische Verfahren.....	39
4 Grundlagen der numerischen Modellierung.....	40
4.1. Das Modell	40
4.2. Die Modellierung von Hangbewegungen	41
4.3. Ziele und Anforderungen einer Hangbewegungs-Modellierung	42
4.4. Methode der Finiten Differenzen und Finiten Elemente.....	42
4.5. Explizite und implizite Methoden	43
4.6. Der Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) Code	45
4.6.1. FLAC im Vergleich mit anderen Modellierungsmethoden	47
4.6.2. Das elastische und plastische Materialverhalten in FLAC.....	49
4.6.2.1. Elastische Modellgruppe	49
4.6.2.2. Plastische Modellgruppe.....	49
4.7. Modellierungsstrategien	53
4.7.1. Grundsätzliche Vorgehensweise.....	55
4.7.2. Rückanalyse	56
4.7.3. Sensitivitätsanalyse.....	56
4.7.4. Standsicherheitsanalyse.....	57

5 Numerische Modellierung der Aggenalm Hangbewegung mit FLAC.....	59
5.1. Modellierung zurückliegender Ereignisse an der Aggenalm Hangbewegung..	59
5.1.1. Geologisches Modell.....	59
5.1.2. FLAC Modell.....	61
5.1.2.1. Definition der Geometrie.....	61
5.1.2.2. Generierung des Gitters	61
5.1.2.3. Definition der Rahmenbedingungen	61
5.1.2.4. Materialparameter	62
5.1.2.5. Grundwasserspiegel	65
5.1.2.6. Seismizität.....	66
5.1.3. Verlauf der Modellierung.....	66
5.1.4. Ergebnisse	68
5.1.4.1. Deformationen	68
5.1.4.2. Sicherheitsfaktor	70
5.1.4.3. Der Sicherheitsfaktor im Vergleich mit anderen Modellen.....	72
5.1.4.4. Geotechnische Parameter	74
5.1.5. Diskussion	74
5.2. Modellierung zukünftiger Ereignisse an der Aggenalm Hangbewegung.....	75
5.2.1. Geologisches Modell.....	75
5.2.2. FLAC Modell.....	76
5.2.2.1. Definition der Geometrie.....	76
5.2.2.2. Generierung des Gitters	76
5.2.2.3. Definition der Rahmenbedingungen	76
5.2.2.4. Materialparameter	77
5.2.2.5. Grundwasserspiegel	77
5.2.2.6. Seismizität.....	77
5.2.3. Verlauf der Modellierung.....	77
5.2.4. Ergebnisse	78
5.2.4.1. Deformationen	78
5.2.4.2. Sensitivitätsanalysen.....	80
5.2.4.3. Bereiche plastischer Deformation	81
5.2.5. Diskussion der Ergebnisse	82
5.2.5.1. Vergleich des Modells mit den Messergebnissen des Monitorings....	82
5.2.5.2. Klassifizierung der Aggenalm Hangbewegung	85
5.2.5.3. Aktivität der Aggenalm Hangbewegung	87
5.2.5.4. Versagens-Szenario.....	88
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	89
Literaturverzeichnis	89
Anhang	95

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersichtskarte des Gebiets südlich von Rosenheim. Das Projektgebiet liegt östlich des Inntals zwischen Brannenburg und Oberaudorf.....	3
Abb. 2: Schräglichtschummerung der Hangbewegung Aggenalm basierend auf einem digitalen Geländemodell (1 m – Laserscan) (...)	4
Abb. 3: Blick vom Nordhang des Großen Traithen Richtung Norden auf das Sudelfeld Gebiet mit der Aggenalm Hangbewegung (rote Markierung) (...)	5
Abb. 4: Orthofoto der Aggenalm Hangbewegung (rote Umrahmung) mit Höhenlinien. (Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2010)	6
Abb. 5: Blick auf die Aggenalm Hangbewegung im Abendlicht, wodurch die typisch buckelige Morphologie der alten Rutschmasse sichtbar wird (...)	6
Abb. 6: Frische Risse in den Wänden von Almgebäuden auf dem Rutschkörper (JUNG 2007: Abb. 21, Abb. 23)	7
Abb. 7: Schäden an den Stützmauern entlang der Straße Rosengasse – Grafenherberg im Bereich der Aggenalm (JUNG 2007: Abb. 29 und Abb. 30)	7
Abb. 8: Tektonische Karte der nördlichen Kalkalpen zwischen Starberger See und Chiemsee (...)	8
Abb. 9: Tektonische Detailkarte der Sudelfeld-Region. (...)	9
Abb. 10: Dunkle Kalke mit calcitverheilten Klüften. Wahrscheinlich handelt es sich um Kössener Kalke (JUNG 2007: Abb. 3)	10
Abb. 11: Mergeliger Kalk (Lumachelle) aus den Kössener Schichten, Lesestein im neueren Abrissgebiet am Aggraben (JUNG 2007: Abb. 4)	10
Abb. 12: Lesestein aus Oberrhätalkalk, im Südteil der Hangbewegung (...)	11
Abb. 13: Kleinstückiger Dolomit unterhalb eines kleinen Aufschlusses, Nordhang der abgesetzten Erhebung im Hangbewegungsgebiet (...)	12
Abb. 14: Foto eines Schurfs in Grundmoränenmaterial. Die Grenze von aufgelockertem zu festem Material ist deutlich sichtbar (JUNG 2007: Abb.8)	14
Abb. 15: Abgedeckte geologische Karte des Projektgebiets. (JUNG 2007)	15
Abb. 16: Geologisches Profil durch die Aggenalm Hangbewegung nach JUNG (2007). Der Profilverlauf ist in Abb. 17 gekennzeichnet (...)	17
Abb. 17: Positionen der Bohrungen und der übrigen Messsysteme auf der Aggenalm Hangbewegung. (SINGER et al. 2009)	18
Abb. 18: Kornverteilung der Probe KB2-WG5	18

Abb. 19: Bohrprofil der Bohrung B2.....	19
Abb. 20: Bohrmannschaft beim Abteufen einer Bohrung an der Aggenalm Hangbewegung.....	20
Abb. 21: Zusammenstellung der Ursachen der Hangbewegung an der Aggenalm.....	24
Abb. 22: Hangneigungen an der Aggenalm Hangbewegung (JUNG 2007: Abb. 11).....	26
Abb. 23: Zusammenhang zwischen Anzahl der Rutschungen und der jährlichen Niederschläge (KRAUTER 2002).....	27
Abb. 24: Porenwasserdruck zweier Piezometer verbaut in Bohrung B4 und B6 an der Hangbewegung Sudelfeld über einen Zeitraum von etwa 2 Monaten (März-April 2009).....	28
Abb. 25: Prozesse des Wasserhaushalts im Boden und Einfluss der Vegetation.	29
Abb. 26: Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland (DIN 4149).....	30
Abb. 27: Prinzip der am Sudelfeld installierten Drahtextensometer (...)	32
Abb. 28: Diagramm mit den Messdaten der drei Extensometer zwischen Januar 2006 und Juli 2008 (ELLINGER 2008).....	33
Abb. 29: Crackmeter an der Nordwand der oberen Lamplalm (ELLINGER 2008).....	34
Abb. 30: Ergebnisse der Inclinometermessungen der Bohrung B5 (...)	35
Abb. 31: Schematischer Aufbau einer TDR Deformationsmessstelle für Hangbewegungen (SINGER 2010)	36
Abb. 32: Ergebnisse (Tagesmittel) der TDR Messungen der Bohrung B2.....	36
Abb. 33: Klimastation und Quellschüttungen am Sudelfeld (ELLINGER 2008).....	37
Abb. 34: Messwertreihen der im Bereich des Haupt-Sensorknotens installierten Messgeräte (Zeitraum Februar bis Dezember 2009).....	38
Abb. 35: Geoelektrik-Profile längs und quer durch die Aggenalm Hangbewegung (Profilverlauf s. Abb. 17). (STÖRZBACH 2009; SINGER 2010)	39
Abb. 36: Der allgemeine Prozess der Auflösung eines numerischen Modells mit finiten Differenzen.....	41
Abb. 37: Vereinfachter Zyklus der expliziten Berechnung in FLAC.....	45
Abb. 38: Flussdiagramm des Lösungsprozesses des FLAC Codes.....	47
Abb. 39: Das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium in FLAC (ITASCA CONSULTING GROUP INC. 2005e).	51
Abb. 40: Anwendungsbereiche der Fließregeln im Mohr-Coulomb Modell (Itasca Consulting Group Inc. 2005e).	53

Abb. 41: Leitfaden zur Prozessanalyse und Beurteilung von Massenbewegung (ZANGERL et al. 2008)	54
Abb. 42: Häufigkeitsverteilung des Sicherheitsfaktors bei Hangbewegungen allgemein (oben) bzw. in verschiedenen Hangbewegungstypen (unten) (...).....	58
Abb. 43: Das rekonstruierte Hangprofil vor der Bewegung (JUNG 2007).....	60
Abb. 44: Lage und Richtung des für die Modellierung verwendeten Profils.....	60
Abb. 45: In FLAC umgesetztes Modell der Ausgangssituation vor dem Einsetzen der Hangbewegung (vgl. auch Profil in Abb. 43).....	62
Abb. 46: Bei der FLAC Modellierung verwendete Variationsbreite der Materialparameter der Kössener Mergel.....	64
Abb. 47: Variation der Wasserstände während der numerischen Modellierung (...).....	65
Abb. 48: Maximale x-Verschiebung der Punkte 1 und 3 nach ca. 50000 Rechenzyklen für die verschiedenen untersuchten Szenarien (...).....	68
Abb. 49: Einfluss der Kohäsion und des Reibungswinkels der Kössener Mergel auf den Deformationsbetrag (nach ca. 50000 Rechenzyklen).....	69
Abb. 50: Kontur-Darstellung der in FLAC ermittelten Verteilung der X-Verschiebung	69
Abb. 51: Vergleich der X-Verschiebung in den Punkten P1, P2 und P3 bei 4 verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Materialparametern (...).....	70
Abb. 52: Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors von den geotechnischen Eigenschaften der Kössener Mergel bei variierenden Grundwasserständen.....	71
Abb. 54: Ergebnisse der SLIDE Modellierung von JUNG (2007).....	72
Abb. 53: Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors vom Grundwasserspiegel bei variierenden geotechnischen Eigenschaften der Kössener Mergel.	72
Abb. 55: Ergebnisse der PHASE ² Modellierung von JUNG (2007)	73
Abb. 56: Zeitabhängige Abnahme des Sicherheitsfaktors mit zunehmender Verwitterung der Kössener Mergel bis zum Böschungsbruch.....	75
Abb. 57: Geometrie, Gesteinsschichten, Wasserstände und Beobachtungspunkte P1, P2 und P3.....	76
Abb. 58: Gitter und Grenzbedingungen des Modells der aktuellen Situation an der Aggenalm.	77

Abb. 59: Maximale x-Verschiebung der Punkte 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten) (vgl. Abb. 57) nach 5000 Rechenzyklen für die verschiedenen untersuchten Szenarien der heutigen Aggenalm Hangbewegung (...)	79
Abb. 60: Einfluss der Kohäsion und des Reibungswinkels der Kössener Mergel auf den Deformationsbetrag (nach ca. 50000 Rechenzyklen)	80
Abb. 61: Vergleich der X-Verschiebung in den Kontrollpunkten bei 5 verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Materialparametern (...)	81
Abb. 62: Beispiel der Anzeige von Elastizitäts- und Plastizitätsbereiche in der Aggenalm Hangbewegung mit FLAC. (...)	82
Abb. 63: Verschiebungen ausgewählter Messpunkte an der Aggenalm Hangbewegung über die Zeit (GALLEMANN 2008)	83
Abb. 64: Die Verschiebungsvektoren an verschiedenen Punkten der Aggenalm Hangbewegung (GALLEMANN 2008). (...)	83
Abb. 65: Konturendiagramm der X-Verschiebung in der Hangbewegung Aggenalm für das Szenario c_M , φ_M und W_M	84
Abb. 66: Geschwindigkeitsvektoren der Aggenalm Hangbewegung im ungünstigsten Fall (...)	84
Abb. 67: Verschiedene Hangbewegungstypen: 1: Fallen/Stürzen, 2: Kippen, 3: Rutschen, 4: Driften, 5: Fließen (WP/WLI 1993)	86
Abb. 68: Versagens-Szenario der Aggenalm Hangbewegung nach einem Extremniederschlagsereignis ggf. im Zusammenwirken mit der Schneeschmelze im Frühjahr (Taufluten)	88

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wichtige Kennzahlen und Charakteristika der Aggenalm Hangbewegung.	16
Tab. 2: Eigenschaften der Proben aus der Bohrung B2	21
Tab. 3: Typische maximale Hangneigungen von verfestigtem Material aus LÖWNER et al. (2005) nach CARSON & KIRKBY (1972).....	26
Tab. 4: Durchschnittliche monatliche Verteilung der Niederschläge im Sudelfeld Gebiet im Jahr 1997 (JUNG 2007).	27
Tab. 5: Vergleich der expliziten und impliziten Lösungsmethoden.	44
Tab. 6: In der Modellierung eingesetzte Materialparameter für die an der Aggenalm auftretenden Gesteine.	62
Tab. 7: In FLAC verwendete geotechnische Parameter für Gesteine und Klüfte.....	63
Tab. 8: Berechnete Werte des Kompressionsmoduls (K) und Schubmoduls (G) der an der Aggenalm Hangbewegung auftretenden Gesteine.	64
Tab. 9: Sammlung geotechnischer Eigenschaften des Kössener Mergels nach verschiedenen Autoren.....	64
Tab. 10: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Bemessungswerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen nach DIN 4149.	66
Tab. 11: In den einzelnen Szenarien der Rückanalyse ermittelte Sicherheitsfaktoren.	71
Tab. 12: Zusammenstellung der Ergebnisse der SLIDE Modellierung von JUNG (2007).....	73
Tab. 13: Zusammenstellung der Ergebnisse der PHASE ² Modellierung von JUNG (2007).....	73
Tab. 14: Einteilung der Hangbewegung in Geschwindigkeitsklassen nach CRUDEN & VARNES 1996 (zitiert in ZANGERL et al. 2008)	87

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Thuro nicht nur für die Vergabe dieses sehr interessanten Themas bedanken, sondern auch für die hilfreichen Tipps. Zweifellos konnte ich nur dadurch in der geplanten Zeit mein Studium beenden.

Herzlichen Dank auch an meine Freunde Hr. Dr. John Singer und Hr. Dipl.-Ing. Majd Hatem. Ihr Interesse und die Tipps waren für mich sehr hilfreich. Nicht nur die stets freundliche Unterstützung in allen Belangen, sondern auch die intensive Betreuung trug zur erfolgreichen Bearbeitung dieses Themas bei.

Ich danke aufrichtig meiner Ehefrau für ihr Geduld und alle Verantwortung, die sie in unserem Leben übernommen hat, damit ich mit weniger Sorgen mein Studium fortsetzen konnte.

Bei meinen Kindern entschuldige ich mich, weil ich für sie in diesen Jahren wenig Zeit hatte; ich werde dies in Zukunft nachholen.

Am Ende danke ich recht herzlich meinen Kollegen der Fakultät, besonders Herrn Haas, der mir stets sehr freundlich geholfen hat.

1 Einführung

1.1. Veranlassung

Hangbewegungen gehören zu den zehn bekanntesten Naturkatastrophen weltweit, und sie sind verantwortlich für große materielle wie immaterielle Schäden. Schätzungen zufolge wurden in den vergangenen 100 Jahren ca. 500.000 Menschen durch Hangbewegungen getötet und weitaus mehr verletzt (NUSSBAUMER 1998). Tausende Häuser wurden zerstört und Millionen Menschen obdachlos, wodurch Milliarden Dollar direkte und indirekte finanzielle Schäden entstanden (HANSEN 1984). Diese drastischen Auswirkungen zeigen, wie wichtig es ist, den Mechanismus und den Ablauf von Hangbewegungen genauer zu erforschen. Trotz der bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen steigt die Zahl der Schäden ständig weiter an.

1.2. Problemstellung

Auf Grund der Änderung des Klimas auf der ganzen Welt, besonders in Europa und in den Alpen, erwartet man viele schwere Regenfälle und Niederschläge als die wichtigste Ursache für Hangbewegungen (ALCAMO et al. 2007). Ein Hangbewegungsgebiet am Alpennordrand ist das Sudelfeld, wo 1935 durch schwere Niederschläge eine Massenbewegung an der Aggenalm ausgelöst wurde. Dabei wurden drei Brücken und eine Straße zerstört. 1997 wurde die Straße nach einer erneuten Hangbewegung wiederum verschüttet und gesperrt. Seit 2001 wird die Hangbewegung regelmäßig bis zu zweimal pro Jahr durch den Geologischen Dienst des LfU im Rahmen des GEO-RISK-Programms vermessen und überwacht. Die Bewegungen setzen sich im Bereich von wenigen Zentimetern pro Jahr fort, wobei die durchschnittlichen Bewegungsraten bei ungefähr zwei Zentimetern pro Jahr liegen.

1.3. Zielsetzung

Das Gebiet wurde bisher vor allem unter ingenieurgeologischen Gesichtspunkten bearbeitet. Dadurch gibt es viele Informationen aus den Arbeitsergebnissen, besonders durch das Projekt alpEWAS (Early Warning System for Alpine Slopes), durch Monitoring mit TDR (Time Domain Reflectometry), GPS (Global Positioning System), VTPS (Video Tacheometry Positioning System), durch geotechnische Untersuchungen der Hangbewegung, sowie auch durch eine numerische Modellierung mit Hilfe finiter Elemente (in RocScience Phase²). In vielen Fällen sind Messungen (geodätische Vermessungen, Inklinometer usw.) durchgeführt worden.

Das Monitoring sowie die numerische Modellierung mit finiten Elementen erbrachten unterschiedliche Ergebnisse. Die Ursachen hierfür liegen womöglich in der Größe der Hangbewegung. Dadurch sind Messpunkte relativ selten und die Genauigkeit jedes

Verfahrens ist unterschiedlich. Andererseits ist eine Modellierung mit finiten Elementen nur für kleine Verformungen möglich, da große Bewegungen nicht mit einbezogen werden können.

Im Vergleich dazu gibt es eine neue Methode die mit finiten Differenzen arbeitet, und die auch für große Verformungen geeignet ist. Diese Methode wird in der Software FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) verwendet (Itasca Consulting Group). Sie kann Daten verschiedener Zustände effizient analysieren. Es ist das Ziel, mit dieser Software alle angeforderten Ergebnisse wie Ursachen der Hangbewegung, Gleitfläche, Verformungen und ihre Richtungen, Spannungen, Standsicherheit, Hangbewegungstyp, Hangbewegungsmerkmale sowie Zustand, Verteilung und Art der Hangbewegungsaktivitäten zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann man den Mechanismus erforschen und den Ablauf von Hangbewegungen genauer vorhersagen.

1.4. Aufgaben

Hier wurden zuerst geologische und geotechnische Daten in ein altes Profil mit drei Klüften importiert und modelliert. Dann wurde die Sicherheit bis zum Rutschen berechnet. Dafür wurden verschiedene Szenarien berücksichtigt. Zuerst wurde angenommen, dass die Haupthangbewegung trocken ist. In anderen Szenarien wird allmählich der Grundwasserspiegel erhöht. Nach jedem Schritt wird die Standsicherheit neu berechnet. Wenn der Grundwasserspiegel bis oberhalb der zweiten Mergelschicht erhöht wurde und die Standsicherheit in diesem Bereich immer noch stabil ist, müssen die Eigenschaften der Mergelschichten verändert werden. Die Mergelschichten verhalten sich nämlich unterschiedlich. Somit erhält man die Ausgangsdaten. Zur Validierung werden Laboruntersuchungen und Literaturwerte verglichen und anschließend für ein neues Profil verwendet.

Das neue Modell, das die heutige Hangbewegung zeigt, baut auf validierte Daten und verwendet dafür verschiedene Szenarien. Jede Stufe liefert verschiedene Ergebnisse. Die Zeit wird in der Software als eine virtuelle Zeit betrachtet, weshalb ein Vergleich mit anderen Methoden notwendig ist, um eine reale Zeit zu erhalten.

Wenn diese Ergebnisse mit denen des Monitoringsystems verglichen werden, kann eine genaue zeitabhängige Entwicklung der Hangbewegung unter dem Einfluss verschiedener Ursachen und Trigger aufgezeigt werden. Als wichtigster Faktor tritt der Grundwasserspiegel auf; hier werden die Angaben der durchgeführten Piezometermessungen übernommen.

2 Die Aggenalm Hangbewegung

2.1. Geographischer Überblick

Die Aggenalm Hangbewegung liegt im Sudelfeld Gebiet ca. 80 km südöstlich von München und ca. 30 km südlich von Rosenheim im östlichen Mangfallgebirge, das wiederum einen Teil der Nördlichen Kalkalpen darstellt ($47^{\circ}41'43''$ N, $12^{\circ}03'36''$ E; Abb. 1 & Abb. 2). Das Sudelfeld, zwischen Oberaudorf und Bayrischzell gelegen, bildet zwischen zwei großen Tälern, dem Ursprungstal im Westen und dem Auerbachtal im Osten, eine sanft wellige Landschaft, umgeben von den schroffen Wänden der Brünstein-Traithen-Gruppe im Süden und der Wildbarren-Wendelstein-Gruppe im Norden (Abb. 3).

Direkt östlich des Skigebiets Sudelfelds, genauer gesagt östlich der Schöngratbahn und südlich des Oswaldlifts, verläuft die Westgrenze des Projektgebiets. Im Norden wird es von einer Ost-West-streichenden Rippe begrenzt, die sich weiter nach Osten in Richtung des Zusammenflusses des Auer- und Gassenbachs zieht. Die östliche Grenze bildet die Westflanke der Gassenleite. Im Süden verläuft die Grenze nördlich des Bergwacht-Hauses und der Schindelberg-Alm.

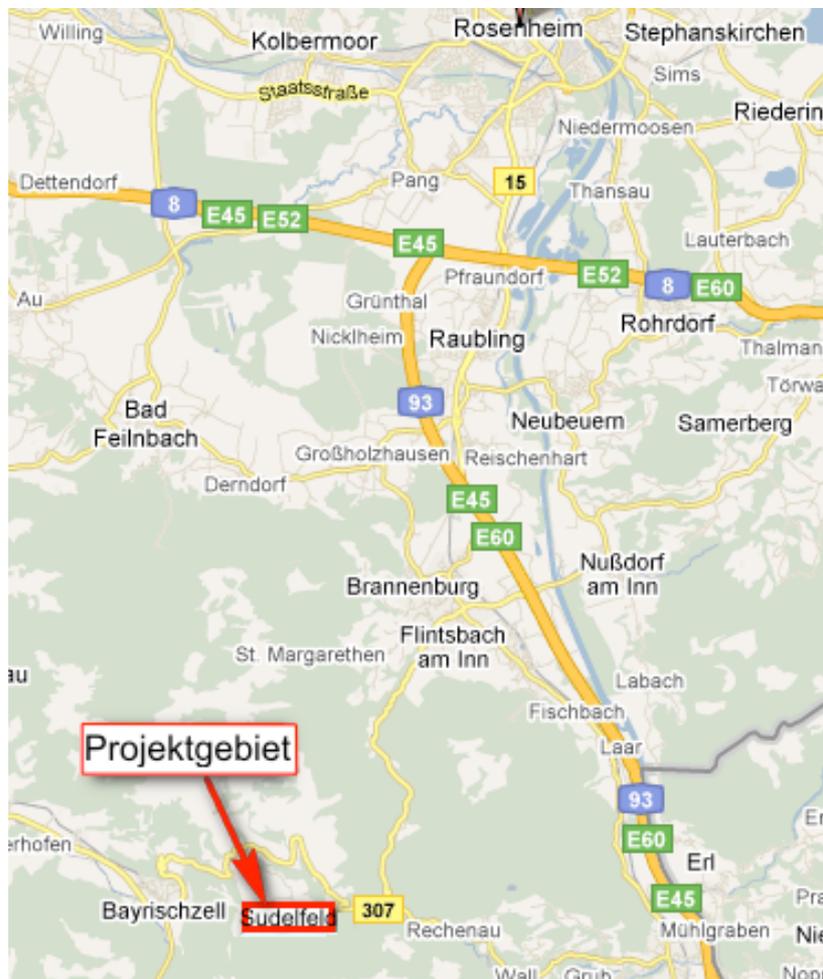


Abb. 1: Übersichtskarte des Gebiets südlich von Rosenheim. Das Projektgebiet liegt östlich des Inntals zwischen Brannenburg und Oberaudorf.

2.2. Historische Ereignisse

An der Aggenalm befindet sich eine alte Rutschmasse mit einer Ausdehnung von ca. 700 x 250 m und einer mittleren Mächtigkeit von 30 m. Diese Rutschung ereignete sich am Ostersonntag des Jahres 1935, und wurde aller Wahrscheinlichkeit nach durch die Schneeschmelze und dem damit verbundenen hohen Grundwasserspiegel verursacht. Dabei wurden ca. zwei Millionen Kubikmeter bewegt (GEORISK Objektkatalog Nr. 8338012 und 8338013).

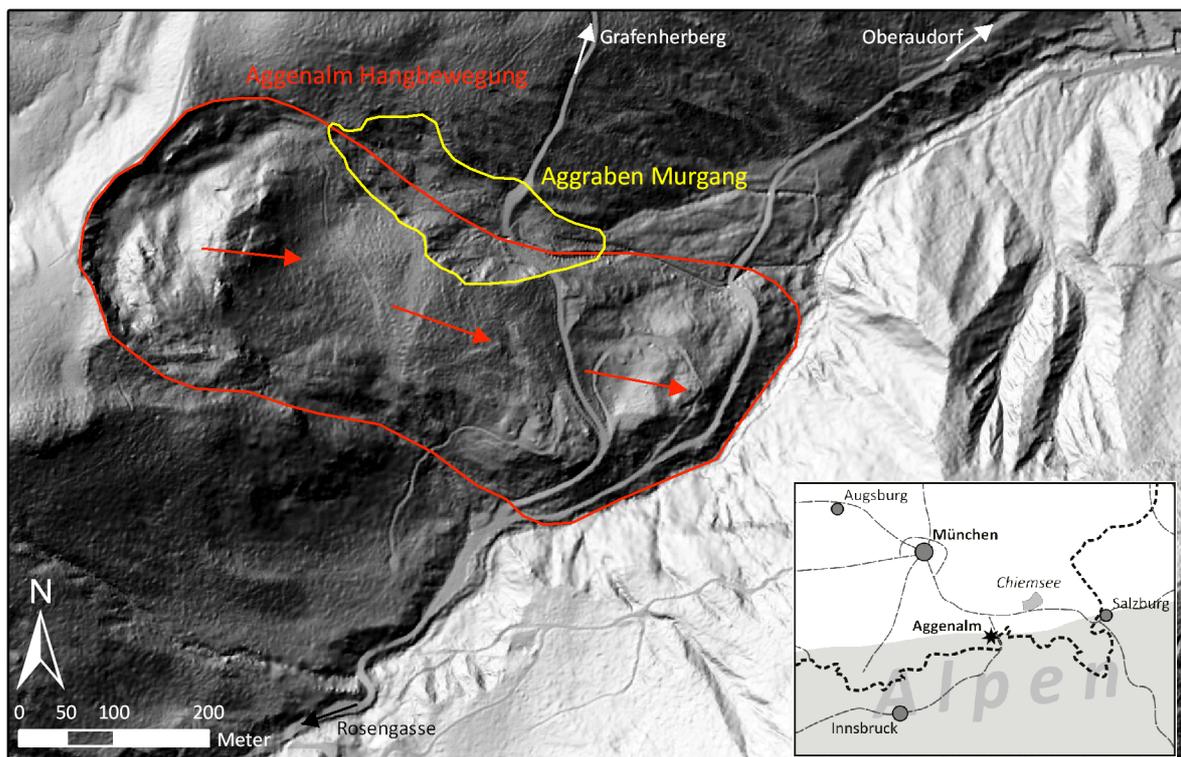


Abb. 2: Schräglichtschummerung der Hangbewegung Aggenalm basierend auf einem digitalen Geländemodell (1 m – Laserscan). Die tiefgreifende Hangbewegung Aggenalm (rot) weist momentan Bewegungsraten von ca. 1 bis 2 cm pro Jahr auf (rote Pfeile). In 1997 löste sich im Aggraben eine Mure, deren Anrisse noch heute im Gelände deutlich sichtbar sind (gelb). (Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2010; Bewegungsvektoren schematisch nach (GALLEMAN 2007).

Das Ereignis von 1935 wird vom WASSERWIRTSCHAFTSAMT ROSENHEIM (o. J.) folgendermaßen beschrieben: „Am 22. April 1935, einem Ostermontag, war das Gelände am Aggeraipl in Bewegung geraten. In breiter Fläche schob sich der Abbruch ins Tal des Gassenbaches, alles mit sich reißend. Bis zum Abend waren rd. 3 ha Weideland und 1,5 ha Wald abgerutscht. 1,5 Mio. m³ Gestein, Felsblöcke und Baumstämme verschütteten auf 1,5 km Länge den Gassenbach bis zu 10 m Höhe. Erst nach 4 Tagen kam die Rutschung zum Stillstand. 10 ha Weideland und 4 ha Wald waren vermurt, 3 Brücken und die Straße in die Rosengasse zerstört. In monatelanger Arbeit wurde von der Wildbachsektion Rosenheim mit Hilfskräften des Arbeitsdienstes und einem Pionierzug aus München die größten Schäden behoben.“



Abb. 3: Blick vom Nordhang des Großen Traithen Richtung Norden auf das Sudelfeld Gebiet mit der Aggenalm Hangbewegung (rote Markierung) (Foto: J. Singer).

Die Geschehnisse der ersten Hangbewegung im Jahr 1935 werden von VON MALAISÉ (1951) und BERNRIEDER (1991) außerdem wie folgt beschrieben (JUNG 2007):

„Am Ostersonntag 1935 ging ein Bergrutsch nieder, der [...] die Öffentlichkeit und Behörden in ausgiebigem Masse beschäftigte. Sein Abrissgebiet lag etwa 90 m über der Aggenalpe im Gebiet der moränenbedeckten Kössener Schichten und Lias-

Fleckenmergel. Die Schneeschmelze verursachte ein Abgleiten von annähernd zwei Millionen Kubikmetern Erdmassen zu fünf Millionen Tonnen. Diese bis zu 30 m mächtigen Massen bewegten sich auf einer etwa 250 m langen Gleitbahn gegen den Gasenbach und wurden von diesem, wenn auch nur zu einem kleinen Teil, 700 m weit bis zur Einmündung in den Auerbach, 900 m weit vom Tatzelwurmwaterfall entfernt, verfrachtet.

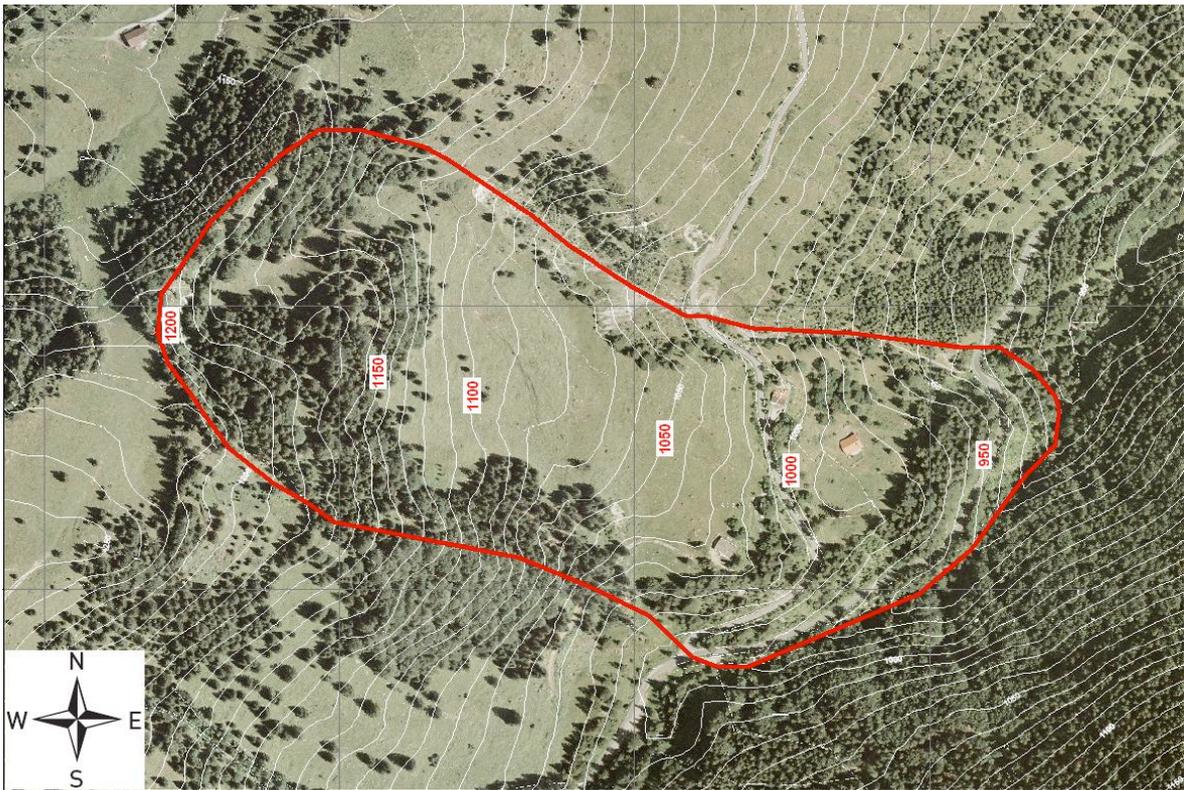


Abb. 4: Orthofoto der Aggenalm Hangbewegung (rote Umrahmung) mit Höhenlinien (Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2010).



Abb. 5: Blick auf die Aggenalm Hangbewegung im Abendlicht, wodurch die typisch buckelige Morphologie der alten Rutschmasse sichtbar wird (JUNG 2007: Abb. 16).



Abb. 6: Frische Risse in den Wänden von Almhäusern auf dem Rutschkörper (JUNG 2007: Abb. 21, Abb. 23).

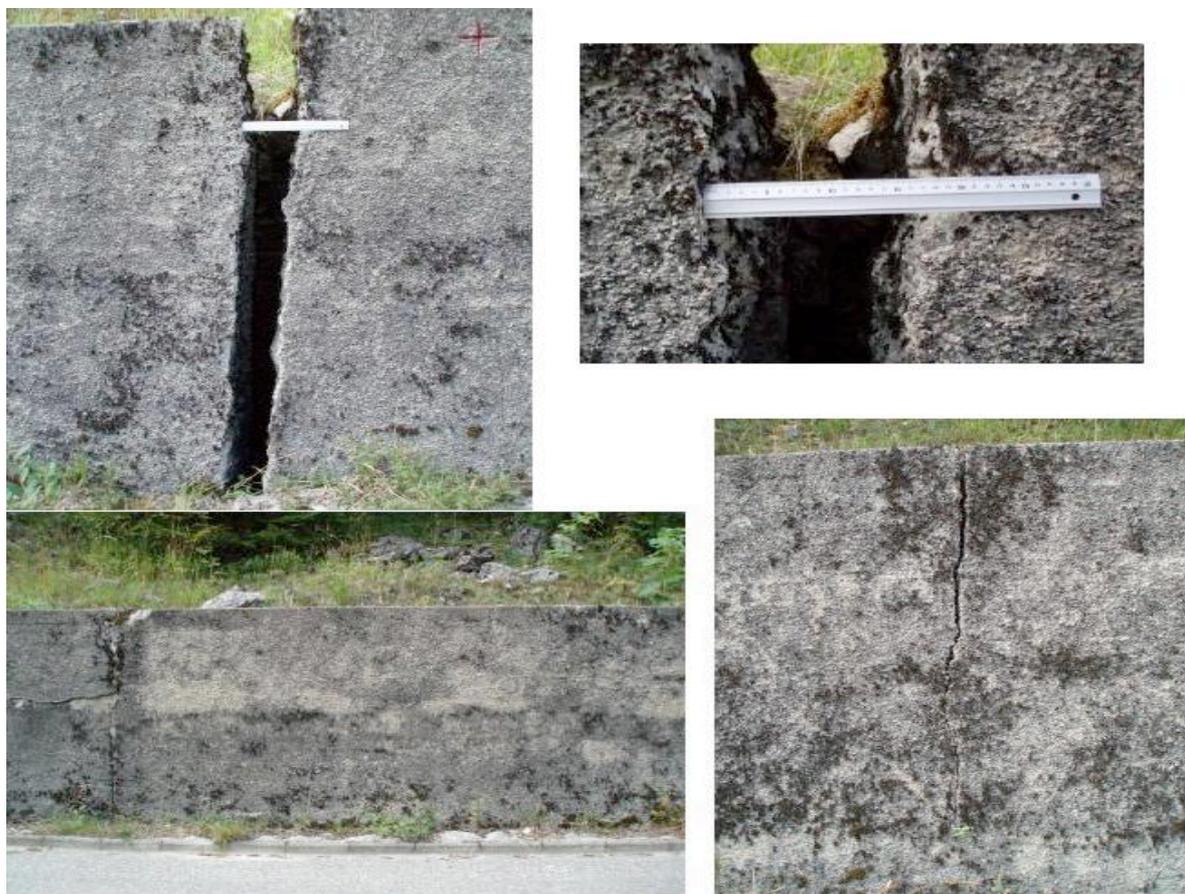


Abb. 7: Schäden an den Stützmauern entlang der Straße Rosengasse – Grafenherberg im Bereich der Aggenalm (JUNG 2007: Abb. 29 und Abb. 30).

1997 löste sich im Agggraben erneut Material und bewegte sich murartig in Richtung Tal (Abb. 2). Noch jünger sind die kleinen oberflächlichen Rotationsrutschungen. Den geodätischen Messungen zufolge ist der Hang zurzeit noch in Bewegung (GALLEMANN 2007).

Bei einer Begehung im Jahr 2000 wurden an den Almhütten, die auf dem Rutschkörper stehen, frische Risse beobachtet (Abb. 6). Außerdem weisen die Grafenherberger Straße und die Rosengassenstraße klare Deformationen im Fahrbahnbelag auf (Abb. 7).

2.3. Geologischer Überblick

Tektonisch gehört das Gebiet zur Lechtaldecke der Nördlichen Kalkalpen (Abb. 8). Unmittelbar im Bereich der Hangbewegung treten die Kössener Schichten, eine Wechselfolge aus Kalken und Mergeln, und der Oberrhätalkalk, ein massiger z.T. dolomitischer Kalk, auf. Im Zuge der Alpen-Orogenese wurde diese Schichtfolge in mehrere große und kleine Ost-West streichende Falten gelegt, von denen der sogenannte Zellerrain-Auerberg-Sattel mit seiner ostwärts einfallenden Faltenachse für das nahezu hangparallele Einfallen der Gesteinsschichten im Bereich der Aggenalm Hangbewegung verantwortlich ist (Abb. 9). Da das Gebiet in der letzten Eiszeit von Gletschern bedeckt war, ist die Region von typischer Glazialmorphologie geprägt und glaziale Sedimente (z.B. Geschiebelehne) treten weit verbreitet auf.

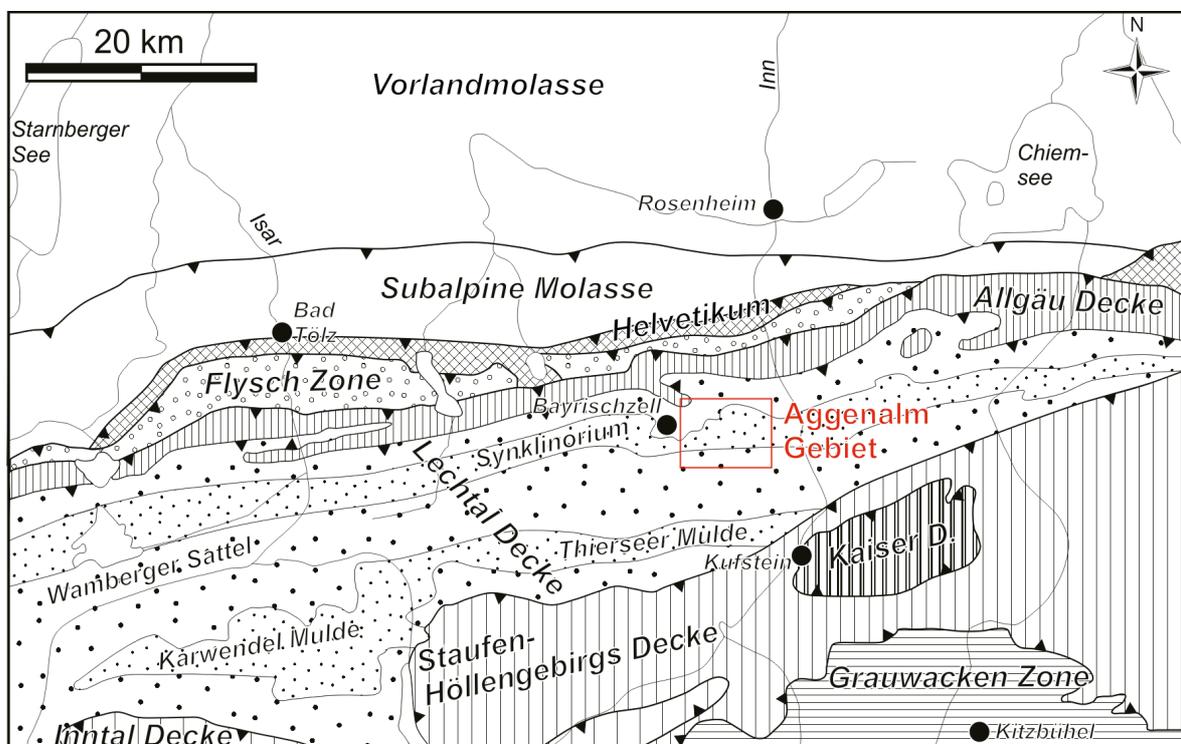


Abb. 8: Tektonische Karte der nördlichen Kalkalpen zwischen Starberger See und Chiemsee. Die Hangbewegung Aggenalm liegt im Bereich der Lechtal Decke innerhalb des Synklinoriums, einer großen Doppelmulde, die sich durch die ganze Region zieht. (SINGER et al. 2009)

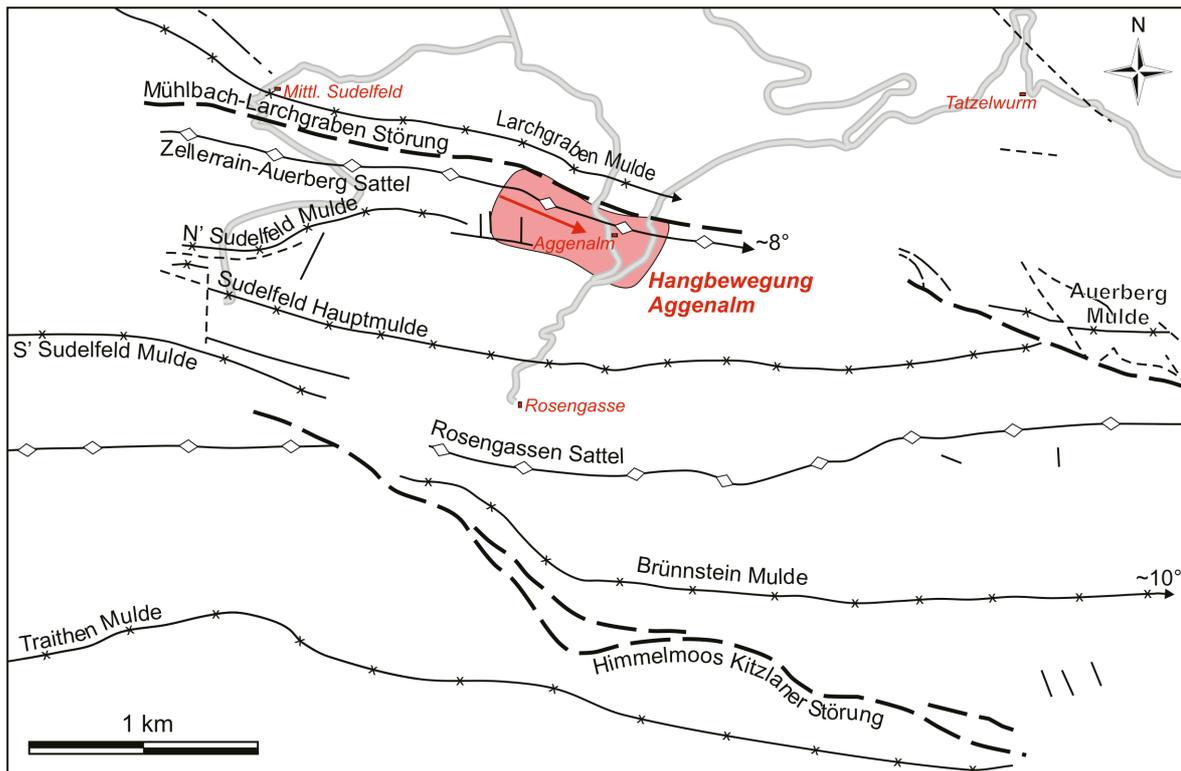


Abb. 9: Tektonische Detailkarte der Sudelfeld-Region. Das Synklinorium weist hier eine komplexe Struktur mit mehreren kleinen Zwischensätteln und -mulden auf. Von diesen ist der Zellerrain-Auerberg Sattel, der mit ca. 8° nach Osten hin einfällt, für das nahezu hangparallele Einfallen der Gesteinsschichten im Bereich der Aggenalm verantwortlich (SINGER et al. 2009).

2.4. Gesteinsbeschreibung

Die Beschreibungen basieren auf den Ergebnissen von Aufschlussbohrungen sowie Karten des Gebietes. Die wichtigsten Grundlagen zur Geologie des Projektgebietes wurden jedoch vor allem von JUNG (2007) im Rahmen einer Detailkartierung erarbeitet.

2.4.1. Plattenkalk

Wie der Name verrät, ist der Plattenkalk meist aus plattigem bis dickbankigem, dichtem Kalkstein mit glatten Schichtoberflächen aufgebaut. Die Bankmächtigkeiten der hell- bis dunkelgrauen, teils schwarzen Kalke schwanken zwischen 5 und 50 cm. Die Verwitterungsfarben gehen Richtung Hellgrau bis Graubraun. Der meist feinkörnige bis dichte Kalkstein zeigt scharfkantigen bis muscheligen Bruch. (JUNG 2007)

2.4.2. Kössener Schichten

Aufgrund der schlechten Aufschlussverhältnisse in den Kössener Schichten ist es wahrscheinlich, dass die Mergel vor den Kalken deutlich dominieren. Die Kössener Mergel zeigen im frischen Zustand meist eine dunkle bis schwarze Farbe, die durch Bitumen oder Pyrit hervorgerufen wird. Ein kleiner Bereich südlich oberhalb der Ortsverbindungsstraße Grafenherberg – Rosengasse zeigt dunkle Kalke mit calci-

tverheilten Klüften und Spiegelharnischen. Es könnte sich hierbei um Kössener Kalke handeln (Abb. 10 und Abb. 11).



Abb. 10: Dunkle Kalke mit calcitverheilten Klüften. Wahrscheinlich handelt es sich um Kössener Kalke (JUNG 2007: Abb. 3).



Abb. 11: Mergeliger Kalk (Lumachelle) aus den Kössener Schichten, Lesestein im neueren Abrissgebiet am Aggraben (JUNG 2007: Abb. 4).

2.4.3. Oberrhätkalk

Die überwiegend hellgrauen bis grauen, auch beigen Kalke wittern charakteristisch in hellem Grau bis Weiß an. Stellenweise sind die Kalke auch dunkler gefärbt. Vor allem lassen sie sich als kleinere und größere Blöcke auf der gesamten Oberfläche der Hangbewegung finden. Im südlichen Teil konnten sogar schwach verkieselte Lagen gefunden werden (Abb. 12).



Abb. 12: Lesestein aus Oberrhätalk, im Südteil der Hangbewegung (JUNG 2007: Abb. 5).

Die Bankmächtigkeiten schwanken zwischen 0,2 bis häufig über 2 m, was dem Oberrhätalk in kleineren Aufschlüssen oft ein massiges Aussehen verleiht. Echte Riffkalke konnten im Gebiet nicht gefunden werden. Aufgrund der Aufschlussverhältnisse konnten Mächtigkeiten von etwa 40 m unterhalb der eingeschalteten Oberrhätadolomite auskartiert werden. Die darüber liegenden Kalke erreichen etwa 35 m Mächtigkeit. Die von SCHORMAIR (2003) angegebenen Mächtigkeiten von 150 – 200 m bestätigten sich in der Kartierung von JUNG (2007) nicht.

Auf tektonischen Druck konnte der kompetente Oberrhätalk nicht durch Faltung ausweichen, sondern reagierte mit zahlreichen Brüchen und Störungen, an denen das Schichtpaket versetzt wurde. Am besten aufgeschlossen ist dies an der Westflanke der Gassenleite, wo sich Erosionsrinnen in den Störungsbereichen bilden konnten. Calcitverheilte Klüfte zeugen ebenfalls vom Spröbruchverhalten.

2.4.4. Oberrhätdolomit

Der hell gelbliche bis weiße, stellenweise rötlich gefleckte Oberrhätdolomit fällt oft schon von weitem ins Auge. Der meist zuckerkörnige Habitus und die kleinstückigen, polygonalen, meist scharfkantigen Bruchstücke sind typisch für dieses Gestein (Abb. 13). Aufgrund des hohen Durchtrennungsgrads ist er leicht erodierbar und bildet kleinere Schuttreißen bzw. überschüttet darunter liegendes Gelände. Ein eventuell vormals vorhandener Lagenbau ist nicht mehr erkennbar.

Der Oberrhätdolomit zeigt aufgrund der Ausstrichsbreite am Westhang der Gassenleite eine Mächtigkeit von ca. 30 m. An der Abbruchwand der Aggenalm Hangbewegung und in dessen rundlichen Bereich erreichten die Mächtigkeiten nicht mehr als 10 m (JUNG 2007). SCHORMAIR (2003) wies Mächtigkeiten von 0 bis 30 m aus.



Abb. 13: Kleinstückiger Dolomit unterhalb eines kleinen Aufschlusses, Nordhang der abgesetzten Erhebung im Hangbewegungsgebiet (JUNG 2007: Abb. 6).

Der diagenetisch entstandene Oberrhättdolomit wird im Gebiet als Einschaltung in die Oberrhättkalke von unterschiedlicher Mächtigkeit gedeutet. Aufschlüsse befinden sich im oberen Teil der Anrisswand der Sudelfeld-Hangbewegung. Östlich der Abrisswand steht er sogar wandbildend mit einer Höhe von etwa 3 m an. An der Westflanke der Gassenleite zeigt er zwischen zwei steilen Oberrhättkalk-wänden durch Verflachung des Geländes eine leichtere Erodierbarkeit an. Besonders hervorzuheben ist die große Verbreitung auf dem durch die Bewegung nach Osten abgesetzten Buckel. Es sind eher kleine, unscheinbare Aufschlüsse zu finden. Die Bereiche dazwischen zeigen Bedeckung von kleinstückig zerbrochenem Dolomit. Stellenweise konnte auch nur noch dolomitischer Grus angetroffen werden.

2.4.5. Quartäre Ablagerungen

In den Alpen sind unter den quartären Ablagerungen die würmeiszeitlichen Bildungen und Landschaftsformen vorherrschend. Ältere Vereisungsspuren sind entweder durch den jüngsten Gletschervorstoß entfernt oder verschleiert worden.

2.4.5.1. Pleistozäne Ablagerungen

Während des Pleistozäns wurde das Arbeitsgebiet durch den größten und längsten ostalpinen Gletscher, dem Inngletscher, geprägt. Ein Seitenarm hielt über das Auerbachtal und das Ursprungstal Verbindung mit dem Leitzachgletscher. Im Würmglazial kann im Arbeitsgebiet von einem Eisstand von mindestens 1280 m ü. NN ausgegangen werden (SCHORMAIR 2003). Die Traithen-Gruppe und der Brünstein ragten als Nunataks aus dem Eis heraus.

Im ausgehenden Würmglazial gewannen die Lokalgletscher an Bedeutung. Als prägend für das Arbeitsgebiet sind hier die kleinen Gletscher aus dem Rosengassenkar im Osten und dem Benebachkar im Westen zu nennen.

Die Grundmoränenablagerungen stellen die einzigen Spuren der Vereisung im Arbeitsgebiet dar. Sie bedecken mit Ausnahme der steilen Felswände den gesamten Festgesteinsuntergrund. Größere Reliefunterschiede werden durch die Geschiebelehmbedeckung gemildert, was der Landschaft ein sanft welliges Erscheinungsbild verleiht. Die Mächtigkeit der pleistozänen Ablagerungen konnte im Gelände nicht bestimmt werden. Sie bewegt sich vermutlich etwa im Bereich als maximale Mächtigkeit.

Die Zusammensetzung des Geschiebelehms in Korngröße und Kornbestand wurde im Zuge der Erstellung und Aufnahme zweier Handschürfe abgeschätzt (JUNG 2007). Es handelt sich hierbei um einen Kies, stark steinig, schluffig bis stark schluffig, sandig bis schwach sandig. Im Zuge der Geländebegehungen konnten zahlreiche Findlingsblöcke auskartiert werden.

Die oben genannten Beobachtungen wurden nun von JUNG (2007) mit den Ergebnissen der Siebanalysen und Geschiebebestandsuntersuchungen von SCHORMAIR (2003) verglichen. Aus insgesamt 50 kg Probenmaterial konnten zwei verschiedene Moränen gleicher Kornverteilung unterschieden werden. SCHORMAIR (2003) stellte diese aufgrund einer Farbvariation und leicht verändertem Geschiebebestand den Liegenden in die Riss-Eiszeit, den Hangenden, helleren in die Würm-Eiszeit.

JUNG (2007) hat im Rahmen seiner Arbeit an zwei Stellen Schürfe durchgeführt: Der Schurf S1 im südlichen Anrissbereich von 1997 und der Schurf S2 in einer neuen Hangbewegung bei Höhenkote 950 m. Diese ergaben, dass sich die farbliche Variation der beiden Bildungen nur auf die obersten 10 bis 30 cm beschränkte und sich nicht weiter nach unten bzw. hangeinwärts verfolgen lässt. Außerdem war eine deutliche Erschwerung der Lösung nach Entfernen der obersten cm festzustellen. Es ist daher wahrscheinlich, dass es sich bei der von SCHORMAIR (2003) beschriebenen Farbvariation nur um oberflächliche Auflockerung und Verwitterung handelt und nicht auf unterschiedliche Alter der Ablagerungen zurückzuführen ist. Die veränderten Kornspektren können auch durch oberflächliche Kriechbewegungen verursacht sein, die im gesamten moränenbedeckten Gebiet zu beobachten sind. Zu bedenken ist hierbei auch, dass die hellen Kalke und Dolomite direkt hangaufwärts des bearbeiteten Gebiets anstehen und somit eine Anreicherung in oberflächennahen Bereichen wahrscheinlich ist. Weiterhin wird diese These durch Wasserzutritt im Schurf an der Grenze von aufgelockertem zu festem Grundmoränenmaterial gestützt. Der obere Bereich ist somit stärker wasserdurchlässig, obwohl sich die Kornverteilungskurven decken. (JUNG 2007)



Abb. 14: Foto eines Schurfs in Grundmoränenmaterial. Die Grenze von aufgelockertem zu festem Material ist deutlich sichtbar (JUNG 2007: Abb.8).

2.4.5.2. Hangschutt

Hangschutt wurde in großen Bereichen außerhalb der Hangbewegung vor allem dort von JUNG (2007) kartiert, wo weitergehende Geländebefunde aufgrund schlechter Aufschlussverhältnisse, zu steilem Gelände bzw. dichter Vegetation nicht möglich waren. Hierzu zählen die Westflanke der Gassenleite sowie die Almweiden im Süden, Teile der Skipisten und ein teilweise bewaldetes Gebiet im Norden des Kartenblattes.

Auch im Gebiet der Hangbewegungen wurden Bereiche mit Hangschutt ausgewiesen, die keine näheren Schlüsse zuließen, wie zum Beispiel im Anrissgebiets des Aggrabens.

Der Hangschutt besteht ausschließlich aus Komponenten der näheren Umgebung. Kalksteine und Dolomite sind vorherrschend, wobei nicht nur aufgrund des geringen Rundungsgrads der Komponenten, sondern auch durch die eindeutige Zuordnung zu stratigraphischen Schichtgliedern eine geringe Transportweite als gesichert anzunehmen ist.

Der Großteil des Hangschutts besteht aus Komponenten vor allem in Kies Korngröße. Bindige Anteile treten stark in den Hintergrund. Größere Steine und Blöcke an der Geländeoberfläche wurden als Blockschutt auskartiert.

2.4.5.3. Blockschutt

Größere Gebiete des Kartiergebiets zeigen Bedeckung von Blöcken, vornehmlich aus Oberrhätkalk (Abb. 15). Es zeigt sich jedoch eine deutliche Häufung der Blockschuttgebiete in den Randbereichen der Haupthangbewegung am Sudelfeld.

Außerhalb des von den Hangbewegungen betroffenen Gebiets befinden sich Blockschutfelder besonders in bewaldeten Bereichen und an steilen Hängen. Im Gelände konnte zwischen reinem Blockschutt und Blockstreu unterschieden werden. Der Blockschutt besteht aus mehr oder weniger nahe beieinander liegenden Blöcken mit mehr als 0,5 m³ Größe, während an anderer Stelle Blöcke und Steine weiter auseinander liegen und zum Teil im Untergrund stecken. (JUNG 2007)

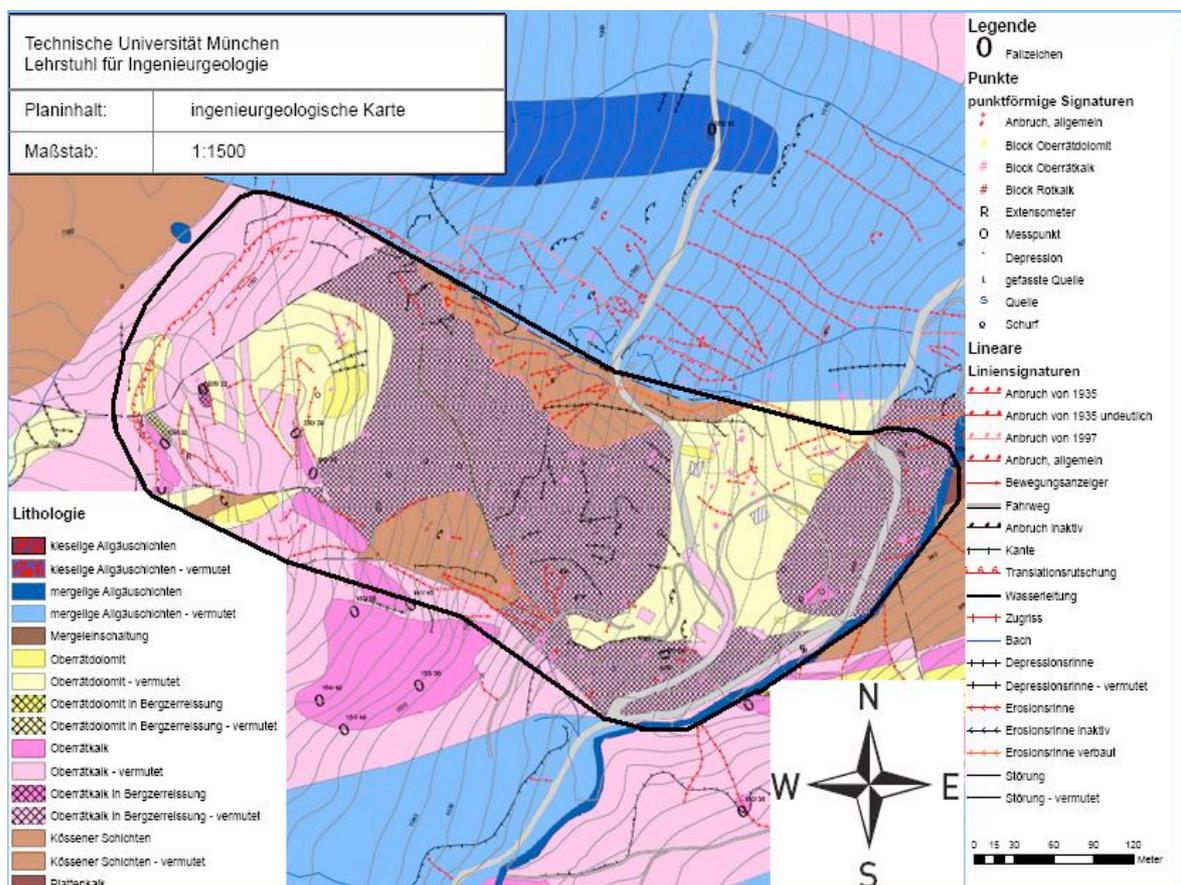


Abb. 15: Abgedeckte geologische Karte des Projektgebiets (JUNG 2007).

2.5. Geotechnischer Überblick

2.5.1. Dimensionen der Hangbewegung

Daten und Ausmaße der Hangbewegung sind in der Tab. 1 zusammengestellt. Die durch Schlamm, Felsblöcke und entwurzelte Bäume gestauten Wassermassen richteten große Verwüstungen an, zwangen zur Räumung der Almhütten und bedrohten auch das Gasthaus Tatzelwurm. Trotzdem bedeutet dieses Naturereignis weder hinsichtlich seiner Entstehungsursachen noch seines Größenausmaßes etwas Besonderes.

Tab. 1: Wichtige Kennzahlen und Charakteristika der Aggenalm Hangbewegung.

Länge (maximal)	780 m
Länge (minimal)	560 m
Breite (maximal)	360 m
Breite (minimal)	230 m
Tiefgang (maximale Höhe aus Profilen)	59 m
Tiefgang (minimale Höhe aus Profilen)	1 m
Fehlende Höhe (Durchschnitt WNW-ESE-Profil)	15,3 m
Gesamtfläche (ArcGis)	191.400 m ²
Gesamtfläche des Anrissgebiets (ArcGis)	78.300 m ²
Bewegtes Gesamtvolumen (WNW-ESE-Profil = 27,1 m)	5.198.700 m ³
Fehlendes Volumen (WNW-ESE-Profil = 15,3 m)	1.200.500 m ³
Gesamtvolumen 1934 (Literatur)	1,5 – 2,0 Mio.m ³
Fahrböschungswinkel (WNW-ESE-Profil)	21°

2.5.2. Hangbewegungsprozesse

Basierend auf einer detaillierten ingenieurgeologischen Kartierung des Hangbewegungsareals hat JUNG (2007) ein erstes geologisches Modell entwickelt, dass die in der Hangbewegung ablaufenden Prozesse schlüssig erklärt. Dieses ist in dem geologischen Profilschnitt in der Abb. 16 (oben) dargestellt. Demnach sinken im oberen Hangbereich die an der Oberfläche sichtbaren Oberrhätkalke und -dolomite in die darunterliegenden, sich plastisch deformierenden Kössener Schichten ein und werden dabei in große, langsam hangabwärts driftende Schollen zerlegt. Somit handelt es sich um ein Fels-Driften (rock spread).

Weiter hangabwärts löst sich mit fortschreitender Deformation der Gefügeverband der Oberrhätkalke und -dolomite mehr und mehr auf, so dass der Mechanismus in ein sehr langsames Schutt-Fließen übergeht (very slow debris flow). Auf Grundlage

von Geländebeobachtungen besteht die Fließmasse vor allem aus eckigen Kalk- und Dolomitkomponenten in allen Korngrößen von Kieskorngröße bis zu sehr großen Blöcken mit mehreren Metern Durchmesser, die z.T. einen noch vollständig erhaltenen Gefügeverband aufweisen. Insgesamt kann diese hohlraumreiche Masse bis zu 25 m Mächtigkeit erreichen.

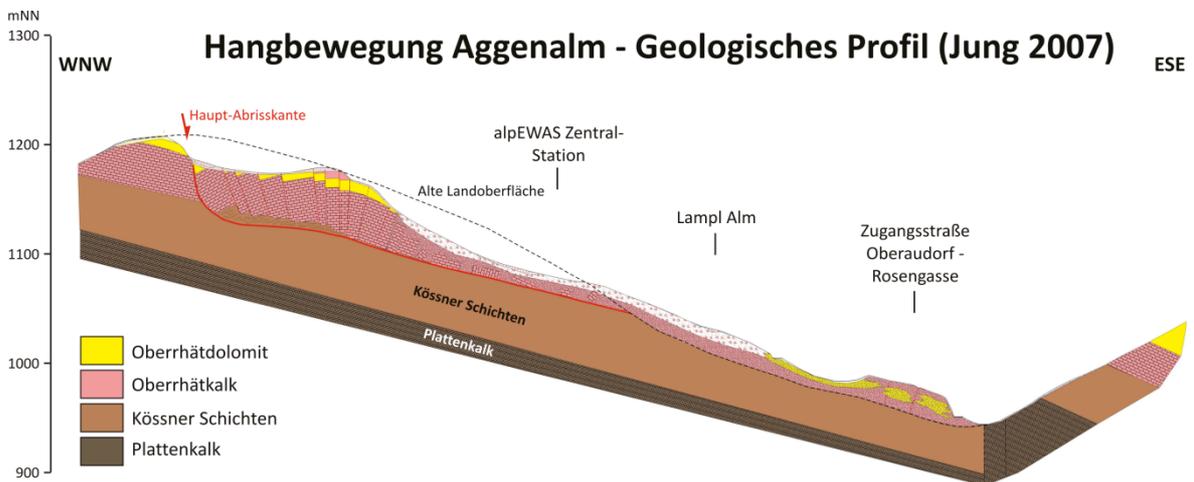


Abb. 16: Geologisches Profil durch die Aggenalm Hangbewegung nach JUNG (2007). Der Profilverlauf ist in Abb. 17 gekennzeichnet. Das Profil von JUNG (2007) wurde lediglich auf Grundlage der ingenieur-geologischen Kartierung erstellt und war die Grundlage für die Planung der Bohrungen. Im oberen Hangbereich liegt demnach ein Driften der Oberrhätkalke auf den Kössener Schichten vor, im unteren Hangbereich im Wesentlichen ein Schuttfliessen.

2.5.3. Mechanische Eigenschaften der Gesteine

Relevante Hangprozesse finden vor allem im Untergrund statt. Für die Modellierung in dieser Studie sind deshalb die Eigenschaften des Bodens bzw. des Gebirges besonders wichtig. Die einzelnen Gesteinsschichten konnten anhand von an der Oberfläche gewonnenen Proben, aber auch von Proben aus den Bohrungen relativ gut bestimmt werden. Insgesamt wurden sieben Bohrungen abgeteuft (Abb. 17, Abb. 18, Abb. 20).

Die Auswertung der Proben erfolgte in den Labors der Technischen Universität München. In der folgenden Tab. 2 sind wichtige Ergebnisse (Bodendichte ρ , Bodenart, Wassergehalt) aufgelistet.

Folgende geotechnische Parameter sind für die Modellierung wichtig und wurden in Versuchen bestimmt:

1. Dichte (*density*):

Die Dichte eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen. Die Dichte der Proben wurde im Auftriebsversuch bestimmt.

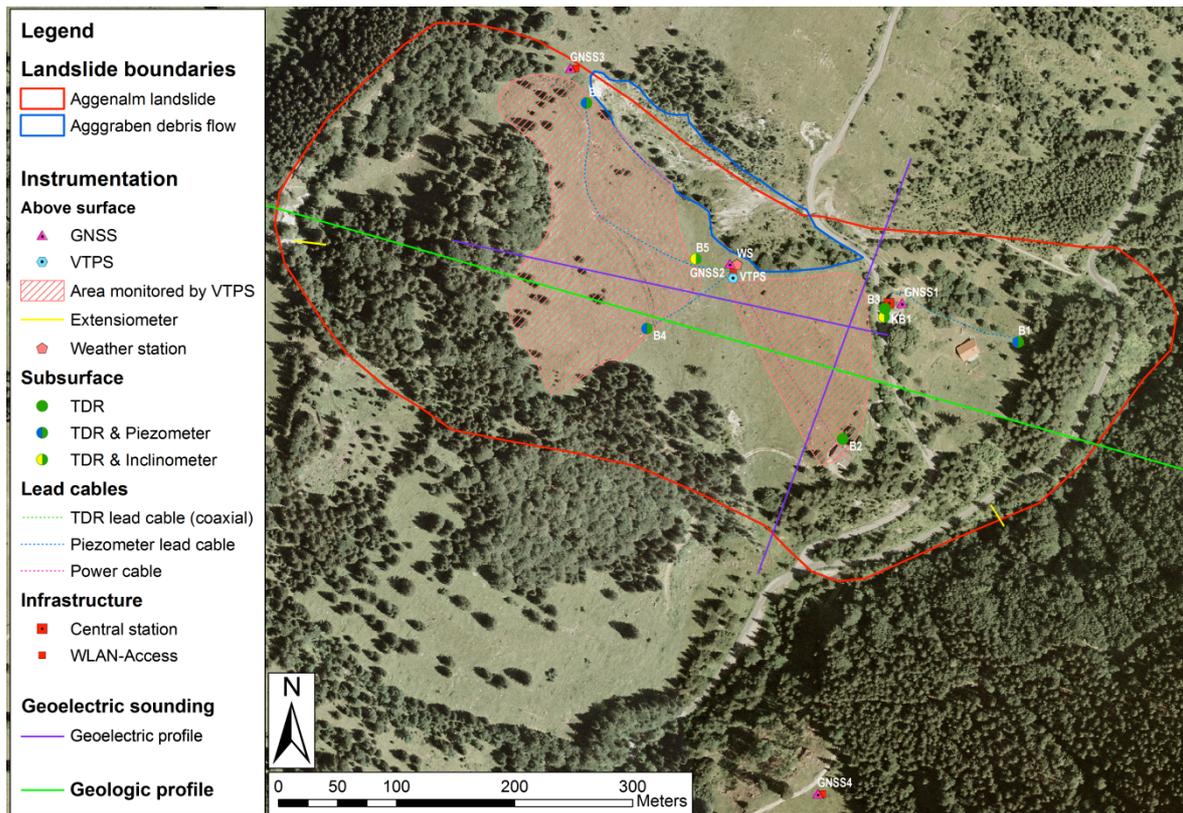


Abb. 17: Positionen der Bohrungen und der übrigen Messsysteme auf der Aggenalm Hangbewegung (SINGER et al. 2009).

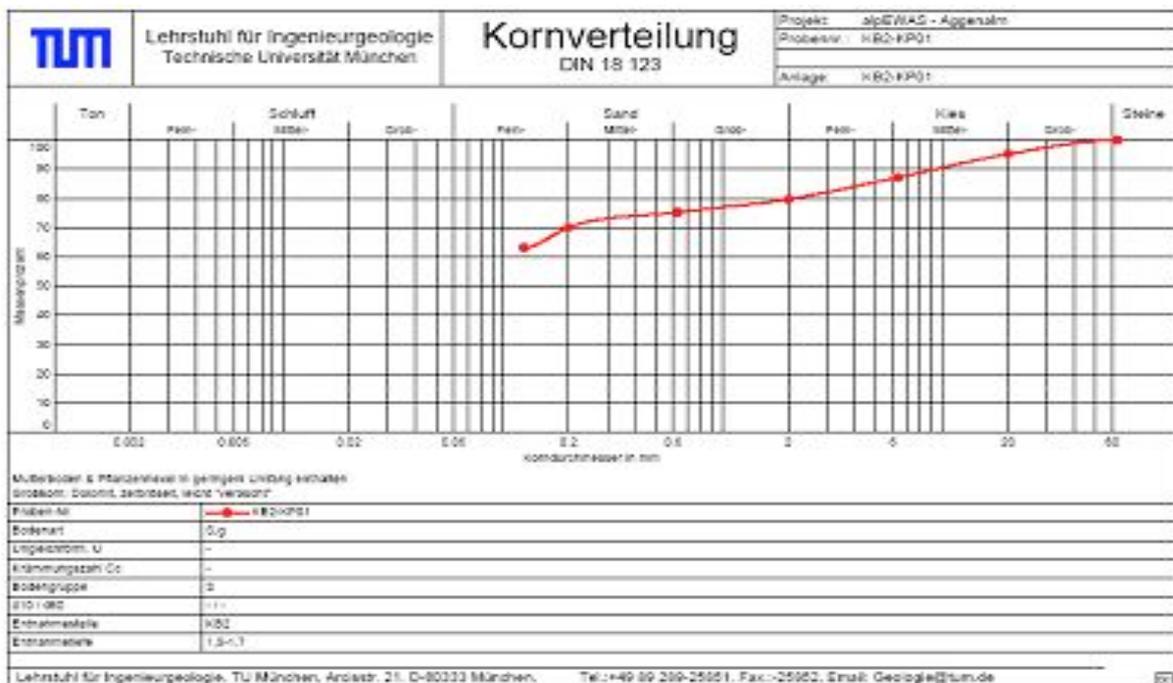


Abb. 18: Kornverteilung der Probe KB2-WG5.

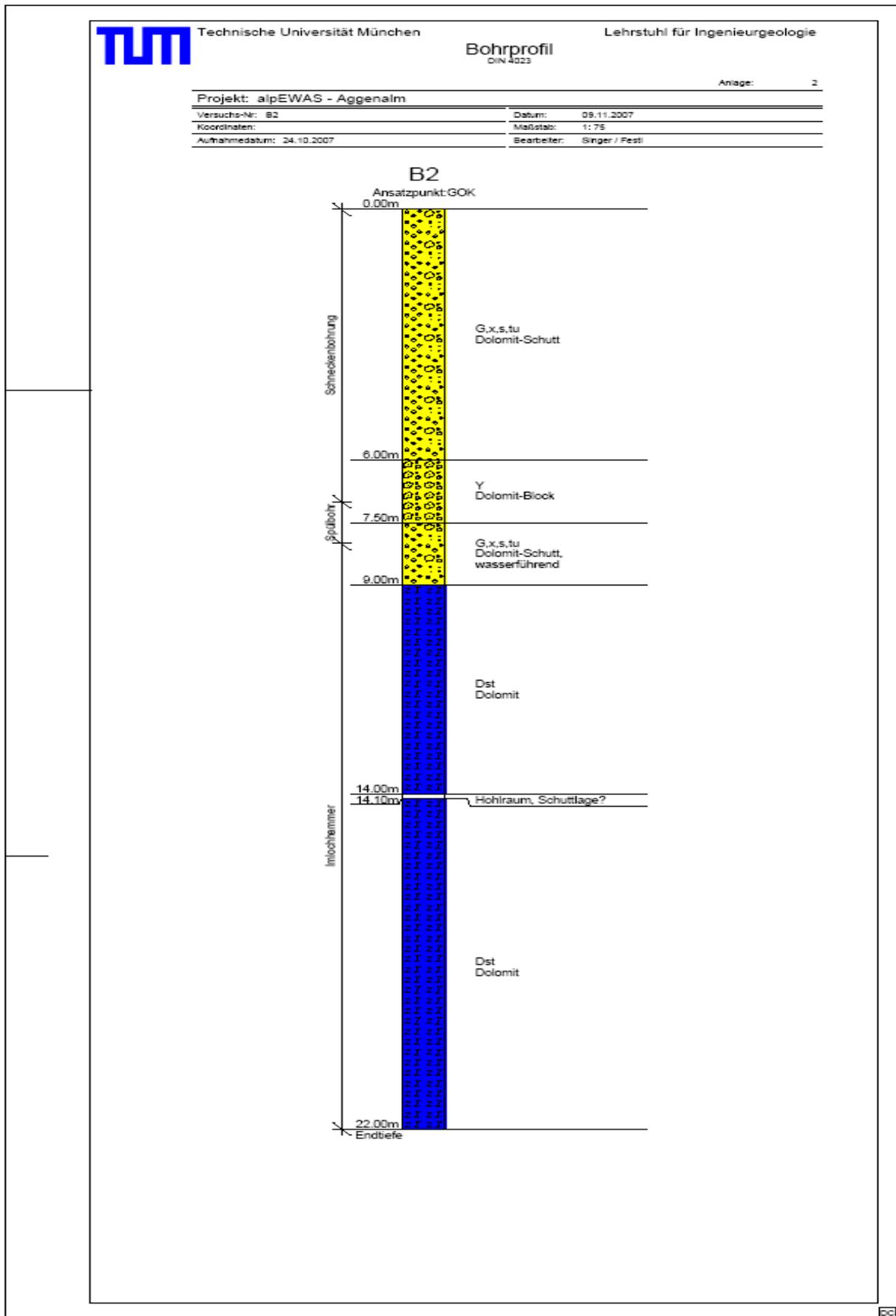


Abb. 19: Bohrprofil der Bohrung B2.



Abb. 20: Bohrmannschaft beim Abteufen einer Bohrung an der Aggenalm Hangbewegung.

2. Kohäsion (cohesion) c :

Die Kohäsion umfasst grundsätzlich die zusammenhaltenden (Bindungs-) Kräfte in bindigen, d. h. feinkörnigen, ton- und schluffreichen Böden, wobei sie eine Funktion des Wassergehaltes ist.

3. Reibungswinkel (friction angle) φ :

Die Reibung ist eine physikalische Kraft, die einer Relativbewegung zweier einander berührender Körper entgegenwirkt. Diese Körper können zwei Bodenschichten sein, genauso wie zwei Bodenpartikel, die aneinander reiben.

4. Zugfestigkeit (tensile strength at break):

Die Zugfestigkeit ist die Spannung, die im Zugversuch aus der maximal erreichten Zugkraft bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt der Probe errechnet wird.

5. E-Modul (modulus of elasticity) E :

Das Elastizitätsmodul ist ein Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt.

6. Poissonzahl (poisson ratio) ν :

Die Poissonzahl ist definiert als das Verhältnis aus relativer Dickenänderung zur relativen Längenänderung bei Einwirkung einer äußeren Kraft oder Spannung. Die Poissonzahl liegt üblicherweise zwischen 0 und 0,5 (für isotrope Materialien). Typische, häufige Werte der Poissonzahl liegen zwischen 0,1 und 0,4. Bei einer Poissonzahl $\nu = 0,5$ bleibt das Volumen eines elastischen Körpers unter Belastung konstant. Die Inkompressibilität bleibt dann nur für infinitesimale Verformungen gewahrt.

Tab. 2: Eigenschaften der Proben aus der Bohrung B2

Proben-Nr.	Entnahmetiefe [m]	Wassergehalt	Bodenart (Geländeansprache)	Dichte (g/m ³)
KB2-WG1	1,75	49,73%	TU, g, s'	2,2
KB2-WG2	4,65	5,12%	G, t, u*, s	2,2
KB2-WG3	8,30	4,09%	G, x, t, u, s'	2,25
KB2-WG4	13,00	6,30%	G, s*, t, u'	2,70
KB2-WG5	17,40	5,30%	G, s*, t, u	2,70
KB2-WG7	20,80	9,49%	G, s*, t, u'	2,75

2.6. Hydrogeologie

Generell sind hydrologische Einflüsse bedeutende Faktoren, die zu Hangbewegungen beitragen bzw. sie sogar auslösen können. Dabei spielen besonders Regenfälle und die durch sie verursachten Änderungen im hydrologischen System (z.B. durch Infiltration) eine große Rolle. Weltweit betrachtet sind hydrologische Einflüsse ein häufigerer Auslöser von Hangbewegungen als zum Beispiel Erdbeben (VAN ASCH 1999).

Es gibt in Abhängigkeit des Systemzustands viele Haupttypen hydrologischer Mechanismen, die die Schwelle des erstmaligen Auslösens einer Hangbewegung beeinflussen können. Dies gilt auch und besonders für reaktivierte Hangbewegungen und deren Fortschritt. Hydrologische Systeme sind meistens sehr komplex. Darüber hinaus können sich wichtige Parameter wie z.B. Drücke oder das Abflussverhalten im Verlauf der Hangbewegung ändern (z.B. durch Änderungen der Topographie).

Das Gebiet des Sudelfeldes ist ein Teil der Nördlichen Kalkalpen. Hier wird das Klima durch die Berge beeinflusst. Der Durchschnitt der Jahresniederschlagsmengen (zwischen 1931 und 1960) der benachbarten Stationen Bayrischzell und Brunnsteinhaus liegt etwa bei 1590 mm/Jahr.

2.6.1. Oberflächlicher Abfluss

2.6.1.1. Quellen

Im Projektgebiet liegen mehrere Quellen. Einige Rohre lassen das Wasser unbekannter Quellen in der Höhenkote 1190 m zu einer Viehtränke fließen. Somit wird zwar das Wasser an einer Stelle des Hanges abgeführt, an einer anderen Stelle wird der Hang jedoch dadurch durchnässt. Abschließend wird jedoch diese Stelle durch einen Bach an der südlichen Begrenzung der Hangbewegung entwässert.

2.6.1.2. Bäche

Das größte Fließgewässer des Gebietes ist der Gassenbach, der im Südosten in das Projektgebiet eintritt und es im Nordosten verlässt. Die Tiefenerosion durch den Gassenbach könnte eine weitere Bewegung des Hanges begünstigen, was deswegen durch Gefällestopfen verhindert wird. Ein kleinerer Bach nördlich der Schindelbergalm fließt in südwestlicher Richtung in den Gassenbach. Mehrere Gerinne und Kleinbäche dienen der Entwässerung des Hanges. Das Wasserwirtschaftsamt Rosenheim installierte 1997 Pflastersteine und Gabbionen zur Verhinderung von Erosion. Trotzdem dringt das Wasser am Schwemmfächer in den Untergrund ein und speist das Grundwasser.

2.6.1.3. Schluckloch

Am südlichen Rand der Hangbewegung wurde ein Schluckloch an der Höhenkote 1160 m angetroffen. Zwischen den beiden Aufschlüssen in dem unterhalb liegenden Oberrhätalkalk und dem darüber liegenden Oberrhätadolomit mündet eine kleine Kriechmasse. Diese wiederum mündet in eine große Erosionsrinne, welche sich an der Südseite der Hangbewegung entlang zieht. Ca. 5 m nördlich des Schlucklochs beginnt eine Vernässungszone, in die wahrscheinlich auch die Kriechmasse entwässert. Das Schluckloch ist nicht unbedingt auf Karsterscheinungen zurückzuführen, obwohl diese in den Oberrhätalkalen in der Umgebung zu finden sind. Es könnte auch auf Hohlraumbildungen infolge der hier auftretenden Zugbewegungen der immer noch andauernden Hangbewegung zurückzuführen sein.

2.6.1.4. Vernässungszonen

Zahlreiche große Gebiete zeigen eine deutliche Vernässung, was auf wasserstauende Schichten im Untergrund schließen lässt. Dies sind vor allem die Kössener Mergel, die hauptsächlich in den Randbereichen der Hangbewegung auftreten.

2.6.2. Grundwasserverhältnisse

Die Grundwasserverhältnisse im Arbeitsgebiet können nur anhand von Geländebeobachtungen bestimmt werden. Die mergeligen Gesteine (Kössener Mergel, mergelige

Allgäu-Schichten und Grundmoränenablagerungen) und deren Verwitterungsprodukte wirken als Grundwasserstauer und können somit auch Vernässungen und durchfeuchtete Bereiche bedingen. An den vorwiegend steilen Hängen kann eine nennenswerte Grundwasserneubildung nur in Bereichen erfolgen, an denen die anstehenden Gesteine sehr wasserdurchlässig sind, da ansonsten ein großer Teil der Niederschläge oberflächlich abfließen würde. Aufgrund des zeitweilig hohen Anfalls an Niederschlagswasser ist von starken Schwankungen des Grundwasserspiegels auszugehen.

2.7. Ursachen und Trigger

Hangbewegungen können von mehreren Faktoren verursacht werden. Faktoren die das Potential von Hangbewegungen verändern können sind z.B. Änderung der Hangneigung, Schwächung des Materials durch Verwitterung, Erhöhung des Wasseranteils, Veränderung der Vegetationsbedeckung und Veränderung der Lasten.

Generell begünstigt die in etwa hangparallele Orientierung der Gesteinsschichten im Bereich der Aggenalm die Entstehung einer Hangbewegung. Die Lagerung von kompetenten, festen Gesteinen (Oberrhätkalke) auf den weniger festen Kössener Schichten (insb. die darin enthaltenen Mergel) führt hier zu labilen Verhältnissen, da die Scherfestigkeit der Mergel nahezu erreicht oder sogar überschritten wird. Verstärkt wird dieser Effekt durch die langsame Verwitterung der Mergel, die sich im Laufe der Zeit zu einem tonreichen Residualgestein umwandeln. Dieser Verwitterungsprozess geht mit einer deutlichen Minderung der Gesteinsfestigkeit einher (NICKMANN 2005) und führt damit zu einer weiteren Destabilisierung des Hanges.

Die Berichte des Ereignisses von 1935, bei dem die gesamte Hangbewegung aktiviert wurde und diese so großflächige Zerstörungen verursachte, benennen heftige Niederschläge vermutlich während der Schneeschmelze als Auslöser (JUNG 2007). Dies erscheint unter Berücksichtigung des geologischen Modells durchaus als plausibel, da sich gerade im oberen Hangabschnitt innerhalb der Oberrhätkalke potentiell ein vergleichbar hoher Grundwasserspiegel ausbilden kann, der vermutlich direkt auf die Scher- bzw. Deformationszone wirkt. Die Messungen des Überwachungssystems konnten inzwischen zweifelsfrei eine Beeinflussung der Hangbewegung durch Niederschlagsereignisse bzw. durch einen Anstieg des Grundwassers nachweisen.

Abb. 21 zeigt die verschiedenen Ursachen für die Instabilität des Hanges am Sudelfeld.

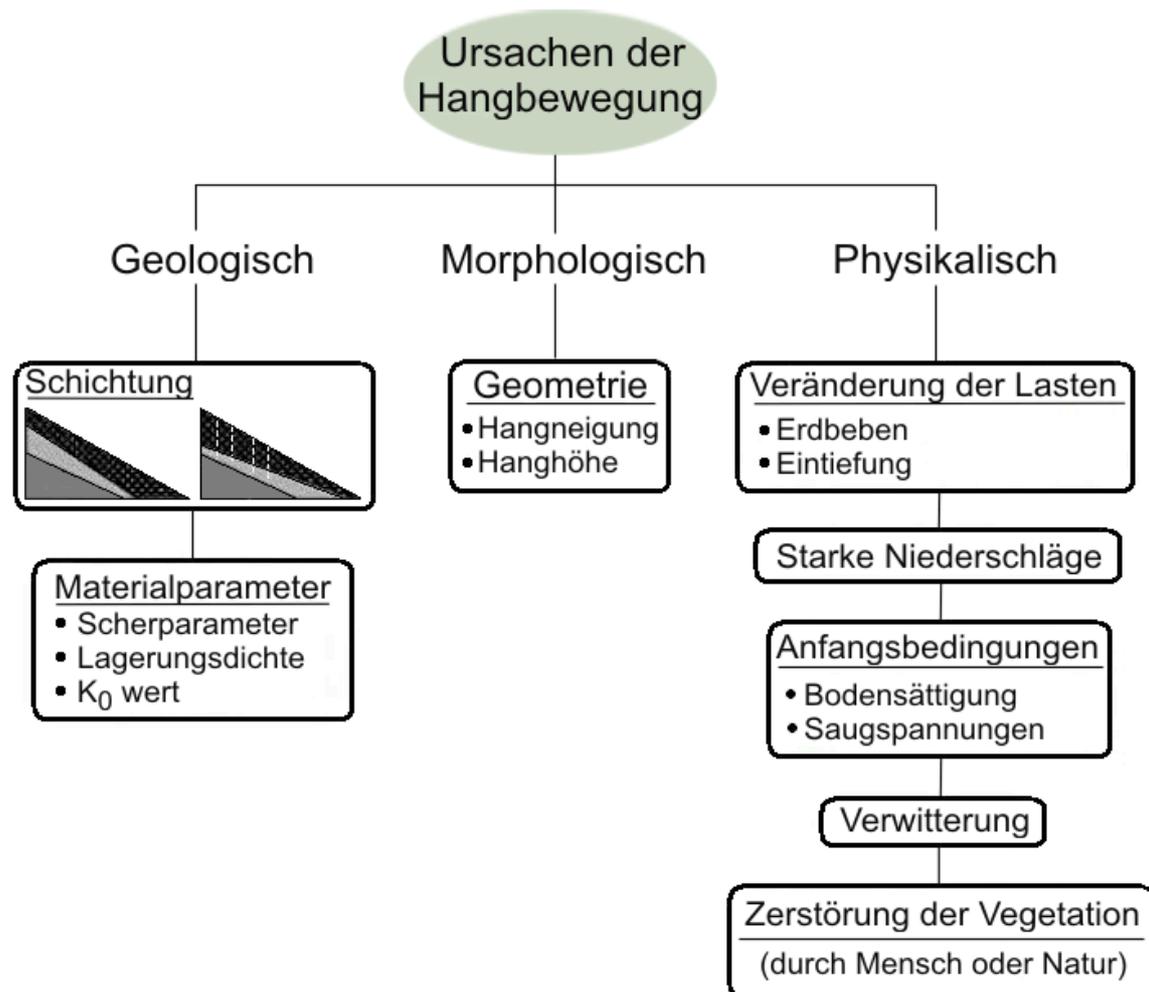


Abb. 21: Zusammenstellung der Ursachen der Hangbewegung an der Aggenalm.

2.7.1. Geologische Ursachen

2.7.1.1. Veränderliche Festigkeit der Mergelgesteine

Die Festigkeit veränderlich fester Gesteine kann sich kurzfristig durch Erhöhung des Wassergehalts vermindern. Die bereits angesprochenen Mergel haben diese Eigenart und werden nach Niederschlägen schwächer sein als im trockenen Zustand. Langfristig können Verwitterungsprozesse, die mit einer Entkalkung der Mergel einhergehen, die Festigkeit der Mergel deutlich reduzieren. Dadurch können sich in ihnen bevorzugt Gleitbahnen ausbilden.

2.7.1.2. Verschiedene Wasserdurchlässigkeit der Gesteine

Die Schichten des Projektgebiets besitzen verschiedene Wasserdurchlässigkeiten. Die groben Ablagerungen sind stets besser wasserdurchlässig als die feinerkörnigen Schichten wie z.B. die Kössener Mergel, was zur Ausbildung von lokalen Grundwasserhorizonten über den Wasserstauern führen kann. Bei ungünstiger geometrischer

Konstellation können sich hier ggf. kurzfristig nach Niederschlägen hohe Porenwasserdrücke aufbauen. Dies kann zur Bewegung des Hanges beitragen.

2.7.1.3. Verwitterung des Materials

Die Verwitterung ist eine wichtige Ursache für die Bewegung. Durch Temperaturänderungen z.B. können im festen Fels Klüfte entstehen. Bei feinkörnigen Gesteinen wie z.B. Mergeln erzeugen exogene Prozesse andere Verwitterungsbilder. Die Mergel sind durch die orogenen Vorgänge bei der Entstehung der Nördlichen Kalkalpen bereits stark von Klüften durchtrennt. Auch ihre geringe Gesteinsfestigkeit trägt zur chemischen und physikalischen Verwitterung bei, wodurch letztlich ein bindiges Lockergestein entsteht, dessen Winkel der inneren Reibung stark herabgesetzt ist und das so leicht als Scherhorizont für kleinere und größere Hangbewegungen dienen kann.

2.7.1.4. Morphologische Ursachen

Geomorphologische Untersuchungen können auf die Komplexität von Hangbewegungen hinweisen und daher auch helfen, das unvermeidbare Defizit abstrakter Modelle zu beschreiben. Diese Phase ist in vorangegangenen Untersuchungen oft ignoriert worden. Ein eingehendes Untersuchungs- und Überwachungsprogramm für eine Hangbewegung bedarf daher der Kombination von geomorphologischen, geotechnischen, geophysikalischen und hydrologischen Analysen (BOGAARD 2001).

Spezifische geomorphologische Analysen ermöglichen die Rekonstruktion der beteiligten Prozessarten (Typ, Mechanismus, Richtung, etc.) und unter Umständen auch der Reihenfolge der Kinematik während der Hangbewegung (GEERTSEMA & POJAR. 2007).

Charakteristische geomorphologische Kennzeichen zur Identifizierung von Hangbewegungen können in deren Abrissgebiet, im Entwicklungsgebiet und im Ablagerungsgebiet gefunden werden. Im Abrissgebiet liefern die Geometrie des Abrisses, die Hangneigung (Abb. 22) sowie die Verformung der Oberfläche wichtige Hinweise, um die Geometrie der Hangbewegung zu bestimmen. Die Kleinräumigkeit der Landschaft, das Muster von Rücken und Spalten sowie die äußere Kontur des Rutschkörpers (eher längliche oder eher seitliche Ausbreitung) können Hinweise hinsichtlich eines Schiebens oder Fließens des Materials liefern. Dies können im Ablagerungsbereich die Form und die Steilheit des Frontbereichs der bewegten Masse sowie eventuell ebenfalls das Muster von Rücken und Spalten anzeigen. Die Frische der Spalten, Lineationen und eine gestörte Topographie sowie der Grad, die Form und das Alter des Vegetationsbewuchses liefern Hinweise auf eine eventuell noch andauernde Aktivität der Hangbewegung (CROZIER 1986). Tab. 3 listet typische Hangneigungen für unterschiedliche Materialien auf.

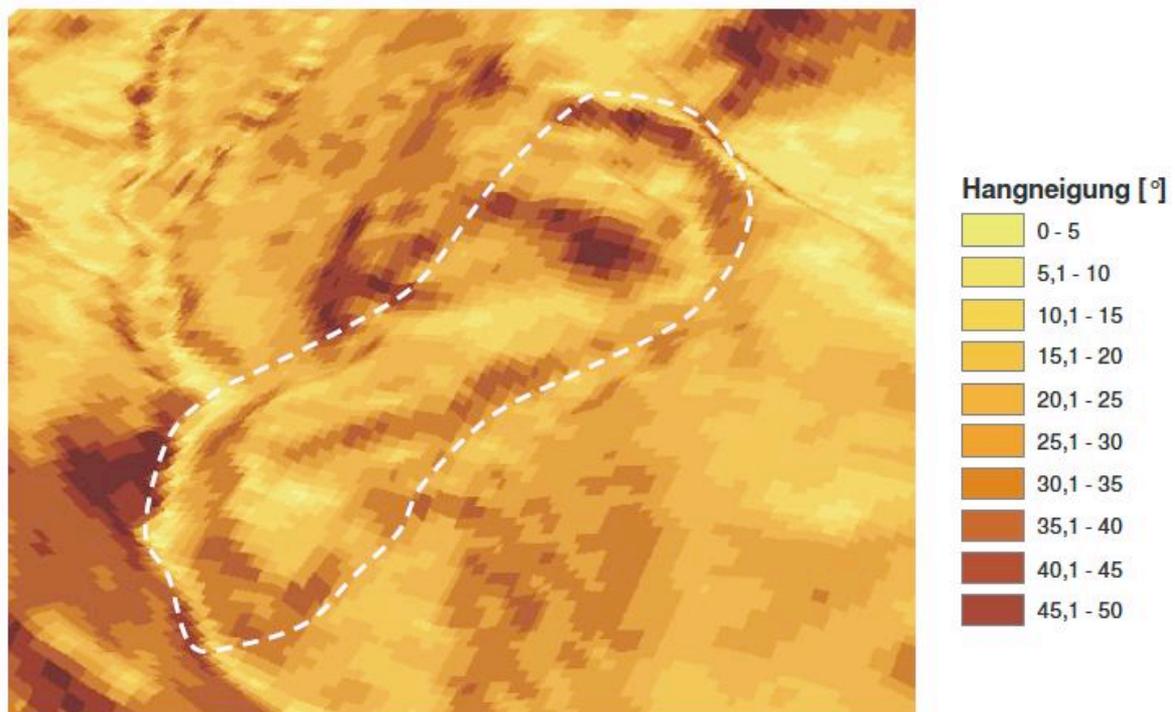


Abb. 22: Hangneigungen an der Aggenalm Hangbewegung (JUNG 2007: Abb. 11).

Tab. 3: Typische maximale Hangneigungen von verfestigtem Material aus LÖWNER et al. (2005) nach CARSON & KIRKBY (1972).

Material	Hangneigung (°)
Felsblockmaterial, augenscheinlich kohäsionslos, hohe Lagerungsdichte	43 - 45
Material wie oben aber geringere Lagerungsdichte	33 - 38
Diamiktes Material (gemischte Korngrößen), mit hohem Porenwasserdruck	25 - 38
Sandiges Material	19 - 21
Tone	8 - 11

2.7.2. Physikalische Ursachen

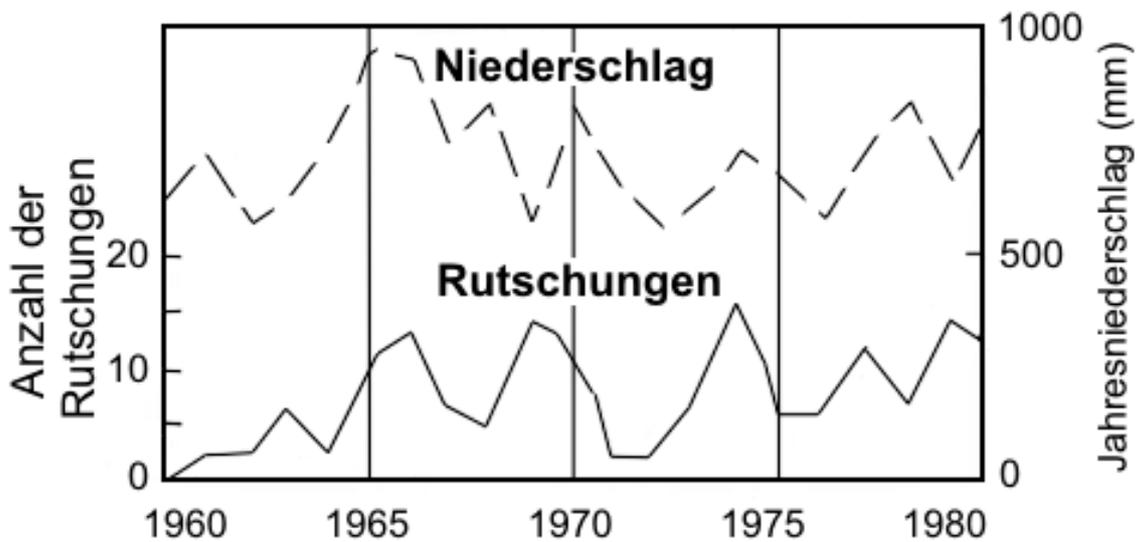
2.7.2.1. Starke Niederschläge

Die durchschnittliche jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge kann der folgenden Tab. 4 entnommen werden (Die angegebene Prozentzahl zeigt den Anteil des Monats an dem Gesamtniederschlag im Jahr).

Auf Grund der weltweiten Änderung des Klimas, besonders in Europa und in den Alpen, sind häufig schwere Niederschläge eine Hauptursache für Hangbewegungen (ALCAMO et al. 2007). Nach KRAUTER (2002) gibt es eine Abhängigkeit der Beschleunigung und der Schwere von Niederschlägen (Abb. 23). Der Einfluss der Niederschläge kann sich auf die Hangbewegungen erst Wochen bis Monate verzögert bemerkbar machen.

Tab. 4: Durchschnittliche monatliche Verteilung der Niederschläge im Sudelfeld Gebiet im Jahr 1997 (JUNG 2007).

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
mm	114,5	106,5	103,4	108,1	144,7	195,6	217,8	176,5	133,6	108,1	90,6	90,6
%	7,2	6,7	6,5	6,8	9,1	12,3	13,7	11,1	8,4	6,8	5,7	5,7

**Abb. 23:** Zusammenhang zwischen Anzahl der Rutschungen und der jährlichen Niederschläge (KRAUTER 2002).

2.7.2.2. Porenwasserdruck

Der Porenwasserdruck ist die Spannung in den wassergefüllten Poren des Bodens. Er setzt sich zusammen aus dem Druck durch die Eigenlast des Wassers in einer bestimmten Tiefe und einem eventuellen Überdruck. Der Porenwasserüberdruck wird durch allmähliches Abströmen des Porenwassers langsam abgebaut (WORMUTH & SCHNEIDER 2007).

Ein negativer Porenwasserdruck (nur teilweise Befeuchtung der Poren) erhöht die Kohäsion, während positiver Porenwasserdruck (Wasser füllt Poren vollständig aus) die Kohäsion schwächt und somit die Grenzscherfestigkeit vermindert. Ein hoher Porenwasserdruck ist in den meisten Fällen ein auslösender Faktor für Hangbewegungen. Abb. 24 zeigt den Porenwasserdruck der Hangbewegung Sudelfeld, gemessen an zwei Piezometern.

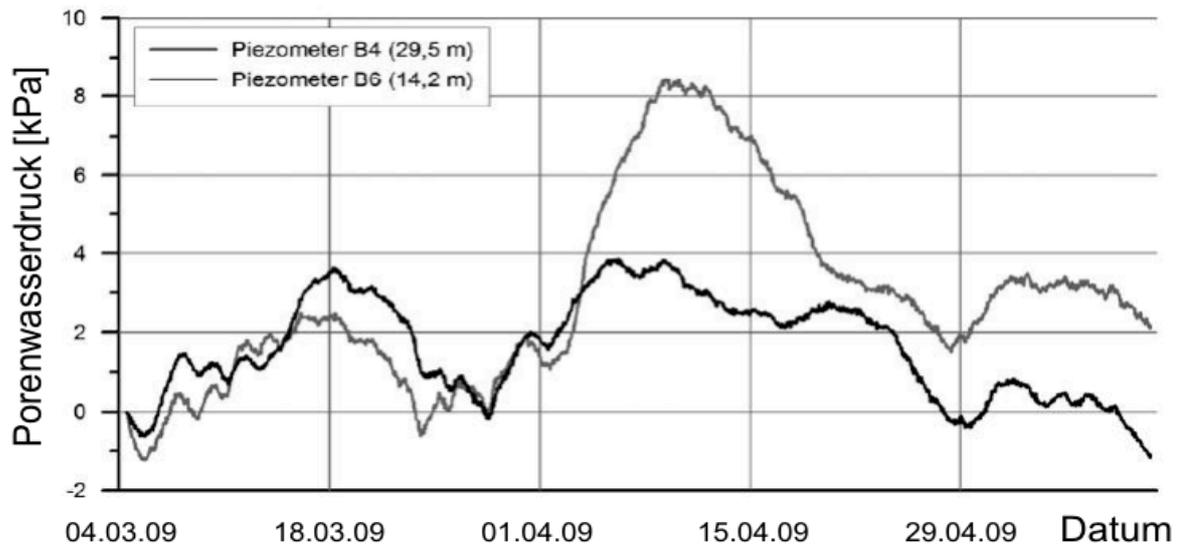


Abb. 24: Porenwasserdruck zweier Piezometer verbaut in Bohrung B4 und B6 an der Hangbewegung Sudelfeld über einen Zeitraum von etwa 2 Monaten (März-April 2009).

2.7.2.3. Einfluss der Vegetation

Vegetation kann auf unterschiedliche Weise auf Hangbewegungen wirken. Sie beeinflusst durch Transpiration, Evapotranspiration, Evaporation und Wasseraufnahme den Wasserhaushalt des Bodens. (Abb. 25), und kann so z.B. die Wirkung starker Niederschlagsereignisse abmildern.

Andererseits kann durch Wurzelsprengung auch der ursprüngliche Gesteinsverband aufgelockert werden, was die Wasserwegsamkeit des Untergrunds erhöhen und die Verwitterung beschleunigen kann. Dies kann unter Umständen eine Hangbewegung sogar noch befördern.

2.7.2.4. Zerstörung der Vegetation

Laut dem WASSERWIRTSCHAFTSAMT ROSENHEIM (o. J.) zerstörte die Hangbewegung am 22. April 1935 ungefähr 4 ha Wald. Dies könnte später nachfolgende Bewegungen – insb. die Murtätigkeit – begünstigt haben, da durch die fehlende Vegetation eventuelle Starkregenereignisse in ihrer Wirkung auf den Grundwasserspiegel weniger abgepuffert wurden.

2.7.2.5. Taufluten

In den relativ warmen Jahreszeiten (Frühling und Sommer) sind die Niederschläge hoch. Im Zeitraum der Schneeschmelze erreicht der oberflächliche Abfluss ein Maximum, somit können hier besonders schnelle Veränderungen des Wasserspiegels auftreten. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn starke Niederschläge in der Zeit der Schneeschmelze auftreten.

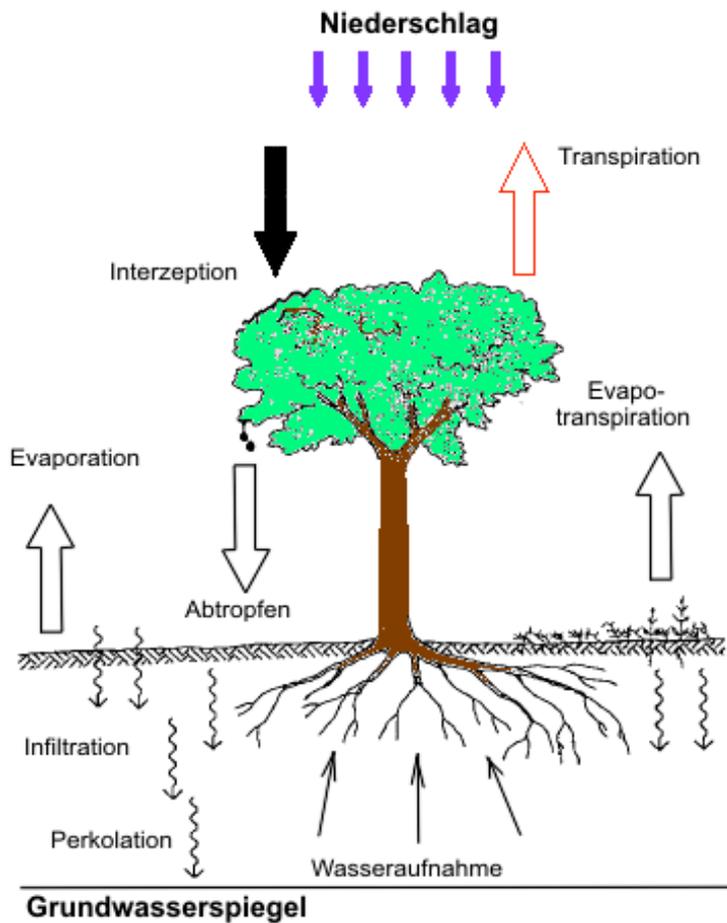


Abb. 25: Prozesse des Wasserhaushalts im Boden und Einfluss der Vegetation.

2.7.2.6. Erdbeben

Erdbeben verursachen massive Krafteinwirkungen. Die horizontalen Kräfte haben dabei den größten Einfluss auf Hangbewegungen. In allen Projekten der Geotechnik müssen diese Kräfte erkannt und in den Berechnungen zugewiesen werden. Die ganze Welt ist in verschiedenen Erdbebenzonen eingeteilt. Die Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 4149 sind in Abb. 26 dargestellt. Das Projektgebiet liegt hierbei in Klasse 0, das bedeutet, dass Erdbeben hier relativ unwahrscheinlich ist. Sie können aber auch nicht ausgeschlossen werden.

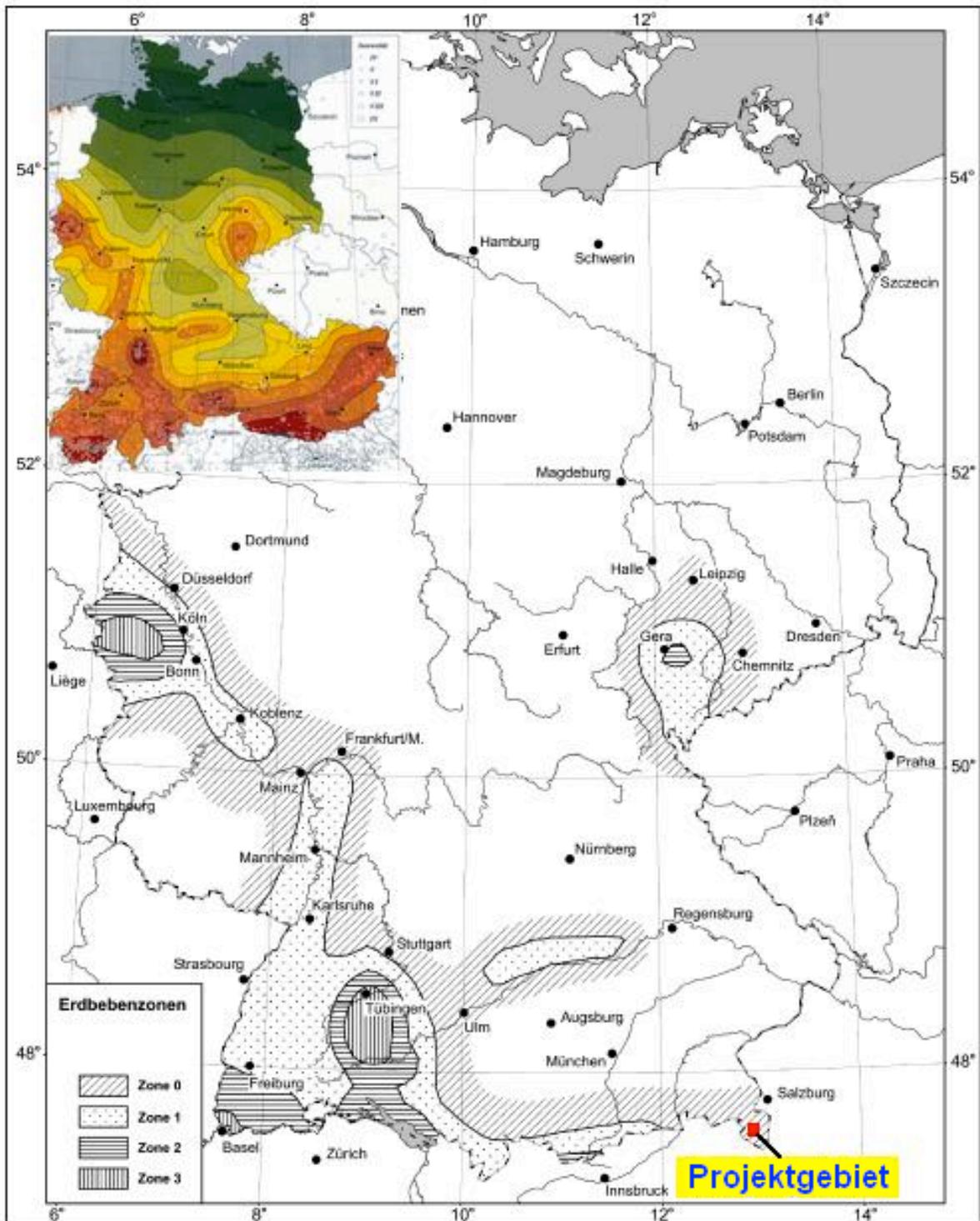


Abb. 26: Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland (DIN 4149).

3 Monitoring der Aggenalm Hangbewegung

Es ist wichtig, die genauen aktuellen Bewegungen mit verschiedenen Methoden zu erfassen, da ein Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen des Modells eine Kalibrierung der Modellierung ermöglicht.

3.1. Messverfahren

Der Verlauf der Bewegung des Hanges kann mit verschiedenen Monitoringverfahren detektiert werden. Dabei können geophysikalische, geodätische und geotechnische Methoden unterschieden werden. Daneben kann ein Monitoring auch mit Bildverarbeitung (Fotografie, Videoaufnahmen) erfolgen (WUNDERLICH 1995).

Zusätzlich müssen klimatische und dynamische Einflussfaktoren erfasst werden. Hierzu dienen meteorologische Messungen, Vergleiche von Niederschlägen, Pegelständen und Quellschüttungen sowie Erschütterungsmessungen (Erdbeben). Aus dem Zusammenspiel von kinematischem und dynamischem Modell kann eine Gefahrenanalyse erstellt werden (LINKWITZ 1991, MATTHESIUS 1995, KUNTSCHKE 1996).

3.1.1. Geodätische Messverfahren

Die geodätischen Verfahren des Geomonitorings zielen auf die Überwachung der räumlichen Lage eines Objektes ab, wobei dies von einer eindimensionalen Komponente (z. B. die Höhe eines Punktes bei Setzungsmessungen) bis zur dreidimensionalen Erfassung (Lage und Höhe eines Punktes) reichen kann. Über den zeitlichen Verlauf der Bewegung lassen sich in der Folge Geschwindigkeiten und Bewegungsvektoren berechnen. Die eingesetzten Technologien reichen von Nivellment über trigonometrische Punktbeobachtung und Verfahren der Satellitengeodäsie bis zur Photogrammetrie. Bei all diesen Verfahren würde die Oberfläche des beobachteten Objektes überwacht.

Eine klassische geodätische Monitoringmethode ist die Tachymetrie. Mit Hilfe von elektronischen Tachymetern und am Objekt montierten Reflektoren kann man mögliche Hangbewegungen überwachen.

3.1.2. Geotechnische Messverfahren

Die große Gruppe der geotechnischen Methoden umfasst den Einsatz verschiedenster Sensoren, die möglichst unmittelbar am oder innerhalb des zu beobachtenden Objektes angebracht werden. Sehr oft kommt es hierbei zur Installation in Bohrlöchern, die in Länge und Orientierung an die lokalen Gegebenheiten, den einzubauenden Sensor und die technischen Möglichkeiten angepasst werden. Geotechnische Sensoren arbei-

ten nach verschiedensten Prinzipien und dienen zur Erfassung von Längenänderungen, Neigungsänderungen, Temperaturen, Drücken oder Fließgeschwindigkeiten. Typische Vertreter der geotechnischen Instrumentierung sind:

3.1.2.1. Extensometer

Abb. 27 zeigt das Prinzip der am Sudelfeld angebrachten Drahtextensometer. Dabei wird ein Ende des Drahtes mit einem Befestigungsanker im Fels verbaut und das andere Ende über eine Spule gelenkt, welche wiederum an einem Baum befestigt ist. Abgelesen wird an einer am Baum befestigten Skala. Im Projektgebiet sind insgesamt drei Extensometer installiert, und zwar an der oberen Anbruchkante des Hanges und zweimal am Ende des Hanges von der Straße Richtung Gassenbach und über den Gassenbach installiert (ELLINGER 2008).

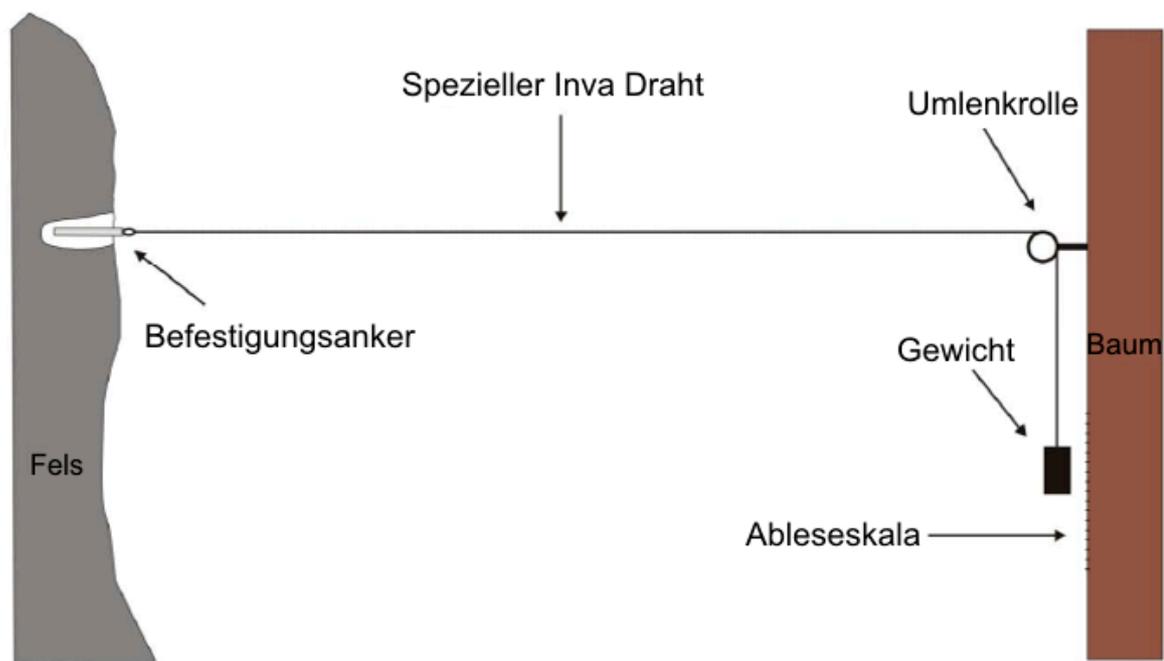


Abb. 27: Prinzip der am Sudelfeld installierten Drahtextensometer (ELLINGER 2008).

Abb. 28 zeigt die Daten der drei Extensometer von Januar 2006 bis Juli 2008. Auf der Abszisse ist der Zeitraum dargestellt, während die Ordinate eine Verkürzung des Drahtes und damit eine Längenänderung in cm veranschaulicht. Gemessen wurde im genannten Zeitraum am Berg und unterhalb der Straße je viermal und am Bach fünfmal.

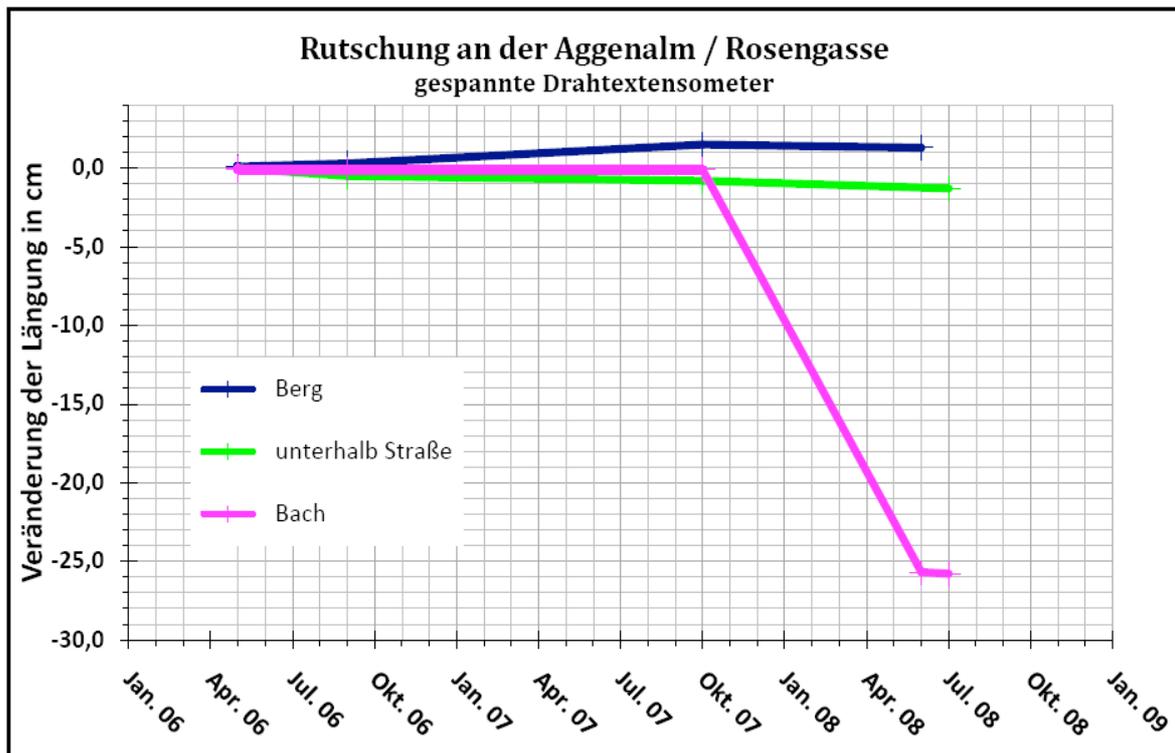


Abb. 28: Diagramm mit den Messdaten der drei Extensometer zwischen Januar 2006 und Juli 2008 (ELLINGER 2008).

Von Anfang 2006 bis Oktober 2007 sind keine großen Auffälligkeiten aller Extensometer zu beobachten, wobei am Berg eine kleine Extension des Drahtes von 1,5 cm festzustellen ist. Die Stationen am Berg und unterhalb der Straße zeigen auch während des restlichen Zeitraumes bis zum Abschluss dieser Arbeit keine nennenswerten Veränderungen. Außergewöhnlich anders verhält es sich mit dem Extensometer am Bach, welches eine erhebliche Verkürzung von 26 cm erfahren hat (ELLINGER 2008).

3.1.2.2. Crackmeter

Crackmeter werden z.B. an Rissen in Hauswänden angebracht und zeigen eine anhaltende Bewegung an. Crackmeter bestehen aus hochwertigem Kunststoff und sind deshalb robust und beständig sind gegen längere Aussetzung an verschiedenen Wetterverhältnissen. Weitere Vorteile sind die geringen Kosten und die einfache Installation (Abb. 29). Leider erbrachte diese Methode über den bislang betrachteten Zeitraum keine signifikanten Ergebnisse.

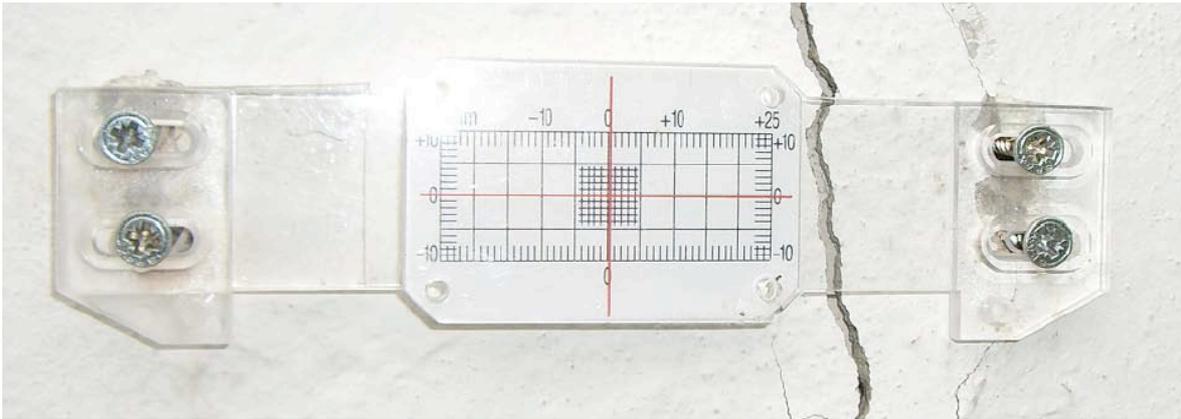


Abb. 29: Crackmeter an der Nordwand der oberen Lamplalm (ELLINGER 2008).

3.1.2.3. Inklinometer

Inklinometer wurden in zwei Messstellen am Sudelfeld platziert (KB1 und B5 in Abb. 17). Wie dem Deformationsprofil (summierte horizontale Verschiebung) der Bohrung B5 in Abb. 30 entnommen werden kann, hat sich das Inklinometerrohr zwischen den Messungen vom 4. März und 13. Mai 2009 deutlich verformt. Genau in dieser Zeit wurde im Piezometer B4 der bislang größte Anstieg des Grundwasserspiegels verzeichnet (vgl. Abb. 34). Das Deformationsprofil zeigt ein mehrfaches S-förmiges Durchbiegen des Inklinometerrohres, wobei die Deformationen in Summe nur eine sehr kleine Bewegung an der Oberfläche erzeugen (< 5 mm). Eine ausgeprägte Scherfläche, wie es von JUNG (2007) prognostiziert wurde, kann nicht festgestellt werden. Somit kommen 2 Ursachen für die Deformation in Frage:

- **Differenzielle Bewegungen innerhalb der Rutschmasse**

Der durch den hohen Grundwasserspiegel verursachte Auftrieb führt dazu, dass es zu differenziellen Bewegungen innerhalb der Blockschuttmassen kommt. Einzelne Blöcke oder Gesteinspartien rotieren dabei geringfügig, wodurch das Inklinometerrohr S-förmig verbogen wird. Da sich insgesamt keine wesentliche Horizontal-Verschiebung ergibt, ist anzunehmen, dass der Gesamtbewegungsvektor nahezu vertikal orientiert ist (Setzungsbewegung).

- **Stauchung des Inkinometerrohres unter Auftrieb**

Aufgrund der Probleme beim Ausinjezieren des Bohrlochs sind ein Ringspalt und/oder größere Hohlräume um das Inklinometerrohr vorhanden. Beim Anstieg des Grundwasserspiegels kommt das z.T. luftgefüllte Inklinometerrohr unter starken Auftrieb. Da das Rohr an der Oberfläche gut verankert und beschwert ist (Unterflurausbau), staucht sich das auftreibende Rohr dort, wo entsprechende Freiheitsgrade bestehen, S-förmig. Beim Absenken des Grundwassers geht die Deformation nur teilweise zurück.

Noch kann nicht sicher beurteilt werden, was für die Deformation verantwortlich ist, allerdings deutet das vergleichbar hohe „Rauschen“ der Inklinometermessungen darauf hin, dass die Einbettung des Inklinometerrohrs nicht optimal ist.

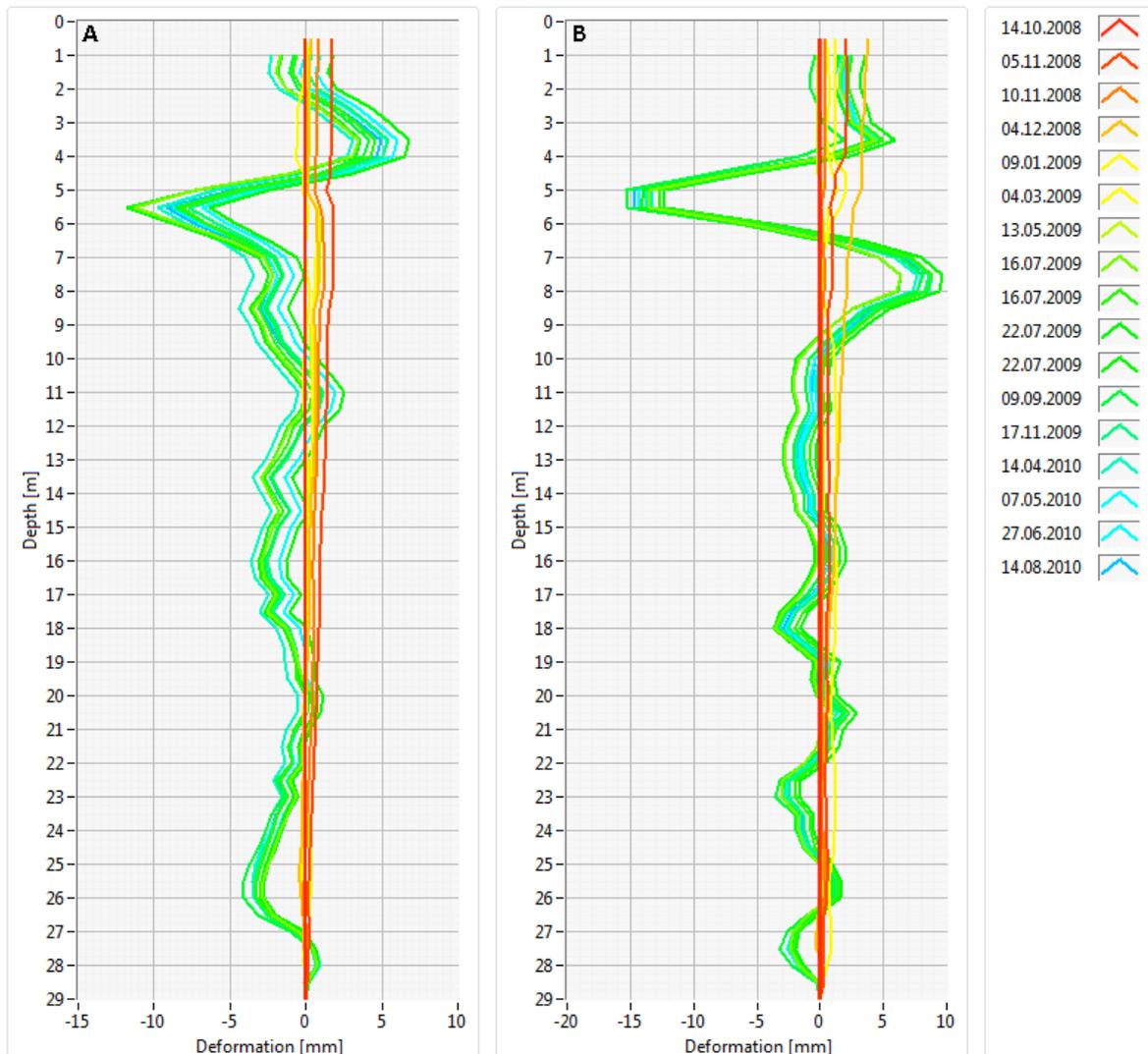


Abb. 30: Ergebnisse der Inklinometermessungen der Bohrung B5. Die Richtung -A entspricht in etwa der Falllinie des Hanges (Ost-Südost), +B weist in Richtung des Aggrabens (Nord-Nordwest).

3.1.2.4. Time Domain Reflectometry

Time Domain Reflectometry (TDR) ist mit einem Radarsystems vergleichbar (Abb. 31). Durch das Aussenden von elektromagnetischen Wellen mit bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Zeitspanne zwischen ausgestrahltem und empfan- genem Signal kann auf eine Distanz geschlossen werden (SINGER & THURO 2007).

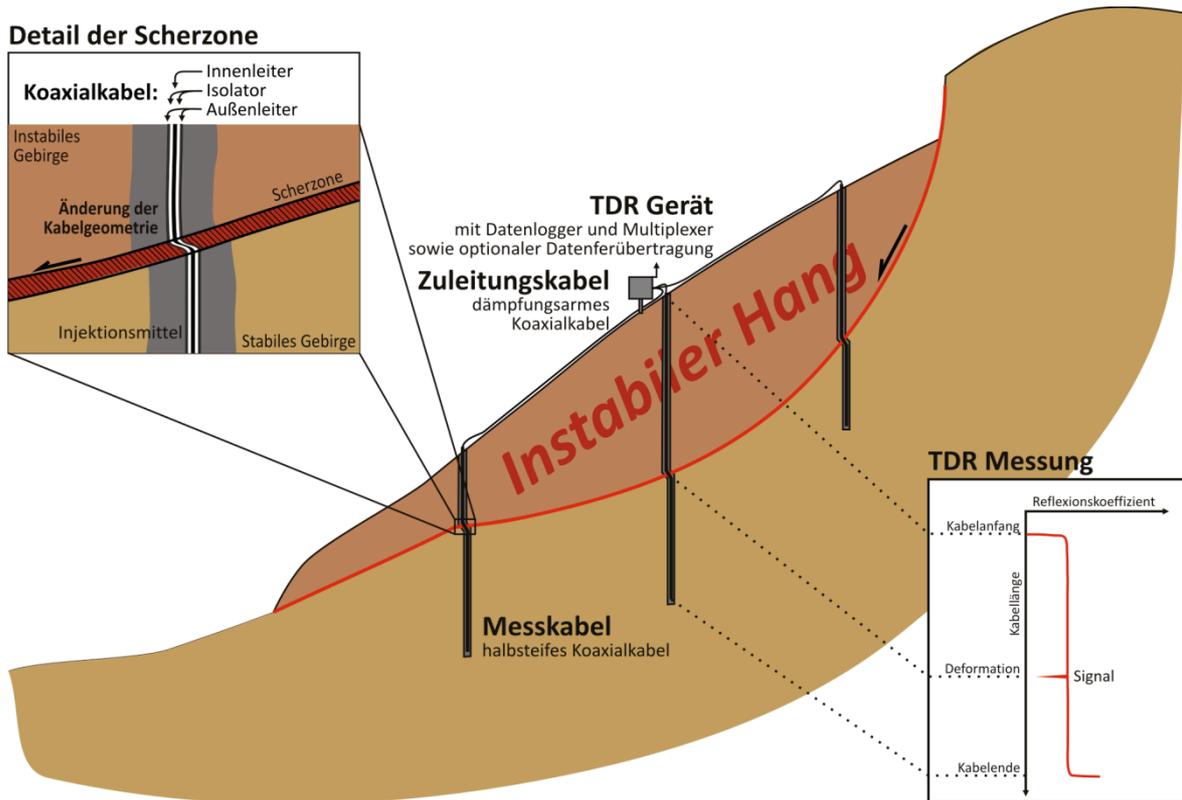


Abb. 31: Schematischer Aufbau einer TDR Deformationsmessstelle für Hangbewegungen (SINGER 2010).

Gemessen wurde am Sudelfeld durch das Einbringen eines Koaxialkabels in jedes Bohrloch (insgesamt sieben TDR-Messstellen im Hang), welches dann mittels eines Injektionsmittels mit dem Gebirge kraftschlüssig verbunden wird. Durch die Bewegung des Hanges an dieser Stelle wird das Kabel deformiert und es kann eine Veränderung der Impedanz festgestellt werden (SINGER & THURO 2006, 2007).

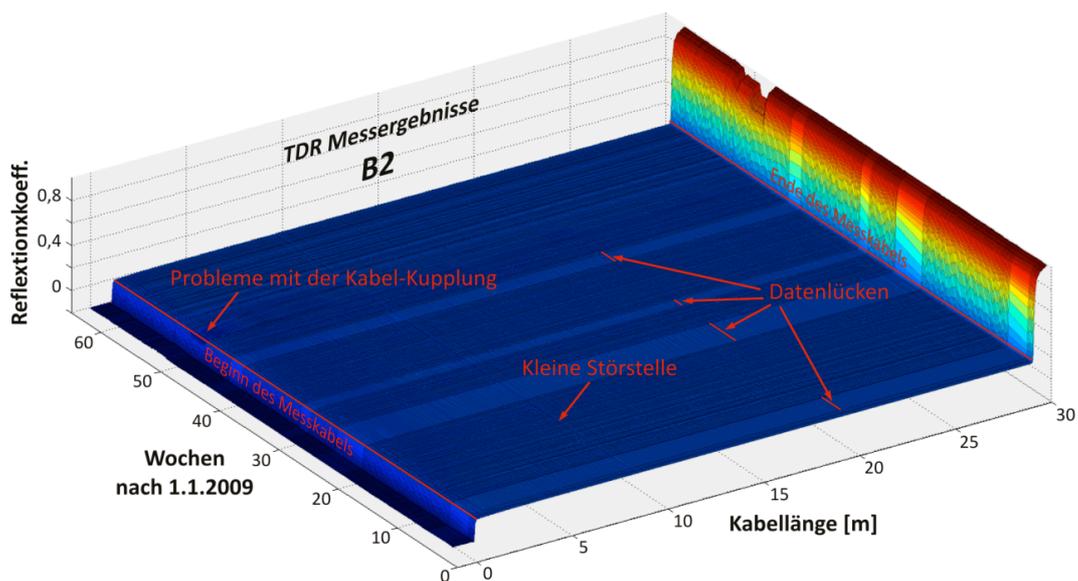


Abb. 32: Ergebnisse (Tagesmittel) der TDR Messungen der Bohrung B2.

3.1.2.5. Piezometer

Piezometer wurden nur in den Messstellen B1, B4 und B6 eingebaut. Die Messungen an der B1 und B4 wurden am 5. September 2008 und an der B6 am 2. September 2008 gestartet. Die Ergebnisse – im Kontext der parallel dazu durchgeführten GPS Messungen - zeigen eine schnelle Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit bei einer Erhöhung des Grundwasserspiegels, anschließend jedoch klingt die Bewegung bei gleichbleibendem Wasserspiegel wieder ab (Abb. 34).

3.1.2.6. Quellschüttungsmessungen

Quellschüttungen werden dem Wasserausfluss entsprechend als perennierend (dauernd), episodisch (unregelmäßig) oder periodisch (in Abständen regelmäßig) bezeichnet (MARTIN & EIBLMAIER 2001).

Veränderungen in der Quellschüttung zeigen infolge der Wechselbeziehung zwischen Niederschlag, Infiltration, Grundwasserneubildung und unterirdischem Abfluss einen jährlichen Gang. Eine Analyse dieser Veränderungen kann zur Bestimmung der hydrogeologischen Parameter des Quelleinzugsgebietes verwendet werden (MARTIN & EIBLMAIER 2001).

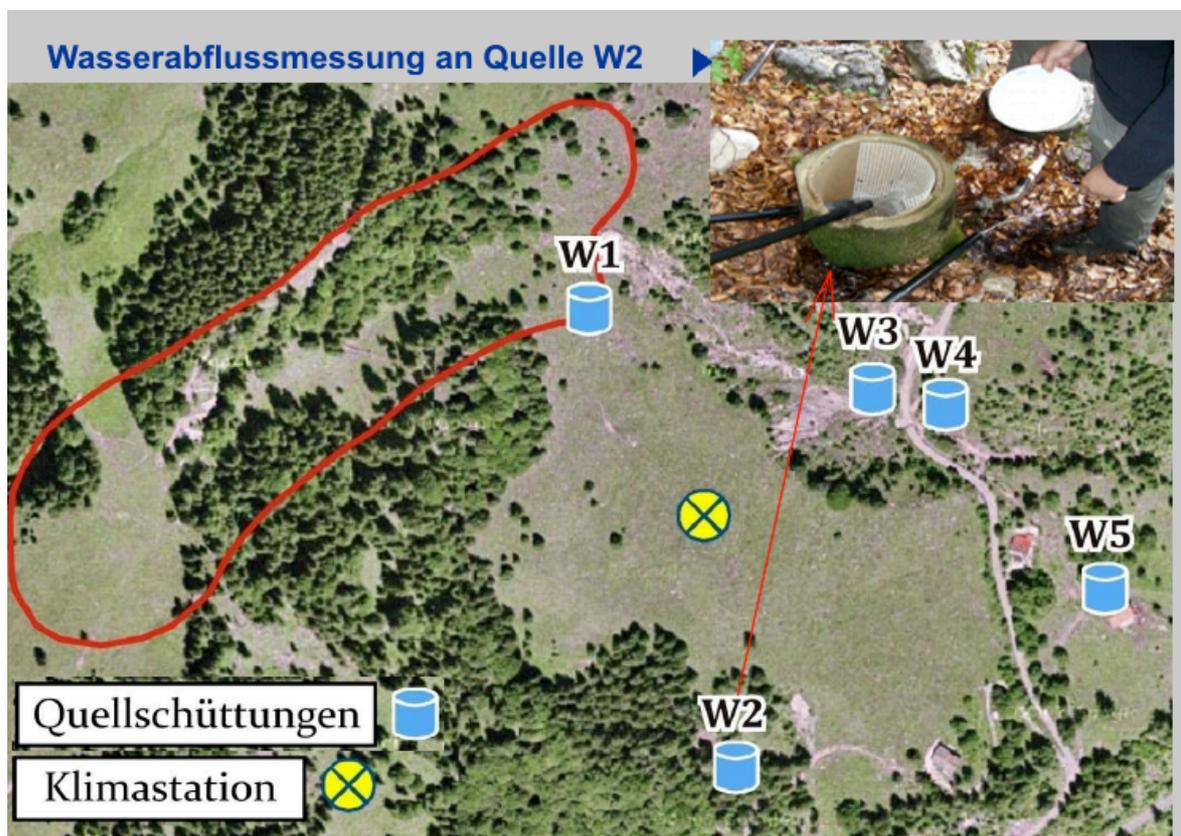


Abb. 33: Klimastation und Quellschüttungen am Sudelfeld (ELLINGER 2008).

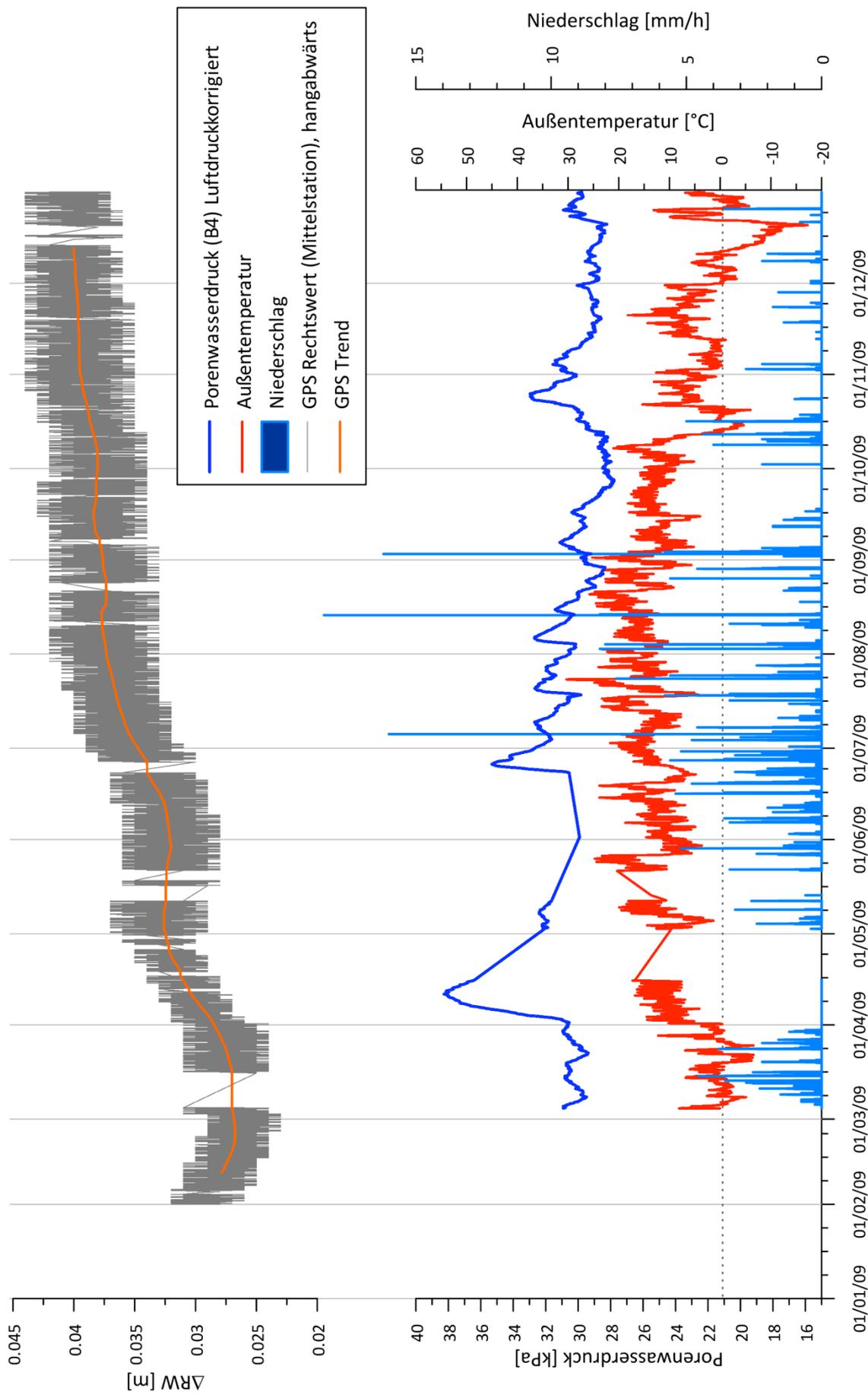


Abb. 34: Messwertreihen der im Bereich des Haupt-Sensorknotens installierten Messgeräte (Zeitraum Februar bis Dezember 2009).

3.1.3. Geophysikalische Verfahren

Erwähnt seien außerdem Messinstrumente, die auf geophysikalischer Basis arbeiten und so Rückschlüsse auf die Eigenschaften des beobachteten Objektes zulassen. An der Aggenalm Hangbewegung kam lediglich Geoelektrik als geophysikalisches Messverfahren zur Erkundung der Untergrundstruktur zum Einsatz. STÖRZBACH (2009) hat die Geoelektrik-Messkampagne durchgeführt und mehrere Geoelektrik-Profileschnitte längs und quer durch die Aggenalm Hangbewegung aufgenommen (Abb. 35). Diese zeigen, dass der Hangbewegungskörper klar in drei Bereiche geteilt werden kann:

- in einen oberen Abschnitt, der aus ca. 100 m mächtigem Oberrhätalk aufgebaut ist,
- in einen inhomogen aufgebauten mittleren Abschnitt, der vermutlich aus Schutt besteht, der stellenweise große Einzelblöcke aus Oberrhätalk enthält und stellenweise eher Feinkorn-dominiert ist und
- in einen unteren Abschnitt, in dem erneut Oberrhätalk auftritt, dessen Mächtigkeit allerdings ca. 40-50 m nicht übersteigt.

Dies kann nur so interpretiert werden, dass die Oberrhätalkplatte im Bereich der Aggenalm Hangbewegung durch die enge Faltung und tektonisch angelegte Störungen in mehrere Schollen zerlegt ist, die gegeneinander versetzt worden sind. Im zentralen Bereich der Hangbewegung ist die Oberrhätalkplatte augenscheinlich sogar unterbrochen, so dass die in diesem Bereich ca. 40 m mächtigen quartären Schutt-Ablagerungen direkt auf den Kössener Schichten zu liegen kommen. Der Schutt entstand vmtl. am Ende der letzten Eiszeit durch Steinschläge und Felsstürze aus den darüber liegenden Steilhängen aus intensiv zerklüftetem Oberrhätalk.

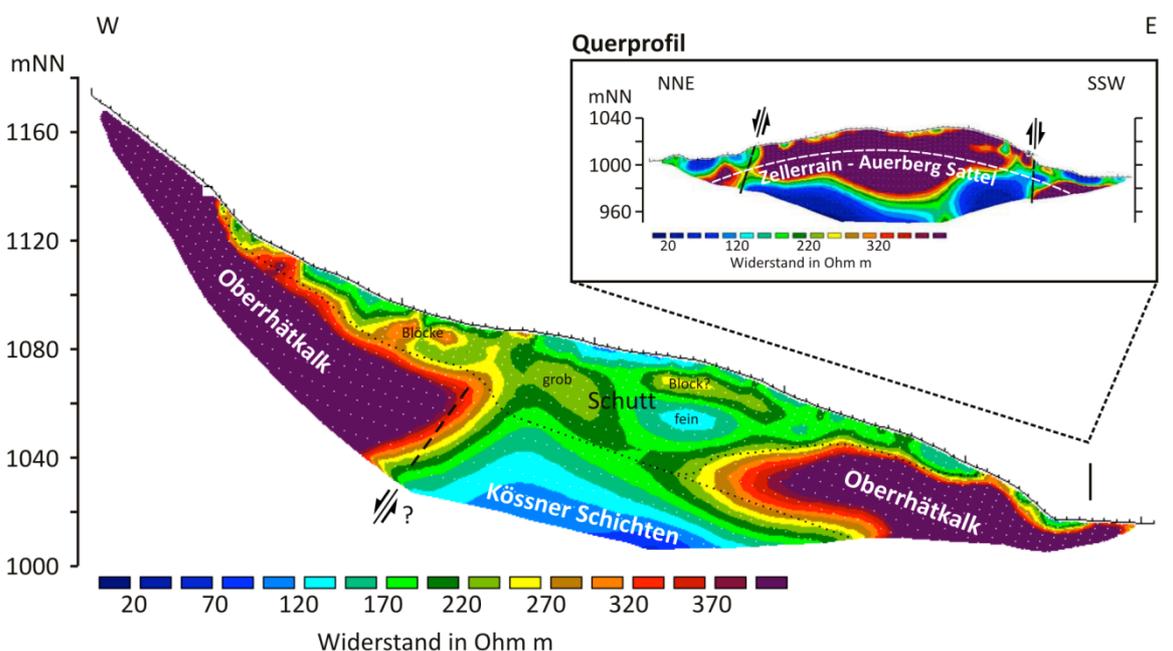


Abb. 35: Geoelektrik-Profile längs und quer durch die Aggenalm Hangbewegung (Profilverlauf s. Abb. 17; STÖRZBACH 2009; SINGER 2010).

Im Geoelektrik-Querprofil (Abb. 35) konnte die auch im Gelände nachvollziehbare Struktur des Zellerrain-Auerberg Sattels nachvollzogen werden. Allerdings zeigt sich auch hier, dass die kompetenten Oberrhätkalke bei der Faltung durch mehrere Störungen durchtrennt und die einzelnen Teilbereiche gegeneinander versetzt wurden. Dies ist auch in der Haupt-Abrisswand der Aggenalm Hangbewegung sichtbar (WOYTOWITZ 2010). So scheinen die Oberrhätkalke im unteren Hangbereich eine oder mehrere mehr oder weniger losgelöste Schollen darzustellen. Nur so erhält man genügend Freiheitsgrade, um die ablaufenden tiefgreifenden Bewegungen zu ermöglichen.

Leider wurden die Geoelektrik-Messungen erst im Sommer/Herbst 2009 durchgeführt, so dass deren Ergebnisse in die in dieser Arbeit vorgestellte numerische Modellierung nicht mehr einfließen konnte.

4 Grundlagen der numerischen Modellierung

Numerische Modelle basieren auf mathematische Zusammenhängen und Beziehungen. Modelle finden nicht nur in den technischen Wissenschaften Anwendung, sondern mittlerweile auch in anderen Bereichen, wie z.B. Wirtschaft, Soziologie, Psychologie oder Politik. In allen Feldern existieren logische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen, weshalb in allen technischen Bereichen sehr oft Modelle zur Kontrolle und Optimierung genutzt werden. Ein numerisches Modell erklärt ein System anhand von Variablen und Gleichungen und zeigt deren Abhängigkeiten.

Bei Hangbewegungen sind die Kinematik und der Ablauf der Bewegungen von vielen Faktoren abhängig. Eine genaue Abgrenzung der einzelnen Arten von Hangbewegungen ist aufgrund der großen Variabilität bei Bewegungsart oder Geschwindigkeit recht schwierig. Dabei kann ein numerisches Modell hilfreich sein.

4.1. Das Modell

Der Begriff „Modell“ bezeichnet hier eine physikalische, mathematische oder logische Darstellung eines Systems von Entitäten, Prozessen oder Phänomenen. Grundsätzlich ist ein Modell eine vereinfachte abstrakte Ansicht einer komplizierteren Wirklichkeit (GOOCH 2000). Die verwendeten begrifflichen, graphischen und mathematischen Beziehungen müssen für den Benutzer verständlich sein. Aus dem Modell muss zudem ersichtlich sein, inwieweit es die Wirklichkeit realistisch widerspiegelt. Vereinfachungen von tatsächlich komplexeren Beziehungen müssen benannt, diskutiert und bewertet werden (SILVERT 2001).

Mit einer Software erstellte Modelle erlauben durch die i. A. große, computergesteuerte Rechenleistung stete Manipulationen während des Modellierungs-Prozesses, die im Idealfall zu einer fortführenden Anpassung und letztlich zur Optimierung des Mo-

dells führen. Dadurch können schließlich Rückschlüsse auf die Funktionseinheit und die beteiligten Prozesse gezogen werden, sowie eventuell sogar Vorhersagen über den weiteren Verlauf getroffen werden.

4.2. Die Modellierung von Hangbewegungen

Eine Modellierung kann einen wesentlichen Teil der Erforschung einer Hangbewegung darstellen. Über verschiedene, veränderbare Variable können eine Vielzahl von wirksamen Randbedingungen für das Projekt erzeugt werden, deren Auswirkungen mit physikalischen Formeln analysiert werden können und so zu einem tieferen Verständnis der beteiligten Prozesse führen (Abb. 36).

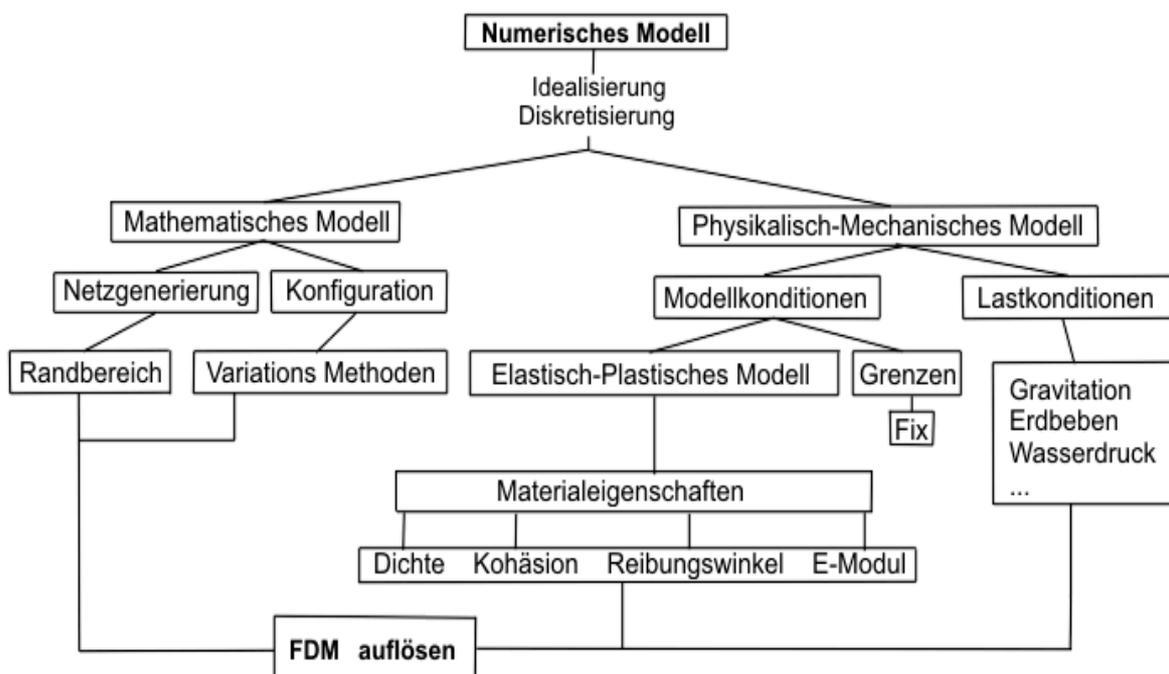


Abb. 36: Der allgemeine Prozess der Auflösung eines numerischen Modells mit finiten Differenzen.

Modelle werden typischerweise dann verwendet, wenn experimentelle Untersuchungen, in denen Ergebnisse direkt gemessen werden könnten, nicht durchführbar sind. Solche unter kontrollierten Bedingungen erzeugte Ergebnisse sind meist deutlich genauer als die modellierten Werte. Dies ist dadurch zu erklären, dass als Eingangsparmeter für Modelle mangels genauer Messwerte häufig Schätzungen dienen müssen. Nimmt die Anzahl dieser Annahmen in einem Modell zu stark zu, vermindert sich gleichzeitig die Genauigkeit und die Relevanz des Modells. Da allerdings auch Experimente meist in kleinerem (Labor-) Maßstab stattfinden und deswegen ebenfalls zu einer Vereinfachung der natürlichen, komplexen Bedingungen gezwungen sind, ist die Herangehensweise mit Hilfe einer numerischen Modellierung nicht zwangsläufig schlechter und durchaus Erfolg versprechend.

Unbestreitbar sind auch die Ergebnisse direkter Messungen im Gelände stets genauer als die prognostizierten Werte von Modellierungen. Aus diesem Grund werden Modelle nur dann aufgestellt, wenn genaue Messungen in der Praxis nicht durchführbar sind, oder wenn Berechnungen und Prognosen für die Zukunft erstellt werden müssen. Des Weiteren können Modelle aufgebaut werden, um vergangene Ereignisse zu reproduzieren, beispielsweise wenn Messwerte aus dieser Zeit fehlen. Die Genauigkeit eines Modells basiert natürlich stark auf der Qualität der Eingabe-Daten, aber auch auf der (Modell-)theoretischen Basis. Modellierungen können auch dazu führen, das Monitoring zu optimieren. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kosten werden computergestützte geotechnische Modellierungen immer häufiger angewandt. Ältere Modelle sind immer hilfreich, da sie das Verständnis einer Problematik unterstützen. Sie können bei Bedarf weiter verbessert und ausgebaut werden.

In einer Modellierung können Eigenschaften wie z.B. der Bewegungsmechanismus einer Rutschung beschrieben werden. Dies kann für evtl. geplante Stabilisierungslösungen, wie z.B. das Aufhalten einer weiteren Bewegung sehr hilfreich sein.

Unter dem Aspekt der ausgeführten Punkte wird klar, dass Modellierungen zwar nicht genaue Messungen im Gelände ersetzen können, jedoch in der Praxis unter Anbetracht der möglichen Ergebnisse einen hohen Stellenwert einnehmen.

4.3. Ziele und Anforderungen einer Hangbewegungs-Modellierung

Vor allem sollte die Modellierung die Wirkung äußerer Einflüsse (Trigger) erhellen und die Standsicherheit (Factor of Safety, FOS), Spannungen und Deformationen sowie die Bewegungsform klären. Dabei können eventuell bereits bestehende Hypothesen verifiziert werden. Von einem Modell wird man vor allem folgende Ergebnisse erwarten:

- Ermittlung der Standsicherheit der Böschung
Ein Bruch innerhalb einer Böschung beginnt, wenn die Scherspannung gleich der Scherfestigkeit des Materials ist.
- Klärung der Kinematik (Bruchmechanismus, Bewegungsform)
Eine mögliche Vorhersage zum Zustand in der Zukunft bei allen möglichen Veränderungen (Ursachen und Trigger) und die genaue Beschreibung der Kinematik kann nur durch eine exakte Modellierung der geometrischen Faktoren Einfallswinkel und Einfallrichtung erreicht werden.

4.4. Methode der Finiten Differenzen und Finiten Elemente

Seit langem werden zur Analyse der Hangbewegung die Methoden der Finiten Differenzen (FD, FDM) und der Finiten Elemente (FE, FEM) angewendet. Numerische

FD/FE-Modelle repräsentieren das Spannungsdehnungsverhalten von Boden und Fels unter Einbeziehung verschiedener Rahmen- und Randbedingungen (z.B. in-situ Spannungszustand oder Wasserverhältnisse).

Die Finite Elemente Methode ist primär ein numerisches Verfahren der Kontinuumsmechanik. Sie ist daher besonders leistungsfähig, wenn die zu untersuchende Struktur vom Material her als homogenes Kontinuum angesetzt werden darf und wenn auch das Bemessungskriterium, die Versagensthese, auf das Kontinuum abgestimmt ist. Sie ist weniger gut geeignet für Untersuchungen von Versagenszuständen, die lokalen Bruch, Scherbewegungen, Kluftkörperversetzungen oder Verbruch von Gebirgskörpern als Grenzzustand ansetzten (DUDDECK 1988).

Steifigkeitsmatrix hat sich als Begriff etabliert, da FE bei der Simulation von Materialien eingesetzt wurde. Im Prinzip handelt es sich einfach um eine Matrix, die invertiert werden muss. Bei FD entsteht diese Matrix ebenfalls, wenn implizite Verfahren verwendet werden. Allerdings sieht die Matrix im Normalfall anders aus. Sie ist wegen der häufig verwendeten, strukturierten Gitter diagonal dominant.

FLAC als ein Finite-Differenzen-Computerprogramm verwendet eine „explizite“ Zeitverlauf-gebundene Methode, um algebraische Gleichungen zu lösen, aber ein „implizites“ Matrix-orientiertes Lösungsschema, wie es bei den Finiten Elementen üblich ist.

Viele Autoren glauben zu Unrecht, dass Finite Differenzen auf rechteckige Gitter beschränkt seien. WILKINS (1964) präsentiert beispielsweise eine Methode der Ableitung von Differenzialgleichungen für Elemente jeder Gestalt. Diese Methode, auch beschrieben als die „Finite Volumen Methode“, wird in FLAC eingesetzt. Die falsche Annahme, dass Finite Differenzen und rechteckige Gitter untrennbar sind, ist für viele Behauptungen bezüglich der Grenzgestalten und Verteilung materieller Eigenschaften verantwortlich. Nach der Methode von WILKINS (1964) können Grenzen jede Gestalt besitzen, und jedes Element kann – wie bei den Finiten Elementen – jeden beliebigen Wert annehmen.

4.5. Explizite und implizite Methoden

Elemente in FD und FE kommunizieren m.E. In etwa gleich miteinander. Benachbarte Elemente tragen zur Lösung auf dem neuen Zeitniveau bei. Wichtig ist jedoch, dass im expliziten Verfahren die Lösung nur von den Anfangsbedingungen (Lösung auf dem Ausgangsniveau) abhängt, während im impliziten Verfahren die Lösung auch von den Nachbarelementen auf dem neuen Zeitniveau beeinflusst wird. Bei unstrukturierten Netzen verfällt ein Vorteil der expliziten Zeitdiskretisierung, da zuerst alle Beiträge

aller Elemente zur Lösung an einem Knoten zusammengetragen werden müssen, und deshalb üblicherweise die "Steifigkeitsmatrix" aufgestellt wird.

Mehrere Wiederholungszyklen sind notwendig, bevor eine Vereinbarkeit und ein Gleichgewicht entstehen. Anzumerken ist, dass bei physikalisch und geometrisch stark nichtlinearen Instabilitäten ein explizites Berechnungsverfahren Vorteile bietet (KONIETZKY 2000 und KONIETZKY et al. 1994). In der Tab. 5 werden die Eigenschaften der expliziten und impliziten Berechnungsweise verglichen.

Tab. 5: Vergleich der expliziten und impliziten Lösungsmethoden.

Explizite Lösungsmethode	Implizite Lösungsmethode
Die Zeitintervalle müssen für die Stabilität kleiner als ein kritischer Wert sein	Die Zeitintervalle können beliebig groß sein (ohne Vorbedingungen des Stabilitätsschemas)
Kleine Anzahl der erforderlichen Berechnungen pro Zeitintervall	Große Anzahl der erforderlichen Berechnungen pro Zeitintervall
Keine genauen numerischen Dämpfungen werden für dynamische Lösungen eingeführt	Numerische Dämpfungen hängen von den aktuellen, bedingungslosen Zeitintervallen ab
Keine Iteration für die Verfolgung nichtlinearer Materialgesetze notwendig	Iteratives Verfahren für die Verfolgung nichtlinearer Materialgesetze notwendig
Es wird vorausgesetzt, dass das Zeitintervall-Kriterium immer zufrieden stellend ist; nichtlineare Gesetze sind immer abhängig von den gültigen physikalischen Lösungen	Es ist immer notwendig, aufzuzeigen, dass die oben beschriebene Prozedur a) stabil und b) dem korrekten physikalischen Weg folgt (für prozedurempfindliche Probleme)
Die Matrizen werden nie gestaltet. Der benötigte Speicherbedarf ist immer beim Minimum. Keine Begrenzung der Bandbreite	Festigkeitsmatrizen müssen gespeichert werden. Wege müssen gefunden werden, damit die verbundenen Probleme überwunden werden, so wie die Bandbreite. Die Speicheranforderungen steigen nach und nach
Solange keine Matrizen erstellt sind, werden große Verschiebungen und Verformungen empfohlen (ohne zusätzliche Rechenanforderungen)	Zusätzliche Rechenanforderungen notwendig, um den großen Verschiebungen und Verformungen gerecht zu werden

Die Berechnungen von FLAC folgen dem in Abb. 37 dargestellten Zyklus. Bei einer Änderung von weniger als 0,1 Prozent wird der Kreislauf angehalten.

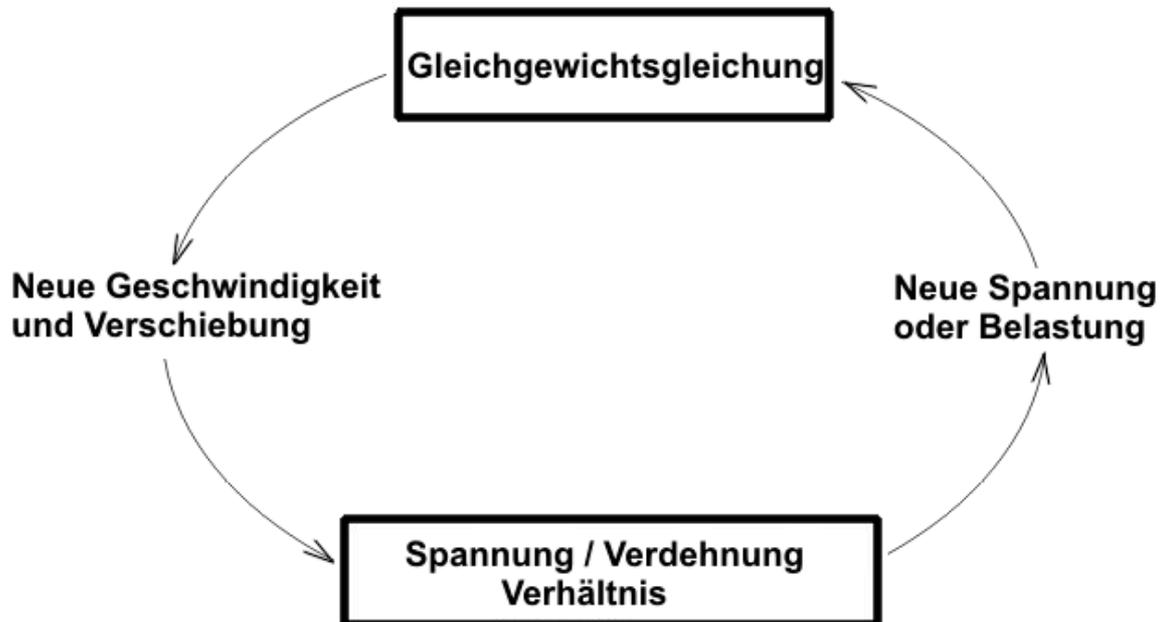


Abb. 37: Vereinfachter Zyklus der expliziten Berechnung in FLAC.

4.6. Der Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) Code

Die Modellierungssoftware FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) basiert auf dem System einer „expliziten finiten Differenzierung“ (ITASCA CONSULTING GROUP, INC. 2005a-f). Materialien werden durch zweidimensionale (2D) Elemente vertreten. Auch wenn heute bereits eine dreidimensionale (3D) Variante von FLAC verfügbar ist, so sind für die meisten Hangbewegungen 2D-Modellierungen prinzipiell ausreichend. Standsicherheitsberechnungen auf Grundlage von 2D-Schnitten sind aufgrund von 3D-Effekten grundsätzlich konservativ. Das Programm wurde für die Analyse und den Entwurf der Stabilität im Bergbau und Tiefbau eingesetzt. Die ausführliche, zeitabhängige Lösung der vollen Gleichungen einer Bewegung einschließlich der Trägheitsbegriffe erlaubt die Analyse des progressiven Bruchs und Zusammenfallens. Dies sind auch bei Hangbewegungen wichtige Phänomene.

Materialien werden durch Elemente oder Zonen vertreten, die ein Gitter bilden und vom Benutzer angepasst werden können. Dies bildet das Gerüst des Modells. Jedes Element verhält sich gemäß einem vorgeschriebenen nichtlinearen oder linearen Gesetz der Spannungen bzw. der Verformungen als ein Ergebnis der resultierenden Kräfte oder Grenzspannungen. Das Material kann sich dehnen und fließen, wodurch das Gitter in Abhängigkeit von der Größe der Verformung deformiert wird. Der allgemeine Modellierungsprozess, der in Abb. 38 illustriert wird, ist praktisch, weil es die Reihenfolge von Verfahren vertritt, wie sie auch in dem physischen Umfeld geschehen (ITASCA CONSULTING GROUP, INC. 2005e).

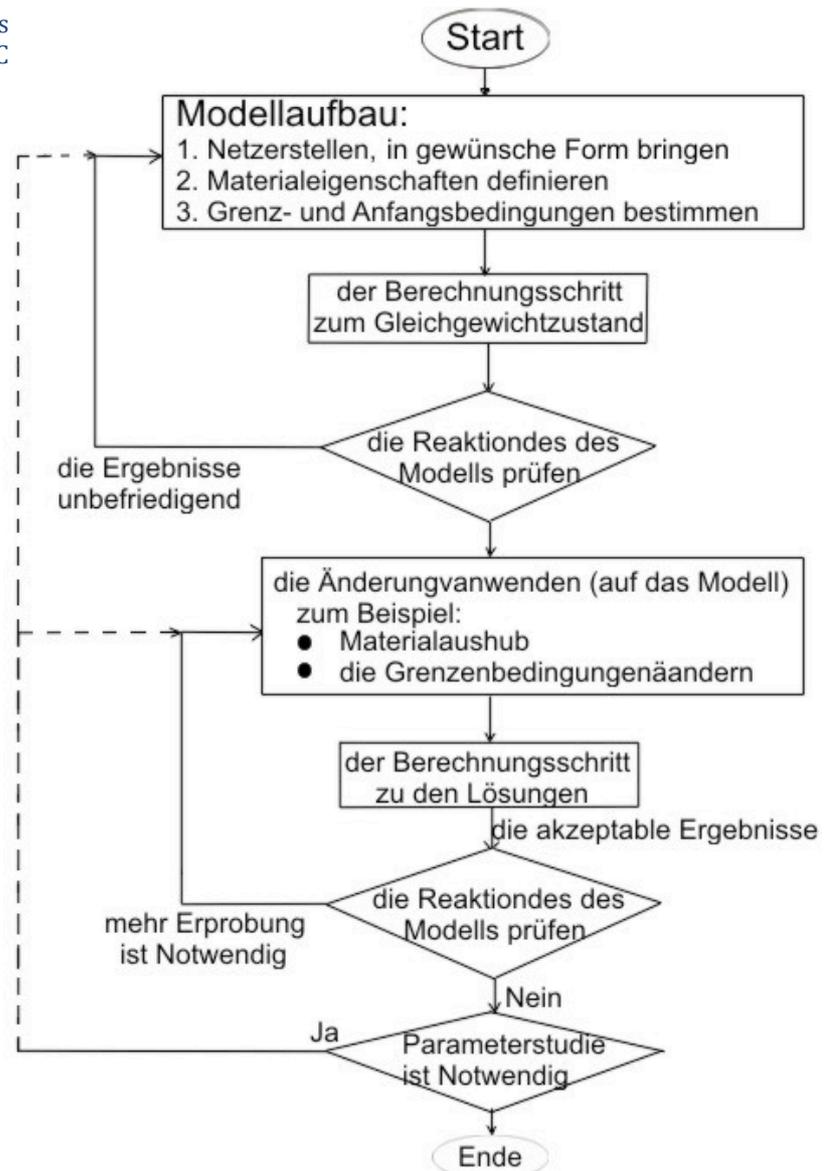
Durch das eindeutige Lagrangian Berechnungsschema und mit Hilfe der Technik der finiten Differenzierung in FLAC ist sichergestellt, dass ein plastischer Fluss bzw. ein

Zusammenbruch sehr genau modelliert wird. Da bei diesem Vorgang keine Matrizen gebildet werden, können große zweidimensionale Berechnungen ohne übermäßige Rechenleistung oder allzu große Speichervoraussetzungen durchgeführt werden.

Nachdem während der Modellierung keine globale Steifigkeitsmatrix erzeugt wird, können Koordinaten nach jedem Zeitintervall aktualisiert werden. Dies kann je nach Art der Verformungen geschehen. Die zusätzlichen Verschiebungen werden zu den Koordinaten hinzugefügt, so dass das Gitter und damit auch das Material, das es vertritt, bewegt und deformiert werden. Dies wird eine "Lagrange"-Formulierung genannt, im Gegensatz zu einer "Euler"-Formulierung, bei der das Material sich hinsichtlich eines festen Gitters bewegt und deformiert wird.

Die Modellierung von Projekten in der Ingenieurgeologie mit dieser Software erfolgt in den zumeist schwierigen Berechnungen der Statik und Dynamik mit großer Genauigkeit, da Strukturen mit plastischen Materialien wie Boden oder Fels, sogar bei größeren Verformungen und Verschiebungen gut dargestellt werden können.

Abb. 38: Flussdiagramm des Lösungsprozesses des FLAC Codes.



4.6.1. FLAC im Vergleich mit anderen Modellierungsmethoden

Das Programm SLIDE, der Firma Rocscience ist ein Hangstabilitätsprogramm, das die Stabilität von Bruchflächen in Boden- oder Felsenhänge bewertet. Diese können kreisförmig oder nichtkreisförmig sein. Hierzu werden vertikale Lamellenschnitte mit Gleichgewichtsmethoden eingesetzt. Künstliche und natürliche Böschungen mit kompliziertem geologischem Schichtaufbau werden leicht entworfen. Der Einsatz von SLIDE kann die Möglichkeit eines Fehlers minimieren und den Zuverlässigkeitsindex erhöhen; entweder für deterministische Bruchflächen mit dem kleinsten Sicherheitsfaktor oder für den ganzen Hang. Die Einfachheit der Bedienung bietet eine günstige Methode zur Durchführung parametrischer Studien. Die grafische Datendarstellung bietet einen reichen Satz an Werkzeugen, um eine günstige Darstellung der Modellergebnisse zu ermöglichen. Mit SLIDE kann man sehr schnell und einfach ein Modell

generieren, um eine Stabilitätsanalyse und korrekte Interpretationen der Ergebnisse durchzuführen.

PHASE² (Programm der Firma Rocscience) kann für eine große Auswahl technischer Projekte benutzt werden und beinhaltet entsprechende Unterstützung in der Entwurfsphase für die Durchführung von Analysen basierend auf der Finiten Element Methode. PHASE² bietet eine große Auswahl an Optionen zur Modellierung.

Eine der wichtigsten Eigenschaften von PHASE² ist die Finite-Element-Hangstabilitätsanalyse, in der die Scherkkraftreduktionsmethode eingesetzt wird. Diese Option ist völlig automatisiert und kann entweder mit Kräfteparametern nach Mohr-Coulomb oder nach Hoek-Brown benutzt werden. PHASE² ist ein starkes 2D elastoplastisch begrenztes Elementdruckanalyseprogramm für den Untertagebau oder Böschungen im Felsen oder im Boden. Es kann für eine große Auswahl von technischen Projekten verwendet werden und schließt den Entwurf von Stützmitteln sowie eine FE Grundwassermodellierung mit ein.

Im Vergleich mit PHASE² besitzt FLAC jedoch folgende Unterschiede:

- Die vollen dynamischen Gleichungen der Bewegung werden verwendet, selbst wenn das modellierte System im Wesentlichen statisch ist. Das ermöglicht FLAC, physisch nicht stabilen Prozessen ohne numerische Probleme zu folgen.
- Es wird im Gegensatz zu den üblicheren impliziten Methoden ein ausführliches Lösungsschema verwendet. Die eingesetzte Computerrechenzeit eines ausführlichen Schemas bei einer willkürlichen Nichtlinearität des Gesetzes der Schubspannung bzw. der Verschiebung ist mit der der Lineargesetze folgenden identisch. Im Gegensatz dazu können implizite Lösungen eine bedeutend längere Zeit in Anspruch nehmen, um nichtlineare Probleme zu beheben.
- Es ist nicht notwendig, jede Matrix zu definieren. Dies bedeutet, dass (a) eine große Zahl von Elementen mit geringen Speichervoraussetzungen modelliert werden kann, und (b) die Simulation einer großen Beanspruchung kaum mehr Zeit in Anspruch nimmt, als eine kleine Beanspruchung, weil es keine stetig zu aktualisierende Steifigkeitsmatrix gibt.
- Viele Normen der finiten Elemente benötigen verschiedene Lösungstechniken für verschieden erstellte Modelle. FLAC kann dagegen jedes Modell ohne Änderungen des Lösungsalgorithmus behandeln.

FLAC zählt seine Elemente mehr in der Form der „Reihe und Spalte“ als in der Form der Reihe auf. Diese Methode erleichtert die Lösung vieler Probleme, da die Elemente leichter zu identifizieren und die Ausgabewerte besser zu interpretieren sind (ITASCA CONSULTING GROUP, INC. 2005e, 2005f).

4.6.2. Das elastische und plastische Materialverhalten in FLAC

Alle geologischen Materialien können zu einem gewissen Grad dauerhaft, wegabhängig deformiert werden. Für alle Materialien kann ein Verformungs-Diagramm (Schubspannung gegen Deformation) erstellt werden. Diese Diagramme zeigen meist eine uneinheitliche Kurve, mit einem elastischen (linear Anteil) und einem plastischen (nicht-linear) Bereich. Der elastische Bereich wird vom Hookschen Gesetz bestimmt, während der plastische Bereich von den Theorien der Plastizität abhängt.

Es gibt verschiedene Versagensmodelle, die jeweils unterschiedliche Vorteile und Einschränkungen haben. In FLAC werden die Materialeigenschaften einer der zwei im Folgenden beschriebenen Gruppen verwendet.

4.6.2.1. *Elastische Modellgruppe*

Elastisch isotropes Modell

Das elastische, isotrope Modell stellt die einfachste Darstellung des Materialverhaltens dar. Dieses Modell ist für nur homogene, isotrope, zusammenhängende Materialien gültig, welche ein lineares Verformungsverhalten aufweisen.

Elastisch anisotropes Modell

In diesem Modell kann man elastische Materialien simulieren, die in verschiedenen Richtungen unterschiedliches elastisches Verformungsverhalten aufweisen. Dies kann sowohl in einer normalen als auch in einer parallelen Richtung zu den Schichten erfolgen.

4.6.2.2. *Plastische Modellgruppe*

Drucker-Prager Modell

Das Drucker-Prager-Plastizitäts-Modell ist ein einfaches Bruchkriterium, in dem die Schubfließgrenze eine Funktion der isotropen Spannung ist. Dieses Modell könnte für weiche Tonerde mit einem niedrigen Reibungswinkel hilfreich sein. Es wird jedoch nicht für geologische Materialien empfohlen. Es wird hier nur aufgeführt, um Vergleiche zu Ergebnissen anderer numerischer Programme zu ziehen.

Ubiquitous-Joint Modell

Dies ist ein homogenes plastisches Modell, das schwache Ebenen einer bestimmten Richtung einschließt, die wiederum in einem festen Material eingebettet ist.

Strain Hardening/Softening Modell

Dieses Modell erlaubt die Darstellung eines nichtlinearen Materials mit einer Erweichung oder Aushärtung, die auf vorgeschriebene Variationen der Mohr-Coulomb-Mustereigenschaften beruht (Kohäsion, Reibung, Ausdehnung, Zugbelastung).

Bilinear Strain-Hardening/Softening Ubiquitous-Joint Modell

Dieses Modell erlaubt die Darstellung des Materialverhaltens (Erweichung und Aushärtung) für die Erstellung der Matrix basierend auf schwache Ebenen der vorgeschriebenen Variationen der „Ubiquitous-Joint Modell“-Eigenschaften (Kohäsion, Reibung, Ausdehnung, Zugbelastung) als Funktionen der reduzierten und dehnbaren plastischen Verformung. Die Variationen der Belastungs-Eigenschaften des Materials mit der minimalen Spannung kann ebenfalls in Betracht gezogen werden (mit der Nutzung der bilinearen Option).

Double-Yield Modell

In diesem Modell sollen Materialien vertreten werden, in denen eine eindeutig unumkehrbare Verdichtung mit einer zusätzlichen Scherendehnung (wie bei einer hydraulischen Auffüllung oder des Einsatzes eines leicht-zementierten granulierten Materials).

Modified Cam-Clay Modell

In diesem Modell können Materialien vertreten werden, in denen der Einfluss der Volumenänderung auf die Eigenschaften der Hauptmasse und auf den Widerstand zur Scherung betrachtet wird, wie z.B. bei weichem Ton.

Hoek-Brown Modell

Dieses Modell charakterisiert die Spannungsbedingungen, die zu Brüchen in intakten Fels und Felsmassen führen. Diese Bruchoberflächen sind nicht linear und basieren auf der Beziehung zwischen den maximalen und minimalen Hauptspannungen. Dieses Modell berücksichtigt eine Regel des plastischen Flusses.

Mohr-Coulomb Modell

Dieses Modell ist das meist eingesetzte Modell. Es wird zur Darstellung von Scherbrüchen für die meisten allgemeinen Studien in Fels und Boden genutzt. Mohr-Coulomb Modelle sind die leistungsfähigsten Plastizitäts-Modelle. Die anderen Plastizitätsmodelle erfordern zusätzliche Rechenzeit.

Mohr-Coulomb Parameter für Kohäsion und Reibungswinkel sind normalerweise leichter verfügbar als andere Eigenschaften von geologischen Materialien. Das Mohr-Coulomb-Plastizitätsmodell, das sich besonders für geotechnische Projekte eignet, hat im Vergleich zu anderen plastischen Modellen den Vorteil, dass es Kohäsion, Reibungswinkel, Dichte, Kompressionsmodul, Schubmodul, Dilatanz und die Zugfestigkeit verwendet. Dies erhöht die Genauigkeit des Modells, weil diese Faktoren einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Da das Mohr-Coulomb-Modell eines der wichtigsten elastisch-plastischen Modelle ist, bedarf es einer ausführlichen Erläuterung, die im Folgenden gegeben wird:

Am Anfang müssen die Variablen dieses Modells erläutert werden. Für diesen Zweck unterteilen wir die Schubspannungen auf die verschiedenen Richtungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

Folgende Annahme ist die Voraussetzung für die weiteren Berechnungen:

$$\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1 \tag{4.1}$$

Jede dieser Schubspannungen besitzt eine eigene Verschiebung ($\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3$).

Diese Verschiebungen werden mit der folgenden Formel berechnet. Die plastischen Multiplikatoren dürfen jedoch während der Messungen nicht gleich Null sein.

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p \quad i = 1, 3 \tag{4.2}$$

Die Erhöhung der Schubspannungen und Verschiebungen unterliegen dem Hook'schen Gesetz:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta e_1^e + \alpha_2 (\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta e_2^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta e_3^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_2^e) \end{aligned} \tag{4.3}$$

Hierbei sind:

$$\alpha_1 = K + 4G/3 \quad \text{und} \quad \alpha_2 = K - 2G/3$$

K = Kompressionsmodul, G = Schubmodul

Anhand der Formel 4.1 kann der genaue Verlauf des Bruchkriteriums auf einer Ebene (σ_1, σ_3) bestimmt werden. Dies ist in Abb. 39 dargestellt.

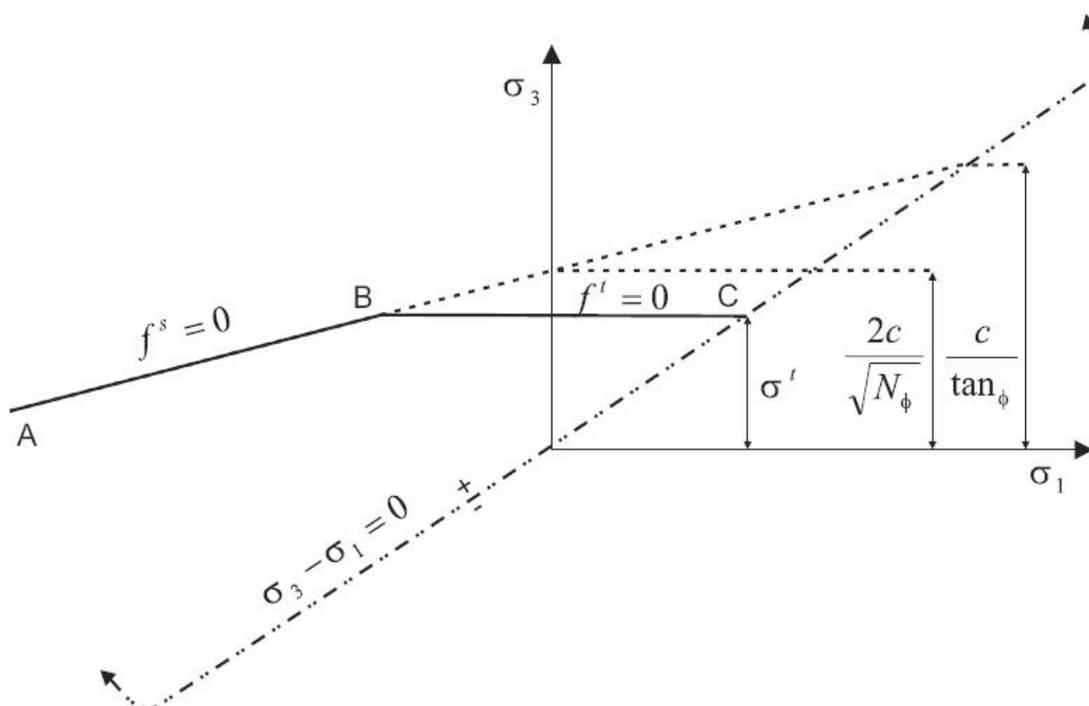


Abb. 39: Das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium in FLAC (ITASCA CONSULTING GROUP INC. 2005e).

Das grundlegende Kriterium für den Bruch in FLAC ist das Mohr-Coulomb Verhältnis, wo die geradlinige Bruchfläche der Scherbruchfläche entspricht. Der Kurvenverlauf zwischen den Punkten A-B und B-C unterliegt den folgenden Mohr-Coulomb-Funktionen:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N\varphi + 2c \sqrt{N\varphi} \quad \text{für A-B} \quad (4.4)$$

Das Mohr-Coulomb-Kriterium verliert seine physische Gültigkeit, wenn die normale Spannung zugbelastet wird. Der Einfachheit halber wird die Fläche ins Zugbelastete Gebiet zum Punkt, wo σ_3 gleich σ^t ist, verschoben. Die dann sehr geringe Spannung kann die Zugbelastung nie überschreiten - d. h.

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad \text{für B-C} \quad (4.5)$$

Hierbei sind: φ = Reibungswinkel, c = Kohäsion, σ^t = Zugwiderstand

$$N\varphi = (1 + \sin\varphi) / (1 - \sin\varphi) \quad (4.6)$$

Der Zugwiderstand darf bei einem Wert $\varphi = 0$ folgenden Wert nicht übersteigen:

$$\sigma^t_{max} = c / \tan \varphi \quad (4.7)$$

Die Scherpotential-Funktion (g^s) einer ungleichmäßigen Funktion erhält man über:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 \cdot N\psi \quad (4.8)$$

Hierbei ist: ψ = Dilatationswinkel

$$N\psi = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi) \quad (4.9)$$

Den Scherpotential-Funktion einer gleichmäßigen Funktion erhält man über:

$$g^t = -\sigma_3 \quad (4.10)$$

Falls die jeweiligen Funktionen mit dem aus dem Test stammenden Verlauf übereinstimmen, spricht man von einer gleichmäßigen Funktion, und $h(\sigma_1, \sigma_3) = 0$. Abb. 40 zeigt den Verlauf der Funktionen $f^s = 0$ und $f^t = 0$ auf einer Ebene (σ_1, σ_3). Die Funktion h ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$h = \sigma_3 - \sigma^t + \alpha^p (\sigma_1 - \sigma^p) \quad (4.11)$$

Wobei α^p und σ^p Konstanten sind und folgendermaßen berechnet werden:

$$\alpha^p = \sqrt{(1+N\varphi^2)} + N\varphi \quad (4.12)$$

$$\sigma^p = \sigma^t N\varphi - 2c \sqrt{N\varphi} \quad (4.13)$$

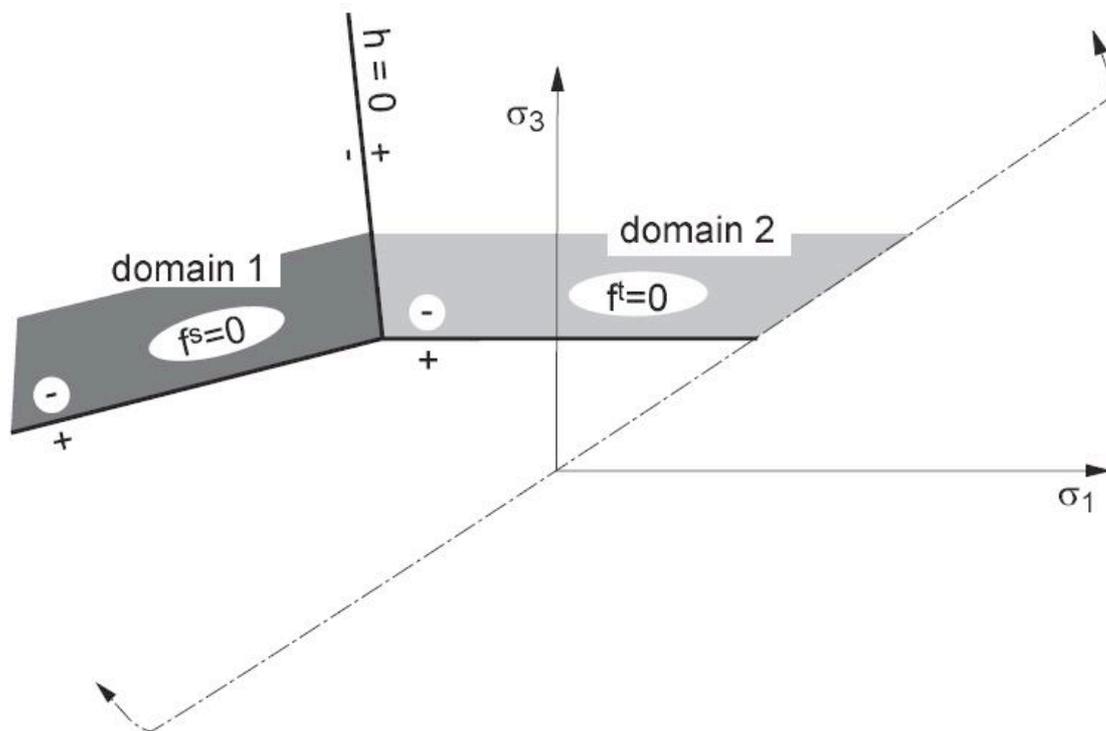


Abb. 40: Anwendungsbereiche der Fließregeln im Mohr-Coulomb Modell (Itasca Consulting Group Inc. 2005e).

4.7. Modellierungsstrategien

Hangbewegungs-Modelle stellen letztlich auch eine Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung dar und erlauben es die zeitliche Entwicklung einzelner Faktoren (z.B. Spannungen, Verformungen etc.) quantitativ zu bestimmen (KIRKBY 2003), um davon den jeweiligen Zustand der Bewegungsaktivität abzuleiten (CLAESSENS et al. 2006).

Bei einer Prozessbasierten Betrachtung von Hangbewegungen schlagen ZANGERL et al. (2008) das in Abb. 41 dargestellte Arbeitsschema vor. Die darin aufgeführten Arbeitsmodule 1 bis 4 wurden im Wesentlichen durch die Vorarbeiten im Rahmen des alpEWAS Projekts bereits durchgeführt, so dass für die numerische Modellierung der Aggenalm Hangbewegung bereits eine ideale Datengrundlage zur Verfügung stand.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Module 5 und 6 – der numerischen Modellierung und der Datenanalyse und Interpretation aller verfügbaren Informationen.

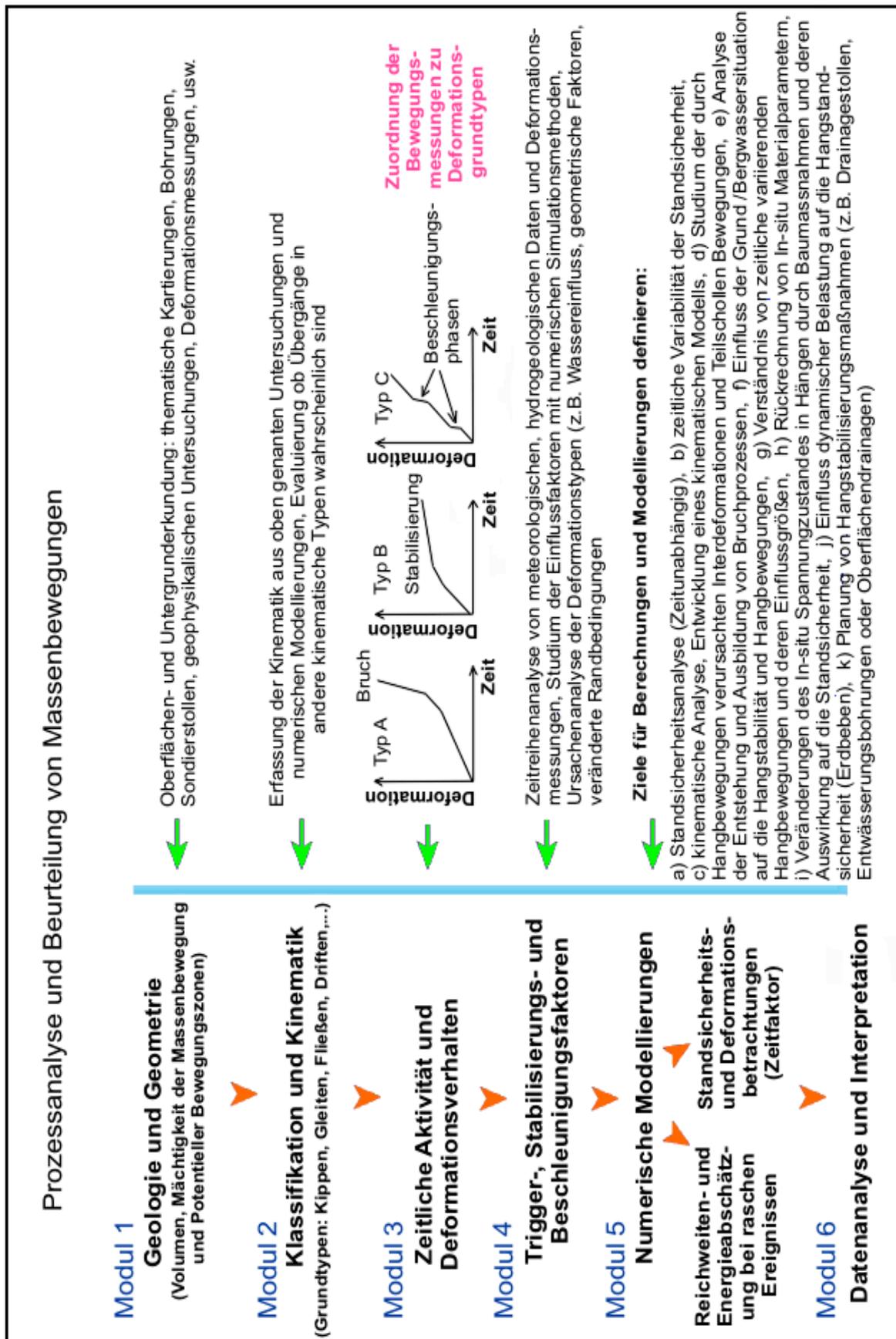


Abb. 41: Leitfaden zur Prozessanalyse und Beurteilung von Massenbewegung (ZANGERL et al. 2008).

Im Wesentlichen wurde die Aggenalm Hangbewegung anhand zweier verschiedener Szenarien untersucht:

Szenario 1: Analyse der Hangbewegungsprozesse von einem rekonstruierten Ausgangszustand bis heute

Ziel dieser Rückanalyse (s. Kap. 4.7.2) ist die Überprüfung und letztlich Kalibrierung des numerischen Modells anhand der Geländebefunde und Messdaten der zurückliegenden Hangbewegungsaktivität.

Szenario 2: Analyse des Zukünftigen Verhaltens der Hangbewegung

Auf Grundlage des kalibrierten Modells wird eine Prognose der zukünftigen Weiterentwicklung der Hangbewegung angestrebt. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Ermittlung der Sensibilität des Hanges auf externe Einflüsse (Auslöseprozesse) und deren Auswirkung auf den Sicherheitsbeiwert.

Bei der Bearbeitung dieser Szenarien kommen verschiedene Modellierungsstrategien zum Einsatz: die Rückanalyse, die Sensitivitätsanalyse und Standsicherheitsanalysen. Bevor auf diese näher eingegangen wird, werden jedoch im Folgenden zunächst noch einige Informationen zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Modellierung diskutiert:

4.7.1. Grundsätzliche Vorgehensweise

Grundsätzlich müssen für die Modellierung in FLAC alle Elemente des Modells getrennt eingeführt werden. Als erstes müssen die Böschungsgeometrie, die geotechnischen Bodeneigenschaften, Wasserspiegel und -verhältnisse, die Klüftigkeit und ggf. einwirkende Kräfte (z.B. dynamische Lasten, Seismizität) definiert werden. Danach erfolgt die Lösung der Bewegungsgleichungen im Hang mit Hilfe mathematischer, physikalischer, mechanischer und geotechnischer Theorien automatisch durch FLAC. Häufig sind allerdings die Ergebnisse einer ersten Modellierung nicht ausreichend, um alle gestellten Fragen zu beantworten. Deswegen muss das Modell oder die benutzten mathematischen Methoden angepasst werden. Dieser Prozess des Testens und Verbesserns wiederholt sich im Normalfall einige Male, bis man schließlich zu einer zufrieden stellenden Lösung kommt. Die Ergebnisse werden dann sofern möglich zur Lösungsverbesserung mit realen Messwerten des Monitorings verglichen. Im Anschluss an die Vergleiche wird das Modell verbessert und der Gesamtprozess erneut wiederholt.

Eine Modellierung mit FLAC ist durch die Notwendigkeit eines präzisen Arbeitens sehr zeitaufwändig und kompliziert. Bereits durch kleinste Änderungen an den Eingangs-Parametern können die Ergebnisse massiv verändert werden. Dies kann sogar soweit führen, dass die mathematischen Berechnungswege und Grundlagen ange-

zweifelt werden. Dieses Problem führt dazu, dass man für die Genauigkeit und die Verbesserung der Ergebnisse Monitoringwerte zum Vergleich einsetzt. Allerdings unterstützt das Monitoring nur die Erstellung des Modells und kann nicht in allen Phasen der Modellierung eingesetzt werden.

Die Ergebnisse der Modellierungen werden in der Regel als Graphiken dargestellt. In diesen Graphiken sind die Vektoren der Bewegungen, der Geschwindigkeiten und der Verformungen eingetragen. Der Vorteil dieser visuellen Darstellung führte zur Verbreitung dieser Methode. FLAC repräsentiert hier eine der praktischsten und fortschrittlichsten Software-Lösungen.

4.7.2. Rückanalyse

Mit der Rückanalyse bereits geschehener Hangdeformationen können Rückschlüsse auf die geomechanischen Eigenschaften der Gesteine und die für die Auslösung eines Hangbewegungsereignisses notwendigen Rahmenbedingungen gezogen werden. Dabei werden die jeweiligen Modellergebnisse mit den im Gelände tatsächlich beobachteten Deformationen verglichen. Die Eingangsparameter werden wiederholt so lange verändert, bis das Modell die realen Verhältnisse möglichst genau wiedergibt. Diese Vorgehensweise ermöglicht zum einen die realitätsnahe Abschätzung der geomechanischen Parameter und liefert zum anderen wichtige Hinweise auf die zugrundeliegenden Hangbewegungsprozesse.

Generell soll mit der Methode der Urzustand des Hanges vor der Bewegung analysiert werden, um die Ursachen der Hangbewegung zu erkennen und die mögliche weitere Entwicklung zu berechnen (LORIG & VARONA 2000).

Die Rückanalyse der Aggenalm Hangbewegung stellt eine zentrale Aufgabe dieser Arbeit dar. Die genaue Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Modellierung werden in Kapitel 5.1 beschrieben.

Wichtig ist, dass man bei der Modellierung des zukünftigen Verhaltens einer Hangbewegung nicht einfach die Rahmenbedingungen der Rückanalyse übernimmt, da das zukünftige Verhalten der Rutschmasse neben den ursprünglichen Ursachen zusätzlich durch neue Faktoren beeinflusst werden kann. Diese Faktoren dürfen bei den Berechnungen zur zukünftigen Entwicklung nicht übersehen werden.

4.7.3. Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss eines einzelnen Parameters auf die Modellierungsergebnisse untersucht. Dies wird durch die multiple Berechnung ein und desselben Modells erreicht, wobei jeweils ausschließlich der zu untersuchende Eingangsparameter um einen bestimmten Betrag variiert wird. Die Gegenüberstellung von zentralen Ergebnissen der Modellierung wie z.B. dem Sicherheitsfaktor oder dem

maximalen Deformationsbetrag und dem jeweils verwendeten Wert des untersuchten Eingangsparameters nach den Einfluss des Parameters auf den Hangbewegungsmechanismus deutlich. Diese Methodik wurde bei beiden Modellierungsszenarien angewandt, da sie die Identifizierung der wesentlichen Mechanismen des jeweiligen Modells unterstützt.

4.7.4. Standsicherheitsanalyse

Ein Bruch innerhalb eines Hanges beginnt, wenn die Scherspannung gleich der Scherfestigkeit des Materials ist. Sobald der Bruch an einer Stelle der Hangbewegung eintritt, ist keine weitere Steigerung der Scherkräfte erforderlich, um eine fortwährende Verschiebung zu gewährleisten. Die Scherparameter (Reibungswinkel, Kohäsion, Zugfestigkeit und Dilatanz) verändern sich in Abhängigkeit der Scherverformung, wobei besonders von einem Verlust der Kohäsion auszugehen ist. Dadurch wird die Scherspannung erhöht und damit wird sich die Böschung bewegen.

Die Standsicherheit wird durch den Widerstand des Materials beschrieben (Kohäsion und Summe der Partikelreibung), das entlang der Bruchfläche zu Stande kommt. Das Verhältnis zwischen dem Maximum der Scherfestigkeit (Widerstandskraft) und der Scherspannung, die entgegen dieser Kraft wirkt, ist der Sicherheitsfaktor (FOS: Factor of Safety). Dieser ist ein Maß für die Stabilität eines Hanges. Wenn die zwei Werte gleich groß sind ($FOS = 1$), ist das System labil. Dann können bereits geringe Änderungen in den Rahmenbedingungen ein Versagen des Hanges verursachen.

Vom physikalischen Standpunkt kann es nützlich sein, sich die Hangneigungen in folgenden drei Zuständen vorzustellen (Abb. 42, nach JONES & LEE 1994):

- **stabil** ($FOS \geq 1.5$): Der Rand der Stabilität des Hanges ist ausreichend hoch, um allen destabilisierenden Kräften zu widerstehen.
- **labil** ($1.0 < FOS < 1.5$): Bei einer weiteren, nur geringen Zunahme der Destabilisierungskräfte kann der Hang versagen.
- **instabil** ($FOS \leq 1.0$): Die destabilisierenden Kräfte erzeugen ununterbrochene oder intermittierende Bewegungen. Bei $FOS \leq 1.0$ ist die Hangbewegung theoretisch gerutscht.

In FLAC kommt für die Bestimmung des Sicherheitsfaktors die sogenannte „Shear-Strength Reduction Technique“ (SSR) zum Einsatz. Dabei wird gleichbedeutend das Verhältnis zwischen der vorhandenen Scherfestigkeit und der Scherfestigkeit beim Versagen angewandt, d.h. der minimal erforderlichen Scherfestigkeit zur Bewahrung des Gleichgewichts. Die Standsicherheit entspricht dem beim Versagen verwendeten „trial factor of safety“ (ITASCA CONSULTING GROUP, INC 2005e):

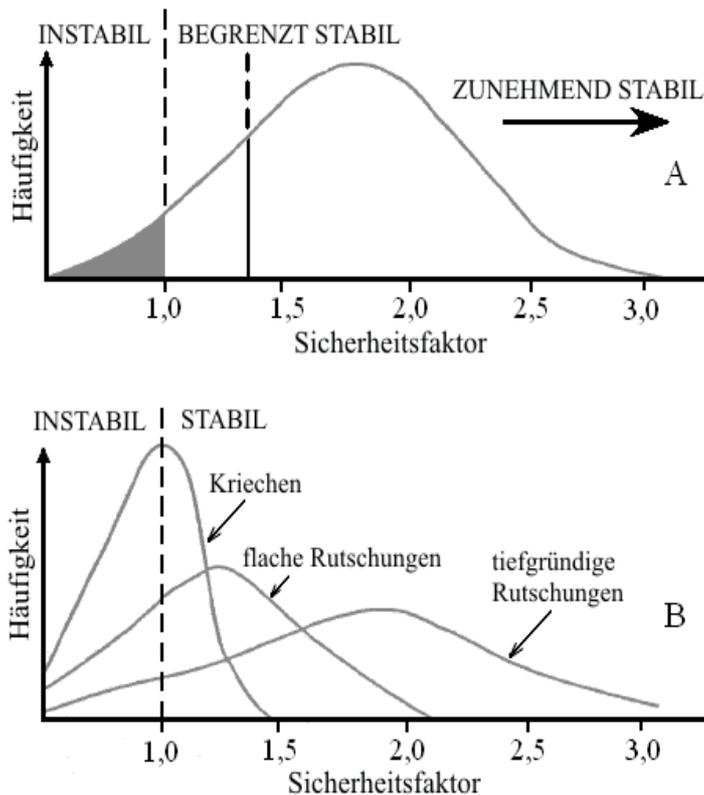


Abb. 42: Häufigkeitsverteilung des Sicherheitsfaktors bei Hangbewegungen allgemein (oben) bzw. in verschiedenen Hangbewegungstypen (unten) (JONES & LEE 1994).

$$c_{trial} = (1/F) * c \tag{4.14}$$

$$\varphi_{trial} = \arctan (1/F) * \tan (\varphi) \tag{4.15}$$

wobei: c = Kohäsion, φ = Reibungswinkel und F = trial factor of safety.

Bei Anwendung der SSR Methode werden die Scherfestigkeiten durch Abminderung der konstitutiven Parameter (φ , c) schrittweise reduziert, bis der Sicherheitsbeiwert gleich 1 (eins) ist. Die Technik kann so grob die Rahmenbedingungen der Auslösung und die Art einer Hangbewegung aufzeigen, wobei alle wichtigen Einflüsse berücksichtigt werden

Um den Ablauf einer Hangbewegung zu modellieren, kann z.B. deren Beständigkeit und Entwicklung simuliert werden. Auf Kontinuumsmechanik basierende und mit rheologischen Daten verbundene Modelle werden gewöhnlich bevorzugt, um den Runout einer Bewegung und andere relevante Parameter vorauszusagen. Dabei kann der Sicherheitsfaktor mit verschiedenen Formeln bestimmt werden. Gewöhnlich wird der Sicherheitsfaktor bestimmt durch das Verhältnis zwischen haltenden und treibenden Kräften (DAS 1990):

$$FOS = \tau_f / \tau_d \tag{4.16}$$

FOS = Sicherheitsfaktor, τ_f = Scherfestigkeit des Bodens [kN]

τ_d = Scherfestigkeit entlang einer möglichen Bruchfläche [kN]

Gemäß MARTEL (2002) sind die Schlüsselpunkte des Sicherheitsfaktors:

1. Der Sicherheitsfaktor ist kein Maß der Stabilität an einem einzigen Punkt, sondern ein Durchschnittswert entlang einer möglichen Gleitbahn.
2. Der Faktor der Sicherheit kann im Feld nicht gemessen, sondern nur im Modell bestimmt werden.
3. Der Faktor der Sicherheit ist deswegen abhängig vom jeweiligen Modell bzw. Bearbeiter.
4. Es ist wünschenswert, dass der Sicherheitsfaktor deutlich größer als eins ist, da stets Unsicherheiten betreffend der geologischen Bedingungen und Druckverhältnisse bestehen.

5 Numerische Modellierung der Aggenalm Hangbewegung mit FLAC

Das Ziel der Modellierung ist die qualitative und quantitative Untersuchung der Hangbewegungsmechanismen – insbesondere die Triggermechanismen – sowie die Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Hangbewegungsaktivität. Dabei ist eine große Anzahl gleichzeitig wirkender Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu gehören geologische, hydrostatische, dynamische, atmosphärische Einflüsse sowie der langfristige Prozess der Verwitterung. Deren Wirkung und Wechselspiel muss differenziert betrachtet werden, um ein möglichst genaues Modell zu erstellen.

5.1. Modellierung zurückliegender Ereignisse an der Aggenalm Hangbewegung

Die Modellierung der zurückliegenden Bewegungen mit Hilfe der Rückanalyse (vgl. Kap. 4.7.2) wird verwendet um die in die Modellierung eingehenden Parameter zu verifizieren und ggf. konkretisieren. Dazu wird ein anhand des geologischen Befundes rekonstruierter Ausgangszustand des Hanges vor dem Einsetzen der Hangbewegung betrachtet. Das Modell und die Modellparameter werden dabei so lange angepasst bis das Modell in der Lage ist, die wesentlichen heute beobachtbaren und aus historischen Quellen bekannten Phänomene nachzuvollziehen.

5.1.1. Geologisches Modell

Als Grundlage für die Rückanalyse der Aggenalm Hangbewegung mit FLAC dient das von JUNG 2007 entwickelte Profil des Hanges vor dem Einsetzen der Hangbewegung (Abb. 43). Darin sind z.B. die Oberrhätalk-Schollen wieder an ihren Ausgangspunkt zurück bewegt und anhand von Geländebeobachtungen und einer Massenbilanz eine alte Landoberfläche rekonstruiert worden. Das modellierte Profil folgt derselben Linie wie das Profil der heutigen Situation (Abb. 16 und Abb. 44), die sich an Verschiebungsvektoren orientiert, die im Laufe der langjährigen geodätischen Überwachung

des Hanges ermittelt wurden. Grundsätzlich ist es meist sinnvoll das Profil für die Modellierung parallel zur Bewegungsrichtung zu wählen.

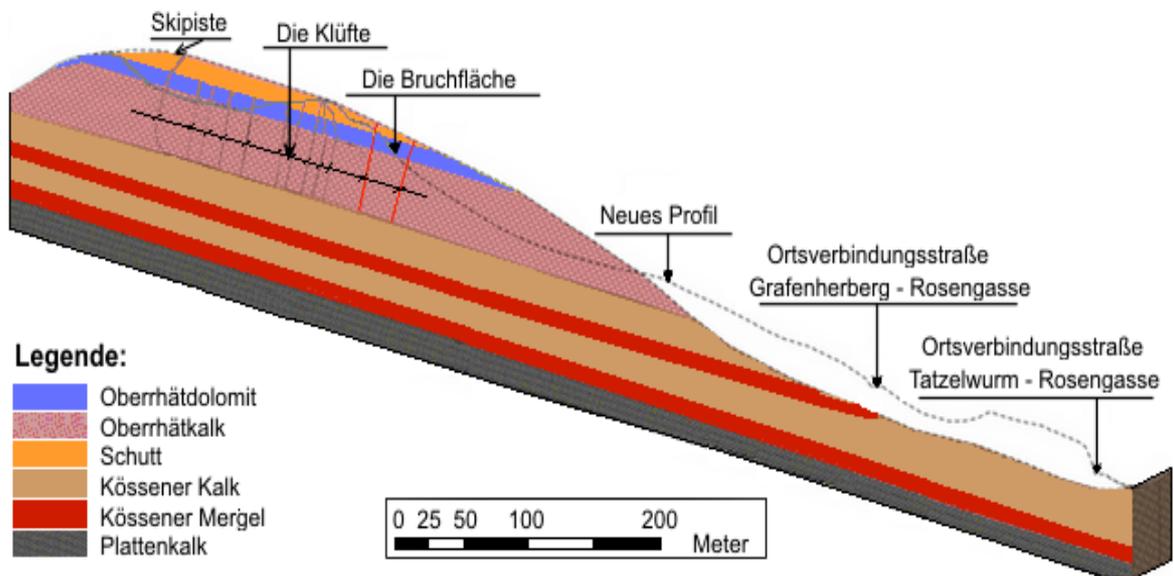


Abb. 43: Das rekonstruierte Hangprofil vor der Bewegung (JUNG 2007).

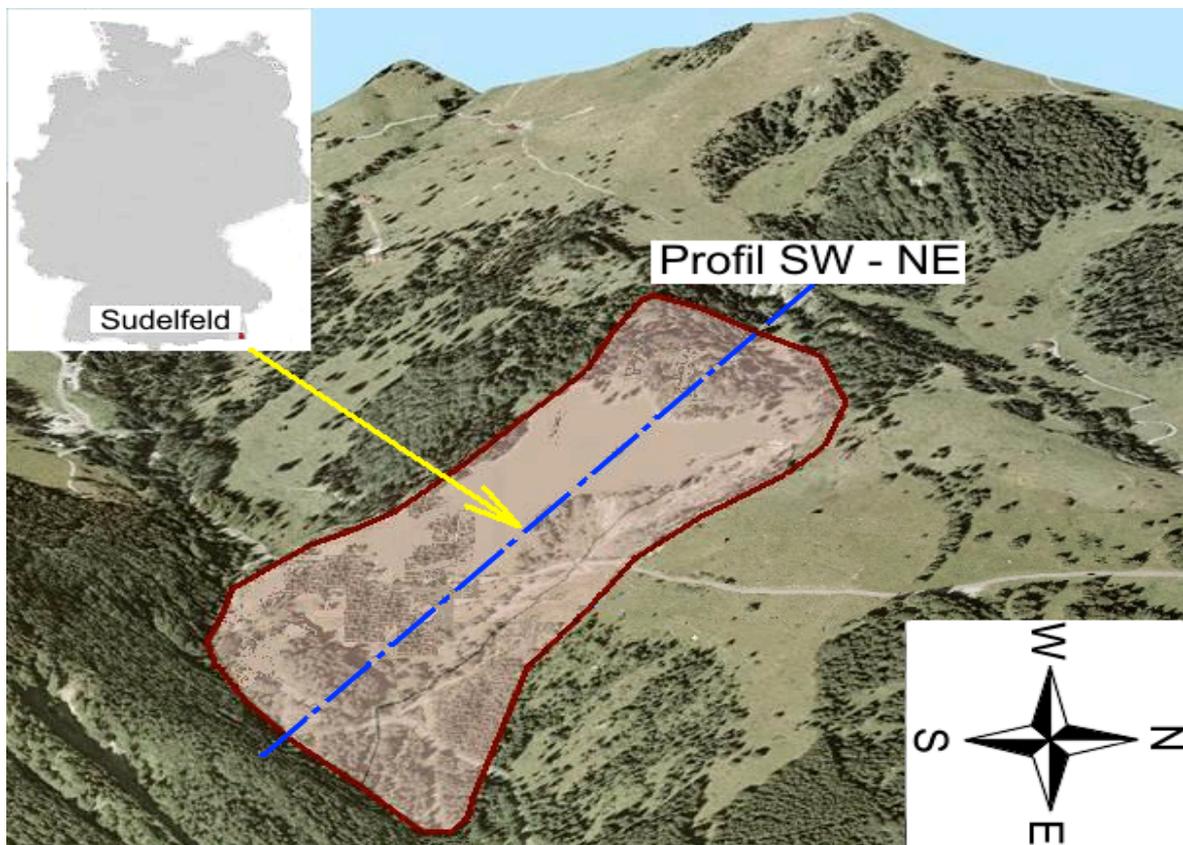


Abb. 44: Lage und Richtung des für die Modellierung verwendeten Profils.

Im Allgemeinen wird für eine ausführliche und korrekte Studie unabhängig von ihrer Thematik ein genauer Überblick über den Zustand in der Vergangenheit benötigt. Dies ist besonders für Hangbewegungsprojekte notwendig, da hier die meisten Faktoren einheitlich sind (z.B. Klima, Material, Vegetation, Geomorphologie).

5.1.2. FLAC Modell

Für die Berechnung mit FLAC muss jedes Profil in kleine, möglichst homogene Zonen aufgeteilt werden. Dies wird mit Hilfe von Netzen bzw. einem Gitter erreicht. Jeder Zellenpunkt des Gitters, das von FLAC erzeugt wird, kann entweder einen stabilen oder einen instabilen Zustand besitzen. Auf jedem dieser Zellenpunkte wirken von den vier umgebenden Zonen Kräfte. Falls die Vektorsumme dieser Kräfte die Zahl Null ist, ist der Zustand stabil. Je größer die Vektorsumme ist, desto instabiler ist das System. Ein plastischer Zustand entsteht bei einer Vektorsumme der Kräfte, die zwar ungleich Null ist, jedoch diesem Wert nahe steht. In diesem Fall kann eine beschleunigungslose Verschiebung stattfinden.

5.1.2.1. Definition der Geometrie

Die Geometrie (Gelände, Ausbruch und Gesteine) gehören zu den wichtigsten zu definierenden Parametern, bei denen schon kleine Änderungen große Wirkungen haben können. Deshalb sollte die Geometrie nach Möglichkeit durch genaue Messungen im Gelände bestimmt werden (Abb. 45).

5.1.2.2. Generierung des Gitters

In dieser Arbeit wurde ein Gitter von 250 x 95 Zellen verwendet (Abb. 45). Das heißt, jedes Grid repräsentiert entsprechend dem Längsschnitt durch die Hangbewegung (800 m x 304 m) 3,2 m x 3,2 m. Im Laufe der Arbeit wurde das Grid mehrmals verkleinert, von anfänglich 1000 x 400 über 500 x 200 auf 250 x 95 Zellen. Diese zunächst verwendeten größeren Mengen hatten keine nennenswerten Auswirkungen auf das Projekt sondern verursachten lediglich mehr Rechenbedarf.

5.1.2.3. Definition der Rahmenbedingungen

Entlang des rechten und linken Randes des modellierten geologischen Schnitts sind keine horizontalen Bewegungen (X-Koordinate) zugelassen. Vertikale Bewegungen entlang der Koordinate Y sind hingegen zulässig. An der Basis des Modells sind beide Raumrichtungen fixiert. Die Ausdehnung des Modells wurde so gewählt, dass die Bewegungen bis zum Modellrand ausgeklungen und keine Randeffekte möglich sind.

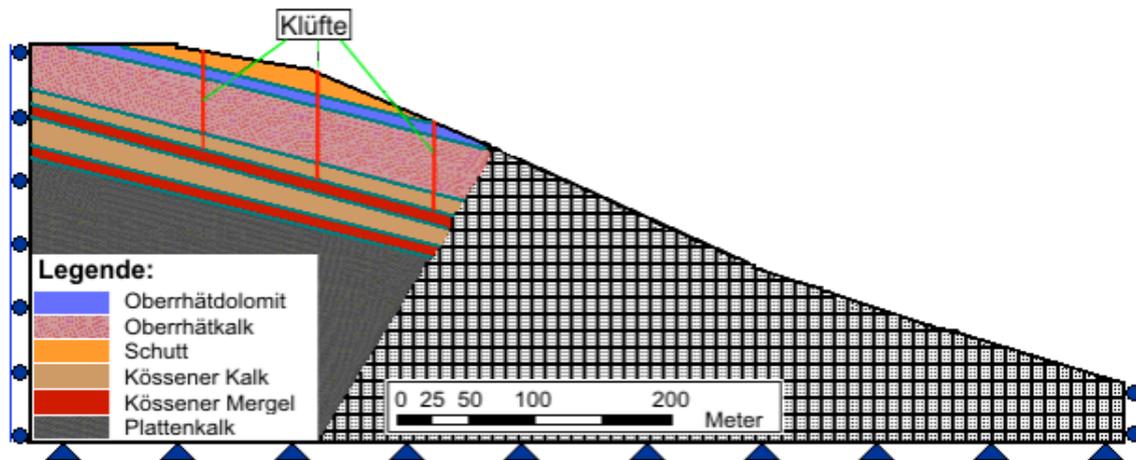


Abb. 45: In FLAC umgesetztes Modell der Ausgangssituation vor dem Einsetzen der Hangbewegung (vgl. auch Profil in Abb. 43). Die Klüfte mussten der Modellierung hinzugefügt werden, um den Mechanismus des Driftens der Oberhättkalk-Schollen im Modell nachbilden zu können.

5.1.2.4. Materialparameter

In Tab. 6 sind die wichtigsten Materialparameter zusammengestellt, wie sie in den nachfolgend beschriebenen Modellierungen verwendet worden sind. Sowohl die Geländebeobachtungen, als auch die von JUNG (2007) im Programm Phase² durchgeführten Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die Materialeigenschaften des Kössener Mergels einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Hangbewegung haben. Deshalb steht dieser auch im Focus der folgenden Untersuchungen.

Tab. 6: In der Modellierung eingesetzte Materialparameter für die an der Aggenalm auftretenden Gesteine.

Lithologie	Dichte ρ (g/cm ³)	Kohäsion c' (kPa)	Reibungs- winkel (°)	Zugfestig- keit(MPa)	E-Modul (MPa)	Poisson- zahl (ν)
Quartär	2,2	10	35	0	20	0,2
Schutt	2,2	0	35	0	50	0,2
Oberhät- dolomit	2,8	3618	29,62	10	8660	0,2
Oberrhätkalk	2,7	2490	30,52	10	7070	0,2
Kössener Kalk	2,7	2490	30,52	10	7070	0,2
Kössener Mergel	2,7	5,5-41,9	16,5-29,4	0,1	5900	0,2
Plattenkalk	2,7	3524	33,45	10	13775	0,2

Da ein Modell alle Details eines Projekts darstellen und berücksichtigen muss, ist eine genaue Aufnahme aller im Gelände zu gewinnenden Parameter notwendig. Wie bei allen Modellen ist es dabei natürlich schwierig, die im Labor gewonnenen Vorstellungen in die ohne Zweifel deutlich kompliziertere Wirklichkeit zu übertragen (FUKUZONO

1985). Die Gesteinsparameter werden in einzelnen Werten, durch das E-Modul (*Young's-Modulus*), Zugfestigkeit (*Tensile Strength*) und der Poissonsahl (*Poisson's Ratio*) ergänzt.

Aufgrund der Verwendung elasto-plastischer Materialgesetze können Brüche sowohl innerhalb der Materialien als auch entlang von Klüften verfolgt werden. Diskrete Klüfte können im Kontinuums-Ansatz in FLAC durch so genannte „Interface Elemente“ nachgebildet werden.

In der folgenden Tabelle (Tab. 7) sind die benötigten geotechnischen Parameter für die Modellierung der Materialien mit FLAC aufgelistet.

Tab. 7: In FLAC verwendete geotechnische Parameter für Gesteine und Klüfte,

Gesteine	Klüfte
Dichte (kN/m ³)	
Kompressionsmodul (GPa)	Kompressionsmodul (GPa)
Schubmodul (GPa)	Schubmodul (GPa)
Kohäsion (Pa)	Kohäsion (Pa)
Reibungswinkel	Reibungswinkel
Dilatation	Dilatation
Zugfestigkeit (MPa)	Kn (Normalsteifigkeit)
	Ks (Schersteifigkeit)

Deshalb kommt nur in einer frühen Phase der Modellierung der Kontinuums-Ansatz des expliziten FD-Codes in FLAC zur Anwendung. Die Kennwerte zum Deformationsverhalten der Klüfte (Normal- und Schersteifigkeit) werden anhand zweier unterschiedlicher Methoden bestimmt:

$$Kn = Ks \leq 10 (\max (K + 4G/3) / \Delta z_{\min}) \quad (5.1)$$

wobei: kn, ks: Normal- und Scher- Steifigkeit, K: Kompressionsmodul; G: Schubmodul; Δz_{\min} : Schmalste Breite der Zone, die in Kontakt mit der Trennfläche steht.

FLAC braucht noch manche wichtige Werte wie Kompressionsmodul (K) und Schubmodul (G), die mit den folgenden Beziehungen berechnet werden.

$$G = E/2 (1 + \nu) \quad (5.2)$$

$$K = E/3 (1 - 2\nu) \quad (5.3)$$

Hierbei sind: E: Elastizitätsmodul, ν : Poissonzahl

Die Ergebnisse dieser Berechnungen für die Modelle der Aggenalm Hangbewegung sind in der Tab. 8 zusammengestellt.

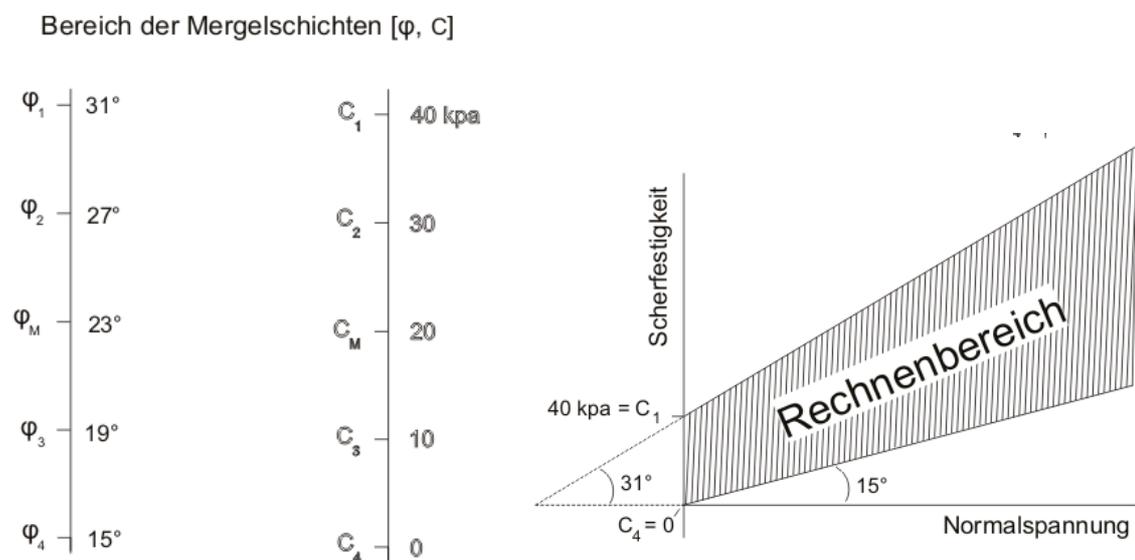
Tab. 8: Berechnete Werte des Kompressionsmoduls (K) und Schubmoduls (G) der an der Aggenalm Hangbewegung auftretenden Gesteine.

Lithologie	K (Pa)	G (Pa)
Quartär	1,10 E7	8,30 E6
Schutt	2,78 E7	2,10 E7
Oberrhätdolomit	4,80 E9	3,61 E9
Oberrhätkalk	3,90 E9	2,95 E9
Kössener Kalk	3,90 E9	2,95 E9
Kössener Mergel	3,30 E9	2,46 E9
Plattenkalk	7,65 E9	5,70 E9

Die langfristige (durch Verwitterung) und kurzfristige (durch Porenwasserdrücke) Veränderlichkeit der Scherfestigkeit spielt eine wichtige Rolle für die Stabilität des betrachteten Hanges. Diese Veränderungen können Auslöser einer Instabilität sein oder zu einer Fortsetzung einer bestehenden Bewegungen führen. Deshalb wurden die Materialparameter der Kössener Mergel entsprechend der bei unterschiedlichen Autoren auftretenden Bandbreite (vgl. Tab. 9) variiert. Abb. 46 zeigt die bei der Modellierung verwendeten Kombinationen der Materialparameter für den Kössener Mergel.

Tab. 9: Sammlung geotechnischer Eigenschaften des Kössener Mergels nach verschiedenen Autoren.

Kohäsion c' [kPa]	Reibungswinkel ϕ [°]	Quelle
0 – 25	15 – 32,5	DIN 1055 (2003)
5,5 – 41,9	23 – 24	REIßMÜLLER (1997)
21,3 - 41,2	16,5 - 29,4	SCHORMAIR (2003)

**Abb. 46:** Bei der FLAC Modellierung verwendete Variationsbreite der Materialparameter der Kössener Mergel.

5.1.2.5. Grundwasserspiegel

Verschiedene Messverfahren müssen im Gelände angewandt werden, um die Vorhersage des Einflusses bestimmter Faktoren (z.B. Regen, Porendruck) auf die Bruchstellen des Hanges vorherzusagen (MAYORAZ & VULLIET 2002). Dies kann helfen, das Muster des Bruches zu identifizieren und die physischen Mechanismen hinter der Bewegung eines möglicherweise unsicheren Hanges zu verstehen.

Hydrologische Einflüsse – im Besonderen die des Niederschlags – machen sich meist viel deutlicher bemerkbar als der Einfluss von Erdbeben (VAN ASCH 1999). Es gibt viele Haupttypen hydrologischer Mechanismen (abhängig vom Zustand des Systems), die die Schwelle des erstmaligen Ausfalls beeinflussen. Dies gilt besonders für reaktivierte Hangrutsche und den Fortschritt der Bewegungen. In eine Modellierung müssen Grundwasserstände auf jeden Fall einfließen. Zum näheren Verständnis der Hangbewegung - insbesondere im Hinblick auf die Wasserverhältnisse - sind Grundwasserbeobachtungspegel, wie sie an der Aggenalm vorhanden sind, wünschenswert.

Verschiedene mögliche Grundwasserspiegel wurden bei der Rückanalyse berücksichtigt (siehe Kap. 5.1.3). Das durch die Piezometer B4 und B6 beobachtete Grundwasser liegt heute ca. 2 bis 4 m über der Oberkante der Kössener Mergel und liegt damit in etwa auf dem Niveau des zweithöchsten in der Modellierung verwendeten Wasserstands (W_2 , vgl. Abb. 47). Es wird darauf hingewiesen, dass die Grundwassersituation zu Beginn der Hangbewegung natürlich unbekannt ist.

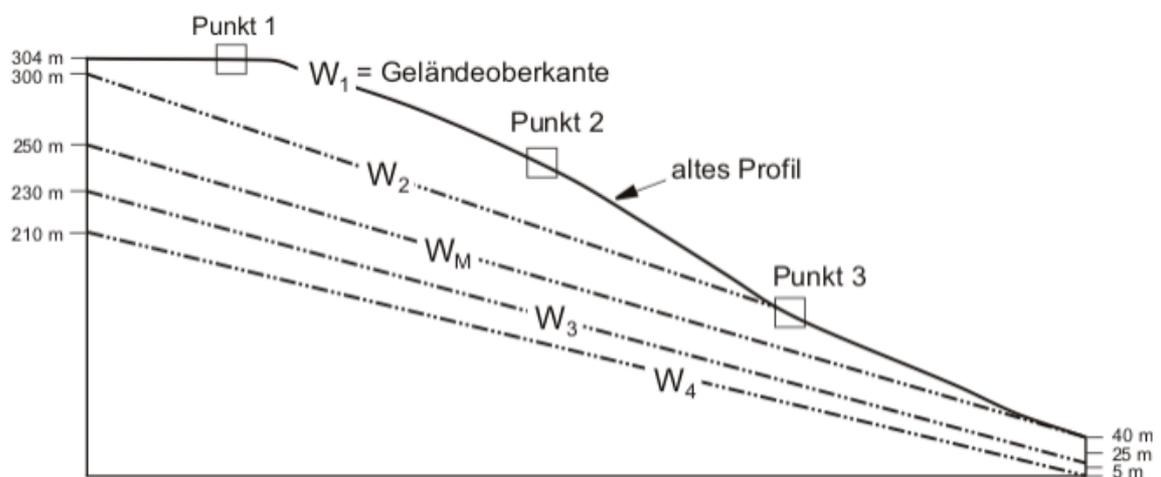


Abb. 47: Variation der Wasserstände während der numerischen Modellierung. Bei den Höhenangaben handelt es sich um Modell-Höhen, die nicht der Höhe üNN entsprechen. Die Deformation wurde während der Modellierung an drei Punkten überwacht.

Die Grundwasserporendrücke im Modell können durch zwei Methoden berechnet werden. Bei der ersten Methode werden die Grundwasserporendrücke nur an den

Modell-Rändern definiert und der Grundwasserspiegel danach automatisch aufgebaut. Die zweite Methode besteht in einer numerischen Definition des Wasserspiegels über das gesamte Modell hinweg. In dieser Arbeit wurde die zweite Methode verwendet, da man damit man besser die vermuteten Gegebenheiten darstellen kann.

5.1.2.6. Seismizität

Als zonenspezifischer Einwirkungsparameter für Erdbeben gilt ein Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g , der in Tab. 10 den Erdbebenzonen zugeordnet ist und als Grundlage für den rechnerischen Erdbebennachweis anzusehen ist, sofern dieser erforderlich ist.

Tab. 10: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Bemessungswerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen nach DIN 4149.

Erdbebenzone	Intensitätsintervall I	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g (m/s ²)
0	$6 \leq I < 6,5$	---
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Da die Aggenalm innerhalb der Erdbebenzone Null liegt, wird eine Beschleunigung in keiner der Berechnungen mit einbezogen. Das heißt, dass eine statische Modellierung ausreichend ist. Eine dynamische Modellierung wäre notwendig, wenn das Projektgebiet eine andere Erdbebenzone hätte.

5.1.3. Verlauf der Modellierung

Nur realistische Faktoren, welche die Hangbewegung beeinflussen könnten, wie z.B. das Ansteigen des Grundwasserspiegels und eine Änderung der mechanischen Eigenschaften der Gesteine), wurden in die einzelnen Fälle aufgenommen. Diese wurden dem einfachen Ausgangs-Modell schrittweise nach und nach hinzugefügt, bis das Modell die beobachteten Hangbewegungsphänomene zufriedenstellend abbildete.

Im Folgenden werden die Elemente, die während der Rückanalyse nach und nach der Modellierung hinzugefügt wurden, kurz erläutert:

Szenario 1: Erstes Modell des Ausgangszustands der Aggenalm Hangbewegung

Das in Abb. 45 dargestellte Profil wurde zunächst mit den in Tab. 6 gelisteten Materialparametern belegt, wobei zunächst für den Kössener Mergel die Maximalwerte der Kohäsion und des Reibungswinkels eingesetzt wurden ($\varphi = 31^\circ$ und $C = 40$ kPa; un- verwitterter Zustand des Mergels). Der Wasserstand wurde als sehr niedrig ange-

nommen und unterhalb der Unterkante der ersten Schicht Kössener Mergel platziert (W_4 in Abb. 47). Die in diesem Modell auftretenden Deformationen waren sehr gering, der Hang insgesamt als stabil zu bezeichnen (vgl. Zusammenstellung der Ergebnisse in Tab. 11).

Szenario 2 bis 5: Schrittweiser Anstieg des Grundwassers.

Der Grundwasserspiegel wird nun schrittweise erhöht (W_3 bis W_1), zunächst auf einen Stand innerhalb der Kössener Mergel, dann oberhalb der Kössener Mergel und schließlich an die Geländeoberkante. Da der Grundwasserspiegel nur als physikalischer Zustand betrachtet, d.h. dass nur der Porenwasserdruck als mechanische Einflussgröße in die Berechnungen eingefügt wurde. Für die Modellierung wurde der Einfluss des Wassers zusätzlich als reduzierender Faktor der mechanischen Eigenschaften der Gesteine (z.B. Mergel) in einer eigenständigen Form berücksichtigt.

Die Erhöhung des Wasserspiegels führte nur zu einer geringfügigen Absenkung des Sicherheitsbeiwerts (vgl. Tab. 11). Im ungünstigsten Fall (Wasserstand = Geländeoberkante) lag dieser bei 1,76.

Szenario 6: Erste Anpassung der mechanischen Eigenschaften der Kössener Mergel

In diesem Schritt wird der Effekt der Verwitterung der Kössener Mergel betrachtet, indem deren mechanische Eigenschaften auf $\varphi = 27^\circ$ und $C = 30$ kPa verändert werden. Der Grundwasserspiegel liegt nun wieder unterhalb der Kössener Mergel auf Level 210 m (W_1).

Der Sicherheitsfaktor reduziert sich wieder nur sehr geringfügig gegenüber dem Szenario 1 auf einen Wert von 1,82. Der Hang muss somit nach wie vor als stabil bezeichnet werden.

Szenario 7 bis 10: Erneuter schrittweiser Anstieg des Grundwasserspiegels

Analog zu Fall 2 bis 5 wird der Wasserspiegel verändert, wobei jetzt die verringerten mechanischen Eigenschaften der Kössener Mergel aus Fall 6 verwendet werden.

Auch hier kann wieder eine geringfügige Reduzierung des Sicherheitsbeiwerts mit steigendem Grundwasserspiegel beobachtet werden. Der minimal erreichte Sicherheitsbeiwert bei dem höchsten Wasserspiegel wurde mit 1,68 ermittelt.

Weitere Szenarien: Weitere schrittweise Verringerung der mechanischen Eigenschaften des Kössener Mergels bei wechselnden Wasserständen

Im Weiteren Verlauf der Modellierung wurden als Ausdruck der fortschreitenden Verwitterung die Materialparameter entsprechend der Abb. 46 jeweils schrittweise reduziert und bei verschiedenen Wasserständen die Reaktionen des Hangs simuliert.

Erst bei Verwendung eines Reibungswinkels von $\varphi = 19^\circ$ und $C = 10$ kPa für den Kössener Mergel wurde bei einem hohen Wasserstand (W_2) ein labiler Zustand des Hanges erreicht (FOS = 1,26).

Im ungünstigsten Fall ($\varphi = 19^\circ$, $C = 10$ kPa, Wasserstand W_1) wurde ein Sicherheitsbeiwert von 1,05 ermittelt, womit der Hang als extrem labil einzustufen ist. Bereits eine geringfügige Verschlechterung der Eingangsparameter oder Rahmenbedingungen würde zu einer Destabilisierung des Hanges führen.

5.1.4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rückanalyse nochmals zusammenfassend dargestellt.

5.1.4.1. Deformationen

Drei Beobachtungspunkte (P1, P2, P3) wurden auf der Oberfläche festgelegt (Abb. 47), um deren Verschiebungen in den oben beschriebenen Szenarien zu ermitteln. Die Ergebnisse werden in der Abb. 48 zusammengefasst:

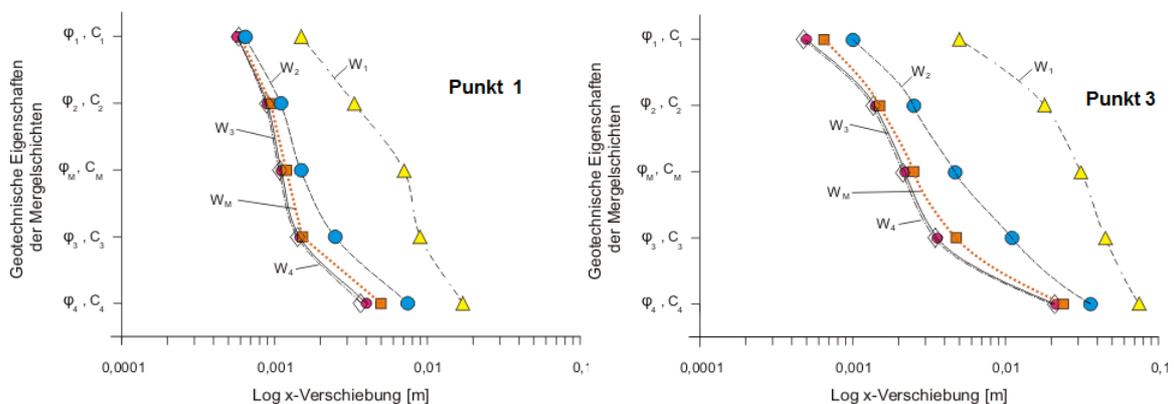


Abb. 48: Maximale x-Verschiebung der Punkte 1 und 3 nach ca. 50000 Rechenzyklen für die verschiedenen untersuchten Szenarien (vgl. Tab. 11) mit unterschiedlichen Materialparametern für die Kössener Mergel und variierenden Grundwasserständen.

In allen untersuchten Szenarien verblieben die ermittelten Gesamtdeformationen im Bereich von wenigen Millimetern bis Zentimetern. Es hat sich allerdings gezeigt, dass generell mit einer Erniedrigung der Materialparameter des Mergels und mit einer Erhöhung des Grundwasserspiegels die Deformationen zunehmen. Dabei ist in allen drei Punkten eine sehr starke Zunahme der Deformationen beim Übergang vom Fall φ_3, C_3 zu φ_4, C_4 zu beobachten, was darauf hindeutet, dass der Hang sich hier in einem extrem labilen Zustand befindet.

Während sich bei den Wasserständen W_4 , W_3 , W_M und W_2 (Abb. 47) keine wesentlichen Unterschiede bei den Deformationsraten ergeben, nehmen die Deformationen beim höchsten Wasserstand W_1 stets deutlich zu.

Betrachtet man alleine den Einfluss der Veränderung der Kohäsion auf die Deformationsbeträge, stellt man fest, dass dieser sehr gering ist. Eine Verringerung der Kohäsion um 40 kPa führt nur zu einer Zunahme der Deformation um ca. 1 bis 2 mm (nach 5000 Rechenzyklen). Anders verhält es sich bei dem Reibungswinkel. Dieser hat einen vergleichbar starken Einfluss auf die Bewegungen (Abb. 49).

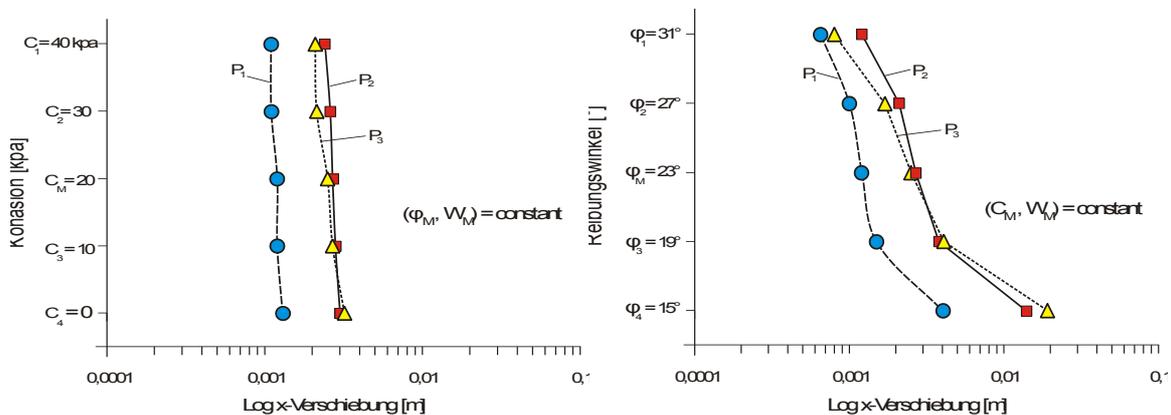


Abb. 49: Einfluss der Kohäsion und des Reibungswinkels der Kössener Mergel auf den Deformationsbetrag (nach ca. 50000 Rechenzyklen).

Die räumliche Verteilung der Deformation ist in Abb. 50 dargestellt. Es zeigt sich, dass die X-Verschiebung in den Zentralen Teilen der Hangbewegung am stärksten ist. Nach unten hin sind die Deformationen scharf abgegrenzt, was auf die Entstehung einer diskreten Scherzone parallel zu dem allgemeinen Schichteinfallen hinweist. Als Schwächezone dient die Basis der Kössener Mergel.

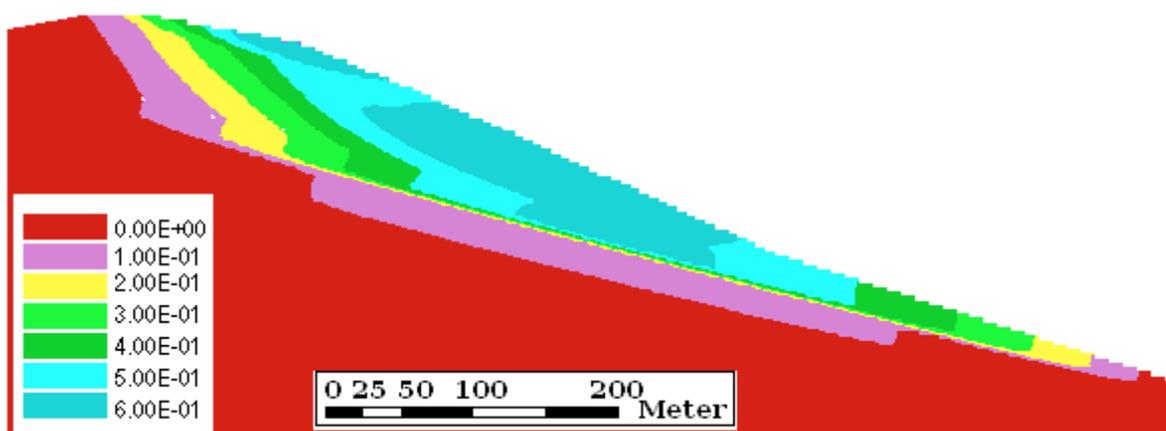


Abb. 50: Kontur-Darstellung der in FLAC ermittelten Verteilung der X-Verschiebung.

Der Vergleich des Bewegungsverhaltens der Punkte P1, P2 und P3 zeigt, dass die Punkte P2 und P3 in der Regel eine geringfügig größere X-Verschiebung aufweisen, als der Punkt P1 (Abb. 49 und Abb. 51).

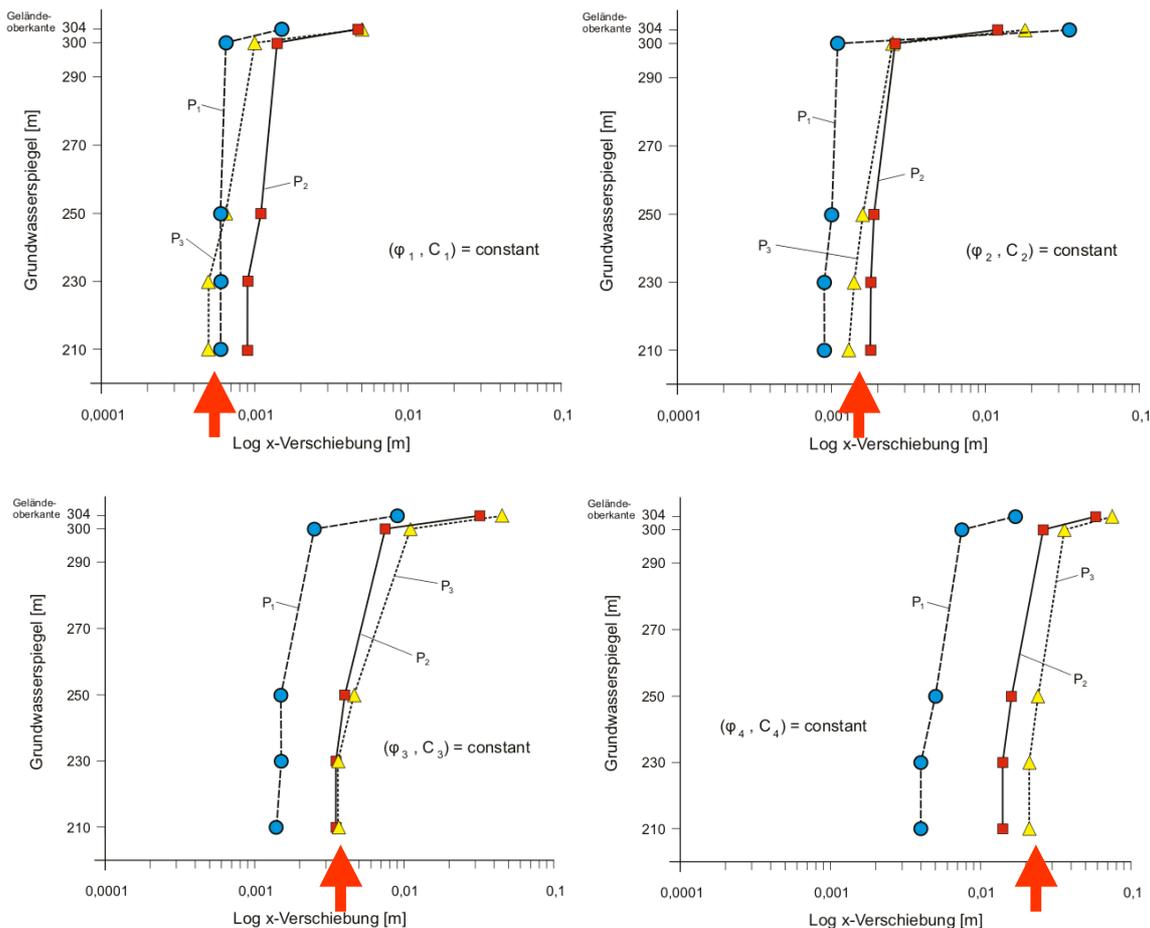


Abb. 51: Vergleich der X-Verschiebung in den Punkten P1, P2 und P3 bei 4 verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Materialparametern für den Kössener Mergel bei variierenden Grundwasserspiegeln.

Interessant ist, dass sich der am weitesten hangabwärts liegende Punkt P3 bei einer Reduzierung der Materialparameter für die Kössener Mergel, deutlich stärker beschleunigt als die anderen beiden Punkte (s. rote Pfeile in Abb. 51). Gegebenenfalls könnte dies darauf hinweisen, dass die Destabilisierung des Hanges vom Hangfuß ausgeht.

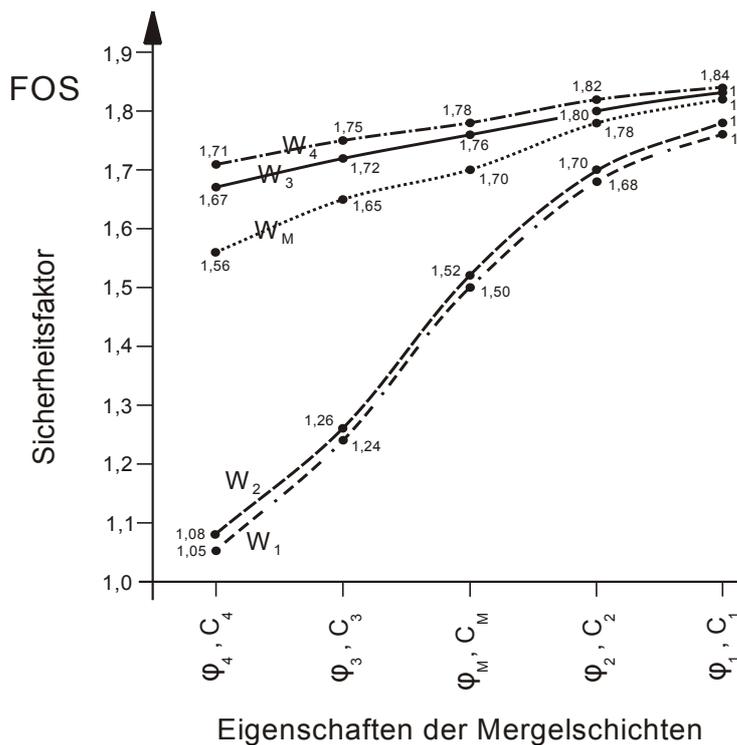
5.1.4.2. Sicherheitsfaktor

Die Entwicklung des Sicherheitsfaktors im Laufe der 25 Szenarien der Rückanalyse ist in Tab. 11 sowie in der Abb. 52 und Abb. 53 zu sehen.

Es zeigt sich dabei deutlich die starke Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors vom Wasserstand und von den Materialeigenschaften des Kössener Mergels. Während der Sicherheitsfaktor bei den Wasserständen W_4 , W_3 und W_3 stets über 1,5 bleibt und der Hang damit als stabil gelten muss, können sich bei den Wasserständen W_1 und W_2 deutlich labilere Verhältnisse ausbilden. Der Hang reagiert in diesen Fällen hinsichtlich seiner Stabilität viel stärker auf eine Reduzierung der Festigkeit des Materials.

Tab. 11: In den einzelnen Szenarien der Rückanalyse ermittelte Sicherheitsfaktoren.

Szenario	ϕ [°]	C' [kPa]	Lage des Grundwasserspiegels	FOS
1	31	40	210	1,84
2	31	40	230	1,83
3	31	40	250	1,82
4	31	40	300	1,78
5	31	40	Geländeoberkante	1,76
6	27	30	210	1,82
7	27	30	230	1,80
8	27	30	250	1,78
9	27	30	300	1,70
10	27	30	Geländeoberkante	1,68
11	23	20	210	1,78
12	23	20	230	1,76
13	23	20	250	1,70
14	23	20	300	1,52
15	23	20	Geländeoberkante	1,50
16	19	10	210	1,75
17	19	10	230	1,72
18	19	10	250	1,65
19	19	10	300	1,26
20	19	10	Geländeoberkante	1,24
21	15	0	210	1,71
22	15	0	230	1,67
23	15	0	250	1,56
24	15	0	300	1,08
25	15	0	Geländeoberkante	1,05

**Abb. 52:** Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors von den geotechnischen Eigenschaften der Kössener Mergel bei variierenden Grundwasserständen.

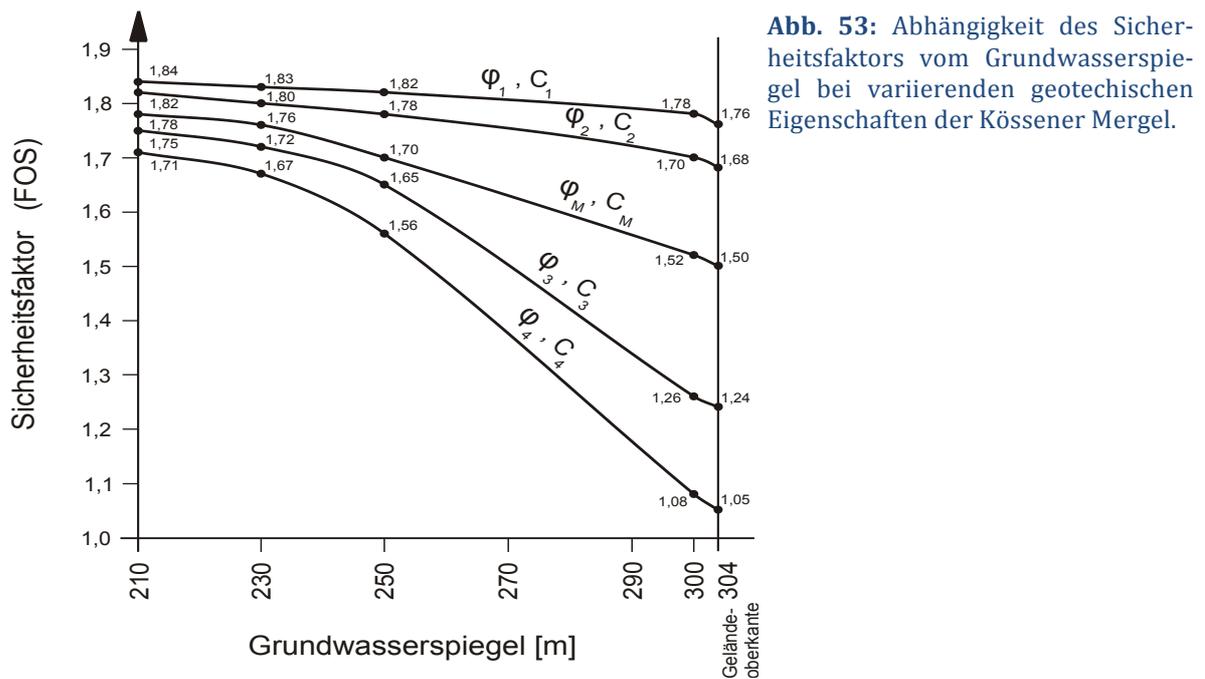


Abb. 53: Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors vom Grundwasserspiegel bei variierenden geotechnischen Eigenschaften der Kössener Mergel.

5.1.4.3. Der Sicherheitsfaktor im Vergleich mit anderen Modellen

Die Ergebnisse der hier durchgeführten FLAC Modellierung deckt sich weitestgehend mit den Ergebnissen der entsprechenden SLIDE und PHASE² Modellierung der Aggenalm Hangbewegung von JUNG (2007).

Abb. 50 zeigt die in FLAC berechnete Verschiebung des Hangs. Im Vergleich dazu ist das Ergebnis der Modellierung mit SLIDE (Abb. 54) und PHASE² (Abb. 55) dargestellt. Die Standsicherheitsberechnungen und die Ergebnisse der Modellierung mit SLIDE und PHASE² (JUNG 2007) sind in Tab. 12 und Tab. 13 zusammengestellt.

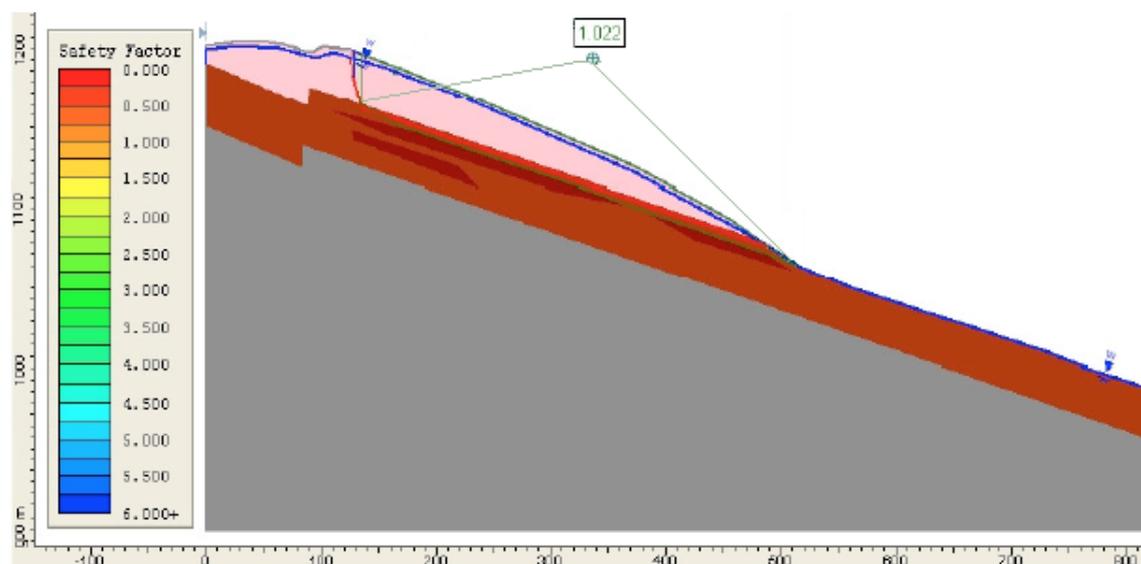
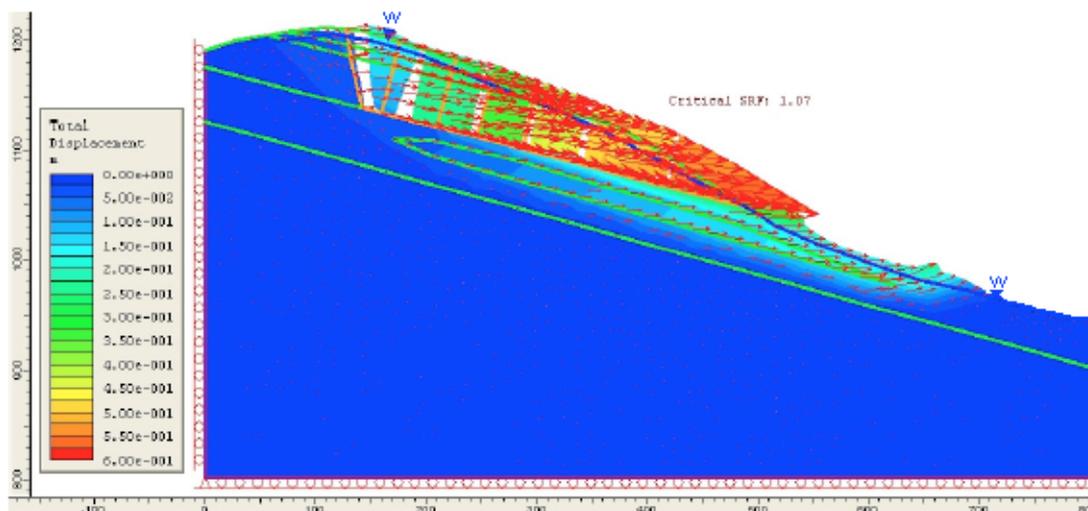


Abb. 54: Ergebnisse der SLIDE Modellierung von JUNG (2007). Die verwendeten Materialparameter entsprechen denen der FLAC Modellierung im Schritt 8 (Kössener Mergel: $\phi = 16^\circ$ und $c' = 0$ kPa)

Tab. 12: Zusammenstellung der Ergebnisse der SLIDE Modellierung von JUNG (2007).

Zustand	FOS	
	Bishop	Janbu
Trocken	1,643	1,612
Trocken und Klüfte	1,486	1,437
Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	0,868
	Innerhalb der Kössener Mergel	0,997
	Oberhalb der Kössener Mergel	0,744
Kalkeinschaltungen und Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	1,465
	Innerhalb der Kössener Mergel	1,267
	Oberhalb der Kössener Mergel	1,106

**Abb. 55:** Ergebnisse der PHASE² Modellierung von JUNG (2007). Die verwendeten Materialparameter entsprechen denen der FLAC Modellierung im Schritt 8 (Kössener Mergel: $\varphi = 16^\circ$ und $c' = 0$ kPa)**Tab. 13:** Zusammenstellung der Ergebnisse der PHASE² Modellierung von JUNG (2007).

Zustand	FOS	
Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	1,59
	Innerhalb der Kössener Mergel	1,64
	Oberhalb der Kössener Mergel	1,62
Basisgleitlinie und Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	1,28
	Innerhalb der Kössener Mergel	1,11
	Oberhalb der Kössener Mergel	0,99
Kalkeinschaltungen, und Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	2,68
	Innerhalb der Kössener Mergel	4,00
	Oberhalb der Kössener Mergel	2,51
Kalkeinschaltungen, Basisgleitlinie und Grundwasser	Unterhalb der Kössener Mergel	1,50
	Innerhalb der Kössener Mergel	1,50
	Oberhalb der Kössener Mergel	1,07

Die Bandbreite der auftretenden Sicherheitsfaktoren ist – trotz der z.T. unterschiedlichen Szenarien - bei allen Modellen in etwa gleich und bewegt sich zwischen ca. 1,8 und 1,0. In allen Modellen wird das System erst extrem labil, wenn sehr ungünstige Materialparameter für den Kössener Mergel angenommen werden.

5.1.4.4. Geotechnische Parameter

Wie bereits mehrfach angesprochen, lässt sich eine Instabilität des Ursprünglichen Hanges nur dann erreichen, wenn für den Kössener Mergel sehr ungünstige Materialparameter angenommen werden. Die Entstehung einer Hangbewegung ist unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten nur bei den Szenarien φ_3, c_3 und φ_4, c_4 sowie bei den Grundwasserständen W_1 und W_2 vorstellbar. Es ist folglich davon auszugehen dass die vermutlich verwitterten Kössener Mergel eine Kohäsion von unter 10 KPa und einen Reibungswinkel von unter 19° besitzen.

Die Materialparameter der übrigen Festgesteine zeigen, wenn sie im Rahmen einer Sensibilitätsanalyse innerhalb für die jeweilige Gesteinsart plausibler Grenzen variiert werden, keinerlei Einfluss auf die Hangbewegung. Entscheidend für die Beurteilung der Hangbewegung sind somit nahezu ausschließlich die mechanischen Eigenschaften der Kössener Schichten.

5.1.5. Diskussion

Die Aggenalm Hangbewegung wird erst durch die Verwitterung der Kössener Mergel und der damit einhergehenden Reduzierung der Festigkeit des Gesteins möglich. Dieser Prozess ist somit – zusammen mit der strukturellen Disposition (hangparalleles Einfallen der Schichten) – als Hauptursache der Aggenalm Hangbewegung anzusehen.

Die langsam ablaufende Verwitterung hat im Laufe der Zeit die Stabilität des Hanges nach und nach reduziert (Abb. 56), wodurch es zunächst zu dem plastischen Einsinken der Überlagernden Oberrhätkalke und schließlich zu einem spontanen Versagen kam. Die dabei spröde zerbrechenden Oberrhätkalke, die schon aufgrund ihrer starken Tektonisierung stark geklüftet sind, wurden dadurch weiter aufgelockert, wodurch deren Wasserwegigkeit erhöht wurde. Der dadurch erhöhte Zustrom von Wasser zu den darunterliegenden Kössener Schichten könnte zu einer weiteren Verstärkung der Verwitterung geführt haben, so dass hier insgesamt ein sich selbst verstärkender Prozess vorliegt.

Auch wenn das Ereignis von 1935, als sich der Hang in wenigen Tagen mehrere Meter hangabwärts bewegte, sicherlich nicht das Erste (und vmtl. auch nicht das letzte; vgl. Kap. 5.2.5.4) seiner Art war, zeigt es, dass im Hang bereits in der Vergangenheit die Scherfestigkeit der Gesteine überschritten wurde, so dass davon auszugehen ist, dass Scherflächen im Hang vorhanden sind. Entlang dieser können die Materialeigenschaften noch deutlich ungünstiger als die in der Modellierung angenommenen Werte ausfallen (Restscherfestigkeiten).

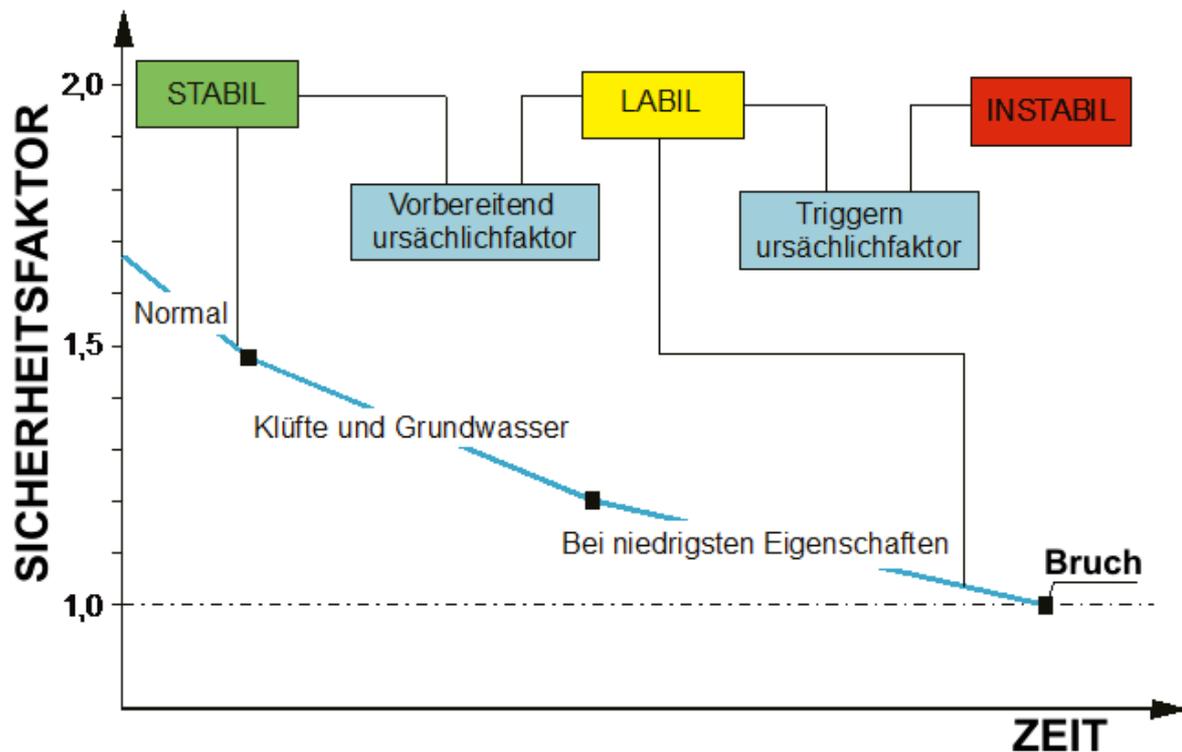


Abb. 56: Zeitabhängige Abnahme des Sicherheitsfaktors mit zunehmender Verwitterung der Kössener Mergel bis zum Böschungsbruch.

Die im Folgenden betrachteten Profile entstehen deshalb unter der Maßgabe von bereits vorhandenen Gleitflächen. Im nächsten Abschnitt folgt die Modellierung des heutigen Zustands der Aggenalm Hangbewegung (vgl. Abb. 16).

5.2. Modellierung zukünftiger Ereignisse an der Aggenalm Hangbewegung

Die Modellierung der momentanen Situation an der Aggenalm Hangbewegung dient zum einen der Evaluierung der momentanen Stabilität des Hanges (Ermittlung Sicherheitsfaktor), zum anderen aber auch der Prognose, welche Rahmenbedingungen (Triggereinflüsse) zu einer deutlichen Zunahme der Verformungen des Hanges führen kann. Diese Quantitativen Angaben können die Grundlage für die Definition von Schwellenwerten für die Triggerprozesse sein, die ein Monitoring-System nutzt, um Frühwarnungen vor einem Versagen des Hanges ausgeben zu können.

5.2.1. Geologisches Modell

Das geologische Modell der heutigen Situation an der Aggenalm Hangbewegung wurde von JUNG 2007 entwickelt und ist in Abb. 16 dargestellt. Der Grundlegende Aufbau der Hangbewegung wurde bereits in Kap. 2.3 und 2.5 erläutert.

Das neue Geländeprofil hat dieselbe Lage und Orientierung wie das zuvor betrachtete Modell (vgl. Abb. 44), zeigt aber deutliche, durch die Rutschung verursachte Änderungen.

5.2.2. FLAC Modell

Auf Grundlage des geologischen Modells der Aggenalm Hangbewegung wurde das in Abb. 57 dargestellte Modell in FLAC generiert.

5.2.2.1. Definition der Geometrie

Die Geometrie der Topographie und der geologischen Einheiten wurden deutlich vereinfacht, um die Rechenzeiten gering zu halten. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass alle wesentlichen geologischen Einheiten vorhanden sind und die wesentlichen Strukturelemente erhalten geblieben sind.

Wesentlich ist z.B. die Integration von Klüften in den Oberrhätkalk, wobei deren Orientierung sich nach den Geländebefunden von JUNG 2007 richtet.

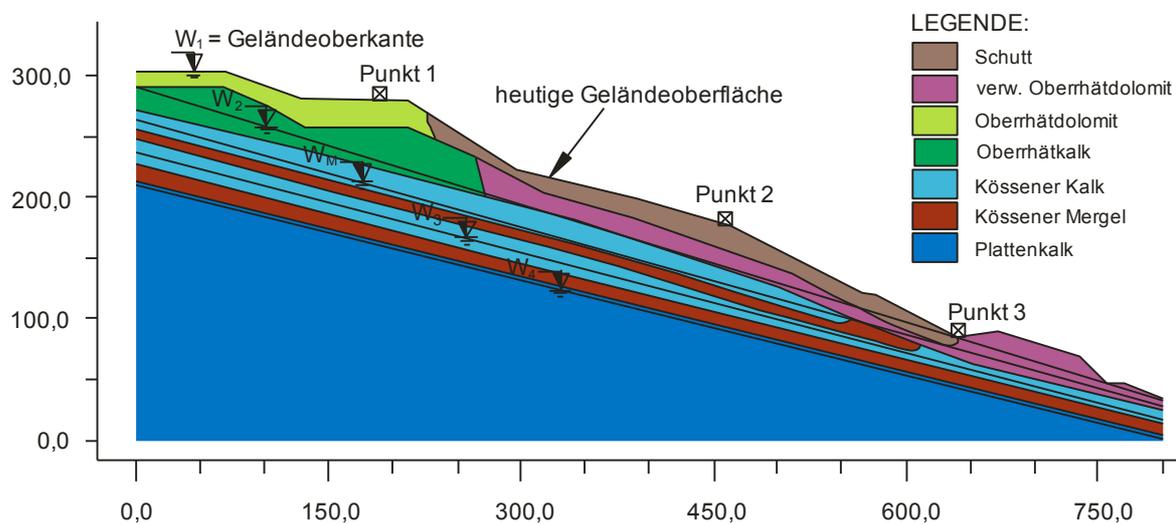


Abb. 57: Geometrie, Gesteinsschichten, Wasserstände und Beobachtungspunkte P1, P2 und P3.

5.2.2.2. Generierung des Gitters

Wie im vorhergehenden Modell wurde auch hier ein Gitter mit einer Maschenweite von 3,2 x 3,2 m gewählt (Abb. 58).

5.2.2.3. Definition der Rahmenbedingungen

Entlang des linken und rechten Modellrandes wurde Bewegungen in Y-Richtungen zugelassen (Abb. 58). Bewegungen in X-Richtung sind dort nicht zulässig. Die Basislinie des Modells wurde fixiert (keine Verschiebungen möglich). Die Ausdehnung des Modells wurde groß genug gewählt, so dass ggf. auftretende Randeefekte die Ergebnisse der Simulation der Hangbewegung nicht beeinflussen können.

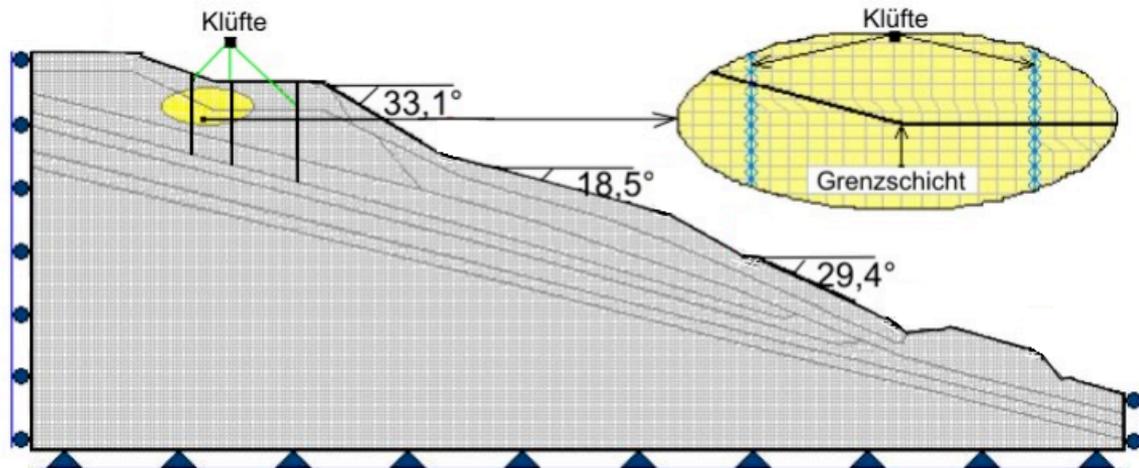


Abb. 58: Gitter und Grenzbedingungen des Modells der aktuellen Situation an der Aggenalm.

5.2.2.4. Materialparameter

Im Wesentlichen wurden die bereits im ersten Modell verwendeten Eingangsparameter auch in diesem Modell verwendet (vgl. Kap. 5.1.2.4 und hier insbesondere Tab. 6). Auf Grundlage der Rückanalyse konnten die geotechnischen Eigenschaften der Kössener Mergel eingegrenzt werden: diese müssen, um eine Instabilität des Hanges zu ermöglichen, sehr geringe Kohäsion und einen geringen Reibungswinkel besitzen ($\varphi < 19^\circ$ und $c' < 10$ kPa; vgl. Kap. 5.1.4.4). Nichts desto trotz – um die Sensibilität des jetzigen Hanges auf eine Variation der Materialeigenschaften des Kössener Mergels zu ermitteln – wurden wiederum alle in Abb. 46 dargestellten Materialparameter-Kombinationen bei der Modellierung überprüft.

5.2.2.5. Grundwasserspiegel

Fünf verschiedene Grundwasserspiegel (W_1, W_2, W_M, W_3, W_4) wurden bei dieser Modellierung berücksichtigt, deren Lage in Abb. 57 dargestellt ist. Der Wasserstand W_2 entspricht dabei in etwa dem tatsächlich in den Bohrungen ermittelten Grundwasserspiegel in der Hangbewegung.

5.2.2.6. Seismizität

Wie beim vorherigen Modell wurde keine zusätzliche dynamische Belastung berücksichtigt, da die Aggenalm innerhalb der Erbebenzone „0“ liegt (vgl. Abb. 26).

5.2.3. Verlauf der Modellierung

Für die Modellierung wurde erneut ein eigenständiges Programm in FLAC geschrieben (Anlage 1) und die Kennwerte aus Laboruntersuchungen, Literatur und Rückanalyse für die einzelnen Szenarien verwendet. Die jeweiligen Szenarien werden mit die-

sem Programm berechnet und entsprechend modelliert. Die Entwicklung des Grundwasserspiegels, der Klüfte und insbesondere der Verwitterung der Kössener Mergel wurde betrachtet. Bei den Szenarien 1 bis 6 wurden für die Kössener Mergel zunächst sehr hohe Werte für Kohäsion und Reibungswinkel angesetzt und bei den folgenden Szenarien schrittweise reduziert. Um den Einfluss des Grundwasserspiegels zu ermitteln, wurde anfangs mit einem absolut trockenen Zustand angefangen und dann der Grundwasserspiegel sukzessive erhöht. Deshalb wurde als erstes der Grundwasserspiegel bis zur Liegendgrenze der Kössener Mergel und dann in Höhen 230, 250, 300 Meter bis zur Geländeoberkante angehoben.

Um die Ergebnisse der Rückanalyse zu berücksichtigen, wurden der Grundwasserspiegel angehoben und die geotechnischen Eigenschaften der Mergel in den Szenarien noch weiter herabgesetzt, d.h. der Reibungswinkel wurde bis auf 15° und die Kohäsion bis auf 0 kPa verringert (vgl. Kapitel 5.1.4.4).

Letztlich wurde durch die Variation der verschiedenen Parameter eine Sensitivitätsanalyse für den Einfluss des Wasserstands und der mechanischen Eigenschaften des Kössener Mergels auf die Stabilität des Hangs durchgeführt.

5.2.4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung des heutigen Zustands der Aggenalm Hangbewegung zeigen unter welchen Bedingungen es zu einer starken Zunahme der Deformationen kommen kann. Zudem geben sie Aufschluss über die der Hangbewegung zugrundeliegenden Mechanismen.

5.2.4.1. Deformationen

Je nach Parameterkombination (Geotechnische Eigenschaften des Kössener Mergels und Wasserstand) wurden nach ca. 50000 Rechenzyklen an den Punkten 1, 2 und 3 (vgl. Abb. 57) unterschiedliche Beträge der Gesamtdeformation ermittelt. Diese schwanken von < 1 mm bis über 1 m. Da die Deformation nicht mit einer tatsächlichen Zeit korreliert werden können, sind nur relative Vergleiche zwischen den einzelnen Parameterkombinationen möglich. Der Betrag der Gesamtdeformation kann dabei als Indikator der Aktivität gelten.

In Abb. 59 sind die maximalen Deformationsbeträge der Punkte 1, 2 und 3 (vgl. Abb. 57) in X-Richtung den geotechnischen Eigenschaften der Mergel bei verschiedenen Grundwasserständen gegenübergestellt. Es zeigen sich folgende Gesetzmäßigkeiten bzw. Auffälligkeiten:

- Der Deformationsbetrag nimmt grundsätzlich zu wenn die geomechanischen Eigenschaften (Kohäsion und Reibungswinkel) der Kössener Mergel reduziert werden, wobei der Punkt 3 am stärksten, der Punkt 1 am schwächsten reagiert.

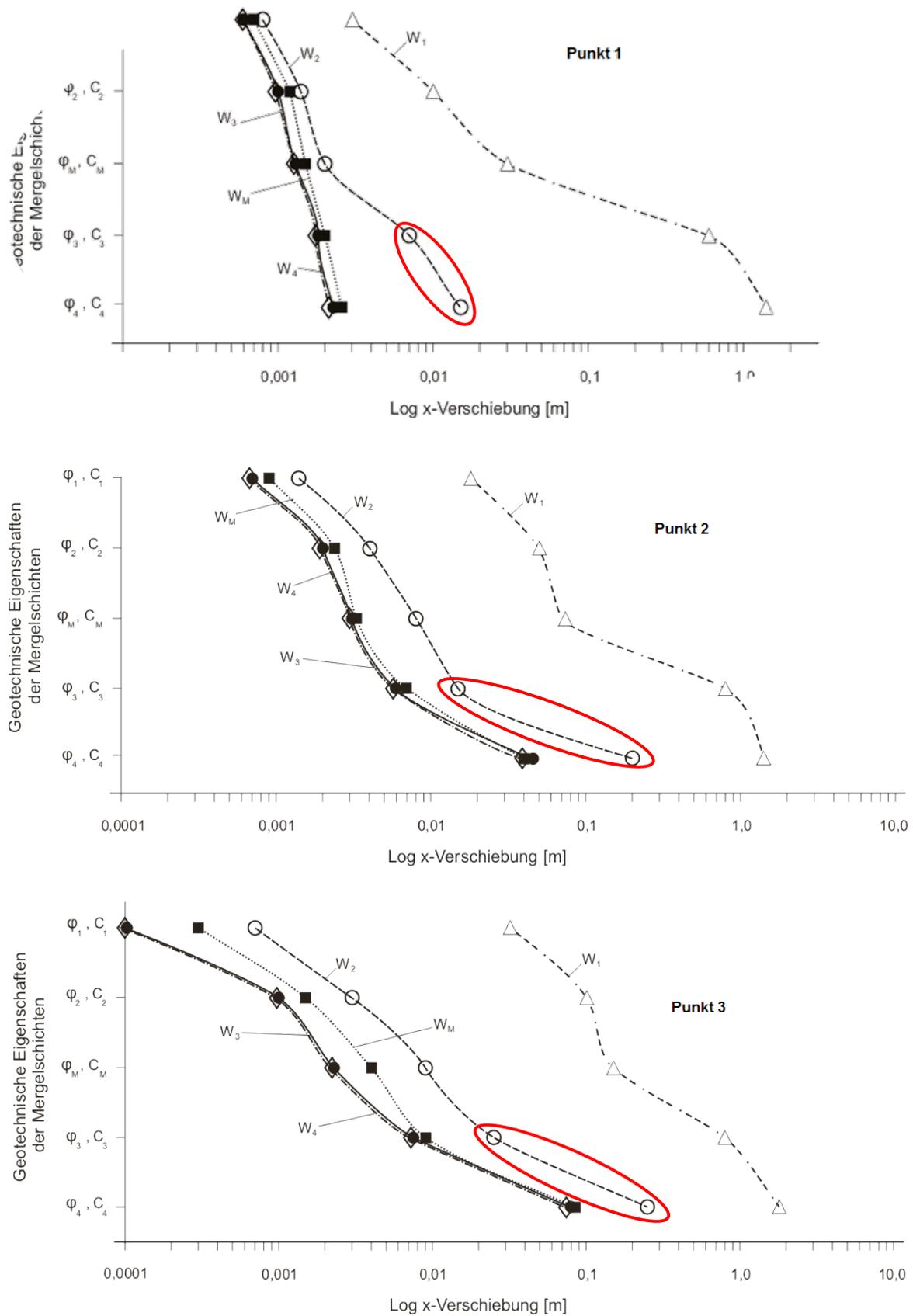


Abb. 59: Maximale x-Verschiebung der Punkte 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten) (vgl. Abb. 57) nach 5000 Rechenzyklen für die verschiedenen untersuchten Szenarien der heutigen Aggenalm Hangbewegung mit unterschiedlichen Materialparametern für die Kössener Mergel und variierenden Grundwasserständen. Die rote Markierung hebt jeweils die lt. Rückanalyse und Wasserstandsmessungen realitätsnächsten Szenarien hervor.

- Die Ergebnisse bei den Wasserständen W_M , W_3 und W_4 unterscheiden sich kaum voneinander. Diese niedrigen Wasserstände scheinen die Hangbewegung nicht zu beeinflussen.
- Ab dem Wasserstand W_2 zeigt sich eine starke Zunahme der Deformationsbeträge durch den steigenden Wasserspiegel. Siehe dazu auch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Kapitel (5.2.4.2).
- In den Fällen φ_3 , c_3 und φ_4 , c_4 nehmen die Deformationen in den Punkten 2 und 3 bei allen Wasserständen deutlich zu, im Punkt 1 ist dies nur bei den Wasserständen W_1 und W_2 der Fall.
- Insgesamt zeigen die Punkte P1, P2 und P3 ein sehr ähnliches Verhalten.

5.2.4.2. Sensitivitätsanalysen

Betrachtet man die Abhängigkeit des Deformationsbetrags von den Materialparametern der Kössener Mergel (hier: Kohäsion und Reibungswinkel), zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Modellierung des Ausgangszustands der Hangbewegung (vgl. Kap. 5.1.4.1): Während die Kohäsion nur geringen Einfluss auf die X-Verschiebung hat, wirkt sich einer Änderung des Reibungswinkels sehr stark aus. Insbesondere wenn der Reibungswinkel unter ca. 20° sinkt, nimmt die Deformation stark zu (Abb. 60).

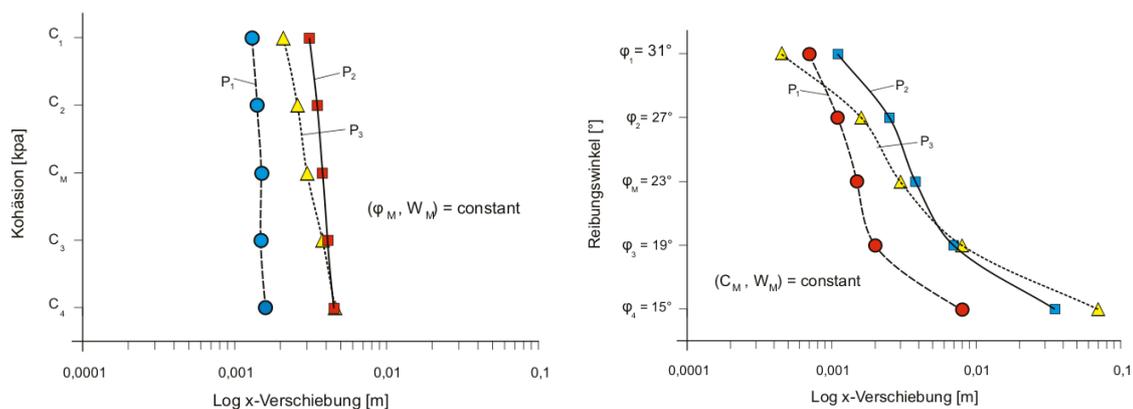


Abb. 60: Einfluss der Kohäsion und des Reibungswinkels der Kössener Mergel auf den Deformationsbetrag (nach ca. 50000 Rechenzyklen).

Der Einfluss einer Änderung des Wasserspiegels auf die Deformationen der Kontrollpunkte bei verschiedenen geotechnischen Eigenschaften des Mergels ist in Abb. 61 dargestellt. Die Diagramme zeigen deutlich die in der Regel geringe Beeinflussung der Messpunkte durch den Wasserpegel in den Fällen W_M , W_3 und W_4 und die deutliche Zunahme der Deformation im Fall W_1 .

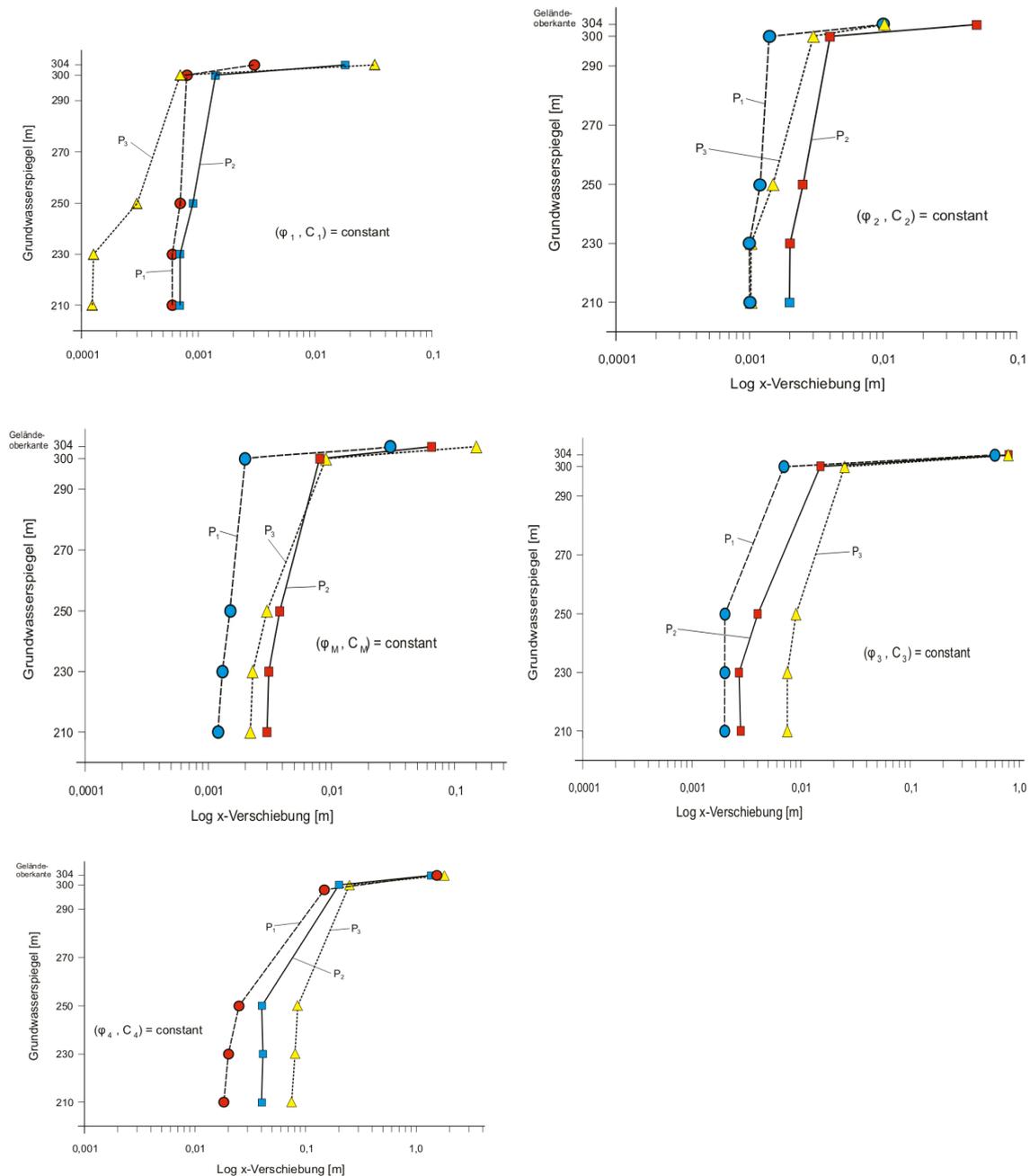


Abb. 61: Vergleich der X-Verschiebung in den Kontrollpunkten bei 5 verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Materialparametern für den Kössener Mergel bei variierenden Grundwasserspiegeln.

5.2.4.3. Bereiche plastischer Deformation

Das Mohr-Coulomb Kriterium bestimmt die Grenze zur plastischen Verformung durch Abscheren (vgl. Kap. 4.6.2). Überschreiten die Spannungsverhältnisse im Hang das Mohr-Coulomb Kriterium, kommt es demnach zu einem plastischen Fließen des Materials. FLAC bietet die Möglichkeit sich die Bereiche des Modells anzuzeigen, in denen plastische Verformungen auftreten. Abb. 62 zeigt diese beispielhaft für eine Modellierung der Aggenalm Hangbewegung. Dabei wird klar ersichtlich, dass sich die plastischen Deformationen auf die Kössener Mergel konzentrieren, was aufgrund de-

ren Materialeigenschaften nicht verwundert. Da sich der Plastizitätsbereich linienartig im Modell ausbreitet, ist hier mit der Ausbildung einer Scherzone zu rechnen.

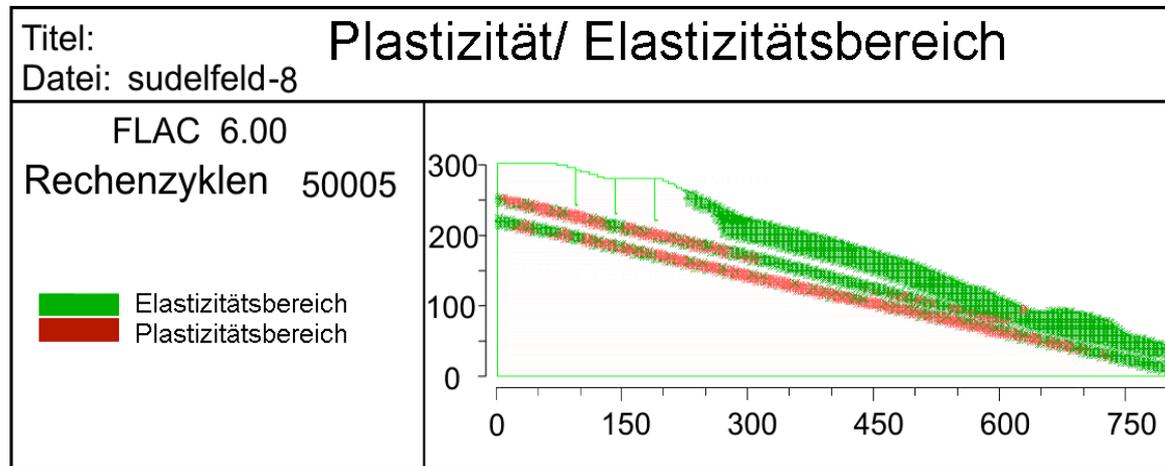


Abb. 62: Beispiel der Anzeige von Elastizitäts- und Plastizitätsbereiche in der Aggenalm Hangbewegung mit FLAC. Hier ist ein Modell im Szenario c_M , φ_M und W_M gezeigt.

5.2.5. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung im Kontext der Messergebnisse des Monitorings der Aggenalm Hangbewegung diskutiert.

5.2.5.1. Vergleich des Modells mit den Messergebnissen des Monitorings

Da sich die auf Rechenzyklen basierenden Deformationsangaben nicht mit realer Zeit korrelieren lassen, ist ein direkter Vergleich zwischen der beim Monitoring ermittelten Deformation und der Modell-Deformation nicht möglich.

Betrachtet man den Fall, der nach den Ergebnissen der Rückanalyse (Bestimmung Materialparameter der Kössener Mergel) und den Piezometer-Messungen (Bestimmung des mittleren Wasserspiegels) der momentan im Hang vorliegenden Situation am nächsten kommt (Bereich zwischen φ_3 , c_3 und φ_4 , c_4 sowie W_2), ergeben sich im Modell für die beobachteten Messpunkte summierte Deformationsbeträge zwischen 0,5 cm und 25 cm. Mit dem Monitoringsystem an der Aggenalm wurden langfristig zwischen 1 und 2 cm Deformation pro Jahr ermittelt (GALLEMANN 2008, vgl. Abb. 63).

Die geodätische Vermessung hat ergeben, dass die über den Hang verteilten Bewegungsvektoren relativ gleichförmig sind (Abb. 64). Große Unterschiede in den Deformationsbeträgen an unterschiedlichen Stellen der Hangbewegung sind nicht zu beobachten. Die drei über den Hang verteilten Beobachtungspunkte zeigen für den Fall φ_4 , c_4 und W_2 Unterschiede mit einem Faktor von bis zu ca. 10. Für den Fall φ_3 , c_3 und W_2 sind die Bewegungen deutlich gleichförmiger – es treten nur noch Unterschiede mit einem Faktor von ca. 3 auf. Die Beträge liegen dabei im Bereich 0,7 bis 2,5 cm. Das

Konturendiagramm der Deformationen zeigt eine deutlich ungleichförmige Bewegung (Abb. 65).

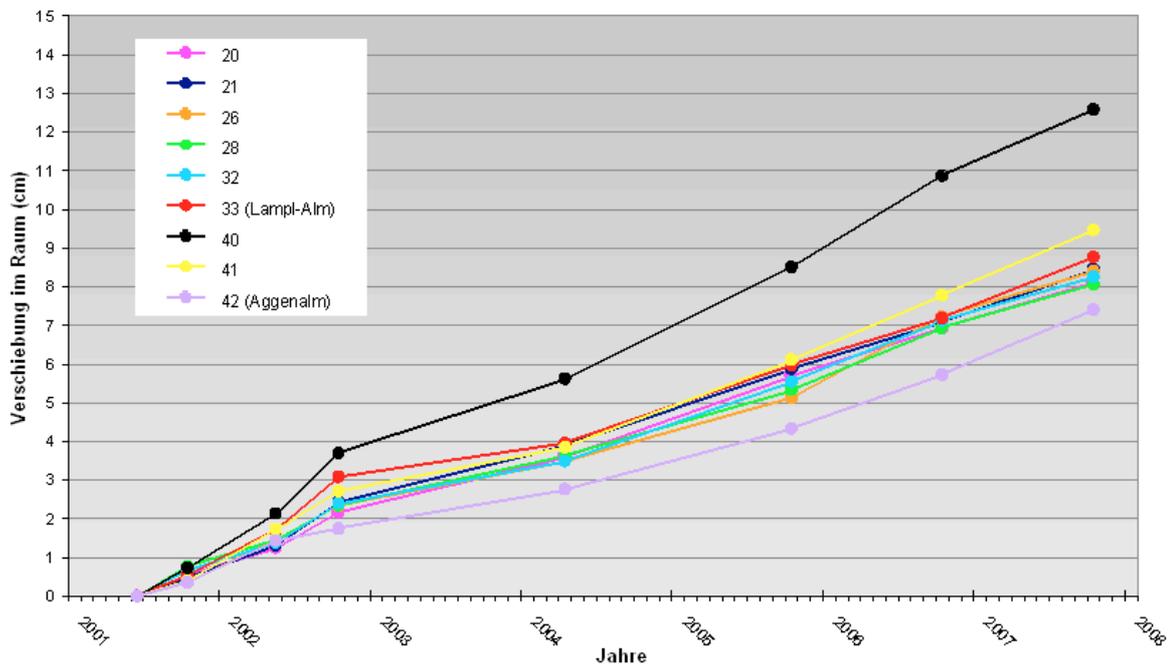


Abb. 63: Verschiebungen ausgewählter Messpunkte an der Aggenalm Hangbewegung über die Zeit (GALLEMANN 2008).

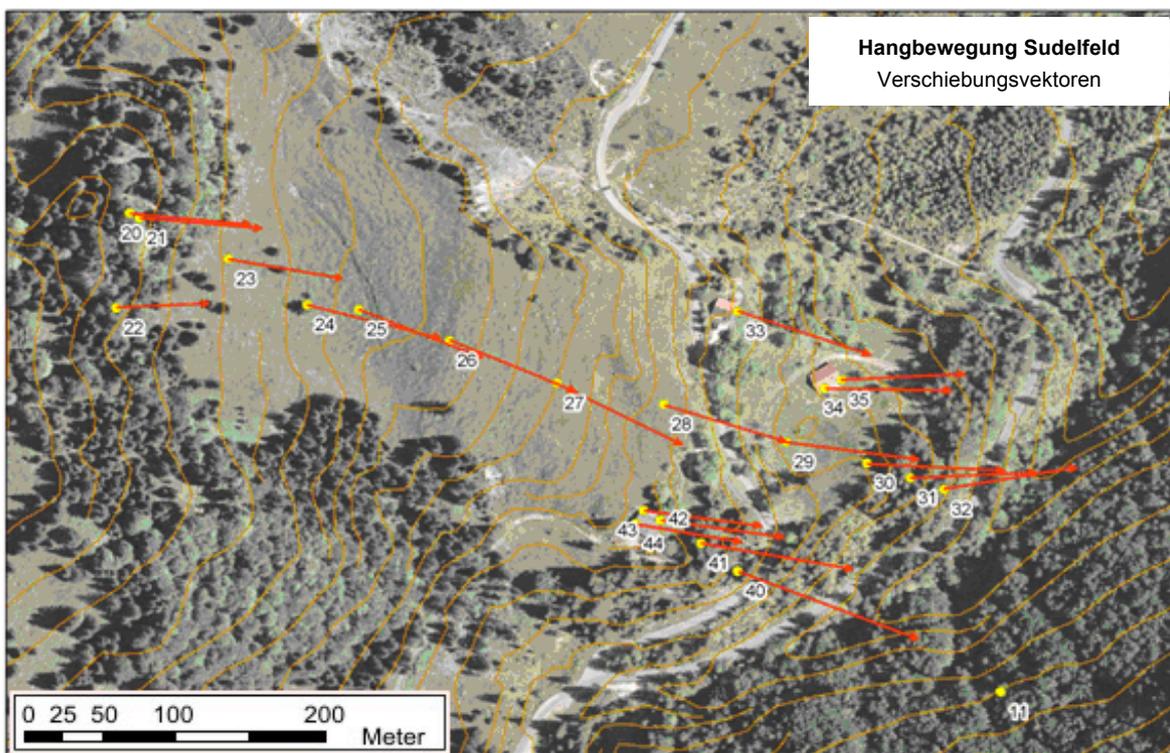


Abb. 64: Die Verschiebungsvektoren an verschiedenen Punkten der Aggenalm Hangbewegung (GALLEMANN 2008). Die Deformationsbeträge liegen zwischen 1 und 2 cm pro Jahr.

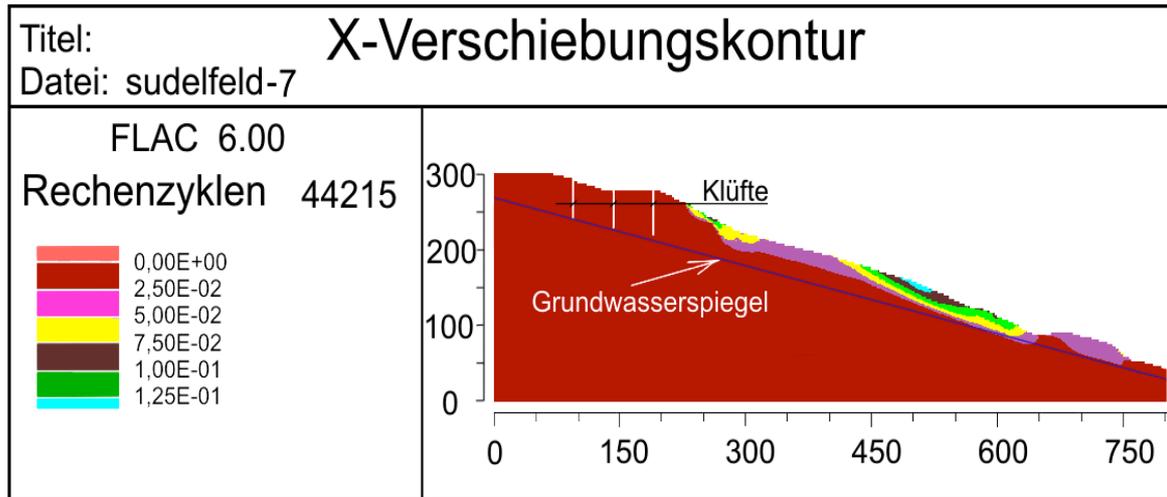


Abb. 65: Konturendiagramm der X-Verschiebung in der Hangbewegung Aggenalm für das Szenario c_M , φ_M und W_M .

Die Orientierung der in der Modellierung ermittelten Deformationen kann der Abb. 66 entnommen werden. Es zeigt sich dass diese grundsätzlich nahezu Hangparallel verlaufen. Am Hangfuß kommt es zu einer leichten Verflachung der Vektoren, was auf ein Ausbauchen des Hangfußes hindeutet. Die geodätische Vermessung der Aggenalm Hangbewegung zeigt ebenfalls generell hangparallele Verformungspfade.

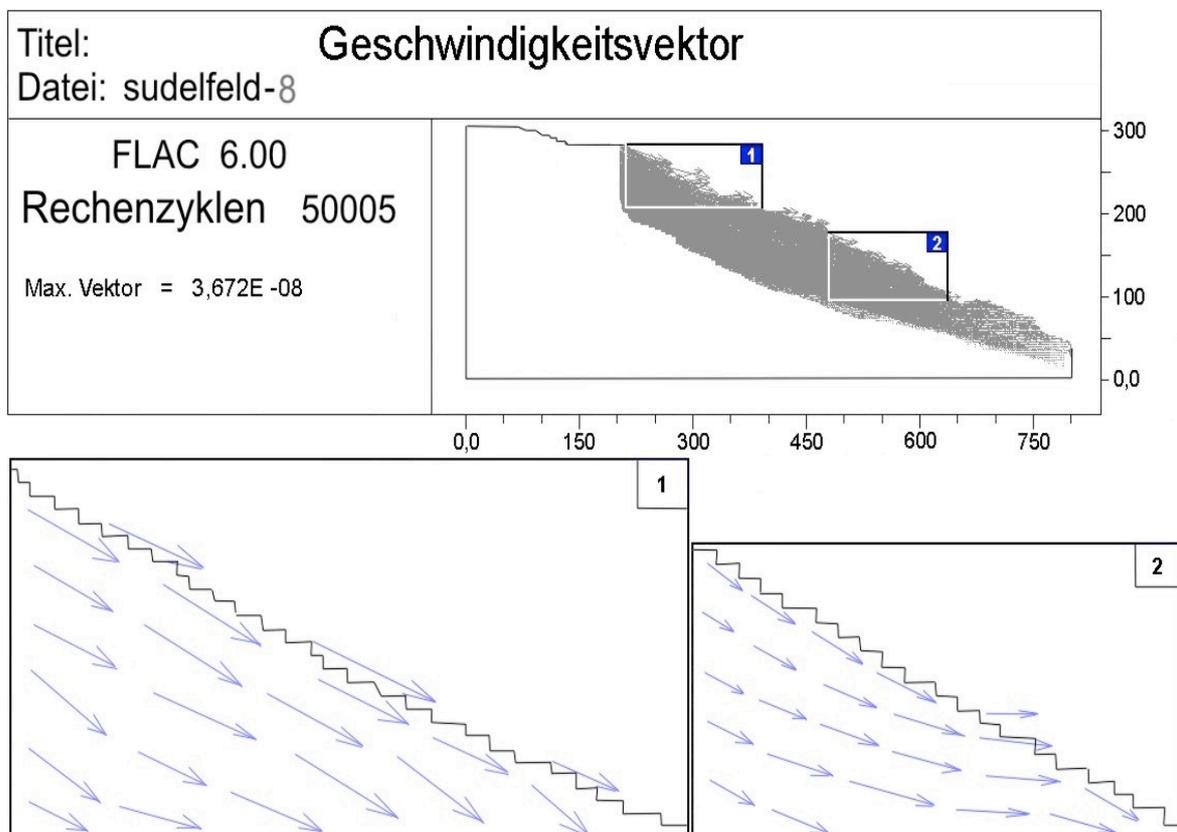


Abb. 66: Geschwindigkeitsvektoren der Aggenalm Hangbewegung im ungünstigsten Fall (Kössener Mergel $\varphi = 15^\circ$ und $c' = 0$ kPa; Wasserstand W_1).

Aus den Daten des kontinuierlichen Monitorings der Aggenalm Hangbewegung konnte eine Verstärkung der Bewegungen durch eine Erhöhung des Grundwasserspiegels nachgewiesen werden (vgl. Abb. 34). Dieses Verhalten konnte auch in dem Modell nachgewiesen werden (Übergang von W_2 auf W_1 ; vgl. Abb. 61).

Zusammenfassend scheint das Szenario φ_3, c_3 zusammen mit dem Wasserstand W_2 die tatsächlichen Verhältnisse an der Aggenalm Hangbewegung am besten abzubilden. Die Größenordnung und Orientierung der Deformation, die Gleichförmigkeit der Bewegung über den Hang und die Sensibilität auf einen Grundwasserspiegelanstieg stimmen hier mit dem tatsächlichen, durch die Monitoring-Verfahren nachgewiesenen Verhalten des Hanges überein.

5.2.5.2. Klassifizierung der Aggenalm Hangbewegung

Es ist sehr wichtig, die Hangbewegung zu klassifizieren. Den hier vorgestellten Definitionen kommt wesentliche Bedeutung für die Erkennung und Beschreibung von Massenbewegungen zu. Sie eröffnen die Möglichkeit, Hangbewegungen anhand ihrer Morphologie und des Prozessverhaltens zu klassifizieren. DIKAU et. al. (1996) beschreibt eine Klassifikationsstruktur, welche die Variabilität der involvierten Materialien und der Prozesstypen beschreibt. Diese Struktur baut auf derjenigen von VARNES (1978) und der komplexeren Klassifikation von HUTCHINSON (1988) auf.

Die Klassifikation der Hangbewegungen erfolgt in dieser Arbeit nach dem von der UNESCO –Arbeitsgruppe "Weltweite Dokumentation von Rutschungen" erarbeiteten Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI 1993). In der Abb. 67 werden die fünf Bewegungsgrundtypen Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Fließen dargestellt.

Nach den Ergebnissen der Modellierung verläuft die Bewegung des Hanges auf den oberen Schichten der Kössener Mergel und kann im oberen Bereich des Hanges als Driften bezeichnet werden. Driften ist eine laterale Ausdehnung bzw. Extension von kohäsiven Lockergesteins- oder Felsmassen. Das liegende Substrat ist plastisch, so dass der geklüftete, kohäsive Gesteinsverband einsinkt. Bei den Driften ist die Gleitfläche keine Scherfläche. Driften kann durch Verflüssigung oder Fließen (und Extrusion) des liegenden oder weniger kompetenten Substrats verursacht werden.

Die Ergebnisse der Modellierungen unter hohen Wasserständen (Fall W_1 ; Abb. 61), die eine starke Erhöhung der Deformationsraten und eine linienhafte Konzentration der plastischen (Scher-)Deformation zeigen (Abb. 62), legen den Schluss nahe, dass der Mechanismus der Hangbewegung unter diesen Umständen in ein Rutschen übergehen kann.

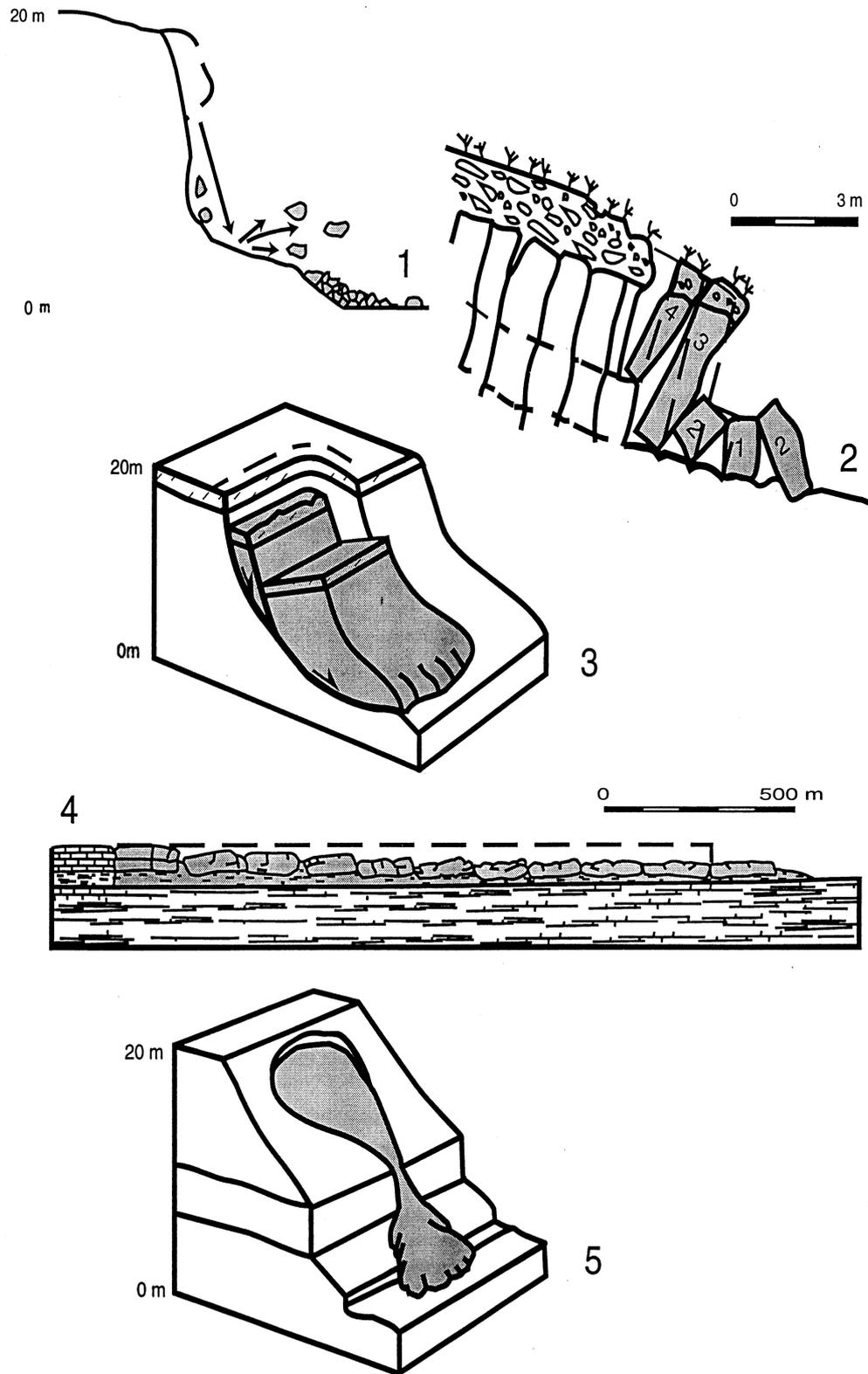


Abb. 67: Verschiedene Hangbewegungstypen: 1: Fallen/Stürzen, 2: Kippen, 3: Rutschen, 4: Driften, 5: Fließen (WP/WLI 1993).

5.2.5.3. Aktivität der Aggenalm Hangbewegung

Beim Thema der Geschwindigkeit einer Hangbewegung ergibt sich stets die Frage, ob ein aktuelles Modell bei langsamen Bewegungsraten auch zur Prognose zukünftiger Abläufe verwendet werden kann. Die Geschwindigkeiten einer Hangbewegung in einer Modellierung können auf zwei Arten bestimmt werden. Zum einen durch Integration aller Geschwindigkeiten im gesamten Feld, und zum anderen durch die Auswahl einzelner Punkte im Gitter und dem Verlauf ihrer Geschwindigkeiten während der Rutschung. Beide Arten können für verschiedene Fragestellungen nützlich sein.

Stationäre Bedingungen können vermutet werden, wenn alle Geschwindigkeiten ähnliche Werte zeigen. Wenn alle Geschwindigkeiten nahe null sind (d.h. bei ihren Anfangswerten), dann hat sich ein erneutes Gleichgewicht eingestellt und die Hangbewegung ist zum Stillstand gekommen. Wenn alle Geschwindigkeiten einen ähnlichen Wert ungleich Null betragen, dann findet vermutlich ein gleichmäßiges plastisches Fließen der gesamten Hangbewegung statt. Zeigen eine oder mehr Bereiche der Hangbewegung schwankende Geschwindigkeiten, dann ist das System in einer instabilen Phase.

Wie oben bereits beschrieben zeigt das Monitoring der Aggenalm Hangbewegung gleichförmige Bewegungen im Bereich von 1 bis 2 cm pro Jahr. Nach CRUDEN & VARNES 1996 handelt es sich bei der Aggenalm Hangbewegung damit um eine „langsame“ Hangbewegung (vgl. Geschwindigkeitsklassifikation in Tab. 14). Die Aggenalm Hangbewegung ist aufgrund der laufend stattfindenden Deformationen als „aktiv“ zu bezeichnen.

Tab. 14: Einteilung der Hangbewegung in Geschwindigkeitsklassen nach CRUDEN & VARNES 1996 (zitiert in ZANGERL et al. 2008)

Klasse	Beschreibung	Geschwindigkeit	Potentielle Auswirkungen
7	extrem rasch	5×10^3 mm/s 5 m/s	Sehr großes Zerstörungspotential, viele Tote, Evakuierung unmöglich, großer Sachschaden
6	sehr rasch	5×10^1 mm/s 5 m/ min	Großes Zerstörungspotential, einige Tote, Evakuierung teilweise möglich, großer Sachschaden
5	rasch	5×10^{-1} mm/s 5 m/ h	Zerstörungspotential vorhanden, vsl. keine Toten da Evakuierung möglich, großer Sachschaden
4	mäßig	5×10^{-3} mm/s 5 m/ Monat	Sachschaden an Gebäuden und Infrastruktur
3	langsam	5×10^{-5} mm/s 5 m/ Jahr	Sachschaden an Gebäuden und Infrastruktur, Sanierung je nach Hang-Geschwindigkeit teilweise möglich
2	sehr langsam	5×10^{-7} mm/s 5 mm/ Jahr	Differentielle Bewegung führen zu Schäden an Bauwerken, manche Strukturen bleiben unbeeinflusst
1	extrem langsam	$< 5 \times 10^{-7}$ mm/s < 5 mm/ Jahr	ohne instrumentelle Messung keine Bewegung erkennbar, Bebauung mit Vorkehrungen möglich

5.2.5.4. Versagens-Szenario

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass ein starker Anstieg des Grundwasserspiegels eine deutliche Zunahme der Deformationsraten bei gleichzeitiger Konzentration der plastischen Deformation auf die Mergellagen hervorrufen kann (vgl. Kap. 5.2.5.2) und somit eine Rutschung ausgelöst werden kann.

Dieser Prozess ist jedoch auf den unteren Teil des Hanges beschränkt (Abb. 68). Im oberen Hangbereich, wo eine mächtige Oberrhätalk-Auflage die Kössener Schichten überdeckt, bildet sich im Modell keine Rutschung aus. Hier kommt es lediglich zu einer leichten Beschleunigung des Driftens. In der Folge treten hier auch deutlich geringere Gesamtdeformationen auf als im unteren Hangbereich (vgl. Abb. 61).

Es ist zu Vermuten, dass in Folge des Abrutschens des unteren Hangbereichs mittelfristig auch die Deformationen im oberen Hangbereich deutlich zunehmen, da die Rutschung das Widerlager der driftenden Oberrhätalk-Schollen zumindest teilweise entfernt hat und damit die Freiheitsgrade der Schollen erhöht hat.

Um ein Abrutschen des unteren Hanges auszulösen muss es zu einem extrem hohen Grundwasserpegel kommen (vgl. Szenario W_1 in Abb. 57). Dies kann nur durch eine starke Schneeschmelze (Tauflut) und/oder heftige Niederschläge verursacht werden. Ersteres wird auch bei dem Ereignis von 1935 beschrieben (vgl. Kap. 2.2). Es ist jedoch nicht überliefert, ob die damalige schnelle Hangbewegung nur auf den unteren Hangbereich beschränkt war, wie es das Modell postuliert.

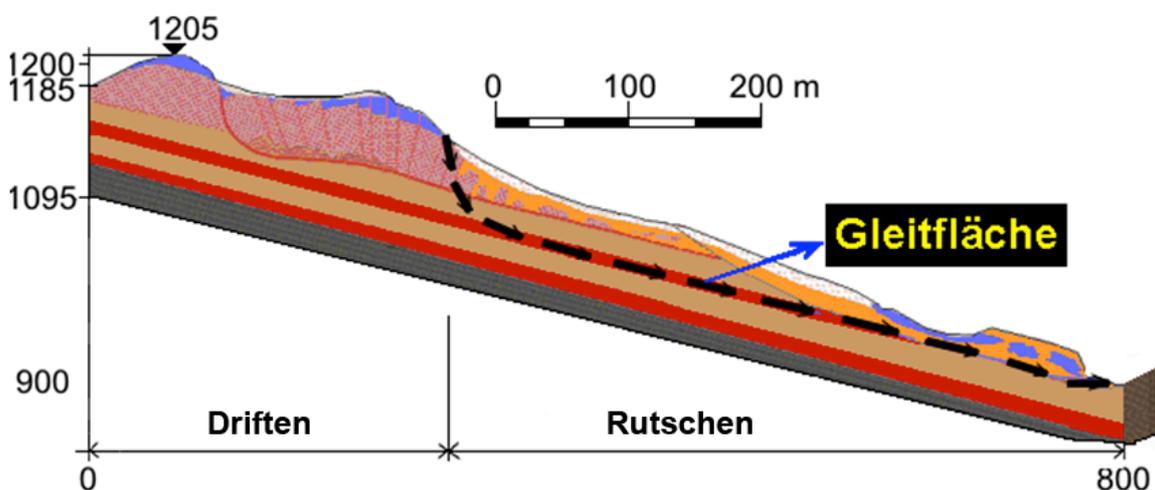


Abb. 68: Versagens-Szenario der Aggenalm Hangbewegung nach einem Extremniederschlagsereignis ggf. im Zusammenwirken mit der Schneeschmelze im Frühjahr (Tauflut).

Der Übergang zwischen den Szenarien W_1 und W_2 markiert den Bereich in dem ein Grundwasseranstieg zur Auslösung einer Rutschung führen kann. Da keine weiteren Szenarien zwischen W_1 und W_2 mehr modelliert wurden kann der genaue für die Aus-

lösung der Hangbewegung nötige Grundwasseranstieg nicht ermittelt werden. Die Größenordnung liegt aber bei ca. 2 bis 5 m. Bislang wurden trotz einiger Starkregeneignisse (bis zu ca. 100 l in 24 h) und starker Schneeschmelze im Frühjahr in den Piezometern Wasserspiegelschwankungen von maximal ca. 1 m gemessen. Dies zeigt, dass die Jährlichkeit eines Rutschereignisses an der Aggenalm Hangbewegung vermutlich sehr hoch und damit die Gefahr eines solchen Ereignisses sehr klein ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Modellierungen der Aggenalm Hangbewegung konnten die meisten der im Gelände u.a. auch mit Hilfe von Monitoringsystemen beobachteten und gemessenen Phänomene nachbilden und damit wichtige Erkenntnisse bezüglich der Mechanik des Hanges liefern.

So konnte zum Beispiel aus der Rückanalyse der Hangbewegung das für das Versagen des Hanges entscheidende Gestein – die Kössener Mergel - identifiziert und deren Materialeigenschaften bestimmt werden. Desweiteren konnten die wichtigsten Ursachen für die Hangbewegung identifiziert werden (Verwitterung, geologische Struktur) und der aus den historischen Ereignissen bekannte Trigger-Mechanismus (Niederschlag bzw. hohe Grundwasserstände) verifiziert und quantifiziert werden.

Die Modellierung der heutigen Hangsituation gibt Auskunft über die Stabilität des Hanges und erlaubt es ein mögliches – wenn auch unwahrscheinliches – Versagens-Szenario zu entwerfen.

Die Durchführung eines umfangreichen Laborprogramms zur Ermittlung der Materialparameter der Kössener Mergel und anderer Gesteine konnte im Rahmen dieser Arbeit aus logistischen und finanziellen Gründen leider nicht durchgeführt werden. Die fundierte Ermittlung der für das Modell notwendigen Gesteinskennwerte würde die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich erhöhen.

Nicht vollständig abbilden konnte das Modell den Prozess des Driftens im oberen Hangbereich. Die hier im Gelände beobachtete Rotation beim Einsinken der Oberhätalk-Schollen in die unterlagernden Kössener Schichten wurde im Modell nicht richtig abgebildet. Ggf. wäre eine Modellierung des Hages mit dem Universal Distinct Element Code (UDEC) von Itasca sinnvoll, da hier die einzelnen Schollen sich völlig voneinander lösen können.

Literaturverzeichnis

- ALCAMO, J., MORENO, J. M., NOVÁKY, B., BINDI, M., COROBOV, R., DEVOY, R. J., GIANNAKOPOULOS, C., MARTIN, E., OLESEN, J. E. & SHVIDENKO, A. (2007): Europe.– In: PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J. & HANSON, C. E. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.– 986 S.; Cambridge, UK (Cambridge University Press), 541-580.
- BERNRIEDER, J. (1991): *Unser Audoorf*.– 1014 S.; Oberaudorf (Gemeinde Oberaudorf).
- BOGAARD, T. (2001): *Analysis of hydrological processes in unstable clayey slopes*.– 192 S.; Utrecht (Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap; Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht).
- CARSON, M. A. & KIRKBY, M. J. (1972): *Hillslope form and process*.– Cambridge geographical studies, 3. Aufl., 475 S.; London (Cambridge Univ. Press).
- CROSTA, G. B., IMPOSIMATO, S. & RODDEMAN, D. G. (2003): Numerical modelling of large landslides stability and runout.– *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3 (6): 523–538.
- CROZIER, M. J. (1986): *Landslides*.– 252 S.; London (Croom Helm).
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. (1996): *Landslide Types and Processes*.– In: TURNER, K. A. & SCHUSTER, R. L. (Hrsg.): *Landslides - Investigation and Mitigation*.– Special Report, 247: 673 S.; Washington, D.C. (Transportation Research Board, National Research Council), 36-71.
- CRUDEN, D. M. (1991): A simple definition of a landslide.– *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43 (1): 27-29.
- CRUDEN, D. M. (1991): A suggested method for a landslide summary.– *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43 (1): 101-110.
- DACHROTH, W. & BREZINA, J. (2002): *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*.– 3. Aufl., 681 S.; Berlin (Springer).
- DAS, B. M. (2002): *Principles of geotechnical engineering*.– 5, 589 S.; Pacific Grove, CA (Brooks Cole/Thompson Learning).
- DAWSON, E. M. (1999): Slope stability analysis by strength reduction.– *Geotechnique*, 49 (6): 835-840.
- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L. & IBSEN, M.-L. (1996): *Landslide recognition. Identification, Movement and Courses*.– 251 S.; Chichester, New York (Wiley).
- DIN 1055-2 (2003): *Einwirkungen auf Tragwerke-Teil 2: Bodenkenngößen*.– 14 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 18196 (2004): *Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*.– 11 S.; Berlin (Beuth).

- DIN 4021-1 (1990): Baugrund-Teil 1: Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben.– 27 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 4022-1 (1987): Baugrund und Grundwasser-Teil 1: Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels.– 22 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 4084 (2002): Baugrund; Geländebruchberechnungen.– 32 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 4149 (2002): Bauten in deutschen Erdbebengebieten: Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.– 77 S.; Berlin (Beuth).
- DUDDECK, H. (1988): Was Finite Elemente Methoden im Grund- und Felsbau leisten und leisten sollten.– In: N.N. (Hrsg.): FEM Anwendungen in der Baupraxis.– Tagungsband, Berlin (Ernst & Sohn), 227-253.
- ELLINGER, M. (2008): Geomonitoring der Aggenalm – Zeitreihenanalyse der ersten Messdaten.– unveröff. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 44 S.; München.
- FUKUZONO, T. (1985): A new method for predicting the failure time of a slope.– Proc. 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo; Tokyo (Tokyo University Press), 145-150.
- GALLEMANN, T. (2007): Geodätische Überwachung der Rutschung Aggenalm im Sudelfeld.– Interner Bericht Archiv-Nr. 3476, 11 S.; München.
- GALLEMANN, T. (2008): Geodätische Überwachung der Rutschung Aggenalm im Sudelfeld.– Interner Bericht Archiv-Nr. 3476, 12 S.; München.
- GEERTSEMA, M. & POJAR, J. J. (2007): Influence of landslides on biophysical diversity - A perspective from British Columbia.– *Geomorphology*, 89 (1-2): 55-69.
- GIUSTI, G., IACCARINO, G., PELLEGRINO, A., PICARELLI, L. & URCIUOLI, G. (1996): Kinematic features of earthflows in Southern Apennine.– In: SENNESET, K. (Hrsg.): Proc. of the 7th international symposium on landslides, 17.-21. Juni 1996, 3, Trondheim, Norway.– 700 S.; Rotterdam (Balkema), 457-462.
- GOOCH, T. (2000): History of UML.–
http://pigseye.kennesaw.edu/~dbraun/csis4650/A&D/UML_tutorial/history_of_uml.htm, abgerufen am 12. August 2008.
- HAHN, F. (1914): Ergebnisse neuer Spezialforschungen in den deutschen Alpen.– *Geol. Rundsch.*, 5 (2): 112-145.
- HANSEN, A. (1984): Landslide hazard analysis.– In: BRUNSDEN, D. & PRIOR, D. B. (Hrsg.): *Slope instability*.– 620 S.; New York (Wiley), 523-595.

- HOEK, E. & BROWN, W. M. (1997): Practical estimates of rock mass strength.– International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (8): 1165-1186.
- HUTCHINSON, J.N. (1988): General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.– In: BONNARD, C. (Hrsg.): Landslides – Proceeding of the Fifth International Symposium on Landslides, 10.-15. Juli 1988, Lausanne.– 1800 S.; Lausanne (Balkema), 3-35.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005a): Command Reference.– Minneapolis, USA.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005b): Example Applications.– Minneapolis, USA.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005c): Fish in FLAC.– Minneapolis, USA.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005d): FLAC/Slope.– Minneapolis, USA.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005e): Theory and Background.– Minneapolis, USA.
- ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (2005f): User's Guide.– Minneapolis, USA.
- JONES, D. K. & LEE, E. M. (1994): Landsliding in Great Britain.– 361 S.; London (H.M.S.O).
- JUNG, S. (2007): Untersuchung der Hangbewegung an der Aggenalm östlich des Sudelfelds zwischen Bayrischzell und Oberaudorf.– unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 82 S.; München.
- KEMPFFERT, H.-G. & RAITHEL, M. (2007): Bodenmechanik und Grundbau.– 1, 371 S.; Berlin (Bauwerk).
- KIRKBY, M. J. (2003): A Consistent Framework for Modelling Geomorphic Processes and Landform Evolution.– In: WILCOCK, P. R. & IVERSON, R. M. (Hrsg.): Prediction in geomorphology.– Geophysical Monograph Series, 135: 256 S.; Washington, DC (American Geophysical Union), 85-97.
- KONIETZKY, H. (2000): Numerische Simulationen in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren.– Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, 358 S.; Freiberg.
- KONIETZKY, H., BILLAUX, D. & HART, R. (1994): Mathematische Modellierung von geklüftetem Fels.– Felsbau, 12 (6): 395-400.
- KRAUTER, E. (2002): Landslides – Types and Risk Assessment.– CERIG Intensive Course, 14-21. Juli 2002, Dornbirn, Austria.
- KUNTSCHKE, K. (1996): Empfehlungen zum Einsatz von Mess- und Überwachungssystemen für Hänge, Böschungen und Stützbauwerke.– Geotechnik, 2: 82-98.

- LINKWITZ, K. (1991): Messtechnische Überwachung von Hängen, Böschungen und Stützmauern.– In: SMOLTCZYK, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch.– 4. Aufl., Teil 2; Berlin (Ernst & Sohn). 677-742.
- LORIG, L. & VARONA, P. (2000): Practical Slope Stability Analysis Using Finite Difference Codes.– In: HUSTRULID, W. A., MCCARTER, M. K. & VAN ZYL, D. J. (Hrsg.): Slope stability in surface mining.– 442 S.; Littleton, Colorado (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration), 115-124.
- LÖWNER, M.-O., DÖRSCHLAG, D. & PLÜMER, L. (2005): GeoSaMT – ein Konzept zur Kartierung und semantischen Modellierung von steilen Hangbereichen.– Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 4: 281-290.
- MARTEL S. (2002): Slope Stability (Limit Equilibrium) Analysis (27).– http://www.soest.hawaii.edu/martel/Courses/GG454/GG454_Lec_27.pdf, abgerufen am 27. Mai 2009.
- MARTIN, C. & EIBLMAIER, M. (Hrsg.) (2001): Lexikon der Geowissenschaften.– CD-ROMs; Heidelberg, Berlin (Spektrum Akad. Verl.).
- MATTHESIUS, H. J. (1995): Neue Methoden zur Vorhersage von Rutschungsereignissen am Beispiel eines aktiven Rutschhanges in Rheinhessen.– Geotechnik, Sonderheft 10. Natl. Tagung Ing. Geol., Freiberg/Sachsen: 248-259.
- MAYORAZ, F. & VULLIET, L. (2002): Neural Networks for Slope Movement Prediction.– Int. J. Geomech., 2 (2): 153-173.
- NUSSBAUMER, J. (1998): Die Gewalt der Natur.– 2. Aufl., Illustrierte Chronik der Katastrophen, 1: 354 S.; Grünbach (Ed. Sandkorn).
- POPESCU, M. E. (1994): A suggested method for reporting landslide causes.– Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 50 (1): 71-74.
- REIßMÜLLER, M. (1997): Die Geologie des Oberen Rottachtales zwischen Bodenschneid, Stolzenberg und Siebligrat sowie Geotechnische Eigenschaften verwitterter Kössener Mergel.– unveröff. Diplomarbeit und -kartierung. Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Technische Universität München; Garching.
- SCHORMAIR, N. (2003): Geologische Kartierung des Gebietes zwischen Aggenalm und Tatzelwurmwasserfall, Sudelfeld.– unveröff. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 56 S.; München.
- SCHUKOFF, B. (2009): Geomonitoring – ein Überblick.– In: MARSCHALLINGER, R. & WANKER, W. (Hrsg.): Geomonitoring, FE-Modellierung, Sturzprozesse und Massenbewegungen.– 197 S.; Heidelberg (Wichmann), 1-7.
- SILVERT, W. (2001): Modelling as a Discipline.– Int. J. General Systems, 30 (3): 261-282.

- SINGER, J. (2010): Development of a continuous monitoring system for instable slopes using Time Domain Reflectometry (TDR).– unveröff. Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 189 S.; München.
- SINGER, J. & THURO, K. (2006): Development of a continuous 3D-monitoring system for unstable slopes using Time Domain Reflectometry.– In: CULSHAW, M., REEVES, H., SPINK, T. & JEFFERSON, I. (Hrsg.): IAEG Engineering geology for tomorrow's cities.– Proceeding of the 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom, 6.-10. September 2006: 7 S.; Paper number 494, CD-ROM.
- SINGER, J. & THURO, K. (2007): Entwicklung eines kontinuierlichen 3D-Überwachungssystems für instabile Hänge mittels Time Domain Reflectometry (TDR).– In: OTTO, F. (Hrsg.): 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“, 7.-10. März 2007, Bochum.– 492 S.; Bochum (Technische Fachhochschule Georg Agricola), 69-76.
- SINGER, J., SCHUHBÄCK, S., WASMEIER, P., THURO, K., HEUNECKE, O., WUNDERLICH, T., GLABSCH, J. & FESTL, J. (2009): Monitoring the Aggenalm Landslide using Economic Deformation Measurement Techniques.– Austrian Journal of Earth Sciences, 102 (2): 20–34.
- SMOLTZYK, U. (2001): Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen.– 6. Aufl., 838 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- STÖRZBACH, S. (2009): Untersuchung der Hangbewegung am Sudelfeld mittels Geolektrik.– unveröff. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 45 S.; München.
- THIELEN, A. (2008): Einfluss der Bodensättigung auf die Stabilität von Hängen.– 225 S.; Zürich (Vdf, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich).
- TURNER, K. A. & SCHUSTER, R. L. (1996): Landslides - Investigation and Mitigation.– Special Report, 247, 673 S.; Washington, D.C. (Transportation Research Board, National Research Council).
- VAN ASCH, T. (1999): A view on some hydrological triggering systems in landslides.– Geomorphology, 30 (1-2): 25-32.
- VARNES, D.J., (1978): Slope movement types and processes.– In: SCHUSTER, R. L. & KRIZEK, R. J. (Hrsg.): Special Report, 176: Landslides: Analysis and Control.– 234 S.; Washington, D.C. (Transportation Research Board, National Research Council), 11-33.
- VAUVNAT, J., LEROUIEL, S. & FAURE, R. (1994): Slope movements: a geotechnical perspective.– In: OLIVIERA, R. L. (1994): Proceedings Seventh International Congress International Association of Engineering Geology, 5.-9. September 1994, Lisabon, Portugal.– 4922 S.; Rotterdam (Balkema), 1637-1646.

- VON MALAISÉ, V. (1951): Die Landwirtschaft des Landkreises Rosenheim im Allgemeinen, die Almwirtschaft im Besonderen und die Maßnahmen zu ihrer Förderung.– Dissertation, Technische Hochschule München, 217 S.; München.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT ROSENHEIM (o.J.): Talzuschub Gassenbach – Aggraben, Östliches Sudelfeld Gemeinde Oberaudorf. – Informationsblatt.
- WILKINS, M. L. (1964): Fundamental Methods in Hydrodynamics.– Methods in Computational Physics, 3: 211-263.
- WORMUTH, R. & SCHNEIDER, K. J. (2007): Baulexikon.– 2. Aufl., 350 S.; Berlin (Bauwerk).
- WOYTOWITZ, F. (2010): Entwurf und Installation eines ad-hoc multi-hop Sensornetzwerkes für die Hangbewegung Aggenalm bei Bayrischzell.– unveröff. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 44 S.; München.
- WP/WLI (1990): A suggested method for reporting a landslide.– Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 41 (1): 5-12.
- WP/WLI (1993): Multilingual Landslide Glossary.– 59 S.; Richmond, British Columbia, Canada (BiTech Publishers).
- WUNDERLICH, T. (1995): Die Geodätische Überwachung von Massenbewegungen.– Felsbau, 13 (6): 414-419.
- ZANGERL, C., PRAGER, C., BRANDNER, R., BRÜCKL, E., EDER, S., FELLIN, W., TENTSCHERT, E., POSCHER, G. & SCHÖNLAUB, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur Prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen.– Geo.Alp., 5: 1-51.

ANLAGE: FLAC Programm

FLAC Programm für die Durchführung der Modellierung der aktuellen Hangsituation an der Aggenalm Hangbewegung (vgl. 5.2).

```

SUDELFFELD PROJEKT
new
config ats gw extra 1
grid 250 95
;Mohr-Coulomb model
m m

;
;-----
;***** GENERATION OF SLOPE FIGURE *****
;-----

gen (0,0) (0,41.6) (800,41.6) (800,0) i 1 251 j 1 14
gen same (0,304) (800,304) same i 1 251 j 14 96
; ----- TABLE : ( T8 )
table 8 delete
table 8 (-6.4,304) (67.2,304) (134.4,281.6) (200,281.6) (297.6,224) &
(400,194.2) (470.4,170) (499.2,160) (569.6,124.8) (579.2,124.8) &
(643.2,89.6) (681.6,92.8) (736,76.8) (758.4,54.4) (768,54.4) (800,44.8)
gen table 8 i=1,251 j=1,96
m null region 29 95
m null region 32 95
m null region 50 95
m null region 70 95

; ----- TABLE : ( T2 )
table 2 (-6.4,291.2) (67.2,291.2) (112,272) (115.2,268.8) (134.4,259.2) &
(211.2,260) (310,204.8) (381,190) (400,185.2) (470.4,160) &
(490,150) (569.6,115.2) (579.2,112) (627.2,86.4) (640,86.4) (646.4,99.2)
gen table 2 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( T3 )
table 3 (0,272) (112,243.2) (160,230.4) (323.2,188.8) (450,150) &
(508.8,124) (643,67) (803.2,25.6)
gen table 3 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( T4 )
table 4 -6.4 259.2 144 217.6 323.2 169.6 550.4 99.2 560 102
gen table 4 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( T5 )
table 5 -3.2 249.6 144 208 323.2 160 508.8 102.4 612.4 73.6 612.4 85
gen table 5 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( T6 )
table 6 -3.2 227.2 90 203.53 105 199.59 188.8 176 198.4 176 198.4 174.4 803.2 16
gen table 6 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( T7 )
table 7 -6.4 217.6 90 194.2 105 190.3 188.8 167.88 &
198.4 167.88 198.4 165.39 803.2 6.4
gen table 7 i=1,251 j=1,96

; ----- TABLE : ( L8 )
;
gen line (220.8,278.4) (233.6,252.6)

; ----- TABLE : ( L9 )
;
gen line (259.2,240) (274,201.6)

```

```
;
;***** SOIL PROPERTIES: *****
;

; There are large cohesion to force initial elastic behavior fordetermining ini-
tial

; stress state.This will prevent slope failure wheninitializing the gravity
steresses.

;
LAYER 1
group 'Quartär:soil 7' region 165 44
model mohr group 'Quartär:soil 7'
prop density=2200 bulk=1.1E7 shear=8.3E6 cohesion=1E10 friction=35.00 &
dilation=0.0 tension=0.0 group 'Quartär:soil 7'
;
LAYER 2
group 'Schutt:soil 6' region 87 67
model mohr group 'Schutt:soil 6'
prop density=2200 bulk=2.78E7 shear=2.1E7 cohesion=1E10 friction=35.00 &
dilation=0.0 tension=0.0 group 'Schutt:soil 6'
;
LAYER 3
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 10 92
model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'
prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E10 friction=29.62 &
dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'
;
LAYER 4
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 20 85
model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'
prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'
;
LAYER 5
group 'Kössenerkalk:soil 3' region 5 81
model mohr group 'Kössenerkalk:soil 3'
prop density=2700 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
dilation=1.0 tension=1E7 group 'Kössenerkalk:soil 3'
;
LAYER 6
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
prop density=2700 bulk=3.3E9 shear=2.46E9 cohesion=4.2e10 friction=29.5 &
dilation=0.01 tension=1E5 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 7
group 'Kössenerkalk:soil 3' region 5 71
model mohr group 'Kössenerkalk:soil 3'
prop density=2700 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
dilation=1.0 tension=1E7 group 'Kössenerkalk:soil 3'
;
LAYER 8
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
prop density=2700 bulk=3.3E9 shear=2.46E9 cohesion=4.2e10 friction=29.5 &
dilation=0.01 tension=1E5 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 9
group 'Plattenkalk:soil 1' region 5 38
model mohr group 'Plattenkalk:soil 1'
prop density=2700 bulk=7.65E9 shear=5.7E9 cohesion=3.52E10 friction=33.45 &
dilation=1.0 tension=1E7 group 'Plattenkalk:soil 1'
```

```
-----
;N 16
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 35,80
model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'
  prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
  dilation=0.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'
;N 26
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 50,80
model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'
  prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'
;N 36
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 62,75
model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'
  prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E10 friction=30.52 &
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'

-----
;N 17
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 35,87
model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'
  prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E10 friction=29.62 &
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'
;N 27
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 50,88
model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'
  prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E10 friction=29.62 &
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'
;N 37
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 62,85
model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'
  prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E10 friction=29.62 &
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'

;
----- displacement boundary conditions -----
fix x i=1
fix x y j=1
fix x i=251

;
----- apply gravity and use large strain logic -----
set grav=9.81
set large

;
-----
; Die Modellierung der Böschung mit hohe EIGENSCHAFTEN Ohne WASSER
;und Ohne KLUFTE.
;
-----

Solve

;*****
;reset
ini xdis=0 ydis=0
```

```
;  
;***** SOIL PROPERTIES: *****  
;  
; There are normal cohesion to force initial elastic and plastic behavior for  
;determining initial stress state.  
;  
LAYER 1  
group 'Quartär:soil 7' region 165 44  
model mohr group 'Quartär:soil 7'  
  prop density=2200 bulk=1.1E7 shear=8.3E6 cohesion=1E4 friction=35.00 &  
  dilation=0.0 tension=0.0 group 'Quartär:soil 7'  
;  
LAYER 2  
group 'Schutt:soil 6' region 87 67  
model mohr group 'Schutt:soil 6'  
  prop density=2200 bulk=2.78E7 shear=2.1E7 cohesion=1e4 friction=35.00 &  
  dilation=0.0 tension=0.0 group 'Schutt:soil 6'  
;  
LAYER 3  
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 10 92  
model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
  prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E6 friction=29.62 &  
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
;  
LAYER 4  
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 20 85  
model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'  
  prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'  
;  
LAYER 5  
group 'Kössenerkalk:soil 3' region 5 81  
model mohr group 'Kössenerkalk:soil 3'  
  prop density=2700 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Kössenerkalk:soil 3'  
;  
LAYER 6  
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76  
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'  
  prop density=2700 bulk=3.3E9 shear=2.46E9 cohesion=4.2e4 friction=29.5 &  
  dilation=0.01 tension=1E5 group 'Kössenermergel:soil 2'  
;  
LAYER 7  
group 'Kössenerkalk:soil 3' region 5 71  
model mohr group 'Kössenerkalk:soil 3'  
  prop density=2700 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Kössenerkalk:soil 3'  
;  
LAYER 8  
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66  
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'  
  prop density=2700 bulk=3.3E9 shear=2.46E9 cohesion=4.2e4 friction=29.5 &  
  dilation=0.01 tension=1E5 group 'Kössenermergel:soil 2'  
;  
LAYER 9  
group 'Plattenkalk:soil 1' region 5 38  
model mohr group 'Plattenkalk:soil 1'  
  prop density=2700 bulk=7.65E9 shear=5.7E9 cohesion=3.52E6 friction=33.45 &  
  dilation=1.0 tension=1E7 group 'Plattenkalk:soil 1'
```

```
-----  
;N 16  
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 35,80  
  model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'  
    prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'  
;N 26  
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 50,80  
  model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'  
    prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'  
;N 36  
group 'Oberhätkalk:soil 4' region 62,75  
  model mohr group 'Oberhätkalk:soil 4'  
    prop density=2800 bulk=3.9E9 shear=2.95E9 cohesion=2.49E6 friction=30.52 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätkalk:soil 4'  
  
-----  
;N 17  
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 35,87  
  model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
    prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E6 friction=29.62 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
;N 27  
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 50,88  
  model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
    prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E6 friction=29.62 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
;N 37  
group 'Oberhätdolomit:soil 5' region 62,85  
  model mohr group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
    prop density=2700 bulk=4.8E9 shear=3.61E9 cohesion=3.62E6 friction=29.62 &  
      dilation=1.0 tension=1E7 group 'Oberhätdolomit:soil 5'  
  
;-----  
;----- displacement history of slope -----  
;-----  
  
his 1 xdis i=22 j=94  
his 2 xdis i=67 j=88  
his 3 xdis i=130 j=61  
his 4 xdis i=160 j=46  
his 5 xdis i=180 j=39  
his 6 xdis i=202 j=29  
his 7 xdis i=230 j=23  
  
his 8 ydis i=22 j=94  
his 9 ydis i=67 j=88  
his 10 ydis i=130 j=61  
his 11 ydis i=160 j=46  
his 12 ydis i=180 j=39  
his 13 ydis i=202 j=29  
his 14 ydis i=230 j=23  
  
;-----  
;x ERSTE Analyse: (SENARIO 1)  
; Die Modellierung der Böschung mit normal EIGENSCHAFTEN Ohne WASSER  
;und Ohne KLUFTE.  
solvesolve  
save s1.sav  
;-----
```

```

;
;***** Einfügen die erste Kluft *****
;

m null i=60 j=70,96

gen (0,0) (0,246.4) (92.8,246.4) (92.8,0) i=1,30 j=1,78
gen (0,246.4) (0,304) (92.8,304) (92.8,246.4) i=1,30 j=78,96

gen (92.8,0) (92.8,233.6) (140.8,233.6) (140.8,0) i=30,45 j=1,74
gen (92.8,233.6) (92.8,246.4) (140.8,246.4) (140.8,233.6) i=30,45 j=74,78
gen (92.8,246.4) (92.8,304) (140.8,304) (140.8,246.4) i=30,45 j=78,96

gen (140.8,0) (140.8,224) (188.8,224) (188.8,0) i=45,60 j=1,71
gen (140.8,224) (140.8,233.6) (188.8,233.6) (188.8,224) i=45,60 j=71,74
gen (140.8,233.6) (140.8,304) (188.8,304) (188.8,233.6) i=45,60 j=74,96

gen (188.8,0) (188.8,224) (800,224) (800,0) i=60,251 j=1,71
gen (188.8,224) (188.8,304) (800,304) (800,224) i=61,251 j=71,96

int 1, ASIDE from 60,88 to 60,70 BSIDE from 61,88 to 61,70
int 1 glue kn 3e9 ks 3e9 friction=5 cohesion=0

;
;x ZWEITE Analyse: (SENARIO 2)
;x Der vorherige Zustand mit erste Kluft.
solve
save s2.sav
;

;
;***** ADD WATER TABLE *****
;

;Install phreatic surface in slope

water table 1 density=1000
table 1 0 272 800 25.6

def wet_den
loop i (1,izones)
  loop j (1,jzones)
    if model(i,j)>1 then
      xa=(x(i,j)+x(i+1,j)+x(i+1,j+1)+x(i,j+1))
      xc=0.25*xa
      ya=(y(i,j)+y(i+1,j)+y(i+1,j+1)+y(i,j+1))
      yc=0.25*ya
      if yc<table(1,xc) then
        density(i,j)=density(i,j)+300
      end_if
    end_if
  end_loop
end_loop
end
wet_den

;
;x DRITTE Analyse: (SENARIO 3)
;x Der vorherige Zustand mit mittleren Wasserspiegel.
solve
save s3.sav
;

```

```

;
;***** Einfügen die zweite Klüfte *****
;

m null i=45 j=73,96
gen (0,0) (0,246.4) (92.8,246.4) (92.8,0) i=1,30 j=1,78
gen (0,246.4) (0,304) (92.8,304) (92.8,246.4) i=1,30 j=78,96

gen (92.8,0) (92.8,233.6) (140.8,233.6) (140.8,0) i=30,45 j=1,74
gen (92.8,233.6) (92.8,246.4) (140.8,246.4) (140.8,233.6) i=30,45 j=74,78
gen (92.8,246.4) (92.8,304) (140.8,304) (140.8,246.4) i=30,45 j=78,96

gen (140.8,0) (140.8,224) (188.8,224) (188.8,0) i=45,60 j=1,71
gen (140.8,224) (140.8,233.6) (188.8,233.6) (188.8,224) i=45,60 j=71,74
gen (140.8,233.6) (140.8,304) (188.8,304) (188.8,233.6) i=46,60 j=74,96

gen (188.8,0) (188.8,224) (800,224) (800,0) i=60,251 j=1,71
gen (188.8,224) (188.8,304) (800,304) (800,224) i=61,251 j=71,96

int 2, ASIDE from 45,89 to 45,73 BSIDE from 46,89 to 46,73
int 2 glue kn 3e9 ks 3e9 friction=5 cohesion=0

;
;x VIERTE Analysis: (SENARIO 4)
; Der vorherige Zustand mit zwei Klüften.
solve
save s4.sav
;

;
;***** ADD WATER TABLE *****
;

;Install phreatic surface in slope

water table 1 density=1000
table 1 0 272 800 25.6

def wet_den
loop i (1,izones)
  loop j (1,jzones)
    if model(i,j)>1 then
      xa=(x(i,j)+x(i+1,j)+x(i+1,j+1)+x(i,j+1))
      xc=0.25*xa
      ya=(y(i,j)+y(i+1,j)+y(i+1,j+1)+y(i,j+1))
      yc=0.25*ya
      if yc<table(1,xc) then
        density(i,j)=density(i,j)-300
      end_if
    end_if
  end_loop
end_loop
end
wet_den

solve

water table 1 density=1000
table 1 0 304 800 41.6
def wet_den
loop i (1,izones)
  loop j (1,jzones)
    if model(i,j)>1 then
      xa=(x(i,j)+x(i+1,j)+x(i+1,j+1)+x(i,j+1))
      xc=0.25*xa
      ya=(y(i,j)+y(i+1,j)+y(i+1,j+1)+y(i,j+1))

```

```

        yc=0.25*ya
        if yc<table(1,xc) then
            density(i,j)=density(i,j)+300
        end_if
    end_if
end_loop
end_loop
end
wet_den

;
;-----
;x FÜNFTE Analysis: (SENARIO 5)
; Der vorherige Zustand mit maximalen Wasserspiegel.
solve
save s5.sav
;-----

;
;-----
;***** Einfügen die dritte Klüfte *****
;-----

m null i=30 j=77,96
gen (0,0) (0,246.4) (92.8,246.4) (92.8,0) i=1,30 j=1,78
gen (0,246.4) (0,304) (92.8,304) (92.8,246.4) i=1,30 j=78,96

gen (92.8,0) (92.8,233.6) (140.8,233.6) (140.8,0) i=30,45 j=1,74
gen (92.8,233.6) (92.8,246.4) (140.8,246.4) (140.8,233.6) i=30,45 j=74,78
gen (92.8,246.4) (92.8,304) (140.8,304) (140.8,246.4) i=31,45 j=78,96

gen (140.8,0) (140.8,224) (188.8,224) (188.8,0) i=45,60 j=1,71
gen (140.8,224) (140.8,233.6) (188.8,233.6) (188.8,224) i=45,60 j=71,74
gen (140.8,233.6) (140.8,304) (188.8,304) (188.8,233.6) i=46,60 j=74,96

gen (188.8,0) (188.8,224) (800,224) (800,0) i=60,251 j=1,71
gen (188.8,224) (188.8,304) (800,304) (800,224) i=61,251 j=71,96

int 3, ASIDE from 30,93 to 30,77 BSIDE from 31,93 to 31,77
int 3 glue kn 3e9 ks 3e9 friction=5 cohesion=0

;
;-----
;x SECHSTE Analysis: (SENARIO 6)
; Der vorherige Zustand mit drei Klüften.
solve
save s6.sav
;-----

;
;-----
;*****Die Änderungen der Mergelschichteigenschaften*****
;-----

LAYER 6
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=1e4 friction=23 &
dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 8
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=1e4 friction=23 &
dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'

solve
;.....

```

```
;
LAYER 6
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=7e3 friction=21 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 8
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=7e3 friction=21 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'

solve
;.....
;
LAYER 6
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=4e3 friction=19 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 8
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=4e3 friction=19 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'

;
;x SIEBTE Analyse: (SENARIO 7)
;Der vorherige Zustand mit minderung der mechanischen Eigenschaften der Mergel-
schichten.
solve
save s7.sav
;

;
;+++++ Am Schluss +++++
;
;***** Die minime Eigenschaften *****
;

LAYER 6
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 76
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=0 friction=16.5 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'
;
LAYER 8
group 'Kössenermergel:soil 2' region 10 66
model mohr group 'Kössenermergel:soil 2'
  prop density=1700 bulk=3.278E9 shear=2.458E9 cohesion=0 friction=16.5 &
  dilation=0.0 tension=0 group 'Kössenermergel:soil 2'

;
;x ACHTE Analyse: (SENARIO 8)
;Der vorherige Zustand aber mit minime mechanischen Eigenschaften der Mergel-
schichten.
solve
save s8.sav
;

solve fos associated
save s9.sav
```

```
;  
-----  
;***** plot command *****  
;  
-----  
  
set back 15  
set foreground black  
title  
SUDELFELD PROJEKT  
;Plot name:grid  
pl hold hist grid  
;Plot name:displacement vectors  
pl hold bound displacement xvel zero  
;Plot name:water table  
pl hold density fill inv water apply lmagenta  
;Plot name:pore pressure distribution  
pl hold bound velocity pp  
  
pl xdisp fill hold  
pl ydisp fill hold  
pl sig1 fill hold  
pl sig2 fill hold  
  
pl his 1 2 3 4 5 6 7 black xdis hold  
pl his 8 9 10 11 12 13 14 black ydis hold  
  
;plot name:principal stresses  
plot hold bound stress  
;plot name:plasticity state  
plot hold bound plasticity  
;plot name:plasticity shear strain  
plot hold bound e_plastic fill  
;plot name:fos-ssi(ssr)  
plot hold bound fos tension block inv ssi iwhite  
;plot name:fos-vel. vectors  
plot hold fos group water velocity plasticity no_past
```