

# MASTERARBEIT

---

## NUMERISCHE STUDIE ZUM ANKERKRAFTVERLAUF BEI KAVERNEN

---

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik und Grundbau  
der  
Technischen Universität Graz

im April 2012

Verfasser: Mario Fuchsberger, BSc  
Betreuer: Dipl.-Ing. Franz Tschuchnigg  
Beurteilung: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut F. Schweiger

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, Februar 2012

---

Mario Fuchsberger

## DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt meiner Mutter Gabriele Moser. *Ich danke dir für deine Unterstützung und dein uneingeschränktes Vertrauen, welches ich all die Jahre hinweg genießen durfte.*

Weiter bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau für die ausgezeichnete Rundumbetreuung zur Entstehung dieser Arbeit.

Herrn Dr.-Ing. Thomas Marcher und seinen Mitarbeitern, von der Firma ILF - Beratende Ingenieure, möchte ich für die Motivation zu dieser Arbeit und die fortlaufende Unterstützung danken.

# KURZFASSUNG

Rechnerische Nachweise werden im Bereich des Untertagebaus immer wichtiger, weshalb Rechentechniken und Berechnungsverfahren von Softwareherstellern immer weiterentwickelt werden. Speziell im Tunnel- und Kavernenbau sind numerische Analysen schon seit längerem Stand der Technik.

In dieser Arbeit wird das numerische Phänomen des oszillierenden Normalkraftverlaufes entlang der Anker im Kavernenbau untersucht. Für die Analyse werden unterschiedliche Finite-Elemente-Programme verwendet. Es werden verschiedene Einflüsse systematisch der Reihe nach untersucht, verglichen und interpretiert. Durch verschiedene Darstellungen und deren Interpretation wird der Mechanismus, der den zu untersuchenden oszillierenden Ankernormalkraftverlauf hervorruft, aufgezeigt.

Neben dem verwendeten Stoffgesetz haben der gewählte Berechnungsansatz, die gewählte Netzfeinheit und die Ankerdefinition, welche unter anderem softwareabhängig ist, den größten Einfluss auf das untersuchte Phänomen.

## ABSTRACT

Over the last years numerical simulations have grown more and more in importance in underground construction. This led to a continuous development of methods and algorithms by software developers and vendors. Today, numerical analysis and simulations are state of the art in tunneling and cavern construction.

This work treats the numerical phenomenon of oscillating normal forces along ground anchors in cavern constructions. Several finite-element codes are applied and the results compared. Influences on the phenomenon are systematically investigated and compared. The mechanisms leading to the oscillation of the normal force are identified by interpretation of the results.

Besides the constitutive model, the numerical method, the mesh resolution and the general anchor definition (that is also software dependent) were shown to have a major impact on the investigated phenomenon.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>3</b>
2.1	Finite-Elemente-Methode (FEM)	3
2.2	Stoffgesetze [2]	5
2.2.1	Mohr-Coulomb (MC)	5
2.2.2	Hardening Soil (HS)	7
2.2.3	Hoek-Brown (HB)	9
<b>3</b>	<b>FE-UNTERSUCHUNG – PLAXIS 2D 2010</b>	<b>10</b>
3.1	Vorgehensweise	10
3.2	Referenzmodell	10
3.2.1	Geometrie	10
3.2.2	Materialparameter	11
3.2.3	Berechnungsschritte	12
3.2.4	Ergebnisse der Berechnung	13
3.3	Parametervariation	15
3.3.1	Aushubsequenz	15
3.3.2	Dilatanz	17
3.3.3	Zugfestigkeit ( <i>Tension cut-off</i> )	18
3.3.4	Ausbau ( <i>Tunnel Lining</i> )	19
3.3.5	Ankersteifigkeit	20
3.3.6	Ankernormalkraftverläufe	22
3.4	HS – Modell	28
3.4.1	Allgemein	28
3.4.2	Variation der Steifigkeiten	28
3.4.3	Variation der Kohäsion und Zugfestigkeit	30
3.5	HB – Modell	33
3.5.1	Allgemein	33
3.5.2	Ergebnisse	34
3.6	Vergleichende Darstellungen	36
3.6.1	Entwicklung der Wellen in der Ankernormalkraft	36
3.6.2	Spannungsdiagramme	40
3.6.3	Spannungsverteilung und Trajektorien	43
3.7	Einfluss der Netzfeinheit	47
3.8	Einfluss der Randbedingungen	49

3.8.1	Allgemein	49
3.8.2	Vertikalschnitt	51
3.8.3	Horizontalschnitt	52
<b>3.9</b>	<b>Schlussfolgerungen I</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>VERGLEICHSRECHNUNG PHASE2</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Äquivalentes Modell</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Ergebnisse der Berechnung</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Einfluss des Berechnungsansatzes</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>Einfluss der Vorentlastung in PHASE2</b>	<b>61</b>
<b>4.5</b>	<b>Schlussfolgerungen II</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>VERGLEICHSRECHNUNG – PLAXIS 3D</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Äquivalentes Modell</b>	<b>66</b>
<b>5.2</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>67</b>
<b>5.3</b>	<b>Schlussfolgerungen III</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG &amp; AUSBLICK</b>	<b>72</b>

## 1 Einleitung

Der Tunnelbau ist durch seine Komplexität eines der interessantesten und zugleich schwierigsten Aufgabengebiete eines Bauingenieurs/Geotechnikers. Die größten Schwierigkeiten liegen sicherlich in den Unsicherheiten und den Inhomogenitäten des Gebirges. Durch die relativ hohen Unsicherheiten des räumlichen und zeitlichen Gebirgsverhaltens sind baubegleitende Beobachtung, deren Bewertung und in weiterer Folge deren daraus gezogene Konsequenzen unverzichtbar für einen wirtschaftlichen und sicheren Tunnelbau. Durch eine abstrahierte Modellvorstellung sowie vereinfachte Versagenskriterien kann man heutzutage, mit Hilfe von spezieller Software, gute Prognosen erstellen. Jedoch zeigt die Erfahrung, dass durch die vielen Annahmen und Idealisierungen, die Realität nur begrenzt wiedergegeben werden kann.

Nichtsdestotrotz gewinnen numerische Methoden in den Planungsphasen immer mehr an Bedeutung. Mittels Sensibilitätsuntersuchungen bzw. Variationen diverser Parameter können gute Aussagen in Form von Bandbreiten getroffen werden, welche in weiterer Folge als Dimensionierungs- oder Ausschreibungsgrundlage dienen können. Somit sind numerische Berechnungen neben anderen Faktoren, wie z. B. der geologischen Bewertung des Gebirges und der Erfahrung im Untertagebau, ein wesentlicher Bestandteil des modernen Tunnelbaus.

### 1.1 Problemstellung und Motivation

Im Zuge eines Praktikums bei der Firma ILF, Abteilung Geotechnik, hat sich ein Masterarbeitsthema ergeben, welches die Untersuchung eines ungeklärten Phänomens bezüglich des Ankerkraftverlaufs aus numerischen Berechnungen zum Ziel hatte. In dieser Arbeit sollte speziell das Ankernormalkraftverhalten bei Kavernen untersucht werden.

Zur untersuchten Thematik wurde keine passende Literatur gefunden, auf welche man hier verweisen könnte. In Abbildung 1 ist die Problemstellung veranschaulicht. Als Ergebnis einer numerischen Berechnung ist ein wellenförmiger Normalkraftverlauf entlang der Anker zu sehen.

Bei geotechnischen Projekten, vor allem bei Kavernen, treten bei numerischen Berechnungen manchmal scheinbar unlogische Ankerkraftverläufe auf. Diese oftmals oszillierenden Normalkraftverläufe entlang des Ankers sind schwer zu interpretieren und deren Ursache konnte bis dato noch nicht genau ausgemacht werden. Eine geläufige Möglichkeit, mit einem Normalkraftverlauf dieser Art umzugehen, ist die Verschmierung der Normalkräfte entlang der Anker. Es wird unter anderem auf den

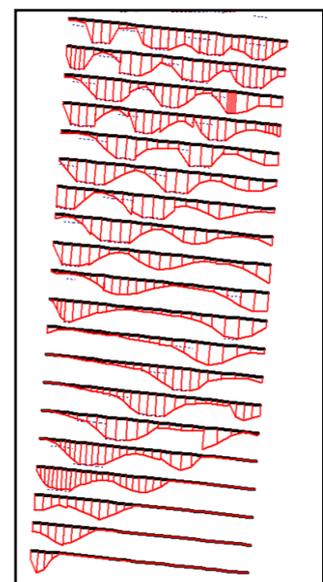


Abbildung 1: Repräsentativer Ankerkraftverlauf

schwer zu modellierenden Verbund zwischen Anker, Mörtel und Gebirge hingewiesen, welcher eine Verschmierung des Normalkraftverlaufes legitimieren sollte.

Diese Arbeit soll das beschriebene Phänomen, die Entstehung, deren Konsequenzen, sowie andere Aspekte bei numerischen Berechnungen, speziell im Zusammenhang mit Kavernen, zum Inhalt haben.

## **1.2 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist in erster Linie die Untersuchung des oszillierenden Ankernormalkraftverlaufes bei numerischen Berechnungen mittels Finite-Elemente-Methode (kurz: FEM). Es werden systematisch verschiedene Einflüsse und deren Auswirkung untersucht.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Einflüsse zu untersuchen, werden Berechnungen mit dem 2D-FEM-Programm PLAXIS 2D 2010 durchgeführt. Zusammenfassend werden folgende Einflüsse untersucht:

- Einfluss der Aushubsequenz
- Einfluss der Dilatanz
- Einfluss der Zugfestigkeit
- Einfluss des Ausbaus
- Einfluss der Ankerdefinition
- Einfluss des Stoffgesetzes
- Einfluss der Netzfeinheit
- Einfluss der Randbedingungen
- Einfluss des Berechnungsansatzes

In weiterer Folge werden Vergleichsrechnungen mit dem 2D-FEM-Programm PHASE2 und dem 3D-FEM-Programm PLAXIS 3D durchgeführt. Nach diversen Darstellungen, Vergleichen und deren Interpretationen, sollen die verschiedenen Einflüsse auf den Ankerkraftverlauf sowie der Mechanismus des oszillierenden Ankerkraftverlaufes aus numerischer Sicht geklärt sein.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die benötigten Grundlagen für die verwendeten Finite-Elemente-Programme und den dabei verwendeten Stoffgesetzen beschrieben. Für eine detailliertere Beschreibung ist auf die jeweiligen Benutzerhandbücher der Programme zu verweisen (siehe [2] und [4]).

### 2.1 Finite-Elemente-Methode (FEM)

Grundsätzlich handelt es sich bei der FEM um ein numerisches Näherungsverfahren zum Lösen von Differenzialgleichungen.

Das zu untersuchende Kontinuum wird in eine beliebige, aber endliche Anzahl von Elementen diskretisiert. Diese Elemente werden mit einer Ansatzfunktion definiert und erhalten, je nach gewähltem Ansatz, dementsprechende Elementknoten. In weiterer Folge stehen diese Knoten mit Randbedingungen (Auflager, Kräfte,...) in einem zu lösenden Gleichungssystem. Dieses Gleichungssystem wird dann numerisch gelöst und liefert somit eine angenäherte Lösung des Problems. Die Qualität der Lösung hängt stark von der Anzahl der verwendeten Elemente und dem gewählten Ansatz ab (vgl. [1]).

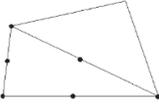
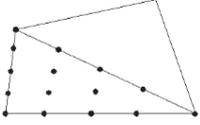
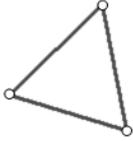
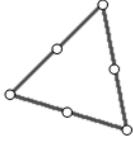
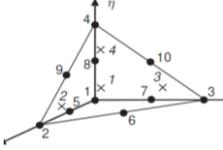
Für die vorliegende Arbeit wurden bei 2D-Berechnungen 3-, 6- und 15-knotige Dreieckselemente sowie für 3D-Berechnungen 10-knotige Tetraederelemente zur Diskretisierung verwendet. Die jeweilige Anzahl der Knoten pro Element gibt Aufschluss über den gewählten Verformungsansatz:

- Ein 3-knotiges Dreieckselement steht für einen linearen Verformungsansatz und kann in PHASE2 verwendet werden.
- Ein 6-knotiges Dreieckselement steht für einen quadratischen Verformungsansatz und kann in PLAXIS2010 und PHASE2 verwendet werden.
- Ein 15-knotiges Dreieckselement steht für einen Verformungsansatz vierter Ordnung und kann in PLAXIS2010 verwendet werden.
- In PLAXIS 3D werden standardmäßig 10-knotige Tetraederelemente verwendet, welche für einen quadratischen Verformungsansatz stehen.

In

Tabelle 1 sind die verwendeten Elementtypen in Matrixform dargestellt.

Tabelle 1: Verwendete Elementtypen (aus [3] und [4])

Knoten je Element	3	6	10	15
Verformungsansatz	1.Ordnung (2D)	2.Ordnung (2D)	2.Ordnung (3D)	4.Ordnung (2D)
<b>2D - PLAXIS2010</b>		 [3]		 [3]
<b>2D - PHASE2</b>	 [4]	 [4]		
<b>3D - PLAXIS 3D</b>			 [3]	

## 2.2 Stoffgesetze [2]

Ein Stoffgesetz beschreibt das Spannungs-Verformungsverhalten eines Materials. Stoffgesetze werden mit dem Ziel, das reale Spannungs-Verformungsverhalten eines bestimmten Materials zu beschreiben, immer weiterentwickelt beziehungsweise angepasst. Für die vorliegende Arbeit wurden, neben linear elastischem Materialverhalten, folgende Stoffgesetze verwendet, welche in weiterer Folge beschrieben werden:

- Mohr-Coulomb (MC)
- Hardening Soil (HS)
- Hoek-Brown (HB)

### 2.2.1 Mohr-Coulomb (MC)

Das MC-Modell beschreibt ein linearelastisches-idealplastisches Materialverhalten unter Verwendung der MC-Bruchbedingung.

Die Dehnungen setzen sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen. In Abbildung 2 ist dieses Verhalten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm allgemein veranschaulicht. Die elastischen Dehnungen  $\epsilon^e$  sind durch den E-Modul definiert und reversibel. Plastische Dehnungen  $\epsilon^p$  treten ab Erreichen der jeweiligen Grenzspannung ein und sind irreversibel.





dargestellt. Gemeinsam mit der Fließbedingung der Kompaktionsverfestigung (*compression hardening*) wird der jeweilige elastische Bereich definiert (siehe Abbildung 6).

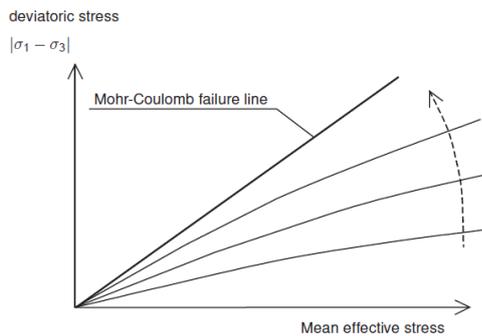


Abbildung 5: *Shear hardening* – schematisch [2]

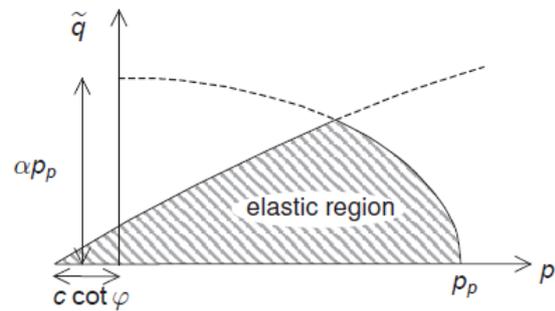


Abbildung 6: Elastischer Bereich – HS [2]

In einem Hauptspannungsraum bilden die Fließbedingungen einen sechsseitigen Konus mit Kappe (siehe Abbildung 7).

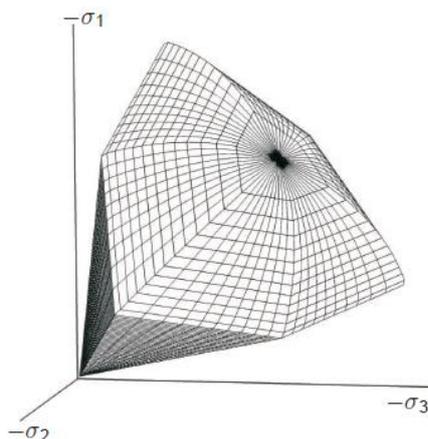


Abbildung 7: HS-Fließflächen im Hauptspannungsraum [2]

Das HS-Modell ist ein fortschrittliches Modell zur Beschreibung des Verhaltens verschiedenster Böden.

Zur Definition des HS-Modells sind neben den MC-Parametern folgende Basisparameter notwendig:

- $E_{50}^{ref}$       Sekanten-Modul bei Standardtriaxversuch      [kPa]
- $E_{oed}^{ref}$       Tangenten-Modul bei Ödometerversuch      [kPa]
- $E_{ur}^{ref}$       Entlastungs- Wiederbelastungsmodul      [kPa]  
 (standardmäßig  $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$  )
- $m$       Parameter für Spannungsabhängigkeit (0-1)      [-]

### 2.2.3 Hoek-Brown (HB)

Das HB-Modell beschreibt, gleich wie das MC-Modell, ein linearelastisches-idealplastisches Materialverhalten unter Verwendung des HB-Versagenskriteriums. Das HB-Versagenskriterium ist eine nicht-lineare Annäherung an das reale Versagenskriterium von Fels. Durch Parameter-Fitting kann mit HB das Versagen über weite Bereiche sehr gut beschrieben werden.

Die Fließbedingung des Modells ist eine Erweiterung des HB-Versagenskriteriums für allgemeine Spannungszustände und beschreibt den jeweiligen Grenzzustand. Für die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  ist die Fließbedingung folgendermaßen definiert:

$$f_{HB} = \sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{-\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.3)$$

Durch Umformulieren für allgemeine Spannungszustände, kann die Oberfläche der Fließbedingungen in einem Hauptspannungsraum dargestellt werden. (siehe Abbildung 8)

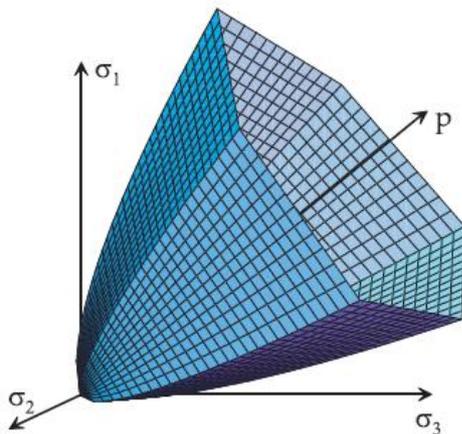


Abbildung 8: HB-Fließflächen im Hauptspannungsraum [2]

Im Bereich der Felsmechanik hat sich das HB-Stoffgesetz gut etabliert und wird je nach Vorlieben bzw. zur Verfügung gestellten Basisparametern angewendet.

Zur Definition des HB-Modells sind folgende Basisparameter notwendig:

-	<b>E</b>	E-Modul	[kPa]
-	<b>v</b>	Querdehnzahl	[-]
-	<b><math>\sigma_{ci}</math></b>	Einaxiale Druckfestigkeit des <i>intact rock</i>	[kPa]
-	<b><math>m_i</math></b>	Empirischer <i>intact rock</i> -Parameter	[-]
-	<b>GSI</b>	Geological Strength Index	[-]
-	<b>D</b>	Störfaktor (0-1)	[-]
-	<b><math>\Psi_{max}</math></b>	Dilatanz (bei $\sigma_3 = 0$ )	[°]
-	<b><math>\sigma_\psi</math></b>	Wert von $\sigma_3$ bei dem Dilatanz zu 0 wird	[kPa]

### 3 FE-Untersuchung – PLAXIS 2D 2010

Die numerischen Berechnungen wurden mit dem 2D FEM-Programm PLAXIS2010 Version 2010.01 durchgeführt. Es wurden grundsätzlich 15-knotige Dreieckselemente in einem ebenen Dehnungszustand (*plane strain*) verwendet.

#### 3.1 Vorgehensweise

Ausgehend von einem realen Kraftwerksprojekt, welches für diese Arbeit als Bezugsprojekt dient, wurde ein stark vereinfachtes Modell für eine Kaverne (Maschinenkaverne) erstellt.

Die verschiedenen Einflüsse wurden durch Abändern des Referenzmodells untersucht. Die jeweiligen Ergebnisse wurden dann mit dem Referenzergebnis verglichen. Wenn nach einer ersten Analyse klar war, dass ein bestimmter Einfluss in keinem direkten Zusammenhang mit dem Ankerkraftverlauf steht, wurde dieser nicht weiter untersucht. Einflüsse die auf einen direkten Zusammenhang hindeuteten, wurden genauer analysiert.

#### 3.2 Referenzmodell

Hier wird das erstellte Referenzmodell, von dem ausgehend alle weiteren Untersuchungen abgeleitet wurden, beschrieben.

##### 3.2.1 Geometrie

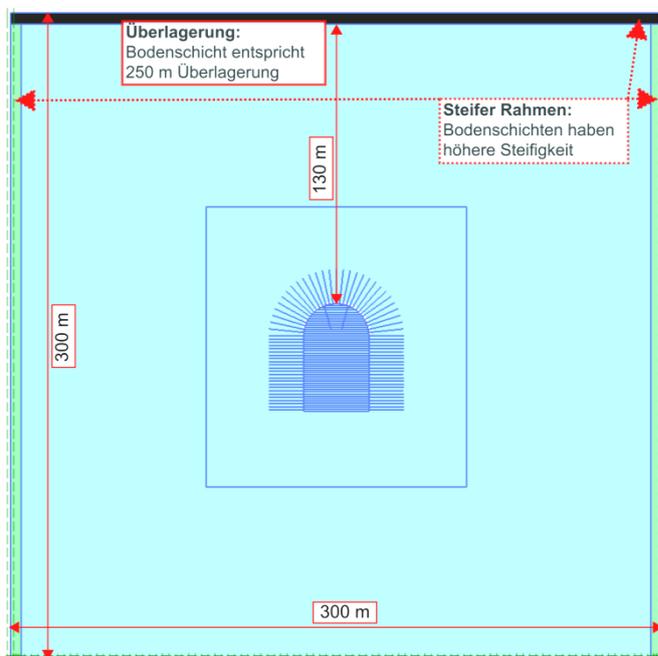


Abbildung 9: Referenzmodell

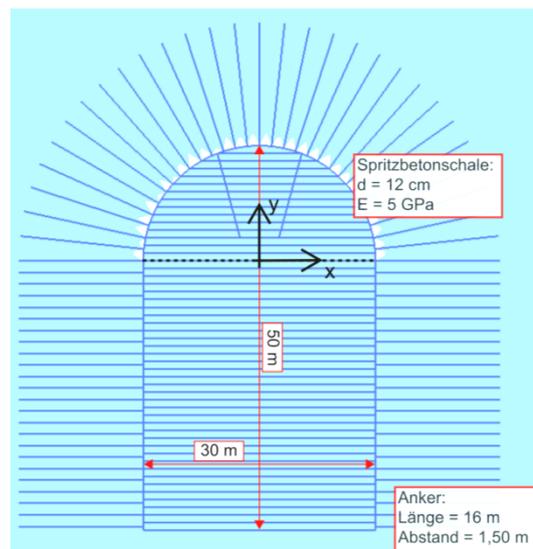


Abbildung 10: Kavernengeometrie

Das Referenzmodell ist zwar symmetrisch, wurde aber als Ganzes modelliert, da man für eventuell weiterführende Untersuchungen die Option einer nebenstehenden Kaverne (Trafokaverne) offen lassen wollte.

Das Gesamtmodell (siehe Abbildung 9) hat Gesamtabmessungen von 300 x 300 m, wobei an der Oberfläche des Modells eine 5 m dicke Bodenschicht aufliegt, welche repräsentativ für eine Überlagerung von 250 m steht. Seitlich sind je 5 m Bodenpakete modelliert, welche gemeinsam mit der Überlagerungsschicht, durch eine sehr hohe Steifigkeit, eine Art steifen Rahmen bilden. Dieser Rahmen repräsentiert eine tiefer reichende Gebirgstragwirkung und wird in Kapitel 0 genauer untersucht.

Die Kaverne hat eine Gesamthöhe von 50 m und eine Breite von 30 m. Die Anker werden mit einem Abstand von 1,50 m und mit einer Länge von 16 m vorgesehen. Im Bereich der Kalotte, ein Halbkreis mit einem Radius von 15 m, wird eine Spritzbetonschale vorgesehen (siehe Abbildung 10).

### 3.2.2 Materialparameter

Tabelle 2: Parameter - Soils

Parameter	1A (hellblau)	Überlagerung (schwarz)	Seitenaufleger (grün)	Einheit
Materialmodell	Mohr-Coulomb	Linear-Elastisch	Linear-Elastisch	-
Typ	Drained	Drained	Drained	-
$\gamma_{\text{unsat}}$	27	1350	27	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{\text{sat}}$	27	1350	27	kN/m <sup>3</sup>
E	10,00 E6	1,25 E9	1,25 E9	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	0,25	0,00	0,00	-
c	2000	-	-	kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	40	-	-	°
$\psi$	15	-	-	°
$\sigma_t$	200	-	-	kN/m <sup>2</sup>
$K_0$	0,40	0,40	0,40	-

Tabelle 3: Parameter – Plates

Parameter	Spritzbeton	Einheit
Materialmodell	Elastisch	-
EA	600,00 E3	kN/m
EI	720,00	kNm <sup>2</sup> /m
d	0,12	m
w	3,00	kN/m/m
$\nu$	0,15	-

Tabelle 4: Parameter - Geogrids

Parameter	Anker	Einheit
Materialmodell	Elastoplastisch	-
EA	122,80 E3	kN/m
$N_p$	500,00	kN/m

Für den anstehenden Fels wurde ein drainiertes MC-Materialmodell verwendet. Ausgehend vom Bezugsmodell wurden die Gebirgsparameter der verschiedenen Schichtungen verschmiert und so angepasst, dass sich für das Referenzmodell der oszillierende Ankerkraftverlauf gut erkennbar ausbildete.

Für die steifen Bodenschichten wurde ein linear-elastisches Materialmodell verwendet. Die verwendete Steifigkeit entspricht 125-mal der angesetzten Gebirgssteifigkeit. Da dieser Wert vom Bezugsprojekt übernommen wurde, ist dieser Einfluss in Kapitel 0 genauer betrachtet worden.

Die Anker, mit einer Bemessungsfestigkeit von 850 kN, einem Durchmesser von 36 mm und einem *out-of-plane spacing* von 1,70 m, wurden als elastoplastische *Geogrid-Elemente* modelliert.

Es wurde im Kalottenbereich eine 12 cm dicke Spritzbetonschale mit einer Steifigkeit von 5 GPa vorgesehen. Da diese Schale keinen Einfluss auf die entstehenden Ankerkraftverläufe im untersuchten Bereich der Kavernenwandung hat, wurde die Steifigkeit mit fortschreitendem Aushub nicht weiter erhöht.

Es wurde für alle Bodenschichten ein Seitendruckbeiwert ( $K_0$ ) von 0,40 angesetzt.

Zusammenfassend stehen die verwendeten Parameter in den Tabelle 2 bis Tabelle 4. Der vollständige Parametersatz wurde aus PLAXIS2010 exportiert und kann dem Anhang A entnommen werden.

### 3.2.3 Berechnungsschritte

Ausgehend vom Bezugsprojekt wurde für alle Ausbrüche eine 30%ige Vorentlastung vorgesehen und eine Hauptaushubsequenz von 4 m verwendet. Die Modellierung des Ausbruches erfolgt in mehreren Phasen, welche in Tabelle 5 aufgelistet und ergänzend in Abbildung 11 veranschaulicht sind.

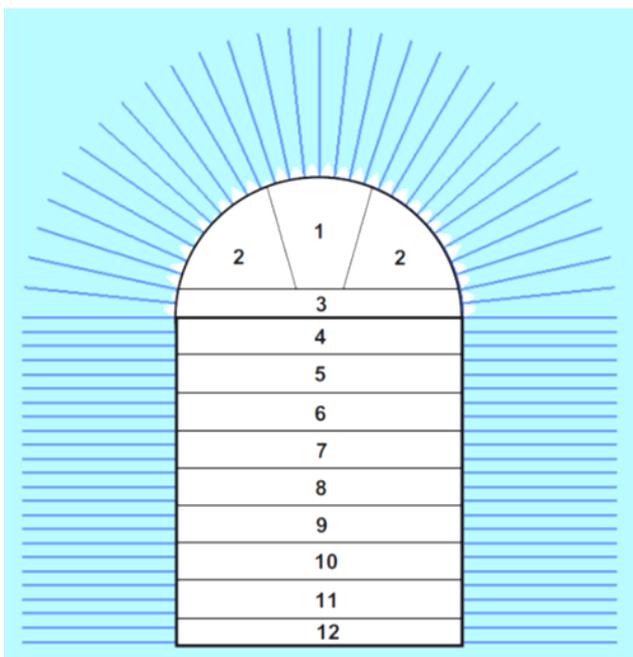


Abbildung 11: Aushubabfolge

Tabelle 5: Phasenabfolge

Phasenabfolge		
Phase	Beschreibung	Aushubbereich
1	In-Situ Spannungszustand	-
2	Vorentlastung Kalotte	1
3	Ausbruch Kalotte und Einbau der Anker	1
4	Vorentlastung Ulmenstollen	2
5	Ausbruch Ulmenstollen und Einbau der Anker	2
6	Vorentlastung Restliche Kalotte	3
7	Ausbruch Restliche Kalotte und Einbau der Anker	3
8	Einbau Spritzbetonschale Kalotte	1, 2, 3
9	Vorentlastung Strosse 1	4
10	Ausbruch Strosse 1 und Einbau der Anker	4
.	.	.
.	.	.
.	.	.
25	Vorentlastung Strosse 9	12
26	Ausbruch Strosse 9 und Einbau der Anker	12

### 3.2.4 Ergebnisse der Berechnung

Da der Fokus der Untersuchung bei dem wellenförmigen Ankerkraftverlauf liegt, werden hier die wichtigsten Ergebnisse dargestellt, welche für die in weiterer Folge untersuchten Einflüsse und deren Vergleiche relevant sind.

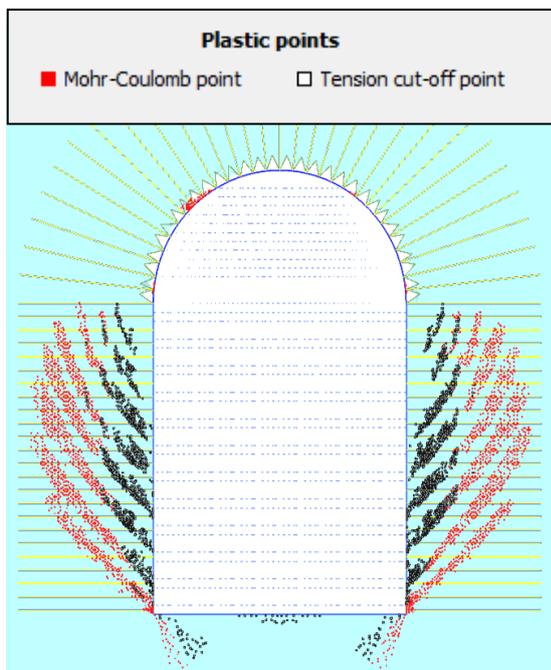


Abbildung 12: Plastic Points - Referenzmodell

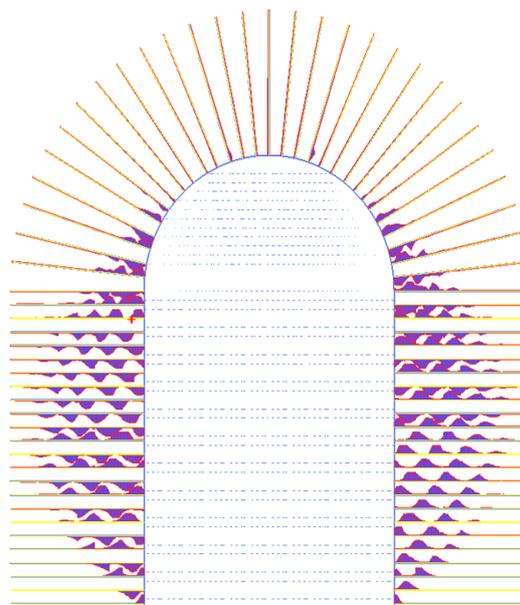


Abbildung 13: Ankernormalkraft - Referenzmodell

Wie erwartet stellt sich ein symmetrisches Verhalten ein, daher wird in den weiteren Betrachtungen nur noch die rechte Seite der Kaverne betrachtet. Bei der sich in den Ankern ergebenden Normalkraft (Abbildung 13) scheint es einen Zusammenhang mit den plastischen Punkten (Abbildung 12) zu geben. Bemerkenswert ist, dass im Bereich der Firste kaum Ankernormalkräfte entstehen.

Plastische Punkte (*Plastic points*) sind überbeanspruchte Spannungspunkte im berechneten Modell. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, liegen diese Punkte auf der Fließfläche und können nur noch plastische Dehnungen aufnehmen. *Mohr-Coulomb points* sind Spannungspunkte, die ihre Scherfestigkeit erreicht haben. *Tension cut-off points* sind Punkte, die ihre Zugfestigkeit (bzw. den definierten *Tension-cut off*) erreicht haben. Auffallend ist, dass sich die plastischen Punkte in Form von Scherbändern ausbilden.

Die maximalen Verformungen (siehe Abbildung 14) ergeben sich in der Sohle mit 41 mm Hebung und in der Firste mit 37 mm Setzung. Das zickzackförmige Verformungsbild an der Kavernenwandung scheint ebenso einen Zusammenhang mit den plastischen Punkten und den Ankernormalkräften zu haben. Die maximale Verformung in diesem Bereich ergibt 39 mm.

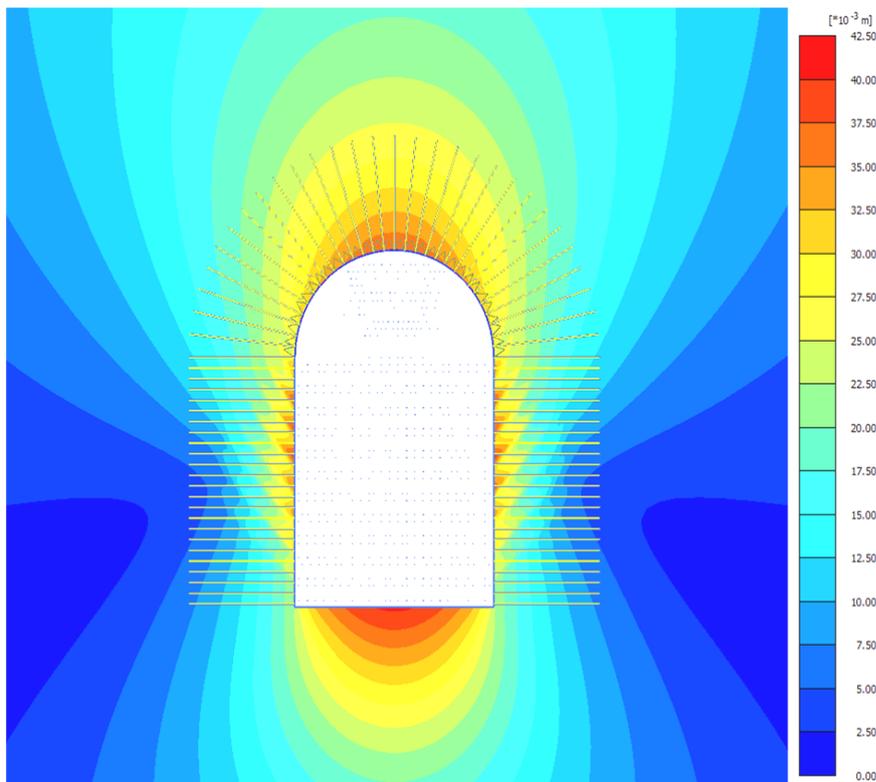


Abbildung 14: Gesamtverformung  $|u|$  - Referenzmodell

### 3.3 Parametervariation

Es wurden, ausgehend vom Referenzmodell, diverse Änderungen im Modell vorgenommen und deren Auswirkung auf die Ankernormalkräfte untersucht.

#### 3.3.1 Aushubsequenz

Da beim Referenzmodell die Scherbänder jeweils an der temporären Sohle starten, wird hier der Einfluss der Aushubsequenz untersucht. Bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen wurde die Aushubsequenz von 1 bis 35 m (1-, 2-, 4-, 6-, 15- und 35 m) variiert. Schematisch ist die Änderung der Aushubabfolge für eine 2-m-Sequenz (siehe Abbildung 15) und für eine 35-m-Sequenz (siehe Abbildung 16) dargestellt.

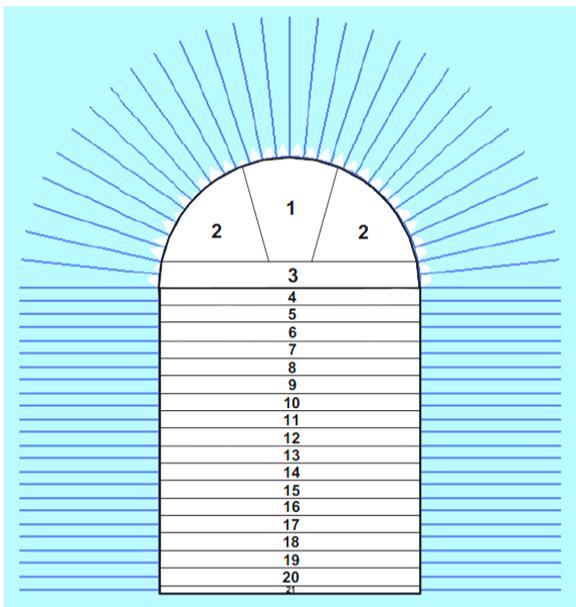


Abbildung 15: Aushubabfolge für 2-m-Sequenz

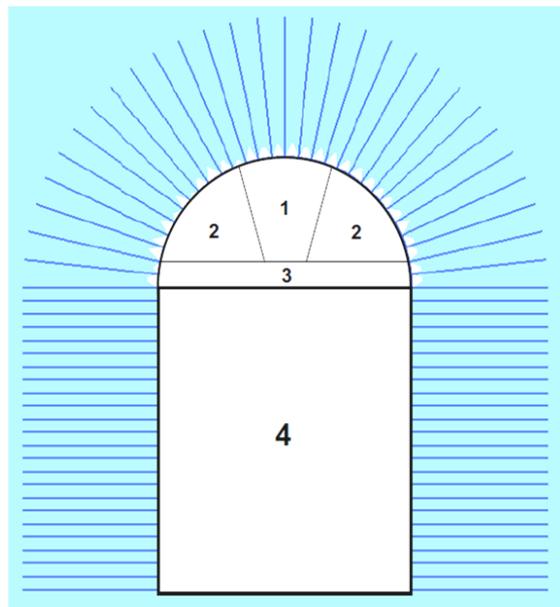


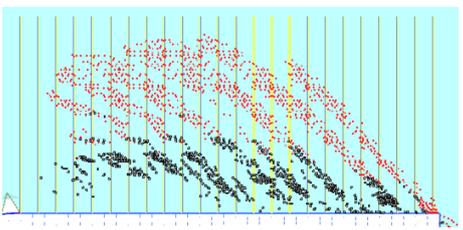
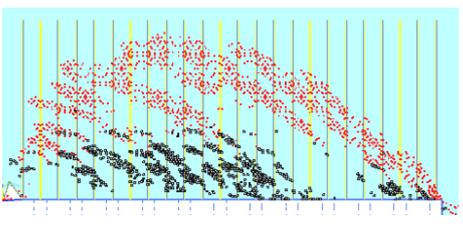
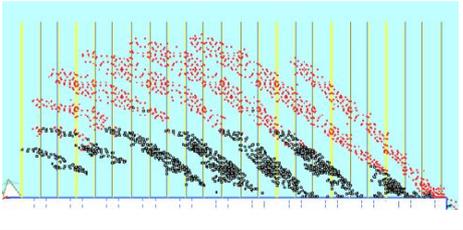
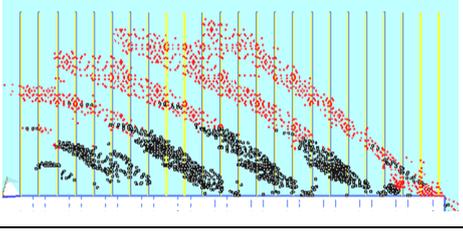
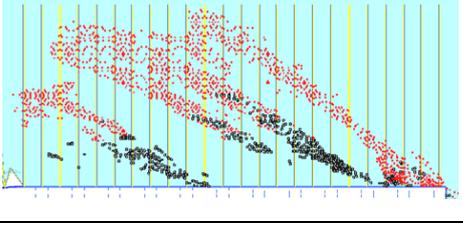
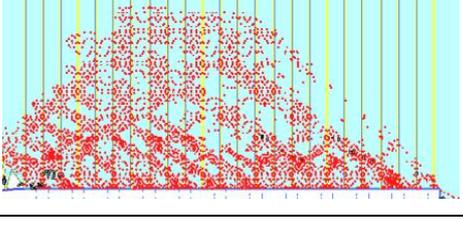
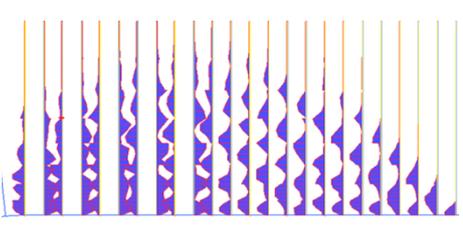
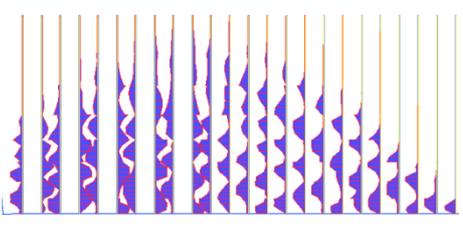
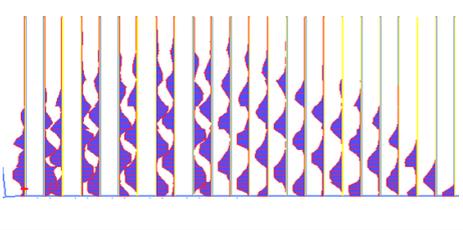
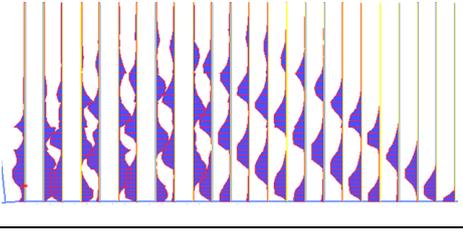
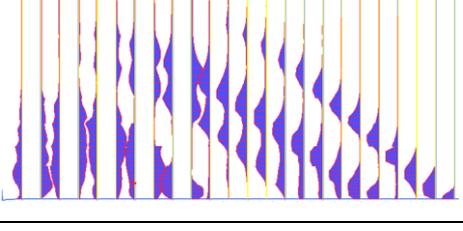
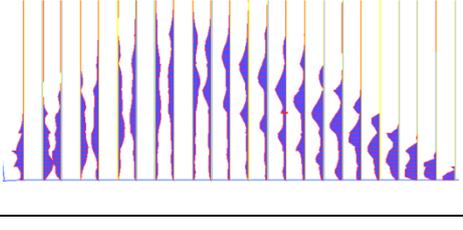
Abbildung 16: Aushubabfolge für 35-m-Sequenz

In folgender Matrixdarstellung (siehe Tabelle 6) werden der Einfluss der Aushubsequenz für *Plastic Points* und Ankernormalkräfte optisch, sowie die maximalen Verformungen quantitativ, gegenübergestellt.

Es ist gut zu erkennen, dass die Aushubsequenz mit der Entstehung der *Plastic Points* und den auftretenden Ankerkräften in einem Zusammenhang steht. Mit einem kleiner werdenden Aushubintervall erhöht sich die Anzahl der plastischen Bänder. In gleicher Weise oszillieren die Ankernormalkräfte mit kleineren Aushubschritten immer mehr.

Wie erwartet, bestimmt die Aushubsequenz durch die jeweilige temporäre Sohle, indirekt Lage und Form der entstehenden Wellen im Ankerkraftverlauf.

Tabelle 6: Matrixdarstellung - Einfluss der Aushubsequenz

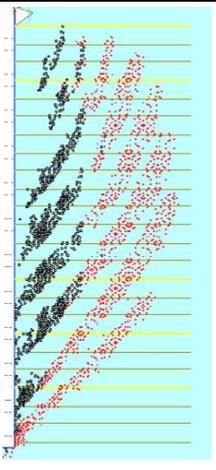
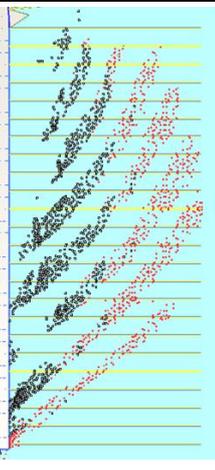
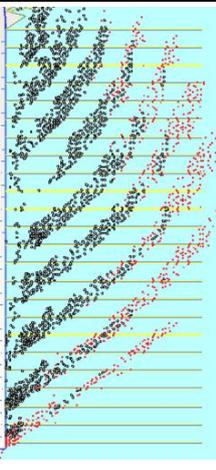
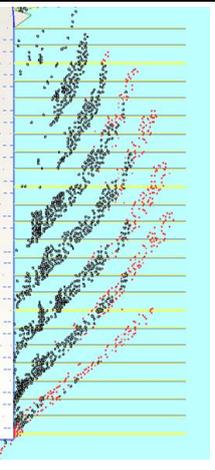
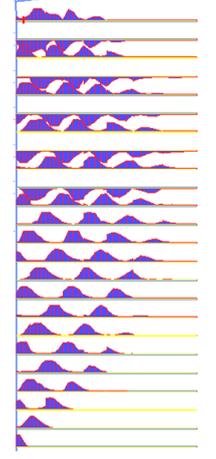
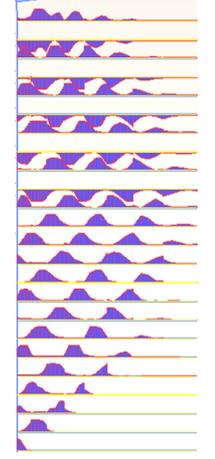
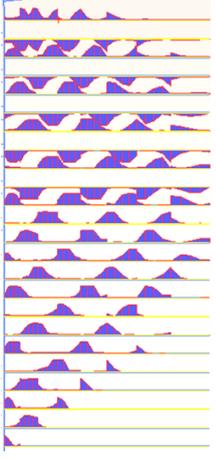
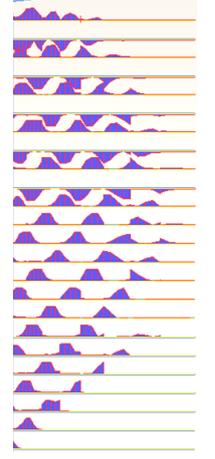
Aushubsequenz [m]	1	2	4 (Referenz)	6	15	35
<b>Plastic Points</b>						
<b>Ankernormalkraft</b>						
<b> u  Firste [mm]</b>	37	37	37	37	36	35
<b> u  Sohle [mm]</b>	40	40	41	40	40	39
<b> u  Wandung [mm]</b>	36	36	39	37	33	27

### 3.3.2 Dilatanz

Da der verwendete Parametersatz eine relativ hohe Dilatanz ( $\psi=15^\circ$ ) aufweist, wird hier der Einfluss der Dilatanz untersucht. Dilatanz führt zu Volumendehnung bei plastischen Scherdehnungen.

Zuerst wurde, bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen, die Dilatanz auf  $7,5^\circ$  und  $0^\circ$  gesetzt. Da die Reduktion der Dilatanz schlechtere Materialparameter repräsentiert und daher höhere Verformungen sowie eine tiefer reichende plastische Zone auftritt, wird in einem zusätzlichen Berechnungsschritt bei  $0^\circ$  Dilatanz ein erhöhter Reibungswinkel von  $45^\circ$  angesetzt.

Tabelle 7: Matrixdarstellung - Einfluss der Dilatanz

Reibungswinkel $\varphi$ [°]	40	40	40	45
Dilatanz $\psi$ [°]	15 (Referenz)	7,5	0	0
<b>Plastic Points</b>				
<b>Ankernormalkraft</b>				
<b> u  Firste [mm]</b>	37	40	43	40
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	42	43	41
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	39	40	35

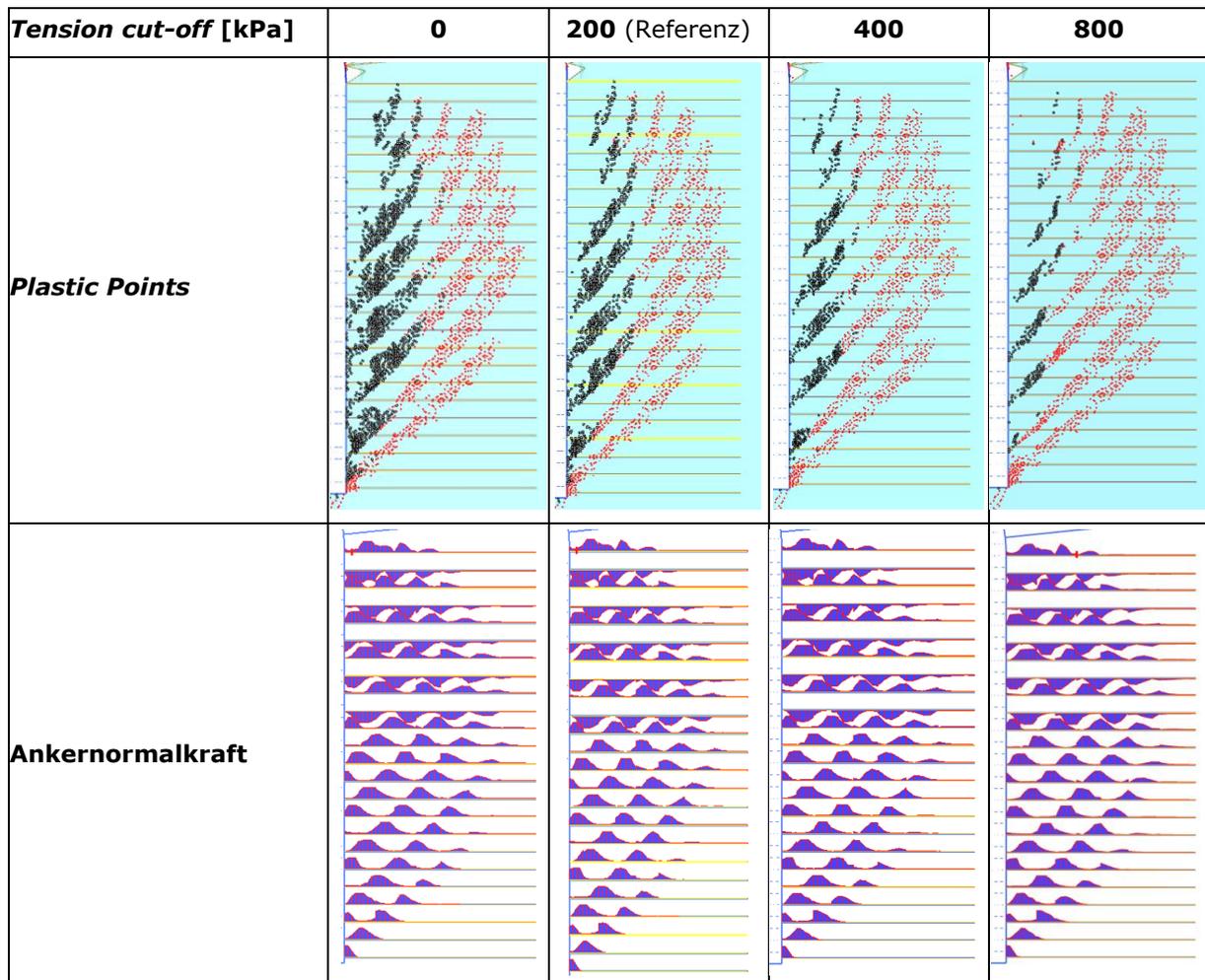
In Tabelle 7 sind die angeführten Berechnungen, gleich wie zuvor, in Matrixform gegenübergestellt. Die Scherbänder und die Ankernormalkräfte stellen sich grundsätzlich ähnlich ein. Mit abnehmender Dilatanz entstehen jedoch verhältnismäßig mehr *Tension cut-off points* als *Mohr-Coulomb points*. Der wellenförmige Normalkraftverlauf wird dadurch noch ausgeprägter.

Je nach gewähltem Parametersatz ist ersichtlich, dass sich die entstehenden Scherbänder von der Kavernenwandung her kommend, durch das Auftreten von *Tension cut-off points* und *Mohr-Coulomb points*, bemerkbar machen. Der Zugspannungsausfall an der Kavernenwandung führt zu fortschreitendem Versagen im Fels.

### 3.3.3 Zugfestigkeit (*Tension cut-off*)

Ausgehend von der Annahme, dass der Zugspannungsausfall für die Entstehung der Scherbänder verantwortlich ist, wird hier dieser Einfluss untersucht. Ausgehend von der Referenzzugfestigkeit (200 kPa), wird diese einerseits auf 0 kPa reduziert und andererseits auf 400 kPa und 800 kPa erhöht. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse, in gleicher Form wie zuvor, gegenübergestellt.

Tabelle 8: Matrixdarstellung - Einfluss der Zugfestigkeit



<b> u  Firste [mm]</b>	37	37	38	38
<b> u  Sohle [mm]</b>	40	41	41	41
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	39	38	39

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Zugfestigkeit die Bereiche, in denen *Tension cut-off points* entstehen, kleiner werden. Der Einfluss auf den wellenförmigen Ankerkraftverlauf ist jedoch gering. Mit abnehmender Zugfestigkeit werden die beanspruchten Bereiche der Anker geringfügig größer. Bei den Verformungen sieht man, dass kein großer Einfluss auf das Gesamtverhalten besteht.

Bei höherer Zugfestigkeit treten zwar weniger überbeanspruchte Bereiche auf, in denen die maximale Zugfestigkeit erreicht wird, aber der Mechanismus der Scherbänder, welcher die wellenförmigen Ankerkräfte mit sich zieht, bleibt mehr oder weniger unverändert.

### 3.3.4 Ausbau (*Tunnel Lining*)

Da eine eventuelle Spritzbetonschale zur Sicherung der Kavernenwandung, wie auch beim Bezugsprojekt, selten in Rechnung gestellt wird, wird hier der Einfluss eines Ausbaus (*Tunnel Lining*) untersucht. Die grundsätzliche Überlegung für die Berücksichtigung des Ausbaus war, dass durch ein *Tunnel Lining* geringere Relativverschiebungen an der Kavernenwandung auftreten und daher eventuell keine bzw. schwächer ausgeprägte Scherbänder auftreten. Da es grundsätzlich um den Einfluss der Schale auf das umliegende Gebirge geht, wird je eine Schale mit einem gleichbleibenden E-Modul aktiviert.

Für diese Untersuchung wurde ein 10 cm dicker Ausbau (*Plate*) mit einer Steifigkeit von 5 bzw. 15 GPa angenommen. Diese *Plate* wurde jeweils in derselben Phase wie die Anker aktiviert.

Tabelle 9: Matrixdarstellung – Einfluss des Ausbaus

<b>Plate – 0,10 m E-Modul [GPa]</b>	<b>Nein - (Referenz)</b>	<b>Ja 5</b>	<b>Ja 15</b>
<b>Plastic Points</b>			

<b>Ankernormalkraft</b>			
	<b> u  Firste [mm]</b>	37	37
	<b> u  Sohle [mm]</b>	41	40
	<b> u  Wandung [mm]</b>	39	38

Es wurde ein höheres Widerstandsverhalten erwartet, welches sich aber kaum bemerkbar macht, wie man in folgender Gegenüberstellung (siehe Tabelle 9) sehen kann. Der entgegengebrachte Widerstand, durch einen solchen Ausbau, ist im Verhältnis zu dem anstehenden Gebirgsdruck so gering, dass kaum ein Einfluss auf den oszillierenden Ankerkraftverlauf entsteht.

### 3.3.5 Ankersteifigkeit

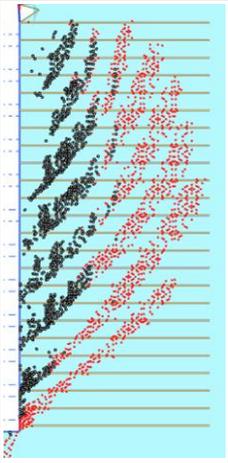
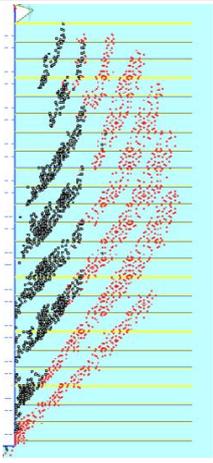
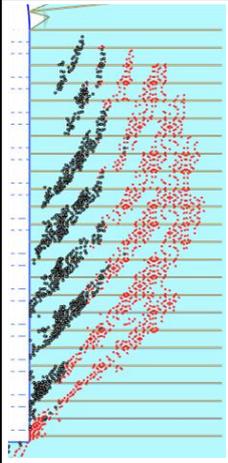
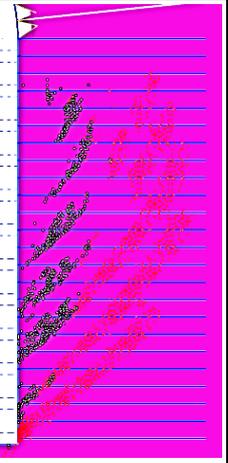
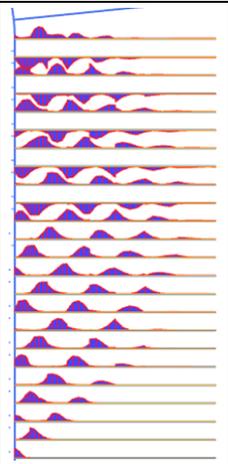
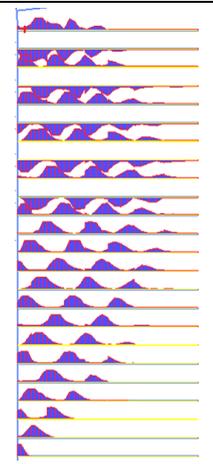
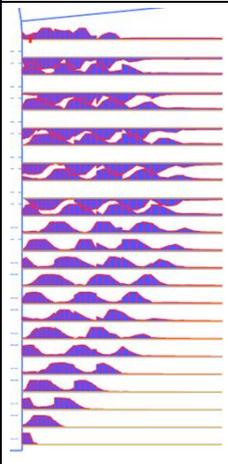
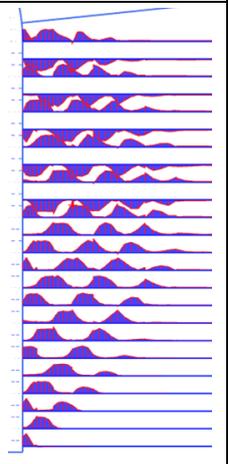
Die auftretenden Scherbänder und die damit entstehenden Kräfte entlang der Anker stehen in einem klaren Zusammenhang. Die jeweilige Steifigkeit der modellierten Anker müsste demnach auch in einem direkten Zusammenhang mit den Ankerkraftverläufen stehen.

Hier wird der Einfluss der Ankersteifigkeit betrachtet, indem die Steifigkeit einmal halbiert und einmal verdoppelt wurde. In einem weiteren Schritt wurden die Anker als Biegebalken (*Plate-Element*) mit einer Biegesteifigkeit, welche aus der Geometrie des Stahlgliedes ermittelt wurde, modelliert. Es wird erwartet, dass bei zunehmender Steifigkeit die Kräfte in den Ankern zunehmen und umgekehrt. Da die Biegesteifigkeit der Anker im Verhältnis zu den anstehenden Kräften sehr gering ist, wird hier nur ein geringer Effekt erwartet.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in üblicher Form in Tabelle 10 zusammengefasst. Wie erwartet, zieht eine höhere Steifigkeit der Anker mehr Kräfte an und umgekehrt. Aus diesem Grund bilden sich mit zunehmender Steifigkeit entlang des Ankerkraftverlaufs auch breitere Wellen. Die auftretenden Scherbänder bleiben in ihrer Form bestehen, wobei sich aber mit zunehmender Steifigkeit die Anzahl der *Plastic Points* leicht reduziert. Vor allem im Bereich der Kavernenwandung treten dadurch auch geringere Verformungen auf.

Der Einfluss der Biegesteifigkeit reduziert im Bereich der Anker die *Plastic Points* und erhöht somit auch das Widerstandsverhalten. Die Ausprägung der Wellen im Ankerkraftverlauf bleibt jedoch nahezu unverändert.

Tabelle 10: Matrixdarstellung - Einfluss der Ankersteifigkeit

<b>EA/Anker [MN/m]</b> <b>EI/Anker [kNm<sup>2</sup>/m]</b>	<b>61,4</b> -	<b>122,8</b> - (Referenz)	<b>245,6</b> -	<b>122,8</b> <b>9,94</b>
<b>Plastic Points</b>				
<b>Ankernormalkraft</b>				
<b> u  Firste [mm]</b>	38	37	37	37
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	41	40	40
<b> u  Wandung [mm]</b>	42	39	37	38

### 3.3.6 Ankernormalkraftverläufe

Um die Auswirkungen der untersuchten Einflüsse auf den Ankernormalkraftverlauf besser vergleichen zu können, werden hier zwei beliebige Anker gewählt, an denen die Normalkräfte dargestellt werden. Wie in Abbildung 17 dargestellt, liegen die beiden Anker im zentralen Bereich der beanspruchten Zone. Auf der Abszisse wird die x-Koordinate, von 15 m bis 31 m, dargestellt. Auf der Ordinate wird die Ankernormalkraft in kN/m aufgetragen und linear verbunden. Für die weiteren Vergleiche wird der Anker bei  $Y = -9,00$  m als Anker I und der Anker bei  $Y = -15,00$  m als Anker II bezeichnet.

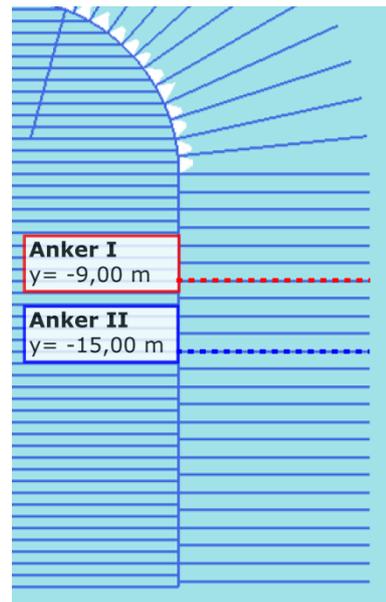


Abbildung 17: Ausgewählte Anker – Darstellung der Ankernormalkräfte

#### Aushubsequenz:

$a$  = Aushubsequenz (siehe Kapitel 3.3.1)

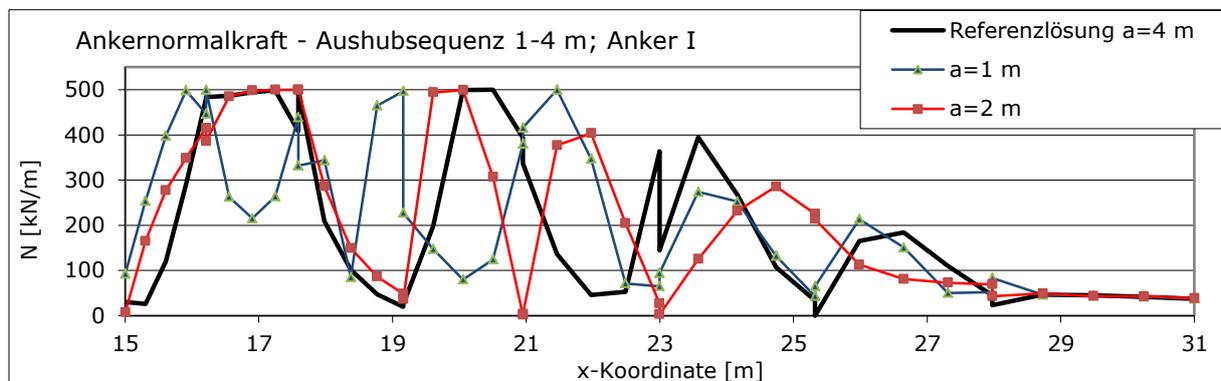


Abbildung 18: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 1-4 m; Anker I

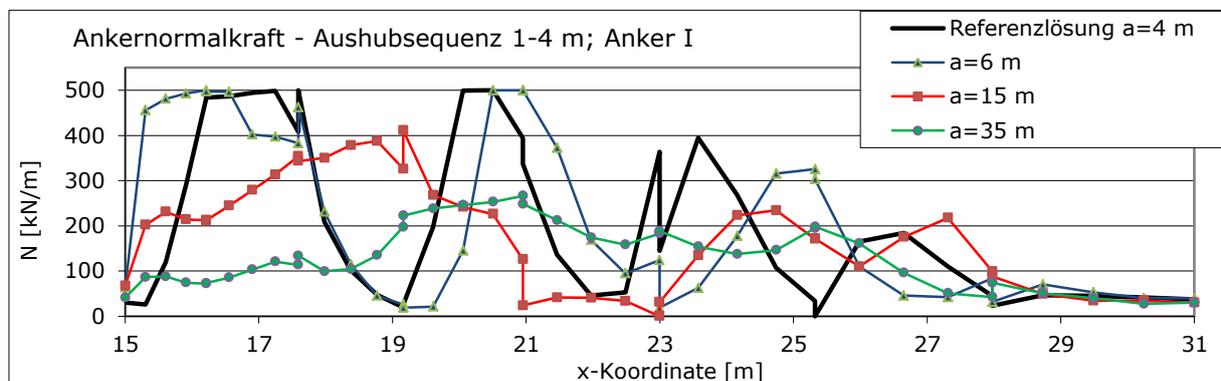


Abbildung 19: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 4-35 m; Anker I

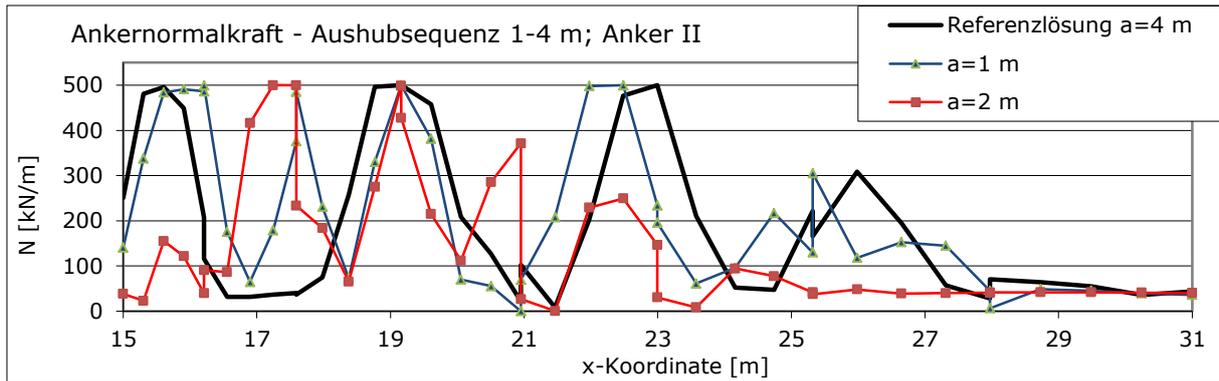


Abbildung 20: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 1-4 m; Anker II

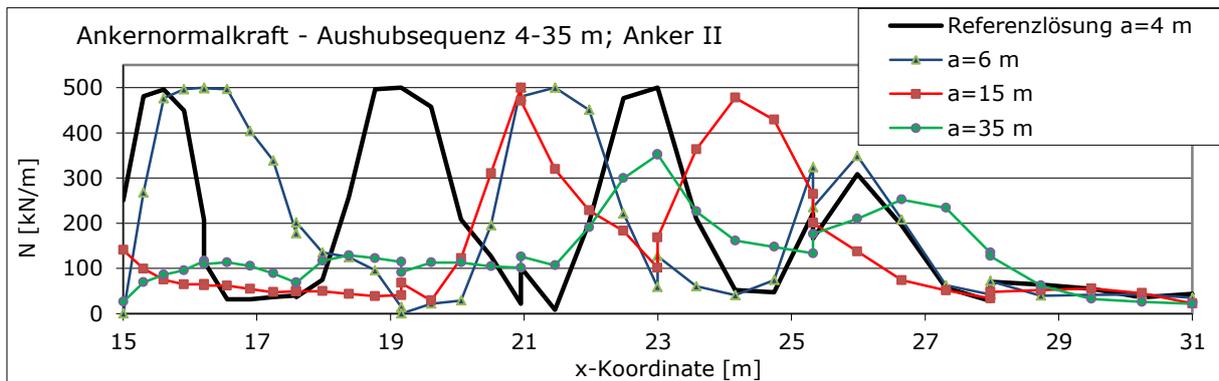


Abbildung 21: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 4-35 m; Anker II

Es ist nun klarer ersichtlich, dass durch eine kleiner werdende Aushubsequenz die Anzahl der entstehenden Wellen entlang des Ankers zunimmt. Man kann auch erkennen, dass mit größer werdender Aushubsequenz der Anstieg (bzw. Abfall) der Normalkraft abnimmt.

Bei der größten Aushubsequenz mit 35 m sind die maximalen Normalkräfte von 266 bzw. 351 kN/m verhältnismäßig weit unter der maximalen Festigkeit von 500 kN/m. Bei der Aushubsequenz mit 15 m liegen diese Werte bei 411 bzw. 500 kN/m.

**Dilatanz:**

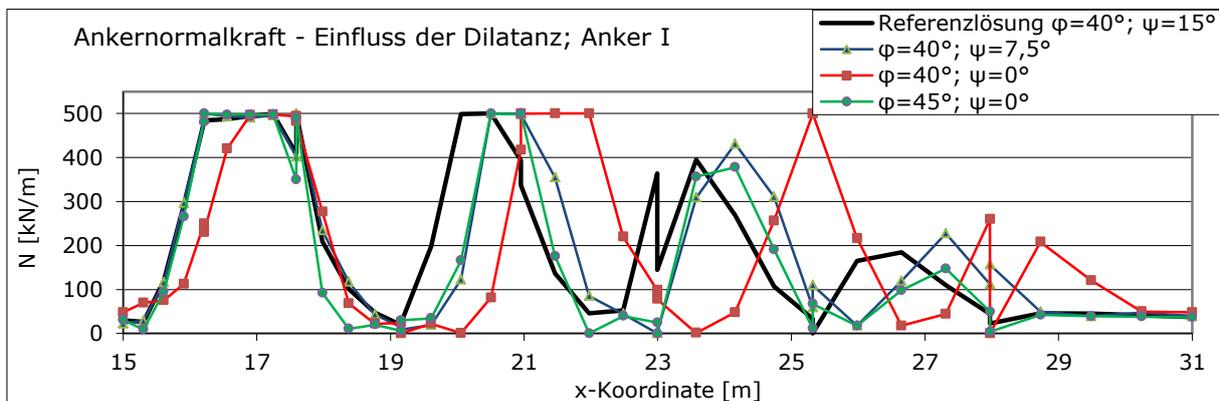


Abbildung 22: Ankernormalkraft – Einfluss der Dilatanz; Anker I

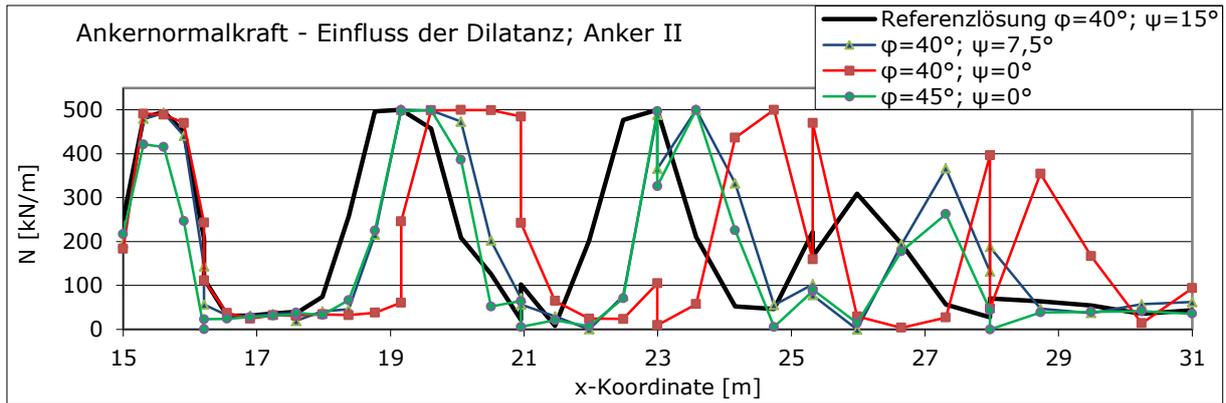


Abbildung 23: Ankernormalkraft – Einfluss der Dilatanz; Anker II

Das Fehlen bzw. Abnehmen der Dilatanz hat, wie hier ersichtlich, keinen Einfluss auf die Entstehung der Wellen im Normalkraftverlauf. Abgesehen von den ersten Wellen ganz links, welche gut übereinstimmen, wird mit abnehmender Dilatanz der Abstand zwischen den Wellen größer, was wiederum auf die schlechteren Materialparameter und einer damit größer werdenden plastischen Zone (vgl. Tabelle 7) zurückzuführen ist.

**Zugfestigkeit (*Tension cut-off*):**

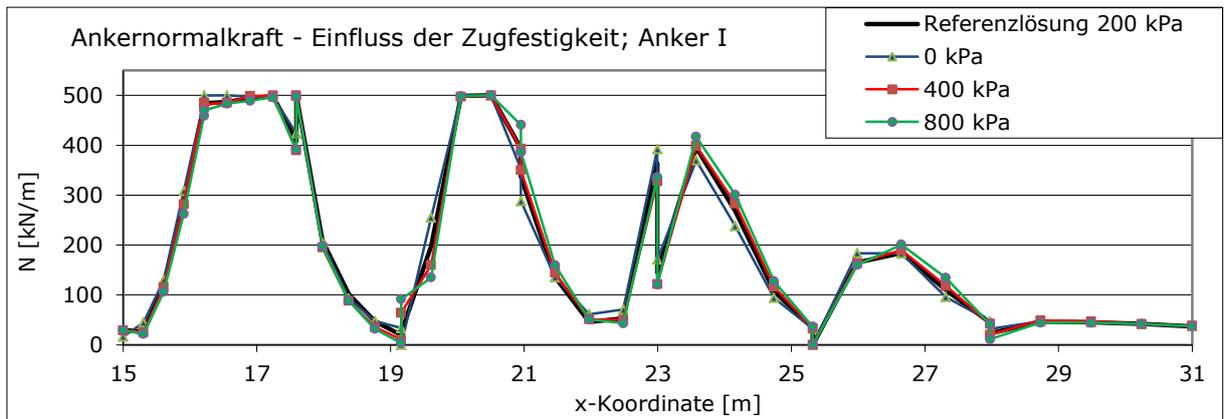


Abbildung 24: Ankernormalkraft – Einfluss der Zugfestigkeit; Anker I

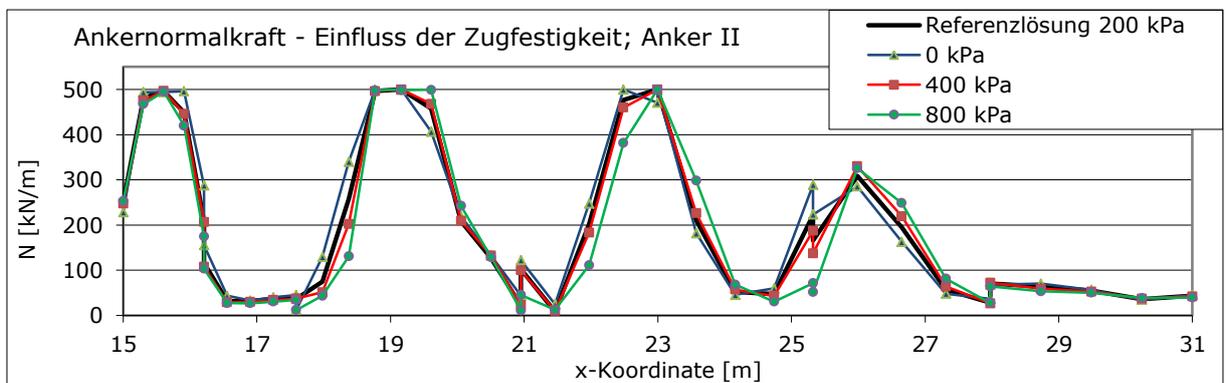


Abbildung 25: Ankernormalkraft – Einfluss der Zugfestigkeit; Anker II

Die Zugfestigkeit hat, wie auch in Tabelle 8 ersichtlich, einen Einfluss auf die Häufigkeit der entstehenden *Tension cut-off points*, sowie allgemein auf die Breite der entstehenden Scherbänder. Der Einfluss auf den Ankernormalkraftverlauf ist jedoch, wie hier in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt, praktisch nicht erkennbar.

### Ausbau (Tunnel Lining):

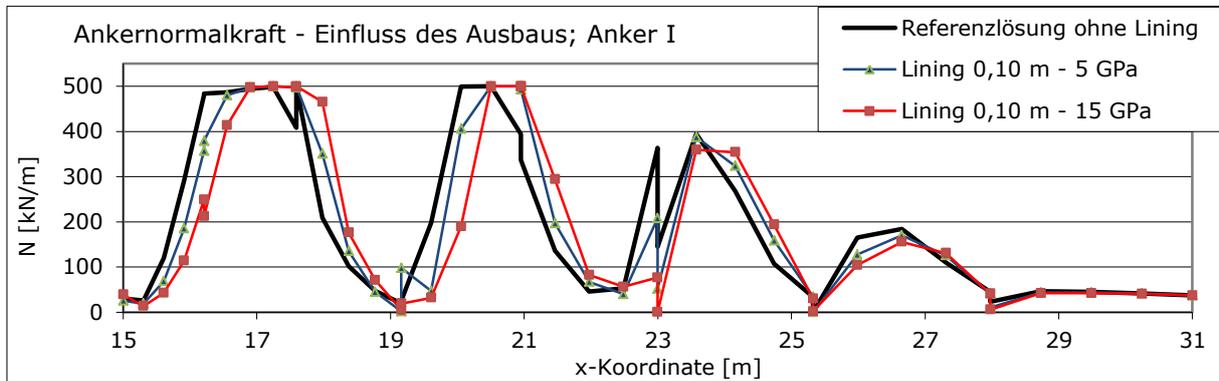


Abbildung 26: Anker normalkraft – Einfluss des Ausbaus; Anker I

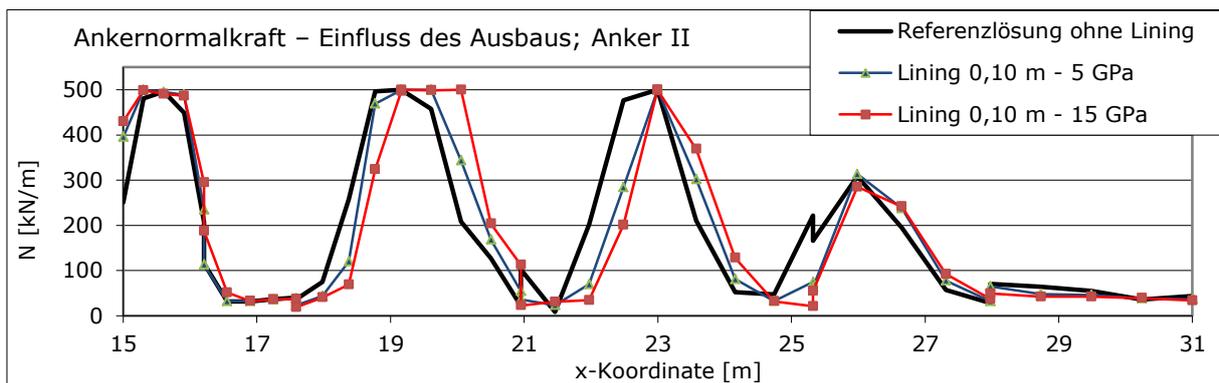


Abbildung 27: Anker normalkraft – Einfluss des Ausbaus; Anker II

Wie bereits in Kapitel 3.3.4 erwähnt, hat ein Ausbau dieser Art generell kaum einen Einfluss auf das System. Durch die Zunahme des Ausbauwiderstandes ist die Ausprägung der Wellen gleich, jedoch tendenziell leicht nach rechts verschoben.

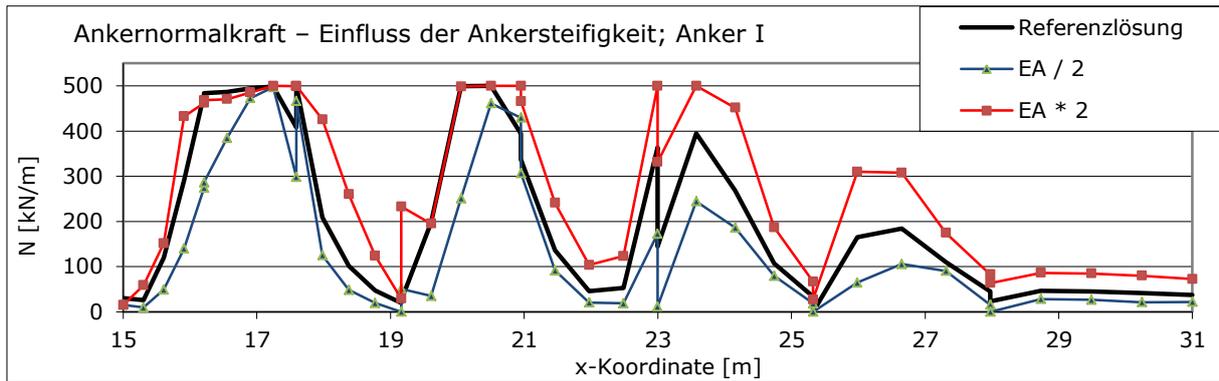
**Ankersteifigkeit:**

Abbildung 28: Ankernormalkraft – Einfluss der Ankersteifigkeit; Anker I

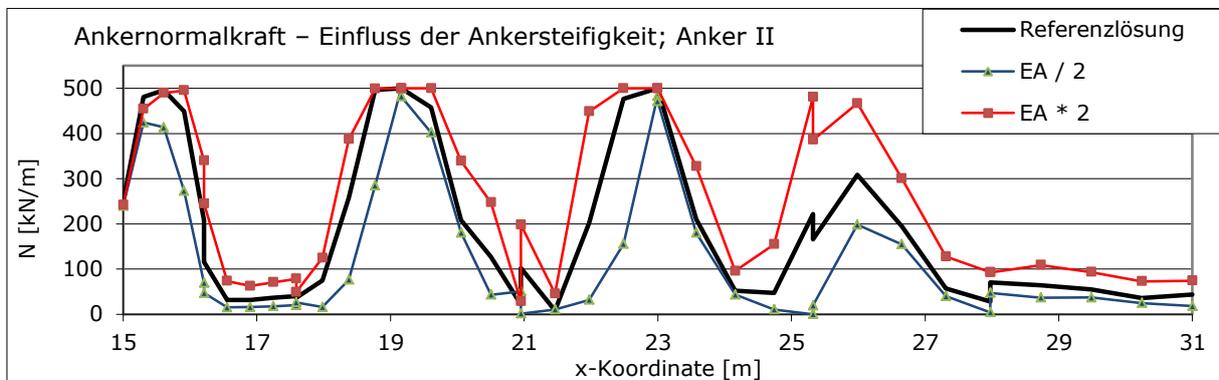


Abbildung 29: Ankernormalkraft – Einfluss der Ankersteifigkeit; Anker II

Hier wird klar ersichtlich, dass eine höhere Steifigkeit Kräfte anzieht und somit der Einfluss auf die Normalkraft eindeutig und direkt ist. Der Einfluss auf die Entstehung der Wellen ist jedoch nicht gegeben, da genau gleichviele Wellen an denselben Stellen auftreten.

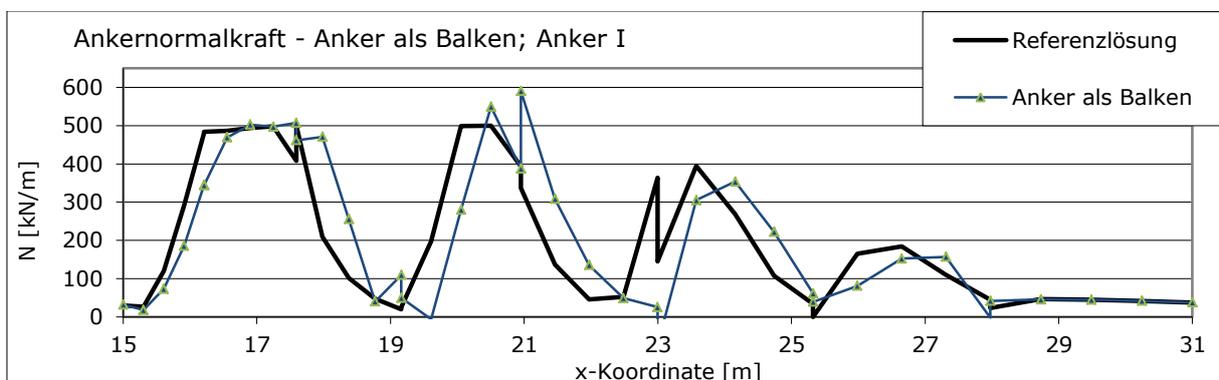


Abbildung 30: Ankernormalkraft – Anker als Balken; Anker I

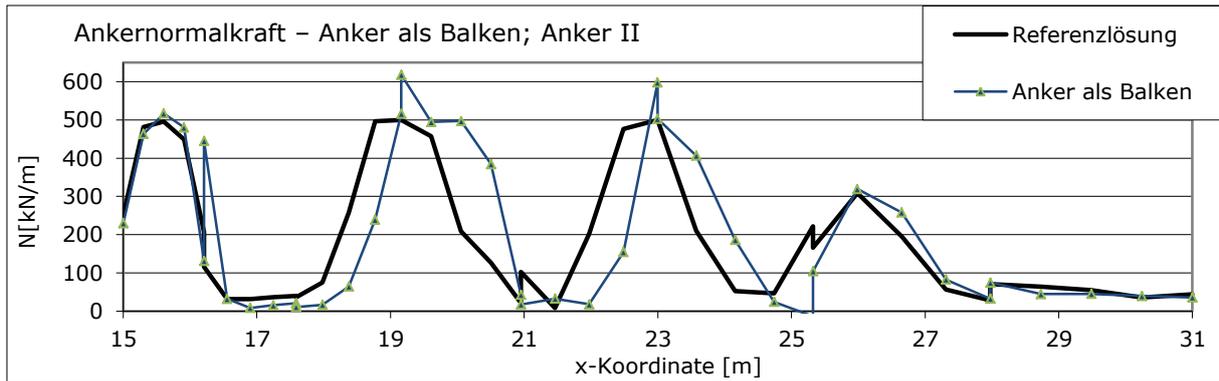


Abbildung 31: Ankernormalkraft – Anker als Balken; Anker II

Die Modellierung der Anker als Balken bringt durch die geringe Biegesteifigkeit kaum eine Veränderung des Ankerkraftverlaufs. Die Wellen bilden sich in ähnlicher Form aus.

### Allgemeine Anmerkung:

Die dargestellten Bilder in den Matrixdarstellungen (Tabelle 6 - Tabelle 10), sowie die Abbildungen der Ankerkräfte (Abbildung 18 - Abbildung 31) zeigen jeweils den Endzustand in der letzte Berechnungsphase, daher wird in Kapitel 3.6.1 generell die Entwicklung der *Plastic Points* und der Ankernormalkräfte über die Phasen genauer betrachtet.

### 3.4 HS – Modell

Um den Einfluss des verwendeten Stoffgesetzes auf das Phänomen des oszillierenden Ankerkraftverlaufes zu untersuchen, wird in diesem Kapitel für das anstehende Material das HS-Modell verwendet.

#### 3.4.1 Allgemein

Da sich Boden im Gegensatz zu Fels kaum oder nur bedingt linear-elastisch verhält, wurde das HS-Stoffgesetz in erster Linie für Böden entwickelt. Inwiefern es zulässig ist, für einen anstehenden Fels das HS-Modell zu verwenden, soll hier vorerst nicht thematisiert werden.

Grundsätzlich wird das gesamte Modell mit seinen MC-Parametern beibehalten. Die Festlegung der HS-Steifigkeitsparameter  $E_{50}$ ,  $E_{\text{öd}}$  und  $E_{\text{ur}}$  ist der einzige Unterschied und auch die größte Schwierigkeit. In einem MC-Modell wird von einem linear-elastisch perfekt plastischen Materialverhalten ausgegangen, wobei die Steifigkeit durch einen konstanten E-Modul beschrieben wird. Für eine detailliertere Beschreibung ist auf Kapitel 2.2 zu verweisen.

#### 3.4.2 Variation der Steifigkeiten

Um nun erste vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden vier verschiedene Parametersets angenommen. Durch die beschriebene Problematik wurde eine Steifigkeitsbandbreite so gewählt, dass zum Einen der MC-E-Modul von 10 GPa den  $E_{\text{ur}}$ , und zu Anderen  $E_{50}$  und  $E_{\text{öd}}$  ( $E_{50}$  und  $E_{\text{öd}}$  wurden als gleich angenommen) widerspiegelt. Des Weiteren musste zwischen den E-Modulen Faktoren festgelegt werden. Standardmäßig wurde der Faktor 3 gewählt, welcher eine allgemein bekannte Annahme, bei Berechnungen mit abgeleiteten Parametern, ist. Da sich das Steifigkeitsverhalten mit verschiedenen E-Modulen von dem linear-elastischen MC-Steifigkeitsverhalten stark unterscheidet, wurde der Steifigkeitsunterschied für die weitere Variation so weit wie möglich reduziert. Da in PLAXIS2010 eine interne Vorgabe einen Faktor von mindestens 2 vorschreibt, wurde genau dieser gewählt. Der Parameter  $m$  (*Power*), welcher die Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit beschreibt, wurde auf 0 gesetzt, was wiederum bedeutet, dass die Steifigkeitsparameter konstant bleiben. Um das Steifigkeitsverhalten dieser Variation zu veranschaulichen, wurden für die gewählten Materialsets Spannungs-Dehnungs-Kurven aus PLAXIS2010 exportiert, welche dem Anhang B entnommen werden können.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse für diese Berechnungen dargestellt. Ähnlich wie bei der MC-Berechnung starten jeweils von der Ausbruchsohle der jeweiligen Aushubsequenz Scherbänder in Form von *Tension cut-off points*, welche jedoch bei weitem nicht so tiefreichend sind.

Auffällig ist jedoch das komplette Fehlen von *Mohr-Coulomb points*. Des Weiteren treten hier durch das Stoffgesetz bedingt **Hardening**-, **Cap**- und **Cap + hardening Points** auf.

**Erläuterung der Begriffe:**

- **Hardening** (*shear hardening*) steht für deviatorische plastische Verfestigung
- **Cap** (*compression hardening*) steht für volumetrische plastische Verfestigung
- **Cap + hardening** steht für deviatorische und volumetrische plastische Verfestigung; ein Spannungszustand an der sogenannten *Cap-Cone-Ecke* (vgl. Kapitel 2.2).

Tabelle 11: Matrixdarstellung - Variation der Steifigkeit bei HS

		Plastic points			
		■ Mohr-Coulomb point	■ Tension cut-off point	▼ Cap point	◆ Cap + hardening point
		▲ Hardening point			
<b>E<sub>50</sub>/E<sub>oed</sub> [GPa]</b>		<b>3,33</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>E<sub>ur</sub> [GPa]</b>		<b>10</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
<b>Plastic Points</b>					
<b> u  Firste [mm]</b>		60	53	28	22
<b> u  Sohle [mm]</b>		51	49	24	17
<b> u  Wandung [mm]</b>		39	36	19	13

Ähnlich wie bei den MC-Berechnungen treten im Kreuzungsbereich zwischen Ankern und Scherbändern leicht wellenförmige Ausprägungen der Ankernormalkraft auf. Die absoluten Kräfte in den Ankern sind jedoch deutlich geringer. Bei den Verformungen sieht man, dass mit zunehmender Steifigkeit die Verformungen geringer werden, wodurch die auftretenden *Tension cut-off points* zunehmen und die absoluten Ankernormalkräfte geringer werden.

Zum besseren Vergleich wird, an den in Kapitel 3.3.6 definierten Ankern, der Normalkraftverlauf in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

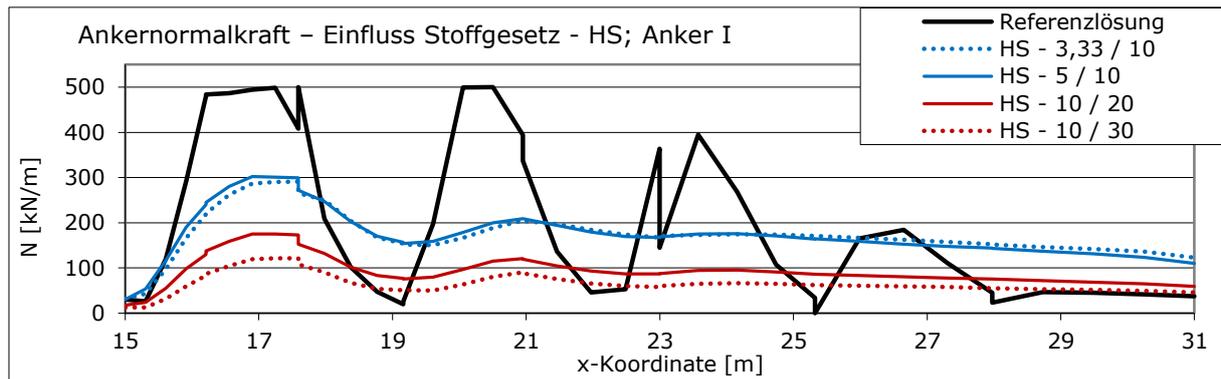


Abbildung 32: Anker normalkraft - Einfluss Stoffgesetz - HS; Anker I

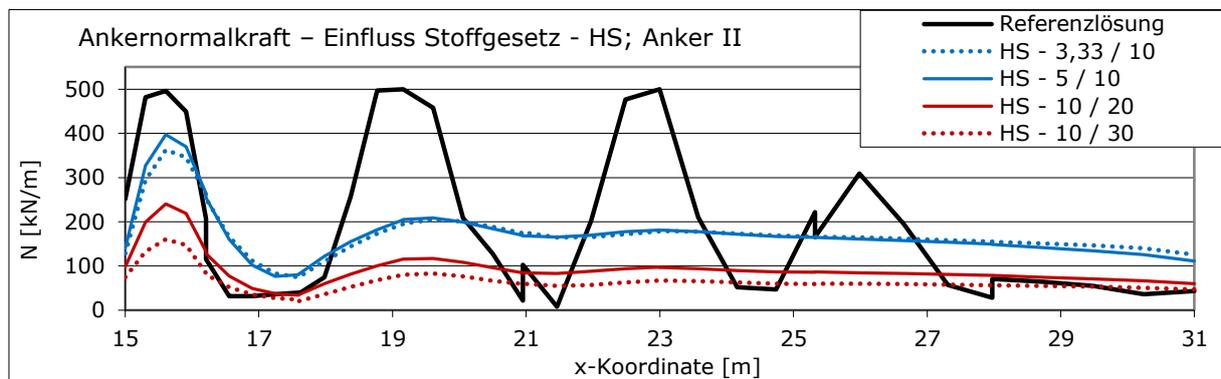


Abbildung 33: Anker normalkraft - Einfluss Stoffgesetz - HS; Anker II

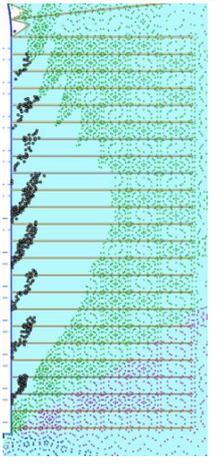
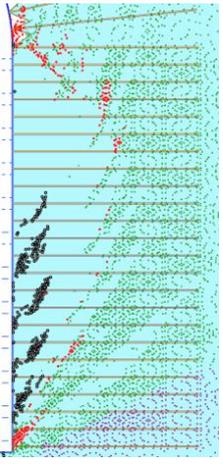
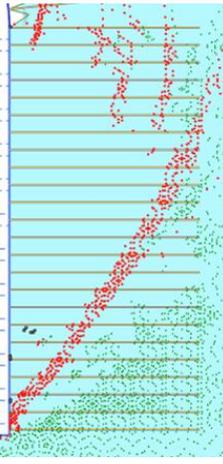
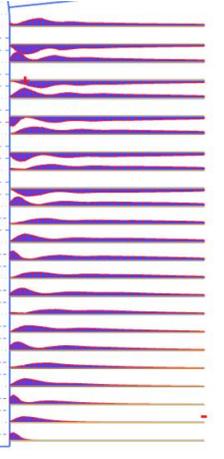
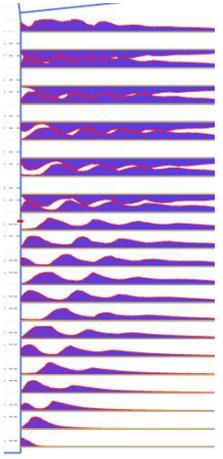
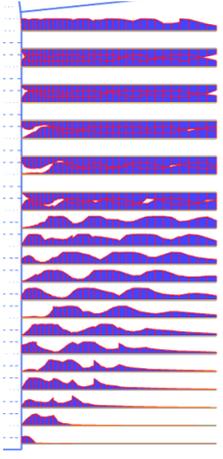
Wie hier ersichtlich ist, ergibt sich bei den HS-Ergebnissen einerseits bis auf die Ausprägung am Beginn der Anker, grundsätzlich ein eher regelmäßiger Verlauf. Andererseits ist man bei Betrachtung der maximalen Ankernormalkräfte weit unter den Werten aus der MC-Berechnung.

### 3.4.3 Variation der Kohäsion und Zugfestigkeit

Da sich bei diesen HS-Modellen im Gegensatz zum MC-Modell keine *Mohr-Coulomb points* bilden, wurde durch eine Reduktion von Kohäsion und Zugfestigkeit grundsätzlich untersucht, ob sich bei schlechter werdenden Materialparametern *Mohr-Coulomb points* und somit ein ähnliches Verhalten wie bei den MC-Berechnungen einstellt.

Für diese Untersuchung wurden Kohäsion und Zugfestigkeit von 2000 kPa bzw. 200 kPa auf 1000 kPa bzw. 100 kPa und auf 500 kPa bzw. 50 kPa reduziert. Diese Variation wurde für alle vier Variation der Steifigkeiten durchgeführt, wobei die Ergebnisse des Steifigkeitssets 5/10 ( $E_{50}$  und  $E_{\text{ö}d} = 5$  GPa;  $E_{\text{ur}} = 10$  GPa) repräsentativ für diese Untersuchung hier in Tabelle 12 dargestellt werden.

Tabelle 12: Matrixdarstellung - Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit bei HS

Kohäsion [kPa]	2000	1000	500
Zugfestigkeit [kPa]	200 (HS-Referenz)	100	50
<b>Plastic Points</b>			
<b>Ankernormalkraft</b>			
<b> u  Firste [mm]</b>	53	66	87
<b> u  Sohle [mm]</b>	49	54	62
<b> u  Wandung [mm]</b>	36	64	108

Durch die Abnahme der Festigkeitseigenschaften treten nun wie erwartet *Mohr-Coulomb points* auf. Damit verbunden stellt sich dann auch ein stärker oszillierender Ankerkraftverlauf im HS-Modell ein. Auffallend ist, dass die Scherbänder in einer ganz anderen Art auftreten, was jedoch auf die stark abgeminderten Parameter zurückzuführen ist. Auch bei den maximalen Verformungen wird klar, dass bei dem gezeigten Vergleich das Gesamtverhalten durch die abgeminderten Parameter sehr viel nachgiebiger ist.

Der direkte Vergleich mit den MC-Ergebnissen kann durch die abgeminderten Versagensparameter nicht geführt werden. Es kann jedoch festgestellt werden, dass sich bei entsprechenden HS-Parametern ebenfalls ein oszillierender Ankernormalkraftverlauf einstellt.

Zum besseren Vergleich wird, an den in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, der Normalkraftverlauf in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt.

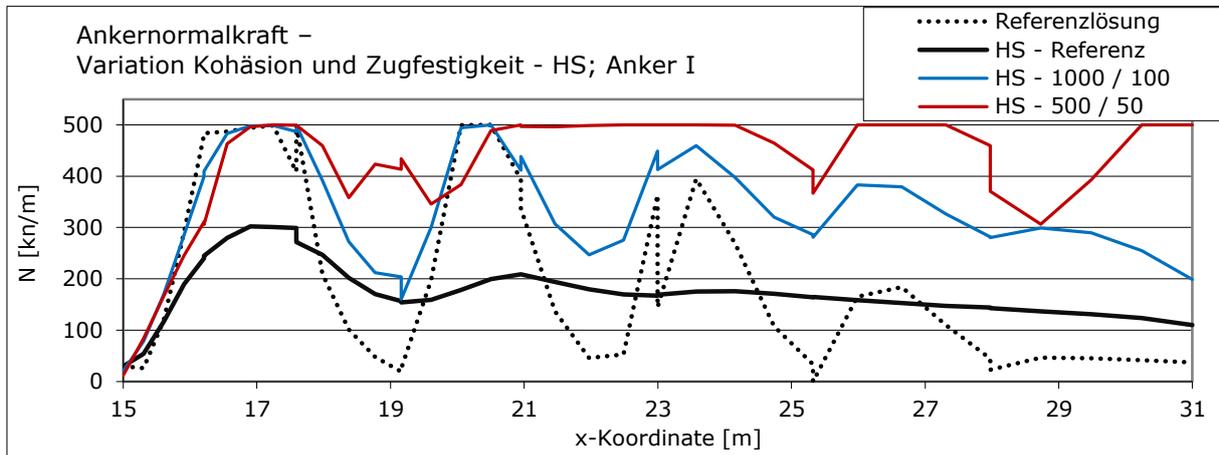


Abbildung 34: Ankernormalkraft – Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit - HS; Anker I

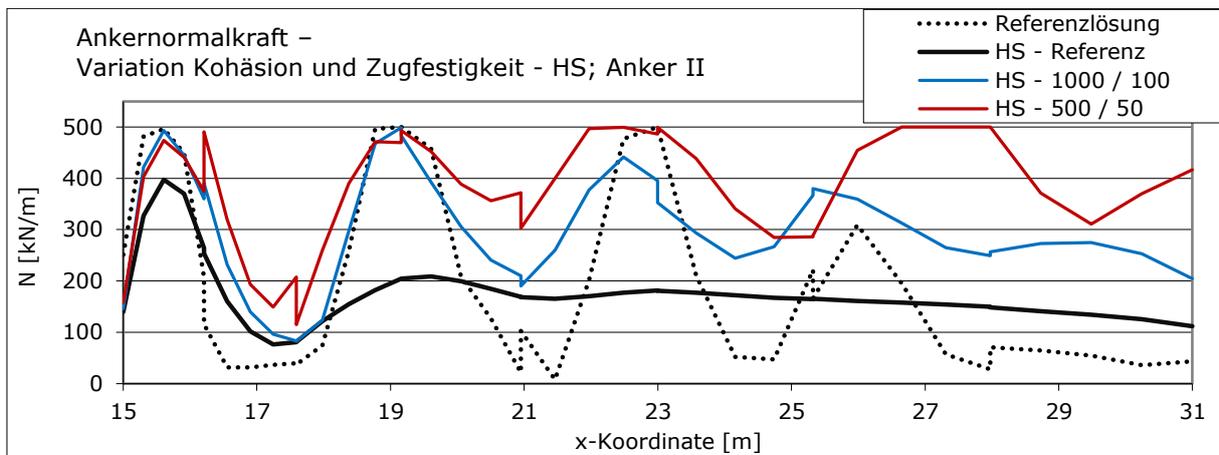


Abbildung 35: Ankernormalkraft – Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit - HS; Anker II

### 3.5 HB – Modell

Da der Einfluss des verwendeten Stoffgesetzes auf das Phänomen des oszillierenden Ankerkraftverlaufes größer als erwartet ist, wird hier eine weitere Vergleichsrechnung mit dem HB-Modell gezeigt.

#### 3.5.1 Allgemein

Das HB-Stoffgesetz beschreibt, gleich wie das MC-Modell, ein linearelastisches-idealplastisches Materialverhalten unter Verwendung des nicht-linearen HB-Versagenskriteriums (vgl. Kapitel 2.2).

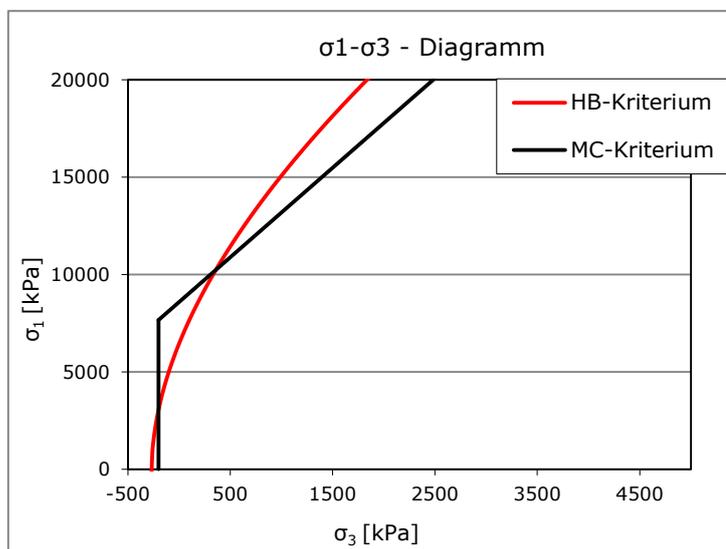
Die HB-Parameter werden hier von den bestehenden MC-Parametern abgeleitet und sind in Tabelle 13 aufgelistet. In Abbildung 36 wird das HB-Versagenskriterium (rote Linie) mit dem MC-Versagenskriterium (schwarze Linie) in einem Hauptspannungsdiagramm dargestellt. Man sieht, dass global betrachtet eine gute Übereinstimmung besteht. Im Verhältnis zum MC-Versagenskriterium wird bei dem gewählten HB-Parametersatz im höheren Spannungsbereich die Festigkeit überschätzt und im geringen Spannungsbereich unterschätzt.

Da die HB-Festigkeit im Bereich geringer Spannungen geringer ist, wird grundsätzlich mit höheren Verformungen gerechnet. Ansonsten erwartet man ein ähnliches Gesamtverhalten wie bei den MC-Berechnungen.

Tabelle 13: Materialparameter - HB

Parameter	1A (hellblau)	Einheit
Materialmodell	Hoek-Brown	-
Typ	Drained	-
$\gamma_{\text{unsat}}$	27	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{\text{sat}}$	27	kN/m <sup>3</sup>
E	10 6	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	0,25	-
$\sigma_{ci}$	80000	kN/m <sup>2</sup>
$m_i$	10	-
GSI	55	-
D	0	-
$\psi_{\text{max}}$	15	°
$\sigma_{\psi}$	20000	kN/m <sup>2</sup>
$K_0$	0,40	-

Abbildung 36: HB - Versagenskriterium



#### Anmerkung zu den Parametern:

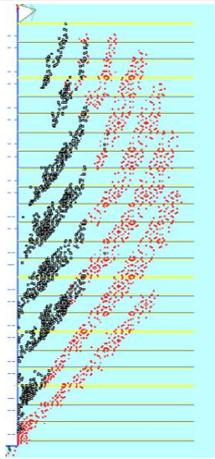
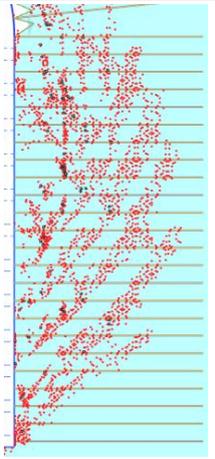
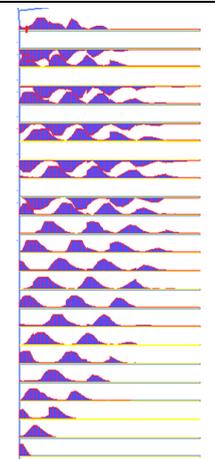
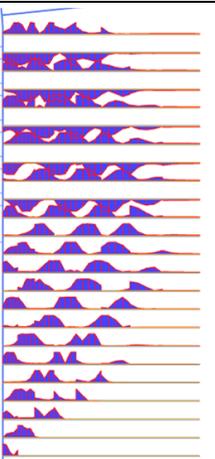
Die Dilatanz wird durch den Parameter  $\psi_{\text{max}}$  definiert, wobei diese bei einer Spannung, welche durch  $\sigma_{\psi}$  definiert wird, linear zu null wird. Für eine detailliertere Beschreibung ist auf Kapitel 2.2 zu verweisen. Der Parameter  $\sigma_{\psi}$  wurde von 10 bis 60 MPa variiert, um den Einfluss für das zu untersuchende Problem auszumachen. Für die untersuchten Einflüsse (Verformung, *Plastic*

*Points* und Ankerkraftverlauf) konnte jedoch kein Unterschied festgestellt werden. Somit wurde dieser Wert für die weiteren Berechnungen mit 20 MPa festgelegt.

### 3.5.2 Ergebnisse

In Tabelle 14 sind die HB-Ergebnisse mit den MC-Ergebnissen dargestellt. Wie erwartet, bildet sich eine annähernd gleichgroße plastische Zone, sowie ein durch die Aushubsequenz bedingter wellenförmiger Ankerkraftverlauf, aus. Die Verformungen im Bereich der First und der Sohle sind nur geringfügig, jedoch im Bereich der Kavernenwandung deutlich höher.

Tabelle 14: Matrixdarstellung - Einfluss HB-Stoffgesetz

Stoffgesetz	MC (Referenz)	HB
<b>Plastic Points</b>		
<b>Ankernormalkraft</b>		
<b> u  Firste [mm]</b>	37	41
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	42
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	51

Bei den HB-Ergebnissen sind kaum *Tension cut-off points* zu erkennen, was auf das nicht Vorhandensein des *Tension cut-off* zurückzuführen ist. Das entstehende Bild der plastischen Zone wirkt im Gegensatz zu MC eher ungeordnet, obwohl man grundsätzlich gleiche Scherbänder erkennen kann. Der oszillierende Anker normalkraftverlauf stellt sich auch in

ähnlicher Form ein. Diverse Unterschiede können auf das unterschiedliche Versagenskriterium zurückgeführt werden.

Zum besseren Vergleich wird, an den in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, der Normalkraftverlauf in Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellt.

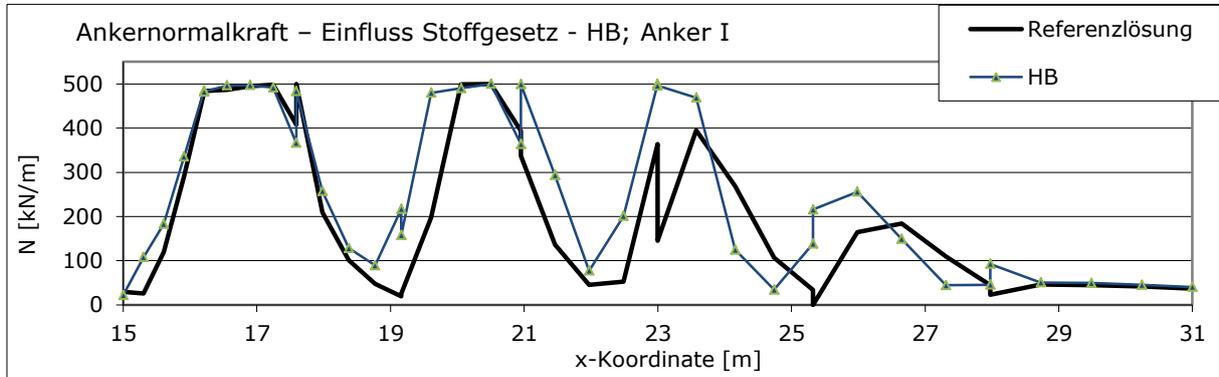


Abbildung 37: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HB; Anker I

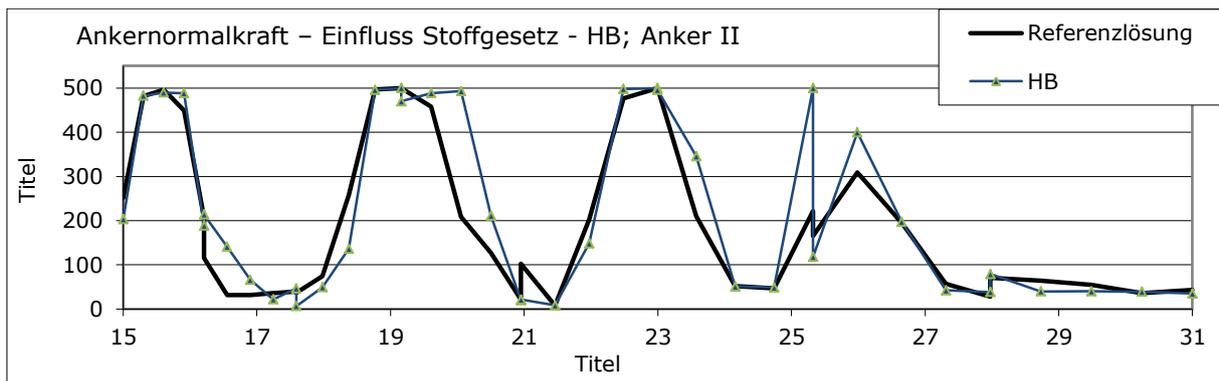


Abbildung 38: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HB; Anker II

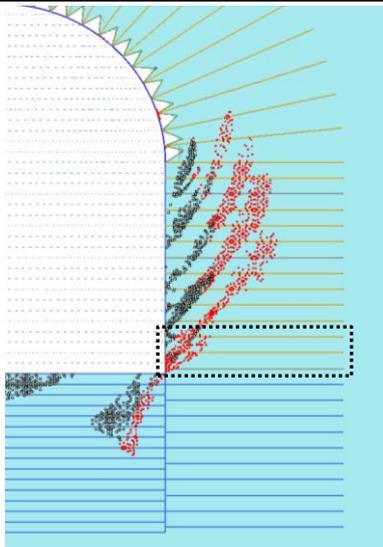
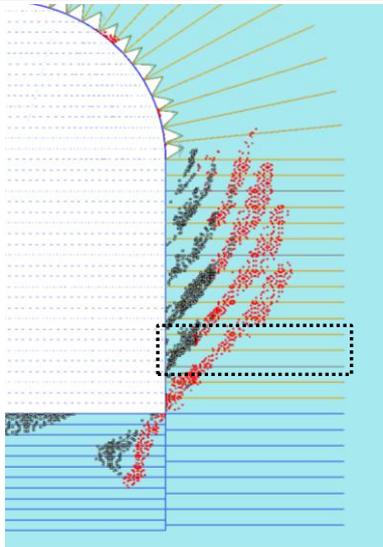
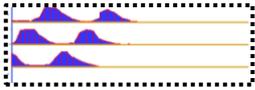
### 3.6 Vergleichende Darstellungen

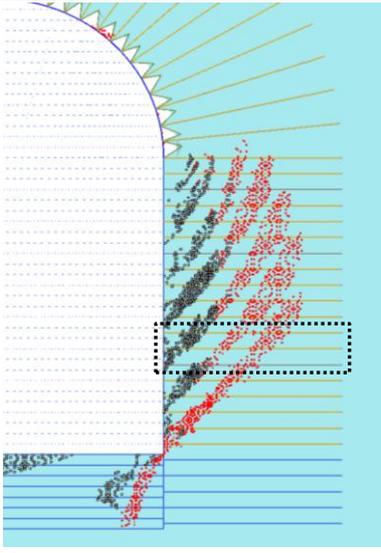
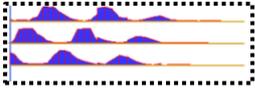
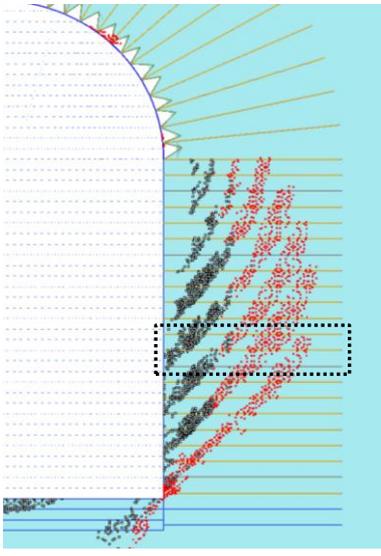
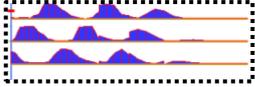
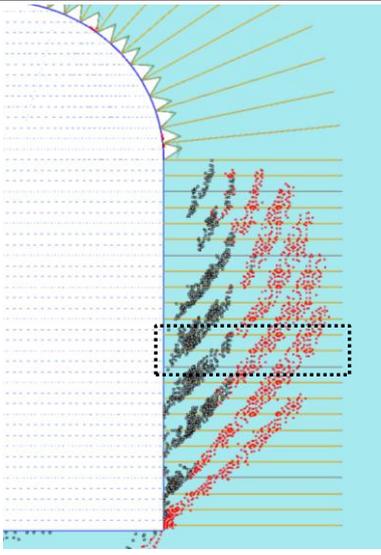
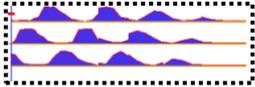
In diesem Kapitel wird der Mechanismus, der hinter der Entstehung des oszillierenden Ankernormalkraftverlaufs steht, untersucht. Des Weiteren werden für die vorangegangenen Kapitel diverse Vergleiche und Darstellungen gezeigt.

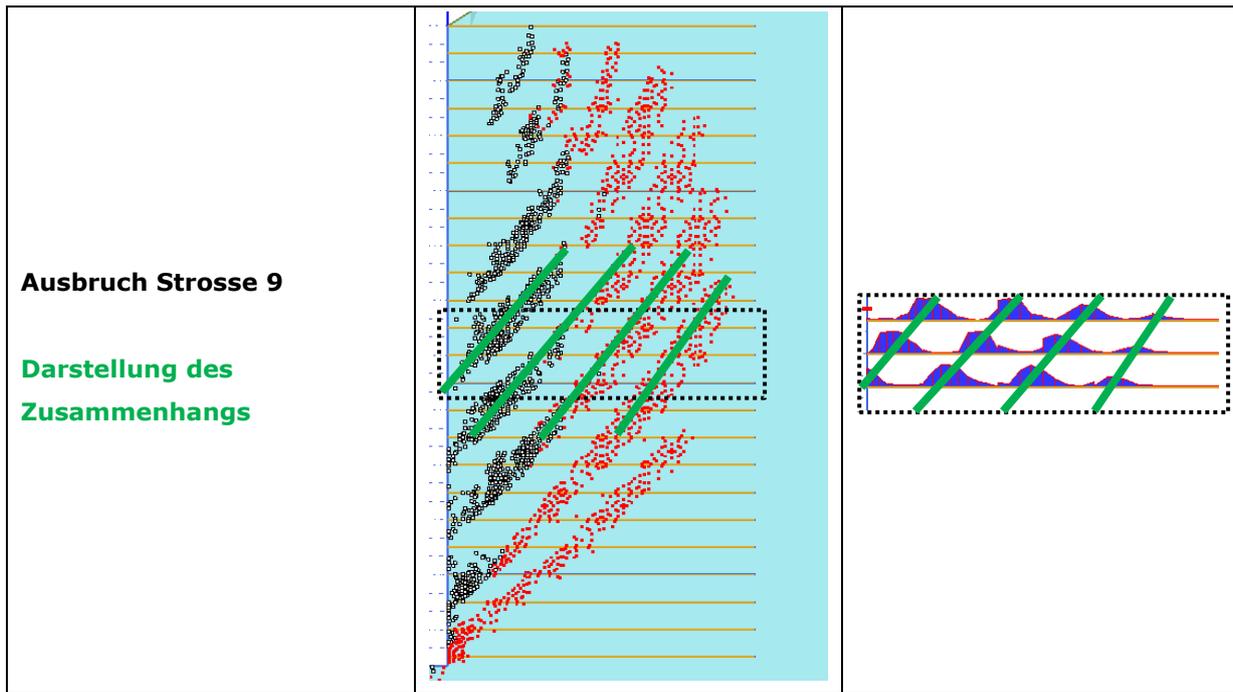
#### 3.6.1 Entwicklung der Wellen in der Ankernormalkraft

Um die Entwicklung des endgültigen Normalkraftverlaufs klarer zu verstehen, wurden bei der Referenzberechnung drei zentral liegende Anker, von der Phase ihrer Aktivierung bis zur letzten Phase, genauer betrachtet. Die Ankernormalkraft und die dazugehörige Darstellung der *Plastic Points* sind in Tabelle 15 in chronologischer Reihenfolge dargestellt. Da die jeweiligen Phasen der Vorentlastung keinen nennenswerten Beitrag für diese Betrachtung leisten, werden jeweils die Ausbruchsequenzen gezeigt.

Tabelle 15: Entwicklung der Ankernormalkraft über die Phasen

Phase	<i>Plastic Points</i>	Ankernormalkraft
<b>Ausbruch Strosse 5</b>		
<b>Ausbruch Strosse 6</b>		

<p><b>Ausbruch Strosse 7</b></p>		
<p><b>Ausbruch Strosse 8</b></p>		
<p><b>Ausbruch Strosse 9</b></p>		



Der Zusammenhang der auftretenden Scherbänder und den auftretenden Normalkräften in den Ankern ist hier klar erkennbar. Durch den jeweiligen Ausbruch entstehen, von der jeweiligen temporären Sohle beginnend, Scherbänder, welche in den Kreuzungsbereichen mit den Ankern Normalkräfte hervorrufen.

Zusätzlich wird in folgenden Abbildungen die Normalkraft der Anker in den Aushubphasen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch die jeweiligen Ausbrüche je eine neue Normalkraft, in Form einer neu entstehenden Welle und zum Teil in Form einer Erhöhung der bestehenden Wellen, in den Ankern entsteht.

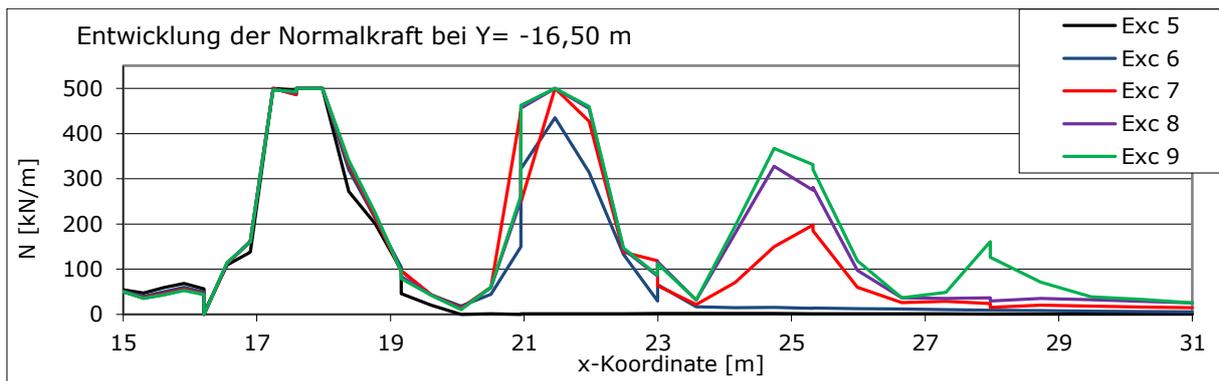


Abbildung 39: Entwicklung der Normalkraft bei Y= -16,50 m

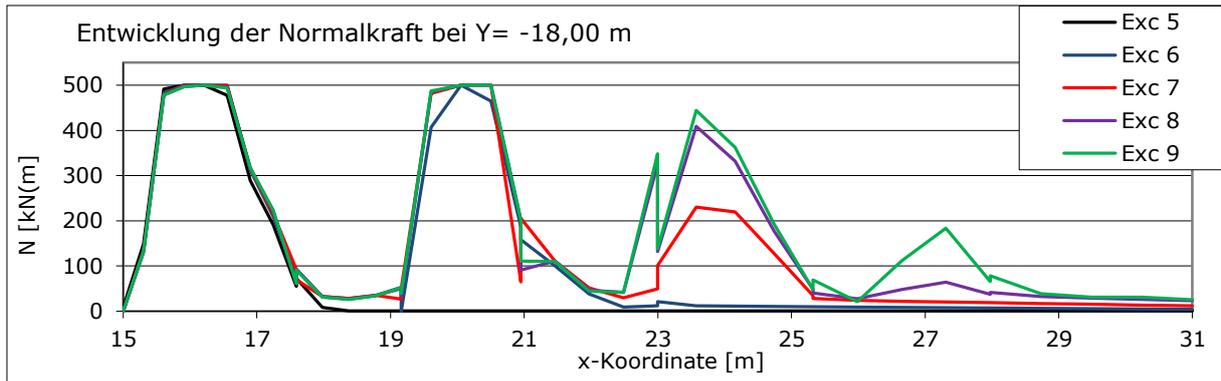


Abbildung 40: Entwicklung der Normalkraft bei Y= -18,00 m

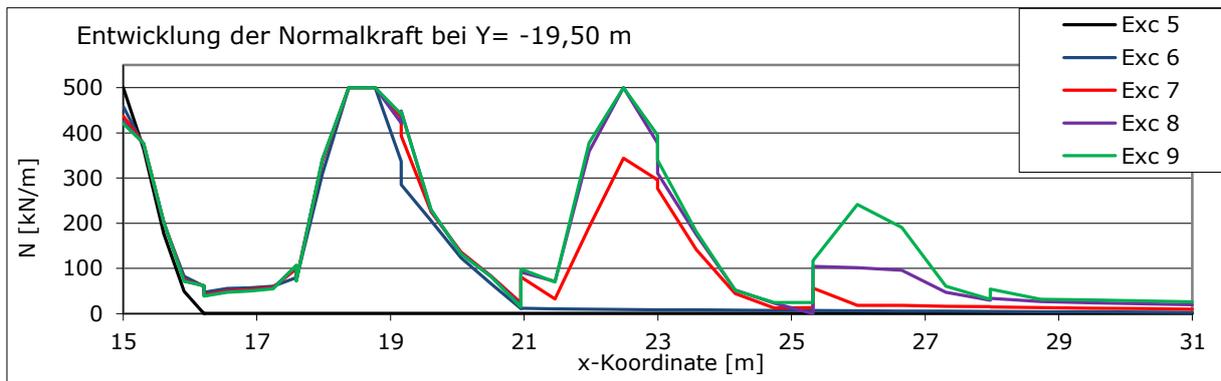
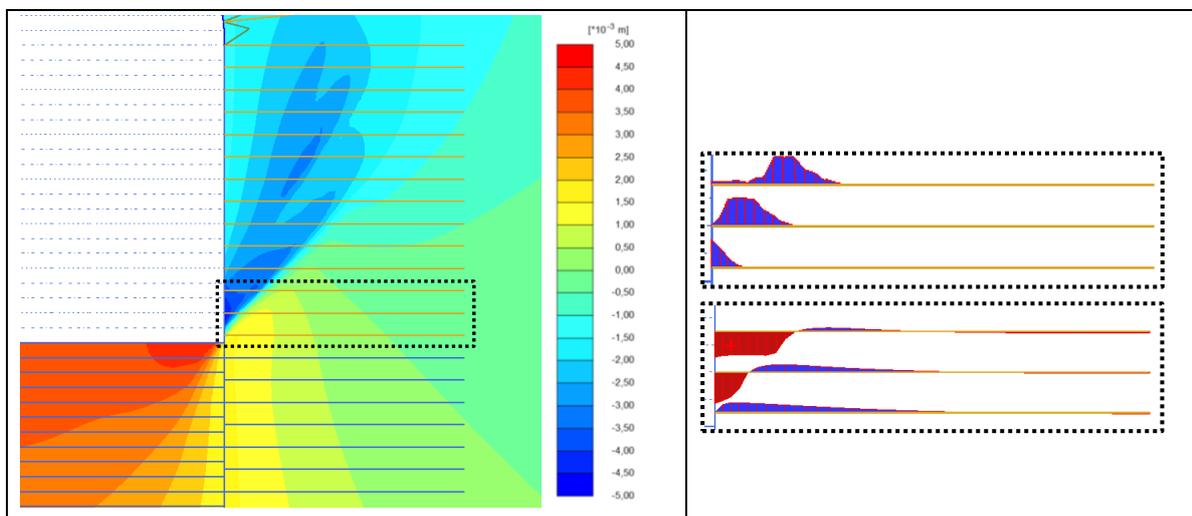


Abbildung 41: Entwicklung der Normalkraft bei Y= -19,50 m

Als weiteres Indiz und zum besseren Verständnis der Entstehung der Scherbänder werden in folgender Gegenüberstellung (siehe Tabelle 16) für die Phase „Ausbruch Strosse 5“, die vertikalen Verformungen die in der Phase entstehen ( $Pu_y$ ), mit der entstehenden Ankernormalkraft dargestellt.

Tabelle 16: Zusammenhang  $Pu_y$  - Ankernormalkraft



Man erkennt, dass zufolge des Aushubs Hebungen von unten her und Setzungen von oben her kommend, genau dort zu einem starken Gradienten führen wo auch die Ankernormalkraft entsteht.

### 3.6.2 Spannungsdiagramme

Bei Betrachtung der Scherbänder kann man feststellen, dass diese bei ihrer Entstehung hauptsächlich aus *Mohr-Coulomb Points* bestehen. Mit voranschreitendem Ausbruch werden diese, von der Kavernenwandung beginnend, sukzessive durch *Tension cut-off points* ersetzt.

Um dies genauer zu betrachten wurden entlang eines Ankers ( $Y = -22,50$  m) Spannungspunkte (K bis T) gewählt und in Form von Spannungsdiagrammen ausgewertet. In Abbildung 42 ist die Lage der Spannungspunkte mit den dazugehörigen Koordinaten dargestellt.

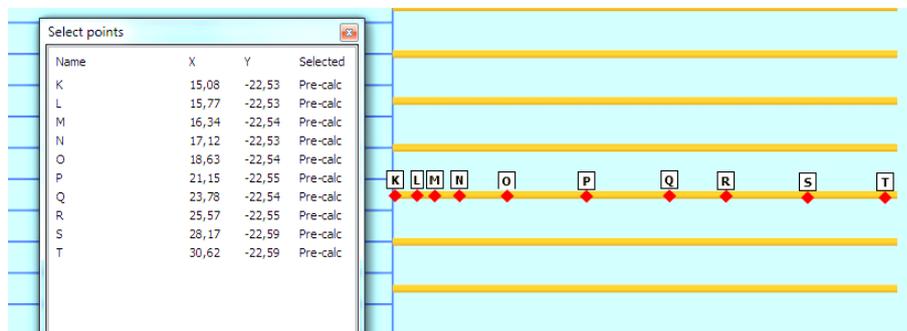
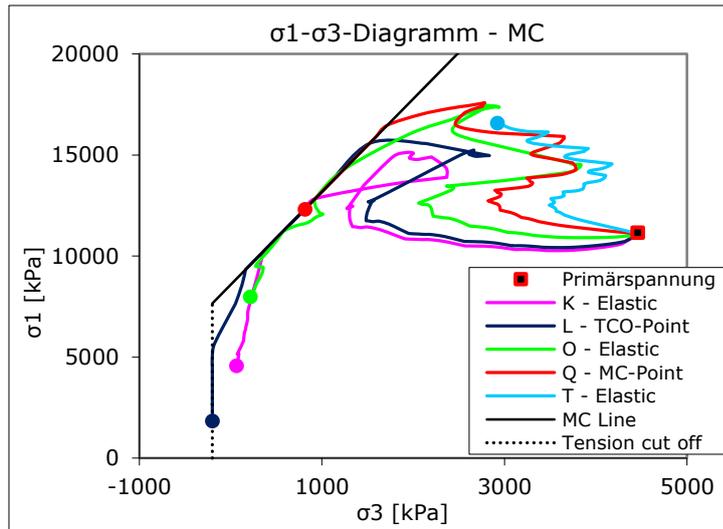


Abbildung 42: gewählte Spannungspunkte

Es werden aus Gründen der Übersichtlichkeit 5 der 10 Spannungspunkte in den folgenden Darstellungen gezeigt. Da sich die Punkte alle auf derselben Höhe befinden, starten alle Pfade vom selben Punkt aus, welcher im Diagramm als Primärspannung bezeichnet ist. Der Endpunkt der Spannungspfade ist jeweils mit einem gleichfärbigen Punkt dargestellt. Als Begrenzung wird das Versagenskriterium ebenfalls im Diagramm dargestellt.

Abbildung 43:  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - MC

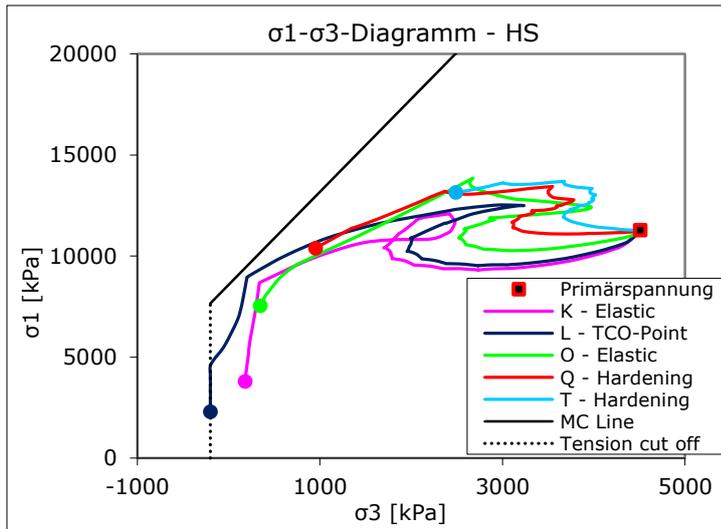
Man erkennt bei den Punkten K bis Q, dass durch den Aushub der Kaverne und der damit verbundenen Spannungsumlagerung einerseits die größere Hauptspannung ( $\sigma_1$ ) größer wird und andererseits die kleinere Hauptspannung ( $\sigma_3$ ) immer kleiner wird. Dies führt alle Punkte die sich im Bereich der plastischen Zone befinden früher oder später an die Grenzen der Festigkeitseigenschaften.

Durch Spannungsumlagerungen können sich einige Punkte wieder vom MC-Bruchkriterium entfernen und im elastischen Bereich zu liegen kommen (siehe z.B. Punkt K und O). Punkte die sich nun in einem solchen niedrigen Spannungsbereich befinden, können dann durch weitere Umlagerung, zufolge des weiterführenden Aushubs, an der *Tension cut-off*-Linie zu liegen kommen. Dies wiederum bedeutet, dass die Zugfestigkeit an diesem Punkt erreicht wird.

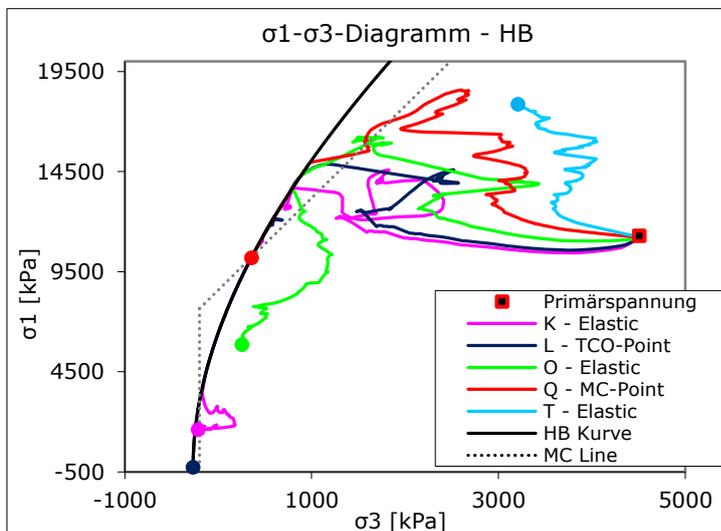
In anderen Worten könnte man sagen, dass die Bereiche zwischen den Scherbändern, die am Ende der Berechnung elastisch sind, im Laufe der Berechnung an ihr Versagen kommen, aber durch die Ausbildung von Scherbändern in benachbarten Felsbereichen wieder entlastet werden.

Für Punkte, die außerhalb des überbeanspruchten Bereiches liegen, in diesem Fall Punkt T, sieht man, dass das Verhältnis zwischen der Abnahme von  $\sigma_3$  und der Zunahme von  $\sigma_1$  nicht zum Erreichen des Bruchkriteriums führt. Das ist nun der Bereich, in dem die Sekundärspannung durch Spannungsumlagerung am höchsten ist.

Für die Berechnungen mit dem HS- bzw. HB-Stoffgesetz wurden dieselben Spannungsdiagramme mit gleichen Spannungspunkten erstellt. Für das untersuchte HS-Modell wurde das Modell mit dem Steifigkeitsset 5/10 repräsentativ für die HS-Berechnung gewählt.

Abbildung 44:  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - HS

Das HS-Modell zeigt grundsätzlich eine ähnliche Tendenz wie das MC-Modell, jedoch wird das Versagenskriterium weder während noch am Ende der Berechnung erreicht. Daher gibt es auch keine *Mohr-Coulomb Points* bei der HS-Berechnung. Die Punkte die nahe an der Kavernenwandung liegen (K bis O), kommen in ähnlicher Art wie beim Referenzmodell zu liegen. Weiter erkennt man, dass die Spannungspfade hier nicht so großen Spannungsumlagerungserscheinungen ausgesetzt sind.

Abbildung 45:  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - HB

Das HB-Modell zeigt grundsätzlich die gleichen Tendenzen wie das Referenzmodell. Die Punkte sind hier noch stärkeren Spannungsumlagerungen ausgesetzt und nähern sich im überbeanspruchten Bereich der HB-Versagenskurve. Ähnlich wie bei der Betrachtung der *Plastic Points* wirken die Spannungspfade chaotischer als bei MC.

Ergänzend wurden für dieselben Spannungspunkte Spannungspfade in einem p-q-Diagramm erstellt und können dem Anhang C entnommen werden.

### 3.6.3 Spannungsverteilung und Trajektorien

Zum ergänzenden Vergleich der Berechnungen mit den unterschiedlichen Stoffgesetzen werden hier verschiedene Spannungsdarstellungen gegenübergestellt.

In Tabelle 17 sind für die Stoffgesetze MC, HB und HS die Vertikalspannungen ( $\sigma_{yy}$ ), die Horizontalspannungen ( $\sigma_{xx}$ ) sowie die größten Hauptspannungen in Trajektorien-Darstellung ( $\sigma_1$ ) jeweils gleich skaliert gegenübergestellt.

Im Weiteren wird für eine detailliertere Betrachtung ein Horizontalschnitt von der Kavernenwandung (X= 15,00 m; Y= -15,00 m) beginnend 40 Meter nach rechts dargestellt (siehe Abbildung 46). Es werden horizontale und vertikale Spannungen sowie Verformungen verglichen.

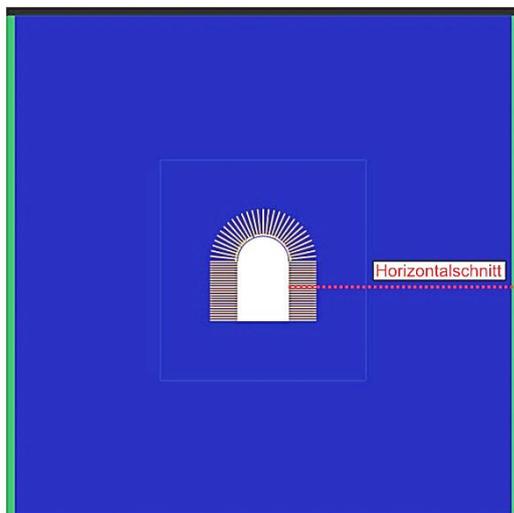
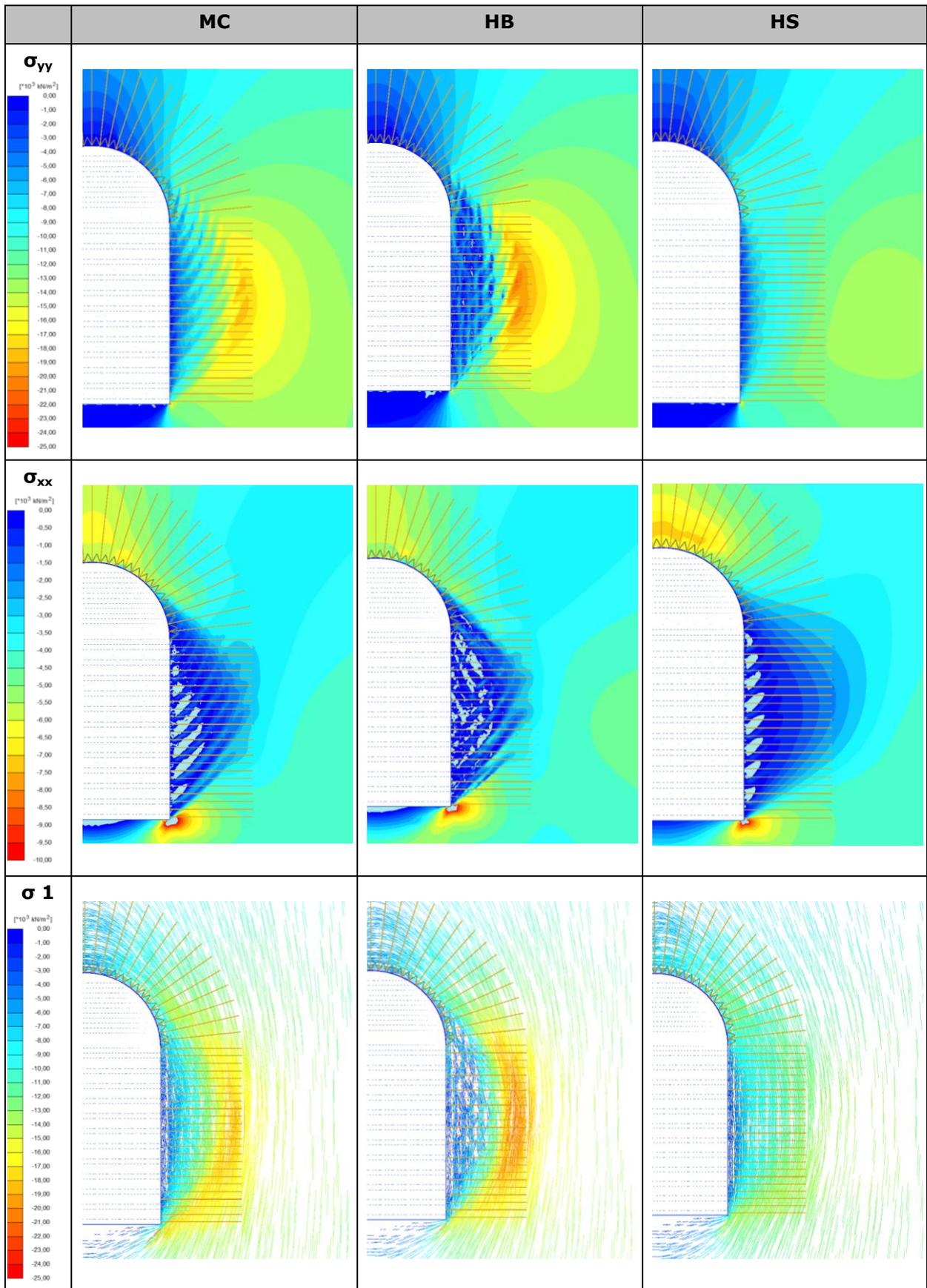


Abbildung 46: Detaillierte Betrachtung - Schnittführung

Tabelle 17: Matrixdarstellung - Spannungsdarstellungen der unterschiedlichen Stoffgesetze



Die MC- und HB-Ergebnisse passen bezüglich des Spannungsniveaus und der Ausdehnung des überbeanspruchten Bereiches gut überein. Die Spannungen entwickeln sich bei HB im überbeanspruchten Bereich jedoch sehr sprunghaft. Wie auch schon bei den Spannungspfaden festgestellt, liegen die HS-Ergebnisse, durch eine weiträumigere Spannungsumlagerung, in einem geringeren Spannungsniveau. Die Ausbildung einer plastischen Zone, wie in MC und HB, ist daher nicht in dieser Art gegeben.

Die horizontalen Spannungen (siehe Abbildung 47) verlaufen grundsätzlich in ähnlicher Art, wobei die starke Sprunghaftigkeit beim HB-Modell auffallend ist. Diese Sprunghaftigkeit wird auf numerische Ursachen in der Formulierung des HB-Stoffgesetzes zurückzuführen sein., welche hier nicht geklärt werden können.

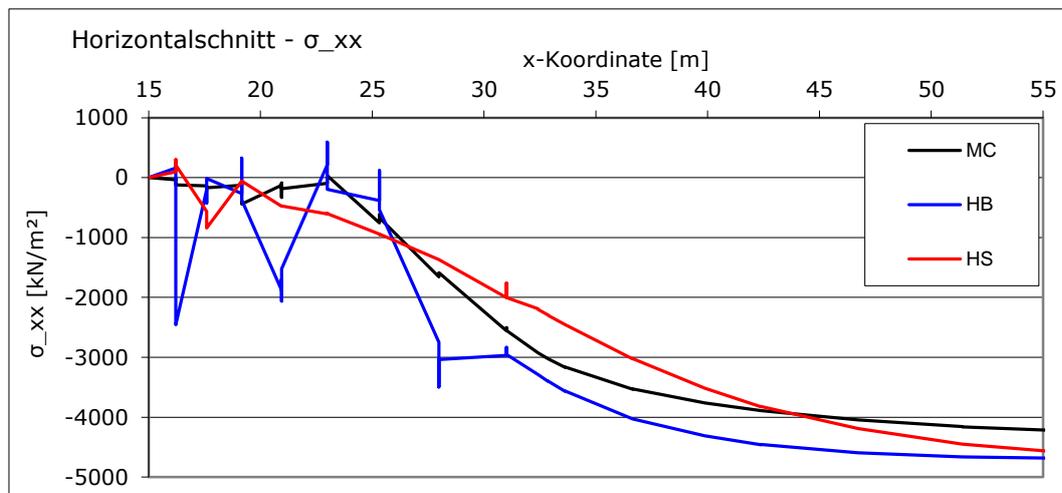


Abbildung 47: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt -  $\sigma_{xx}$

Bei den vertikalen Spannungen (siehe Abbildung 48) ist auffallend, dass bei HB im elastischen Bereich die höchsten Spannungen auftreten die dann im plastischen Bereich schnell sehr niedrig werden, beziehungsweise sogar in den Zugbereich springen. Der Verlauf der Spannung bei MC entspricht der Erwartung und liegt im Bereich der Kavernenwandung am höchsten, wobei der Wert von ca. 8,9 MPa in etwa der einaxialen Druckfestigkeit entspricht.

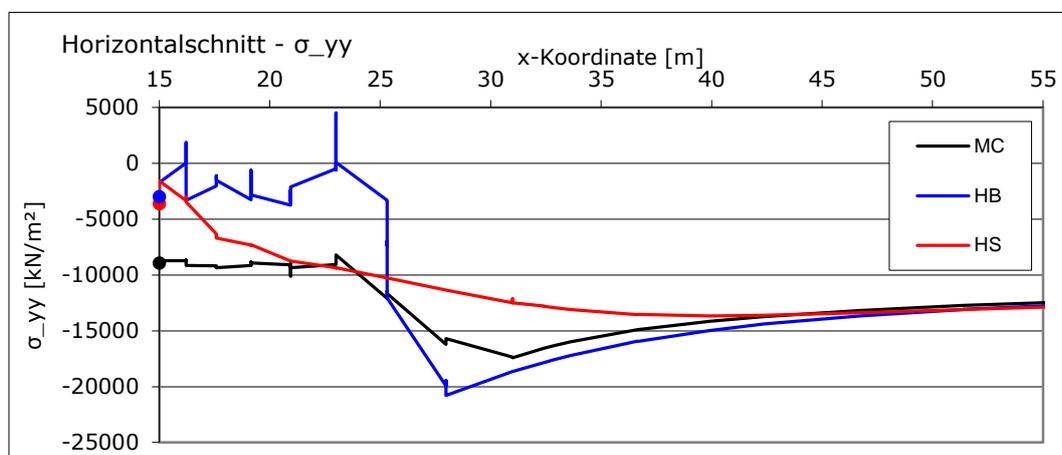


Abbildung 48: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt -  $\sigma_{yy}$

Die horizontalen Verformungen zeigen grundsätzlich ähnliche Verläufe, wobei der Anstieg bei HB im Nahbereich der Kaverne am stärksten ist.

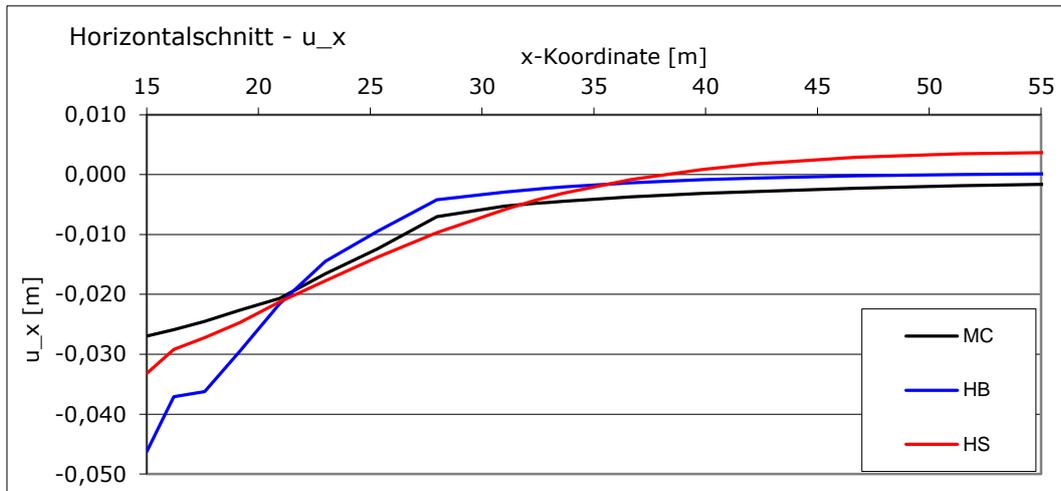


Abbildung 49: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt -  $u_x$

Für die vertikalen Verformungen ergibt sich bei MC eine eher gleichmäßige Setzung des Kontinuums. Bei HB und HS ergeben sich im Nahbereich Hebungen.

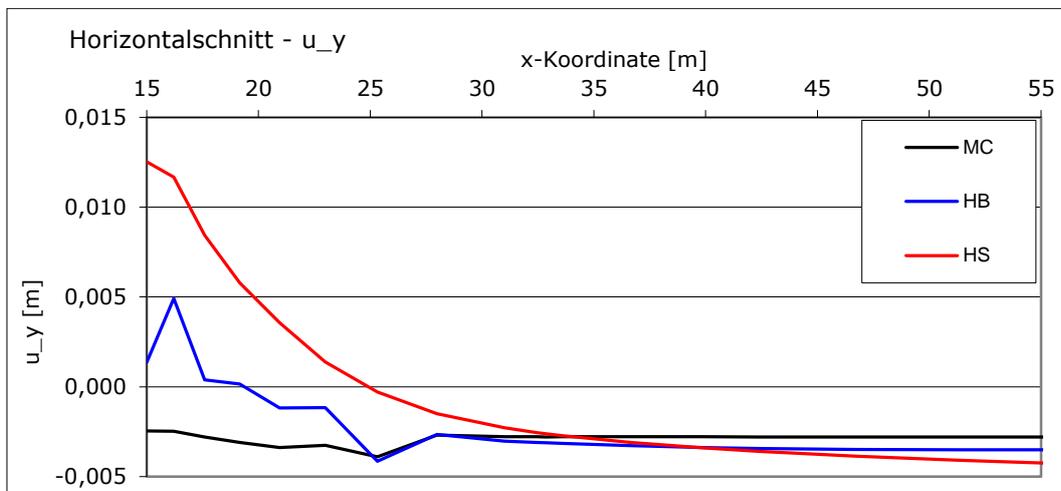


Abbildung 50: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt -  $u_y$

Zusammenfassend sind in Tabelle 18 die Ergebnisse für die Endverformung in tabellarischer Form zusammengestellt.

	MC	HB	HS
$u_x$ [mm] bei $X= 15,00$ m	<b>-27,0</b>	-46,3	-33,2
$u_y$ [mm] bei $X= 15,00$ m	<b>-2,4</b>	1,4	12,5

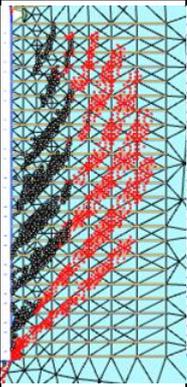
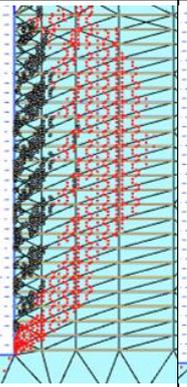
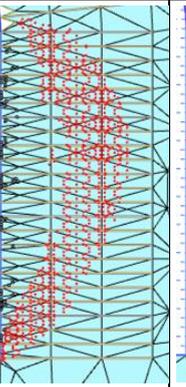
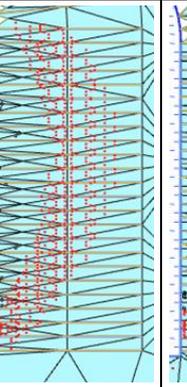
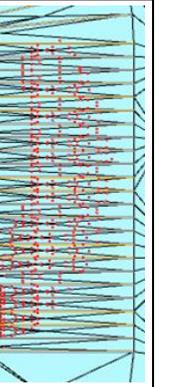
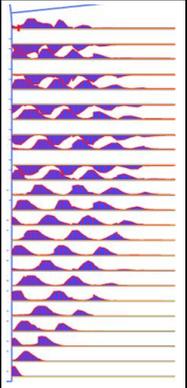
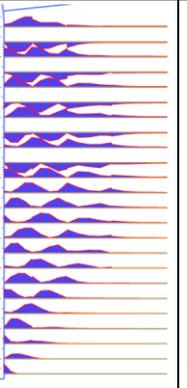
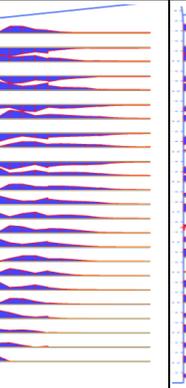
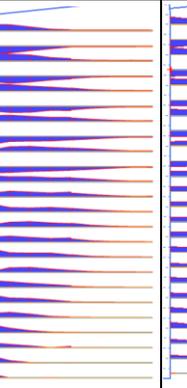
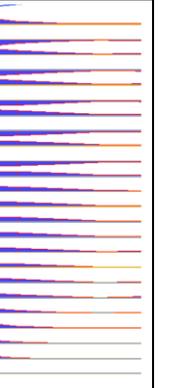
Tabelle 18: Vergleich der Stoffgesetze –  $u_x$  und  $u_y$

### 3.7 Einfluss der Netzfeinheit

Wie in der Einleitung schon erwähnt, ist das Verschmieren der Ankernormalkraft entlang des Ankers eine Möglichkeit, mit dem Phänomen des wellenförmigen Ankerkraftverlaufs umzugehen. Unter anderem kann dies durch Manipulation der Netzfeinheit geschehen. Aus diesem Grund wird hier der Einfluss der Netzfeinheit genauer untersucht. Ausgehend vom Referenzmodell, welches im Nahbereich der Kaverne die höchst mögliche Netzfeinheit (beschränkt durch das Rechenprogramm) aufweist, wurde das Netz schrittweise vergrößert.

Mit zunehmender Grobheit des Netzes wird ein allgemein verschmierender Effekt erwartet. Durch den verschmierenden Effekt werden auch geringere Verformungen erwartet. In Tabelle 19 sind die Ergebnisse für *Plastic Points* mit jeweiliger Netzdarstellung, sowie Ankernormalkräfte und Verformungen in üblicher Matrixform, dargestellt. Die Ergebnisse der Modelle *Gröber(3)* und *Gröber(4)* werden rein zu Demonstrationszwecken dargestellt. Modelle mit so schlechtem Netz wären ansonsten zu vermeiden.

Tabelle 19: Matrixdarstellung - Einfluss der Netzfeinheit

Netzfeinheit	Referenz	Gröber(1)	Gröber(2)	Gröber(3)	Gröber(4)
<b>Plastic Points</b>					
<b>Ankernormalkraft</b>					
<b> u  Firste [mm]</b>	37	36	35	35	34
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	39	39	39	38
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	34	30	29	27

Man erkennt gut, dass mit gröber werdendem Netz die Ausprägung der Scherbänder abnimmt. Die resultierenden Ankernormalkräfte verschmieren sich und die Wellen verschwinden im Verlauf. Bei den Verformungen in Firste und Sohle sieht man wie erwartet

eine geringe Reduktion mit größer werdendem Netz. Im Bereich der Wandung ist jedoch schnell ein starker Abfall erkennbar.

Um den Ankerkraftverlauf besser zu veranschaulichen werden, entlang der in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, die Normalkräfte in Abbildung 51 und Abbildung 52 gegenübergestellt.

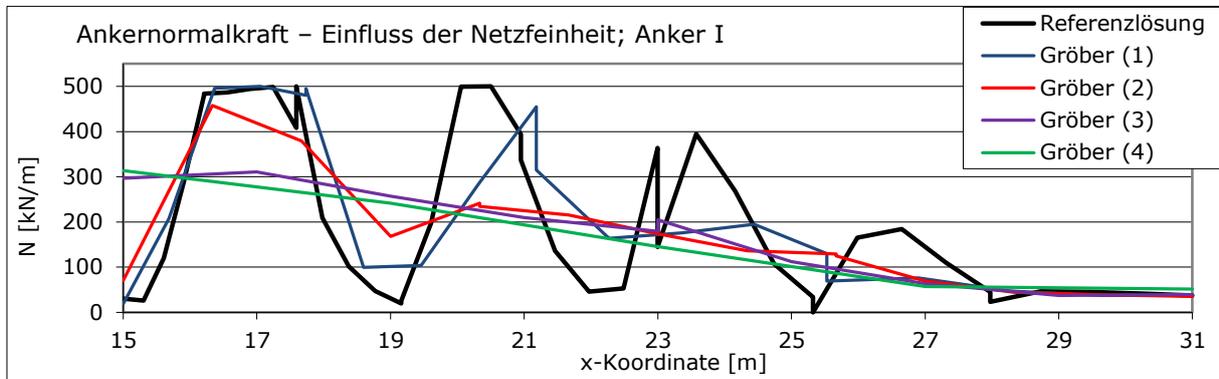


Abbildung 51: Ankerkraftverlauf – Einfluss der Netzfeinheit; Anker I

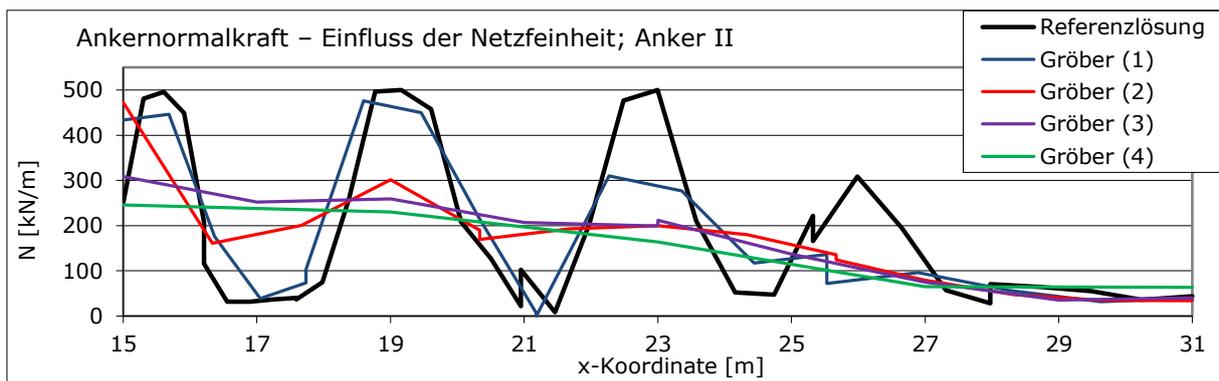


Abbildung 52: Ankerkraftverlauf – Einfluss der Netzfeinheit; Anker II

Durch ein gröberes Netz sind entlang der Ankerstrecke weniger Elemente und somit auch weniger Stützwerte. Es kommt zu einer Art Glättung des Verlaufs.

### 3.8 Einfluss der Randbedingungen

Im Zuge dieser Arbeit wird das Referenzmodell, welches in Kapitel 3.2 genau beschrieben ist, bezüglich der Randbedingungen genauer betrachtet. Diese Betrachtung ist als eine Art „Nebenschauplatz“ zu verstehen, da hier nur die Wirkung des steifen Rahmens betrachtet wird.

#### 3.8.1 Allgemein

Das Referenzmodell besitzt einen linear-elastischen steifen Rahmen, welcher eine weitreichendere Gebirgstragwirkung simulieren soll. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde zuerst bei gleichbleibender Modellgröße der steife Rahmen entfernt (die Überlagerungsschicht bleibt bestehen). Weiter wurde dann diese 5-m-Überlagerungsschicht durch 250 m des Basismaterials ersetzt. In weiterer Folge wurde das Modell sukzessive verbreitert.

Die Eigenschaften und die Abmessungen dieser Variation sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Für diese Untersuchung wurde für die Strosse eine Aushubsequenz von 35 m vorgesehen. Für die hier gezeigte Auswertung werden ein Horizontal- und ein Vertikalschnitt (Abbildung 53) geführt, in denen Spannungen und Verformungen verglichen werden.

Um grundsätzlich die Wirkung des steifen Rahmens zu erkennen, werden zuerst in Tabelle 21 die totalen Verformungen rein graphisch am jeweiligen Modell dargestellt. Das rot gestrichelte Quadrat stellt, in den jeweiligen Abbildungen, die Referenzabmessung von 300 x 300 m dar.

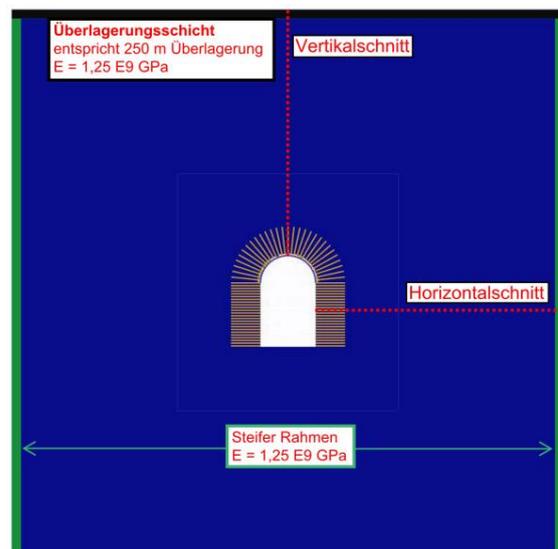
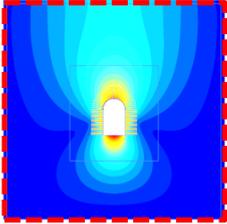
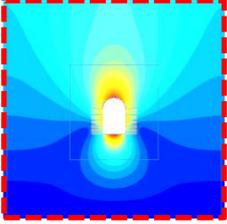
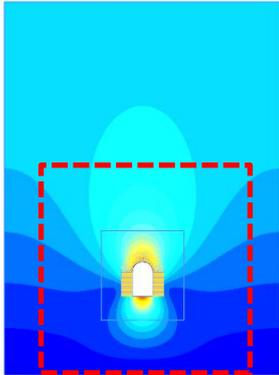
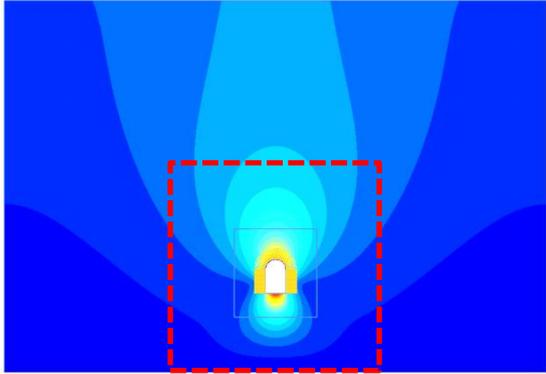
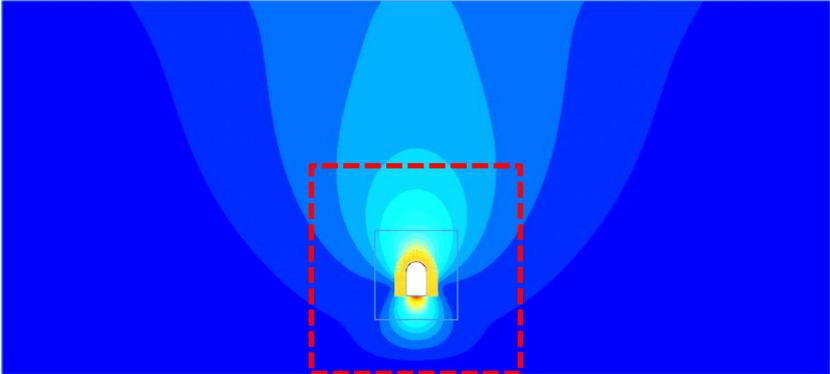


Abbildung 53: Einfluss der Randbedingungen - Schnittführung

Bezeichnung	Steifer Rahmen	Überlagerungsschicht	Abmessungen (b x h)
Referenz	Ja	Ja	300 x 300 (295 + 5)
Ohne Rahmen	Nein	Ja	300 x 300 (295 + 5)
Geringe Breite	Nein	Nein	400 x 545
Mittlere Breite	Nein	Nein	790 x 545
Große Breite	Nein	Nein	1200 x 545

Tabelle 20: Einfluss Randbedingung - Modellübersicht

Tabelle 21: Matrixdarstellung - Einfluss Randbedingung -  $|u|$

Bezeichnung	$ u $ - Totale Verformungen (alle gleich skaliert)
Referenz	
Ohne Rahmen	
Geringe Breite	
Mittlere Breite	
Große Breite	

Es ist ersichtlich, dass bei dem Modell ohne Rahmen und dem mit geringer Breite, durch die räumlich geringe Ausdehnung des Modells, das System stärker beansprucht ist. Bei den Modellen mit mittlerer und großer Breite erkennt man eine tiefreichende Tragwirkung, da sich die Belastung auf das Kontinuum seitlich ausdehnt. Des Weiteren erkennt man, dass sich bei dem Modell mit großer Breite eine Art V-förmiges Verformungsbild von der Kaverne zur Geländeoberfläche ergibt. Ein noch breiteres Modell würde daher kaum noch Mitwirkungspotential besitzen. Rein optisch betrachtet stimmen die zwei breiten Modelle gut mit dem Referenzmodell überein.

### 3.8.2 Vertikalschnitt

Für die Auswertung des Vertikalschnitts wird die Ordinate, welche für die y-Koordinate steht, von der Firste (X= 0,00 m; Y= 15,00 m) 30 Meter nach oben dargestellt. Auf der Abszisse wird der jeweilige Bereich so skaliert, dass Tendenzen erkennbar sind.

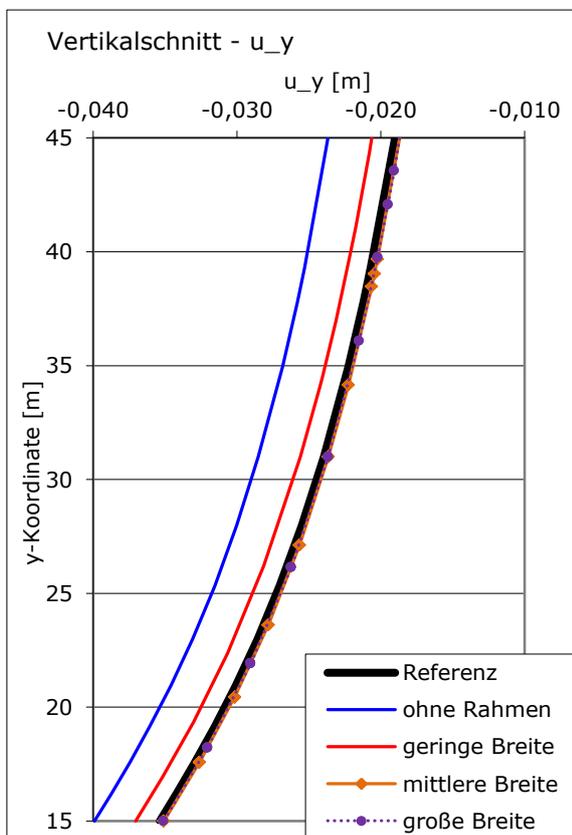


Abbildung 54: Randbedingungen - Vertikalschnitt -  $u_y$

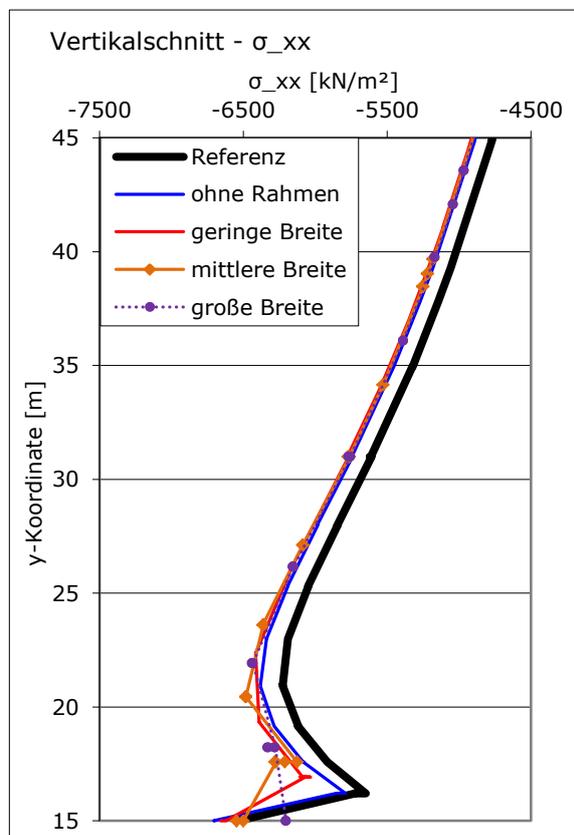
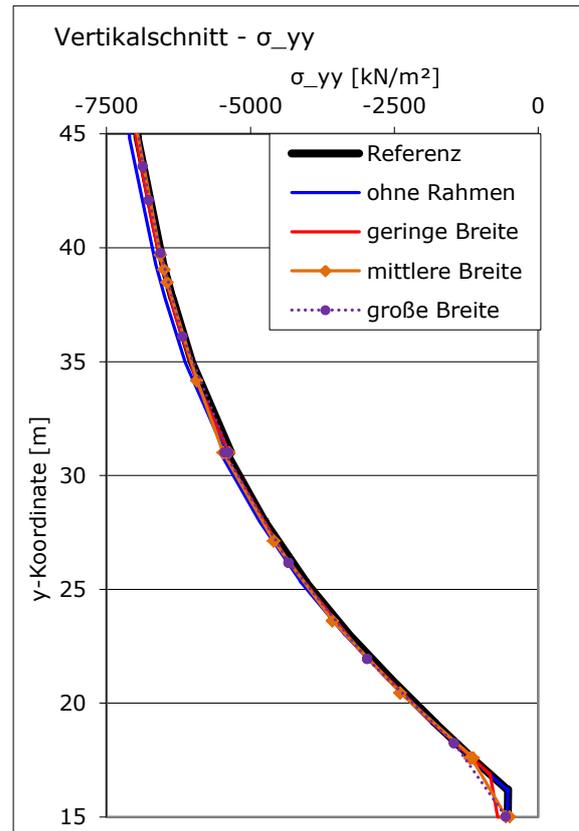


Abbildung 55: Randbedingungen - Vertikalschnitt -  $\sigma_{xx}$

Vertikalschnitt	Referenz	ohne Rahmen	geringe Breite	mittlere Breite	große Breite
$u_y$ [mm] bei Y= 15,00 m	<b>-35,4</b>	-39,9	-37,0	-35,1	-35,1
Abweichung [%]	<b>0,0</b>	-12,8	-4,7	-0,8	-0,7

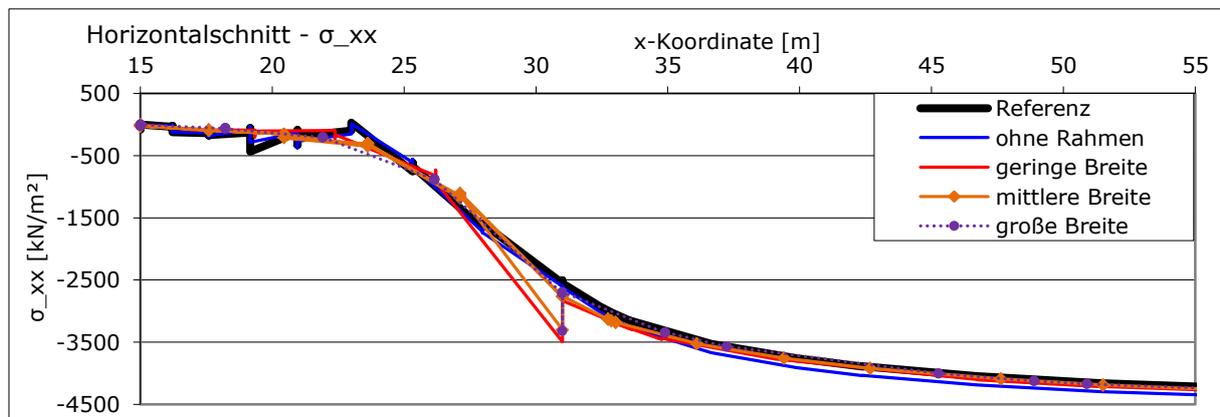
Tabelle 22: Randbedingungen – Vertikalschnitt -  $u_y$

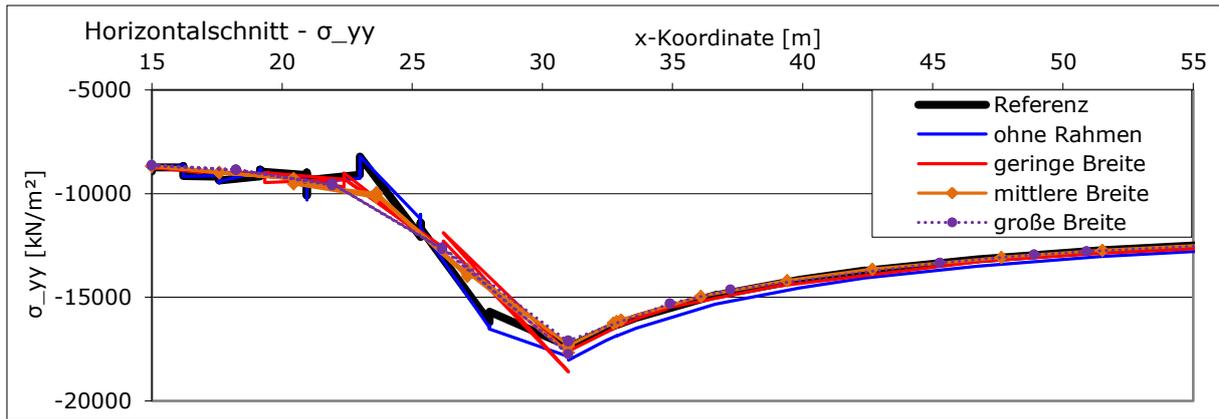
Wie in Abbildung 54 ersichtlich, konvergiert die Verformung mit breiter werdendem Modell zu dem Referenzmodell. Die Verformungswerte an der Firse ( $Y = 15,00$  m) sind in Tabelle 22 mit den jeweiligen Abweichungen, bezogen auf das Referenzmodell, aufgelistet. Es besteht kaum ein Unterschied zwischen mittlerer Breite und großer Breite, was auch dafür spricht, dass ein noch breiteres Modell keine anderen Ergebnisse mehr liefern würde. Bei Betrachtung der Spannungsverläufe (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56) sind Unterschiede erkennbar.

Abbildung 56: Randbedingungen - Vertikalschnitt -  $\sigma_{yy}$ 

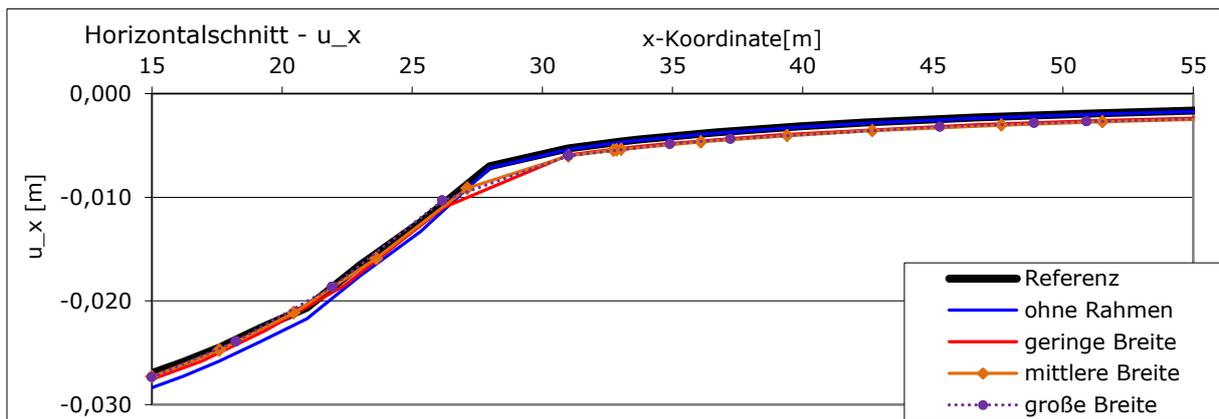
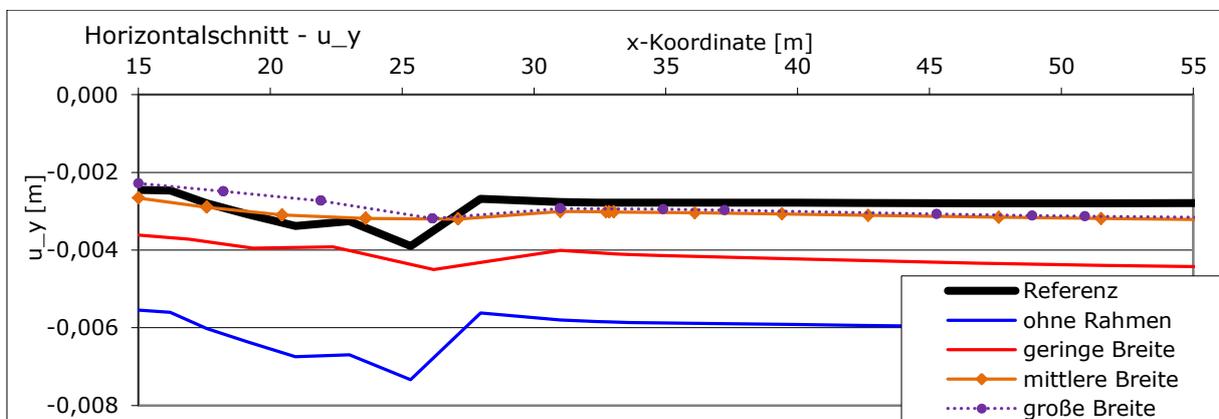
### 3.8.3 Horizontalschnitt

Für die Auswertung des Horizontalschnittes wird die Abszisse, welche für die x-Koordinate steht, von der Kavernenwandung ( $X = 15,00$  m;  $Y = -15,00$  m) 40 Meter nach rechts dargestellt. Auf der Ordinate wird der jeweilige Bereich so skaliert, dass Tendenzen erkennbar sind.

Abbildung 57: Randbedingungen - Horizontalschnitt -  $\sigma_{xx}$

Abbildung 58: Randbedingungen – Horizontalschnitt -  $\sigma_{yy}$ 

Ähnlich wie beim Vertikalschnitt sind bei den Spannungen kaum Unterschiede erkennbar. Man kann aber gut erkennen, wie sich die Primärspannungen im Nahbereich der Kaverne in Sekundärspannungen umwandeln. Die horizontale Spannung (siehe Abbildung 57) wird zu 0 MPa und die vertikale Spannung (siehe Abbildung 58) entspricht in etwa der einaxialen Druckfestigkeit, welche bei 8,6 MPa liegt.

Abbildung 59: Randbedingungen – Horizontalschnitt -  $u_x$ Abbildung 60: Randbedingungen – Horizontalschnitt -  $u_y$

Die Darstellungen für die Verformungen (siehe Abbildung 59 und Abbildung 60) zeigen, dass auch hier die Modellierung mit steifem Rahmen eine gute Übereinstimmung mit den breiten Modellen liefert.

Die Verformungswerte sind mit Abweichung, bezogen auf das Referenzmodell, in Tabelle 23 und Tabelle 24 aufgelistet. Vor allem bei der Betrachtung der Vertikalverformungen sieht man, dass das Referenzmodell mit dem gewählten steifen Rahmen die tiefreichende Gebirgstragwirkung gut repräsentiert.

Vertikalschnitt	Referenz	ohne Rahmen	geringe Breite	mittlere Breite	große Breite
u_x mm bei X= 15,00 m	<b>-27,0</b>	-28,4	-27,6	-27,3	-27,4
Abweichung [%]	<b>0,0</b>	-5,2	-2,3	-1,3	-1,6

Tabelle 23: Randbedingungen – Horizontalschnitt - u\_x

Vertikalschnitt	Referenz	ohne Rahmen	geringe Breite	mittlere Breite	große Breite
u_y [mm] bei X= 15,00 m	<b>-2,4</b>	-5,5	-3,6	-2,7	-2,3
Abweichung [%]	<b>0,0</b>	-126,4	-47,8	-8,6	6,6

Tabelle 24: Randbedingungen – Horizontalschnitt - u\_y

### 3.9 Schlussfolgerungen I

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die untersuchten Einflüsse aus Kapitel 3.3 (Aushubsequenz, Dilatanz, Zugfestigkeit, Ausbau und Ankersteifigkeit) keinen ursächlichen Einfluss auf die Entstehung der oszillierenden Ankernormalkräfte haben. Ein indirekter Zusammenhang besteht jedoch bei der Aushubsequenz, welche Anzahl und Lage der Wellen im Normalkraftverlauf bestimmt.

Der Einfluss des Stoffgesetzes ist direkt gegeben. Das HB-Modell bestätigt das Phänomen des wellenförmigen Ankerkraftverlaufs direkt. Die Berechnungen mit den abgeleiteten HB-Parametern zeigen bezüglich der Ankernormalkraft sogar eine gute Übereinstimmung. Das HS-Modell zeigt im Gegensatz dazu ein gänzlich anderes Bild, was letztlich auf das doch sehr anders definierte Stoffgesetz zurückzuführen ist. Durch die *Hardening-Prozesse* und die damit verbundenen plastischen Verformungen wird die Belastung viel weitreichender umgelagert. Jedoch ergibt sich bei den Berechnungen mit reduzierten Kennwerten (vgl. Kapitel 3.4.3) ebenfalls ein oszillierender Ankerkraftverlauf.

Die Variation der Netzfeinheit hat einen starken Einfluss auf den Verlauf der Normalkraft in den Ankern. Durch eine geringere Anzahl an Elementen im untersuchten Bereich werden einerseits die Mechanismen und andererseits die Ergebnisse verschmiert.

In Tabelle 25 sind die untersuchten Einflüsse und deren Auswirkung, bezüglich der Wellenbildung in der Ankernormalkraft, übersichtsmäßig zusammengefasst.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Einflüsse I

<b>Untersuchter Einfluss</b>	<b>Auswirkung auf Ankernormalkraftverlauf</b>
Aushubsequenz	Bestimmt Lage und Anzahl
Dilatanz	-
Zugfestigkeit	-
Ausbau	-
Ankerdefinition	-
Stoffgesetz HS	Starker Einfluss → bestätigt Wellenbildung indirekt
Stoffgesetz HB	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt Wellenbildung direkt
Netzfeinheit	Starker Einfluss → je feiner, desto ausgeprägter

Der Mechanismus, der hinter der Entstehung des oszillierenden Ankernormalkraftverlaufs steht, kann folgendermaßen beschrieben werden:

Bei stark überbeanspruchtem Material entsteht im Bereich der Kavernenwandung ein plastischer Bereich, der sich hier in Form von Scherbändern äußert. Die plastischen Dehnungen konzentrieren sich in diesem Fall in den Scherbändern. Die Ausbildung der einzelnen Scherbänder ist einerseits durch die Phasendefinition und andererseits durch die Genauigkeit der Berechnung (Netzfeinheit) gegeben.

In den Bereichen, in denen die höchsten Verformungsgradienten auftreten, ist das Material äußerst beansprucht. Diese lokale und stärkere Überbeanspruchung ist wiederum für das Entstehen der Scherbänder und in weiterer Folge für die Entstehung der Wellen im Ankerkraftverlauf verantwortlich.

Bereiche, die zwischen den Scherbändern liegen, gehören grundsätzlich auch zur plastischen Zone und sind auch dementsprechend beansprucht. Jedoch werden diese durch die Entstehung der Scherbänder nicht so stark und direkt beansprucht. Diese Bereiche werden durch die Ausbildung von Scherbändern in der Nachbarschaft, sogar entlastet. Durch die Darstellung von Spannungspfaden (vgl. Kapitel 3.6.2) wird dieses Verhalten sehr gut veranschaulicht.

## 4 Vergleichsrechnung PHASE2

Um die Ergebnisse aus PLAXIS2010 zu verifizieren wurde eine Vergleichsrechnung mit der Software PHASE2 V8 durchgeführt. PHASE2 ist ein leistungsstarkes 2D elasto-plastisches Finite-Elemente-Programm für tiefliegenden und oberflächennahen Ausbruch in Fels und Boden (vgl. [5]).

### 4.1 Äquivalentes Modell

Zu Beginn wurde versucht, das PLAXIS2010-Modell so exakt wie möglich nachzubilden, wobei sich dies schwerer als erwartet herausstellte. Bei diesen zwei FE-Programmen gibt es in vielen Punkten unterschiedliche Zugänge, welche es erschwerten eine schnelle Vergleichsrechnung durchzuführen. Letztendlich wurde das PHASE2-Modell mittels verschiedener Behelfe so hergestellt, dass es dem PLAXIS2010-Modell entspricht. Die Hauptunterschiede und deren gewählte Lösung werden hier in Kurzform geschildert. Einige der folgenden Punkte werden im Laufe dieses Kapitels noch genauer betrachtet.

**K0 Prozedur:** In PHASE2 ist diese Prozedur nicht vorgesehen, daher wurde in der ersten Phase nur die Überlagerungsschicht modelliert um gleiche Primärspannungen zu erhalten. In der zweiten Phase wurden im Weiteren für die seitlichen 5-m-Randstreifen ein Materialwechsel durchgeführt, welcher dann gemeinsam mit der Überlagerungsschicht den steifen Rahmen bildet.

**Steifer Rahmen:** In PHASE2 steht kein linear-elastisches Materialverhalten zur Verfügung. Deshalb wurde das MC-Stoffgesetz mit so hohen Versagensparametern gewählt, dass kein Versagen auftritt. Somit verhält sich das Material quasi linear-elastisch.

**Ankerdefinition:** In PHASE2 kann man aus verschiedenen Ankertypen wählen, wobei hier „Fully Bonded“ als das entsprechende Pendant zum „Geogrid“ zu sehen ist. Die Eingabe der entsprechenden Parameter erfolgte mit Werten pro Anker. Durch die Eingabe des Ankerabstands aus der Berechnungsebene verschmiert PHASE2 für die Berechnung die Werte dementsprechend, stellt jedoch bei den Ergebnissen wieder die Normalkräfte pro Anker dar.

**Netzfeinheit:** In PHASE2 wird das Netz ähnlich wie in PLAXIS2010 automatisch generiert und kann dann von Hand individuell verfeinert werden. In PHASE2 können die Cluster nicht wie in PLAXIS2010 verfeinert werden. Für Bereiche die es zu verfeinern gilt, wird in PHASE2 ein Polygon gezeichnet, beziehungsweise ein Fenster aufgezo-gen. Diese Prozedur kann so oft wiederholt werden, bis man das gewünschte Ergebnis erhält. Rein optisch wurde versucht ein äquivalentes Netz zu erstellen.

**Berechnungsansatz:** In PHASE2 kann man zwischen 3- und 6-knotigen Elementen wählen, wobei standardmäßig 3-knotige Elemente voreingestellt sind. Es wurde vorerst mit 6-knotigen Elementen gerechnet.

**Vorentlastung:** Für das in Rechnung stellen der Vorentlastung bietet PHASE2 verschiedene Möglichkeiten an (vgl. [4]), wobei bis Version 8.006 keine dieser Methoden direkt mit der *M-Stage-Methode* aus PLAXIS2010 vergleichbar war. Seit dem Update 8.007 vom 28.11.2011 funktioniert die Funktion „*induced stress*“ für Berechnungen mit Mehrfachausbrüchen und ist gleichwertig mit der *M-Stage-Funktion* aus PLAXIS2010. In Kapitel 4.4 wird auf den Punkt der Vorentlastung noch genauer eingegangen.

Ansonsten konnte das Modell ohne weitere nennenswerte Unterschiede modelliert und berechnet werden. In Abbildung 61 ist das Gesamtmodell und in Abbildung 62 die Kaverne dargestellt.

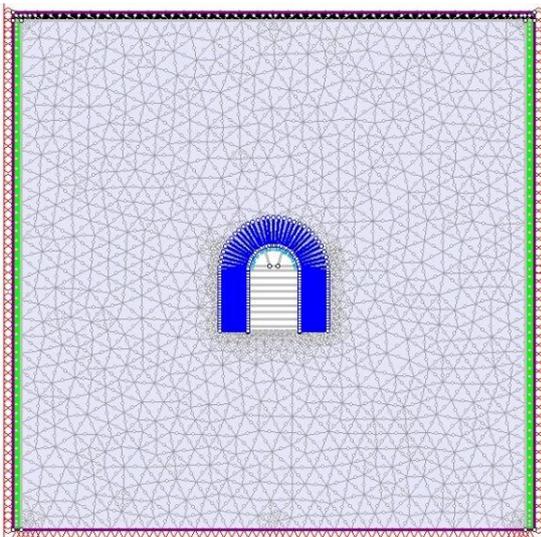


Abbildung 61: Gesamtmodell - PHASE2

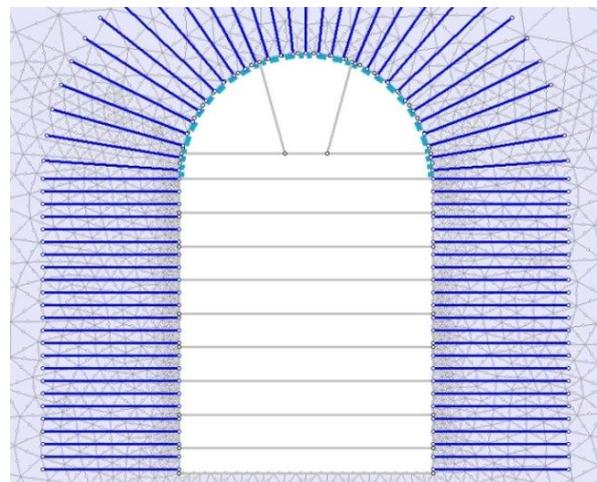


Abbildung 62: Kaverne - PHASE2

## 4.2 Ergebnisse der Berechnung

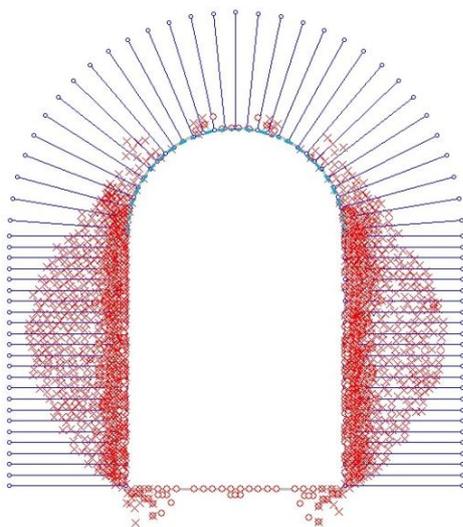


Abbildung 63: Plastic Points - PHASE2

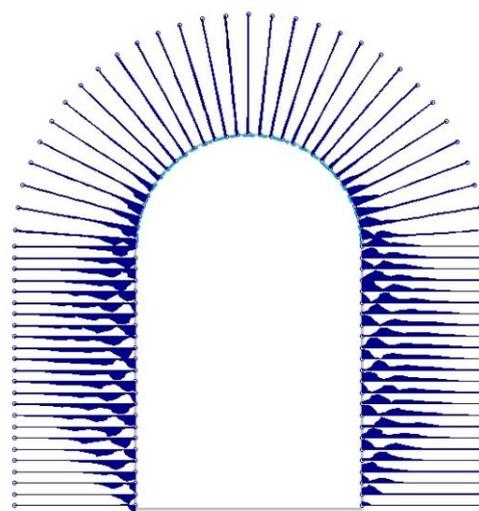


Abbildung 64: Normalkraft - PHASE2

Für die erste Berechnung wurden 6-knotige Elemente verwendet. Da die Referenzlösung aus PLAXIS2010 mit 15-knotigen Elementen berechnet wurde, wurde das Referenzmodell für eine bessere Vergleichbarkeit in weiterer Folge ebenfalls mit 6-knotigen Elementen berechnet.

In Abbildung 63 sind die *Plastic Points* dargestellt, welche im Nahbereich der Kavernenwandung sehr dicht auftreten. Die Ausdehnung der plastischen Zone entspricht in etwa der der Referenzlösung. In Abbildung 64 ist die dazugehörige Normalkraft der Anker dargestellt. Die Ausbildung eines wellenförmigen Verlaufs ist auch hier gegeben, wobei dieser im Verhältnis zur Referenzlösung schneller abflacht und dann eher gleichmäßig ausläuft.

Die dargestellte Gesamtverformung (siehe Abbildung 65) entspricht rein optisch betrachtet auch den Erwartungen. Die maximale Verformung in der Firste beträgt 36 mm, in der Sohle 39 mm und im Bereich der Kavernenwandung 33 mm. Diese Werte sind etwas geringer als die der Referenzlösung mit 15-knotigen Elementen.

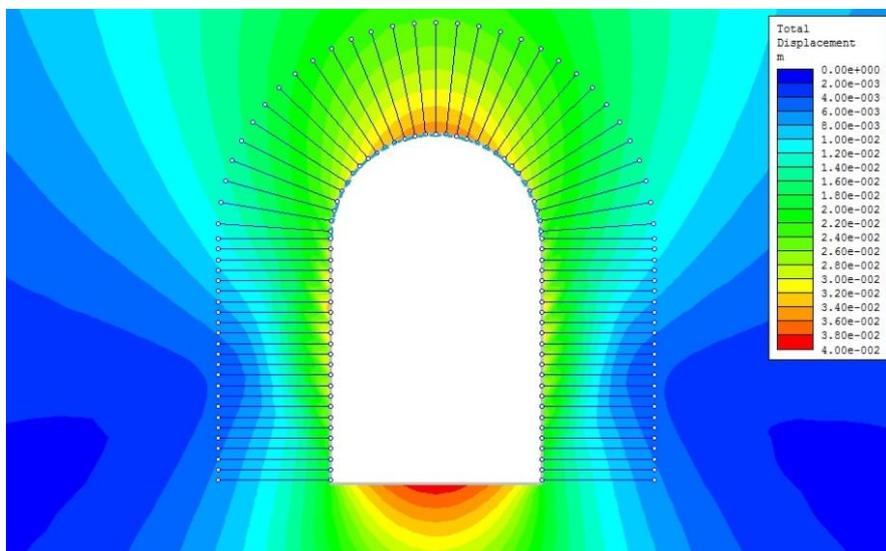


Abbildung 65: Gesamtverformung  $|u|$  – PHASE2

Bei einer Nachrechnung der Referenzlösung mit 6-knotigen Elementen, ergeben sich für die drei Verformungsgrößen die gleichen Werte wie hier in PHASE2. Da der gewählte Berechnungsansatz eine wesentliche Rolle für diese Untersuchung spielt, wird dieser Punkt im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

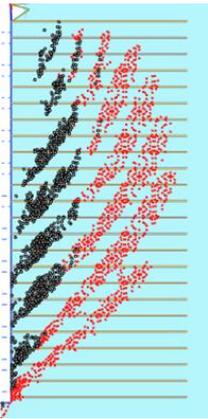
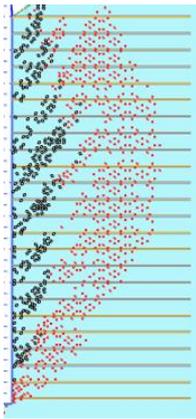
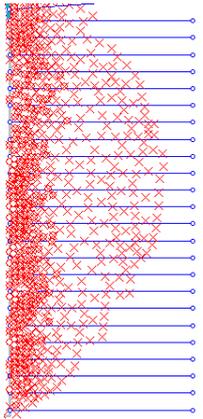
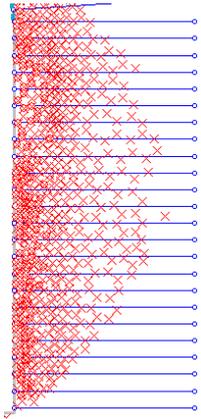
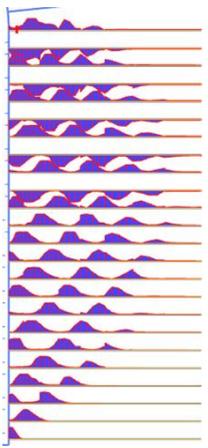
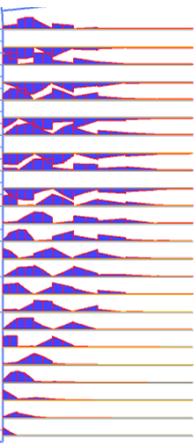
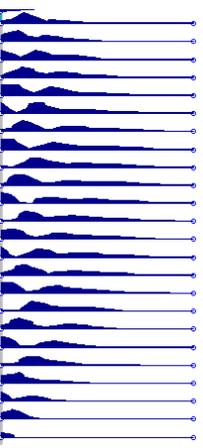
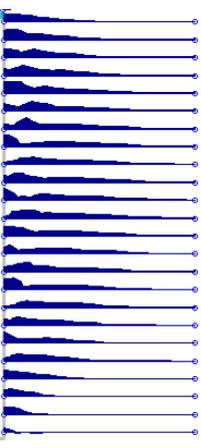
### 4.3 Einfluss des Berechnungsansatzes

Um den Einfluss des Berechnungsansatzes zu untersuchen, werden für PLAXIS2010 die Berechnungen mit 6- und 15-knotigen Elementen mit den 3- und 6-knotigen Berechnungen aus PHASE2 verglichen.

Grundsätzlich erwartet man sich mit höherwertigem Berechnungsansatz und gleichbleibendem Netz ein genaueres Ergebnis. Ähnlich wie bei dem Einfluss der Netzfeinheit ist in Tabelle 26 zu erkennen, dass sich die Verformungen in Firste und Sohle nur geringfügig ändern. Die

maximalen Verformungen in der Kavernenwandung sind jedoch stärker davon betroffen. Die Darstellung der *Plastic Points* aus PHASE2 liefert ein Bild, in dem eine Scherbandbildung nicht erkennbar ist. Jedoch liefert der Normalkraftverlauf ein Bild, welches auf genau diese Scherbänder hinweisen würde.

Tabelle 26: Matrixdarstellung – Einfluss des Berechnungsansatzes

Programm	PLAXIS2010		PHASE2	
Knoten je Element	15 (Referenz)	6	6	3
<b>Plastic Points</b>				
<b>Ankernormalkraft</b>				
<b> u  Firste [mm]</b>	37	36	36	34
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	39	39	37
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	33	33	29

Um den Ankerkraftverlauf besser zu veranschaulichen, werden entlang der in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, die Normalkräfte in Abbildung 66 und Abbildung 67 gegenübergestellt.

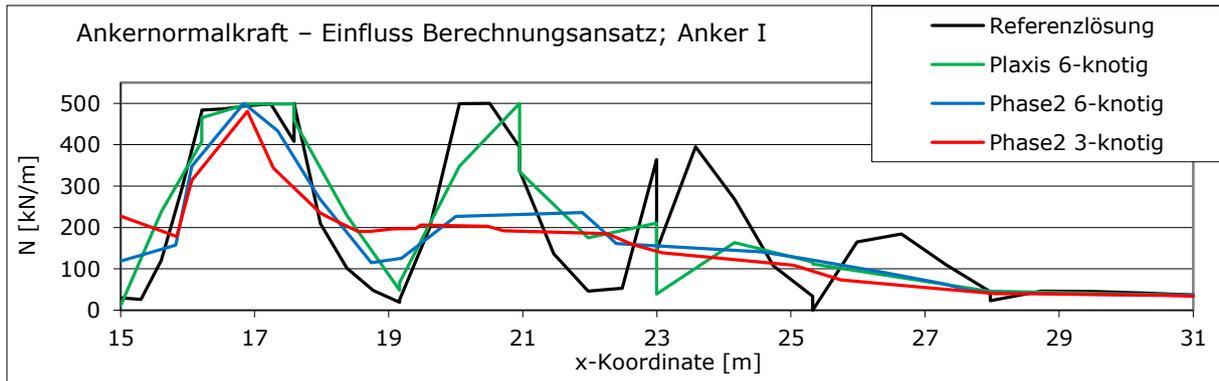


Abbildung 66: Ankernormalkraft – Einfluss Berechnungsansatz; Anker I

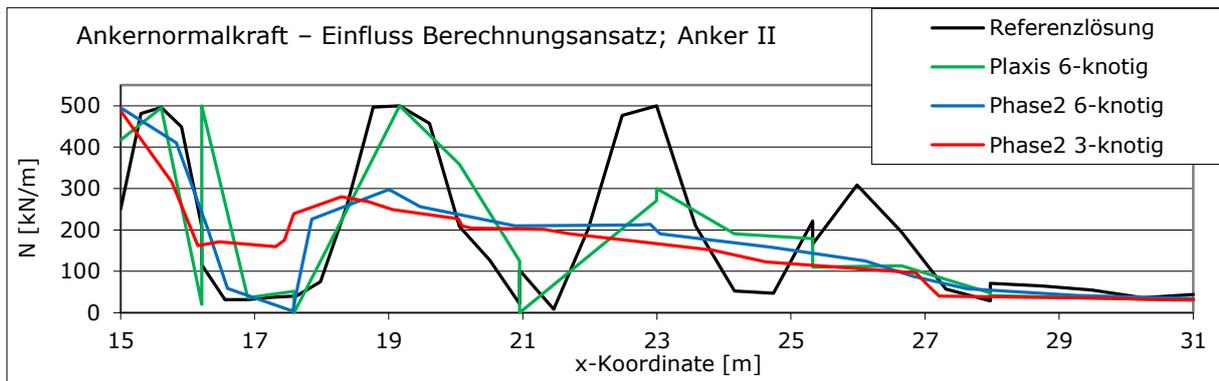


Abbildung 67: Ankernormalkraft – Einfluss Berechnungsansatz; Anker II

Da in PHASE2 das Verfeinern des Netzes relativ einfach geht, wurde das Netz sukzessive verfeinert, um zu untersuchen, ob sich die Ergebnisse an die Referenzlösung annähern. In Abbildung 68 und Abbildung 69 sind für dieselben Anker die Normalkräfte dargestellt.

Wie erwartet, nähert sich der Verlauf mit steigender Elementanzahl der Referenzlösung an. Vor allem bei den Wellen mit zunehmender Entfernung von der Kavernenwandung, ist der Einfluss der Netzfeinheit gut erkennbar.

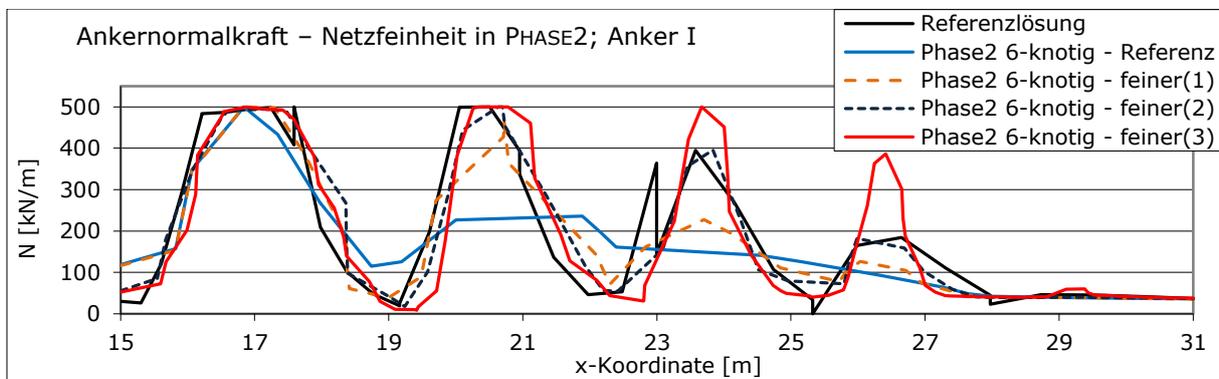


Abbildung 68: Ankernormalkraft – Netzfeinheit in PHASE2; Anker I

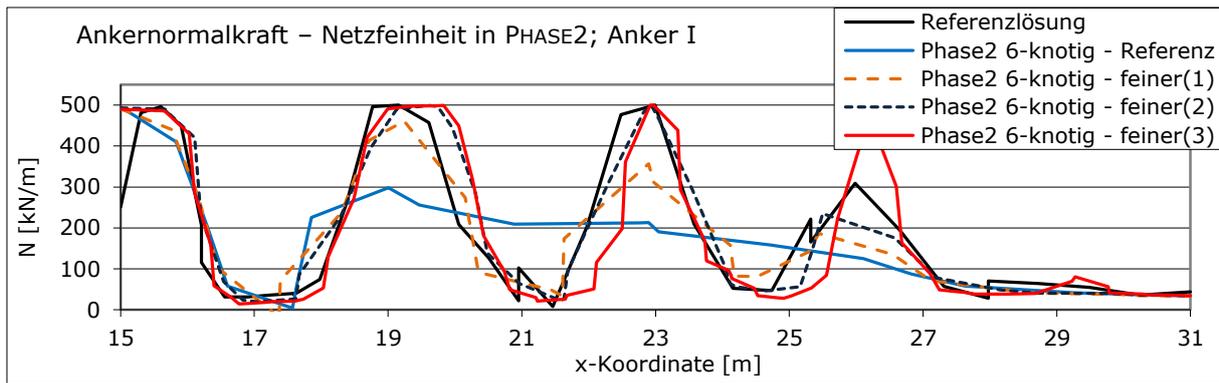
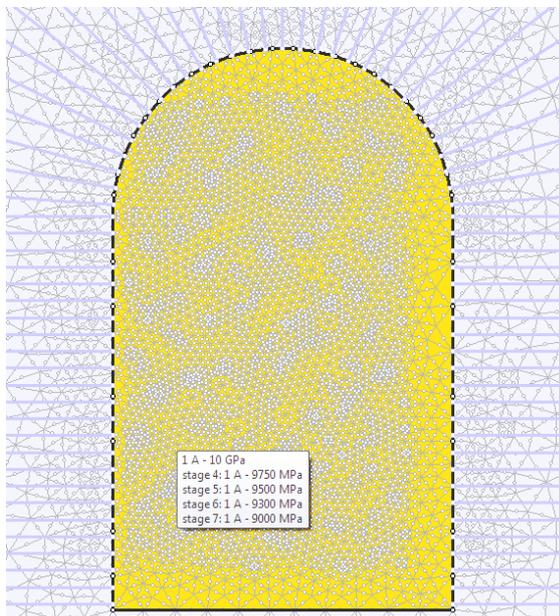


Abbildung 69: Anker Normalkraft – Netzfeinheit in PHASE2; Anker II

#### 4.4 Einfluss der Vorentlastung in PHASE2

Da für die ersten Vergleichsrechnungen mit PHASE2 V8 die „*induced stress*“-Funktion, welche als Pendant zur *M-Stage-Methode* aus PLAXIS2010 gesehen werden kann, noch nicht verfügbar war, wurde die Vorentlastung vorerst durch einen Materialwechsel simuliert. Zur Ermittlung der Materialsteifigkeit, welche die Vorentlastung simulieren sollte, wurde bei einer „*wished-in-place*“-Berechnung der E-Modul variiert (siehe Abbildung 70). Die Initialspannung des jeweiligen Materials wurde bei dem Materialwechsel auf null gesetzt.

Abbildung 70: „*wished-in-place*“-Berechnung - PHASE2

Ziel dieser Methode war, durch einen Materialwechsel 30% der Primärspannungen abzubauen, denn genau das würde der *M-Stage-Methode* aus PLAXIS2010 entsprechen. Natürlich wäre das nur ein Versuch die Vorentlastung zu simulieren, da das Referenzmodell in mehreren Phasen berechnet wird. Mit jedem weiteren Materialausbruch würden neue Spannungsumlagerungen entstehen, auf welche der E-Modul des Austauschmaterials je Phase zu kalibrieren wäre.

Es wurde entlang der Ausbruchslinie ein Spannungszustand mit 70% der Primärspannung konstruiert. Das Ziel war nun einen E-Modul zu finden, welcher diesen Spannungszustand am besten widerspiegeln würde. In Abbildung 71 sind entlang der Kavernenausbruchslinie die Normalspannungen der verschiedenen Phasen aufgetragen.

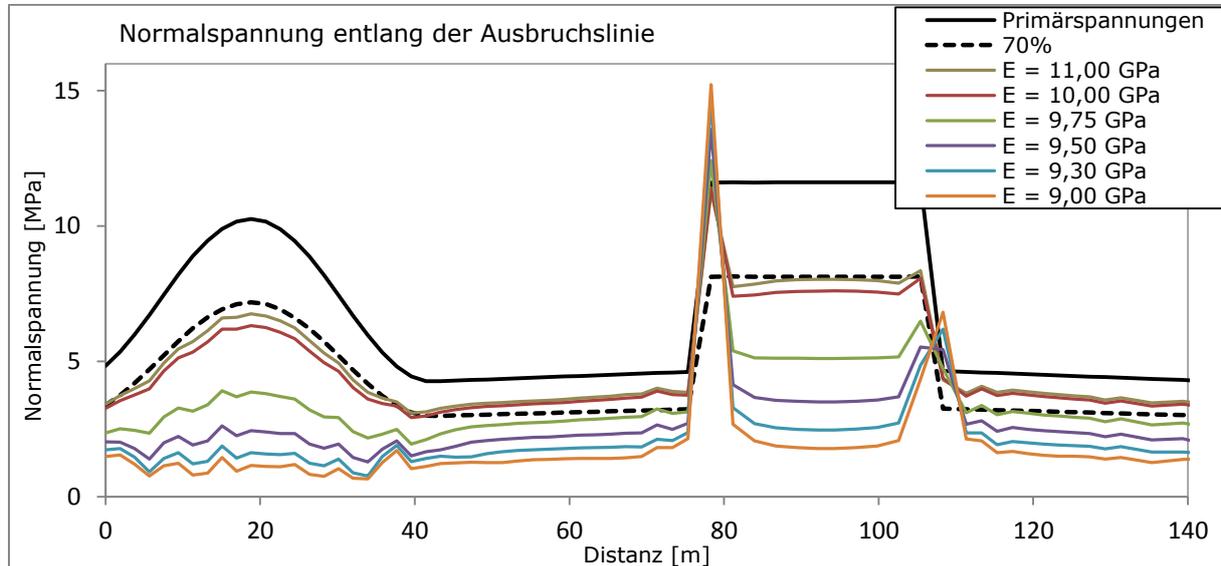


Abbildung 71: E-Modulbestimmung - PHASE2

Einerseits ist ersichtlich wie in den Eckbereichen der Kaverne Spannungsspitzen entstehen und andererseits, dass die Verläufe nicht einfach nur parallel verschobene Linien sind. Es entsteht durch die Spannungsumlagerung ein nicht zu beeinflussender Spannungszustand, der nie exakt an jeder Stelle den gleichen Spannungsabfall in Prozent besitzen wird.

Im Gegensatz zu der eben gezeigten Methode, ist die Simulation der Vorentlastung mit der „induced-stress“-Funktion sehr einfach und handlich. Wie in Abbildung 72 ersichtlich, wird in der Phase der Vorentlastung eine Last entlang der Ausbruchslinie aufgebracht, welche mit dem Faktor 0,7 genau 70% der Spannung der vorangegangenen Phase beträgt. Somit ist die Vorentlastung an jeder Stelle 30%.

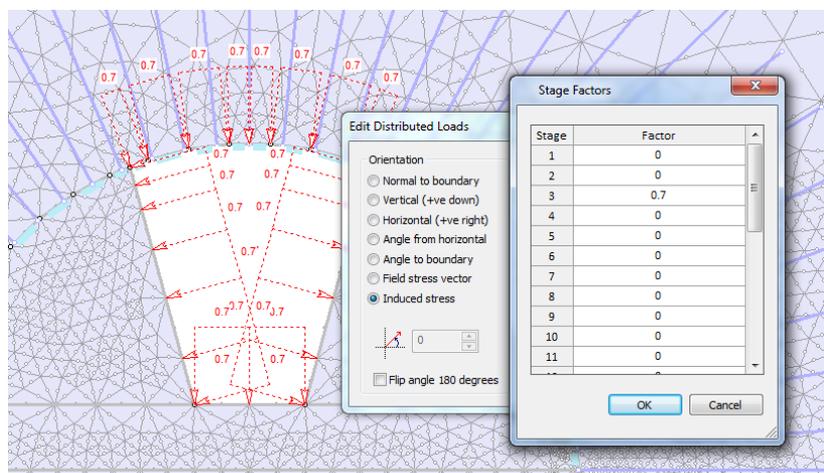


Abbildung 72: "induced stress"-Funktion

Für die Vergleichsrechnung dieser beiden Methoden wurde, bei ansonsten gleichen Bedingungen (4-m Aushubsequenz, Netzfeinheit 2), für die Methode mit dem Austauschmaterial ein E-Modul von 10 GPa gewählt.

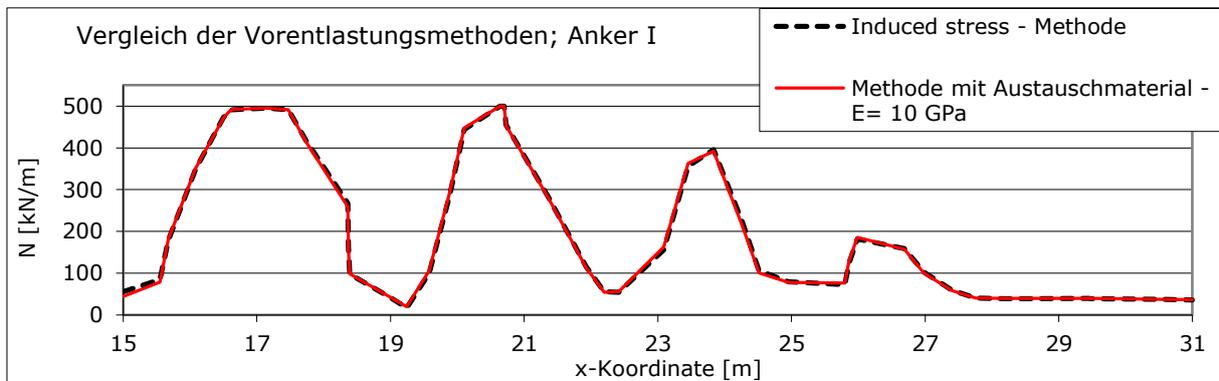


Abbildung 73: Vergleich der Vorentlastungsmethoden; Anker I

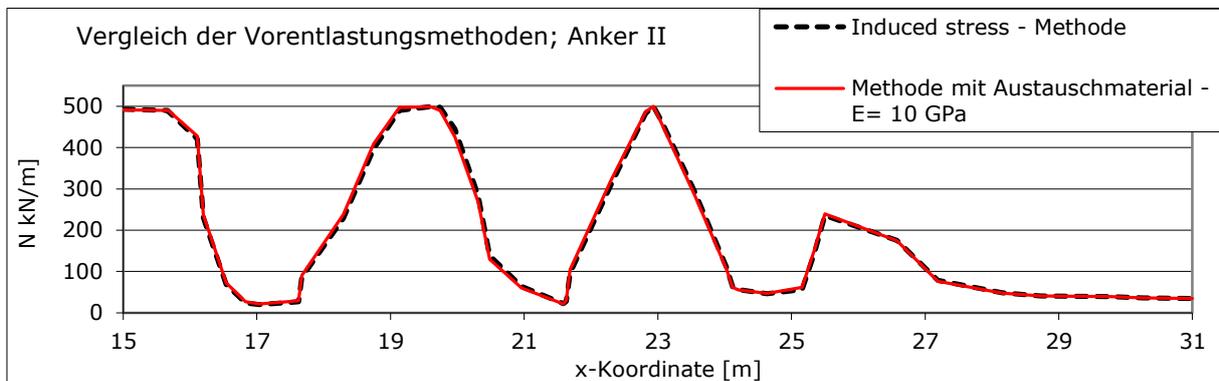


Abbildung 74: Vergleich der Vorentlastungsmethoden; Anker II

Erstaunlicherweise sind die Ergebnisse nahezu identisch, wie man in Abbildung 73 und Abbildung 74 sehen kann. Aufgrund dieser guten Übereinstimmungen liegt der Verdacht nahe, dass die Vorentlastung generell keinen allzu großen Einfluss auf die Entstehung der Wellen in der Ankernormalkraft hat. Um dies zu untersuchen, wurde das PHASE2-Modell wieder bei ansonsten gleichen Bedingungen (4-m Aushubsequenz, Netzfeinheit 2), einmal mit voller Vorentlastung (100%) und einmal ohne Vorentlastung (0%) berechnet.

In Abbildung 75 und Abbildung 76 sind die Verläufe gegenübergestellt. Man kann sehen, dass sich für eine Berechnung ohne Vorentlastung, für die Ankerkraftverläufe kaum Unterschiede ergeben würden. Im Gegensatz dazu würde bei einer 100%igen Vorentlastung die erste Welle im Normalkraftverlauf kaum entstehen, was auf den späteren Einbau der Anker zurückzuführen ist. Durch eine volle Vorentlastung entsteht zwar das gleiche Scherband im Kontinuum, jedoch wird der Anker erst in der darauffolgenden Phase wirksam. Dieser Vergleich wurde aus rein akademischen Gründen geführt und soll lediglich den allgemeinen Einfluss der Vorentlastung klären.

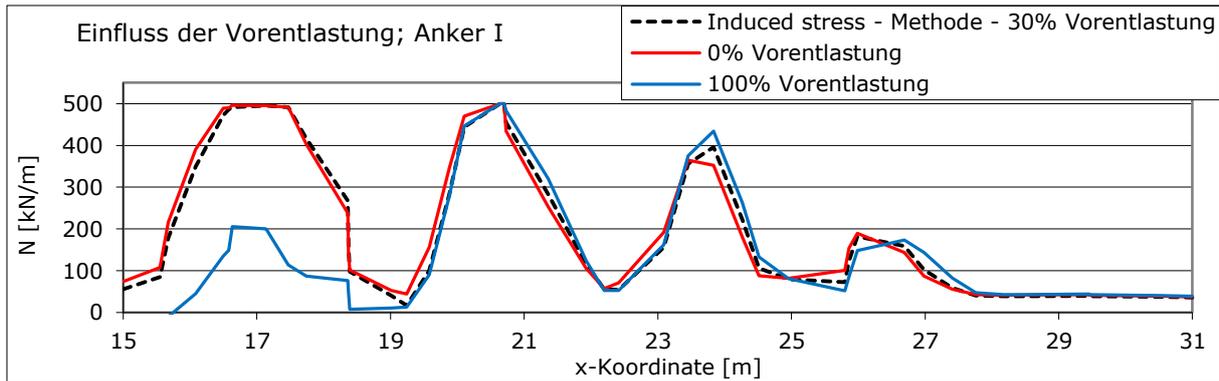


Abbildung 75: Einfluss der Vorentlastung; Anker I

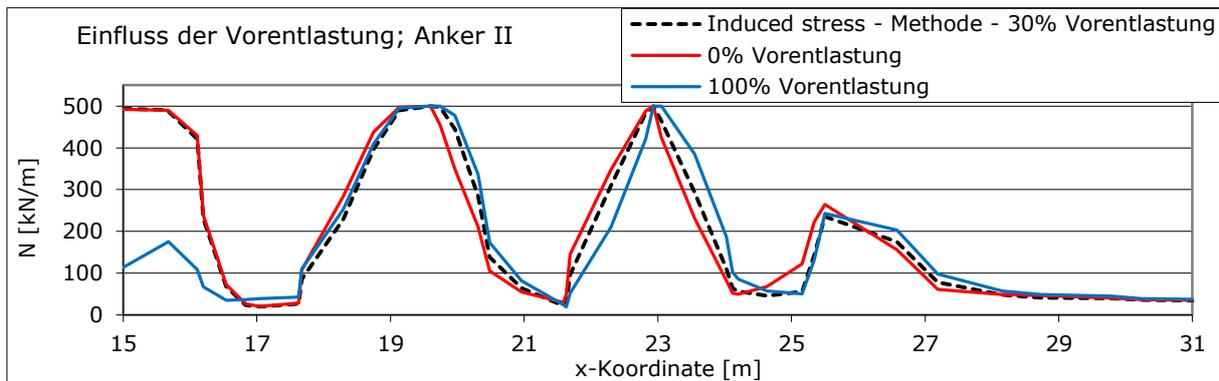


Abbildung 76: Einfluss der Vorentlastung; Anker II

#### 4.5 Schlussfolgerungen II

Die Berechnungen mit PHASE2 bestätigen die berechneten Ergebnisse aus PLAXIS2010 eindeutig. Trotz diverser Unterschiede in den Programmen, entwickelt sich der oszillierende Ankernormalkraftverlauf unter ähnlichen Randbedingungen (vor allem bei Berücksichtigung der Netzfeinheit und des Berechnungsansatzes) auf dieselbe Art und Weise. Da die Implementierung der Anker in das Netz und die Netzgenerierung an sich sehr unterschiedlich sind, kann man natürlich auch nicht mit einer 100%igen Übereinstimmung rechnen. Unter Betracht dessen kann man sagen, dass das entstehende Phänomen des oszillierenden Ankernormalkraftverlaufs ein softwareunabhängiges Phänomen ist.

Klar wurde auch der starke Einfluss des Berechnungsansatzes aufgezeigt. Dieser Einfluss ist allgemein bekannt, wird aber oft unterschätzt. Hier wurde klar gezeigt, dass der Berechnungsansatz (ähnlich wie die Netzfeinheit) den größten Einfluss auf das Ergebnis des untersuchten Phänomens hat.

Ein leichter Einfluss auf die Wellen in der Ankernormalkraft ist durch die Vorentlastung zwar gegeben, jedoch besteht kein direkter Zusammenhang. Die Anker beginnen je nach Vorentlastung früher oder später im Kontinuum zu wirken und werden deshalb auch früher oder später in der Spannungsgeschichte des Kontinuums mitbeansprucht.

Die untersuchten Einflüsse und deren Auswirkung dieses Kapitels sind in Tabelle 27 übersichtsmäßig zusammengefasst.

Tabelle 27: Zusammenfassung der Einflüsse II

<b>Untersuchter Einfluss</b>	<b>Auswirkung auf Ankernormalkraftverlauf</b>
Software PHASE2	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt PLAXIS2010 direkt
Berechnungsansatz	Starker Einfluss → je höher, desto ausgeprägter
Vorentlastung	-

## 5 Vergleichsrechnung – PLAXIS 3D

Da sich die Frage stellte, ob das untersuchte Phänomen eventuell ein rein zweidimensionales Problem ist, wurde eine vereinfachte 3D-Berechnung mit der Software PLAXIS 3D 2010 durchgeführt. Bei 2D-Berechnungen werden die Anker, sowie auch alle anderen Elemente, als ebene Elemente mit unendlicher Tiefenausdehnung angesehen. Daher ist grundsätzlich zu untersuchen, ob bei den Ankern in einem dreidimensionalen Modell dieselben wellenförmigen Normalkraftverläufe entstehen.

### 5.1 Äquivalentes Modell

Da der Berechnungsaufwand bei 3D-Berechnungen allgemein intensiver ist, wurde eine Symmetrieebene eingeführt, wobei die rechte Seite modelliert wurde. Die Höhe (Z-Achse) des Modells bleibt somit gleich und die Breite (X-Achse) halbiert sich. Die Tiefe (Y-Achse) des Modells wurde mit 1,70 m festgelegt, da bei den Ankern das *out-of-plane spacing* des Referenzmodells ebenfalls 1,70 m beträgt. Dieses 3D-Modell entspricht somit einer 1,70 m dicken Scheibe, welche die „*plane strain*“-Bedingungen der 2D-Berechnungen widerspiegeln sollte, jedoch die Möglichkeit bietet, die Anker als Einzelelemente zu modellieren.

In folgenden Punkten werden die wichtigsten Unterschiede der Modellbildung in Kurzform geschildert.

**Überlagerungsschicht:** Aus nicht nachvollziehbaren Gründen funktionierte die Netzgenerierung bei einer 5-m-Überlagerungsschicht nicht. Daher wurde diese auf 10 m verdoppelt und die dazugehörige Wichte halbiert.

**Ankerdefinition:** Um die Anker als Einzelelemente zu modellieren, wurden „*Embedded piles*“ verwendet. Bei der Definition dieser kann einerseits keine Grenzlast eingegeben werden, und andererseits muss die maximal übertragbare Mantelreibung (*skin resistance*) angegeben werden. Da dies ein gänzlich anderer Zugang der Definition ist, wurde die übertragbare Mantelreibung variiert. Für die folgenden Untersuchungen wurden 300, 500 und 1000 kN/m für diesen Parameter verwendet.

**Vorentlastung:** Da in PLAXIS 3D eine etwaige Vorentlastung nur schwer modelliert werden kann und die vorherrschende Vorentlastung von 30% kaum einen Einfluss auf den entstehenden Ankernormalkraftverlauf hat (vgl. Kapitel 4.4), wurde das Modell ohne Vorentlastung (0% Vorentlastung) berechnet.

**Berechnungsansatz:** PLAXIS 3D verwendet standardmäßig 10-knotige Tetraeder-Elemente (vgl. Kapitel 2.1).

**Berechnungsschritte:** Einfachheitshalber wurde der Ausbruch der Kalotte in einem Schritt durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass der Ausbruch der Kalotte kaum einen Einfluss auf das untersuchte Phänomen hat. Für den Ausbruch der Strosse wurde, wie im Referenzmodell, eine 4-m-Sequenz verwendet.

In Abbildung 77 ist das Gesamtmodell in der letzten Phase dargestellt. In Abbildung 78 ist die Kaverne mit den modellierten Ankern, ebenfalls in der letzten Phase dargestellt, wobei die ausgehobenen Volumina der einzelnen Phasen auch ersichtlich sind.

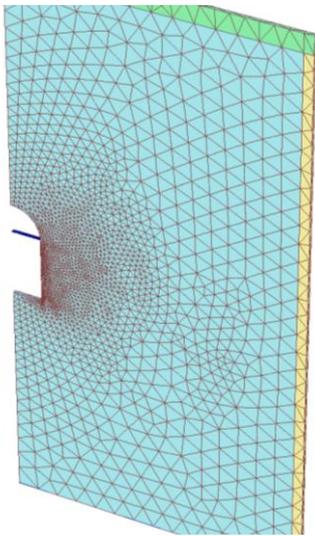


Abbildung 77: Gesamtmodell – PLAXIS 3D

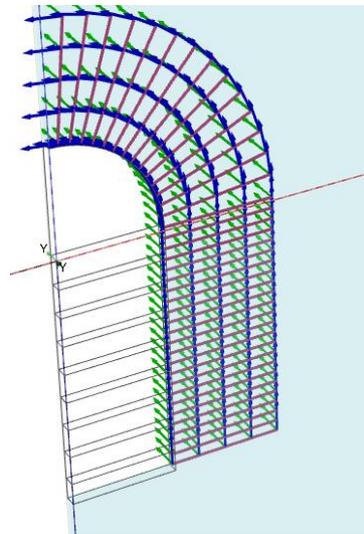


Abbildung 78: Kaverne – PLAXIS 3D

## 5.2 Ergebnisse

Als 3D-Referenz wurde für die „*embedded piles*“ eine *skin resistance* von 500 kN/m verwendet. Es ist ersichtlich, dass sich grundsätzlich für *Plastic Points* (siehe Abbildung 79) und Ankernormalkräfte (siehe Abbildung 80) das erwartete Phänomen einstellt. Da die „*embedded piles*“ nicht mit einer maximalen Zugfestigkeit begrenzt werden können, entstehen hier jedoch Kräfte bis über 1000 kN.

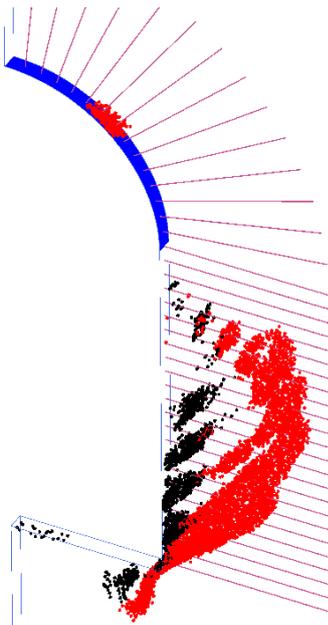


Abbildung 79: *Plastic Points* – PLAXIS 3D

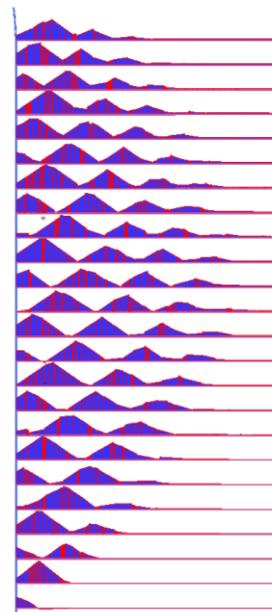


Abbildung 80: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D

Die dargestellte Gesamtverformung in Abbildung 81 passt qualitativ und quantitativ relativ gut mit jener der 2D-Referenz zusammen, ist jedoch tendenziell etwas geringer. Die maximalen Verformungen betragen in der Firste 35 mm, der Sohle 39 mm und in der Kavernenwandung 32 mm.

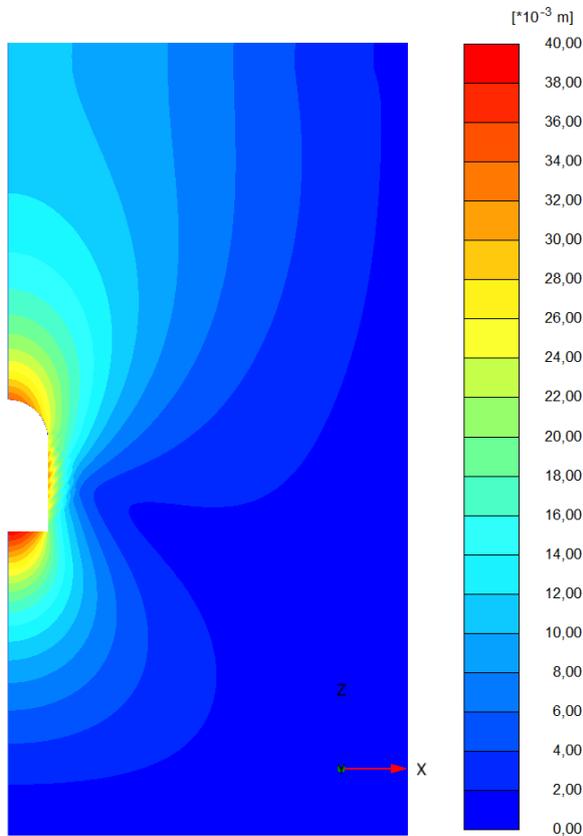


Abbildung 81: Gesamtverformung |u| – PLAXIS 3D

Um den Ankerkraftverlauf besser zu veranschaulichen, werden entlang der in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, die Normalkräfte in Abbildung 82 und Abbildung 83 dargestellt. Die Ergebnisse aus der 3D-Berechnung wurden auf 1 m normiert, um sie mit den 2D-Ergebnissen vergleichen zu können.

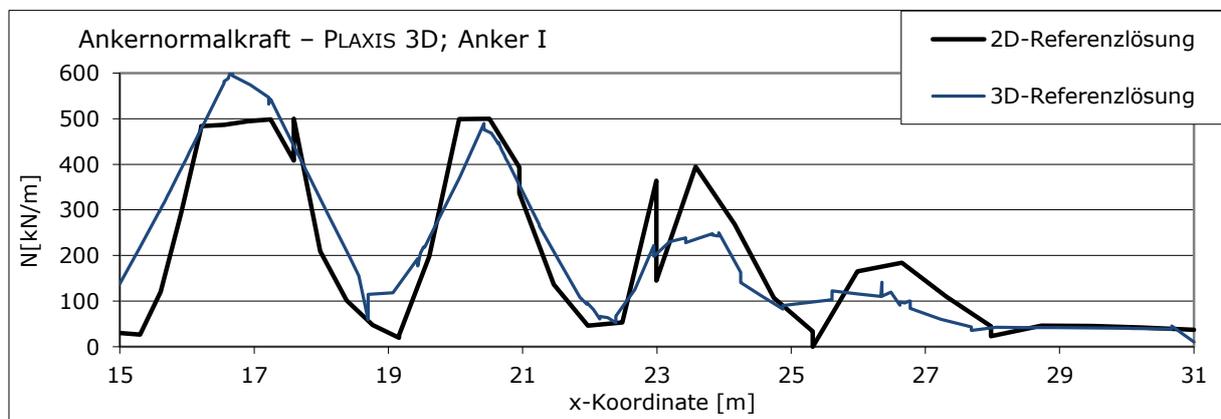


Abbildung 82: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D; Anker I

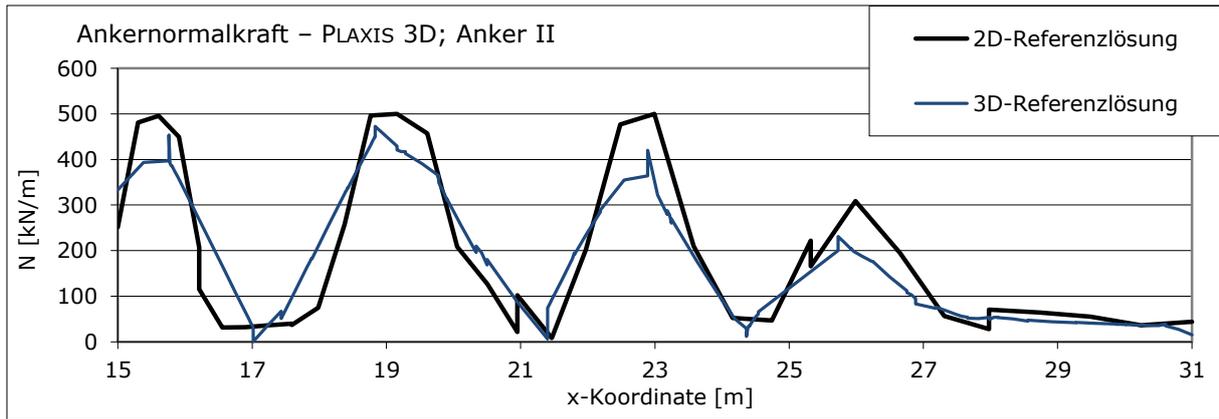


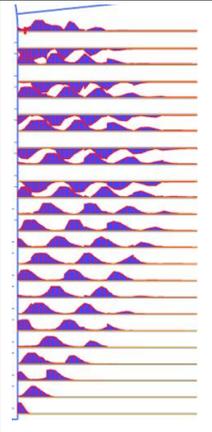
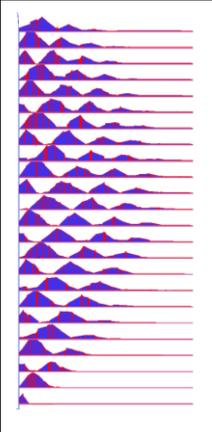
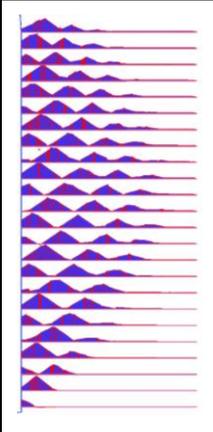
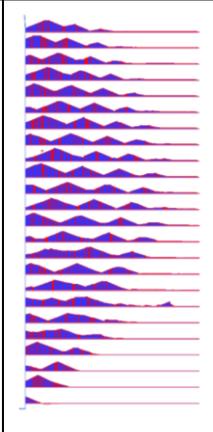
Abbildung 83: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D; Anker II

Es ergeben sich Lage und Anzahl der Wellen im Normalkraftverlauf auf dieselbe Art und Weise. Da sich die Normalkraft nicht begrenzen lässt, kann dies zu höheren Spitzenwerten führen (siehe erste Welle in Abbildung 82). Der Anstieg (bzw. Abfall) der Normalkraft ist durch die *skin resistance* von 500 kN/m begrenzt, wie auch an der konstanten Steigung der Wellen zu erkennen ist.

In folgender Tabelle sind die Ergebnisse der 3D-Berechnung zusammengefasst. Bei der 2D-Referenzberechnung mit *Geogrid-Elementen* gibt es keine Begrenzung der aufnehmbaren Mantelreibung, daher wird dieser Wert hier mit „unendlich“ ( $\infty$ ) bezeichnet.

Tabelle 28: Matrixdarstellung – Ergebnisse PLAXIS 3D

<b>Skin resistance [kN/m]</b>	$\infty$ (Referenz)	<b>1000</b>	<b>500</b>	<b>300</b>
<b>Plastic Points</b>				

<b>Ankernormalkraft</b>				
<b> u  Firste [mm]</b>	37	35	35	35
<b> u  Sohle [mm]</b>	41	39	39	39
<b> u  Wandung [mm]</b>	39	32	32	34

Um den Ankerkraftverlauf besser zu veranschaulichen, werden entlang der in Kapitel 3.3.6 definierten Anker, die Normalkräfte in Abbildung 84 und Abbildung 85 gegenübergestellt.

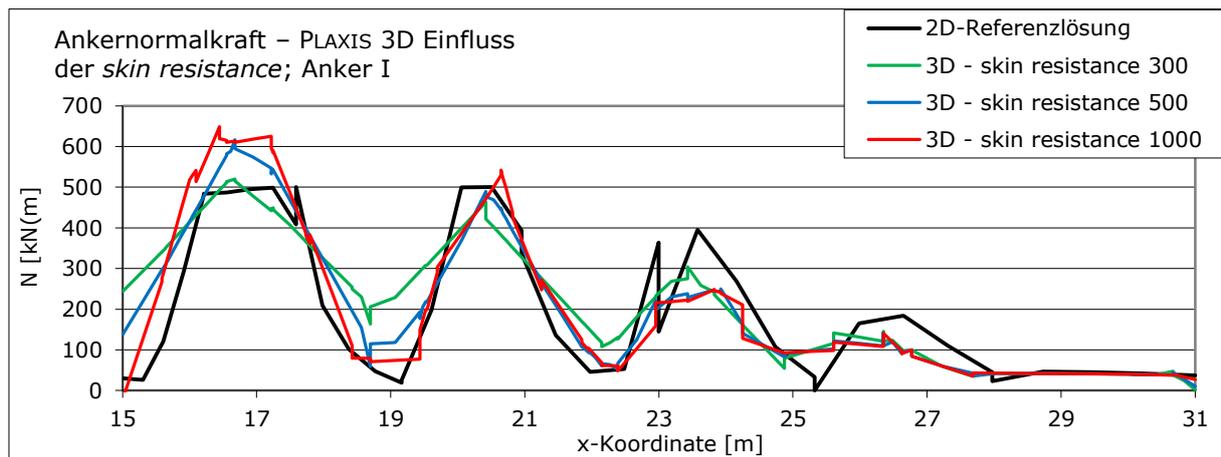


Abbildung 84: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D Einfluss der *skin resistance*; Anker I

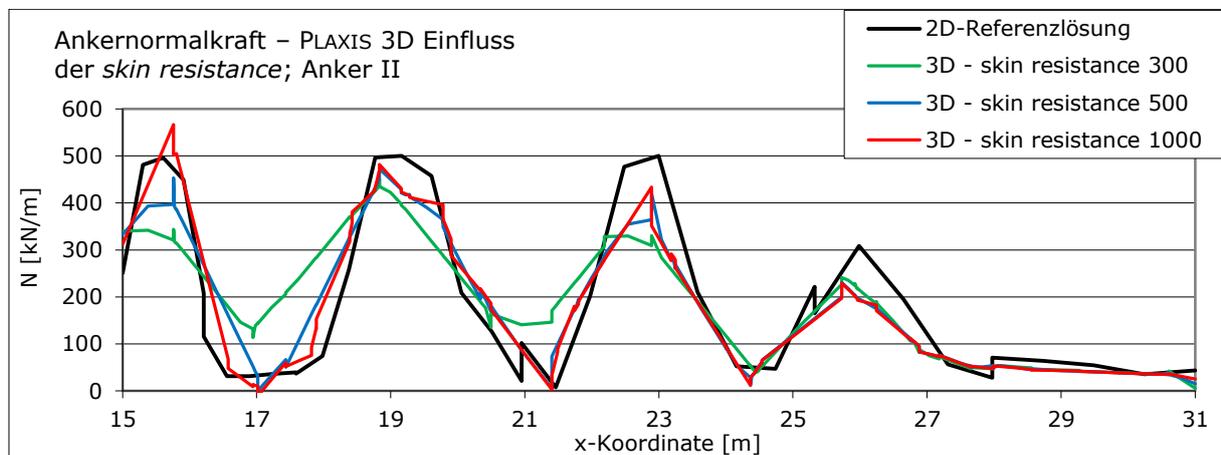


Abbildung 85: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D Einfluss der *skin resistance*; Anker II

### 5.3 Schlussfolgerungen III

Die Berechnungen mit PLAXIS 3D bestätigen die Ergebnisse aus PLAXIS2010 und es wird klar, dass das untersuchte Phänomen nicht auf die 2D-Modellierung der Anker zurückzuführen ist. Trotz diverser Vereinfachungen und Unterschiede in den Programmen, entwickelt sich der oszillierende Normalkraftverlauf unter ähnlichen Randbedingungen, auf dieselbe Art und Weise.

Wie in Tabelle 28, Abbildung 84 und Abbildung 85 zu erkennen ist, wird mit einer geringer aufnehmbaren Mantelreibung (*skin resistance*) der Normalkraftverlauf, in Bezug auf die Ausprägung der Wellen, schwächer. Dadurch liegen die Tiefpunkte des Verlaufs höher und die Hochpunkte des Verlaufs niedriger. Es entsteht eine Art Verschmierung des Ankerkraftverlaufs. Diese Erkenntnis ist insofern interessant, weil unter realistischen Bedingungen ebenfalls ein solcher Effekt zu erwarten wäre. Je nachgiebiger die Verbindung zwischen Anker und Fels wird, desto stärker wird der Ankernormalkraftverlauf homogenisiert.

Die untersuchten Einflüsse und deren Auswirkung dieses Kapitels sind in Tabelle 29 übersichtsmäßig zusammengefasst.

Tabelle 29: Zusammenfassung der Einflüsse III

Untersuchter Einfluss	Auswirkung auf Ankernormalkraftverlauf
Software PLAXIS 3D	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt PLAXIS2010 indirekt
Ankerdefinition	Starker Einfluss → je starrer, desto ausgeprägter

## 6 Zusammenfassung & Ausblick

In dieser Arbeit wurde das numerische Phänomen des oszillierenden Ankernormalkraftverlaufes bei FE-Berechnungen untersucht. Die Auswertung und Interpretation der Berechnungen führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Eine aushubbedingte Spannungsumlagerung führt bei dementsprechenden Gegebenheiten zu einem überbeanspruchten Bereich. Der Grad der Überbeanspruchung ist allgemein vom Primärspannungszustand, den Abmessungen der Kaverne und den angesetzten Materialparameter abhängig.
- Es entsteht eine plastische Zone, wobei sich numerisch die plastischen Dehnungen, im untersuchten Fall, in Scherbändern konzentrieren. Die konkrete Ausbildung der entstehenden Scherbänder ist einerseits durch die Phasendefinition und andererseits durch die Genauigkeit der Berechnung (Netzfeinheit und Berechnungsansatz) gegeben.
- Im Kreuzungsbereich der Scherbänder und der Anker entsteht dadurch eine lokale Beanspruchung in den modellierten Ankern. In Summe ergibt sich ein wellenförmiger Ankernormalkraftverlauf, welcher durch die softwareabhängige Ankerdefinition stärker oder schwächer ausprägt ist.

Da sich diese Erkenntnisse auf eine rein numerische Interpretation beziehen, bleibt fraglich, wie sich eine solche plastische Zone real ausbilden würde. Inhomogenitäten des Gebirges und schwer vorherzusehende dreidimensionale Umlagerungsprozesse könnten diese plastische Zone homogenisieren. Andererseits könnten Schwachstellen im Gebirge die Entstehung eines Scherbandes lokal begünstigen.

Bei einer realen Betrachtung der entstehenden Ankernormalkraft kann man davon ausgehen, dass der Mörtel zwischen Anker und Fels einen verschmierenden Effekt begünstigen würde. Des Weiteren würde die maximal aufnehmbare Mantelreibung diesen Verlauf ebenfalls verschmieren.

Abschließend sind alle untersuchten Einflüsse dieser Arbeit übersichtsmäßig in Tabellenform dargestellt (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: Zusammenfassung der untersuchten Einflüsse

Untersuchter Einfluss		Auswirkung auf Wellenbildung
PLAXIS 2D 2010	Aushubsequenz	Bestimmt Lage und Anzahl
	Dilatanz	-
	Zugfestigkeit	-
	Ausbau	-
	Ankerdefinition	-
	Stoffgesetz HS	Schwer zu vergleichen → bestätigt Wellenbildung indirekt
	Stoffgesetz HB	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt Wellenbildung direkt
	Netzfeinheit	Starker Einfluss → je feiner, desto ausgeprägter
PHASE2	Software PHASE2	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt PLAXIS2010 indirekt
	Berechnungsansatz	Starker Einfluss → je höher, desto ausgeprägter
	Vorentlastung	-
PLAXIS 3D	Software PLAXIS 3D	Ähnliche Ergebnisse → bestätigt PLAXIS2010 indirekt
	Ankerdefinition	Starker Einfluss → je starrer, desto ausgeprägter

## ANHANG

## Anhang A: Vollständiger Parametersatz – Referenzmodell

Tabelle 31: Parametersatz des Referenzmodells – Teil 1

<b>Material set</b> Identification number 1 Identification 1A Material model Mohr-Coulomb Drainage type Drained Colour RGB 161, 226, 232 Comments			<b>Material set</b> Identification number 2 3 Identification Seitenaufleger Überlagerung Material model Linear elastic Linear elastic Drainage type Drained Drained Colour RGB 134, 234, 162 RGB 11, 11, 9 Comments		
<b>General properties</b> $\gamma_{\text{unsat}}$ kN/m <sup>3</sup> 27,00 $\gamma_{\text{sat}}$ kN/m <sup>3</sup> 27,00			<b>General properties</b> $\gamma_{\text{unsat}}$ kN/m <sup>3</sup> 27,00 1350 $\gamma_{\text{sat}}$ kN/m <sup>3</sup> 27,00 1350		
<b>Advanced</b> <b>Void ratio</b> Dilatancy cut-off No $e_{\text{init}}$ 0,5000 $e_{\text{min}}$ 0,000 $e_{\text{max}}$ 999,0 <b>Damping</b> Rayleigh $\alpha$ 0,000 Rayleigh $\beta$ 0,000			<b>Advanced</b> <b>Void ratio</b> Dilatancy cut-off No No $e_{\text{init}}$ 0,5000 0,5000 $e_{\text{min}}$ 0,000 0,000 $e_{\text{max}}$ 999,0 999,0 <b>Damping</b> Rayleigh $\alpha$ 0,000 0,000 Rayleigh $\beta$ 0,000 0,000		
<b>Stiffness</b> E kN/m <sup>2</sup> 10,00E6 $\nu$ (nu) 0,2500			<b>Stiffness</b> E kN/m <sup>2</sup> 1,250E9 1,250E9 $\nu$ (nu) 0,000 0,000		
Identification 1A <b>Alternatives</b> G kN/m <sup>2</sup> 4,000E6 $E_{\text{oed}}$ kN/m <sup>2</sup> 12,00E6			Identification Seitenaufleger Überlagerung <b>Alternatives</b> G kN/m <sup>2</sup> 625,0E6 625,0E6 $E_{\text{oed}}$ kN/m <sup>2</sup> 1,250E9 1,250E9		
<b>Strength</b> $c_{\text{ref}}$ kN/m <sup>2</sup> 2000 $\varphi$ (phi) ° 40,00 $\psi$ (psi) ° 15,00			<b>Velocities</b> $V_s$ m/s 1205 $V_p$ m/s 2087		
<b>Velocities</b> $V_s$ m/s 1205 $V_p$ m/s 2087			<b>Advanced</b> Set to default values Yes Yes <b>Stiffness</b> $E_{\text{inc}}$ kN/m <sup>2</sup> /m 0,000 0,000 $Y_{\text{ref}}$ m 0,000 0,000		
<b>Strength</b> $c_{\text{inc}}$ kN/m <sup>2</sup> /m 0,000 $Y_{\text{ref}}$ m 0,000 Tension cut-off Yes Tensile strength kN/m <sup>2</sup> 200,0			<b>Undrained behaviour</b> Undrained behaviour Standard Standard Skempton-B 0,9933 0,9933 $\nu_u$ 0,4950 0,4950 $K_{w,\text{ref}} / n$ kN/m <sup>2</sup> 61,87E9 61,87E9		
<b>Undrained behaviour</b> Undrained behaviour Standard Skempton-B 0,9833 $\nu_u$ 0,4950 $K_{w,\text{ref}} / n$ kN/m <sup>2</sup> 392,0E6			<b>Consolidation</b> $C_{v,\text{ref}}$ m <sup>2</sup> /day 0,000 0,000		
<b>Strength</b> Strength Rigid $R_{\text{inter}}$ 1,000			<b>Strength</b> Strength Rigid Rigid $R_{\text{inter}}$ 1,000 1,000		
<b>Real interface thickness</b> $\delta_{\text{inter}}$ 0,000			<b>Real interface thickness</b> $\delta_{\text{inter}}$ 0,000 0,000		

Identification	1A	
<b>K0 settings</b>		
K <sub>0</sub> determination	Manual	
K <sub>0,x</sub> = K <sub>0,z</sub>	Yes	
K <sub>0,x</sub>	0,4000	
K <sub>0,z</sub>	0,4000	
<b>Overconsolidation</b>		
OCR	1,000	
POP	kN/m <sup>2</sup>	0,000
<b>Model</b>		
Data set	Standard	
Model	Van Genuchten	
Model	Van Genuchten	
<b>Soil</b>		
Subsoil/Topsoil	Subsoil	
Type	Coarse	
Type	Sand	
Type	Non-loamy sand (B1)	
Type	Non-loamy sand (O1)	
< 2 µm	%	10,00
2 µm - 50 µm	%	13,00
50 µm - 2 mm	%	77,00

Identification	1A	
<b>Model parameters</b>		
S <sub>res</sub>	0,06203	
S <sub>sat</sub>	1,000	
g <sub>n</sub>	1,377	
g <sub>a</sub>	1 / m	3,830
g <sub>l</sub>	1,250	
ψ <sub>k</sub>	m	-1,060
ψ <sub>s</sub>	m	-2,370
<b>Parameters</b>		
Set to default values	No	
k <sub>x</sub>	m/day	0,000
k <sub>z</sub>	m/day	0,000
k <sub>y</sub>	m/day	0,000
-V <sub>unsat</sub>	m	10,00E3
e <sub>init</sub>	0,5000	
<b>Change of permeability</b>		
c <sub>k</sub>	1,000E15	

Identification	Seitenaufleger	Überlagerung
<b>K0 settings</b>		
K <sub>0</sub> determination	Manual	Manual
K <sub>0,x</sub> = K <sub>0,z</sub>	Yes	Yes
K <sub>0,x</sub>	0,4000	0,4000
K <sub>0,z</sub>	0,4000	0,4000
<b>Overconsolidation</b>		
OCR	1,000	1,000
POP	kN/m <sup>2</sup>	0,000
<b>Model</b>		
Data set	Standard	Standard
Model	Van Genuchten	Van Genuchten
Model	Van Genuchten	Van Genuchten
<b>Soil</b>		
Subsoil/Topsoil	Subsoil	Subsoil
Type	Coarse	Coarse
Type	Sand	Sand
Type	Non-loamy sand (B1)	Non-loamy sand (B1)
Type	Non-loamy sand (O1)	Non-loamy sand (O1)
< 2 µm	%	10,00
2 µm - 50 µm	%	13,00
50 µm - 2 mm	%	77,00

Identification	Seitenaufleger	Überlagerung
<b>Model parameters</b>		
S <sub>res</sub>	0,06203	0,06203
S <sub>sat</sub>	1,000	1,000
g <sub>n</sub>	1,377	1,377
g <sub>a</sub>	1 / m	3,830
g <sub>l</sub>	1,250	1,250
ψ <sub>k</sub>	m	-1,060
ψ <sub>s</sub>	m	-2,370
<b>Parameters</b>		
Set to default values	No	No
k <sub>x</sub>	m/day	0,000
k <sub>z</sub>	m/day	0,000
k <sub>y</sub>	m/day	0,000
-V <sub>unsat</sub>	m	10,00E3
e <sub>init</sub>	0,5000	
<b>Change of permeability</b>		
c <sub>k</sub>	1,000E15	1,000E15

Identification	Seitenaufleger	Überlagerung
<b>Model parameters</b>		
S <sub>res</sub>	0,06203	0,06203
S <sub>sat</sub>	1,000	1,000
g <sub>n</sub>	1,377	1,377
g <sub>a</sub>	1 / m	3,830
g <sub>l</sub>	1,250	1,250
ψ <sub>k</sub>	m	-1,060
ψ <sub>s</sub>	m	-2,370
<b>Parameters</b>		
Set to default values	No	No
k <sub>x</sub>	m/day	0,000
k <sub>z</sub>	m/day	0,000
k <sub>y</sub>	m/day	0,000
-V <sub>unsat</sub>	m	10,00E3
e <sub>init</sub>	0,5000	
<b>Change of permeability</b>		
c <sub>k</sub>	1,000E15	1,000E15

Tabelle 32: Parametersatz des Referenzmodells – Teil 2

Anker - <i>Geogrid</i>		Spritzbetonschale - <i>Plate</i>	
<b>Material set</b> Identification number: 1 Identification: Anker L = 16 m Comments: Colour: RGB 255, 255, 0 Material type: Elastoplastic		<b>Material set</b> Identification number: 1 Identification: SpC 12cm jung Comments: E = 5 GPa Colour: RGB 242, 0, 255 Material type: Elastic	
<b>Properties</b> EA: kN/m 122,8E3 N <sub>p</sub> : kN/m 500,0		<b>Properties</b> EA: kN/m 600,0E3 EI: kN m <sup>2</sup> /m 720,0 d: m 0,1200 w: kN/m/m 3,000 v (nu): 0,1500 M <sub>p</sub> : kN m/m 1,000E15 N <sub>p</sub> : kN/m 1,000E15 Rayleigh α: 0,000 Rayleigh β: 0,000	

**Anhang B:** PLAXIS2010 – *Soiltest* für HS-Parametervariation

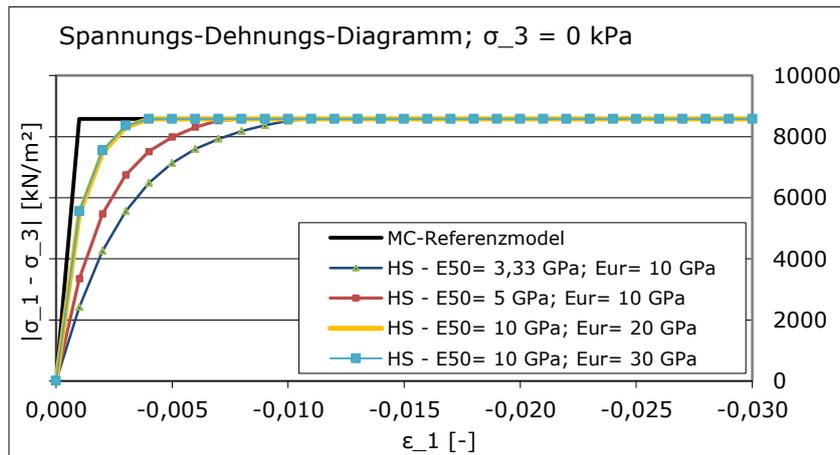


Abbildung 86: Spannungs-Dehnungs-Diagramm;  $\sigma_3 = 0$  kPa

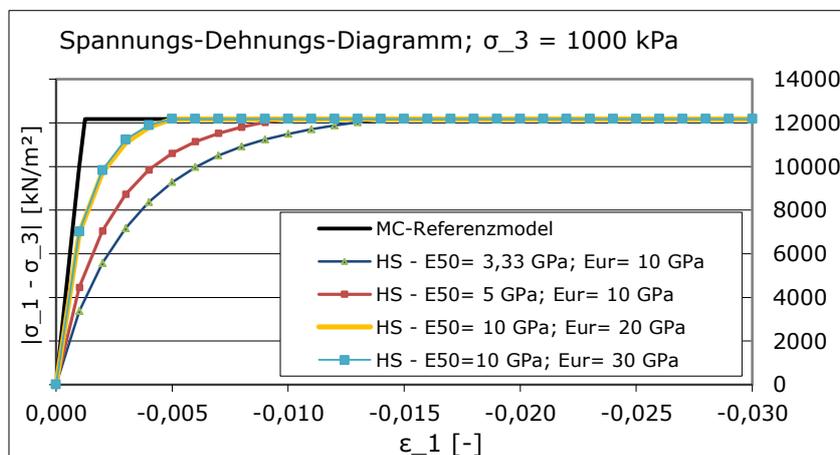


Abbildung 87: Spannungs-Dehnungs-Diagramm;  $\sigma_3 = 1000$  kPa

## Anhang C: Ergänzende Spannungspfade

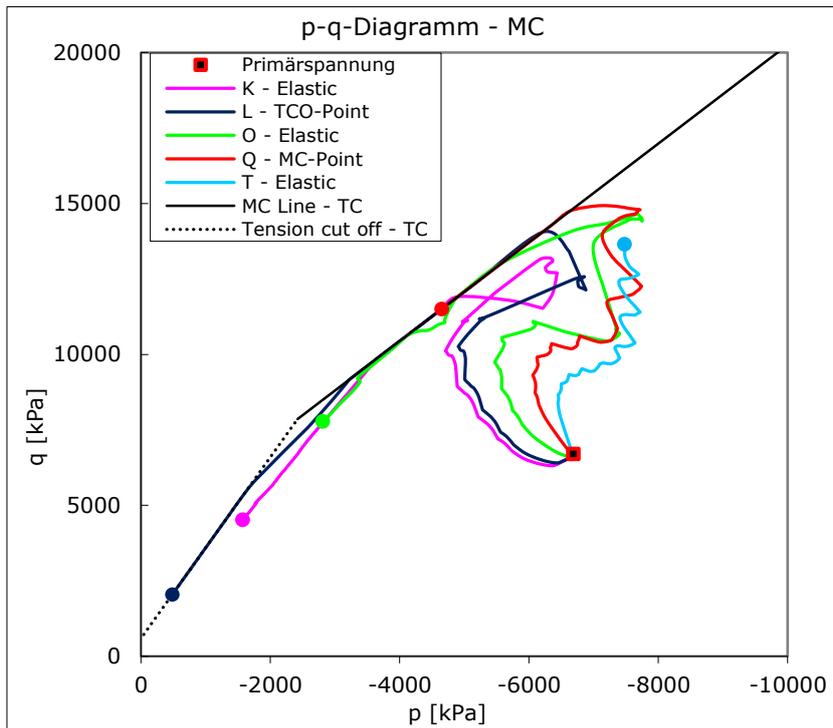


Abbildung 88: p-q-Diagramm - MC

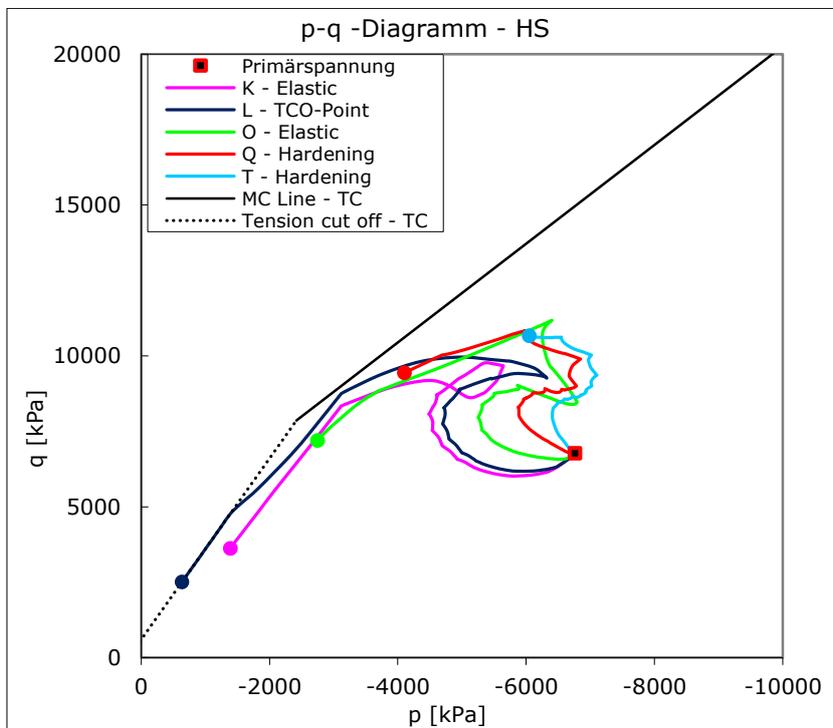


Abbildung 89: p-q-Diagramm - HS

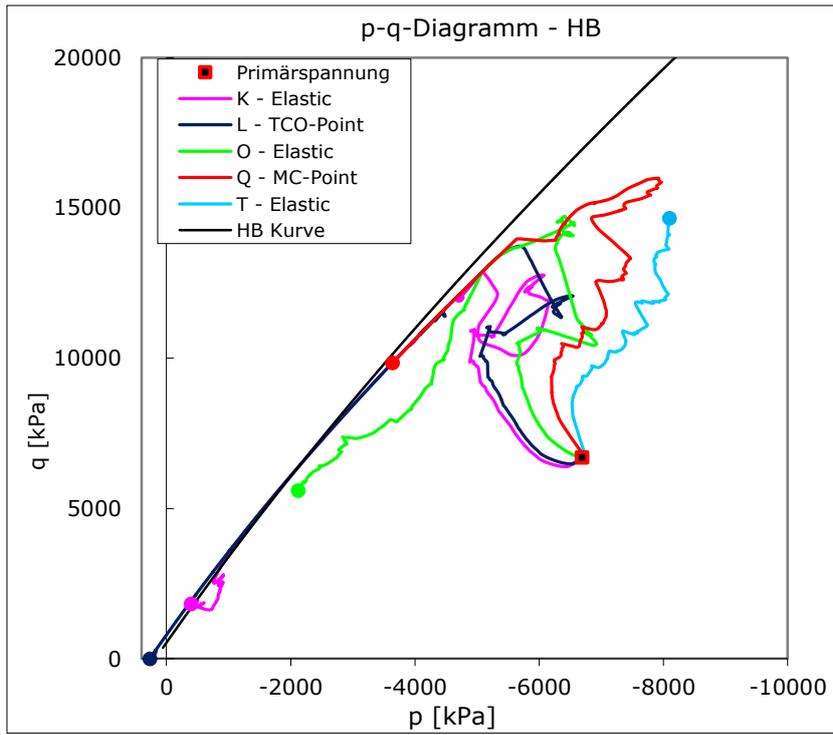


Abbildung 90: p-q-Diagramm - HB

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Repräsentativer Ankerkraftverlauf .....	1
Abbildung 2: Linearelastisches-idealplastisches Materialverhalten [2] .....	6
Abbildung 3: MC-Fließflächen im Hauptspannungsraum [2] .....	6
Abbildung 4: Elasto-plastisches Materialverhalten im HS-Modell [2].....	7
Abbildung 5: <i>Shear hardening</i> – schematisch [2].....	8
Abbildung 6: Elastischer Bereich – HS [2].....	8
Abbildung 7: HS-Fließflächen im Hauptspannungsraum [2].....	8
Abbildung 8: HB-Fließflächen im Hauptspannungsraum [2].....	9
Abbildung 9: Referenzmodell .....	10
Abbildung 10: Kavernengeometrie.....	10
Abbildung 11: Aushubabfolge.....	12
Abbildung 12: <i>Plastic Points</i> - Referenzmodell .....	13
Abbildung 13: Ankernormalkraft - Referenzmodell.....	13
Abbildung 14: Gesamtverformung $ u $ - Referenzmodell .....	14
Abbildung 15: Aushubabfolge für 2-m-Sequenz .....	15
Abbildung 16: Aushubabfolge für 35-m-Sequenz .....	15
Abbildung 17: Ausgewählte Anker – Darstellung der Ankernormalkräfte .....	22
Abbildung 18: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 1-4 m; Anker I .....	22
Abbildung 19: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 4-35 m; Anker I .....	22
Abbildung 20: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 1-4 m; Anker II.....	23
Abbildung 21: Ankernormalkraft – Einfluss der Aushubsequenz 4-35 m; Anker II .....	23
Abbildung 22: Ankernormalkraft – Einfluss der Dilatanz; Anker I .....	23
Abbildung 23: Ankernormalkraft – Einfluss der Dilatanz; Anker II.....	24
Abbildung 24: Ankernormalkraft – Einfluss der Zugfestigkeit; Anker I .....	24
Abbildung 25: Ankernormalkraft – Einfluss der Zugfestigkeit; Anker II.....	24
Abbildung 26: Ankernormalkraft – Einfluss des Ausbaus; Anker I .....	25
Abbildung 27: Ankernormalkraft – Einfluss des Ausbaus; Anker II .....	25
Abbildung 28: Ankernormalkraft – Einfluss der Ankersteifigkeit; Anker I .....	26
Abbildung 29: Ankernormalkraft – Einfluss der Ankersteifigkeit; Anker II .....	26
Abbildung 30: Ankernormalkraft – Anker als Balken; Anker I .....	26
Abbildung 31: Ankernormalkraft – Anker als Balken; Anker II .....	27
Abbildung 32: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HS; Anker I.....	30
Abbildung 33: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HS; Anker II.....	30
Abbildung 34: Ankernormalkraft – Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit - HS; Anker I .....	32
Abbildung 35: Ankernormalkraft – Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit - HS; Anker II .....	32
Abbildung 36: HB - Versagenskriterium.....	33
Abbildung 37: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HB; Anker I.....	35
Abbildung 38: Ankernormalkraft – Einfluss Stoffgesetz - HB; Anker II.....	35
Abbildung 39: Entwicklung der Normalkraft bei $Y = -16,50$ m .....	38
Abbildung 40: Entwicklung der Normalkraft bei $Y = -18,00$ m .....	39
Abbildung 41: Entwicklung der Normalkraft bei $Y = -19,50$ m .....	39
Abbildung 42: gewählte Spannungspunkte .....	40
Abbildung 43: $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - MC .....	41
Abbildung 44: $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - HS.....	42
Abbildung 45: $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm - HB.....	42

---

Abbildung 46: Detaillierte Betrachtung - Schnittführung .....	43
Abbildung 47: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt - $\sigma_{xx}$ .....	45
Abbildung 48: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt - $\sigma_{yy}$ .....	45
Abbildung 49: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt - $u_x$ .....	46
Abbildung 50: Vergleich der Stoffgesetze – Horizontalschnitt - $u_y$ .....	46
Abbildung 51: Ankernormalkraft – Einfluss der Netzfeinheit; Anker I .....	48
Abbildung 52: Ankernormalkraft – Einfluss der Netzfeinheit; Anker II .....	48
Abbildung 53: Einfluss der Randbedingungen - Schnittführung .....	49
Abbildung 54: Randbedingungen - Vertikalschnitt - $u_y$ .....	51
Abbildung 55: Randbedingungen - Vertikalschnitt - $\sigma_{xx}$ .....	51
Abbildung 56: Randbedingungen - Vertikalschnitt - $\sigma_{yy}$ .....	52
Abbildung 57: Randbedingungen – Horizontalschnitt - $\sigma_{xx}$ .....	52
Abbildung 58: Randbedingungen – Horizontalschnitt - $\sigma_{yy}$ .....	53
Abbildung 59: Randbedingungen – Horizontalschnitt - $u_x$ .....	53
Abbildung 60: Randbedingungen – Horizontalschnitt - $u_y$ .....	53
Abbildung 61: Gesamtmodell - PHASE2 .....	57
Abbildung 62: Kaverne – PHASE2 .....	57
Abbildung 63: <i>Plastic Points</i> – PHASE2.....	57
Abbildung 64: Normalkraft – PHASE2 .....	57
Abbildung 65: Gesamtverformung $ u $ – PHASE2.....	58
Abbildung 66: Ankernormalkraft – Einfluss Berechnungsansatz; Anker I.....	60
Abbildung 67: Ankernormalkraft – Einfluss Berechnungsansatz; Anker II .....	60
Abbildung 68: Ankernormalkraft – Netzfeinheit in PHASE2; Anker I.....	60
Abbildung 69: Ankernormalkraft – Netzfeinheit in PHASE2; Anker II.....	61
Abbildung 70: <i>"wished-in-place"</i> -Berechnung - PHASE2 .....	61
Abbildung 71: E-Modulbestimmung - PHASE2 .....	62
Abbildung 72: <i>"induced stress"</i> -Funktion .....	62
Abbildung 73: Vergleich der Vorentlastungsmethoden; Anker I .....	63
Abbildung 74: Vergleich der Vorentlastungsmethoden; Anker II .....	63
Abbildung 75: Einfluss der Vorentlastung; Anker I.....	64
Abbildung 76: Einfluss der Vorentlastung; Anker II.....	64
Abbildung 77: Gesamtmodell – PLAXIS 3D .....	67
Abbildung 78: Kaverne – PLAXIS 3D .....	67
Abbildung 79: <i>Plastic Points</i> – PLAXIS 3D .....	67
Abbildung 80: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D .....	67
Abbildung 81: Gesamtverformung $ u $ – PLAXIS 3D .....	68
Abbildung 82: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D; Anker I .....	68
Abbildung 83: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D; Anker II .....	69
Abbildung 84: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D Einfluss der <i>skin resistance</i> ; Anker I.....	70
Abbildung 85: Ankernormalkraft – PLAXIS 3D Einfluss der <i>skin resistance</i> ; Anker II .....	70
Abbildung 86: Spannungs-Dehnungs-Diagramm; $\sigma_3 = 0$ kPa .....	3
Abbildung 87: Spannungs-Dehnungs-Diagramm; $\sigma_3 = 1000$ kPa.....	3
Abbildung 88: p-q-Diagramm - MC .....	4
Abbildung 89: p-q-Diagramm - HS .....	4
Abbildung 90: p-q-Diagramm - HB .....	5

---

---

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Verwendete Elementtypen (aus [3] und [4]) .....	5
Tabelle 2: Parameter - <i>Soils</i> .....	11
Tabelle 3: Parameter - <i>Plates</i> .....	11
Tabelle 4: Parameter - <i>Geogrids</i> .....	11
Tabelle 5: Phasenabfolge.....	13
Tabelle 6: Matrixdarstellung - Einfluss der Aushubsequenz .....	16
Tabelle 7: Matrixdarstellung - Einfluss der Dilatanz.....	17
Tabelle 8: Matrixdarstellung - Einfluss der Zugfestigkeit.....	18
Tabelle 9: Matrixdarstellung - Einfluss des Ausbaus.....	19
Tabelle 10: Matrixdarstellung - Einfluss der Ankersteifigkeit.....	21
Tabelle 11: Matrixdarstellung - Variation der Steifigkeit bei HS .....	29
Tabelle 12: Matrixdarstellung - Einfluss Kohäsion und Zugfestigkeit bei HS.....	31
Tabelle 13: Materialparameter - HB .....	33
Tabelle 14: Matrixdarstellung - Einfluss HB-Stoffgesetz .....	34
Tabelle 15: Entwicklung der Ankernormalkraft über die Phasen .....	36
Tabelle 16: Zusammenhang $Pu_y$ - Ankernormalkraft .....	39
Tabelle 17: Matrixdarstellung - Spannungsdarstellungen der unterschiedlichen Stoffgesetze.....	44
Tabelle 18: Vergleich der Stoffgesetze - $u_x$ und $u_y$ .....	46
Tabelle 19: Matrixdarstellung - Einfluss der Netzfeinheit.....	47
Tabelle 20: Einfluss Randbedingung - Modellübersicht.....	49
Tabelle 21: Matrixdarstellung - Einfluss Randbedingung - $ u $ .....	50
Tabelle 22: Randbedingungen - Vertikalschnitt - $u_y$ .....	51
Tabelle 23: Randbedingungen - Horizontalschnitt - $u_x$ .....	54
Tabelle 24: Randbedingungen - Horizontalschnitt - $u_y$ .....	54
Tabelle 25: Zusammenfassung der Einflüsse I.....	55
Tabelle 26: Matrixdarstellung - Einfluss des Berechnungsansatzes .....	59
Tabelle 27: Zusammenfassung der Einflüsse II .....	65
Tabelle 28: Matrixdarstellung - Ergebnisse PLAXIS 3D .....	69
Tabelle 29: Zusammenfassung der Einflüsse III .....	71
Tabelle 30: Zusammenfassung der untersuchten Einflüsse .....	73
Tabelle 31: Parametersatz des Referenzmodells - Teil 1.....	1
Tabelle 32: Parametersatz des Referenzmodells - Teil 2.....	3

---

## Literaturverzeichnis

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode> (09.02.2012)
  - [2] Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., Engin E., „PLAXIS Material Models Manual 2010“.
  - [3] Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., Engin E., „PLAXIS Scientific Manual 2010“.
  - [4] <http://www.rocscience.com/downloads/phase2/webhelp/phase2.htm> (09.02.2012)
  - [5] <http://www.rocscience.com/products/3/Phase2> (13.03.2012)
-