

MASTERARBEIT

SICHERUNG EINER DRUCKROHRLEITUNG IN EINEM KRIECHHANG

AM BEISPIEL KRAFTWERK BÄRENWERK

JOSEF SCHWEIGHOFER

Vorgelegt am

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Technische Universität Graz

Graz, August 2014

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

Für seine Betreuung, für interessante Diskussionen und für seine Hilfsbereitschaft während dieser Arbeit möchte ich an erster Stelle Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte besonders danken.

Ich bedanke mich ebenfalls bei Herrn Dipl.-Ing. Georg Ausweger, für seine Unterstützung, für seine hilfreichen Denkanstöße und für die zahlreichen spannenden Diskussionen während der Arbeit.

Besonderen Dank gilt Herrn Bmstr. Dipl.-Ing. (FH) Martin Lumetzberger und der Salzburg AG für die Möglichkeit, dieses Projekt im Rahmen einer Masterarbeit bearbeiten zu dürfen, für die interessanten Diskussionen und für die hilfreiche Bereitstellung von Daten und Informationen während der Arbeit.

Bei meinen Freunden möchte ich mich für die gemeinsam verbrachte Zeit während des Studiums ganz besonders bedanken.

Großer Dank gilt abschließend meinen Eltern und meiner Familie in Salzburg, die mir das Studium ermöglicht haben und mich während meiner Studienzeit immer unterstützt haben.

Kurzfassung

Die Planung und Durchführung von Baumaßnahmen in und in der unmittelbaren Nähe von Kriechhängen stellt eine herausfordernde Aufgabenstellung der Geotechnik dar.

Diese Masterarbeit behandelt die Realisierung einer Druckrohrleitung in einem Kriechhang als Teil der Sanierungsmaßnahmen zur Modernisierung des Kraftwerkes Bärenwerk in Fusch an der Großglocknerstraße, Salzburg.

Um die Verlegung der Druckrohrleitung im Kriechhang zu ermöglichen, musste ein Einschnitt in diesen hergestellt werden.

Die Veranlassung dieser Arbeit bestand darin, dass die Sicherung dieser Druckrohrleitung für den Endzustand noch zu überprüfen ist.

Für diese Arbeit ergaben sich daher die folgenden Fragestellungen:

- Die Erstellung eines geologisch-geotechnischen Modells für den Hang;
- Eine Auswertung der vorliegenden Messdaten, um das Verhalten des Hanges objektiv zu erfassen;
- Eine Interpretation dieser Messdaten, um zu Aussagen über das Systemverhalten des Hanges zu gelangen;
- Eine Standsicherheitsuntersuchung anhand eines kalibrierten Berechnungsmodells, um eine Abschätzung von eventuell notwendigen zusätzlichen Stabilisierungsmaßnahmen zu ermöglichen.

Bei der Planung von Baumaßnahmen, insbesondere der notwendigen Sicherungsmaßnahmen, in Kriechhängen ist ein Verständnis für das System und das Systemverhalten unumgänglich, um geeignete Sicherungsmaßnahmen entwerfen und ausführen zu können.

In diesem Sinne soll diese Arbeit eine Grundlage für die Abschätzung der Notwendigkeit von zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen und für die Planung dieser Maßnahmen im gegenständlichen Hang darlegen.

Abstract

A common and important challenge in geotechnical engineering is the design and realization of construction measures in creeping landslides and in their immediate vicinity.

This thesis will focus on the specific case of the construction of a penstock pipe in an existing creeping landslide in Fusch an der Großglocknerstraße, Salzburg, which is to be constructed as part of modernization measures for the existing hydropower plant “Bärenwerk”.

One of the measures necessary for the construction of the penstock pipe involved making a cut into the landslide mass.

The purpose of this thesis was to investigate the permanent stability of the landslide pertaining to the penstock pipe.

This gave way to the following problems which will be addressed in this thesis:

- The development of a geologic-geotechnical model for the creeping landslide;
- The evaluation of the available geotechnical monitoring data, in order to give an objective analysis of the behaviour of the creeping landslide;
- The interpretation and analysis of the evaluated data, in order to better understand and reach conclusions regarding the landslide system and system behaviour;
- An analysis of the stability of the creeping landslide mass using a calibrated model, in order to allow for an estimation of necessary additional stabilization measures

An understanding of the landslide system and system behaviour is of high importance for the planning and execution of construction measures, especially of appropriate stabilization measures, in landslide masses.

Given these considerations, this thesis will provide a basis for the determination and planning of necessary additional stabilization measures related to the above mentioned construction measures in a creeping landslide.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeine Projektbeschreibung	1
1.2	Veranlassung	2
1.3	Zielsetzung	4
2	Erstellung des geologisch-geotechnischen Modells.....	5
2.1	Maßnahmen zur Baugrunderkundung	5
2.2	Böden	6
2.3	Abgrenzung der bewegten Masse	12
2.4	Grundwasser	17
2.5	Darstellung des Untergrundmodells in einem repräsentativen Schnitt	17
3	Auswertung der Messdaten	19
3.1	Zeitlicher Ablauf der Bauzustände	20
3.2	Verschiebungsmessung – Inklinometer.....	25
3.3	Verschiebungsmessung – geodätische Messpunkte	38
3.4	Niederschlagsmessungen.....	56
3.5	Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung.....	58
3.6	Ankerkraftmessung	62
3.7	Zusammenfassung der Auswertung	67
4	Interpretation der Messdaten	69
4.1	Aussagen über das System	69
4.2	Aussagen über das Systemverhalten	77
4.3	Zusammenfassung.....	91
5	Modellkalibrierung	92
5.1	Wahl des Berechnungsmodells	93
5.2	Beschreibung des Berechnungsmodells	96
5.3	Sensitivitätsanalyse am Berechnungsmodell	109
5.4	Kalibrierung des Modells.....	115

6	Sicherheitsberechnungen	126
6.1	Berechnungsparameter.....	127
6.2	Sicherheitsberechnungen für den oberen Gleitkörper.....	133
6.3	Sicherheitsberechnungen für den unteren Gleitkörper.....	136
6.4	Sicherungsvariante	139
7	Zusammenfassung und Ausblick	145
7.1	Zusammenfassung.....	145
7.2	Ausblick	146
8	Literaturverzeichnis	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sanierungsprojekt Kraftwerk Bärenwerk [1]	1
Abbildung 2: Prinzipskizze - Einschnitt in den Hang mit Druckrohrleitung, entsprechend [3]	2
Abbildung 3: Kriechhang mit Anriss, aus [5]	3
Abbildung 4: Lageplan mit Kernbohrungen und Inklinometern [2], [7], [15]	6
Abbildung 5: Bodenschicht L4 – Hanglehm [11].....	8
Abbildung 6: Bodenschicht L6a - umgelagerte Moräne [11].....	8
Abbildung 7: Bodenschicht L6b – Grundmoräne [11].....	9
Abbildung 8: Bodenschicht L5 – Hangbrekzie [11].....	9
Abbildung 9: Kornverteilungslinie, Probe 7704 [12].....	10
Abbildung 10: Verschiebungen in Abhängigkeit der Tiefe im Inklinometer INK 1 [4]	13
Abbildung 11: Verschiebungen in Abhängigkeit der Tiefe im Inklinometer INK 9 [13]	14
Abbildung 12: Anordnung und Endtiefen der Rammsondierungen, gemäß [7], [14], [15]....	15
Abbildung 13: Abgeschätztes Volumen der Kriechmasse	16
Abbildung 14: Schnittführung Längenschnitt [2], [7], [15]	18
Abbildung 15: Längenschnitt, mit Angaben von [10]	18
Abbildung 16: Aushubbereiche und Baumaßnahmen im Lageplan [3], [15]	20
Abbildung 17: Bereich "rechts" (L: Aushub, R: fertiggestellt) [18]	21
Abbildung 18: Portalbereich (L: Aushub, R: fertiggestellt) [18].....	22
Abbildung 19: Bereich "links" (L: 1. Abtragsebene, R: 2. Abtragsebene) [18].....	22
Abbildung 20: Bereich "links" (L: Abtrag verbleibender Berme; R: fertiggestellt) [18].....	23
Abbildung 21: Flächenentwässerung [15], [19].....	24
Abbildung 22: Anordnung der Inklinometer im Lageplan [15].....	25
Abbildung 23: Bildung der Gesamtverschiebungsvektoren	26
Abbildung 24: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 1 [4].....	28
Abbildung 25: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 1	29
Abbildung 26: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 5 [20].....	31
Abbildung 27: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 5	32

Abbildung 28: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 9, vor 05.06.2013 [13]	34
Abbildung 29: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 9, ab dem 05.06.2013 [13]	35
Abbildung 30: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 9.....	36
Abbildung 31: Differenz der Verschiebungen in der oberen und unteren Gleitfläche, INK 9	37
Abbildung 32: Messquerschnitte der geodätischen Vermessung [2], [15]	38
Abbildung 33: Messquerschnitt MQ 1 – Messpunkte, auf Basis von [2].....	41
Abbildung 34: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 1 [21].....	41
Abbildung 35: Messquerschnitt MQ 3 – Messpunkte, auf Basis von [2].....	43
Abbildung 36: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 3 [21].....	43
Abbildung 37: Messquerschnitt MQ 5 – Messpunkte, auf Basis von [2].....	45
Abbildung 38: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 5 [21].....	45
Abbildung 39: Messquerschnitt MQ 7 – Messpunkte, auf Basis von [2].....	47
Abbildung 40: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 7 [21].....	47
Abbildung 41: Talwärtsverschiebungen im Lageplan gemäß [2], [21].....	49
Abbildung 42: Schnitt 1-1 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand	50
Abbildung 43: Schnitt 2-2 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand	50
Abbildung 44: Schnitt 3-3 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand	51
Abbildung 45: Schnitt 4-4 Verschiebungen im Nahbereich des Inklinometers INK 9.....	52
Abbildung 46: Schnitt 5-5 mit Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich	53
Abbildung 47: Schnitt 6-6 mit Verschiebungen in der Nähe des Anrisses	54
Abbildung 48: Tagesniederschlag und Niederschlagssummenlinie Bärenwerk.....	56
Abbildung 49: Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung KB 10/12, entsprechend [16]	59
Abbildung 50: Grundwasserverhältnisse im Bereich der Kernbohrung KB 10/12.....	61
Abbildung 51: Ankerblöcke 1 bis 11 [18].....	63
Abbildung 52: Ankerblöcke 1 bis 11 im Lageplan [2].....	63
Abbildung 53: Ankerkräfte in der oberen Ankerebene, entsprechend [26].....	64

Abbildung 54: Ankerkräfte in der unteren Ankerebene, entsprechend [26].....	64
Abbildung 55: Ankerkräfte am Dammfuß der Bewehrte-Erde-Konstruktion, gemäß [29]	66
Abbildung 56: Ergebnisse der Auswertung der Messdaten.....	68
Abbildung 57: Mögliches Gleitflächensystem nach Ausbildung der oberen Gleitfläche.....	70
Abbildung 58: Fotoaufnahme im Inklinometer INK 9 [31]	73
Abbildung 59: Gegenüberstellung der Bewegungsvorgänge	74
Abbildung 60: System nach Herstellung des Einschnittes.....	76
Abbildung 61: Gegenüberstellung Bewegungen – Bauzustände	78
Abbildung 62: Setzungen im MQ 1, 17.01.2013 bis 04.03.2013 [32]	79
Abbildung 63: Querverschiebungen im MQ 1, 17.01.2013 bis 04.03.2013 [32].....	80
Abbildung 64: Fehlender "Fuß" der Spritzbetonwand nach Aushubschritt [18].....	81
Abbildung 65: Gegenüberstellung Bewegungen – Niederschlag	82
Abbildung 66: Gegenüberstellung Bewegung – Grundwasser und Porenwasserdruck.....	84
Abbildung 67: Gegenüberstellung Bewegungen – Ankerkräfte	86
Abbildung 68: Ankerblöcke mit benachbarten Messpunkten in der Spritzbetonwand	87
Abbildung 69: Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse	88
Abbildung 70: Modell mit Berücksichtigung der Durchlässigkeiten in SLIDE	94
Abbildung 71: Beispielergebnis der Grundwassermodellierung mit Eingabe der Messdaten im oberen Hangbereich	94
Abbildung 72: Gleichgewichtsbetrachtung bei hangparallelem Gleiten	96
Abbildung 73: Annahmen zur Berechnung der resultierenden Ankerkraft [2]	101
Abbildung 74: Methode nach Chu zur Berechnung des aktiven Erddrucks [35]	104
Abbildung 75: Annahmen zur Bestimmung des aktiven Erddrucks.....	105
Abbildung 76: Berücksichtigung der Stützkraft eines Erdkeils	107
Abbildung 77: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η vom Grundwasserstand im Hanglehm	110
Abbildung 78: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der Druckhöhe in der Gleitfläche	111
Abbildung 79: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der resultierenden Ankerkraft	112

Abbildung 80: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η vom Reibungswinkel.....	113
Abbildung 81: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der Kohäsion.....	114
Abbildung 82: Stützkeil am 31.01.2013 [18]	118
Abbildung 83: Stützkeil am 04.02.2013 [18]	118
Abbildung 84: Lageplan mit Geometrie im Endzustand, gemäß [3]	128
Abbildung 85: Schnitt mit Geometrie im Endzustand, gemäß [3]	129
Abbildung 86: Freischnitt des oberen Gleitkörpers mit angreifenden Kräften	134
Abbildung 87: Freischnitt des unteren Gleitkörpers mit angreifenden Kräften	137
Abbildung 88: Stabilisierungsmaßnahmen im Lageplan, mit Angaben von [3]	143
Abbildung 89: Stabilisierungsmaßnahmen im Schnitt, mit Angaben von [3]	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenschichten mit Bezeichnungen	7
Tabelle 2: Ergebnisse der Scherversuche an Proben der umgelagerten Moräne [12]	10
Tabelle 3: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 1	29
Tabelle 4: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 5	32
Tabelle 5: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 9	37
Tabelle 6: Messquerschnitte der geodätischen Vermessung	39
Tabelle 7: Vergleich Messquerschnitt MQ 1 und Inklinometer INK 9	42
Tabelle 8: Vergleich Messquerschnitt MQ 3 und Inklinometer INK 9	44
Tabelle 9: Vergleich Messquerschnitt MQ 5 und Inklinometer INK 9	46
Tabelle 10: Vergleich Messquerschnitt MQ 7 und Inklinometer INK 9	48
Tabelle 11: Wesentliche Niederschlagsereignisse	57
Tabelle 12: Ausbau der Kernbohrung KB 10/12	58
Tabelle 13: Anstiege des Grundwasserspiegels bzw. Porenwasserdruckes	60
Tabelle 14: Permanente Litzanker zur Sicherung des Einschnittes	62
Tabelle 15: Ankerkraftanstiege, obere Ankerreihe.....	65
Tabelle 16: Ankerkraftanstiege, untere Ankerreihe.....	65
Tabelle 17: Temporäre Litzanker am Fuß der bewehrten Erde.....	66
Tabelle 18: checksum-Werte im Inklinometer INK 9, 28.05.2013 [13]	72
Tabelle 19: checksum-Werte im Inklinometer INK 9, 05.06.2013 [13]	72
Tabelle 20: Zusammenhänge zwischen Bewegungen und Niederschlag.....	83
Tabelle 21: Ankerblöcke mit zugehörigen gemittelten Querverschiebungen	88
Tabelle 22: Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse	89
Tabelle 23: Abgeschätzte rechnerische Ankerkraftherhöhungen	89
Tabelle 24: Bewegungsvorgänge mit auslösenden Ereignissen	91
Tabelle 25: Eingabewerte - Geometrie	97
Tabelle 26: Eingabewerte – Bodenkennwerte	98
Tabelle 27: Eingabewerte für Grundwassersituation	99

Tabelle 28: Gewichts-, Reibungs- und Kohäsionskraft.....	100
Tabelle 29: Annahmen für den Winkel δ	102
Tabelle 30: Größen zur Berücksichtigung der Ankerkräfte im Modell	103
Tabelle 31: Größen zur Ermittlung der Spannungen in der Gleitfläche.....	106
Tabelle 32: Größen zur Berücksichtigung des Erddrucks im Modell.....	106
Tabelle 33: Berücksichtigung der Stützkraft eines Erdkeils.....	107
Tabelle 34: Parameter für die Sensitivitätsanalyse.....	109
Tabelle 35: Kalibrierungsfälle	115
Tabelle 36: Verwendete Wertepaare für die Kalibrierungsberechnungen.....	116
Tabelle 37: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 1	117
Tabelle 38: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 1	117
Tabelle 39: Stützkeile im Kalibrierungsfall 1	117
Tabelle 40: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 1	119
Tabelle 41: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 1	119
Tabelle 42: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 2	120
Tabelle 43: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 2	120
Tabelle 44: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 2	121
Tabelle 45: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 2	121
Tabelle 46: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 3	122
Tabelle 47: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 3	122
Tabelle 48: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 3	122
Tabelle 49: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 3	123
Tabelle 50: Ergebnisse der Modellkalibrierung.....	124
Tabelle 51: Eingabewerte – Geometrie.....	129
Tabelle 52: Eingabewerte – Bodenkennwerte	130
Tabelle 53: Eingabewerte für Grundwassersituation	131
Tabelle 54: Erddruckkräfte	132
Tabelle 55: Sicherheitszahlen für den oberen Gleitkörper.....	134

Tabelle 56: Erforderliche Ankerkräfte für den oberen Gleitkörper	135
Tabelle 57: Sicherheitszahlen für den unteren Gleitkörper.....	137
Tabelle 58: Erforderliche Ankerkräfte für den unteren Gleitkörper	138
Tabelle 59: Sicherheitszahlen – oberer Gleitkörper gesichert.....	140
Tabelle 60: Sicherheitszahlen – unterer Gleitkörper gesichert.....	141

Variablenverzeichnis

Kürzel	Einheit	Bezeichnung
Berechnungsmodell: Gleichgewichtsbetrachtung bei hangparallelem Gleiten		
Eingabeparameter		
b	[m]	Gleitkörperlänge in der Ebene
B	[m]	Gleitkörperbreite aus der Ebene
h_{L4}	[m]	Mächtigkeit, Schicht L4
h_{L6a}	[m]	Mächtigkeit, Schicht L6a
β	[°]	Hangneigung
γ	[kN/m ³]	Feuchtwichte
γ_{sat}	[kN/m ³]	gesättigte Wichte
t_{GW}	[m u.GOK]	Gemessener Grundwasserstand im Hanglehm
t_{PWDG}	[m u.GOK]	Gemessene Druckhöhe in der Gleitfläche
φ	[°]	Reibungswinkel in der Gleitfläche
c	[kN/m ²]	Kohäsion in der Gleitfläche
G_{SK}	[kN]	Gewicht eines Stützkeils
A	[kN]	Resultierende Ankerkraft
α	[°]	Neigung der resultierende Ankerkraft (von der Horizontalen gemessen)
Berechnete Größen		
G	[kN]	Gewichtskraft
G_N	[kN]	Gewichtskraft normal zur Gleitfläche
$G_{//}$	[kN]	Gewichtskraftparallel zur Gleitfläche
F_R	[kN]	Reibungskraft in der Gleitfläche
C	[kN]	Kohäsionskraft in der Gleitfläche
p_w	[kN/m ²]	Porenwasserdruck in der Gleitfläche
U	[kN]	Porenwasserdruckkraft
A_N	[kN]	Komponente der Ankerkraft normal zur Gleitfläche
A_R	[kN]	Durch die Ankerkraft mobilisierte Reibungskraft
$A_{//}$	[kN]	Komponente der Ankerkraft parallel zur Gleitfläche
$p_{a,o}$	[kN/m ²]	Erddruck auf Fläche normal zur Gleitfläche, Bereich 1
$p_{a,u}$	[kN/m ²]	Erddruck auf Fläche normal zur Gleitfläche, Bereich 2
$E_{a,o}$	[kN]	Erddruckkraft, Bereich 1
$E_{a,u}$	[kN]	Erddruckkraft, Bereich 2
E_a	[kN]	Gesamte Erddruckkraft ($E_{a,o} + E_{a,u}$)
$G_{\text{SK,H}}$	[kN]	Reibungskraft durch das Gewicht des Stützkeils
$G_{\text{SK,H,//}}$	[kN]	Komponente von $G_{\text{SK,H}}$ parallel zur Gleitfläche
$G_{\text{SK,N}}$	[kN]	Komponente von $G_{\text{SK,H}}$ normal zur Gleitfläche
$G_{\text{SK,R}}$	[kN]	Durch $G_{\text{SK,N}}$ mobilisierte Reibungskraft in der Gleitfläche

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Projektbeschreibung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Realisierung einer Druckrohrleitung in einem Kriechhang.

Diese Druckrohrleitung ist Teil der Sanierungsmaßnahmen zur Modernisierung des Kraftwerkes Bärenwerk in Fusch an der Großglocknerstraße, Salzburg. Das Bärenwerk ging im Jahre 1924 in Betrieb und ist somit das älteste, von der Salzburg AG betriebene, Kraftwerk [1].

Der bestehende Druckstollen, welcher vom Speicher Ferleiten bis zum Kraftabstieg verläuft, wird durch einen neuen Druckstollen mit anschließender Druckrohrleitung ersetzt. Der neue Druckstollen verläuft unterirdisch vom Speicher Ferleiten bis zum Portal Wimm, wie es in Abbildung 1 dargestellt ist.

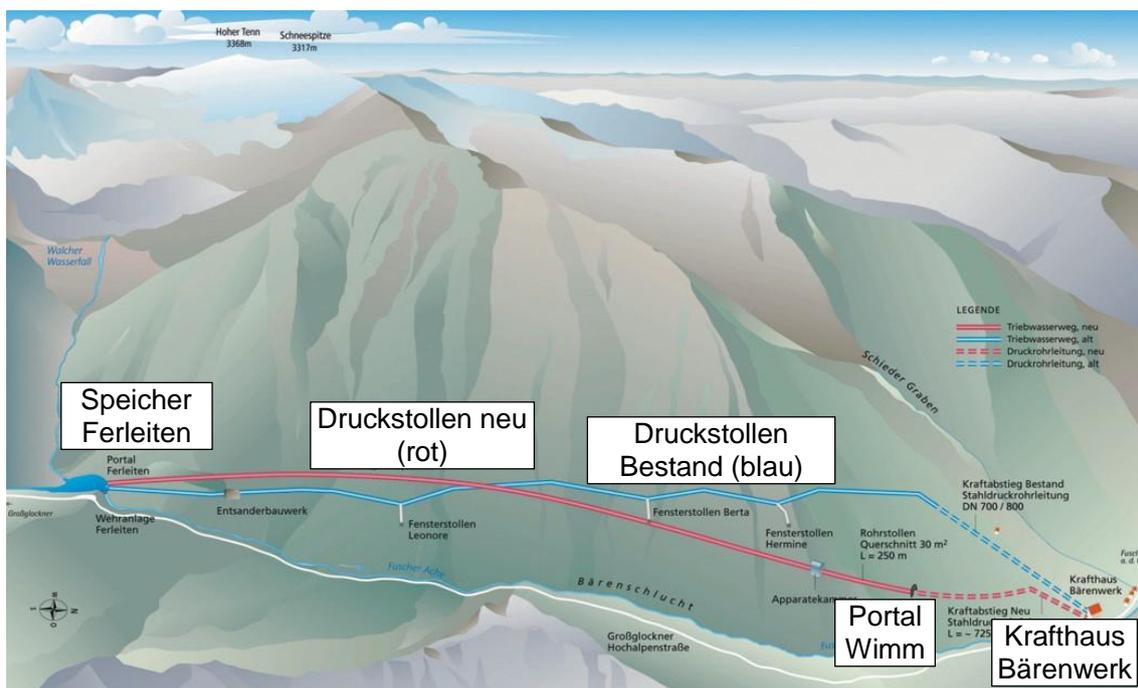


Abbildung 1: Sanierungsprojekt Kraftwerk Bärenwerk [1]

Im Bereich zwischen dem Portal Wimm und dem Kraftabstieg zum Krafthaus durchquert die Druckrohrleitung über ca. 50 m Länge einen Kriechhang [2].

Um den Bau der Druckrohrleitung im Hangbereich zu ermöglichen, musste ein Einschnitt von ca. 11 m Tiefe in den Hang hergestellt werden. In Abbildung 2 ist der Einschnitt mit der Druckrohrleitung schemenhaft dargestellt.

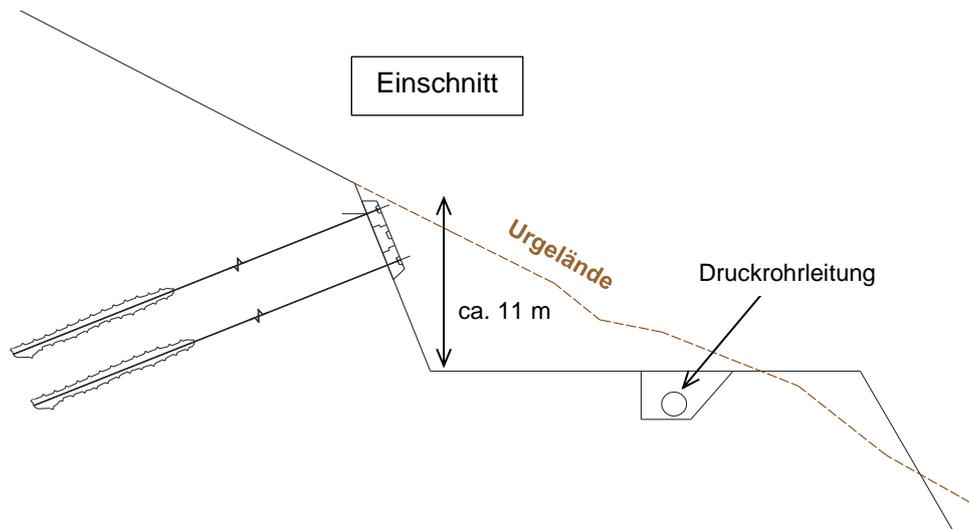


Abbildung 2: Prinzipskizze - Einschnitt in den Hang mit Druckrohrleitung, entsprechend [3]

1.2 Veranlassung

Ende Juli 2012 (im Zeitraum zwischen dem 18.07 und 31.07.2012), kurz vor Beginn der Erdbauarbeiten zur Herstellung des Einschnittes, zeigte das im unteren Hangbereich eingebaute Inklinometer INK 1 eine Bewegung von ca. 3,5 cm in einer Tiefe von ca. 9 bis 11 m [4]. Die Lage der Inklinometer und die Verschiebungen sind im Kapitel 3.2 dargestellt.

Es war zusätzlich ein Anriss an der Oberfläche im oberen Hangbereich ersichtlich, welcher in Abbildung 3 zu erkennen ist.



Abbildung 3: Kriechhang mit Anriss, aus [5]

Aufgrund dieser klaren Hinweise für Hanginstabilitäten wurde eine Neuberechnung der Sicherungsmaßnahmen für den Einschnitt im betroffenen Bereich durchgeführt [5].

Die Veranlassung dieser Arbeit besteht darin, dass die Sicherung der Druckrohrleitung vor allem im Hinblick auf den Endzustand noch zu überprüfen ist [6].

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, wie im Abschnitt 1.2 schon angedeutet, die Sicherung der Druckrohrleitung in Bezug auf den Endzustand zu beurteilen.

Von dieser Zielsetzung ausgehend ergaben sich folgende Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit auszuarbeiten waren:

- Die Erstellung eines geologisch-geotechnischen Modells anhand der ausgeführten Baugrunderkundungsmaßnahmen;
- Eine Auswertung der vorliegenden Messdaten, um das Verhalten im Hang objektiv zu erfassen;
- Eine Interpretation dieser Messdaten, um zu Aussagen über das System und Systemverhalten im Hang zu gelangen;
- Eine Standsicherheitsuntersuchung anhand eines kalibrierten Berechnungsmodells, um eine Abschätzung von eventuell notwendigen zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen zu ermöglichen.

2 Erstellung des geologisch-geotechnischen Modells

Um eine Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte zu schaffen, musste ein geologisch-geotechnisches Modell für den vorliegenden Hang erstellt werden.

Im aktuellen Kapitel wird auf die folgenden Punkte näher eingegangen:

- Die Maßnahmen zur Baugrunderkundung, die im betroffenen Bereich durchgeführt wurden
- Die daraus ermittelten maßgebenden Bodenarten bzw. -schichten im Hang, einschließlich ihrer bodenmechanischen Eigenschaften
- Die Abgrenzung der bewegten Masse und die sich daraus ableitende Abschätzung des bewegten Volumens für den Ursprungszustand
- Die Grundwasserverhältnisse im Hang
- Die Darstellung des Untergrundmodells in einem repräsentativen Schnitt

2.1 Maßnahmen zur Baugrunderkundung

Zur Erkundung der Untergrundverhältnisse im Hang wurden Kernbohrungen und Rammsondierungen durchgeführt.

Die Kernbohrungen ermöglichten einerseits die Ermittlung der maßgebenden Bodenarten und -schichten im Hang; andererseits wurden acht Kernbohrungen zusätzlich als Inklinometer ausgebaut, um die Gleitfläche zu lokalisieren und um das zeitliche Bewegungsverhalten erfassen zu können.

Die räumliche Anordnung der Kernbohrungen ist in Abbildung 4 dargestellt.

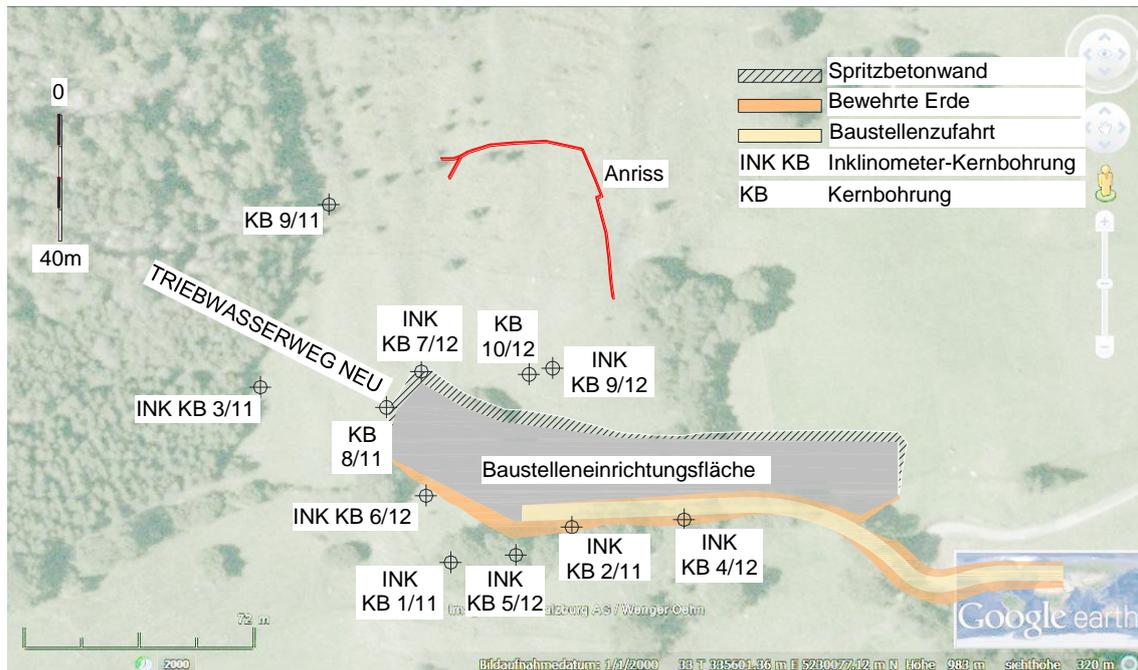


Abbildung 4: Lageplan mit Kernbohrungen und Inklinometern [2], [7], [15]

Aus der Kernbohrung INK KB 9/12 wurden vier Proben zur Durchführung von bodenmechanischen Laborversuchen entnommen.

Die Kernbohrung KB 10/12 wurde als Grundwassermessstelle ausgebaut. An dieser werden mithilfe eines Grundwasserpegels und eines Porenwasserdruckgebers die bestehenden Grundwasserverhältnisse im Nahbereich der Messstelle erfasst.

Die Ergebnisse der Rammsondierungen wurden als zusätzlicher Hinweis auf die Lage der Gleitfläche herangezogen. Die Darstellung ihrer Anordnung im Lageplan sowie ihrer Ergebnisse erfolgt in Abbildung 12 im Abschnitt 2.3.

2.2 Böden

Für die Identifizierung und Beschreibung der maßgebenden Bodenarten bzw. -schichten im Hang standen Bohrprofile, einschließlich Fotodokumentationen, zur Verfügung. Eine umfassende Interpretation der Aufschlüsse aus geologischer Sicht lag ebenfalls vor.

Auf Basis dieser Informationen kann zwischen vier Bodenschichten unterschieden werden. Diese sind in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Bodenschichten mit Bezeichnungen

Bezeichnung	Bodenart
L4	Hanglehm
L6a	Umgelagerte Moräne
L6b	Grundmoräne
L5	Hangbrekzie

Die nachstehende Beschreibung der Bodenschichten stützt sich im Wesentlichen auf die Interpretation der Aufschlüsse durch den Geologen [8].

2.2.1 Beschreibung der Bodenschichten [8]

Der Hanglehm (Bodenschicht **L4**) umfasst die jüngsten Ablagerungen der Hangflanken. Dieses Hangschuttmaterial wurde nicht durch die Auflast eines Gletschers vorverdichtet, besitzt eine schluffig-sandige Zusammensetzung mit einem Kiesanteil von 10 bis 30% [12], und ist von Steinen und Blöcken durchsetzt. Der Hanglehm wird zusätzlich als „regellos“ beschrieben, d.h. er weist keine Schichtung auf.

Das Moränenmaterial (Bodenschichten **L6a** und **L6b**) umfasst die eiszeitlichen bis späteiszeitlichen Ablagerungen des Gletschers. Es wird unterschieden zwischen den End- und Seitenmoränen bzw. umgelagerte Moränen (Bodenschicht **L6a**), die im Gegensatz zum Hanglehm eine gewisse Schichtung und Gradierung aufweisen und den vom Gletscher überfahrenen Grundmoränen (Bodenschicht **L6b**).

Die Hangbrekzie (Bodenschicht **L5**) umfasst zu Konglomerat verkrustete Hangschuttmassen, die an den Hangflanken lagern. Sie sind offenporig und vielfach horizontal geschichtet. Die Größe von Einzelblöcken in diesem Material kann über 10 m³ betragen.

2.2.2 Schichtenfolge im Hang

Die Schichtenfolge kann im Allgemeinen wie folgt beschrieben werden [8], [9]:

Als oberste Schicht gilt stets der Hanglehm, mit Schichtdicken von ca. 5 m bis 14 m. Der Hanglehm überlagert die umgelagerte Moräne, die dem Hanglehm ähnliche Schichtmächtigkeiten aufweist. Der umgelagerten Moräne folgt ein Übergangsbereich, der sich gemäß den Bohrprofilen aus Moränenmaterial und den verkrusteten Ablagerungen der Hangbrekzie zusammensetzt. Ab einer Tiefe von ca. 30 m steht die Hangbrekzie an.

Da die Felslinie nur in einer Bohrung (Schrägbohrung KB 9/11) angetroffen wurde, unterliegt der Verlauf von dieser einer Unsicherheit. Im Längenschnitt wurde eine mögliche Lage der Felslinie, überlagert von einer Auflockerungszone, entsprechend [10] angenommen.

In den Abbildungen 5 bis 8 sind die aufgeschlossenen Böden im Hang dargestellt. Die Bilder wurden aus den Fotodokumentationen der Kernbohrungen KB 5/12 und KB 7/12 entnommen.



Abbildung 5: Bodenschicht L4 – Hanglehm [11]



Abbildung 6: Bodenschicht L6a - umgelagerte Moräne [11]



Abbildung 7: Bodenschicht L6b – Grundmoräne [11]



Abbildung 8: Bodenschicht L5 – Hangbrekzie [11]

2.2.3 Bodenmechanische Eigenschaften

Es wurden Laborversuche an vier Proben durchgeführt, die der Kernbohrung KB 9/12 entnommen wurden. Das Versuchsprogramm umfasste Scherversuche und Versuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilung an allen Proben. Es stammen alle Proben aus dem Bereich der umgelagerten Moräne (Bodenschicht **L6a**).

Auf Basis der durchgeführten Laborversuche kann für die umgelagerte Moräne folgende Aussagen getroffen werden: die Bodenschicht L6a besitzt eine weitgestufte Kornverteilung und Mittelwerte der Scherparameter von $\varphi = 29^\circ$ und $c = 13 \text{ kPa}$.

Die Ergebnisse der Scherversuche sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Scherversuche an Proben der umgelagerten Moräne [12]

Probennummer	φ [°]	c [kPa]	φ_r [°]	Tiefe [m u.GOK]
7703	29,1	16,5	28,1	5,4 – 6,0
7704	28,2	13,4	23,7	8,0 – 8,6
7705	27,4	9,5	25,9	13,0 – 13,8
7706	31,3	12,1	30,8	15,0 – 15,6

Eine typische Kornverteilungslinie für die umgelagerte Moräne kann der Abbildung 9 entnommen werden.

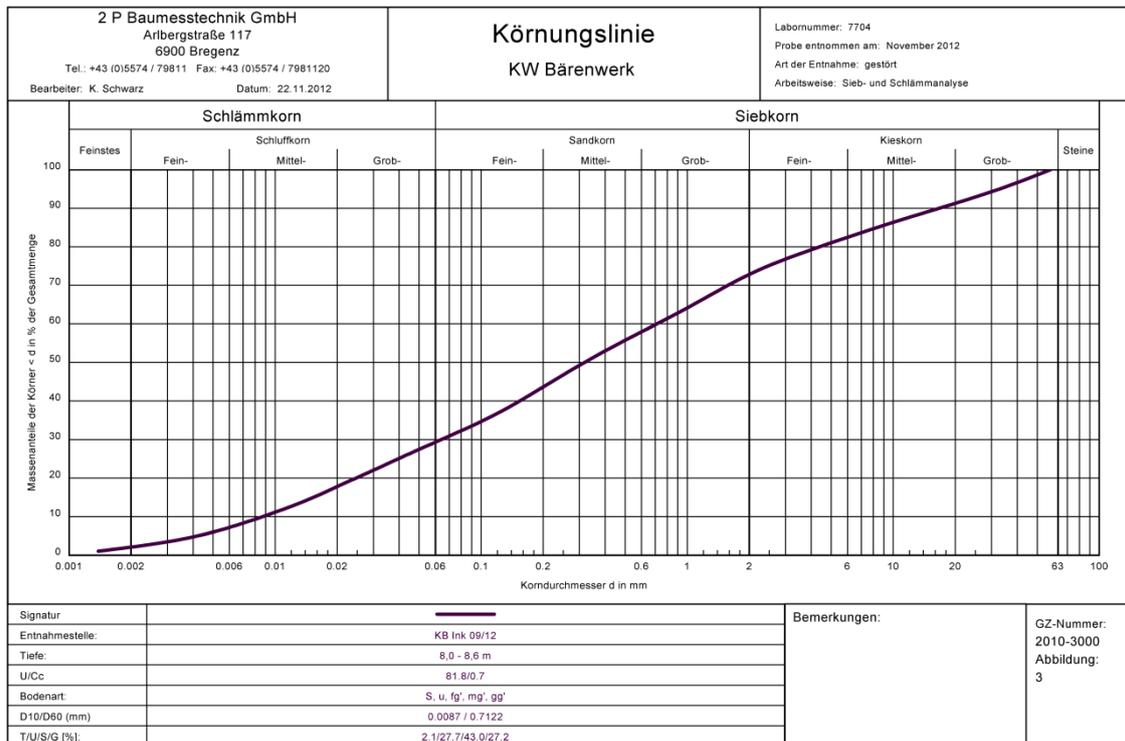


Abbildung 9: Kornverteilungslinie, Probe 7704 [12]

Obwohl aus den Bereichen der restlichen Bodenarten keine Proben zur Versuchsdurchführung entnommen wurden, wurden im geologischen Bericht auch bodenmechanisch relevante Aussagen über diese getroffen [8]. Sie betreffen die Lagerungsdichte, die Korngrößenverteilung bzw. Zusammensetzung, und zum Teil die Durchlässigkeit der Bodenarten und sollen im Folgenden erwähnt werden.

Der Hanglehm weist eine geringere Lagerungsdichte als die umgelagerte Moräne auf. Er besitzt eine der umgelagerten Moräne ähnliche, weitgestufte Korngrößenverteilung.

Die umgelagerte Moräne besitzt eine geringere Lagerungsdichte als die Grundmoräne. Sie weist ebenfalls einen etwas geringeren Feinkorngelhalt als der Hanglehm auf.

Die Grundmoräne wird durch ihre sehr hohe Lagerungsdichte charakterisiert, die mit einer sehr geringen Durchlässigkeit verbunden ist. Weiters besitzt diese ebenfalls eine weitgestufte Korngrößenverteilung.

Das Moränenmaterial wird durch einen fehlenden Tonanteil gekennzeichnet.

Es wird im geologischen Bericht darauf hingewiesen, dass die Moränen bei Wasserzutritt ihre Kohäsion verlieren und breiartig zerfallen.

Die Hangbrekzie wird ebenfalls durch eine hohe Lagerungsdichte charakterisiert, im Gegensatz zur Grundmoräne ist sie jedoch aufgrund der offenen Porenräume gut wasserdurchlässig.

2.3 Abgrenzung der bewegten Masse

Die Abgrenzung der bewegten Masse nach unten hin erfolgt durch die Lokalisierung der Gleitfläche, welche im vorliegenden Fall anhand der Inklinometerergebnisse vollzogen werden konnte. Die Ergebnisse der Rammsondierungen wurden, wie oben erwähnt, als zusätzliche Information für die Bestimmung der Gleitfläche herangezogen.

Anhand dieser Informationen kann anschließend eine Abschätzung des bewegten Volumens erfolgen.

In den Inklinometern INK 1 und INK 9 war eine Gleitfläche in ca. 11 m Tiefe unter Geländeoberkante (GOK) eindeutig erkennbar. Die Darstellungen der kumulativen Verschiebungen in diesen Inklinometern in Abhängigkeit der Tiefe können Abbildung 10 bzw. Abbildung 11 entnommen werden.

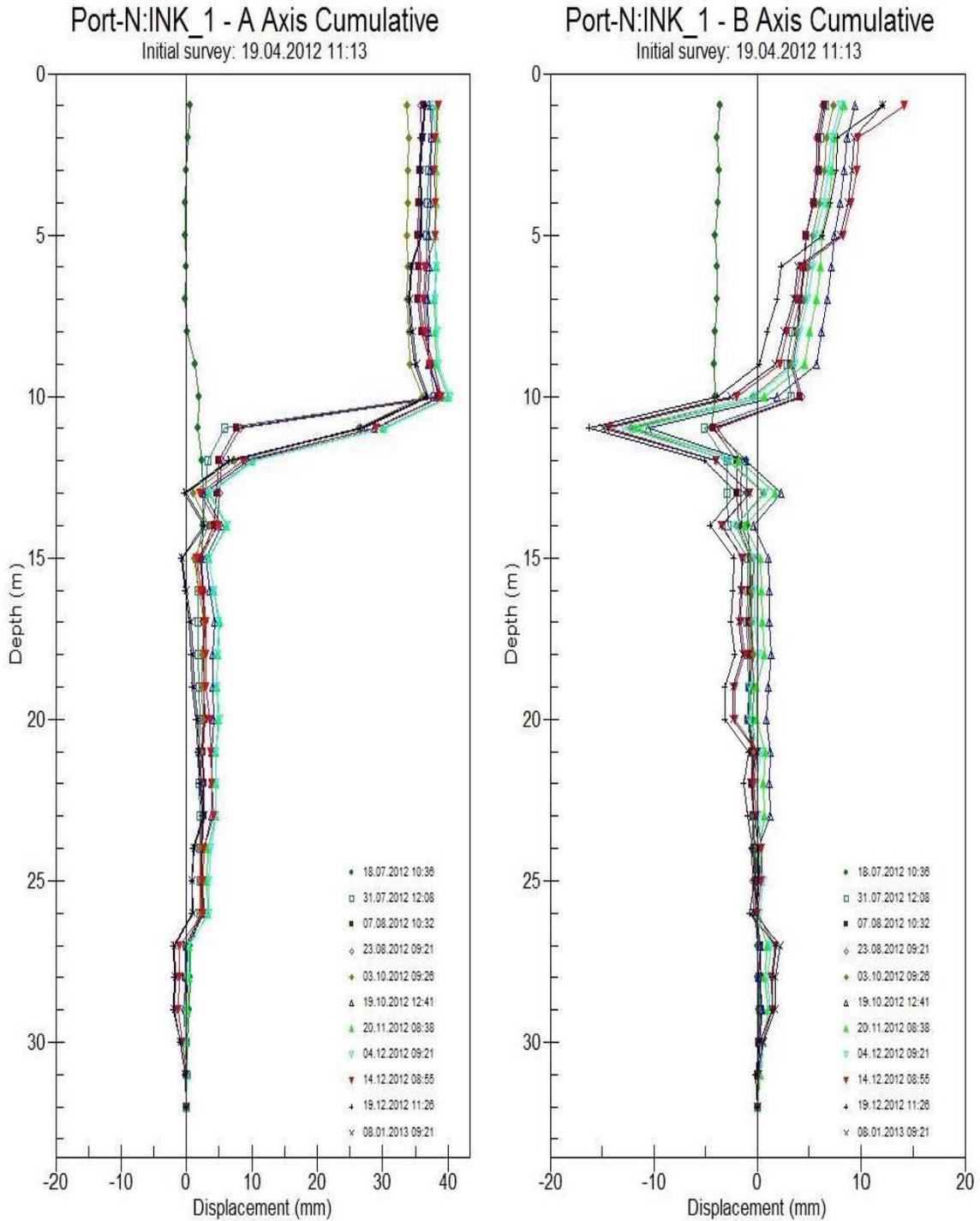


Abbildung 10: Verschiebungen in Abhängigkeit der Tiefe im Inclinometer INK 1 [4]

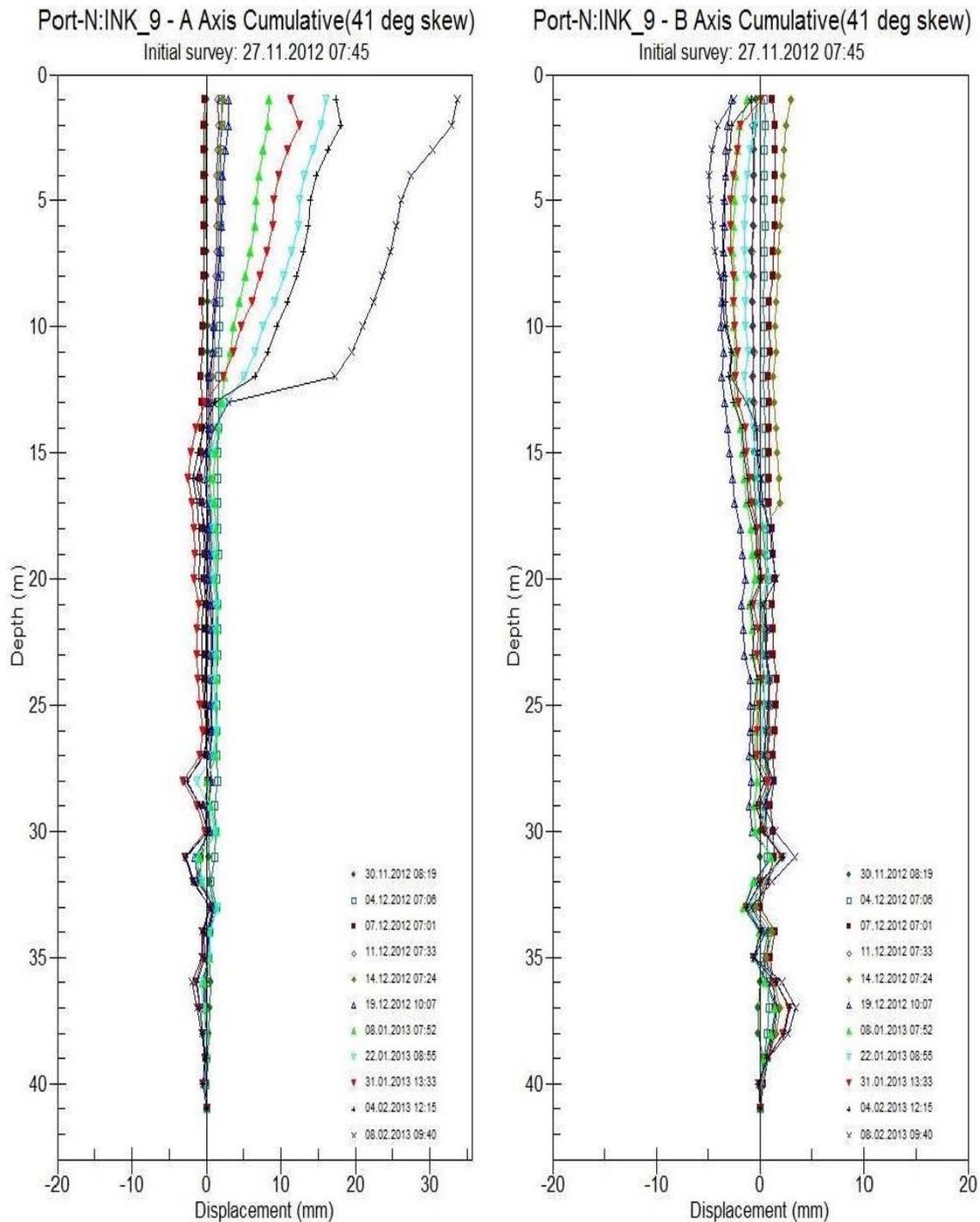


Abbildung 11: Verschiebungen in Abhängigkeit der Tiefe im Inclinometer INK 9 [13]

Da die Rohroberkante (ROK) ca. 1,0 m über der Geländeoberkante liegt, errechnet sich die Tiefe unter GOK als die gemessene Tiefe unter ROK abzüglich des Überstandes (1,0 m).

Es wurde aufgrund dieser Ergebnisse angenommen, dass für den Ursprungszustand (d.h. vor sämtlichen Baumaßnahmen) eine näherungsweise hangparallele Gleitfläche in ca. 11 m Tiefe besteht. Die Gleitfläche verläuft somit in beiden Schichten L4 und L6a. Es wird hier auf die Darstellung der Gleitfläche und Bodenschichten in Abschnitt 2.5 verwiesen.

In der dem Inklinometer INK 1 nahegelegenen Rammsondierung RS 3 wurde eine Endtiefe (Abbruch der Sondierung bei 100 Schlägen / 10 cm) von 10,50 m erreicht. Diese Tiefe entspricht annähernd der Gleitflächentiefe im Inklinometer INK 1 von 11,0 m u.GOK.

Andere Rammsondierungen im angenommenen bewegten Hangbereich (RS 7, RS 8, RS 5, und RS 4b) zeigten ähnliche Ergebnisse, mit Endtiefen zwischen 8,80 und 14,80 m u.GOK.

Die räumliche Anordnung sowie die jeweiligen Endtiefen der durchgeführten Rammsondierungen sind Abbildung 12 zu entnehmen [14].

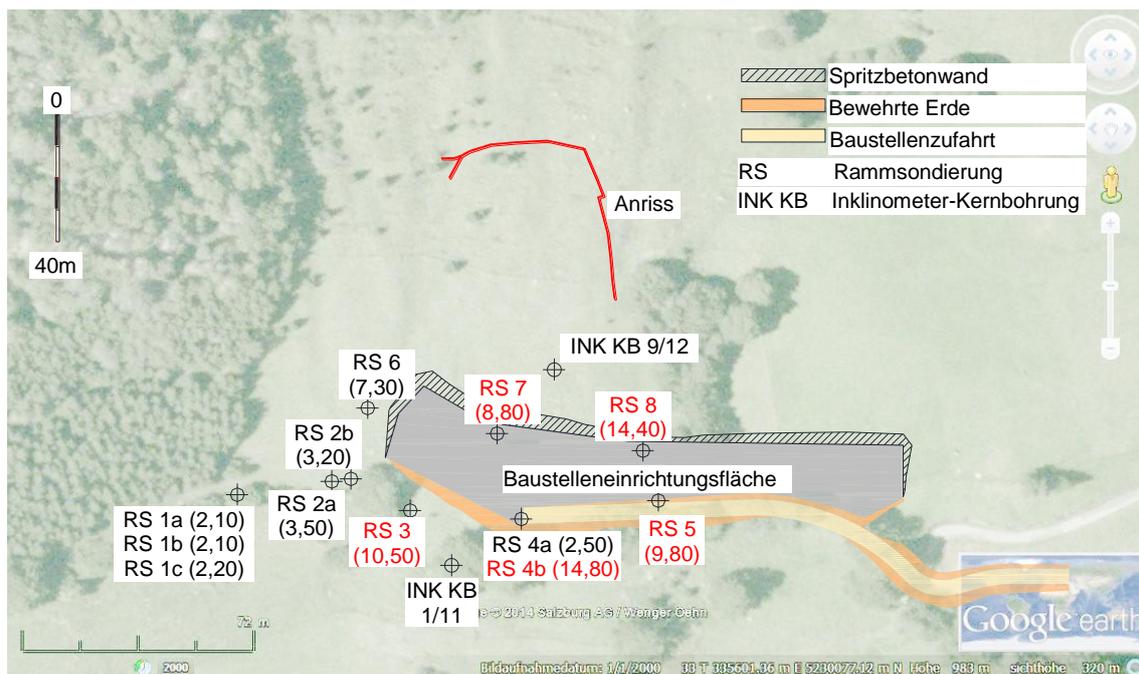


Abbildung 12: Anordnung und Endtiefen der Rammsondierungen, gemäß [7], [14], [15]

Der Mittelwert der Abbruchtiefen der Rammsondierungen im angenommenen bewegten Bereich (in Abbildung 12 rot beschriftet) beträgt 11,6 m. Aufgrund dieser Ergebnisse kann angenommen werden, dass eine Gleitfläche in einer Tiefe von ca. 11,0 m über den gesamten bewegten Bereich besteht.

Die Rammsondierung RS4a wurde als Ausreißer interpretiert und in dieser Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

2.3.1 Abschätzung des bewegten Volumens

Zur Abschätzung des bewegten Volumens werden zusätzlich zur Gleitflächentiefe auch die Breite und die Länge der bewegten Masse benötigt. Auf Basis des Lageplans [2], in welchem der beobachtete Anriss eingezeichnet ist, wurde die Breite mit 45 m angenommen. Diese Annahme wurde von den Ergebnissen der geodätischen Messungen, die im Abschnitt 3.3 ausführlich behandelt werden, bestätigt.

Zur groben Abschätzung des Volumens wurde die von der Geländeoberkante und der Gleitfläche begrenzte Fläche, die in Abbildung 13 schraffiert dargestellt ist, mit der Breite der Kriechmasse multipliziert.

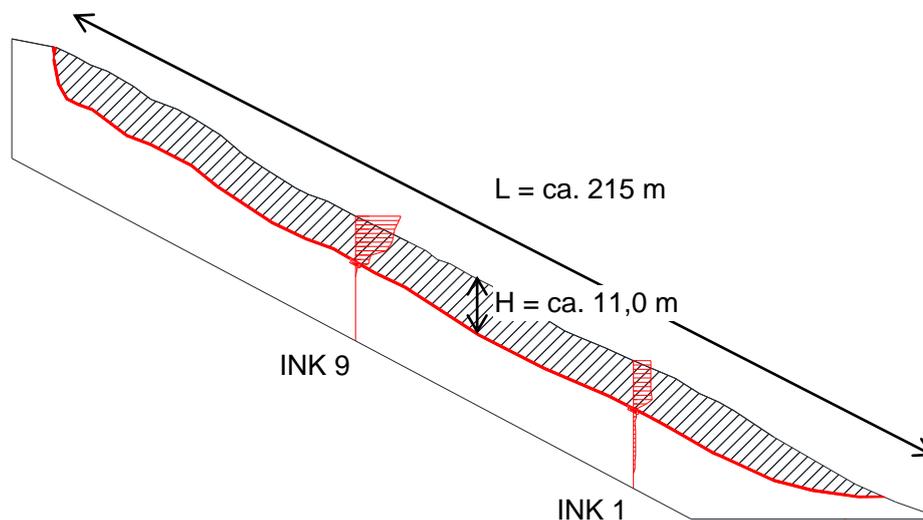


Abbildung 13: Abgeschätztes Volumen der Kriechmasse

Die schraffierte Fläche in Abbildung 13 beträgt ca. 2000 m² bei einer durchschnittlichen Tiefe der Gleitfläche von 11,0 m und einer möglichen Länge der bewegten Masse von ca. 215 m. Durch Multiplikation dieser Fläche mit der angenommenen Breite des Kriechhanges kann ein bewegtes Volumen im Ursprungszustand von ca. 90.000 m³ abgeschätzt werden.

Es soll jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass anhand der verfügbaren Informationen nur eine sehr grobe Abschätzung des bewegten Volumens möglich ist. Es ist z.B. möglich, dass die Gleitfläche bis in den flachen Talboden (weiter als in Abbildung 13 eingezeichnet) verläuft, in welchem Fall das bewegte Volumen wesentlich größer als 90.000 m³ wäre.

2.4 Grundwasser

Im oberen Hangbereich wurde neben dem Inklinometer INK 9 ein Grundwasserpegel eingebaut (KB 10/12). Es wird an dieser Stelle mithilfe eines Porenwasserdruckgebers der Porenwasserdruck in einer Tiefe von ca. 11 m u. GOK zusätzlich gemessen.

Die Ergebnisse der Grundwassermessungen an dieser Messstelle zeigen einen freien Grundwasserspiegel im Hanglehm, der zwischen 2,54 und 3,74 m u. GOK schwankt. Die Druckhöhe in der Tiefe von 11 m u. GOK schwankt zwischen 8,98 und 9,40 m u. GOK.

Es wird in einem der geologischen Berichte darauf hingewiesen, dass es keinen zusammenhängenden Grundwasserkörper im Hang gibt.

Die Grundwasserthematik und die Ergebnisse der Grundwassermessungen auf Basis von [16] werden im Abschnitt 3.5 näher behandelt.

2.5 Darstellung des Untergrundmodells in einem repräsentativen Schnitt

Das Untergrundmodell wird nun in einem repräsentativen Schnitt dargestellt. In diesem Schnitt sind sämtliche Informationen aus der bisher beschriebenen Baugrunderkundung enthalten.

Es wurde eine Schnittführung angestrebt, die einer maximalen Anzahl an Kernbohrungen naheliegt, um auch ein Höchstmaß an Information aus diesen berücksichtigen zu können.

Für das Bodenprofil wurden die Ergebnisse der Kernbohrungen INK KB 1/11, INK KB 5/12, INK KB 6/12, INK KB 7/12, und INK 9/12 berücksichtigt, da sie im Nahbereich des maßgebenden Schnittes liegen.

Die Tiefe der möglichen Gleitfläche im Ursprungszustand wird, wie oben angesprochen, auf Basis der Ergebnisse in den Inklinometern INK 1 und INK 9 mit 11,0 m u. GOK angenommen.

Die Schnittführung ist in Abbildung 14 und der daraus resultierende Längenschnitt in Abbildung 15 dargestellt. Die Bezeichnungen der Bodenschichten entsprechen den angegebenen Bezeichnungen in Tabelle 1. Die möglichen Verläufe der Gleitfläche sind in rot dargestellt. Die zukünftige Lage des Einschnittes wird mit einer strichlierten Linie angedeutet.

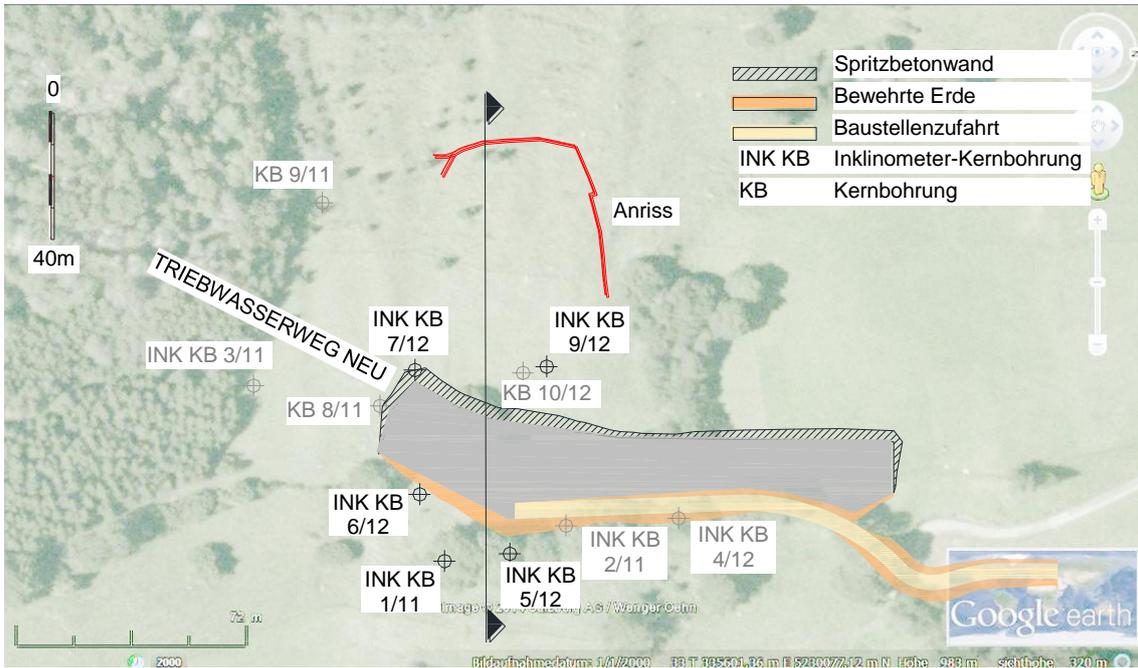


Abbildung 14: Schnittführung Längenschnitt [2], [7], [15]

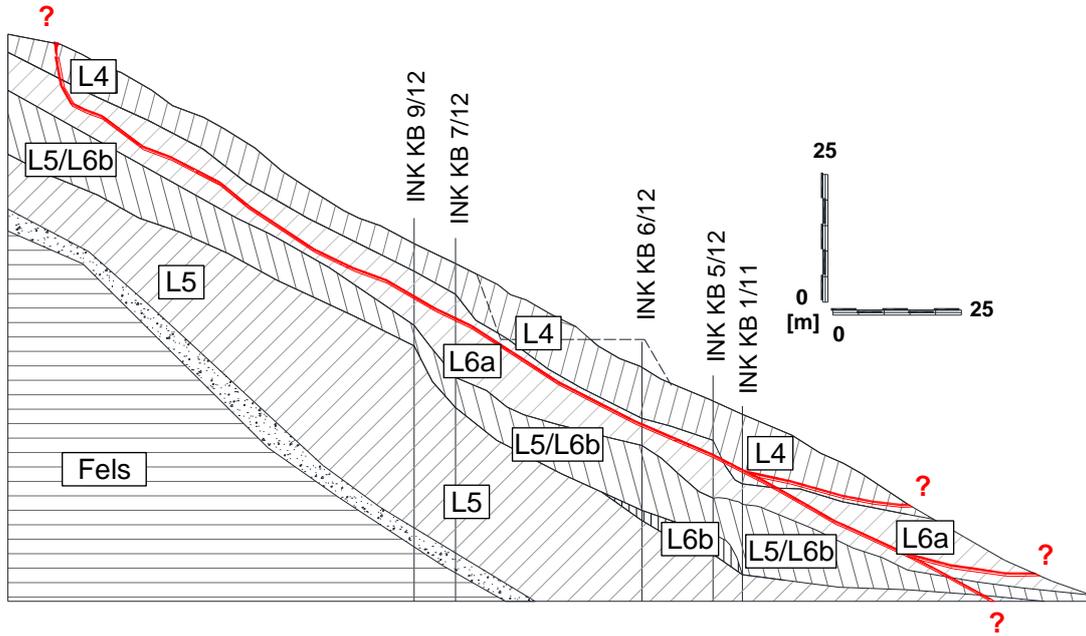


Abbildung 15: Längenschnitt, mit Angaben von [10]

3 Auswertung der Messdaten

Unter der Auswertung der Messdaten ist eine objektive Analyse der zur Verfügung gestellten Messdaten und Zusatzinformationen zu verstehen.

In diesem Abschnitt sollen die Messdaten zum Bewegungsverhalten des Hanges aufgearbeitet werden, die relevanten Zustände im Hang (Grundwasser, Bauzustände) erfasst werden, und auch äußere Einflüsse (Niederschlag) quantifiziert werden.

Dieser Abschnitt dient als Grundlage für die Interpretation der Messdaten im Kapitel 4, die ein Verständnis für das Systemverhalten und die Einflussfaktoren auf das Verhalten des Hanges schaffen soll.

Zu den verfügbaren Daten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, gehören:

- Der zeitliche Ablauf der Bauzustände
- Die Verschiebungsmessung mittels Inklinometer
- Die Verschiebungsmessung mittels geodätischer Vermessung
- Die Niederschlagsmessung
- Die Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung
- Die Ankerkraftmessung

3.1 Zeitlicher Ablauf der Bauzustände

Mit dem Bauablauf können die Bauzustände im Hang in ihrer zeitlichen Reihenfolge identifiziert werden. Die erfassten Bauzustände können in weiterer Folge mit den Verschiebungsmessdaten verglichen werden, um den Einfluss von Baumaßnahmen auf das Verhalten des Hanges zu untersuchen. Die Beschreibung der Baumaßnahmen in diesem Abschnitt gliedert sich wie folgt:

- Beschreibung der Aushubbereiche zur Herstellung des Einschnittes
- Der Aushub im Bereich „rechts“
- Der Aushub im Portalbereich
- Der Aushub im Bereich „links“ mit Zusatzmaßnahmen
- Die Aufschüttung der Bewehrte-Erde-Konstruktion
- Der Einbau von Flächenentwässerungsmaßnahmen

Die zeitlichen Abläufe wurden den Bautagesberichten entnommen [17].

3.1.1 Beschreibung der Aushubbereiche zur Herstellung des Einschnittes

Im Lageplan wurde der Aushub in zwei Bereiche, Bereich „links“ und Bereich „rechts“, aufgeteilt. Der Bereich „links“ enthält den Portalbereich, von dem aus der Vortrieb für den neuen Druckstollen erfolgte. Die Aushubbereiche sind in Abbildung 16 dargestellt.

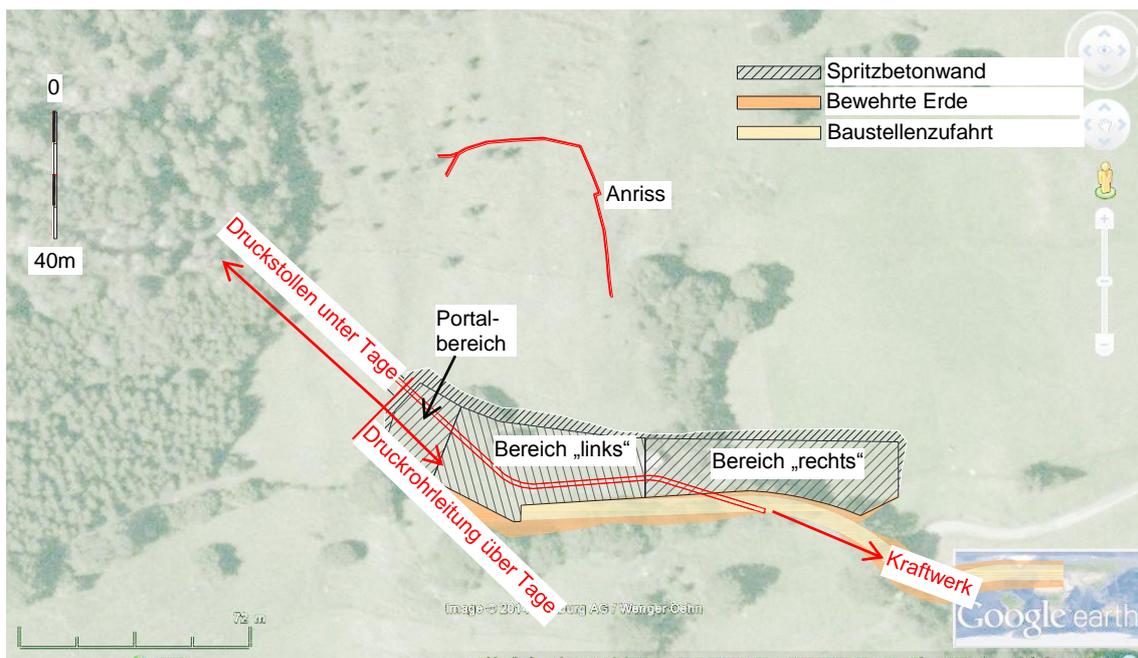


Abbildung 16: Aushubbereiche und Baumaßnahmen im Lageplan [3], [15]

3.1.2 Aushub im Bereich „rechts“

Mit den Erdbauarbeiten wurde am 03.08.2012 begonnen, und nach Fertigstellung der Baustellenzufahrt am 03.09.2012 wurde mit dem Aushub im Bereich „rechts“ begonnen.

Der Bereich „rechts“ befindet sich zum großen Teil außerhalb des bewegten Hangbereiches. Die Herstellung des Einschnittes im Bereich „rechts“ wurde am 09.10.2012 fertiggestellt und die Sicherung dieses Bereiches erfolgte mit einer Bodenvernagelung.



Abbildung 17: Bereich "rechts" (L: Aushub, R: fertiggestellt) [18]

3.1.3 Aushub im Portalbereich

Parallel zum Aushub im Bereich „rechts“ wurde am 11.09.2012 mit dem Aushub im Bereich „links“ begonnen, der sich zur Gänze im bewegten Hangbereich befindet. Der Aushub im gesamten Bereich „links“ wurde bis zum 26.09.2012 fortgeführt.

Am 26.09.2012 musste der Aushub im Bereich „links“ aufgrund der neuen Hinweise auf das Kriechverhalten des Hanges eingestellt werden, bis die zusätzlich geplante Sicherung durch Litzenanker, die im Abschnitt 1.2 schon erwähnt wurde, fertiggestellt war.

Am 12.10.2012 wurde der Aushub im Bereich „links“, jedoch nur mehr im Portalbereich, fortgesetzt. Der Aushub im Portalbereich wurde am 14.11.2012 fertiggestellt.



Abbildung 18: Portalbereich (L: Aushub, R: fertiggestellt) [18]

3.1.4 Aushub im Bereich „links“ mit Zusatzmaßnahmen

Der verbleibende Aushub im Bereich „links“ wurde im Zeitraum vom 05.12.2012 bis 06.02.2013 durchgeführt.

Die zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen in diesem Bereich bestanden aus 11 Ankerrippen mit jeweils zwei Ankerebenen, die in einem horizontalen Abstand von 3,0 m angeordnet wurden.

Die erste Abtragungsebene in diesem Bereich wurde vom 05.12.2012 bis 10.12.2012 ausgeführt und die Litzenanker der oberen Ankerebene wurden am 02.01.2013 und am 03.01.2013 gespannt.

Die zweite Abtragungsebene wurde vom 03.01.2013 bis 14.01.2013 ausgeführt und die Litzenanker der unteren Ankerreihe wurden am 22.01.2013 bzw. am 28.01.2013 gespannt.



Abbildung 19: Bereich "links" (L: 1. Abtragungsebene, R: 2. Abtragungsebene) [18]

Nach Aushub der zwei Abtragsebenen und Einbau aller zusätzlich geplanten Sicherungsmaßnahmen erfolgte der Abtrag der verbleibenden Bermen im Bereich „links“ vom 23.01.2013 bis 27.01.2013 und vom 31.01.2013 bis 06.02.2013.

Am 06.02.2013 waren alle Baumaßnahmen für den Einschnitt abgeschlossen.



Abbildung 20: Bereich "links" (L: Abtrag verbleibender Berme; R: fertiggestellt) [18]

3.1.5 Aufschüttung der Bewehrte-Erde-Konstruktionen

Die Herstellung der Bewehrte-Erde-Konstruktionen zur Erweiterung der Baustelleneinrichtungsfläche erfolgte, parallel zu den anderen Baumaßnahmen, im Zeitraum zwischen dem 08.10.2012 bis 16.01.2013.

Zur Sicherung der Bewehrte-Erde-Konstruktionen kamen 50 temporäre Litzenanker zum Einbau.

3.1.6 Flächenentwässerungsmaßnahmen

Abgesehen von den Baumaßnahmen für den Einschnitt selber, die oben zur Gänze beschrieben sind, wurde im Herbst (August/September) 2013 ein Flächenentwässerungssystem mittels Drainagerippen ausgeführt. Das Ziel eines solchen Systems ist die Verhinderung der Einsickerung von Oberflächenwasser in den betroffenen Hangbereich.

Der Grund für den Einbau dieser Flächenentwässerungsmaßnahmen und die kontrollierte Ableitung von Oberflächenwasser bestand in der Vermutung, dass der Hang auf Niederschlagsereignisse mit Bewegungen reagierte. Auf den Zusammenhang zwischen Niederschlagsereignissen und Bewegungen im behandelten Hang wird im Abschnitt 4.2.2 näher eingegangen.

Die Anordnung der Entwässerungsrippen im Lageplan ist in Abbildung 21 schemenhaft dargestellt.

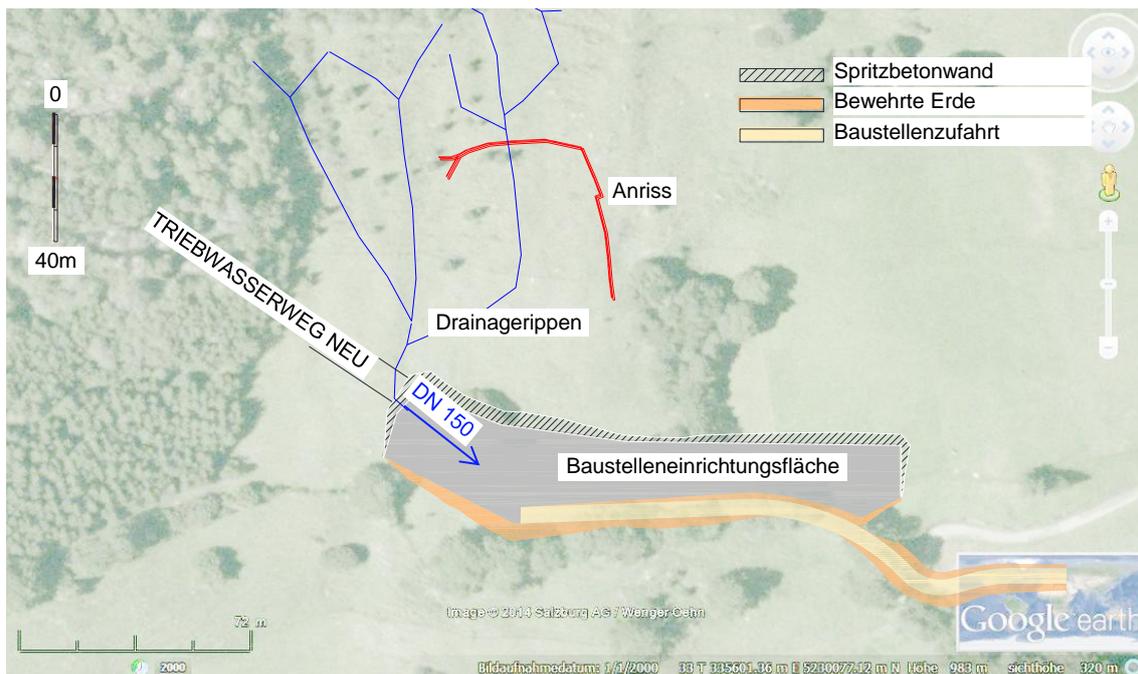


Abbildung 21: Flächenentwässerung [15], [19]

3.2 Verschiebungsmessung – Inklinometer

Die Inklinometermessung dient einerseits der Lokalisierung von eventuell bestehenden Gleitflächen und andererseits der Messung von Hangbewegungen.

Von den durchgeführten Kernbohrungen wurden acht als Inklinometer ausgebaut. Die Anordnung der Inklinometer im Lageplan kann Abbildung 22 entnommen werden.

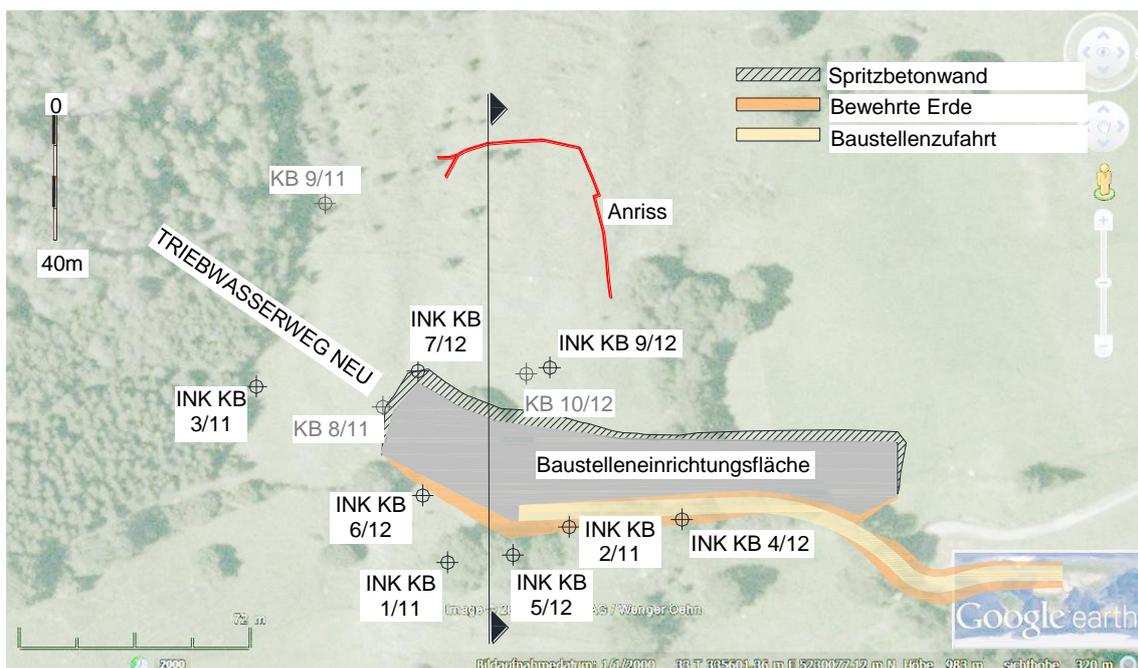


Abbildung 22: Anordnung der Inklinometer im Lageplan [15]

Im Folgenden wird auf die Messergebnisse der Inklinometer INK 1, INK 5, und INK 9, welche dem betrachteten Längenschnitt naheliegen, näher eingegangen. Diese Inklinometer sind auch nicht in oder unmittelbar neben diversen Bauteilen (z.B. Spritzbetonwand, Bewehrte Erde) angeordnet, sodass eine unmittelbare Beeinflussung der Ergebnisse durch solche Baumaßnahmen unwahrscheinlich ist.

3.2.1 Grundsätzliches zur Auswertung

Für die Darstellung der Messergebnisse aus den Inclinometermessungen wurden die kumulativen Verschiebungen in Abhängigkeit der Tiefe herangezogen.

Die Verschiebungswerte in A- und B-Richtung wurden für jede Messung abgelesen und daraus Verschiebungsvektoren gebildet. Die Größe der Gesamtverschiebungsvektoren wurde anschließend in Abhängigkeit der Zeit für eine bestimmte Tiefe dargestellt, um eine Aussage über die Bewegungsraten erhalten zu können. Die Bildung der Verschiebungsvektoren wird in Abbildung 23 dargestellt.

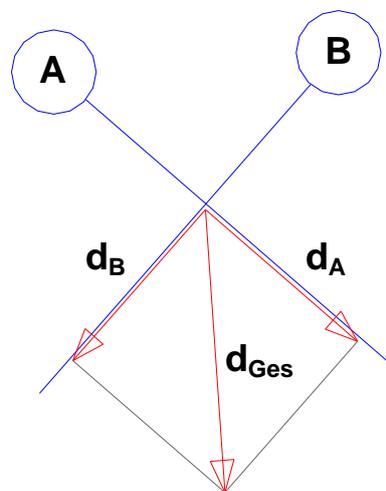


Abbildung 23: Bildung der Gesamtverschiebungsvektoren

Die Tiefen, in denen die Auswertung erfolgte, wurden entsprechend gewählt um die Bewegungsraten in den vorhandenen Gleitflächen erfassen zu können.

3.2.2 Inklinometer INK 1

Das Inklinometer INK 1 befindet sich im Hangbereich unterhalb der Baustelleneinrichtungsfläche und am 19.04.2012 wurde die Nullmessung durchgeführt.

In diesem Inklinometer konnte im betrachteten Zeitraum von 19.04.2012 bis 27.03.2014 eine Gleitfläche in einer Tiefe zwischen 9 bis 11 m u.GOK beobachtet werden. Die Darstellung der Verschiebungen über die Zeit erfolgt für eine Tiefe von 3 m u.GOK.

In Abbildung 24 ist die kumulative Verschiebung im Inklinometer INK 1 über die Tiefe dargestellt. Sämtliche verwendete Daten für Inklinometer INK 1 wurden [4] entnommen.

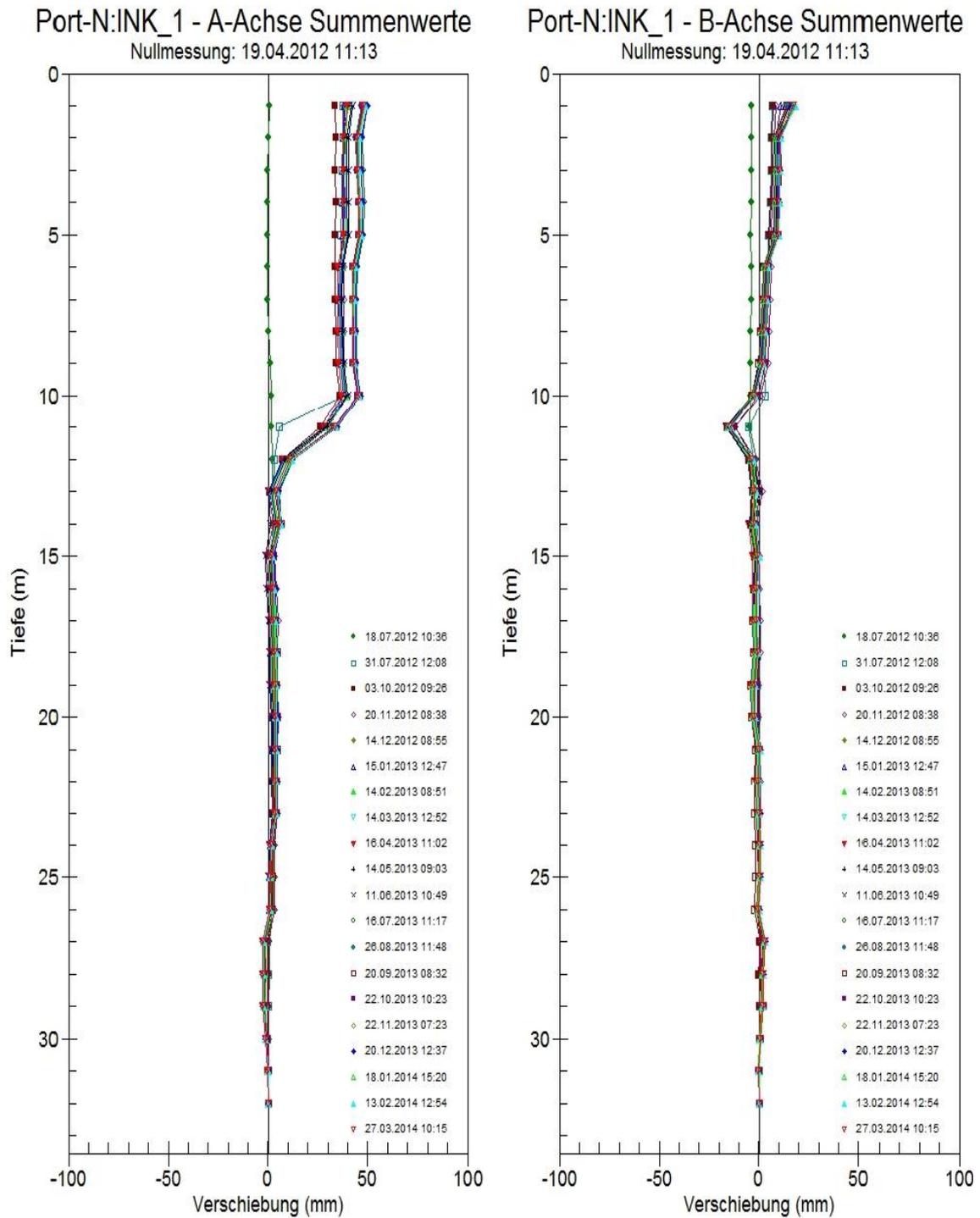


Abbildung 24: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 1 [4]

Die Gesamtverschiebungen in Abhängigkeit der Zeit können Abbildung 25 entnommen werden. Die maßgebenden Bewegungsvorgänge wurden durchnummeriert und in Tabelle 3 zusammengefasst.

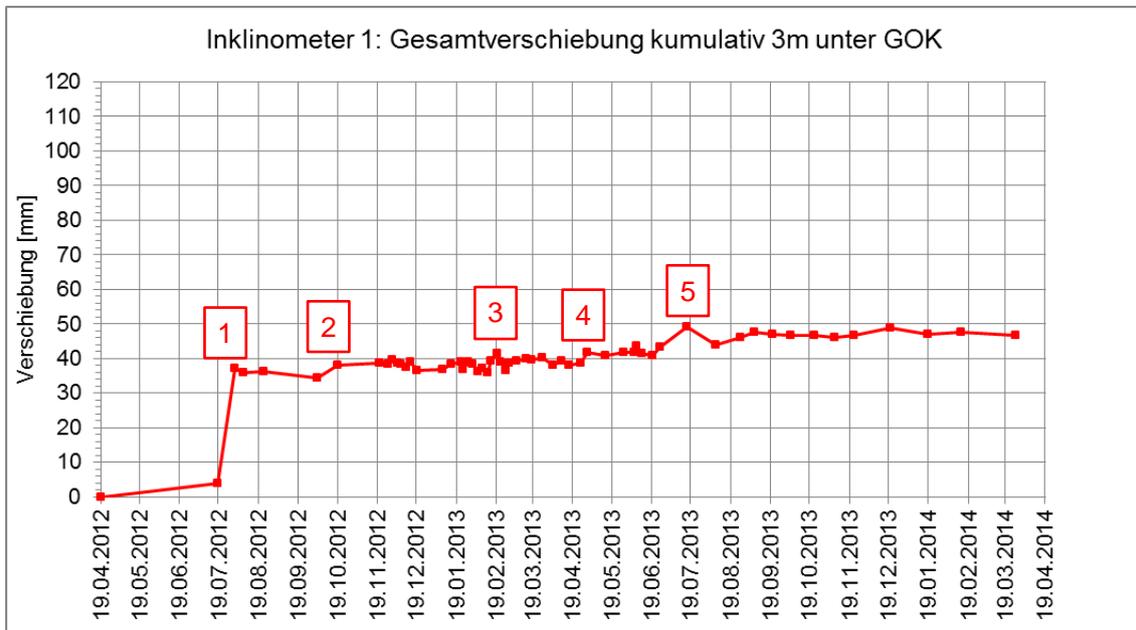


Abbildung 25: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 1

Im Zeitraum von der Nullmessung bis zum letztvorhandenen Messergebnis am 27.03.2014 werden fünf Bewegungsvorgänge unterschieden.

Die angeführten Bewegungsvorgänge stellen Bewegungen mit Bewegungsraten zwischen 0,3 und 2,7 mm/d dar.

Tabelle 3: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 1

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Verschiebungsbetrag [mm]	v [mm/d]
1	18.07.2012 – 31.07.2012	35	2,7
2	03.10.2012 – 19.10.2012	4	0,3
3	12.02.2013 – 19.02.2013	5	0,7
4	25.04.2013 – 30.04.2013	3	0,6
5	19.06.2013 – 16.07.2013	9	0,3

3.2.3 Inklinometer INK 5

Das Inklinometer INK 5 befindet sich ebenfalls unterhalb der Baustelleneinrichtungsfläche und am 03.10.2012 wurde die Nullmessung durchgeführt. Die A-Richtung dieses Inklinometers ist relativ zur Fallrichtung des Hanges um 52° verdreht.

Es ist im Verschiebungsbild dieses Inklinometers, im Unterschied zum Inklinometer INK 1, keine eindeutige Gleitfläche zu beobachten. Im Bereich von 4 bis 6 m unter Geländeoberkante ist jedoch eine wesentliche Zunahme der Bewegungen in A-Richtung zu beobachten, die auf eine Gleitfläche in diesem Bereich hinweisen könnte.

Die Auswertung der Zeit-Verschiebungslinie erfolgte wiederum in einer Tiefe von 3 m u.GOK. In Abbildung 26 ist das Verschiebungsbild im Inklinometer INK 5 dargestellt. Sämtliche Daten für Inklinometer INK 5 wurden [20] entnommen.

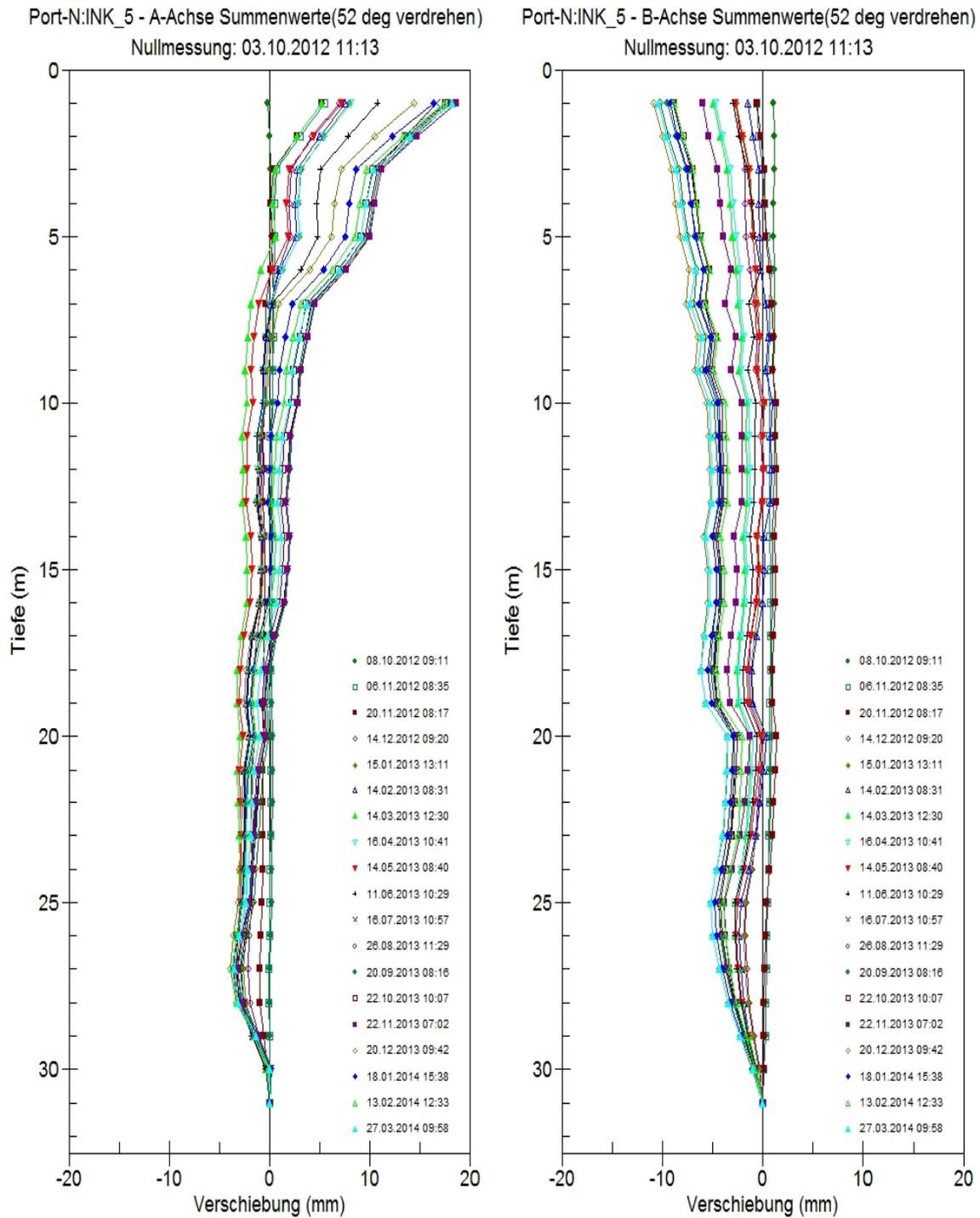


Abbildung 26: kumulative Verschiebung Inklinometer INK 5 [20]

Die Gesamtverschiebungen in Abhängigkeit der Zeit können Abbildung 27 entnommen werden. Der maßgebende Bewegungsvorgang wurde nummeriert und in Tabelle 4 angeführt.

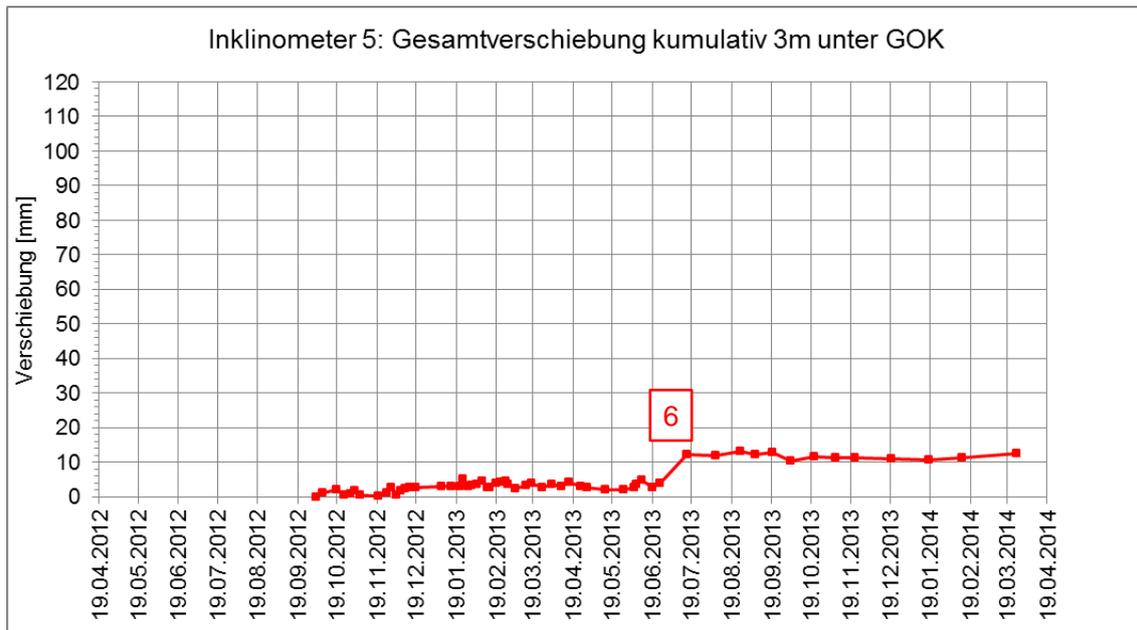


Abbildung 27: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 5

Im Zeitraum von der Nullmessung bis zum 27.03.2014 wurde ein wesentlicher Bewegungsvorgang identifiziert.

Der Bewegungsvorgang 6 stellt eine Bewegung von ca. 10 mm (Bewegungsrate 0,4 mm/d) dar. Er findet zum selben Zeitpunkt wie der Bewegungsvorgang 5 im benachbarten Inklinometer INK 1 statt und besitzt die gleiche Größenordnung wie dieser.

Tabelle 4: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 5

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Verschiebungsbetrag [mm]	v [mm/d]
6	19.06.2013 – 16.07.2013	10	0,4

3.2.4 Inklinometer INK 9

Das Inklinometer INK 9 befindet sich im Hangbereich oberhalb der Baustelleneinrichtungsfläche ca. 15 m hinter der Spritzbetonsicherung, und am 27.11.2012 wurde die Nullmessung durchgeführt. Die A-Richtung ist relativ zur Fallrichtung des Hanges um 41° verdreht.

Es wird bei dem Inklinometer INK 9 zunächst zwischen dem Verschiebungsbild vor und nach der Messung am 05.06.2013 unterschieden. Vor dieser Messung bestand eine Gleitfläche in einer Tiefe von 11 m u.GOK. Die Messung am 05.06.2013 wies auf die Ausbildung einer neuen Gleitfläche in einer Tiefe von 9 m u.GOK hin, die bei sämtlichen weiteren Messungen ebenfalls zu beobachten war. Die kumulative Verschiebung vor dem 05.06.2013 ist in Abbildung 28 dargestellt.

Sämtliche Daten für Inklinometer INK 9 wurden [13] entnommen.

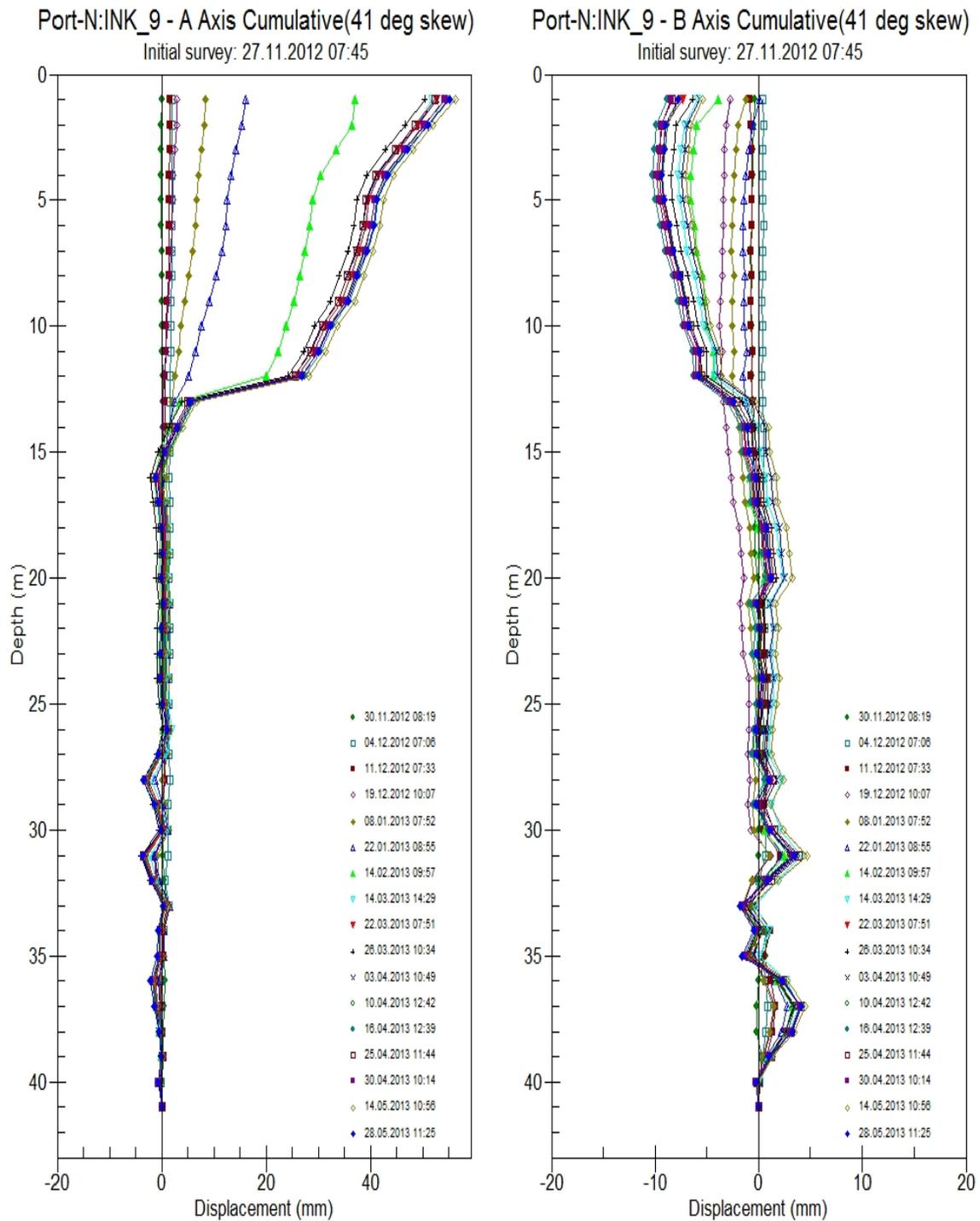


Abbildung 28: kumulative Verschiebung Inclinometer INK 9, vor 05.06.2013 [13]

In Abbildung 29 ist die kumulative Verschiebung ab dem 05.06.2013 dargestellt.

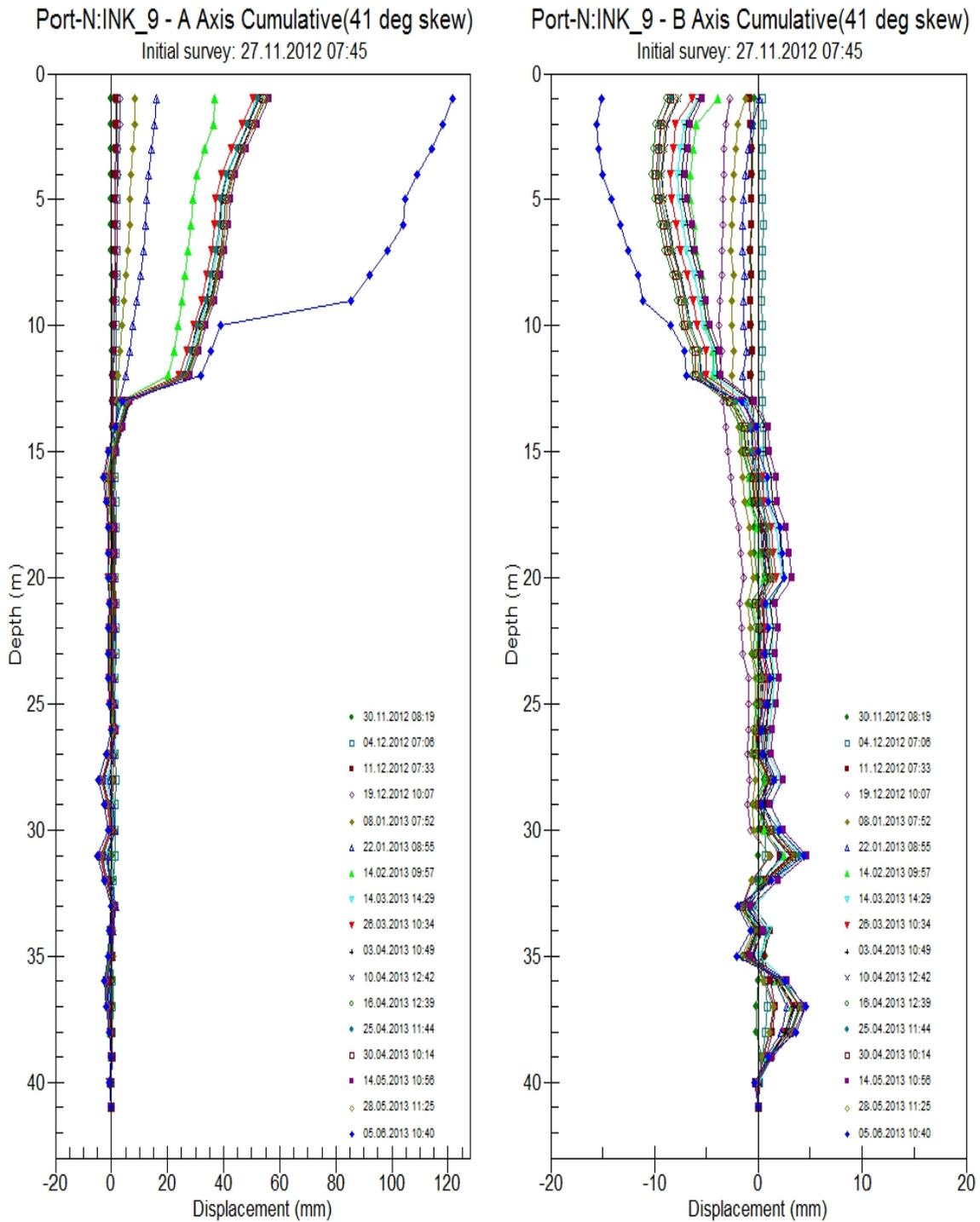


Abbildung 29: kumulative Verschiebung Inclinometer INK 9, ab dem 05.06.2013 [13]

Da bei diesem Inklinometer zwei Gleitflächen zu beobachten waren, erfolgte auch die Auswertung in zwei unterschiedlichen Tiefen. Sie wurde sowohl in der Tiefe von 3 m u.GOK als auch in der Tiefe von 10 m u.GOK durchgeführt.

Hierbei erfasste die Auswertung in 10 m Tiefe jene Bewegungen, die ausschließlich auf der unteren Gleitfläche stattgefunden hatten. Die Auswertung in 3 m Tiefe erfasste die Gesamtbewegungen aus beiden Gleitflächen. Durch Abziehen der Verschiebungen in 10 m Tiefe von den Verschiebungen in 3 m Tiefe konnten jene Verschiebungen, die ausschließlich aus der oberen Gleitfläche stammten, bestimmt werden.

Die Gesamtverschiebungen in Abhängigkeit der Zeit können Abbildung 30 entnommen werden. Die maßgebenden Bewegungsvorgänge wurden durchnummeriert und in Tabelle 5 angeführt.

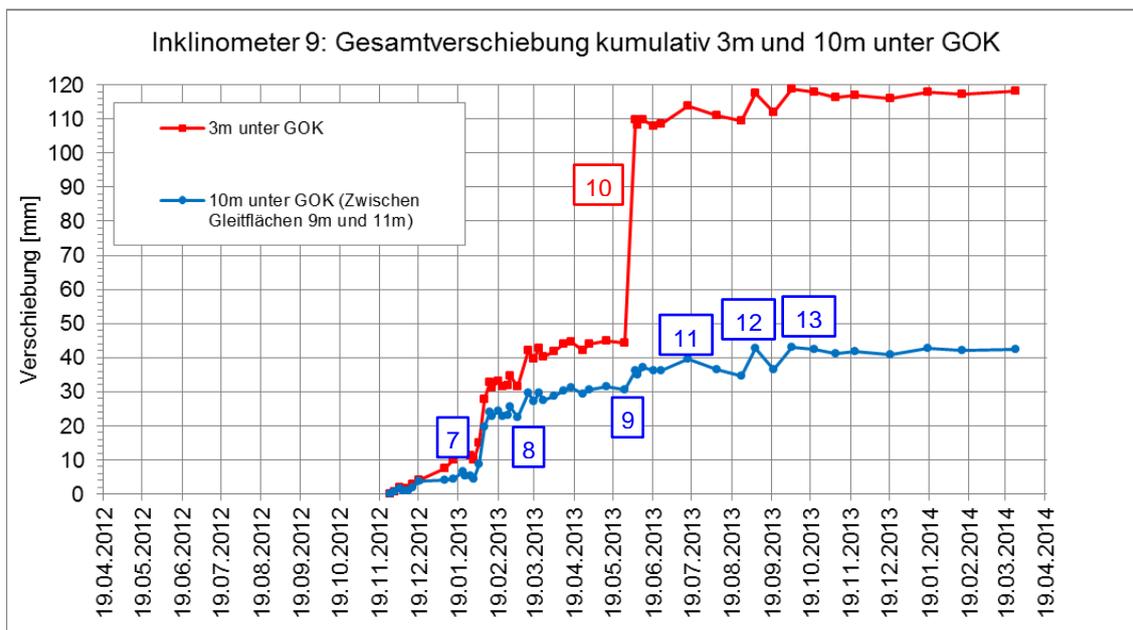


Abbildung 30: Gesamtverschiebung vs. Zeit, Inklinometer INK 9

Im Zeitraum zwischen der Nullmessung und dem 27.03.2014 wurden sieben wesentliche Bewegungsvorgänge identifiziert.

Der Bewegungsvorgang 10 stellt die Ausbildung einer zweiten Gleitfläche in 9 m Tiefe dar.

Der Bewegungsvorgang 11, beginnend am 19.06.2013, fällt zeitlich mit Vorgängen in den Inklinometern INK 1 und INK 5 zusammen, ist jedoch größenordnungsmäßig kleiner. Ansonsten ist zu den Zeitpunkten der Bewegungen im Inklinometer INK 9 keine Reaktion in den anderen zwei Inklinometern zu erkennen.

Tabelle 5: Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 9

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Verschiebungsbetrag [mm]	v [mm/d]	Gleitfläche [m u.GOK]
7	31.01.2013 – 12.02.2013	20	1,7	11
8	06.03.2013 – 14.03.2013	7	0,9	11
9	28.05.2013 – 05.06.2013	6	0,8	11
10	28.05.2013 – 05.06.2013	65	8,1	9
11	19.06.2013 – 16.07.2013	4	0,1	11
12	26.08.2013 – 06.09.2013	8	0,7	11
13	20.09.2013 – 04.10.2013	7	0,5	11

Die letzte Spalte in Tabelle 5 gibt jene der zwei Gleitflächen an, aus der die angeführten Bewegungen stammen. Wie oben schon angesprochen kommt diese Information aus der Differenzbildung der ausgewerteten Verschiebungen in 3 m Tiefe und 10 m Tiefe.

Diese zuvor beschriebene Differenzbildung wird in Abbildung 31 graphisch dargestellt. Hierbei ist die Differenz bzw. die Verschiebung in der oberen Gleitfläche in Gelb dargestellt. Es ist gut erkennbar dass alle Bewegungen, mit Ausnahme der Bewegung im Zeitraum vom 28.05.2013 bis 05.06.2013, in der unteren Gleitfläche stattfinden.

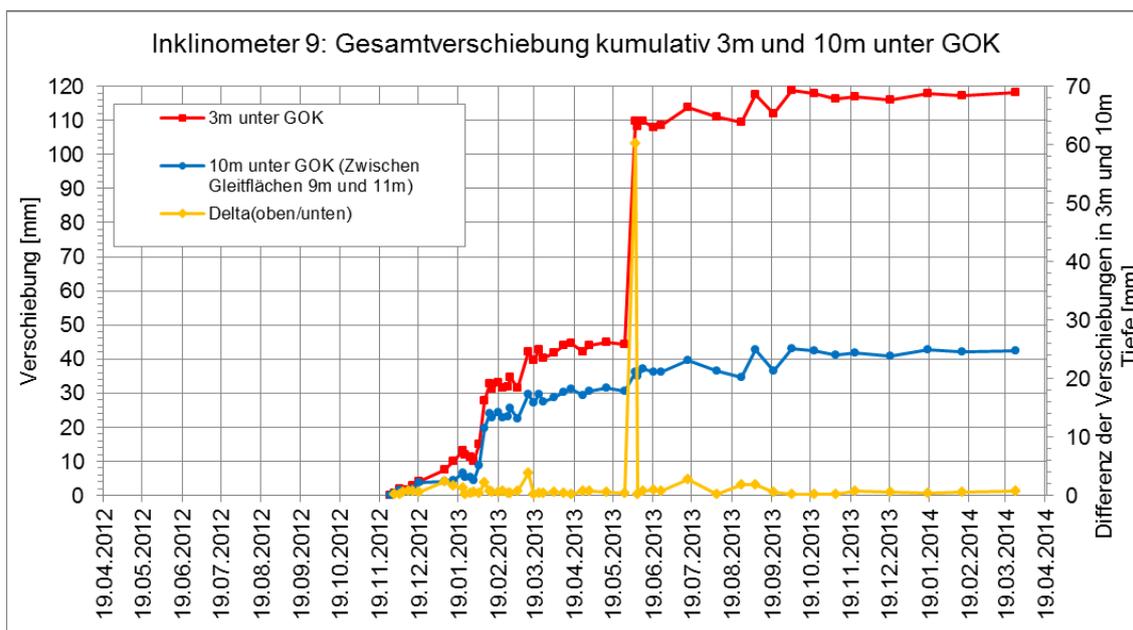


Abbildung 31: Differenz der Verschiebungen in der oberen und unteren Gleitfläche, INK 9

3.3 Verschiebungsmessung – geodätische Messpunkte

Neben den Inklinometermessungen wurden auch geodätische Messpunkte zur Verschiebungsmessung herangezogen.

Die geodätischen Messpunkte wurden in Messquerschnitten angeordnet, die in Abbildung 32 zu sehen sind. Die Ergebnisse der geodätischen Vermessung umfassen die Setzungen (vertikale Verschiebungen), die Querverschiebungen (horizontale, talwärts gerichtete Verschiebungen in Fallrichtung des Hanges) und die Verschiebungen quer zur Fallrichtung des Hanges der einzelnen Messpunkte.

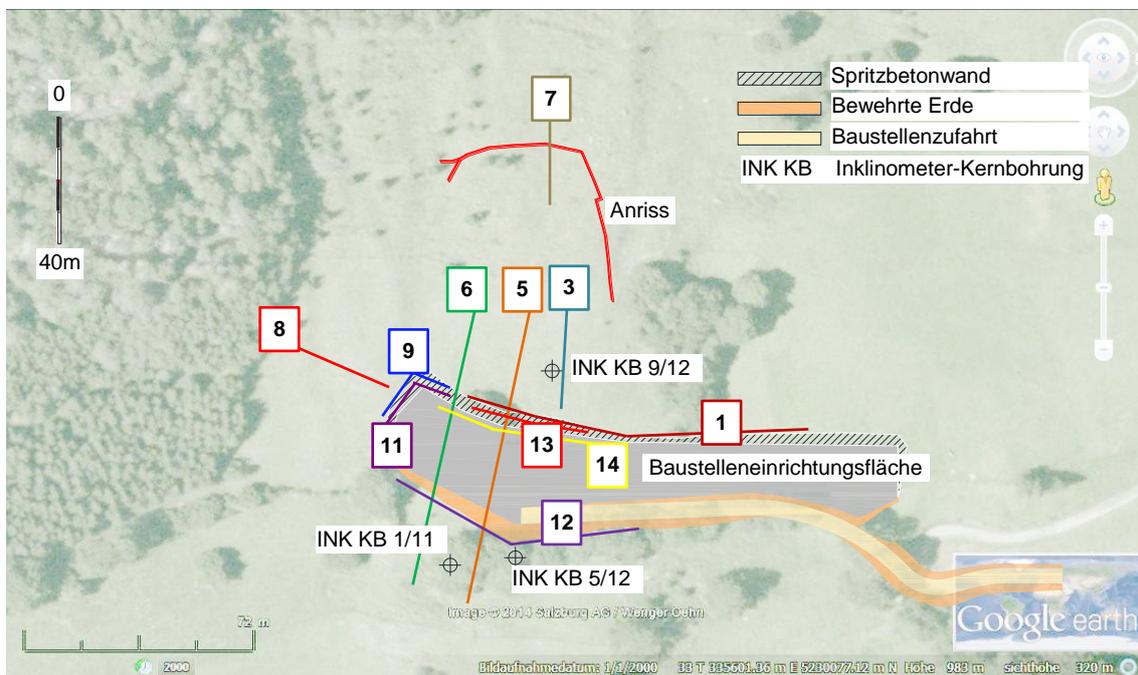


Abbildung 32: Messquerschnitte der geodätischen Vermessung [2], [15]

In Tabelle 6 sind die Messquerschnitte, jeweils mit einer Kurzbeschreibung ihrer Lage im Hang, zusammengefasst.

Tabelle 6: Messquerschnitte der geodätischen Vermessung

Bezeichnung	Beschreibung
MQ 1	Spritzbetonwand oben
MQ 3	Oberer Hangbereich, Nähe INK 9
MQ 5	Oberer mittlerer Hangbereich
MQ 6	Oberer linker Hangbereich
MQ 7	Oberer Hangbereich, Nähe Anriss
MQ 8	Stollenbereich
MQ 9	Spritzbetonwand oben, Portal
MQ 11	Spritzbetonwand mitte, Portal
MQ 12	Fußbereich, bewehrte Erde
MQ 13	Spritzbetonwand mitte
MQ 14	Spritzbetonwand unten

Die Auswertung der geodätischen Messungen wird in diesem Abschnitt auf zweifache Weise erfolgen:

Im ersten Schritt werden die geodätischen Messungen in den wesentlichen Messquerschnitten mit den Inklinometerergebnissen verglichen.

In einem zweiten Schritt werden die Verschiebungsvektoren aus der geodätischen Vermessung im Lageplan sowie in Schnitten entlang der wesentlichen Messquerschnitte dargestellt, um die Verschiebungscharakteristik auch bildhaft darzustellen.

Betrachtet werden die geodätischen Messungen im Zeitraum vom 28.01.2013 bis zum 18.12.2013. In diesem Zeitraum fanden auch die maßgebenden Bewegungen im Inklinometer INK 9 statt.

Alle Daten für die geodätische Messung im oben genannten Zeitraum wurden [21] entnommen.

3.3.1 Vergleich mit den Ergebnissen des Inklinometers INK 9

Im Folgenden werden die talwärts gerichteten Verschiebungen in den wesentlichen Messquerschnitten über die Zeit dargestellt und mit den Bewegungsvorgängen im Inklinometer INK 9 verglichen.

Es wird auf die Verschiebungen in den folgenden vier Bereichen eingegangen:

- An der Spritzbetonwand (Messquerschnitte MQ 1 und MQ 13)
- Im unmittelbaren Nahbereich des Inklinometers INK 9 (Messquerschnitt MQ 3)
- Im mittleren oberen Hangbereich (Messquerschnitte MQ 5 und MQ 6)
- In der Nähe des Anrisses im oberen Hangbereich (Messquerschnitt MQ 7)

Die Bezeichnungen der Bewegungsvorgänge, die im Abschnitt 3.2.4, Abbildung 30 eingeführt wurden, werden weiterhin verwendet.

Verschiebungen an der Spritzbetonwand

Für die Verschiebungen der Spritzbetonwand werden die Messquerschnitte MQ 1 und MQ 13 herangezogen. Da das Verschiebungsverhalten in den Messquerschnitten MQ 1 und MQ 13 annähernd gleich ist, werden lediglich die Ergebnisse des Messquerschnitts MQ 1 dargestellt. Die Messpunkte im Messquerschnitt MQ 1 sind in Abbildung 33 im Grundriss dargestellt. Die einzelnen Linien in Abbildung 34 stellen die gemessenen Verschiebungen in einzelnen Messpunkten des Messquerschnittes MQ 1 über die Zeit dar.

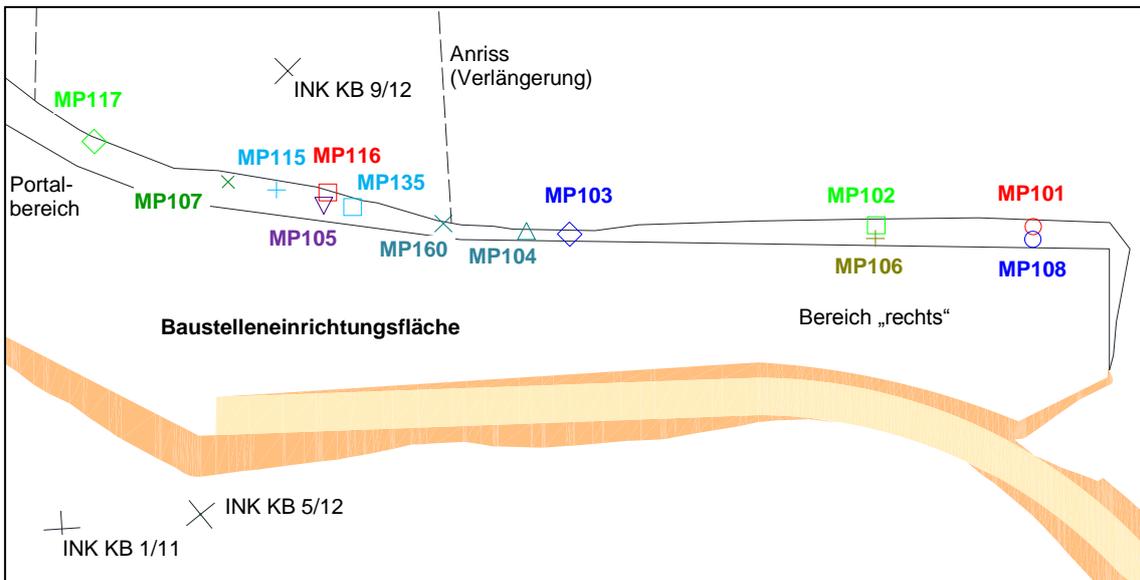


Abbildung 33: Messquerschnitt MQ 1 – Messpunkte, auf Basis von [2]

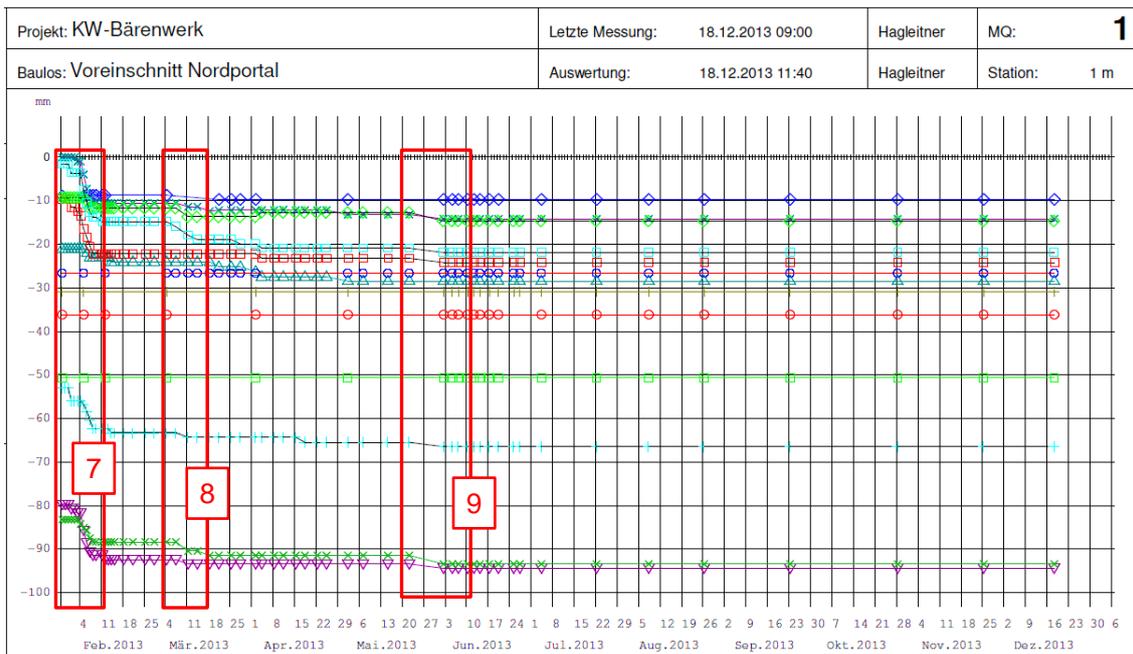


Abbildung 34: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 1 [21]

Der Vergleich zwischen den Verschiebungen im Inklinometer INK 9 und in den Messquerschnitten MQ 1 bzw. MQ 13 wird in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Vergleich Messquerschnitt MQ 1 und Inklinometer INK 9

Bewegungsvorgang*	Zeitraum	Bewegung im MQ 1/ MQ 13 erfasst
7	31.01.2013 – 12.02.2013	Ja
8	06.03.2013 – 14.03.2013	Ja
9	28.05.2013 – 05.06.2013	Ja
10	28.05.2013 – 05.06.2013	Nein
11	19.06.2013 – 16.07.2013	Nein
12	26.08.2013 – 06.09.2013	Nein
13	20.09.2013 – 04.10.2013	Nein

*siehe Abschnitt 3.2.4, Tabelle 5

Die Bewegungsvorgänge 7, 8, und 9 wurden neben dem Inklinometer INK 9 auch im Messquerschnitt MQ 1 und somit an der Spritzbetonwand beobachtet.

Der Bewegungsvorgang 10, der eine Verschiebung von ca. 65 mm in einer Tiefe von 9 m darstellt, wurde an der Spritzbetonwand nicht gemessen.

Es ist zu erkennen, dass die Verschiebungen der Spritzbetonwand im Nahbereich des Inklinometers INK 9 am größten sind. In den Messpunkten rechts der in Abbildung 33 eingezeichneten Verlängerung des Anrisses (MP 101, 108, 102, 106, 103, 104) wurden deutlich kleinere Verschiebungen gemessen. Dasselbe gilt für den Messpunkt MP 117, der sich im Portalbereich befindet.

Verschiebungen im unmittelbaren Nahbereich des Inklinometers INK 9

Die Verschiebungen an der Oberfläche im unmittelbaren Nahbereich des Inklinometers INK 9 werden im Messquerschnitt MQ 3 erfasst. In Abbildung 35 sind die Messpunkte im Messquerschnitt MQ 3 im Lageplan dargestellt. In Abbildung 36 sind die talwärts gerichteten Verschiebungen der einzelnen Messpunkte über die Zeit dargestellt.

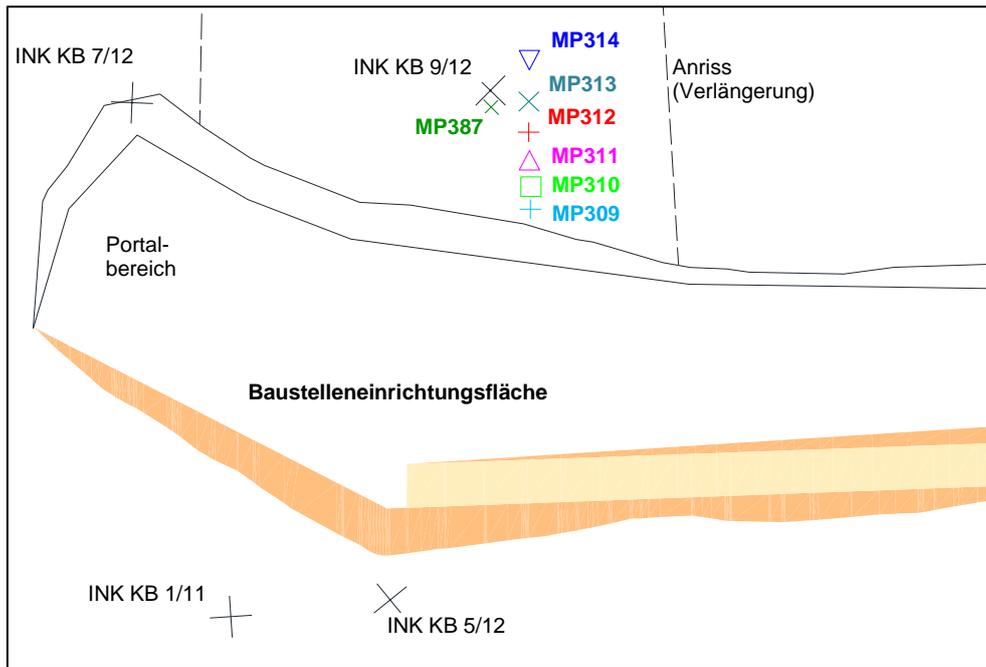


Abbildung 35: Messquerschnitt MQ 3 – Messpunkte, auf Basis von [2]

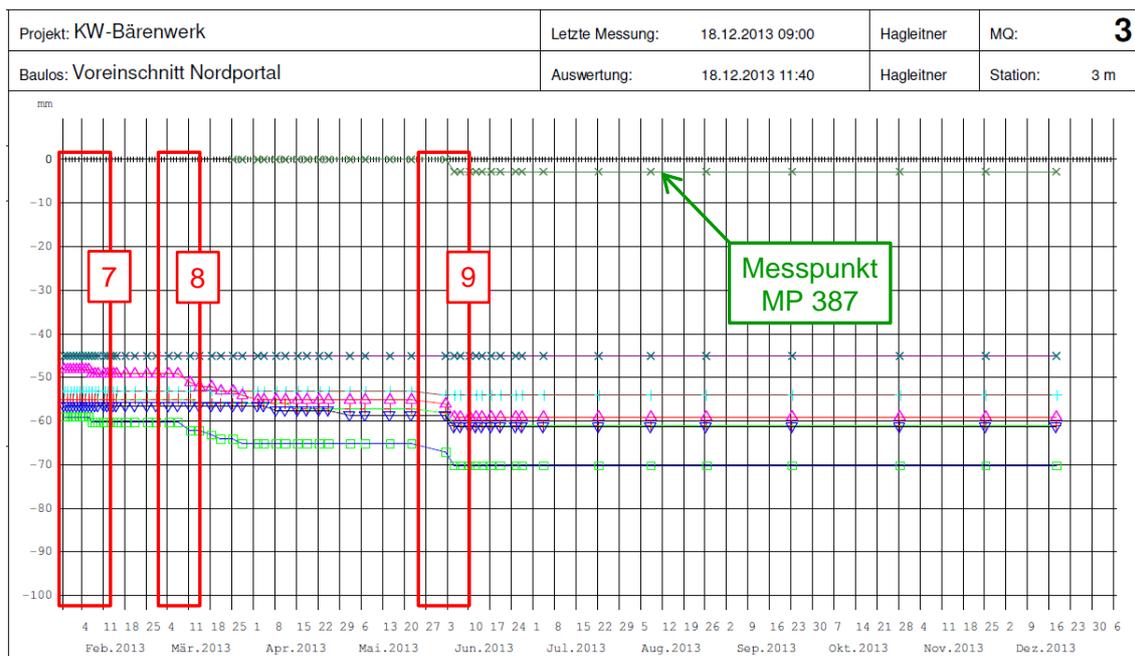


Abbildung 36: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 3 [21]

Der Vergleich zwischen den Verschiebungen im Inklinometer INK 9 und im Messquerschnitt MQ 3 wird in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Vergleich Messquerschnitt MQ 3 und Inklinometer INK 9

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Bewegung im MQ 3 erfasst
7	31.01.2013 – 12.02.2013	Ja
8	06.03.2013 – 14.03.2013	Ja
9	28.05.2013 – 05.06.2013	Ja
10	28.05.2013 – 05.06.2013	Nein
11	19.06.2013 – 16.07.2013	Nein
12	26.08.2013 – 06.09.2013	Nein
13	20.09.2013 – 04.10.2013	Nein

Im Messquerschnitt MQ 3 waren wiederum die ersten drei Bewegungsvorgänge im Inklinometer INK 9 erkennbar.

Im Fall des Bewegungsvorganges 7 muss angemerkt werden, dass die Größenordnung der Verschiebungen viel kleiner als jene im Inklinometer INK 9 ist. Sie ist auch kleiner als die Verschiebungen, die zum gleichen Zeitpunkt im Messquerschnitt MQ 1 gemessen wurden.

Die fehlenden Oberflächenverschiebungen, die dem Bewegungsvorgang 10 entsprechen würden, fallen hier nochmals auf. Dies ist ebenfalls für den Messpunkt MP 387 der Fall, welcher der Kopfverschiebung des Inklinometers INK 9 entspricht. Der Verschiebungsverlauf für diesen Messpunkt wurde in Abbildung 36 gekennzeichnet. Die Verschiebungen, die am Messpunkt M387 gemessen wurden, entsprechen größenordnungsmäßig nur jenen Verschiebungen, die aufgrund der Gleitfläche in 11 m Tiefe entstehen.

Auf diesen Umstand wird im Abschnitt 4.1.1 noch näher eingegangen.

Im Allgemeinen nehmen die Verschiebungen hangaufwärts ab. So weisen die Messpunkte MP 310 und 311 höhere Verschiebungen als die MP 312 und 314 auf.

Der Messpunkt MP 313 weist keine Verschiebung auf. Dieses Ergebnis ist in Frage zu stellen, da die Bewegungen im Inklinometer INK 9, die in den anderen unmittelbar benachbarten Messpunkten erfasst wurden, auch in diesem Messpunkt erfasst werden müssten.

Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich

Die Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich werden in den Messquerschnitten MQ 5 und MQ 6 erfasst. Da das Verschiebungsverhalten in beiden Messquerschnitten annähernd gleich ist, werden lediglich die Ergebnisse des Messquerschnitts MQ 5 dargestellt. In Abbildung 37 sind die Messpunkte im Lageplan dargestellt und die Verschiebungen der einzelnen Messpunkte über die Zeit sind Abbildung 38 zu entnehmen.

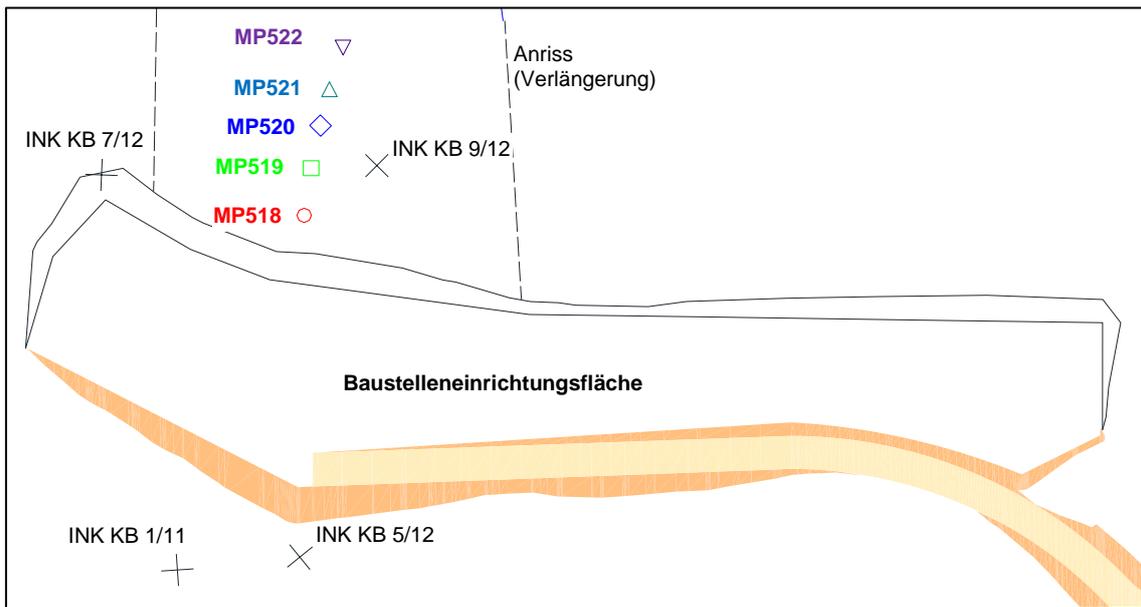


Abbildung 37: Messquerschnitt MQ 5 – Messpunkte, auf Basis von [2]

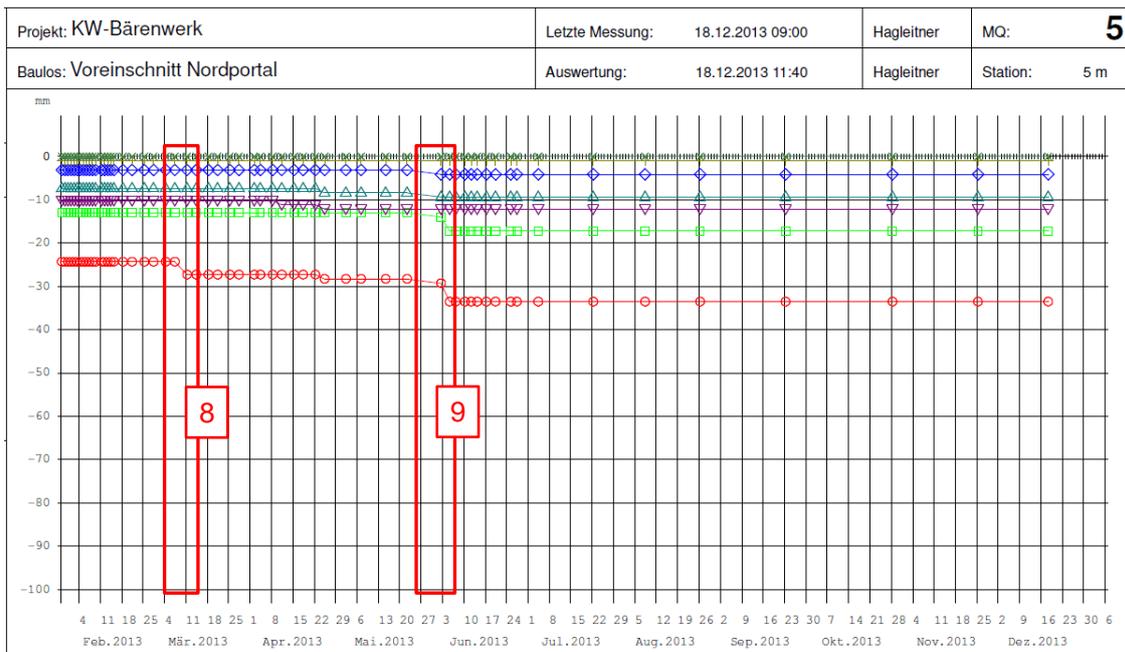


Abbildung 38: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 5 [21]

In den Messquerschnitten MQ 5 und MQ 6 werden die Bewegungsvorgänge 8 und 9 im März 2013 bzw. Anfang Juni 2013 eindeutig erfasst.

Der Vergleich zwischen Verschiebungen im Inklinometer INK 9 und im Messquerschnitt MQ 5 bzw. MQ 6 wird in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Vergleich Messquerschnitt MQ 5 und Inklinometer INK 9

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Bewegung im MQ 5 erfasst
7	31.01.2013 – 12.02.2013	Nein
8	06.03.2013 – 14.03.2013	Ja
9	28.05.2013 – 05.06.2013	Ja
10	28.05.2013 – 05.06.2013	Nein
11	19.06.2013 – 16.07.2013	Nein
12	26.08.2013 – 06.09.2013	Nein
13	20.09.2013 – 04.10.2013	Nein

Es sind, wie im Messquerschnitt MQ 3, hangaufwärts abnehmende Verschiebungen zu beobachten. Die Messpunkte MP 518 und 519 weisen größere Verschiebungen auf, während die obersten Messpunkten MP 520 bis 522 deutlich kleinere Verschiebungen aufweisen.

Die Verschiebungen im Messpunkt MP 518, die mit den Bewegungsvorgängen 8 und 9 im Inklinometer INK 9 zeitgleich stattfinden, stimmen auch größenordnungsmäßig mit diesen relativ gut überein.

Verschiebungen in der Nähe des Anrisses im oberen Hangbereich

Die Verschiebungen im oberen Hangbereich in der Nähe des beobachteten Anrisses werden im Messquerschnitt MQ 7 erfasst. In Abbildung 39 sind die Messpunkte im Lageplan und in Abbildung 40 die talwärts gerichteten Verschiebungen über die Zeit dargestellt.

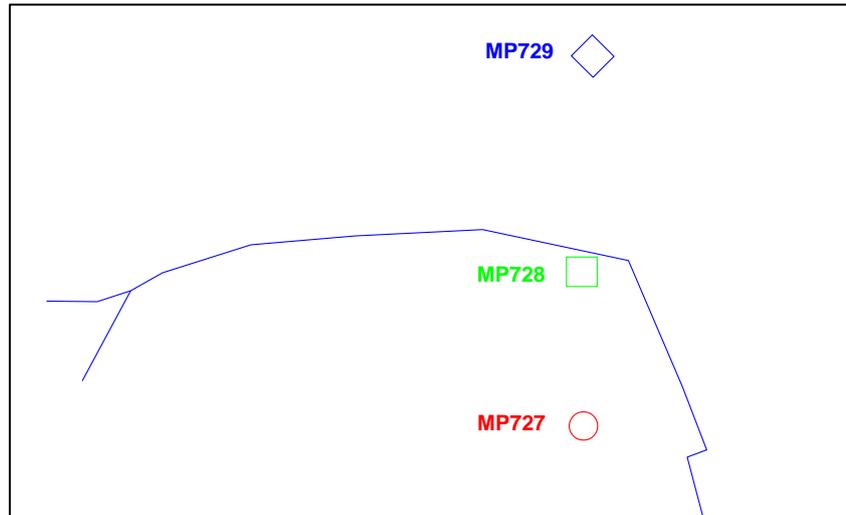


Abbildung 39: Messquerschnitt MQ 7 – Messpunkte, auf Basis von [2]

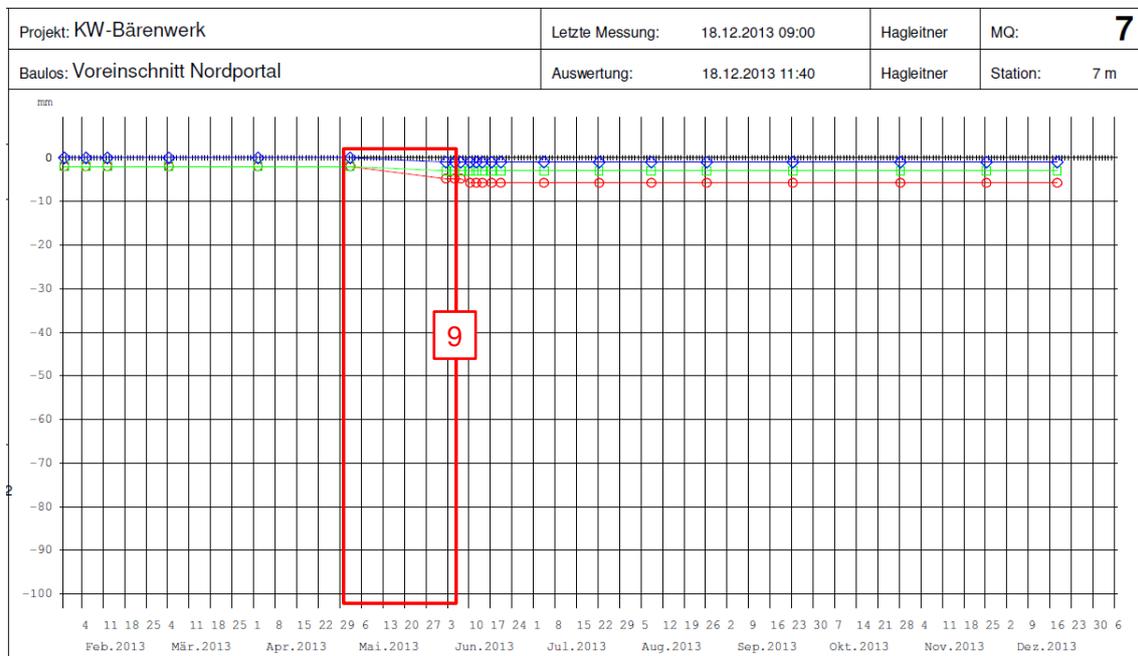


Abbildung 40: Talwärtsverschiebungen im Messquerschnitt MQ 7 [21]

Die Messergebnisse in diesem Messquerschnitt zeigen, dass lediglich der Bewegungsvorgang 9 im obersten Hangbereich beobachtet wurde.

Der Messpunkt MP 727, der sich innerhalb des angenommenen bewegten Körpers befindet, weist Verschiebungen auf, während die anderen zwei Messpunkte MP 728 und 729 nahezu keine Verschiebungen aufweisen.

Der Vergleich zwischen Verschiebungen im Inklinometer INK 9 und im Messquerschnitt MQ 7 wird in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Vergleich Messquerschnitt MQ 7 und Inklinometer INK 9

Bewegungsvorgang	Zeitraum	Bewegung im MQ 7 erfasst
7	31.01.2013 – 12.02.2013	Nein
8	06.03.2013 – 14.03.2013	Nein
9	28.05.2013 – 05.06.2013	Ja
10	28.05.2013 – 05.06.2013	Nein
11	19.06.2013 – 16.07.2013	Nein
12	26.08.2013 – 06.09.2013	Nein
13	20.09.2013 – 04.10.2013	Nein

3.3.2 Verschiebungscharakteristik

Um zu einer bildhaften Darstellung der Verschiebungen aus den geodätischen Messungen zu gelangen werden nun im Lageplan bzw. in ausgewählten Schnitten die Verschiebungsvektoren dargestellt.

Die nachfolgenden Darstellungen sollen einerseits eine Abgrenzung der bewegten Masse auch im Lageplan ermöglichen, andererseits wird in den Schnitten die Bewegungscharakteristik der im vorigen Abschnitt angeführten Bereiche (Messquerschnitte MQ 1 bzw. 13, MQ 3, MQ 5 bzw. 6, und MQ 7) veranschaulicht. Die Verschiebungsvektoren in den nachstehenden Abbildungen stellen stets die aufsummierten Verschiebungen im Zeitraum zwischen 28.01.2013 und 18.12.2013 dar.

Verschiebungen im Lageplan

In Abbildung 41 sind die talwärts gerichteten Verschiebungen im Lageplan dargestellt. Eine Konzentration der Bewegungen an der Spritzbetonwand im Bereich des angedeuteten Gleitkörpers ist deutlich zu erkennen. Links und rechts des zur Spritzbetonwand hin verlängerten Anrisses (im Portalbereich bzw. im Bereich „rechts“) sind deutlich reduzierte Bewegungen zu erkennen. Dasselbe gilt für die Bewegungen oberhalb des Anrisses, wodurch dieser als Begrenzung der bewegten Masse im Lageplan bestätigt wird.

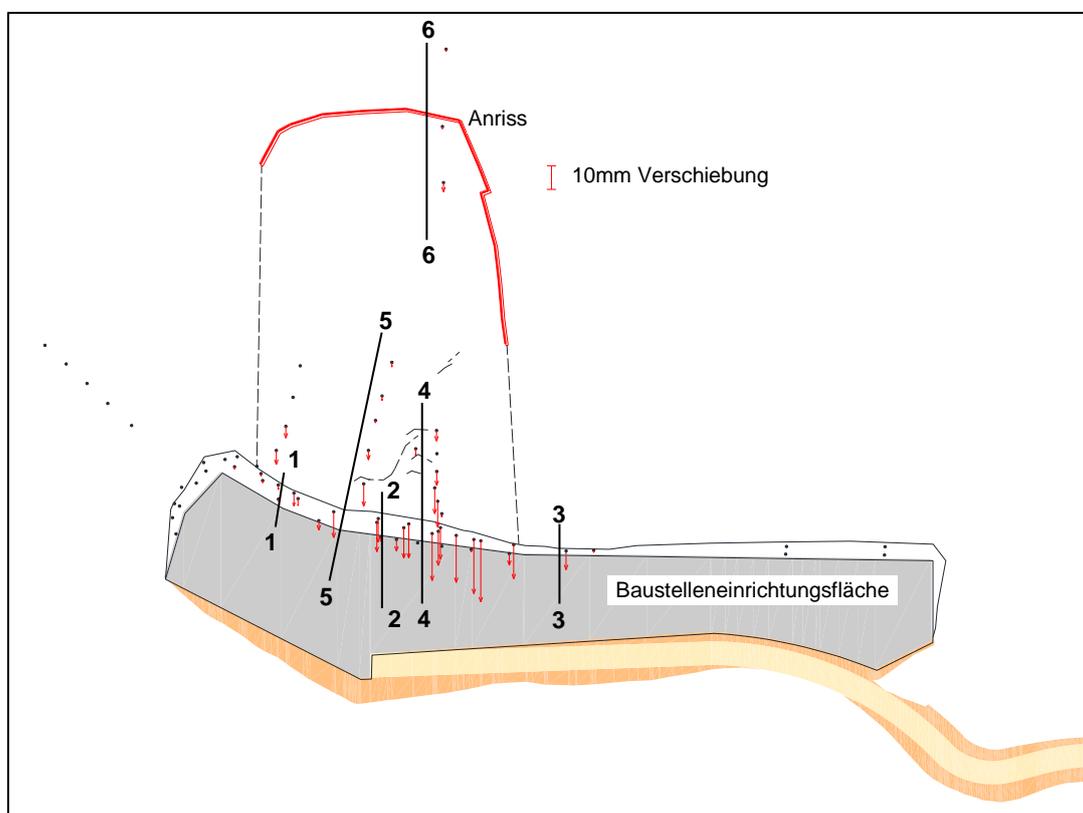


Abbildung 41: Talwärtsverschiebungen im Lageplan gemäß [2], [21]

Verschiebungen an der Spritzbetonwand

Die in Abbildung 41 gekennzeichneten Schnitte 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 und 5-5 werden zur weiteren Veranschaulichung der Verschiebungen im Bereich der Spritzbetonwand herangezogen. Die Schnitte 1-1, 2-2 und 3-3 sind in Abbildungen 42 bis 44 dargestellt.

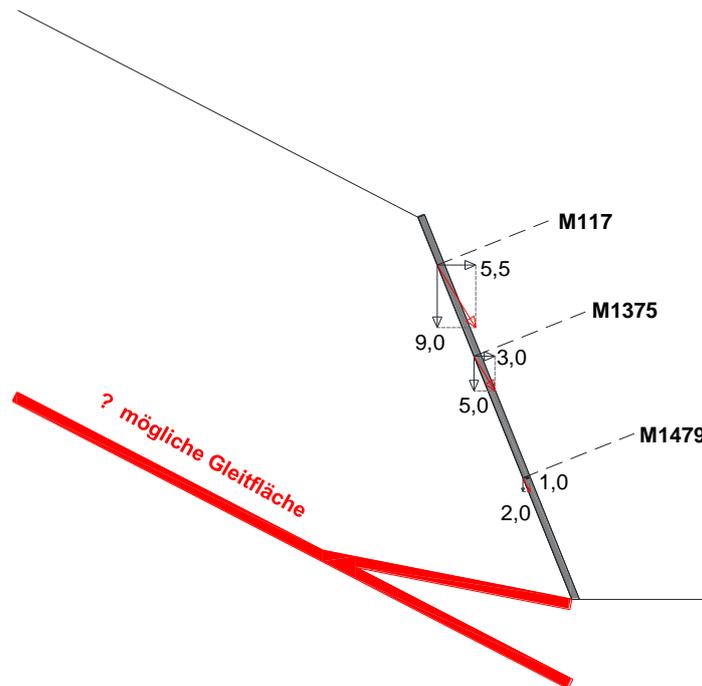


Abbildung 42: Schnitt 1-1 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand

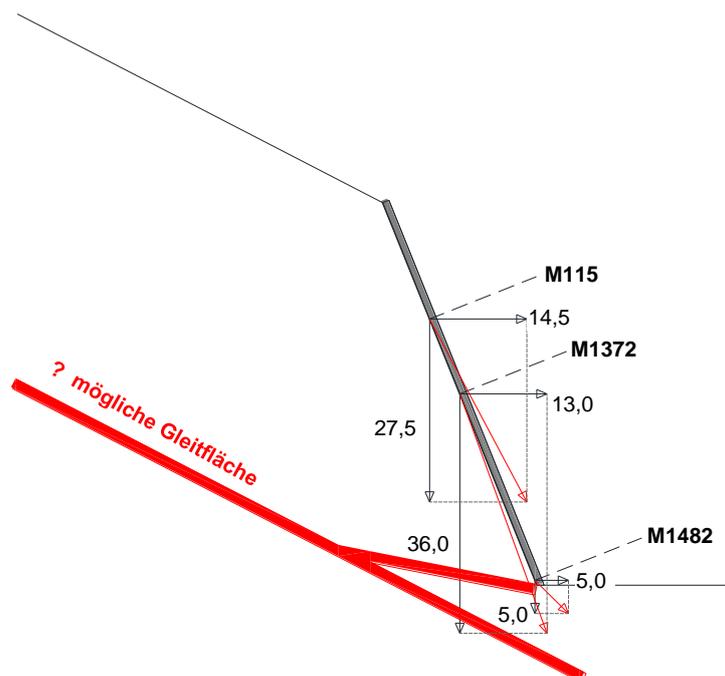


Abbildung 43: Schnitt 2-2 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand

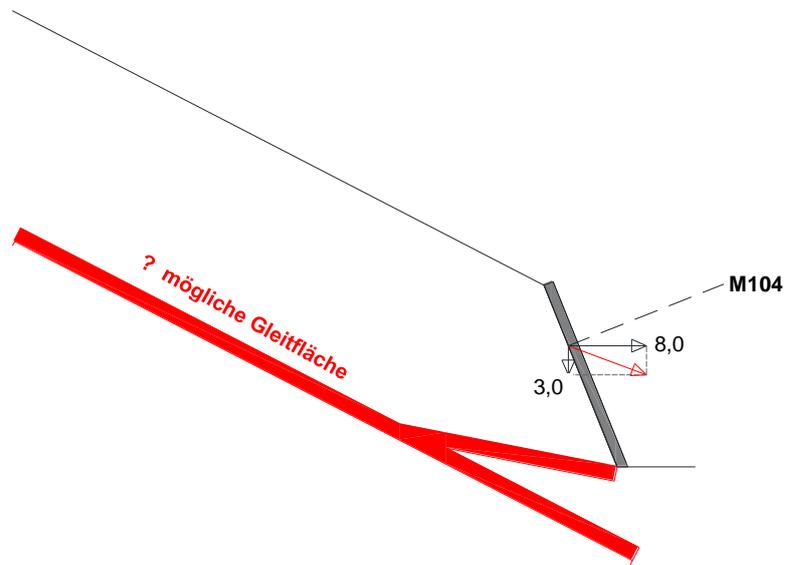


Abbildung 44: Schnitt 3-3 mit Verschiebungen an der Spritzbetonwand

Wie in Abbildung 41 schon zu erkennen war, finden die größeren Bewegungen im mittleren Bereich der Spritzbetonwand (Schnitt 2-2), unmittelbar unterhalb des Inclinometers INK 9, statt. Es ist im Schnitt 2-2 ebenfalls zu erkennen, dass im Bereich der Spritzbetonwand die (vertikalen) Setzungen wesentlich größer als die talwärts gerichteten (horizontalen) Verschiebungen sind.

Im Portalbereich (Schnitt 1-1) und im Bereich rechts des Anrisses (Schnitt 3-3) ist gegenüber dem mittleren Bereich eine Reduktion der Setzungen, sowie der Querverschiebungen zu beobachten.

Verschiebungen im unmittelbaren Nahbereich des Inklinometers INK 9

Die Verschiebungen im Nahbereich des Inklinometers INK 9 werden im Schnitt 4-4, dessen Schnittführung dem Messquerschnitt MQ 3 entspricht, dargestellt. Der Schnitt ist in Abbildung 45 dargestellt.

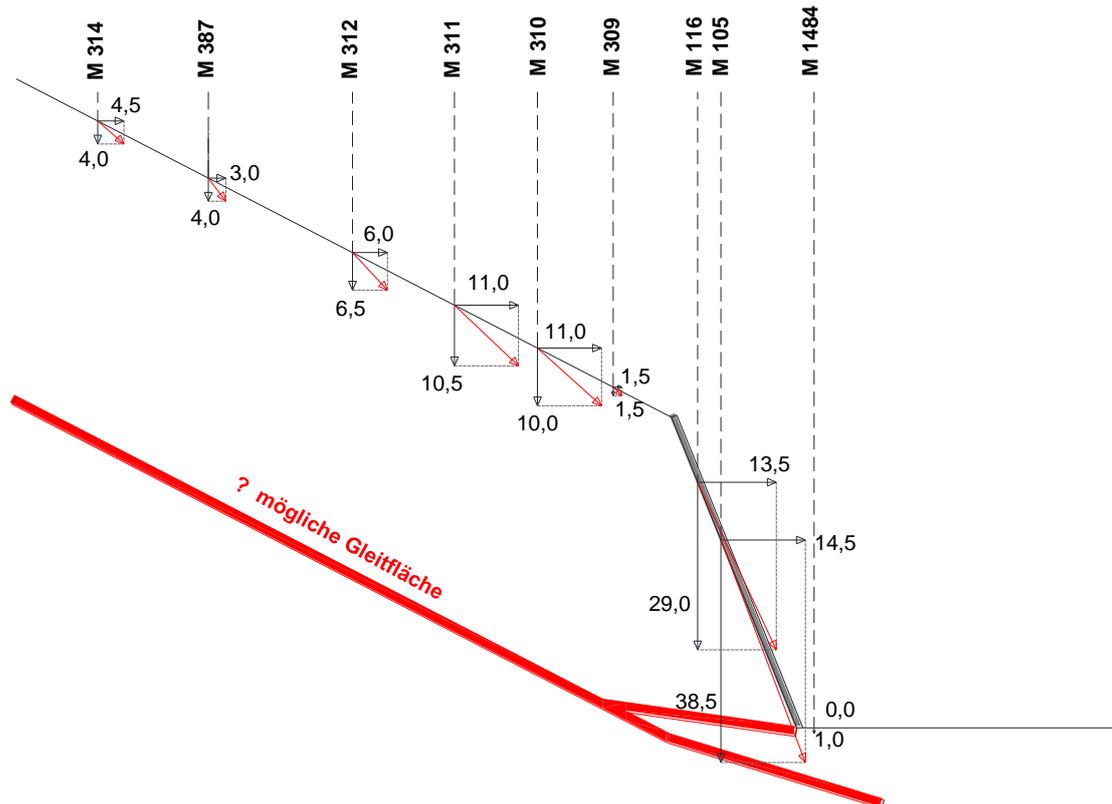


Abbildung 45: Schnitt 4-4 Verschiebungen im Nahbereich des Inklinometers INK 9

Aus der obigen Darstellung ist die Konzentration der größten Bewegungen an der Spritzbetonwand gut ersichtlich.

Nach oben hin verkleinert sich einerseits das Verhältnis zwischen Setzung und Querverschiebung, andererseits wird die Größe der gemessenen Verschiebungen ebenfalls kleiner.

Der Messpunkt M387 entspricht der Lage des Inklinometers INK 9. Wie beim Vergleich der Verschiebungen mit den Ergebnissen des Inklinometers INK 9 schon erwähnt, ist hier wieder hervorzuheben, dass keine Verschiebungen mit einer Größenordnung von 65 mm (beim Bewegungsvorgang 10) gemessen wurden.

Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich

Die Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich werden im Schnitt 5-5, dessen Schnittführung dem Messquerschnitt MQ 5 entspricht, dargestellt. Der Schnitt ist Abbildung 46 zu entnehmen.

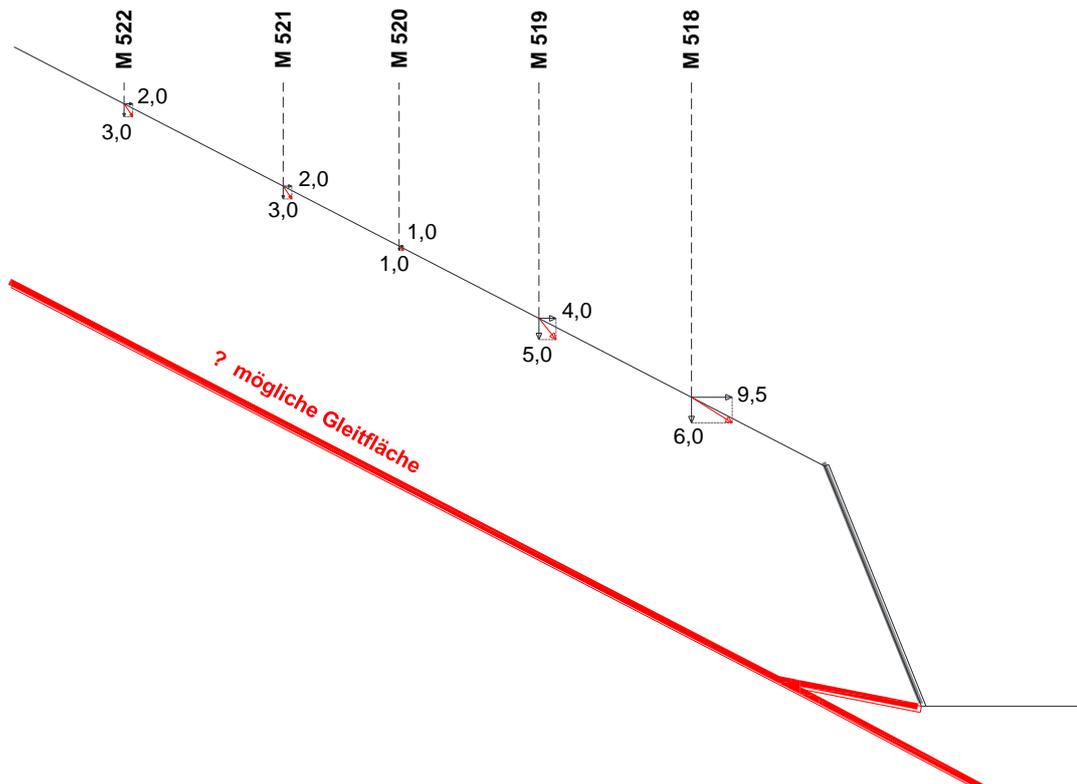


Abbildung 46: Schnitt 5-5 mit Verschiebungen im mittleren oberen Hangbereich

In Abbildung 46 sind ebenfalls nach oben hin abnehmende Verschiebungen im mittleren Hangbereich zu erkennen.

Im wandnahen Messpunkt M518 sind die gemessenen Querverschiebungen, im Gegensatz zu lagenmäßig vergleichbaren Messpunkten in den vorigen Schnitten, größer als die Setzungen. Die resultierende Verschiebung in diesem Messpunkt schließt einen Winkel von ca. 32° mit der Horizontalen ein. Somit ist diese resultierende Verschiebung annähernd parallel zur Geländeoberfläche (mit einer mittleren Neigung von ca. $27,5^\circ$ [6]).

Verschiebungen in der Nähe des Anrisses im oberen Hangbereich

Abschließend werden die Verschiebungen im oberen Hangbereich im Schnitt 6-6, dessen Schnittführung dem Messquerschnitt MQ 7 entspricht, dargestellt. Der Schnitt ist Abbildung 47 zu entnehmen.

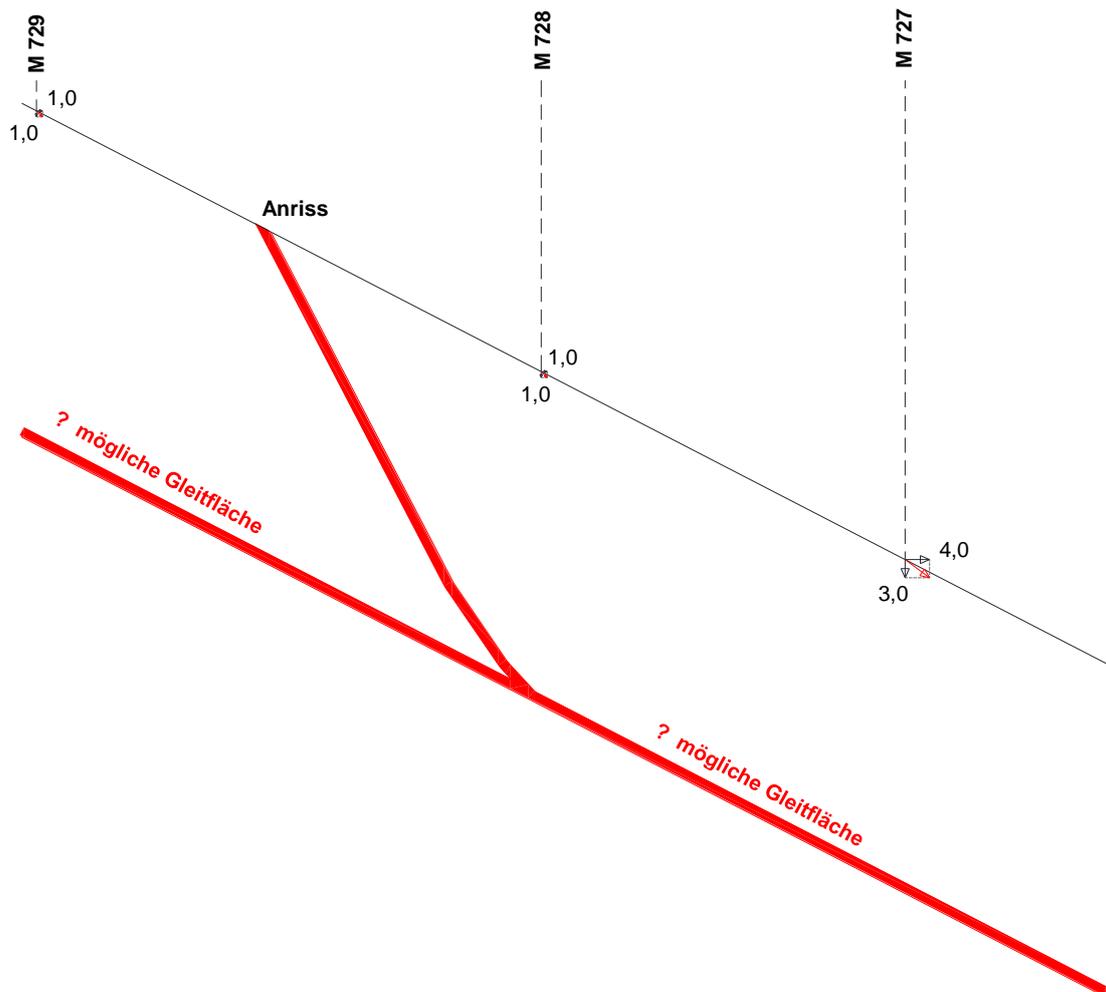


Abbildung 47: Schnitt 6-6 mit Verschiebungen in der Nähe des Anrisses

Die Ergebnisse in diesem Schnitt bestätigen den angenommenen Anriss, da merkbare Verschiebungen erst unterhalb des Anrisses, im Messpunkt M727, beginnen.

Im Messpunkt M727 wurden wiederum höhere Querverschiebungen als Setzungen gemessen. Die resultierende Verschiebung in diesem Messpunkt schließt einen Winkel von ca. 36° mit der Horizontalen ein, im Vergleich zur mittleren Hangneigung von 27,5°.

3.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wesentlichsten Aussagen der geodätischen Vermessung werden im Folgenden noch einmal zusammengefasst.

Vergleich mit den Verschiebungen im Inklinometer INK 9

Die Bewegungsvorgänge am Anfang Februar 2013, im März 2013, sowie am Anfang Juni 2013 im Inklinometer INK 9 wurden durch die geodätischen Messungen ebenfalls aufgezeichnet. Dies gilt jedoch nur für die Verschiebungen auf der unteren Gleitfläche im Inklinometer INK 9; die Verschiebung auf der oberen Gleitfläche (Bewegungsvorgang 10) wurde von der geodätischen Messung nicht bestätigt.

Die Bewegungsvorgänge 12 und 13 im August bzw. September 2013 wurden im Laufe der geodätischen Messungen ebenfalls nicht erfasst.

Verschiebungscharakteristik

Die gemessenen Verschiebungen nehmen links bzw. rechts vom angenommenen Anriss (also außerhalb des vermuteten Bewegungskörpers) stark ab. Die Verschiebungen konzentrieren sich vorwiegend im mittleren Hangbereich, am stärksten im Bereich der Spritzbetonwand.

Ausgehend von der Spritzbetonwand nimmt die Größenordnung der Verschiebungen hangaufwärts ab.

Das Gleiche gilt für das Verhältnis von Setzung zu Querverschiebung, das im Nahbereich der Spritzbetonwand am größten ist.

3.4 Niederschlagsmessungen

Niederschlag kann bekanntlich einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten bewegter Hänge haben, und stellt in vielen Fällen den auslösenden Faktor für erhöhte Bewegungsraten dar [22].

Darum bildet die Niederschlagsmessung eine wesentliche Grundlage für die Interpretation von Verschiebungsmessdaten. Durch die quantitative Erfassung des Niederschlages kann ein eventuell bestehender Zusammenhang mit den gemessenen Hangbewegungen erkannt werden.

Im vorliegenden Fall wurden die Niederschlagsdaten einer Messstelle beim Kraftwerk Bärenwerk zur Verfügung gestellt, entsprechend [23]. Die Daten umfassen die Tagesniederschläge, gemessen in Millimetern, vom 01.01.2012 bis zum 22.01.2014. Die Tagesniederschläge (blau) sowie die daraus gebildete Summenlinie (rot) sind in Abbildung 48 über den relevanten Zeitraum dargestellt.

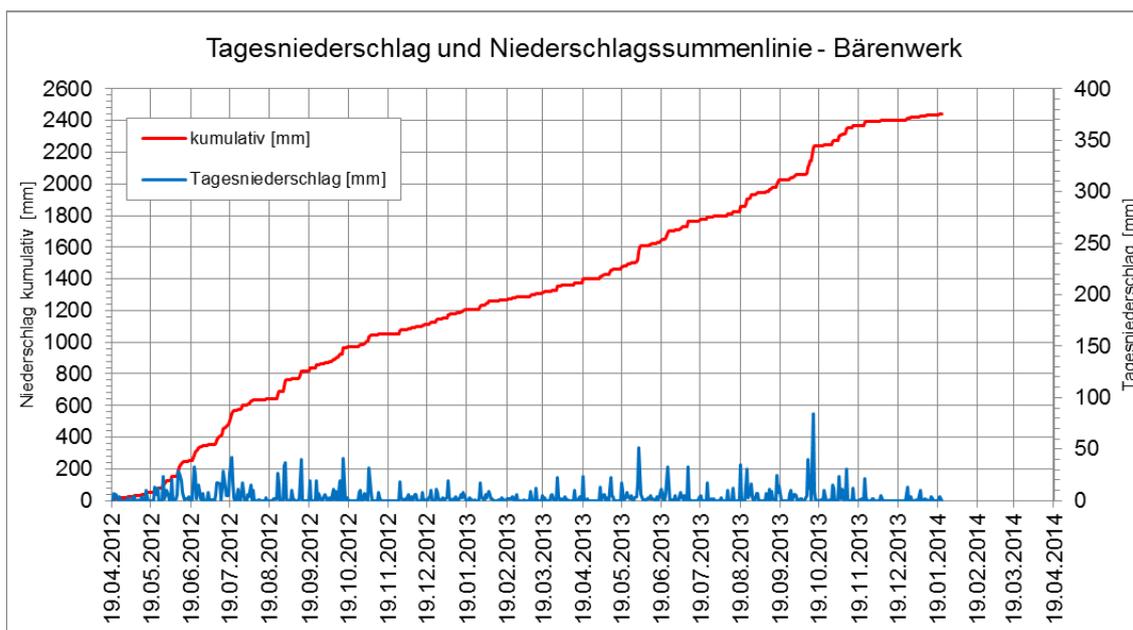


Abbildung 48: Tagesniederschlag und Niederschlagssummenlinie Bärenwerk

Der Mittelwert der Tagesniederschläge TN_{mittel} im Gesamtzeitraum vom 01.01.2012 bis 22.01.2014 beträgt ca. 6,0 mm.

Um einen Vergleich zwischen den Niederschlagsdaten und allen Bewegungsvorgängen zu ermöglichen, mussten die wesentlichen Niederschlagsereignisse im Zeitraum ab dem 01.07.2012 erfasst werden.

Zu diesem Zweck wurde in einem ersten Ansatz, auf Basis des berechneten Mittelwertes der Tagesniederschläge TN_{mittel} , ein Kriterium für wesentliche Niederschlagsereignisse eingeführt. Hierbei wurden alle Niederschlagsereignisse mit einem Tagesniederschlag $TN \geq 4 \cdot TN_{\text{mittel}} = 24 \text{ mm}$ als wesentliche Niederschlagsereignisse definiert.

In Tabelle 11 sind die für die Gegenüberstellung mit den Bewegungsvorgängen herangezogenen wesentlichen Niederschlagsereignisse zusammengefasst.

Tabelle 11: Wesentliche Niederschlagsereignisse

Niederschlagsereignis	Datum	Tagesniederschlag [mm]
1	14.07.2012	28,4
2	19.07.2012	26,1
3	20.07.2012	41,5
4	25.08.2012	27,0
5	30.08.2012	33,6
6	31.08.2012	36,8
7	12.09.2012	40,0
8	15.10.2012	41,3
9	04.11.2012	31,6
10	19.04.2013	23,8
11	01.06.2013	51,0
12	02.06.2013	26,7
13	23.06.2013	32,6
14	09.07.2013	32,6
15	19.08.2013	34,5
16	24.08.2013	30,9
17	16.09.2013	24,9
18	10.10.2013	39,8
19	12.10.2013	24,4
20	14.10.2013	84,6
21	09.11.2013	30,4

3.5 Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung

Mithilfe der Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung werden Hinweise auf die Grundwasserverhältnisse im Hang gegeben.

Mit den aus diesen Messungen gewonnenen Informationen kann einerseits die eventuelle Reaktion des Grundwassers auf Niederschlagsereignisse, andererseits der gegebenenfalls vorhandene Zusammenhang zwischen Änderungen der Grundwasserverhältnisse und Bewegungen, untersucht werden.

Die Auswertung der Grundwasserdaten erfolgt auf Basis von [16].

3.5.1 Grundwassermessstelle KB 10/12

Im vorliegenden Hang wurde eine Grundwassermessstelle, die Kernbohrung KB 10/12, eingerichtet. Die Grundwassermessung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

- Ein Grundwasserpegel zur Beobachtung des freien Grundwasserspiegels
- Ein Porenwasserdruckgeber in einer Tiefe von 11,0 m u.GOK

Die Lage der Kernbohrung wurde in Abbildung 4 dargestellt.

Da sich diese Grundwassermessstelle im Hangbereich oberhalb der Baustelleneinrichtungsfläche befindet, gelten ihre Messergebnisse nur für den oberen Hangbereich. Im Hangbereich unterhalb der Baustelleneinrichtungsfläche wurden keine Grundwassermessungen durchgeführt.

Der Ausbau der Kernbohrung KB 10/12 wird in Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 12: Ausbau der Kernbohrung KB 10/12

Tiefe [m.u.GOK]	Ausbau
0,0 – 2,8	Tonabdichtung
2,8 – 3,0	Sandpolster
3,0 – 6,0	Filterkies 2/3 mm

*Ausbau nur bis 6,0 m angeführt in [16]

Das Bodenprofil im Bereich der Kernbohrung KB 10/12 wurde gleich angenommen als in der benachbarten Kernbohrung INK KB 9/12. Die Unterkante des Hanglehms, der im Bohrprofil als gering wasserdurchlässig bis wasserdurchlässig beschrieben wurde, befindet sich in einer Tiefe von 5,4 m u.GOK. In dieser Tiefe findet der Übergang zur umgelagerten Moräne, die im Bohrprofil als gering wasserdurchlässig bis wasserundurchlässig beschrieben wurde, statt.

Aufgrund des Ausbaues handelt es sich im Bereich von 0,0 bis 6,0 m u.GOK um eine Messung des freien Grundwasserspiegels.

Der Porenwasserdruckgeber wurde in einer Tiefe von 11,0 m u.GOK angeordnet, und liefert als Ergebnis den Porenwasserdruck in dieser Tiefe. Diese Tiefe entspricht auch der Lage der Gleitfläche, wie es im Inklinometer INK 9 zu erkennen ist.

3.5.2 Ergebnisse der Grundwassermessung

Es liegen Messergebnisse für den Porenwasserdruckgeber vom 06.01.2013 bis 25.07.2013, für den Grundwasserpegel vom 10.01.2013 bis 21.01.2014 vor.

Die Ergebnisse der Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung sind in Abbildung 49 über die Zeit aufgetragen. Die wesentlichen Anstiege des Porenwasserdrucks bzw. Grundwasserspiegels wurden durchnummeriert und sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

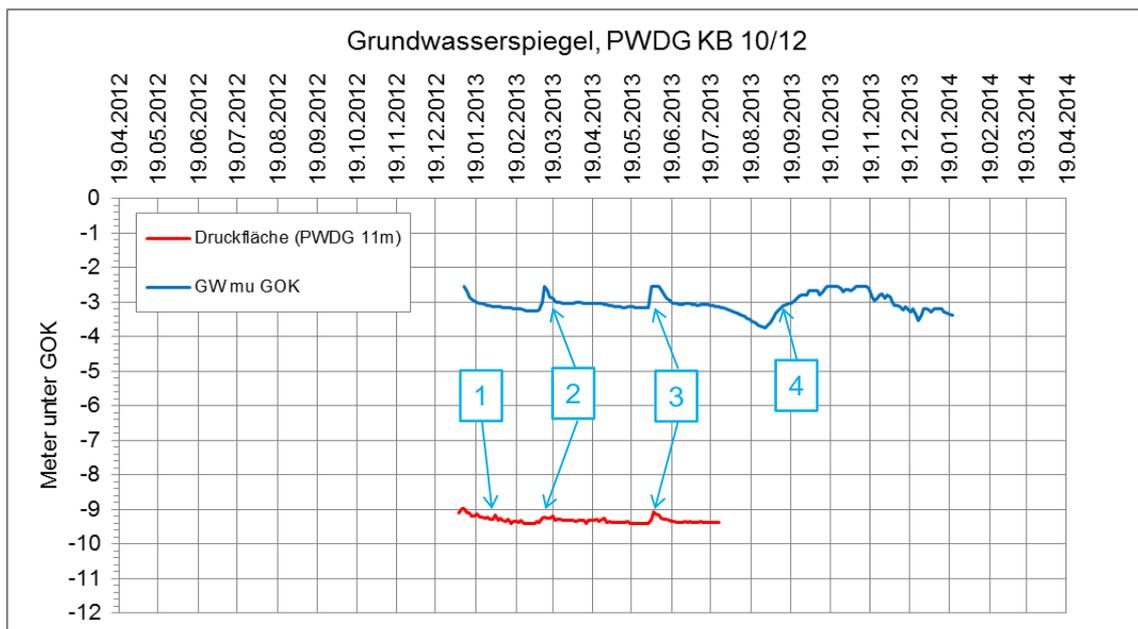


Abbildung 49: Grundwasser- und Porenwasserdruckmessung KB 10/12, entsprechend [16]

Tabelle 13: Anstiege des Grundwasserspiegels bzw. Porenwasserdruckes

Bez.	Zeitraum	Anstieg GW [m]	Anstieg Porenwasserdruck [m]
1	01.02.2013 – 03.02.2013	-	0,13
2	07.03.2013 – 13.03.2013	0,71	0,15
3	01.06.2013 – 05.06.2013	0,61	0,34
4	30.08.2013 – 08.11.2013	1,20	Keine Daten

Die Messungen zeigen die Lage des freien Grundwasserspiegels im Hanglehm, welche zwischen ca. 2,54 bis 3,74 m u.GOK schwankt. Die Druckhöhe in der Tiefe von 11,0 m u.GOK schwankt zwischen ca. 8,98 und 9,40 m u.GOK.

Da die Druckhöhe in der Tiefe von 11,0 m u.GOK kleiner ist als die Druckhöhe des gemessenen Grundwasserspiegels, kann es sich nicht um einen Grundwasserkörper handeln, der bis in die Tiefe von 11,0 m u.GOK reicht.

Aus diesem Grund wird hier die Annahme getroffen, dass der gemessene freie Grundwasserspiegel nur bis zur Unterkante des Hanglehms in der Tiefe von 5,4 m u.GOK wirkt, bei der ein Übergang in das undurchlässige Material stattfindet.

In der Tiefe von 11,0 m u.GOK dürfte es sich um leicht gespanntes Grundwasser handeln.

In Abbildung 50 ist die Grundwassersituation im Bereich der Kernbohrung KB 10/12 bildhaft dargestellt.

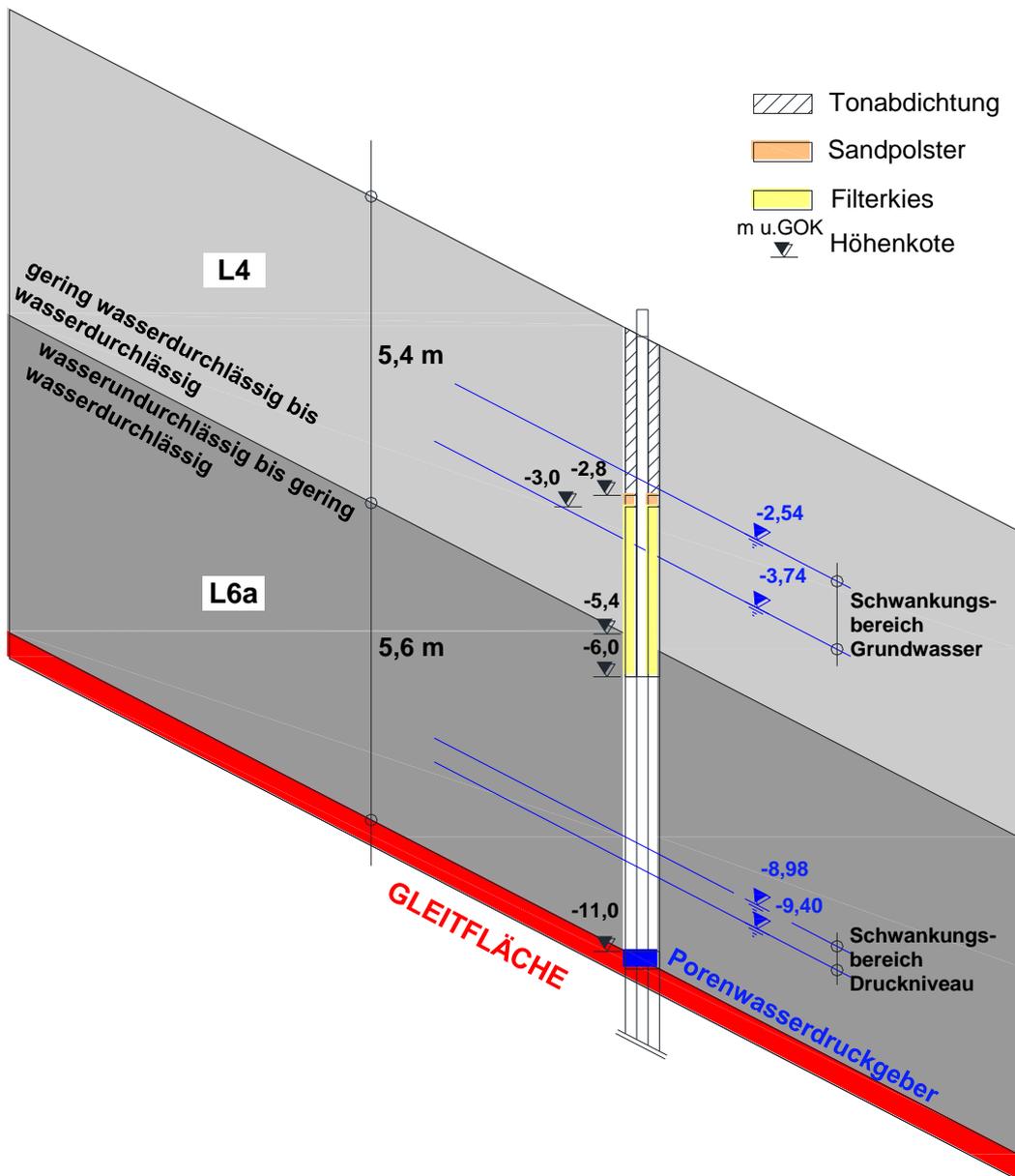


Abbildung 50: Grundwasserverhältnisse im Bereich der Kernbohrung KB 10/12

3.6 Ankerkraftmessung

Der letzte Teil dieses Abschnittes über die Auswertung der Messdaten bildet die Auswertung der Ankerkraftmessungen.

Mit der Ankerkraftmessung ist eine Möglichkeit gegeben, die Reaktion des eingebauten Sicherungssystems auf die Bewegungsvorgänge zu quantifizieren.

In weiterer Folge können die gemessenen Ankerkräfte für Kalibrierungszwecke herangezogen werden.

Im konkreten Fall wird zwischen den permanenten Litzenankern zur Sicherung des Einschnittes und den temporären Litzenankern am Fuß der Bewehrte-Erde-Konstruktion unterschieden.

3.6.1 Permanente Litzenanker zur Sicherung des Einschnittes

Die permanenten Litzenanker am Einschnitt wurden in 11 Ankerblöcken mit jeweils zwei Ankern angeordnet. In der Mitte jedes Ankerblockes wurde eine Öffnung für den Einbau eines dritten Ankers vorgesehen [24]. Die wesentlichen Daten der permanenten Litzenanker sind in Tabelle 14 zusammengefasst [5], [24], [25].

Tabelle 14: Permanente Litzenanker zur Sicherung des Einschnittes

Spannstahl		St 1570 / 1770	
Litzen		7 Ø 15,3 mm	
Vorspannkraft	A	600,0	[kN]
Ankerlänge	L_a	30,0	[m]
Verpressstreckenlänge	L_{vp}	10,0	[m]
Freie Stahllänge	L_f	20,0	[m]
Ankerabstand	e	3,00	[m]
Ankerneigung	α	25,0	[°]

Die Ankerblöcke sind in Abbildung 51 zu sehen und ihre Anordnung im Lageplan ist Abbildung 52 zu entnehmen.

Es wurden die Ankerkräfte in den Ankerblöcken 2, 6 und 9, sowohl in der oberen als auch in der unteren Ankerebene, gemessen [26]. Die gemessenen Ankerblöcke sind in Abbildung 52 in Rot dargestellt.



Abbildung 51: Ankerblöcke 1 bis 11 [18]

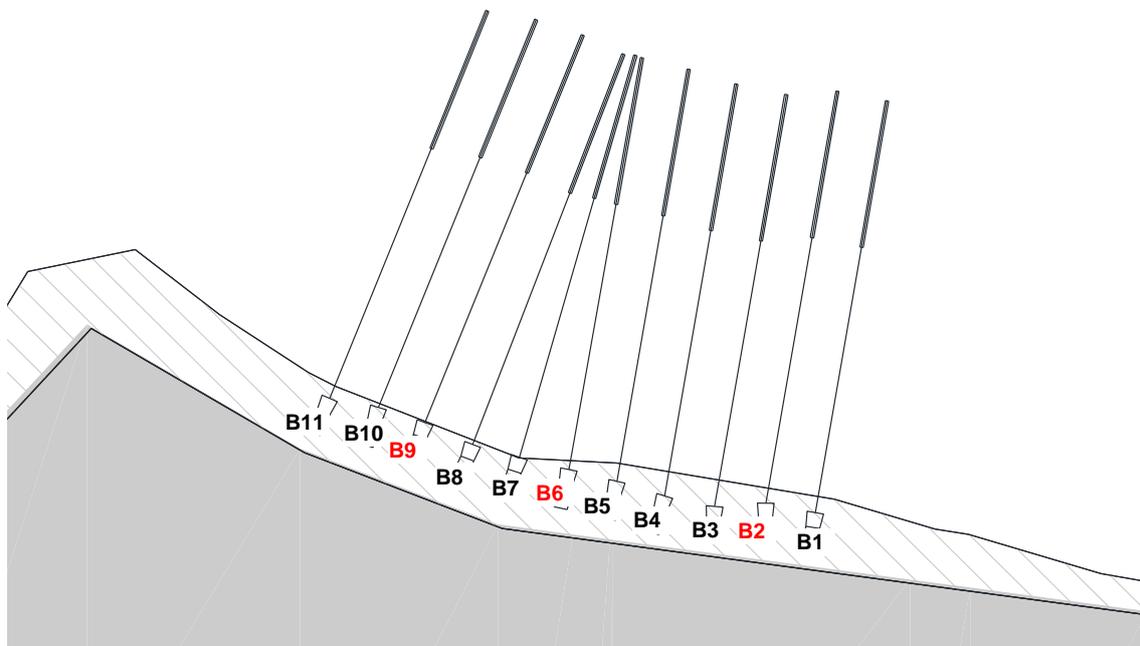


Abbildung 52: Ankerblöcke 1 bis 11 im Lageplan [2]

Die Ankerorientierungen im Grundriss wurden möglichst normal zur Spritzbetonwand angenommen.

Die gemessenen Ankerkräfte in der oberen Ankerebene sind in Abbildung 53, die Ankerkräfte in der unteren Ankerebene in Abbildung 54, über die Zeit aufgetragen.

Die Temperatur kann die abgelesene Ankerkraft am Gerät erheblich beeinflussen. Höhere Temperaturen führen im Allgemeinen zu einer höheren Ankerkraft am Anzeigergerät. Aus diesem Grund wird die Temperatur gemeinsam mit den Ankerkräften dargestellt.

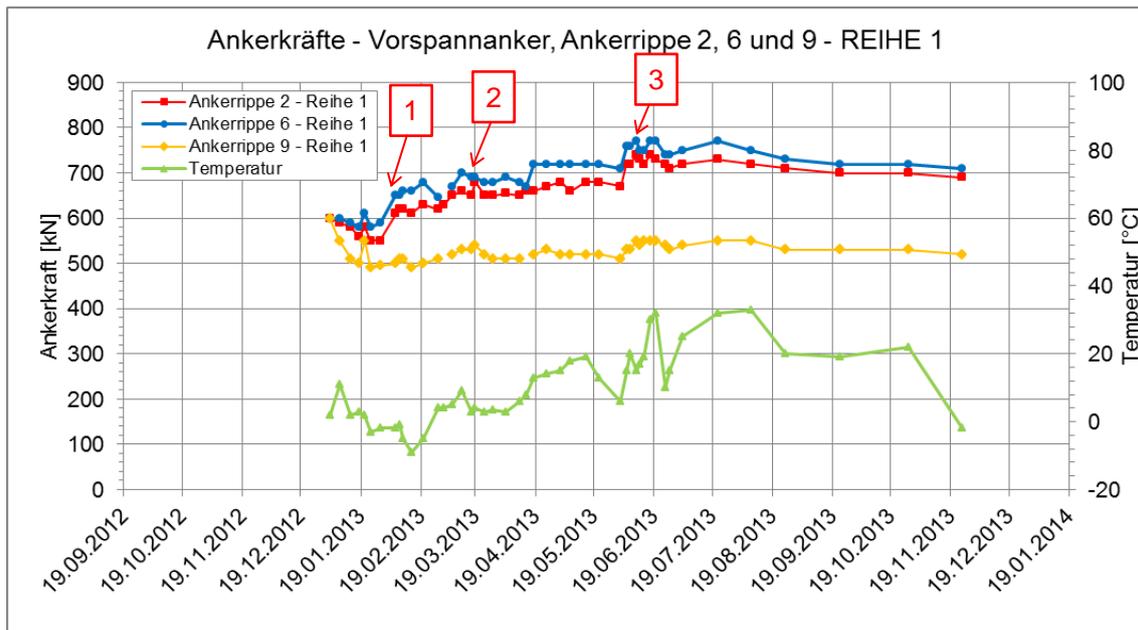


Abbildung 53: Ankerkräfte in der oberen Ankerebene, entsprechend [26]

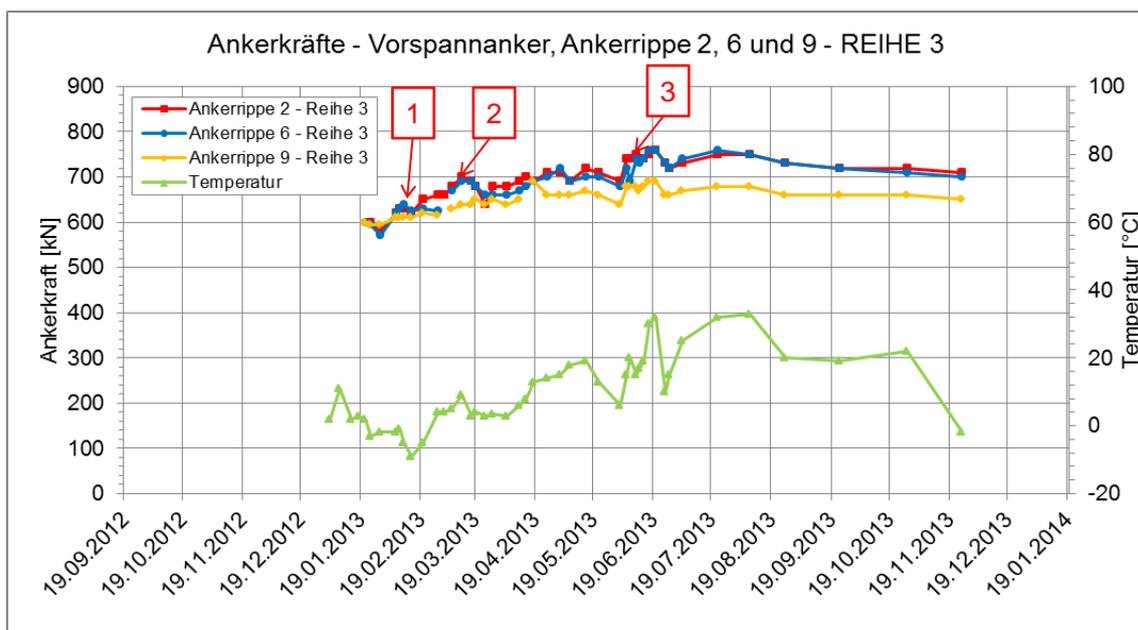


Abbildung 54: Ankerkräfte in der unteren Ankerebene, entsprechend [26]

Es sind drei wesentliche Anstiege der Ankerkräfte zu erkennen, die zu einer deutlichen und dauerhaften Erhöhung der Ankerkräfte geführt haben. Sie sind in den obigen Abbildungen gekennzeichnet und in den Tabellen 15 und 16 zusammengefasst.

Tabelle 15: Ankerkraftanstiege, obere Ankerreihe

Bez.	Zeitraum	Ankerkraftanstiege [kN]		
		Block 2	Block 6	Block 9
1	29.01.2013 – 10.02.2013	70	70	15
2	03.03.2013 – 12.03.2013	30	55	20
3	02.06.2013 – 10.06.2013	70	60	40
	Gesamt	170	185	75

Tabelle 16: Ankerkraftanstiege, untere Ankerreihe

Bez.	Zeitraum	Ankerkraftanstiege [kN]		
		Block 2	Block 6	Block 9
1	29.01.2013 – 10.02.2013	50	70	15
2	03.03.2013 – 12.03.2013	40	65	25
3	02.06.2013 – 10.06.2013	60	60	40
	Gesamt	150	195	80

Aus den Tabellenwerten ist ersichtlich, dass Messungen bei den Ankerblöcken 2 und 6 die höchsten Ankerkraftanstiege zeigen. Die Ankerkräfte und die Ankerkraftanstiege im Ankerblock 9 sind kleiner als in den anderen beobachteten Ankerblöcken.

Ein gewisser Einfluss der Temperatur auf die abgelesenen Ankerkräfte zeigt sich bei den Ankerkraftverläufen. Die Ankerkraftanstiege fallen teilweise mit Spitzen im Temperaturverlauf zusammen. Für eine weitere Interpretation ist daher zu berücksichtigen, dass die abgelesenen Ankerkräfte durch den Einfluss der Temperatur verfälscht sein können.

3.6.2 Temporäre Litzenanker am Fuß der Bewehrte-Erde-Konstruktion

Unterhalb der Baustelleneinrichtungsfläche wurden zur Sicherung des Bewehrten-Erde-Dammes 50 Litzenanker eingebaut. Im Gegensatz zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen Litzenankern sind diese nur für den temporären Einsatz vorgesehen.

Die Daten dieser Litzenanker sind in Tabelle 17 zusammengefasst [27], [28].

Tabelle 17: Temporäre Litzenanker am Fuß der bewehrten Erde

Spannstahl		St 1670 / 1860	
Litzen		6 Ø 15,7 mm	
Vorspannkraft	A	400,0	[kN]
Ankerlänge	L_a	26,0 bzw. 31,0	[m]
Verpressstreckenlänge	L_{vp}	12,0	[m]
Freie Stahllänge (mit 1 m Überstand)	L_f	13,0 bzw. 18,0	[m]
Ankerabstand	e	variabel	[m]
Ankerneigung	α	30,0	[°]

Es wurden Ankerkraftmessungen an sieben ausgewählten Litzenankern durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 55 in Abhängigkeit der Zeit dargestellt.

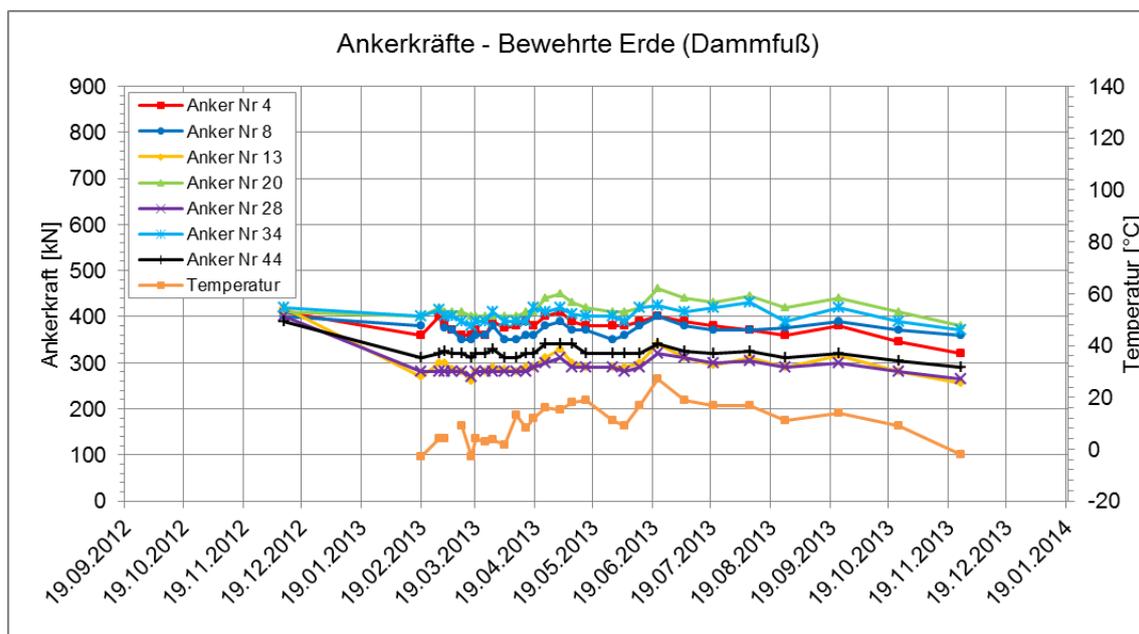


Abbildung 55: Ankerkräfte am Dammfuß der Bewehrte-Erde-Konstruktion, gemäß [29]

Die Ankerkräfte sind über die Zeit relativ konstant und es sind keine wesentlichen Ankerkraftanstiege vorhanden, die zu einer deutlichen und dauerhaften Erhöhung der Ankerkräfte führen. Außerdem ist bei diesen Anker eine sehr ausgeprägte Ähnlichkeit zwischen Ankerkraftverlauf und Temperaturverlauf zu beobachten, welche auf einen ausgeprägten Einfluss der Temperatur schließen lässt.

3.7 Zusammenfassung der Auswertung

Zum Abschluss dieses Kapitels werden die Bewegungsvorgänge in den Inklinometern, die relevanten Bauzustände, Niederschlagsereignisse, Änderungen der Grundwasserverhältnisse, und Ankerkraftanstiege entlang einer Zeitleiste dargestellt. Die Zeitleiste ist Abbildung 56 zu entnehmen.

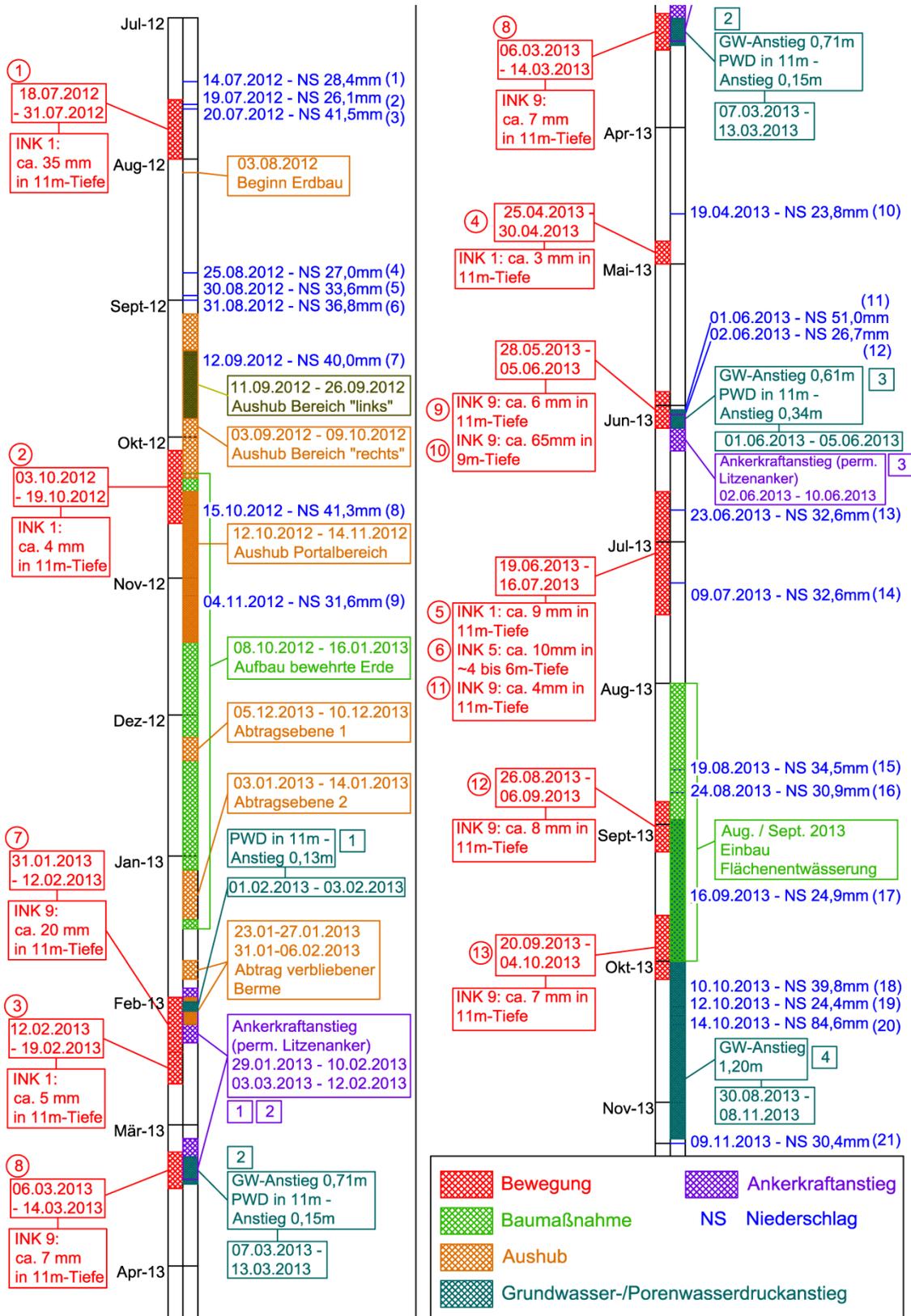


Abbildung 56: Ergebnisse der Auswertung der Messdaten

4 Interpretation der Messdaten

Unter der Interpretation der Messdaten ist eine Analyse der ausgewerteten Messdaten zu verstehen, um Aussagen über das System und Systemverhalten zu treffen.

Dieses Kapitel ist grundsätzlich in zwei Teile aufgegliedert:

- Aussagen über das System
- Aussagen über das Systemverhalten

Die Aussagen über das System betreffen die Systemgeometrie. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Rutschkörpergeometrie vor und nach der Baumaßnahme.

Die Aussagen über das Systemverhalten beinhalten einerseits die Identifizierung von Einflussfaktoren, die Bewegungen im System hervorrufen, und andererseits die Beurteilung der Systemreaktion auf Bewegungen. Zum Ersteren gehören die Niederschlagsereignisse, Änderungen der Grundwasserverhältnisse, und die Baumaßnahmen, zum Letzteren gehören in diesem Fall die Ankerkrafterhöhungen.

4.1 Aussagen über das System

Die Systemgeometrie im Ursprungszustand wurde im Abschnitt 2.3 schon angesprochen und bildhaft dargestellt. Für den Ursprungszustand wird von einer durchgehenden Gleitfläche und somit einem zusammenhängenden Gleitkörper ausgegangen.

Die Basis dieser Annahme ist die Gleitfläche in einer Tiefe von 11 m u.GOK, die sowohl im Bereich unterhalb als auch oberhalb der Baustelleneinrichtungsfläche beobachtet werden konnte.

Auf die Aktivität dieses Gleitkörpers vor den Baumaßnahmen wird aufgrund des Bewegungsvorganges 1 im Inklinometer INK 1, geschlossen.

Für die Systemgeometrie nach Herstellung des Einschnittes kann von zwei Varianten ausgegangen werden: es kann entweder die Ursprungsgeometrie mit durchgehender Gleitfläche erhalten bleiben, oder es kommt zu einer Trennung des Gleitkörpers in einen oberen und einen unteren Gleitkörper.

Um dies zu überprüfen wird ein Vergleich zwischen den gemessenen Bewegungsvorgängen im oberen und unteren Hangbereich durchgeführt. Somit soll ersichtlich werden, ob es sich weiterhin um einen zusammenhängenden Gleitkörper oder um zwei unabhängig agierende Gleitkörper handelt.

Um das System nach Herstellung des Einschnittes zu beurteilen werden nur jene Bewegungsvorgänge miteinander verglichen, die nach Herstellung des Einschnittes stattgefunden haben.

Vor diesem Vergleich soll jedoch die Diskussion über den Bewegungsvorgang 10 (Abschnitt 3.2.4, Tabelle 5) im Inklinometer INK 9 geführt werden, die zum Aussondern dieses Bewegungsvorganges geführt hat.

4.1.1 Bewegungsvorgang 10 im Inklinometer INK 9

Der Bewegungsvorgang 10 wurde in Abbildung 30 (Abschnitt 3.2.4) gekennzeichnet und stellt die scheinbare Ausbildung einer zweiten Gleitfläche in einer Tiefe von 9 m u.GOK dar. Diese Verschiebung hatte eine Größenordnung von ca. 65 mm.

Ein mögliches Gleitflächensystem welches diesen Messergebnissen zugrunde liegen könnte, ist in Abbildung 57 dargestellt.

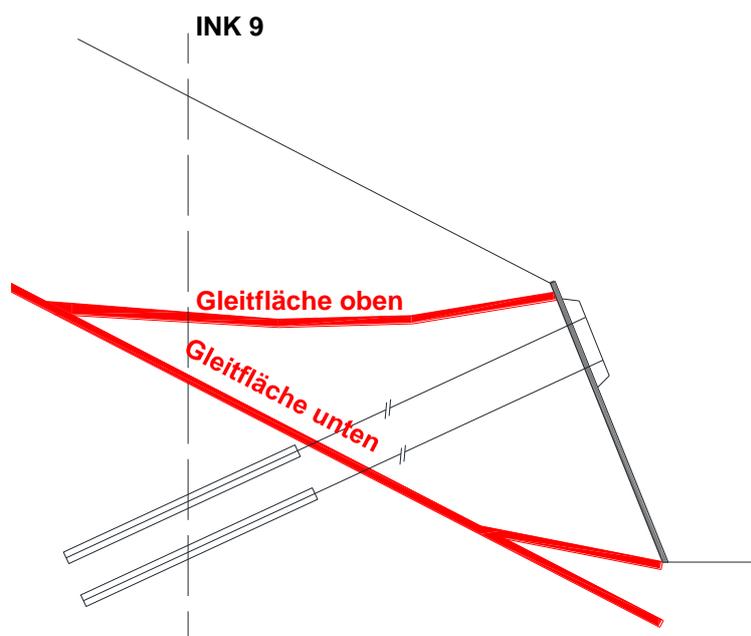


Abbildung 57: Mögliches Gleitflächensystem nach Ausbildung der oberen Gleitfläche

Würde das in Abbildung 57 dargestellte System, welches dem theoretischen Haefeli-Fall [30] nahekommt, bestätigt werden, so würde daraus folgen, dass die aufgebrachte Stützkraft ausreichend war um die Gleitfläche in 11 m-Tiefe nach oben zu drücken.

Konkret könnte ein Zusammenhang mit dem Ankerkraftanstieg im Zeitraum zwischen dem 02.06 und 10.06.2013 bestehen, der eine Verlagerung der Gleitfläche von unten nach oben bewirkt hätte.

Es spricht für das oben dargestellte Gleitflächensystem, dass zum Zeitpunkt des Bewegungsvorgangs keine Verschiebungen an der Spritzbetonwand (im Messquerschnitt MQ 1 bzw. MQ 13) gemessen wurden, die dem Bewegungsvorgang 10 entsprechen könnten.

Allerdings entstehen Probleme beim Vergleich der Ergebnisse des Inklinometers INK 9 mit den geodätischen Messungen im Messquerschnitt MQ 3, welcher sich im unmittelbaren Nahbereich des Inklinometers befindet. Wie bei der Auswertung der Verschiebungsmessdaten schon dargelegt, wurde im Messquerschnitt MQ 3 keine dem Bewegungsvorgang 10 entsprechende Verschiebung gemessen.

Im Verschiebungsbild des Inklinometers INK 9 ist jedoch eine eindeutige Fortpflanzung der Verschiebungen von der oberen Gleitfläche (9 m u.GOK) bis zur Geländeoberkante zu sehen. Somit muss sich jede Bewegung, die im Inklinometer auf der oberen Gleitfläche gemessen wird, auch an der Geländeoberfläche zeigen.

Aus dieser Überlegung heraus lassen sich folgende zwei Möglichkeiten ableiten: es besteht entweder ein Fehler in der geodätischen Vermessung und der Bewegungsvorgang 10 stellt eine tatsächliche Bewegung dar, oder es besteht ein Fehler in der Inklinometermessung, und der Bewegungsvorgang 10 ist nicht zu berücksichtigen.

Da der Bewegungsvorgang 9, der im Inklinometer INK 9 zeitgleich mit dem Bewegungsvorgang 10 stattgefunden hat, im Messquerschnitt MQ 3 in der entsprechenden Größenordnung erfasst wurde, ist ein Fehler in der geodätischen Vermessung als unwahrscheinlich anzusehen. Der Bewegungsvorgang 9 stellte eine Verschiebung von ca. 5 mm in der unteren Gleitfläche dar.

Des Weiteren haben die Ergebnisse in Abbildung 31 (Abschnitt 3.2.4) gezeigt, dass der Bewegungsvorgang 10 der einzige Bewegungsvorgang in der oberen Gleitfläche war. Da ein Gleitkörper, dessen Gleitfläche an der Oberkante der Ankerrippe ausbricht, keinen zusätzlichen Widerstand durch die Sicherung hätte, stellt auch diese Beobachtung den Bewegungsvorgang 10 in Frage.

Es war folglich eine genauere Überprüfung der Inclinometerergebnisse im Inclinometer INK 9 notwendig, die auf zweifache Weise erfolgte: es wurden die Differenzen zwischen der A0- und A180-Messung vor und nach dem Bewegungsvorgang verglichen, und anschließend wurde das Inclinometer INK 9 mit einer Kamera befahren.

Checksum-Werte im Inclinometer INK 9

Die Differenz der A0- und A180-Messung bildet der *checksum*-Wert, der auf den *Offset*-Wert des Inclinometers hinweist. Der *Offset*-Wert ist ein Messfehler, der von einer Ungenauigkeit im Neigungssensor herrührt und bleibt in der Regel konstant über die Zeit. Dieser kann durch eine Umschlagmessung (A0- und A180-Messung) ausgeglichen werden.

In Tabelle 18 sind die *checksum*-Werte im Inclinometer INK 9 am 28.05.2013, die letzte Messung vor Ausbildung der zweiten Gleitfläche, dargestellt. In Tabelle 19 sind die Werte bei Ausbildung der zweiten Gleitfläche am 05.06.2013 angeführt.

Tabelle 18: checksum-Werte im Inclinometer INK 9, 28.05.2013 [13]

Tiefe [m]	A0	A180	checksum	B0	B180	checksum
8	-74	-47	-121	0	-173	-173
9	373	-498	-125	222	-377	-155
10	29	-147	-118	55	-232	-177

Tabelle 19: checksum-Werte im Inclinometer INK 9, 05.06.2013 [13]

Tiefe [m]	A0	A180	checksum	B0	B180	checksum
8	113	-233	-120	-168	-23	-191
9	2030	-1962	68	1123	1289	166
10	59	-182	-123	-12	-190	-202

Die *checksum*-Werte in der Tiefe von 9 m u.GOK stimmen am 28.05.2013 mit den Werten in den anderen Tiefen noch überein. Am 05.06.2013 ist eine starke Abweichung der Werte in dieser Tiefe aufgetreten.

Die markante Änderung dieser Gerätekonstante gibt einen weiteren Grund zur Bezweifelung der Ergebnisse im Inclinometer INK 9 in der Tiefe von 9 m u.GOK.

Kamerabefahrung des Inklinometers INK 9

Abschließend wurde eine Kamerabefahrung des Inklinometers INK 9 durchgeführt, die in der Tiefe von 9 m u.GOK eine deutliche Beschädigung des Rohres zeigte.

Eine Fotoaufnahme von der Befahrung, in der das stark eingedrückte Inklinometerrohr gut erkennbar ist, ist Abbildung 58 zu entnehmen.

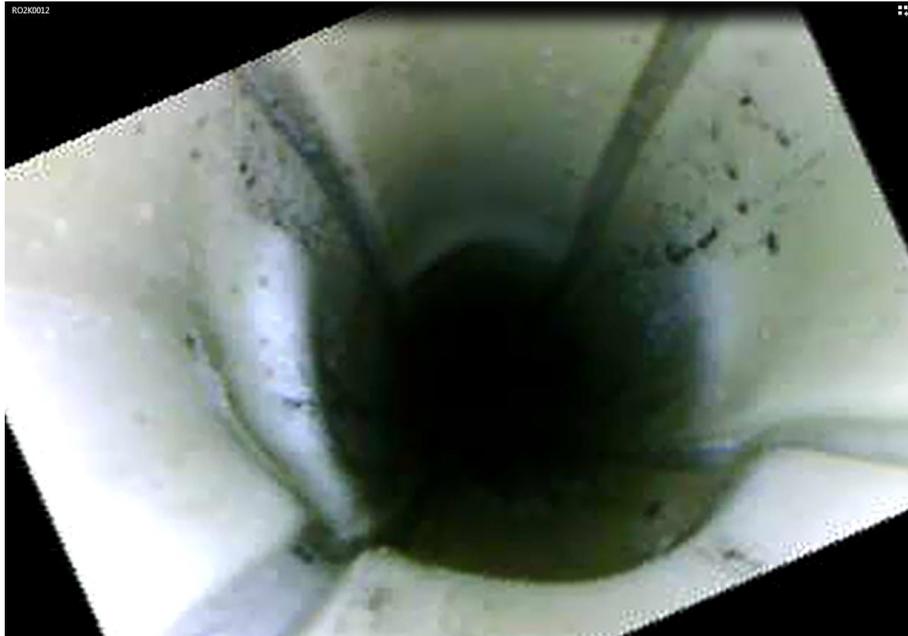


Abbildung 58: Fotoaufnahme im Inklinometer INK 9 [31]

Aufgrund der oben beschriebenen Überlegungen und klaren Beweise eines Fehlers in den Inklinometerergebnissen wird nun der Bewegungsvorgang 10 verworfen und in den weiterführenden Überlegungen zur Systemgeometrie nicht mitberücksichtigt.

4.1.2 Vergleich der Bewegungsvorgänge in den verschiedenen Inklinometern nach Fertigstellung des Einschnittes

Es werden nun die Bewegungsvorgänge in den Inklinometern INK 1, INK 5, und INK 9 ab Fertigstellung der Baumaßnahmen am Einschnitt miteinander verglichen. Mit Ausnahmen des Inklinometers INK 5, in der eine ausgeprägte Gleitfläche nicht klar erkennbar war, finden alle Verschiebungen in einer Tiefe von 11 m u.GOK statt.

In Abbildung 59 ist eine Gegenüberstellung der Bewegungsvorgänge angeführt. Um eine bessere Darstellung zu erreichen wurden sechs Bereiche aus dem Gesamtzeitraum herausgeschnitten und größer dargestellt. Diesen Ausschnitten wurden die Bezeichnungen A1 bis A6 zugeordnet. Die Nummerierung der Bewegungsvorgänge der vorigen Kapitel wird beibehalten.

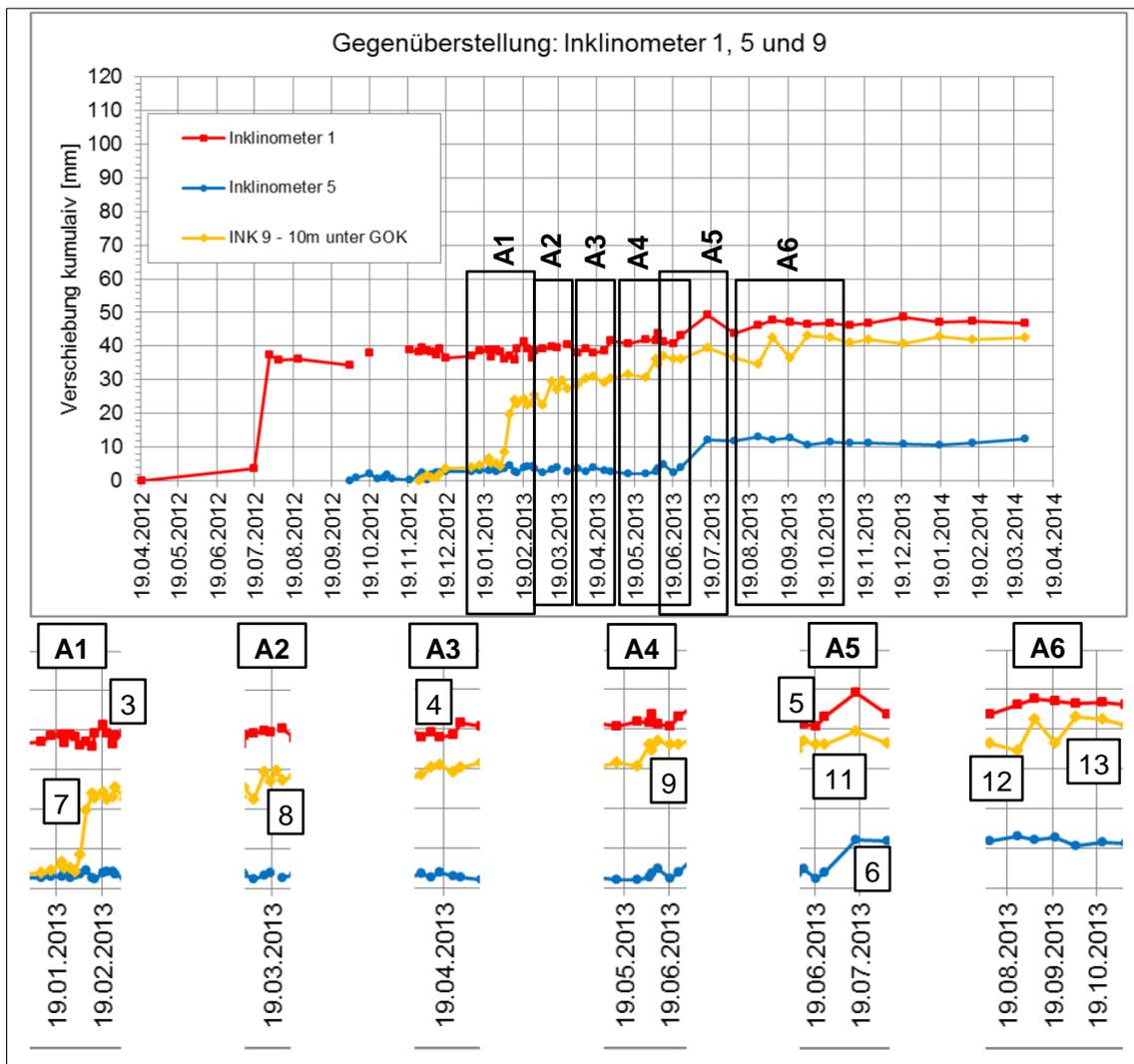


Abbildung 59: Gegenüberstellung der Bewegungsvorgänge

Es geht aus der in Abbildung 59 dargestellten Gegenüberstellung klar hervor, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen dem Bewegungsverhalten oberhalb (Inklinometer INK 9) und unterhalb der Baustelleneinrichtungsfläche (Inklinometer INK 1 und INK 5) gibt.

Im Folgenden wird diese Aussage anhand der Beobachtungen in den oben dargestellten Ausschnitten A1 bis A6 begründet.

Im **Ausschnitt A1** wird der Bewegungsvorgang 3 im Inklinometer INK 1 mit dem Bewegungsvorgang 7 im Inklinometer INK 9 gegenübergestellt. Diese Bewegungen sind von unterschiedlicher Größenordnung und finden nicht zeitgleich statt; der Bewegungsvorgang 3 folgt dem Bewegungsvorgang 7.

Im **Ausschnitt A2** ist der Bewegungsvorgang 8 erkennbar, der eine Bewegung im Inklinometer INK 9 darstellt. Es ist zum Zeitpunkt dieser Bewegung keine Reaktion der Inklinometer im unteren Hangbereich zu erkennen.

Ausschnitt A3 zeigt der Bewegungsvorgang 4 im Inklinometer INK 1, der ohne Reaktion des Inklinometers im oberen Hangbereich stattfindet.

Im **Ausschnitt A4** wird der Bewegungsvorgang 9 dargestellt, eine Verschiebung im Inklinometer INK 9 die wiederum keinen vergleichbaren Vorgang im unteren Hangbereich findet.

Im **Ausschnitt A5** werden die Bewegungsvorgänge im Zeitraum vom 19.06.2013 bis 16.07.2013 dargestellt. Die Bewegungen im unteren Hangbereich (Bewegungsvorgang 5 im Inklinometer INK 1 und Bewegungsvorgang 6 im Inklinometer INK 5) sind von gleicher Größenordnung und finden zeitgleich statt. Der Bewegungsvorgang 11 im Inklinometer INK 9 findet zwar gleichzeitig mit den anderen Vorgängen statt, ist jedoch in seiner Größenordnung viel kleiner.

Im **Ausschnitt A6** sind die Bewegungsvorgänge 12 und 13 im Inklinometer INK 9 zu sehen, die jeweils Verschiebungen nur im oberen Hangbereich darstellen.

Zusammenfassend kann eindeutig beobachtet werden, dass sich das Verschiebungsverhalten im oberen Hangbereich deutlich von dem Verhalten im unteren Hangbereich unterscheidet.

Eine Bewegung im oberen Hangbereich bedeutet nicht zwangsläufig eine gleichzeitige Bewegung im unteren Hangbereich und umgekehrt. Im Fall von gleichzeitigen Bewegungen im oberen und unteren Bereich ist nicht davon auszugehen, dass diese von gleicher Größenordnung sind.

Es wird hiermit eine für die weiterführende Modellierung wichtige Aussage getroffen: der hergestellte Einschnitt hat den ursprünglichen zusammenhängenden Gleitkörper in einen unteren und einen oberen Gleitkörper geteilt und somit das ursprünglich aller Wahrscheinlichkeit nach einteilige System in ein zweiteiliges übergeführt.

Das System nach der Herstellung des Einschnittes, bestehend aus zwei unabhängigen Gleitkörpern, wird in Abbildung 60 dargestellt.

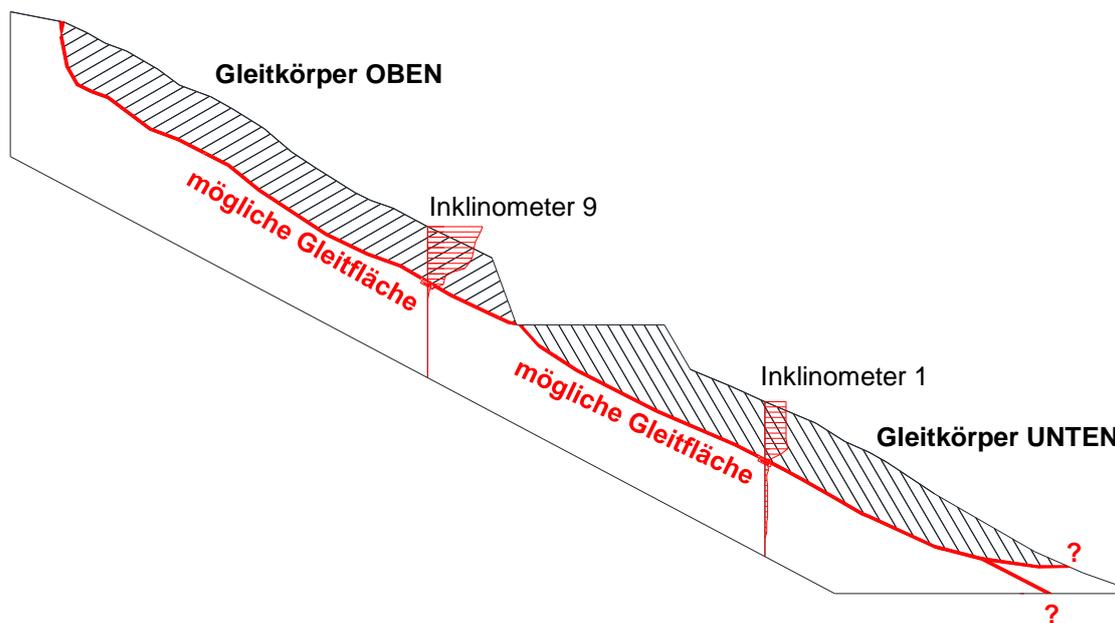


Abbildung 60: System nach Herstellung des Einschnittes

4.2 Aussagen über das Systemverhalten

Nachdem das System in seiner Geometrie definiert wurde soll nun sein Verhalten beurteilt werden. Es sollen insbesondere jene Einflussfaktoren, auf die der Hang mit Bewegungen reagiert, herausgearbeitet werden.

Die Einflussfaktoren, welche identifiziert werden konnten und auf die in diesem Abschnitt näher eingegangen wird sind die folgenden:

- Bauzustände - insbesondere die Aushubzustände, Aufschüttung der Bewehrte-Erde-Konstruktion und der Einbau der Flächenentwässerungsmaßnahmen;
- Niederschlag;
- Grundwasser- und Porenwasserdruckänderungen

Zur Beurteilung des Verhaltens des Sicherungssystems werden die Ankerkraftmessungen herangezogen.

4.2.1 Zusammenhang zwischen Bewegungen und Bauzuständen

Die Bauzustände (braun und grün) sind zusammen mit den Bewegungsvorgängen (rot) in Abbildung 61 dargestellt.

Es werden drei Baumaßnahmen im Detail untersucht: die Aufschüttung der Bewehrte-Erde-Konstruktion, die letzten Aushubmaßnahmen im Bereich „links“ und der Einbau von Flächenentwässerungsmaßnahmen im oberen Hangbereich.

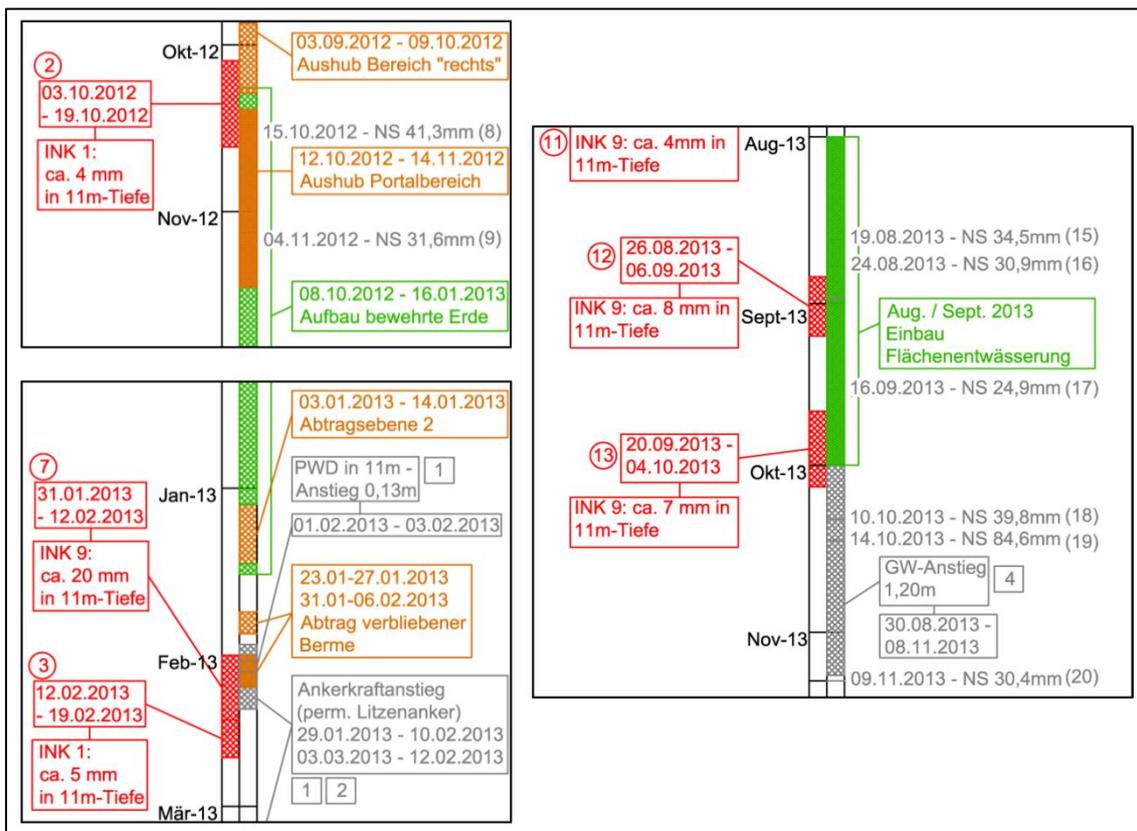


Abbildung 61: Gegenüberstellung Bewegungen – Bauzustände

Aufschüttung der Bewehrte-Erde-Konstruktion

Die Aufschüttung des Dammes aus bewehrter Erde begann am 12.10.2012 und wurde am 16.01.2013 fertiggestellt. Die Aufschüttung bedeutet zusätzliches Gewicht im Kopfbereich des unteren Gleitkörpers, was für diesen destabilisierend wirken kann.

Es ist in diesem Zeitraum ein eindeutig erkennbarer Bewegungsvorgang im unteren Bereich vorhanden. Der Bewegungsvorgang 2 im Inklinometer INK 1 fand zwischen dem 03.10.2012 und 19.10.2012 statt.

Die Aufschüttung des Dammes dürfte daher mit diesem Bewegungsvorgang zu korrelieren sein. Es ist anzumerken dass am 15.10.2012 ein wesentliches Niederschlagsereignis gemessen wurde, das ebenfalls mit diesem Bewegungsvorgang zusammenhängen könnte.

Aushub

Der Aushub im Bereich „links“ (in dem durch die permanenten Litzenanker gesicherten Bereich des Einschnitts) betrifft den oberen Gleitkörper, da er stabilisierendes Material von dessen Fußbereich entfernt. Die Aushubzustände zur Herstellung des Einschnittes wurden im Abschnitt 3.1 im Detail beschrieben.

Während des Aushubs der Abtragungsebene 2 (03.01.2013 – 14.01.2013) und des ersten Abtrags zur Entfernung der verbliebenen Berme vom 23.01.2013 bis 27.01.2013 wurden geringfügige Bewegungen der Messpunkte in der Spritzbetonwand gemessen.

Nach dem zweiten Aushubschritt zur Entfernung der verbliebenen Berme vom 31.01.2013 bis 06.02.2013 war eine rasche Zunahme der Bewegungen an der Spritzbetonwand erkennbar, die im Inklinometer INK 9 ebenfalls gemessen wurde.

Eine Darstellung der Messergebnisse im Messquerschnitt MQ 1 vom 17.01.2013 bis 04.03.2013 befindet sich in den Abbildungen 62 und 63. Die Abtragungsebene 2 (Vorgang V1), der erste Abtrag der verbliebenen Berme (Vorgang V2) und der zweite Abtrag der verbliebenen Berme (Vorgang V3) sind in den Abbildungen gekennzeichnet. Es sind in Abbildung 62 die Setzungen und in Abbildung 63 die Querverschiebungen dargestellt. Die einzelnen Linien stellen die Verschiebungen über die Zeit in einzelnen Messpunkten des Messquerschnittes MQ 1 dar (die Messpunkte im Grundriss sind Abbildung 33 zu entnehmen).

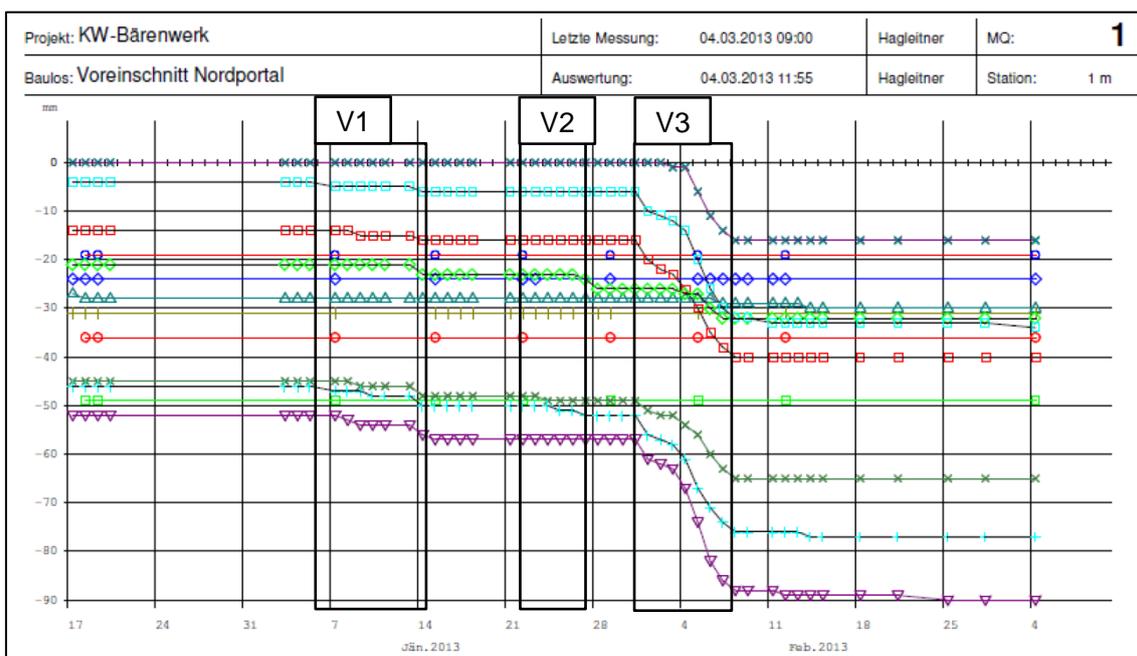


Abbildung 62: Setzungen im MQ 1, 17.01.2013 bis 04.03.2013 [32]

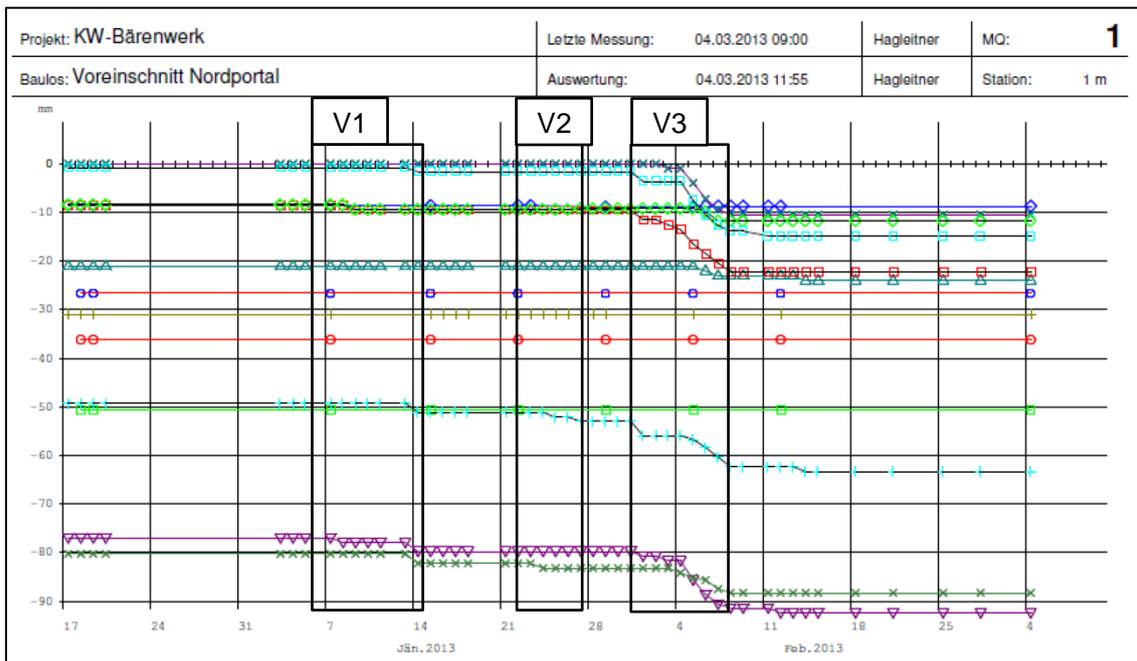


Abbildung 63: Querverschiebungen im MQ 1, 17.01.2013 bis 04.03.2013 [32]

Es kann hier die Aussage getroffen werden, dass es für den oberen Gleitkörper einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Bewegungen und Aushubzuständen gibt. Insbesondere die Aushübe Ende Jänner bzw. Anfang Februar 2013 haben eine Reduktion der Standsicherheit dieses Gleitkörpers verursacht.

Der Aushub im oberen Bereich und der Bewegungsvorgang 7 (der Bewegungsvorgang im Inklinometer INK 9 während der Aushubvorgänge Ende Jänner bzw. Anfang Februar 2013) können auch als Auslöser des Bewegungsvorganges 3 (der Bewegungsvorgang im Inklinometer INK 1 Anfang Februar 2013) im unteren Hangbereich interpretiert werden. In diesem Fall kann es sein, dass der obere Gleitkörper nach dem Bewegungsvorgang 7 eine zusätzliche Belastung auf den unteren Gleitkörper ausgeübt hat.

Über den Zusammenhang zwischen Aushub und Bewegung hinaus ist in den Abbildungen 62 und 63 auch das größere Verhältnis der vertikalen Setzungen zu den horizontalen Querverschiebungen im Wandbereich, das in Abschnitt 3.3.2 schon erwähnt wurde, eindeutig erkennbar.

Bei einer mittleren Hangneigung von ca. $27,5^\circ$ mit einer hangparallelen Gleitfläche entspricht das zu erwartende Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Verschiebung dem Tangens des Hangneigungswinkels.

Da dies natürlich geringere Setzungen als horizontale Verschiebungen bedeuten würde, kann es sich bei diesen Bewegungsvorgängen nicht ausschließlich um eine Bewegung in der hangparallelen Gleitfläche handeln.

Das große Verhältnis zwischen vertikaler und horizontaler Verschiebung im Wandbereich kann auf eine mögliche Verschiebung entlang der Spritzbetonwand hinweisen, da unmittelbar nach Aushub der Berme die Spritzbetonwand noch keinen „Fuß“ hat. Da die Wand mit ca. 68° geneigt ist würde eine solche Verschiebung größere vertikale als horizontale Verschiebungen aufweisen. Dieser Zustand ist in Abbildung 64 dargestellt.



Abbildung 64: Fehlender "Fuß" der Spritzbetonwand nach Aushubschritt [18]

Flächenentwässerung

Die Flächenentwässerung hat das Ziel, anfallende Oberflächenwässer zu sammeln und abzuleiten, damit sie möglichst nicht in den bewegten Hangbereich gelangen.

Nach Einbau der Flächenentwässerungsmaßnahmen wurden drei starke Niederschlagsereignisse gemessen, die gemäß Verschiebungsmessung keine Bewegungen ausgelöst hatten. Besonders bemerkenswert ist, dass das Ereignis am 14.10.2013 mit einem Tagesniederschlag von 84,3 mm, keine Bewegungen ausgelöst hat.

Diese Beobachtungen sind ein Hinweis dafür, dass die Flächenentwässerungsmaßnahmen ihre erwünschte Wirkung erreichen und dazu beitragen, Bewegungen im Hang zufolge Niederschlag zu unterbinden.

4.2.2 Zusammenhang zwischen Bewegungen und Niederschlag

Jene Bewegungsvorgänge (rot), die mit mindestens einem wesentlichen Niederschlagsereignis (blau beschriftet) in Verbindung stehen, sind in Abbildung 65 zusammen mit den Niederschlagsereignissen dargestellt.

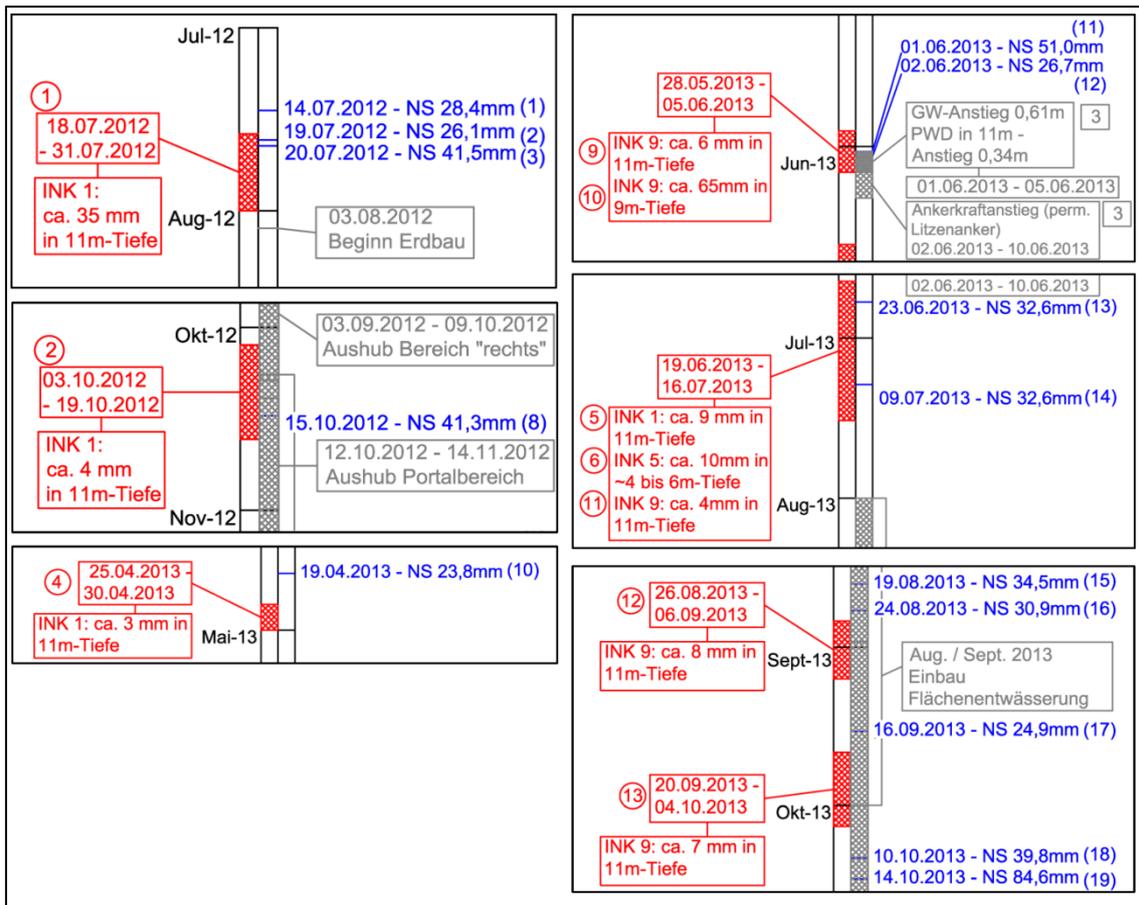


Abbildung 65: Gegenüberstellung Bewegungen – Niederschlag

Die Bewegungen mit den zugehörigen Niederschlagsereignissen sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Zusammenhänge zwischen Bewegungen und Niederschlag

Bewegung	Zeitraum	Hangbereich	Niederschlagsereignisse***
1*	18.07.2012 – 31.07.2012	unten	14.07.2012 / 28,4 mm 19.07.2012 / 26,1 mm 20.07.2012 / 41,5 mm
2	03.10.2012 – 19.10.2012	unten	15.10.2012 / 41,3 mm
4	25.04.2013 – 30.04.2013	unten	19.04.2013 / 23,8 mm
9	28.05.2013 – 05.06.2013	oben	01.06.2013 / 51,0 mm 02.06.2013 / 26,7 mm
5, 6, 11	19.06.2013 – 16.07.2013	oben, unten	23.06.2013 / 32,6 mm 09.07.2013 / 32,6 mm
12**	26.08.2013 – 06.09.2013	oben	19.08.2013 / 34,5 mm 24.08.2013 / 30,9 mm
13**	20.09.2013 – 04.10.2013	oben	16.09.2013 / 24,9 mm

*) Ursprungszustand

***) Diese Vorgänge wurde im Laufe der geodätischen Vermessung nicht bestätigt

***) Wesentliche Niederschlagsereignisse mit $TN \geq 4TN_{\text{mittel}}$; siehe Abschnitt 3.4

Basierend auf den zeitlichen Zusammenhängen, die in der obigen Tabelle angeführt sind, können zwei wesentliche Aussagen über die Wirkung von Niederschlag auf das System getroffen werden.

Erstens kann gesagt werden, dass der Hang kurzzeitig auf Niederschlagsereignisse mit Bewegungen reagiert.

Weiters kann festgehalten werden, dass dies sowohl für den Ursprungszustand als auch für beide Gleitkörper im Zustand nach den Baumaßnahmen gilt.

Es ist anzumerken, dass Niederschlag im Fall der oben angeführten Zusammenhänge vermutlich nicht immer der einzige Auslöser war. Im Fall des Bewegungsvorgangs 2 wurde schon erwähnt, dass dieser zeitgleich mit der Aufschüttung der bewehrten Erde stattgefunden hat, und im Fall der Vorgänge 9, 12, und 13 konnten Grundwasseranstiege bzw. Porenwasserdruckanstiege ebenfalls zum Zeitpunkt der Bewegung gemessen werden.

Nach Einbau der Flächenentwässerungsmaßnahmen sind, wie bereits erwähnt, Niederschlagsereignisse ohne eine Reaktion des Hanges mit Bewegungen zu beobachten gewesen. Dies ist ein Hinweis dafür, dass der Zusammenhang zwischen Bewegung und Niederschlag von diesen Maßnahmen entschärft wurde.

4.2.3 Zusammenhang zwischen Bewegungen und Grundwasser- bzw. Porenwasserdruckänderungen

In Abbildung 66 sind die vier wesentlichen Grundwasser- und Porenwasserdruckänderungen (blaugrün) entlang der Zeitleiste mit den Bewegungsvorgängen (rot) dargestellt. Es sind fünf Bewegungsvorgänge im oberen Hangbereich, die mit den Anstiegen im Grundwasser bzw. im Porenwasserdruck korreliert werden können (Bewegungsvorgänge 7, 8, 9, 12 und 13).

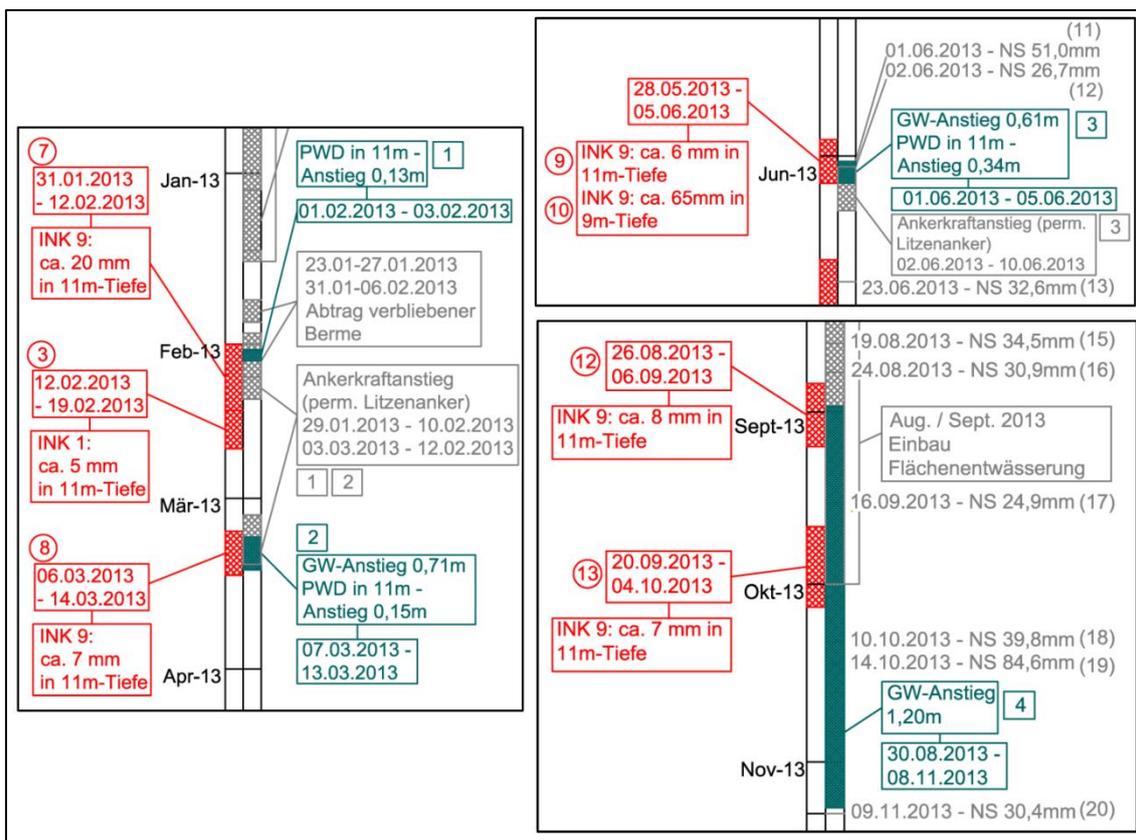


Abbildung 66: Gegenüberstellung Bewegung – Grundwasser und Porenwasserdruck

Im Fall des Bewegungsvorganges 7 Ende Jänner bzw. Anfang Februar 2013 wurde im Zeitraum der Bewegung ein Anstieg des Porenwasserdruckes in der Gleitflächentiefe von 0,13 m aufgezeichnet. Obwohl dieser Bewegungsvorgang eindeutig hauptsächlich auf den Aushub im Bereich „links“ zurückzuführen ist, kann ein Mitwirken des Porenwasserdruckanstiegs als Auslöser nicht ausgeschlossen werden.

Im Fall des Bewegungsvorganges 8 im März 2013 ist ein Anstieg sowohl vom Grundwasserspiegel als auch vom Porenwasserdruck zu erkennen. Da keine parallelen Niederschlagsereignisse oder Aushubvorgänge in diesem Zeitraum stattgefunden haben, wirkt dies vermutlich als alleiniger Auslöser dieser Bewegung. Es können diese Änderungen der Grundwasserverhältnisse eventuell auf eine Schneeschmelze zurückgeführt werden.

Die Bewegungen, die im Inklinometer INK 9 Ende Mai bzw. Anfang Juni 2013 stattgefunden haben sind ebenfalls mit einem wesentlichen Anstieg des Grundwasserstands und des Porenwasserdrucks zu korrelieren. In diesem Fall wirken zwei Starkniederschläge mit, die mögliche Ursachen des Grundwasser- und Porenwasserdruckanstieges sind.

Im Zeitraum vom 30.08.2013 bis 08.11.2013 wurde ein allmählicher Grundwasseranstieg von 1,20 m gemessen, welcher als ein möglicher Auslöser der Bewegungsvorgänge 12 und 13 angesehen werden kann.

Es kann die Aussage getroffen werden, dass die Grundwasserverhältnisse im oberen Hangbereich stark mit Bewegungsvorgängen zusammenhängen. Auf einen Grundwasser- oder Porenwasserdruckanstieg hat der obere Gleitkörper eindeutig mit Bewegungen geantwortet.

Des Weiteren ist, insbesondere bei dem Bewegungsvorgang 9, ein enger Zusammenhang zwischen Niederschlag und Grundwasserstand bzw. Porenwasserdruck zu erkennen. In diesem Fall haben die Grundwasser- bzw. Porenwasserdruckanstiege unmittelbar nach den Niederschlagsereignissen stattgefunden.

Für den unteren Bereich liegen keine Grundwasserdaten vor, deshalb kann auch keine Aussage über den Zusammenhang zwischen den Grundwasserverhältnissen in diesem Bereich und Niederschlag getroffen werden.

4.2.4 Zusammenhang zwischen Bewegungen und Ankerkräften

Die Bewegungsvorgänge im oberen Hangbereich (rot) sind größtenteils mit Anstiegen der gemessenen Ankerkräfte (violett) zu korrelieren.

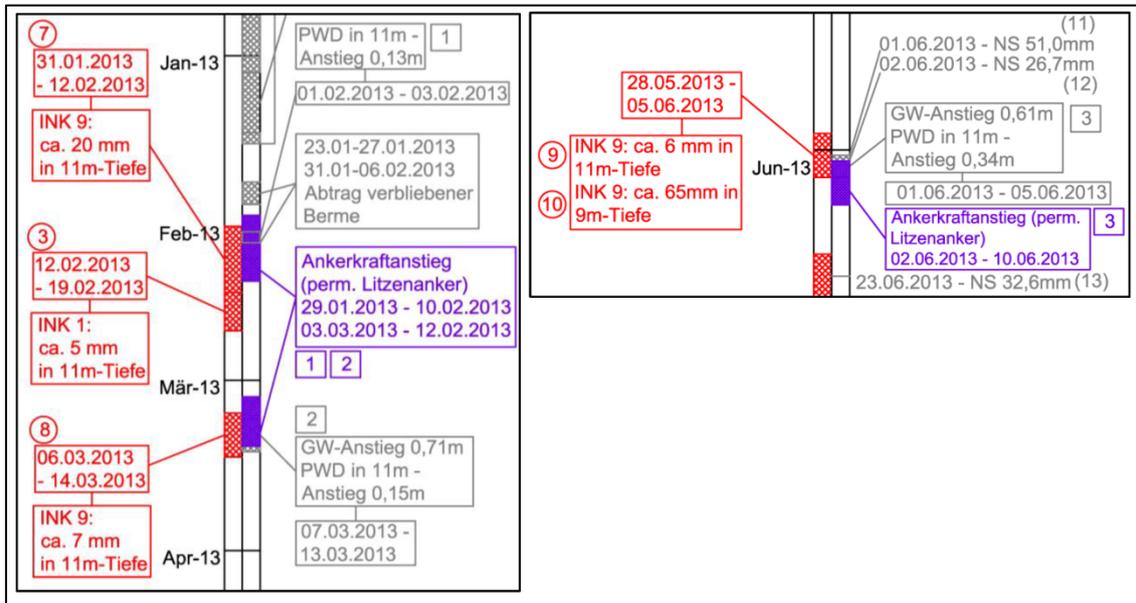


Abbildung 67: Gegenüberstellung Bewegungen – Ankerkräfte

Wie es in Abbildung 67 zu erkennen ist, wurden zum Zeitpunkt der Bewegungsvorgänge 7, 8, und 9, auch Anstiege der Ankerkraft in den permanenten Litzenankern gemessen.

Für die Ankerblöcke 2, 6, und 9 wurde nun der zu erwartende Ankerkraftanstieg anhand der gemessenen Verschiebungen im Messquerschnitt MQ 1 bzw. MQ 13 abgeschätzt, um einen Vergleich mit der Ankerkraftmessung zu ermöglichen.

Es wurden die Verschiebungen wiederum im Zeitraum vom 28.01.2013 bis 18.12.2013 berücksichtigt.

Abschätzung der Ankerkrafterhöhung anhand der Verschiebungen

Die Messpunkte im oberen Bereich der Spritzbetonwand, die den Ankerblöcken 2, 6, bzw. 9 lagenmäßig am nächsten gelegen sind, sind in Abbildung 68 dargestellt.

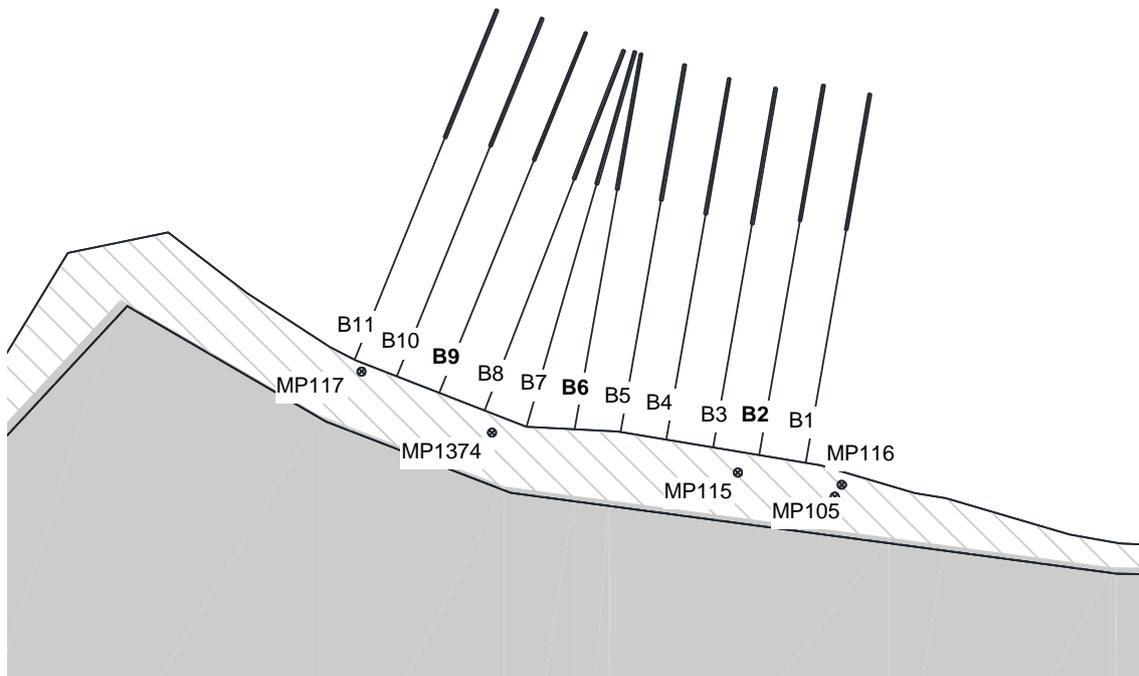


Abbildung 68: Ankerblöcke mit benachbarten Messpunkten in der Spritzbetonwand

Für jeden Ankerblock wurden zunächst Mittelwerte der Querverschiebungen gebildet, um eine Berechnung der zu erwartenden Ankerkrafterhöhung zu ermöglichen. Für den Ankerblock 2 wurden die Messpunkte M115, M105 und M116, für den Block 6 die Messpunkte M115 und M1374 und für den Block 9 die Messpunkte M117 und M1374 berücksichtigt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Querverschiebungen (horizontale, talwärts gerichtete Verschiebungen der Spritzbetonwand) für die Dehnung der Litzen in Richtung der Ankerachse und somit für die Ankerkrafterhöhung verantwortlich sind. Aus diesem Grund werden die Setzungsanteile (vertikale Verschiebungen der Spritzbetonwand) in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt.

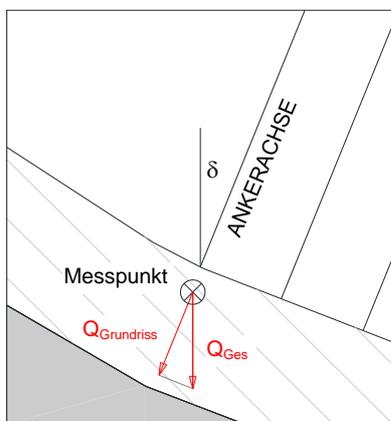
Die Ankerblöcke mit den zugehörigen gemittelten Querverschiebungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Ankerblöcke mit zugehörigen gemittelten Querverschiebungen

Ankerblock	Messpunkt	Querverschiebung [mm]	Mittelwert [mm]
Block 2	M116	13,5	14,2
	M115	14,5	
	M105	14,5	
Block 6	M115	14,5	12,7
	M1374	11,0	
Block 9	M1374	11,0	8,2
	M117	5,5	

Zusätzlich musste die Komponente der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse berechnet werden, da diese Verschiebungskomponente für die Ankerkrafterhöhung verantwortlich ist. Die Umrechnung wird in Abbildung 69 dargestellt und die umgerechneten Querverschiebungen sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

1) Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse im Grundriss



2) Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse im Schnitt

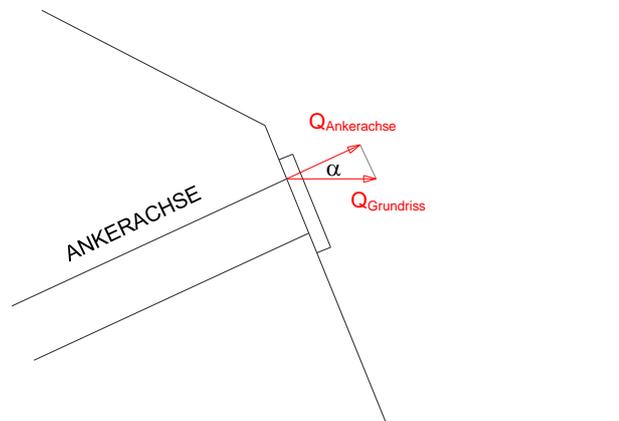


Abbildung 69: Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse

Tabelle 22: Berechnung der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse

Ankerblock	Q _{ges} [mm]*	δ [°]	Q _{Grundriss} [mm]**	α [°]	Q _{Ankerachse} [mm]***
Block 2	14,2	9,8	14,0	25	12,7
Block 6	12,7	10,0	12,5	25	11,3
Block 9	8,2	22,0	7,6	25	6,9

*) Q_{ges} entspricht den in Tabelle 21 angeführten Mittelwerten

***) Q_{Grundriss} = Q_{ges} * cos(δ)

****) Q_{Ankerachse} = Q_{Grundriss} * cos(α)

Die Abschätzung erfolgte anhand der folgenden Formel:

$$\Delta F = E \cdot A \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Für die Querschnittsfläche wurden 7Ø0,6“ Litzen berücksichtigt. Der E-Modul für Stahl wurde mit 210.000 MN/m² angenommen und die Anfangslänge L wurde der freien Stahllänge von 20 m gleichgesetzt.

Für den Wert von ΔL wurde die Komponente der Querverschiebung in Richtung der Ankerachse (Q_{Ankerachse}) übernommen.

Die nach der oben angeführten Formel abgeschätzten rechnerischen Ankerkrafteerhöhungen sind in Tabelle 23 angeführt und mit den gemessenen Erhöhungen im Zeitraum von 28.01.2013 bis 18.12.2013 verglichen.

Tabelle 23: Abgeschätzte rechnerische Ankerkrafteerhöhungen

Ankerblock	Gemessene Erhöhung (oben/ unten) [kN]	Rechnerisch abgeschätzte Erhöhung [kN]
Block 2	170	170,2
	150	
Block 6	185	151,5
	195	
Block 9	75	92,5
	80	

Die mit den Querverschiebungen abgeschätzten Ankerkrafteerhöhungen stimmen mit den gemessenen Werten größenordnungsmäßig gut überein.

Die Messung zeigte größere Ankerkrafteerhöhungen in den Blöcken 2 und 6 als im Block 9. Dies ist auch bei den gerechneten Werten der Fall.

Es kann hier die Aussage getroffen werden, dass die Ankerkräfte in den permanenten Litzenankern mit den Bewegungen zusammenhängen. Eine Bewegung des oberen Gleitkörpers verursacht eine Erhöhung der Ankerkräfte, und die gemessenen Erhöhungen sind proportional zu den Querverschiebungen der Spritzbetonwand.

4.3 Zusammenfassung

Durch die Herstellung des Einschnitts wurde das ursprüngliche System einer Geometrieänderung unterzogen. Der ursprüngliche durchgehende Gleitkörper wurde in einen Gleitkörper oberhalb und einen Gleitkörper unterhalb des Einschnittes aufgeteilt.

Es wurde gezeigt, dass Bauzustände, Niederschlagsereignisse, Grundwasseränderungen, und Porenwasserdruckänderungen eindeutig mit Bewegungen zusammenhängen. Es kann eine Bewegung von einem dieser Einflussfaktoren ausgelöst werden, oder es kann eine Kombination gleichzeitig wirkender Einflussfaktoren zu einer Bewegung führen. Bewegungen des oberen Gleitkörpers führen zu einer Erhöhung der Ankerkräfte in den permanenten Litzenankern.

Die in diesem Kapitel beschriebene Systemgeometrie sowie die Einflussfaktoren auf das System sind in den Berechnungsmodellen und in der Planung von Sicherungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Die Bewegungsvorgänge mit den vermutlichen auslösenden Ereignissen sind in Tabelle 24 enthalten.

Tabelle 24: Bewegungsvorgänge mit auslösenden Ereignissen

Bewegungsvorgang	Gleitkörper	Vermutliche/r Auslöser
1	Ursprungszustand	Niederschlag
2	unten	Aufschüttung der bewehrten Erde, Niederschlag
3	unten	Bewegungsvorgang 7, ev. aufgrund Zusatzbelastung durch den oberen Gleitkörper
4	unten	Niederschlag
5	unten	Niederschlag
6	unten	Niederschlag
7	oben	Aushub des Einschnittes
8	oben	Porenwasserdruckanstieg in 11m, Grundwasseranstieg
9	oben	Niederschlag, Grundwasseranstieg, Porenwasserdruckanstieg in 11m
11	oben	Niederschlag
12*	oben	Niederschlag, Grundwasseranstieg
13*	oben	Niederschlag, Grundwasseranstieg

*) Bewegungsvorgänge im Laufe der geodätischen Vermessung nicht bestätigt

5 Modellkalibrierung

Die folgenden zwei Kapitel werden der Beurteilung der Standsicherheit des Kriechhanges gewidmet. Um eine Standsicherheitsberechnung zu ermöglichen musste zunächst ein Berechnungsmodell erstellt und die wesentlichen Kennwerte, die als Eingabeparameter des Modells dienen, bestimmt werden.

Die wesentlichen Kennwerte zur Beurteilung der Standsicherheit sind die Scherparameter in der Gleitfläche. Die Ermittlung vom Reibungswinkel φ' und einer eventuell bestehenden geringfügigen Kohäsion c' in der Gleitfläche stellt bei solchen Problemstellungen eine große Schwierigkeit dar. Die Qualität von Laborergebnissen kann durch Störungen bei der Probeentnahme, dem Transport und dem Einbau in den Versuchsapparat beeinträchtigt werden und sind selbst bei einwandfreier Entnahme und Versuchsdurchführung aufgrund der Heterogenität im Untergrund als alleinige Basis der Standsicherheitsberechnung ungeeignet [33].

Aufgrund dieser Tatsachen wird versucht, die für die Standsicherheitsbeurteilung wichtigen Kennwerte durch Rückrechnung bzw. durch Kalibrierung des gewählten Berechnungsmodells abzuschätzen. Hierzu werden Zeitpunkte mit maßgebenden Bewegungsvorgängen betrachtet, wobei die messtechnischen Beobachtungen als Eingabeparameter herangezogen werden.

Das vorliegende Kapitel wird folgendermaßen gegliedert:

- Es werden zuerst jene Überlegungen präsentiert, die zur Entscheidung für das geeignete Berechnungsmodell geführt haben;
- Das gewählte Berechnungsmodell wird dargestellt und die notwendigen Eingabeparameter mit den Ansätzen zur Bestimmung dieser Parameter beschrieben;
- Eine Sensitivitätsanalyse wird durchgeführt um das Verhalten des Modells bei Änderung der Eingabeparameter zu ermitteln;
- Die Kalibrierung des Berechnungsmodells zu den Zeitpunkten der Bewegungsvorgänge wird beschrieben und die Ergebnisse angeführt.

5.1 Wahl des Berechnungsmodells

Die Berechnungsmodelle, die zur Beurteilung der Standsicherheit von Hängen in Frage kommen, reichen von einfacheren analytischen Modellen bis zu numerischen Modellierungen mit der Finite-Elemente-Methode.

Wesentlich für die Wahl des Berechnungsmodells im vorliegenden Fall sind die großen Unschärfen bezüglich der Untergrundverhältnisse im Hang.

Dies ist insbesondere bei den Grundwasserverhältnissen der Fall, da nur eine Grundwassermessstelle im oberen Hangbereich vorhanden ist und im geologischen Bericht darauf hingewiesen wird, dass es keinen zusammenhängenden Grundwasserkörper im Hang gibt.

5.1.1 Standsicherheitsbeurteilung mit dem Programm SLIDE

Es wurde anfangs versucht, die Standsicherheit des Hanges mit dem analytischen Programm SLIDE [34] zu beurteilen. Das Programm bietet die Möglichkeit, Grundwasserströmungen und Grundwasserverhältnisse im Hang mit einem Zusatzprogramm auf Basis der Finite-Elemente-Methode zu modellieren. Dabei können Porenwasserdrücke sowie Höhen des freien Grundwasserspiegels in beliebigen Punkten definiert werden. Anschließend werden die daraus resultierenden Porenwasserdrücke im restlichen Hangbereich vom Programm berechnet und für die Stabilitätsberechnung herangezogen.

Im vorliegenden Fall konnte der gemessene Grundwasserspiegel sowie der Porenwasserdruck in der Tiefe von 11,0 m u.GOK entsprechend der Darstellung im Abschnitt 3.5 im oberen Hangbereich eingegeben werden. Das Programm verlangt zusätzlich die Eingabe von Durchlässigkeiten, welche aufgrund der Angaben in den Bohrprofilen im Modell berücksichtigt bzw. abgeschätzt wurden. Hierbei wurden, in gleicher Vorgehensweise als bei der Modellierung der Bodenschichten, Bereiche gleicher Durchlässigkeit in den jeweiligen Bohrprofilen miteinander verbunden.

Das im Programm SLIDE eingegebene Modell und das Ergebnis einer beispielhaften Berechnung mit Eingabe der Grundwassermessdaten im oberen Hangbereich sind Abbildung 70 bzw. 71 zu entnehmen.

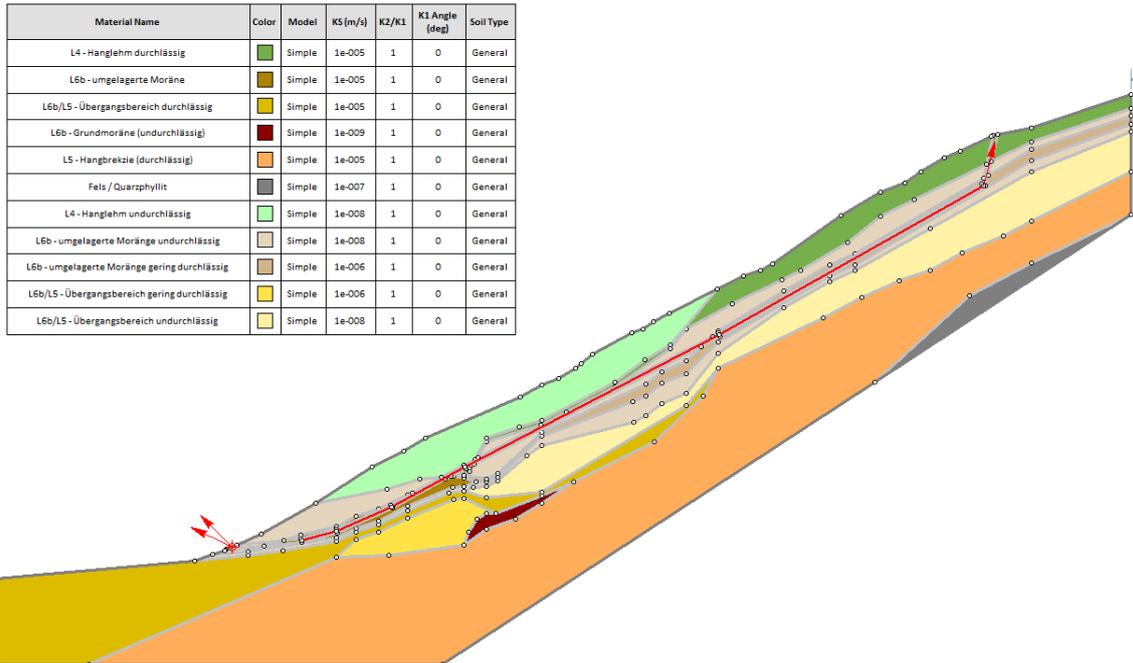


Abbildung 70: Modell mit Berücksichtigung der Durchlässigkeiten in SLIDE

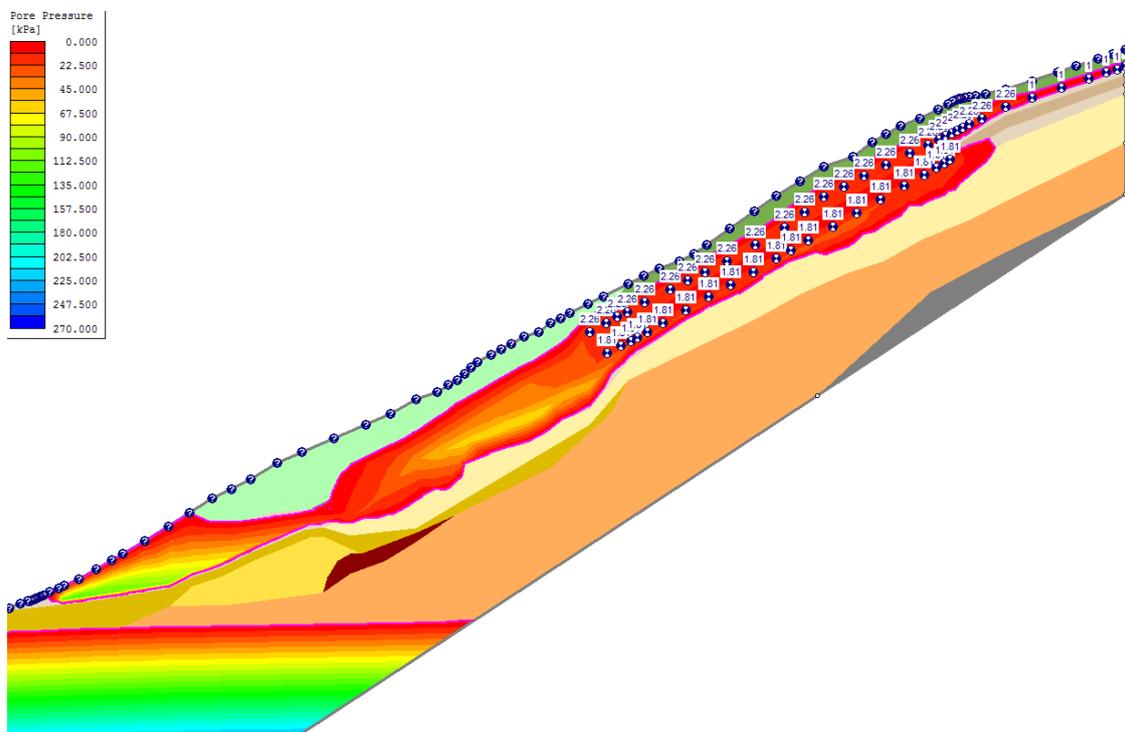


Abbildung 71: Beispielergebnis der Grundwassermodellierung mit Eingabe der Messdaten im oberen Hangbereich

Obwohl die Ergebnisse aus SLIDE für die Sicherheitsbeurteilung dieses Kriechhanges durchaus sinnvoll sein können, ist die Tatsache nicht zu umgehen, dass das Programm Eingabedaten erfordert, die einer erheblichen Unschärfe unterliegen.

Das erste Problem besteht grundsätzlich darin, dass nur eine Grundwassermessstelle vorliegt. Diese Information reicht für eine genauere Modellierung der Grundwasserverhältnisse eindeutig nicht aus.

Das zweite Problem liegt in der Aufforderung des Programms, auch die Durchlässigkeiten der maßgebenden Bodenschichten im Hang einzugeben, welches eine weitere Unschärfe in ein bereits stark vereinfachtes Modell bringt.

Die wesentliche Schlussfolgerung dieser Diskussion ist, dass mit der oben beschriebenen Modellierung (analytische Sicherheitsberechnung, numerische Grundwassermodellierung mit SLIDE) aufgrund der genannten Unschärfen bei den Eingangsparametern keine bessere Beurteilung der Standsicherheit des Hanges erreicht werden kann als mit einem einfacheren Modell.

Es wurde deshalb entschieden auf ein einfacheres Modell zurückzugreifen, da diese Vorgehensweise als auf das Ausmaß an bekannten Informationen besser abgestimmt beurteilt wurde.

5.1.2 Standsicherheitsbeurteilung mit einer Gleichgewichtsbetrachtung bei hangparallelem Gleiten

Das einfachste mechanische Modell, das sich bei einer hangparallelen Gleitfläche zur Abschätzung der Standsicherheit anbietet, ist das Modell der unendlich langen Böschung (hangparalleles Gleiten) bzw. eine einfache Kräfte-Gleichgewichtsbetrachtung.

Das Modell eignet sich für Böschungen mit hangparallelen Gleitflächen. Eine zusätzliche Bedingung für die Anwendung des Modells ist ein ebener Dehnungszustand aus der Ebene.

Da der vorliegende Kriechhang diese Bedingungen weitestgehend erfüllt, kann er mit einer Gleichgewichtsbetrachtung bei hangparallelem Gleiten modelliert werden. Es handelt sich hierbei um eine abgewandelte Form des Modells der unendlich langen Böschung, da aufgrund der Aushubzustände unterschiedliche Erddrücke oberhalb und unterhalb der betrachteten Lamelle eingegeben werden.

Die Möglichkeit der nachvollziehbaren Berücksichtigung aller maßgebenden Einflussgrößen (Bauzustände, Porenwasserdrücke und Grundwasserstände, Ankerkräfte) im Modell stellt einen wesentlichen Vorteil dar.

5.2.1 Geometrie

Grundsätzlich wird die Geometrie des Modells durch die Hangneigung (β) und die Tiefe der Gleitfläche bestimmt.

Die Tiefe der Gleitfläche wird gemäß Inklinometer INK 9 mit 11,0 m u.GOK angenommen und die Hangneigung gemäß dem Bericht der 3P Geotechnik [6] und dem Längenschnitt [10] mit $27,5^\circ$ angenommen.

Aus dem gegebenen Lageplan [2] wurde eine Breite des Gleitkörpers aus der Ebene (B) von 45,0 m angenommen.

Die Länge des betrachteten Gleitkörpers in der Ebene (b) wurde mit 93,0 m angenommen, welche aus dem Längenschnitt hervorgeht und bei der angenommenen Gleitflächentiefe und Gleitkörperbreite aus der Ebene ein Gesamtvolumen von ca. 45.000 m³ ergibt.

Bis zur Gleitflächentiefe muss auch ein Bodenprofil angenommen werden, welches dem Bohrprofil INK KB 9/12 entnommen wurde. Der Hanglehm (Schicht L4) steht bis zur Tiefe von 5,4 m u.GOK an und geht in dieser Tiefe in die umgelagerte Moräne (Schicht L6a) über. Ab 5,4 m u.GOK steht die umgelagerte Moräne bis zur Gleitfläche an.

In Tabelle 25 sind die Größen zusammengefasst, die die Geometrie des Modells festlegen. Die Werte in Tabelle 25 stellen gleichbleibende Größen dar und gelten für alle Berechnungen.

Tabelle 25: Eingabewerte - Geometrie

Größe	Abkürzung	Wert	Einheit
Hangneigung	β	27,5	[°]
Gleitkörperbreite aus der Ebene	B	45,0	[m]
Gleitkörperlänge in der Ebene	b	93,0	[m]
Mächtigkeit, Schicht L4	h_{L4}	5,4	[m]
Mächtigkeit, Schicht L6a	h_{L6a}	5,6	[m]

5.2.2 Bodenkennwerte

Als festgelegte Bodenkennwerte werden die Wichten der jeweiligen Bodenschichten angegeben. Die Feuchtwichten sind im Bericht der 3P Geotechnik [6] angeführt und die gesättigten Wichten wurden angenommen.

Der Reibungswinkel und die Kohäsion in der Gleitfläche sowie im Material sind zunächst als unbekannt anzunehmen. Es ist das Ziel der Modellkalibrierung bzw. Rückrechnung, wie oben schon angedeutet, plausible Werte für diese Größen zu ermitteln. Als Richtwerte dienen jene Werte aus den Laborversuchen (siehe Abschnitt 2.2.3).

Die Bodenkennwerte für das Modell werden in Tabelle 26 angeführt.

Tabelle 26: Eingabewerte – Bodenkennwerte

Größe	Abkürzung	Wert	Einheit
Feuchtwichte, Schicht L4	γ_{L4}	20,0	[kN/m ³]
Gesättigte Wichte, Schicht L4	$\gamma_{sat,L4}$	21,0	[kN/m ³]
Feuchtwichte, Schicht L6a	γ_{L6a}	21,0	[kN/m ³]
Gesättigte Wichte, Schicht L6a	$\gamma_{sat,L6a}$	22,0	[kN/m ³]
Reibungswinkel (in der Gleitfläche)	φ	variabel	[°]
Kohäsion (in der Gleitfläche)	c	variabel	[kN/m ²]

Für die Schicht L4 wird bis zur Tiefe des gemessenen Grundwasserspiegels die Feuchtwichte angesetzt. Unter dem gemessenen Grundwasserspiegel wird die gesättigte Wichte zur Berechnung des Gewichtes angesetzt.

Für die Schicht L6a wird angenommen, dass diese nahezu gesättigt ist. Daher wird in diesem Bereich zur Berechnung des Gewichtes die gesättigte Wichte verwendet.

Zur Durchlässigkeit sollen die Aussagen im Bohrprofil erwähnt werden. Die Durchlässigkeit des Hanglehms in diesem Bereich wird als „wasserdurchlässig bis gering wasserdurchlässig“ beschrieben. Die Durchlässigkeit der umgelagerten Moräne in diesem Bereich wird als „gering wasserdurchlässig bis wasserundurchlässig“ beschrieben.

5.2.3 Grundwasser und Porenwasserdruckkraft

Im Modell wird die Grundwassersituation gemäß den Messungen in der Kernbohrung KB 10/12 berücksichtigt. Für die Modellkalibrierung ist somit die Möglichkeit vorgesehen, die gemessenen Grundwasserstände bzw. Porenwasserdrücke einzugeben.

Die Eingabe der Messdaten erfolgt direkt über die Variablen t_{GW} und t_{PWDG} . Die Variable t_{GW} stellt die Tiefe des freien Grundwasserspiegels im Hanglehm dar. Die Variable t_{PWDG} stellt die vom Porenwasserdruckgeber gemessene Druckhöhe in der Tiefe von 11,0 m u.GOK dar. Beide Größen sind vertikale Abstände, gemessen von der Geländeoberfläche.

Aufgrund der angegebenen Durchlässigkeiten wird angenommen, wie im Abschnitt 3.5 erwähnt, dass der Grundwasserkörper im Hanglehm nur bis zur Unterkante des Hanglehms reicht. Für die Sicherheitsbetrachtung in der bestehenden Gleitfläche ist daher die Größe t_{GW} nur für die Ermittlung der Gewichtskraft maßgebend, da unterhalb dieser Tiefe die gesättigten Wichten angesetzt werden.

Für die Ermittlung des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche (p_w) und somit der Porenwasserdruckkraft (U), ist die Größe t_{PWDG} maßgebend. Der Porenwasserdruckgeber befindet sich in der Tiefe von 11,0 m u.GOK und gibt somit den Porenwasserdruck in der Gleitflächentiefe an. Es wird für das Modell angenommen, dass dieser Wasserdruck über die gesamte Gleitfläche konstant wirkt.

Der Porenwasserdruck in der Gleitfläche errechnet sich nach folgender Formel:

$$p_w = \gamma_w \cdot (11,0 - t_{PWDG})$$

Die Porenwasserdruckkraft lässt sich auf Basis folgender Formel ermitteln:

$$U = p_w \cdot \frac{b}{\cos\beta} \cdot B$$

Die Eingabedaten zur Beschreibung der Grundwassersituation und die daraus abgeleiteten Drücke und Kräfte sind in Tabelle 27 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 27: Eingabewerte für Grundwassersituation

Größe	Abkürzung	Einheit
Gemessener Grundwasserstand im Hanglehm	t_{GW}	[m u.GOK]
Gemessene Druckhöhe in der Gleitfläche	t_{PWDG}	[m u.GOK]
Porenwasserdruck in der Gleitfläche	p_w	[kN/m ²]
Porenwasserdruckkraft	U	[kN]

5.2.4 Gewichtskraft-, Reibungs- und Kohäsionskraft

Die Gewichtskraft wird mit den angegebenen Wichten unter Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse berechnet.

Die Formel zur Berechnung der Gewichtskraft wird hier angeführt als:

$$G = [\gamma_{L4} \cdot t_{GW} + \gamma_{sat_{L4}} \cdot (h_{L4} - t_{GW}) + \gamma_{sat_{L6a}} \cdot h_{L6a}] \cdot b \cdot B$$

Die Komponente der Gewichtskraft, die normal zur Gleitfläche gerichtet ist, ist für die Berechnung der Reibungskraft heranzuziehen. Sie ist mit der folgenden Formel zu berechnen:

$$G_N = G \cdot \cos\beta$$

Die Komponente der Gewichtskraft, die parallel zur Gleitfläche gerichtet ist, stellt die wesentliche destabilisierende Kraft dar und wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$G_{//} = G \cdot \sin\beta$$

Von der normal zur Gleitfläche wirkenden Komponente der Gewichtskraft kann, nach Abzug der Porenwasserdruckkraft, die in der Gleitfläche wirkende Reibungskraft bestimmt werden:

$$F_R = (G_N - U) \cdot \tan\varphi'$$

Die Kohäsionskraft in der Gleitfläche wird durch Multiplizieren der eingegebenen Kohäsion mit der Fläche der Gleitfuge bestimmt:

$$C = c \cdot \frac{b}{\cos\beta} \cdot B$$

In Tabelle 28 sind die in diesem Abschnitt angeführten Kräfte nochmals zusammengefasst.

Tabelle 28: Gewichtskraft-, Reibungs- und Kohäsionskraft

Größe	Abkürzung	Einheit
Gewichtskraft	G	[kN]
Gewichtskraft normal zur Gleitfläche	G_N	[kN]
Gewichtskraft parallel zur Gleitfläche	$G_{//}$	[kN]
Reibungskraft in der Gleitfläche	F_R	[kN]
Kohäsionskraft in der Gleitfläche	C	[kN]

5.2.5 Resultierende Ankerkraft

Die Ankerkräfte werden durch den Ansatz einer resultierenden Ankerkraft (A) im Modell berücksichtigt. Der Widerstand, den die Ankerkraft in der Gleitfläche leistet, besteht aus der hangparallelen Komponente der resultierenden Ankerkraft ($A_{//}$) und einer Reibungskraft (A_R), die durch die normal auf die Gleitfläche wirkende Komponente der Ankerkraft mobilisiert wird.

Die im Modell angesetzte Ankerkraft (A) wird durch die Bildung einer Resultierenden aller Litzenankerkräfte bestimmt. Die Litzenanker wurden unter einem Winkel von 25° zur Horizontalen eingebaut. Zur Bestimmung der Resultierenden aus diesen Ankerkräften waren folgende Annahmen erforderlich.

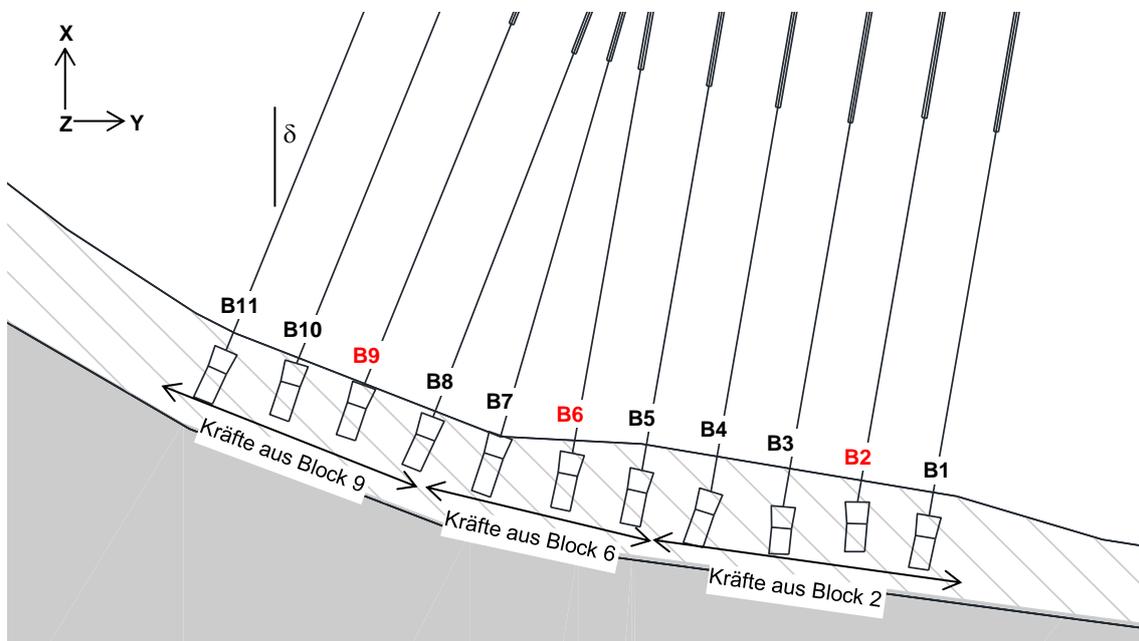


Abbildung 73: Annahmen zur Berechnung der resultierenden Ankerkraft [2]

Da Messungen nur in den Ankerblöcken 2, 6, und 9 erfolgten, ist eine Annahme der gemessenen Ankerkräfte für die anderen Ankerblöcke erforderlich. Die Annahmen hierzu sind in Abbildung 73 angeführt.

Zur Berechnung der resultierenden Ankerkraft wurde ein Koordinatensystem eingeführt, das in Abbildung 73 ebenfalls angedeutet ist.

Zur Bestimmung der Komponenten der gemessenen Ankerkräfte in Richtung der x- bzw. y-Achse wurde der Winkel δ angeführt. Zur Bestimmung dieses Winkels wurden die Ankerorientierungen im Grundriss möglichst normal zur Spritzbetonwand angenommen.

Die gemessenen bzw. angesetzten Ankerkräfte in jedem Ankerblock a_i können nun in x-, y- und z-Komponenten folgendermaßen aufgeteilt werden:

$$a_{x_i} = a_i \cdot \cos 25 \cdot \cos \delta$$

$$a_{y_i} = a_i \cdot \cos 25 \cdot \sin \delta$$

$$a_{z_i} = a_i \cdot \sin 25$$

Hierbei werden die Ankerkräfte zur Bestimmung der x- und y-Komponenten zuerst durch Multiplikation mit dem Cosinus vom Einbauwinkel ($\alpha_E = 25^\circ$) in den Grundriss gebracht und anschließend jeweils mit dem Cosinus bzw. Sinus des Winkels δ multipliziert. Die z-Komponente hängt nur mit dem Einbauwinkel α_E zusammen.

Die Annahmen für den Winkel δ sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29: Annahmen für den Winkel δ

Ankerblock	Winkel δ	Einheit
Block 1	9,8	[°]
Block 2	9,8	[°]
Block 3	9,8	[°]
Block 4	9,8	[°]
Block 5	9,8	[°]
Block 6	10,0	[°]
Block 7	16,0	[°]
Block 8	21,0	[°]
Block 9	22,0	[°]
Block 10	22,0	[°]
Block 11	22,0	[°]

Die Größe der Resultierenden in der x-z-Ebene (welche der Schnittführung entspricht und annähernd parallel zur Falllinie ist) wird nach Summation der Komponenten in die x- bzw. z-Richtung über alle Ankerblöcke mit folgender Formel berechnet:

$$A = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n a_{x_i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n a_{z_i}\right)^2}$$

Der von der resultierenden Ankerkraft und der Horizontalen eingeschlossene Winkel (α) in der x-z-Ebene wird mithilfe folgender Formel bestimmt:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^n a_{z_i}}{\sum_{i=1}^n a_{x_i}}\right)$$

Der Winkel ϑ , der zur Berechnung der Komponenten der resultierenden Ankerkraft in der Gleitfläche notwendig ist, berechnet sich somit wie folgt:

$$\vartheta = 90 - \alpha - \beta$$

Es können nun die Widerstände in der Gleitfläche berechnet werden, die durch die Ankerkräfte aktiviert werden. Die hangparallele Komponente der Ankerkraft ergibt sich zu:

$$A_{//} = A \cdot \sin\vartheta$$

Die Komponente der Ankerkraft normal zur Gleitfläche und die dadurch mobilisierte Reibungskraft errechnen sich wie folgt:

$$A_N = A \cdot \cos\vartheta$$

$$A_R = A_N \cdot \tan\varphi'$$

Da nun alle Annahmen zur Berücksichtigung der Ankerkraft im Modell beschrieben sind, werden sie nochmals in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Größen zur Berücksichtigung der Ankerkräfte im Modell

Größe	Abkürzung	Einheit
Ankerkraft in einem Ankerblock	a_i	[kN]
Resultierende Ankerkraft	A	[kN]
Komponente der Ankerkraft parallel zur Gleitfläche	$A_{//}$	[kN]
Komponente der Ankerkraft normal zur Gleitfläche	A_N	[kN]
Durch die Ankerkraft mobilisierte Reibungskraft	A_R	[kN]
Winkel zwischen der Resultierenden und der Horizontalen	α	[°]
Winkel zur Bestimmung der Ankerkräfte in der Gleitfuge	ϑ	[°]

5.2.6 Erddruckkraft

Im konventionellen Modell der unendlich langen Böschung heben sich in einem Ursprungszustand die Erddruckkräfte, die auf die Seiten der betrachteten Lamelle wirken, gegenseitig auf. Für einen Aushubzustand ist dies nicht mehr der Fall, da der Boden durch diesen Vorgang auf einer Seite entfernt wird. Daher ist für einen Aushubzustand die Berücksichtigung einer aktiven Erddruckkraft als zusätzliche destabilisierende Komponente notwendig.

Für dieses Modell wird der Erddruckansatz nach Chu [35] verwendet. Mit dem bekannten Spannungszustand in der Gleitfläche wird eine Polpunktkonstruktion durchgeführt, und somit der Spannungszustand auf einer Fläche normal zur Gleitfläche im Fall eines aktiven Versagens ermittelt. Die Bestimmung erfordert als Eingabe die Normalspannung und die Schubspannung auf der Gleitfläche.

Die Methode nach Chu wird in Abbildung 74 im Mohr'schen Spannungsdiagramm dargestellt.

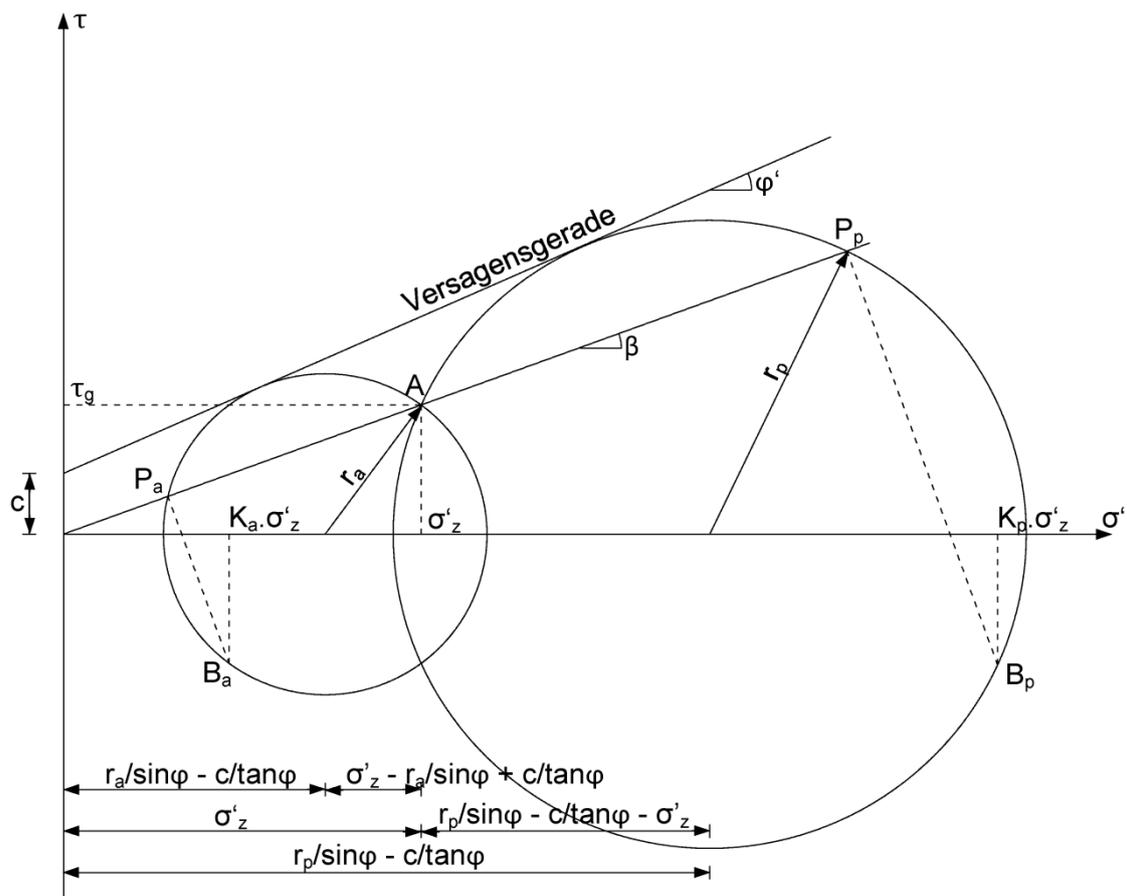


Abbildung 74: Methode nach Chu zur Berechnung des aktiven Erddrucks [35]

Tabelle 31 enthält die Formeln zur Berechnung der oben angeführten Variablen für beide Bereiche.

Tabelle 31: Größen zur Ermittlung der Spannungen in der Gleitfläche

Größe	Bereich 1	Bereich 2	Einheit
G	$t_{GW} \cdot \gamma_{L4} + (h_{L4} - t_{GW}) \cdot \gamma_{satL4}$	$t_{GW} \cdot \gamma_{L4} + (h_{L4} - t_{GW}) \cdot \gamma_{satL4} + h_{L6a} \cdot \gamma_{satL6a}$	[kN]
p_w	$(h_{L4} - t_{GW}) \cdot \cos^2\beta \cdot \gamma_w^{**}$	$(11,0 - t_{PWDG}) \cdot \gamma_w$	[kN/m ²]
U	$(h_{L4} - t_{GW}) \cdot \cos\beta \cdot \gamma_w$	$(11,0 - t_{PWDG}) \cdot \gamma_w \cdot \frac{1}{\cos\beta}$	[kN]

**Für Bereich 1 wird der Porenwasserdruck unter Berücksichtigung der Strömung im freien Grundwasserkörper (Strömungsnetz) berechnet

In einem Zwischenschritt wird der Radius des Mohr'schen Spannungskreises für ein aktives Versagen mit der folgenden Formel ermittelt:

$$r_a^2 = \tau_g^2 + \left(\sigma'_z - \frac{r_a}{\sin\varphi} + \frac{c}{\tan\varphi} \right)^2$$

Der aktive Erddruckbeiwert K_a errechnet sich nun zu:

$$K_a = \frac{\sigma'_z - 2 \cdot \left(\sigma'_z - \frac{r_a}{\sin\varphi} + \frac{c}{\tan\varphi} \right)}{\sigma'_z}$$

Um den Erddruck p_a zu ermitteln, der auf die Fläche normal zur Gleitfuge wirkt, ist die nachstehende Formel anzuwenden:

$$p_a = \frac{1}{2} \cdot \sigma'_z \cdot K_a \cdot \frac{1}{\cos\beta}$$

Die Erddruckkraft, die im Modell als destabilisierende Einwirkung angesetzt wird, lässt sich für die beiden Bereiche mit folgenden Formeln berechnen.

$$E_{a_o} = p_{a_o} \cdot (h_{L4} \cdot \cos\beta) \cdot B$$

$$E_{a_u} = p_{a_u} \cdot (h_{L6a} \cdot \cos\beta) \cdot B$$

Die aktiven Erddrücke und Erddruckkräfte sind in Tabelle 32 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 32: Größen zur Berücksichtigung des Erddrucks im Modell

Größe	Abkürzung	Einheit
Erddruck auf Fläche normal zur Gleitfuge, Bereich 1	$p_{a,o}$	[kN/m ²]
Erddruck auf Fläche normal zur Gleitfuge, Bereich 2	$p_{a,u}$	[kN/m ²]
Erddruckkraft, Bereich 1	$E_{a,o}$	[kN]
Erddruckkraft, Bereich 2	$E_{a,u}$	[kN]

5.2.7 Stützkraft eines Erdkeils

Um eine Betrachtung der Sicherheit in einem Teilaushubzustand zu ermöglichen, kann auch eine Stützkraft zufolge eines Erdkeils berücksichtigt werden.

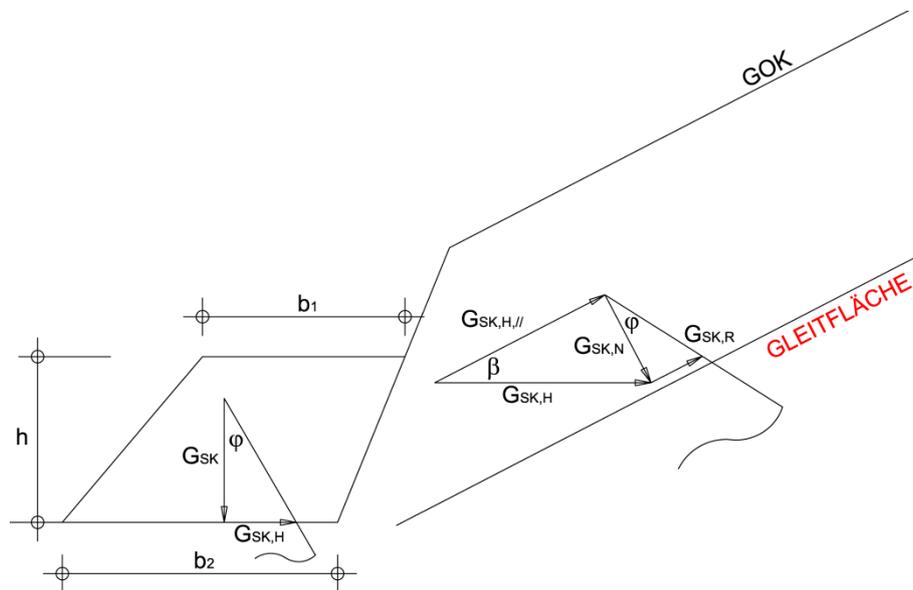


Abbildung 76: Berücksichtigung der Stützkraft eines Erdkeils

Die in Abbildung 76 dargestellten Dimensionen des Stützkeils können z.B. anhand von Fotodokumentationen abgeschätzt werden; mit der zusätzlichen Annahme einer Länge des Stützkeils aus der Ebene (L) wird das Gewicht G_{SK} mit der Feuchtwichte berechnet. Die Gewichtskraft G_{SK} mobilisiert die Reibkraft $G_{SK,H}$, deren Komponente in der Gleitfuge, $G_{SK,H,||}$ berechnet werden kann. Eine Komponente der Reibkraft $G_{SK,H}$ wirkt normal auf die Gleitfuge und mobilisiert eine weitere Reibkraft $G_{SK,R}$, die in der Gleitfuge wirkt und ebenfalls berücksichtigt wird.

Tabelle 33 fasst die oben angeführten Variablen nochmals zusammen und gibt die Formeln an, mit denen sie berechnet werden.

Tabelle 33: Berücksichtigung der Stützkraft eines Erdkeils

Größe	Abkürzung	Formel	Einheit
Gewicht des Stützkeils	G_{SK}	$\gamma \cdot \left(\frac{b_1+b_2}{2}\right) \cdot h \cdot L^*$	[kN]
Reibkraft durch das Gewicht des Stützkeils	$G_{SK,H}$	$G_{SK} \cdot \tan\varphi$	[kN]
Komponente von $G_{SK,H}$, parallel zur Gleitfläche	$G_{SK,H, }$	$G_{SK,H} \cdot \cos\beta$	[kN]
Komponente von $G_{SK,H}$ normal zur Gleitfläche	$G_{SK,N}$	$G_{SK,H} \cdot \sin\beta$	[kN]
Durch $G_{SK,H,N}$ mobilisierte Reibkraft in der Gleitfläche	$G_{SK,R}$	$G_{SK,N} \cdot \tan\varphi$	[kN]

* L – Länge des Stützkeils aus der Ebene

5.2.8 Sicherheitsberechnung

Zur Berechnung der Sicherheit wird das Verhältnis zwischen den stabilisierenden Kräften und den destabilisierenden Kräften, die in der Gleitfläche wirken und in dem vorigen Kapitel vorgestellt wurden, gebildet.

Die stabilisierenden Kräfte setzen sich aus den Reibungs- und Kohäsionskräften, Ankerkräften, und den Widerständen zufolge eines Erdkeils zusammen.

$$R = F_R + C + A_{//} + A_R + G_{SK_{H//}} + G_{SK_R}$$

Die destabilisierenden Kräfte sind die hangparallele Komponente der Gewichtskraft und die im Aushubzustand wirkenden aktiven Erddruckkräfte.

$$T = G_{//} + E_{a_o} + E_{a_u}$$

Die Sicherheitszahl ist der Quotient aus den oben angeführten Größen:

$$\eta = \frac{R}{T}$$

5.3 Sensitivitätsanalyse am Berechnungsmodell

Bevor die Modellkalibrierung durchgeführt wird, ist es zweckmäßig, die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse am verwendeten Berechnungsmodell zu präsentieren. Diese Untersuchung gibt Auskunft über den Einfluss der einzelnen Eingabeparameter auf die Sicherheitszahl, und erleichtert dadurch die Interpretation der Kalibrierungsergebnisse.

Diese Sensitivitätsanalyse betrachtet den Einfluss des Grundwasserstandes im Hanglehm, des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche, der Ankerkräfte, des Reibungswinkels, und der Kohäsion auf die Sicherheitszahl.

Die variierten Parameter sind in Tabelle 34 enthalten. Das Wertepaar von Reibungswinkel und Kohäsion, das für die Sensitivitätsanalyse verwendet wurde, stellt eines der in weiterer Folge für die Modellkalibrierung herangezogenen Wertepaare dar.

Tabelle 34: Parameter für die Sensitivitätsanalyse

Größe	Abkürzung	Wert	Einheit
Gemessener Grundwasserstand	t_{GW}	3,04*	[m u.GOK]
Gemessene Druckhöhe in der Gleitfläche	t_{PWDG}	9,31*	[m u.GOK]
Resultierende Ankerkraft	A	0	[MN]
Reibungswinkel (in der Gleitfläche)	φ'	30,5	[°]
Kohäsion (in der Gleitfläche)	c'	1,0	[kN/m ²]

*Mittelwert der Messreihe

Zur Ermittlung des Einflusses eines Parameters auf die Sicherheitszahl wird dieser innerhalb eines vorgegebenen Wertebereiches variiert, während alle übrigen Parameter die in Tabelle 34 enthaltenen Werte beibehalten.

Grundwasserstand im Hanglehm

Um den Einfluss des gemessenen Grundwasserstandes im Hanglehm, t_{GW} , zu untersuchen, wurde dieser zwischen 2,00 und 4,00 m u.GOK variiert. Hierbei wurde die Sicherheit für 0,10 m-Intervalle des Grundwasserstandes berechnet und in Abhängigkeit des Grundwasserstandes aufgetragen. Das Ergebnis kann Abbildung 77 entnommen werden.

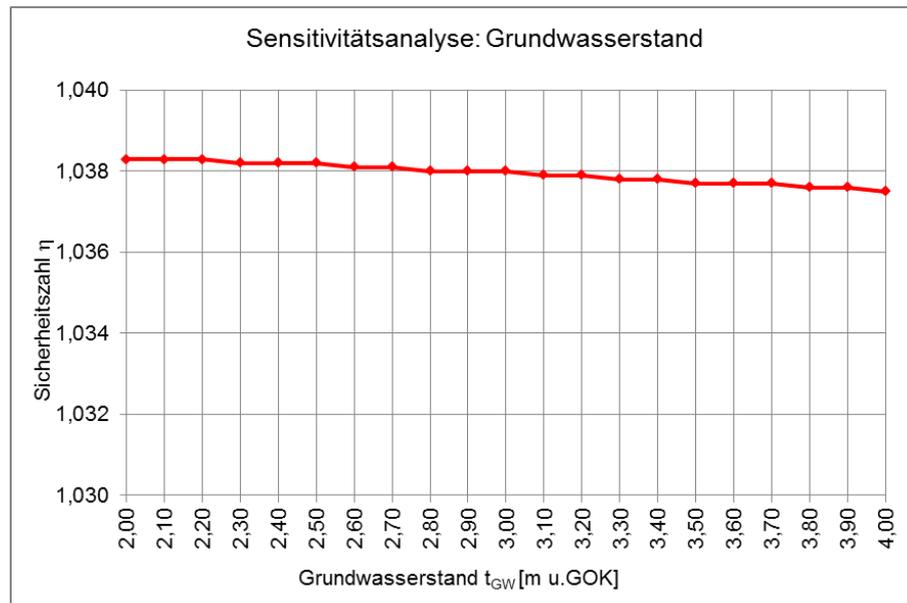


Abbildung 77: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η vom Grundwasserstand im Hanglehm

Aus Abbildung 77 ist ersichtlich, dass zwischen der Sicherheitszahl und dem Grundwasserstand im Hanglehm nur einen sehr untergeordneten Zusammenhang besteht. Bei Variation des Grundwasserstandes um 2 m bleibt die Sicherheitszahl annähernd gleich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Porenwasserdruck in der Gleitfläche, der für die Sicherheit in der Gleitfläche maßgebend ist, nicht vom Grundwasserstand im Hanglehm abhängt, sondern über die Größe t_{PWDG} berücksichtigt wird.

Die Größe t_{GW} hat lediglich auf die Berechnung der Gewichtskraft einen Einfluss, da unter diesem Grundwasserspiegel die gesättigten Wichten angesetzt werden.

Diese Beobachtung entspricht auch der Realität, da die Grundwassermessungen zeigen, dass der Porenwasserdruck in der Gleitfläche deutlich kleiner als der hydrostatische Wasserdruck (bezogen auf den Grundwasserspiegel im Hanglehm) in dieser Tiefe wäre.

Druckhöhe in der Gleitfläche

Die Druckhöhe in der Gleitfläche, die über die Größe t_{PWDG} im Modell berücksichtigt wird, wurde zwischen 8,50 und 10,00 m u.GOK variiert, um den Einfluss dieses Parameters auf die Sicherheitszahl zu ermitteln. Die Sicherheitszahl wurde für 0,10 m-Intervallen der Druckhöhe in der Gleitfläche berechnet.

In diesem Fall ist ein, im betrachteten Wertebereich, annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Porenwasserdruck in der Gleitfläche und der Sicherheitszahl erkennbar. Eine Abnahme der Druckhöhe bzw. Zunahme von t_{PWDG} um 0,8 m bewirkt eine Erhöhung der Sicherheit um 5 %.

Demzufolge bewirkt eine Änderung der Druckhöhe von 0,16 m eine Änderung der Sicherheitszahl um 1 %. In Abbildung 78 wird die Sicherheitszahl in Abhängigkeit der Druckhöhe in der Gleitfläche aufgetragen.

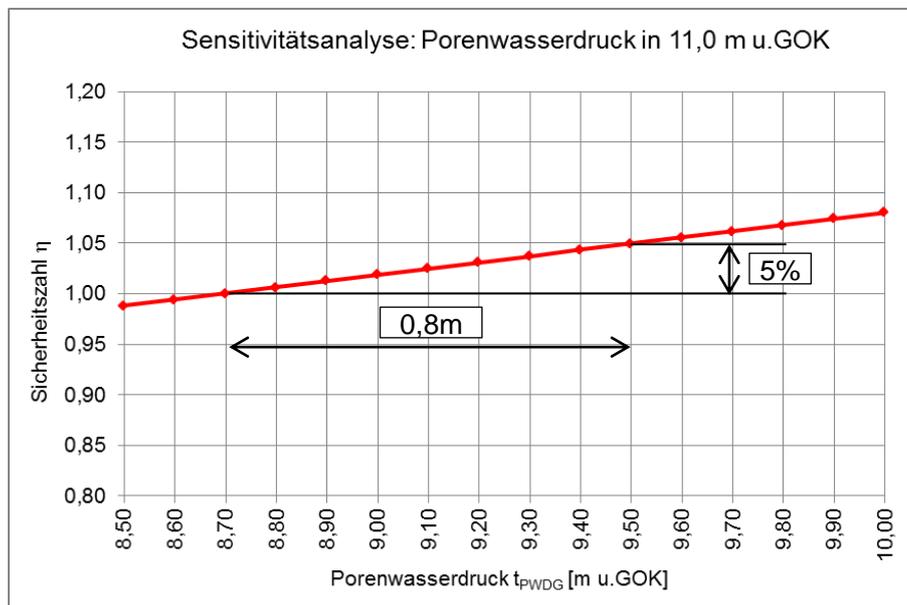


Abbildung 78: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der Druckhöhe in der Gleitfläche

Es wird hier die Aussage getroffen, dass eine Änderung der Druckhöhe in der Gleitfläche eine direkte Auswirkung auf die Sicherheitszahl hat. Ein Anstieg des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche ist somit in der Lage, die Sicherheitszahl auf Werte von 1,0 oder niedriger herabzusetzen und gegebenenfalls eine Bewegung auszulösen.

Resultierende Ankerkraft

Um den Einfluss der Ankerkräfte auf die Sicherheitszahl zu ermitteln wurden diese zwischen 0 und 45 MN variiert, wobei sich ein wiederum annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Ankerkraft und der Sicherheitszahl herausstellte. Für den von der Horizontalen und der resultierenden Ankerkraft eingeschlossenen Winkel α wurde 25° angenommen.

Der Zusammenhang wird in Abbildung 79 dargestellt. Für eine Sicherheitserhöhung von 5 % ist eine Ankerkraft von 21,0 MN zusätzlich aufzubringen. Dies entspricht 4,2 MN um eine Sicherheitserhöhung von 1 % zu erzielen.

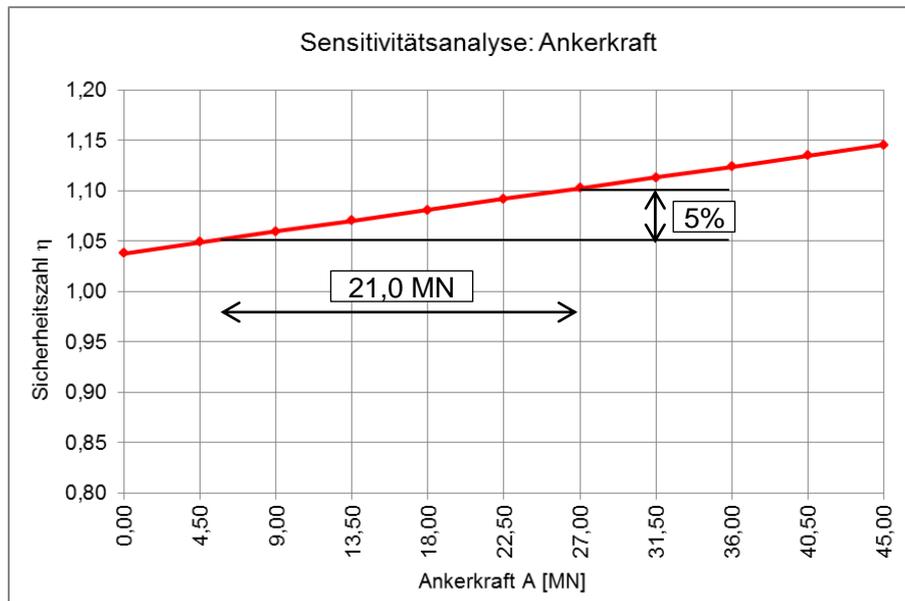


Abbildung 79: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der resultierenden Ankerkraft

Diesen Überlegungen zufolge wirken sich Änderungen in den Ankerkräften direkt auf die Sicherheitszahl aus. Etwaige Ankerkrafterhöhungen nach einem Bewegungsvorgang sind z.B. in der Lage, die Sicherheitszahl zu erhöhen und somit wiederum ein Gleichgewicht herzustellen.

Reibungswinkel und Kohäsion

Zum Schluss wurde der Einfluss des Reibungswinkels und der Kohäsion in der Gleitfläche auf die Sicherheitszahl untersucht. Im ersten Fall wurde der Reibungswinkel bei konstanter Kohäsion zwischen 27° und 32° , und in einem zweiten Fall wurde bei konstantem Reibungswinkel die Kohäsion von 0 bis 10 kPa variiert.

Es stellt sich heraus, dass eine Änderung des Reibungswinkels um 1° eine Änderung der Sicherheitszahl um 4 % bewirkt, während eine Änderung der Kohäsion um 1 kPa eine Änderung der Sicherheitszahl um 1 % bewirkt.

Für die Scherparameter in der Gleitfläche ist von einer zu vernachlässigenden Kohäsion auszugehen. In der nachfolgenden Modellkalibrierung wird entweder die Kohäsion vernachlässigt, oder es wird eine geringfügige Kohäsion von 1 kPa angesetzt. Angesichts dieser kleinen Bandbreite an möglichen Werten ist der Einfluss der Kohäsion auf die Sicherheitszahl als untergeordnet bzw. verschwindend anzusehen.

Anders ist es bei dem Reibungswinkel, auf den die Sicherheitszahl sehr sensibel reagiert. Wie am Anfang dieses Kapitels erwähnt, ist eine genaue Bestimmung des Reibungswinkels in der Gleitfläche schwierig bzw. unmöglich. Das Problem besteht nun

darin, dass bei geringfügiger Änderung des Reibungswinkels, welcher sehr schwierig zu bestimmen ist, das Modell mit relativ großen Änderungen im Ergebnis reagiert.

Dies verdeutlicht die unumgängliche Notwendigkeit einer Modellkalibrierung, bevor Sicherheitsberechnungen mit dem Modell durchgeführt werden können; durch die Nachbildung der Realität anhand der gemessenen Größen können für das gegebene Berechnungsmodell Scherparameter angegeben werden, die für das gegebene Modell zu plausiblen Ergebnissen führen.

Die Zusammenhänge zwischen Reibungswinkel bzw. Kohäsion und Sicherheitszahl sind in den Abbildungen 80 und 81 dargestellt.

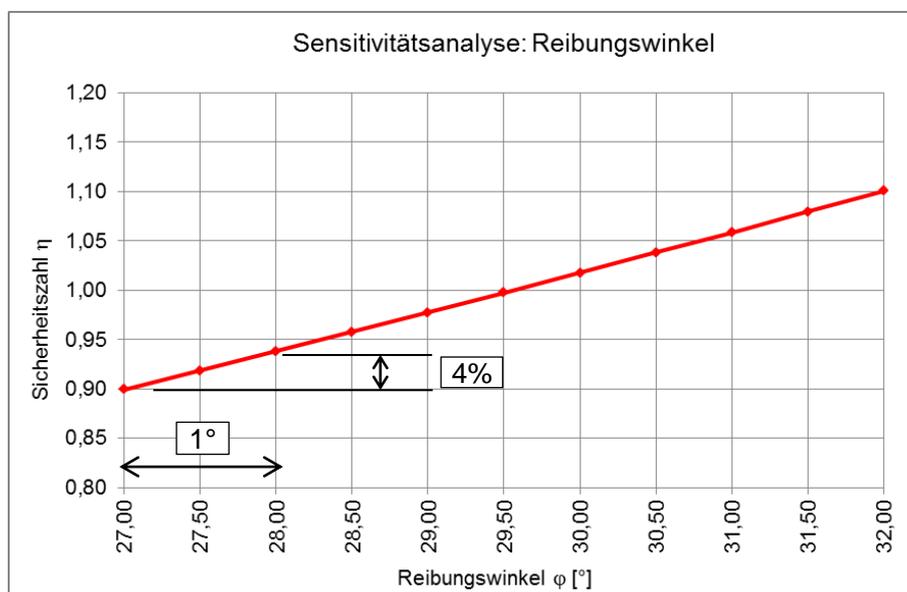
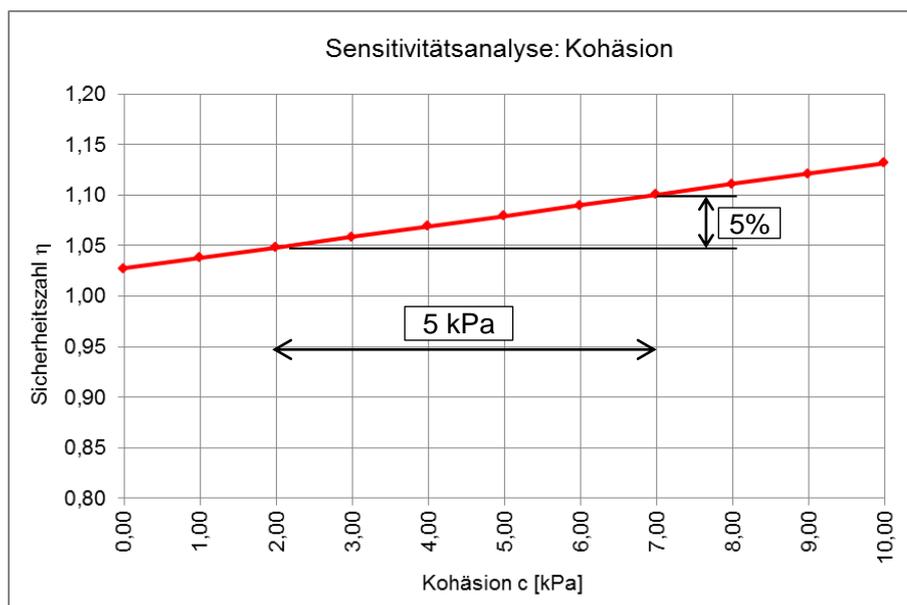


Abbildung 80: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η vom Reibungswinkel

Abbildung 81: Abhängigkeit der Sicherheitszahl η von der Kohäsion

5.4 Kalibrierung des Modells

Das Ziel der Modellkalibrierung ist es, Werte für die Scherparameter in der Gleitfläche zu ermitteln, die für die weitere Sicherheitsbeurteilung herangezogen werden können.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich die globale Sicherheitszahl eines Kriechhangs zwischen ungefähr $\eta = 1,0$ und $\eta = 1,1$ befindet. Für Zeiträume mit erhöhten Bewegungsraten wird eine Sicherheitszahl von ca. $\eta = 1,0$ bzw. geringfügig geringer als $\eta = 1,0$ angenommen.

Somit ist die Vorgehensweise für die Kalibrierung gegeben: es sind jene Scherparameter in der Gleitfläche zu ermitteln, die im Zeitraum der erhöhten Bewegungsbeträge mit bekannten und quantifizierbaren Randbedingungen zu einer Sicherheitszahl um ca. $\eta = 1,0$ führen. Es handelt sich hierbei um eine „Rückrechnung“ der Sicherheitszahlen, bei der die zu den Zeitpunkten der Bewegungsvorgänge vorhandenen Grundwasserstände, Porenwasserdrücke, Ankerkräfte, und Bauzustände als Eingabedaten dienen.

Für die Kalibrierung wurden drei wesentliche Bewegungsvorgänge, die im Inklinometer INK 9 gemessen wurden, herangezogen. Jeder der Bewegungsvorgänge stellt ein Kalibrierungsfall dar; für jeden Kalibrierungsfall wurde die Sicherheit zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb des Bewegungsvorganges berechnet.

Die drei Kalibrierungsfälle werden im Folgenden näher beschrieben und sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35: Kalibrierungsfälle

Bezeichnung	Zeitraum	Bewegungsvorgang
Kalibrierungsfall 1	31.01.2013 – 12.02.2013	7
Kalibrierungsfall 2	06.03.2013 – 14.03.2013	8
Kalibrierungsfall 3	28.05.2013 – 05.06.2013	9

Die Berechnungen erfolgten für jeden Kalibrierungsfall mit den in Tabelle 36 dargestellten Wertepaaren. Basierend auf den Berechnungsergebnissen, welche am Ende dieses Kapitels präsentiert werden, konnte ein plausibler Ansatz für die Scherfestigkeit in der Gleitfläche gefunden werden.

Tabelle 36: Verwendete Wertepaare für die Kalibrierungsberechnungen

Wertepaar	φ [°]	c [kN/m ²]
1	30,0	0
2	30,0	1
3	30,5	0
4	30,5	1
5	31,0	0

5.4.1 Kalibrierungsfall 1

Der Kalibrierungsfall 1 entspricht dem Bewegungsvorgang 7, der während der letzten Aushubarbeiten zur Herstellung des Einschnittes Ende Jänner bzw. Anfang Februar 2013 stattgefunden hat.

Für diesen Kalibrierungsfall wurde die Sicherheit zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet. Die Eingabedaten zu jedem Berechnungszeitpunkt (Grundwasserdaten, Ankerkräfte, Stützkeile und Erddruckkräfte) werden im Folgenden angeführt.

Tabelle 37: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 1

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	t_{GW} [m.u.GOK]	t_{PWDG} [m.u.GOK]
1-1	01.02.2013	3,12	9,30
1-2	03.02.2013	3,13	9,17
1-3	07.02.2013	3,14	9,26

Die Größe und Richtung der resultierenden Ankerkraft wurden gemäß der im Kapitel 5.2.5 beschriebenen Vorgehensweise berechnet. Die gemessenen Ankerkräfte in den Ankerblöcken 2, 6 und 9 und die berechnete Resultierende sind Tabelle 38 zu entnehmen.

Tabelle 38: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 1

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	Block 2 oben+unten [kN]	Block 6 oben+unten [kN]	Block 9 oben+unten [kN]	A [MN]	α [°]
1-1	29.01.2013	1130	1160	1090	12,0	25,8
1-2	29.01.2013	1130	1160	1090	12,0	25,8
1-3	06.02.2013	1230	1270	1110	12,8	25,8

Für die Berechnungszeitpunkte 1-1 und 1-2 mussten verbleibende Bermen als Stützkeile berücksichtigt werden, da zu diesen Zeitpunkten der Aushub noch nicht vollständig abgeschlossen war. Die Dimensionen zur Abschätzung des Volumens der Stützkeile gemäß Abbildung 76, die anhand von Fotodokumentationen angenommen wurden, sind in Tabelle 39 angeführt.

Tabelle 39: Stützkeile im Kalibrierungsfall 1

Berechnungszeitpunkt	Dimensionen des Stützkeils gem. Fotodokumentation von	h [m]	b_1 [m]	b_2 [m]	L [m]	G_{SK}^* [MN]
1-1	31.01.2013	5,50	5,00	7,40	30,00	20,46
1-2	04.02.2013	3,00	3,00	5,00	20,00	4,80

*mit Feuchtwichte $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Die Fotodokumentationen des Bauablaufes, auf Basis derer die Dimensionen der Stützkeile angenommen wurden, sind in Abbildung 82 und 83 dargestellt.



Abbildung 82: Stützkeil am 31.01.2013 [18]



Abbildung 83: Stützkeil am 04.02.2013 [18]

Die aktive Erddruckkraft ist nicht nur von dem Spannungszustand in der Gleitfläche und somit von den gemessenen Grundwasserdaten, sondern auch vom angesetzten Reibungswinkel abhängig.

Für die Berechnung der aktiven Erddruckkraft werden die Scherparameter des Bodens im Gleitkörper (nicht die Parameter in der Gleitfuge) angesetzt. Hierbei wird der angesetzte Reibungswinkel in der Gleitfläche um 1° erhöht und der Mittelwert der Kohäsion aus den Laborversuchen (13 kPa) herangezogen.

Die angesetzten Erddruckkräfte zu den jeweiligen Berechnungszeitpunkten sind in Tabelle 40 für die jeweilig angesetzten Reibungswinkel in der Gleitfläche zusammengefasst.

Tabelle 40: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 1

Berechnungszeitpunkt	$E_a / \varphi = 30,0^\circ$	$E_a / \varphi = 30,5^\circ$	$E_a / \varphi = 31,0^\circ$
	[MN]	[MN]	[MN]
1-1	28	27	27
1-2	28	28	27
1-3	28	27	27

Da nun alle erforderlichen Eingabedaten zur Berechnung der Sicherheitszahlen angeführt wurden, werden die, aufgrund von Gleichgewichtsbetrachtungen, berechneten Sicherheitszahlen in der Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 1

Berechnungszeitpunkt	η	η	η	η	η
	$\varphi = 30,0^\circ/c=0$	$\varphi = 30,0^\circ/c=1$	$\varphi = 30,5^\circ/c=0$	$\varphi = 30,5^\circ/c=1$	$\varphi = 31,0^\circ/c=0$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1-1	1,00	1,01	1,02	1,03	1,05
1-2	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01
1-3	0,97	0,98	1,00	1,01	1,01

Vom Zeitpunkt 1-1 zum Zeitpunkt 1-2 fällt die Sicherheitszahl deutlich (um 3-4 %) ab. Diese Abnahme der Sicherheitszahl ist primär auf den Aushub zurückzuführen, und teilweise auch auf den Anstieg des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche.

Vom Zeitpunkt 1-2 auf Zeitpunkt 1-3 erfolgt zwar die Entfernung der verbleibenden Berme, dieser wirken jedoch eine Ankerkrafteerhöhung und eine Abnahme des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche entgegen. Aus diesen Gründen steigt die Sicherheitszahl zum Zeitpunkt 1-3 wieder an bzw. bleibt diese gleich.

5.4.2 Kalibrierungsfall 2

Der Kalibrierungsfall 2 entspricht dem Bewegungsvorgang 8, der im März 2013 stattgefunden hat.

Für den Kalibrierungsfall 2 wurde die Sicherheit zu fünf unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet. Die Eingabedaten zu jedem Berechnungszeitpunkt (Grundwasserdaten, Ankerkräfte, Stützkeile und Erddruckkräfte) werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 42: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 2

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	t_{GW} [m.u.GOK]	t_{PWDG} [m.u.GOK]
2-1	07.03.2013	3,26	9,36
2-2	09.03.2013	3,23	9,37
2-3	11.03.2013	3,00	9,27
2-4	13.03.2013	2,55	9,21
2-5	17.03.2013	2,84	9,26

Die gemessenen Ankerkräfte in den Ankerblöcken 2, 6 und 9 und die berechnete Resultierende sind Tabelle 43 zu entnehmen.

Tabelle 43: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 2

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	Block 2 oben+unten [kN]	Block 6 oben+unten [kN]	Block 9 oben+unten [kN]	A [MN]	α [°]
2-1	07.03.2013	1330	1340	1150	13,5	25,8
2-2	07.03.2013	1330	1340	1150	13,5	25,8
2-3	12.03.2013	1360	1390	1170	13,9	25,8
2-4	12.03.2013	1360	1390	1170	13,9	25,8
2-5	17.03.2013	1340	1380	1170	13,8	25,8

Da alle Baumaßnahmen zur Herstellung des Einschnittes im Zeitraum des Kalibrierungsfalls 2 schon abgeschlossen waren, waren keine Stützkeile zu berücksichtigen.

Die angesetzten Erddruckkräfte zu den jeweiligen Zeitpunkten sind in Tabelle 44, für die jeweilig angesetzten Reibungswinkel in der Gleitfläche zusammengefasst.

Tabelle 44: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 2

Berechnungszeitpunkt	$E_a / \varphi = 30,0^\circ$	$E_a / \varphi = 30,5^\circ$	$E_a / \varphi = 31,0^\circ$
	[MN]	[MN]	[MN]
2-1	28	27	27
2-2	28	27	27
2-3	28	28	27
2-4	29	28	27
2-5	28	28	27

Die Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 2, berechnet aufgrund der Gleichgewichtsbetrachtungen bei hangparallelem Gleiten, sind in Tabelle 45 angeführt.

Tabelle 45: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 2

Berechnungszeitpunkt	η $\varphi = 30,0^\circ/c=0$	η $\varphi = 30,0^\circ/c=1$	η $\varphi = 30,5^\circ/c=0$	η $\varphi = 30,5^\circ/c=1$	η $\varphi = 31,0^\circ/c=0$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
2-1	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-2	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-3	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-4	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01
2-5	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02

Zu den ersten zwei Zeitpunkten bleiben die Sicherheiten gleich, da in den Ankerkräften bzw. Porenwasserdrücken keine bzw. nur kleine Änderungen festgestellt wurden. Zum Berechnungszeitpunkt 2-3 ist der Porenwasserdruck in der Gleitfläche angestiegen, diesem Anstieg wirkte jedoch eine Ankerkrafterhöhung entgegen. Aus diesen Gründen sind die berechneten Sicherheitszahlen in den ersten drei Zeitpunkten annähernd gleich geblieben.

Zum Berechnungszeitpunkt 2-4 findet ein Anstieg des Porenwasserdruckes statt, welcher für eine Abnahme der Sicherheitszahl von 1 % ausreicht.

Im letzten Berechnungszeitpunkt, 2-5, nimmt der Porenwasserdruck in der Gleitfläche unter Beibehaltung der angestiegenen Ankerkraft wieder ab und die Sicherheitszahl steigt um 1 % wieder an.

5.4.3 Kalibrierungsfall 3

Der Kalibrierungsfall 3 entspricht dem Bewegungsvorgang 9 Ende Mai bzw. Anfang Juni 2013.

Für den Kalibrierungsfall 3 wurde die Standsicherheit zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet. Die Eingabedaten zu jedem Berechnungszeitpunkt (Grundwasserdaten, Ankerkräfte, Stützkeile und Erddruckkräfte) werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 46: Grundwasserdaten im Kalibrierungsfall 3

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	t_{GW} [m u.GOK]	t_{PWDG} [m u.GOK]
3-1	01.06.2013	3,15	9,40
3-2	03.06.2013	2,54	9,30
3-3	05.06.2013	2,54	9,06
3-4	07.06.2013	2,54	9,14

Die gemessenen Ankerkräfte in den Ankerblöcken 2, 6 und 9 und die berechnete Resultierende sind Tabelle 47 zu entnehmen.

Tabelle 47: Ankerkräfte im Kalibrierungsfall 3

Berechnungszeitpunkt	Messdatum	Block 2 oben+unten [kN]	Block 6 oben+unten [kN]	Block 9 oben+unten [kN]	A [MN]	α [°]
3-1	02.06.2013	1360	1390	1150	13,8	25,8
3-2	02.06.2013	1360	1390	1150	13,8	25,8
3-3	05.06.2013	1460	1480	1210	14,7	25,8
3-4	07.06.2013	1460	1450	1210	14,6	25,8

Die angesetzten Erddruckkräfte zu den jeweiligen Zeitpunkten sind in Tabelle 48, für die jeweilig angesetzten Reibungswinkel in der Gleitfläche zusammengefasst.

Tabelle 48: Erddruckkräfte im Kalibrierungsfall 3

Berechnungszeitpunkt	$E_a / \varphi = 30,0^\circ$ [MN]	$E_a / \varphi = 30,5^\circ$ [MN]	$E_a / \varphi = 31,0^\circ$ [MN]
3-1	28	27	27
3-2	29	28	27
3-3	29	28	28
3-4	29	28	27

Die Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 3, berechnet aufgrund der Gleichgewichtsbetrachtungen bei hangparallelem Gleiten, sind in Tabelle 49 angeführt.

Tabelle 49: Sicherheitszahlen im Kalibrierungsfall 3

Berechnungs- zeitpunkt	η	η	η	η	η
	$\varphi = 30,0^\circ/c=0$	$\varphi = 30,0^\circ/c=1$	$\varphi = 30,5^\circ/c=0$	$\varphi = 30,5^\circ/c=1$	$\varphi = 31,0^\circ/c=0$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
3-1	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
3-2	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
3-3	0,96	0,97	0,99	1,00	1,01
3-4	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01

Vom Zeitpunkt 3-1 auf Zeitpunkt 3-2 nimmt die Sicherheitszahl zufolge einer Erhöhung des Porenwasserdruckes in der Gleitfläche, dem keine Ankerkrafterhöhung entgegengesetzt wird, um ca. 1 % ab.

Darauf folgend wurde zum Zeitpunkt 3-3 ein weiterer, deutlicher Porenwasserdruckanstieg gemessen. Obwohl eine Ankerkrafterhöhung zu diesem Zeitpunkt ebenfalls gemessen wurde sinkt die Sicherheitszahl wiederum um 1 %.

Zum Zeitpunkt 3-4 beginnt der Porenwasserdruck in der Gleitfläche abzunehmen, während die angestiegenen Ankerkräfte erhalten bleiben. Aus diesem Grund steigt die Sicherheitszahl wieder an bzw. bleibt gleich.

5.4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Tabelle 50 werden die Ergebnisse der Kalibrierungsberechnungen nochmals zusammengefasst um eine Gegenüberstellung aller Kalibrierungsfälle zu ermöglichen.

Tabelle 50: Ergebnisse der Modellkalibrierung

Berechnungs- zeitpunkt	η	η	η	η	η
	$\varphi = 30,0^\circ/c=0$	$\varphi = 30,0^\circ/c=1$	$\varphi = 30,5^\circ/c=0$	$\varphi = 30,5^\circ/c=1$	$\varphi = 31,0^\circ/c=0$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Kalibrierungsfall 1					
1-1	1,00	1,01	1,02	1,03	1,05
1-2	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01
1-3	0,97	0,98	1,00	1,01	1,01
Kalibrierungsfall 2					
2-1	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-2	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-3	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
2-4	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01
2-5	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
Kalibrierungsfall 3					
3-1	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
3-2	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
3-3	0,96	0,97	0,99	1,00	1,01
3-4	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01

Es werden hier zwei Aussagen getroffen, die für die weiteren Sicherheitsbetrachtungen wesentlich sind.

Jeder Kalibrierungsfall weist auf ein plausibles Verhalten des Modells hin. Zum Beginn jedes Kalibrierungsfalls bzw. Bewegungsvorganges wurde die höchste Sicherheitszahl berechnet; zu einem darauffolgenden Zeitpunkt führt entweder ein Aushubschritt oder eine Erhöhung des Porenwasserdruckes zu einer Abnahme der Sicherheitszahl. Am Ende jedes Kalibrierungsfalls steigt die Sicherheitszahl wieder an bzw. bleibt gleich, da durch einen Anstieg der Ankerkräfte eine weitere Abnahme der Sicherheitszahl verhindert wird.

Als zweite wichtige Aussage werden nun Scherparameter, mit denen Standsicherheitsberechnungen mit diesem Modell plausibel durchgeführt werden können, angegeben. Für weitere Berechnungen kann mit einem Reibungswinkel von $30,5^\circ$ und gegebenenfalls mit einer Kohäsion von $1,0 \text{ kPa}$ in der Gleitfläche gerechnet werden.

Die Wertepaare ($\varphi=30,5^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$) und ($\varphi=30,5^\circ$, $c=1 \text{ kPa}$) führten im Allgemeinen zu Sicherheiten vor bzw. nach den Bewegungsvorgängen von ca. $1,00$ bis $1,02$ und während der Bewegungsvorgänge zu Sicherheiten von ca. $0,99$ bis $1,00$. Somit sind die am Anfang dieses Abschnitts angeführte Bedingungen für die Kalibrierungsergebnisse erfüllt und diese Wertepaare können für die weitere Bearbeitung herangezogen werden.

6 Sicherheitsberechnungen

Mit den im vorigen Kapitel angegebenen Scherparametern können nun unter Berücksichtigung der im Kapitel 4 angeführten Systemgeometrie Sicherheitsberechnungen für beide Gleitkörper für den Ursprungszustand, für Bauzustände und letztlich auch für den Endzustand durchgeführt werden.

Das bestehende System kann als zweiteiliges System mit einem oberen und einem unteren Gleitkörper, welche unabhängig voneinander agieren, beschrieben werden. Es ist als sehr wahrscheinlich zu bewerten, dass es auf der bestehenden Gleitfläche in der Tiefe von 11,0 m u.GOK weiterhin zu Bewegungen beider Gleitkörper kommen wird, wenn keine Sicherungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Für die Sicherheit der Druckrohrleitung im Endzustand bedeutet dies grundsätzlich zwei Gefährdungen. Einerseits kann es sein, dass der obere Gleitkörper sich weiterhin in Richtung der Druckrohrleitung bewegen wird, und andererseits kann es ebenfalls sein, dass der untere Gleitkörper, in dessen Kopfbereich die Druckrohrleitung verläuft, sich weiterhin talwärts bewegen wird. Beides führt zu großen Verformungen der Druckrohrleitung.

Es ist eindeutig, dass diese Gefährdungen auch Versagensszenarien für die Druckrohrleitung darstellen, die durch geeignete Maßnahmen zu verhindern sind.

Dieses Kapitel gliedert sich wie folgt:

- Die wesentlichen Annahmen und Eingabeparameter für die Sicherheitsberechnungen werden angeführt;
- Die Ergebnisse der Sicherheitsberechnungen für den oberen Gleitkörper werden präsentiert, einschließlich der erforderlichen zusätzlichen Ankerkräfte um ausgewählte Sicherheitszahlen zu erreichen;
- Die Ergebnisse der Sicherheitsberechnungen für den unteren Gleitkörper werden präsentiert, ebenfalls mit den erforderlichen zusätzlichen Ankerkräften um ausgewählte Sicherheitszahlen zu erreichen;
- Es wird eine mögliche Variante zur Stabilisierung des Hanges für eine Sicherheitszahl von $\eta=1,10$ beschrieben und im Lageplan und Schnitt dargestellt.

6.1 Berechnungsparameter

In diesem Abschnitt werden die Annahmen und Ansätze für die Eingabeparameter, welche für die Sicherheitsberechnungen getroffen wurden, beschrieben. Für eine genaue Beschreibung der berechneten Größen (z.B. die Gewichtskraft) wird auf Abschnitt 5.2 verwiesen.

6.1.1 Geometrie

Die Berechnungsparameter zur Beschreibung der Geometrie werden größtenteils von der Modellkalibrierung übernommen. Die Hangneigung β und die Breite der Gleitkörper aus der Ebene B bleiben erhalten. Die Länge des oberen Gleitkörpers bleibt ebenfalls gleich (93,0 m).

Da der Sicherungsaufwand proportional zum zu sichernden Volumen ist wird vorgeschlagen, nur jenen Bereich des unteren Gleitkörpers zu sichern, in dem die Druckrohrleitung verlegt wird. Weitere Bewegungen des unteren Gleitkörpers unterhalb des gesicherten Bereiches würden in diesem Fall keine Gefahr für die Druckrohrleitung darstellen, solange kein sukzessives Versagen des Fußes des gesicherten Erdkörpers stattfinden kann. Es ergibt sich für den zu sichernden Bereich des unteren Gleitkörpers eine Länge in der Ebene von ca. 35,0 m. Die Geometrie im Endzustand wird in Abbildung 84 im Lageplan dargestellt.

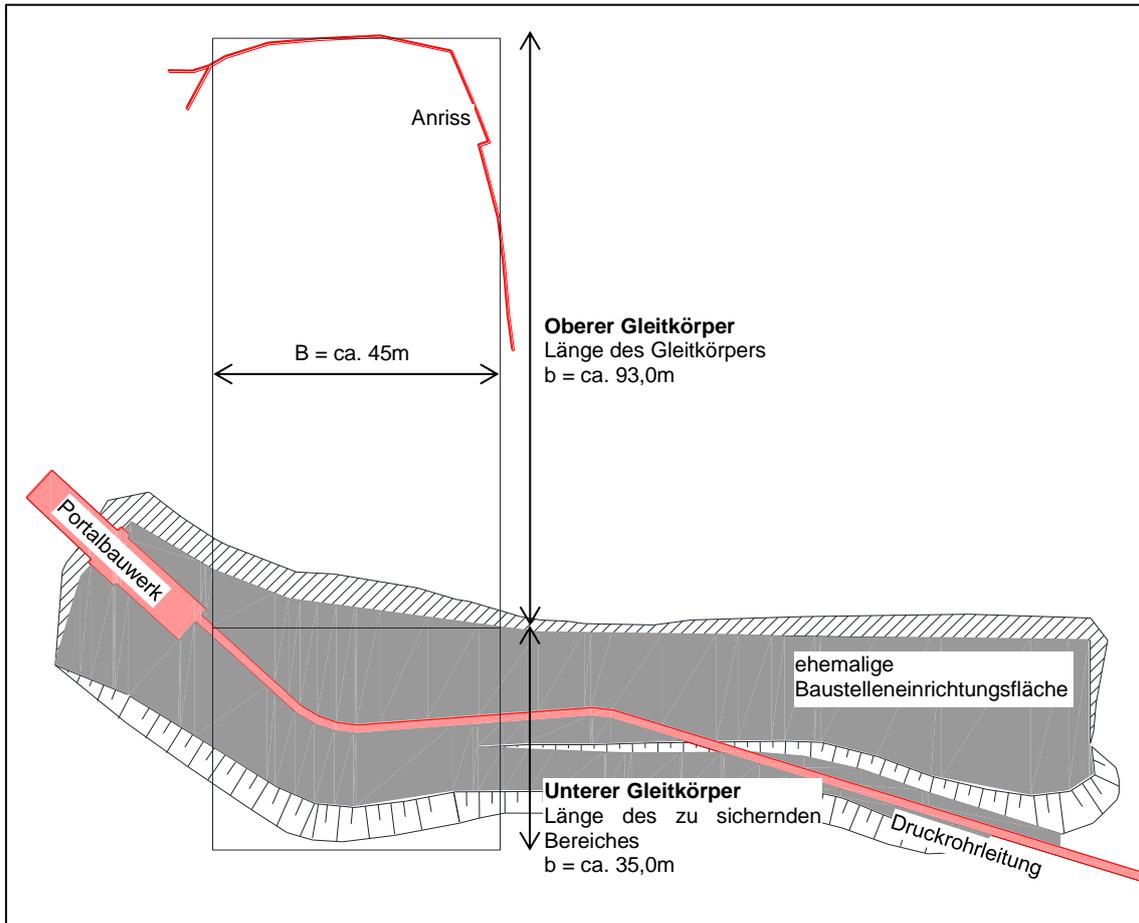


Abbildung 84: Lageplan mit Geometrie im Endzustand, gemäß [3]

Für die folgenden Sicherheitsberechnungen wird weiters davon ausgegangen, dass im Endzustand der Ursprungszustand bzw. das Urgelände möglichst vollkommen wiederhergestellt wird (d.h. der Einschnitt wird wieder rückgebaut).

In Abbildung 85 ist ein Schnitt, in dem dieser Zustand ersichtlich ist, dargestellt.

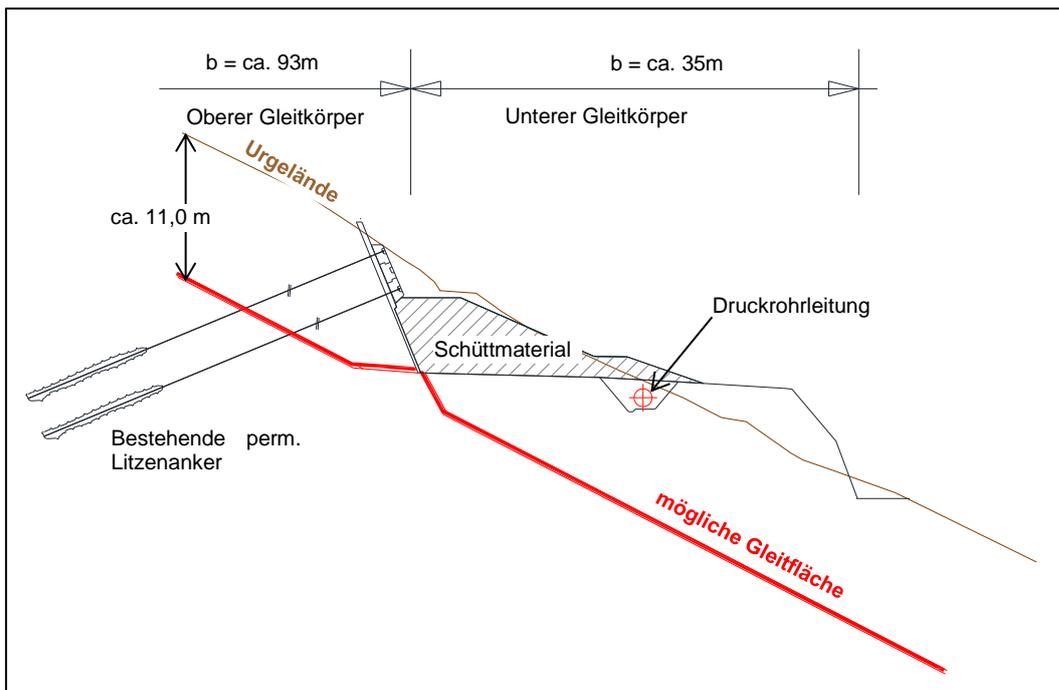


Abbildung 85: Schnitt mit Geometrie im Endzustand, gemäß [3]

Für die Bodenschichtung wird für beide Gleitkörper weiterhin das Bodenprofil vom Inklinometer INK 9 angenommen. Diese Annahme wurde bereits in der Modellkalibrierungsphase für den oberen Gleitkörper getroffen. Sie wird hier auch für den für die Sicherheitsberechnungen maßgebenden Kopfbereich des unteren Gleitkörpers getroffen, weil sich dieser auch im ungefähren Nahbereich des Inklinometers INK 9 befindet.

Die Eingabeparameter zur Beschreibung der Geometrie sind in Tabelle 51 für beide Gleitkörper angegeben.

Tabelle 51: Eingabewerte – Geometrie

Größe	Abkürzung	oberer Gleitkörper	unterer Gleitkörper	Einheit
Hangneigung	β	27,5	27,5	[°]
Gleitkörperbreite aus der Ebene	B	45,0	45,0	[m]
Gleitkörperlänge in der Ebene	b	93,0	35,0	[m]
Mächtigkeit, Schicht L4	h_{L4}	5,4	5,4	[m]
Mächtigkeit, Schicht L6a	h_{L6a}	5,6	5,6	[m]

6.1.2 Bodenkennwerte

Für die Wichten der jeweiligen Bodenschichten werden die gleichen Wichten wie bei der Modellkalibrierung verwendet.

Es werden weiterhin unterhalb des freien Grundwasserspiegels im Hanglehm die gesättigten Wichten angesetzt. Oberhalb des Grundwasserspiegels im Hanglehm gilt weiterhin die Feuchtwichte.

Für die Scherfestigkeit in der Gleitfläche werden die im Abschnitt 5.4.4 ermittelten Wertepaare angenommen. Alle Sicherheitsberechnungen werden sowohl mit dem Wertepaar ($\varphi=30,5^\circ$, $c=0$ kPa) als auch mit dem Wertepaar ($\varphi=30,5^\circ$, $c=1$ kPa) durchgeführt.

In Tabelle 52 sind die angesetzten Bodenkennwerte für die Sicherheitsberechnungen zusammengefasst.

Tabelle 52: Eingabewerte – Bodenkennwerte

Größe	Abkürzung	Wert	Einheit
Feuchtwichte, Schicht L4	γ_{L4}	20,0	[kN/m ³]
Gesättigte Wichte, Schicht L4	$\gamma_{\text{sat,L4}}$	21,0	[kN/m ³]
Feuchtwichte, Schicht L6a	γ_{L6a}	21,0	[kN/m ³]
Gesättigte Wichte, Schicht L6a	$\gamma_{\text{sat,L6a}}$	22,0	[kN/m ³]
Reibungswinkel (in der Gleitfläche)	φ'	30,5	[°]
Kohäsion (in der Gleitfläche)	c'	0,0 bzw. 1,0	[kN/m ²]

6.1.3 Grundwasser und Porenwasserdruck

Die Grundwasserverhältnisse werden entsprechend der Vorgehensweise bei der Modellkalibrierung über die Parameter t_{GW} und t_{PWDG} modelliert.

Die Größe t_{GW} weist über den Beobachtungszeitraum vom 10.01.2013 bis 21.01.2014 einen Schwankungsbereich von 2,54 bis 3,74 m u.GOK auf. Die Größe t_{PWDG} weist über den Beobachtungszeitraum vom 06.01.2013 bis 25.07.2013 eine Schwankung zwischen 8,98 und 9,40 m u.GOK auf.

Die arithmetischen Mittelwerte der Messreihen von t_{GW} bzw. t_{PWDG} über die jeweiligen Beobachtungszeiträume betragen 3,04 m u.GOK für den Grundwasserspiegel im Hanglehm und 9,31 m u.GOK für die Druckhöhe in der Tiefe von 11,0 m u.GOK.

Alle Sicherheitsberechnungen werden mit den oben angeführten Mittelwerten der zwei Messreihen durchgeführt und stellen somit „mittlere“ Sicherheitszahlen η_{mittel} dar.

Da in der Sensitivitätsanalyse beobachtet wurde, dass t_{PWDG} einen maßgebenden Einfluss auf die Sicherheitszahl hat, wird auch für jede Sicherheitsberechnung eine „minimale“ Sicherheitszahl η_{min} angegeben. Diese wird mit der größten gemessenen Druckhöhe in der Gleitfläche (8,98 m u.GOK) berechnet. Der Grundwasserspiegel im Hanglehm wird aufgrund seines vernachlässigbaren Einflusses auf die Sicherheitszahl (siehe Sensitivitätsanalyse) für die Berechnungen der minimalen Sicherheitszahl nicht verändert.

Die angesetzten Werte zur Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse in den Sicherheitsberechnungen sind in Tabelle 53 zusammengefasst.

Tabelle 53: Eingabewerte für Grundwassersituation

	Abkürzung	für η_{min}	für η_{mittel}	Einheit
Grundwasserstand im Hanglehm	t_{GW}	3,04	3,04	[m u.GOK]
Druckhöhe in der Gleitfläche	t_{PWDG}	8,98	9,31	[m u.GOK]

6.1.4 Ankerkraft

Für die Ankerkräfte wird immer, wie im Abschnitt 5.2.5 beschrieben, eine Resultierende berechnet. Zur Berechnung der Resultierenden A werden die Festlegekräfte der Anker in Rechnung gestellt.

In den nächsten Abschnitten werden die Sicherheitszahlen der Gleitkörper auch für den Ursprungszustand angegeben. Für diese Berechnungen wurde keine Ankerkraft in Rechnung gestellt, da im Ursprungszustand keine Anker eingebaut bzw. wirksam sind.

6.1.5 Erddruckkraft

Für die oben erwähnten Berechnungen des Ursprungszustandes (vor Herstellung des Einschnittes) entspricht das Berechnungsmodell dem konventionellen Modell der unendlich langen Böschung. In diesen Berechnungen heben sich die Erddruckkräfte auf beiden Seiten der betrachteten Lamelle auf und die Erddruckkraft wird gleich Null gesetzt.

Dies gilt ebenfalls für den Endzustand, da wie bereits erwähnt von einer Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes ausgegangen wird.

Es werden im nächsten Abschnitt auch Sicherheitszahlen für den Zustand nach Herstellung des Einschnittes (für den oberen Gleitkörper) berechnet und angeführt. Für diese Berechnungen ist wie bei der Modellkalibrierung eine Erddruckkraft anzusetzen.

Die angesetzten Erddruckkräfte sind in Tabelle 54 enthalten. Sie wurden berechnet mit einem Reibungswinkel von $31,5^\circ$ (Reibungswinkel in der Gleitfläche erhöht um 1° für den Gleitkörper), mit einer Kohäsion von 13 kPa (Mittelwert aus den Laborversuchen) und mit den bereits angeführten Werten von t_{GW} und t_{PWDG} .

Tabelle 54: Erddruckkräfte

Größe	Abkürzung	für η_{\min}	für η_{mittel}	Einheit
Erddruckkraft	E_a	28	27	[MN]

6.2 Sicherheitsberechnungen für den oberen Gleitkörper

Die Sicherheitsberechnungen für den oberen Gleitkörper werden zunächst für vier verschiedene Zustände durchgeführt.

Es wird zunächst die Sicherheitszahl für den Ursprungszustand berechnet. Dies beschreibt die Standsicherheit des oberen Gleitkörpers vor Herstellung des Einschnittes und es werden für diese Berechnung keine Erddruckkräfte und keine Ankerkräfte angesetzt.

Anschließend wird die Sicherheitszahl für eine Herstellung des Einschnittes ohne Anker angegeben, um den Einfluss des Einschnittes selber auf die Sicherheit im oberen Gleitkörper zu untersuchen. Hierzu wird lediglich die Erddruckkraft auf der unteren Seite der betrachteten Lamelle deaktiviert und auf der oberen Seite der betrachteten Lamelle aktiviert.

Drittens werden auch die Ankerkräfte aktiviert und die Sicherheitszahl für den Einschnitt mit Litzenankern angegeben. Dies dient der Untersuchung des Einflusses der Litzenanker auf die Sicherheitszahl und es wird hierfür die Festlegekraft von 600 kN in den 22 permanenten Litzenankern angesetzt.

Abschließend wird die Sicherheitszahl für den Endzustand ohne zusätzliche Maßnahmen berechnet. Da für den Endzustand die Wiederherstellung des Ursprungszustandes vorausgesetzt wird, werden für diese Berechnung unter Beibehaltung der Ankerkräfte lediglich die Erddruckkräfte an beiden Enden des Gleitkörpers (im Sinne der unendlich langen Böschung) gleich Null gesetzt.

Abbildung 86 zeigt einen Freischnitt des oberen Gleitkörpers mit sämtlichen angreifenden Kräften.

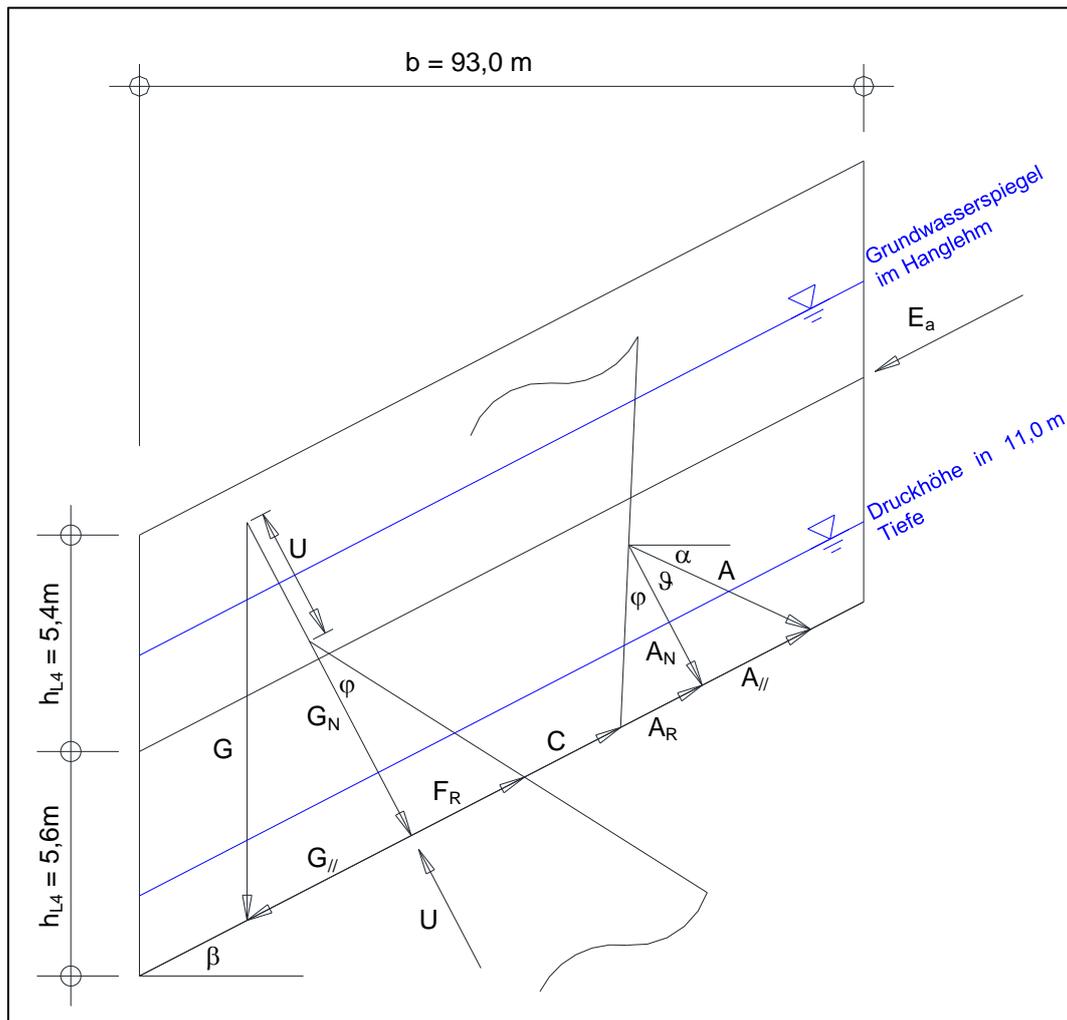


Abbildung 86: Freischnitt des oberen Gleitkörpers mit angreifenden Kräften

Die berechneten Sicherheitszahlen sind in Tabelle 55 angeführt.

Tabelle 55: Sicherheitszahlen für den oberen Gleitkörper

Zustand	$\varphi = 30,5^\circ, c = 0 \text{ kPa}$		$\varphi = 30,5^\circ, c = 1 \text{ kPa}$	
	η_{\min}	η_{mittel}	η_{\min}	η_{mittel}
Ursprungszustand	1,01	1,03	1,02	1,04
Einschnitt ohne Anker	0,95	0,97	0,96	0,98
Einschnitt mit Ankern*	0,98	1,00	0,99	1,01
Endzustand ohne zusätzliche Maßnahmen*	1,04	1,06	1,05	1,07

*Vorspannkraft von 600 kN in 22 Litzenankern ergibt $A = 12,8 \text{ MN}$ und $\alpha = 25,8^\circ$

Für den Ursprungszustand wird eine Sicherheitszahl von 1,03 bis 1,04 berechnet.

Würde ein Einschnitt bis zur Gleitflächentiefe von ca. 11,0 m ohne Sicherungsmaßnahmen hergestellt werden, so würde die Sicherheitszahl um ca. 6% auf 0,97 bis 0,98 abfallen.

Durch den bereits stattgefundenen Einbau der Litzanker in den 11 Ankerblöcken erhöht sich die Sicherheitszahl gegenüber dem Fall eines Einschnittes ohne Anker um ca. 3%. Dies stellt die mittlere Sicherheitszahl für den Bauzustand von ca. 1,00 bis 1,01 dar, die in der Modellkalibrierung ebenfalls beobachtet wurde. Diese Sicherheitszahl wurde am Anfang von nahezu allen Kalibrierungsfällen beobachtet.

Würde nun der Einschnitt zugeschüttet und der Ursprungszustand wieder hergestellt werden, so würde die Sicherheitszahl auf 1,06 bis 1,07 ansteigen. Dies entspricht den Sicherheiten im Ursprungszustand, erhöht um den Einfluss der permanenten Litzanker (3%).

Im Weiteren werden für den oberen Gleitkörper die erforderlichen Ankerkräfte angegeben, um ausgewählte Sicherheitszahlen zu erreichen.

Es wird zunächst eine Neigung der Resultierenden α von $25,0^\circ$ angenommen und die erforderlichen Ankerkräfte auf Basis dieser Annahme für mittlere Sicherheitszahlen von $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$, $\eta_{\text{mittel}} = 1,15$, und $\eta_{\text{mittel}} = 1,20$ angegeben.

Nach einer genauen Festlegung der Stabilisierungsmaßnahmen sind die Sicherheitszahlen mit den tatsächlichen Orientierungen und Einbauwinkeln der Anker und somit mit der tatsächlich vorhandenen Größe und Neigung der Ankerkraftresultierenden zu überprüfen.

Diese Berechnungen werden lediglich mit dem Wertepaar ($\varphi = 30,5^\circ$, $c = 0 \text{ kPa}$) durchgeführt, da diese Scherparameter den ungünstigeren Fall darstellen.

Die erforderlichen gesamten Ankerkräfte zur Erreichung der ausgewählten Sicherheitszahlen für den oberen Gleitkörper sind in Tabelle 56 angeführt.

Tabelle 56: Erforderliche Ankerkräfte für den oberen Gleitkörper

Sicherheit η_{mittel}	erforderliche gesamte Ankerkraft $A_{\text{erf,ges}} [\text{MN}]$	Neigung der Resultierenden $\alpha [^\circ]$
1,10	30,4	25,0
1,15	51,4	25,0
1,20	72,4	25,0

Die erforderlichen Ankerkräfte in Tabelle 56 stellen die erforderliche Größe der Gesamtresultierenden aller Ankerkräfte dar. Zur Erreichung dieser erforderlichen Ankerkraft dürfen die Ankerkräfte in den bereits eingebauten permanenten Litzankern in Rechnung gestellt werden.

Es leitet sich aus den Werten in Tabelle 56 ab, dass eine Ankerkraftherhöhung von 4,2 MN eine Erhöhung der Sicherheit von 1,0% entspricht, welche mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse übereinstimmt.

6.3 Sicherheitsberechnungen für den unteren Gleitkörper

Die Sicherheitsberechnungen für den unteren Gleitkörper werden für den Ursprungszustand und für den Endzustand ohne zusätzliche Maßnahmen durchgeführt.

Für den Ursprungszustand werden für diese Berechnung die gleichen Annahmen wie für den oberen Gleitkörper getroffen. Die Erddrücke und Ankerkräfte werden im Ursprungszustand gleich Null gesetzt. Unter diesen Annahmen ist die Sicherheitszahl unabhängig vom Gleitkörpervolumen und es wird die gleiche Sicherheitszahl wie bei dem oberen Gleitkörper erreicht.

Für den unteren Gleitkörper entspricht der Endzustand ohne zusätzliche Maßnahmen genau dem Ursprungszustand und es wird die gleiche Sicherheitszahl wie im ursprünglichen Zustand berechnet. Der Grund hierfür ist, dass die 50 Litzenanker (siehe Abschnitt 3.6.2), die den Kopfbereich des unteren Gleitkörpers bzw. den Fußbereich der bewehrten Erde gesichert haben, temporär vorgesehen sind. Sie dürfen daher für den permanenten Zustand nicht in Rechnung gestellt werden.

Abbildung 87 zeigt einen Freischnitt des unteren Gleitkörpers mit sämtlichen angreifenden Kräften.

Tabelle 58: Erforderliche Ankerkräfte für den unteren Gleitkörper

Sicherheit η_{mittel}	erforderliche gesamte Ankerkraft $A_{\text{erf,ges}}$ [MN]	Neigung der Resultierenden α [°]
1,10	11,5	25,0
1,15	19,3	25,0
1,20	27,2	25,0

Es ist hier ersichtlich, dass eine Ankerkrafterhöhung von ca. 1,6 MN zu einer Erhöhung der Sicherheitszahl um 1,0% führt.

6.4 Sicherungsvariante

Basierend auf den vorigen Überlegungen (Abschnitte 6.2 und 6.3) wird hier eine mögliche Variante zur Erreichung der mittleren Sicherheitszahl von $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ für beide Gleitkörper durch den Einbau zusätzlicher Litzenanker angeführt. Das erforderliche bzw. tatsächlich gewünschte Sicherheitsniveau ist vom Bauherrn, gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit Beratern festzulegen.

Die Ausgangszustände beider Gleitkörper sind unterschiedlich. Die Sicherheitszahl des oberen Gleitkörpers liegt ohne Maßnahmen zwischen 1,06 und 1,07 und es wird für diesen Gleitkörper eine Ankerkraft von insgesamt ca. 30 MN (bei $\alpha = 25^\circ$) benötigt, um die Sicherheitszahl $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ zu erreichen. Die auf den oberen Gleitkörper bereits wirkende Ankerkraftresultierende beträgt 12,8 MN (mit einem berechneten $\alpha = 25,9^\circ$), d.h. die zusätzlich erforderliche Ankerkraft beträgt ca. 17,2 MN.

Die Sicherheit des unteren Gleitkörpers liegt ohne Maßnahmen zwischen 1,03 und 1,04. Für diesen Gleitkörper wurde eine erforderliche Ankerkraft von ca. 11,5 MN (bei $\alpha = 25^\circ$) berechnet, um die mittlere Sicherheitszahl von $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ zu erreichen.

6.4.1 Sicherungsmaßnahmen für den oberen Gleitkörper

Wie vorher erläutert müssten unter Vernachlässigung der geringfügig unterschiedlichen Neigungen zwischen der bestehenden und neuen Ankerkraftresultierenden ca. 17,2 MN an zusätzlicher Ankerkraft aufgebracht werden.

Würde die dritte (mittlere) Öffnung jedes bestehenden Ankerblockes mit einem Litzenanker mit der gleichen Vorspannkraft von 600 kN und dem gleichen Einbauwinkel von 25° wie die bereits eingebauten Anker besetzt werden, so würde sich eine Ankerkraft von ungefähr 6,6 MN ergeben (600 kN x 11 Anker).

Die verbleibenden ca. 10,6 MN müssten durch die Anordnung von neuen Litzenankern bzw. Ankerblöcken aufgebracht werden. Möglich wäre z.B. die Anordnung von 6 neuen Ankerblöcken mit jeweils drei Litzenankern. Bei einer Vorspannkraft jedes Litzenankers von 600 kN ergibt dies eine gesamte Ankerkraft von ca. 10,8 MN.

Für den oberen Gleitkörper würden zusammenfassend folgende Maßnahmen zur Erreichung der Sicherheitszahl von $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ erforderlich sein:

- In den bestehenden Ankerblöcken 1 bis 11 würde die dritte Öffnung, die für den Einbau zusätzlicher Litzenanker gleicher Vorspannkraft vorgesehen und bemessen wurde [5], mit einem Litzenanker belegt werden. Die Vorspannkraft beträgt 600 kN.
- Es würden 6 neue Ankerblöcke mit jeweils drei Litzenankern, jeweils auf 600 kN vorgespannt, angeordnet werden. Es wäre z.B. möglich, 5 Anker rechts vom bestehenden Ankerblock 1, und 1 Anker links vom bestehenden Ankerblock 11 anzuordnen. (Siehe Abbildung 88)

Wenn die neuen Anker mit einem Einbauwinkel von 25° und im Grundriss unter einem Winkel von 10° zur Fallrichtung des Hanges hergestellt werden, so würde sich eine resultierende Ankerkraft A von ca. 30,0 MN (Summe aus bestehenden und neu eingebauten Ankerkräften) geneigt unter $\alpha = 25,7^\circ$ zur Horizontalen ergeben.

Die Standsicherheitsberechnungen wurden mit diesen Werten nochmals durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 59 zusammengefasst.

Tabelle 59: Sicherheitszahlen – oberer Gleitkörper gesichert

Zustand (oberer Gleitkörper)	$\varphi = 30,5^\circ, c = 0 \text{ kPa}$		$\varphi = 30,5^\circ, c = 1 \text{ kPa}$	
	η_{min}	η_{mittel}	η_{min}	η_{mittel}
Sicherungsvariante	1,08	1,10	1,09	1,11

Bei Ausführung der beschriebenen Sicherungsvariante würde sich eine mittlere Sicherheitszahl für den oberen Gleitkörper zwischen 1,10 und 1,11 ergeben.

Die bestehenden Litzenanker in den Ankerblöcken 1 bis 11 besitzen eine Länge von 30 m und reichen somit eindeutig in die tragfähigere Hangbrekzie (bzw. in den Übergangsbereich, siehe Längsschnitt im Abschnitt 2.5). Der dritte (mittlere) Litzenanker soll mit einer größeren Länge ausgeführt werden (z.B. 40 m) um eine gegenseitige Beeinflussung der Anker im Krafteintragungsbereich zu vermeiden.

6.4.2 Sicherungsmaßnahmen für den unteren Gleitkörper

Für den unteren Gleitkörper ist insgesamt eine Ankerkraft von ca. 11,5 MN (unter $\alpha = 25^\circ$) erforderlich um die Sicherheitszahl $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ zu erreichen.

Dividiert durch die Breite des Gleitkörpers von ca. 45,0 m entspricht dies einer Ankerkraft von ca. 260 kN/m.

Beispielsweise könnten Ankerblöcke mit jeweils zwei Litzenankern in einem Abstand untereinander von 3,0 m über die Gleitkörperbreite angeordnet werden. Die Ankerkraft pro Ankerblock beträgt 780 kN (260 kN/m bei 3,0 m Abstand der Ankerblöcke untereinander) und die daraus abgeleitete Vorspannkraft pro Anker beträgt 390 kN (780 kN aufgeteilt auf zwei Anker).

Werden die Anker mit einem Einbauwinkel von $\alpha = 25^\circ$ und parallel zur Fallrichtung des Hanges orientiert eingebaut, so würde sich eine resultierende Ankerkraft von 11,7 MN ($\alpha = 25^\circ$) ergeben. Dies gilt für die Ausführung gemäß Abbildung 88 im nächsten Abschnitt, mit 15 Ankerblöcken im unteren Gleitkörper angeordnet.

Die unter diesen Bedingungen berechneten Sicherheitszahlen sind in Tabelle 60 angeführt.

Tabelle 60: Sicherheitszahlen – unterer Gleitkörper gesichert

Zustand (unterer Gleitkörper)	$\varphi = 30,5^\circ, c = 0 \text{ kPa}$		$\varphi = 30,5^\circ, c = 1 \text{ kPa}$	
	η_{min}	η_{mittel}	η_{min}	η_{mittel}
Sicherungsvariante	1,08	1,10	1,09	1,11

Überlegenswert wäre, die Ankerkraft von 260 kN/m auch in den Bereichen unmittelbar links bzw. rechts der Ränder des unteren Gleitkörpers, wie ebenfalls in Abbildung 88 dargestellt, aufzubringen, um auch den Übergang zu den stabilen Bereichen (Bereich „rechts“ und Portalbereich, siehe Abschnitt 3.1) zu sichern. Dies ist insbesondere deswegen wesentlich, weil die Breite der bewegten Masse im unteren Bereich nicht durch Beobachtungen (z.B. Anriss) eingegrenzt werden konnte und daher auch einer gewissen Unsicherheit unterliegt.

Weiters sollten die Ankerlängen mindestens 35 m betragen um sicherzustellen, dass die Einleitung der Ankerkräfte in den tragfähigeren Schichten (Übergangsbereich bzw. Hangbrekzie) stattfindet.

6.4.3 Standsicherheit des Gesamtsystems

In den vorigen Abschnitten wurden mögliche Sicherungsmaßnahmen für den oberen und unteren Gleitkörper ermittelt, um eine mittlere Sicherheitszahl von $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ zu erreichen. Diese getrennte Betrachtung beider Gleitkörper ist aufgrund der Beobachtung eines aller Wahrscheinlichkeit nach zweiteiligen Systems, mit zwei unabhängigen Gleitkörpern, notwendig.

Wenn im Endzustand der Ursprungszustand wiederhergestellt wird, so ist es möglich, dass auch das vermutete Ursprungssystem eines zusammenhängenden Gleitkörpers wieder eintritt. Für diesen Fall ist eine Standsicherheitsberechnung für das Gesamtsystem, bestehend aus dem oberen Gleitkörper und dem gesicherten Bereich des unteren Gleitkörpers, zusätzlich notwendig.

Diese Standsicherheitsberechnung würde unter Berücksichtigung der Geometrie des Gesamtsystems mit einer Länge in der Ebene von 128 m (die Summe der Längen beider gesicherten Gleitkörper) und unter Berücksichtigung aller Ankerkräfte (aus dem oberen und unteren System) erfolgen.

Ein Sonderfall für das erstellte Berechnungsmodell ist jener, in dem beide getrennt betrachtete Gleitkörper die gleiche Sicherheitszahl aufweisen. In diesem Fall würde für das Gesamtsystem bestehend aus diesen beiden Gleitkörpern dieselbe Sicherheitszahl berechnet werden.

Da in den oben angeführten Berechnungen möglicher Sicherungsmaßnahmen die mittlere Sicherheitszahl von $\eta_{\text{mittel}}=1,10$ für beide Gleitkörper nachgewiesen wurde, beträgt die mittlere Sicherheitszahl des Gesamtsystems bestehend aus beiden gesicherten Gleitkörpern ebenfalls $\eta_{\text{mittel}}=1,10$ und es kann auf eine Standsicherheitsberechnung für das Gesamtsystem verzichtet werden.

Werden für den oberen und unteren Gleitkörper unterschiedliche Sicherheitszahlen angestrebt, so ist die Standsicherheit des Gesamtsystems zusätzlich nachzuweisen.

6.4.4 Darstellung der Sicherungsvariante

In Abbildung 88 werden die oben beschriebenen Sicherungsmaßnahmen im Lageplan und in Abbildung 89 im Schnitt dargestellt.

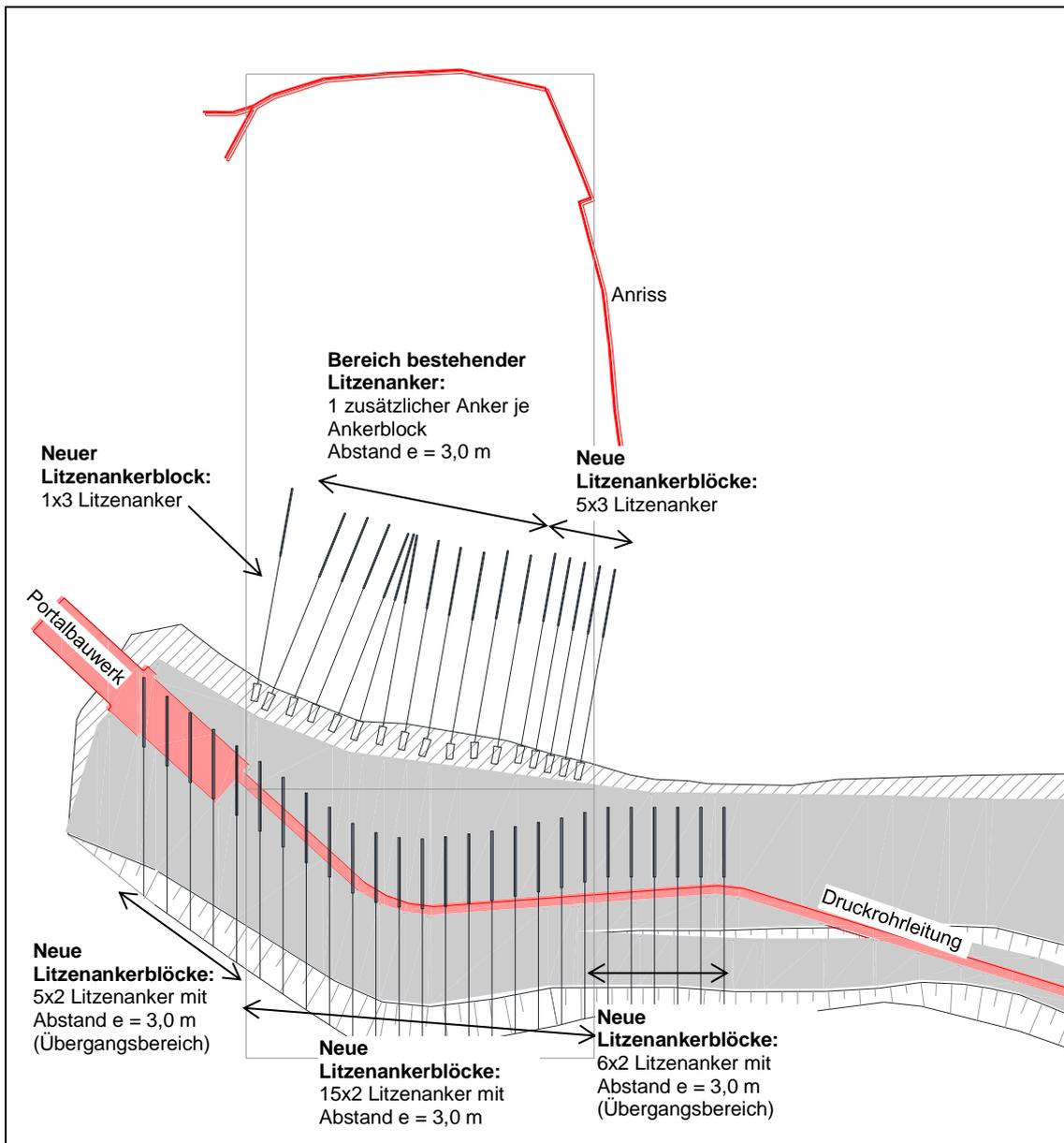


Abbildung 88: Stabilisierungsmaßnahmen im Lageplan, mit Angaben von [3]

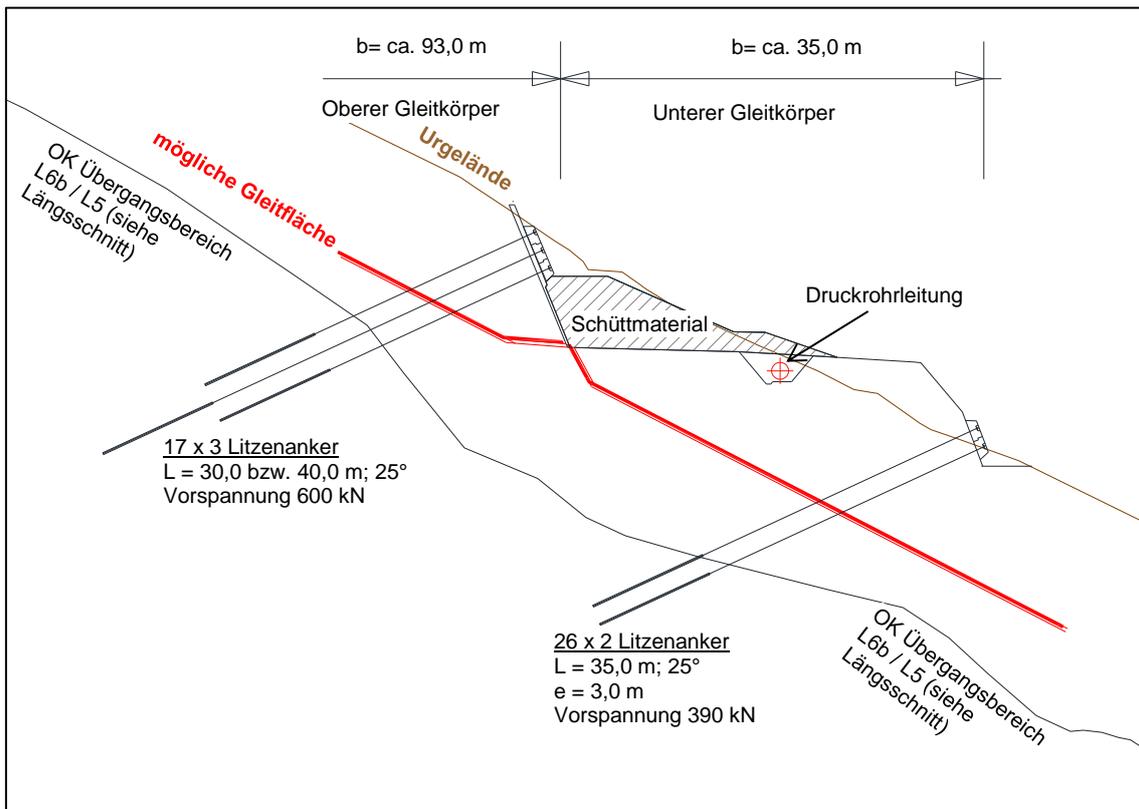


Abbildung 89: Stabilisierungsmaßnahmen im Schnitt, mit Angaben von [3]

Abschließend wird festgehalten, dass im Falle einer tatsächlich geplanten Hangsicherung, diese seitens eines befugten Projektanten auszuarbeiten und zu planen sind. Die Hangsicherungsmaßnahmen dürfen keinesfalls allein auf den Ausführungen dieser Masterarbeit ausgelegt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelte die Realisierung einer Druckrohrleitung in einem Kriechhang als Teil der Modernisierung des Kraftwerkes Bärenwerk in Fusch an der Großglocknerstraße, Salzburg.

Die ausgearbeiteten Fragestellungen wurden im Abschnitt 1.3 angeführt und das aktuelle Kapitel soll eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse dieser Ausarbeitungen geben.

Die erste Fragestellung betraf die Untergrundmodellierung des Hanges mit den maßgebenden Bodenschichten, einschließlich einer Abgrenzung der bewegten Masse anhand der messtechnischen Überwachung. Das Untergrundmodell wurde in einem repräsentativen Längenschnitt dargestellt. Es wurde eine gemeinsame Gleitfläche in zwei Inklinometern, Inklinometer INK 1 und INK 9, in einer Tiefe von ca. 11,0 m beobachtet, und es wurde daher für den Ursprungszustand eine durchgehende Gleitfläche in dieser Tiefe vermutet und angenommen.

Es folgte eine Auswertung der wesentlichen Messdaten und eine Interpretation dieser, um Aussagen über die Systemgeometrie und das Systemverhalten treffen zu können. Aufgrund der Beobachtungen wurde der Schluss gezogen, dass die Herstellung des Einschnittes eine Aufteilung des vorher vermutlich einheitlichen Gleitkörpers in einen Gleitkörper oberhalb und einen Gleitkörper unterhalb des Einschnittes verursachte. Weiters wurden Niederschlagsereignisse, Aushubzustände und Änderungen der Grundwasserverhältnisse als wesentliche Systemeinflussfaktoren identifiziert, auf die der Hang mit Bewegungen reagiert hat.

Mit den neugewonnenen Kenntnissen der Systemgeometrie und des Systemverhaltens konnte ein Berechnungsmodell zur Bestimmung einer globalen Sicherheitszahl erstellt werden, in dem die als wesentlich identifizierten Einflussgrößen berücksichtigt werden konnten. Dieses Modell wurde anhand der vorhandenen Messdaten kalibriert und für die Sicherheitsberechnungen herangezogen.

Abschließend wurde eine mögliche Sicherungsvariante vorgestellt, um eine mittlere Sicherheitszahl (mit dem erstellten Berechnungsmodell) von ca. $\eta_{\text{mittel}} = 1,10$ zu erreichen.

7.2 Ausblick

Vor der Planung von Stabilisierungsmaßnahmen in einem Kriechhang ist es unumgänglich, ein Verständnis für das System und das Systemverhalten zu erlangen. Nur auf diese Weise ist es möglich, angemessene Stabilisierungsmaßnahmen zu entwerfen und auszuführen.

In diesem Sinne bietet diese Arbeit für den gegenständlichen Hang eine Grundlage für die Planung von Sicherungsmaßnahmen mit anschließenden Aussagen über das System und das Systemverhalten.

Weiters bietet das Berechnungsmodell, welches in dieser Arbeit verwendet wurde, und die für dieses Modell rückgerechneten Bodenkennwerte, eine Grundlage für Standsicherheitsberechnungen bzw. für die Abschätzung von erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für den gegenständlichen Hang.

Es soll hier nochmals auf die wesentlichen Unschärfen des Modells, insbesondere betreffend die Grundwasserverhältnisse im Hang, hingewiesen werden.

Die durchgeführten Berechnungen mit diesem Modell stellen daher keinen Ersatz für die weitere Durchführung von geotechnischen Messungen im Endzustand dar.

Es sollen die folgenden Messungen im Endzustand weitergeführt werden:

- Die Inklinometermessungen, insbesondere in Inklinometern INK 1, INK 5 und INK 9; die Anordnung von zusätzlichen Inklinometern im Kopfbereich des unteren Gleitkörpers um das Verhalten in diesem Bereich im Endzustand zu erfassen wird empfohlen;
- Die geodätischen Messungen für alle Messquerschnitte, um einen Vergleich mit den Inklinometermessungen zu ermöglichen;
- Die Grundwassermessung in Kernbohrung KB 10/12;
- Die Ankerkräfte in den bestehenden, bereits beobachteten Litzenankern sowie in ausgewählten neugeplanten Litzenankern;
- Die Wassermengen, die von der Flächendrainage gefasst werden, um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen untersuchen zu können

Die weitere Durchführung dieser Messungen wird es erlauben, das Verhalten des Kriechhanges besser zu verstehen, insbesondere das Verhalten im Endzustand, und ist ohnehin bei großen Unsicherheiten in den Untergrund- bzw. in diesem Fall Grundwasserverhältnissen unumgänglich.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Salzburg AG: Modernisierung Kraftwerk Bärenwerk <http://www.salzburg-ag.at/herkunft/neue-projekte/kraftwerk-baerenwerk/> Datum des Zugriffs: 10.08.2014
- [2] Hochmair & Partner ZT GmbH: KW Bärenwerk VE Nord: Lage- und Höhenplan PN15-01-V-NEU2. 07.02.2013
- [3] BERNARD Ingenieure ZT GmbH: KW Bärenwerk Sanierung - BE-Fläche Nord Rückbaumaßnahmen Lageplan und Schnitte. 06.06.2014
- [4] Salzburg AG: KW Bärenwerk Portal Nord, Messstelle Inklinometer INK_1. Messung am 18.07.2012 bis Messung am 27.03.2014
- [5] IGT Geotechnik und Tunnelbau Ziviltechniker Gesellschaft m.b.H: Sanierung Kraftwerk Bärenwerk – Neudimensionierung des Voreinschnittes Nord. 11.12.2012
- [6] 3P Geotechnik ZT GmbH: Steilhang mit nunmehr bestätigter Kriechneigung – Angabe der Bodenkennwerte für die weitere Dimensionierung. 16.10.2012
- [7] IGT Geotechnik und Tunnelbau Ziviltechniker Gesellschaft m.b.H: KW Bärenwerk Sanierung – Triebwasserweg Böschungssicherung Lageplan Nordportal. 16.10.2012
- [8] ZT Büro Mag. Wolfgang Gadermayr: Aktenvermerk – KW Bärenwerk. Interpretation der Aufschlüsse der Inklinometerbohrungen, Entwässerungskonzept BE Fläche. 22.10.2012
- [9] Salzburg AG – Kraftwerk Bärenwerk. Bohrprofile INK KB 1/11 – INK KB 9/12.
- [10] 3P Geotechnik ZT GmbH: KW Bärenwerk – Längsschnitt 4, V4a. 05.11.2012
- [11] Fa. Felbermayr: KW Bärenwerk, Fusch – Fotodokumentationen der Kernbohrungen INK KB 4/12 bis INK KB 7/12
- [12] 2P Baumesstechnik: KW Bärenwerk – Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen. 15.01.2013
- [13] Salzburg AG: KW Bärenwerk Portal Nord, Messstelle Inklinometer INK_9. Messung am 30.11.2012 bis Messung am 27.03.2014
- [14] Reisinger Brunnenbau und Bohrtechnik: Salzburg AG, Fusch – Rammsondierung RS 1a bis RS 8. 15.04.2011
- [15] Google, Inc. – Google Earth: Bild 33T 335601.36 m E 5230077.12 m N, Bildaufnahmedatum 1.1.2000. Datum des Zugriffs: 13.08.2014.
- [16] geo² ZT Ges.m.b.H: Aktenvermerk – KW Bärenwerk. Zwischenergebnisse der Grundwassermessstelle und des Porenwasserdruckgebers. 21.01.2014
- [17] Marti GmbH, 8045 Graz: Baustelle – KW Bärenwerk. Bautagesberichte von 03.08.2012 bis 06.02.2013 (Nummer 5 bis Nummer 143)

- [18] Salzburg AG: KW Bärenwerk VE Nord. Fotodokumentationen der Baumaßnahmen von 31.07.2012 bis 11.02.2013
- [19] Hochmair & Partner ZT GmbH: KW Bärenwerk VE Nord – Drainagen. Lage- und Höhenplan. 11.11.2013
- [20] Salzburg AG: KW Bärenwerk Portal Nord, Messstelle Inklinometer INK_5. Messung am 08.10.2012 bis 27.03.2014
- [21] Hochmair & Partner ZT GmbH: KW Bärenwerk Voreinschnitt Nordportal: Zeitbezogene Darstellungen der Setzungen (MQ1, MQ3, MQ5 - MQ14), Bewegungen längs, Bewegungen quer. Zeitraum: 28.01.2013 – 18.12.2013
- [22] Gostelow, T.P.: Rainfall and landslides. <http://eird.org/deslizamientos/pdf/eng/doc5752/doc5752-1.pdf> Datum des Zugriffs: 14.08.2014
- [23] Hydrographischer Dienst Salzburg: Messstelle 104224. Tagesniederschläge 01.01.2012 bis 22.01.2014.
- [24] IGT Geotechnik und Tunnelbau Ziviltechniker Gesellschaft m.b.H.: KW Bärenwerk Sanierung – Portal Nord Ansicht Ankerrippen, PN 22. 30.11.2012
- [25] Fa. Felbermayr Bau GmbH & Co. KG: Spannprotokolle: Bärenwerke. Baustelle: Einschnitt
- [26] Hochmair & Partner ZT GmbH: KW Bärenwerk. Ablesewerte Kraftmessgeräte – permanente Vorspannanker VE Nord. Reihe 1 03.01 – 25.11.2013, Reihe 3 21.01 – 25.11.2013
- [27] Fa. Felbermayr Bau GmbH & Co. KG: Spannprotokolle: Bärenwerke. Baustelle: Damm
- [28] 3P Geotechnik ZT GmbH: Neuberechnung Standsicherheit Aufschüttung BE-Fläche Nord. 28.08.2012
- [29] Hochmair & Partner ZT GmbH: KW Bärenwerk. Ablesewerte Kraftmessgeräte Bewehrte Erde (Dammfuss). Zeitraum 10.12.2012 – 25.11.2013
- [30] Haefeli, R.: Zur Erd- und Kriechdrucktheorie. Mit einer Anwendung auf den Castieler Viadukt der Linie Chur-Arosa der Rhätischen Bahn. In: Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidgen. Techn. Hochschule. Hrsg.: Meyer-Peter, E.: Zürich. Verlag AG Gebr. Leemann & Co., 19453
- [31] Salzburg AG: Videoaufnahme der Kamerabefahrung des Inklinometers INK 9, aufgenommen am 27.03.2014
- [32] Hochmair & Partner ZT GmbH.: KW Bärenwerk Voreinschnitt Nordportal: Zeitbezogene Darstellungen der Setzungen (MQ1, MQ3, MQ5 - MQ14), Bewegungen längs, Bewegungen quer. Zeitraum: 17.01.2013 – 04.03.2013

- [33] Marte, R.: Vorlesung „Massenbewegungen“. Lehrveranstaltung Bodenmechanik und Grundbau VA, Wintersemester 2013/2014, TU Graz.
- [34] Rocscience: SLIDE Version 6.0, Tutorial Manual
- [35] Chu, S.: Rankine analysis of active and passive pressure in dry sands. In: Soils and Foundations 31 (4). Hrsg. Japanese Geotechnical Society. Elsevier B.V., 1991