

Numerische Untersuchung eines mittels Spritzbetoninnenschale verstärkten Stollenbauwerks in einer Massenbewegung

Numerical analysis of a gallery in a landslide reinforced by a
shotcrete lining

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

erstellt von

Peter Wellenzohn

eingereicht am

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Ingenieurgeologie
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOM-INGENIEUR

Betreuer:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel

und

Dipl.-Ing. Kurt Mair am Tinkhof

Wien, 20.11.2013

Widmung und Danksagung

Eine Diplomarbeit schreibt sich bekanntlich nicht von alleine, weshalb ich mich bei allen Unterstützern recht herzlich bedanken möchte.

Diese Diplomarbeit ist meinen Eltern Isolde Vill Wellenzohn und Ernst Wellenzohn gewidmet, die mich während des gesamten Studiums tatkräftig in jeglicher Hinsicht unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinem Professor Rainer Poisel für seine tatkräftige Unterstützung und für die Gelegenheit, dass ich durch diese praxisorientierte Diplomarbeit einen Einblick in das Arbeitsleben als Bauingenieur erhalten habe. Weiters gilt ein großer Dank meinem Betreuer Kurt Mair am Tinkhof, der sich stets Zeit genommen hat, mich mit seinen fachlichen Kompetenzen über so manches Tief hinwegzubringen.

Gedankt sei auch meiner Freundin Lisa die stets Verständnis für meine Arbeit gezeigt hat und mich, wo immer es ging, unterstützte. Last but not least möchte ich meinem Bruder und meiner Schwester danken die stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Kurzfassung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Untersuchung eines Schadenfalls in einem Stollen, der durch die Gleitzone einer Massenbewegung hindurchführt. Dazu wurde der Hang inklusive Stollen und zugehörigen Sanierungsmaßnahmen mit dem kontinuumsmechanischen Programm FLAC (“Fast Lagrangian Analysis of Continua“) simuliert. Ziel war die Verfolgung und Analyse sowie die zukünftige Entwicklung der Bewegungsvorgänge und deren Auswirkung auf die Standsicherheit des Stollens.

Der Hang wurde durch bauliche Maßnahmen am Hangfuß erst vor wenigen Jahren reaktiviert; seit diesem Zeitpunkt wird der Stollenausbau deformiert und es kam zu Rissbildungen. Die Messungen vor Einbau der Spritzbetonschale zeigten, dass die Horizontalverschiebungen des Stollens und der Oberfläche etwa 10-12 mm pro Jahr betragen. Wegen der fortschreitenden Schädigungen wurde der Stollenausbau mittels einer Spritzbetonschale verstärkt. Seitdem wird der Stollen nicht mehr deformiert, die Horizontalverschiebungen des Stollens blieben aber gleich.

Beim Modellaufbau wurde in den Hang eine Gleitzone mit geringerer Festigkeit eingebaut, durch welche der Stollen verläuft. Nach dem Aufbau der Insitu- Spannungen wurden der Gleitzone die abgeminderten Parameter zugewiesen und so lange Berechnungsschritte durchgeführt, bis sich eine durchgehende Gleitzone ausbildete. Anschließend wurde der Stollen ausgebrochen und der historische Stollenausbau eingebaut. Durch Verändern der Materialparameter sowie der Position und Dicke der Gleitzone wurde das Bewegungsverhalten des Hanges und des Stollens beeinflusst, um so die beobachteten Verschiebungen, Stollenkonvergenzen und Rissbilder zu erhalten

Die beste Übereinstimmung zeigt sich bei der Modellvariante mit einer Gleitzonendicke von 3,5 Metern, wobei der gesamte Stollen in der Gleitzone liegt. Durch die Scherverschiebungen der Gleitzone wird der Stollen deformiert und es kommt zu Überschreitungen der Zugfestigkeit. Anfangs wird an mehreren Stellen an der Schalenaußenseite die Zugfestigkeit überschritten. Von wesentlichem Interesse sind aber die Zugrisse (=Überschreitung der Zugfestigkeit) an der Innenseite, die sich in weiterer Folge ausbilden, da nur diese in der Realität an der Stolleninnenseite beobachtet werden können. Wie in der Realität beobachtet, bilden sich Zugrisse in der linken Sohle und im Bereich der rechten Firste aus. Auch das Verhältnis der horizontalen Stollenverschiebung zu den Stollenkonvergenzen stimmt mit den Monitoringdaten überein. Nach Überschreitung der Zugfestigkeit an mehreren Stellen (=Ausbildung von Zugrissen) wurde der Einbau der Spritzbetonschale simuliert. Die stabilisierende Wirkung der Spritzbetonschale auf die Verformungen des historischen Stollenausbaus zeigt sich anhand der Stollenkonvergenzen, die wie in der Realität in Folge stark abnehmen. Die talseitige Horizontalverschiebung des Stollens kann durch den Spritzbetonausbau nicht gestoppt werden. Der Stollen wird zwar nicht weiter verformt, gleitet aber mit der Massenbewegung weiter talwärts.

Wird die numerische Berechnung über den derzeit bestehenden Zustand fortgeführt, steigen die Spannungen in der Spritzbetonschale nur mehr unwesentlich an. Es kann daher angenommen werden, dass die Spritzbetonschale in nächster Zeit den Belastungen standhalten wird. Durch die Verschiebung des Stollenbauwerks kommt es aber in den Übergangsbereichen zwischen bewegten und unbewegten Hangbereichen zu Rissbildungen, die zur Gefährdung der Standsicherheit in diesen Bereichen führen könnten.

Abstract

This diploma thesis deals with the analysis of a damage event in a gallery which runs through the shear zone of a landslide. To analyse the motion, the slope, the gallery and its redevelopment measures are set up and simulated in the continuum-mechanical program FLAC. The results of the numerical model were adapted to the monitoring results in reality by changing the material parameters as well as the geometry of the shear zone of the landslide. The objective is the observation, analysis and future-development of the courses of movement. The analysed mass movement has been active again for a few years having been reactivated by building activities at the hillside toe. Thereby the gallery was deformed to such an extent that cracks were formed, which made remedial measures using steel arches and a shotcrete lining necessary. Since the first cracks formed, the gallery as well as the slope have been monitored by inclinometer measurements, measurements of gallery convergences and the observation of crack widths.

Based on the geometric data a model in FLAC is built up, in which the historical gallery form is integrated. The calculations are performed until the inner surface of the gallery displays tension cracks observed in reality. Subsequently, the shotcrete lining is integrated into the model and the calculations are carried on. Displacements and stresses are continuously recorded in the model.

The best correlations appear in the model variant with a shear zone thickness of 3.5 meters. First, cracks are formed in the left invert, followed by cracks in the right roof. The crack pattern gained, correlates well with the one observed. Moreover, the horizontal gallery calculated and the gallery convergences correlate well with the monitoring data. After simulation of the shotcrete lining a stabilizing effect (in terms of the gallery convergences) can be observed. The horizontal displacements of the gallery downslope are not influenced by the shotcrete lining, which can also be observed in reality.

When analysing the actual and future stresses of the shotcrete lining, it can be supposed that the shotcrete shell will withstand the deformations. This means that the central area which has been supported by shotcrete is not at risk. In the future the problem will be displaced to the transition areas of active from not moved to moved zones, where already cracks can be observed.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Geologische Grundlagen	2
2.2	Hang und Stollengeometrie	2
2.3	Monitoring und Schadensbild	5
2.4	Schadensursache	5
2.5	Sanierungsmaßnahmen	10
2.6	Kriechverhalten des jungen Spritzbetons	10
3	Grundzüge des Programms FLAC	12
3.1	Finite Differenzen Methode	12
3.2	Das Programm FLAC	13
4	Modellierung mittels FLAC	16
4.1	Allgemeines	16
4.2	Generierung von Berechnungsnetzen	17
4.3	Rückrechnung der Verformungs und Festigkeitseigenschaften des Gebirges auf Basis der Deformationen des Stollens	20
4.4	Berechnung	21
4.4.1	Berechnungsablauf	21
4.4.2	Materialmodelle	23
4.5	Modellvarianten	24
5	Berechnungsergebnisse	30
5.1	Modell 1	30
5.2	Modell 2	40
5.3	Modell 3	47
5.4	Modell 4	55
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	64
6	Interpretation	65
7	Zusammenfassung	70

Kapitel 1

Problemstellung

In dieser Diplomarbeit wird ein Stollen behandelt, welcher durch eine nacheiszeitliche Massenbewegung hindurchführt. Der Stollen wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts errichtet und wies bis vor einigen Jahren keinerlei Schäden auf. Man kann davon ausgehen, dass der Hang zuvor stabil war, sich jedoch sehr nahe am Grenzgleichgewicht befand und erst durch bauliche Eingriffe am Hangfuß vor wenigen Jahren reaktiviert wurde. Es kann aber auch durchaus sein, dass der Hang bereits vorher in Bewegung war, die Gleitzone jedoch oberhalb des Stollens verlief, sich erst durch baulich Eingriffe am Hangfuß weiter nach unten verlagerte und nun durch den Stollen verläuft. Seit diesem Zeitpunkt ist die Massenbewegung jedenfalls aktiv und deformiert den sich in der Bewegungszone befindenden Stollen dermaßen, dass Sanierungsmaßnahmen mittels Tunnelbögen und Spritzbeton erforderlich wurden. Obwohl Verstärkungen dazu führen, dass der verstärkte Bauteil Spannungen anzieht (Poisel et al., 1996), wurde diese Maßnahme durchgeführt, um den Stollen noch eine gewisse Zeit funktionsfähig zu erhalten. Durch aufwendiges Monitoring, welches nach Beobachtung der ersten Rissbildungen im Stollenausbau begonnen wurde, konnten Deformationen und Verschiebungen aufgezeichnet werden. Durch die Sanierungsmaßnahmen konnten die Verformungen des Stollens stark reduziert werden, jedoch verschiebt er sich noch immer im selben Ausmaß talwärts wie vorher. Die Kernaufgabe dieser Arbeit ist die Erstellung eines Finite Differenzen Modells mittels FLAC, anhand welchem der oben beschriebene Schadensfall simuliert werden soll. Anhand von vorgegebener Hang- und Stollengeometrie sowie realistischen Materialparametern soll versucht werden, das Modell an die Ergebnisse aus dem Monitoring anzupassen, um so eine möglichst wirklichkeitsgetreue Wiedergabe der Versagensvorgänge zu erhalten. Ziel ist die Verfolgung und Analyse sowie die zukünftige Entwicklung der Bewegungsvorgänge und deren Auswirkung auf die Standsicherheit des Stollens.

Grundlagen

2.1 Geologische Grundlagen

Der untersuchte Stollenabschnitt befindet sich in 24 Meter Tiefe und quert die Massenbewegung in einer Länge von ca. 46 Metern. Diese Angaben beruhen auf der Beobachtung der erhobenen Schäden im Stollenquerschnitt. Die Massenbewegung hat die Form einer Muschel und wird nur in ihrem tiefsten Punkt vom Stollen durchquert (Abb. 2.1). Das Untersuchungsgebiet liegt im *Flysch*, welcher aus einer sedimentären Wechselfolge aus dünn- bis dickbankigen Sandsteinen von häufig hoher Festigkeit und Zwischenlagen unterschiedlicher Mächtigkeit aus dünnschichtigem bis plattigem Tonstein/-mergel mit großteils sehr geringer Festigkeit besteht. Es gibt in diesem Gebiet fast keine Aufschlüsse und die meisten Erkenntnisse stammen aus den durchgeführten Bohrungen. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die Schichten leicht gefaltet sind und mit 40° S und SSW einfallen, der Hang fällt nach WNW. Das gesamte Umgebungsgebiet wurde als nacheiszeitliche Großhangbewegung identifiziert und Teile davon als potenziell instabil klassifiziert.

2.2 Hang und Stollengeometrie

Der Stollen wurde Anfang des 20. Jahrhunderts erbaut - wie üblich zu dieser Zeit in bergmännischem Vortrieb. Es wurde ein Querschnitt mit ca. 2,4 m Breite und 2,55 m Höhe vorgetrieben und mit einer Holzkonstruktion gestützt (Abb. 2.3). In einem zweiten Schritt wurden die Sohle und Ulmen mittels Stampfbeton errichtet, die Firste als Steingewölbe gemauert und mit Ausbruchsmaterial hinterfüllt. Die Holzkonstruktion wurde im Querschnitt belassen. Diese Bauweise war in jener Zeit üblich für das Errichten von Stollen in druckhaftem Gebirge. Diese Baumethode führte zu mangelhaftem Kraftschluss zwischen Ausbau und Gebirge und damit zu großer Nachgiebigkeit des Ausbaus, vor allem im Firstbereich. Dieses Problem wurde bereits vor einigen Jahrzehnten erkannt und aufgrund dessen wurde der Firstbereich in anderen Abschnitten nachträglich durch Zementinjektionen verstärkt. Im gegenständlich untersuchten Bereich wurden solche Injektionsarbeiten nicht

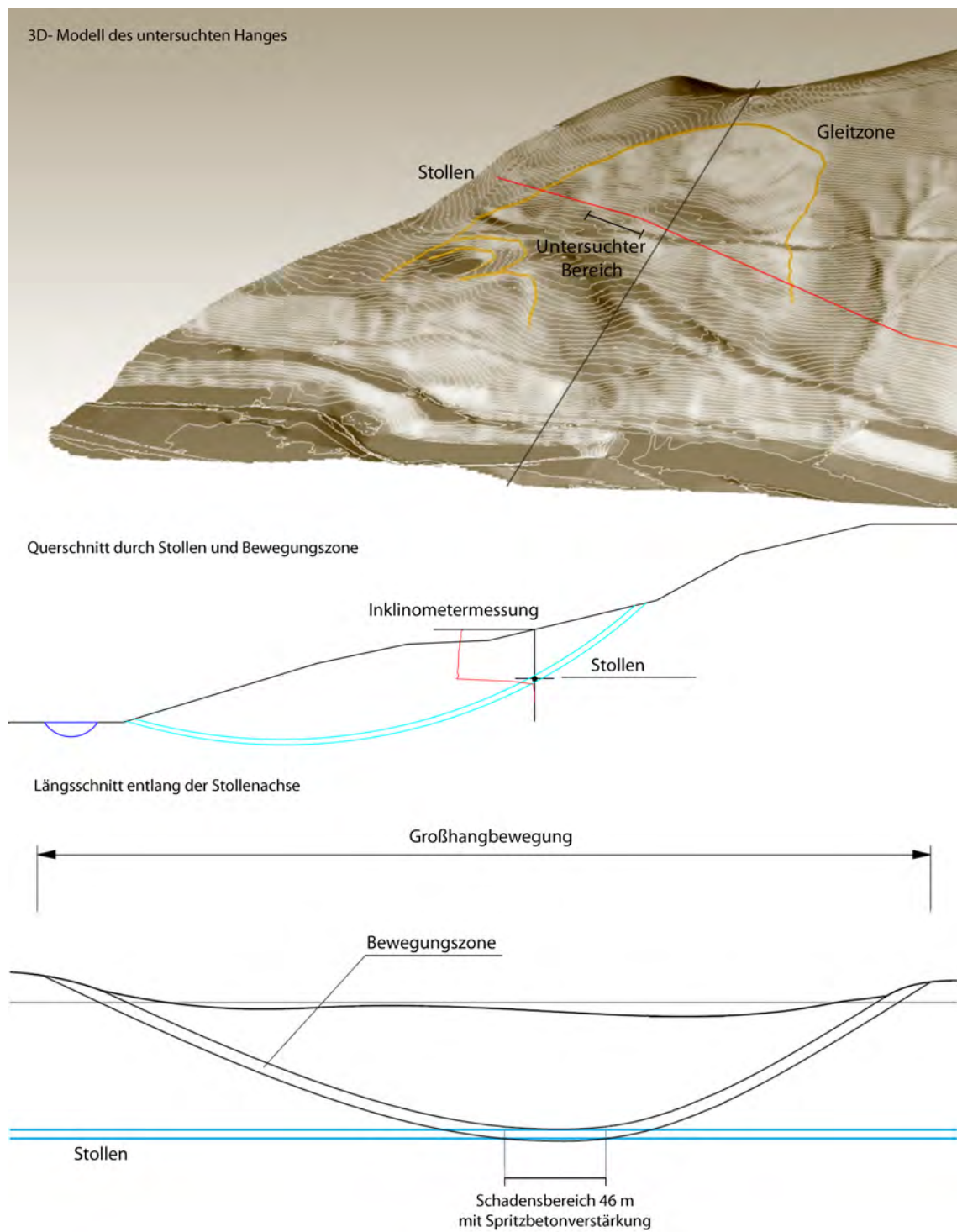


Abbildung 2.1: 3D-Modell der Massenbewegung mit Quer- und Längsschnitt durch den Stollen und die Bewegungszone.

vorgenommen.

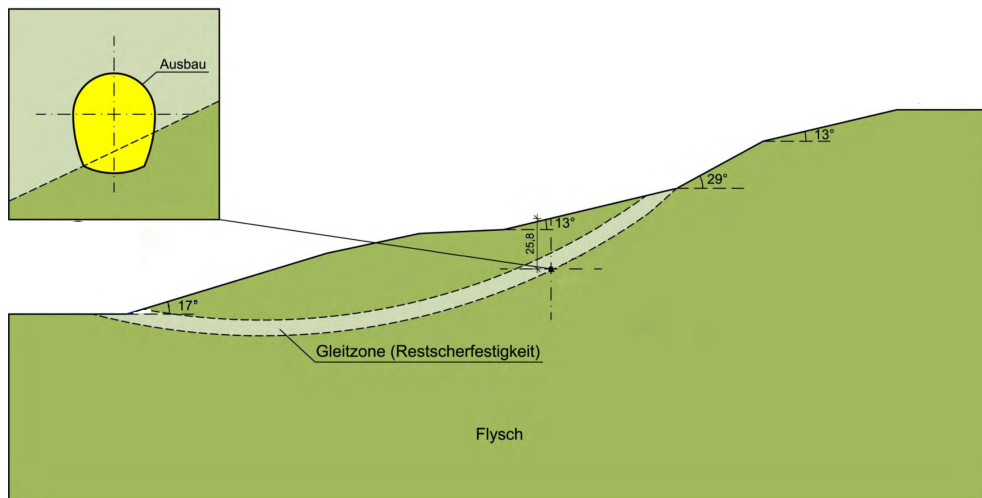


Abbildung 2.2: Querschnitt durch den untersuchten Hang.

Nach derzeitigen Erkenntnissen zieht sich eine Gleitschicht von der oberen Kante des Hanges bis an den Hangfuß durch. In dieser Gleitzone aus sehr stark zerlegtem *Flysch* befindet sich der zu untersuchende Stollenbereich (Abb. 2.2). Die Neigung des untersuchten Hanges liegt zwischen 13-29°. Die Massenbewegung weist in etwa eine Länge von 280 m und eine größte Mächtigkeit von ca. 45 m auf.

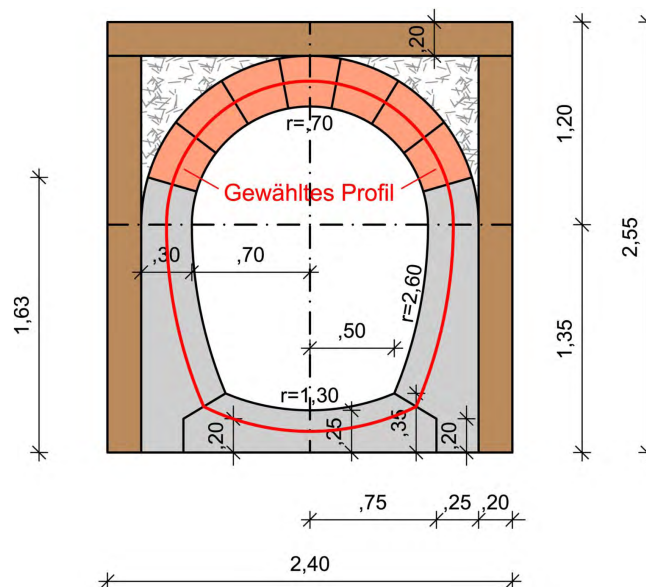


Abbildung 2.3: Historischer Querschnitt des Stollens.

2.3 Monitoring und Schadensbild

Nach Auftreten der ersten Schäden am Stollen wurde ein ausgedehntes Monitoringsystem installiert. Es wurden Inklinometer eingebaut, die Verschiebungen des Stollens bestimmt sowie Konvergenzen und Rissweiten beobachtet (Abb. 2.5). Die Inklinometermessung in Abbildung 2.4 zeigt, dass die Masse als kompakter Körper abgleitet. Die Scherzone ist sehr schmal und der darüberliegende bewegte Bereich weist eine über die Höhe konstante Bewegung auf, es handelt sich also um eine Gleit- und um keine Kriechbewegung. Dies erkennt man auch, wenn man in Abbildung 2.5 die Horizontalverschiebungen an der Oberfläche mit jenen des Stollens vergleicht. Die Messreihe vor Einbau der Spritzbetonschale zeigt, dass die Horizontalverschiebungen des Stollens und der Oberfläche etwa 10-12 mm pro Jahr betragen, wobei 80 % der Bewegungen in den Wintermonaten stattfinden. Die Horizontal- und Vertikalkonvergenzen betragen in etwa ein Viertel der genannten Horizontalverschiebungen des Stollens und zeigen denselben jahreszeitlichen Trend wie diese. Zwei Jahre nach der Feststellung der ersten Risse wurde die Spritzbetoninnenschale zur Stabilisierung des Stollens eingebaut. Betrachtet man die anschließenden Konvergenzen und Verschiebungen, so kann man erkennen, dass die Stollen sich nicht mehr deformiert. Bei den Horizontalverschiebungen des Stollens und der Oberfläche lässt sich jedoch keine Stabilisierung erkennen, der Stollen bewegt sich in den Wintermonaten immer noch bis zu 10 Millimeter talwärts.

Die oben genannte Hangbewegung führt zu einer Deformation des historischen Stollenbauwerks, es wird in horizontaler Richtung gedehnt und in vertikaler Richtung gestaucht (Abb. 2.7). Die Beträge dieser Verschiebungen sind annähernd gleich groß. Dabei treten achsparallele Zugrisse in der bergseitigen Firste und der talseitigen Sohle auf, außerdem kommt es zu Abplatzungen aufgrund der Druckspannungen in der unteren Hälfte der bergseitigen Ulme und in der oberen Hälfte der talseitigen Ulme. Die Schäden sind in Abbildung 2.6 rot gekennzeichnet, das gesamte Ausmaß der Beschädigung zeigen die Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9. Im Übergangsbereich zwischen bewegter und unbewegter Zone treten zunehmend schräg über den Querschnitt des Stollens verlaufende Risse auf. Die zyklische Bewegungsrate in Abbildung 2.4 zeigt jährlich wiederkehrende Bewegungsschübe, welche auf den sich ändernden Grundwasserspiegel zurückgeführt werden können.

2.4 Schadensursache

Das vorliegende Schadensbild sowie die auftretenden Verschiebungen lassen auf einen gedrehten Spannungszustand wie er in Abbildung 2.10 dargestellt ist, schließen. Aus den Ergebnissen der geodätischen Messungen geht hervor, dass sich der Stollen im Bereich der Gleitzone befindet (Abb. 2.1). Das dazugehörige Böschungsmodell zeigt, dass bei einer Massenbewegung genau im Bereich der Gleitzone dieser gedrehte Primärspannungszustand auftritt, der zum vorliegenden Schadensfall führt. Die schräg über dem Querschnitt verlaufenden Risse lassen darauf schließen, dass der Stollen hier durch die Grenze zwischen bewegtem und unbewegtem Bereich verläuft. Als Erklärung dafür dient einerseits das entstehende Rissbild eines stark belasteten Balkens auf zwei Stützen (Abb. 2.11) und andererseits das Rissbild, welches bei einem torsionsbelasteten Rohrquerschnitt entsteht (Abb. 2.12).

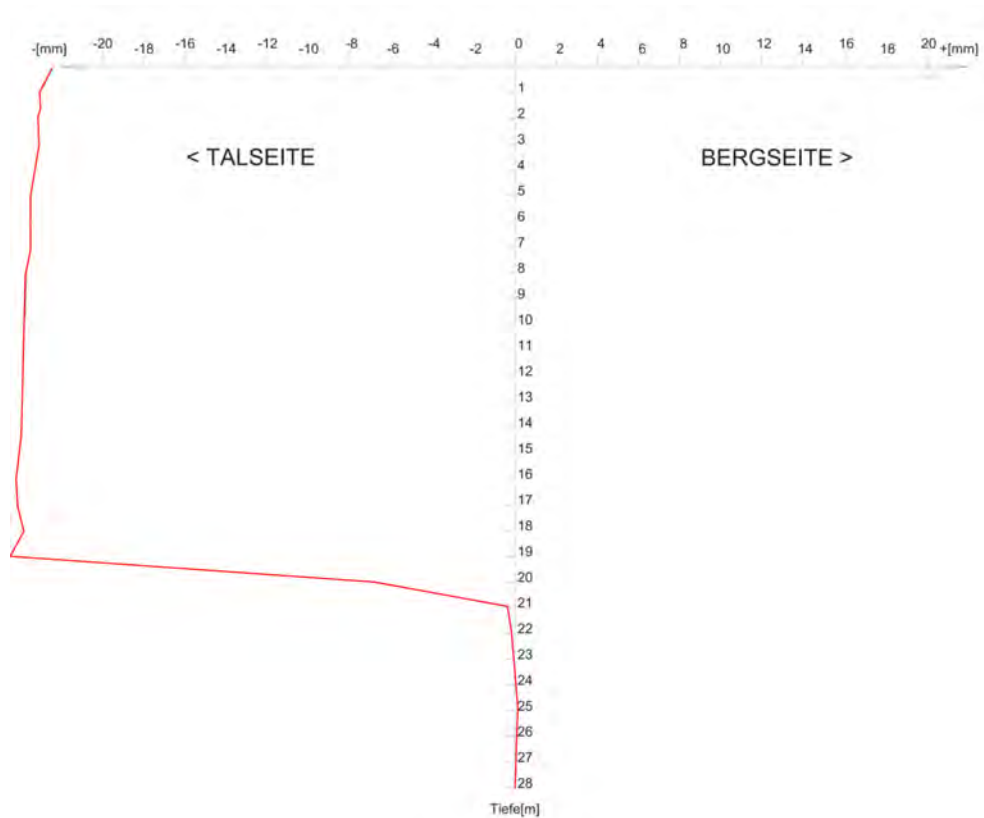


Abbildung 2.4: Inklinometermessung im betrachteten Hang in unmittelbarer Nähe zum Stollen.

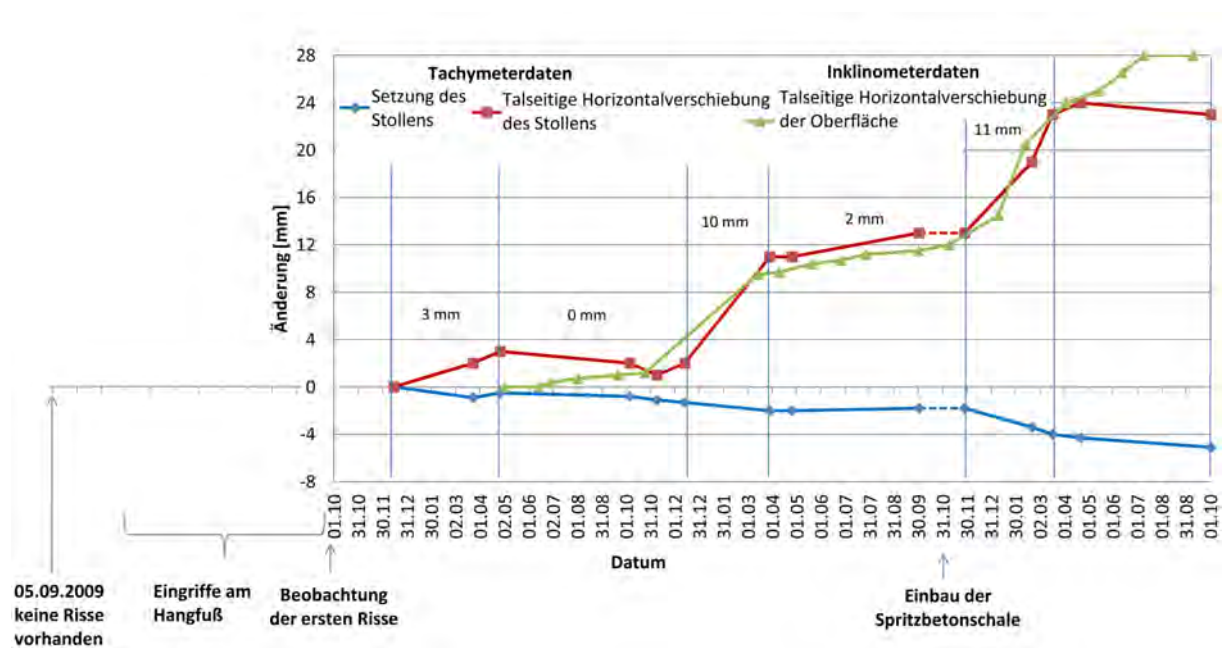


Abbildung 2.5: Horizontalverschiebung des Stollens und der Oberfläche sowie Setzung des Stollens mittels Inklinometer- und Tachymetermessung.

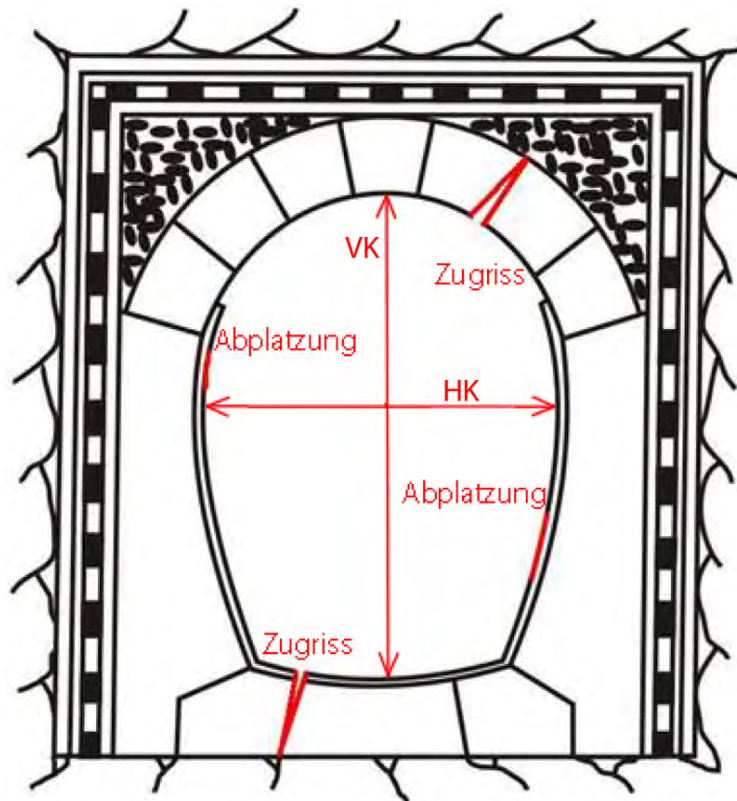


Abbildung 2.6: Schadensbild im historischen Stollen vor Durchführung der Sanierungsmaßnahmen.

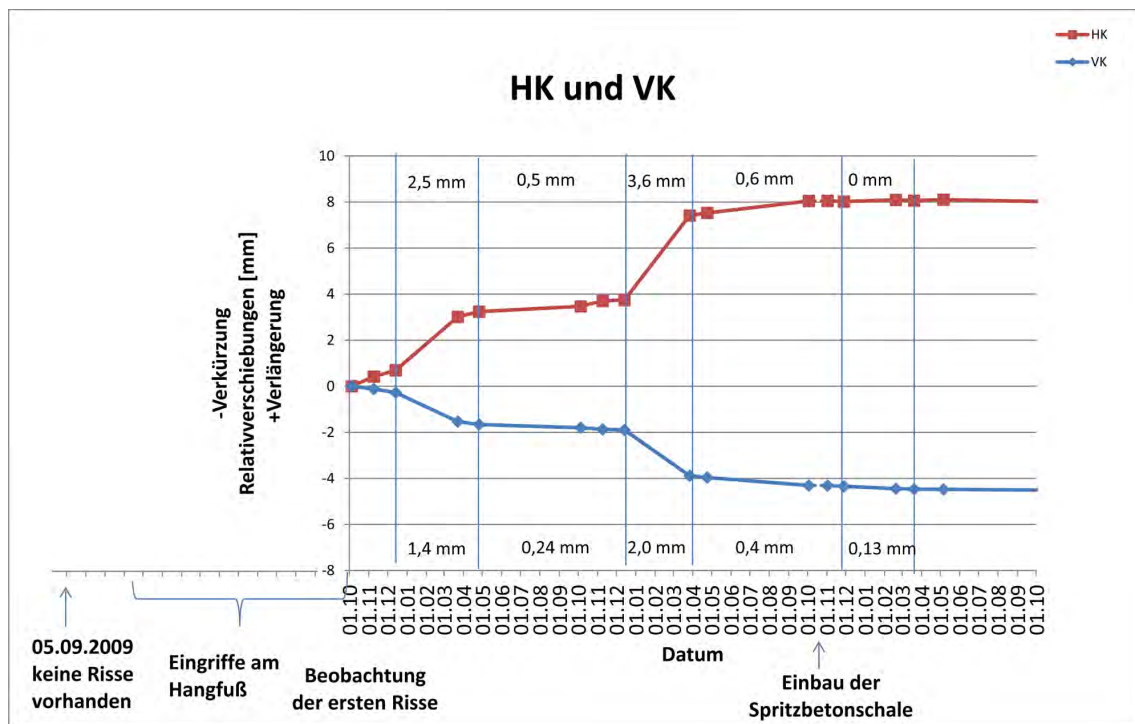


Abbildung 2.7: Horizontale und vertikale Stollenkonvergenzen (siehe auch Abb. 2.6).



Abbildung 2.8: Zugrisse in der Sohle des Stollens (Poisel, 2010).



Abbildung 2.9: Zugrisse in der Firste des Stollens (Poisel, 2010).

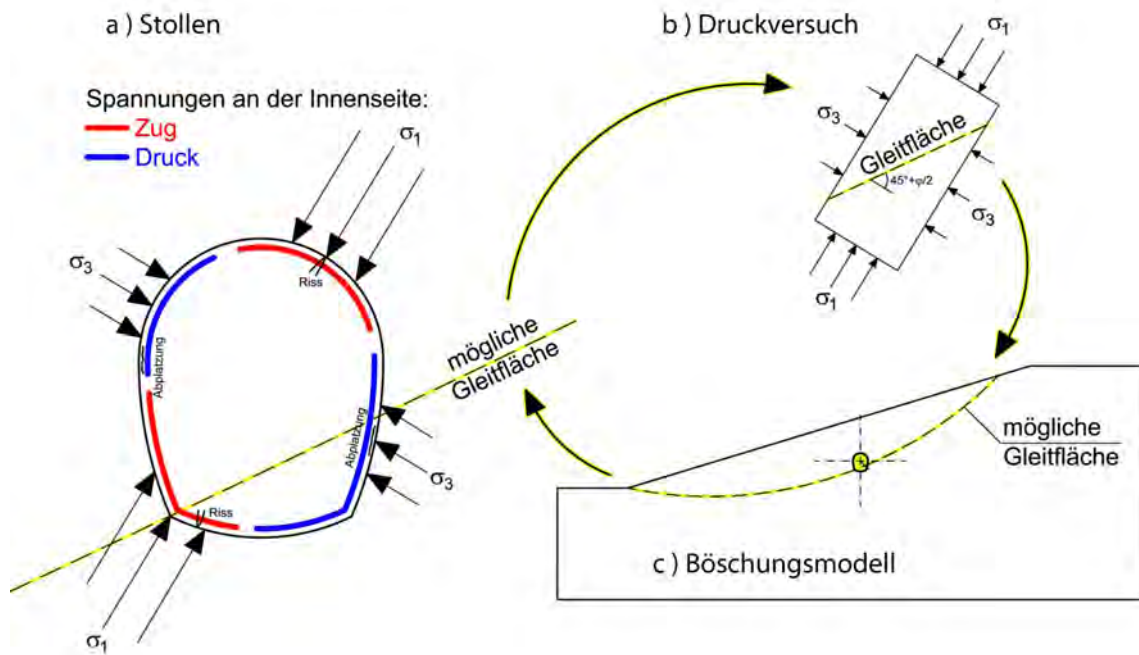


Abbildung 2.10: Hauptspannungsrichtungen in einer Gleitzone.

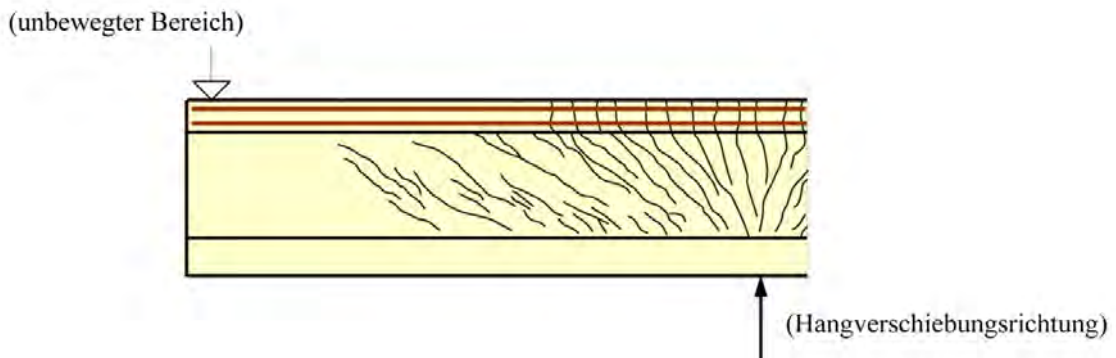


Abbildung 2.11: Schräge Zugrisse (“Schubrisse“) in einem Biegebalken (nach: Kollegger, 2011).

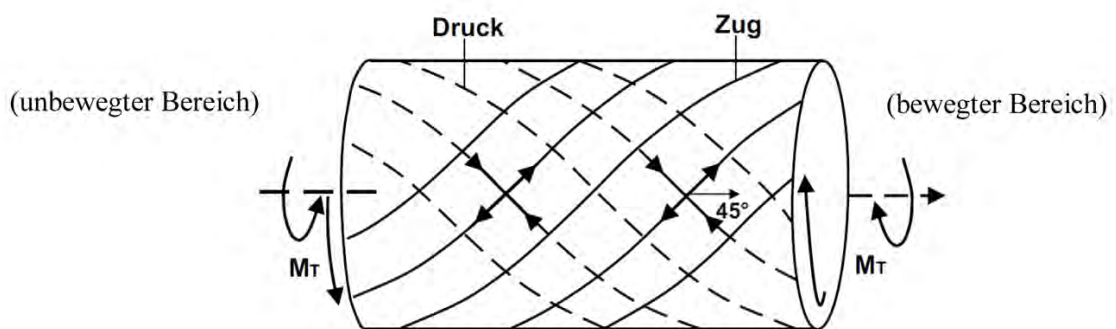


Abbildung 2.12: Hauptspannungstrajektorien (d.h. die Zugrisse haben die Richtung der Drucktrajektorien) zufolge Torsion eines Zylinders (aus: Leonhardt, 1964)

2.5 Sanierungsmaßnahmen

Aufgrund der erheblichen Schäden musste der Stollen auf einer Länge von 46 m saniert werden. Als sofortige Maßnahmen wurden die Risse mit Zementmörtel verschlossen. Als nächste Stabilisierungsmaßnahme wurde eine Spritzbetoninnenschale hergestellt, um die Funktionsfähigkeit des Stollens eine gewisse Zeit zu erhalten. Die eingebrachte Spritzbetonschale besitzt eine Dicke von 10 cm und entspricht mindestens der Festigkeitsklasse C35/45. Zusätzlich dazu wurden Tunnelbögen der Güte BSt 500 im Abstand von je einem Meter verbaut. Zwischen den Tunnelbögen wurden Baustahlgitter AQ 42 eingebracht, um den Kraftschluss zu gewährleisten. Um den Stollen weiterhin mittels Messgeräten überwachen zu können, wurden neue Messpunkte gesetzt. Zusätzlich wurden in der Spritzbetonschale Aussparungen angeordnet, um weiterhin auch am alten Stollenbauwerk Messungen vornehmen zu können.

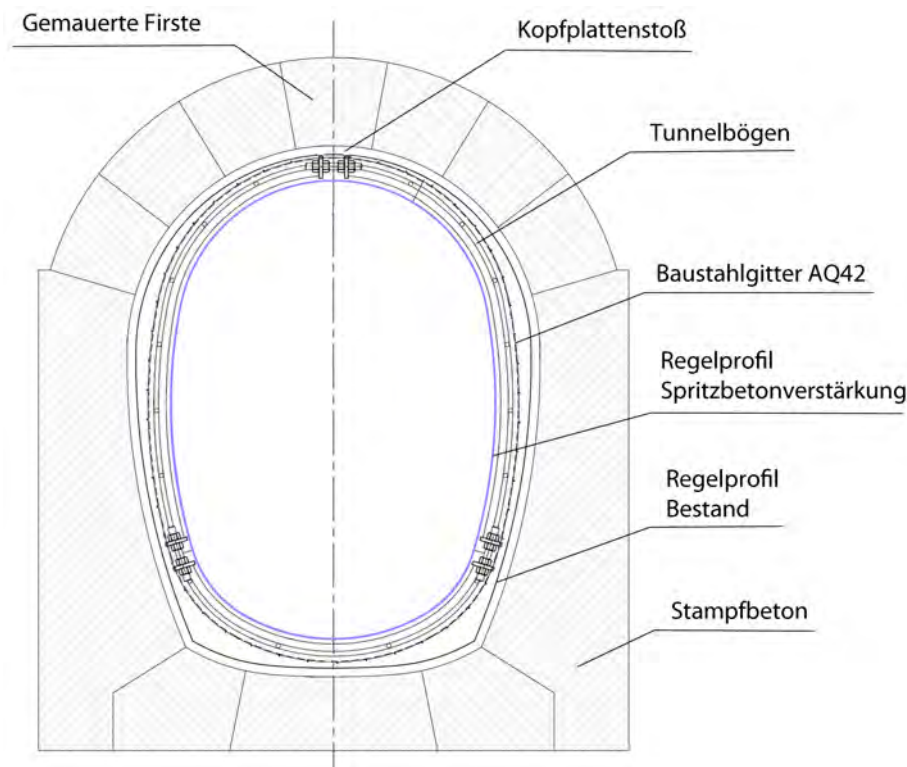


Abbildung 2.13: Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen (10 cm Spritzbetonschale und Tunnelbögen)

2.6 Kriechverhalten des jungen Spritzbetons

Durch Literaturrecherchen (Rokahr et al., 1987) (Müller, M. 2001) hat sich gezeigt, dass es sehr wenig Langzeitversuche (über einige wenige Tage hinaus) zum Kriechverhalten von Spritzbeton gibt. Unter Kriechen versteht man die zeit- sowie belastungsabhängige Verformung von Beton. Besonders junger Spritzbeton weist ein ausgeprägtes Kriechverhalten auf, wodurch ein Teil der Spannungen abgebaut wird. Beim Kriechvorgang kommt es im

Beton zu Umlagerungen von chemisch nicht gebundenem Wasser, und zu Verdichtungs- und Gleitvorgängen zwischen den Gelpartikeln. Abbildung 2.14 zeigt einen längsstau-
chungsgesteuerten Langzeitversuch (Müller, M. 2001), bei dem die Belastung aufgrund
des Kriechvorgangs innerhalb von 16 Tagen um 63 % reduziert werden musste, um keine
Längenänderungen des Prüfkörpers hervorzurufen.

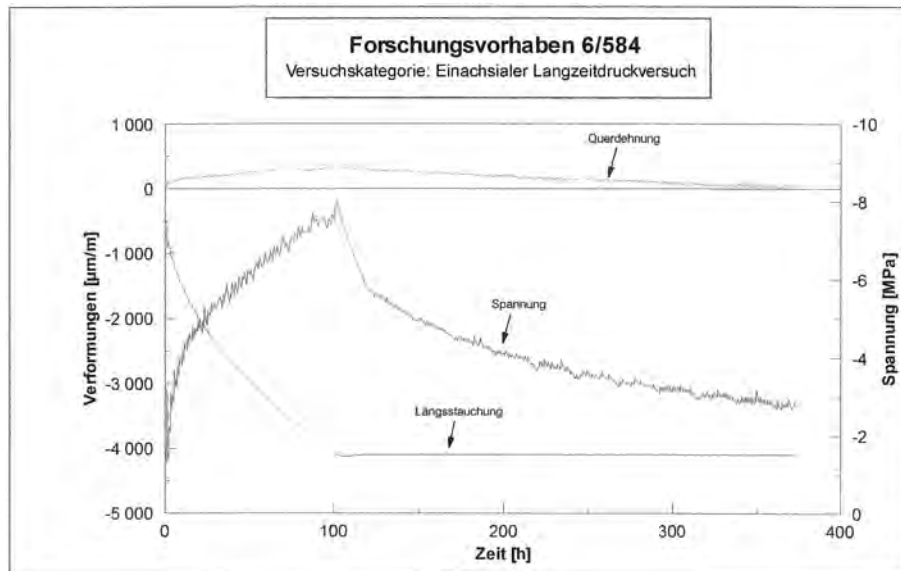


Abbildung 2.14: Kriechverhalten des jungen Spritzbetons (aus: Müller, M. 2001).

Grundzüge des Programms FLAC

3.1 Finite Differenzen Methode

Viele physikalische Probleme können mit Hilfe von Differentialgleichungen beschrieben werden. Die Finite Differenzen Methode ist, wie die Finite Elemente Methode, ein Rechenverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen beziehungsweise Differentialgleichungssystemen. Der Unterschied zwischen der Finiten Elemente Methode und der Finiten Differenzen Methode besteht darin, dass bei der ersteren Differentialgleichungssysteme mithilfe von Matrizen gelöst werden, während man sich bei der Finite Differenzen Methode der Lösung schrittweise nähert. Bei der Finite Differenzen Methode werden die Ableitungen der Differentialgleichungen durch Differenzenquotienten ersetzt, welche aus der Definition der Ableitung oder der Formel von Taylor folgen. Durch diese Methode wird die Differentialgleichung in eine Differenzgleichung überführt, welche dann mithilfe von numerischen Methoden gelöst wird. Alle Diskretisierungsbeziehungen besitzen die folgende Form (Itasca, 2013):

$$\text{Ableitung} = \text{Differenzenquotient} + \text{Diskretisationsfehler}$$

Wird der Diskretisationsfehler vernachlässigt, so bezieht sich der Differenzenquotient nicht auf die abgeleitete Funktion f , sondern auf eine Approximation F .

$$\text{Ableitung der Funktion} \approx \text{Differenzenquotient der Funktion } F$$

Als Approximation der Ableitung einer Funktion $f(x)$ in einem bestimmten Punkt können die Vorwärts-, Rückwärts- und Zentraldifferenz herangezogen werden. Von diesen drei Möglichkeiten stellt die Zentraldifferenz die beste Näherung dar. Man kann sich dem Ergebnis sowohl von dem oberen als auch von dem unteren Grenzwert annähern. Die Genauigkeit der Lösung hängt wesentlich von der Netzfeinheit ab. Je nach Genauigkeitsanforderungen soll die Netzfeinheit variiert werden. Für eine Vertiefung der Finite Differenzen Methode wird auf (Roth, 1999) verwiesen.

3.2 Das Programm FLAC

FLAC (“Fast Lagrangian Analysis of Continua“) ist ein Finite Differenzen Programm der Itasca Consulting Group das zur numerischen Berechnung von Kontinuumsmodellen in 2D herangezogen wird. Dieses Programm kann sehr vielseitig im Ingenieursbereich, vorallem in der Geotechnik eingesetzt werden. Es besteht auch die Möglichkeit thermische und dynamische Problemstellungen zu lösen. Weiters können Tunnelschalen, Schlitzwände, Pfähle und Anker mit den jeweiligen mechanischen Eigenschaften ins Modell integriert werden (Itasca, 2013).

Das erstellte Kontinuumsmodell stellt eine Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse dar und wird in sehr kleine Elemente zerlegt. Dieses diskretisierte Kontinuum nennt man “Gitter“, die “Zone“ ist die kleinste Einheit der Diskretisierung, ihre Eckpunkte werden als “Gitterpunkte“ bezeichnet. FLAC basiert nicht auf globalen Steifigkeits- und Massenmatrizen sondern an jedem Gitterpunkt bzw. in jeder Gitterzone werden die Grundgleichungen angeschrieben und schrittweise über eine fiktive Zeit gelöst. Der Zustand eines Gitterpunktes während eines Zeitschrittes hängt ausschließlich vom Zustand der Feldvariablen seiner Nachbarzonen ab und der Zustand einer Zone wird nur von ihren Randpunkten beeinflusst. Die Verfahrensstabilität ist nur dann gegeben, wenn sich die physikalischen Informationen innerhalb eines Zeitschrittes nicht weiter als bis zu den Nachbarpunkten ausbreiten (Roth, 1999).

Anfangs werden an jedem Gitterpunkt die herrschenden Teilknotenkräfte aus den benachbarten Zonen, die im vorherigen Rechenschritt ermittelt wurden, und die Gravitationskräfte aufsummiert. Falls die Kräfte nicht im Gleichgewicht sind, werden die Gitterpunkte aufgrund des *zweiten Newton’schen Gesetz* beschleunigt.

$$m * \frac{d\dot{u}}{dt} = \sum F$$

Das *zweite Newton’sche Gesetz* wird in Finiten-Differenzen-Schreibweise folgendermaßen dargestellt:

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + F_i^{(t)} * \frac{\Delta t}{m}$$

\dot{u}_iKomponente des Geschwindigkeitsvektors zum Zeitpunkt $(t+\Delta t/2)$ bzw. $(t-\Delta t/2)$

$F_i^{(t)}$.Komponente des Kraftvektors im Gitterpunkt (Kraftbeiträge der Nachbarzonen und Gravitationskräfte)

Δt ...Zeitschritt

m ...Masse des Gitterpunktes (jedes benachbarte Dreieck liefert ein Drittel der Masse)

Bei großen Verschiebungen wird die obige Gleichung über den Zeitschritt integriert und die neuen Koordinaten des Gitterpunkts werden bestimmt:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{u}^{(t+\Delta t/2)} * \Delta t$$

Die nötigen Differentialgleichungen werden unter Zuhilfenahme von inkrementellen Zeitschritten berechnet. Dies erfolgt nach folgendem Grundprinzip:

$$\frac{du}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{\Delta u}{\Delta x} \approx \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

Dieses Lösungsverfahren basiert auf der Berechnung eines kritischen Zeitschritts Δt , in dem die rechnerische Ausbreitungsgeschwindigkeit größer als die physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit der auf das Modell einwirkenden Belastung ist. Aus diesem Lösungsverfahren werden für jeden Gitterpunkt voneinander unabhängige Bewegungsgleichungen erstellt. Gleichzeitig können für jeden beliebigen Zeitschritt Gleichgewichtsbetrachtungen aufgestellt werden. Der sogenannte Berechnungskreislauf in Abbildung 3.1 wird in jedem Zeitschritt durchlaufen und die Werte neu berechnet. Es werden ausgehend von der Bewegungsgleichung aus Spannungen und Kräften neue Geschwindigkeiten und Verschiebungen der Gitterpunkte berechnet. Beim nächsten Schritt werden aus den Geschwindigkeiten der Gitterpunkte Dehnungsgeschwindigkeiten in den Zonen berechnet und über konstitutive Beziehungen neue Spannungen bestimmt.

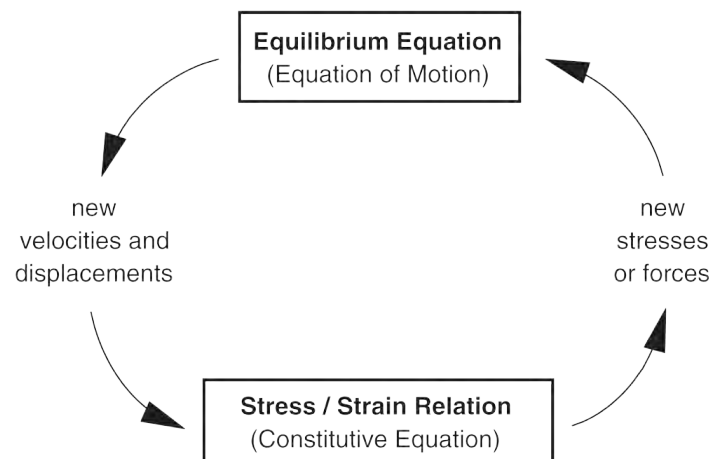


Abbildung 3.1: FLAC Berechnungskreislauf (aus: Itasca, 2013)

Die Werte aller Gittervariablen werden auf Basis von den Werten zu Beginn der Berechnung bei jedem Durchlauf neu ermittelt. Erst nach zahlreichen Durchgängen kann sich eine lokale Störung ausbreiten und Einfluss auf entfernte Bereiche nehmen. Das herrschende Ungleichgewicht im System wird so schrittweise durch Verschiebungen ausgeglichen. Der Rechenvorgang wird fortgeführt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt oder die Rechnung

aufgrund von fortschreitendem Versagen vom Nutzer abgebrochen wird. Nach jedem Rechendurchlauf werden die berechneten Verschiebungen auf das Netz angewendet und neue Koordinaten bestimmt. Als explizites Lösungsverfahren eignet sich FLAC besonders gut für Probleme mit nichtlinearem Verhalten, großen Verformungen und dynamischen Prozessen (Roth, 1999). In FLAC kann man sowohl Berechnungen am verformten als auch am unverformten System durchführen. In dieser Arbeit wurden alle Rechnungen am unverformten System durchgeführt.

Modellierung mittels FLAC

4.1 Allgemeines

Wie bereits erwähnt, wird für die numerische Simulation der kontinuumsmechanische Code FLAC der Itasca Consulting Group verwendet. Der Hang wird mit und ohne Leitungsbauwerk untersucht. Aus der geologischen Untersuchung (Kapitel 2) geht hervor, dass es im betrachteten Hang bereits vor dem Bau des Stollens eine Massenbewegung gegeben hat, aufgrund derer eine Scherzone mit geringerer Festigkeit vorhanden ist. Zum Zeitpunkt des Stollenbaus war der Hang stabil, die Massenbewegung wurde erst vor einigen Jahren durch bauliche Eingriffe am Hangfuß reaktiviert. Um den genannten Fakten gerecht zu werden, wird in den Hang eine Gleitzone mit geringerer Festigkeit eingebaut, (Abb. 4.1) durch welche der Stollen verläuft. Aufgrund der Messungen ist bekannt, dass der Hang leicht in Bewegung ist. Daher ist anzunehmen, dass er sich knapp unterhalb des Grenzgleichgewichts befindet. Um die Parameter für das Grenzgleichgewicht zu erhalten wird das Modell ohne Leitungsbauwerk mittels der Regel von Fellenius rückgerechnet. In der Rechnung mit dem Leitungsbauwerk werden die Parameter so modifiziert, dass sich das Modell unterhalb des Grenzgleichgewichts befindet. Die Rechendurchgänge werden so lange fortgesetzt, bis sich eine durchgehende Gleitzone ausgebildet hat. Anschließend wird der Stollen ausgebrochen und die historische Stollenschale ins Modell eingebaut. Die historische Stollenschale wird durch die Massenbewegung belastet und nach Auftreten der entsprechenden Verformungen wird in einem letzten Schritt die Spritzbetonschale, als Sanierungsmaßnahme in das Modell integriert und auf Deformationen untersucht. Der historische Stollenquerschnitt sowie die Spritzbetonschale wird durch Schalenelemente mit unterschiedlichen Stärken modelliert. Während des gesamten Rechenvorgangs werden Verschiebungen und Spannungen aufgezeichnet um sie anschließend zu analysieren. Durch das Verändern von Materialparametern sowie der Position und Dicke der Scherzone entstehen verschiedene Modellvarianten, von denen jene vier ausgewählt wurden, die die Lösungsfindung am besten beschreiben.

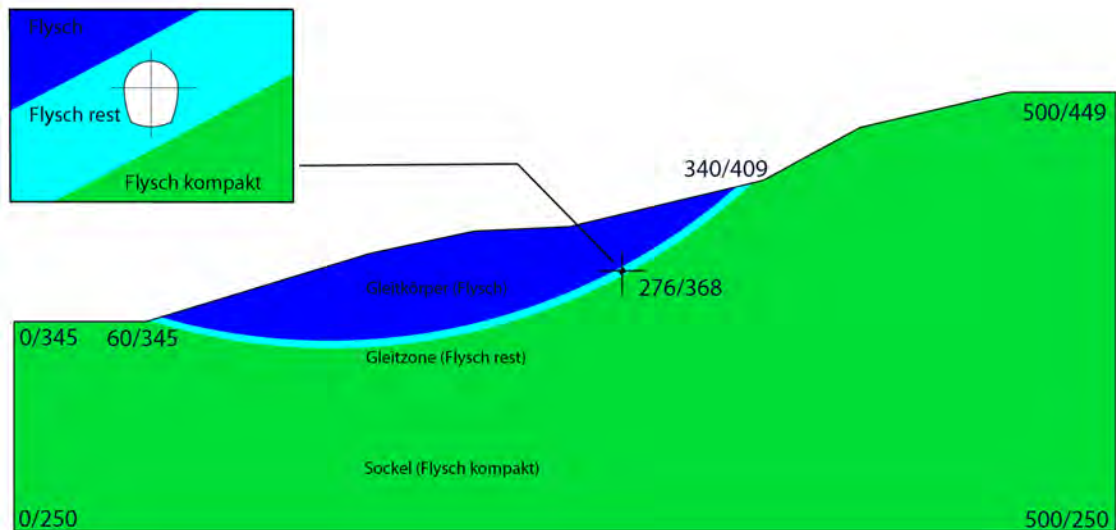


Abbildung 4.1: Querschnitt durch den untersuchten Hang mit den verschiedenen Zonen welchen unterschiedliche Parameter zugewiesen werden.

4.2 Generierung von Berechnungsnetzen

Der Netzaufbau ist ein wesentlicher Teil des Modells, die Feinheit des Netzes hat einen erheblichen Einfluss auf die Berechnungsgenauigkeit und damit auf die Aussagekraft der Ergebnisse. Die Netzfeinheit am Modellrand beträgt 1 m und wird zum Stollen hin auf 0,25 m reduziert, da dort die Anforderungen an die Genauigkeit am höchsten sind. Der Abstand vom Hohlraum zum Rand des Modells ist so gewählt, dass es zu keiner Beeinträchtigung der Verschiebung durch den Modellrand kommt. Die Seitenflächen werden in x-Richtung und die Bodenflächen in x- und y-Richtung festgehalten. Wie in Abbildung 4.1 dargestellt wird das Modell in drei Bereiche unterteilt. Da es sich um eine bereits aktive Massenbewegung handelt, wird die Gleitzone als eigener Bereich betrachtet (*Flysch rest*), dem geringere Festigkeiten als der Umgebung zugewiesen werden, sogenannte Restfestigkeiten, mit diesen wird die Ausbildung der Bewegungszone reguliert. Weiters wird zwischen den Sockel (*Flysch kompakt*) und den Gleitkörper (*Flysch*) unterschieden. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Modellierung des historischen Stollens mit Schalenelementen (Abb. 4.4). Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Spritzbetonschale, welche ebenfalls als Schalenelemente modelliert wird, ins Modell integriert (Abb. 4.5).

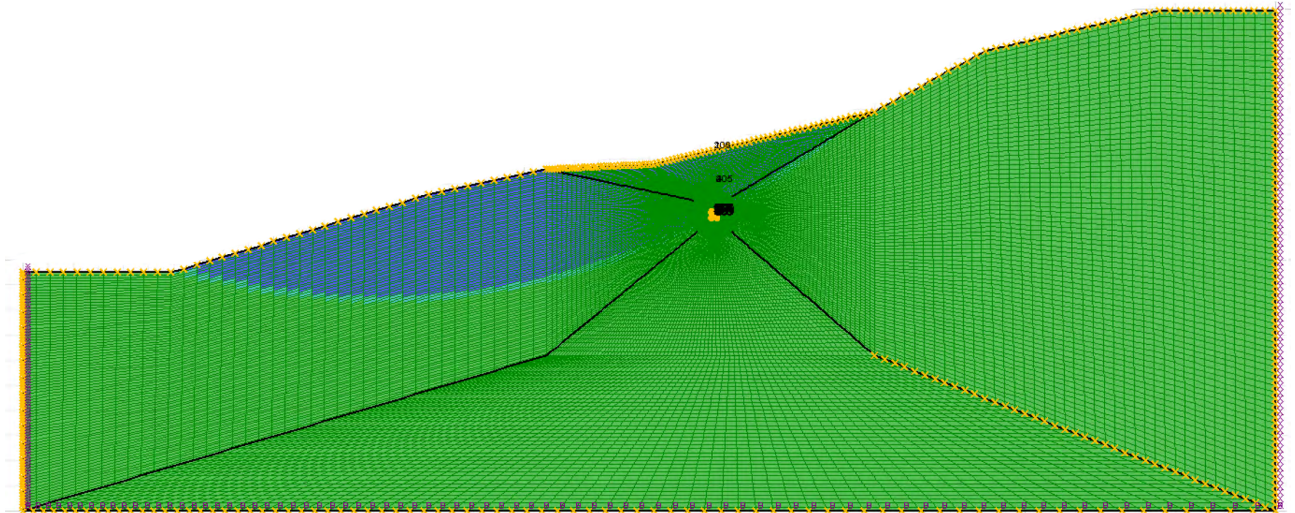


Abbildung 4.2: Netzaufbau des Hangs (Netzfeinheit außen 1 m, Verfeinerung auf 0,25 m im Bereich des Stollens).

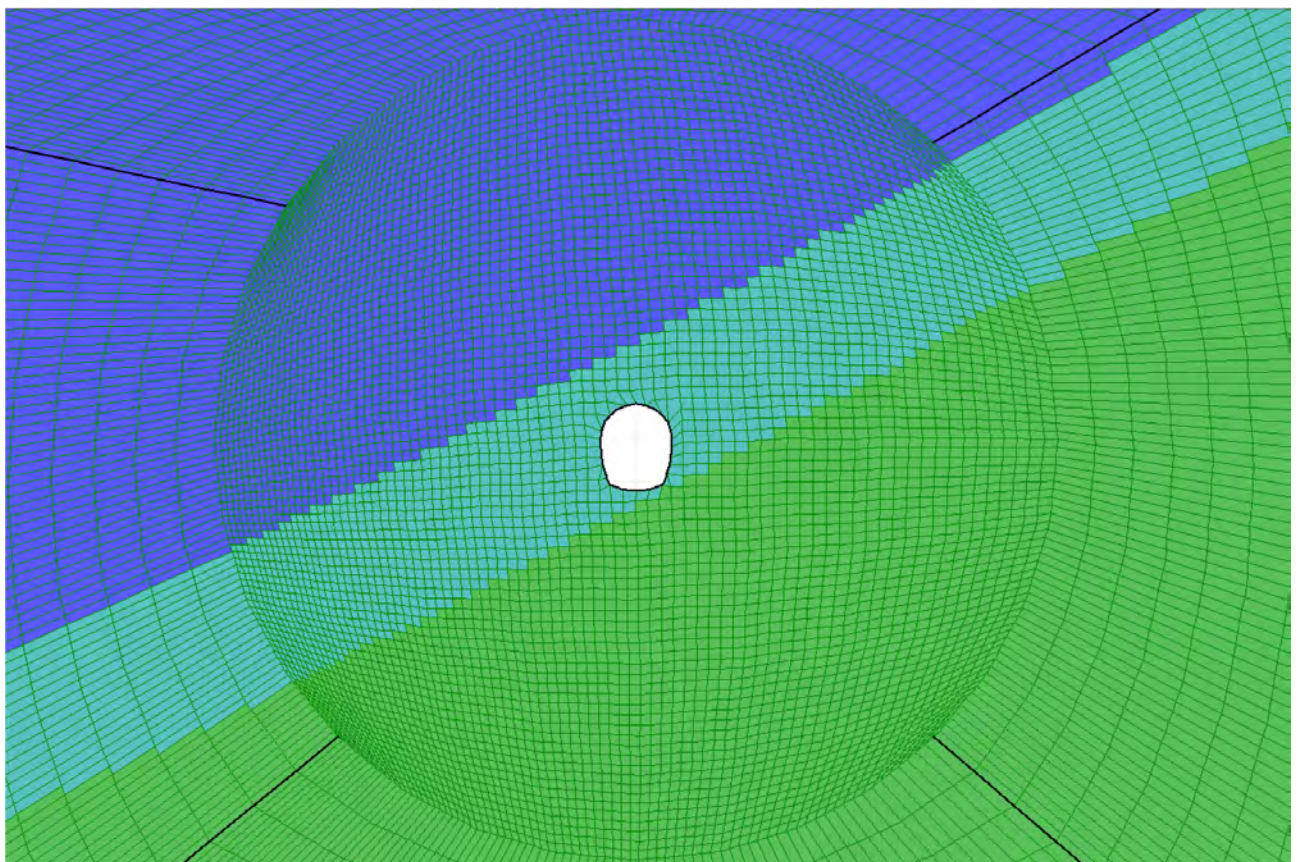


Abbildung 4.3: Netzaufbau im Umfeld des Stollens.

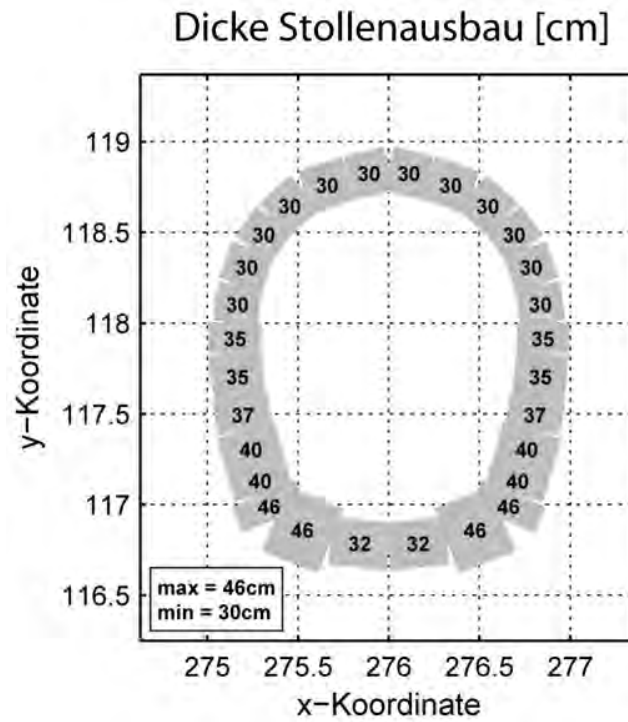


Abbildung 4.4: Querschnitt durch den historischen Stollen mit Angabe der Stärke des Ausbaus.

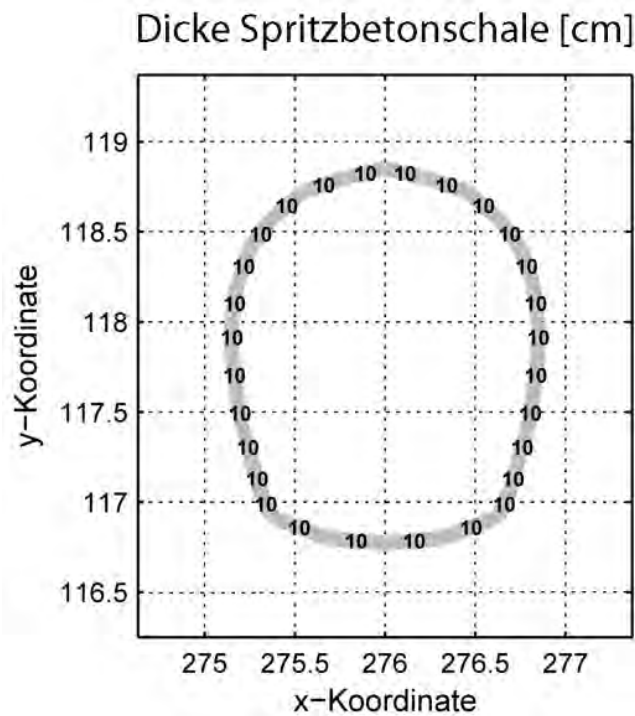


Abbildung 4.5: Querschnitt durch die Spritzbetonschale mit Angabe der Stärke des Ausbaus.

4.3 Rückrechnung der Verformungs und Festigkeits-eigenschaften des Gebirges auf Basis der Deformationen des Stollens

Die Rückrechnung mittels der Regel von Fellenius dient der Bestimmung der Materialparameter im Zustand des Grenzgleichgewichts. Die Berechnung des Sicherheitsfaktors wird ohne Stollen und mit einheitlichen Materialparametern des Hangs durchgeführt. Das anstehende Material (*Flysch*) wurde mit Hilfe des plastischen Materialmodells nach Mohr-Coulomb unter Anwendung einer nicht assoziativen Fließregel (Dilatationswinkel = 0) beschrieben. Ausgehend von der Annahme, dass der Hang im Grenzgleichgewicht ist, wird ein Sicherheitsfaktor ermittelt und die entsprechenden Materialparameter rückgerechnet. Die Berechnung des Sicherheitsfaktors läuft wie folgt ab: zu Beginn werden die Festigkeiten sehr hoch gesetzt, so dass das Modell im Gleichgewicht ist. Anschließend wird eine Rechnung mit sehr niedrigen Festigkeiten durchgeführt, so dass es zum Versagen kommt. Ausgehend von diesen Parametern wird mittels Intervallhalbierung das Grenzgleichgewicht ermittelt. Mit dem ermittelten Sicherheitsfaktor, können die Parameter im Grenzgleichgewichtszustand rückgerechnet werden (Preh, A. Zapletal, M. 2006).

Ausgehend von folgenden Parametern:

E-Modul $E = 1 \text{ GPa}$

Dichte $\rho = 2650,0 \text{ kg/m}^3$

Kohäsion $c = 20,0 \text{ kPa}$

Reibungswinkel $\varphi = 30^\circ$

wurde ein Sicherheitsfaktor (FS) von 1,35 ermittelt.

Anhand der Regel von Fellenius ergeben sich folgende Parameter für das Grenzgleichgewicht:

$$c_{NEW} = \frac{c}{FS} = \frac{20 \text{ kPa}}{1,35} = 14,8 \text{ kPa}$$

$$\varphi_{NEW} = \arctan \left[\frac{\tan(\varphi)}{FS} \right] = \arctan \left[\frac{\tan(30^\circ)}{1,35} \right] = 23,16^\circ$$

Die neu errechneten Parameter werden als Ausgangswerte für die weiteren Berechnungen verwendet, für einige Bereiche werden die Materialparameter jedoch reduziert. Das Modell wird, wie bereits erwähnt, in drei Bereiche unterteilt (Abb. 4.1) denen unterschiedliche Parameter zugewiesen werden. Der unterste Bereich (Sockel) besitzt die höchste Festigkeit. Aufgrund der leichten Auflockerung wurden dem Gleitkörper leicht niedrigere Parameter

zugewiesen. Die geringste Festigkeit wurde der Scherzone zugewiesen, um so der nahezeitlichen Hangbewegung Rechnung zu tragen, während welcher dieser Bereich abgeschert wurde (Annahme einer Restscherfestigkeit).

4.4 Berechnung

4.4.1 Berechnungsablauf

Die Berechnungen des Modells sind in vier Schritte unterteilt: den Insitu-Zustand, die Ausbildung der Scherzone, die Berechnung des historischen Stollens und die Berechnung der Spritzbetonschale.

Anfangs wird das Modell aufgebaut und es wird eine elastische Berechnung zum Aufbau der Spannungen durchgeführt. Anschließend werden die effektiven Materialparameter angesetzt und 50.000 Berechnungsdurchläufe durchgeführt, mit dem Ziel, dass sich eine Scherzone ausbildet. Gemäß der Inklinometermessung (Kap. 4.4) soll der Gleitkörper oberhalb der Scherzone als eine Einheit abgleiten und es soll sich lediglich eine schmale Scherzone ausbilden. Es wurde versucht eine Bewegungsgeschwindigkeit von ca. $2 * 10^{-5}$ m/Berechnungsschritt zu erreichen, da bei schnelleren Bewegungen die Gefahr eines vorzeitigen Hangversagens besteht. Falls die Geschwindigkeiten zu gering sind, kann sich der Hang stabilisieren. Nach Ausbildung der Scherzone werden alle aufgezeichneten Verschiebungen auf Null gesetzt. Im nächsten Schritt wird der Stollen ausgebrochen und der historische Stollenausbau eingebaut, dann folgen je nach Modellvariante ca. 10.000 Berechnungsschritte. Die Anzahl der Berechnungsschritte wird vom Rissbild abhängig gemacht, und die Berechnung wird solange fortgesetzt, bis sich an der Innenseite die Risse wie in Abbildung 2.6 dargestellt zeigen. Während des gesamten Vorgangs werden die Verschiebungen und Spannungen aufgezeichnet. Als letzter Schritt wird die Spritzbetonschale eingebaut und über ein Interface mit dem historischen Stollen kraftschlüssig verbunden. Die Berechnungen werden fortgeführt, bis sich der Stollen weitere 25 mm talwärts verschiebt.

Am Ende der Berechnungen werden die aufgezeichneten Verschiebungen mit den gemessenen verglichen. Außerdem wird geprüft, ob sich die Risse im Modell an der selben Stelle zeigen, wie sie im Bestand beobachtet wurden. Aufgrund dieser Kriterien und des Verschiebungsverlaufes wird das Modell beurteilt und gegebenenfalls werden Änderungen vorgenommen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, um Einfluss auf das Modellverhalten zu nehmen: so können die Eingangswerte verändert, die Berechnungsschritte erhöht oder gesenkt oder die Scherzone verändert werden. So wird z.B. die Scherzone in ihrer Mächtigkeit verändert oder in ihrer Position verschoben, so dass nur ein Teil des Stollens in dieser Zone liegt und der Rest im festen Gestein. Dies hat erheblichen Einfluss auf die Verformung des Stollens und der Spritzbetonschale.

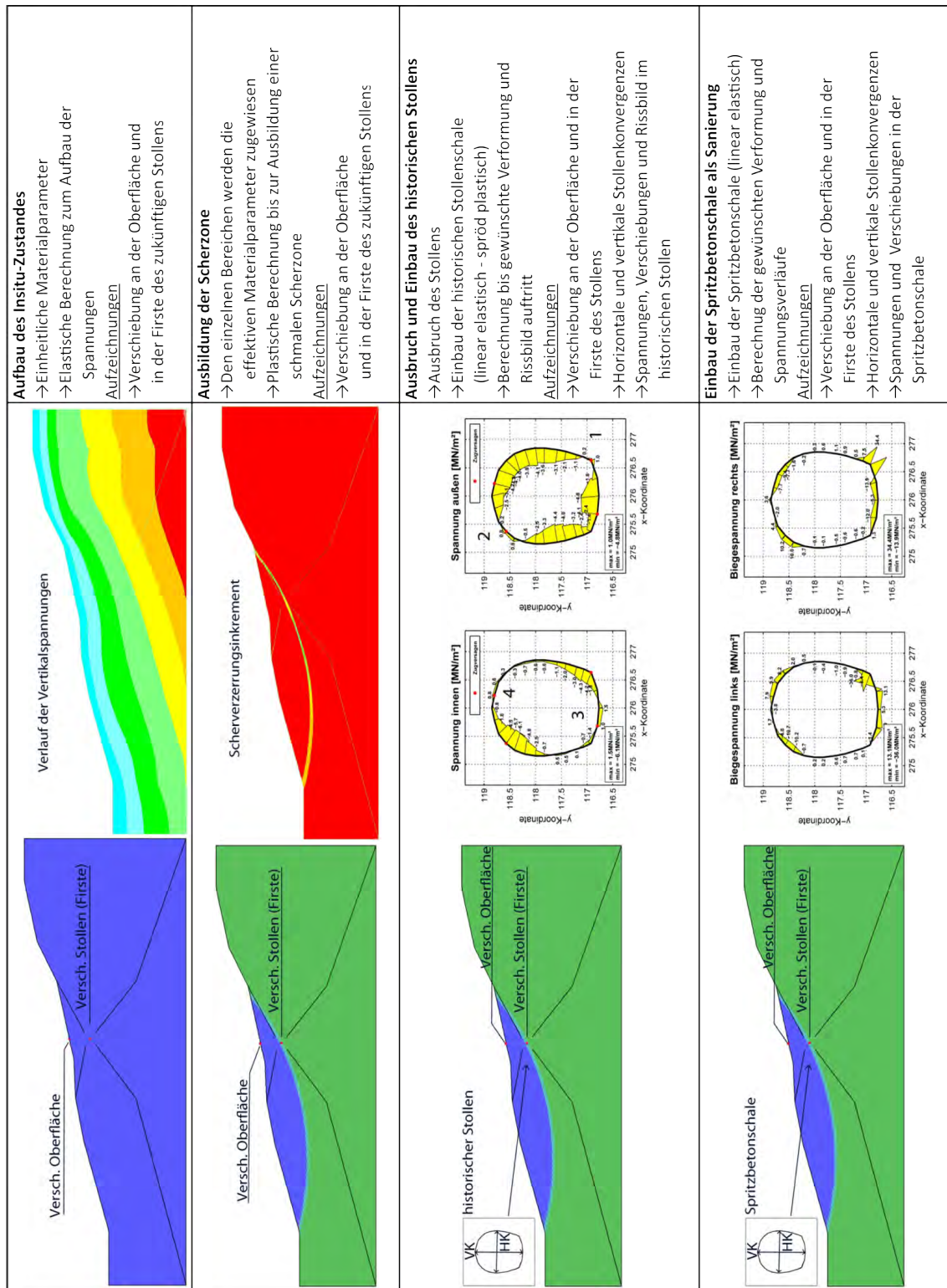


Abbildung 4.6: Ablauf der Berechnungen in FLAC.

4.4.2 Materialmodelle

Das Verhalten des Hangs basiert auf einem isotropen linear-elastischen, ideal-plastischen Stoffgesetz (Abb. 4.7). Als Bruchbedingung wird das Versagenskriterium nach Mohr-Coulomb herangezogen (Abb. 4.8). Als Materialparameter gehen die Dichte ρ , der E-Modul E , die Querdehnzahl ν , die Kohäsion c und der Reibungswinkel φ des Materials in die Berechnung ein.

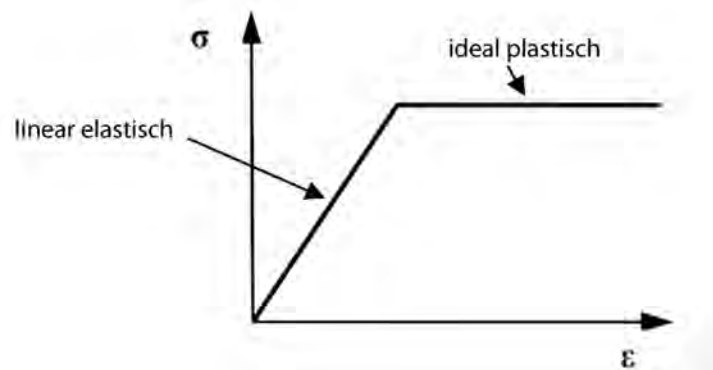


Abbildung 4.7: Hangmaterial: Linear-elastisches ideal-plastisches Materialverhalten.

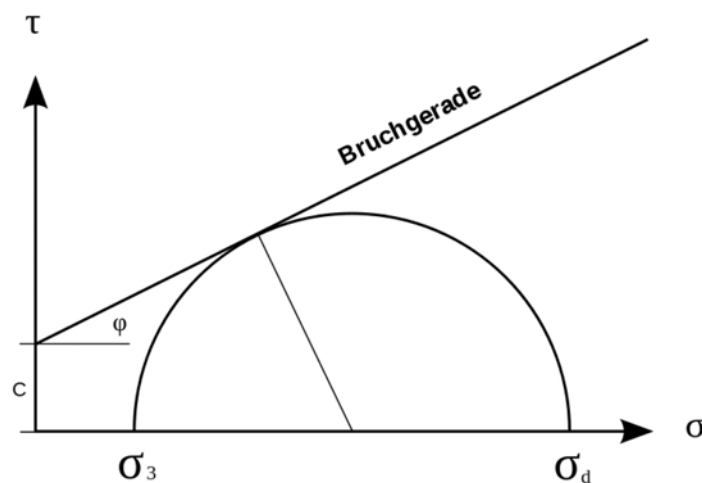


Abbildung 4.8: Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium.

Der historische Tunnelquerschnitt wird mit Schalenelementen modelliert denen entsprechende Materialparameter zugewiesen werden. Es wird ein linear-elastisches, spröde-plastisches Materialmodell angewandt (Abb. 4.9). Das gemauerte Gewölbe erhält andere Materialeigenschaften als die aus Stampfbeton gefertigte Sohle und Ulmen. Die Materialeigenschaften stammen aus Druckversuchen aus untersuchten Bohrkernen und wurden mit (Lublner, J. 1989) verglichen und rückgerechnet.

Die Spritzbetonschale wird ebenfalls mit Schalenelementen modelliert, die aber rein elastisch gerechnet werden. Zwischen dem historischen Querschnitt und dem Spritzbetonliner

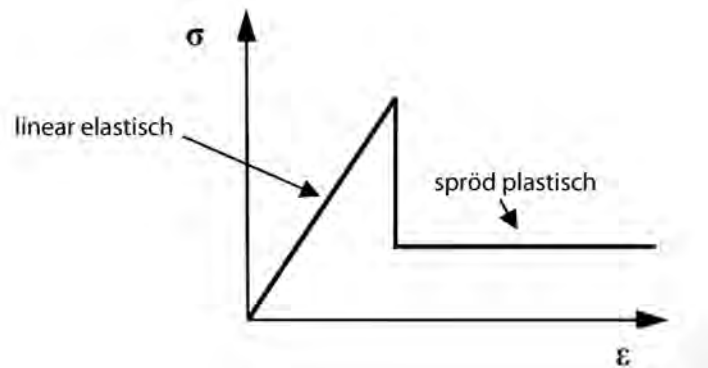


Abbildung 4.9: Historischer Stollenausbau: Linear-elastisches spröd-plastisches Materialverhalten.

wird ein Interface als kraftschlüssige Verbindung eingebaut. Die Materialeigenschaften des Verbundes aus Tunnelbögen und der Spritzbetonschale wurden aufgrund von Herstellerangaben und entsprechenden Rechnungen so realistisch wie möglich abgeschätzt.

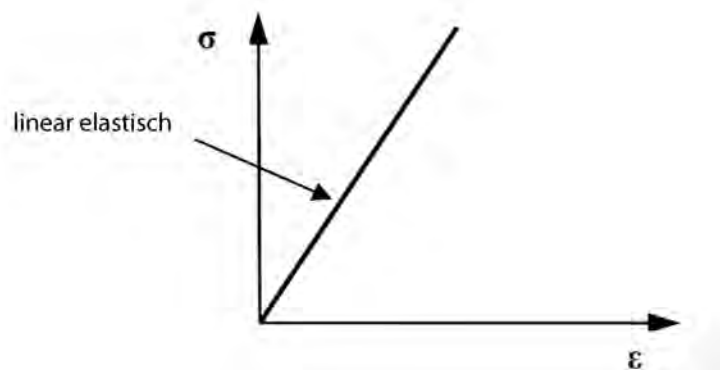


Abbildung 4.10: Spritzbetonschale: Linear-elastisches Materialverhalten.

4.5 Modellvarianten

Die Materialparameter für das anstehende Gebirge wurden der Rückrechnung (knapp unter dem Grenzgleichgewicht) entnommen. Durch das Verändern dieser Parameter sowie der Position und Dicke der Scherzone, wurden ungefähr 100 Modellvarianten durchgerechnet, von denen die aussagekräftigsten ausgewählt wurden und in Folge dargestellt werden.

Die Festigkeiten des Betons wurden anhand von Druckversuchen an Bohrkernen, die vom Inneren des Stollens entnommen wurden, bestimmt. Aufgrund dieser Ergebnisse und der Vergleichsparameter aus (Lublinter, J. 1989) wurde die Druckfestigkeit des Stampfbetons auf 17,5 MPa und die Zugfestigkeit auf 2,0 MPa geschätzt. Dem gemauerten Gewölbe wurde dieselbe Druckfestigkeit zugewiesen, nur die Zugfestigkeit wurde auf 1,5 MPa redu-

ziert. Die Druck- und Zugfestigkeit der Spritzbetonschale wurde anhand des vorgegebenen Betongüte bestimmt, wobei die Zugfestigkeit des Spritzbetons aufgrund seines starken Bewehrungsgrads (Tunnelbögen im Abstand 1m) auf bis zu 10-15 MPa erhöht werden kann (siehe Werte in Klammer). Da die Spritzbetonschale mit einem rein linear-elastischen Materialverhalten berechnet wird, fließt die Druck- und Zugfestigkeit nicht in die Berechnung ein. Sie dient lediglich als Anhaltspunkt um eine Abschätzung zu eventuellen Rissbildungen oder Versagen in der Spritzbetonschale treffen zu können.

Modell 1

Die Scherzone (*Flysch rest*) ist in diesem Modell 4 m dick, der Stollen liegt größtenteils in der Scherzone, lediglich ein Teil der Sohle liegt im festen Gestein (*Flysch kompakt*). Die genaue Position des Stollens kann man in Abbildung 4.11 erkennen, dadurch erwartet man sich ein Verhalten wie es in Abbildung 2.10 dargestellt wurde.

Materialparameter:

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Kohäsion c [kPa]	Reibungswinkel φ [°]
Flysch	1,0	2650	17,9	23,4
Flysch rest	1,0	2650	7,5	13,0
Flysch kompakt	1,0	2650	25,0	25,0

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Druckf. f_{ck} [MPa]	Zugf. f_{ctm} [MPa]	Restdruckf. f_{ck}^* [MPa]	Restzugf. f_{ctm}^* [MPa]
Gewölbe	10,0	2400	17,5	1,5	17,5	0,75
Stampfbeton	10,0	2400	17,5	2,0	17,5	1,0
Spritzbeton	33,0	2400	45,0	3,8 (10-15)		

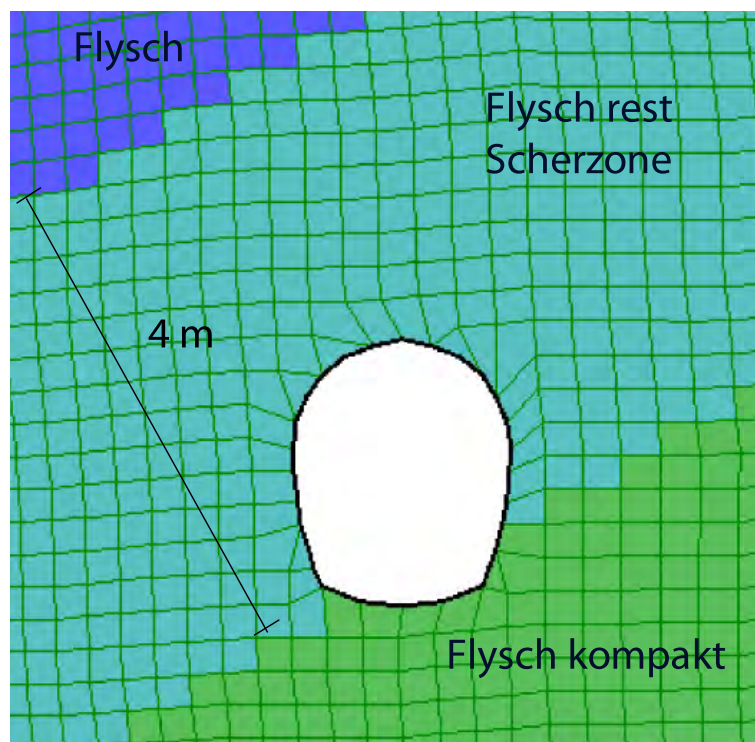


Abbildung 4.11: Modell 1: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.

Modell 2

Im Modell 2 wird die Dicke der Scherzone auf 3,5 m reduziert, die Lage des Stollens bleibt unverändert. Weiters wird die Kohäsion des Gleitkörpers (*Flysch*) und der Scherzone (*Flysch rest*) verändert.

Materialparameter:

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Kohäsion c [kPa]	Reibungswinkel φ [°]
Flysch	1,0	2650	14,9	23,4
Flysch rest	1,0	2650	2,75	13,0
Flysch kompakt	1,0	2650	25,0	25,0

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Druckf. f_{ck} [MPa]	Zugf. f_{ctm} [MPa]	Restdruckf. f_{ck}^* [MPa]	Restzugf. f_{ctm}^* [MPa]
Gewölbe	10,0	2400	17,5	1,5	17,5	0,75
Stampfbeton	10,0	2400	17,5	2,0	17,5	1,0
Spritzbeton	33,0	2400	45,0	3,8 (10-15)		

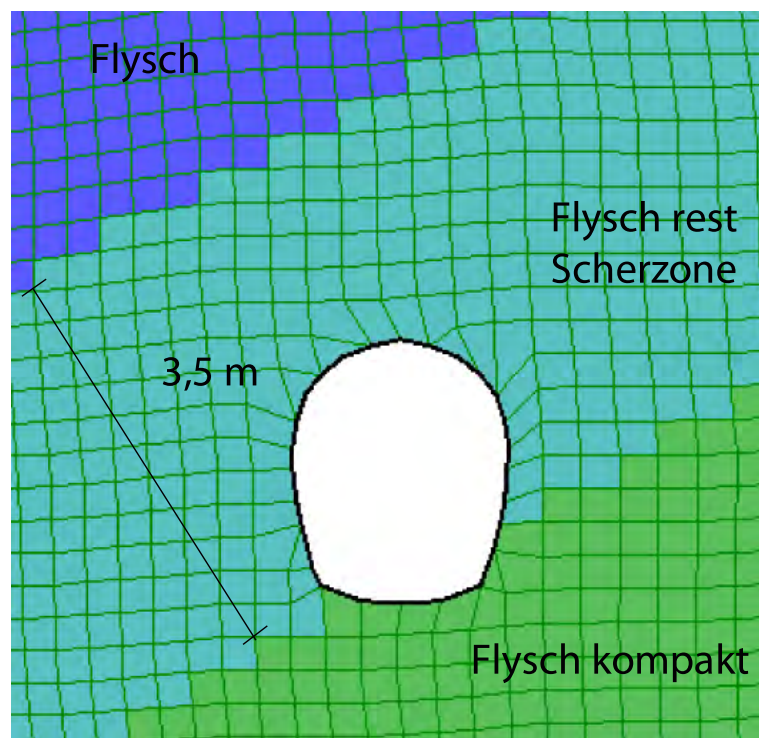


Abbildung 4.12: Modell 2: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.

Modell 3

Die Scherzone ist in diesem Modell ebenfalls 3,5 m dick, sie wird jedoch um einen halben Meter nach unten verschoben, so dass sich der gesamte Stollen in dieser Zone befindet. Weiters wird die Kohäsion der Scherzone reduziert.

Materialparameter:

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Kohäsion c [kPa]	Reibungswinkel φ [°]
Flysch	1,0	2650	14,9	23,4
Flysch rest	1,0	2650	2,5	13,0
Flysch kompakt	1,0	2650	25,0	25,0

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Druckf. f_{ck} [MPa]	Zugf. f_{ctm} [MPa]	Restdruckf. f_{ck}^* [MPa]	Restzugf. f_{ctm}^* [MPa]
Gewölbe	10,0	2400	17,5	1,5	17,5	0,75
Stampfbeton	10,0	2400	17,5	2,0	17,5	1,0
Spritzbeton	33,0	2400	45,0	3,8 (10-15)		

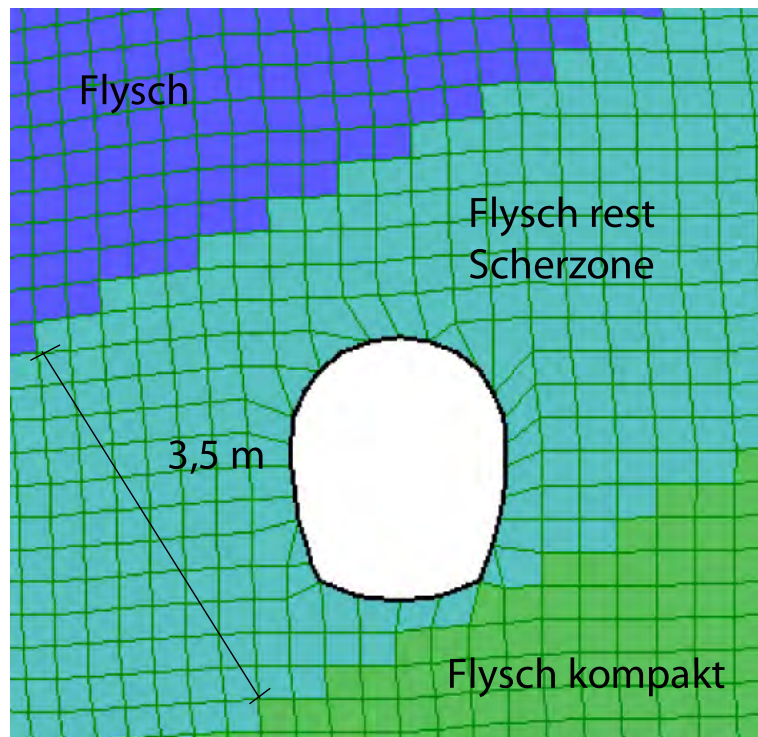


Abbildung 4.13: Modell 3: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.

Modell 4

In diesem Modell wird die Scherzone geringfügig nach unten verschoben. Damit wird versucht, eine größere Horizontalverschiebung des Stollens zu erreichen, um so die Verschiebungsdifferenz zwischen Oberfläche und Stollen zu verringern. Die Kohäsion der Scherzone wird wieder auf 2,75 kPa erhöht, um so die Bewegungsgeschwindigkeit zu reduzieren.

Materialparameter:

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Kohäsion c [kPa]	Reibungswinkel φ [°]
Flysch	1,0	2650	14,9	23,4
Flysch rest	1,0	2650	2,75	13,0
Flysch kompakt	1,0	2650	25,0	25,0

Material	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/m ³]	Druckf. f_{ck} [MPa]	Zugf. f_{ctm} [MPa]	Restdruckf. f_{ck}^* [MPa]	Restzugf. f_{ctm}^* [MPa]
Gewölbe	10,0	2400	17,5	1,5	17,5	0,75
Stampfbeton	10,0	2400	17,5	2,0	17,5	1,0
Spritzbeton	33,0	2400	45,0	3,8 (10-15)		

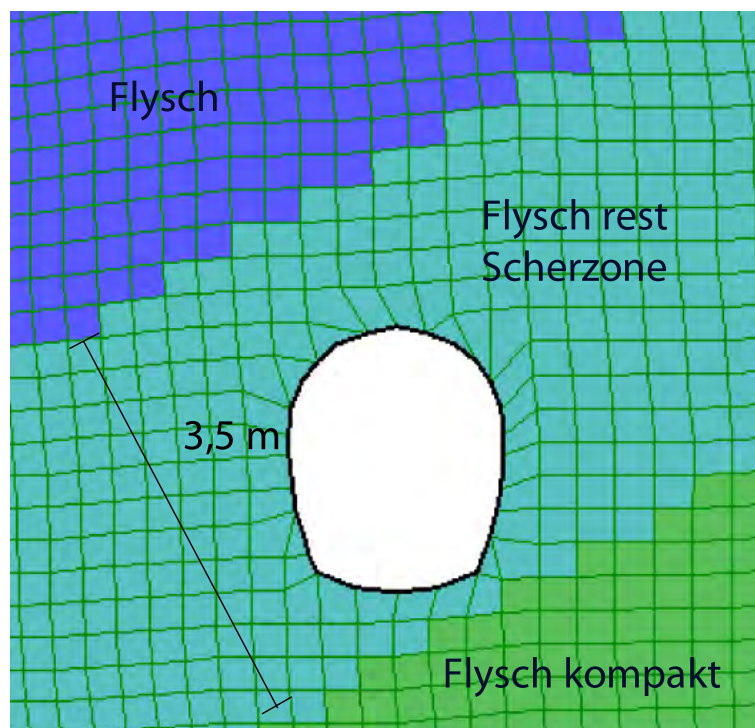


Abbildung 4.14: Modell 4: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.

Berechnungsergebnisse

5.1 Modell 1

Insitu-Zustand und Ausbildung der Scherzone

Die Scherzone (*Flysch rest*) ist in diesem Modell 4 m dick, der Stollen liegt größtenteils in der Scherzone, lediglich ein Teil der Sohle liegt im festen Gestein (Abb. 4.11). Wie bereits im Abschnitt Berechnungsablauf beschrieben, muss sich das Modell in einem ersten Schritt konsolidieren.

Im zweiten Schritt werden dem Modell die Bereiche mit entsprechenden Festigkeiten zugewiesen und solange gerechnet bis sich eine entsprechende Gleitzone ausbildet (50.000 Berechnungsschritte), dieser Zustand dient als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen. In Abbildung 5.1 sieht man die Horizontalverschiebungen der Oberfläche sowie an der Stelle an welcher in einem späteren Schritt der Stollen ausgebrochen wird (Firstpunkt). In Abbildung 5.2 sieht man deutlich die Gleitzone, die sich nach 50.000 Schritten ausbildet. Aufgrund der Inklinometermessungen ist bekannt, dass die Bewegungsgeschwindigkeit von der Oberfläche bis in die Tiefe des Stollens annähernd konstant ist und nur eine schmale Gleitzone existiert. In diesem Modell ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Oberfläche wesentlich höher als die Geschwindigkeit des Stollens. Der Grund dafür ist, dass sich die Scherzone über den Stollen verlagert wie man in Abbildung 5.6 sieht und der Stollen nicht mit dem Gleitkörper abgleitet. In Abbildung 5.3 werden die Geschwindigkeitsvektoren nach Ausbildung der Scherzone dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass der Gleitkörper als kompakte Masse mit konstanter Geschwindigkeit abgleitet.

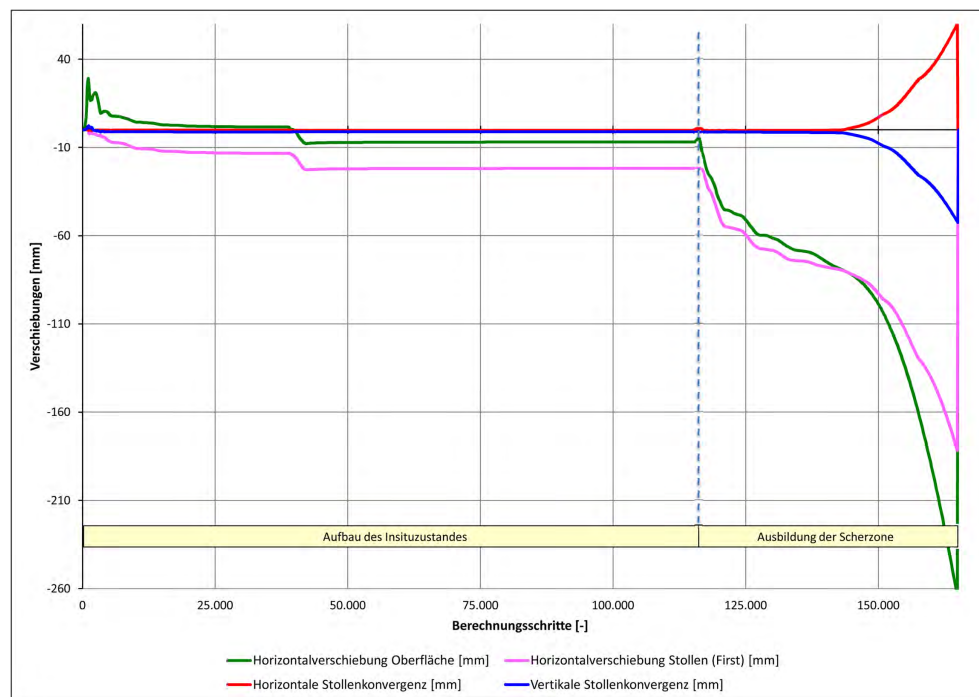


Abbildung 5.1: Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen während des Aufbaus des Insitu-Zustandes und der Ausbildung der Scherzone.

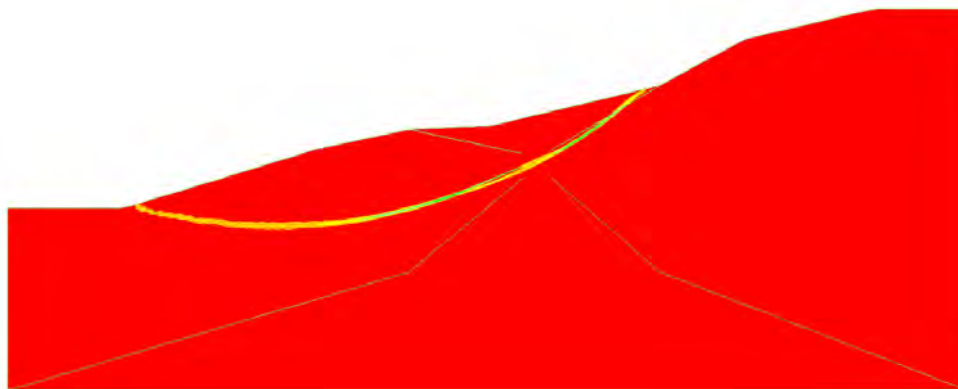


Abbildung 5.2: Modell 1: Ausbildung der Scherzone gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements kurz vor Stolleneinbau.

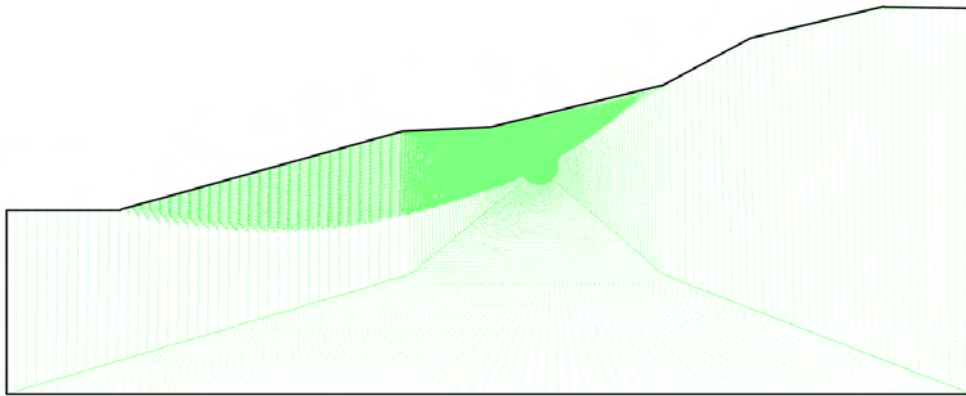


Abbildung 5.3: Modell 1: Geschwindigkeitsvektoren nach Ausbildung der Scherzone kurz vor Stolleneinbau.

Historischer Stollen

Nach Ausbildung der Scherzone wird der historische Stollen zuerst ausgebrochen und dann die Schale eingebaut. Anschließend wird die Berechnung solange fortgeführt bis sich an der Innenseite des Stollens die erwünschten Risse ausbilden. Zur besseren Veranschaulichung bzw. zum Vergleich der Horizontalverschiebungen des Stollens und der Oberfläche werden in Abbildung 5.5 die Verschiebungen, welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden ausgeblendet. Für die zukünftige Betrachtung der Ergebnisse werden diese Verschiebungen herangezogen. Auch die Berechnungsschritte werden Null gesetzt um eine bessere Übersicht zu geben. Dies wird auch bei den weiteren Modellen so gehandhabt. Aus Abbildung 5.5 geht hervor, dass die Verschiebungen der Oberfläche um ein Vielfaches größer sind als jene in der Firste des Stollens. Der Grund dafür ist, dass die Sohle des Stollens im kompakten Gestein liegt, was einer Verankerung gleich kommt. Dadurch verlagert sich die Gleitzone über den Stollen und der Stollen wird durch die Massenbewegung nur wenig beeinflusst (Abb. 5.6). Im Gegensatz zu den Beobachtungen sind die vertikalen Stollenkonvergenzen größer als die horizontalen Stollenkonvergenzen und betragen etwa $1/7$ der Horizontalverschiebung des Stollens (Tabelle 1).

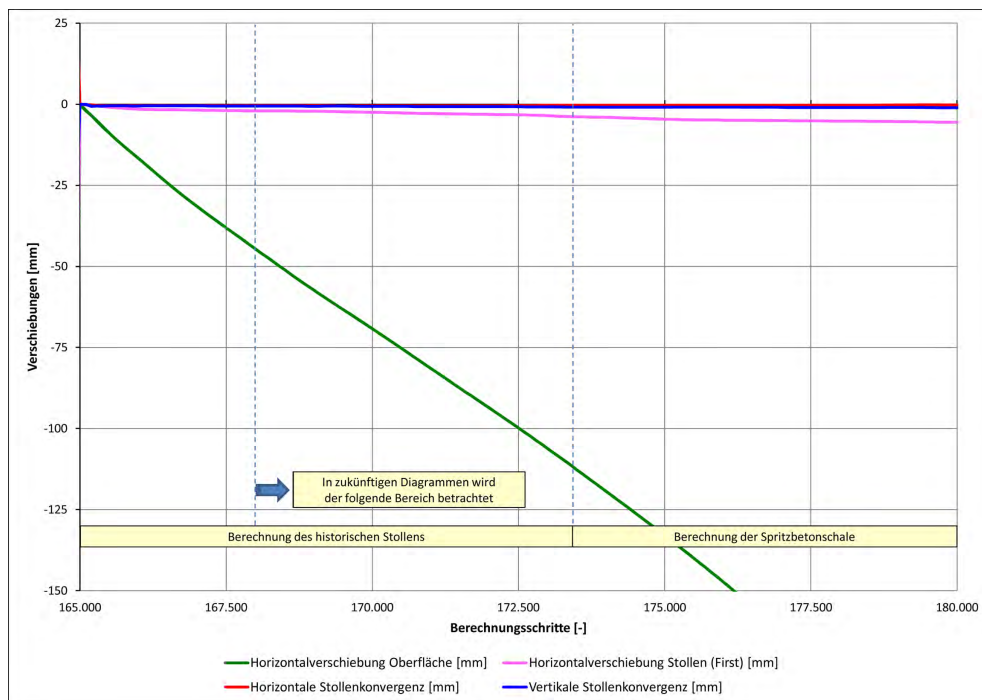


Abbildung 5.4: Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.

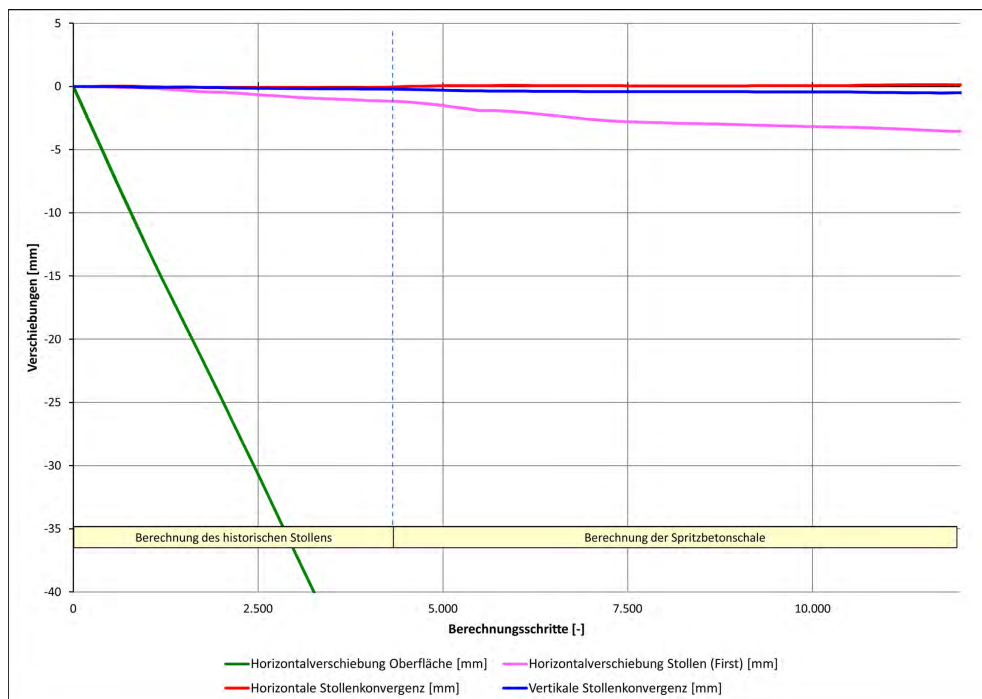


Abbildung 5.5: Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigung der Verschiebungen welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.

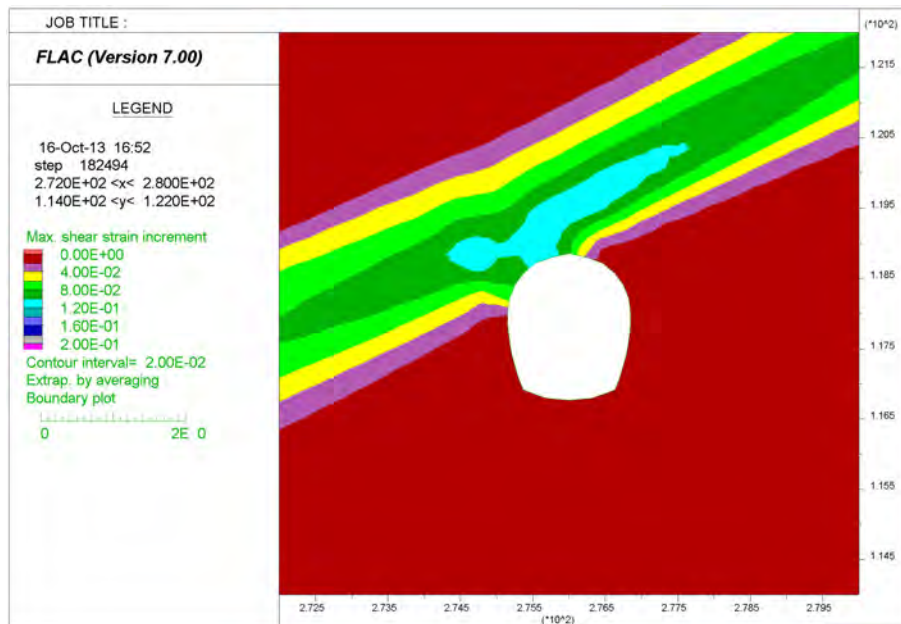


Abbildung 5.6: Modell 1: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.

In den folgenden Abbildungen 5.7 bis 5.10 zeigt sich die Zunahme der Spannungen und Verschiebungen im Stollenausbau im Laufe der Berechnung. Die Rechendurchläufe werden solange durchgeführt, bis sich an der Innenseite des Bauwerks Zugrisse ausbilden wie sie im Stollen beobachtet wurden. Aus den oben genannten Abbildungen ist die Schadensabfolge sehr gut ersichtlich. Als erstes versagt der Stollen an der Außenseite im Bereich der rechten Sohle auf Zug, gefolgt von Zugversagen oberhalb der linken Ulme. Als nächstes kommt es zur Ausbildung von Zugrissen in der rechten Firste und in der linken Ulme. Die Zugrisse an der Innenseite des Stollens befinden sich nicht an denselben Stellen, wie jene die im Inneren des Stollens lokalisiert wurden. Aufgrund der plastischen Verformungen kommt es nach Ausbildung der Zugrisse immer wieder zu Spannungsumlagerungen.

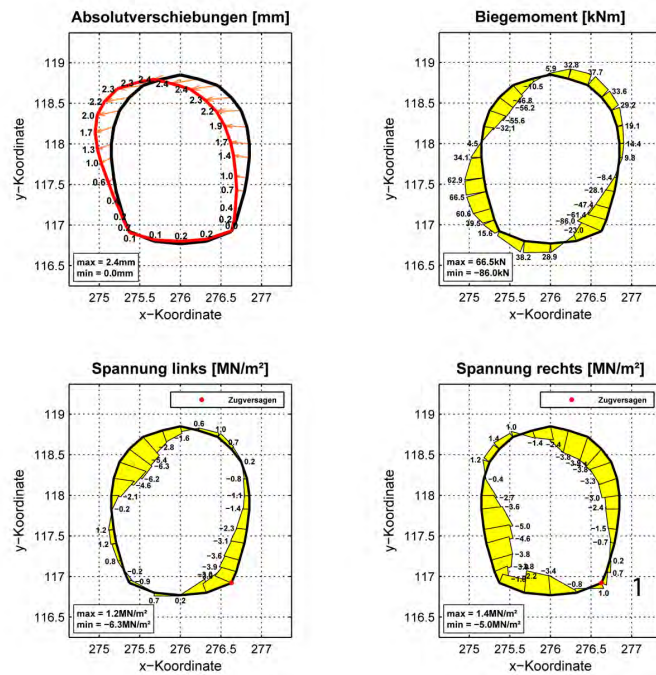


Abbildung 5.7: Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 58,6 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,16 mm).

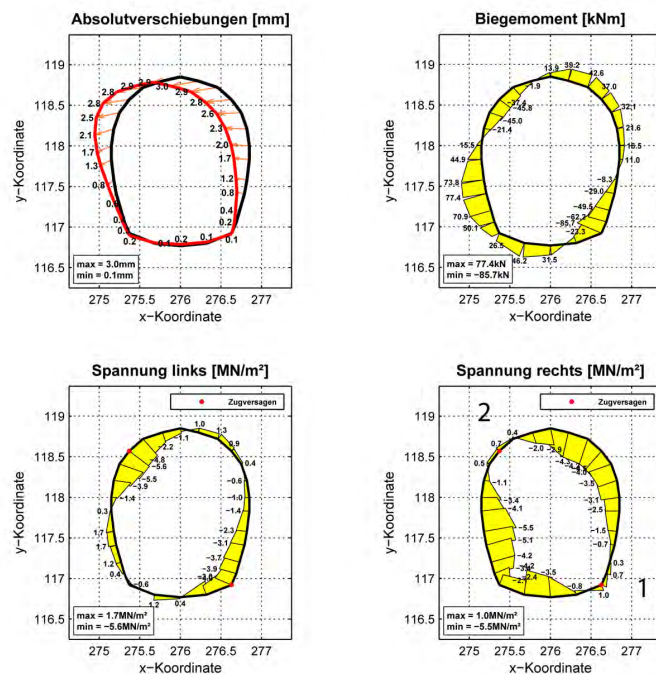


Abbildung 5.8: Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 76,7 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,64 mm).

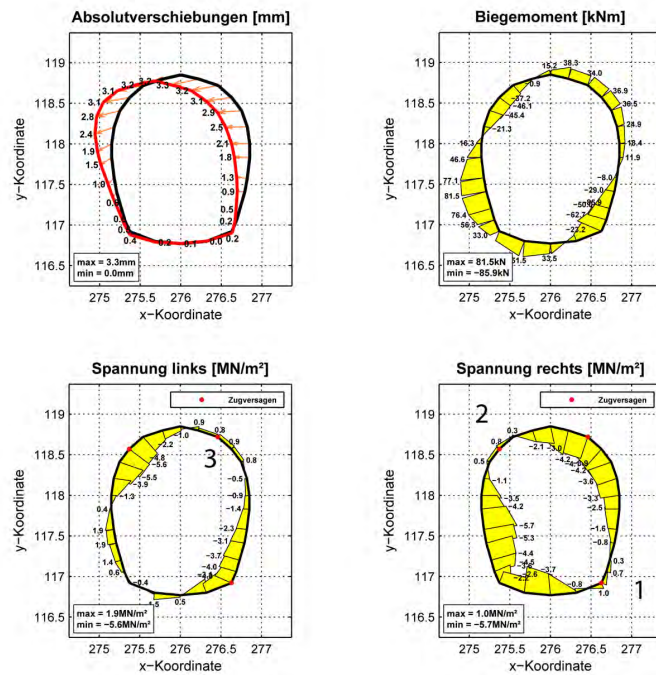


Abbildung 5.9: Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 89,5 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,03 mm).

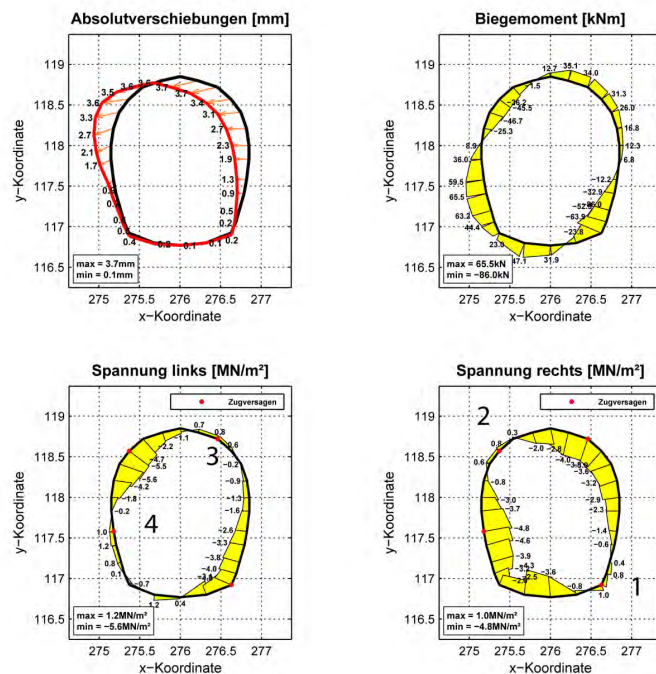


Abbildung 5.10: Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 112,1 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,95 mm).

Tabelle 1: Modell 1: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens (siehe auch Abb. 5.5)

Modell 1:				
Alle Werte ab neuen Nullpunkt	1.Riss (außen)	2.Riss (außen)	3.Riss (innen)	4.Riss (innen)
Berechnungsschritte	1500	3000	4000	5400
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	58,6	76,7	89,5	112,1
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	1,16	1,64	2,03	2,95
VK Stollen [mm]	-0,14	-0,21	-0,31	-0,4
HK Stollen [mm]	-0,05	-0,05	0,09	0,1
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻²]	1,4	1,5	1,6	1,5

Spritzbetonschale

Nach der Berechnung des historischen Stollens, welche bis zum Auftreten von Zugrissen an der Stolleninnenseite fortgeführt wurde, wird die Spritzbetonschale eingebaut. Eigentlich wurde angedacht die Berechnung bis zu einer horizontalen Stollenverschiebung von 25 mm nach Einbau der Spritzbetonschale weiterzuführen, doch da die Massenbewegung in dieser Modellvariante zu geringen Einfluss auf die Stollenverschiebung hat, wurde die Rechnung nach einer Oberflächenverschiebung von 100 mm abgebrochen. Abbildung 5.12 zeigt die Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale, die nach einer Oberflächenverschiebung von 100 mm vorherrschen. Da die Rissbilder im historischen Stollen sowie Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nicht mit den gemessenen Werten übereinstimmen wird auf dieses Modell nicht näher eingegangen.

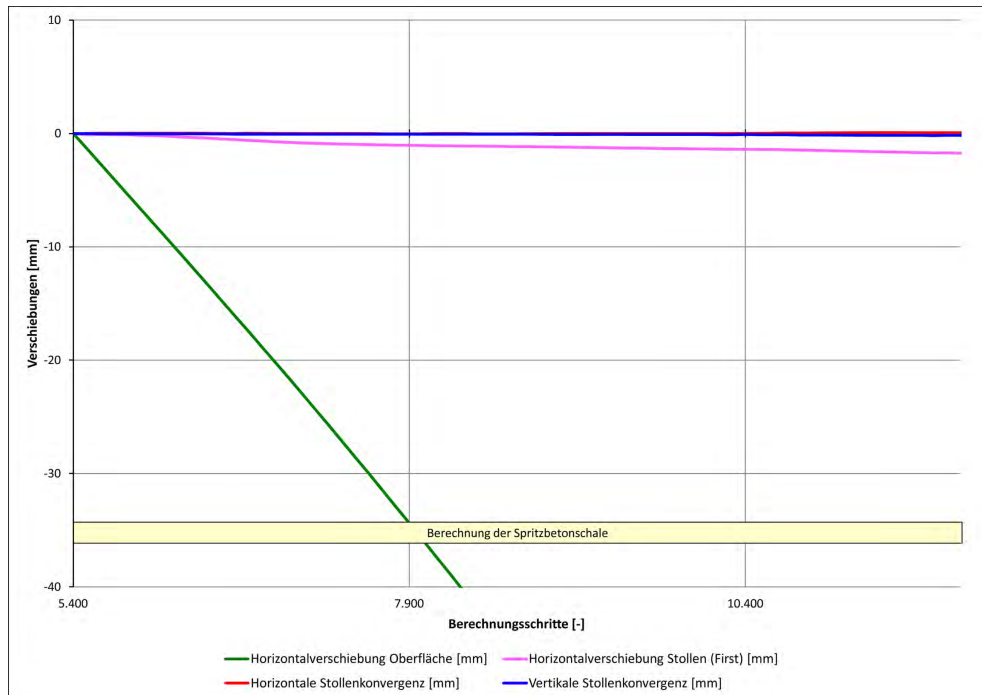


Abbildung 5.11: Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Oberflächenverschiebung von 100 mm.

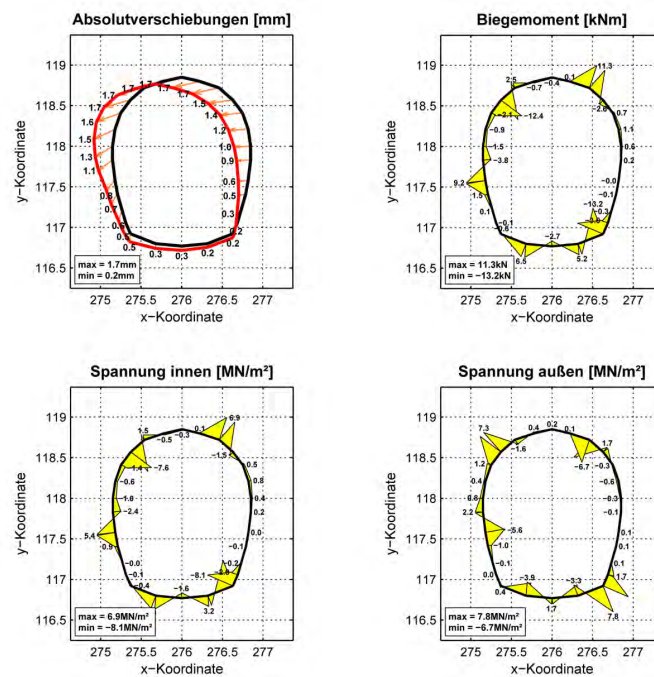


Abbildung 5.12: Modell 1: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 100 mm Oberflächenverschiebung (Horizontalverschiebung Oberfläche = 100,99 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,72 mm).

Tabelle 2: Modell 1: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale (siehe auch Abb. 5.11.)

Modell 1:	
Alle Werte ab Einbau Spritzbetonschale	
Berechnungsschritt	15000
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	100,99
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	1,72
VK Stollen [mm]	-0,17
HK Stollen [mm]	0,06
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻²]	1,7
Max. Drucksp. außen [MN/m ²]	6,7
Max. Zugsp. außen [MN/m ²]	7,8
Max. Drucksp. innen [MN/m ²]	8,1
Max. Zugsp. innen [MN/m ²]	6,9

5.2 Modell 2

Insitu-Zustand und Ausbildung der Scherzone

Da das vorhergehende Modell erhebliche Abweichungen zu den erhobenen Messdaten und beobachteten Rissbild aufweist, wird durch Änderung der Eingangswerte probiert, ein passenderes Rechenmodell zu erstellen. Durch die Reduktion der Dicke der Scherzone wird versucht die Scherzone weiter nach unten zu verlagern, so dass der Stollen mehr durch die Massenbewegung beeinflusst wird. Da die Dicke der Scherzone reduziert wird, werden die Festigkeiten in dieser herabgesetzt um die Gleitbewegung weiterhin zu ermöglichen.

Die Berechnung des Insitu-Zustandes und die Ausbildung der Scherzone für das Rechenmodell erfolgt ident zum vorherigen Modell (Abb. 5.1).

Historischer Stollen

Im Vergleich zum vorherigen Modell sind die Bewegungsgeschwindigkeiten geringer. In Abbildung 5.14 sind die Verschiebungen und Stollenkonvergenzen nach Ausbruch des historischen Stollens unter Vernachlässigung der Umlagerungsprozesse bis zum Ende der Berechnung der Spritzbetonschale ersichtlich. Laut den Inklinometermessungen sollte der First des Stollens sich in etwa gleich talwärts bewegen wie die Oberfläche, dies ist aber nicht der Fall. Die Scherzone verläuft oberhalb des Stollens und deformiert diesen zu wenig. Die Vertikalkonvergenzen sind wiederum größer als die Horizontalkonvergenzen und betragen in etwa $1/7$ der Horizontalverschiebungen des Stollens (Tabelle 3). Im Gegensatz zum ersten Modell hat sich das Verhältnis, zwischen Stollenverschiebung und Oberflächenverschiebung verbessert, ist jedoch immer noch nicht zufriedenstellend.

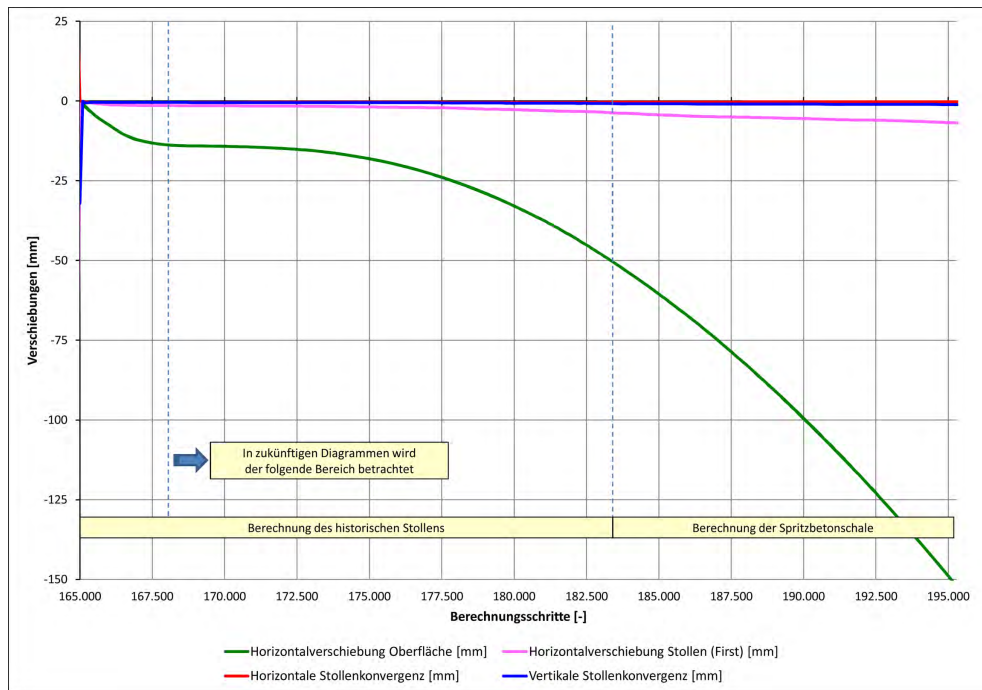


Abbildung 5.13: Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.

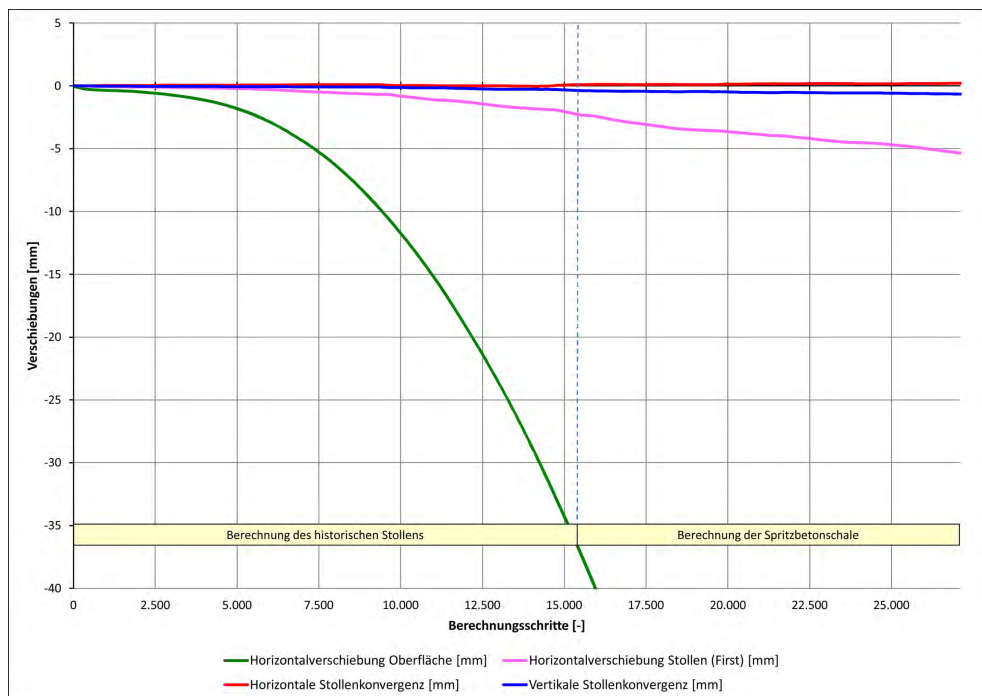


Abbildung 5.14: Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigung der Verschiebungen welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.

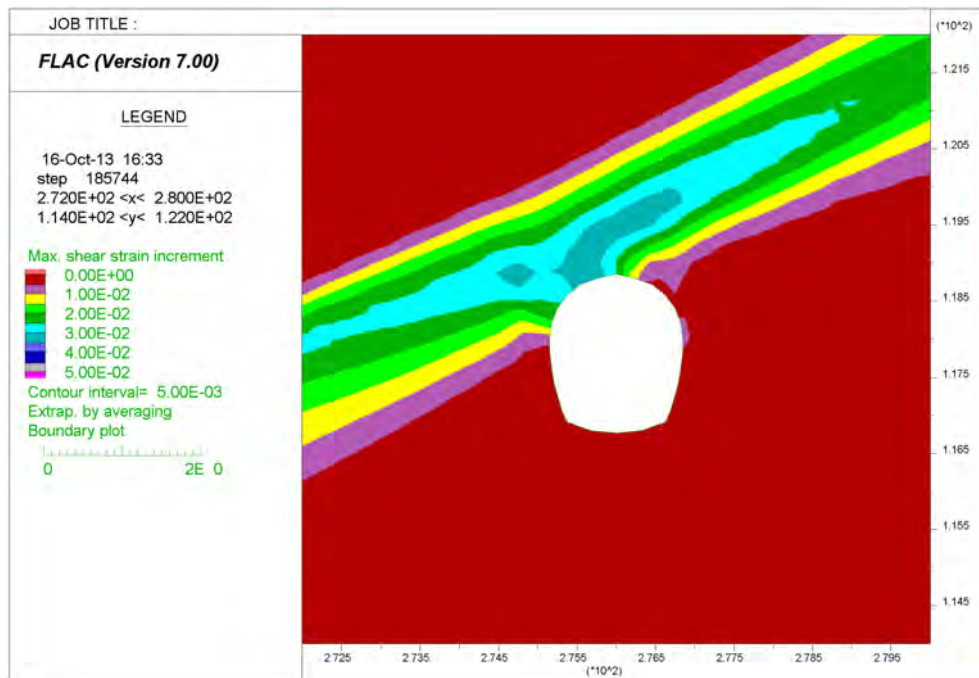


Abbildung 5.15: Modell 2: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.

In den folgenden Abbildungen 5.16 bis 5.19 sieht man die Zunahme der Spannungen und Verschiebungen im Stollenausbau. Die Rechendurchläufe werden solange durchgeführt, bis an der Innenseite Zugrisse auftreten. Aus diesen Abbildungen ist der Schadensmechanismus sehr gut ersichtlich. Die Abfolge der Rissbildungen stimmt mit jener aus Modell 1 überein, man kann wiederum beobachten, dass sich der 2. Zugriss an der Innenseite nicht wie gewünscht in der linken Sohle ausbildet, sondern in der linken Ulme.

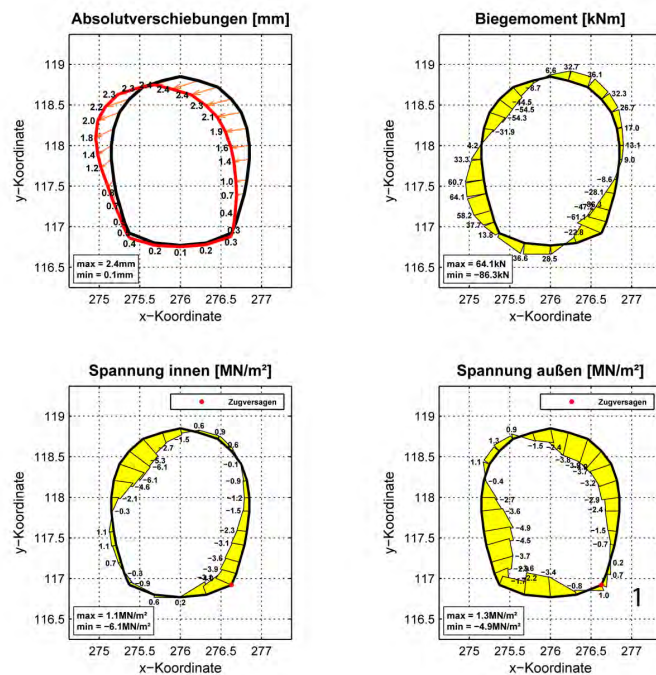


Abbildung 5.16: Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 11,73 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,81 mm).

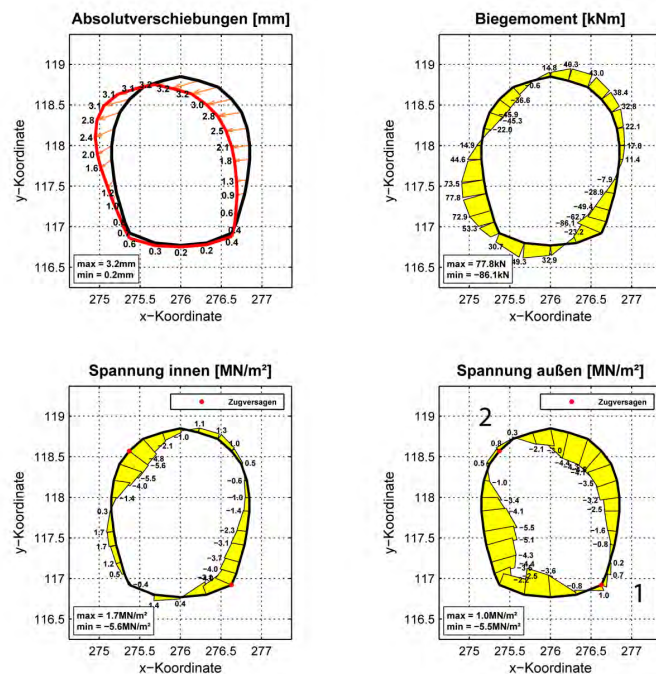


Abbildung 5.17: Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 23,66 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,59 mm).

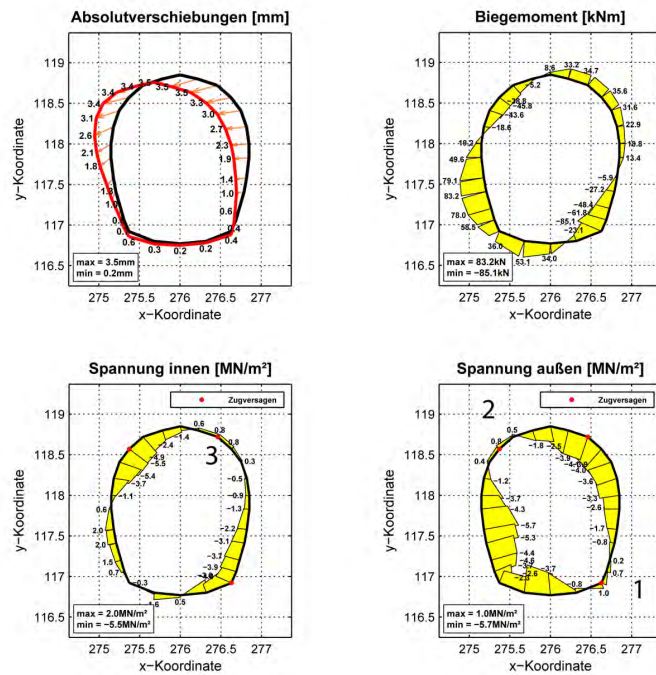


Abbildung 5.18: Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 31,41 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,88 mm).

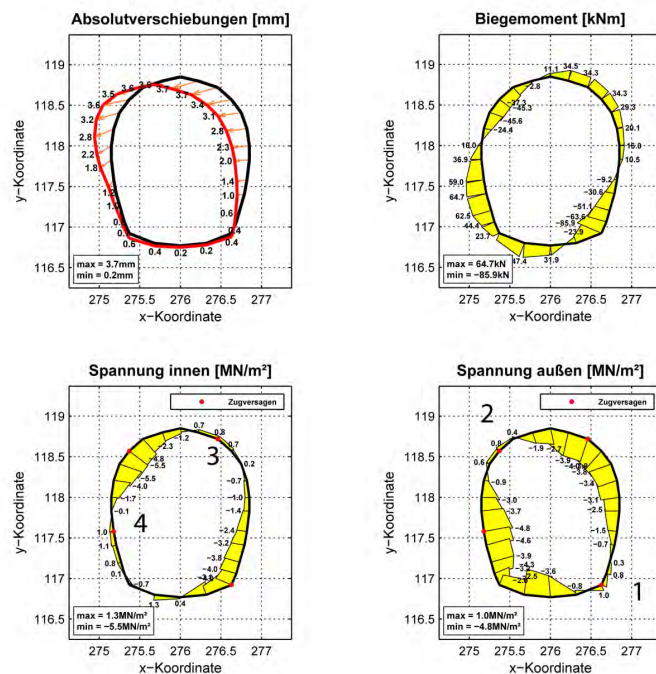


Abbildung 5.19: Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 34,27 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,05 mm).

Tabelle 3: Modell 2: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens (siehe auch Abb. 5.14)

Modell 2:				
Alle Werte ab neuen Nullpunkt	1.Riss (außen)	2.Riss (außen)	3.Riss (innen)	4.Riss (innen)
Berechnungsschritte	99000	13000	14500	15400
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	11,73	23,66	31,41	34,27
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	0,81	1,59	1,88	2,05
VK Stollen [mm]	-0,13	-0,27	-0,28	-0,31
HK Stollen [mm]	0,02	0,00	-0,02	0,06
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻³]	3,9	5,8	6,9	7,3

Spritzbetonschale

Nach Ausbildung, des beobachteten Rissbildes wird die Spritzbetonschale eingebaut und deren Auswirkung auf künftige Verschiebungen und Konvergenzen untersucht. Man erkennt, dass die Verschiebungsraten durch die Spritzbetonschale leicht reduziert werden, sie sind jedoch wie im vorherigen Modell zu gering um eine Aussage treffen zu können. Aufgrund dessen und da die Rissbilder im historischen Stollen sowie Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nicht mit den gemessenen Werten übereinstimmen wird auch auf dieses Modell nicht näher eingegangen.

Tabelle 4: Modell 2: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale (siehe auch Abb. 5.20.)

Modell 2:	
Alle Werte ab Einbau Spritzbetonschale	
Berechnungsschritt	27100
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	99,6
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	3,07
VK Stollen [mm]	-0,28
HK Stollen [mm]	0,11
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻²]	1,26
Max. Drucksp. außen [MN/m ²]	13,9
Max. Zugsp. außen [MN/m ²]	34,4
Max. Drucksp. innen [MN/m ²]	36,6
Max. Zugsp. innen [MN/m ²]	13,1

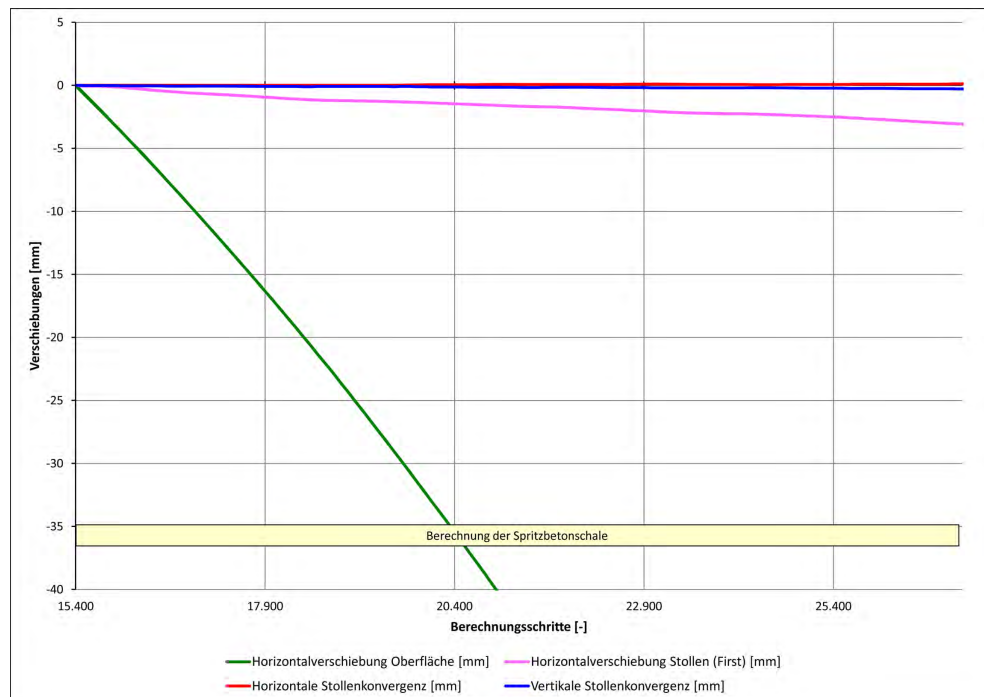


Abbildung 5.20: Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Oberflächenverschiebung von 100 mm.

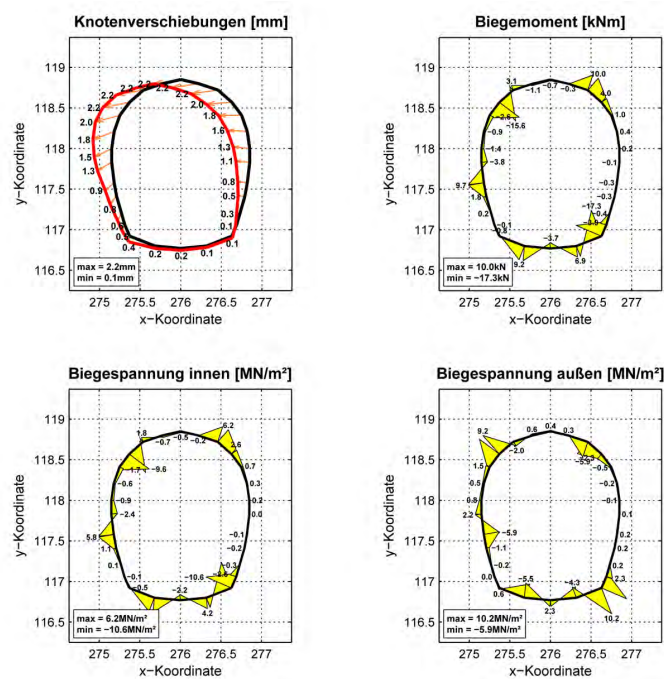


Abbildung 5.21: Modell 2: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 100 mm Oberflächenverschiebung (Horizontalverschiebung Oberfläche = 99,6 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 3,07 mm).

5.3 Modell 3

Insitu-Zustand und Ausbildung der Scherzone

In diesem Modell wird die Scherzone weiter nach unten verschoben, so dass der gesamte Stollen in der Massenbewegung liegt. Dadurch wird versucht die Horizontalverschiebung des Stollens zu erhöhen. Weiters wird die Kohäsion der Scherzone auf 2,5 kPa reduziert.

Die Berechnung des Insitu-Zustandes und die Ausbildung der Scherzone für das Rechenmodell erfolgt ident zum Modell 1 (Abb. 5.1).

Historischer Stollen

In Abbildung 5.22 wird der Verlauf der Verschiebungen vom Einbau des Stollens bis zum Zeitpunkt an dem sich die Spritzbetonschale 25 mm verschoben hat dargestellt. In dieser Abbildung sind die Verschiebungen welche durch Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden noch enthalten, in den nachfolgenden Diagrammen wird dieser Verschiebungsanteil herausgeschnitten. Betrachtet man den Verlauf der Verschiebungen in Abbildung 5.23 so kann man feststellen, dass das Verhältnis der Verschiebungen besser mit den im Stollen beobachteten übereinstimmt. Die Horizontal- und Vertikalkonvergenzen sind in etwa gleich groß und betragen bis zum Einbau der Spritzbetonschale ca. 1/6 der horizontalen Stollenverschiebungen. Man kann gut erkennen, dass die Differenz der Verschiebungen zwischen Stollen und Oberfläche geringer als in den vorherigen Modellen ist, dies liegt daran, dass sich in diesem Modell der gesamte Stollen in der Scherzone befindet und dadurch besser mitgleitet. Dies sieht man sowohl in Abbildung 5.23 als auch in Abbildung 5.24 wo sich die Scherzone besser um den Stollen ausbildet.

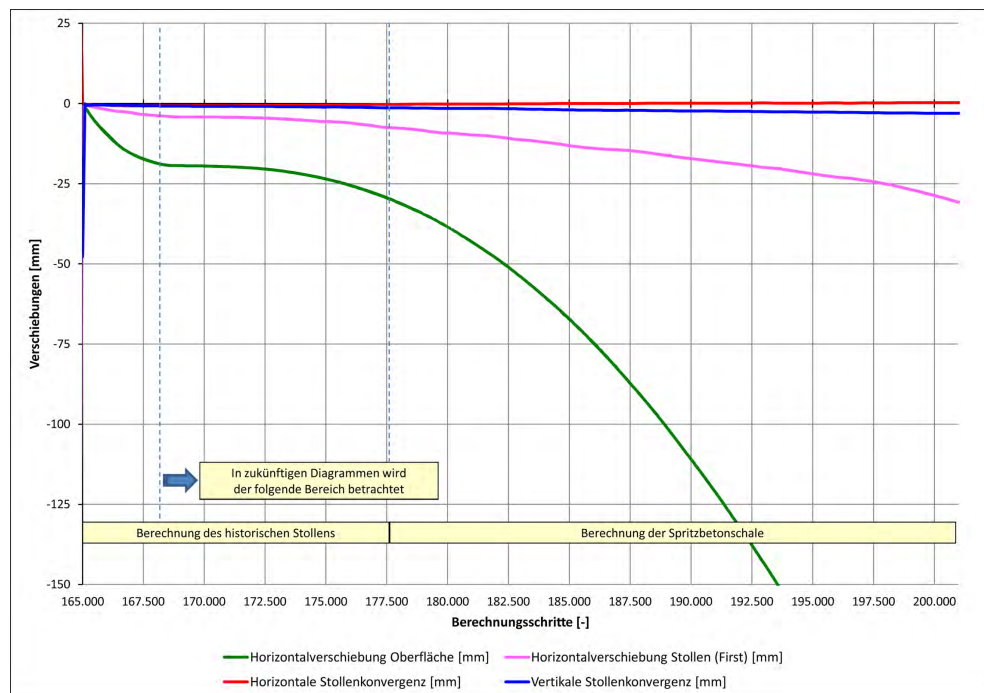


Abbildung 5.22: Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.

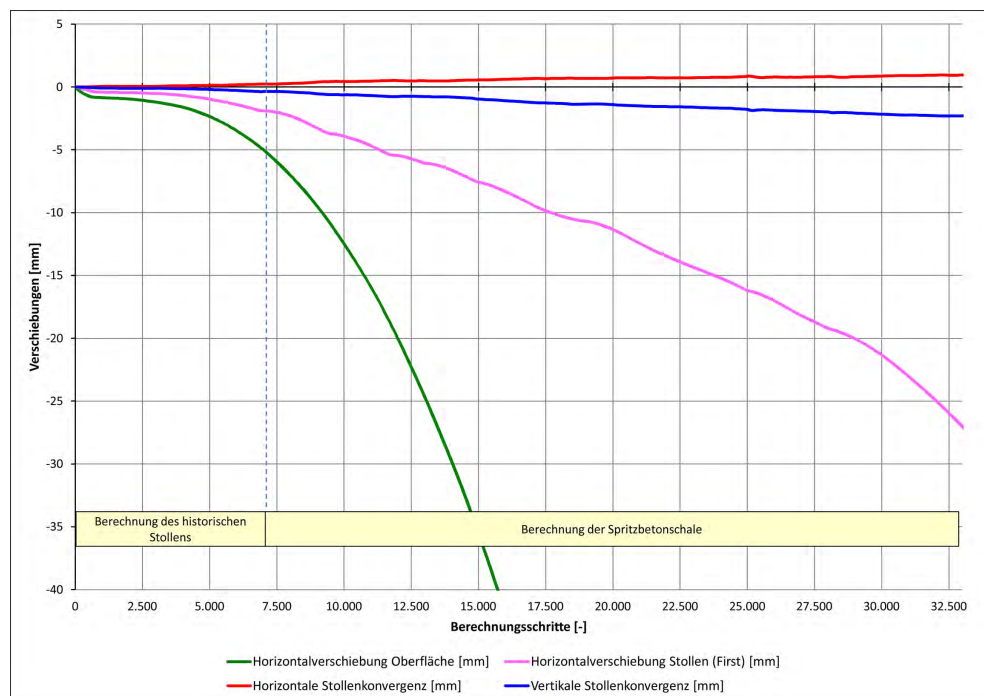


Abbildung 5.23: Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigungen der Verschiebung welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.

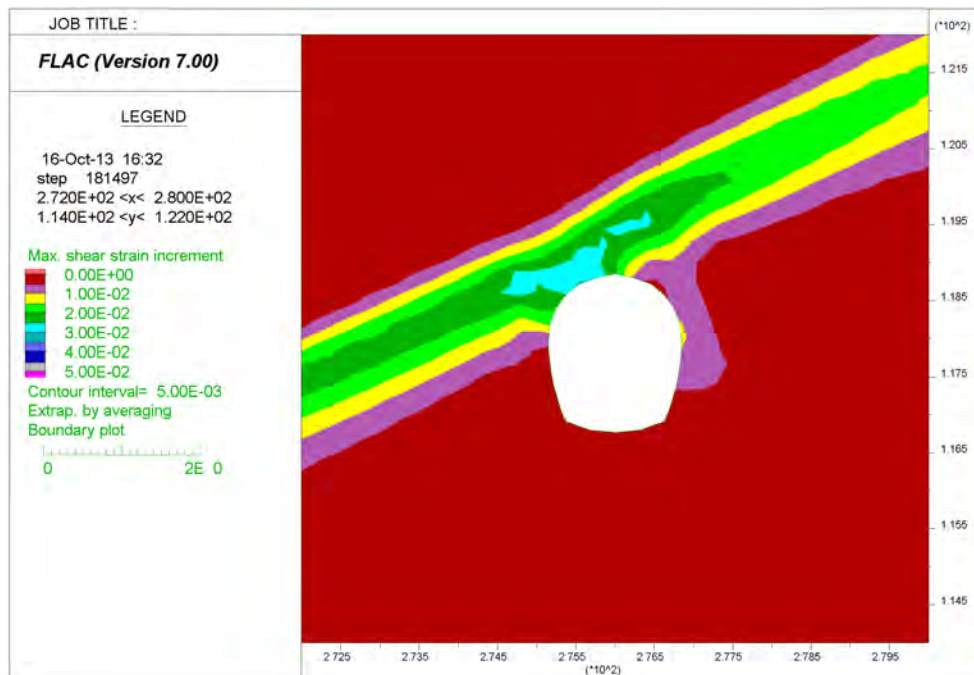


Abbildung 5.24: Modell 3:: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.

In den folgenden Abbildungen 5.25 bis 5.28 werden jeweils die Spannungszustände dargestellt, in welchen sich Zugrisse an der Innen- bzw. Außenseite des Stollens ausbilden. Nachdem sich das gewünschte Rissbild ausgebildet hat wird die Spritzbetonschale eingebaut. Aus den oben genannten Abbildungen, mit den nach ihrem zeitlichen Entstehen nummerierten Zugrissen, ist der Schadensmechanismus sehr gut ersichtlich. In diesem Fall stimmen die Positionen der Risse annähernd mit den beobachteten Rissen im Stollen überein. Anfangs bildet sich an der Außenseite der rechten Sohle ein Zugriss aus, aufgrund des auftretenden Biegemoments wird die Zugspannung an dieser Stelle überschritten. Wegen des spröde-plastischen Materialverhaltens kommt es zum Versagen und in diesem Punkt kann nur mehr die angegebene Restzugfestigkeit aufgenommen werden. Die logische Konsequenz sind Spannungsumlagerungen in der Stollenschale. Als nächstes kommt es zum Zugversagen oberhalb der linken Ulme, ebenfalls an der Stollenaußenseite. Von wesentlichem Interesse sind die Zugrisse an der Innenseite, die sich in weiterer Folge ausbilden, da genau diese an der Stolleninnenseite beobachtet werden konnten. Anfangs bilden sich Zugrisse in der linken Sohle aus, danach folgen jene in der rechten Firste. Vergleicht man dieses Rissbild mit dem beobachteten (Abb. 2.6) so kann man eine gute Übereinstimmung erkennen, lediglich der Zugriss an der rechten Innenseite des Stollens müsste höher liegen. Zur besseren Veranschaulichung wurde eine Rechnung mit rein elastischer Stollenschale durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5.29 dargestellt und zeigen an welchen Stellen die Zugfestigkeiten des Stampfbetons bzw. des Steingewölbes überschritten werden.

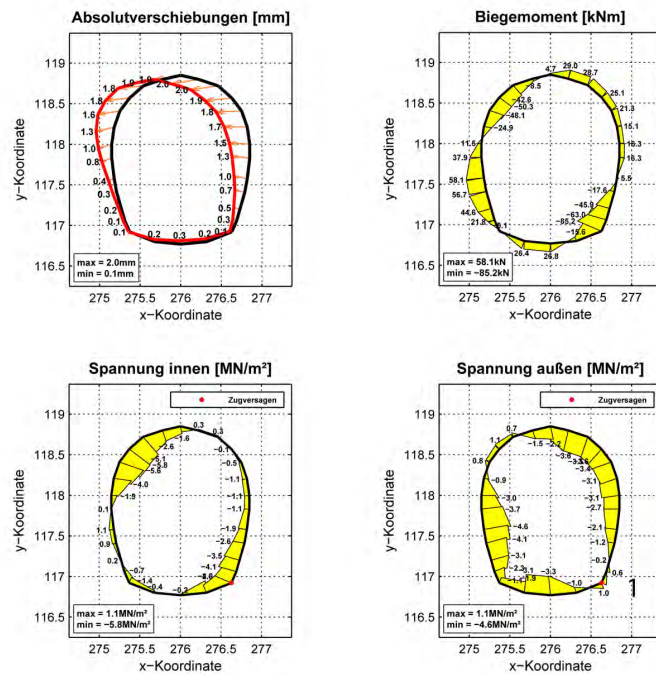


Abbildung 5.25: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 0,85 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,42 mm).

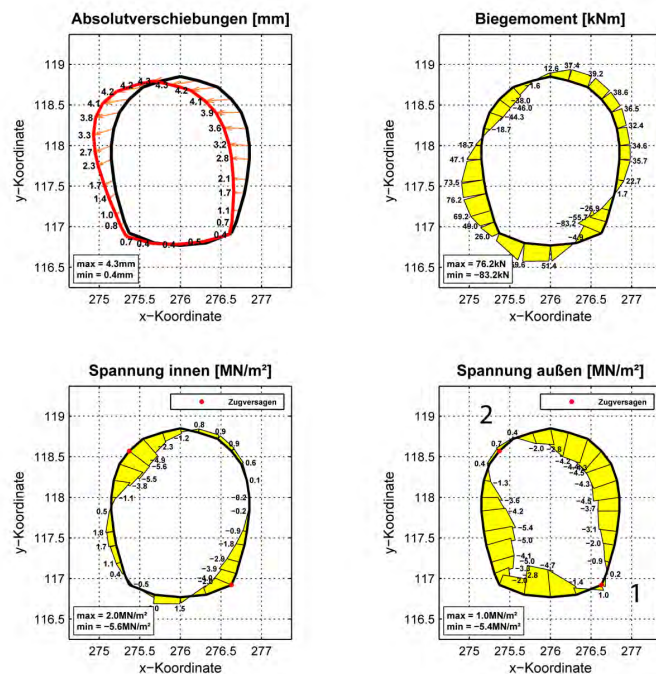


Abbildung 5.26: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 2,35 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,97 mm).

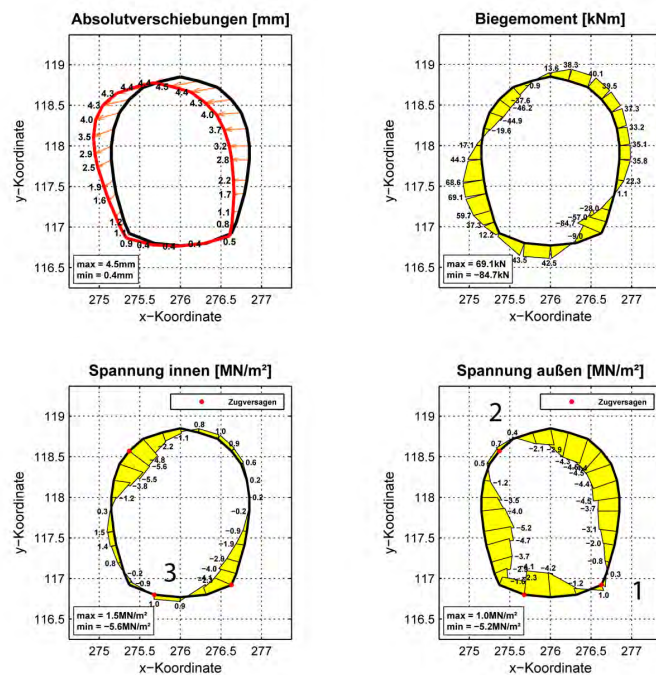


Abbildung 5.27: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 4,19 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,61 mm).

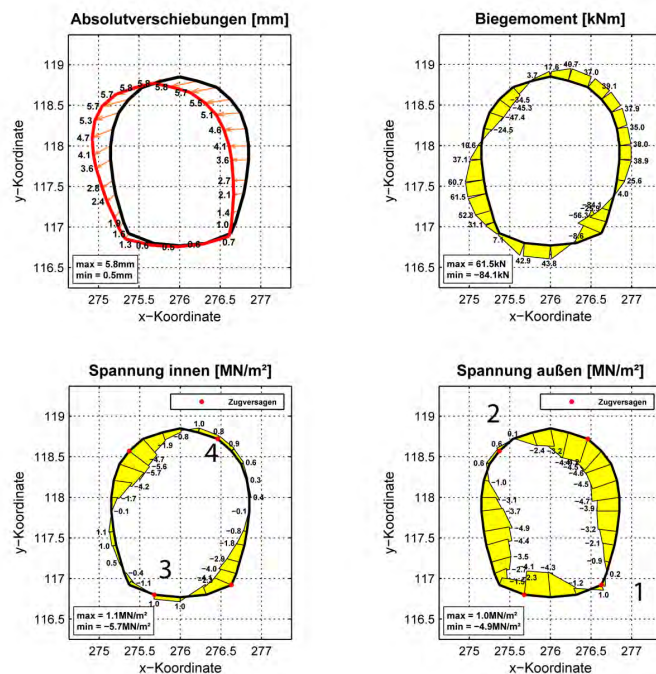


Abbildung 5.28: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 12,47 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 3,92 mm).

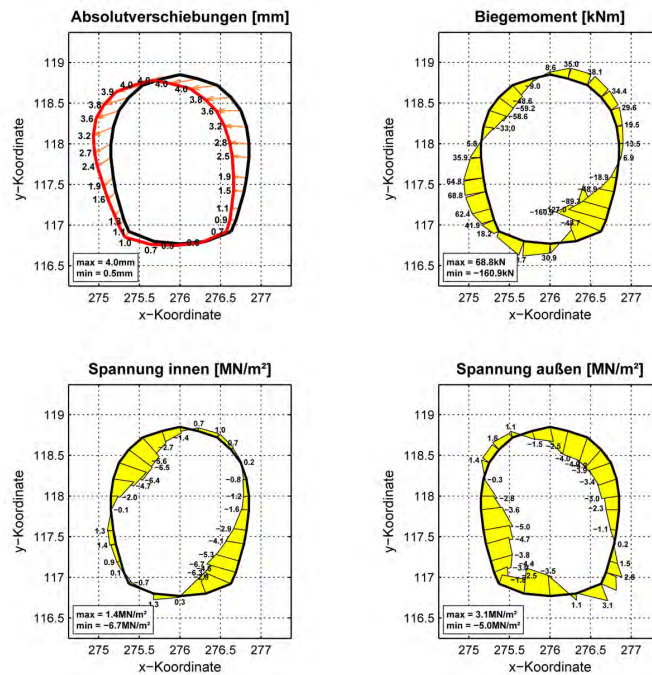


Abbildung 5.29: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen bei rein elastischem Materialverhalten.

Tabelle 5: Modell 3: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens (siehe auch Abb. 5.23.)

Modell 3:				
Alle Werte ab neuen Nullpunkt	1.Riss (außen)	2.Riss (außen)	3.Riss (innen)	4.Riss (innen)
Berechnungsschritte	1000	2000	3500	6900
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	0,85	2,35	4,19	12,47
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	0,42	0,97	1,61	3,92
VK Stollen [mm]	-0,09	-0,2	-0,33	-0,62
HK Stollen [mm]	0,04	0,13	-0,2	0,43
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻³]	9,8	0,43	0,65	2,3

Spritzbetonschale

Die Spritzbetonschale wird wie in den vorhergehenden Modellen nach Auftreten der Zuarisse im historischen Stollen eingebaut. In diesem Fall gleitet der Stollen mehr mit der Massenbewegung mit und die Berechnung wird fortgeführt bis sich eine zusätzliche horizontale Stollenverschiebung von 25 mm einstellt. Wie man in Abbildung 5.30 sieht besteht wiederum eine große Differenz zwischen Oberflächenverschiebung und Stollenverschiebung, sie ist jedoch viel geringer als in den vorangehenden Modellen. Es stellt sich aber auch

heraus, dass es mit dieser Modellkonfiguration kaum möglich sein wird, dass die Oberflächenverschiebung und die Stollenverschiebung gleich groß sind und dabei auch noch die gewünschten Horizontal- und Vertikalkonvergenzen sowie passende Rissbilder erreicht werden. Deswegen wird versucht sich vor allem an die horizontale Stollenverschiebung zu halten. Die Horizontal- und Vertikalkonvergenzen werden durch den Einbau der Spritzbetonschale reduziert, der Stollen gleitet jedoch weiterhin mit der Massenbewegung ab. Betrachtet man Abbildung 2.7 so entspricht dies durchaus der Realität, da auch im untersuchten Stollen die Horizontal- und Vertikalkonvergenzen stark zurückgehen, während die Horizontalverschiebung des Stollens nahezu keine Veränderung durch den Einbau der Spritzbetonschale erfährt. In Abbildung 5.32 sind die Spannungen in der Spritzbetonschale dargestellt. Aufgrund der zu starken Belastungen kommt es in den Bereichen wo die Zugrisse in der historischen Tunnelschale auftreten zu lokalen Überbeanspruchungen im Spritzbeton. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Spannungen zu hoch sind, deswegen wird versucht ein neues Modell mit geringerer Differenz zwischen Oberflächenverschiebung und Stollenverschiebung zu erstellen, wodurch auch die Spannungen im Spritzbeton abnehmen.

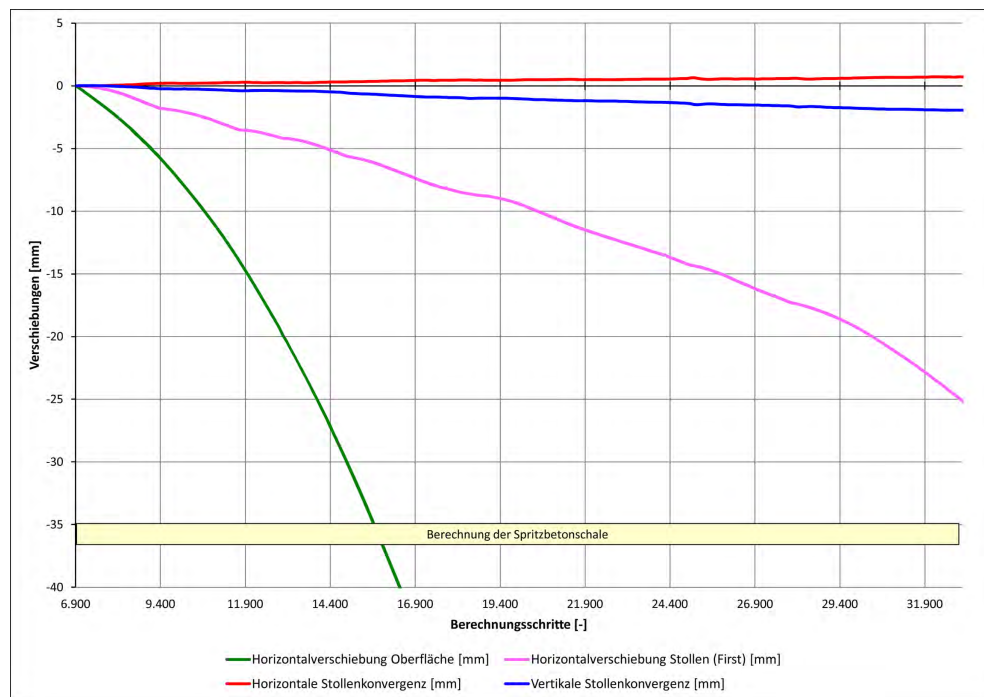


Abbildung 5.30: Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Horizontalverschiebung des Stollens von 25 mm.

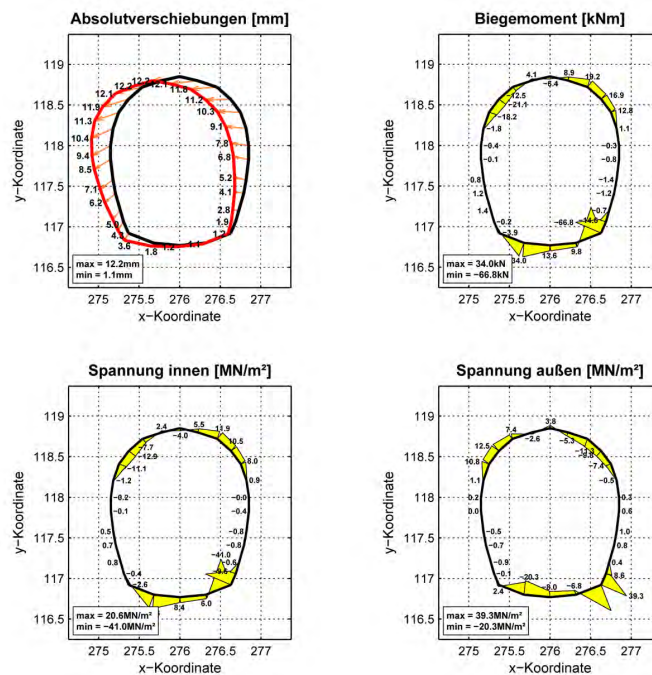


Abbildung 5.31: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 12 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 92,62 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 12,02 mm).

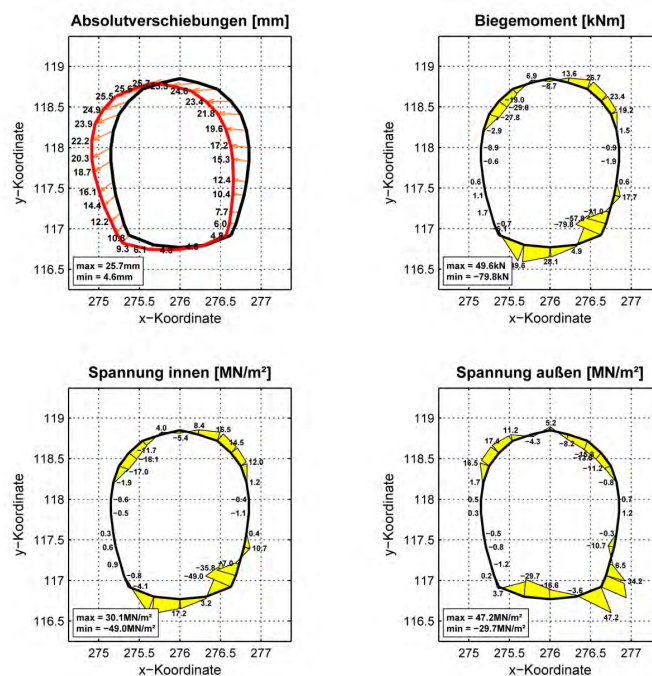


Abbildung 5.32: Modell 3: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 25 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 231,68 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 25,13 mm).

Tabelle 6: Modell 3: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale (siehe auch Abb. 5.30.)

Modell 3: Alle Werte ab Einbau Spritzbetonschale		
Berechnungsschritt	22500	33000
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	92,62	231,68
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	12,02	25,13
VK Stollen [mm]	-1,21	-1,93
HK Stollen [mm]	0,50	0,72
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻²]	1,5	1,9
Max. Drucksp. außen [MN/m ²]	20,3	29,7
Max. Zugsp. außen [MN/m ²]	39,3	47,2
Max. Drucksp. innen [MN/m ²]	41,0	49,0
Max. Zugsp. innen [MN/m ²]	20,6	30,1

5.4 Modell 4

Insitu-Zustand und Ausbildung der Scherzone

In diesem Modell wird die Kohäsion auf 2,75 kPa geändert, durch die Erhöhung der Kohäsion wird versucht die Bewegungsgeschwindigkeit des Hangs zu reduzieren. Zusätzlich wird die Scherzone um 15 cm nach unten verschoben. Mit dieser Änderung wird versucht eine größere Horizontalverschiebung des Stollens zu erreichen, um so die Verschiebungsdifferenz zwischen Oberfläche und Stollen zu verringern. Dadurch sollte der Stollen besser mit dem Hangkörper mitgleiten.

Die Berechnung des Insitu-Zustandes und die Ausbildung der Scherzone für das Rechenmodell erfolgt ident zu den vorherigen Modellen (Abb. 5.1).

Historischer Stollen

Die Abbildung 5.33 zeigt den Verlauf der Verschiebungen vom Einbau des Stollens bis zum Zeitpunkt in dem sich in der Firste der Spritzbetonschale eine zusätzliche Horizontalverschiebung von 25 mm einstellt. Die Verschiebungen welche durch Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden sind in dieser Abbildung noch enthalten, in den darauffolgenden Abbildungen werden diese herausgeschnitten. Betrachtet man Abbildung 5.34 so sieht man, dass sich die Oberflächenverschiebung wesentlich reduziert hat, bei gleichbleibender Stollenverschiebung. Dies stellt eine Verbesserung zum vorhergehenden Modell dar. Die Horizontalkonvergenzen und Vertikalkonvergenzen sind in etwa gleich groß und betragen bis zum Einbau der Spritzbetonschale in etwa 1/5 der horizontalen Stol-

lenverschiebungen. Die Differenz der Verschiebungen zwischen Stollen und Oberfläche sind um die Hälfte kleiner als im 3. Modell. Ausschlaggeben dafür ist, dass der gesamte Stollen in der Scherzone liegt und dadurch besser mitgleitet. Dies sieht man sowohl in Abbildung 5.34 als auch in Abbildung 5.35 wo sich die Scherzone besser um den Stollen ausbildet.

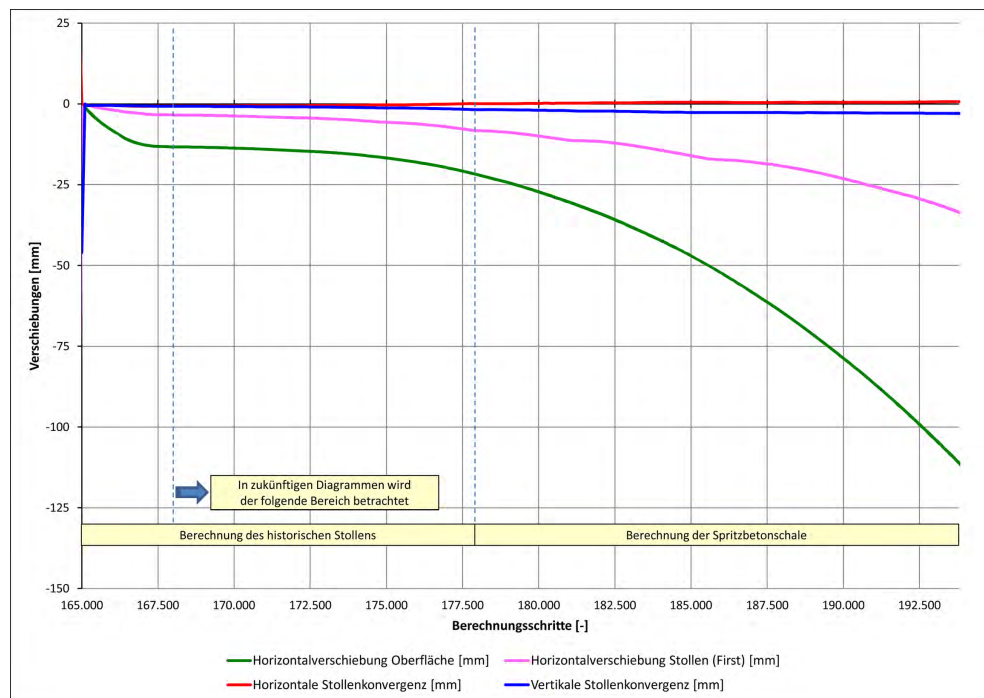


Abbildung 5.33: Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.

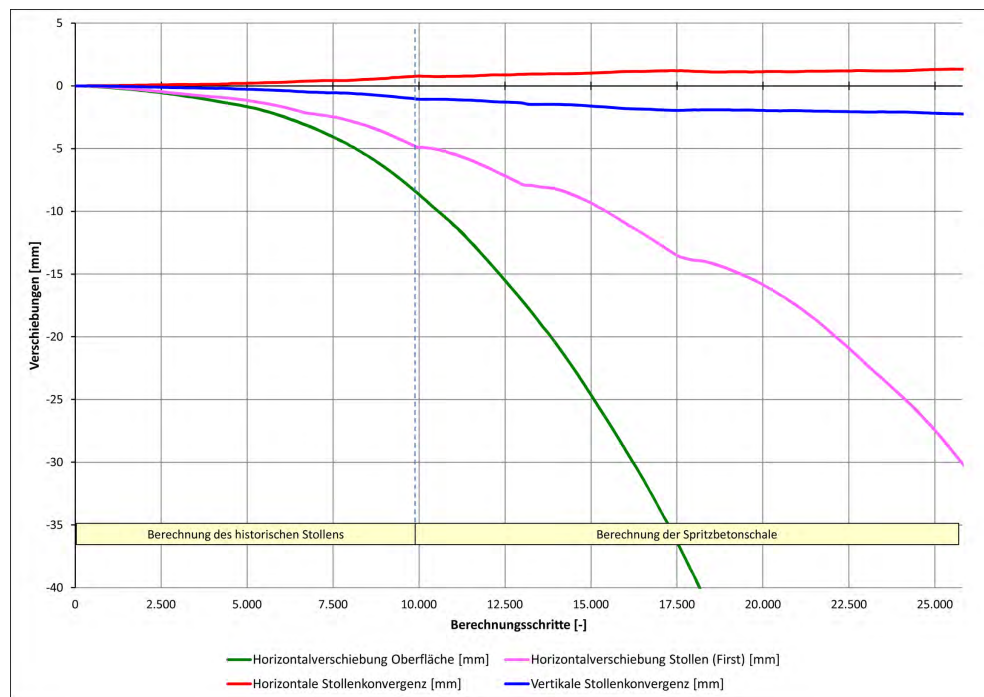


Abbildung 5.34: Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigungen der Verschiebung welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.

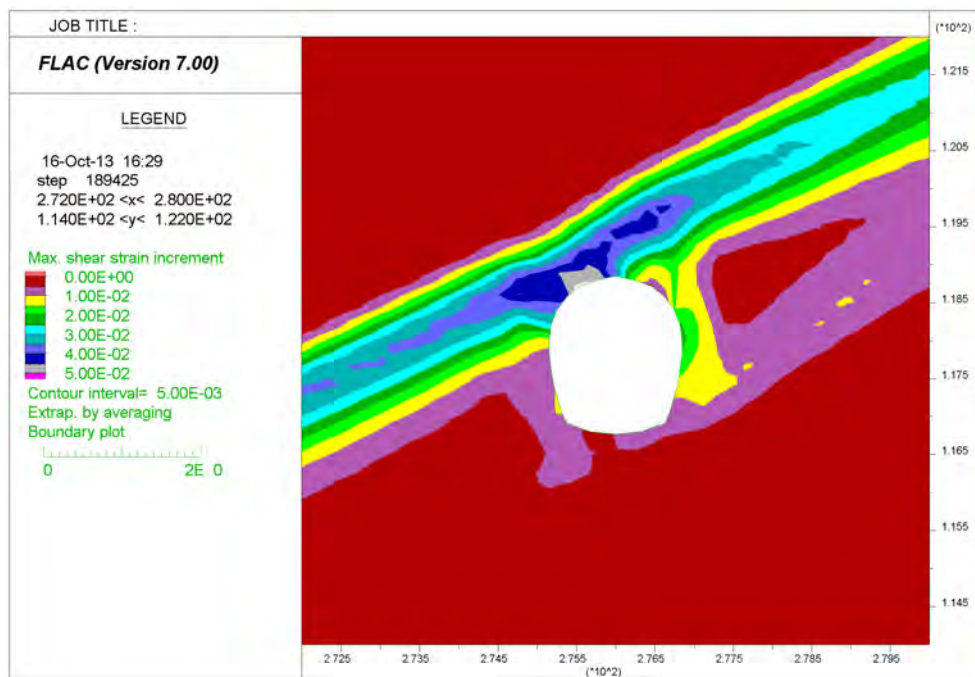


Abbildung 5.35: Modell 4: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.

In den Abbildungen 5.36 bis 5.39 werden die Spannungszustände dargestellt, in welchen sich Zugrisse an der Innen- bzw. Außenseite des Stollens ausbilden. Die Spritzbetonschale wird eingebaut, nachdem sich das beobachtete Rissbild ausgebildet hat. Aus den oben genannten Abbildungen, mit den nach ihrem zeitlichen Entstehen nummerierten Zugrissen, ist der Schadensmechanismus sehr gut ersichtlich. In diesem Modell stimmt das entstandene Rissbild sehr gut mit den beobachteten Rissen im Stollen überein. Wie im vorigen Modell bildet sich anfangs an der Außenseite der rechten Sohle ein Zugriss aus. Als nächstes kommt es zum Zugversagen oberhalb der linken Ulme, ebenfalls an der Stollenaußenseite. Wesentlich wichtiger für die Untersuchung sind die Zugrisse an der Innenseite der Stollenschale, welche sich in weiterer Folge ausbilden. Anfangs bilden sich Zugrisse in der linken Sohle aus, danach folgen jene in der rechten Firste. Wenn man dieses Rissbild mit den Beobachtungen in Abbildung 2.6 vergleicht, so kann man sehen, dass sich die Risse exakt an den gleichen Stellen ausbilden. Zur besseren Veranschaulichung wurde eine Rechnung mit rein elastischer Stollenschale durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5.40 dargestellt und zeigen an welchen Stellen die Zugfestigkeiten des Stampfbetons bzw. des Steingewölbes überschritten werden.

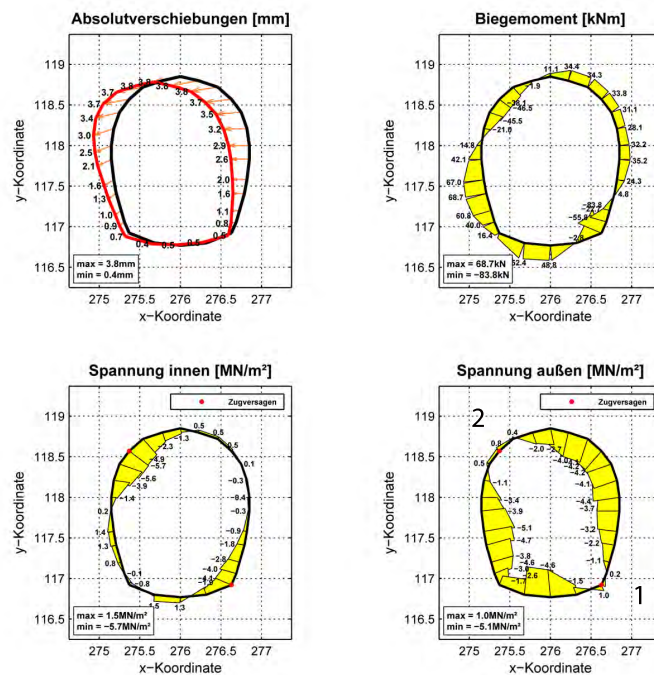


Abbildung 5.36: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 0,93 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,33 mm).

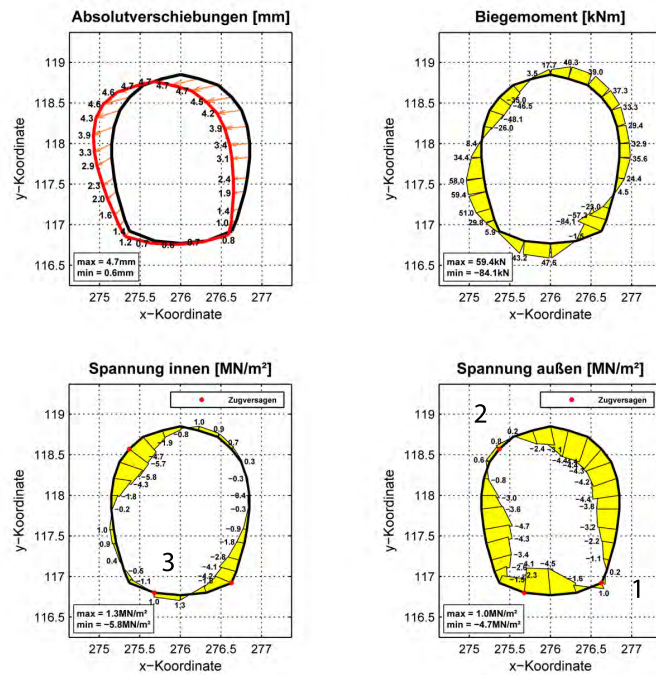


Abbildung 5.37: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 1,66 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,16 mm).

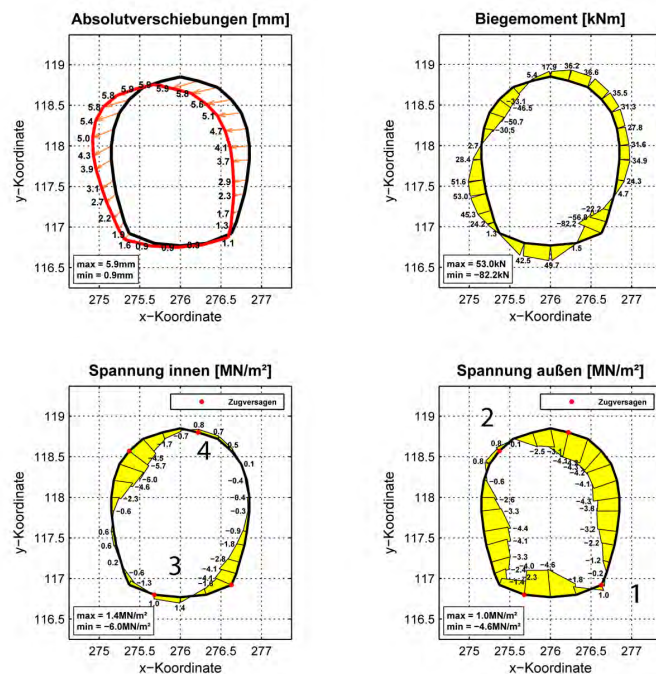


Abbildung 5.38: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 3,46 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,26 mm).

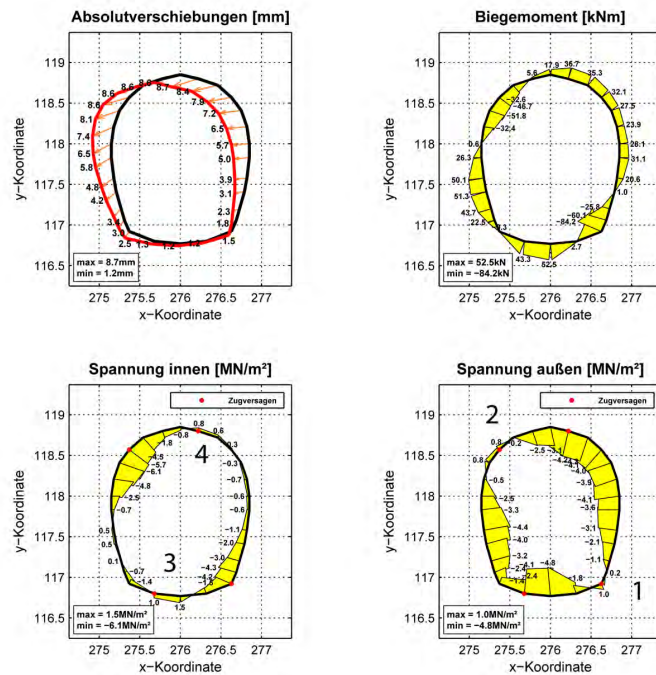


Abbildung 5.39: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 8,65 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 4,89 mm).

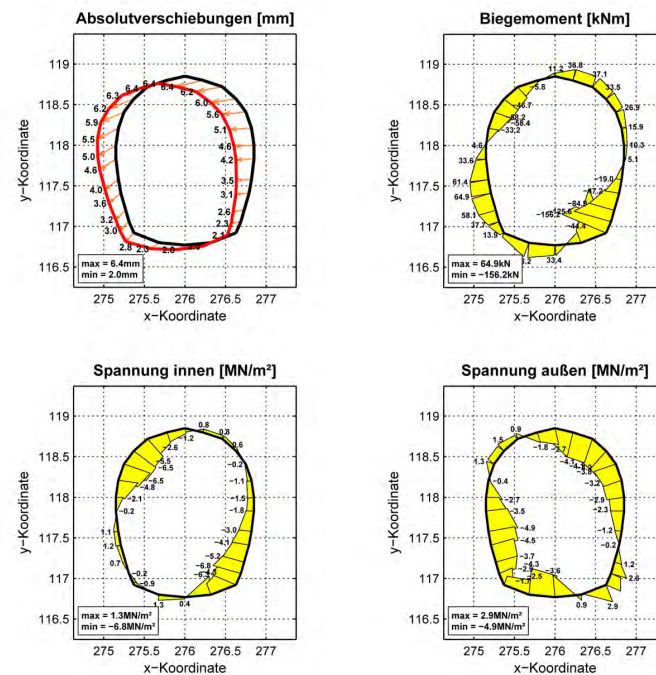


Abbildung 5.40: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen bei rein elastischem Materialverhalten.

Tabelle 7: Modell 4: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens (siehe auch Abb. 5.34.)

Modell 4:				
Alle Werte ab neuen Nullpunkt	1.Riss (außen)	2.Riss (außen)	3.Riss (innen)	4.Riss (innen)
Berechnungsschritte	2000	5000	7000	9900
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	0,93	1,66	3,46	8,65
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	0,33	1,16	2,26	4,89
VK Stollen [mm]	-0,08	-0,27	-0,51	-1,07
HK Stollen [mm]	0,06	0,21	-0,40	0,78
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻⁴]	4,9	8,9	15,6	30,5

Spritzbetonschale

Wie in den vorhergehenden Modellen wird auch in diesem Modell die Spritzbetonschale nach Auftreten der Zugrisse an der Innenseite des Stollens eingebaut. In diesem Modell ist es gelungen, dass der Stollen noch mehr mit der Massenbewegung mitgleitet als im 3. Modell. Die Berechnung wird fortgeführt bis sich in der Firste des Stollens eine zusätzliche Horizontalverschiebung von 25 mm einstellt. In Abbildung 5.41 sieht man, dass sich die Differenz zwischen Oberflächen- und Stollenverschiebung wesentlich verkleinert hat, die Stollenverschiebung beträgt ca. ein Viertel der Oberflächenverschiebung. In Abbildung 5.34 ist zu erkennen, dass nach dem Einbau der Spritzbetonschale die Horizontal- sowie die Vertikalkonvergenzen erheblich reduziert werden. Trotz dieser versteifenden Wirkung der Spritzbetonschale gleitet der Stollen mit der Massenbewegung ab, das erkennt man an den Horizontalverschiebungen von Oberfläche und Stollen, die durch den Einbau der Spritzbetonschale kaum beeinflusst werden. Das Modell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verschiebungen und Stollenkonvergenzen, bei einer Horizontalverschiebung des Stollens von 12 mm beträgt die vertikale Stollenkonvergenz weniger als 1 mm und liegt damit im Trend der Messungen. Die maximalen Zugspannungen treten in den Punkten auf, an denen sich im historischen Stollen Zugrisse ausgebildet haben. Bei einer Horizontalverschiebung von 12 mm beträgt die maximale Zugspannung an der Innenseite der Spritzbetonschale 11,5 MPa. Bei einer Horizontalverschiebung von 25 mm steigt die maximale Zugspannung an der Innenseite nur geringfügig auf einen Wert von 13,1 MPa an. Aufgrund der sehr realistischen Verformungen und Verschiebungen sowie der plausiblen Spannungen wird für zukünftige Analysen dieses Modell herangezogen.

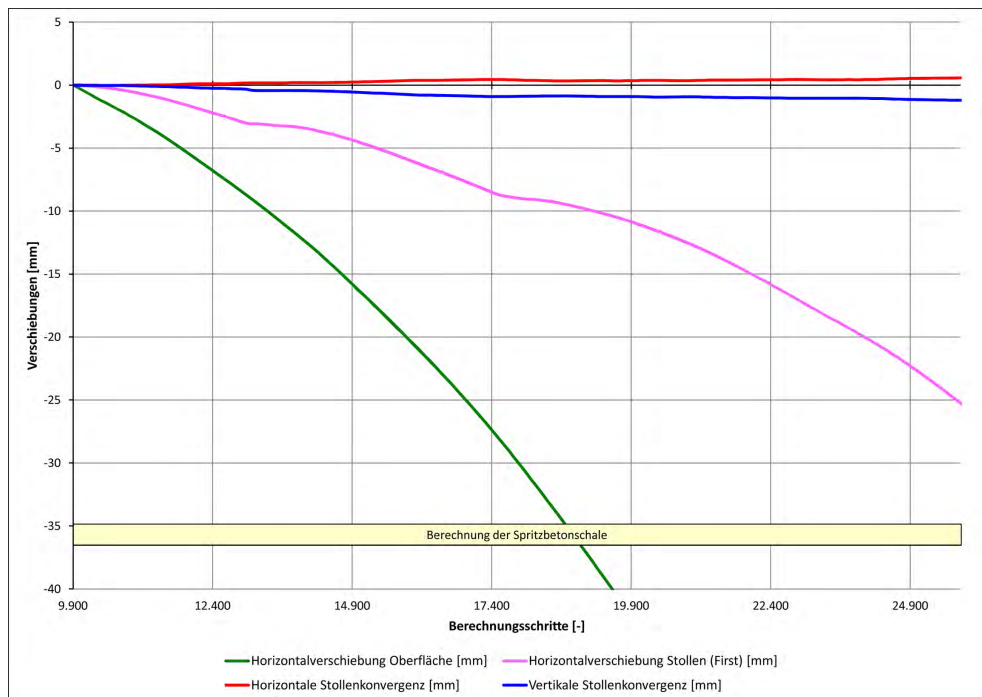


Abbildung 5.41: Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Horizontalverschiebung des Stollens von 25 mm.

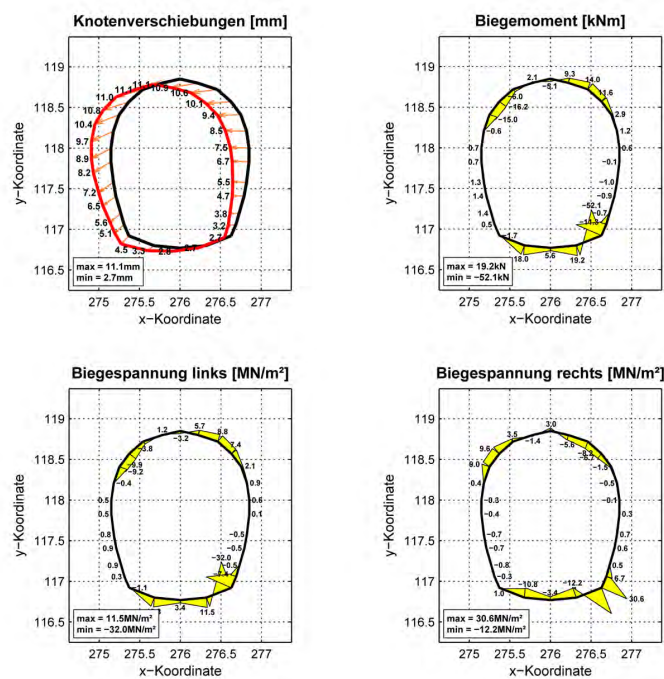


Abbildung 5.42: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 12 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 46,8 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 11,97 mm).

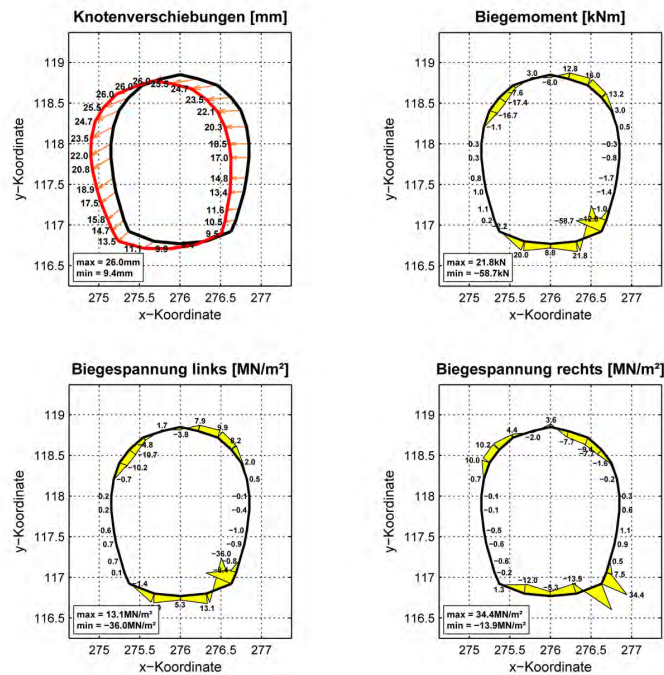


Abbildung 5.43: Modell 4: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 25 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 89,4 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 25,25 mm).

Tabelle 8: Modell 4: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale (siehe auch Abb. 5.41).

Modell 4:		
Alle Werte ab Einbau Spritzbetonschale		
Berechnungsschritt	20600	25800
Horiz. Versch. Oberfläche [mm]	46,8	89,4
Horiz. Versch. Stollen (Firste) [mm]	11,97	25,25
VK Stollen [mm]	-0,94	-1,20
HK Stollen [mm]	0,36	0,57
Geschwindigkeit [mm/Step*10 ⁻³]	8,3	12,0
Max. Drucksp. außen [MN/m ²]	12,2	13,9
Max. Zugsp. außen [MN/m ²]	30,6	34,4
Max. Drucksp. innen [MN/m ²]	32,0	36,6
Max. Zugsp. innen [MN/m ²]	11,5	13,1

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die aus den Berechnungen resultierenden Spannungsverteilungen sind mit dem Belastungsmodell in Abbildung 2.10 erklärbar. Das Rissbild im historischen Stollenbauwerk stimmt in den ersten beiden Modellvarianten (1 und 2) nicht zur Gänze mit dem im Stollen erhobenen überein. In den letzten beiden Modellvarianten (3 und 4) besteht eine gute Übereinstimmung mit den im Stollen vorhandenen Rissen. In den Modellen 1 und 2 verläuft die Scherzone oberhalb des Stollens und die Stollenverschiebungen sind wesentlich geringer als die Hangverschiebungen. Bei den Modellen 3 und 4 läuft die Scherzone direkt durch den Stollen, die Stollenverschiebungen und die Hangverschiebungen sind annähernd gleich und die beiden Verschiebungen nehmen kontinuierlich zu, wie es in der Realität beobachtet wurde.

Der Stollen wird bei allen Modellvarianten vertikal gestaucht und horizontal gedehnt. Das Verhältnis zwischen diesen Konvergenzen stimmt vor allem in den ersten beiden Modellen nicht mit der Realität überein, während es bei den Modellen 3 und 4 den Monitoringergebnissen entspricht. Bei den Berechnungen wurde vor allem Wert darauf gelegt, dass das Verhältnis zwischen der Horizontalverschiebung des Stollens und der maximalen Stollenkonvergenz in etwa mit den Messungen übereinstimmt. Nach Ausbildung des Rissbildes im historischen Stollenbauwerk wurde die Spritzbetonschale eingebaut. Die darin auftretenden Spannungen überschreiten bei den derzeit auftretenden Hangverschiebungen nicht die Festigkeiten. Übereinstimmend mit der Realität führt der Einbau der Spritzbetonschale zu einer Reduktion der Verformungen. Auch die Reduktion der Stollenkonvergenzen auf das gemessene Maß trägt dieser Annahme Rechnung.

Kapitel 6

Interpretation

Basierend auf den in Kapitel 2.3 beschriebenen Beobachtungs- und Messergebnissen wurde das Hang- und Stollenverhalten möglichst realitätsgetreu im numerischen Modell simuliert. Durch Verändern der Materialparameter sowie der Position und Dicke der Scherzone wurde das Bewegungsverhalten des Hanges und des Stollens beeinflusst, um so die beobachteten Verschiebungen, Stollenkonvergenzen und Rissbilder im Modell abzubilden. Abbildung 6.1 zeigt die Positionen des Stollens in Bezug zur Scherzone in den 4 Modellvarianten.

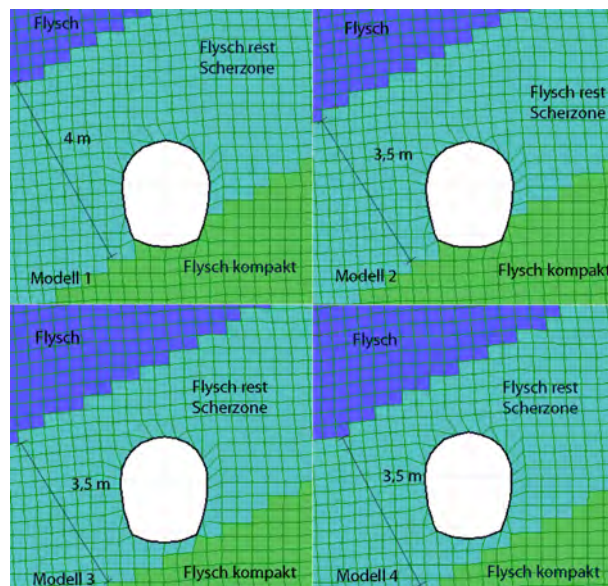


Abbildung 6.1: Position der Scherzone in den 4 Modellvarianten

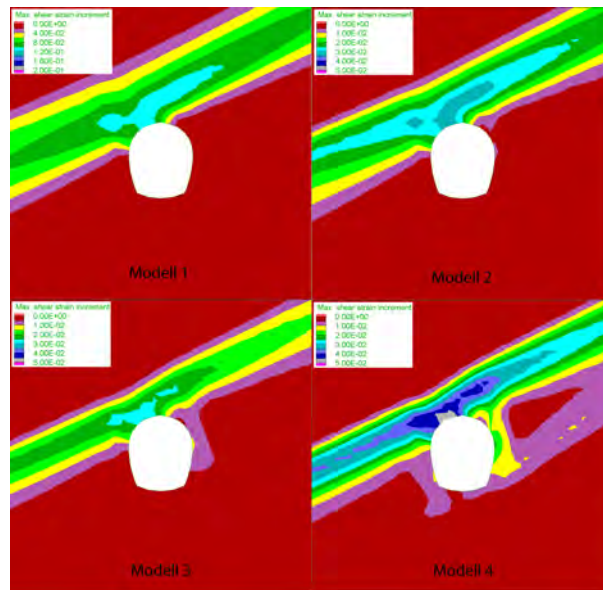


Abbildung 6.2: Schubverzerrungsinkremente kurz vor Einbau der Spritzbetonschale in den 4 Modellvarianten.

Abbildung 6.2 zeigt die Schubverzerrungsinkremente in den vier Modellen. In den Modellen 1 und 2 verläuft die Scherzone oberhalb des Stollens und beeinflusst ihn nur gering. In den Modellen 3 und 4 verläuft die Scherzone durch den Stollen. Laut Monitoring verschieben sich der Firstpunkt des Stollens und die Oberfläche annähernd gleich (Abb. 2.5). Dies ist bei den ersten beiden Modellen nicht der Fall (Abb. 6.3), da der rechte Teil der Sohle im kompakten, nicht bewegten Gebirge (Sockel) liegt und dadurch eine Verankerung in diesem Bereich vorliegt. Bei den Modellen 3 und 4 liegt der Stollen komplett in der Gleitzone und bewegt sich mit dieser talwärts. Dies führt zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Oberflächen- und Stollenverschiebung (Abb. 6.3).

Die Rissbilder des historischen Stollens in (Abb. 2.6) werden in den Modellen 3 und 4 (Abb. 6.4) sehr gut abgebildet. In den Modellen 1 und 2 werden im Bereich der Ulme die Zugfestigkeiten überschritten, während dies an der Innenseite der linken Sohle nicht der Fall ist. Dies stimmt mit den Beobachtungen in der Realität (Zugrisse) nicht überein.

Das Verhältnis zwischen den vertikalen und den horizontalen Konvergenzen liegt im historischen Stollen laut Messungen bei ca. 1 zu 4. Dies ist im Modell 4 annähernd der Fall, während in den anderen Modellen eine größere Abweichung besteht.

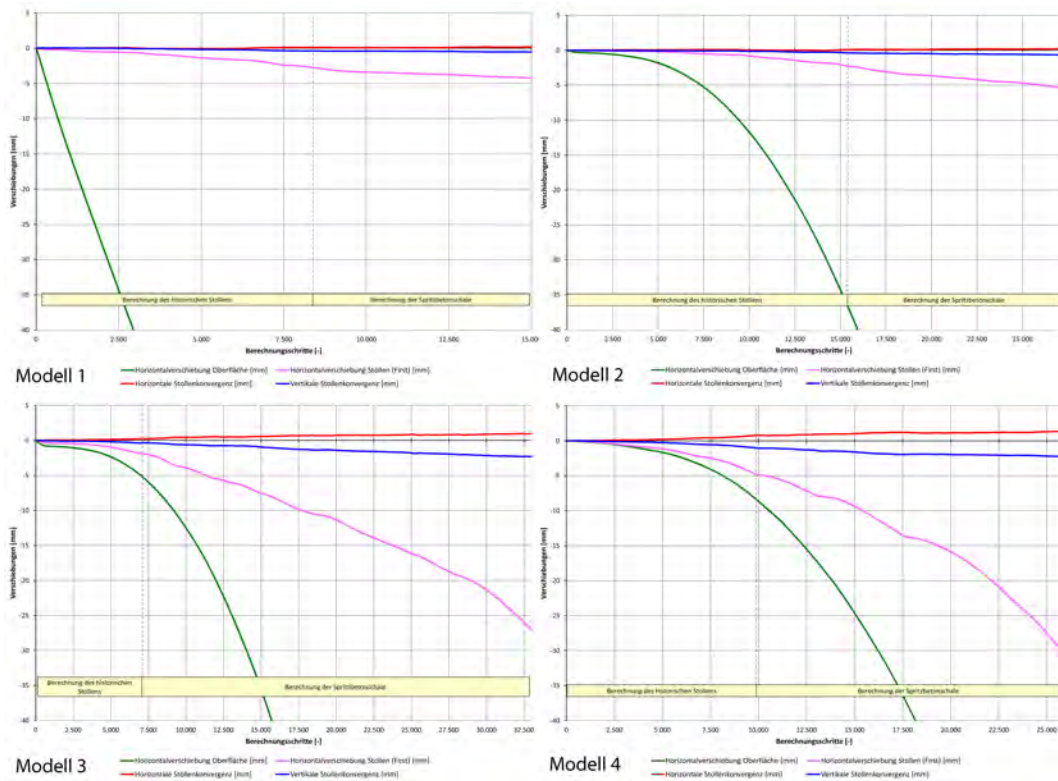


Abbildung 6.3: Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der 4 Modellvarianten.

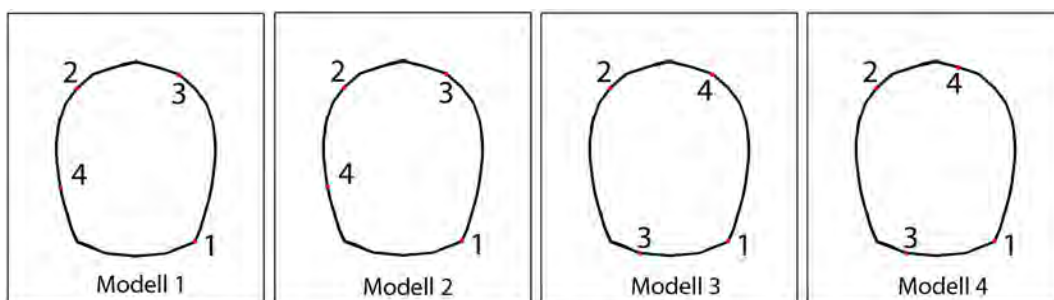


Abbildung 6.4: Rissbilder der 4 Modellvarianten mit Nummerierung der Risse nach zeitlichem Auftreten.

Wie bereits erwähnt, stimmt bei den letzten beiden Modellen die Position der Risse im historischen Stollen annähernd mit den beobachteten überein. Anfangs wird an der Außenseite der rechten Sohle die Zugfestigkeit überschritten. Aufgrund des spröde-plastischen Materialverhaltens kann in diesem Punkt nur mehr eine festgelegte Restfestigkeit übertragen werden, was zu Spannungsumlagerungen in der Tunnelschale führt. Dadurch kommt es zum Zugversagen (=Überschreitung der Zugfestigkeit) oberhalb der linken Ulme, an der Stollenaußenseite. Von wesentlichem Interesse sind die Zugrisse an der Innenseite, die sich in weiterer Folge ausbilden, da nur diese an der Stolleninnenseite beobachtet werden können. Anfangs bilden sich Zugrisse in der linken Sohle aus, danach folgen jene im Bereich der rechten Firste. Die Abfolge der Rissbildungen scheint sehr plausibel und zeigt, wie bereits erwähnt, gute Übereinstimmungen mit den Beobachtungen. Nach Ausbildung der Risse wurde die Spritzbetonschale eingebaut.

Wie man in den Monitoringdaten (Abb. 2.5 und Abb. 2.7) erkennen kann, hat sich der Stollen seit Einbau der Spritzbetonschale wie im Jahr davor ca. 10-12 mm talwärts geschoben, während die Stollenkonvergenzen in diesem Zeitraum annähernd zum Stillstand gekommen sind. Dies zeigt die stabilisierende Wirkung der Spritzbetonschale auf die Verformungen des Stollens. Dieses Verhalten simuliert Modell 4 am besten. Modell 4 zeigt auch nach Einbau der Spritzbetonschale eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verschiebungen und Stollenkonvergenzen. Bei einer Horizontalverschiebung von 12 mm beträgt die vertikale Stollenkonvergenz weniger als 1 mm und liegt damit im Trend der Messungen (Abb. 5.41). Deshalb wurde für Prognosen des zukünftigen Verhaltens Modell 4 herangezogen.

Die maximalen Zugspannungen an der Innenseite der Spritzbetonschale betragen 11,5 MPa nach 12 mm Horizontalverschiebung des Stollens seit Einbau der Spritzbetonschale (entspricht dem aktuellen Stand) und treten genau im Bereich der Risse in der historischen Tunnelschale auf (Abb. 5.42). Aufgrund der hohen Betongüte und des starken Bewehrungsgrades hält der Spritzbeton diesen Belastungen stand. Im Bereich der rechten Sohle treten an der Außenseite sehr hohe Zugspannungen auf. Es wird jedoch angenommen, dass auch diese Spannungen ohne Zerstörung der Spritzbetonschale abgetragen werden können, da die Dicke der Spritzbetonschale in diesem Bereich aufgrund der Ausrundung des Profils (Abb. 2.13) viel größer ist als sie in der Rechnung angesetzt wurde. Lässt man die Simulation mittels des Modells 4 weiterlaufen, kommt es auch bei größerer Horizontalverschiebung des Stollens bis zu 25 mm und darüber hinaus nicht zum Versagen der Spritzbetonschale bzw. des historischen Stollens. Die Spannungen im Spritzbeton nehmen zwar zu und es kann zu lokalen Rissbildungen kommen, aber die Standsicherheit ist in diesem Bereich nicht gefährdet (Abb. 5.43). Eine weitere Sicherheit stellt das Kriechverhalten des jungen Spritzbetons dar. Abbildung 2.14 zeigt, dass im beschriebenen Kriechversuch die Spannungen des jungen Spritzbetons in den ersten 16 Tagen um 63 % abgenommen haben, das Kriechen aber noch nicht abgeschlossen war. Als Größenordnung der Dauer der Kriechvorgänge kann daher ein Monat angenommen werden. Die Spannungen in der Spritzbetonschale betragen einen Monat nach Einbau 5,1 MPa, was in der Größenordnung der aufgetragenen Spannungen in Abbildung 2.14 liegt. Unter der Annahme, dass prozentuell die Spannungsreduktion eintritt, ergibt sich eine Reduktion der Spannungen von 3 MPa, die aufgrund von Kriech-

vorgängen im ersten Monat abgebaut wurden.

Diese Ergebnisse zeigen zwar, dass im zentralen Spritzbetonbereich die Standsicherheit nicht gefährdet ist, durch die Auskleidung kommt es aber zu einer Verlagerung des Problems in die Übergangsbereiche zwischen bewegter und unbewegter Zone (Abb. 6.5). Dies zeigt sich an den schräg über den Querschnitt des Stollens verlaufenden Rissen, die in diesem Bereich in der Spritzbetonschale bereits erkennbar sind. Der Stollen wird wie ein Balken auf zwei Stützen belastet, wobei er im kompakten Gebirge eingespannt ist und sich nur im Bereich der Massenbewegung hangabwärts verschiebt. Die Risse in den Übergangsbereichen können daher mit den Schubrisen nahe dem Auflager eines Betonträgers verglichen werden (Abb. 2.11). Diese Tatsache und die zusätzliche Torsionsbelastung durch die Drehbewegung des Stollens (Abb. 2.12) führen zu dem beobachteten Rissbild in den Übergangsbereichen.

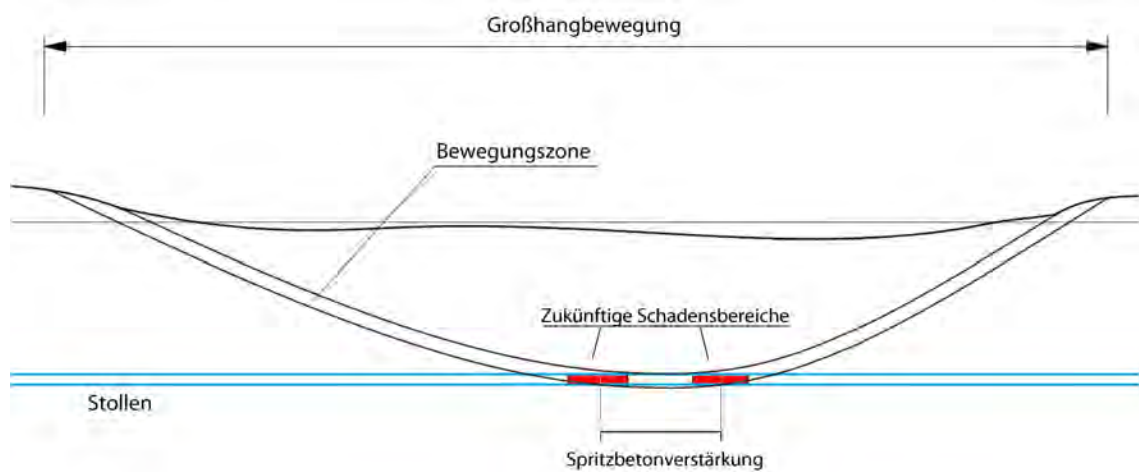


Abbildung 6.5: Kennzeichnung der zukünftigen Schadensbereiche.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Untersuchung eines Schadenfalls in einem Stollen, der durch die Gleitzone einer Massenbewegung hindurchführt. Dazu wurde der Hang inklusive Stollen und zugehörigen Sanierungsmaßnahmen mit dem kontinuumsmechanischen Programm FLAC (“Fast Lagrangian Analysis of Continua“) simuliert. Ziel war die Verfolgung und Analyse sowie die zukünftige Entwicklung der Bewegungsvorgänge und deren Auswirkung auf die Standsicherheit des Stollens.

Der Stollen, welcher vor ca. 100 Jahren errichtet wurde, liegt in einer Tiefe von 24 m unterhalb der Geländeoberkante und verläuft durch wechselhaft festen Flysch. Die Sohle und Ulme bestehen aus Stampfbeton, die Firste wurde mit Steinblöcken gemauert. Bis vor wenigen Jahren wies der Stollen keinerlei Schäden auf. Geologische Untersuchungen haben ergeben, dass der Hang durch eine nacheiszeitliche Massenbewegung führt. Vermutlich war der Hang mehr oder weniger stabil, befand sich jedoch sehr nahe am Grenzgleichgewicht und wurde erst durch bauliche Maßnahmen am Hangfuß vor wenigen Jahren reaktiviert. Seit diesem Zeitpunkt ist die Massenbewegung (wieder) aktiv und deformiert den, sich in der Gleitzone befindenden Stollen, dermaßen, dass es zu Rissbildungen kam. Diese Schäden machten Sanierungsmaßnahmen mittels Tunnelbögen und Spritzbeton erforderlich. Die ersten Risse wurden ein Jahr nach Durchführung der baulichen Maßnahmen am Hangfuß festgestellt, seitdem werden die Hangbewegungen und Stollendeformationen mittels Monitoring aufgezeichnet. Aus den Inklinometermessungen erkennt man, dass die Gleitzone eine Dicke von etwa 2 Metern hat und sich der darüber liegende Gleitkörper mit einer über die Höhe konstanten Geschwindigkeit talwärts schiebt. Geodätische Messungen haben gezeigt, dass sich der Firstpunkt des Stollens mit derselben Geschwindigkeit bewegt wie die Oberfläche. Der Stollen liegt daher genau in der Scherzone der Massenbewegung. Die Messreihen vor Einbau der Spritzbetonschale zeigen, dass die Horizontalverschiebungen des Stollens und der Oberfläche etwa 10-12 mm pro Jahr betragen, wobei der größte Teil der Bewegungen in den Wintermonaten stattfindet. Die Horizontal- und Vertikalkonvergenzen betragen

etwa ein Viertel der Horizontalverschiebungen des Stollens und zeigen denselben jahreszeitlichen Trend wie diese. Aufgrund der Beanspruchung durch die Scherverschiebungen in der Gleitzone haben sich Zugrisse in der bergseitigen Firste und in der talseitigen Sohle gebildet. Wegen der fortschreitenden Schädigungen wurden zwei Jahre nach Beginn der Messungen Sanierungsarbeiten durchgeführt. Der Stollen wurde mit Tunnelbögen in einem Abstand von einem Meter und einer 10 cm dicken Spritzbetonschale verstärkt. Seitdem deformiert sich der Stollen nicht mehr, die Horizontalverschiebung des Stollens beträgt aber immer noch 10-12 mm pro Jahr.

Basierend auf den geometrischen Daten wurde in FLAC ein Modell aufgebaut. Die Materialeigenschaften wurden mittels Aufschlüssen, Bohrkernen und Vergleichsparametern aus der Literatur abgeschätzt. In den Hang wurde eine Gleitzone mit geringerer Festigkeit eingebaut, durch welche der Stollen verläuft. Nach dem Aufbau der Insitu-Spannungen wurden der Gleitzone die entsprechenden Parameter zugewiesen und so lange Berechnungsschritte durchgeführt, bis sich eine durchgehende Gleitzone ausbildete. Anschließend wurde der Stollen ausgebrochen und die historische Stollenschale eingebaut. Durch Verändern der Materialparameter sowie der Position und Dicke der Gleitzone wurde das Bewegungsverhalten des Hanges und des Stollens beeinflusst, um so die beobachteten Verschiebungen, Stollenkonvergenzen und Rissbilder zu erhalten.

Die beste Übereinstimmung zeigt sich bei der Modellvariante mit einer Gleitzonendicke von 3,5 Metern, wobei der gesamte Stollen in der Gleitzone liegt. Durch die Scherverschiebungen der Gleitzone wird der Stollen deformiert und es kommt zu Überschreitungen der Zugfestigkeit. Anfangs wird an mehreren Stellen an der Schalenaußenseite die Zugfestigkeit überschritten. Von wesentlichem Interesse sind aber die Zugrisse (=Überschreitung der Zugfestigkeit) an der Innenseite, die sich in weiterer Folge ausbilden, da nur diese in der Realität an der Stolleninnenseite beobachtet werden können. Wie in der Realität beobachtet bilden sich Zugrisse in der linken Sohle und im Bereich der rechten Firste aus. Auch das Verhältnis der horizontalen Stollenverschiebung zu den Stollenkonvergenzen stimmt mit den Monitoringdaten überein. Nach Überschreitung der Zugfestigkeit an mehreren Stellen (=Ausbildung von Zugrissen) wurde der Einbau der Spritzbetonschale, die mittels Interface kraftschlüssig mit dem historischen Stollen verbunden wurde, simuliert. Die stabilisierende Wirkung der Spritzbetonschale auf die Verformungen des historischen Stollenausbaus zeigt sich anhand der Stollenkonvergenzen, die wie in der Realität in der Folge stark abnehmen. Die talseitige Horizontalverschiebung des Stollens kann durch den Spritzbetonausbau nicht gestoppt werden. Der Stollen wird zwar nicht weiter verformt, gleitet aber mit der Massenbewegung weiter talwärts.

Wird die numerische Berechnung über den derzeit bestehenden Zustand fortgeführt, steigen die Spannungen in der Spritzbetonschale nur mehr unwesentlich an. Es kann daher angenommen werden, dass die Spritzbetonschale in nächster Zeit den Belastungen standhalten wird. Durch die Verschiebung des Stollenbauwerks kommt es aber in den Übergangsbereichen zwischen bewegten und unbewegten Hangbereichen zu Rissbildungen, die zur Gefährdung der Standsicherheit in diesen Bereichen führen könnten.

Abbildungsverzeichnis

2.1	3D-Modell der Massenbewegung mit Quer- und Längsschnitt durch den Stollen und die Bewegungszone.	3
2.2	Querschnitt durch den untersuchten Hang.	4
2.3	Historischer Querschnitt des Stollens.	4
2.4	Inklinometermessung im betrachteten Hang in unmittelbarer Nähe zum Stollen.	6
2.5	Horizontalverschiebung des Stollens und der Oberfläche sowie Setzung des Stollens mittels Inklinometer- und Tachymetermessung.	6
2.6	Schadensbild im historischen Stollen vor Durchführung der Sanierungsmaßnahmen.	7
2.7	Horizontale und vertikale Stollenkonvergenzen (siehe auch Abb. 2.6).	7
2.8	Zugrisse in der Sohle des Stollens (Poisel, 2010).	8
2.9	Zugrisse in der Firste des Stollens (Poisel, 2010).	8
2.10	Hauptspannungsrichtungen in einer Gleitzone.	9
2.11	Schräge Zugrisse (“Schubrisse“) in einem Biegebalken (nach: Kollegger, 2011).	9
2.12	Hauptspannungstrajektorien (d.h. die Zugrisse haben die Richtung der Drucktrajektorien) zufolge Torsion eines Zylinders (aus: Leonhardt, 1964)	9
2.13	Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen (10 cm Spritzbetonschale und Tunnelbögen)	10
2.14	Kriechverhalten des jungen Spritzbetons (aus: Müller, M. 2001).	11
3.1	FLAC Berechnungskreislauf (aus: Itasca, 2013)	14

4.1	Querschnitt durch den untersuchten Hang mit den verschiedenen Zonen welchen unterschiedliche Parameter zugewiesen werden.	17
4.2	Netzaufbau des Hangs (Netzfeinheit außen 1 m, Verfeinerung auf 0,25 m im Bereich des Stollens).	18
4.3	Netzaufbau im Umfeld des Stollens.	18
4.4	Querschnitt durch den historischen Stollen mit Angabe der Stärke des Ausbaus.	19
4.5	Querschnitt durch die Spritzbetonschale mit Angabe der Stärke des Ausbaus.	19
4.6	Ablauf der Berechnungen in FLAC.	22
4.7	Hangmaterial: Linear-elastisches ideal-plastisches Materialverhalten.	23
4.8	Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium.	23
4.9	Historischer Stollenausbau: Linear-elastisches spröd-plastisches Materialverhalten.	24
4.10	Spritzbetonschale: Linear-elastisches Materialverhalten.	24
4.11	Modell 1: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.	26
4.12	Modell 2: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.	27
4.13	Modell 3: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.	28
4.14	Modell 4: Position des Stollens und Dicke der Scherzone.	29
5.1	Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen während des Aufbaus des Insitu-Zustandes und der Ausbildung der Scherzone.	31
5.2	Modell 1: Ausbildung der Scherzone gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements kurz vor Stolleneinbau.	31
5.3	Modell 1: Geschwindigkeitsvektoren nach Ausbildung der Scherzone kurz vor Stolleneinbau.	32
5.4	Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.	33
5.5	Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigung der Verschiebungen welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.	33

5.6	Modell 1: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.	34
5.7	Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 58,6 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,16 mm).	35
5.8	Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 76,7 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,64 mm).	35
5.9	Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 89,5 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,03 mm). . .	36
5.10	Modell 1: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 112,1 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,95 mm). .	36
5.11	Modell 1: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Oberflächenverschiebung von 100 mm.	38
5.12	Modell 1: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 100 mm Oberflächenverschiebung (Horizontalverschiebung Oberfläche = 100,99 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,72 mm).	38
5.13	Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.	41
5.14	Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigung der Verschiebungen welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.	41
5.15	Modell 2: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.	42
5.16	Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 11,73 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,81 mm).	43
5.17	Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 23,66 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,59 mm).	43
5.18	Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 31,41 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,88 mm). .	44

5.19	Modell 2: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 34,27 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,05 mm).	44
5.20	Modell 2: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Oberflächenverschiebung von 100 mm.	46
5.21	Modell 2: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 100 mm Oberflächenverschiebung (Horizontalverschiebung Oberfläche = 99,6 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 3,07 mm).	46
5.22	Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.	48
5.23	Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigungen der Verschiebung welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.	48
5.24	Modell 3: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.	49
5.25	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 0,85 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,42 mm).	50
5.26	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 2,35 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,97 mm).	50
5.27	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 4,19 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,61 mm).	51
5.28	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 12,47 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 3,92 mm).	51
5.29	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen bei rein elastischem Materialverhalten.	52
5.30	Modell 3: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Horizontalverschiebung des Stollens von 25 mm.	53
5.31	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 12 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 92,62 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 12,02 mm).	54

5.32	Modell 3: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 25 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 231,68 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 25,13 mm).	54
5.33	Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen beginnend bei Stolleneinbau.	56
5.34	Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen unter Vernachlässigungen der Verschiebung welche durch die Umlagerungsprozesse nach dem Stolleneinbau verursacht werden.	57
5.35	Modell 4: Scherzone in der Umgebung des Stollens kurz vor Einbau der Spritzbetonschale gezeigt anhand des Scherverzerrungsinkrements.	57
5.36	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 0,93 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 0,33 mm).	58
5.37	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stollenaußenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 1,66 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 1,16 mm).	59
5.38	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 1. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 3,46 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 2,26 mm).	59
5.39	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen nach Ausbildung des 2. Risses an der Stolleninnenseite (Horizontalverschiebung Oberfläche = 8,65 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 4,89 mm).	60
5.40	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen im historischen Stollen bei rein elastischem Materialverhalten.	60
5.41	Modell 4: Aufgezeichnete Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der Spritzbetonschale bis zu einer Horizontalverschiebung des Stollens von 25 mm.	62
5.42	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 12 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 46,8 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 11,97 mm).	62
5.43	Modell 4: Spannungen und Verschiebungen in der Spritzbetonschale nach 25 mm Horizontalverschiebung der Spritzbetonschale (Horizontalverschiebung Oberfläche = 89,4 mm, Horizontalverschiebung Stollen (Firste) = 25,25 mm).	63
6.1	Position der Scherzone in den 4 Modellvarianten	65

6.2	Schubverzerrungsincremente kurz vor Einbau der Spritzbetonschale in den 4 Modellvarianten.	66
6.3	Verschiebungen und Stollenkonvergenzen der 4 Modellvarianten.	67
6.4	Rissbilder der 4 Modellvarianten mit Nummerierung der Risse nach zeitlichem Auftreten.	67
6.5	Kennzeichnung der zukünftigen Schadensbereiche.	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modell 1: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens.....	37
Tabelle 2: Modell 1: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale.....	39
Tabelle 3: Modell 2: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens.....	45
Tabelle 4: Modell 2: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale.....	45
Tabelle 5: Modell 3: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens.....	52
Tabelle 6: Modell 3: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale.....	55
Tabelle 7: Modell 4: Zusammenfassung der Verschiebungen des historischen Stollens.....	61
Tabelle 8: Modell 4: Zusammenfassung der Spannungen und Verschiebungen der Spritzbetonschale.....	63

Literaturverzeichnis

- Poisel, R., Zettler, A.H., Unterberger, W. (1996) Tunnelling in Landslides. (selected paper) Proc. Eurock 96. Turin 1996, 667-674
- Itasca (2013). FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions) User's Guide, Itasca Consulting Group
- Roth, W. (1999). Ermittlung von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen - Codes FLAC. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien
- Preh, A. Zapletal, M. (2006). The perfect mesh for $FLAC^{3D}$ to analyze the stability of rock slopes. 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics - 2006 - Hart Varona (eds.). Minneapolis: Itasca
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International of Solids and Structures
- Leonhardt, F., Mönnig, E., (1964). Grundlagen des Stahl- und Spannbetons. Teil 1 Stahlbeton Technische Hochschule
- Kollegger, J., (2011). Skript für Betonbau TU Wien
- Müller, M. 2001. Kriechversuche an jungen Spritzbetonen zur Ermittlung der Parameter für Materialgesetze, Diploma Thesis, Insitut für Gemoechanik, Tunnelbau und konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben.
- Rokahr R.B., Lux K.H., (1987). Einfluß des rheologischen Verhaltens des Spritzbetons auf den Ausbauwiderstand. Felsbau 5 (1987) Nr. 1