

# Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)  
der Studienrichtung Rohstoffingenieurwesen

Masterstudium Rohstoffgewinnung und Tunnelbau  
Schwerpunktfach Geotechnik und Tunnelbau

eingereicht am

Lehrstuhl für Subsurface Engineering  
an der Montanuniversität Leoben

Rudolf Michael Sumann

Leoben, im August 2010

Thema:

Numerische Berechnungen zum  
Kennlinienverfahren unter  
Berücksichtigung eines  
Spritzbetonausbaus



## **EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **AFFIDAVIT**

In declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

In erster Linie bedanke ich mich bei meiner Familie, die mir während meines Studiums stets zur Seite gestanden ist. Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung diese Ausbildung erst ermöglicht haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler für die Betreuung bei der Fertigstellung dieser Abschlussarbeit, sowie für die Bereitstellung der Räumlichkeiten inklusive Inventars zur Bearbeitung der Aufgabenstellung.

Weiters möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Stefan Kainrath-Reumayer danken, der mir als Betreuer stets hilfreich zur Seite stand und mich bis zum Abschluss dieser Arbeit tatkräftig unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt meiner Freundin, die mit ihrer Geduld und Anteilnahme für Rückhalt in stressigen Zeiten sorgte.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und ganz besonders bei meinen Freunden bedanken, die mir während des Studiums auf unterschiedlichste Weise beistanden.

## Kurzfassung

Die ausgewerteten numerischen Berechnungsergebnisse aus FLAC<sup>3D</sup> liefern, gemessen an den analytischen Ansätzen nach Hoek und Vlachopoulos vergleichbare Werte. Im Vergleich mit den numerisch ermittelten Radialverschiebungsverläufen in Tunnellängsrichtung (LDP) ist ersichtlich, dass Vlachopoulos diese besser beschreibt als Hoek.

Der Einbau einer Spritzbetonschale hat diverse Einflüsse auf den Verschiebungsverlauf, welche mittels inkrementeller Anpassung des LDPs nach Vlachopoulos bestimmt werden, wobei die numerisch berechneten Ergebnisse nicht exakt mit diesen übereinstimmen. Einflüsse auf die LDPs vor und an der Orstbrust beeinträchtigen diese nachhaltig.

## Abstract

In comparison to the analytical solutions of Hoek and Vlachopoulos the numerical results of FLAC<sup>3D</sup> are quite comparable. Considering the numerical results Vlachopoulos describes the Longitudinal Deformation Profile (LDP) better than Hoek.

The installation of a shotcrete layer has several impacts on the radial deformation profile, which the incremental adjustment of the LDP of Vlachopoulos tries to cover. Nevertheless the adjusted LDP does not fit exactly. There are influences before and at the tunnel face, that affect the LDP.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>Annahmen und Voraussetzungen</b>	<b>6</b>
<b>4.2</b>	<b>Materialgesetz</b>	<b>6</b>
<b>4.3</b>	<b>Spannungsverteilung um den Hohlraum</b>	<b>7</b>
4.3.1	<i>Linear – Elastisches Materialverhalten</i>	7
4.3.2	<i>Elastisch – Idealplastisches Materialverhalten</i>	8
<b>4.4</b>	<b>Das Kennlinienverfahren</b>	<b>9</b>
4.4.1	<i>Die Gebirgskennlinie</i>	9
4.4.1.1	Radialverschiebungsverlauf in der plastischen Zone nach Sulem/Panet	11
4.4.1.2	Radialverschiebungsverlauf in der plastischen Zone nach Salençon	12
4.4.2	<i>Ausbaukennlinie von Spritzbeton</i>	13
4.4.2.1	Zeitunabhängiges Verhalten des Spritzbetons	13
4.4.2.2	Zeitabhängiges Verhalten des Spritzbetons	14
4.4.3	<i>Das Longitudinal Deformation Profile</i>	15
4.4.3.1	Hoek	15
4.4.3.2	Vlachopoulos	15
<b>4.5</b>	<b>Anpassung des LDP</b>	<b>16</b>
4.5.1	<i>Allgemein</i>	16
4.5.2	<i>Anpassung durch Ausbaustützdruck</i>	17
<b>5</b>	<b>Das Numerische Modell</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Allgemein</b>	<b>18</b>
<b>5.2</b>	<b>Netzerstellung</b>	<b>18</b>
5.2.1	<i>Breite und Höhe</i>	18
5.2.2	<i>Länge</i>	19
5.2.3	<i>Netzfeinheit</i>	20
5.2.4	<i>Boundary Conditions</i>	20
<b>5.3</b>	<b>Erstellen des LDP</b>	<b>21</b>
5.3.1	<i>Allgemein</i>	22

---

5.3.2	<i>Ohne Spritzbetonausbau</i> .....	23
5.3.3	<i>Mit Spritzbetonausbau</i> .....	24
5.3.3.1	<i>Spritzbeton - zeitunabhängig</i> .....	26
5.3.3.2	<i>Spritzbeton - zeitabhängig</i> .....	27
<b>6</b>	<b>Numerische Ergebnisse und Auswertung</b> .....	<b>29</b>
<b>6.1</b>	<b>Ohne Spritzbetonschale</b> .....	<b>29</b>
6.1.1	<i>LDP - absolute Verschiebungswerte</i> .....	29
6.1.2	<i>LDP - relative Anteile an der Maximalverschiebung</i> .....	33
<b>6.2</b>	<b>Mit Spritzbetonschale</b> .....	<b>36</b>
6.2.1	<i>Allgemein</i> .....	36
6.2.2	<i>Spritzbeton - zeitunabhängig</i> .....	37
6.2.2.1	<i>Einfluss des Einbauortes</i> .....	37
6.2.2.2	<i>Einfluss des Dicke des SpC-Ausbaus</i> .....	39
6.2.2.3	<i>Einfluss des E-Modul der SpC-Schale</i> .....	41
6.2.2.4	<i>Einfluss des E-Modul des Gebirges</i> .....	44
6.2.3	<i>Spritzbeton - zeitabhängig</i> .....	46
6.2.3.1	<i>Einfluss der Vortriebsgeschwindigkeit</i> .....	46
6.2.3.2	<i>Einfluss des Einbauortes</i> .....	49
6.2.3.3	<i>Einfluss des E-Moduls des Gebirges</i> .....	50
6.2.4	<i>Vergleich zeitun- mit zeitabhängigem SpC-Ausbau</i> .....	53
6.2.5	<i>Betrachtung inkrementelle Anpassung des LDP</i> .....	56
6.2.5.1	<i>Allgemein</i> .....	56
6.2.5.2	<i>SpC - zeitunabhängig</i> .....	57
6.2.5.3	<i>SpC - zeitabhängig</i> .....	59
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>70</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>71</b>
	<b>Anhang A</b>	
	<b>Anhang B</b>	

# 1 Problemstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit soll anhand zahlreicher Beispiele einen Vergleich zwischen numerischen und analytischen Berechnungen beinhalten. Dazu wird mittels des Finiten Differenzen Programms FLAC<sup>3D</sup> ein Tunnelvortrieb simuliert. Vorab werden Parametervariationen ohne Ausbau durchgeführt, um einen Abgleich zwischen Numerik und Analytik zu erhalten.

In weiterer Folge soll ermittelt werden, in wie weit die numerischen Ergebnisse von den unterschiedlichen analytischen Methoden zur Ermittlung der radialen Verschiebungsverläufe in Tunnellängsrichtung (LDP) divergieren. Der Einfluss eines Stützmitteleinbaus soll anhand der numerisch ermittelten Verschiebungsverläufe dargestellt werden. Als Ausbau wird in dieser Arbeit ausschließlich eine Spritzbetonschale berücksichtigt, welche in mehreren Variationen in das bestehende numerische Modell implementiert wird.

Abschließend soll bestimmt werden, in wie weit der Ansatz mittels inkrementeller Anpassung des LDP nach Kainrath-Reumayer und Gschwandtner [16][7], mit den Berechnungsergebnissen der Numerik korreliert und welche Unterschiede auftreten.

## 2 Zusammenfassung

Die Auswertung numerisch berechneter Beispiele und deren Vergleich mit dem analytischen Ansatz nach Vlachopoulos zur Bestimmung des radialen Verschiebungsverlaufes in Tunnellängsrichtung zeigen, dass absolut betrachtet durchaus vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.

Im Vergleich mit den numerisch generierten LDPs beschreibt Vlachopoulos den radialen Verschiebungsverlauf besser als Hoek, weshalb in weiterer Folge für den Vergleich lediglich der Berechnungsansatz nach Vlachopoulos herangezogen wird.

Bei Betrachtung der Berechnungen ohne Ausbau ist ersichtlich, dass sowohl absolut als auch relativ gesehen die numerisch ermittelten Werte für die Radialverschiebung an der Ortsbrust niedriger sind.

Bei Variation des Ausbaus wird augenscheinlich, dass Faktoren den Verschiebungsverlauf in Tunnellängsrichtung beeinflussen, sich der Einfluss erst nach der Ortsbrust deutlicher durch einen Abfall im LDP manifestiert. Darüber hinaus ist festzustellen, dass ein geringerer Einbauabstand des Ausbaus, ein höherer E-Modul der Schale, eine dickere Spritzbetonschale sowie eine geringere Vortriebsgeschwindigkeit anteilmäßig zu mehr Verschiebungen an der Ortsbrust führen.

Der Vergleich mit der inkrementellen Anpassung des LDP hinsichtlich des Kennlinienverfahrens liefert die Erkenntnis, dass die Einflüsse an und vor der Ortsbrust zu deutlichen Unterschieden führen und in weiterer Folge auch den Verschiebungsverlauf beeinträchtigen.

### **3 Einleitung**

Das Kennlinienverfahren stellt ein Verfahren zur Bemessung von tiefliegenden Tunnelvortrieben dar. Basierend auf einer Interaktion dreier Kennlinien soll ein Gleichgewicht durch den Ausbau gefunden werden. Zeitliche und örtliche Unterschiede des Stützmitteleinbaus beeinflussen den radialen Verschiebungsverlauf, weshalb eine Anpassung der Radialverschiebungsverteilung in Tunnellängsrichtung (LDP) erforderlich ist. Um erwähnte Anpassung des LDPs zu ermitteln werden in dieser Arbeit zahlreiche radiale Verschiebungsverläufe mittels Finite Differenzen Programm FLAC<sup>3D</sup> erstellt, um in erster Linie die analytischen Berechnungsansätze nachzustellen. In weiterer Folge sollen etwaige Einflüsse auf den numerisch generierten Verlauf aufgezeigt werden.



## 4 Allgemeine Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst analytische Berechnungsansätze angeführt und erläutert, welche für die Erstellung des später beschriebenen numerischen Modells maßgebend sind. Des Weiteren werden die Überlegungen betrachtet, welche für die Ausarbeitung und Behandlung des gegebenen Sachverhaltes essentiell sind.

### 4.1 Annahmen und Voraussetzungen

Maßgebend für die Erstellung des numerischen Modells für die folgenden Berechnungen sind die analytischen Spannungs- und Verschiebungsverläufe um den Hohlraum. Deren Anwendung setzt aber einige Randbedingungen voraus [1][3]:

- Homogenität und Isotropie des Gebirges
- Theorie der kreisrund gelochten Scheibe mit unendlicher Ausdehnung
- Hydrostatischer Spannungszustand ( $K=1$ )
- zentralsymmetrischer Ausbauwiderstand

Dem homogenen Gebirge werden ein Materialmodell und ein Stoffgesetz zugewiesen.

### 4.2 Materialgesetz

Für das Gebirge und den Ausbau wird das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb herangezogen, welches den Zusammenhang zwischen Normal-  $\sigma$  und Schubspannungen  $\tau$  in Abhängigkeit der Scherparameter Kohäsion  $c$  und Reibungswinkel  $\varphi$  darstellt.

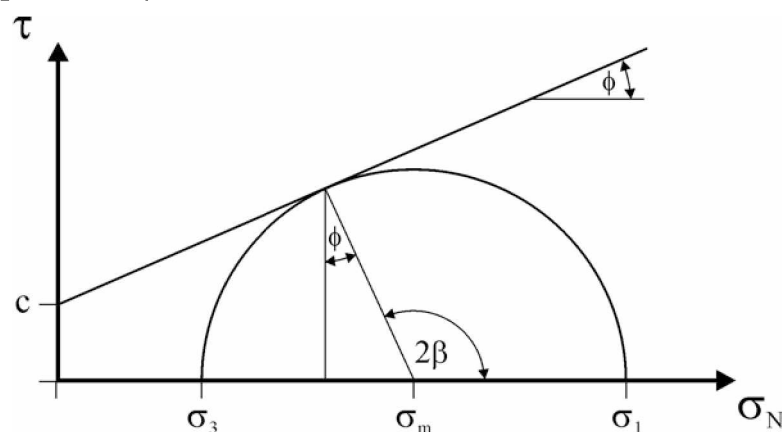


Abb. 4-1: Mohr'scher Spannungskreis [7]

$$\tau = c + \sigma_N \cdot \tan \varphi$$

Gl. 4-1: Zusammenhang Normal- und Schubspannung nach Coulomb

Dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb wird ein elastisches-idealplastisches Materialverhalten zugewiesen.

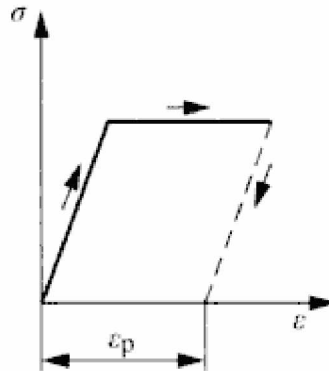


Abb. 4-2: Elastisch-Idealplastisches Materialverhalten [4]

In Abbildung 4-2 wird schematisch der Zusammenhang zwischen Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\epsilon$  dargestellt.

## 4.3 Spannungsverteilung um den Hohlraum

### 4.3.1 Linear – Elastisches Materialverhalten

Ausgehend von der Annahme eines ebenen Spannungszustandes einer gelochten Scheibe erstellten Lamé und in weiterer Folge Kirsch den formelmäßigen Zusammenhang für den Spannungsverlauf um den Hohlraum ins elastische Gebirge. Für die Annahme eines hydrostatischen Spannungszustandes ( $K=1$ ) vereinfachen sich die allgemein ausgeführten Formeln für Radial- und Tangentialspannungen um den Hohlraum:

$$\sigma_t(r) = \frac{\sigma_0}{2} \left[ (1+K) \cdot \left( 1 + \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right) - (1-K) \cdot \left( 1 + 3 \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^4 \right) \cdot \cos 2\alpha \right]$$

$$\sigma_r(r) = \frac{\sigma_0}{2} \left[ (1+K) \cdot \left( 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right) + (1-K) \cdot \left( 1 - 4 \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^4 \right) \cdot \cos 2\alpha \right]$$

Gl. 4-2: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf um den Hohlraum nach Kirsch [5]

für den Ulm ( $\alpha = 90^\circ$ ) zu folgenden Ausdrücken:

$$\sigma_t(r) = \sigma_0 \cdot \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_r(r) = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

Der Winkel ( $\alpha$ ) wird ausgehend vom Firstpunkt im Uhrzeigersinn gemessen. Es sei hier angemerkt, dass die formelmäßigen Zusammenhänge nach Seeber [5] an die Nomenklatur dieser Arbeit angepasst worden sind.

### 4.3.2 Elastisch – Idealplastisches Materialverhalten

Wird jedoch nach der Mohr-Coulomb'schen<sup>1</sup> Anstrengungshypothese der Grenzzustand von:

$$2 \cdot \sigma_0 \geq (K_p + 1) \cdot p_a + \sigma_{UCS}$$

*Gl. 4-3: Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb*

überschritten, bildet sich neben dem elastischen Bereich noch eine plastische Zone um den Hohlraum aus.

Formt man die angeführte Gl. 4-3 nach  $p_a$  um, liefert dies die Radialspannung am Übergang von der plastischen Zone in den elastischen Bereich, den sogenannten „kritischen Ausbaustützdruck“:  $\sigma_{re}$ .

Die Verläufe der Tangential- und Radialspannung am Hohlraumrand für die plastische Zone ergeben sich zu:

$$\sigma_{(t)} = -\frac{\sigma_{UCS}}{K_p - 1} + K_p \cdot \left(p_a + \frac{\sigma_{UCS}}{K_p - 1}\right) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{K_p - 1}$$

$$\sigma_{(r)} = -\frac{\sigma_{UCS}}{K_p - 1} \cdot \left(p_a + \frac{\sigma_{UCS}}{K_p - 1}\right) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{K_p - 1}$$

*Gl. 4-4: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf in der plastischen Zone für MC-Bruchkriterium [2]*

Im elastischen Bereich verhalten sich die Tangential- und die Radialspannungen gemäß folgender formelmäßiger Zusammenhänge:

$$\sigma_{(t)} = \sigma_0 + (\sigma_0 - \sigma_{re}) \cdot \left(\frac{r_p}{r}\right)^2$$

$$\sigma_{(r)} = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_{re}) \cdot \left(\frac{r_p}{r}\right)^2$$

*Gl. 4-5: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf im elastischen Bereich bei Auftreten einer plastischen Zone MC-Bruchkriterium [2]*

<sup>1</sup> Mohr-Coulomb = MC

Dabei ist  $\sigma_{re}$  der kritische Ausbaustützdruck nach der Anstrengungshypothese nach MC:

$$\sigma_{re} = \frac{1}{K_p + 1} (2 \cdot \sigma_0 - \sigma_{UCS})$$

*Gl. 4-6: Ermittlung des kritischen Ausbaustützdruckes*

und  $r_p$  stellt den plastischen Radius um den Hohlraum dar, welcher sich, durch Gleichsetzen der Radialspannungen am Übergang von elastischer auf die plastische Zone, wie folgt berechnet:

$$r_p = r \cdot \left\{ \frac{2}{K_p + 1} \cdot \frac{(K_p - 1) \cdot \sigma_0 + \sigma_{UCS}}{(K_p - 1) \cdot p_a + \sigma_{UCS}} \right\}^{\left(\frac{1}{K_p - 1}\right)}$$

*Gl. 4-7: Berechnung des plastischen Radius*

Formuliert wurden diese Zusammenhänge erstmals von Kastner [2].

## 4.4 Das Kennlinienverfahren

Das Kennlinienverfahren stellt ein analytisches und graphisches Modell dar, um durch Variation von Einbauzeit und -ort diverser Stützmittel, den erforderlichen Ausbau zu ermitteln. Anwendung findet diese Methode vor allem im tiefliegenden Tunnelbau [6].

Dieses Verfahren setzt sich aus drei unterschiedlichen Kennlinien zusammen, welche in diesem Abschnitt erläutert werden sollen.

### 4.4.1 Die Gebirgskennlinie<sup>2</sup>

Durch Kenntnis der radialen Verschiebungen am Hohlraumrand kann unter Annahme eines fiktiven inneren Stützdruckes, der beginnend bei  $\sigma_0$  (Primärspannungszustand) bis auf Null (kein innerer Stützdruck) kontinuierlich abgemindert wird, die Gebirgskennlinie erstellt werden [3].

Zur Ermittlung der Radialverschiebungen um den Hohlraum werden für diese Arbeit zwei Verfahren zur Bestimmung des Radialverschiebungsverlaufes herangezogen, zum Einen das nach Sulem/Panet [8] und zum Anderen das Verfahren nach Salençon [9].

Beiden Berechnungsansätzen liegt das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb zu Grunde. Weiters handelt es sich bei den angeführten Verfahren um zeitunabhängige Modelle, bei denen keine Entfestigung im post-failure Bereich auftritt [7].

Beide analytischen Berechnungsansätze unterstehen den Gesetzmäßigkeiten der MC - Anstrengungshypothese. Deshalb können einerseits beim Auftreten einer plastischen Zone, deren Größe dem zufolge

<sup>2</sup> Gebirgskennlinie = GKL

auch ident ist, die Tangential- und Radialspannungsverläufe im elastischen Bereich um den Hohlraum nach Gl. 4-5 berechnet werden. Zum Anderen unterliegen die radialen Hohlraumrandverschiebungen im elastischen Bereich demselben formelmäßigen Zusammenhang und ergeben sich nach [8] und [9] aus:

$$u_r(r) = (\sigma_0 - \sigma_{re}) \cdot \frac{r_p}{2 \cdot G} \cdot \frac{r_p}{r}$$

*Gl. 4-8: Bestimmung des Verschiebungsverlaufes im elastischen Bereich bei Auftreten einer plastischen Zone [8][9]*

Mit  $r_p$  wird der plastische Radius gemäß Gl. 4-7 in Rechnung gestellt. Bei Abwesenheit einer plastischen Zone kann  $r_p$  durch den Tunnelradius ersetzt werden.

$$u_r(r) = (\sigma_0 - \sigma_{re}) \cdot \frac{r_0}{2 \cdot G} \cdot \frac{r_0}{r}$$

*Gl. 4-9: Verschiebungsverlauf ohne plastische Zone*

Für den elastischen Zustand kann somit für die maximale Hohlraumrandverschiebung ( $r=r_0$ ), sowohl nach Sulem/Panet [8] als auch nach Salençon [9], vereinfacht angeschrieben werden:

$$u_r = r_0 \cdot \frac{\sigma_0 - p_a}{2 \cdot G}$$

Der Verlauf der Gebirgskennlinien im elastischen Bereich ist somit ident, wie in Abbildung 4-3 ersichtlich ist. Die unterschiedlichen GKL-Verläufe ergeben sich aus den voneinander verschiedenen Berechnungsansätzen für den Radialverschiebungsverlauf in der plastischen Zone.

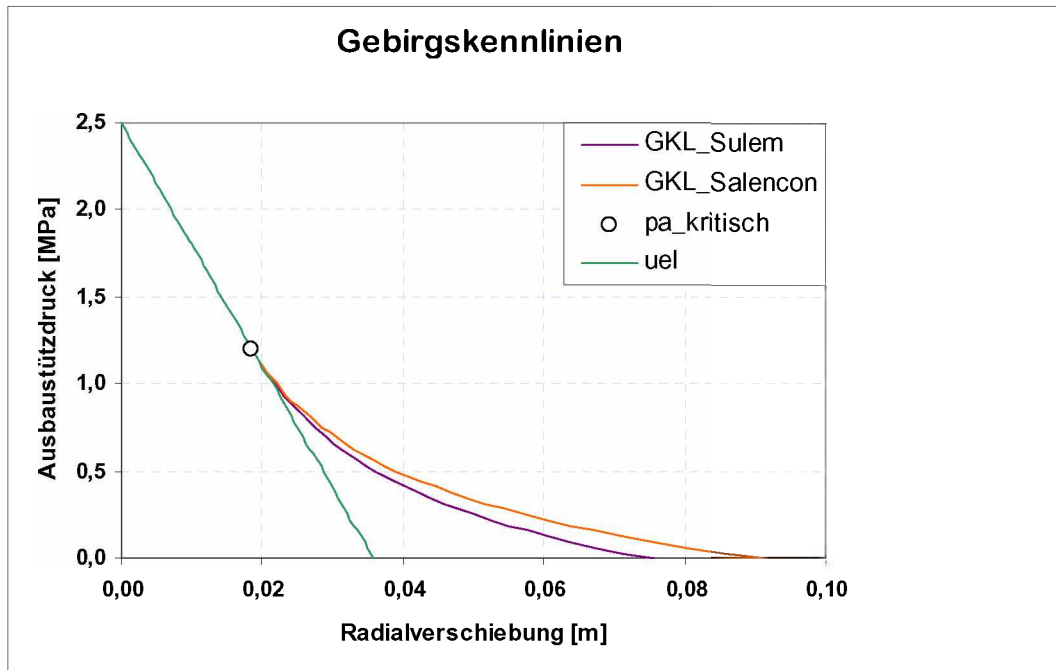


Abb. 4-3: GKL nach Sulem und Salençon

pa\_kritisch in Abbildung 4-3 entspricht  $\sigma_{re}$ , dem kritischen Ausbaustützdruck, ab dessen Unterschreiten sich ein plastisches Materialverhalten einstellt [3].

#### 4.4.1.1 Radialverschiebungsverlauf in der plastischen Zone nach Sulem/Panet

Für die Bestimmung der Radialverschiebung um den Hohlraum nach Sulem/Panet [8] wird in dieser Arbeit nur der zeitunabhängige Anteil der Radialverschiebung, zufolge des Tunnelvortriebes, behandelt. Der Kriechanteil der Radialverschiebungen infolge der Spannungsumlagerungen wird in dieser Arbeit vernachlässigt. Für die Ermittlung des Verschiebungsverlaufes in radialer Richtung um den Hohlraum wird beim Auftreten einer plastischen Zone ein Koeffizient  $\lambda_e$  verwendet.

$$\lambda_e = \frac{1}{K_p + 1} \cdot \left( K_p - 1 + \frac{\sigma_{UCS}}{\sigma_0} \right)$$

$$u_r(r) = r_0 \cdot \lambda_e \cdot \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \left( \frac{r_p}{r_0} \right)^2 \cdot \sigma_0$$

Gl. 4-10: Formelmäßige Zusammenhänge zur Bestimmung des Verschiebungsverlaufes in der plastischen Zone [8]

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Gl. 4-11: Berechnung von passivem Seitendruckbeiwert  $K_p$  und Bestimmung des Schubmodul  $G$  in Abhängigkeit von  $E$ -Modul und Querdehnzahl [8]

Am Hohlraumrand, wo die maximale Radialverschiebung auftritt, wird für „ $r$ “ der Tunnelradius  $r_0$  eingesetzt.

#### 4.4.1.2 Radialverschiebungsverlauf in der plastischen Zone nach Salençon

Salençon [9] berechnet sowohl die Spannungs- als auch die Radialverschiebungsverläufe im elastischen Bereich gleich wie Sulem/Panet gemäß Gl. 4-8 und Gl. 4-9. Salençon berücksichtigt zusätzlich eine Auflockerung der plastischen Zone unter Bestimmung eines Auflockerungsfaktors, welcher sich gemäß Gl. 4-12 aus dem Dilatationswinkel  $\psi$  berechnet:

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

Gl. 4-12: Ermittlung des Auflockerungsfaktors nach Salençon [9]

Somit ergibt sich eine größere maximale Hohlraumrandverschiebung (siehe Abbildung 4-3). Die radiale Verschiebung berechnet sich aus:

$$u_r(r) = r_0 \cdot \left(-\frac{\sigma_0}{2 \cdot G}\right) \cdot \frac{r}{r_0} \cdot \chi \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)$$

wobei:

$$\begin{aligned} \chi\left(\frac{r}{r_0}\right) &= (2 \cdot \nu - 1) \cdot \left(1 - \frac{q}{\sigma_0} \cdot k_p\right) \\ &+ \frac{(1 - \nu) \cdot (K_p^2 - 1)}{K_p + K_{ps}} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma_0} + \frac{q}{\sigma_0} \cdot k_p\right) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^{K_p + K_{ps}} \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-K_{ps} - 1} \\ &+ \left[(1 - \nu) \cdot \frac{K_p \cdot K_{ps} + 1}{K_p + K_{ps}} - \nu\right] \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma_0} + \frac{q}{\sigma_0} \cdot k_p\right) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{K_p - 1} \end{aligned}$$

Gl. 4-13: Formelmäßige Zusammenhänge zur Ermittlung des Verschiebungsverlaufes in der plastischen Zone nach Salençon [9]

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$k_p = \frac{1}{K_p - 1} \quad q = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p}$$

Gl. 4-14: Bestimmung des passiven Seitendruckbeiwertes  $K_p$  und der Berechnungsbeiwerte  $k_p$  und  $q$  nach Salençon [9]

## 4.4.2 Ausbaukennlinie<sup>3</sup> von Spritzbeton

Im Zuge dieser Arbeit wird als Stützmittel zur Hohlräumeicherung der Spritzbeton<sup>4</sup> betrachtet. Zentralsymmetrischer Einbau d.h. konstante Schalendicke am gesamten Hohlraumrand [3] und ein linear elastisches – idealplastisches Materialgesetz siehe Abbildung 4-2 werden bei diesem Ausbaustützmittel vorausgesetzt. Im Grunde genommen wirkt die AKL dem Druck des Gebirges am Hohlraumrand entgegen und soll die Verschiebungen kontrollieren [6][16].

Des Weiteren wird der Einfluss unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten auf den Ausbau mittels zeitabhängigen Verhaltens der Spritzbetonschale dargestellt.

### 4.4.2.1 Zeitunabhängiges Verhalten des Spritzbetons

Es werden einerseits Einbauort und –zeitpunkt variiert und andererseits unterschiedliche Schalendicken am Hohlraumrand aufgebracht, wobei für Spritzbeton charakteristische Parameter angenommen werden. Die AKL berechnet sich nach Gesta et al. [11], unter der Annahme, dass die Schalendicke  $d_{SpC} \ll r_0$  ist:

$$K_{SN} = \frac{E_{SpC}}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{d_{SpC}}{r_m}$$

Gl. 4-15: Ermittlung der Normalsteifigkeit [11]

wobei  $r_m$  der Radius ist, der bis Mitte der SpC-Schale gemessen wird.

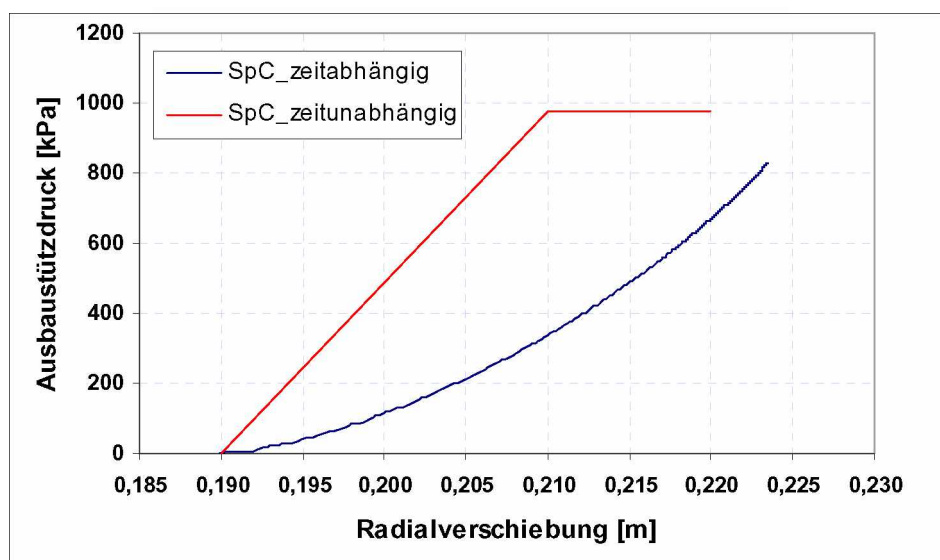


Abb. 4-4: AKL zeitun- und zeitabhängig

<sup>3</sup> Ausbaukennlinie = AKL

<sup>4</sup> Spritzbeton = SpC



In Abbildung 4-4 werden schematisch die Verläufe für einen Spritzbetonausbau dargestellt. Es wird hier Ausbaustützdruck über Radialverschiebung aufgetragen. Je steiler der Verlauf der AKL, desto steifer verhält sich der Ausbau. Bei der roten Linie handelt es sich um die AKL für Spritzbeton bei zeitunabhängiger Betrachtung. Die blaue Linie beschreibt die zeitabhängige AKL mit Aushärten des E-Moduls. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

#### 4.4.2.2 Zeitabhängiges Verhalten des Spritzbetons

Um ein zeitabhängiges Verhalten zu implementieren, wird ein Aushärten des E-Moduls angesetzt. In Abhängigkeit von verschiedenen Vortriebsgeschwindigkeiten<sup>5</sup> hat der Spritzbeton für den jeweiligen Abschnitt unterschiedlich lange Zeit, um seine Festigkeit zu entwickeln. In Abbildung 4-5 werden die Aushärtkurven für die in dieser Arbeit eingesetzten VGs skizziert. In Bezug auf den vorliegenden Sachverhalt wird hier der E-Modul über den Abstand zur Ortsbrust<sup>6</sup> aufgetragen. Basierend auf der jeweiligen VG ergibt sich für jeden einzelnen Abschnitt der gestützten Tunnelröhre ein zugehöriger E-Modul.

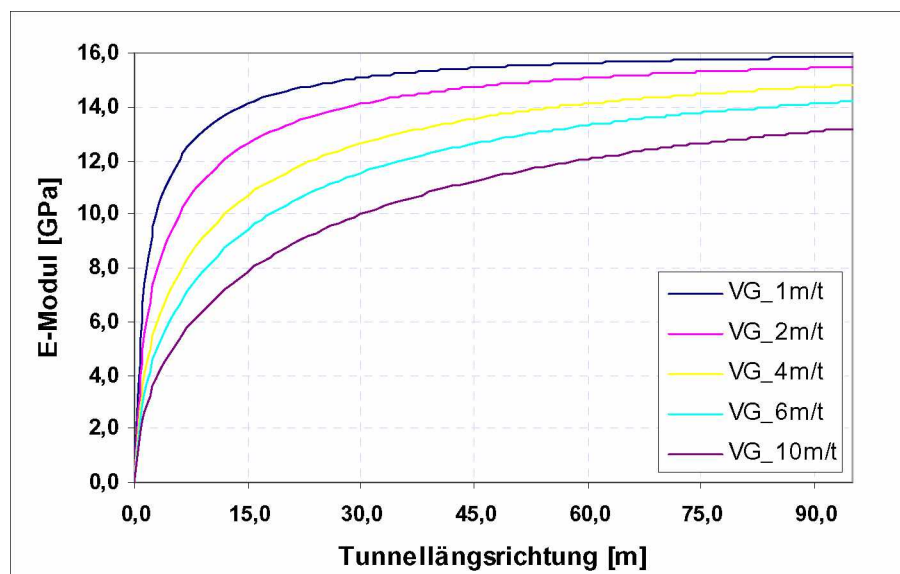


Abb. 4-5: E-Modul Entwicklung in Tunnellängsrichtung

Ausgegangen wird hier von der Annahme, dass sich der E-Modul des Spritzbetons nach seinem Aufbringen am Hohlraumrand folgendermaßen verhält:

<sup>5</sup> Vortriebsgeschwindigkeit = VG

<sup>6</sup> Ortsbrust = OB

$$E_{SpC}(t) = E_{SpC(28t)} \cdot \sqrt{\frac{t}{(4,2 + 0,85 \cdot t)}}$$

Gl. 4-16: E-Modul Entwicklung in Abhängigkeit von der Zeit [12]

In diesem Fall wird für (t) die Zeit in Tagen und für  $E_{SpC(28t)}$  der E-Modul, den der Spritzbeton nach 28 Tagen aufweist, eingesetzt. Es handelt sich hierbei um den Ansatz nach CEB-FIP (1978) [12]

### 4.4.3 Das Longitudinal Deformation Profile<sup>7</sup>

Mit Hilfe des LDPs wird der Verschiebungsverlauf der Radialverschiebungen in Tunnellängsrichtung nachgebildet. Um Einbauzeitpunkt und -ort berücksichtigen zu können, wird die bestehende zweidimensionale Darstellung um eine Dimension, in Tunnelachsrichtung, erweitert. Somit können örtliche und zeitliche Einflüsse auf die Radialverschiebungsverteilung berücksichtigt werden [6].

Als Vergleich zu den numerischen Ergebnissen dienen in dieser Arbeit zwei Berechnungsansätze, um den Radialverschiebungsverlauf in Tunnellängsrichtung zu beschreiben.

#### 4.4.3.1 Hoek

Gemäß Hoek [13] verhält sich der Radialverschiebungsverlauf in Tunnellängsrichtung nach folgendem formelmäßigen Zusammenhang:

$$u_r(x) = u_{pl(pi=0)\infty} \cdot \lambda$$

Gl. 4-17: LDP Ermittlung nach Hoek [13]

$$\lambda = \frac{1}{\left(1 + e^{\left(\frac{y}{0,55}\right)}\right)^{1,7}} \quad \text{und für } y \text{ gilt: } y = \frac{x}{2 \cdot r_0}$$

Gl. 4-18: Berechnungsbeiwerte für die LDP Ermittlung nach Hoek [13]

#### 4.4.3.2 Vlachopoulos

Dieser Berechnungsansatz berücksichtigt die Größe der plastischen Zone und differenziert zwischen einem Teil des LDPs vor und hinter der Ortsbrust. Demnach korrelieren die normierten Radialverschiebungen mit dem normierten plastischen Radius [10]. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich bei sämtlichen Darstellungen der Ortsbrustdurchgang bei Tunnellängsrichtung 0m befindet. Negative Abszissenwerte beschreiben den örtlichen Bereich vor, positive Werte entlang der x-Achse beschreiben den Abstand hinter der Ortsbrust, wie in Abbildung 4-6 dargestellt wird.

<sup>7</sup> Longitudinal Deformation Profile = LDP

Angeführt wird der durch Ausgleichsrechnung ermittelte analytische Ansatz nach Vlachopoulos [10]:

$$u_0^N = u_{r,\max} \cdot \frac{1}{3} \cdot e^{-0,15 \cdot R^*} \quad ; \quad R^* = \frac{r_p}{r} \quad ; \quad X^* = \frac{x}{r_0}$$

Gl. 4-19: Berechnungsbeiwerte nach Vlachopoulos [10]

$$\text{vor der OB } (x < 0): u_r^N(x) = u_0^N \cdot e^{X^*}$$

$$\text{hinter der OB } (x > 0): u_r^N(x) = 1 - (1 - u_0^N) \cdot e^{-\frac{3 \cdot X^*}{2 \cdot R^*}}$$

Gl. 4-20: LDP Ermittlung nach Vlachopoulos [10]

In Abbildung 4-6 werden die angeführten Berechnungsansätze miteinander verglichen. Bei den gleichen Gebirgskennwerten liefern die besagten Verfahren deutlich unterschiedliche Verläufe. Der Endwert der Radialverschiebungen ist derselbe, da beide Ansätze als Bezugswert die maximale Radialverschiebung gemäß Gl. 4-13 nach Salençon [9] verwenden. Dargestellt werden die absoluten Radialverschiebungswerte über die Tunnellängsrichtung.

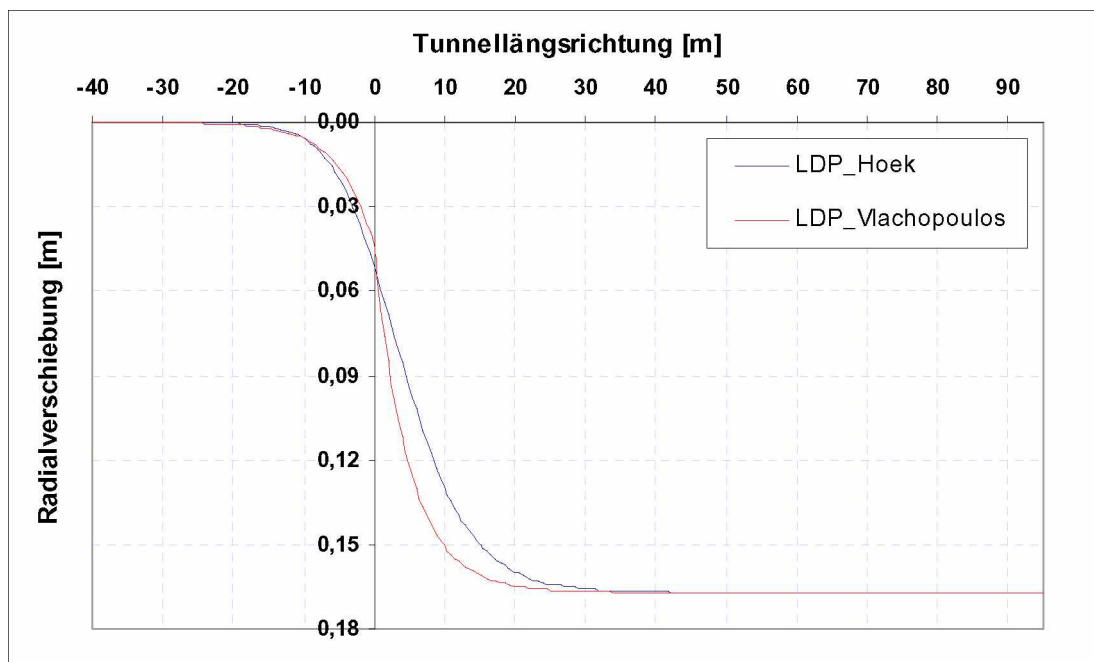


Abb. 4-6: LDP nach Hoek und Vlachopoulos

## 4.5 Anpassung des LDP

### 4.5.1 Allgemein

Die Kombination der angeführten Kennlinien und deren Interpretation stellen das Kennlinienverfahren dar. Unter der Annahme, dass das LDP unveränderlich sei, werden in diesem einfachsten Fall die drei Verläufe

erstellt und daraus der Einbauzeitpunkt bzw. -ort für die Stützmittel abgeleitet [16][6].

Diese Anwendung kann für einfache Sachverhalte noch hinreichend genaue Ergebnisse liefern, jedoch kann und muss bei umfassender Betrachtung davon ausgegangen werden, dass sich der Verlauf des LDPs durch örtlich und zeitlich versetzten Stützmitteleinbau ändern kann. Darüber hinaus hat auch der eingebrachte Ausbau, je nach Art und Steifigkeit, sowie die Vortriebsgeschwindigkeit Einfluss auf den Verlauf des LDPs [16][7].

#### 4.5.2 Anpassung durch Ausbaustützdruck

Hierbei wird der Ausbaustützdruck zeitabhängig in Rechnung gestellt. Der Ansatz der „inkrementellen Anpassung des LDP“ nach Kainrath\_Reumayer et al. [16] und Gschwandtner [7] wird hier im Speziellen angeführt. Zunächst werden die GKL und das LDP ohne Ausbau erstellt. Bleibt bis zum Einbauort das LDP unverändert, wird basierend auf Ähnlichkeiten intervallweise der neue Ausbaustützdruck mit den dazugehörigen Endverschiebungen berechnet.

$$\frac{u_{r,\max}^{NEU} - u_{r,0}^N}{u_{r,\max}^{ALT} - u_{r,0}^N} = \frac{u_r^{N+1}}{u_r^N}$$

Gl. 4-21: Berechnung der zusätzlichen Radialverschiebung zur Bestimmung des angepassten LDPs [16][7]

Bis zum Erreichen des Gleichgewichts werden die jeweiligen Radialverschiebungen berechnet und somit die Punkte, die den Verlauf des neuen LDPs definieren, ermittelt [16][7].

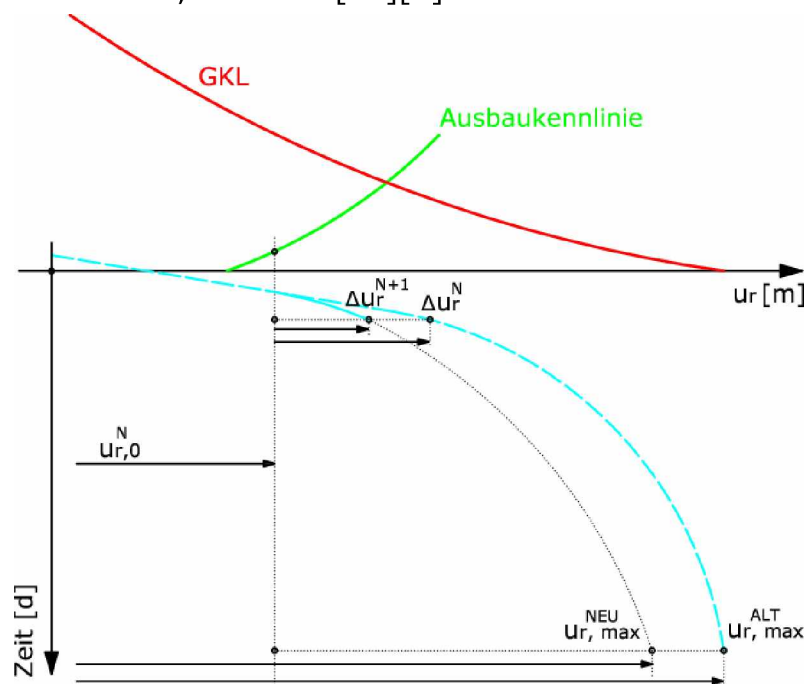


Abb. 4-7: Inkrementelle Anpassung des LDP durch Ausbaustützdruck [7]

## 5 Das Numerische Modell

### 5.1 Allgemein

Prinzipiell ist anzuführen, dass aufgrund der erhöhten Leistungsfähigkeit von Rechnern und der damit einhergehenden Zeitersparnis, die Anwendung von Numerikprogrammen (auch 3D-Programmen) in der Geotechnik durchaus begünstigt wird und als unterstützendes Werkzeug sowohl zur Kontrolle als auch zur Bemessung vor allem bei komplexeren Sachverhalten vermehrt Anwendung findet.

Sämtliche numerischen Berechnungen in dieser Arbeit werden unter Verwendung des Finiten Differenzen Programms  $FLAC^{3D}$ , Version 4.0, durchgeführt. Um relevante Ergebnisse erhalten zu können und vor allem einen Abgleich untereinander zu ermöglichen, sind einerseits die Modellgröße und die Geometrie festzulegen, sowie Vereinfachungen und Randbedingungen zu treffen (siehe dazu Abschnitt 4.1). Da es sich um ein dreidimensionales Numerikprogramm handelt, spielen sowohl die Größe des Modells als auch die Netzfeinheit hinsichtlich der erforderlichen Rechendauer eine entscheidende Rolle. Größere Abmessungen verlangen, ohne Einbußen auf Kosten der Genauigkeit in Kauf zu nehmen, mehr Rechenaufwand was wiederum mehr Zeit beansprucht. Nichtsdestotrotz müssen gewisse Mindestabmessungen vorgesehen werden, um störende Randeinflüsse abzumindern. Somit gilt es Genauigkeit und Rechendauer gegenüberzustellen und einen Kompromiss in Hinblick auf Rechendauer und Auswertbarkeit der Ergebnisse zu finden.

Basierend darauf wird ein Tunnelvortrieb mit einzelnen Abschlagssequenzen generiert, um in weiterer Folge die maximalen radialen Verschiebungswerte in Tunnellängsrichtung auszulesen, welche schlussendlich in Form eines Longitudinal Deformation Profile dargestellt werden können.

### 5.2 Netzerstellung

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen des kreisrunden Hohlraumes (siehe Abschnitt 4.1) kann das Viertelkreismodell herangezogen werden. Maßgebend für die Größe des numerischen Modells sind Ergebnisse aus den angeführten analytischen Berechnungsansätzen von Kapitel 4 „Allgemeine Grundlagen“.

#### 5.2.1 Breite und Höhe

Zunächst werden die Verläufe der Radial- und Tangentialspannungen um den Hohlraum nach Mohr-Coulomb für die ausgewählten (ungünstigsten) Bodenkennwerte berechnet. Die Auflistung der Parametersätze erfolgt in

Tabelle 5-1 in Abschnitt 5.3.2. Eine Abweichung von zwei Prozent der nach Gl. 4-4 und Gl. 4-5 berechneten Spannungsverläufe von der Überlagerungsspannung  $\sigma_0$  erscheint als hinreichend genaue Annäherung. Diese Diskrepanz stellt sich, bei einer in Rechnung gestellten Überlagerungsspannung von 30MPa und den angeführten Kennwerten, in einer Entfernung von 78m vom Hohlraumrand ein. Unter Bedachtnahme, dass dies der absolute Maximalwert für die numerischen Berechnungen ist, wird das Modell in radialer Richtung um den Hohlraum (inklusive Tunnelradius von 5m) auf 80m beschränkt.

Näherungsweise kann man die Entfernung für eine Abweichung der Radial- und der Tangentialspannungen kleiner als 2 Prozent von  $\sigma_0$ , was als hinreichend geringe Abweichung empfunden wird, um störende Randeinflüsse auf den Betrachtungsraum zu unterbinden, mit Hilfe des plastischen Radius  $r_p$  abschätzen. Für die angeführten Parametervariationen, welche sich am Verhältnis  $r_p/r$  orientieren, beträgt die dafür notwendige Entfernung in etwa das 5 bis 6fache des plastischen Radius. Dies gilt für die Verhältnisse  $r_p/r$  von 3,0 bis 1,5. Für Verhältnisse  $r_p/r$  1,5 bis 1,0 ist ca. das 6 bis 7fache von  $r_p$  nötig, um die Abweichung von  $\sigma_0$  auf weniger als 2% abzusenken.

### 5.2.2 Länge

Um die Länge des numerischen Modells festzulegen, erfolgt zunächst eine Betrachtung der maximalen Radialverschiebungen in Tunnellängsrichtung. Eine geringe Abweichung vom minimalen bzw. maximalen Verschiebungswert dient hierbei als Kriterium zur Bestimmung der erforderlichen Modelllänge. Nach der ermittelten radialen Maximalverschiebung  $u_{rmax}$  gemäß Gl. 4-13 nach Salençon [9] werden die Verschiebungsverläufe in Längsrichtung nach Hoek [13] und nach Vlachopoulos [10] (siehe Abschnitt 4.4.3) ermittelt. Es werden die Abstände zur Ortsbrust bestimmt, an denen nahezu der Minimal- bzw. Maximalwert der analytisch bestimmten Radialverschiebungen erreicht wird. Bei den ungünstigsten Gebirgsverhältnisse stellt sich der jeweilige Endwert bei ca. 40m vor und bei 95m nach der Ortsbrust ein. Die Abweichung von den rechnerisch ermittelten Endwerten beträgt dort lediglich 0,1%. Randeinflüsse sind ausschlaggebend für diese verhältnismäßig konservative Wahl der geometrischen Grenzen des Modells.

Um einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Parametersätzen zu ermöglichen, wurden für sämtliche Rechnungen dieselben geometrischen Abmessungen beibehalten.

### 5.2.3 Netzfeinheit

Nach intensiven Testläufen unterschiedliche Netzanordnungen betreffend und einer umfangreichen Untersuchung auf Plausibilität und Rechendauer aufgrund der Netzfeinheit, wird die bereits erwähnte Geometrie des Modells mittels folgender Zonenanordnung unterteilt:

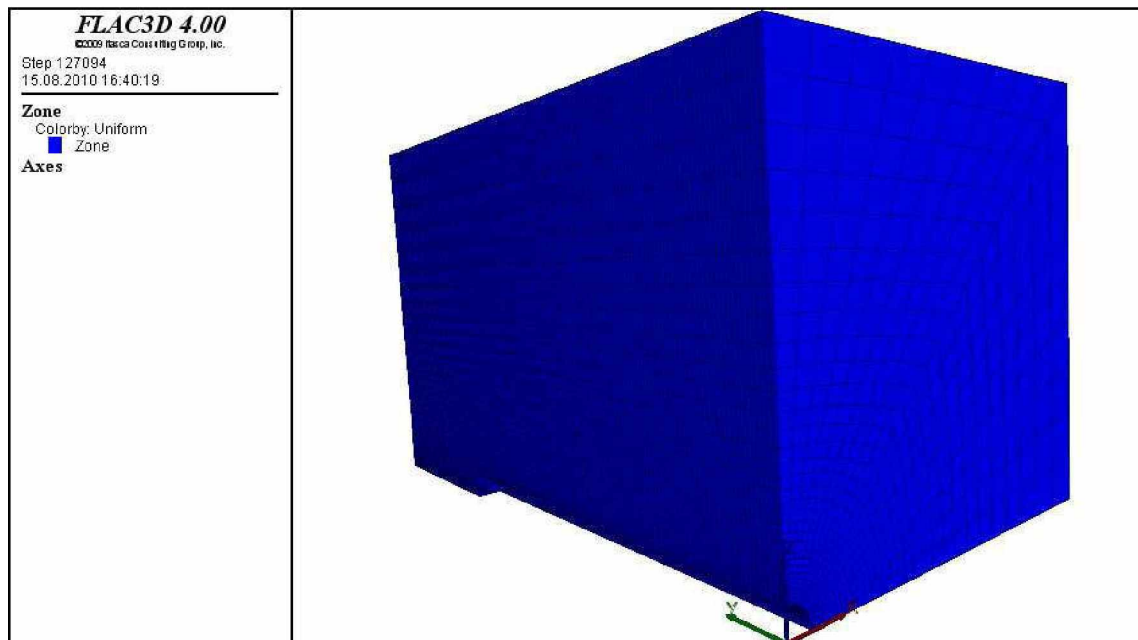


Abb. 5-1: Zonenunterteilung des Netzes

Das in Abbildung 5-1 dargestellte Modell besteht aus 100845 Zonen, wobei die y-Achse in Tunnellängsrichtung weist und die x- und z-Achse radial zum Hohlraum stehen. In Tunnellängsrichtung wurde die Gesamtlänge von 135m in Meterabschnitte, was gleichzeitig den Abschlagslängen entspricht, unterteilt. In Abbildung 5-1 wird ein bereits ausgebrochener Tunnel dargestellt, dessen Ortsbrust sich bei 95m befindet.

### 5.2.4 Boundary Conditions

Für numerische Berechnungen sind neben den Modellabmaßen und Parametern auch Randbedingungen festzulegen.

Das Finite Differenzen Programm  $FLAC^{3D}$  unterscheidet prinzipiell zwischen zwei Arten von Modellgrenzen, welche unterschiedliche Einflüsse auf die numerischen Ergebnisse haben: fixed boundaries und stress boundaries. Bei der Anwendung von stress boundaries werden Verschiebungen und Spannungen überschätzt wohingegen fixed boundaries zu geringeren Endverschiebungen und Spannungen führen [14].

Die Abweichung der Ergebnisse für die Verschiebungen kann bei der Verwendung von stress boundaries bei einem nicht assoziierten Modell bis zu 4,4% betragen [14]. Für sämtliche Berechnungen dieser Arbeit wird

$\psi = 0$  gesetzt und somit kann von einer nicht assoziierten Fließregel ausgegangen werden.

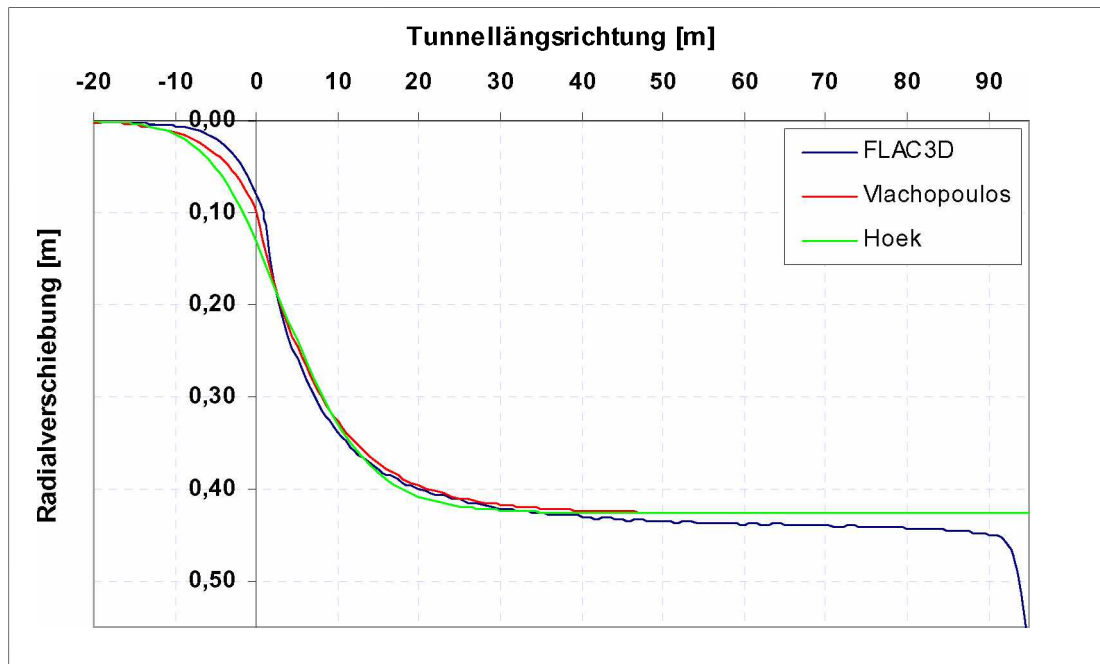


Abb. 5-2: LDP Numerik vs Analytk (ohne SpC-Ausbau)

In Abbildung 5-2 werden unterschiedlich ermittelte LDPs für dieselben Gebirgsparameter aufgezeichnet. Prinzipiell kann festgestellt werden, dass es bei dem numerisch ermittelten LDP am Portal (bei Tunnellängsrichtung 95m) zu erheblichen „Ausreißen“ kommt, weshalb dort von nicht unerheblichen störenden Randeinflüssen ausgegangen werden muss. Darüber hinaus ist augenscheinlich, dass der Maximalwert im Verlauf des numerisch ermittelten LDP (Modell mit stress boundaries) größer ist, als jener der nach Hoek und Vlachopoulos ermittelten LDPs, denen beiden als radialer Maximalwert der Hohlraumrandverschiebung der gemäß Gl. 4-13 nach Salençon [9] ermittelte Wert zu Grunde gelegt ist.

Berücksichtigt man den Umstand, dass bei der Verwendung von stress boundaries die Verschiebungswerte überschätzt werden, erscheinen die höheren Radialverschiebungen in Tunnellängsrichtung plausibel. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass für den in Abbildung 5-2 betrachteten Ausschnitt der Tunnellängsrichtung sämtliche skizzierten Radialverschiebungsverläufe einen größenordnungsmäßig gut übereinstimmenden Verlauf nehmen.

### 5.3 Erstellen des LDP

Die Erstellung der Verschiebungsverläufe nach Vlachopoulos [10] und Hoek [13] wurde bereits in Abschnitt. 4.4.3 erläutert. Um einen Vergleich mit den



numerisch ermittelten Berechnungsergebnissen zu ermöglichen, wird mittels fish (Bezeichnung für die Programmiersprache in FLAC<sup>3D</sup>) eine Abfrage (siehe Anhang A) erstellt, welche für jeden einzelnen Abschlag den Maximalwert der Radialverschiebung sämtlicher Knoten entlang des Hohlraumrandes ausgibt.

Durch Vergleich sämtlicher Radialverschiebungen der Knoten am Hohlraumrand pro Abschlag miteinander ist ersichtlich, dass diese Maßnahme erforderlich ist, wenn man die maximale Hohlraumrandverschiebung erhalten möchte. Der Lösungsalgorithmus von FLAC<sup>3D</sup> erfordert diese Maßnahme. Aufgrund des hydrostatischen Spannungszustandes kann der Punkt mit der maximalen Radialverschiebung praktisch überall am Hohlraumrand auftreten und muss sich nicht in der Firste befinden.

### **5.3.1 Allgemein**

Ausgehend von den geometrischen Abmessungen wird ein Tunnelvortrieb simuliert. In einer fish-function (siehe Anhang A) wird eine Aushubsequenz in Meterabschlägen erzeugt, durch die der kreisrunde Hohlraum im Vollquerschnitt ausgebrochen wird. In besagte Aushubsequenz wird ein „Aufweichen“ des auszubrechenden Gebirges implementiert, mit dem Ziel ein „Überschwingen des Systems<sup>8</sup>“ zu unterbinden. Direkt vor dem Aushub des betroffenen Bereichs wird der dem Gebirge zugewiesene E-Modul in 10 Schritten von seinem ursprünglichen Wert bis auf ein Zehntel dessen, abgemindert und erst im Anschluss ausgebrochen.

---

<sup>8</sup> Mit Überschwingen des Systems ist gemeint, dass es aufgrund einer zu raschen Belastung und den daraus resultierenden plastischen Deformationen zu größeren Endverschiebungen kommt.

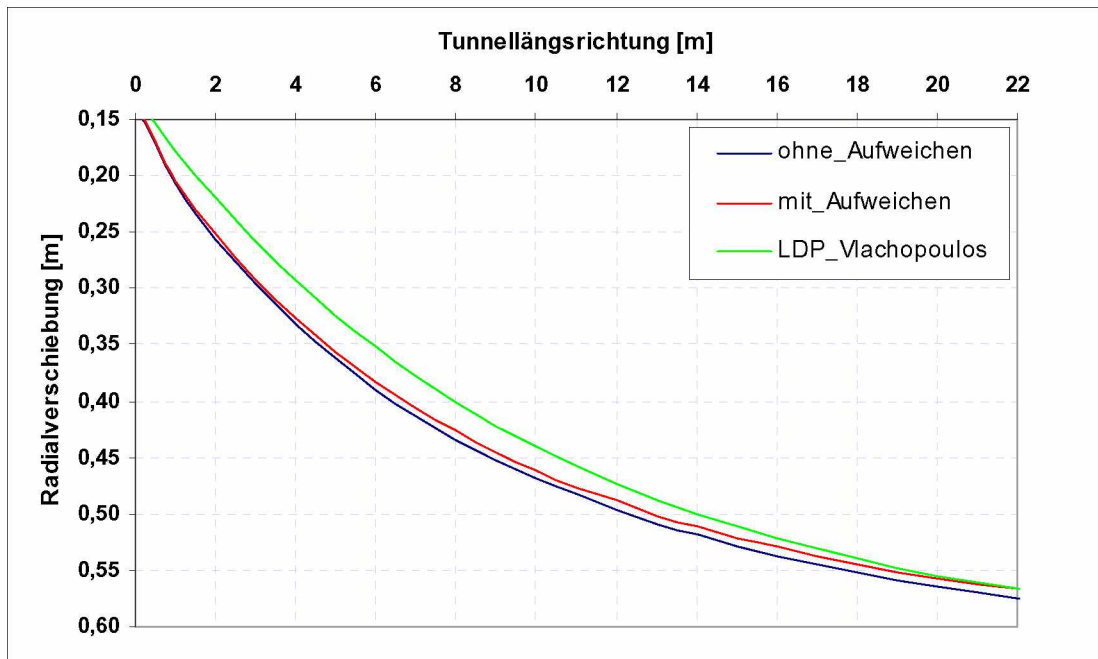


Abb. 5-3: LDP Aufweichen vs ohne Aufweichen

Wie in Abbildung 5-3 dargestellt kommt es beim Verfahren mit stufenweisem Aufweichen des E-Moduls vor dem Ausbruch des Materials zu geringeren Hohlraumrandverschiebungen als beim Verfahren ohne Aufweichen und somit einer besseren Annäherung an die analytischen Verschiebungsverläufe. Im dargestellten Bereich hinter der OB betragen die Abweichungen der Radialverschiebungen unter Anwendung der Aushubsequenz mit Aufweichen um 0,3 – 2,3% weniger als beim Verfahren ohne Aufweichen des E-Moduls verglichen zur analytischen Lösung nach Vlachopoulos [10].

### 5.3.2 Ohne Spritzbetonausbau

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1 angeführten Voraussetzungen, sowie einem kreisrunden Hohlraumquerschnitt mit Radius 5m, wird eine Parameterstudie durchgeführt, welche zum Ziel hat, durch Variation der Gebirgsparameter eine Bandbreite an unterschiedlichen Parametersätzen zu generieren. Für die Berechnungen ohne Ausbaustützdruck werden ein unveränderlicher E-Modul von 2GPa und eine konstante Querdehnzahl von 0,3 gewählt. Maßgebend dafür ist wie bei Pilgerstorfer [15] das Verhältnis  $r_p/r$ . Ähnlich wie bei Pilgerstorfer werden die Primärspannung und  $\phi$  konstant gehalten und  $c$  variiert. Dies wird für eine Primärspannung von 30MPa bei einem Reibungswinkel von  $30^\circ$  und in weiterer Folge  $35^\circ$  durchgeführt. Weiters wird jedoch bei konstanten Scherparametern noch die Spannung und somit eine Veränderung der Überlagerungshöhe simuliert.

<b>Parametersätze ohne Ausbaustützdruck</b>						
<b>E [MPa]</b>	<b>v [-]</b>	<b><math>\sigma_0</math> [MPa]</b>	<b>c [MPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>	<b>rp/r</b>	
2000	0,3	30,00	1	30	~3,0	
		20,00	1	30	~2,5	
		12,15	1	30	~2,0	
		6,10	1	30	~1,5	
		1,75	1	30	~1,0	
<b>E [MPa]</b>	<b>v [-]</b>	<b><math>\sigma_0</math> [MPa]</b>	<b>c [MPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>	<b>rp/r</b>	
2000	0,3	30	1,5	30	~2,5	
		30	2,5	30	~2,0	
		30	5,0	30	~1,5	
		30	17,0	30	~1,0	
<b>E [MPa]</b>	<b>v [-]</b>	<b><math>\sigma_0</math> [MPa]</b>	<b>c [MPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>	<b>rp/r</b>	
2000	0,3	30	0,475	35	~3,0	
		30	0,785	35	~2,5	
		30	1,5	35	~2,0	
		30	3,5	35	~1,5	
		30	15,0	35	~1,0	

Tab. 5-1: Parametersätze für die numerischen Berechnungen

Die Berechnungen der LDPs ohne Ausbau dienen der Kalibrierung des Systems, wobei die eingerahmten Parameter die Grundlage für die weiteren numerischen Berechnungen mit Ausbau liefern. Dieser Parametersatz simuliert einerseits mit einer Primärspannung von 30MPa einen tiefliegenden Tunnelvortrieb (bei einer Wichte von 25kN/m<sup>3</sup> beträgt die Überlagerungshöhe 1200m). Des Weiteren liefern die eingerahmten Werte plausible Kenngrößen bei einem  $r_p/r$  Verhältnis welches sich in der Mitte der betrachteten Bandbreite befindet.

### 5.3.3 Mit Spritzbetonausbau

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Stützmittel ausschließlich Spritzbeton betrachtet. Vorausgesetzt wird hierbei ein zentralsymmetrischer Einbau (siehe Abschnitt 4.1). Für die Querdehnzahl des SpC wird  $v=0,25$  angesetzt. Verändert werden in weiterer Folge die Schalendicke, der Einbauabstand zur Ortsbrust und der E-Modul der Spritzbetonschale.

Die Spritzbetonschale kann auf unterschiedliche Arten in das numerische Modell implementiert werden. Diese Arbeit betrachtet als mögliche Schalenelemente die in FLAC<sup>3D</sup> zur Verfügung stehenden Structural Elements „shell“ und „liner“. Beide Elemente sind Flächenelemente, die aus

drei Knoten bestehen. Durch Kombination können diese zu größeren Oberflächen zusammengesetzt werden. Den wesentlichen Unterschied stellt dar, dass bei shell-Elementen die Ankopplung direkt an das Netz erfolgt, während zwischen liner-Oberfläche und den umliegenden Zonen eine Wechselwirkung implementiert werden kann. Bei der Verwendung von liner-Elementen müssen zusätzliche Parameter, welche die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften im Übergangsbereich von der liner-Schale auf das umliegende Gebirge beschreiben, angegeben werden [14].

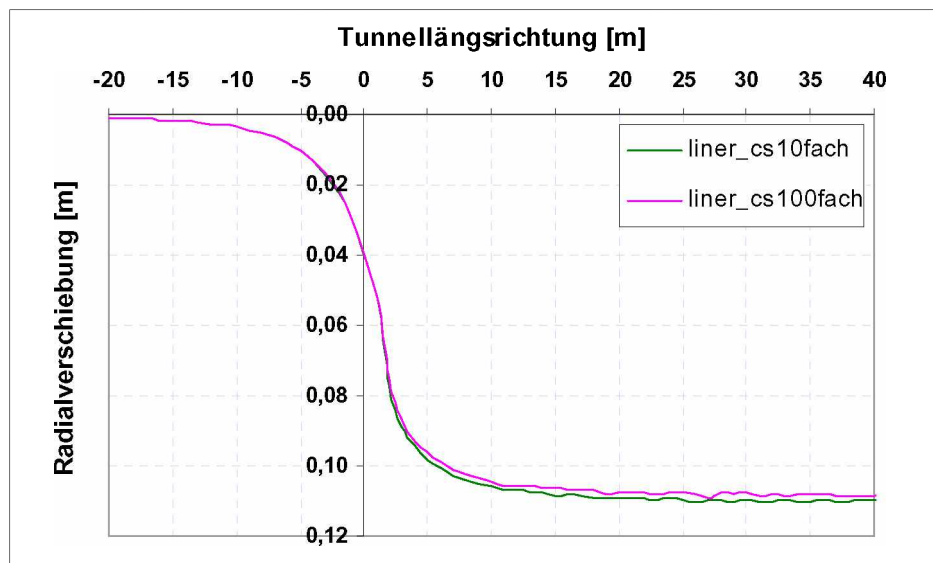


Abb. 5-4: LDP in Abhängigkeit von der Steifigkeit

Abbildung 5-4 zeigt, dass die Steifigkeit des Interfaces zwischen Schale und Gebirge Einfluss auf die maximale Radialverschiebung hat. Für den liner gilt:  $E=15\text{GPa}$  und  $\nu=0,25$ . Betrachtet werden hier zwei LDPs mit SpC-Dicke  $0,2\text{m}$  mit einem Einbauabstand  $1\text{m}$  zur Ortsbrust, welche unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen. Cs steht in diesem Fall für coupling spring stiffness, die Interface Steifigkeit [14].

Einfluss auf den Radialverschiebungsverlauf in Tunnellängsrichtung hat die Interface Steifigkeit. Das LDP der Schale mit höherer Steifigkeit führt zu einer geringeren Endverschiebung (siehe Abbildung 5-4).

Als Faustregel wird für cs das 10 – 100fache des Wertes der folgenden Formel angesetzt.

$$cs \approx (10 \div 100) \times \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right]$$

Gl. 5-1: Näherungsformel für die Steifigkeit [14]

K und G sind der maximale Kompressions- und Schubmodul des umliegenden Gebirges und  $\Delta z_{\min}$  ist die kleinste Abmessung einer Zone, welche normal zur liner-Schale steht [14].

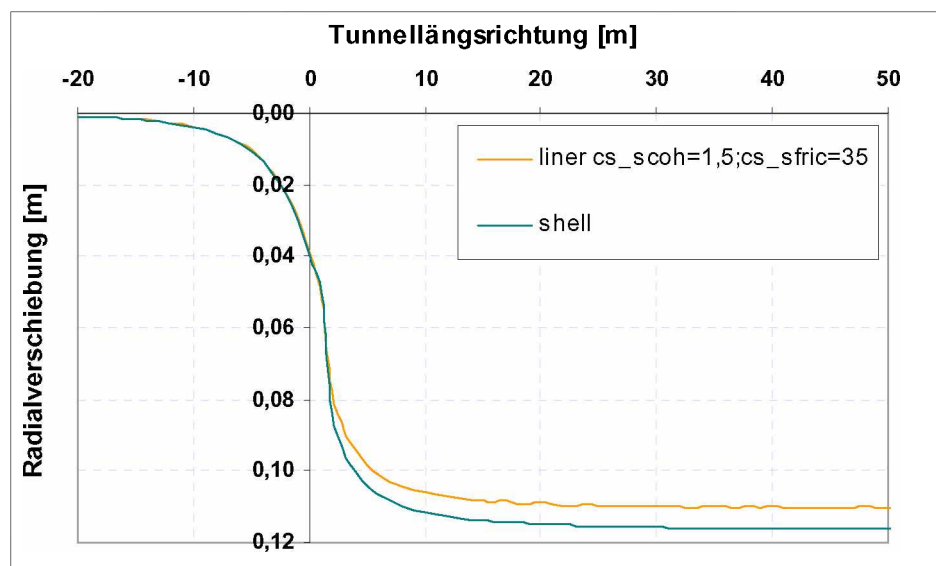


Abb. 5-5: LDP mit Ausbau: shell vs liner

Weist man dem Übergangsbereich dieselben Scherparameter wie im umliegenden Gebirge vorherrschen zu ( $c=1,5\text{MPa}$  und  $\varphi=35^\circ$ ), werden numerisch bei einer Schalendicke von 20cm, die 1m hinter der Ortsbrust eingebaut wird, die in Abbildung 5-5 dargestellten Verschiebungsverläufe ermittelt.

Der Einfluss unterschiedlicher Steifigkeiten und die Tatsache, dass für das Interface, die Kluft zwischen Gebirge und SpC-Schale, zusätzliche Annahmen getroffen werden müssen, veranlassen dazu, als Ausbau eine mittels shell-Elementen generierte SpC-Schale zu verwenden, obwohl wie in Abbildung 5-5 ersichtlich, Unterschiede hinsichtlich der Maximalverschiebungen auftreten. Somit wird für die weiteren Berechnungen die SpC-Schale mittels linear-elastischer shell-Elemente ohne Bruchgrenze implementiert.

### 5.3.3.1 Spritzbeton - zeitunabhängig

Die Annahme, dass sich Spritzbeton zeitunabhängig verhält, stellt eine Vereinfachung im Vergleich zur Realität dar. Wie bereits erwähnt gilt die Annahme konstanter Schalenstärke entlang des gesamten Hohlraumrandes (zentralsymmetrisch) [3]. Neben einer konstanten Querdehnzahl von  $\nu=0,25$  wird darüber hinaus noch von einem zeitlich konstanten E-Modul für die gesamte Spritzbetonschale ausgegangen. Ausgehend davon werden die Dicke der Spritzbetonschale und der Einbauort variiert. Es werden Schalen mit 10, 20 und 30cm Schalenstärke eingebaut.

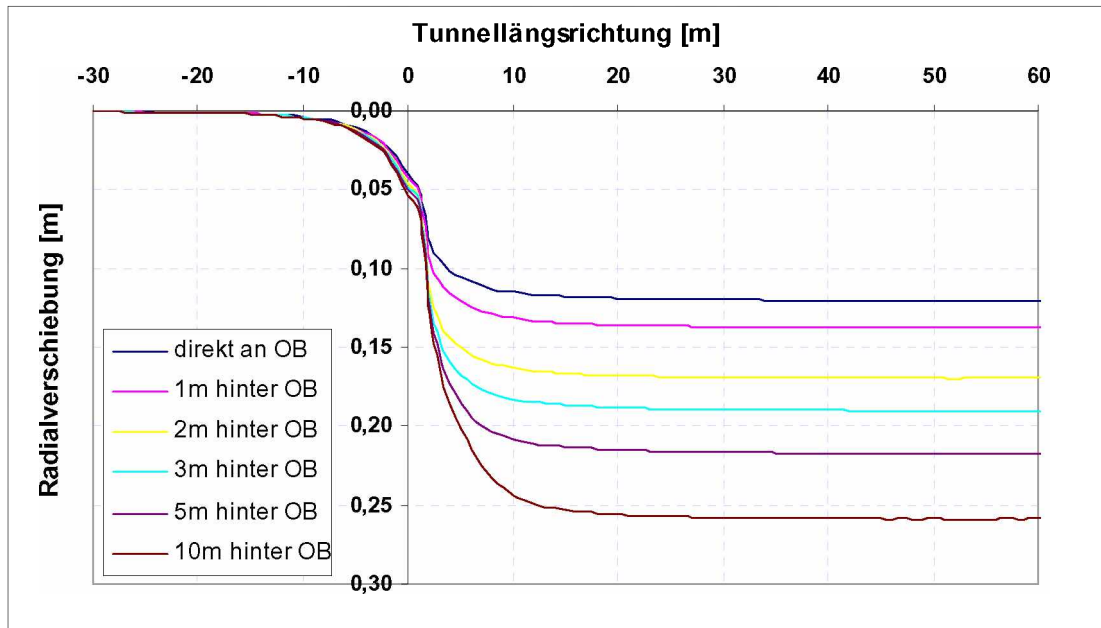


Abb. 5-6: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort

Wie in Abbildung 5-6 ersichtlich, hat ein unterschiedlicher Einbauort deutlichen Einfluss auf die maximale Hohlraumrandverschiebung. Ein rasch oder sogar direkt an der Ortsbrust eingebrachter SpC-Ausbau führt zu einem kleineren Endwert als ein weiter entfernt eingebrachter Ausbau. Eingebaut wird die Schale direkt an der Ortsbrust und im Abstand von 1, 2, 3, 5 und 10m dahinter. Ähnlichen Einfluss auf das LDP haben unterschiedliche E-Moduli der SpC-Schale (siehe Abschnitt 6.2.2.3). Abschließend folgen noch Berechnungen mit konst. SpC-Parametern aber veränderten E-Moduli des umliegenden Gebirges.

### 5.3.3.2 Spritzbeton - zeitabhängig

Die Zeitabhängigkeit des Spritzbetons hängt maßgeblich von der Vortriebsgeschwindigkeit ab. Es wird in Meter-Abschlägen ausgebrochen, jedoch kommt es je nach Vortriebsgeschwindigkeit zu unterschiedlich langen Aushärtephasen für die betroffenen Abschnitte.

Mittels fish-function wird die bestehende Aushubsequenz um eine Aushärtfunktion des E-Moduls (siehe Anhang A) erweitert. Sämtlichen zeitabhängigen Berechnungen wird eine konstante Schalendicke von 20cm zugrunde gelegt. Weiters wird mit einer isotropen SpC-Schale aus shell-Elementen gerechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeit bleibt jedem Abschnitt der Schale in Abhängigkeit seines Abstandes zur OB unterschiedlich lange Zeit um auszuhärten (siehe Abbildung 4-5). Jedem Schalensegment wird somit bei zunehmendem Vortrieb ein neuer, höherer,  $E_{SpC(t)}$  gemäß Gl. 4-16 zugewiesen.

Es wird der Einbauort variiert und zusätzlich werden noch unterschiedliche Vortriebsgeschwindigkeiten (VG) berechnet.

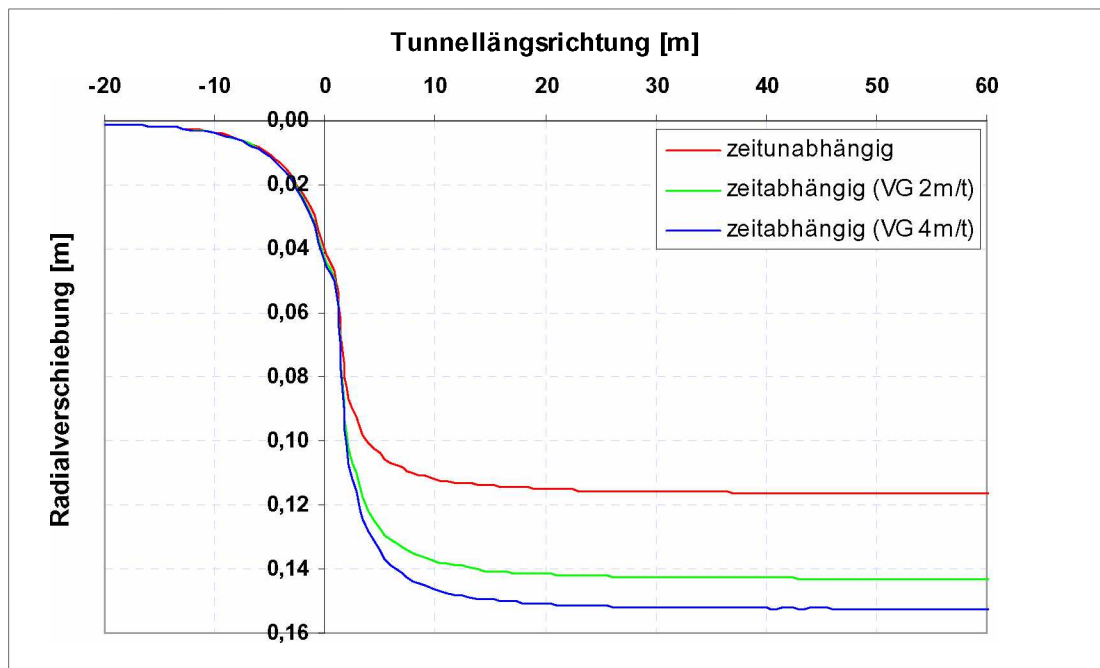


Abb. 5-7: LDP Entwicklung zeitunabhängiger vs zeitabhängiger SpC

Abbildung 5-7 zeigt die LDPs für unterschiedliche Spritzbetonschalen. Obwohl alle drei Schalen eine Dicke von 20cm aufweisen und am selben Ort (1m hinter der Ortsbrust) eingebaut werden, kommt es zu deutlichen Unterschieden, die maximale Radialverschiebung betreffend. Das zeitunabhängige LDP geht sofort beim Einbau von einem voll ausgehärteten SpC-Ausbau mit konstantem E-Modul von 15GPa aus, während die zeitabhängigen Schalen erst aushärten. Des Weiteren ist ersichtlich, dass größere Vortriebsgeschwindigkeiten zu größeren Endverschiebungen führen. Grund dafür ist, dass die SpC-Schale bei einer größeren VG weniger Zeit hat auszuhärten und somit einen geringeren E-Modul aufweist.

Diese Unterschiede werden in Abschnitt 6.2.2 und 6.2.3 ausführlicher behandelt.

## 6 Numerische Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der numerischen Berechnungen anschaulich dargestellt werden. Grundsätzlich werden die Radialverschiebungsverläufe in Tunnellängsrichtung (LDP) dargestellt, zunächst mit den analytischen Ansätzen verglichen und in weiterer Folge untereinander abgeglichen, um Einflüsse auf die Numerik feststellen zu können.

### 6.1 Ohne Spritzbetonschale

Wie in Abschnitt 5.3.2 aufgelistet, werden unterschiedliche Parametersätze durchgerechnet, welche sich am Verhältnis  $r_p/r$  orientieren [15]. Variiert werden die Kohäsion bei konstanter Überlagerung ( $\sigma_0=30\text{MPa}$ ) bei jeweils konstantem Reibungswinkel ( $\varphi=30^\circ$  und  $\varphi=35^\circ$ ). Des Weiteren wird bei konstanten Scherparametern ( $c=1\text{MPa}$  und  $\varphi=30^\circ$ ) die Überlagerung verändert. Für die numerischen Berechnungen ohne Ausbau werden zunächst die Berechnungsansätze nach Abschnitt 4.4.3 als Vergleich herangezogen. Die unterschiedlichen Verschiebungsverläufe, einerseits die Ergebnisse der Analytik und andererseits die numerischen Rechenergebnisse werden graphisch dargestellt und miteinander verglichen.

#### 6.1.1 LDP - absolute Verschiebungswerte

In erster Linie werden die in Tabelle 5-1 angeführten Parametersätze untereinander verglichen. Erste gravierende Unterschiede treten bei der Darstellung der absoluten Radialverschiebungsverläufe für die angeführten Parametervariationen auf. Für besagte Beispiele werden die numerischen Ergebnisse in ein Diagramm übertragen und in weiterer Folge miteinander verglichen. Es handelt sich um drei Parametersätze:

- Satz1 – Variation von  $\sigma_0$  bei  $c=1\text{MPa}$  und  $\varphi=30^\circ$
- Satz2 – Variation von  $c$  bei  $\sigma_0=30\text{MPa}$  und  $\varphi=30^\circ$
- Satz3 - Variation von  $c$  bei  $\sigma_0=30\text{MPa}$  und  $\varphi=35^\circ$

Ausgehend von der maximalen Radialverschiebung für jeden Parametersatz, welche beim Verhältnis  $r_p/r=3,0$  auftritt, wird für den jeweiligen Parametersatz die prozentuelle Abminderung vom Absolutwert aufgrund eines besseren Verhältnisses von  $r_p/r$  bestimmt.



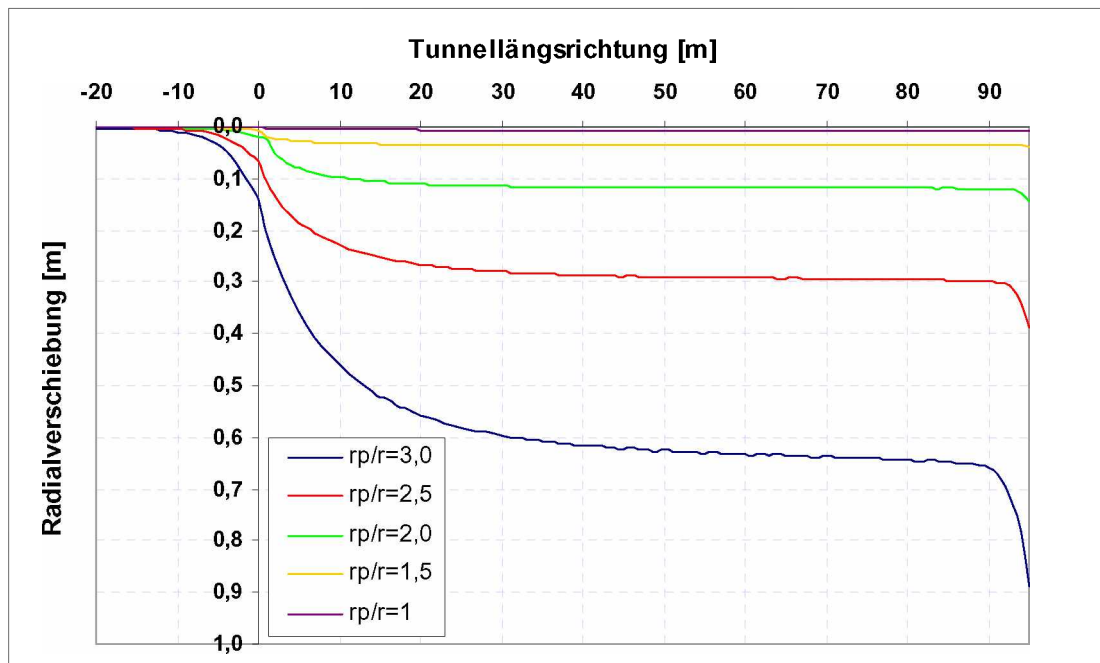


Abb. 6-1: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von  $r_p/r$

Abbildung 6-1 zeigt die numerisch ermittelten LDPs in Abhängigkeit vom Verhältnis  $r_p/r$  in Absolutwerten. Die dargestellten Kurven ergeben sich bei gleichbleibenden Scherparametern ( $c=1\text{MPa}$  und  $\varphi=30^\circ$ ) bei Variation der Überlagerungshöhe. Wie ersichtlich nimmt mit abnehmender Überlagerung auch die maximale Radialverschiebung deutlich ab. Die entsprechenden Werte für  $\sigma_0$  sind aus Tabelle 5-1 zu entnehmen, wobei  $\sigma_0=1,75\text{MPa}$  zur Vervollständigung gewählt wird. Erwartungsgemäß stellen sich bei zunehmend schlechterem Gebirge höhere maximale Endverschiebungen ein. Offensichtlich existieren störende Randeinflüsse im Portalbereich (bei Tunnellängsrichtung 95m). Nach dem numerischen Lösungsansatz ergeben sich in diesem Bereich „Ausreißer“, weshalb in dieser Arbeit die ersten fünf Verschiebungswerte vom Portal als nicht plausibel deklariert werden und keine Berücksichtigung für die weiteren Betrachtungen finden. Bei besseren Gebirgsverhältnissen treten diese Ausreißer zwar abgemindert, aber dennoch auf.

Ausgehend von den absoluten Radialverschiebungsverläufen wird für alle drei Parametersätze ermittelt um wie viel Prozent sowohl die maximale Endverschiebung als auch der Absolutwert an der Ortsbrust aufgrund eines anderen Verhältnisses von  $r_p/r$  abnimmt. Bezogen werden die Werte jeweils auf die Maximalwerte (beim Verhältnis  $r_p/r=3,0$ ) des jeweiligen Parametersatzes. Dies gilt für  $u_{r\max}$  und auch  $u_{rOB}$ . Auf die Ermittlung von  $u_{r\max}$  für die numerischen Rechnungen wird in Abschnitt 6.1.2 näher eingegangen.

Numerik					
Satz1		Satz2		Satz3	
$u_{rmax}$ [m]	0,645	$u_{rmax}$ [m]	0,645	$u_{rmax}$ [m]	0,704
$u_{rOB}$ [m]	0,138	$u_{rOB}$ [m]	0,138	$u_{rOB}$ [m]	0,124
Analytik(Vlachopoulos)					
Satz1		Satz2		Satz3	
$u_{rmax}$ [m]	0,622	$u_{rmax}$ [m]	0,622	$u_{rmax}$ [m]	0,684
$u_{rOB}$ [m]	0,132	$u_{rOB}$ [m]	0,132	$u_{rOB}$ [m]	0,145

Tab. 6-1: Absolute Bezugswerte; Numerik und Analytik (Vlachopoulos)

Wie aus Tabelle 6-1 hervorgeht, treten in Ortsbrustnähe deutliche Unterschiede in den LDPs auf. Liegen die Maximalwerte für die Endverschiebungen der Numerik über den Werten nach Vlachopoulos, was unter Verwendung von stress boundaries zu erwarten (siehe Abschnitt 5.2.4) ist, kommt es im OB-Bereich für den Parametersatz 3 bereits zu Überschneidungen zwischen den Ergebnissen von FLAC<sup>3D</sup> und dem analytischen Berechnungsansatz nach Vlachopoulos. Bei der Betrachtung der weiteren Auswertungen (siehe Anhang B) lassen sich in sämtlichen Fällen Überschneidungen zwischen Numerik und Analytik speziell direkt an der OB und davor (Tunnellängsrichtung  $x < 0$ ), wie beispielsweise in Abbildung 5-2 zu erkennen ist, feststellen. Mit Ausnahme vom Verhältnis  $r_p/r=3,0$  für die Parametersätze 1 und 2 ist für sämtliche Beispiele der radiale Verschiebungswert  $u_{rOB}$  nach Vlachopoulos größer als der numerisch ermittelte Wert an derselben Stelle, wohingegen für sämtliche ohne Stützmittel gerechneten Beispiele gilt, dass die numerisch ermittelte Maximalverschiebung größer ist als die Maximalverschiebung nach Vlachopoulos.

In Tabelle 6-2 werden die prozentuellen Abminderungen aufgrund eines besseren Gebirges von den in Tabelle 5-1 aufgelisteten Bezugswerten sowohl numerisch als auch analytisch, dargestellt. Als analytischer Vergleich dient hier der Berechnungsansatz nach Vlachopoulos:

Numerik								
Satz1			Satz2			Satz3		
rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]
2,5	54,2	53,0	2,5	31,3	42,1	2,5	31,0	14,9
2,0	81,7	85,2	2,0	55,3	56,5	2,0	55,6	55,9
1,5	94,5	94,7	1,5	73,4	74,1	1,5	74,0	69,7
1,0	99,1	99,0	1,0	84,3	82,6	1,0	85,6	80,6
Analytik (Vlachopoulos)								
Satz1			Satz2			Satz3		
rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	rp/r	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]
2,5	54,3	50,6	2,5	31,5	25,9	2,5	31,1	25,8
2,0	82,2	79,2	2,0	56,5	49,2	2,0	56,9	49,9
1,5	94,8	93,5	1,5	74,7	68,2	1,5	75,6	69,4
1,0	99,1	98,7	1,0	84,3	78,8	1,0	85,7	80,8

Tab. 6-2: Prozentuelle Abminderung abhängig vom Verhältnis  $r_p/r$

Die numerisch ermittelte absolute maximale Hohlraumrandverschiebung ist bei konstantem  $\sigma_0$  von 30MPa und Variation von  $c$  in Abhängigkeit von  $\varphi$  bei gleichem  $r_p/r$  Verhältnis größer. Mit Ausnahme von  $r_p/r = 1,0$ , wo die maximale Radialverschiebung nahezu gleich groß ist, liefern die Beispiele mit  $\varphi=35^\circ$  größere Maximalwerte. Numerisch liefert bei gleicher Primärspannung eine größere Kohäsion weniger maximale Hohlraumrandverschiebungen als ein größerer Reibungswinkel. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 6-2, wo die unterschiedlichen Verschiebungsverläufe für das gleiche  $r_p/r$  Verhältnis von 2,5 dargestellt werden.

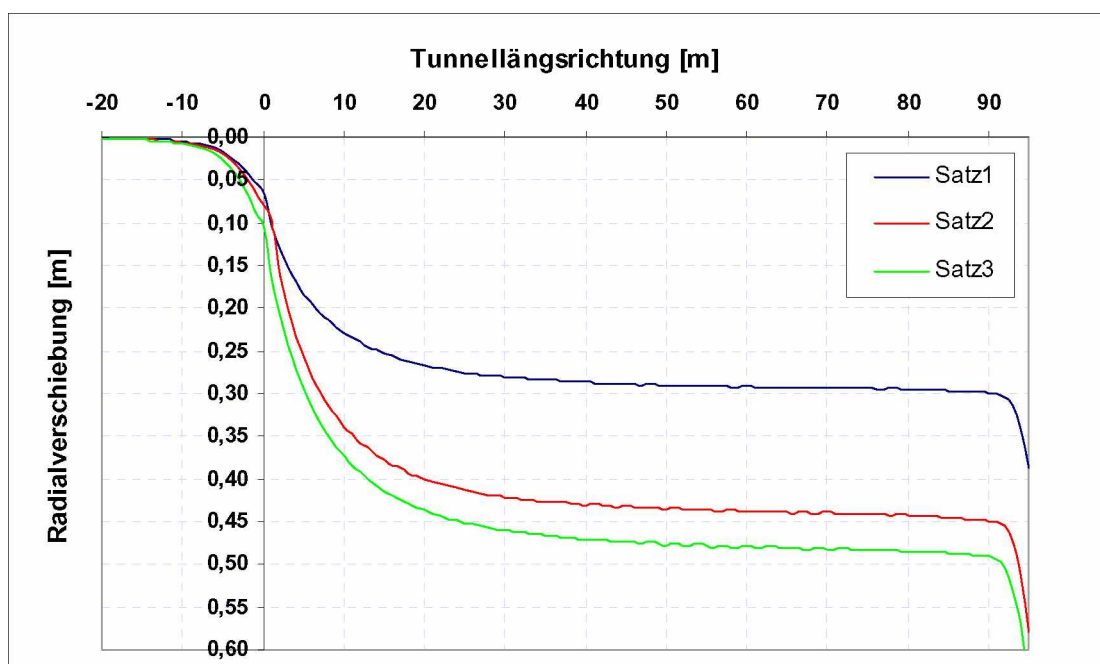


Abb. 6-2: LDP Vergleich für die Parametersätze 1-3;  $r_p/r=2,5$

Verglichen werden die numerisch ermittelten LDPs der einzelnen Beispiele in weiterer Folge mit den Verläufen nach Hoek und Vlachopoulos. Absolut gesehen treten erhebliche Unterschiede in den Verschiebungsverläufen auf. Die verwendeten Verfahren divergieren nach der Ortsbrust teils sehr stark, aber auch im Bereich direkt an der OB gibt es merkbare Unterschiede.

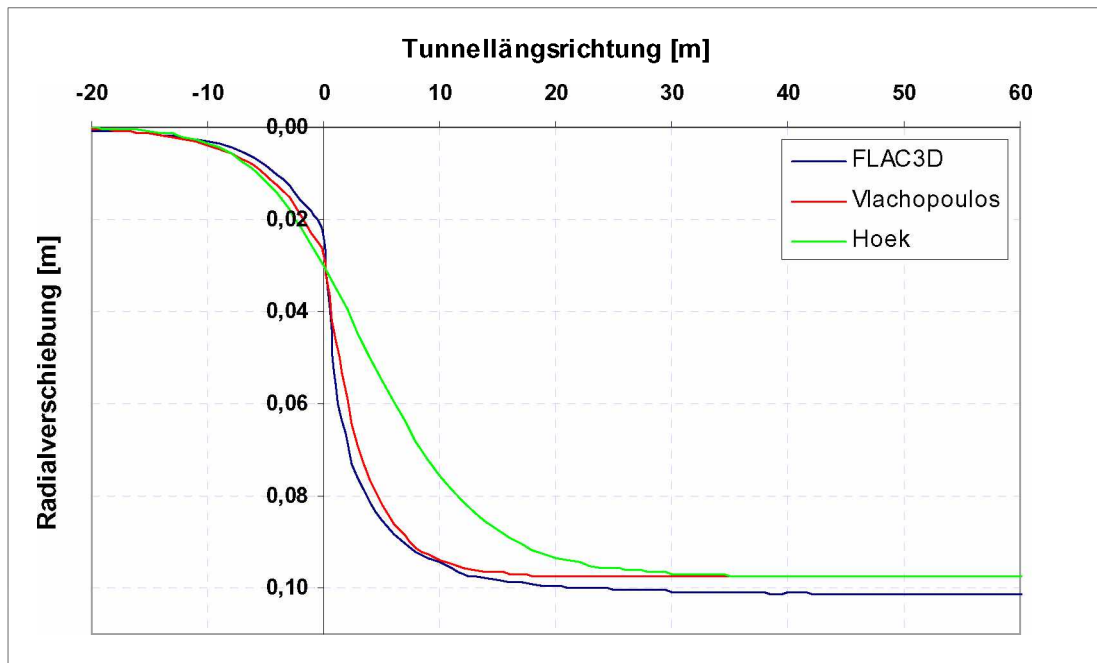


Abb. 6-3: Vergleich zwischen LDP nach  $FLAC^{3D}$  mit LDP nach Hoek und Vlachopoulos

In Abbildung 6-3 sind drei Verschiebungsverläufe dargestellt. Während sich der numerisch errechnete Verlauf dem LDP nach Vlachopoulos vergleichbar verhält, weicht der nach Hoek ermittelte Verschiebungsverlauf deutlich von den beiden anderen ab. Dargestellt wird der Verlauf für das Verhältnis  $r_p/r=1,0$  nach Parametersatz 2.

Bei der Auswertung sämtlicher Beispiele, welche ohne Ausbaustützdruck gerechnet werden, kann man erkennen, dass der Berechnungsansatz nach Vlachopoulos besser die numerisch ermittelten Verschiebungsverläufe beschreibt. Eine zusätzliche Betrachtung des Bereiches an der OB erfolgt indem die relativen Verschiebungsverläufe miteinander verglichen werden.

### 6.1.2 LDP - relative Anteile an der Maximalverschiebung

Um einen zusätzlichen Abgleich zwischen Analytik und den numerischen Ergebnissen zu ermöglichen werden auch die prozentuellen Anteile an der Maximalverschiebung über die Tunnellängsrichtung aufgetragen. Eine Schwierigkeit für die numerischen Berechnungen ohne Ausbau ist hierbei, den Maximalwert der Radialverschiebung zu bestimmen.

Wie in den Abbildungen 6-1 und 6-2 ersichtlich ist, kommt es am Hohlraumrand zu Ausreißen, welche in dieser Arbeit nicht in der Ermittlung des Maximalwertes berücksichtigt werden. Bei sämtlichen Beispielen ohne Ausbau nähert sich das LDP nicht einem exakten Endwert an, wie dies bei den analytischen Ansätzen der Fall ist. Aufgrund dieser Tatsache wird nicht ein einzelner Wert des Verschiebungsverlaufes als Maximum deklariert, sondern es wird ein Bereich des LDPs zur Bestimmung der maximalen Hohlraumrandverschiebung herangezogen. Mit Ausnahme der ersten 5 Werte am Portalbereich, werden die Werte der Radialverschiebung von Tunnellängsrichtung 70m bis 90m gemittelt, da sich dort ein annähernd horizontaler Verlauf einstellt. Der Mittelwert dieses Betrachtungsbereiches wird für die weiteren relativen Betrachtungen dieser Arbeit als maximale Hohlraumrandverschiebung  $u_{rmax}$  angenommen.

In Abbildung 6-4 werden für das Verhältnis von  $r_p/r=1,5$  die prozentuellen Anteile an der maximalen Radialverschiebung in Tunnellängsrichtung für alle drei Parametersätze aufgetragen.

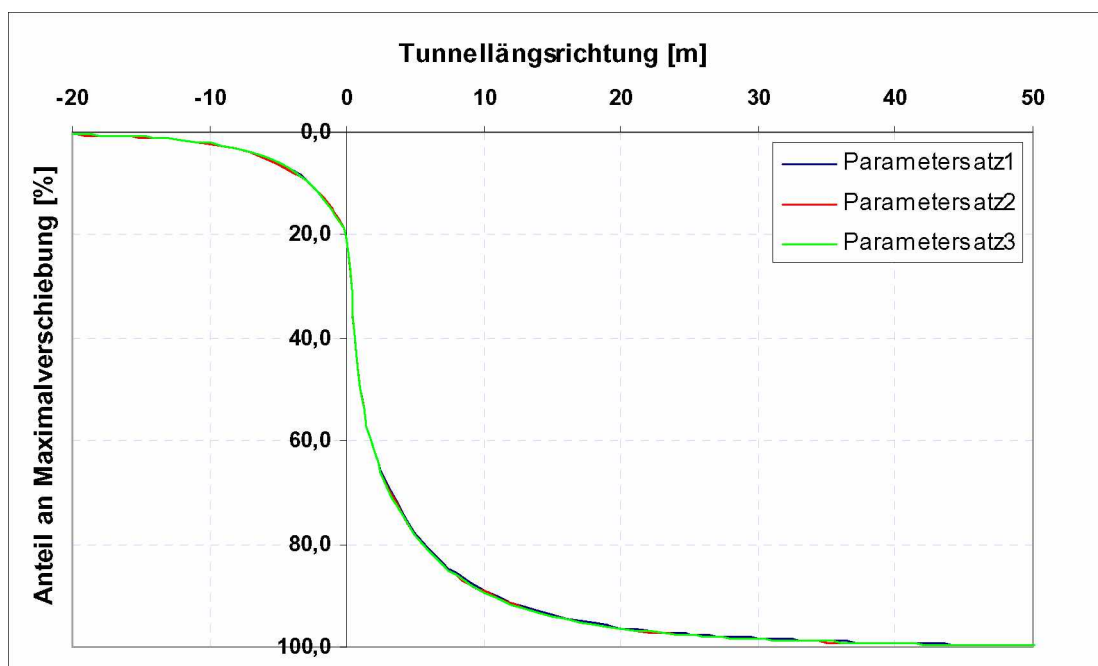


Abb. 6-4: Vergleich Anteil an der Maximalverschiebung für das Verhältnis  $r_p/r = 1,5$

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass bei numerischen Berechnungen ohne Ausbau der Verschiebungsanteil an der OB bei etwa 20% der Endverschiebung liegt. Ausgewertet werden im Zuge dieser Arbeit sämtliche Verhältnisse, zu finden im Anhang, um Aussagen über den Verschiebungsanteil an der Ortsbrust zu erhalten.

Dies zeigt sich auch in Abbildung 6-5, wo die prozentuellen Anteile an der maximalen Radialverschiebung durch Variation der Verhältnisse  $r_p/r$  für den Parametersatz 2 dargestellt werden.

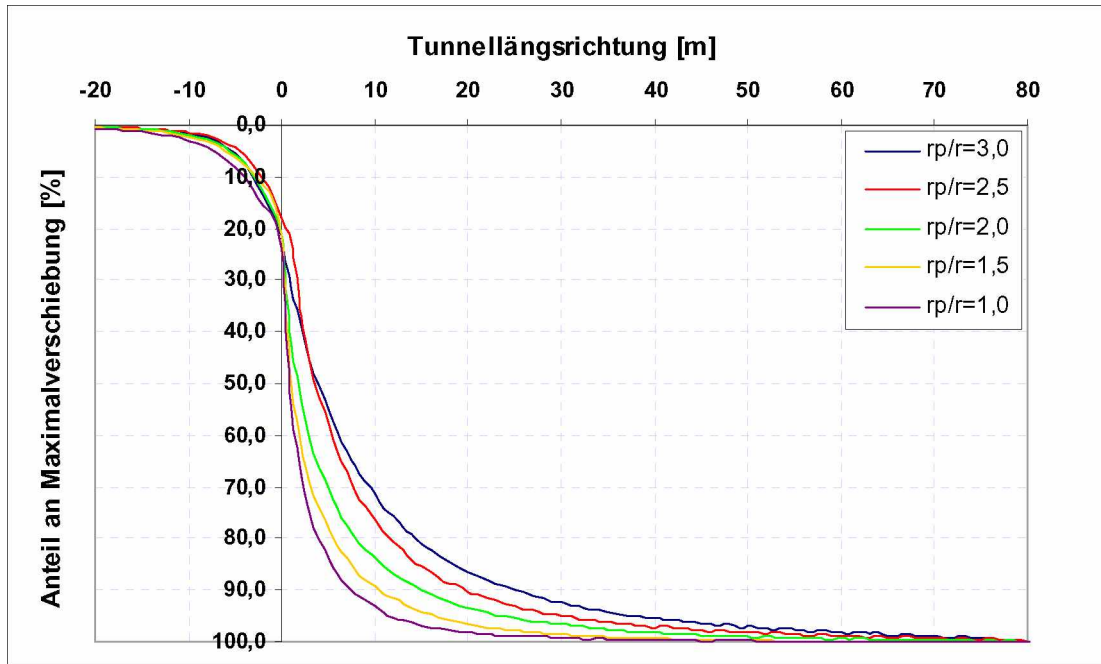


Abb. 6-5: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von  $r_p/r$ ; nach  $FLAC^{3D}$

Bei den numerischen Ergebnissen schwanken die prozentuellen Anteile an der OB leicht. Die Diagramme der beiden anderen Parametersätze sind ähnlich und befinden sich im Anhang. Im Gegensatz dazu folgt die prozentuelle Darstellung Verschiebungsanteile der analytisch ermittelten LDPs. In Abbildung 6-6 werden die relativen Verläufe nach Vlachopoulos für Parametersatz 2 betrachtet. Die Verläufe für Parametersatz 1 und 3 sind im Anhang zu finden.

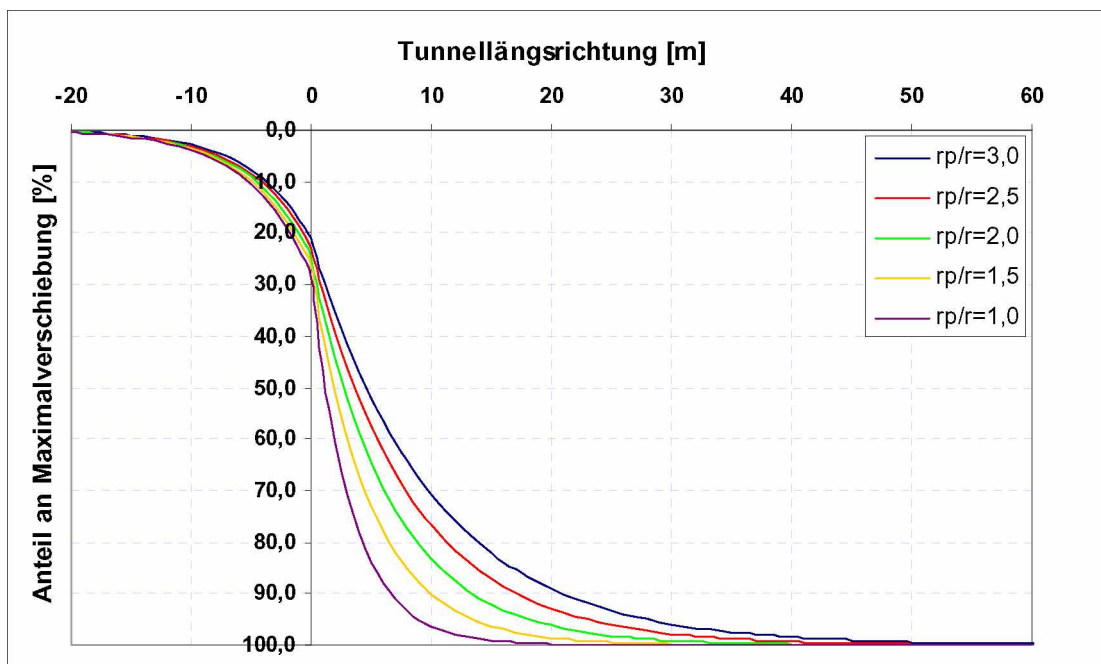


Abb. 6-6: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von  $r_p/r$ ; nach Vlachopoulos

Je schlechter das Gebirge, desto weniger prozentuelle Verschiebung tritt an der Ortsbrust auf. Je besser das Gebirge, desto schneller wird die maximale Radialverschiebung erreicht. Bei Vlachopoulos treten bei den verwendeten Parametersätzen Anteile von 20-30% an der Ortsbrust auf. Der Vergleich mit den numerisch ermittelten Prozentsätzen zeigt, dass mit Ausnahme des nahezu elastischen Gebirges ( $r_p/r=1$ ), nach Vlachopoulos mehr prozentuelle Verschiebung an der OB eintritt als numerisch:

Numerik					
$r_p/r$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Satz1	23,51	20,73	17,23	21,93	21,36
Satz2	23,64	20,81	20,75	17,99	21,36
Satz3	23,62	20,45	17,46	21,71	17,58
Analytik (Vlachopoulos)					
$r_p/r$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Satz1	28,68	26,60	24,69	22,89	21,17
Satz2	28,67	26,64	24,73	22,89	21,17
Satz3	28,65	26,61	24,72	22,89	21,24

Tab. 6-3: Prozentuelle Anteile an der Maximalverschiebung direkt an der OB

Die Werte für den Prozentsatz der an der OB eingetretenen Anteile an den Endverschiebungen sind nach Vlachopoulos um mehrere Prozentpunkte höher als numerisch ermittelt (siehe Tabelle 6-3). Nach Hoek gibt es für alle Beispiele nur ein relatives LDP, dessen Wert an der OB mit 30,8% sogar noch höher als bei Vlachopoulos liegt. Es lässt sich hier erkennen, dass sich die numerisch berechneten Radialverschiebungen trotz eines ähnlichen Verschiebungsverlaufes dennoch von den analytisch ermittelten LDPs unterscheiden. Während hinter der OB numerisch ermittelt größere Verschiebungen auftreten als analytisch gerechnet, sind die numerischen Ergebnisse an der Ortsbrust geringer als jene nach Hoek und Vlachopoulos.

## 6.2 Mit Spritzbetonschale

### 6.2.1 Allgemein

Es ist hier anzumerken, dass die Ergebnisse für LDPs der Numerik mit Spritzbetonausbau am Tunnelportal auch einen extrem unregelmäßigen Verlauf (Ausreißer) im Vergleich zum restlichen Verschiebungsverlauf aufweisen. Darüber hinaus erreichen die LDPs mit Ausbau ihren maximalen Radialverschiebungswert bei etwa 30 bis 60m hinter der Ortsbrust. Störende Randeinflüsse veranlassen dazu lediglich den Bereich bis Tunnelmeter 60 zu betrachten. Als maximaler numerischer Verschiebungswert  $u_{rmax}$  wird der Maximalwert des LDPs mit Ausnahme der



maximalen Ausreißer innerhalb der ersten 5m (Tunnelmeter 90-95) ermittelt.

Es werden drei unterschiedliche Schalenstärken: 10cm, 20cm und 30cm in Kombination mit verschiedenen Einbauabständen zur Ortsbrust berechnet. Eingebaut wird direkt an der OB, 1m, 2m, 3m, 5m und schließlich bei 10m hinter der Ortsbrust (siehe Abschnitt 5.3.3.1). An dieser Stelle sei erwähnt, dass im Falle eines zeitabhängigen Ausbaus nur eine 20cm dicke Spritzbetonschale verwendet wird. Die Abschnitte 6.2.3 und der Vergleich in 6.2.4 beziehen sich somit auf numerische Berechnungen mit einer SpC-Schale der Dicke 20cm.

## 6.2.2 Spritzbeton - zeitunabhängig

### 6.2.2.1 Einfluss des Einbauortes

Als Ausbaustützmittel wird eine Spritzbetonschale implementiert. Bei einer zeitunabhängigen Betrachtung der Spritzbetonschale wird von Beginn an ein konstanter E-Modul aufgebracht. Wie in Abbildung 6-7 ersichtlich, hat ein örtlich veränderter Einbau massive Auswirkungen auf die Absolutverschiebungen.

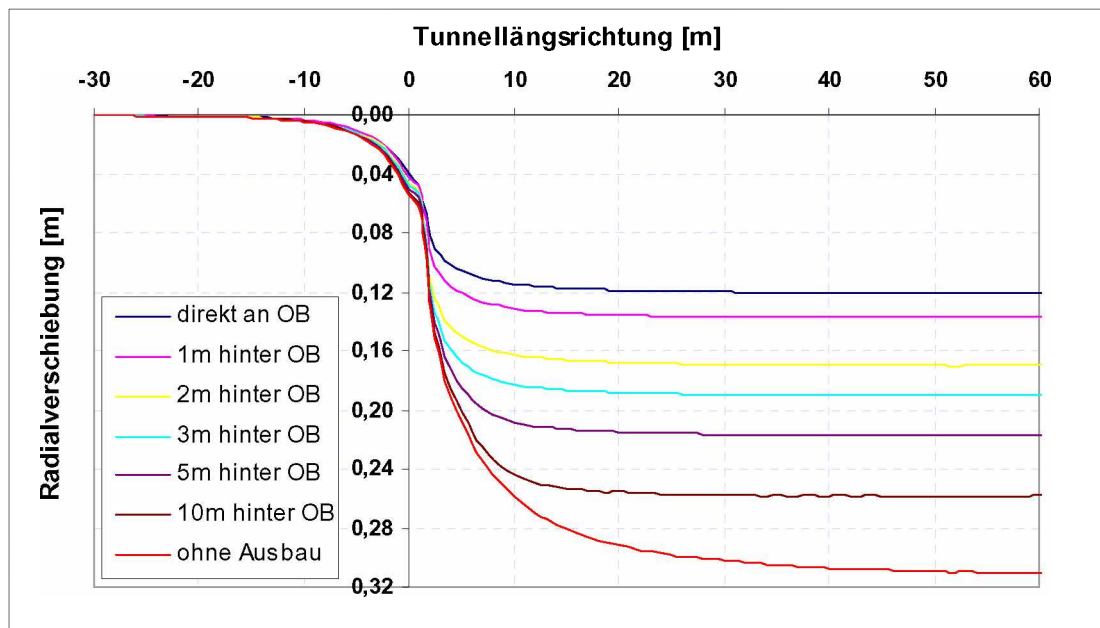


Abb. 6-7: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort

Wie aus der Darstellung zu erkennen ist, führt ein Ausbau, der weiter entfernt zur Ortsbrust eingebaut wird zu einer größeren Radialverschiebung. Betrachtet wird hier ein SpC-Ausbau mit der Dicke 10cm, welcher direkt an der Ortsbrust und in unterschiedlichen Abständen dazu (siehe Legende) eingebracht wird. Auffallend an den dargestellten LDPs ist, dass es bis zur OB nur geringe Unterschiede in den Verschiebungswerten gibt. Erst von



Tunnellaufmeter 1 auf 2 erfolgt für alle Verläufe, unabhängig vom Einbauort, ein massiver Sprung. Derselbe Sprung ist auch bei den Absolutverschiebungsverläufen für die Schalendicken 20 und 30cm ersichtlich (siehe Anhang). Unterstrichen wird dies durch die prozentuelle Abminderung in Bezug auf den maximalen Absolutwert. Die absoluten Bezugswerte werden in Tabelle 6-4 dargestellt. Bezogen werden sämtliche Prozentsätze auf das LDP ohne Ausbau für den Parametersatz 3 mit dem  $r_p/r$  Verhältnis von 2,0 (siehe eingerahmte Werte aus Tabelle 5-1) und deren Maximalwerte von  $u_{rmax}$  und  $u_{rOB}$ .

LDP ohne Ausbau	
$u_{rmax}$ [m]	0,313
$u_{rOB}$ [m]	0,055

Tab. 6-4: Absolute Bezugswerte

Ermittelt wird nun der Prozentsatz, um den die Maximalverschiebung bzw. die Verschiebung an der OB durch einen örtlich früheren Einbau abgemindert werden. Wie in Tabelle 6-5 ersichtlich, nehmen die Maximalverschiebungen deutlicher ab, als die Absolutverschiebungswerte an der Ortsbrust.

SpC 10cm			SpC 20cm			SpC 30cm		
Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
10m	17,2	2,7	10m	19,5	-13,2	10m	20,7	3,7
5m	30,6	8,2	5m	34,5	9,5	5m	36,5	10,4
3m	39,0	12,6	3m	43,9	14,7	3m	46,5	16,0
2m	45,6	16,0	2m	50,9	18,8	2m	53,8	20,5
1m	56,0	23,1	1m	62,8	27,2	1m	66,8	29,6
OB	61,4	27,2	OB	68,6	32,1	OB	72,3	35,1

Tab. 6-5: Prozentuelle Abminderung der maximalen Radialverschiebung in Abhängigkeit vom Einbauort

Die Maximalverschiebung nimmt stärker ab als die Radialverschiebung an der Ortsbrust. Bei Einbau einer 10cm dicken SpC-Schale bei 3m hinter der OB wird gemäß FLAC<sup>3D</sup> die Endverschiebung um knapp 40% abgemindert. Zunehmende Schalendicken führen zu geringeren Radialverschiebungen, da die Maximalverschiebungen zu einem größeren Prozentsatz abgemindert werden (siehe Abschnitt 6.2.2.2). Die Verläufe mit den Absolutwerten für die SpC-Schalendicken 20 und 30cm sind im Anhang zu finden.

Bei der Darstellung der relativen LDPs in Tunnellängsrichtung treten auch merkliche Unterschiede aufgrund der verschiedenen Einbauabstände auf.

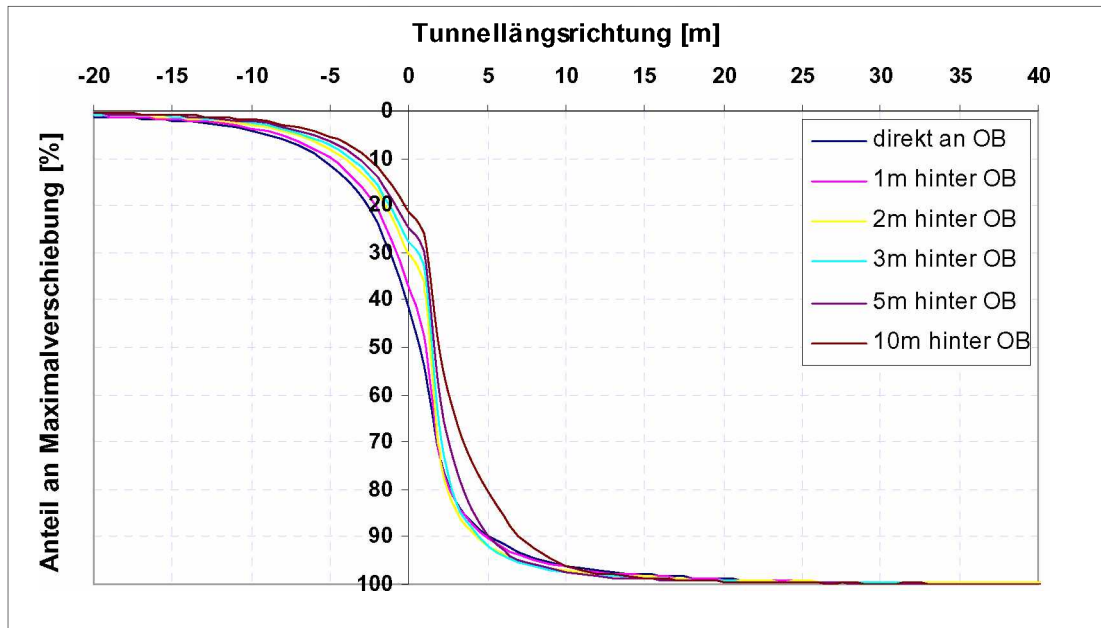


Abb. 6-8: LDP Anteile an der Maximalverschiebung in Abhängigkeit vom Einbauort

In Abbildung 6-8 ist ersichtlich, dass der Einbauort den Verschiebungsverlauf beeinflusst. Dargestellt werden die relativen Anteile an der Maximalverschiebung einer 30cm dicken Spritzbetonschale mit unterschiedlichen Einbauorten. Auffallend ist die massive Bandbreite der Verschiebungsanteile an der Ortsbrust von nahezu 20%. Bei einem Schaleneinbau direkt an der OB treten 40,9% der Endverschiebungen an der Ortsbrust auf, während bei einem Abstand von 10m lediglich 21,2% der maximalen Radialverschiebungen auftreten. Eine ähnliche Bandbreite im OB-Bereich ist bei den relativen LDPs für die SpC-Dicken 20 und 30cm auch zu erkennen (siehe Anhang). Bei einer 20cm dicken Schale, die direkt an der OB eingebaut wird, treten im relativen LDP 37,7% und 10m dahinter 24,5% Anteil an der Maximalverschiebung auf.

Es ist festzustellen, dass die Bandbreite der Verschiebungsanteile mit der Schalendicke abnimmt, deshalb wird auch deren Einfluss auf die numerischen Rechnungen untersucht.

### 6.2.2.2 Einfluss des Dicke des SpC-Ausbaus

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Schalendicken, welche in die numerischen Berechnungen implementiert werden, und deren Einflüsse genauer untersucht. Wie aus Tabelle 6-5 hervorgeht, hat eine dickere SpC-Schale von gleichem E-Modul eine geringere Endverschiebung zu Folge. Diese wird in Abbildung 6-9 durch Darstellung der absoluten Bezugswerte bestätigt.

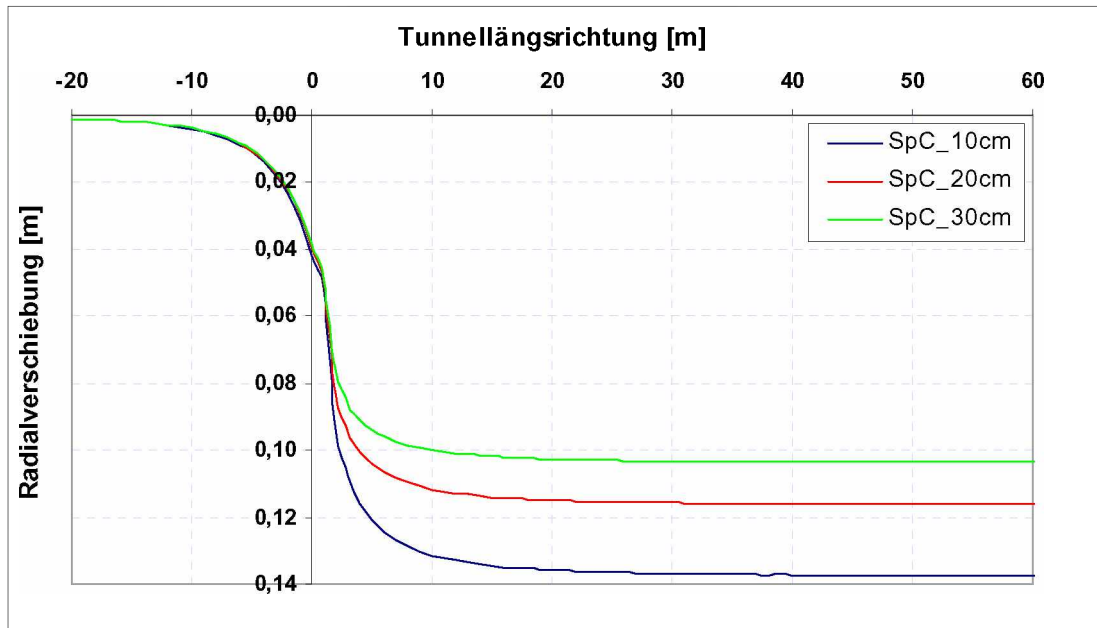


Abb. 6-9: LDP Entwicklung in Abhängigkeit der Schalendicke

Dargestellt werden die absoluten LDPs bei einem Einbau in einem Abstand von 1m zur Ortsbrust. Während die Verläufe vor der OB miteinander vergleichbar sind, divergieren diese dahinter deutlich und die maximale Radialverschiebung liegt bei einer 30cm dicken Spritzbetonschale um 3,4cm niedriger als der Maximalwert beim Einbau einer 10cm dicken SpC-Schale. Bei einer maximalen Radialverschiebung von 31,3cm (siehe Tabelle 6-4) entspricht dies einer Abminderung von mehr als 10% (siehe Tabelle 6-5).

Aus Tabelle 6-5 ist auch ersichtlich, dass je weiter entfernt von der OB die unterschiedlich dicken Schalen eingebracht werden, desto geringer ist deren Einfluss auf die Endverschiebung. Die Schalendicke hat prozentuell mehr Einfluss auf die maximale Radialverschiebung  $u_{rmax}$  als auf die Radialverschiebung an der Ortsbrust  $u_{rOB}$ .

Unterschiede treten auch bei Betrachtung der relativen LDPs auf. Die Schalendicke beeinflusst die Anteile an der Maximalverschiebung direkt an der OB (siehe Abbildung 6-10).

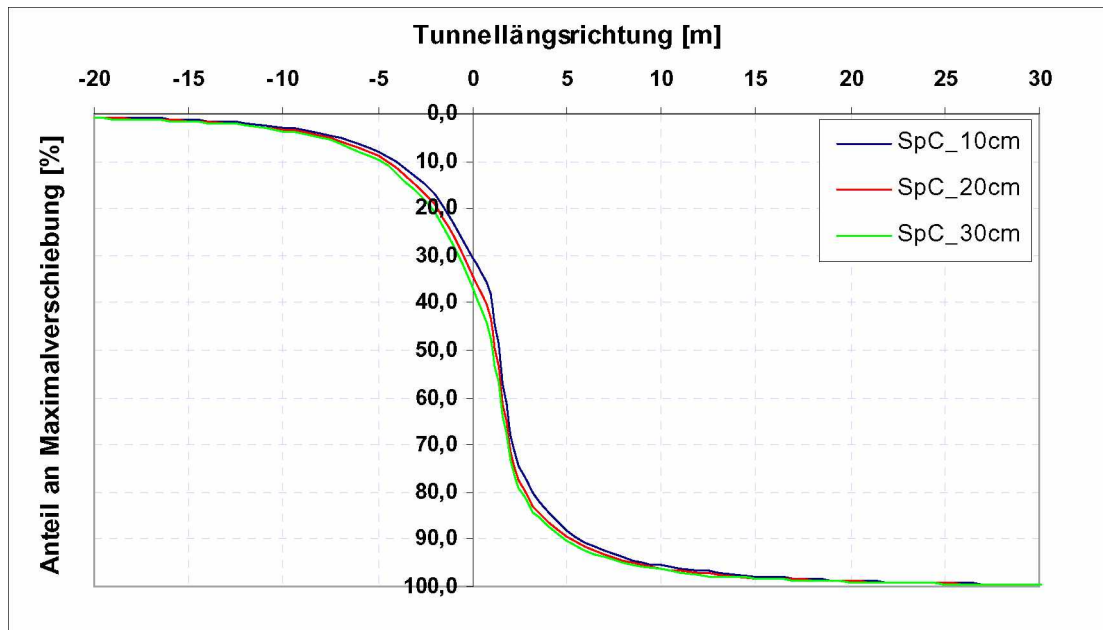


Abb. 6-10: LDP Anteile an der Maximalverschiebung in Abhängigkeit der Schalendicke

Beim Ortsbrustdurchgang tritt eine deutliche Diskrepanz der Verschiebungsanteile auf: 30,5% bei 10cm dicker Schale und 37,0% bei Schalendicke 30cm. Dargestellt wird hier der Schaleneinbau 1m hinter der OB. Generell liegt der Verlauf der Anteile an der Maximalverschiebung bei den dickeren SpC-Schalen höher als für die 10cm Schale. Die Auswertung zu sämtlichen Abständen von der OB in Abhängigkeit der Schalendicke finden sich im Anhang. Es sei darauf hingewiesen, dass die Bandbreite der relativen OB-Verschiebung mit zunehmender Entfernung des Einbauortes abnimmt. So liegen die Verläufe für die SpC-Schalen mit 10 und 30cm Dicke im Abstand von 5m zur OB nur mehr 1,5% auseinander.

### 6.2.2.3 Einfluss des E-Modul der SpC-Schale

In weiterer Folge wird untersucht, welchen Einfluss ein unterschiedlich hoher E-Modul einer konstant dicken Spritzbetonschale auf die Rechenergebnisse hat. Auch hier wird wieder von einem von der Zeit unabhängigen Verhalten ausgegangen. Es werden, wie in Tabelle 6-6 angeführt, fünf unterschiedliche E-Moduli implementiert.

5GPa	10GPa	15GPa	20GPa	15e9GPa
------	-------	-------	-------	---------

Tab. 6-6: E-Moduli der SpC-Schale

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich beim Wert 15e9GPa um keine relevante praktische Größe für den E-Modul einer SpC-Schale handelt.

Bei der Auswertung der numerisch ermittelten Ergebnisse sind Unterschiede in den einzelnen LDP in absoluten Verschiebungswerten offensichtlich.

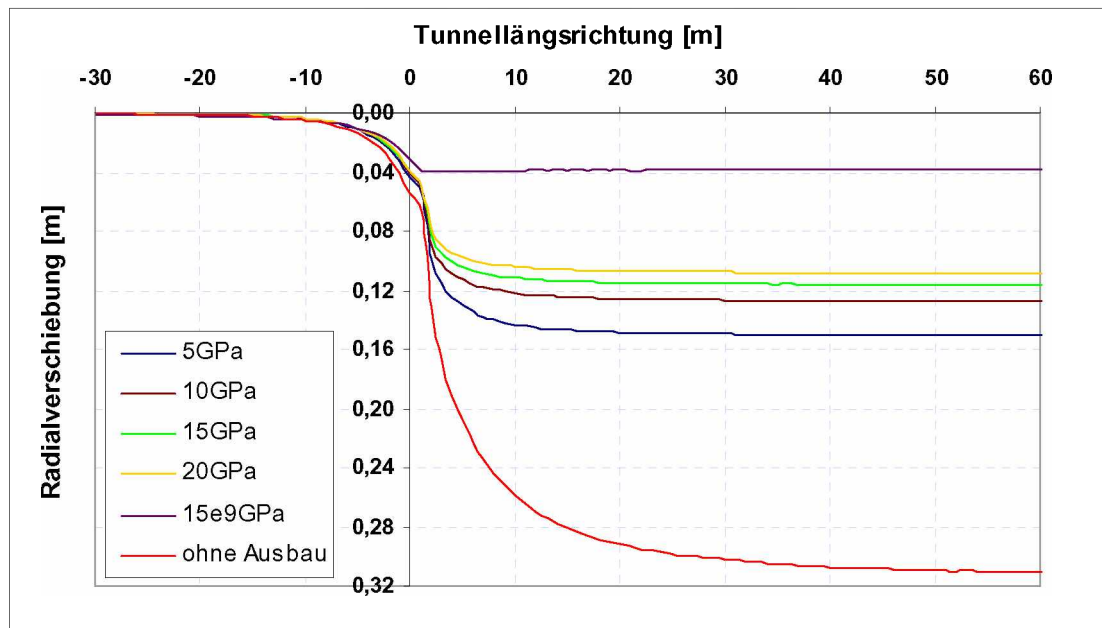


Abb. 6-11: LDP Entwicklung in Abhängigkeit des E-Moduls der Spritzbetonschale

Der Einbau der SpC-Schale erfolgt für sämtliche LDPs, die in Abbildung 6-11 dargestellt werden, 1m hinter der Ortsbrust. Es wird auch für alle Schalen dieselbe Dicke, 20cm angesetzt, um einen Vergleich zu ermöglichen. In Abhängigkeit vom E-Modul verringert eine SpC-Schale mit höherem E-Modul die Maximalverschiebung merklich. Je größer der E-Modul, desto geringer ist die maximale Hohlraumrandverschiebung. Die geringste Absolutverschiebung tritt unter Anwendung des „unendlich“ großen E-Modul (15e9GPa) ein. Ein unendlich steifer E-Modul hat zur Folge, dass sich keine weiteren Verschiebungen mehr einstellen. Die Endverschiebung stellt sich sofort am Einbauort (in diesem Fall bei 1m hinter der Ortsbrust) ein. Bei Vergleich der maximalen Verschiebungswerte ist festzustellen, dass das LDP bei Umstellung des E-Modul der Schale von 5GPa auf 10GPa stärker abnimmt, als von 10GPa auf 15GPa. Wiederum divergieren die Verläufe nach der Ortsbrust deutlich stärker als davor. Verdeutlicht wird dies, indem die prozentuelle Abminderung, bezogen auf die Werte aus Tabelle 6-4 ermittelt, wird. Die maximalen Verschiebungswerte betragen für  $u_{rmax}=0,313m$  und  $u_{rOB}=0,055m$ . Ausgehend von diesen Absolutwerten treten, die in Tabelle 6-7 aufgelisteten prozentuellen Abminderungen in Abhängigkeit des E-Moduls des Spritzbetonausbaus auf.

E-Modul	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
5GPa	51,8	20,7
10GPa	59,3	25,1
15GPa	62,8	27,2
20GPa	65,4	28,8
15e9GPa	87,5	43,4

Tab. 6-7 : Abminderung prozentuell

Noch deutlicher ist der Einfluss des E-Moduls bei einer konstant dicken SpC-Schale zu erkennen, wenn die relativen Anteile an der Maximalverschiebung betrachtet werden. Je höher der E-Modul des Ausbaus, desto größer ist der Anteil an der maximalen Radialverschiebung. Die Endverschiebung wird bei steiferem Ausbau schneller erreicht. Vor allem direkt an der Ortsbrust treten massive Unterschiede auf, wie in Abbildung 6-12 ersichtlich ist. Ungeachtet des SpC-Ausbaus mit unendlich hohem E-Modul reicht die Bandbreite der Prozentanteile an der Endverschiebung bei der Spritzbetonschale mit 5GPa von 28,7% bis zu 36% bei 20GPa E-Modul für den Ausbau.

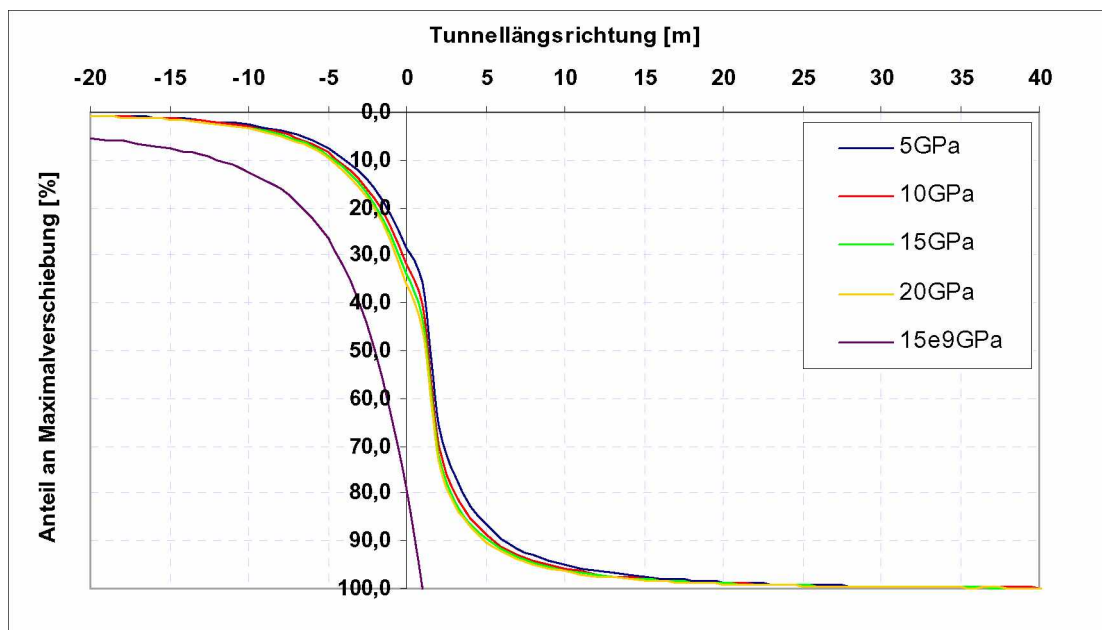


Abb. 6-12: LDP relativ in Abhängigkeit des E-Modul der SpC-Schale

Unterstrichen wird dies durch das LDP der SpC-Schale mit nahezu unendlich hohem E-Modul, 15e9GPa. Stellt man für die isotrope Schale einen nahezu unendlich hohen E-Modul für den Ausbau in Rechnung, treten demnach bereits 80% der Maximalverschiebungen vor der OB auf. Es lässt sich erkennen, dass je größer der E-Modul des Spritzbetonausbaus ist, desto mehr Verschiebungen treten bei der numerischen Berechnung mit FLAC<sup>3D</sup> bereits vor der Ortsbrust auf. Die vorgenommenen Änderungen erfolgen unter konstant gehaltenen Gebirgsparametern. Somit ist das Verhältnis

zwischen  $E\text{-Modul}_{(\text{Gebirge})}$  zu  $E\text{-Modul}_{(\text{SpC})}$  für die numerischen Berechnungsergebnisse relevant.

#### 6.2.2.4 Einfluss des E-Modul des Gebirges

Verfolgen wir diesen Gedanken weiter und verändern das Verhältnis zwischen Gebirgs- und Spritzbeton E-Modul folgt als nächster Schritt eine Abänderung des E-Modul des Gebirges bei konstant dicker SpC-Schale mit gleichbleibendem E-Modul (15GPa). Wie in Abschnitt 6.2.2.3 wird auch für diesen Abschnitt von einer SpC-Schalendicke von 20cm ausgegangen, welche im Abstand von 1m zur Ortsbrust eingebaut wird. Numerisch ermittelt werden die Ergebnisse für folgende Variationen der Gebirgsparameter. Abgeändert wird lediglich der E-Modul; die Querdehnzahl sowie die Primärspannung bleiben unverändert.

1GPa	2GPa	3GPa	5GPa
------	------	------	------

Tab. 6-8: Parametervariation

In Tabelle 6-8 werden die unterschiedlichen E-Moduli aufgelistet. Erwartungsgemäß treten bei Betrachtung der Absolutverschiebungen deutliche Unterschiede auf.

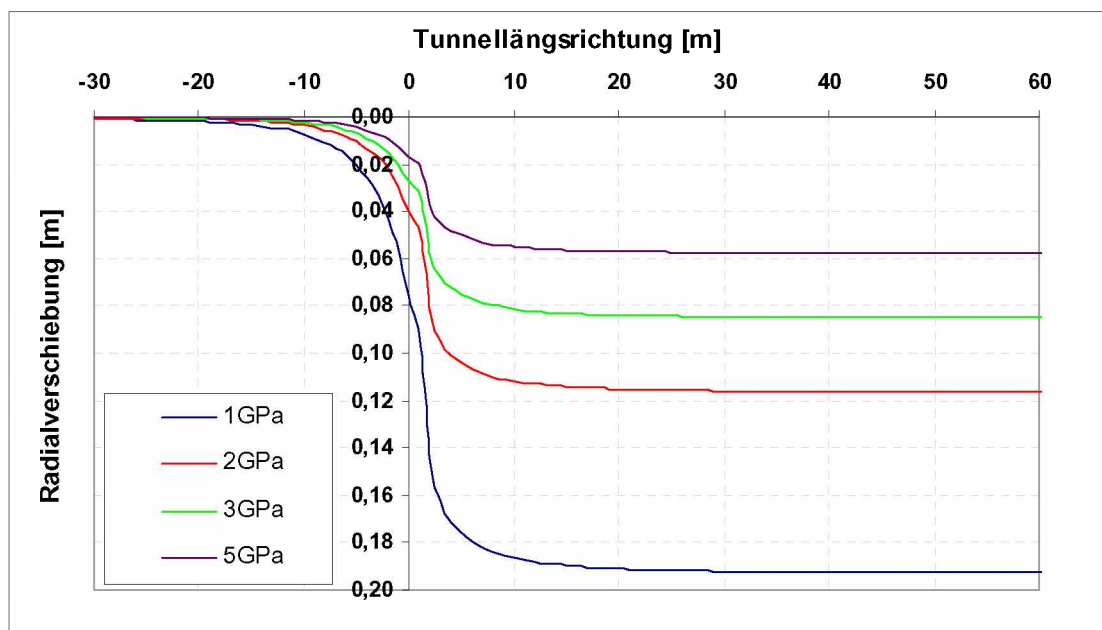


Abb. 6-13: LDP absolut in Abhängigkeit des E-Modul des Gebirges

Ein Gebirge mit kleinerem E-Modul treten mehr Radialverformungen auf (siehe Abbildung 6-13). Im Gegensatz zu den bisherigen Darstellungen betreffen die Abweichungen den gesamten Radialverschiebungsverlauf. Sowohl die Verschiebungen hinter der Ortsbrust als auch davor weisen erhebliche Unterschiede zueinander auf. Dieser Umstand ist auch bei der Darstellung der prozentuellen Abminderung gemessen an der maximal



auftretenden Radialverschiebung (bei  $E\text{-Modul}_{(\text{Gebirge})}=1\text{GPa}$ ) deutlich zu erkennen. Genau genommen nimmt die radiale Verschiebung an der OB  $u_{rOB}$  massiver ab, als im Vergleich dazu die Endverschiebung  $u_{rmax}$ . Als absolute Bezugswerte treten bei einem E-Modul des Gebirges bei 1GPa für  $u_{rmax}=0,193\text{m}$  und für  $u_{rOB}=0,075\text{m}$  auf.

E-Modul	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
2GPa	39,7	47,1
3GPa	56,0	63,7
5GPa	70,1	77,3

Tab. 6-9: Abminderung prozentuell

Wie in Tabelle 6-9 ersichtlich nimmt bei doppelt so großem E-Modul des Gebirges die Maximalverschiebung um knapp 40% ab, wohingegen die Radialverschiebung an der Ortsbrust mit 47,1% nahezu halbiert wird. Die OB-Verschiebungen nehmen nahezu in gleichem Maße ab, wie der E-Modul des Gebirges zunimmt. Beispielsweise stellt sich bei dreifachem E-Modul des Gebirges mit 36,3% lediglich etwas mehr als ein Drittel der Verschiebung ein.

In Abhängigkeit des E-Moduls des umliegenden Gebirges weichen auch die prozentuellen Verschiebungsanteile voneinander ab.

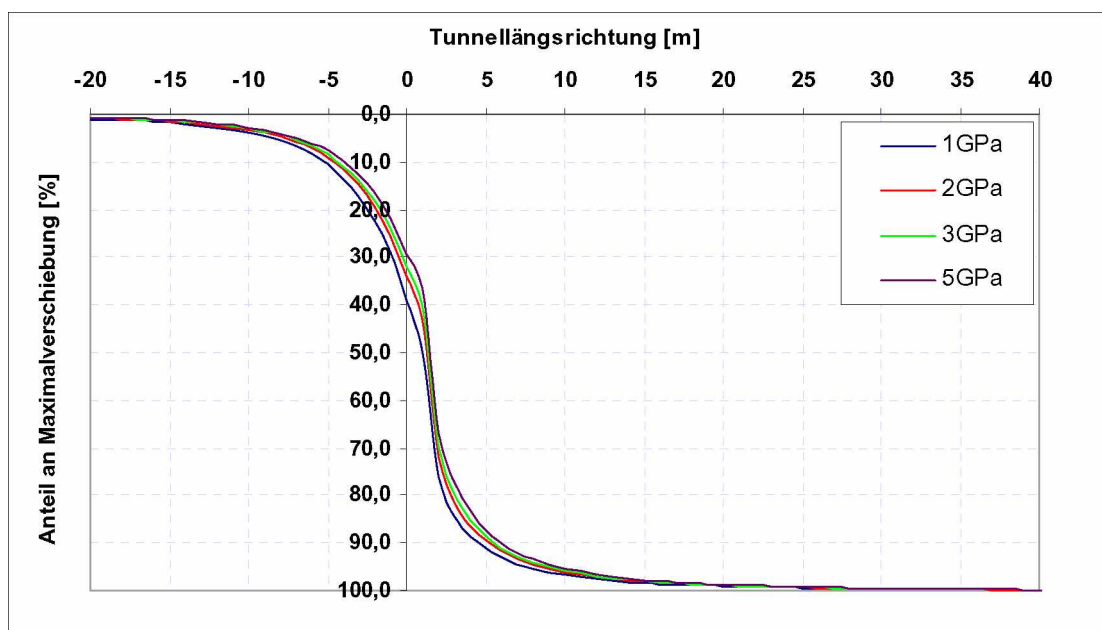


Abb. 6-14: LDP relativ in Abhängigkeit des E-Modul des Gebirges

Die Berechnungen für das Gebirge mit einem größeren E-Modul bei konstantem Spritzbeton E-Modul führen im Gegensatz zu der relativen Betrachtung von unterschiedlich hohen E-Moduli der Schale im Vergleich zum unveränderten Gebirge zu weniger prozentueller Verschiebung an der Ortsbrust (siehe Abbildung 6-14). Die Bandbreite reicht von 29,6% Anteil



an der Maximalverschiebung an der OB bei einem E-Modul des Gebirges von 5GPa bis hin zu 39,0% bei einem E-Modul im umliegenden Gebirge von lediglich 1GPa. Die Anteile schwanken somit um nahezu zehn Prozentpunkte. Der Anteil der Verschiebungsanteile am LDP mit kleinerem E-Modul im Gebirge liegt höher als bei einem Gebirge mit höherem E-Modul, was bedeutet, dass die Maximalverschiebung schneller erreicht wird.

Somit kann festgestellt werden, dass das Verhältnis von E-Modul Ausbau zu Gebirge von Relevanz ist. Ein verhältnismäßig größerer E-Modul des Ausbaus verglichen zum umliegenden Gebirge führt bei numerischen Berechnungen sowohl an der OB als auch über den gesamten Tunnelverlauf zu größeren Anteilen an der Maximalverschiebung.

### **6.2.3 Spritzbeton - zeitabhängig**

Es folgt die Betrachtung der Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen mit einem zeitabhängigen Aushärten des E-Moduls. Der formelmäßige Zusammenhang wurde bereits in Abschnitt 4.4.2.2 erläutert. Aus einer unterschiedlich hohen Vortriebsgeschwindigkeit resultiert eine unterschiedlich lange Aushärtphase jedes Schalenelements des Ausbaus, wodurch die Abhängigkeit von der Zeit implementiert wird.

Die maximalen Verschiebungen unter Annahme eines zeitabhängigen Ausbaus sind größer als unter Zugrundelegung des konstanten E-Moduls direkt nach Einbau siehe Abbildung 5-7. Die zur Berechnung verwendeten Vortriebsgeschwindigkeiten (VG) sind: 1, 2, 4, 6 und 10m pro Tag. Zusätzlich wird auch der Einbauort variiert. Für den Einbauort werden die Abstände zur OB von den Rechnungen ohne zeitabhängigen E-Modul übernommen - mit Ausnahme des 10m Abstandes zur Ortsbrust.

#### **6.2.3.1 Einfluss der Vortriebsgeschwindigkeit**

Unterschiedliche VG und daraus resultierende Einflüsse auf die Höhe des E-Moduls führen zu veränderten Radialverschiebungsverläufen. In Abbildung 6-15 werden die unterschiedlichen LDPs aufgrund verschieden hoher VG in Absolutwerten dargestellt. Für besagte Abbildung erfolgt der Einbau der SpC-Schale (Schalendicke 20cm) 1m hinter der Ortsbrust, wobei der E-Modul des Gebirges 2GPa beträgt.

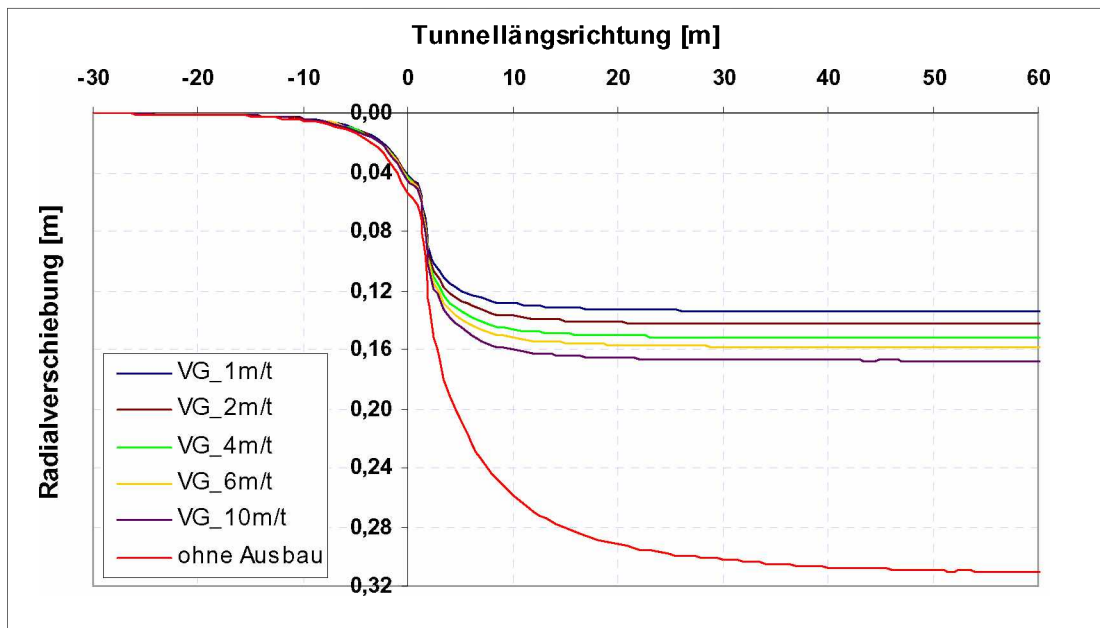


Abb. 6-15: LDP absolut in Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit

Die Auswertungen für sämtliche Einbauabstände befinden sich im Anhang. Absolut betrachtet tritt bei schnellerem Vortrieb mehr Radialverschiebung auf. Nehmen sämtliche Kurven vor der OB einen vergleichbaren Verlauf an, divergieren diese hinter der OB ab Tunnelmeter 1 deutlich. Die Vortriebsgeschwindigkeit hat somit mehr Auswirkung auf die maximale Radialverschiebung als auf die Verschiebung an der Ortsbrust. Um eine Abminderung durch langsameren Vortrieb prozentuell darstellen zu können werden zunächst die absoluten Bezugswerte ermittelt. Bezogen werden die maximalen Radialverschiebungswerte auf die Werte des LDPs ohne Ausbau. Wie aus Tabelle 6-4 entnommen werden kann, sind dies:  $u_{rmax}=0,313m$  und  $u_{rOB}=0,055m$ .

Die prozentuellen Abminderungen aufgrund eines zeitabhängigen E-Moduls der Spritzbetonschale sind in Tabelle 6-10 aufgelistet.

direkt an OB			1m hinter OB			2m hinter OB		
VG	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	VG	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	VG	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
10m/t	53,0	21,8	10m/t	46,4	16,8	10m/t	38,6	12,4
6m/t	55,8	23,6	6m/t	49,3	18,5	6m/t	40,7	13,4
4m/t	57,8	24,6	4m/t	51,3	19,8	4m/t	42,1	14,1
2m/t	60,7	26,2	2m/t	54,3	21,7	2m/t	44,5	15,2
1m/t	63,2	27,7	1m/t	57,1	23,5	1m/t	46,5	16,2

Tab. 6-10: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 0,1 und 2m; zeitabhängig

Diese Prozentsätze beziehen sich auf den Einbauort im Abstand von 0,1 und 2m zur OB. Für die Einbauabstände 3m bzw. 5m von der Ortsbrust treten

folgende prozentuelle Abminderungen von der maximalen Radialverschiebung ohne Ausbau auf.

3m hinter OB			5m hinter OB		
VG	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	VG	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
6m/t	34,8	10,4	6m/t	27,1	6,6
4m/t	36,2	11,0	4m/t	28,2	7,1
2m/t	38,3	12,0	2m/t	30,0	7,7
1m/t	40,0	12,8	1m/t	31,5	8,4

Tab. 6-11: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 3 und 5m; zeitabhängig

Durch Verringerung der VG von 10m/t auf 1m/t wird beispielsweise für den SpC-Einbau direkt an der Ortsbrust der maximale Wert der Radialverschiebung um gut 10% abgemindert (siehe Tabelle 6-10).

Die Betrachtung der relativen Verschiebungsverläufe lässt auch Aussagen bezüglich des Einflusses der VG auf den Verschiebungsverlauf treffen. Exemplarisch wird hier die Darstellung für den Stützmitteinbau direkt an der Ortsbrust gewählt (siehe Abbildung 6-16).

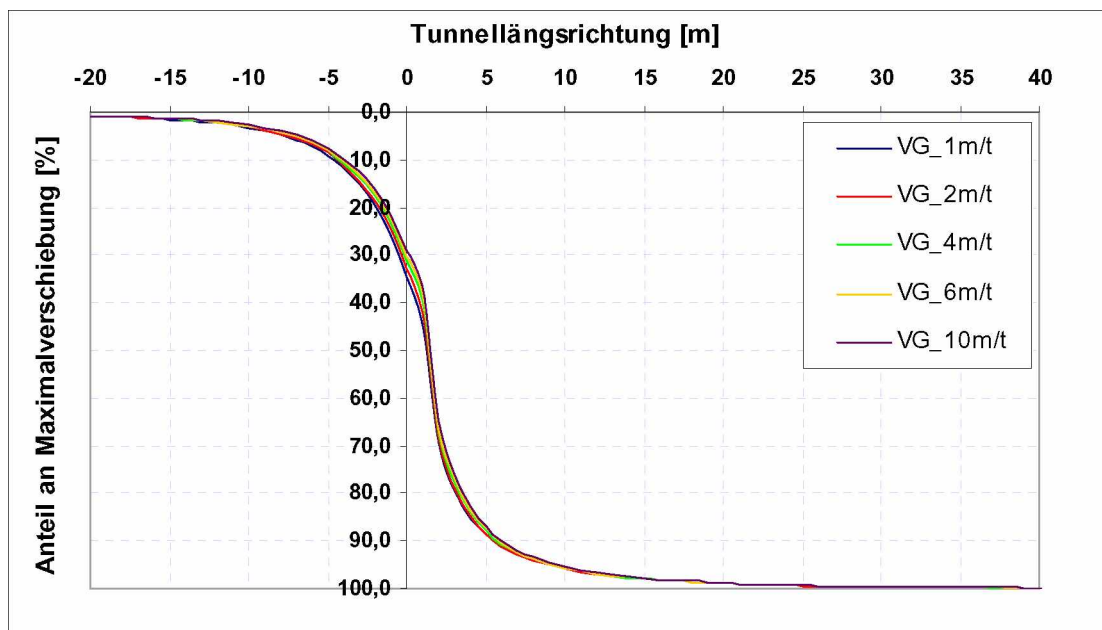


Abb. 6-16: LDP relativ in Abhängigkeit der VG

Je langsamer vorgetrieben wird, desto mehr prozentuelle Verschiebung stellt sich bereits an der Ortsbrust ein. Die Werte für die einzelnen VG schwanken zwischen 29,1% bei einer VG von 10m/t und 34,3% bei 1m/t Vortriebsgeschwindigkeit. Die Darstellungen für die restlichen Einbauabstände sind im Anhang zu finden. Es sei hier erwähnt, dass mit zunehmendem Abstand die Bandbreite der Anteile geringer wird, weshalb der Einfluss des Einbauortes im folgenden Abschnitt untersucht wird.

### 6.2.3.2 Einfluss des Einbauortes

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des Einbauortes auf den Radialverschiebungsverlauf genauer betrachtet werden. Aufgrund der Tatsache, dass es in Abhängigkeit des Abstandes zur OB für den Stützmitteleinbau bei zeitunabhängigem Verhalten des SpC zu deutlichen Einflüssen gekommen ist, ist auch bei Einbau einer zeitabhängigen Schale davon auszugehen. Wie aus Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11 hervorgeht, hat die Variation des Einbauortes mehr Einfluss auf die maximale Radialverschiebung als eine Änderung der VG. Um dies zu verdeutlichen, wird in Abbildung 6-17 eine LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort dargestellt.

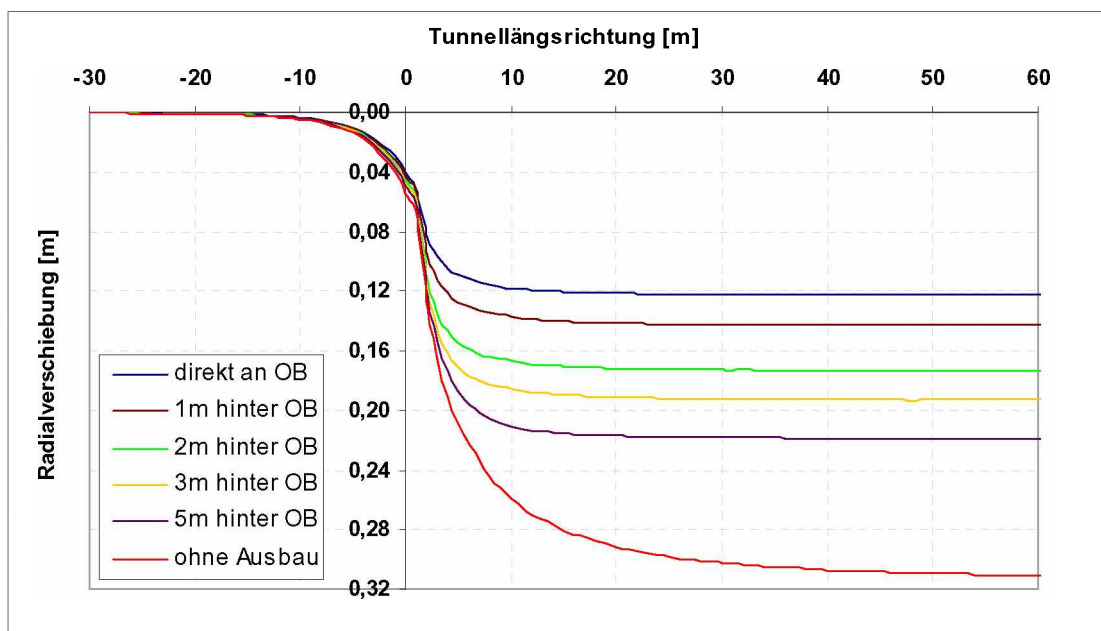


Abb. 6-17: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort; zeitabhängige Betrachtung

Es werden für die Vortriebsgeschwindigkeit 2m/t die Verschiebungsverläufe skizziert. Die übrigen Auswertungen befinden sich im Anhang. Deutlich beeinflusst wird das LDP erst nach der Ortsbrust. Bei einem Einbau der SpC-Schale 5m hinter der Ortsbrust wird die maximale Radialverschiebung verglichen zum LDP ohne Ausbau um ca. 30% abgemindert. Wird direkt an der OB eingebaut kann man die Endverschiebung sogar um über 60% abmindern. Wiederum nehmen die Maximalverschiebungswerte stärker ab als vergleichsweise dazu die radialen Verschiebungen an der OB.

Auch bei Betrachtung der relativen Verschiebungsverteilungen lassen sich deutliche Unterschiede feststellen.

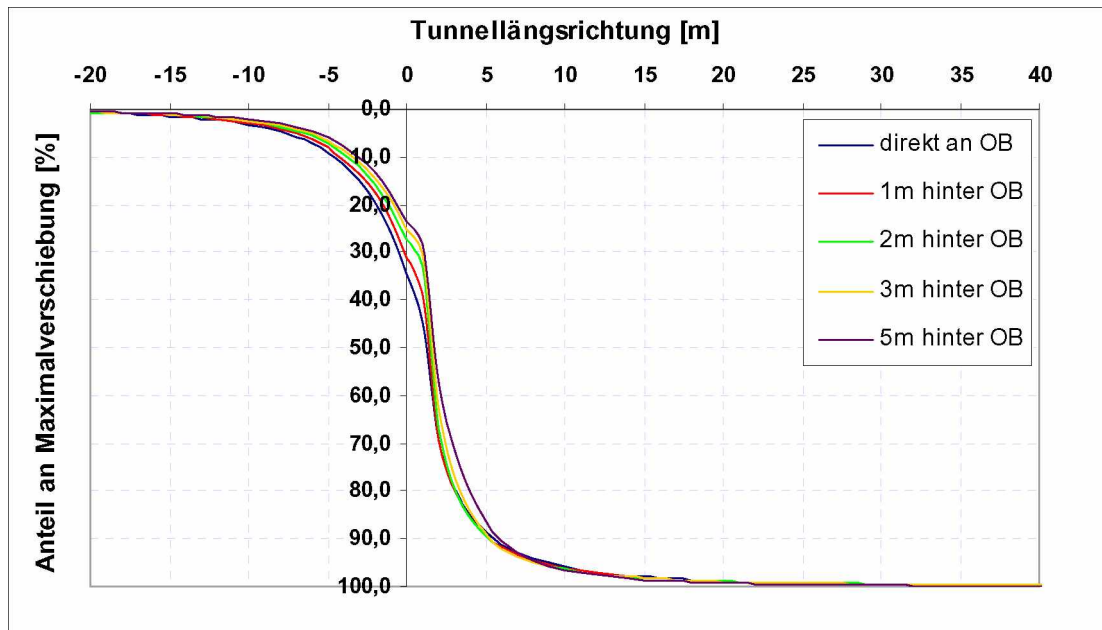


Abb. 6-18: Relative LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort; zeitabhängige Betrachtung

Die Verschiebung direkt an der OB streut merklich (siehe Abbildung 6-18). Bei einem Einbau gleich an der Ortsbrust treten prozentuell mehr Verschiebungen auf als bei einem Einbau der weiter entfernt ist. Dargestellt werden hier die Verläufe in Abhängigkeit vom Einbauort für die VG 1m/Tag. Ähnlich wie bei Spritzbeton mit zeitunabhängigem Verhalten, treten bei nahem Stützmitteleinbau prozentuell bereits mehr Verschiebungsanteile auf als bei einem Einbau mit größerem Abstand zur Ortsbrust. Die restlichen Auswertungen für die verwendeten Vortriebsgeschwindigkeiten befinden sich im Anhang. In diesem Beispiel schwanken die Werte für die Prozentanteile der Maximalverschiebung an der OB zwischen 34,3% bei einem sofortigen Einbau und 23,3% von  $u_{rmax}$  bei Einbau im Abstand von 5 Metern.

### 6.2.3.3 Einfluss des E-Moduls des Gebirges

Wie in Abschnitt 6.2.2.4 ersichtlich, haben unterschiedliche E-Moduli des Gebirges Einfluss auf das LDP. In diesem Abschnitt soll nun bestimmt werden in wie weit sich dieser Einfluss auf eine zeitabhängige SpC-Schale auswirkt. Für diese Variation werden nicht mehr sämtliche Vortriebsgeschwindigkeiten analysiert, sondern die VG 1m/t, 2m/t und 6m/t. Weiters werden die Verläufe bei Einbauabständen größer als 2m hinter der Ortsbrust nicht ermittelt.

Dargestellt werden die unterschiedlichen Verschiebungsverläufe für gleichen Einbauort des Ausbaus sowie gleiche Vortriebsgeschwindigkeit.

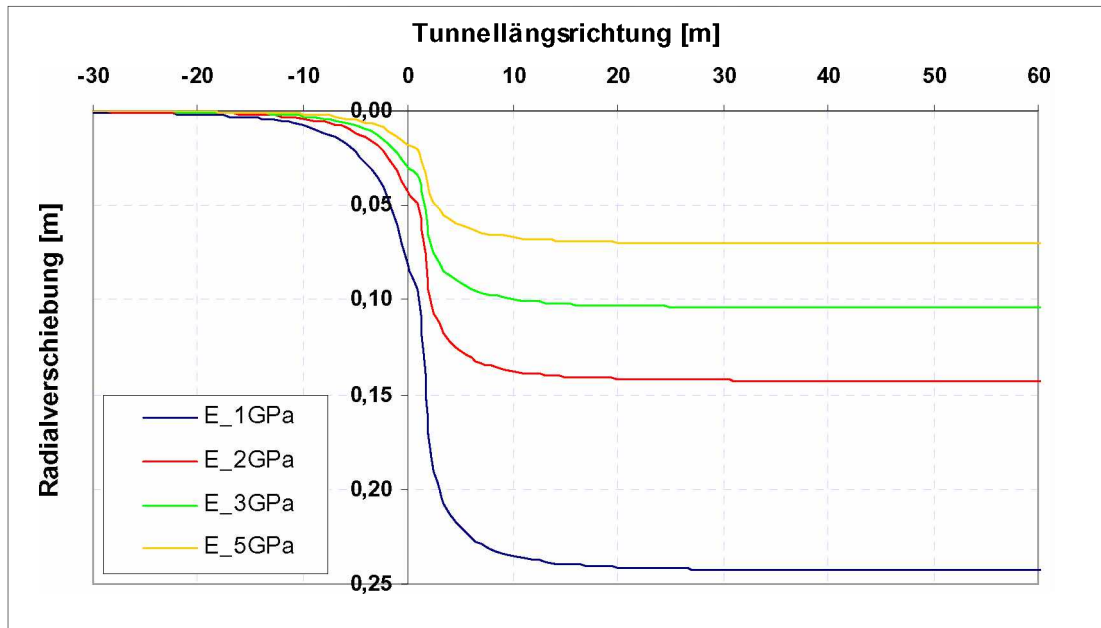


Abb. 6-19: LDP Entwicklung zufolge Variation des E-Modul des Gebirges; zeitabhängige Betrachtung

In Abbildung 6-19 beziehen sich die Absolutwerte auf eine Vortriebsgeschwindigkeit von 2m/t bei einem Einbauort 1m hinter der Ortsbrust. Es treten erhebliche Unterschiede den ganzen Verschiebungsverlauf entlang auf. Es treten deutlich weniger Radialverschiebungen auf, je größer der Wert des E-Modul des Gebirges ist. Die in Tabelle 6-12 aufgelisteten Bezugswerte ergeben sich für das Gebirge mit dem E-Modul 1GPa.

VG_1m/t; direkt an OB		VG_2m/t; direkt an OB		VG_6m/t; direkt an OB	
$u_{rmax}$ [m]	0,189	$u_{rmax}$ [m]	0,205	$u_{rmax}$ [m]	0,233
$u_{rOB}$ [m]	0,074	$u_{rOB}$ [m]	0,076	$u_{rOB}$ [m]	0,079
VG_1m/t; 1m hinter OB		VG_2m/t; 1m hinter OB		VG_6m/t; 1m hinter OB	
$u_{rmax}$ [m]	0,229	$u_{rmax}$ [m]	0,243	$u_{rmax}$ [m]	0,272
$u_{rOB}$ [m]	0,079	$u_{rOB}$ [m]	0,081	$u_{rOB}$ [m]	0,084
VG_1m/t; 2m hinter OB		VG_2m/t; 2m hinter OB		VG_6m/t; 2m hinter OB	
$u_{rmax}$ [m]	0,303	$u_{rmax}$ [m]	0,313	$u_{rmax}$ [m]	0,336
$u_{rOB}$ [m]	0,088	$u_{rOB}$ [m]	0,089	$u_{rOB}$ [m]	0,092

Tab. 6-12: Absolute Bezugswerte für  $E_{(Gebirge)}=1GPa$

Auf die aufgelisteten Absolutwerte beziehen sich die prozentuellen Abminderungen in Abhängigkeit vom Wert des E-Modul des Gebirges. Für die jeweilige VG mit dem dazugehörigen Einbauort wird nach den Maximalwerten die Reduktion aufgrund eines größeren E-Moduls berechnet.

VG_1m/t; direkt an OB			VG_1m/t; direkt an OB			VG_1m/t; direkt an OB		
E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]
2GPa	39,2	46,4	2GPa	40,0	46,8	2GPa	40,6	47,4
3GPa	55,1	63,1	3GPa	55,7	63,5	3GPa	56,0	63,4
5GPa	69,2	76,9	5GPa	69,6	76,9	5GPa	69,7	76,9
VG_1m/t; 1m hinter OB			VG_2m/t; 1m hinter OB			VG_6m/t; 1m hinter OB		
E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]
2GPa	41,3	47,4	2GPa	41,2	47,3	2GPa	41,7	47,1
3GPa	57,0	63,8	3GPa	57,2	63,7	3GPa	57,4	63,5
5GPa	71,0	77,3	5GPa	71,1	77,2	5GPa	71,6	77,3
VG_1m/t; 2m hinter OB			VG_2m/t; 2m hinter OB			VG_6m/t; 2m hinter OB		
E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]	E-Modul	u <sub>rmax</sub> [%]	u <sub>rOB</sub> [%]
2GPa	44,8	48,3	2GPa	44,6	48,2	2GPa	44,8	48,4
3GPa	61,0	64,9	3GPa	60,8	64,8	3GPa	60,9	64,9
5GPa	74,8	78,4	5GPa	74,7	78,4	5GPa	74,6	78,4

Tab. 6-13: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung

Die in Tabelle 6-13 dargestellten Prozentsätze entstammen den einzelnen LDPs für sämtliche VGs und Einbauorte, deren Diagramme im Anhang zu finden sind. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich deutlich erkennen, dass die Maximalverschiebungen in Bezug auf den Einbauort in ähnlichem Maße abnehmen, wohingegen die Abminderungen bei gleicher Vortriebsgeschwindigkeit schlechter übereinstimmen. Der Einbauort bestimmt somit die prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung deutlicher als die Vortriebsgeschwindigkeit. Ähnlich wie in Abschnitt 6.2.2.4 ist ersichtlich, dass die Radialverschiebungen an der OB noch deutlicher abnehmen als die radialen Maximalverschiebungen. Weiters kann man feststellen, dass bei weiter entferntem Einbau durch ein Gebirge mit höherem E-Modul eine deutlichere Abminderung erzielt wird. Bei einem Einbau direkt an der OB wird durch einen E-Modul von 5GPa die Absolutverschiebung um 69,6% abgemindert, während bei einem Einbau der SpC-Schale in 2m Entfernung aufgrund des höheren E-Moduls die Endverschiebung um fast drei Viertel des ursprünglichen Bezugswertes abgemindert wird.

Erwartungsgemäß lassen sich auch Unterschiede bei der Betrachtung der relativen Verschiebungsverläufe erkennen.

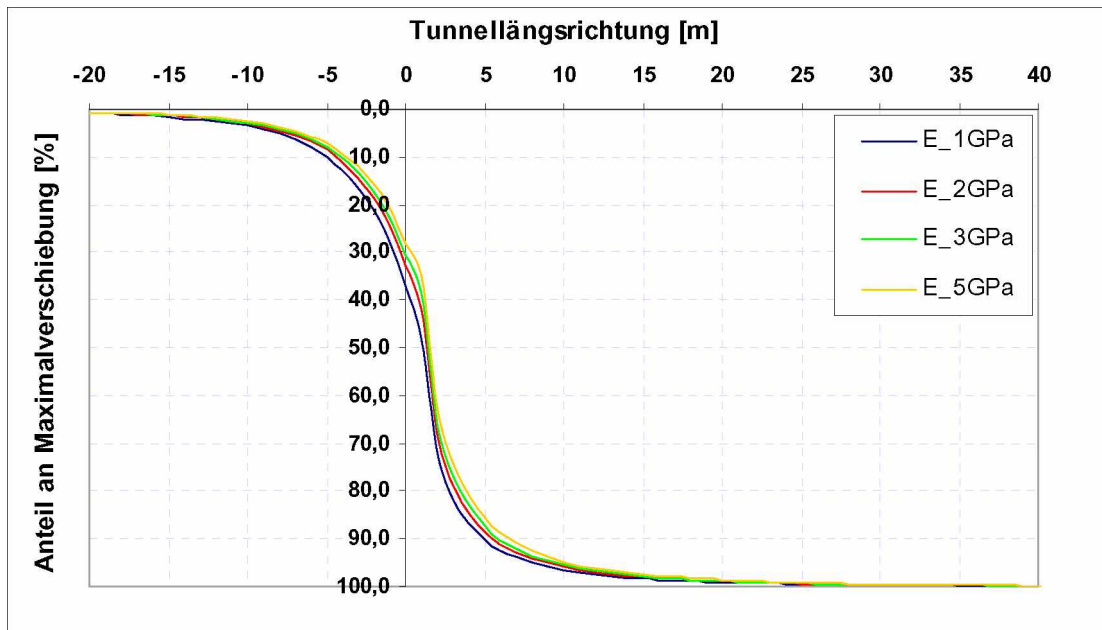


Abb. 6-20: LDP relativ in Abhängigkeit vom E-Modul des Gebirges, zeitabhängig

Ähnlich wie in Abschnitt 6.2.2.4 verlaufen die relativen Verschiebungsanteile. Dargestellt werden in Abbildung 6-20 die LDPs mit Einbau direkt an der Ortsbrust und einer Vortriebsgeschwindigkeit von 2m/t. Die Bandbreite an der OB beträgt nahezu 10%, wobei bei größerem E-Modul im Gebirge prozentuell weniger Verschiebungen an der OB auftreten. Für den skizzierten Sachverhalt tritt bei einem E-Modul von 5GPa 28,1% und bei einem E-Modul von 1GPa 37,0% der maximalen Radialverschiebung an der Ortsbrust auf.

#### 6.2.4 Vergleich zeitun- mit zeitabhängigem SpC-Ausbau

Wie in Abbildung 5-7 bereits dargestellt führt ein von Beginn an mit konstantem E-Modul in Rechnung gestellter Ausbau zu geringeren maximalen Radialverschiebungen als ein Ausbau, welcher zeitabhängiges Verhalten aufweist. In diesem Abschnitt werden sowohl die Verschiebungsverläufe in Absolutwerten als auch die relativen LDPs aus Abschnitt 6.2.2 mit jenen aus Abschnitt 6.2.3 verglichen, um den Einfluss der Zeitabhängigkeit auf den Radialverschiebungsverlauf hervorzuheben. Ausgehend von demselben Einbauort werden die unterschiedlichen Verläufe in Absolutwerten dargestellt und miteinander verglichen. Als Bezugswert werden die maximalen Verschiebungswerte des LDPs ohne Ausbau herangezogen.



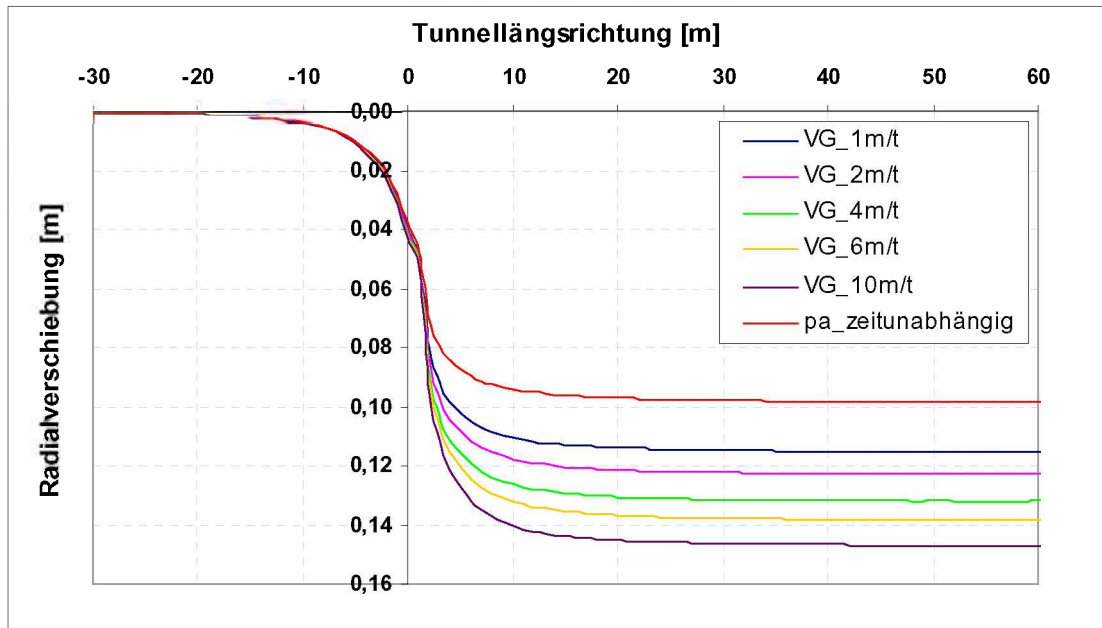


Abb. 6-21: LDP Entwicklung zeitun- und zeitabhängiger SpC

In Abbildung 6-21 wird direkt an der Ortsbrust SpC mit zeitunabhängigem Verhalten eingebracht und verglichen mit den LDPs für Ausbau mit zeitabhängigem Verhalten. Der Maximalwert liegt mit knapp 10cm deutlich unter der Maximalverschiebung sämtlicher zeitabhängiger Verläufe. Die übrigen Auswertungen befinden sich im Anhang. Zu erwähnen ist, dass mit zunehmender Entfernung des Einbauortes zur OB der Unterschied zwischen den maximalen Radialverschiebungen abnimmt. Um dies zu verdeutlichen wird ausgewertet wie viel die prozentuelle Abminderung beträgt, wenn ein zeitunabhängiger E-Modul für den Spritzbeton verwendet wird. Als absolute Bezugswerte dienen die Werte aus Tabelle 6-4. Für den Spritzbetoneinbau im Abstand 0, 1 und 2m gelten folgende Prozentsätze.

direkt an OB			1m hinter OB			2m hinter OB		
Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
10m/t	53,0	21,8	10m/t	46,4	16,8	10m/t	38,6	12,4
6m/t	55,8	23,6	6m/t	49,3	18,5	6m/t	40,7	13,4
4m/t	57,8	24,6	4m/t	51,3	19,8	4m/t	42,1	14,1
2m/t	60,7	26,2	2m/t	54,3	21,7	2m/t	44,5	15,2
1m/t	63,2	27,7	1m/t	57,1	23,5	1m/t	46,5	16,2
E_konst.	68,6	32,1	E_konst.	62,8	27,2	E_konst.	50,9	18,8

Tab. 6-14: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 0,1 und 2m

Wie in Tabelle 6-14 aufgelistet, beträgt die Abminderung aufgrund eines zeitunabhängigen SpC-Ausbaus beim Einbau direkt an der OB knapp 70% der Maximalverschiebung von 31,3cm. Bei zunehmender Entfernung nimmt

auch der Einfluss deutlich ab. In Tabelle 6-15 werden die Abminderungen für die Einbautentfernungen 3 und 5m aufgelistet.

3m hinter OB			5m hinter OB		
Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
6m/t	34,8	10,4	6m/t	27,1	6,6
4m/t	36,2	11,0	4m/t	28,2	7,1
2m/t	38,3	12,0	2m/t	30,0	7,7
1m/t	40,0	12,8	1m/t	31,5	8,4
E_konst.	43,9	14,7	E_konst.	34,5	9,5

Tab. 6-15: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 3 und 5m

Die Verschiebungsanteile des zeitunabhängigen Verhaltens unterscheiden sich auch von jenen der Verläufe mit unterschiedlichen VG.

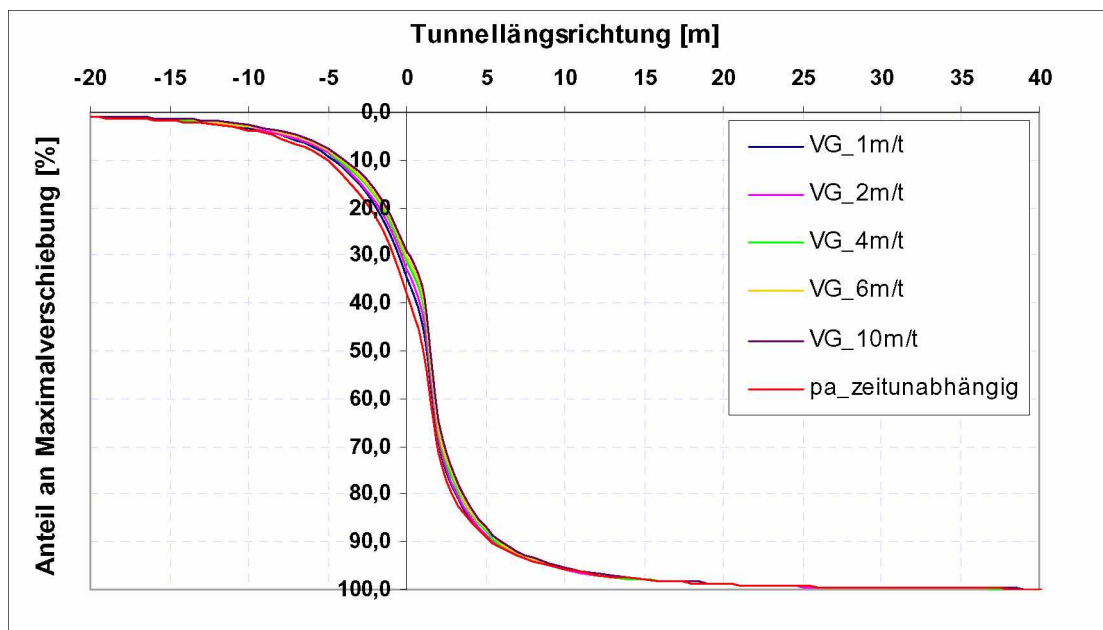


Abb. 6-22: Relative LDP Entwicklung; zeitun- und zeitabhängiges Verhalten der Spritzbetonschale

Anteilmäßig treten bei Einbau einer zeitunabhängigen Schale mehr Verschiebungen an der Ortsbrust ein. Dargestellt werden in Abbildung 6-22 die relativen LDP bei Einbauort direkt an der OB. Wie aus den weiteren Auswertungen, welche sich im Anhang befinden, ersichtlich, wird dieser Einfluss mit zunehmender Entfernung geringer. Die Bandbreite reicht von 37,7% Verschiebungsanteil an der Ortsbrust für Ausbau mit zeitunabhängigem Verhalten bis zu 29,1% Anteil an der Maximalverschiebung für einen Spritzbeton mit zeitabhängigem Verhalten mit einer Vortriebsgeschwindigkeit von 10m/t.

## 6.2.5 Betrachtung inkrementelle Anpassung des LDP

### 6.2.5.1 Allgemein

In diesem Abschnitt sollen nun die numerischen Berechnungsergebnisse aus FLAC<sup>3D</sup> mit einem analytischen Ansatz zur Bestimmung des LDP unter Berücksichtigung eines Spritzbetonausbaus verglichen werden. Die numerischen Ergebnisse werden mit dem LDP gemäß inkrementeller Anpassung des LDP (siehe Abschnitt 4.5.2) verglichen. Für sämtliche Auswertungen wird das analytische LDP nach Vlachopoulos und somit auch die inkrementelle Anpassung des selbigen herangezogen. Die Darstellung der unterschiedlichen LDPs erfolgt zur Illustration zusätzlich noch mit der GKL nach Salençon um zu verdeutlichen, welchen Einfluss der eingebrachte Stützdruck auf die maximale Endverschiebung hat. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich das LDP und deren Anpassung ausschließlich auf die Sekundärachse (Tunnellängsrichtung [m]) beziehen. Der negative Ausbaustützdruck ist von keinerlei Relevanz und lediglich aus Darstellungsgründen im Diagramm angegeben.

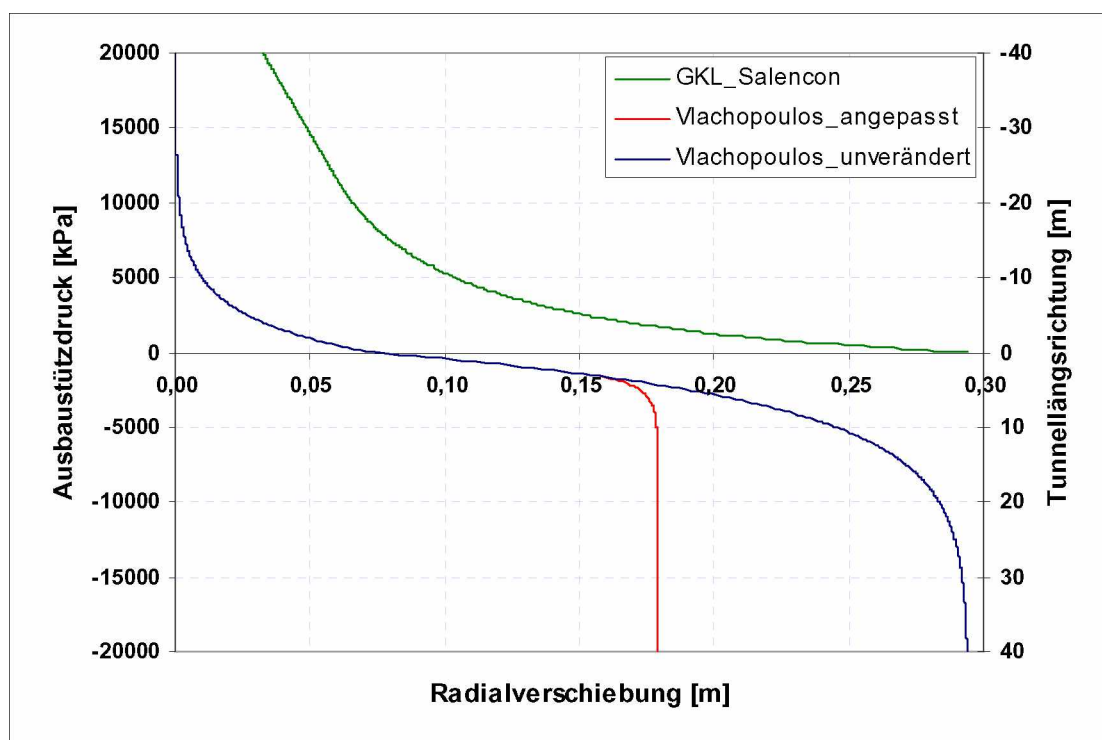


Abb. 6-23: LDP nach Vlachopoulos unverändert und inkrementell angepasst

Wie bereits in Abschnitt 4.5.2 erwähnt und in Abbildung 6-23 deutlich ersichtlich ist, wird der Verschiebungsverlauf bis zum Einbauort nicht angepasst, weshalb die beiden Verläufe in diesem speziellen Fall von Tunnellängsrichtung -40m bis 3m (Sekundärachse) ident sind. Erst ab dem

Einbau der Schale, im dargestellten Fall bei 3m hinter der Ortsbrust, wird das LDP angepasst.

### 6.2.5.2 SpC - zeitunabhängig

Zunächst werden sämtliche numerischen Berechnungen mit Ausbau, welcher ein zeitunabhängiges Verhalten aufweist, mit dem angepassten LDP nach Vlachopoulos verglichen.

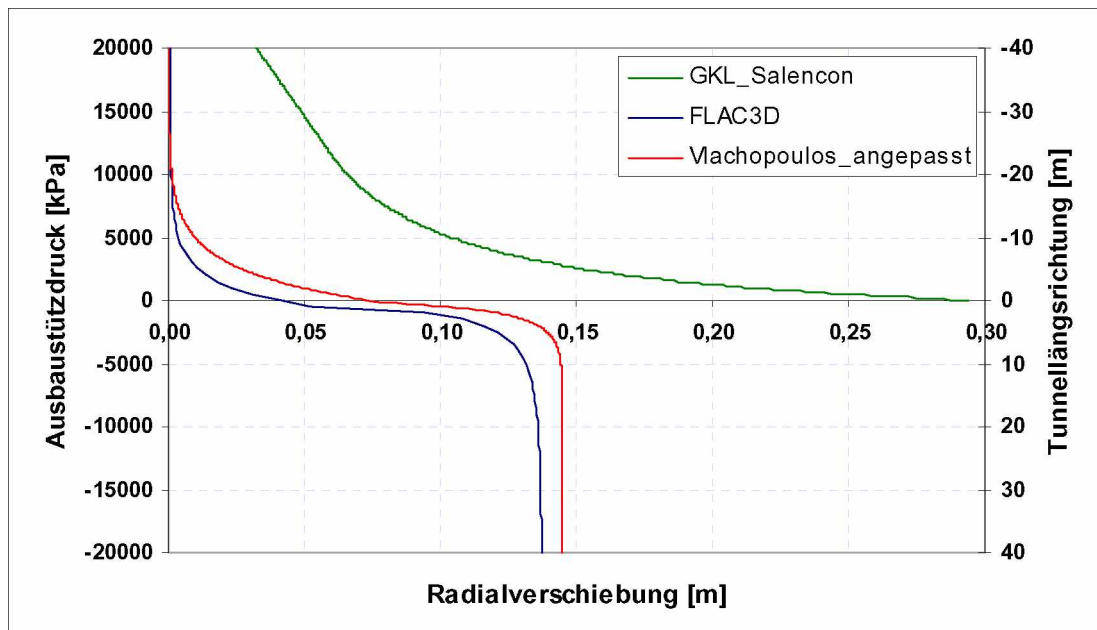


Abb. 6-24: LDP Entwicklung nach  $FLAC^{3D}$  und angepasstes LDP nach Vlachopoulos

In Abbildung 6-24 werden die Verschiebungsverläufe für einen 10cm dicken Spritzbetonausbau, welcher einen konstanten E-Modul (15GPa) aufweist numerisch und angepasst nach Vlachopoulos dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass beide LDP einen vergleichbaren Verlauf nehmen. Für sämtliche Beispiele mit Ausbaustützdruck liefert die Numerik an der Ortsbrust geringere absolute Verschiebungswerte als der analytische Ansatz nach Vlachopoulos. Die Tatsache, dass das angepasste LDP die Verschiebung vor der OB nicht berücksichtigt, ist Grund für diese Tatsache. Die restlichen Auswertungen befinden sich im Anhang.

In der folgenden Tabelle 6-16 wird angeführt um wie viel Prozent geringer die numerisch ermittelte Radialverschiebung an der OB  $u_{rOB}$  gegenüber der nach Vlachopoulos errechneten ist. Der analytische Bezugswert für sämtliche Beispiele mit einem E-Modul des Gebirges von 2GPa beträgt  $u_{rOB}=0,073m$ .

	SpC_10cm	SpC_20cm	SpC_30cm
Abstand	$u_{rOB}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]	$u_{rOB}$ [%]
OB	45,4	49,1	51,3
1m	42,3	45,3	47,2
2m	37,0	39,0	40,4
3m	34,4	36,0	37,0
5m	31,1	32,1	32,7
10m	27,0	15,1	27,7

Tab. 6-16: Prozentuelle Unterschiede an der Ortsbrust; zeitunabhängig

Die Verschiebungen direkt an der Ortsbrust unterscheiden sich erheblich voneinander. Nach Vlachopoulos wird bei einem konstanten E-Modul einer SpC-Schale, welche direkt an der OB eingebaut wird und eine Dicke von 30cm aufweist, mehr als die doppelte Verschiebung als mit FLAC<sup>3D</sup> ermittelt. Weiters ist ersichtlich, dass bei einem zeitunabhängigen Ausbau die prozentuellen Unterschiede mit der Entfernung des Einbauortes zur OB abnehmen. Es lässt sich auch eine Tendenz hinsichtlich Schalendicke erkennen. Mit zunehmender Dicke nehmen auch die Unterschiede zu. Bei Einbau einer SpC-Schale mit 10cm Dicke 2m hinter der OB ist die numerisch bestimmte Verschiebung an der OB um 37% geringer als die nach Vlachopoulos ermittelte  $u_{rOB}$ , während die Verschiebung durch eine 30cm dicke Schale um 40,4% abgemindert wird.

Betrachtet man die LDP in absoluten Werten für Beispiele mit einem von der Ortsbrust weiter entfernten Einbauort, stellt man Überschneidungen zwischen inkrementell angepasstem LDP nach Vlachopoulos und numerisch bestimmtem LDP fest.

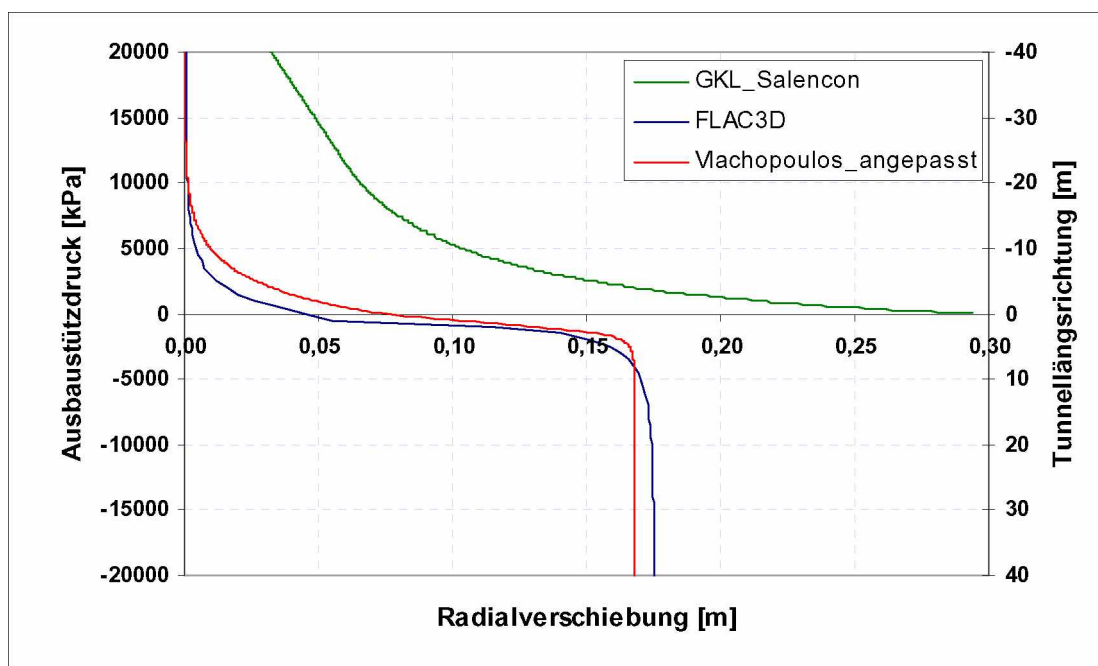


Abb. 6-25: LDP Entwicklung; zeitunabhängige Betrachtung für Spritzbeton

In Abbildung 6-25 wird ein 20cm dicker Spritzbetonausbau mit konstantem E-Modul 3m hinter der OB eingebracht und in absoluten Zahlen dargestellt. Während numerisch gerechnet weniger Radialverschiebung an der Ortsbrust auftritt übersteigt die maximale Hohlraumrandverschiebung den Wert, den das inkrementell angepasste LDP liefert. Die numerisch ermittelten Verschiebungsverläufe für die Berechnungen ohne Ausbau aus Abschnitt 6.1 zeigen, dass die analytischen Ansätze vergleichsweise mehr Radialverschiebung an der Ortsbrust ermitteln. Numerisch gerechnet übersteigt die maximale Hohlraumrandverschiebung jedoch den analytisch ermittelten Vergleichswert.

Grundsätzlich muss man feststellen, dass ein örtlich naher Ausbau zur Ortsbrust numerisch ermittelt geringere Verschiebungswerte liefert als analytisch bestimmt. Bei Betrachtung der maximalen Verschiebungswerte wird die Problematik augenscheinlich. Für zeitunabhängigen Spritzbetonausbau liefert die Numerik bei einem Einbau bis 2m hinter der Ortsbrust geringere Verschiebungswerte als das inkrementell angepasste LDP. In folgender Tabelle 6-17 werden die prozentuellen Abweichungen vom maximalen Verschiebungswert  $u_{rmax}$  nach angepasstem LDP nach Vlachopoulos aufgelistet. Negative Prozentsätze bedeuten, dass die Numerik geringere radiale Endverschiebungen liefert.

	SpC_10cm	SpC_20cm	SpC_30cm
Abstand	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rmax}$ [%]	$u_{rmax}$ [%]
OB	-4,8	-8,3	-11,8
1m	-5,2	-9,9	-14,6
2m	4,5	2,9	0,5
3m	6,5	4,5	2,6
5m	5,0	3,0	1,2
10m	2,9	1,2	0,2

Tab. 6-17: Prozentuelle Abweichungen von  $u_{rmax}$  des angepassten LDPs

Numerisch ermittelt liefert der Einbau der Schale an der OB und 1m dahinter kleinere Radialverschiebungswerte als das angepasste LDP.

Prinzipiell kann aber gesagt werden, dass bei einem weiter entfernten Einbau der SpC-Schale zwar Überschneidungen auftreten, die Tendenz jedoch ähnlich den numerischen Ergebnissen der ohne Ausbau gerechneten Beispiele ist. Derselbe Sachverhalt tritt auch bei zeitabhängigem Verhalten des E-Moduls auf.

### 6.2.5.3 SpC - zeitabhängig

Die radiale Verschiebung an der Ortsbrust liegt auch bei einem zeitabhängigen Verhalten der Spritzbetonschale numerisch gerechnet deutlich unter den Absolutwerten der Analytik.

E-Modul <sub>(Gebirge)</sub> 2GPa									
VG_1m/t		VG_2m/t		VG_4m/t		VG_6m/t		VG_10m/t	
Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]
OB	45,8	OB	44,6	OB	43,4	OB	42,7	OB	41,3
1m	42,6	1m	41,3	1m	39,8	1m	38,8	1m	37,5
2m	37,1	2m	36,4	2m	35,5	2m	35,0	2m	34,2
3m	34,5	3m	34,0	3m	33,2	3m	32,8	nicht berechnet	
5m	31,2	5m	30,7	5m	30,3	5m	29,9	nicht berechnet	

Tab. 6-18: Prozentuelle Unterschiede an der Ortsbrust ; zeitabhängig

In Tabelle 6-18 werden die Abminderungen in Abhängigkeit des Einbauortes für die jeweilige VG bei einem E-Modul des Gebirges von 2GPa dargestellt. Der absolute Bezugswert liegt wie in Abschnitt 6.2.5.2 bei  $u_{rOB}=0,073m$ . Auch hier ist ersichtlich, dass der Einbauort die Abminderung stärker beeinflusst als die VG. Dies gilt auch für die Auswertungen für die Berechnungen mit E-Modul des Gebirges 1GPa mit  $u_{rOB}=0,146m$ , 3GPa mit  $u_{rOB}=0,049m$  und 5GPa mit  $u_{rOB}=0,029m$ , die in Tabelle 6-19 aufgelistet werden.

E-Modul(Gebirge)_1GPa					
VG_1m/t		VG_2m/t		VG_6m/t	
Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]
OB	49,4	OB	47,9	OB	45,5
1m	45,4	1m	44,3	1m	42,1
2m	39,2	2m	38,6	2m	37,1
E-Modul <sub>(Gebirge)</sub> 3GPa					
VG_1m/t		VG_2m/t		VG_6m/t	
Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]
OB	44,0	OB	43,0	OB	40,2
1m	40,7	1m	39,4	1m	36,6
2m	36,0	2m	35,2	2m	33,7
E-Modul <sub>(Gebirge)</sub> 5GPa					
VG_1m/t		VG_2m/t		VG_6m/t	
Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]	Abstand	u <sub>rOB</sub> [%]
OB	41,6	OB	40,0	OB	37,7
1m	38,0	1m	36,6	1m	34,3
2m	34,5	2m	33,7	2m	32,1

Tab. 6-19: Prozentuelle Unterschiede an der OB; unterschiedliche E-Moduli

Es lässt sich hier deutlich erkennen, dass die örtliche Entfernung des Ausbaus nachhaltig den Verschiebungsverlauf beeinflusst. Zur Illustration wird ein LDP mit zeitabhängigem Verhalten für den E-Modul des Spritzbetons angeführt.



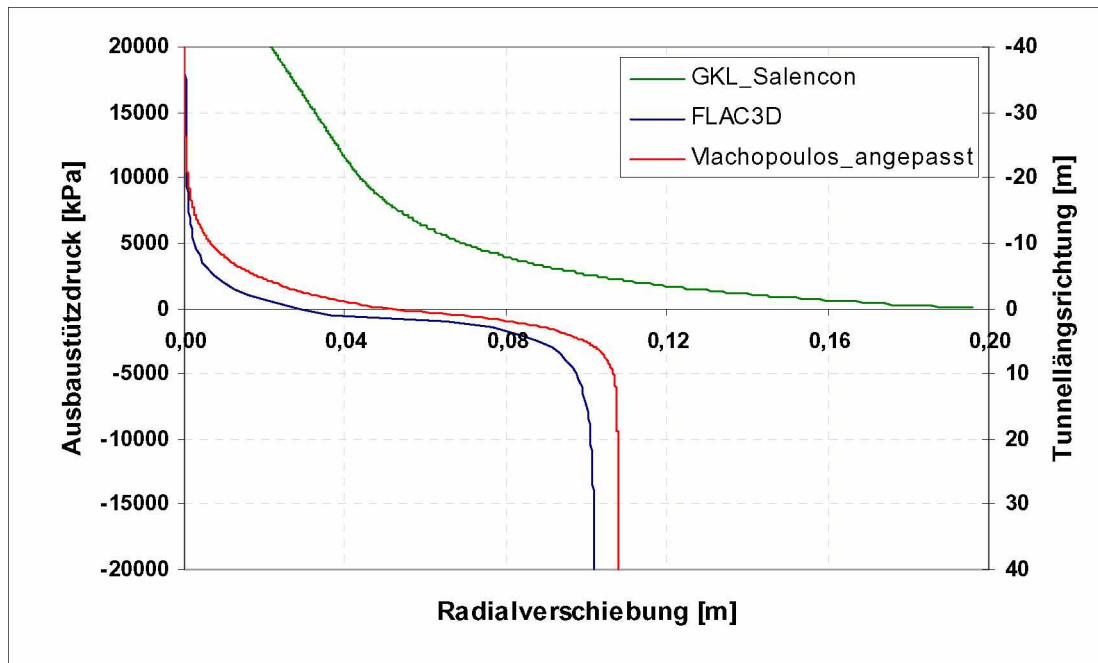


Abb. 6-26: LDP Entwicklung; zeitabhängige Betrachtung

Dargestellt wird in Abbildung 6-26 ein SpC-Schaleneinbau an der Ortsbrust eines Gebirges mit einem E-Modul von 3GPa, die VG liegt bei 6m/t. Auch hier ist zu erkennen, dass bei nahem Schaleneinbau zur Ortsbrust numerisch gerechnet stets kleinere Verschiebungen auftreten als analytisch ermittelt. Die Betrachtung der absoluten Maximalverschiebung lässt erkennen, dass ein früher Einbauort die Ergebnisse der Numerik auch deutlich beeinflusst.

E-Modul <sub>(Gebirge)</sub> 2GPa									
VG_1m/t		VG_2m/t		VG_4m/t		VG_6m/t		VG_10m/t	
Abstand	$u_{rmax}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]	Abstand	$u_{rmax}$ [%]
OB	-9,5	OB	-8,8	OB	-7,6	OB	-6,8	OB	-6,0
1m	-8,5	1m	-6,7	1m	-5,5	1m	-4,5	1m	-2,7
2m	1,1	2m	1,8	2m	2,2	2m	2,1	2m	2,4
3m	3,2	3m	3,4	3m	3,9	3m	4,1	nicht berechnet	
5m	2,2	5m	2,6	5m	3,3	5m	3,7	nicht berechnet	

Tab. 6-20: Prozentuelle Abweichung von  $u_{rmax}$  des angepassten LDPs

Bei Einbau der SpC-Schale bis 2m Entfernung zur OB treten numerisch ermittelt geringere radiale Maximalverschiebungswerte ein als bei einem örtlich weiter entfernten Einbau (siehe Tabelle 6-20).

Ein ähnlicher Zusammenhang besteht bei zeitabhängigem Verhalten der SpC-Schale bei Einbau in ein Gebirge mit 1GPa, 3GPa und 5GPa E-Modul, wobei hier anzumerken ist, dass bei einem E-Modul von 1GPa prozentuell deutlich größere Abweichungen vom  $u_{rmax}$  gemäß angepasstem LDP nach



Vlachopoulos auftreten. Des Weiteren liefert die Numerik bei einer E-Modul<sub>(Gebirge)</sub> von 1GPa für die berechneten Einbauorte mit Ausnahme des Einbaus bei einer VG von 6m/t und 2m hinter der OB nur kleinere maximale Verschiebungswerte.

<b>E-Modul<sub>(Gebirge)</sub>_1GPa</b>					
<b>VG_1m/t</b>		<b>VG_2m/t</b>		<b>VG_6m/t</b>	
<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>
<b>OB</b>	-14,9	<b>OB</b>	-12,6	<b>OB</b>	-10,0
<b>1m</b>	-14,3	<b>1m</b>	-12,5	<b>1m</b>	-8,7
<b>2m</b>	-1,6	<b>2m</b>	-1,1	<b>2m</b>	0,7
<b>E-Modul<sub>(Gebirge)</sub>_3GPa</b>					
<b>VG_1m/t</b>		<b>VG_2m/t</b>		<b>VG_6m/t</b>	
<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>
<b>OB</b>	-7,8	<b>OB</b>	-7,2	<b>OB</b>	-5,1
<b>1m</b>	-5,7	<b>1m</b>	-4,8	<b>1m</b>	-1,9
<b>2m</b>	2,1	<b>2m</b>	2,7	<b>2m</b>	2,8
<b>E-Modul<sub>(Gebirge)</sub>_5GPa</b>					
<b>VG_1m/t</b>		<b>VG_2m/t</b>		<b>VG_6m/t</b>	
<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>	<b>Abstand</b>	<b>u<sub>rmax</sub> [%]</b>
<b>OB</b>	-5,5	<b>OB</b>	-4,8	<b>OB</b>	-1,9
<b>1m</b>	-3,1	<b>1m</b>	-1,4	<b>1m</b>	0,1
<b>2m</b>	3,0	<b>2m</b>	3,1	<b>2m</b>	4,1

Tab. 6-21: Prozentuelle Abweichung von  $u_{rmax}$  des angepassten LDPs

In folgender Abbildung ist zu erkennen, dass der Abfall im angepassten LDP sehr abrupt ist. Betrachtet man einen inkrementell angepassten LDP Verlauf verglichen zum numerisch ermittelten bei einem 5m entfernten Stützmitteleinbau, fällt das angepasste LDP steil ab.

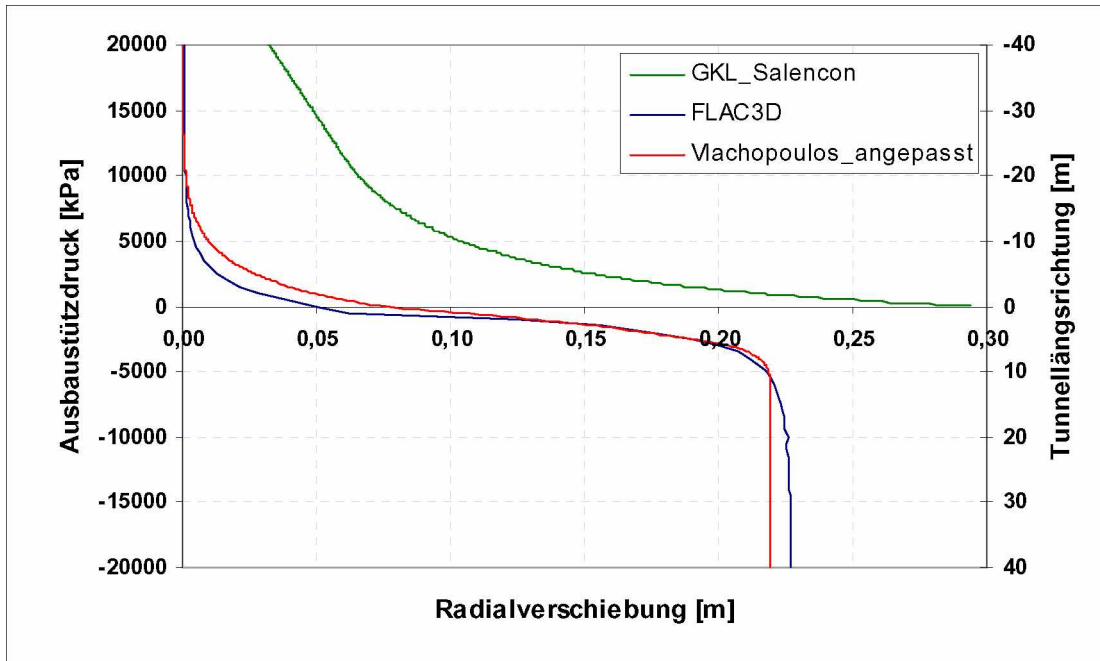


Abb. 6-27: LDP absolut; abrupter Abfall

In Abbildung 6-27 ist dies deutlich ersichtlich. Es handelt sich um einen Vortrieb mit VG 6m/t und einem Stützmitteleinbau 5m hinter der Ortsbrust. Noch deutlicher lässt sich der abrupte Abfall, wo sich in weiterer Folge die maximale Radialverschiebung einstellt, durch die relative Betrachtung der Verschiebungsanteile darstellen.

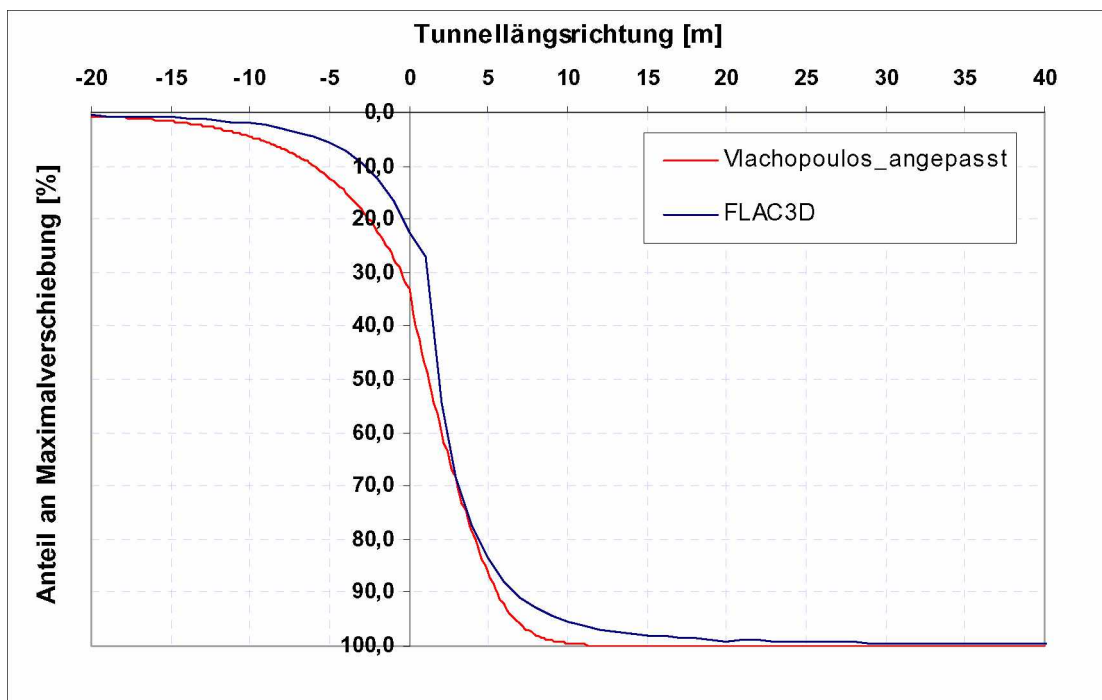


Abb. 6-28: LDP relativ

In Abbildung 6-28 wird derselbe Sachverhalt wie zuvor in Abbildung 6-27 dargestellt, mit dem Unterschied, dass hier die relativen Anteile an der Maximalverschiebung aufgetragen werden. Der deutliche Abfall im absoluten LDP von Abbildung 6-27 lässt sich dadurch erklären, dass bereits bei 14,24m hinter der Ortsbrust die maximale Radialverschiebung auftritt – sozusagen die Endverschiebung erreicht wird. Im Vergleich dazu tritt die  $u_{rmax}$  für die numerische Rechnung erst in einer Entfernung von 53m zur OB auf.

## 7 Schlussfolgerung

Es lässt sich feststellen, dass die numerisch generierten Berechnungsergebnisse durchaus mit den analytisch ermittelten Verschiebungsverläufen vergleichbar sind. Unter Berücksichtigung sämtlicher Vereinfachungen und Randbedingungen können vergleichbare Verläufe festgestellt werden. Nichtsdestotrotz treten deutliche Unterschiede auf.

Wie im Zuge dieser Arbeit ersichtlich wird, liefern die beiden betrachteten Radialverschiebungsverläufe, einerseits mittels FLAC<sup>3D</sup> ermittelt und andererseits der analytische Berechnungsansatz nach Vlachopoulos, größenordnungsmäßig ähnliche Ergebnisse und Verläufe. Jedoch muss festgestellt werden, dass diese beiden Verfahren zur Ermittlung der radialen Verschiebungsverläufe in Tunnellängsrichtung vor allem im Ortsbrustbereich deutlich divergieren.

Generell stellen sich beide Verfahren ähnlich auf die unterschiedlichen Variationen ein, doch Einflüsse in Ortsbrustnähe und davor werden deutlich unterschiedlich ermittelt und beeinflussen das Ergebnis, in diesem Fall den radialen Verschiebungsverlauf, nachhaltig.

Bei Einbau einer Spritzbetonschale passt sich das numerisch ermittelte LDP doch deutlich unterschiedlich an den neuen Maximalverschiebungswert an. In erster Linie liegt dies an den Einflüssen auf die Verschiebungsverteilung bis zur Ortsbrust, da die Verschiebungsanteile bis zum Stützmitteleinbau bei den analytischen Berechnungsansätzen vollkommen unberücksichtigt werden. Weiters ist der Abfall im inkrementell angepassten LDP verglichen zum numerisch berechneten Radialverschiebungsverlauf sehr steil.

Obwohl die Absolutwerte zwar vergleichbar sind, so kann der Verschiebungsverlauf dennoch weiter optimiert werden.

## 8 Quellenverzeichnis

- [1] Terzaghi, K.: Theoretische Bodenmechanik; Springer B/G/H (1954)
- [2] Kastner, H.: Statik des Tunnel- und Stollenbaus (Zweite Auflage); Springer Verlag; Berlin; (1971)
- [3] Lombardi G.: Zur Bemessung der Tunnelauskleidung mit Berücksichtigung des Bauvorganges; Schweizerische Bauzeitung 89; 793-801; (1971)
- [4] Richard, H. A., Sander M.: Technische Mechanik. Festigkeitslehre; Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden; (2008)
- [5] Seeber G.: Druckstollen und Druckschächte - Bemessung Konstruktion Ausführung; ENKE im Georg Thieme Verlag; Stuttgart-New York; (1999)
- [6] Kainrath-Reumayer S., Gschwandtner G. et al.: Das Kennlinienverfahren als Hilfsmittel für die Bemessung von tiefliegenden Tunnelbauwerken; Geomechanik und Tunnelbau; 553-560; (2009)
- [7] Gschwandtner G.; Analytische Berechnungsansätze zum Kennlinienverfahren; Diplomarbeit; (2010)
- [8] Sulem J., Panet M., Guenot A.: An Analytical Solution for Time-dependent Displacements in a Circular Tunnel International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract 24; 155-164; (1987)
- [9] Salençon, J.: Contraction Quasi-Statique D'une Cavité a Symmetrie Sphérique Ou Cylindrique Dans Un Milieu Elastoplastique; Annales Des Ponts Et Chaussées,4; 231-236; (1969)
- [10] Vlachopoulos N., Diederichs M.S.: Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnel; Rock Mechanics and Rock Engineering 42; 131-146; (2009)
- [11] Gesta P. et al.: Tunnel Support and Lining; A.F.T.E.S Groupe de travail Nr.7; 206-222; (N/A)
- [12] CEB-FIP (1978)
- [13] Hoek E., Brown E.T.; Ground response curves for Rock Tunnels; (1983)
- [14] Itasca Consulting Group: Flac3D Version 4.0 Manual; (2009)
- [15] Pilgerstorfer T.: Prediction of displacement development using closed formsolution; Diplomarbeit; TU-Graz; (2008)
- [16] Kainrath-Reumayer, S. et al.: Beitrag zur Anwendung des Kennlinienverfahrens; Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Vol. 155(2); 83-89; (2010)

## 9 Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 4-1: Mohr'scher Spannungskreis [7]</i> .....	6
<i>Abb. 4-2: Elastisch-Idealplastisches Materialverhalten [4]</i> .....	7
<i>Abb. 4-3: GKL nach Sulem und Salençon</i> .....	11
<i>Abb. 4-4: AKL zeitun- und zeitabhängig</i> .....	13
<i>Abb. 4-5: E-Modul Entwicklung in Tunnellängsrichtung</i> .....	14
<i>Abb. 4-6: LDP nach Hoek und Vlachopoulos</i> .....	16
<i>Abb. 4-7: Inkrementelle Anpassung des LDP durch Ausbaustützdruck [7]</i>	17
<i>Abb. 5-1: Zonenunterteilung des Netzes</i> .....	20
<i>Abb. 5-2: LDP Numerik vs Analytk (ohne SpC-Ausbau)</i> .....	21
<i>Abb. 5-3: LDP Aufweichen vs ohne Aufweichen</i> .....	23
<i>Abb. 5-4: LDP in Abhängigkeit von der Steifigkeit</i> .....	25
<i>Abb. 5-5: LDP mit Ausbau: shell vs liner</i> .....	26
<i>Abb. 5-6: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort</i> .....	27
<i>Abb. 5-7: LDP Entwicklung zeitunabhängiger vs zeitabhängiger SpC</i> .....	28
<i>Abb. 6-1: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von <math>r_p/r</math></i> .....	30
<i>Abb. 6-2: LDP Vergleich für die Parametersätze 1-3; <math>r_p/r=2,5</math></i> .....	32
<i>Abb. 6-3: Vergleich zwischen LDP nach FLAC<sup>3D</sup> mit LDP nach Hoek und Vlachopoulos</i> .....	33
<i>Abb. 6-4: Vergleich Anteil an der Maximalverschiebung für das Verhältnis <math>r_p/r = 1,5</math></i> .....	34
<i>Abb. 6-5: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von <math>r_p/r</math>; nach FLAC<sup>3D</sup></i> .....	35
<i>Abb. 6-6: LDP Entwicklung in Abhängigkeit von <math>r_p/r</math>; nach Vlachopoulos</i> ..	35
<i>Abb. 6-7: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort</i> .....	37
<i>Abb. 6-8: LDP Anteile an der Maximalverschiebung in Abhängigkeit vom Einbauort</i> .....	39
<i>Abb. 6-9: LDP Entwicklung in Abhängigkeit der Schalendicke</i> .....	40
<i>Abb. 6-10: LDP Anteile an der Maximalverschiebung in Abhängigkeit der Schalendicke</i> .....	41
<i>Abb. 6-11: LDP Entwicklung in Abhängigkeit des E-Moduls der Spritzbetonschale</i> .....	42
<i>Abb. 6-12: LDP relativ in Abhängigkeit des E-Modul der SpC-Schale</i> .....	43
<i>Abb. 6-13: LDP absolut in Abhängigkeit des E-Modul des Gebirges</i> .....	44
<i>Abb. 6-14: LDP relativ in Abhängigkeit des E-Modul des Gebirges</i> .....	45

---

<i>Abb. 6-15: LDP absolut in Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit</i> .....	47
<i>Abb. 6-16: LDP relativ in Abhängigkeit der VG</i> .....	48
<i>Abb. 6-17: LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort; zeitabhängige Betrachtung</i> .....	49
<i>Abb. 6-18: Relative LDP Entwicklung in Abhängigkeit vom Einbauort; zeitabhängige Betrachtung</i> .....	50
<i>Abb. 6-19: LDP Entwicklung zufolge Variation des E-Modul des Gebirges; zeitabhängige Betrachtung</i> .....	51
<i>Abb. 6-20: LDP relativ in Abhängigkeit vom E-Modul des Gebirges, zeitabhängig</i> .....	53
<i>Abb. 6-21: LDP Entwicklung zeitun- und zeitabhängiger SpC</i> .....	54
<i>Abb. 6-22: Relative LDP Entwicklung; zeitun- und zeitabhängiges Verhalten der Spritzbetonschale</i> .....	55
<i>Abb. 6-23: LDP nach Vlachopoulos unverändert und inkrementell angepasst</i> .....	56
<i>Abb. 6-24: LDP Entwicklung nach FLAC<sup>3D</sup> und angepasstes LDP nach Vlachopoulos</i> .....	57
<i>Abb. 6-25: LDP Entwicklung; zeitunabhängige Betrachtung für Spritzbeton</i> .....	58
<i>Abb. 6-26: LDP Entwicklung; zeitabhängige Betrachtung</i> .....	61
<i>Abb. 6-27: LDP absolut; abrupter Abfall</i> .....	63
<i>Abb. 6-28: LDP relativ</i> .....	63

## 10 Tabellenverzeichnis

Tab. 5-1: Parametersätze für die numerischen Berechnungen.....	24
Tab. 6-1: Absolute Bezugswerte; Numerik und Analytik (Vlachopoulos) ..	31
Tab. 6-2: Prozentuelle Abminderung abhängig vom Verhältnis $r_p/r$ .....	32
Tab. 6-3: Prozentuelle Anteile an der Maximalverschiebung direkt an der OB .....	36
Tab. 6-4: Absolute Bezugswerte.....	38
Tab. 6-5: Prozentuelle Abminderung der maximalen Radialverschiebung in Abhängigkeit vom Einbauort.....	38
Tab. 6-6: E-Moduli der SpC-Schale.....	41
Tab. 6-7 : Abminderung prozentuell .....	43
Tab. 6-8: Parametervariation.....	44
Tab. 6-9: Abminderung prozentuell .....	45
Tab. 6-10: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 0,1 und 2m; zeitabhängig .....	47
Tab. 6-11: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 3 und 5m; zeitabhängig.....	48
Tab. 6-12: Absolute Bezugswerte für E-Modul <sub>(Gebirge)</sub> =1GPa.....	51
Tab. 6-13: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung .....	52
Tab. 6-14: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 0,1 und 2m .....	54
Tab. 6-15: Prozentuelle Abminderung von der Maximalverschiebung für die Einbauabstände 3 und 5m.....	55
Tab. 6-16: Prozentuelle Unterschiede an der Ortsbrust; zeitunabhängig..	58
Tab. 6-17: Prozentuelle Abweichungen von $u_{rmax}$ des angepassten LDPs..	59
Tab. 6-18: Prozentuelle Unterschiede an der Ortsbrust ; zeitabhängig ....	60
Tab. 6-19: Prozentuelle Unterschiede an der OB; unterschiedliche E-Moduli .....	60
Tab. 6-20: Prozentuelle Abweichung von $u_{rmax}$ des angepassten LDPs .....	61
Tab. 6-21: Prozentuelle Abweichung von $u_{rmax}$ des angepassten LDPs .....	62



## 11 Formelverzeichnis

<i>Gl. 4-1: Zusammenhang Normal- und Schubspannung nach Coulomb</i> .....	6
<i>Gl. 4-2: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf um den Hohlraum nach Kirsch [5]</i> .....	7
<i>Gl. 4-3: Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb</i> .....	8
<i>Gl. 4-4: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf in der plastischen Zone für MC-Bruchkriterium [2]</i> .....	8
<i>Gl. 4-5: Formelmäßige Zusammenhänge für den Spannungsverlauf im elastischen Bereich bei Auftreten einer plastischen Zone MC-Bruchkriterium [2]</i> .....	8
<i>Gl. 4-6: Ermittlung des kritischen Ausbaustützdruckes</i> .....	9
<i>Gl. 4-7: Berechnung des plastischen Radius</i> .....	9
<i>Gl. 4-8: Bestimmung des Verschiebungsverlaufes im elastischen Bereich bei Auftreten einer plastischen Zone [8][9]</i> .....	10
<i>Gl. 4-9: Verschiebungsverlauf ohne plastische Zone</i> .....	10
<i>Gl. 4-10: Formelmäßige Zusammenhänge zur Bestimmung des Verschiebungsverlaufes in der plastischen Zone [8]</i> .....	11
<i>Gl. 4-11: Berechnung von passivem Seitendruckbeiwert <math>K_p</math> und Bestimmung des Schubmodul <math>G</math> in Abhängigkeit von E-Modul und Querdehnzahl [8]</i> .....	12
<i>Gl. 4-12: Ermittlung des Auflockerungsfaktors nach Salençon [9]</i> .....	12
<i>Gl. 4-13: Formelmäßige Zusammenhänge zur Ermittlung des Verschiebungsverlaufes in der plastischen Zone nach Salençon [9]</i> .....	12
<i>Gl. 4-14: Bestimmung des passiven Seitendruckbeiwertes <math>K_p</math> und der Berechnungsbeiwerte <math>k_p</math> und <math>q</math> nach Salençon [9]</i> .....	12
<i>Gl. 4-15: Ermittlung der Normalsteifigkeit [11]</i> .....	13
<i>Gl. 4-16: E-Modul Entwicklung in Abhängigkeit von der Zeit [12]</i> .....	15
<i>Gl. 4-17: LDP Ermittlung nach Hoek [13]</i> .....	15
<i>Gl. 4-18: Berechnungsbeiwerte für die LDP Ermittlung nach Hoek [13]</i> ...	15
<i>Gl. 4-19: Berechnungsbeiwerte nach Vlachopoulos [10]</i> .....	16
<i>Gl. 4-20: LDP Ermittlung nach Vlachopoulos [10]</i> .....	16
<i>Gl. 4-21: Berechnung der zusätzlichen Radialverschiebung zur Bestimmung des angepassten LDPs [16][7]</i> .....	17
<i>Gl. 5-1: Näherungsformel für die Steifigkeit [14]</i> .....	25

## 12 Abkürzungsverzeichnis

K	.....Seitendruckbeiwert
c	.....Kohäsion
$\varphi$	.....Reibungswinkel
$\tau$	.....Schubspannung
$\sigma_N$	.....Normalspannung
$\varepsilon$	.....Dehnung
$\varepsilon_p$	.....plastische Dehnung
$\sigma_t$	.....Tangentialspannung
$\sigma_r$	.....Radialspannung
$\sigma_0$	.....Primärspannung
$p_a$	.....Ausbaustützdruck
$r_0$	.....Hohlraumradius
$K_p$	.....passiver Seitendruckbeiwert
$\sigma_{UCS}$	.....einaxiale Druckfestigkeit
$r_p$	.....plastischer Radius
$\sigma_{re}$	.....„kritischer Ausbaustützdruck“
$\lambda_e$	.....Stützmittelkoeffizient
G	.....Schubmodul
E	.....Elastizitätsmodul
$\nu$	.....Querdehnzahl
$\Psi$	.....Dilatationswinkel
$K_{ps}$	.....Auflockerungsfaktor bei Salençon
$K_p$	.....Berechnungsbeiwert bei Salençon
q	.....Berechnungsbeiwert bei Salençon
$\chi$	.....Berechnungsbeiwert bei Salençon
$u_r$	.....Radialverschiebung
$u_{rmax}$	.....maximale Hohlraumrandverschiebung
$u_{rOB}$	.....radiale Hohlraumrandverschiebung an der Ortsbrust
$u_{pl(\pi=0)\infty}$	.....radiale Maximalverschiebung bei Hoek
$\lambda$	.....Berechnungsbeiwert bei Hoek
$\gamma$	.....Berechnungsbeiwert bei Hoek
$u_0^N$	.....normierte Radialverschiebung an der OB nach Vlachopoulos
$R^*$	.....Normierte Größe der plastischen Zone bei Vlachopoulos
$X^*$	.....Normierter Abstand zur Ortsbrust bei Vlachopoulos
$K_{SN}$	.....Normalsteifigkeit
$E_{SpC}$	.....Elastizitätsmodul für Spritzbeton
$d_{SpC}$	.....Schalendicke für Spritzbeton
$r_m$	.....Radius, gemessen bis Mitte Spritzbetonschale



## **Anhang – A**

<b>Eingabe-file .....</b>	<b>A-2</b>
<b>Auslese-file .....</b>	<b>A-5</b>

## Eingabe-file

Folgende Eingabezeilen stellen das input-file dar. Genau genommen beschreibt dieser Code eine Aushubsequenz mit zeitabhängigen Verhalten des Spritzbetons nach dessen Einbau bei 2m hinter der Ortsbrust:

```
new

set log on

set logfile bsp ;logfile-Name „bsp.log“

impgrid "netz.flac3d" ;importieren des Netz-files

group zone tunnel range cyl end1 0 0 0 end2 0 135 0 rad 5

;Mohr-Coulomb Modell - Materialkennwerte
mo mech mohr
prop young 2000.0e6 poisson 0.3 fric 35 coh 1.5e6 ten 0 dil 0 range z 0 80

fix x range x -.1 .1 ;boundary conditions allgemein
;fix x range x 79.9 80.1
fix y range y -.1 .1
fix y range y 134.9 135.1
fix z range z -.1 .1
;fix z range z 79.9 80.1

ini szz -30.0e6 ;Primärspannungszustand
ini sxx -30.0e6
ini syy -30.0e6

apply sxx -30.0e6 range x 79.9 80.1 ;stress boundaries
apply szz -30.0e6 range z 79.9 80.1

def excav ;Aushubschleife mittels fish-function excav
  y0 = 0.0
  al = 1.0
  abstand = 2.0 ;Abstand Spritzbeton zur OB
  loop l (0,94) ;loop Aushub – 95 Abschläge
    y0 = l
    y1 = y0 + al
    new_young = 2000.0e6
    diff_young = new_young / 10
```

```

loop n (0,9)                                ;loop Aufweichen des E-Moduls
  command
    prop young = @new_young range group tunnel y @y0 @y1
    step 100
  end_command
  new_young = new_young - diff_young
end_loop                                    ;Ende loop Aufweichen
ys0 = y0 - abstand * al
ys1 = y1 - abstand * al

if ys0 > -1. then

  yb0 = ys0
  yb1 = ys1
  ;vg = 1.0                                ;Vortriebsgeschwindigkeit in Abschlügen
  tabschlag = 6.0                          ;Dauer in Std → VG = 4m/Tag
  Emax = 15.0e9                            ;ESpC(28t)
  anzahl = ys1

  command                                  ;Ausbau einbringen von ys0 bis ys1
sel shell id 10 range cyl end1 0 @ys0 0 end2 0 @ys1 0 rad 5.1 y @ys0 @ys1 &
  cyl end1 0 @ys0 0 end2 0 @ys1 0 rad 4.9 not
  end_command

loop schale (1,anzahl)                    ;loop Aushärten der Schale
  anz = yb1 - 1                            ;gegen Vortriebsrichtung aushärten
  danz = anzahl - anz
  t = danz * tabschlag
  E_aldrian = Emax * Sqrt ((t/24.) / (4.2 + 0.85 * (t/24.)))
  ;Zeitabhängigkeit nach [12]

  command
    sel shell prop isotropic @E_aldrian,0.25 thickness 0.2 density 2500 &
    ran y @yb0 @yb1
  end_command

  yb0 = yb0 - al
  yb1 = yb1 - al

end_loop                                    ;Ende loop Aushärten der Schale

```

---

```
command                                ;Definieren der SpC-Schale
  sel node local xdir 1 0 0 ydir 0 -1 0    range x -0.1 0.1
  sel node fix lsys                        range x -0.1 0.1
  sel node fix x yr zr                     range x -0.1 0.1
  sel node local xdir 0 0 -1 ydir 0 -1 0    range z -0.1 0.1
  sel node fix lsys                        range z -0.1 0.1
  sel node fix x yr zr                     range z -0.1 0.1
  sel node fix y xr zr                     range y -0.1 0.1

end_command
end_if

command                                ;Aushub des aufgeweichten Abschnitts
  mo mech null range group tunnel y @y0 @y1
  solve
end_command
y0 = y1
y1 = y0 + a1
end_loop                                ;Ende loop Aushub
end

@excav

set log off
```

## Auslese-file

Folgendes file dient der Ermittlung und dem Auslesen der maximalen Radialverschiebung entlang des gesamten Hohlraumradius.

```
def setup
  a_size = 200
  b_size = 200
  filename = 'urad.dat'           ;ausgelesene Werte speichern unter urad.dat
end

@setup

def radial
  command
    tab 1 name radialverschiebung
  end_command

  gp1 = gp_head
  ri = 4.9                       ;Hohlraumrand
  ra = 5.1
  array aa(a_size) bb(b_size)
  nio1 = 0
  yposgp = 0                     ;Laufvariable
  loop while yposgp < 136       ;Tunnellänge
    urad_max = 0.0
    gp1 = gp_head
    loop while gp1 # null
      x = gp_xpos(gp1)
      z = gp_zpos(gp1)
      ypos = gp_ypos(gp1)
      r = sqrt(x^2 + z^2)
      if ypos = yposgp then
        if r < ra then
          if r > ri then
            urad = sqrt(gp_xdisp(gp1)^2 + gp_zdisp(gp1)^2) ;Radialverschiebung
            if urad > urad_max then
              urad_max = urad
            end_if
          end_if
        end_if
      end_if
      gp1 = gp_next(gp1)
    end_loop
  end_command
end
```



```
status = open(filename, 1, 1)
nio1 = nio1+1
aa(nio1) = string(yposgp) + ' ' + string(urad_max)
status = write(aa, nio1)
status = close
yposgp = yposgp + 1           ;Abschlagslänge von 1m addieren
end_loop
end
```

@radial

## **Anhang – B**

### **Diagramme – Beispiele ohne Spritzbetonschale ..... B-2**

Beispiele ..... B-2

LDP – Vergleich absolute Verschiebungswerte..... B-10

    Numerisch ermittelt..... B-10

    Analytisch (Vlachopoulos) ermittelt ..... B-12

LDP – Vergleich relative Anteile an der Maximalverschiebung..... B-14

    Numerisch ermittelt..... B-14

    Analytisch (Vlachopoulos) ermittelt ..... B-16

### **Diagramme - Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitunabhängig) B-18**

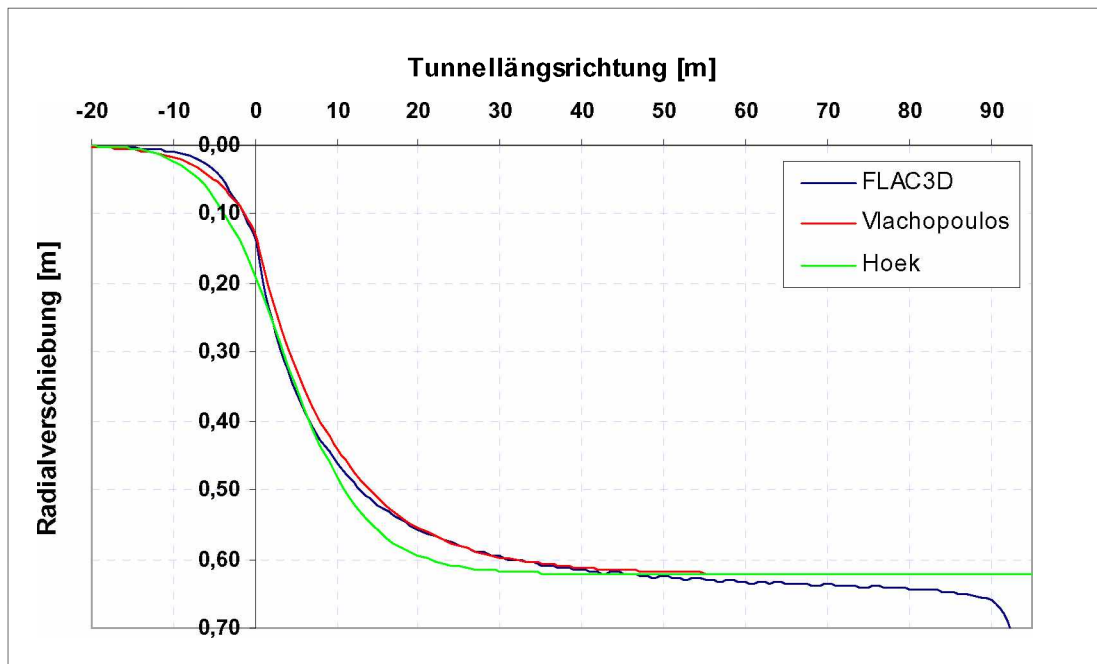
### **Diagramme - Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig) ... B-49**

## Diagramme – Beispiele ohne Spritzbetonschale

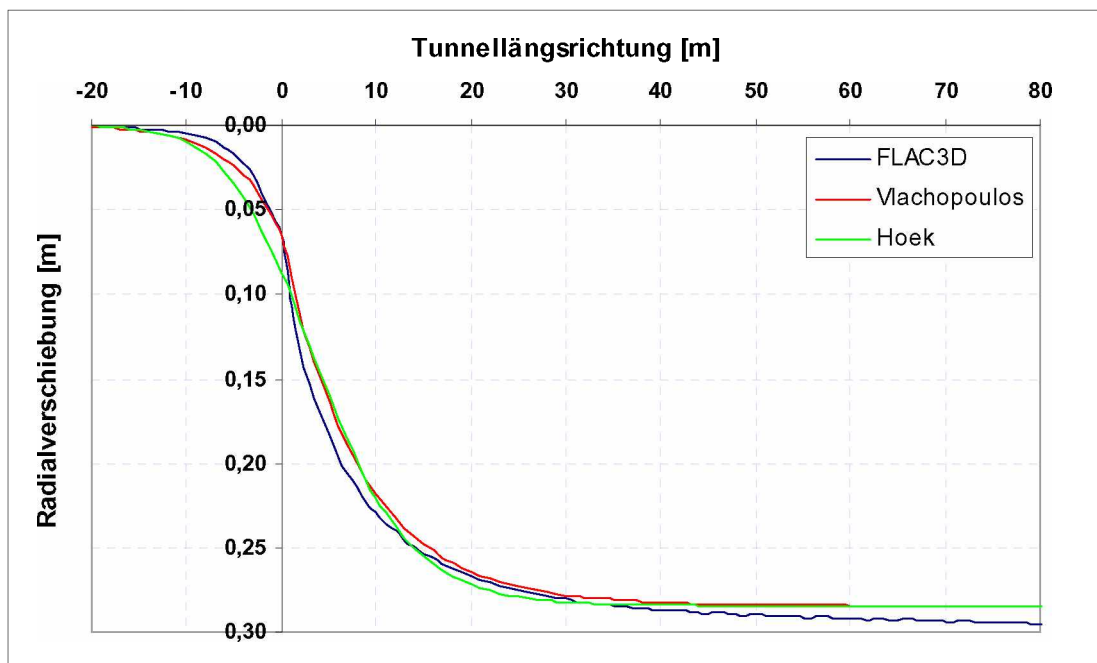
### Beispiele

Beispiele ohne Spritzbetonschale					
Satz 1	Beispiel	$\sigma_0$ [MPa]	c[MPa]	$\varphi$ [°]	$r_p/r$
	1	30,00	1,0	30	~3,0
	2	20,00	1,0	30	~2,5
	3	12,15	1,0	30	~2,0
	4	6,10	1,0	30	~1,5
	5	1,75	1,0	30	~1,0
Satz 2	Beispiel	$\sigma_0$ [MPa]	c[MPa]	$\varphi$ [°]	$r_p/r$
	6	30,0	1,5	30	~2,5
	7	30,0	2,5	30	~2,0
	8	30,0	5	30	~1,5
	9	30,0	17	30	~1,0
Satz 3	Beispiel	$\sigma_0$ [MPa]	c[MPa]	$\varphi$ [°]	$r_p/r$
	10	30,0	0,475	35	~3,0
	11	30,0	0,785	35	~2,5
	12	30,0	1,5	35	~2,0
	13	30,0	3,5	35	~1,5
	14	30,0	15,0	35	~1,0

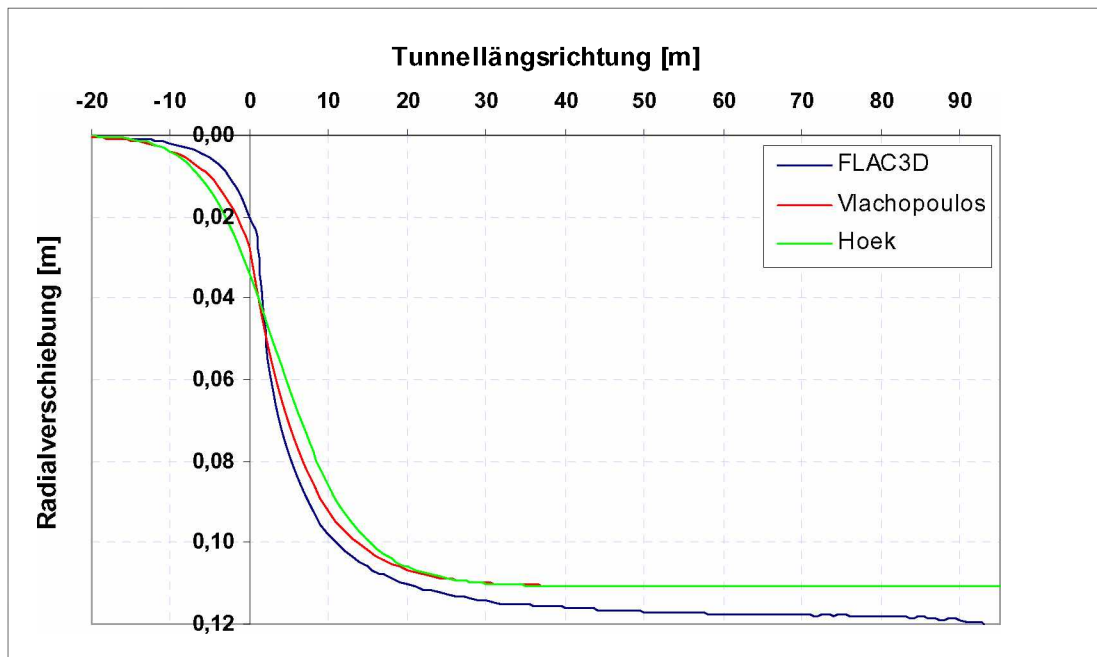
## Beispiel 1



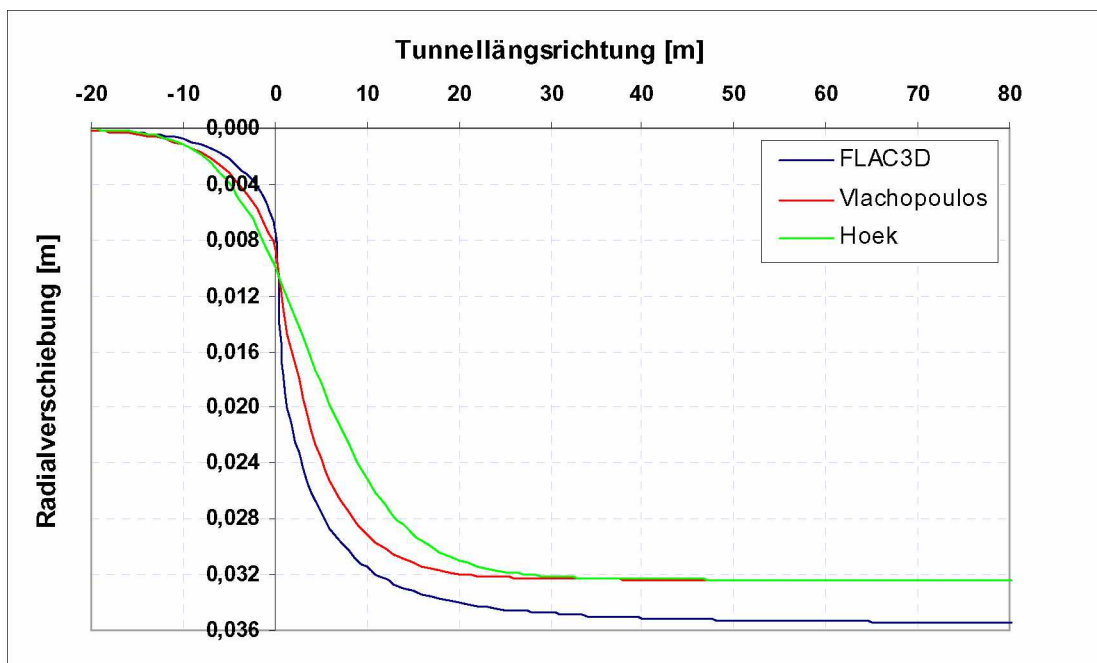
## Beispiel 2



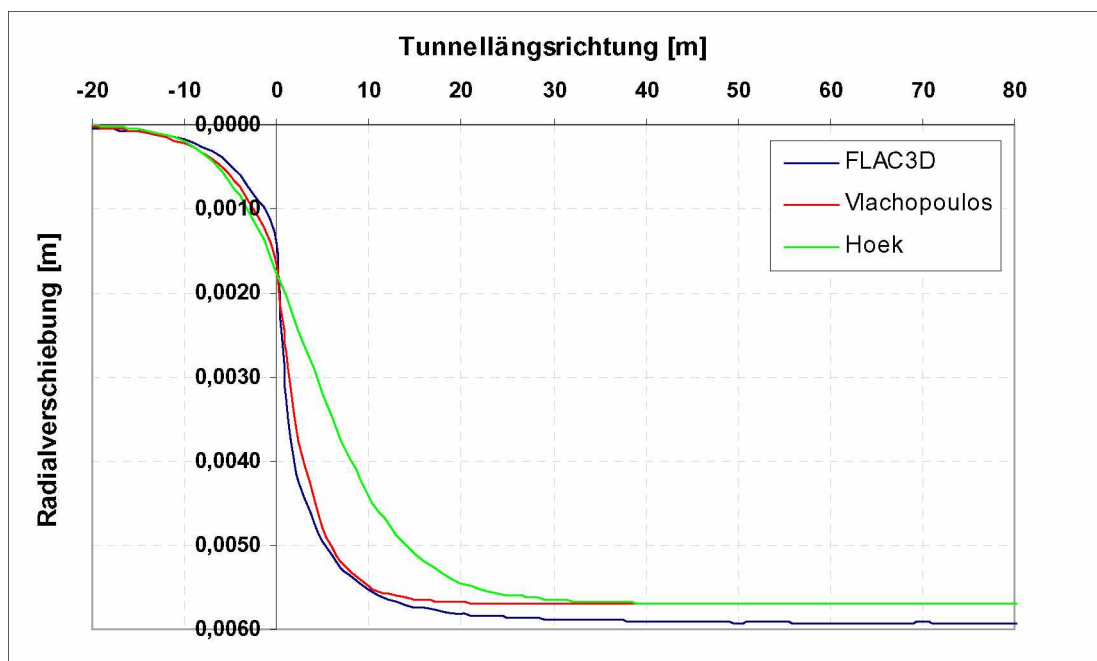
Beispiel 3



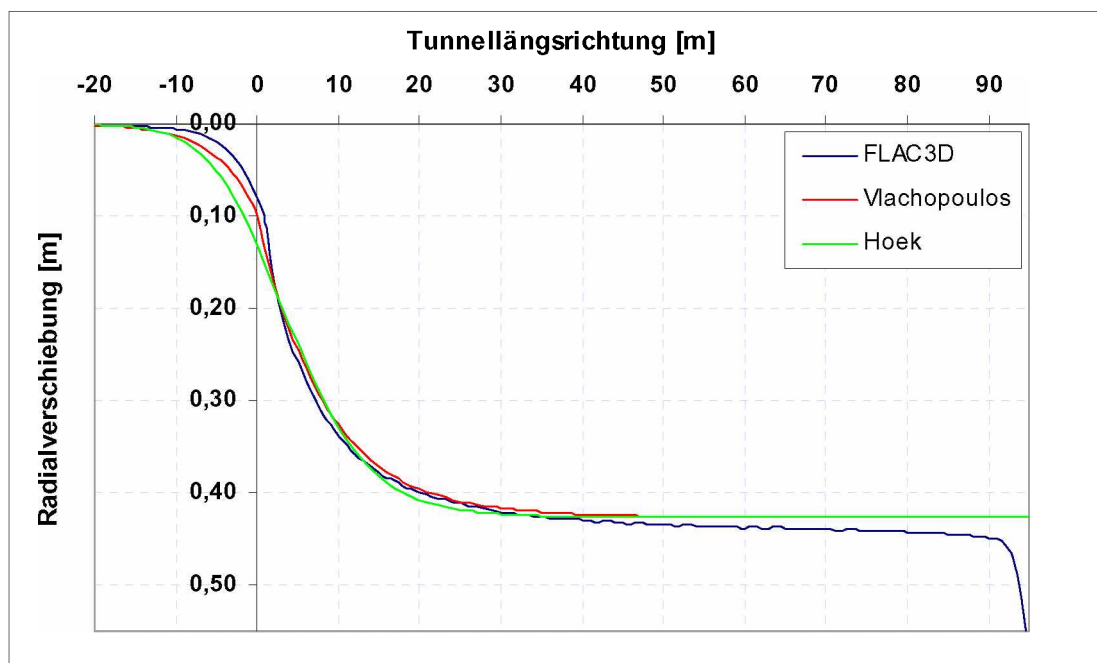
Beispiel 4



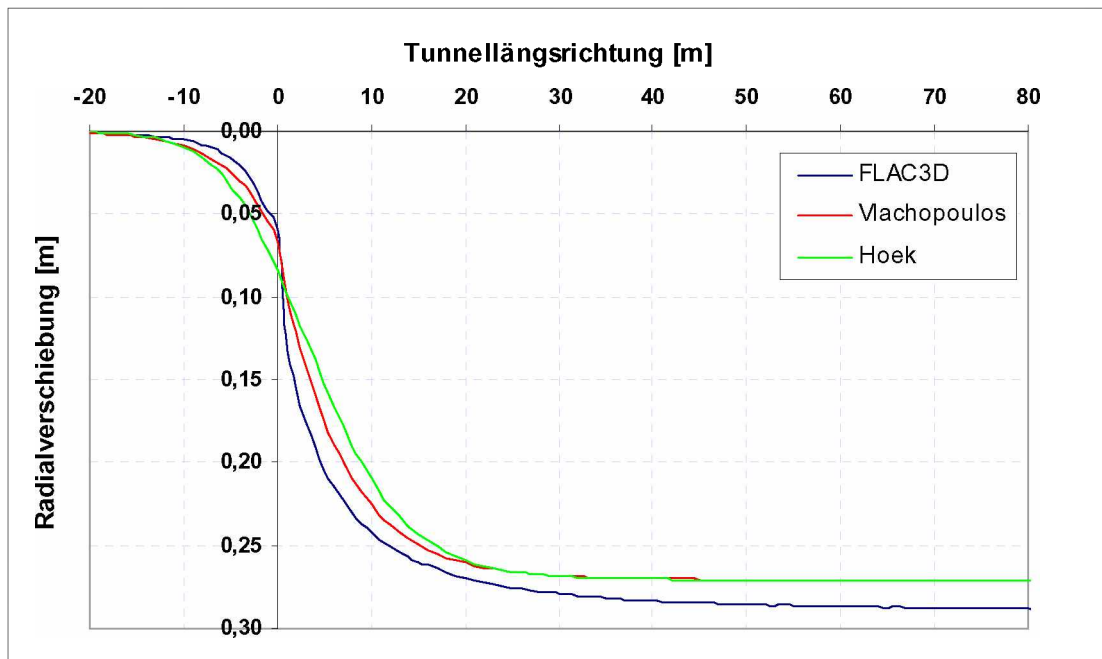
Beispiel 5



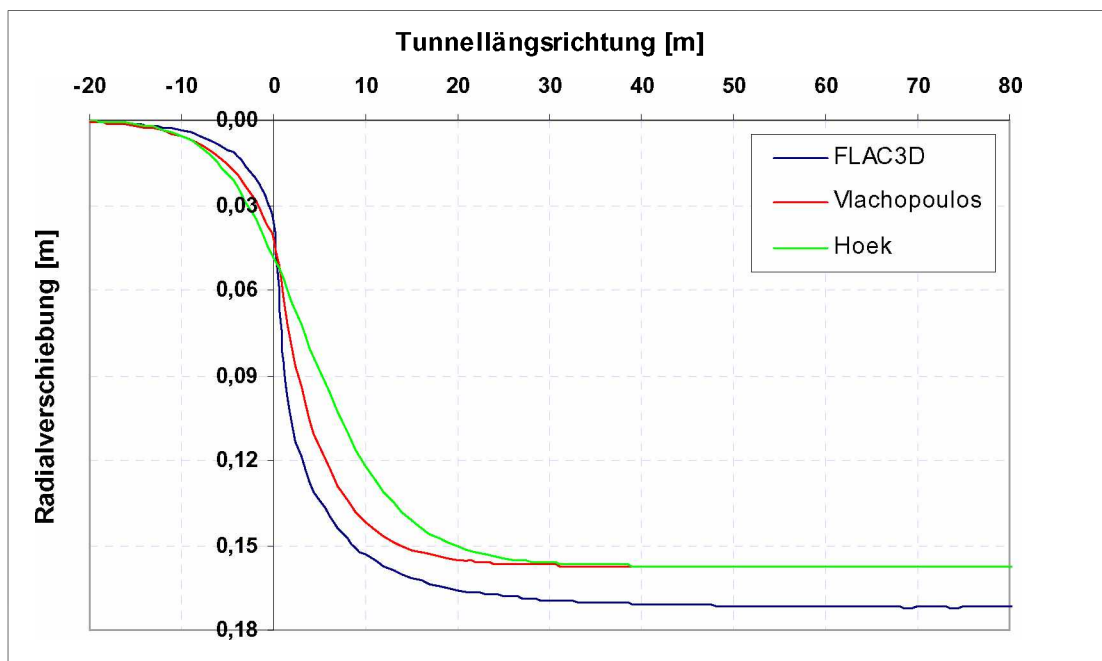
Beispiel 6



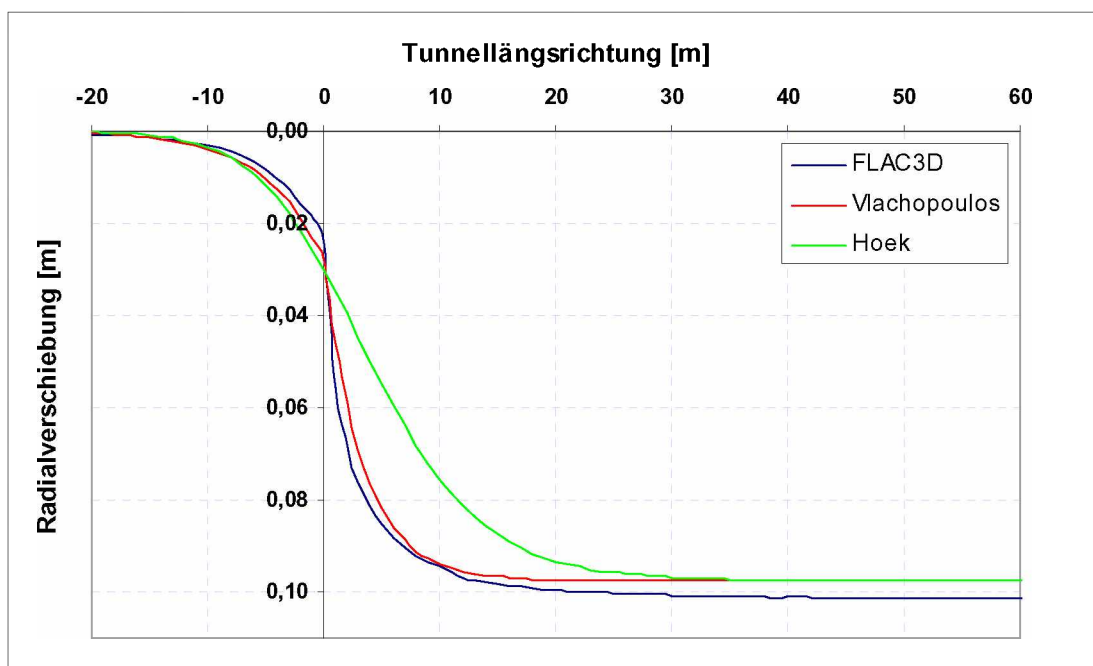
Beispiel 7



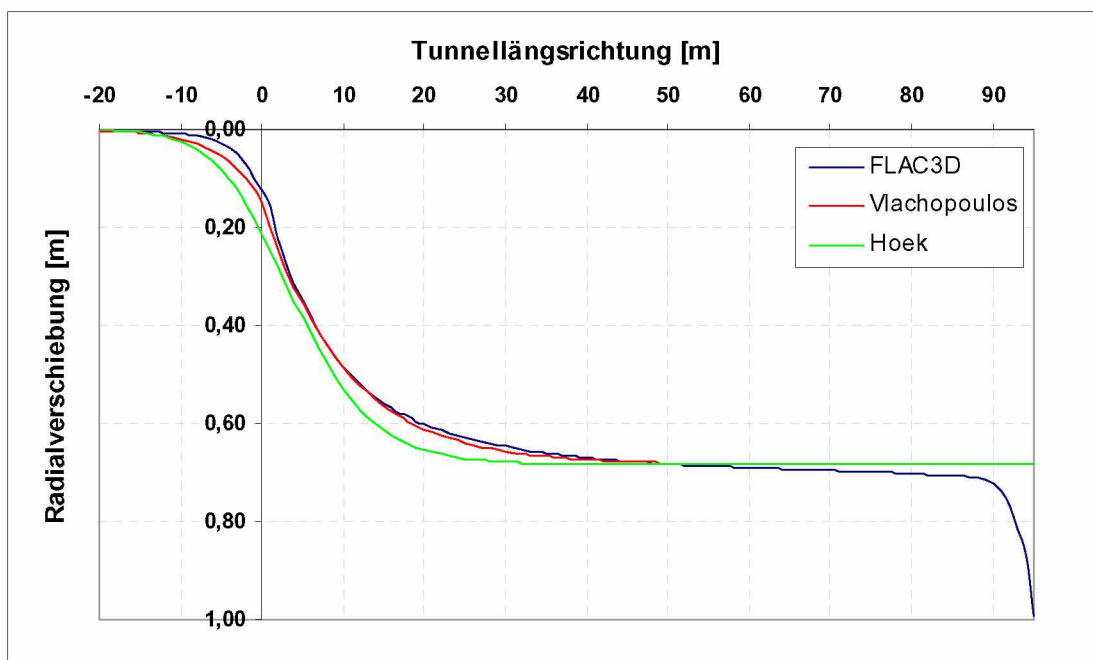
Beispiel 8



Beispiel 9

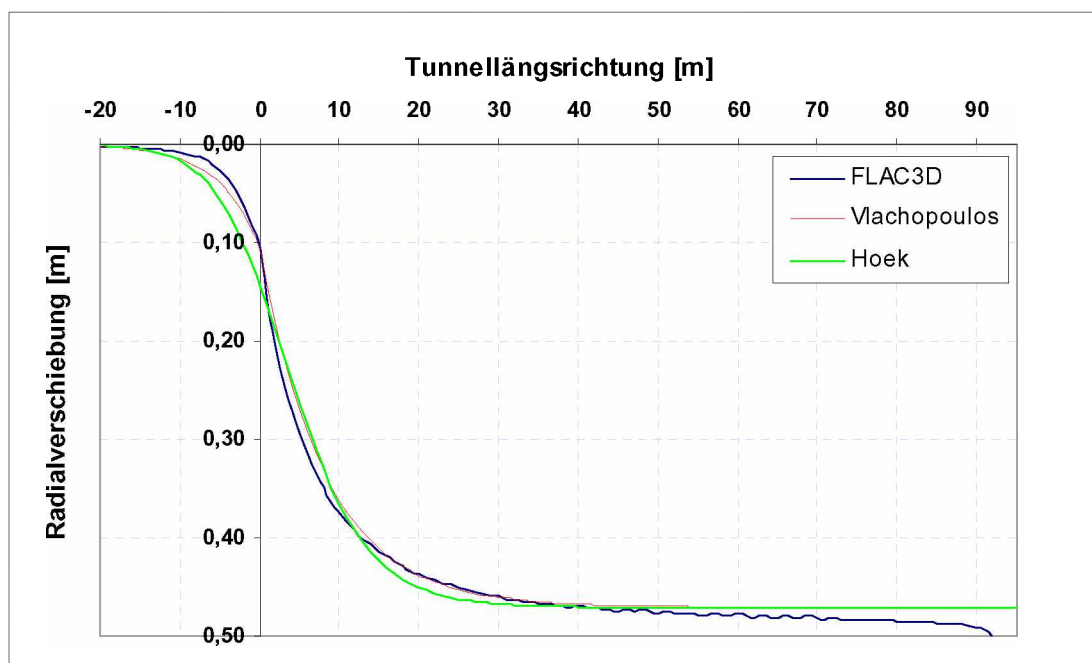


Beispiel 10

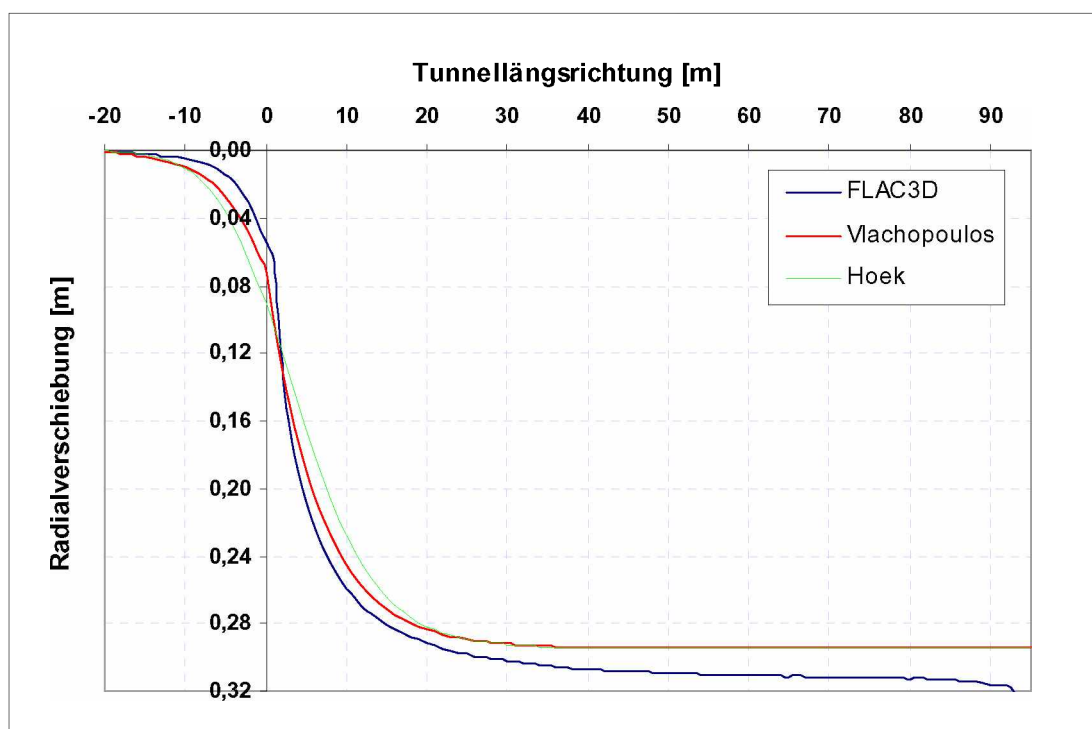




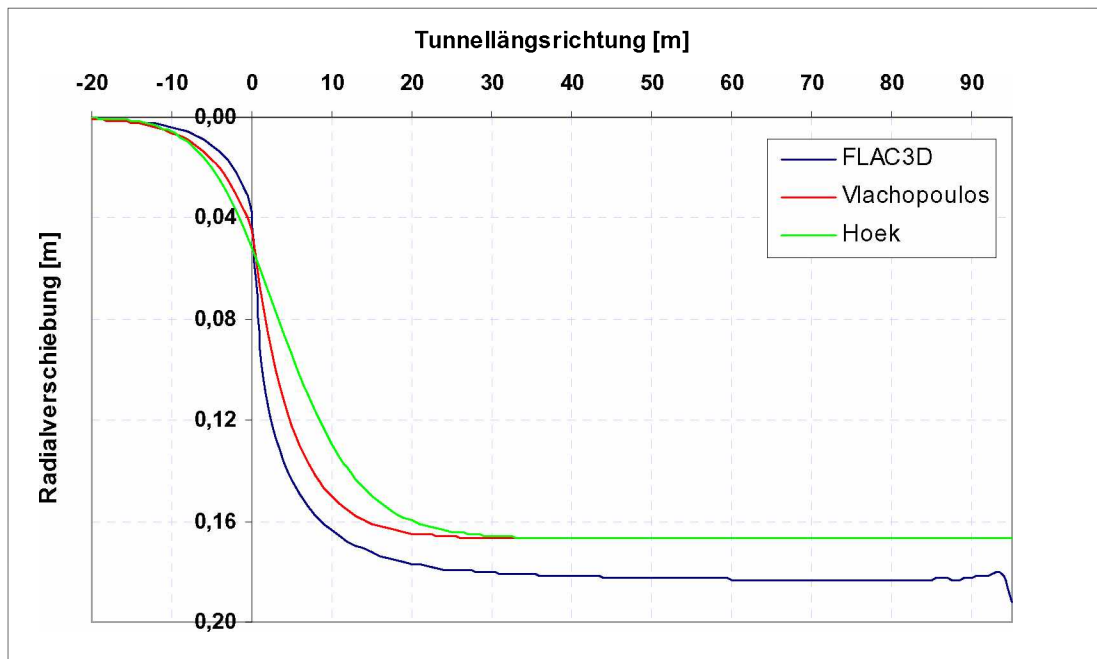
Beispiel 11



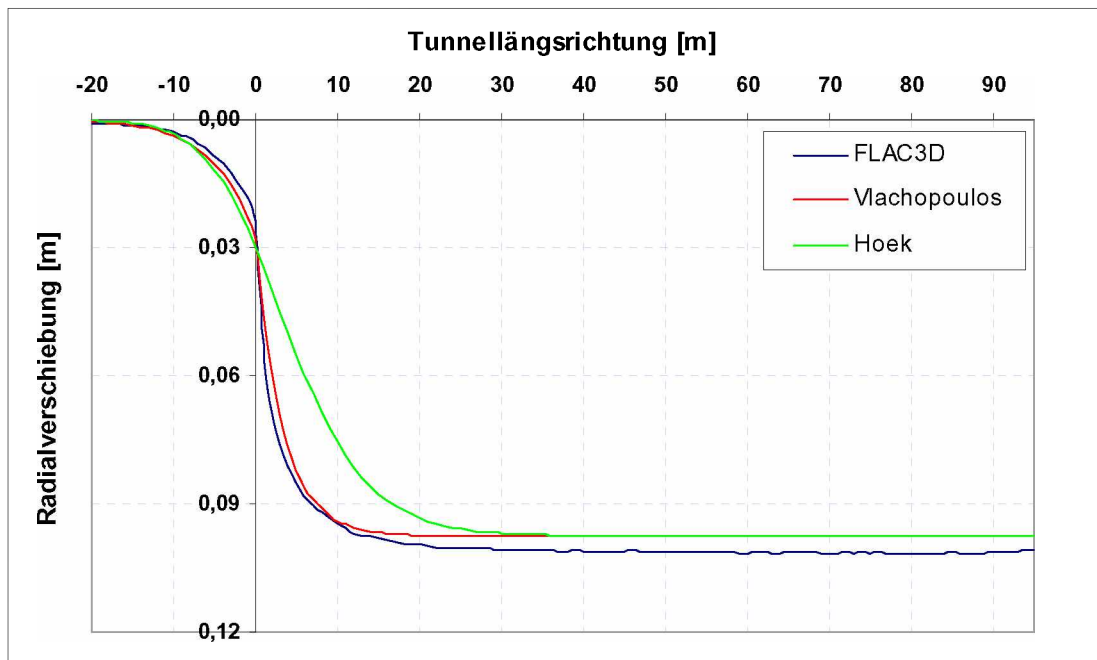
Beispiel 12

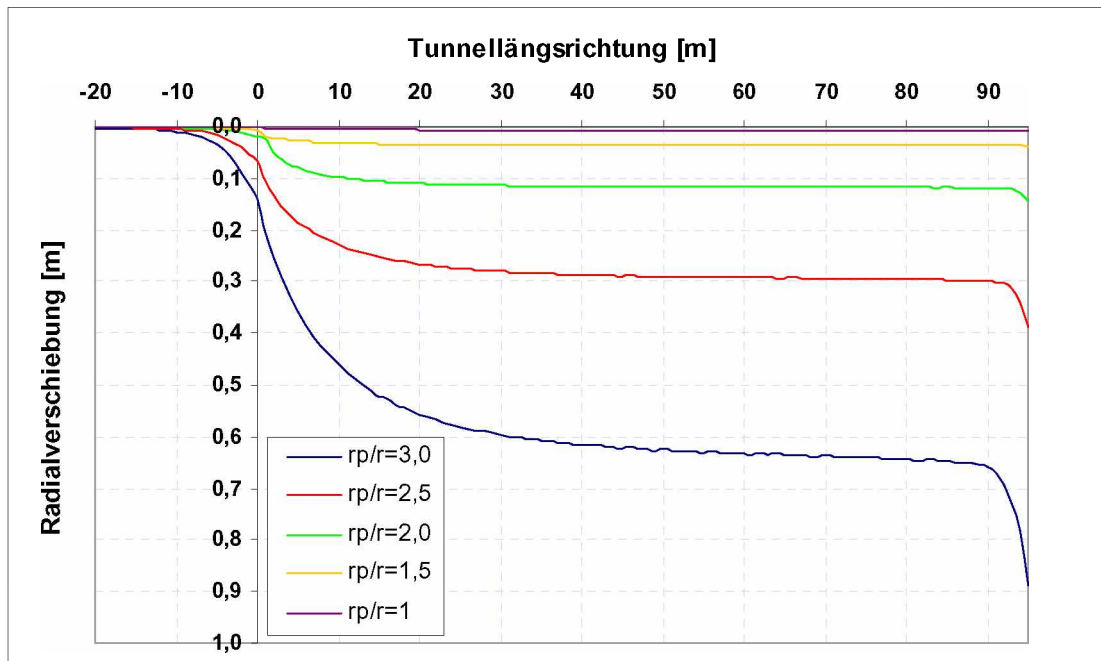
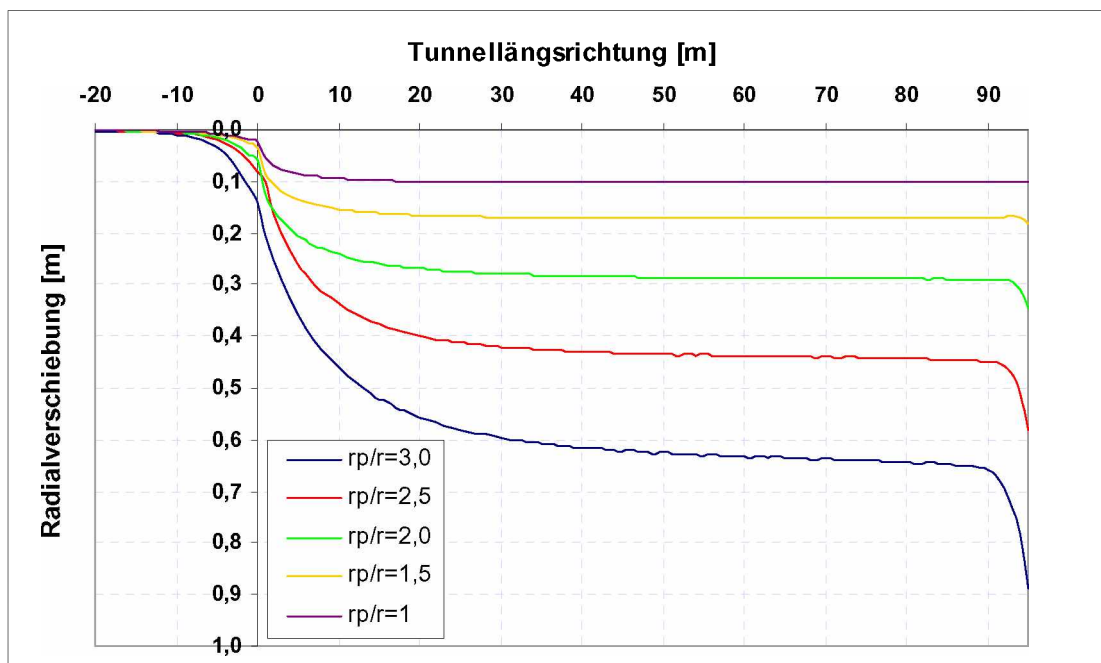


Beispiel 13

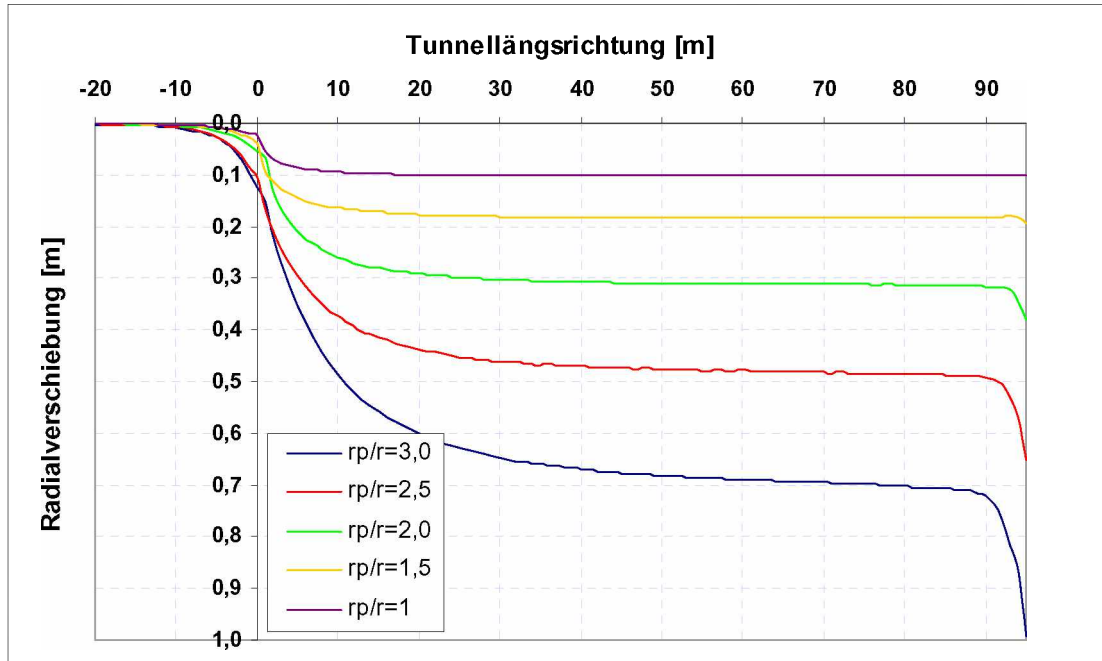


Beispiel 14



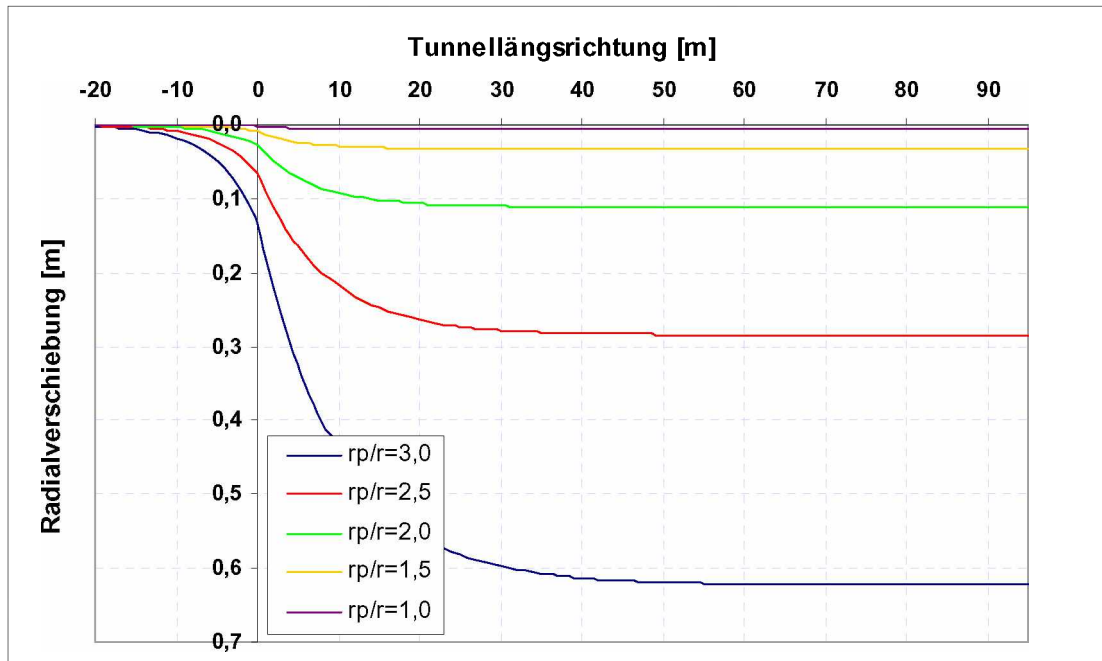
**LDP – Vergleich absolute Verschiebungswerte****Numerisch ermittelt****Satz 1****Satz 2**

## Satz 3

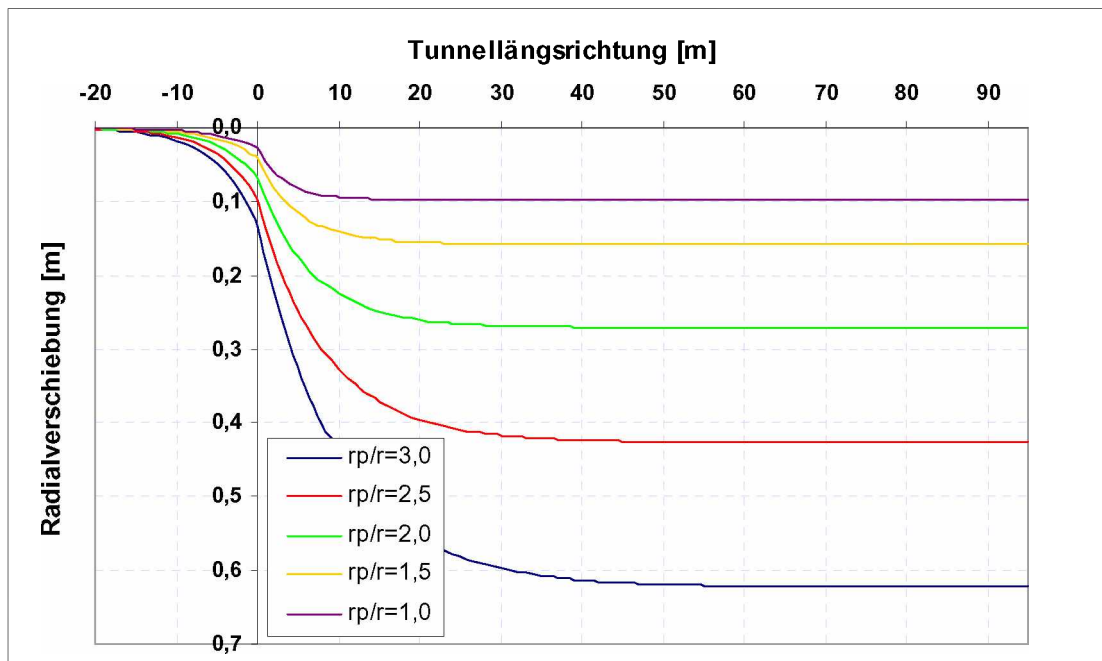


**Analytisch (Vlachopoulos) ermittelt**

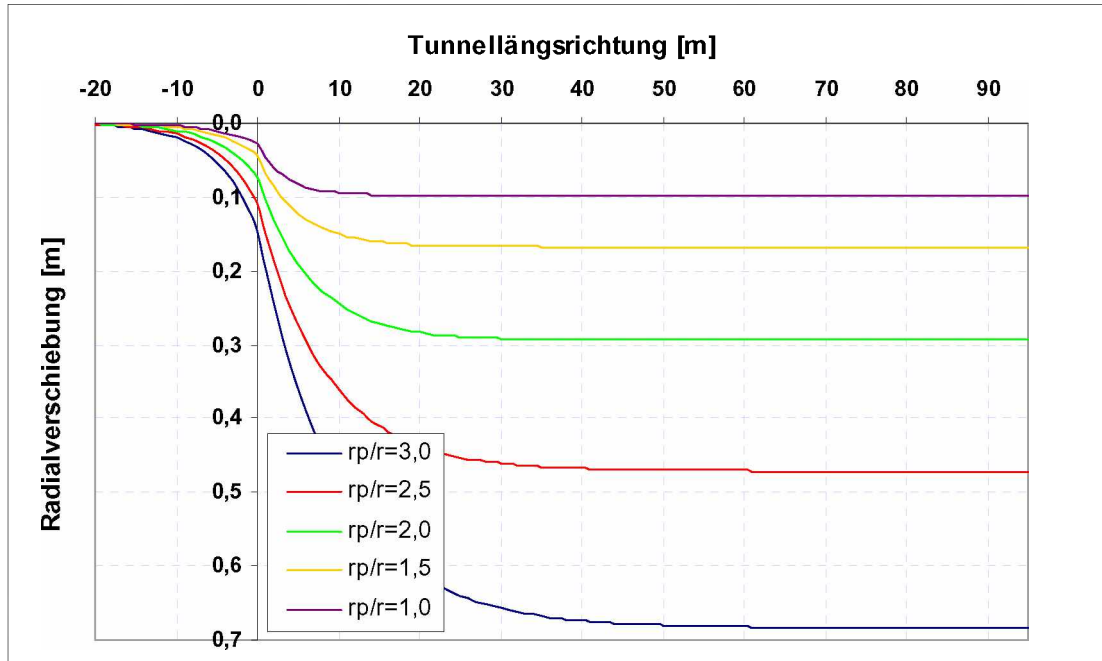
## Satz 1



## Satz 2



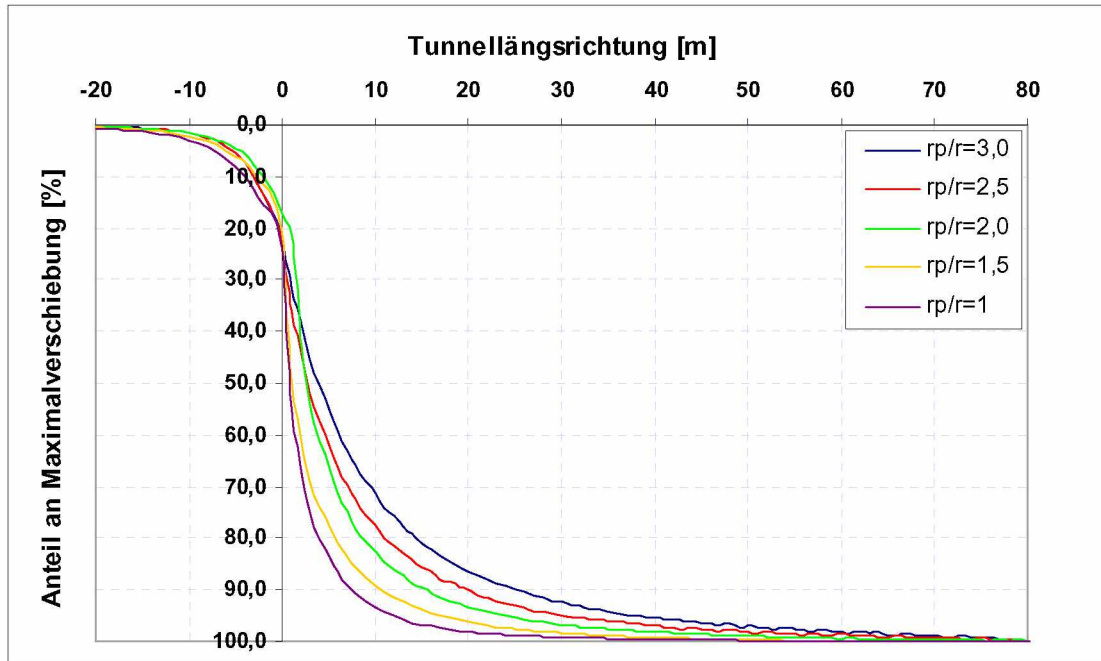
## Satz 3



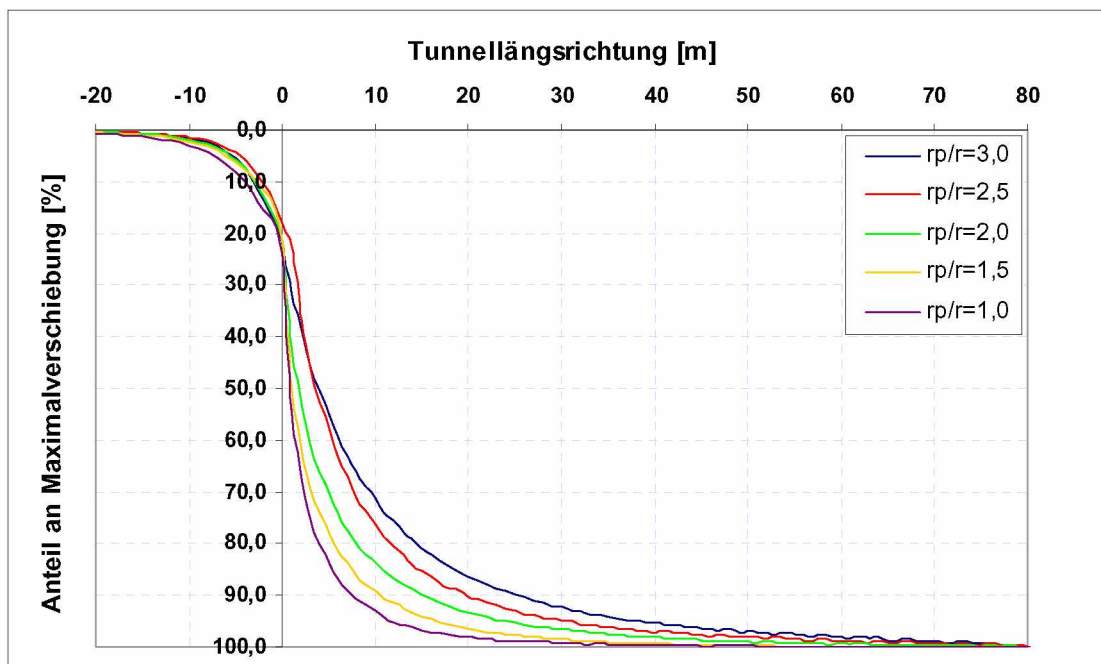
**LDP – Vergleich relative Anteile an der Maximalverschiebung**

Numerisch ermittelt

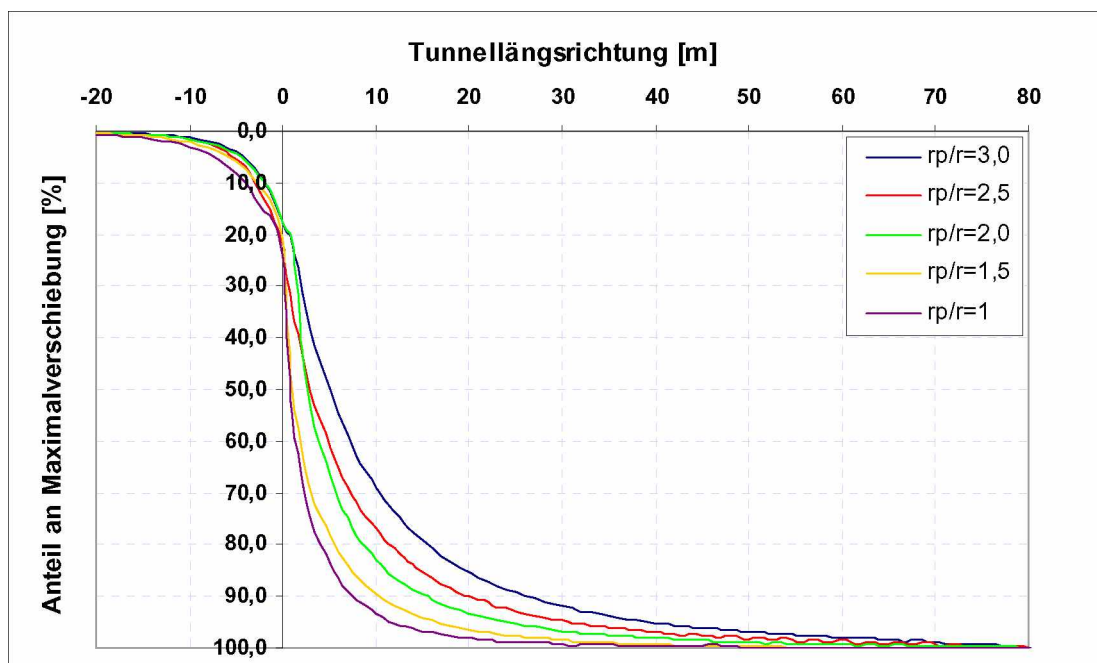
Satz 1



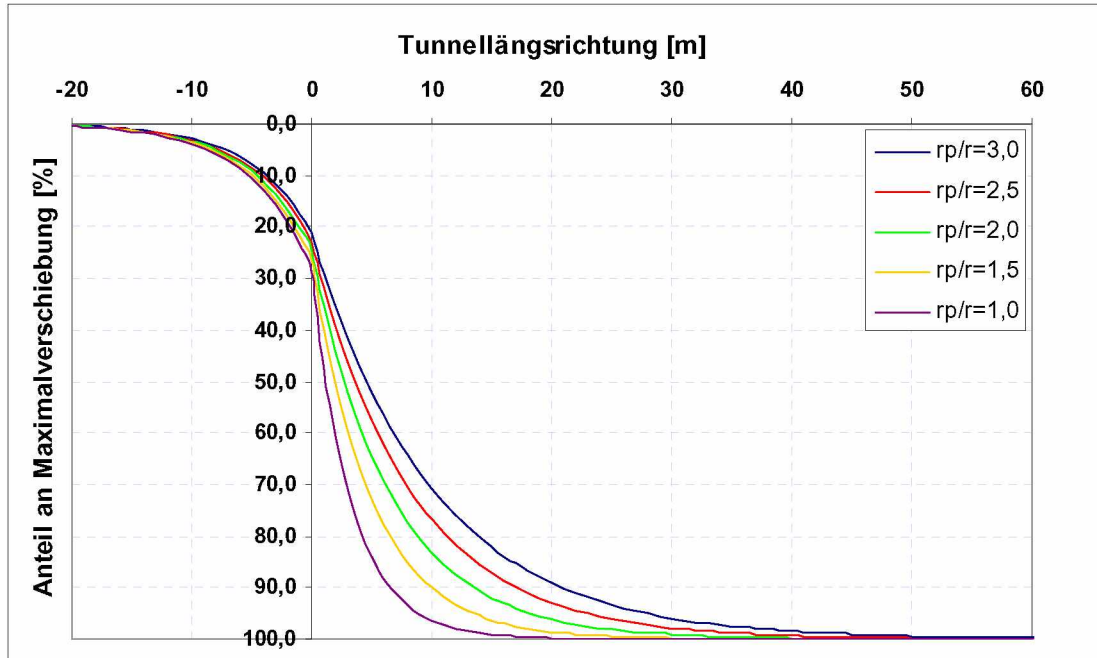
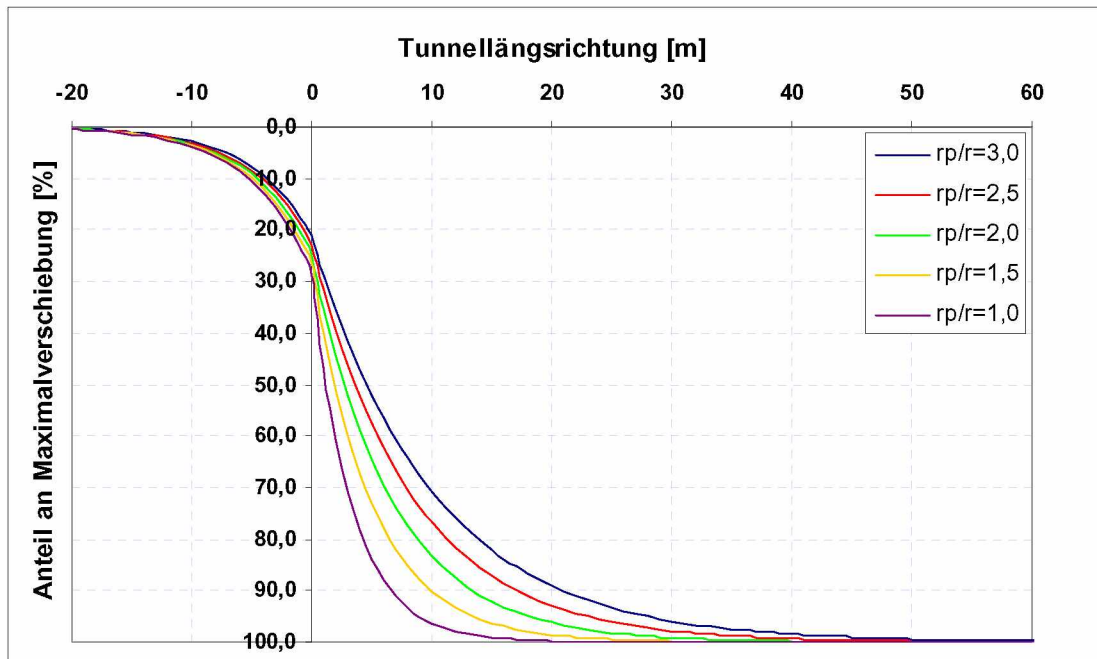
Satz 2



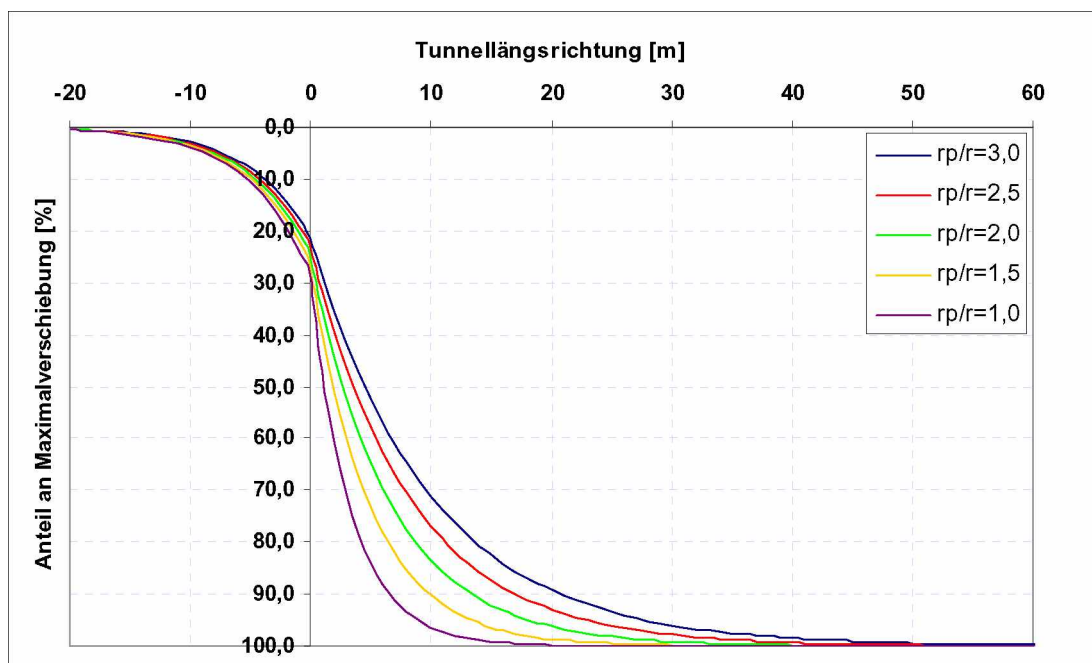
## Satz 3





**Analytisch (Vlachopoulos) ermittelt****Satz 1****Satz 2**

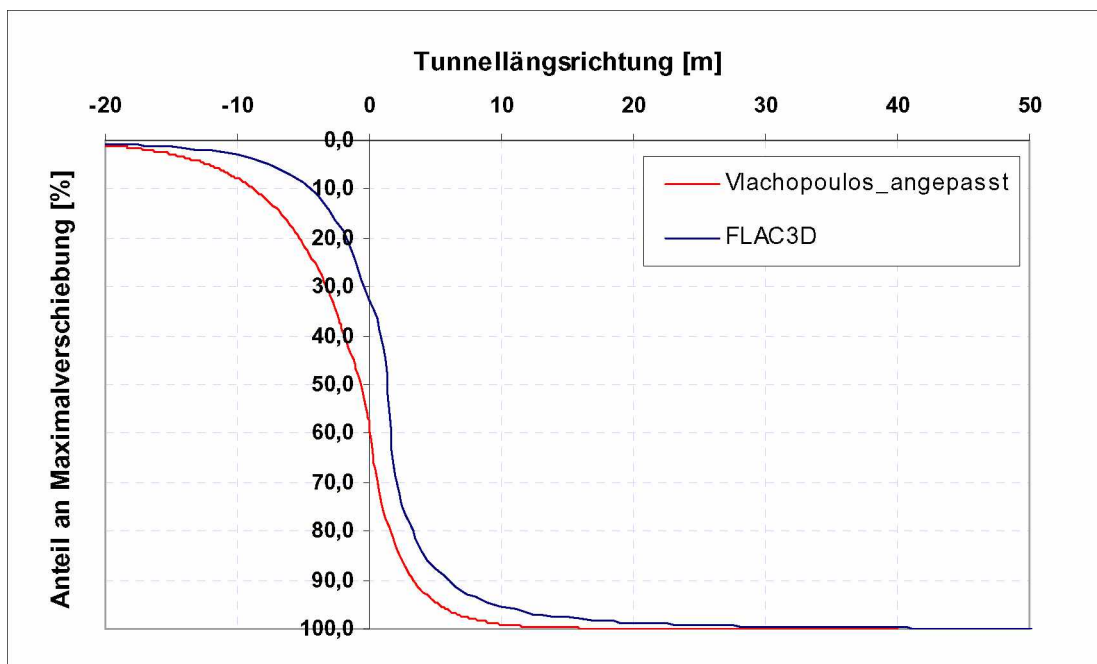
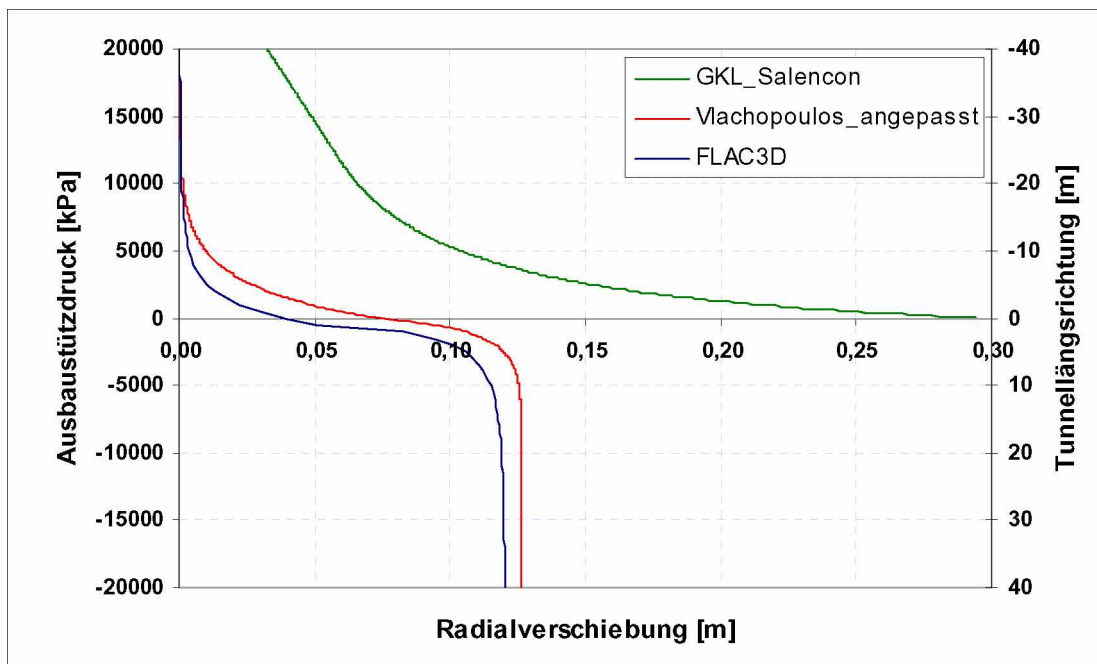
## Satz 3



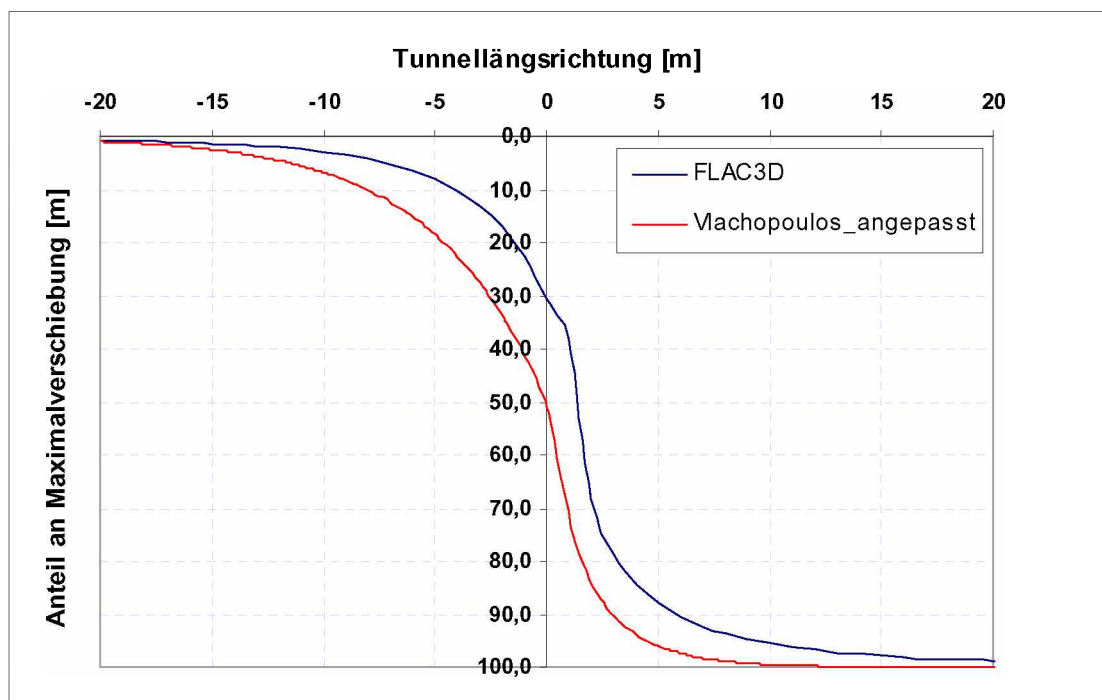
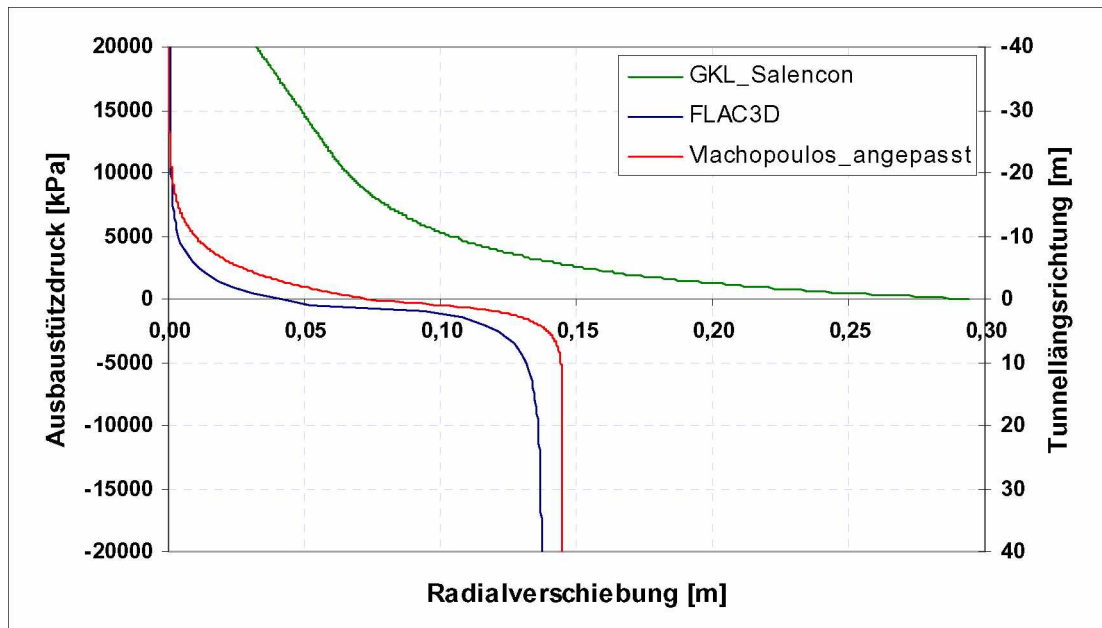
## Diagramme - Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitunabhängig)

<b>Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitunabhängig)</b>			
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>Schalendicke[cm]</b>	<b><math>E_{(spc)}</math>[GPa]</b>
15	0	10	15
16	1	10	15
17	2	10	15
18	3	10	15
19	5	10	15
20	10	10	15
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>Schalendicke[cm]</b>	<b><math>E_{(spc)}</math>[GPa]</b>
21	0	20	15
22	1	20	15
23	2	20	15
24	3	20	15
25	5	20	15
26	10	20	15
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>Schalendicke[cm]</b>	<b><math>E_{(spc)}</math>[GPa]</b>
27	0	30	15
28	1	30	15
29	2	30	15
30	3	30	15
31	5	30	15
32	10	30	15

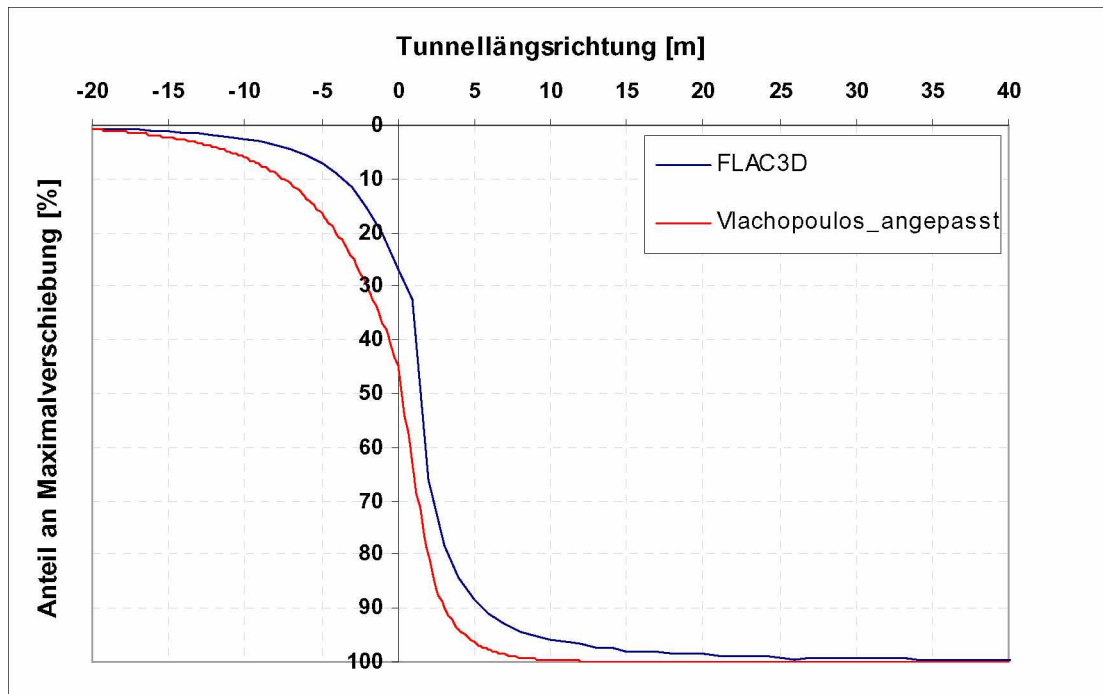
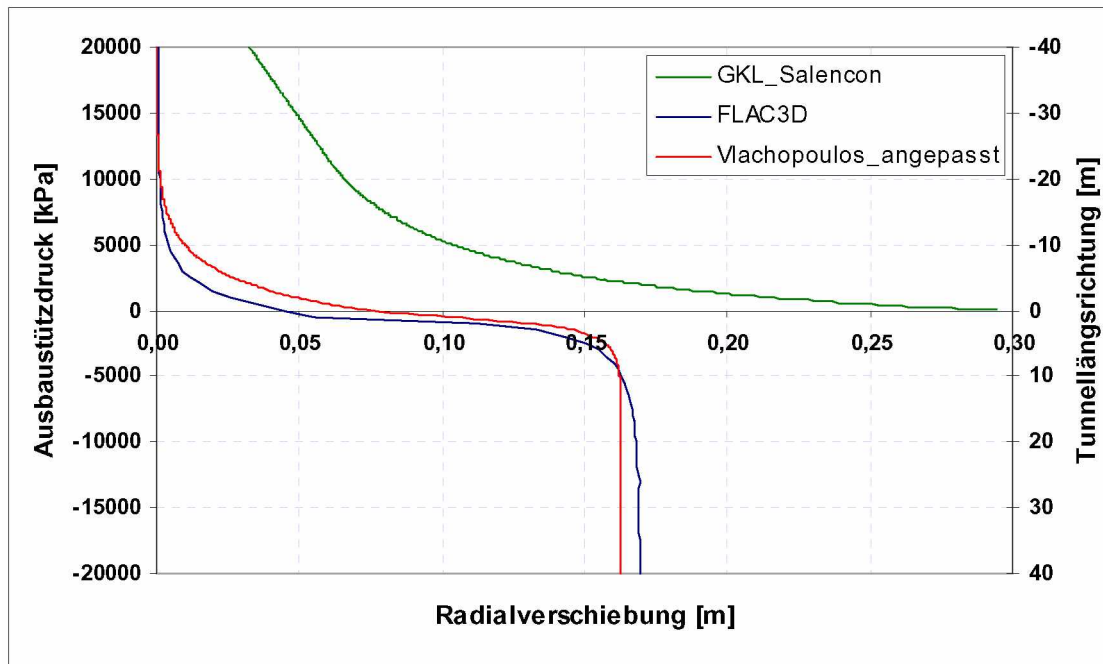
Beispiel 15



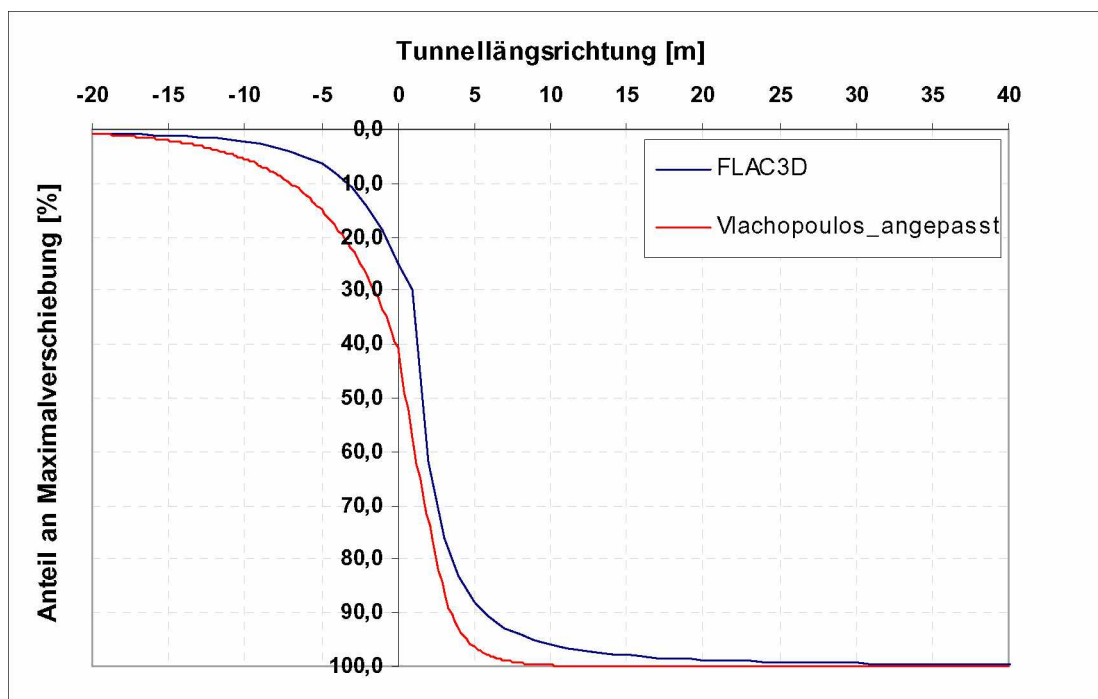
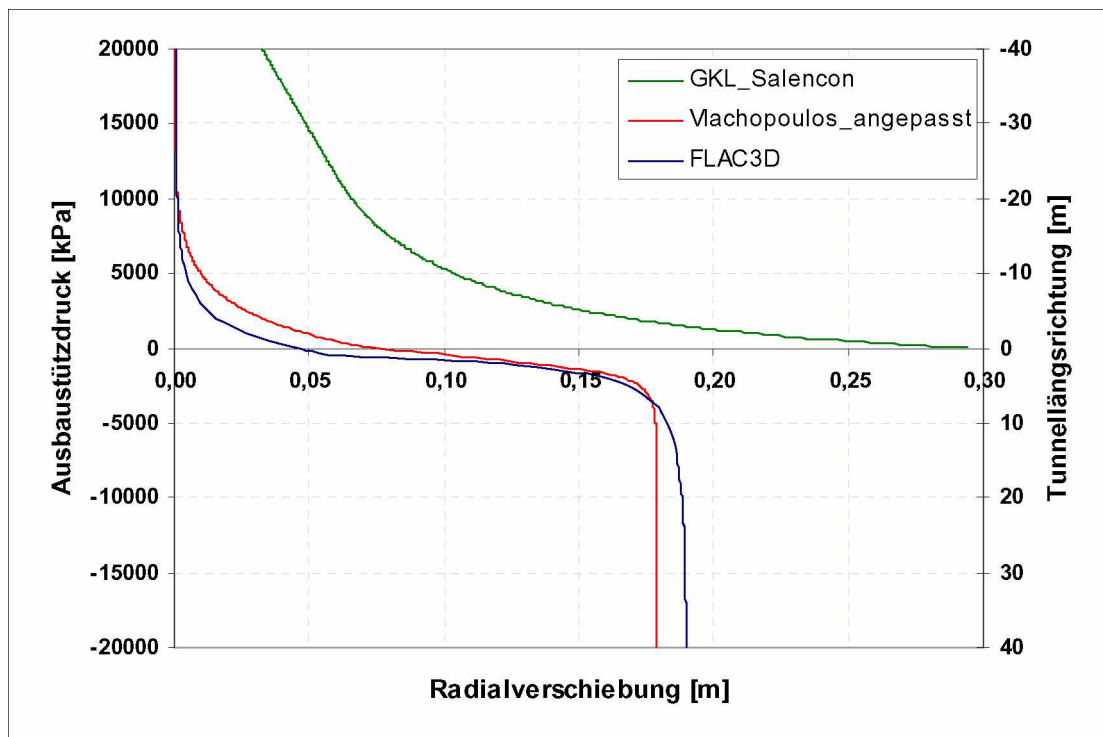
## Beispiel 16



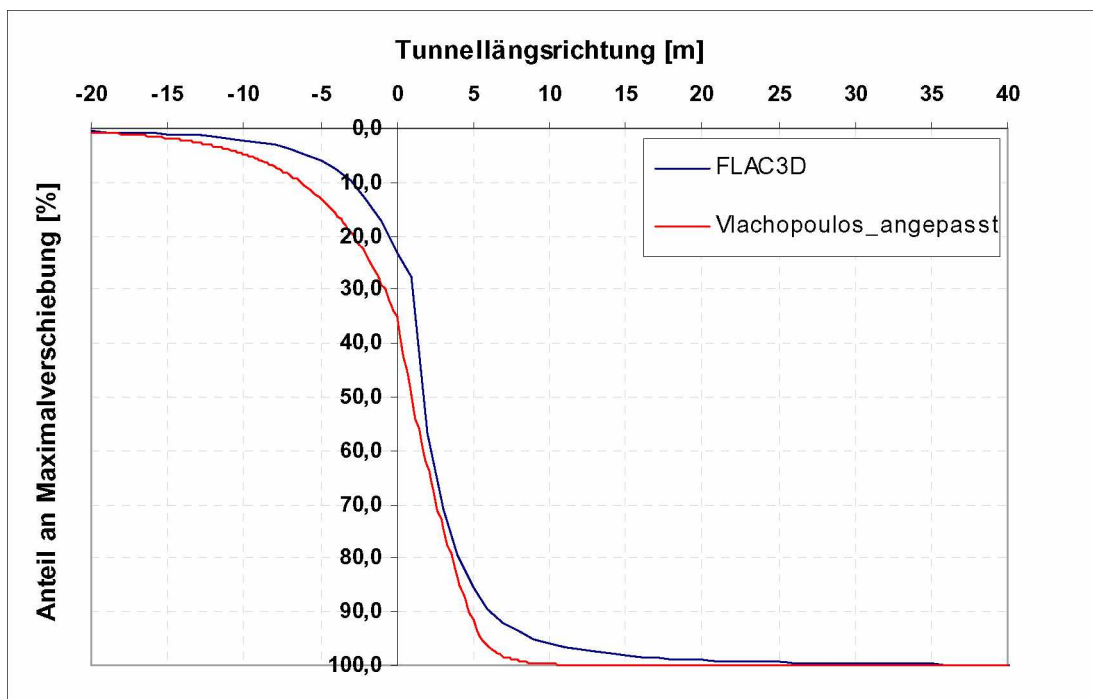
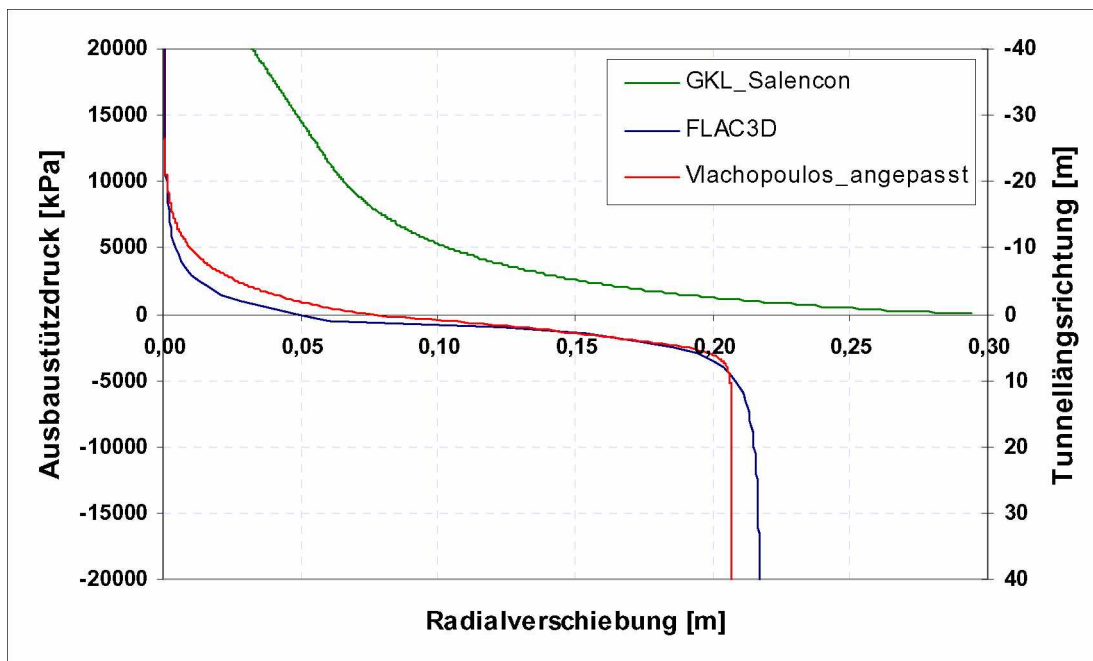
## Beispiel 17



## Beispiel 18

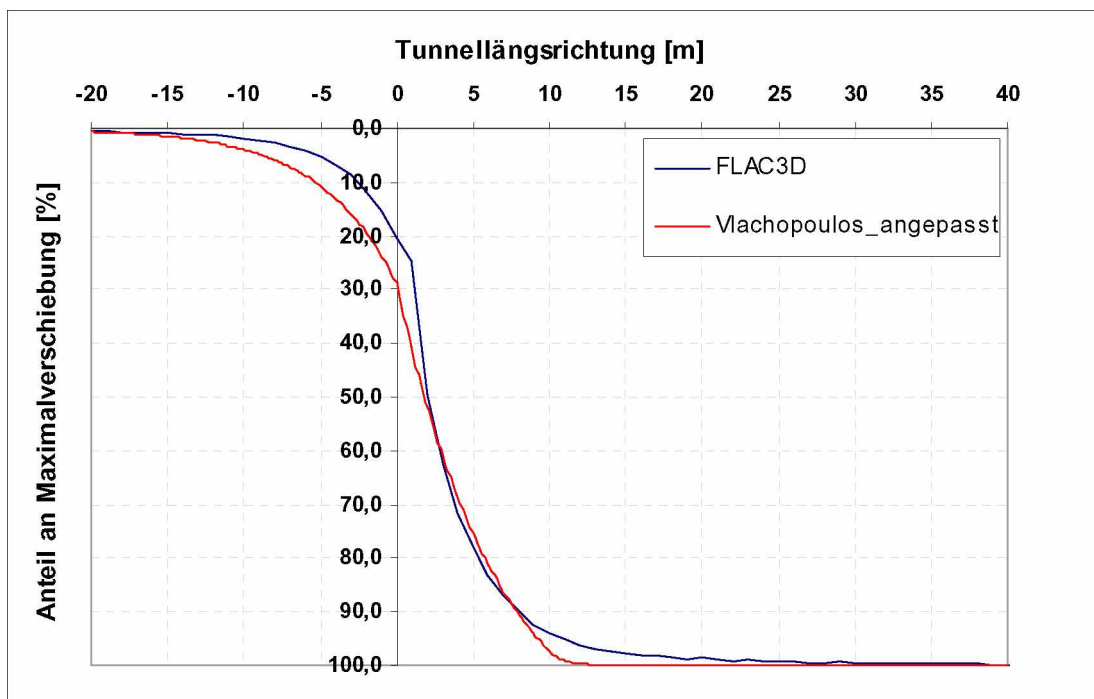
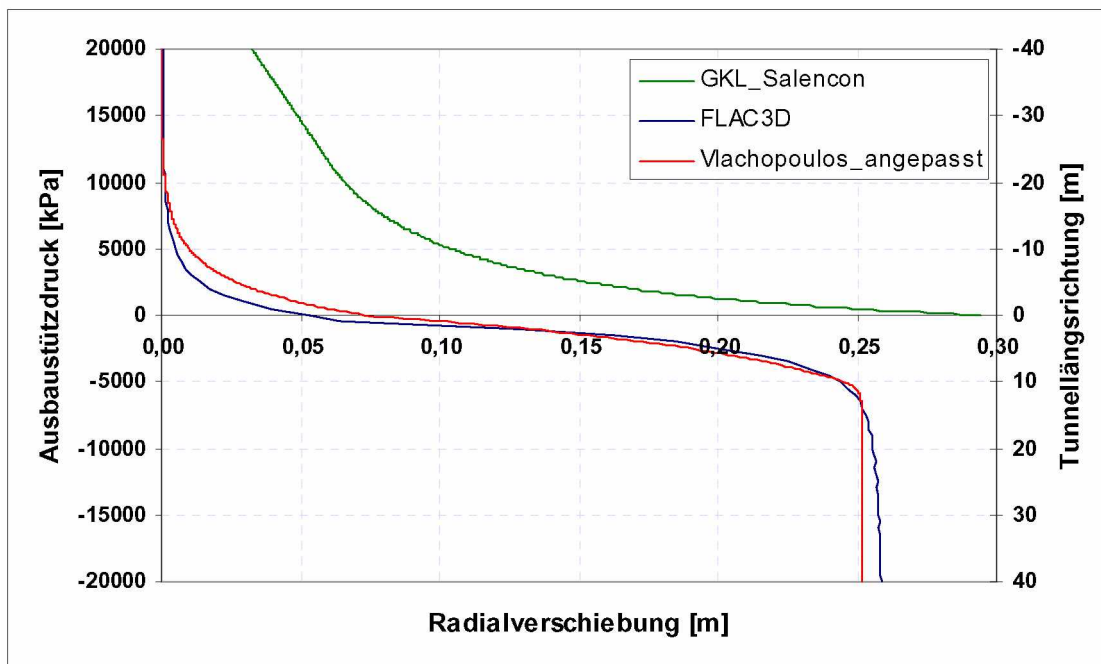


Beispiel 19

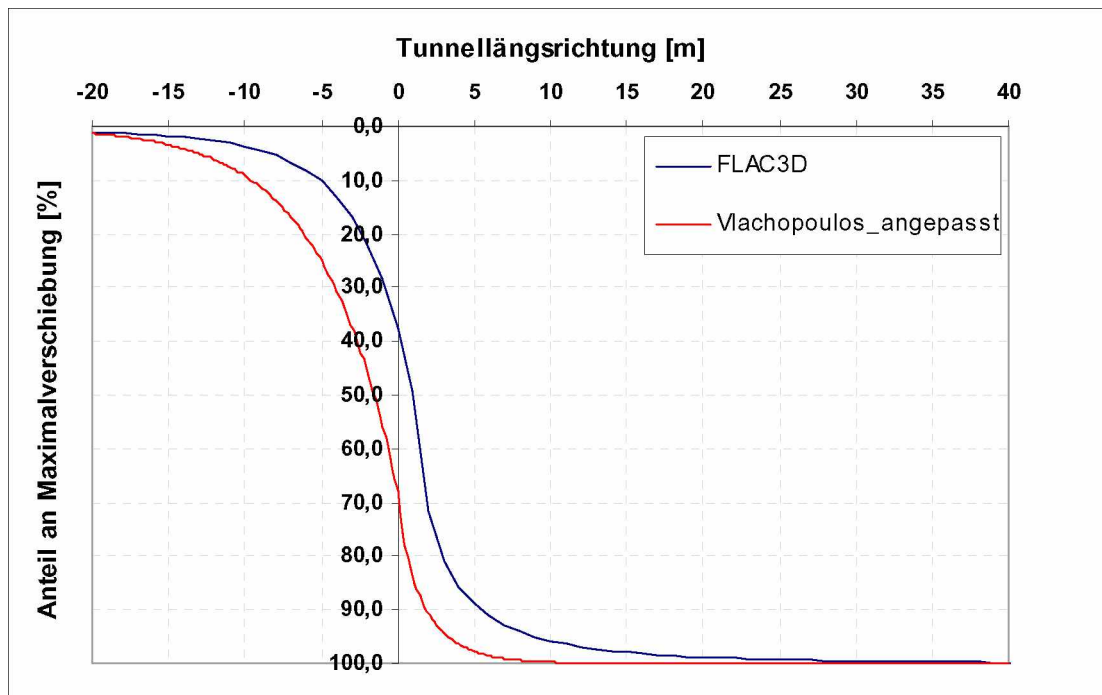
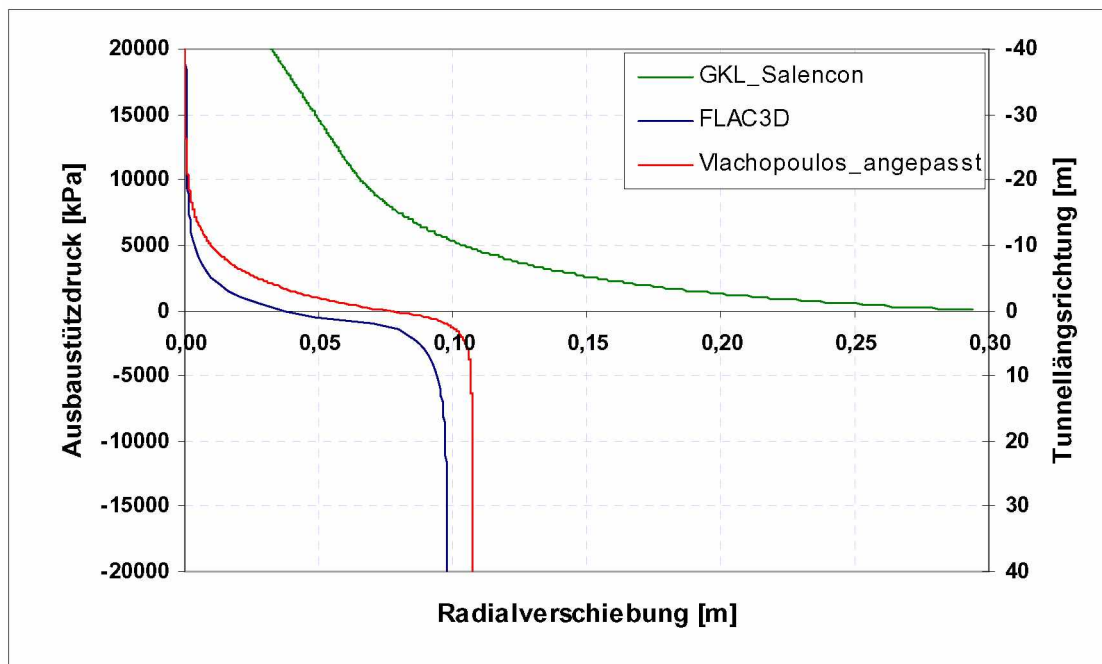




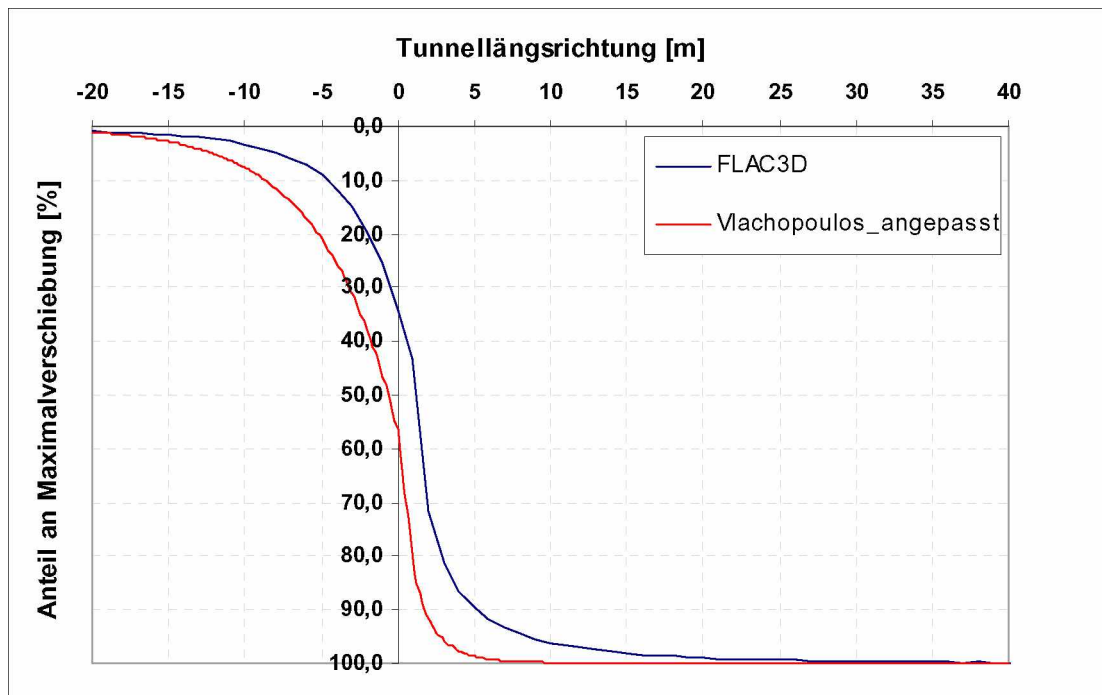
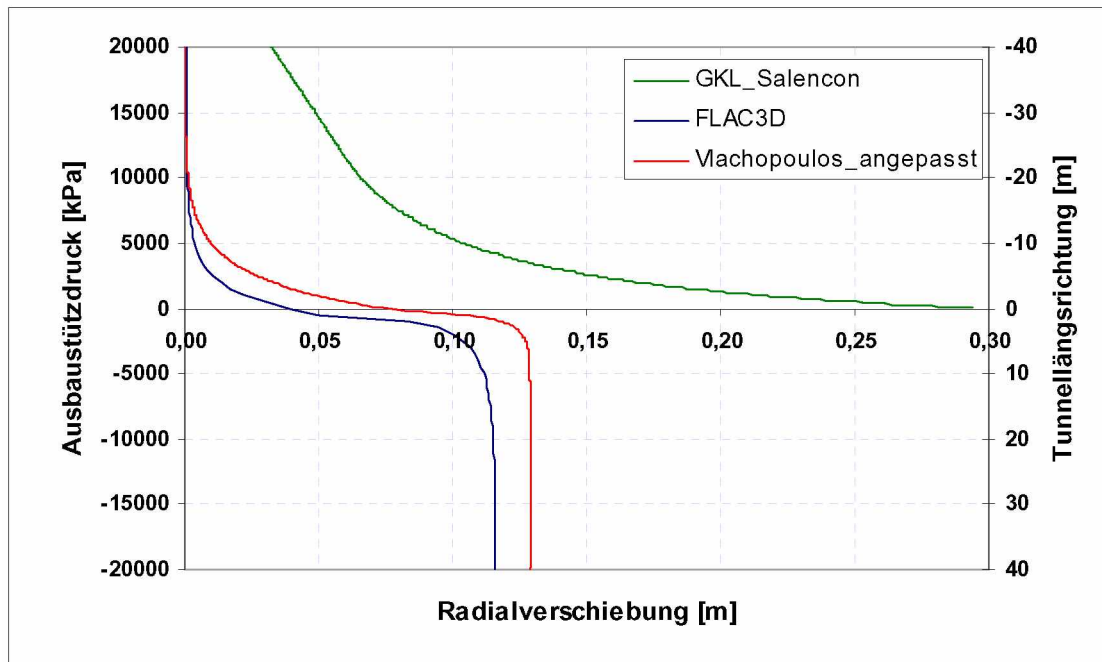
Beispiel 20



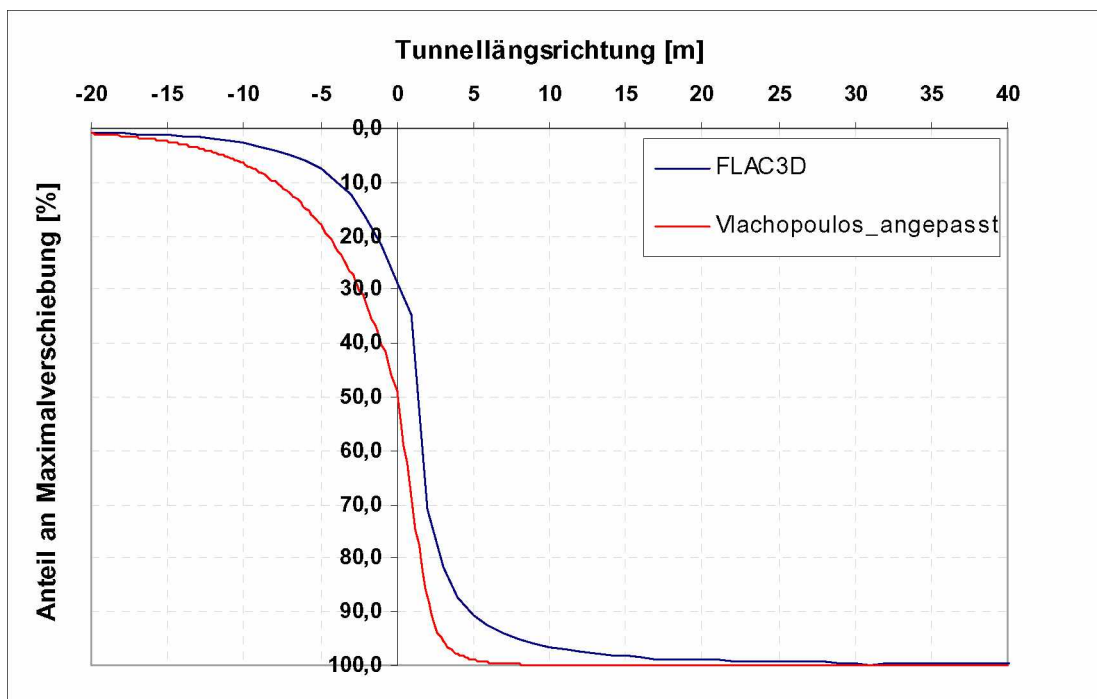
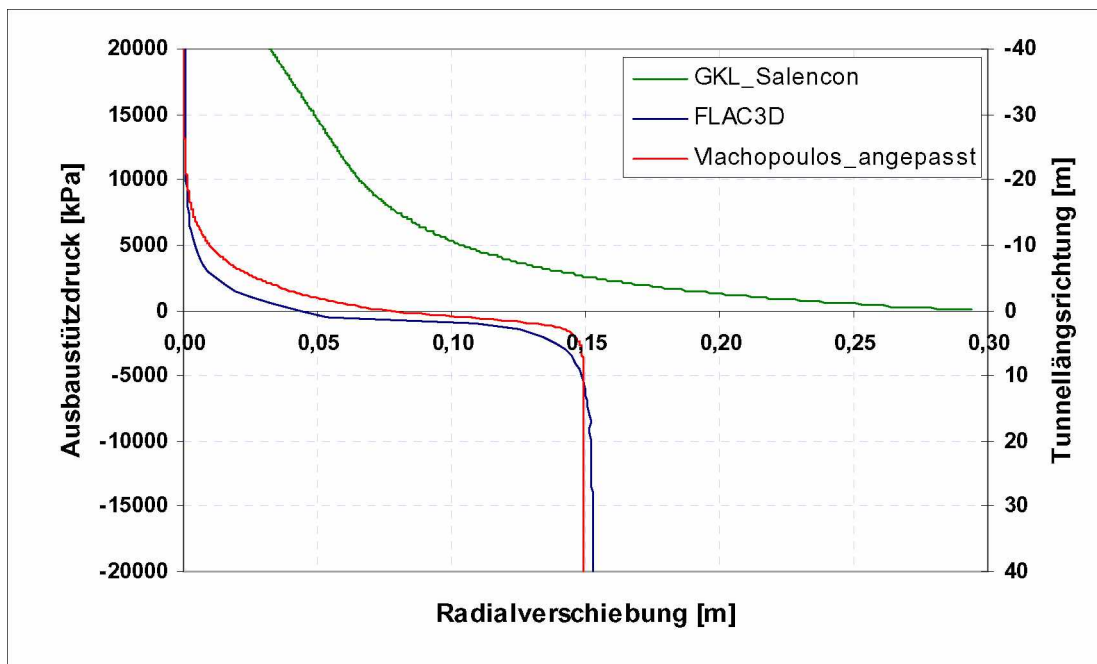
## Beispiel 21



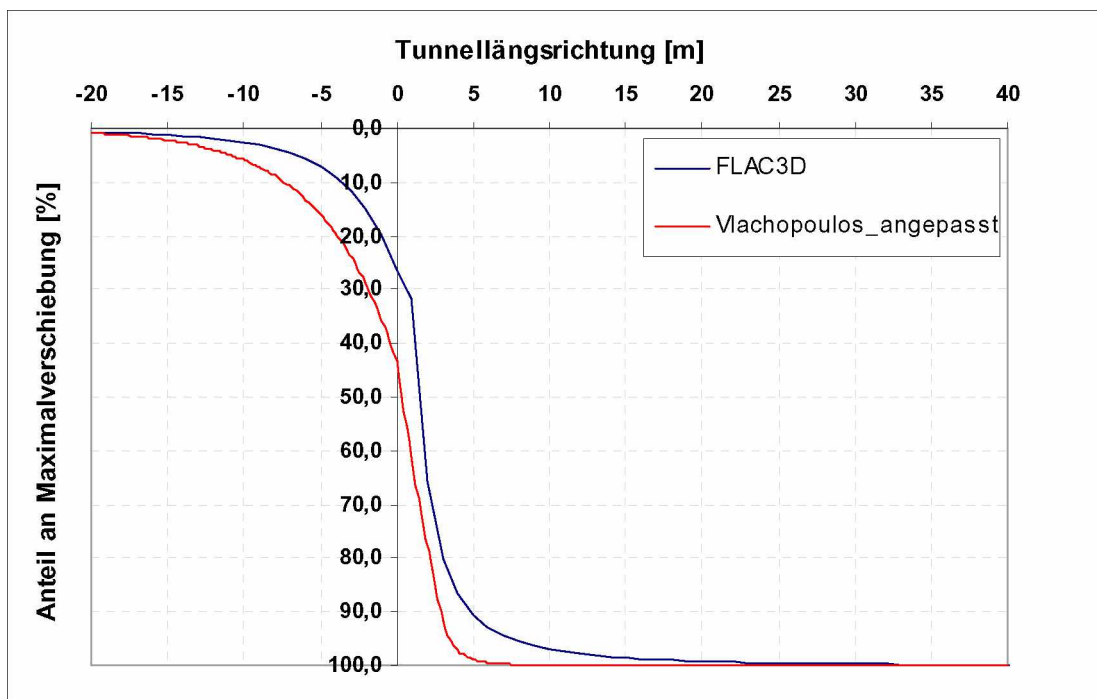
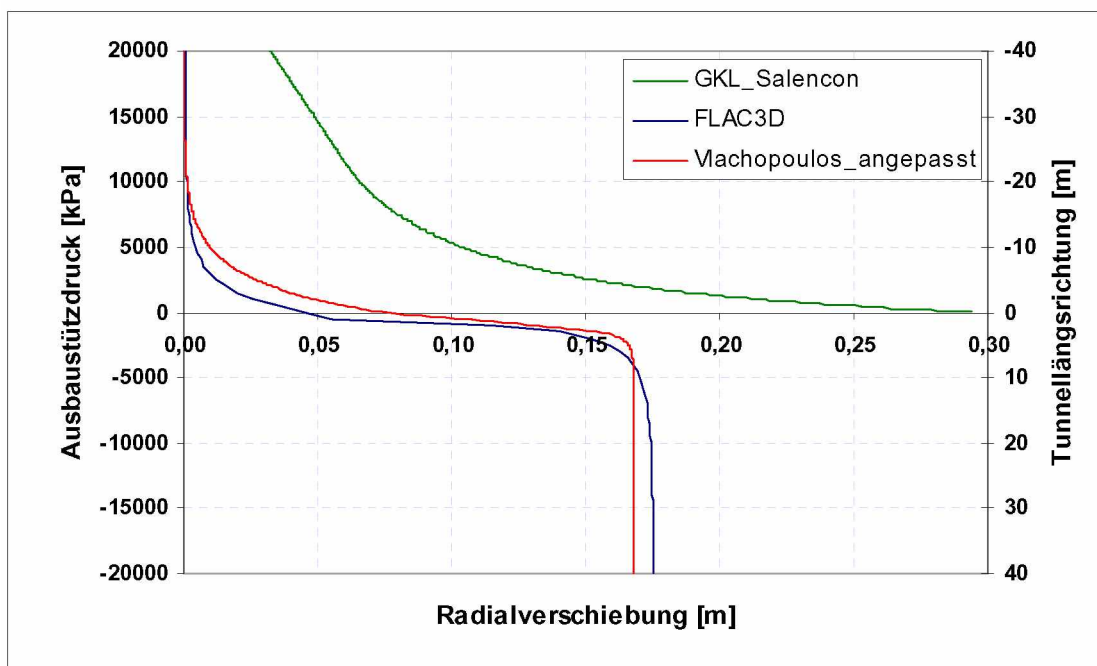
## Beispiel 22



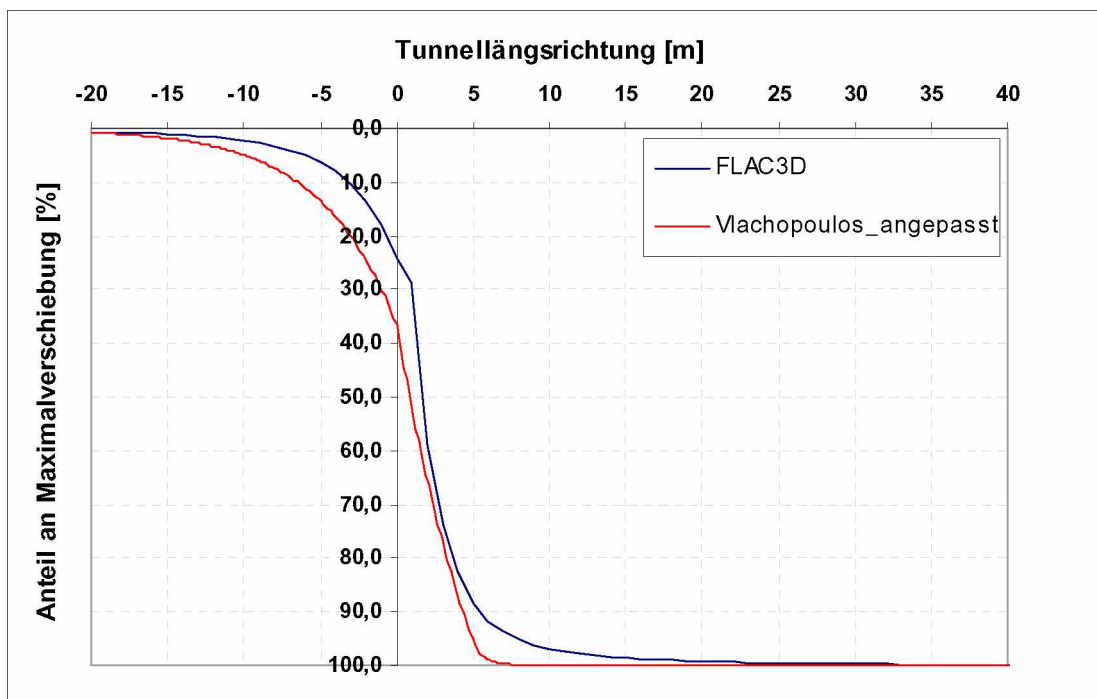
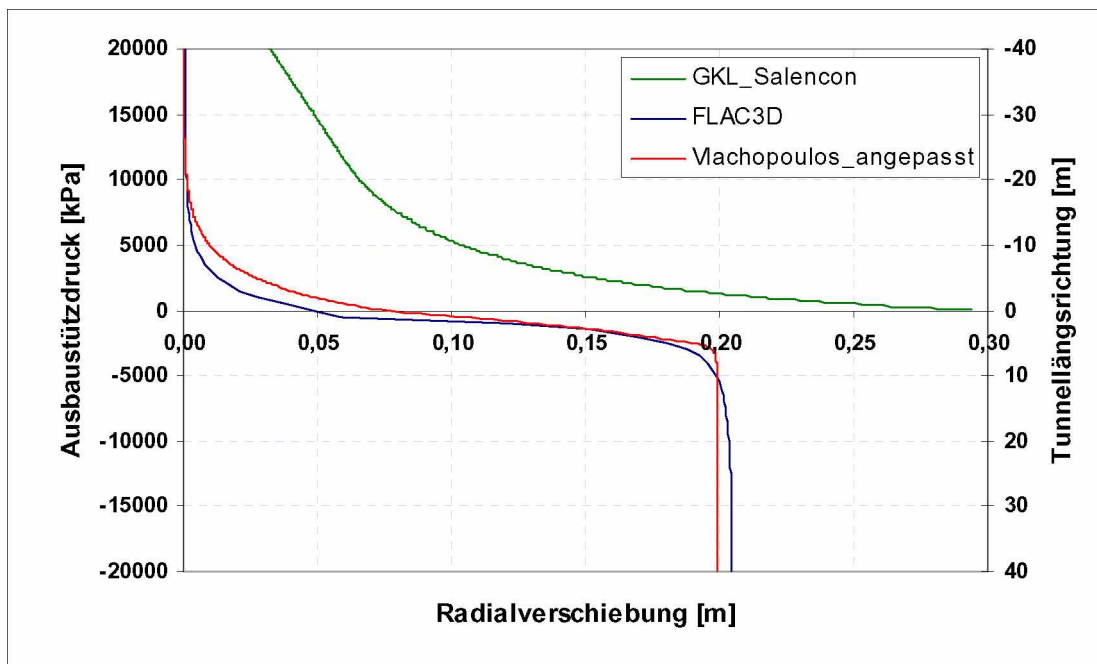
Beispiel 23



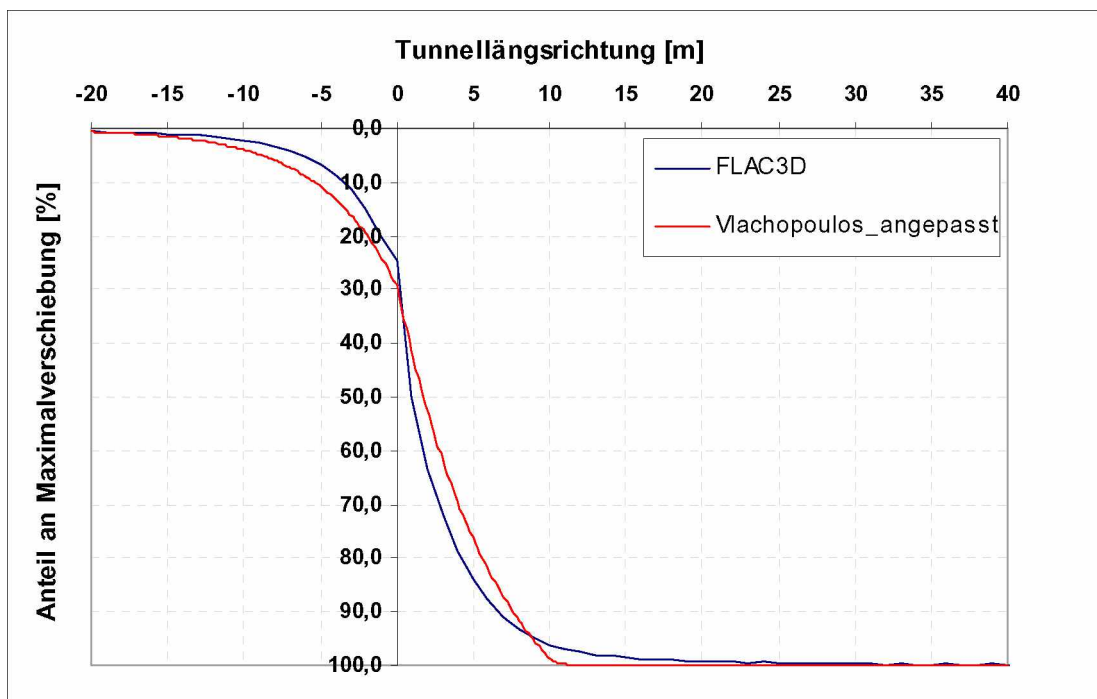
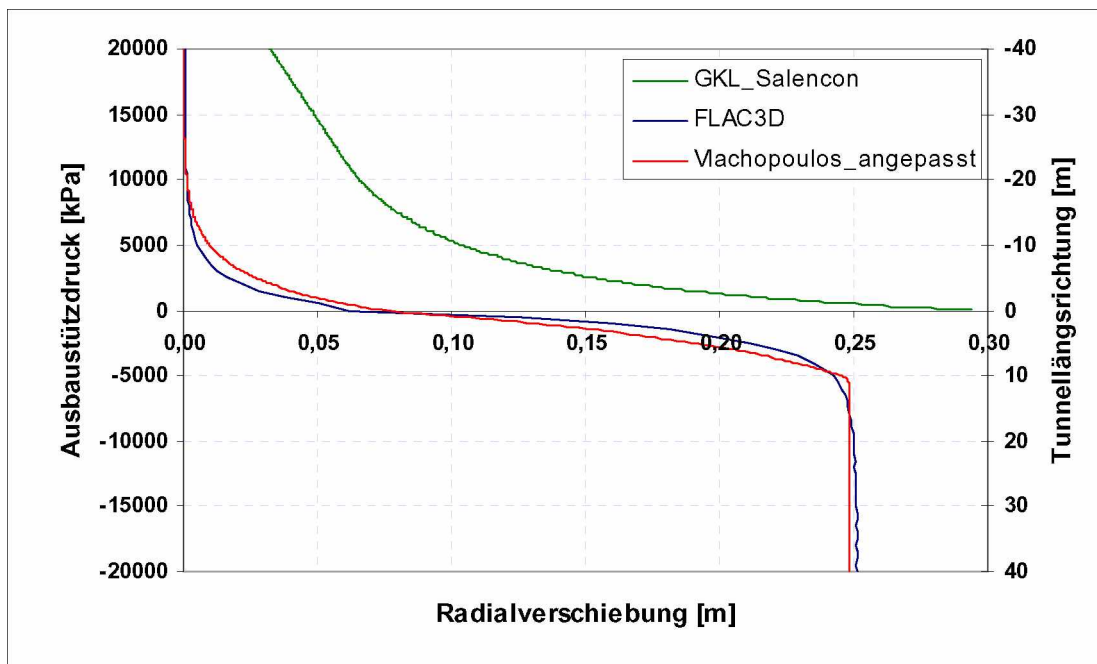
Beispiel 24



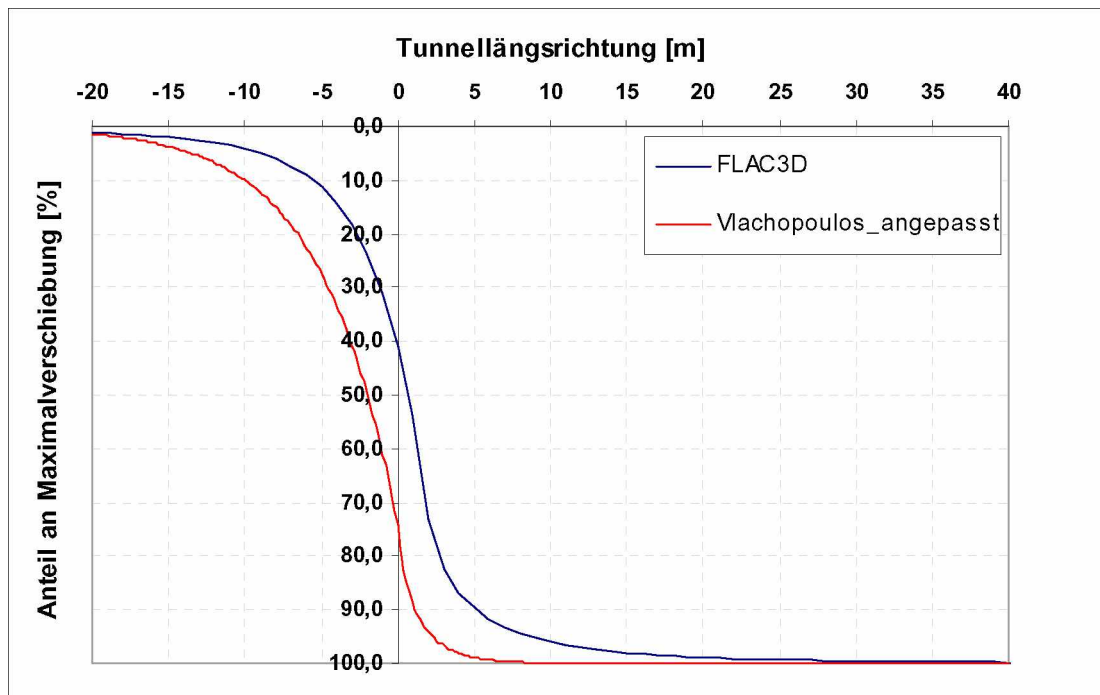
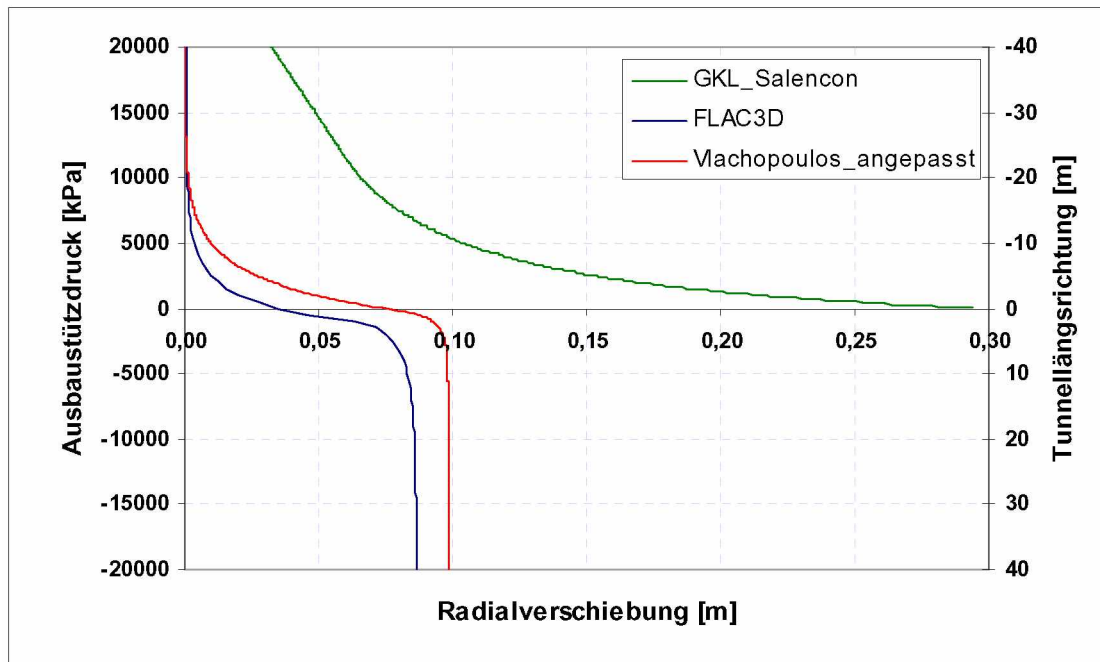
Beispiel 25



Beispiel 26

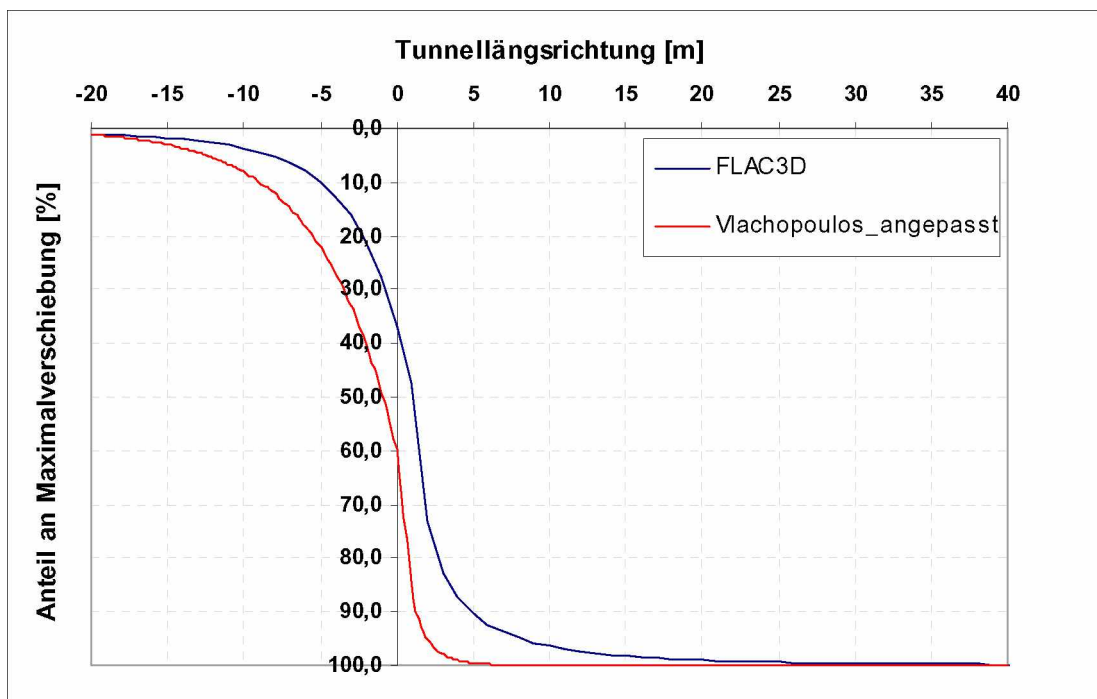
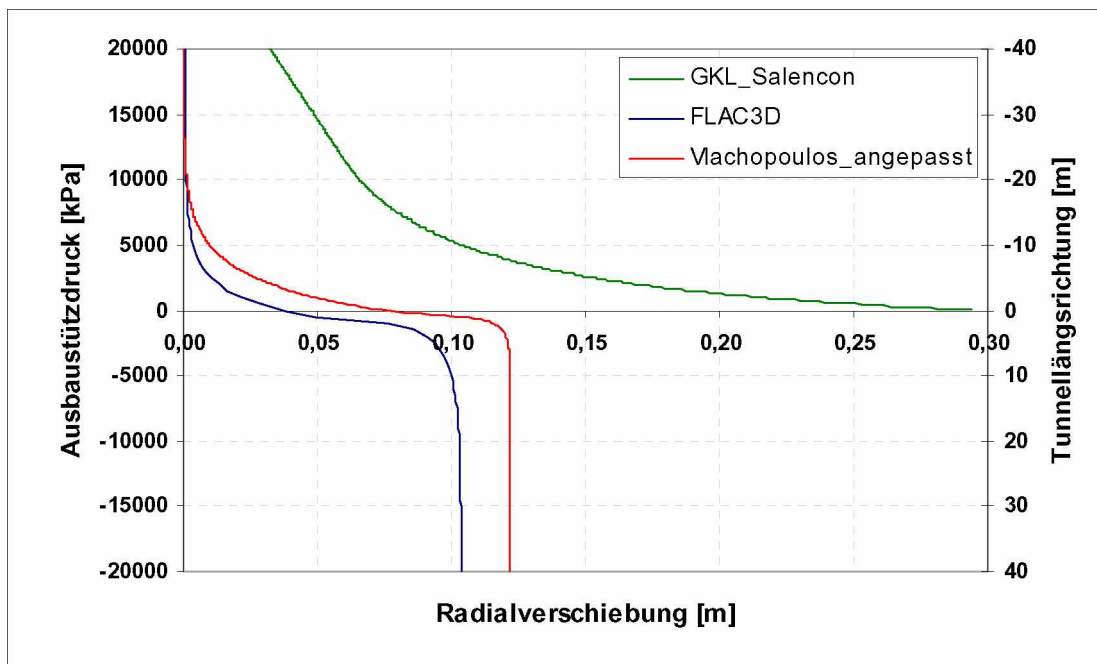


## Beispiel 27

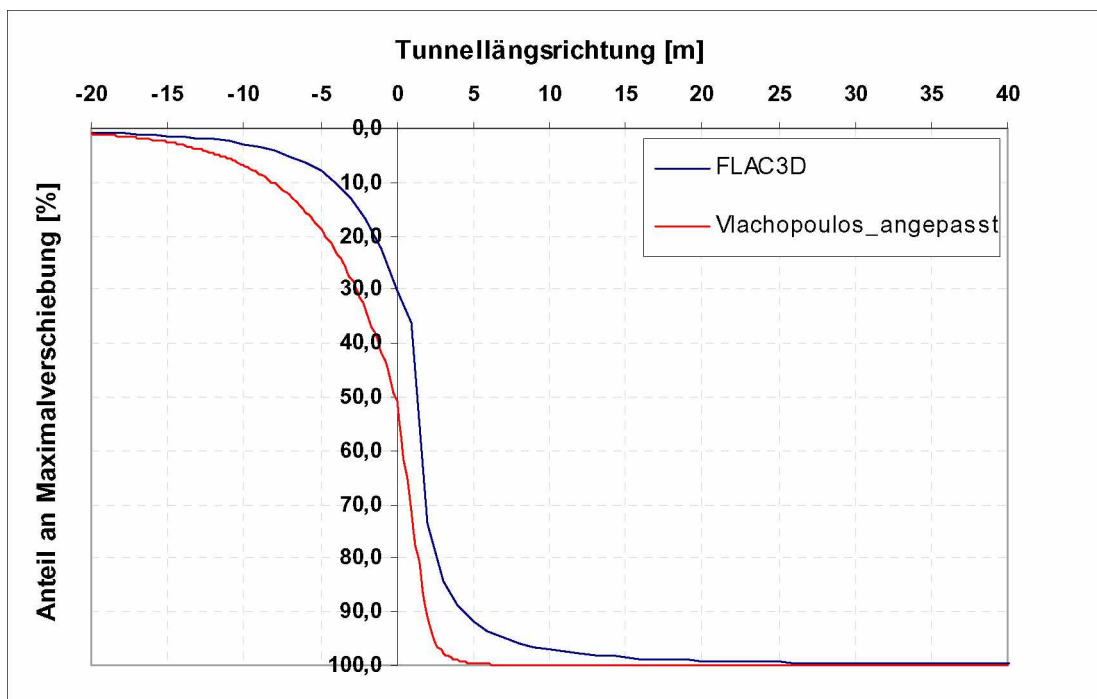
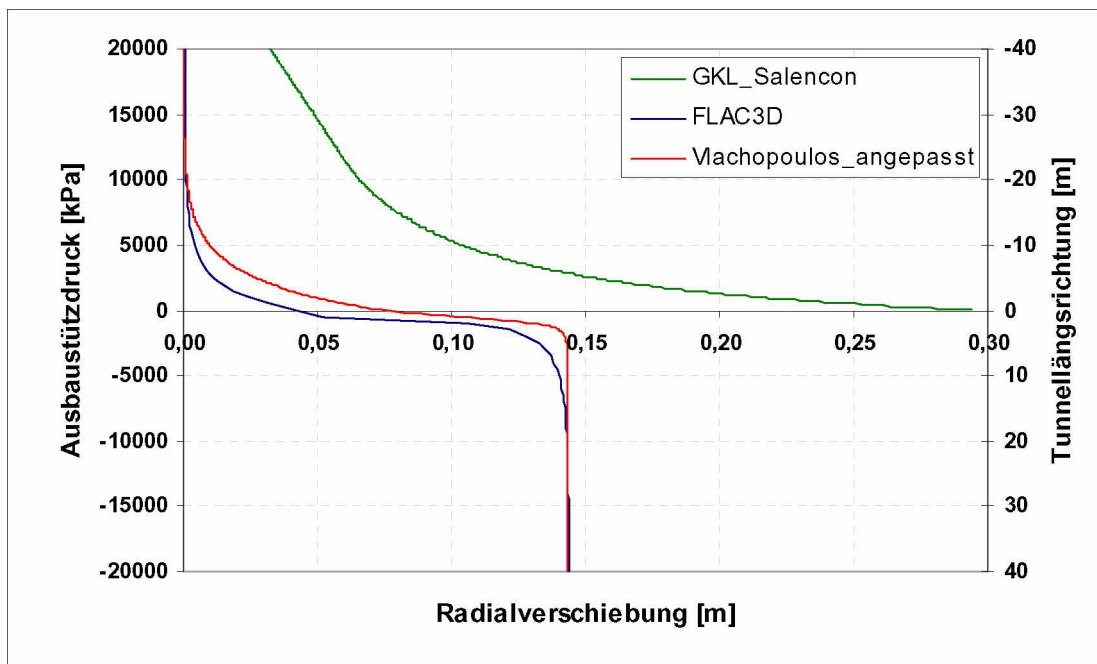




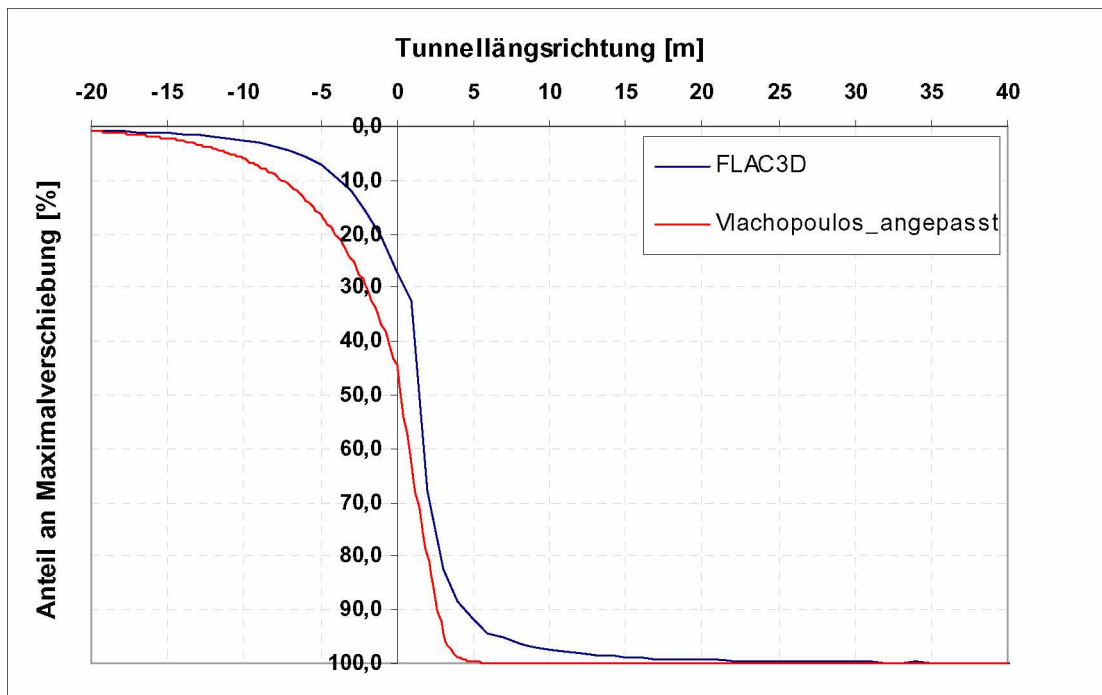
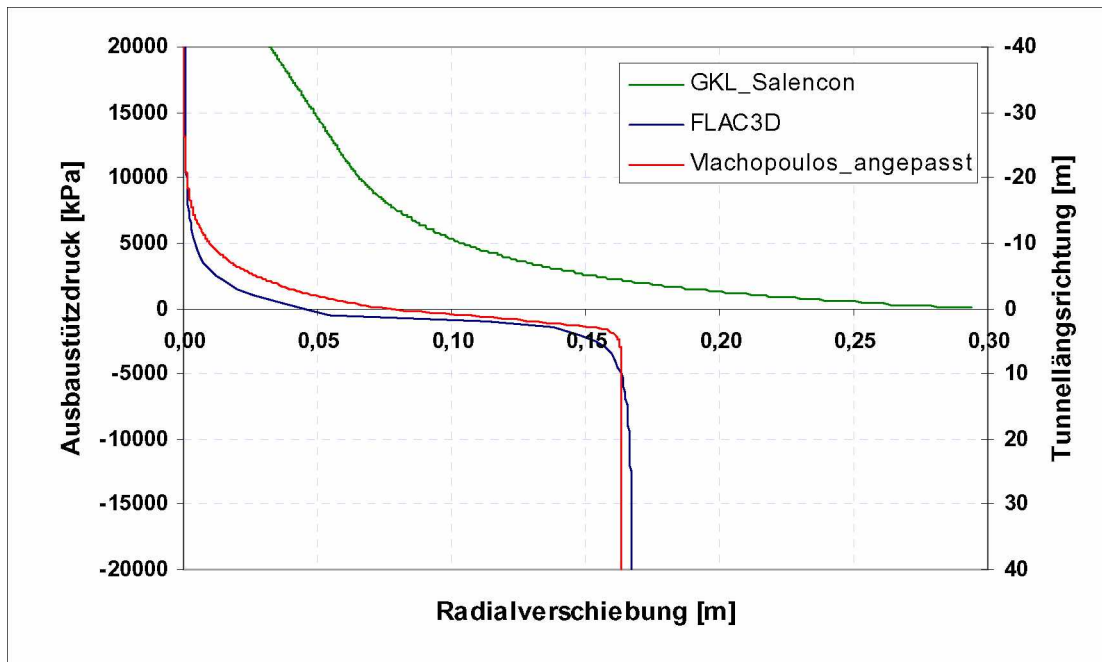
Beispiel 28



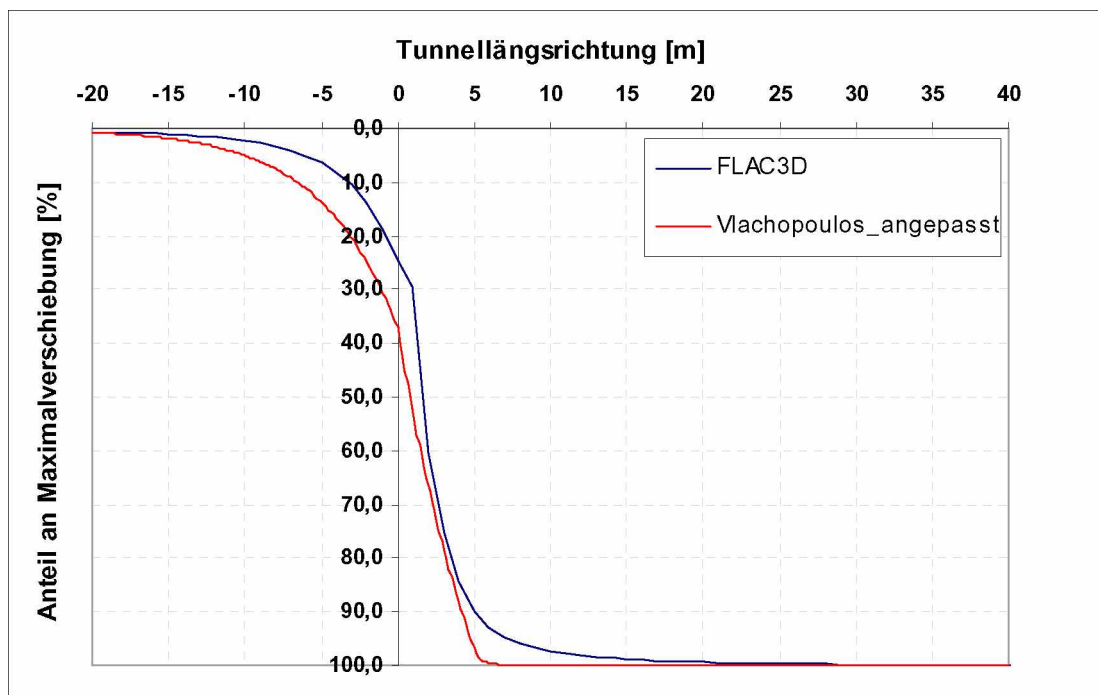
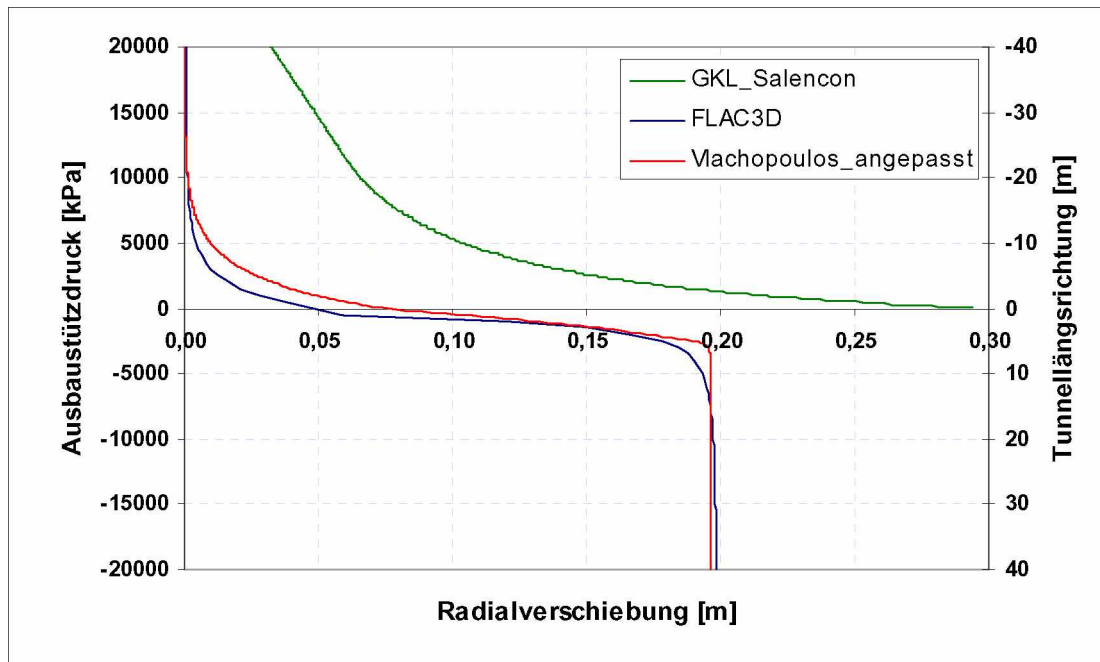
Beispiel 29



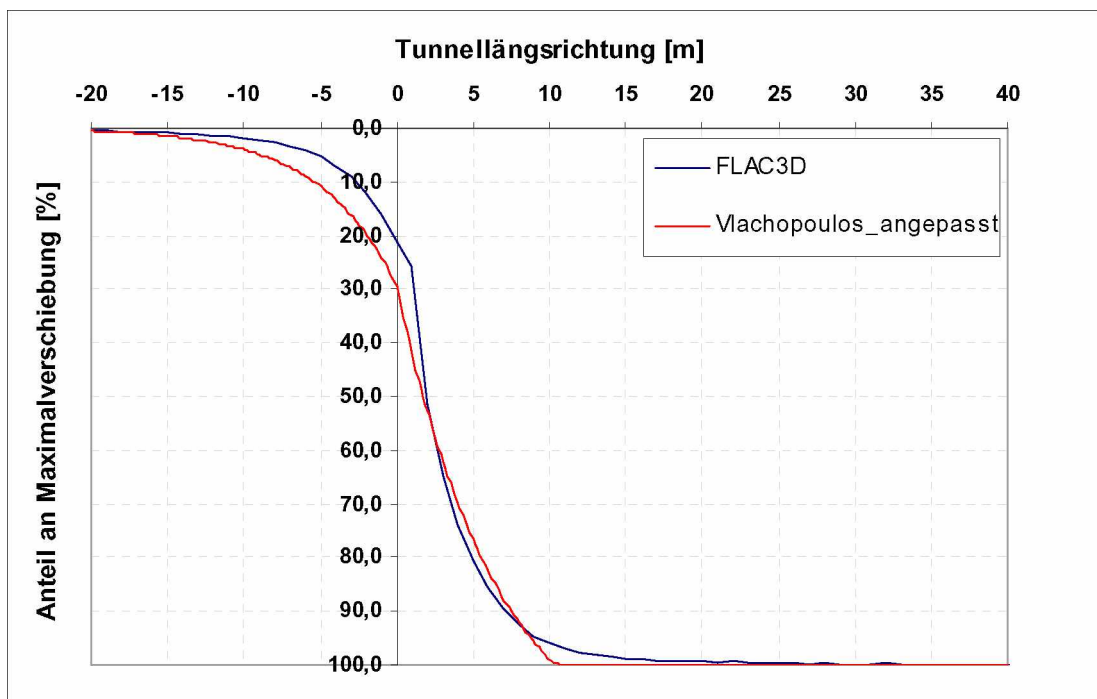
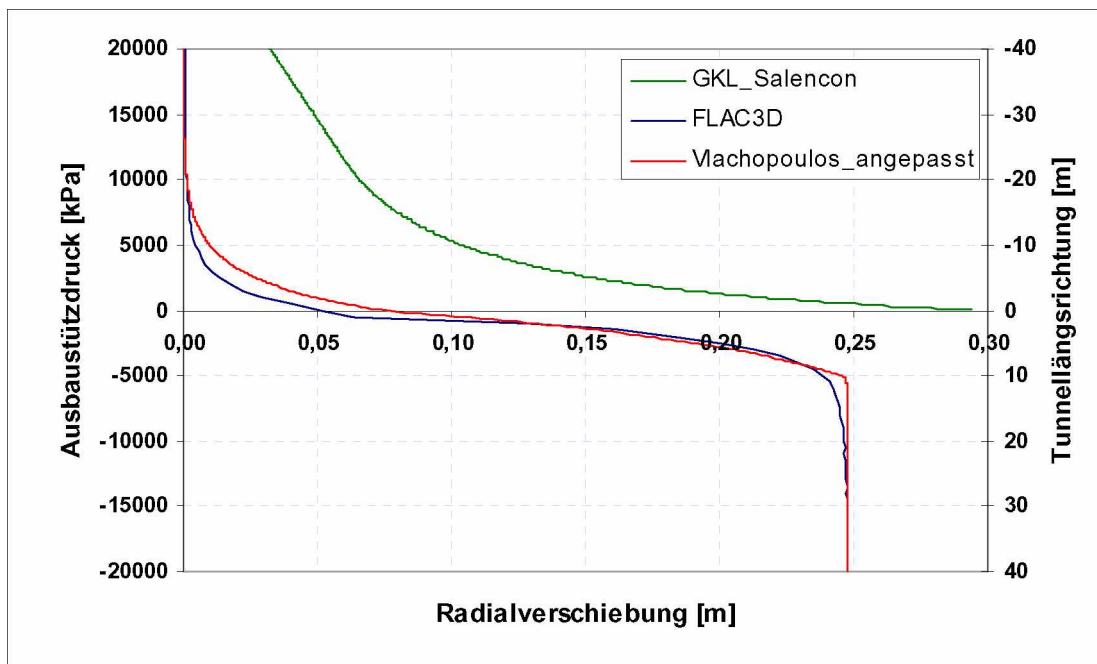
## Beispiel 30



## Beispiel 31

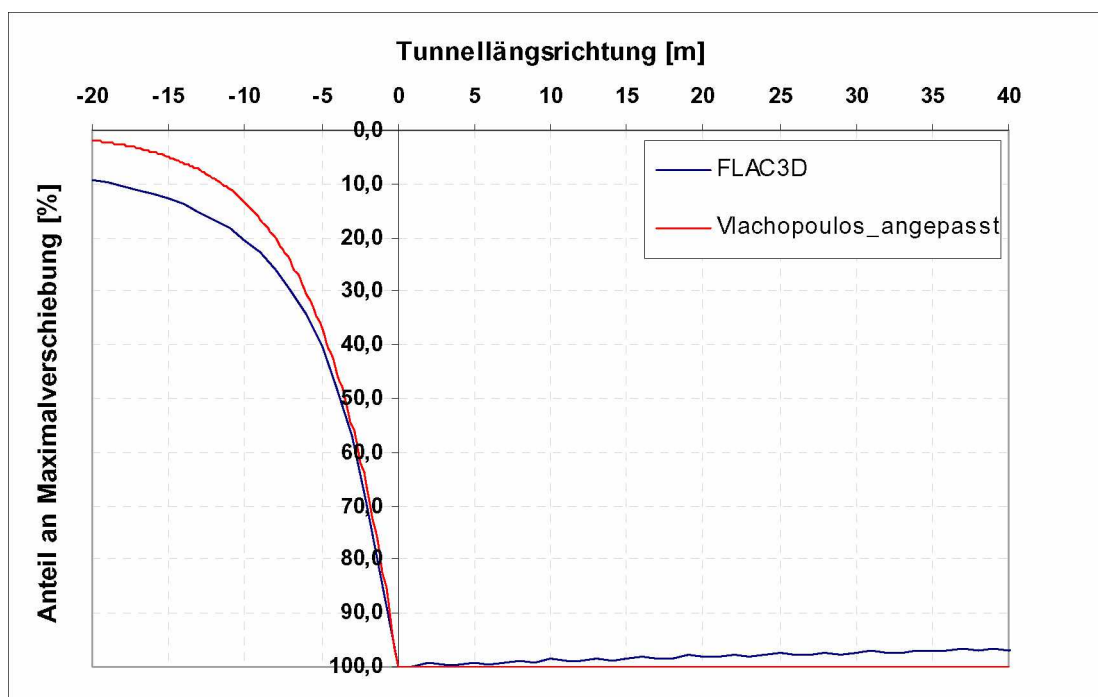
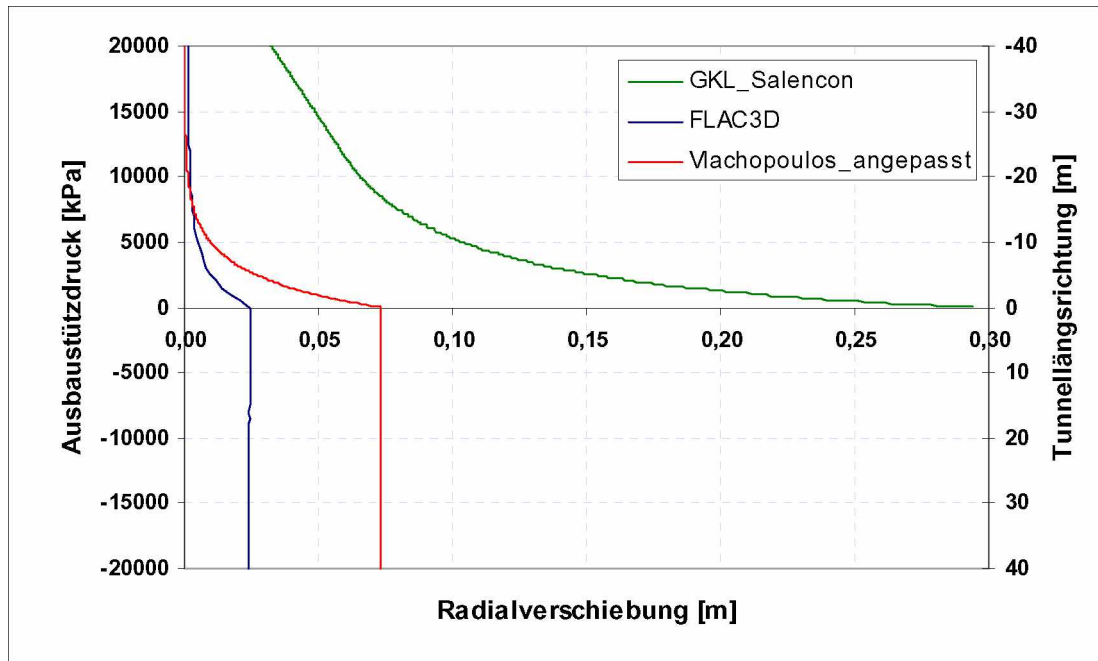


Beispiel 32

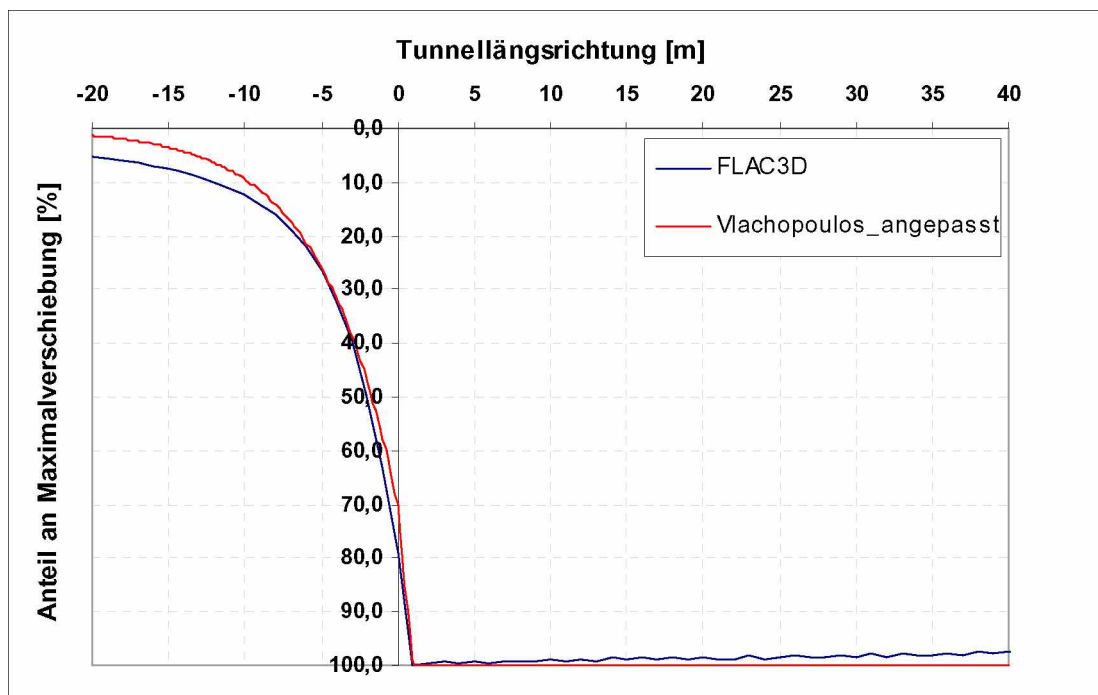
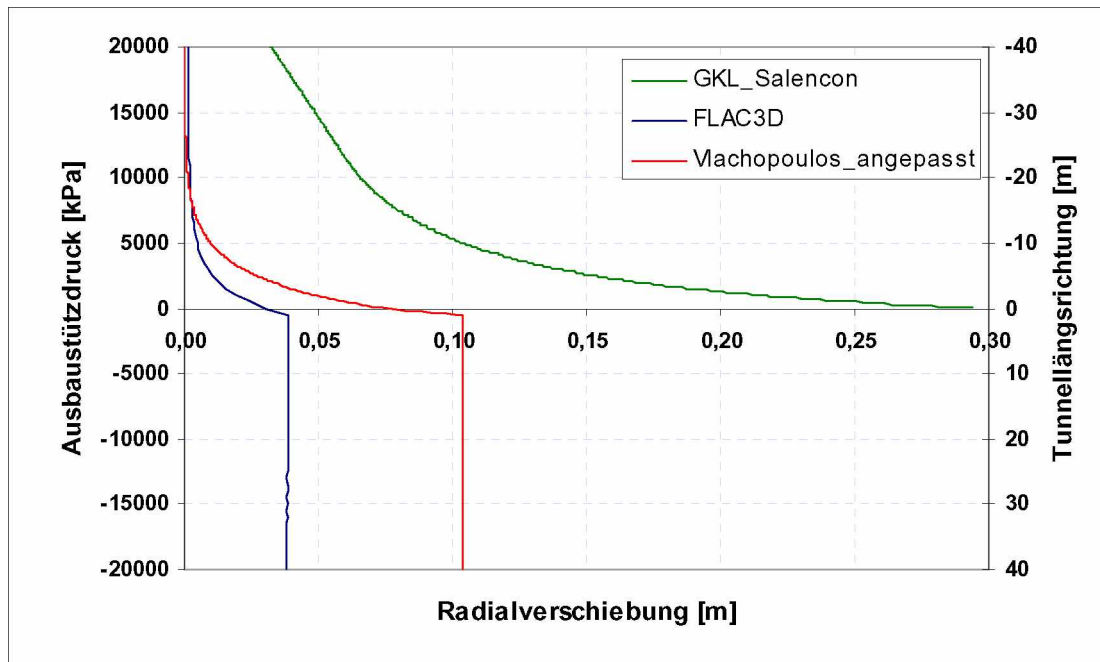


Beispiel	Abstand zu OB[m]	Schalendicke[cm]	E-Modul[GPa]
83	0	20	1,50E+10
84	1	20	1,50E+10
85	2	20	1,50E+10
86	3	20	1,50E+10
87	5	20	1,50E+10
88	10	20	1,50E+10

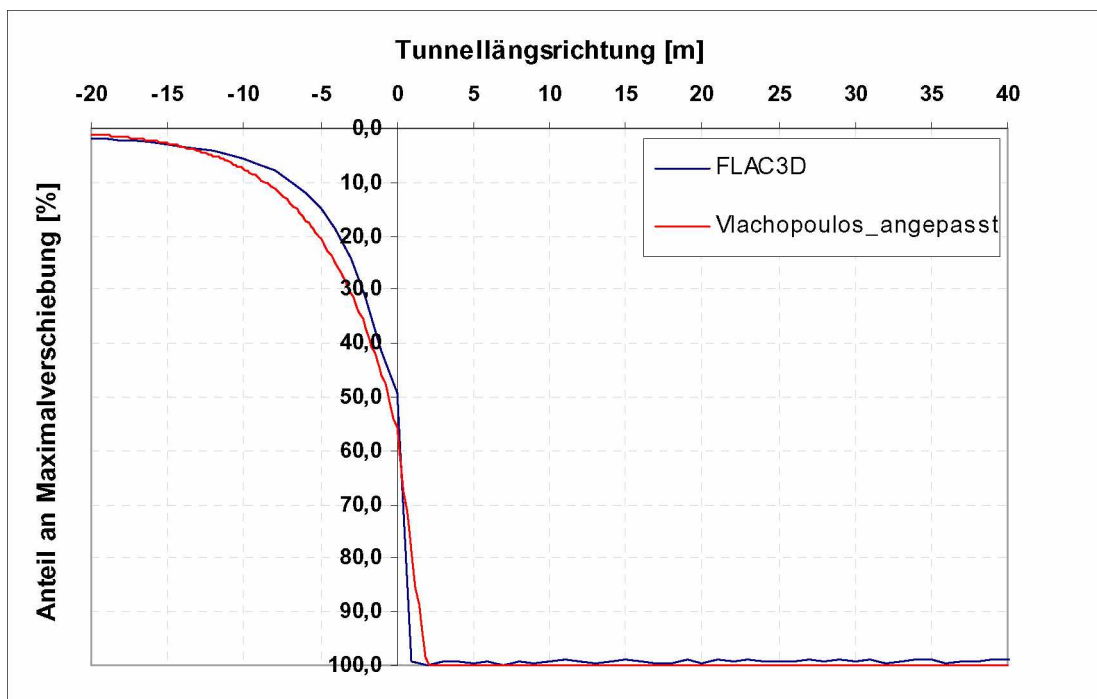
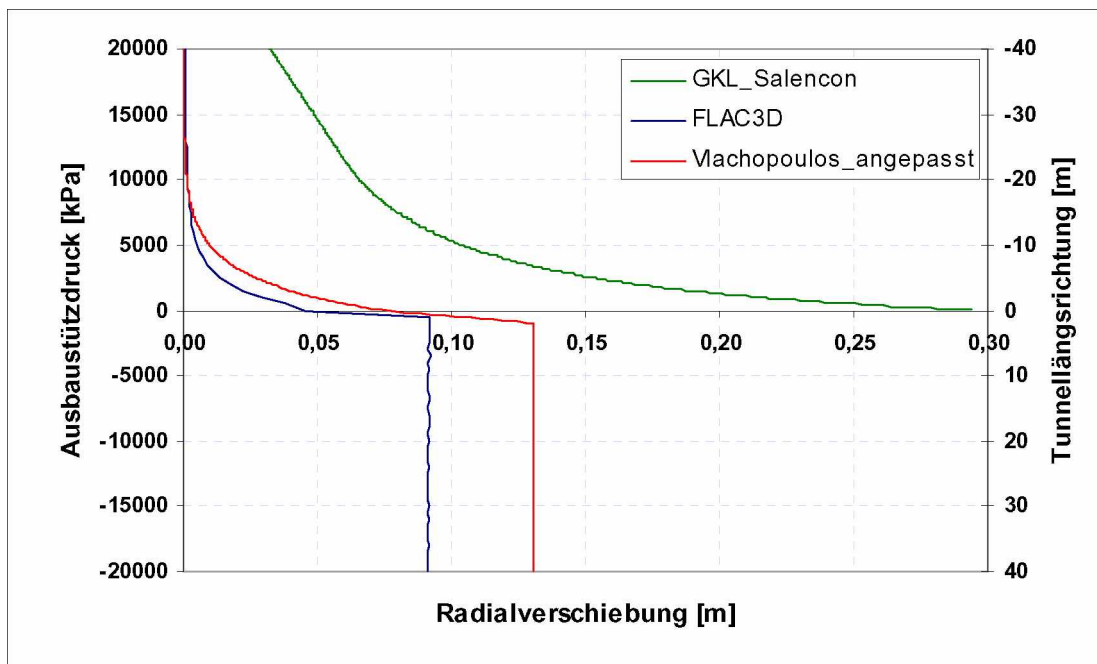
Beispiel 83



## Beispiel 84

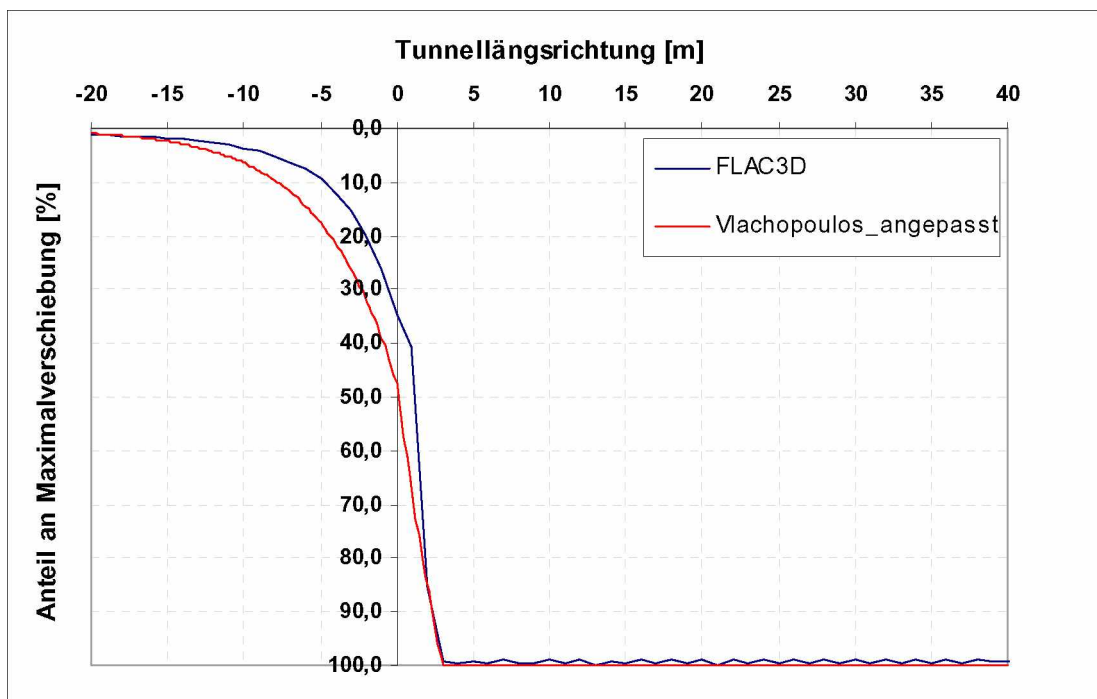
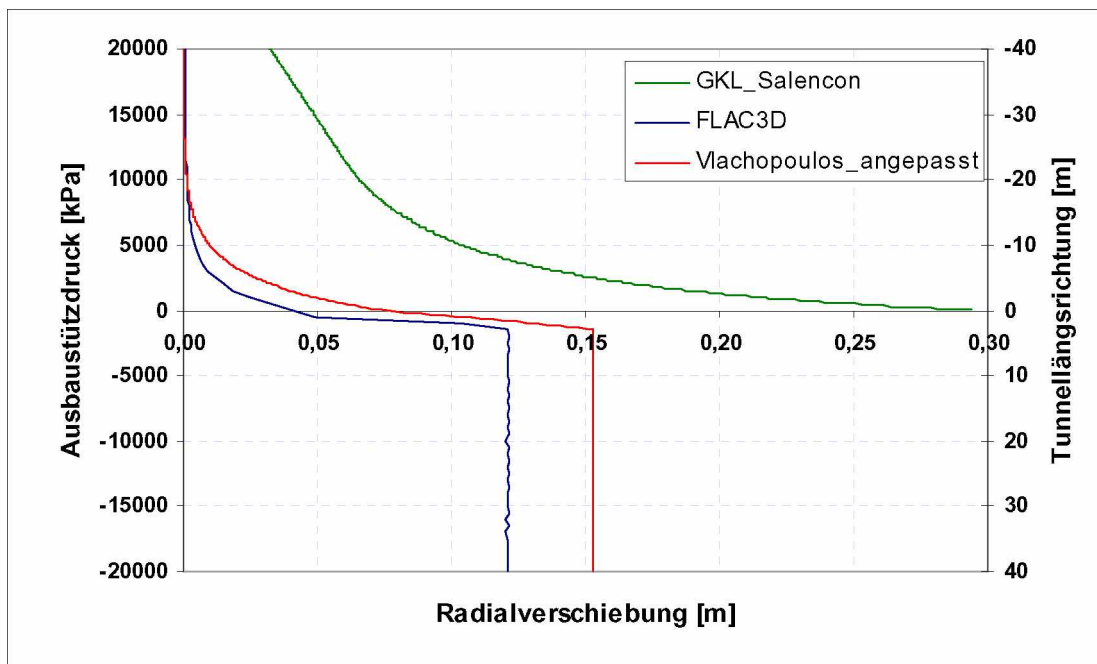


Beispiel 85

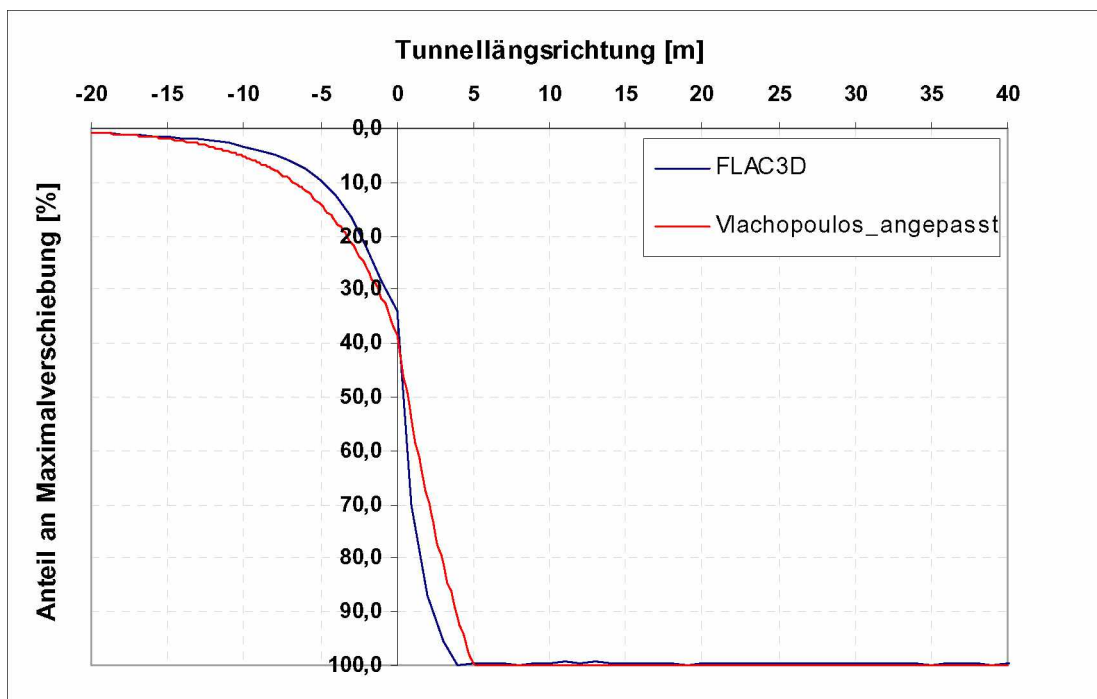
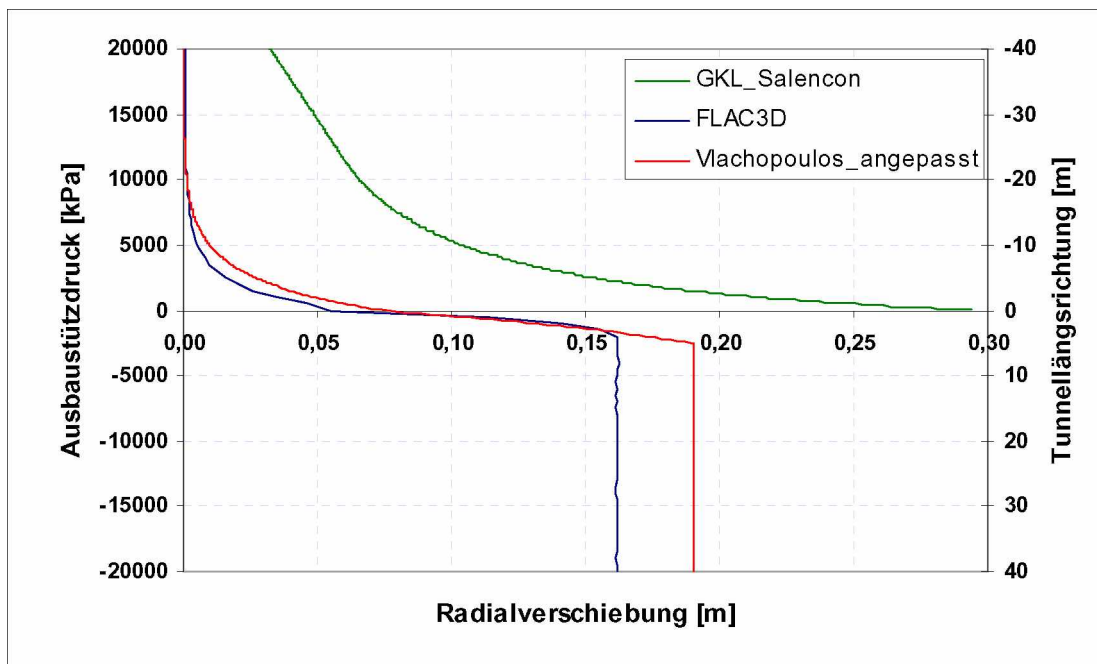




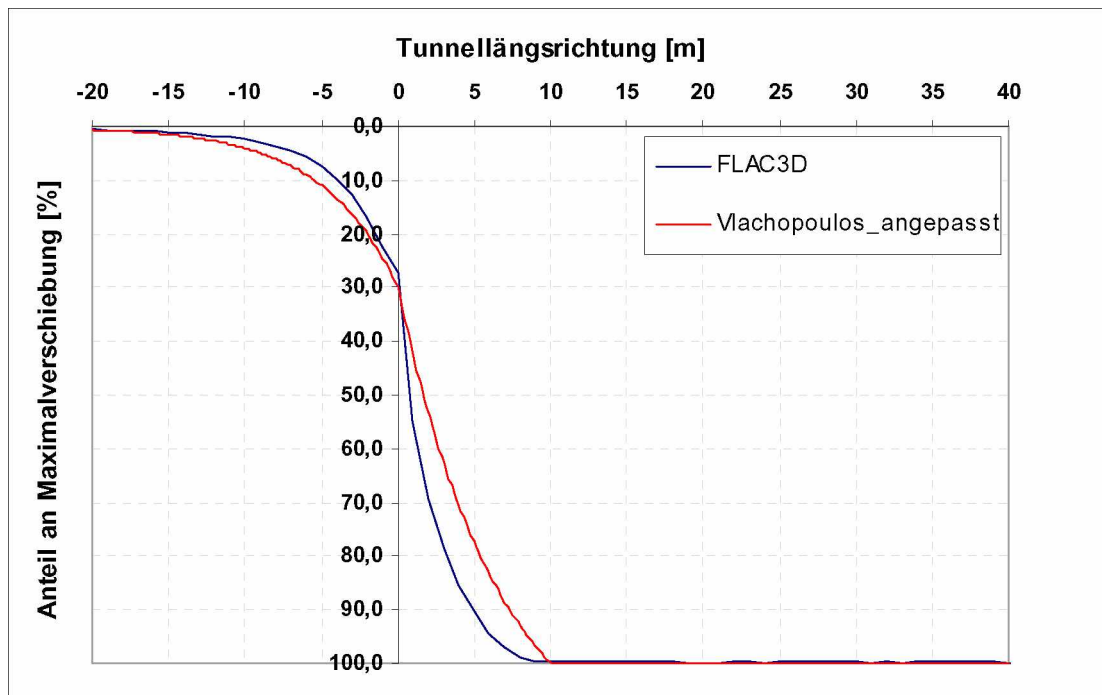
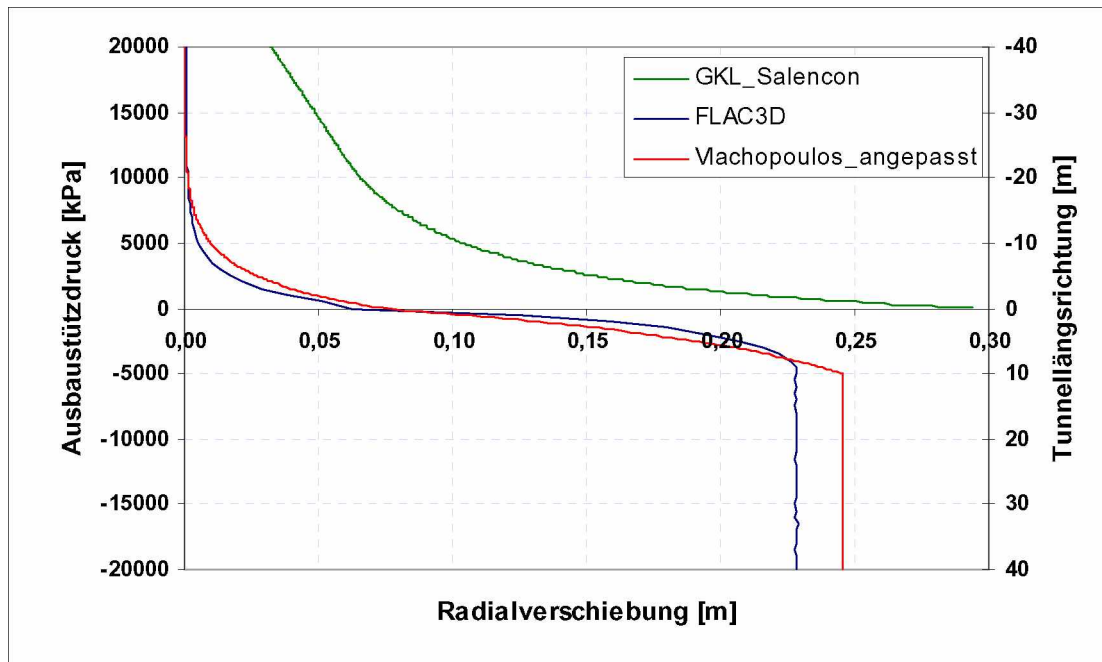
Beispiel 86



Beispiel 87

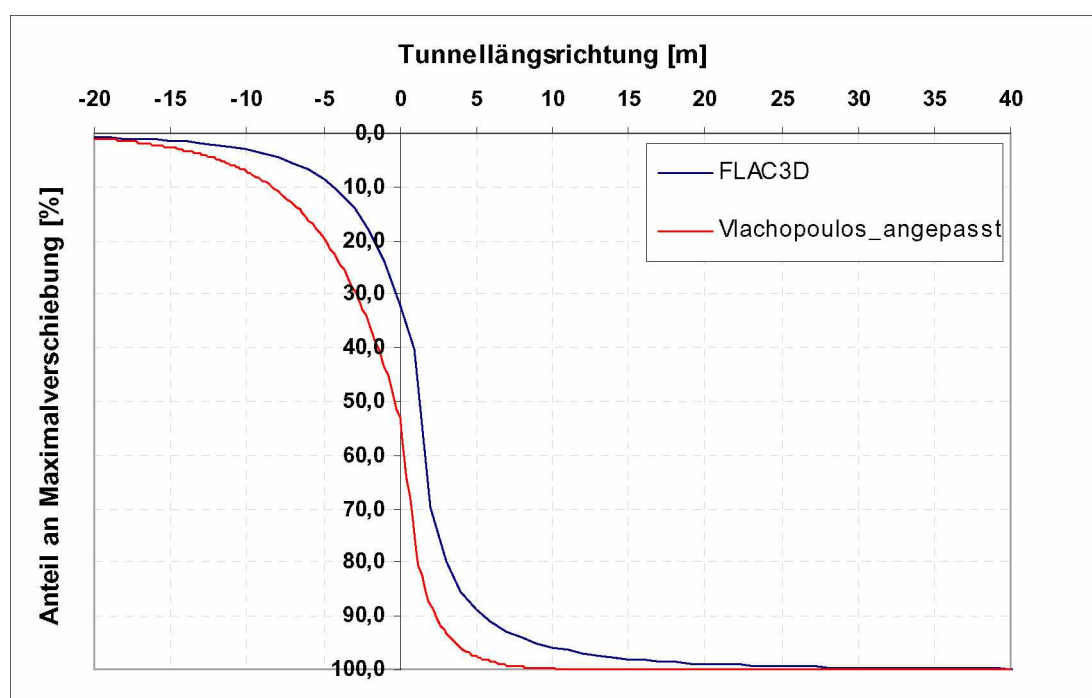
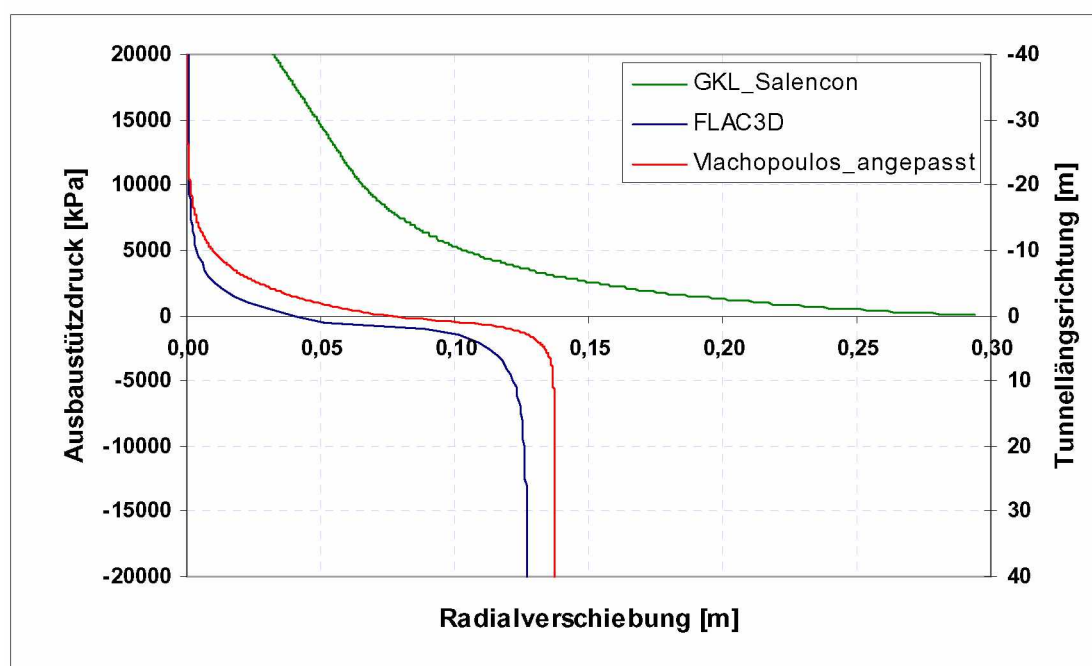


## Beispiel 88

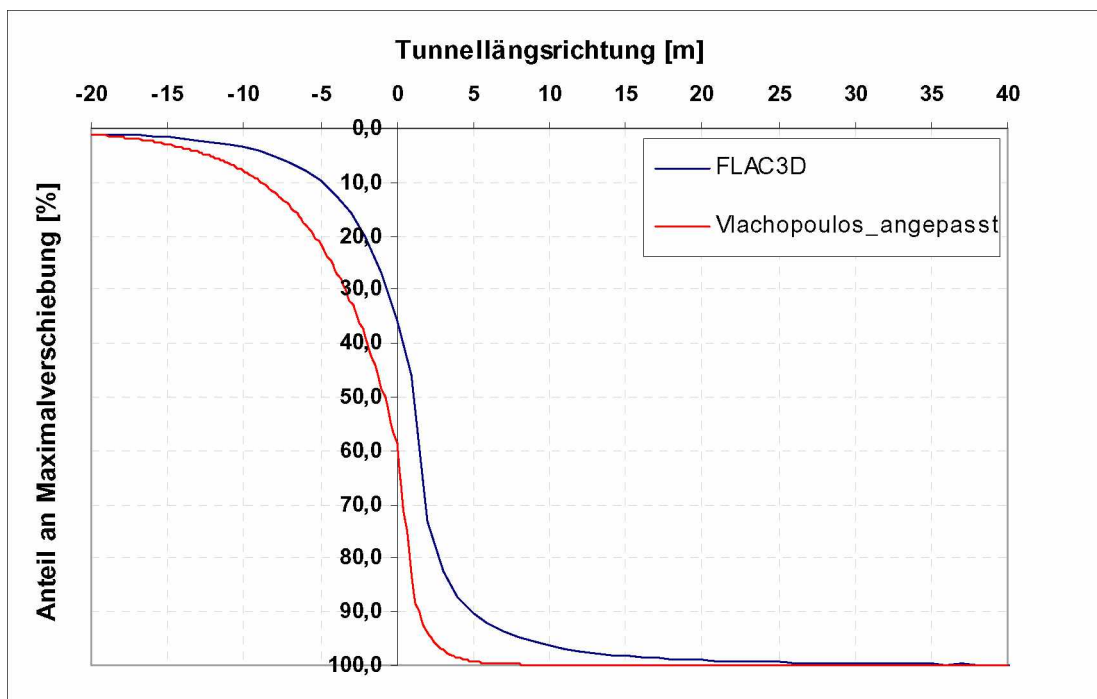
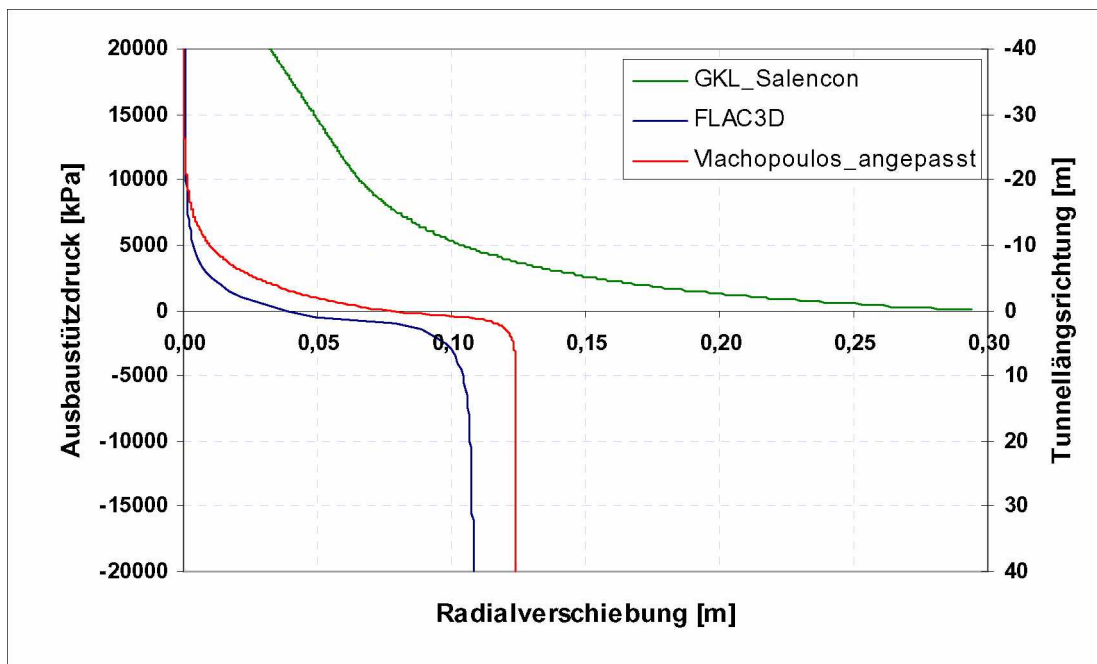


Beispiel	Abstand zu OB[m]	$E_{(SPC)}$ [GPa]	$E_{\text{Gebirge}}$ [MPa]
89	1	10	2000
90	1	20	2000
91	1	5	2000
Beispiel	Abstand zu OB[m]	$E_{(SPC)}$ [GPa]	$E_{\text{Gebirge}}$ [MPa]
92	1	15	1000
93	1	15	3000
94	1	15	5000

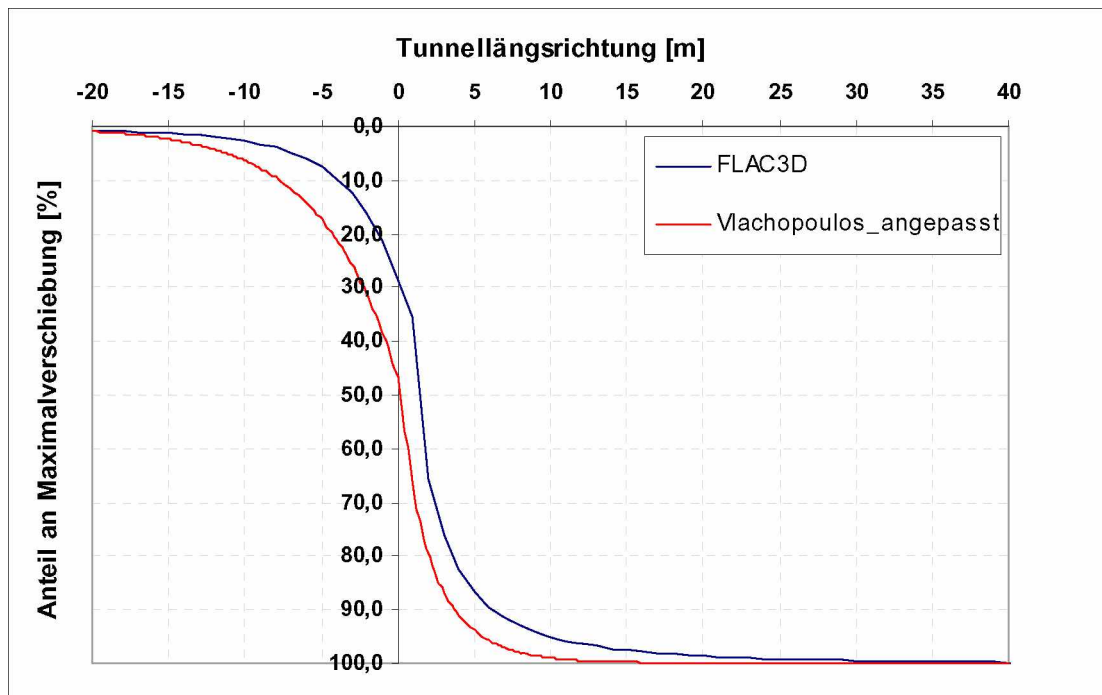
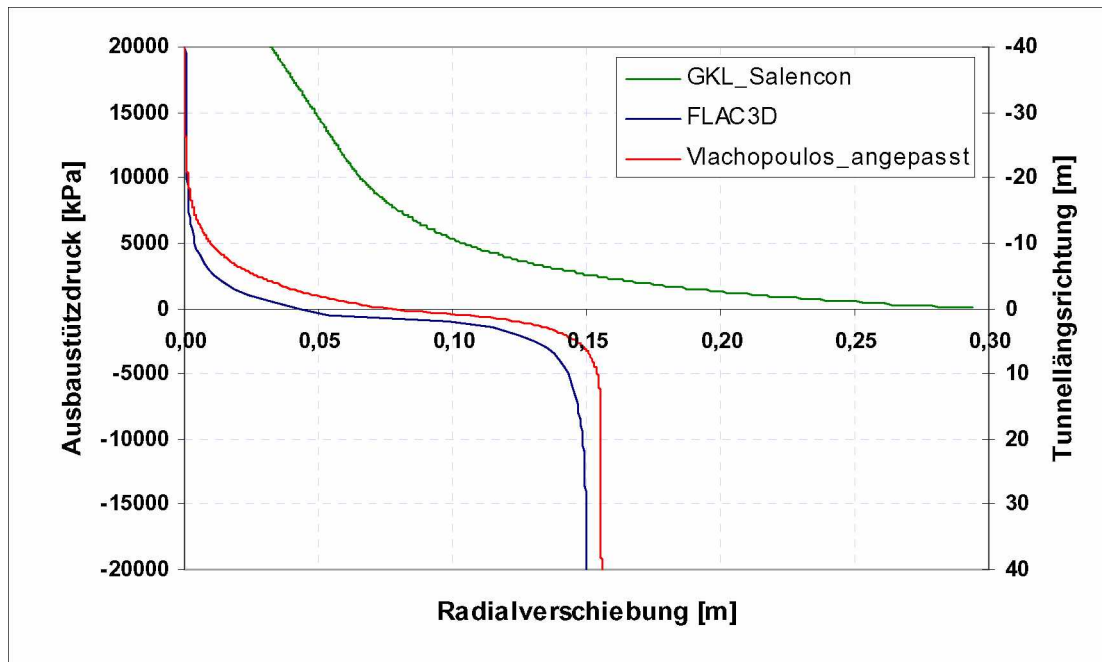
Beispiel 89



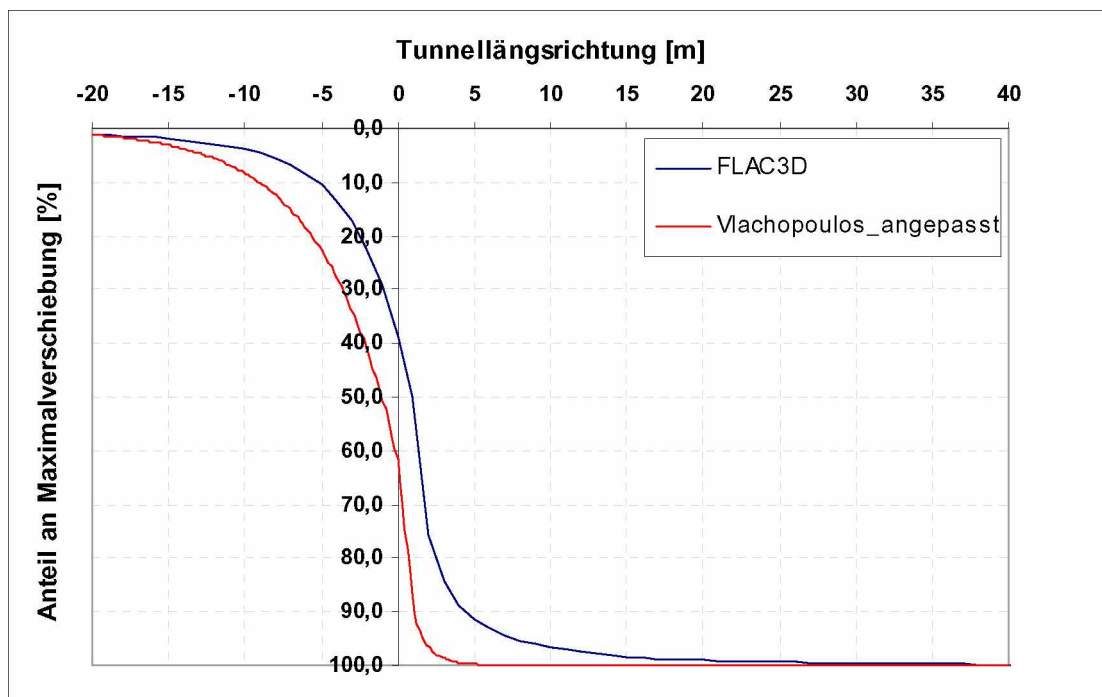
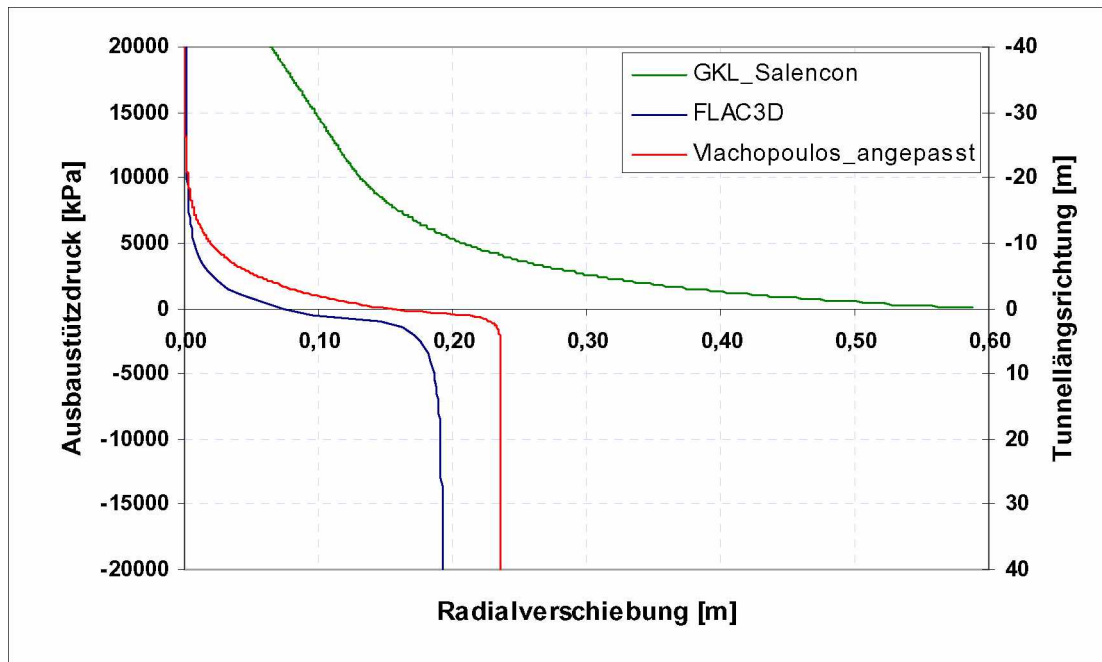
Beispiel 90



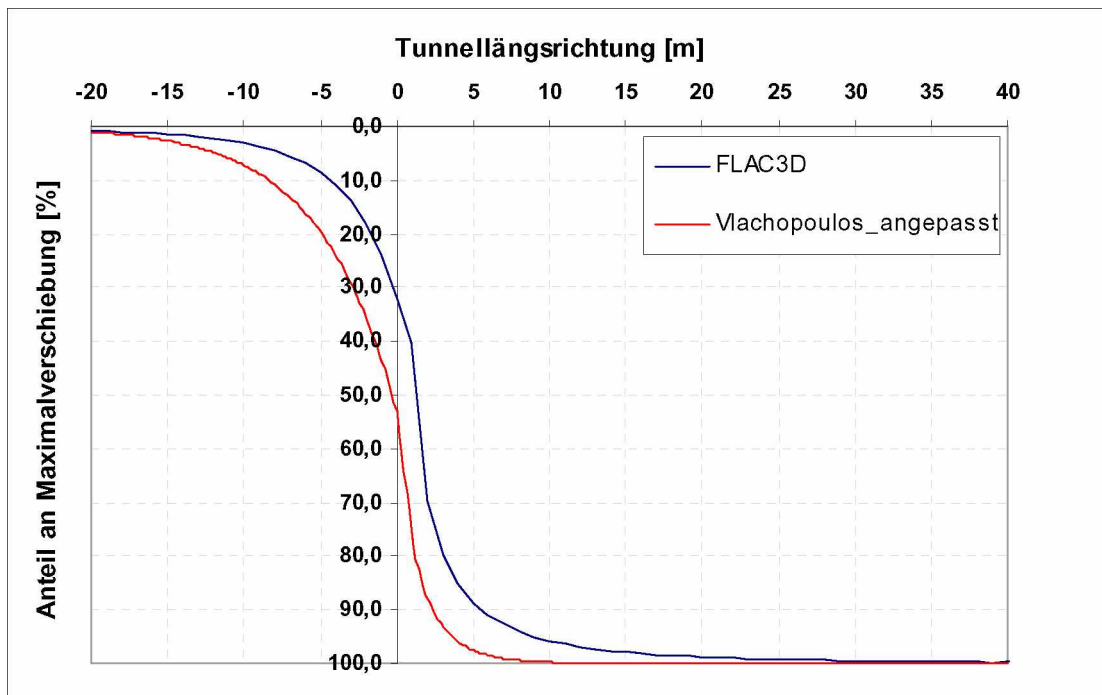
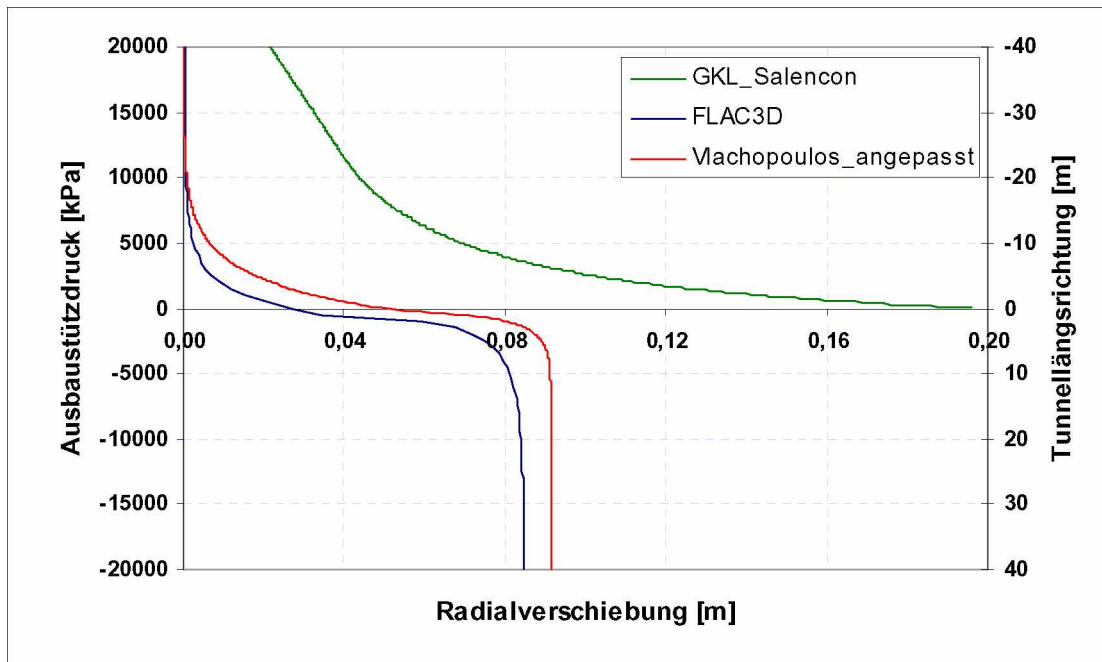
## Beispiel 91



## Beispiel 92

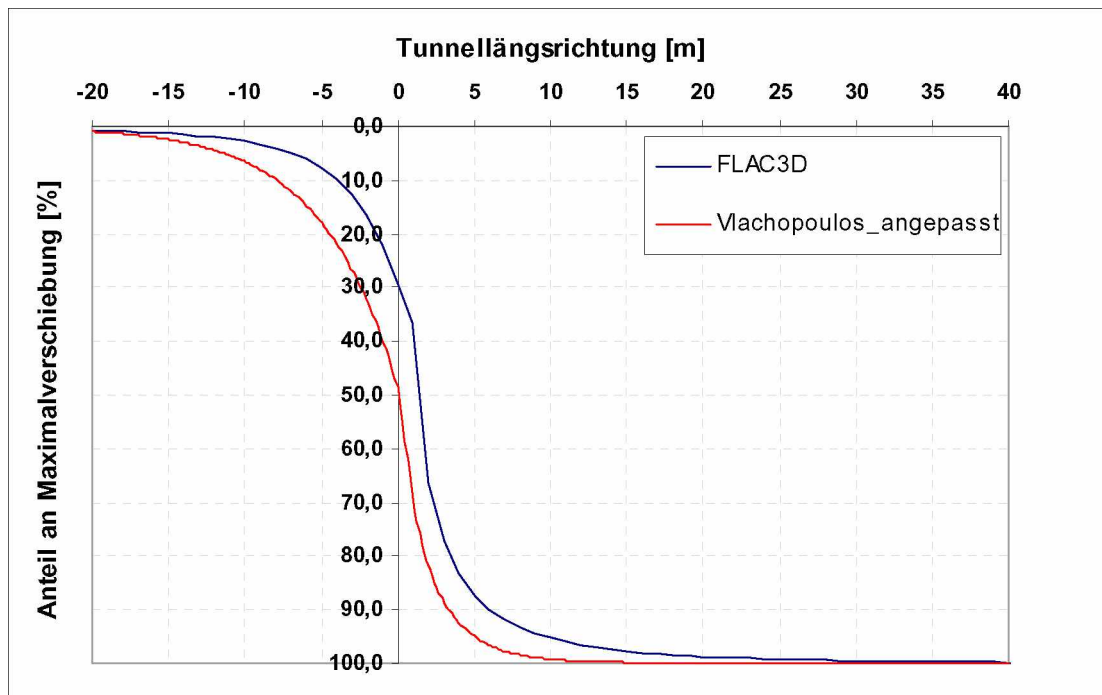
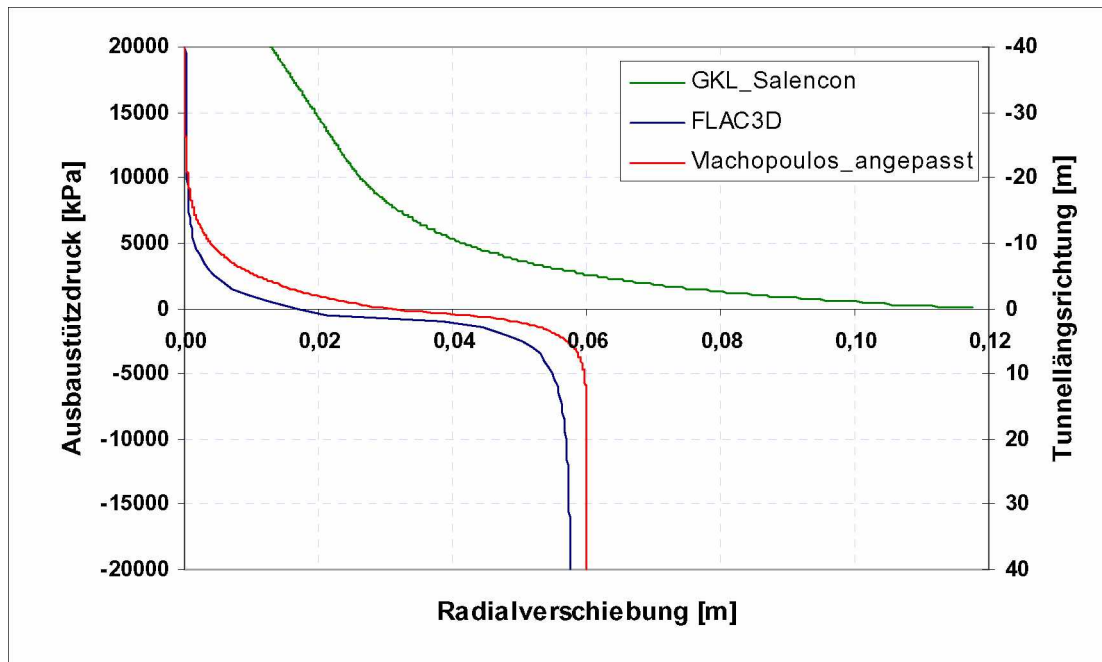


## Beispiel 93





## Beispiel 94



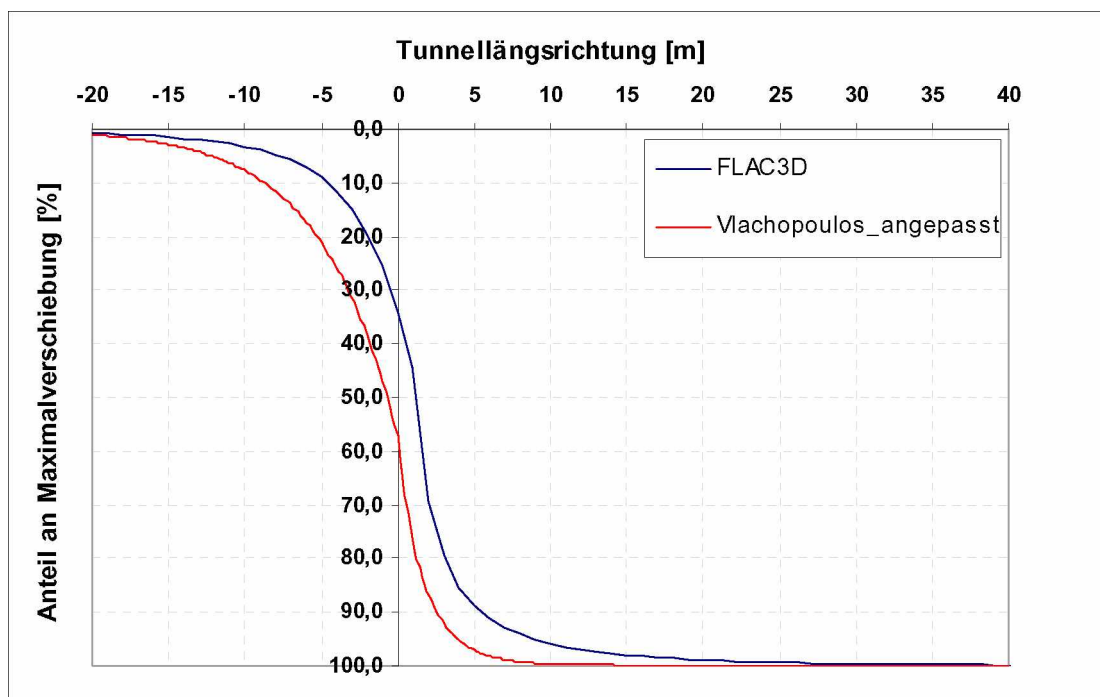
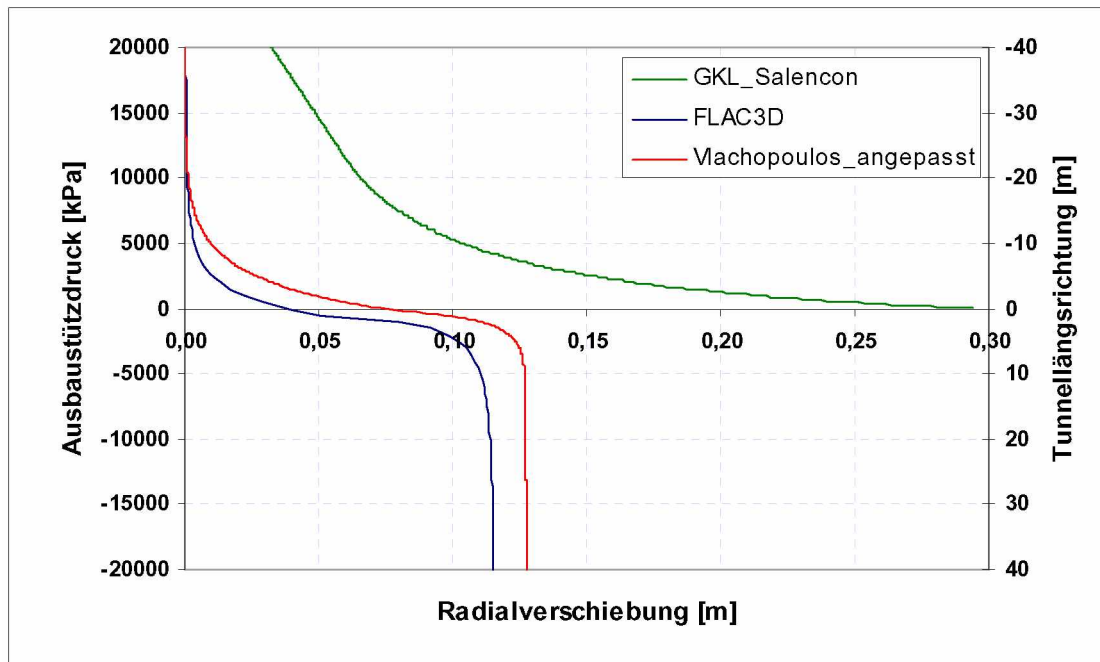
## Diagramme - Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig)

<b>Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig)</b>			
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
33	0	1	2000
34	1	1	2000
35	2	1	2000
36	3	1	2000
37	5	1	2000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
38	0	2	2000
39	1	2	2000
40	2	2	2000
41	3	2	2000
42	5	2	2000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
43	0	4	2000
44	1	4	2000
45	2	4	2000
46	3	4	2000
47	5	4	2000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
48	0	6	2000
49	1	6	2000
50	2	6	2000
51	3	6	2000
52	5	6	2000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
53	0	10	2000
54	1	10	2000
55	2	10	2000

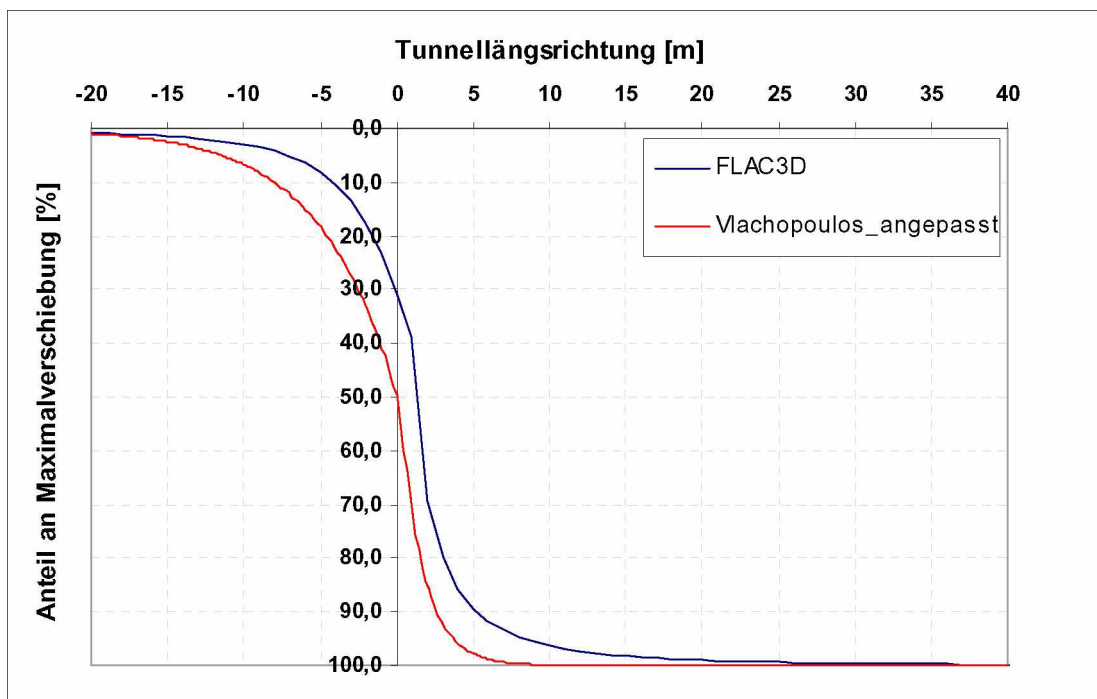
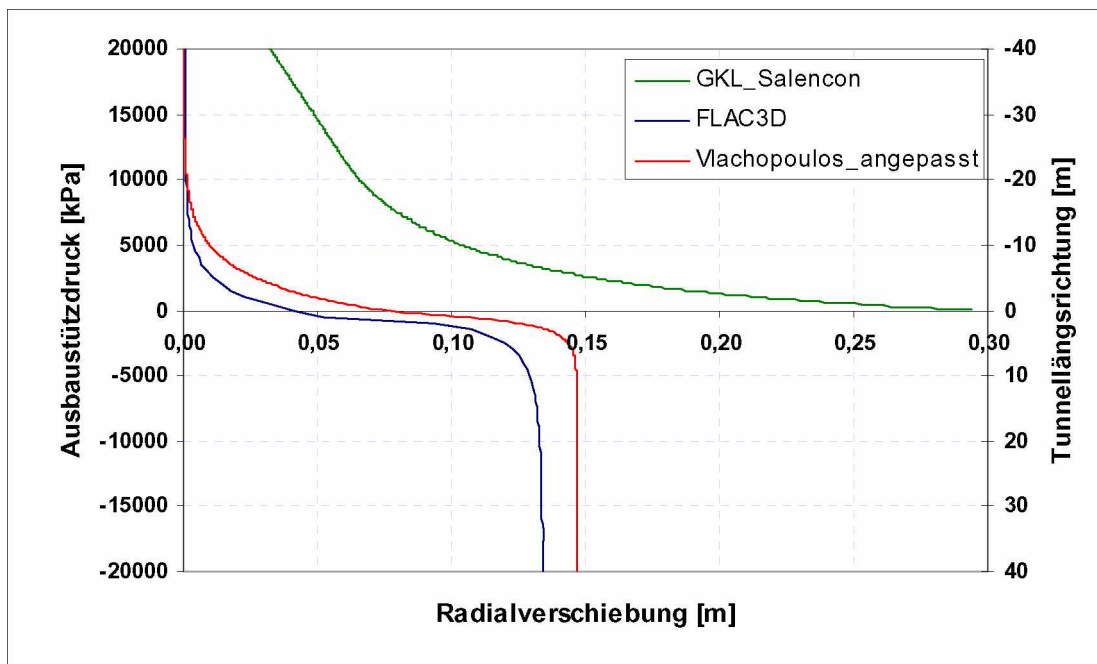
<b>Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig)</b>			
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
56	0	1	1000
57	1	1	1000
58	2	1	1000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
59	0	2	1000
60	1	2	1000
61	2	2	1000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
62	0	6	1000
63	1	6	1000
64	2	6	1000
<b>Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig)</b>			
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
65	0	1	3000
66	1	1	3000
67	2	1	3000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
68	0	2	3000
69	1	2	3000
70	2	2	3000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
71	0	6	3000
72	1	6	3000
73	2	6	3000
<b>Beispiele mit Spritzbetonschale (zeitabhängig)</b>			
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
74	0	1	5000
75	1	1	5000
76	2	1	5000
<b>Beispiel</b>	<b>Abstand zu OB[m]</b>	<b>VG[m/t]</b>	<b>E<sub>Gebirge</sub>[MPa]</b>
77	0	2	5000
78	1	2	5000
79	2	2	5000

Beispiel	Abstand zu OB[m]	VG[m/t]	E <sub>Gebirge</sub> [MPa]
80	0	6	5000
81	1	6	5000
82	2	6	5000

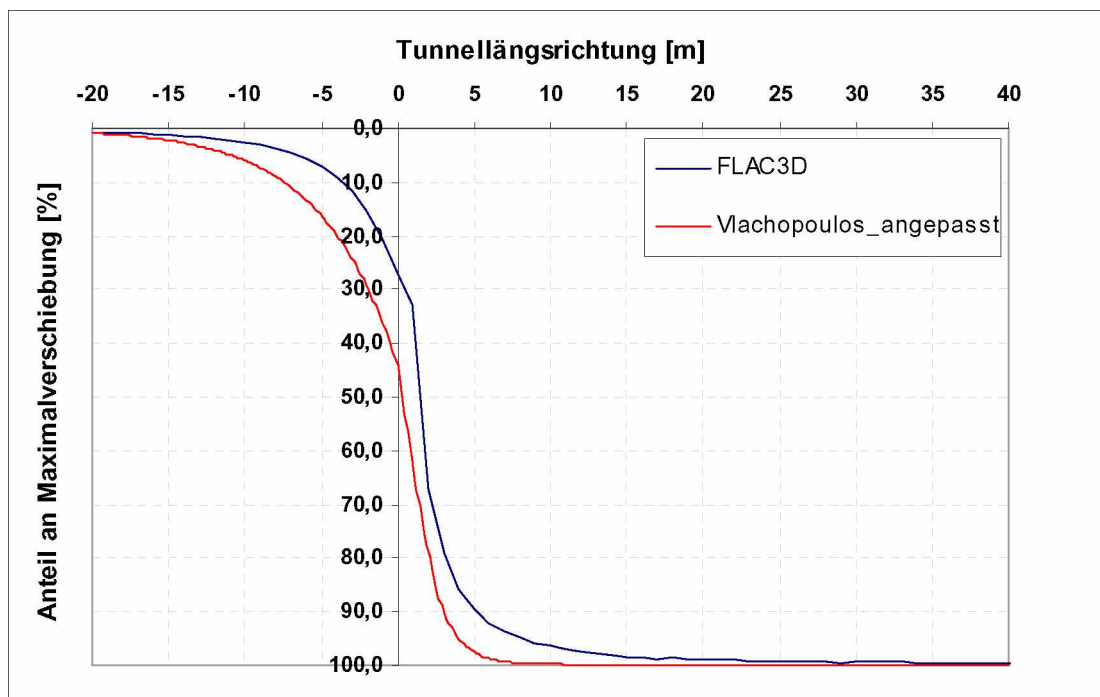
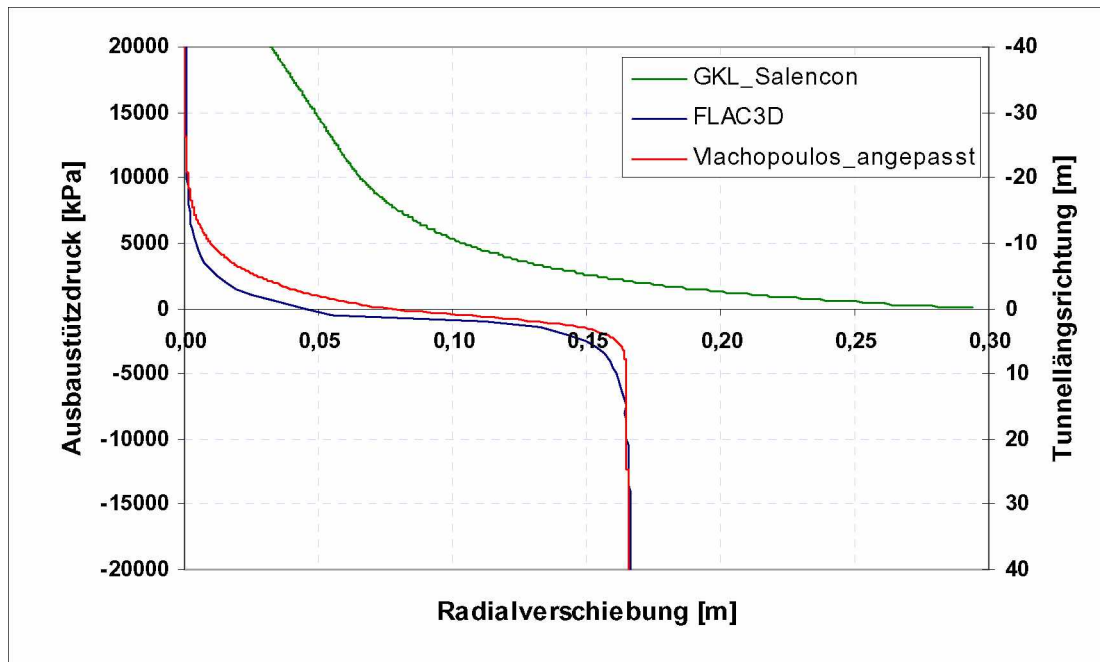
Beispiel 33



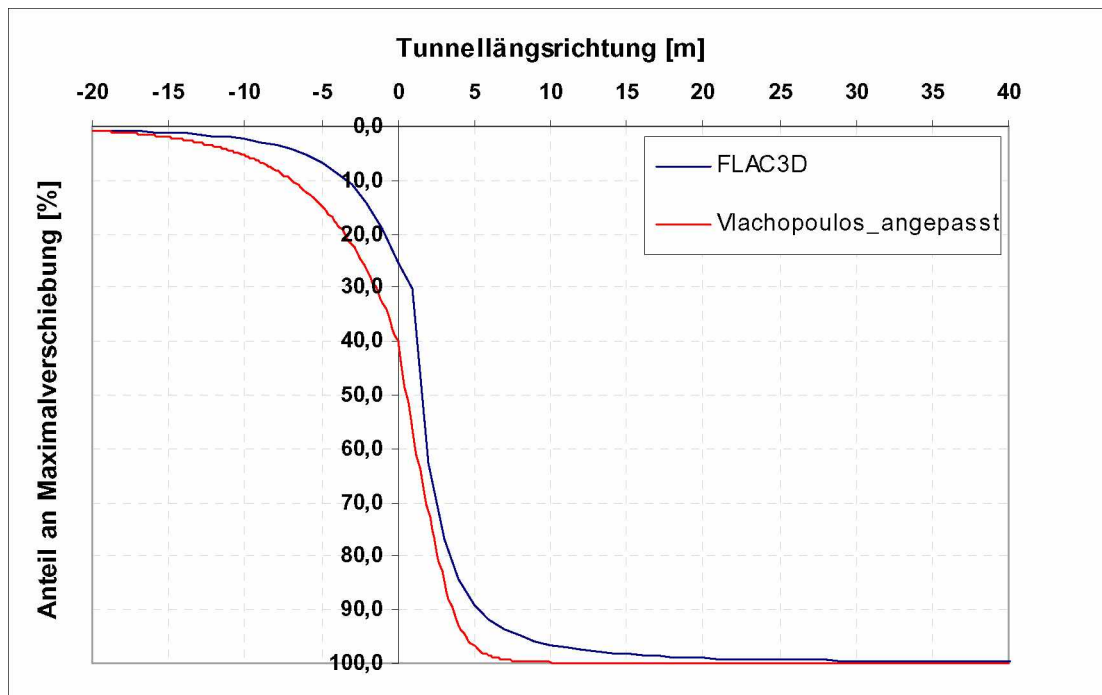
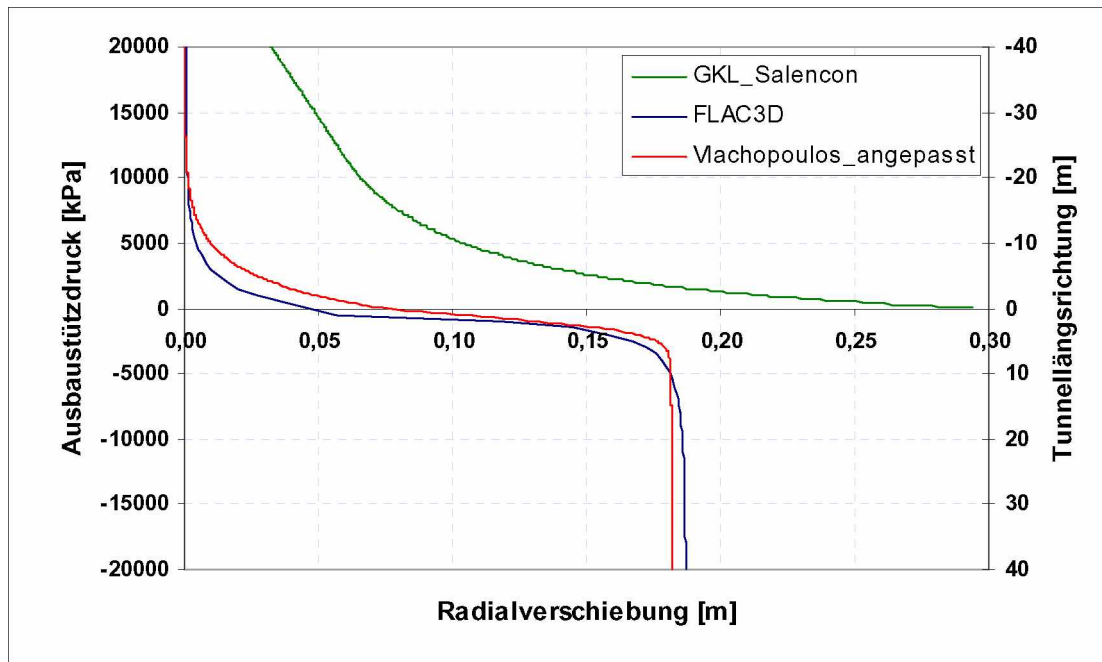
Beispiel 34



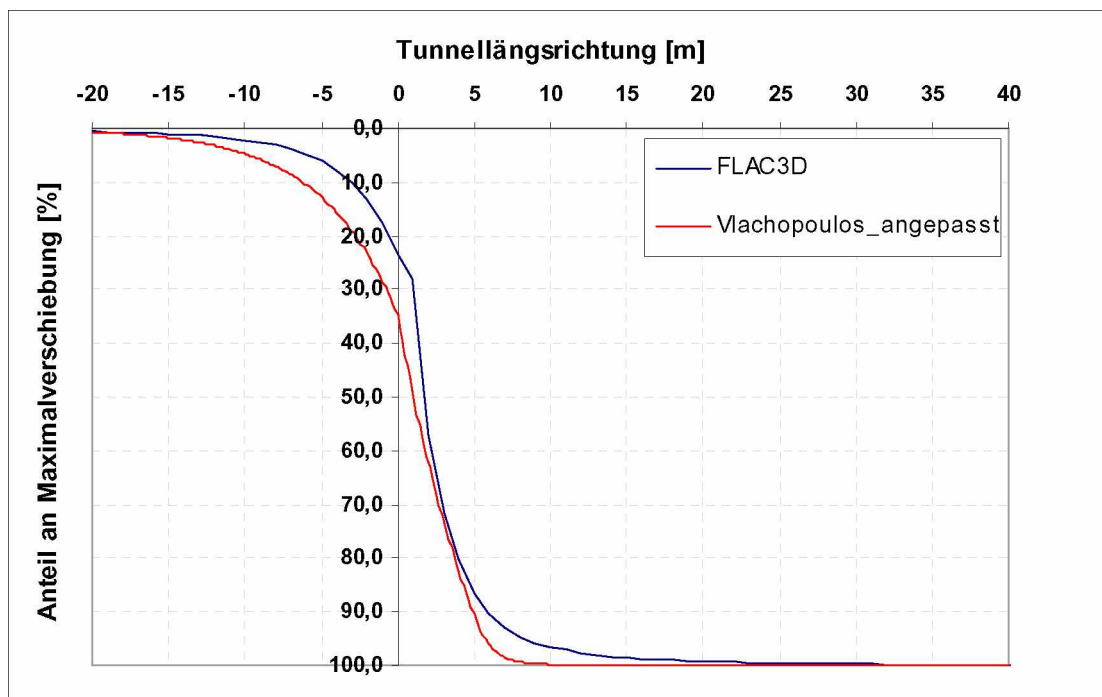
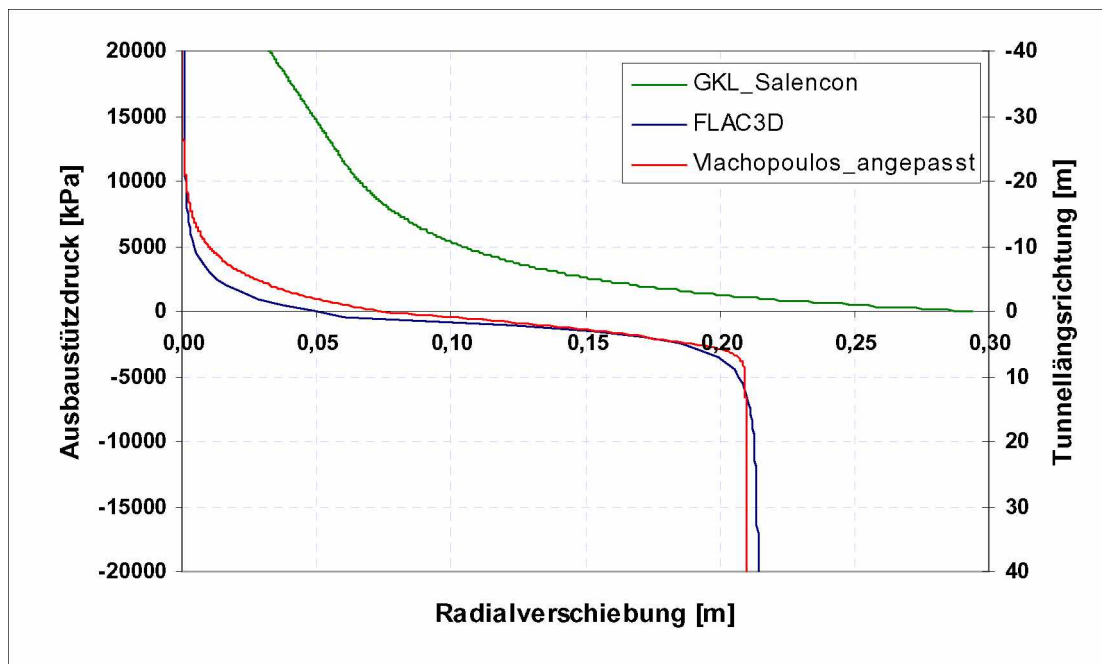
## Beispiel 35



## Beispiel 36

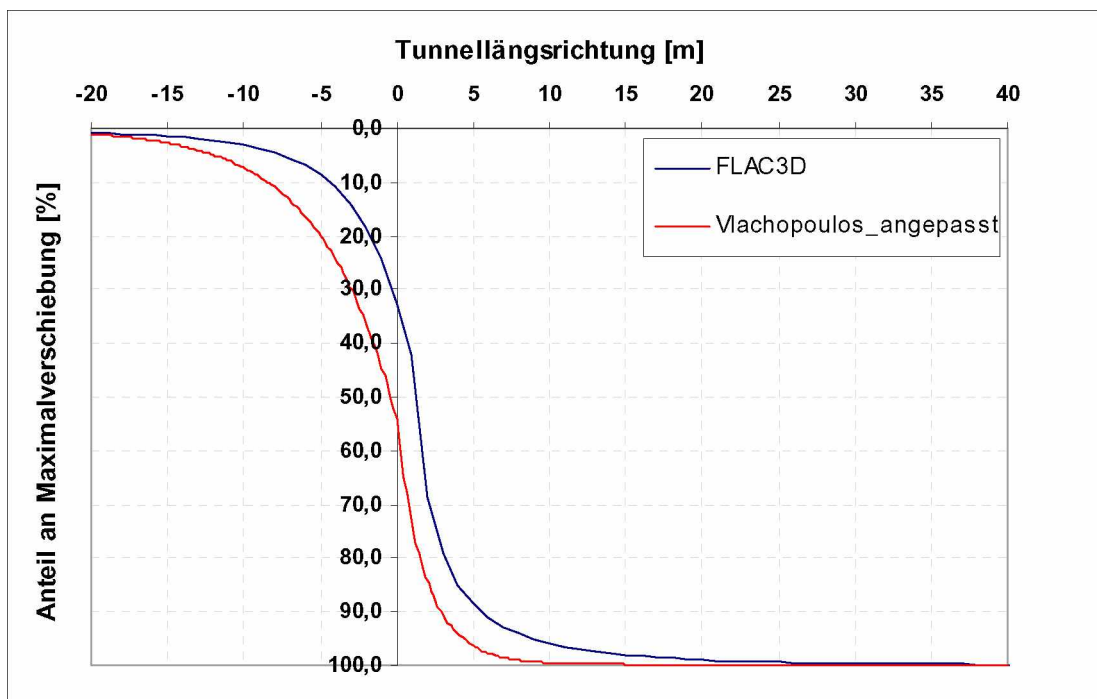
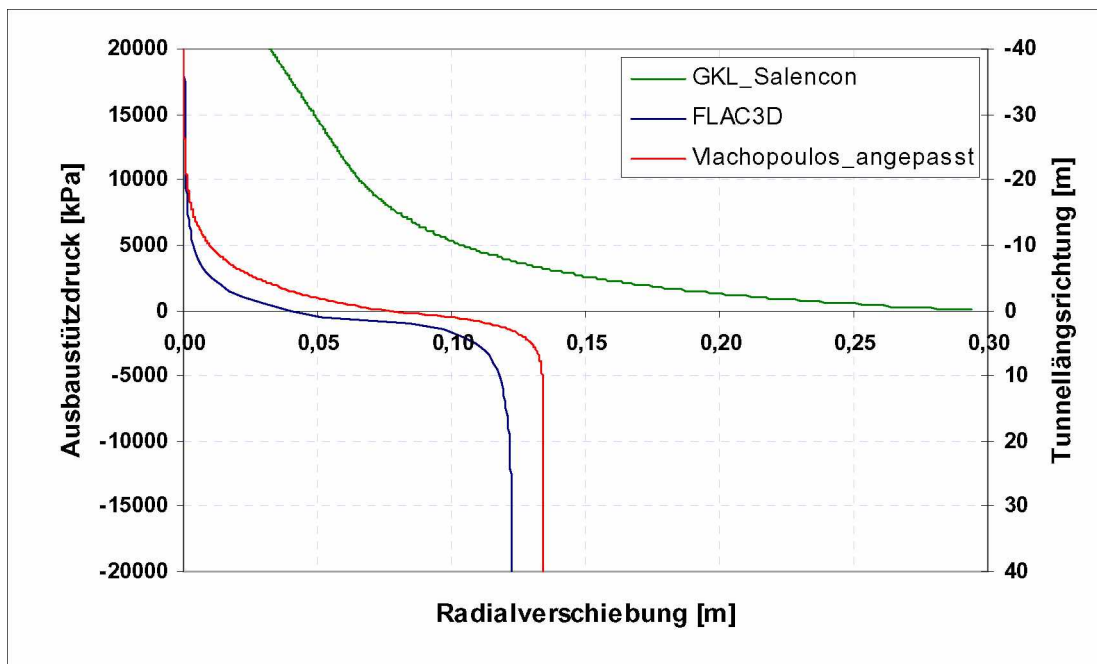


## Beispiel 37

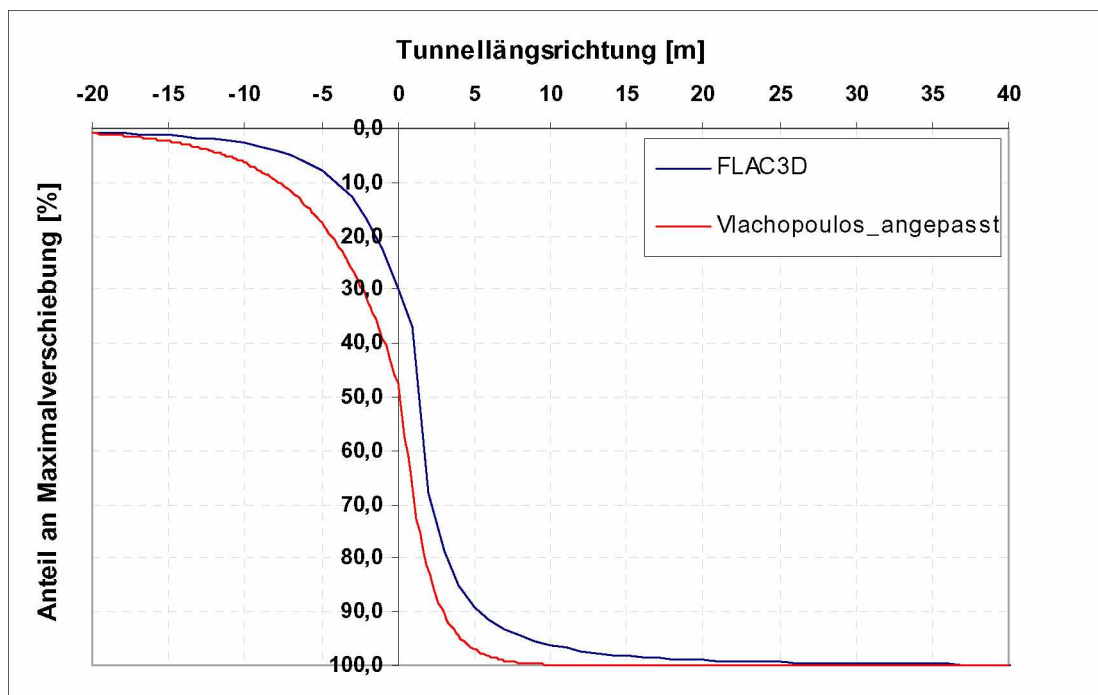
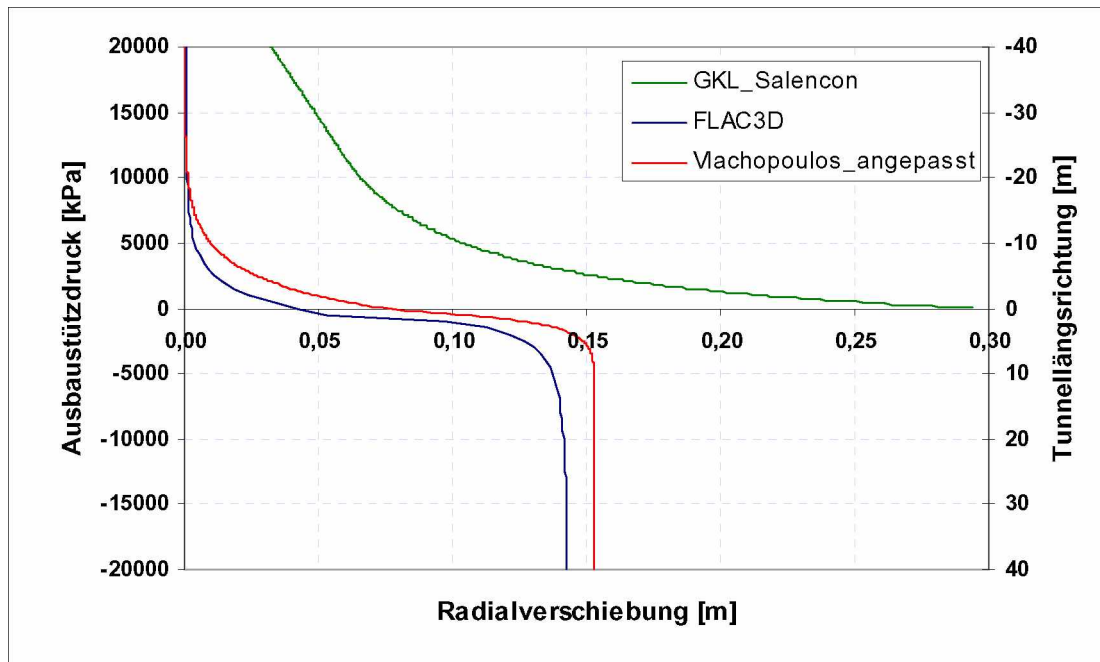




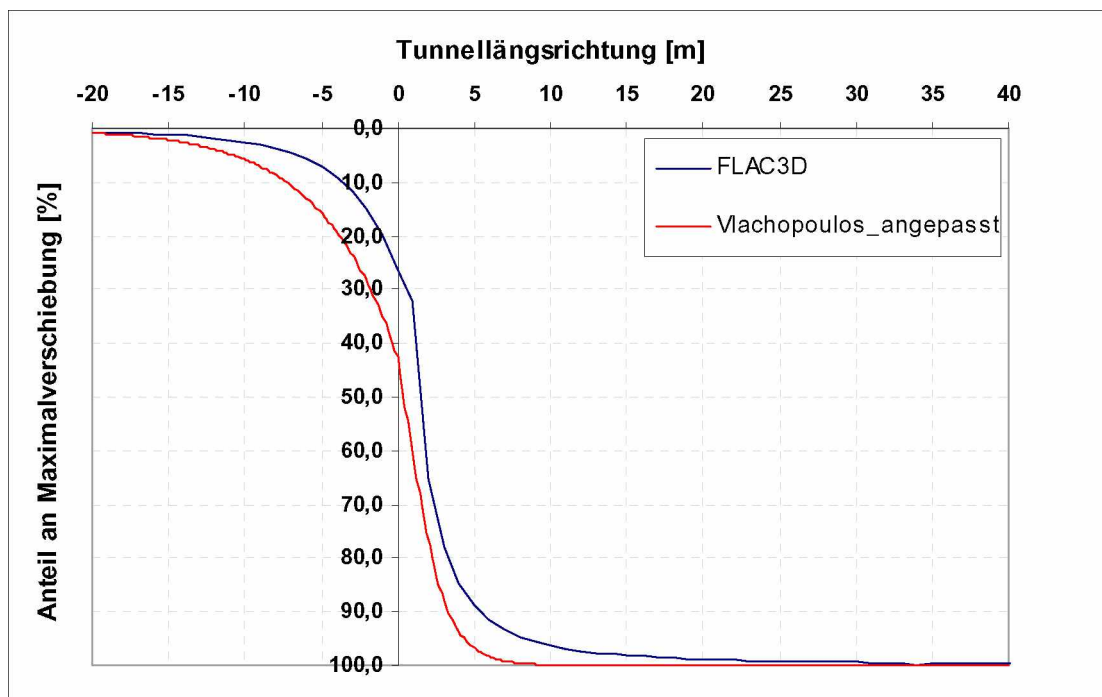
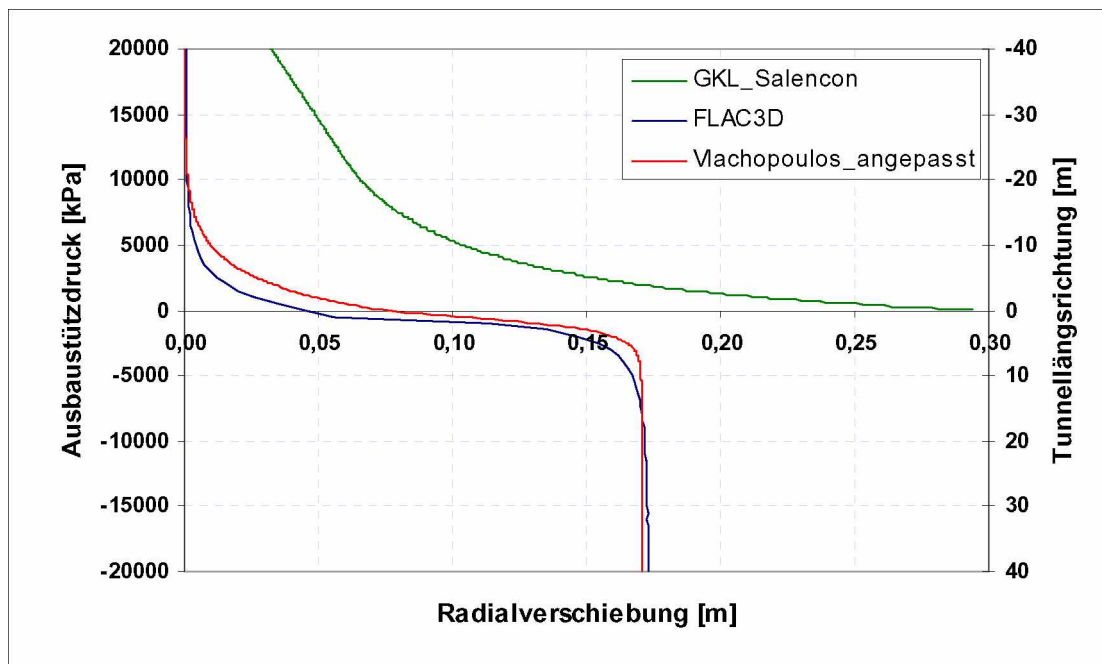
Beispiel 38



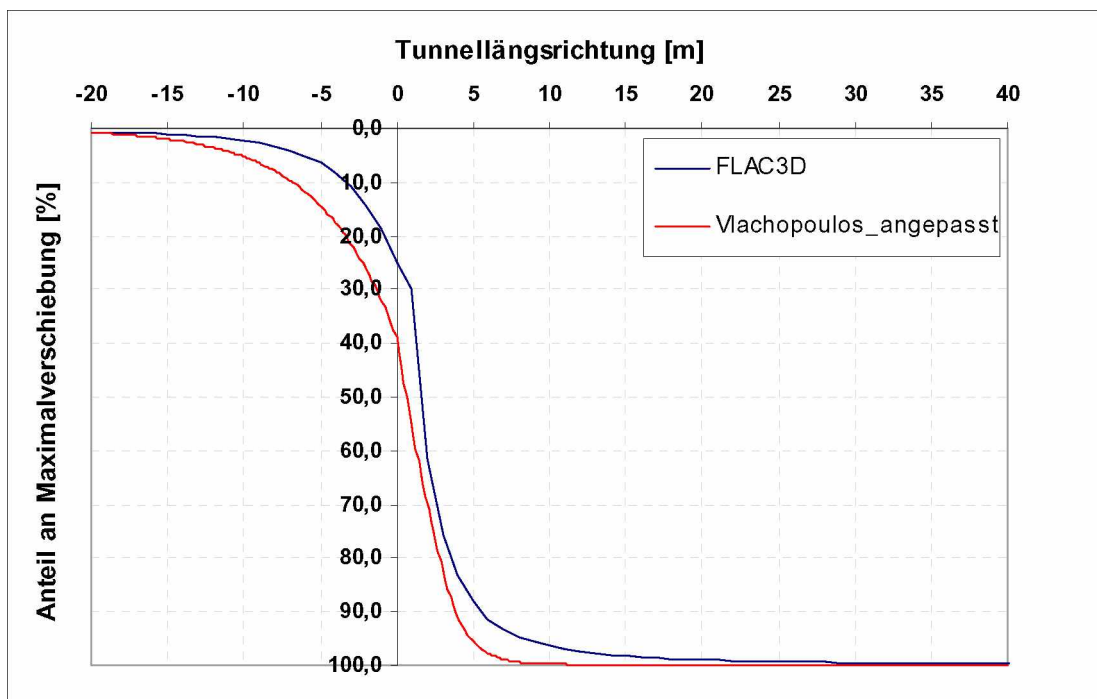
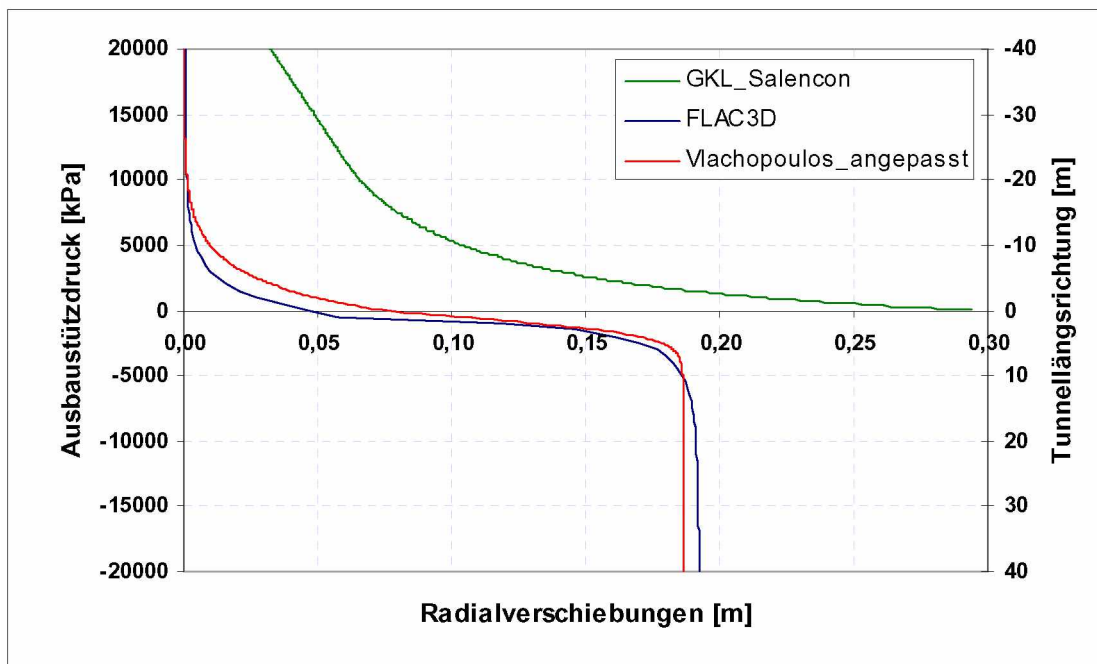
## Beispiel 39



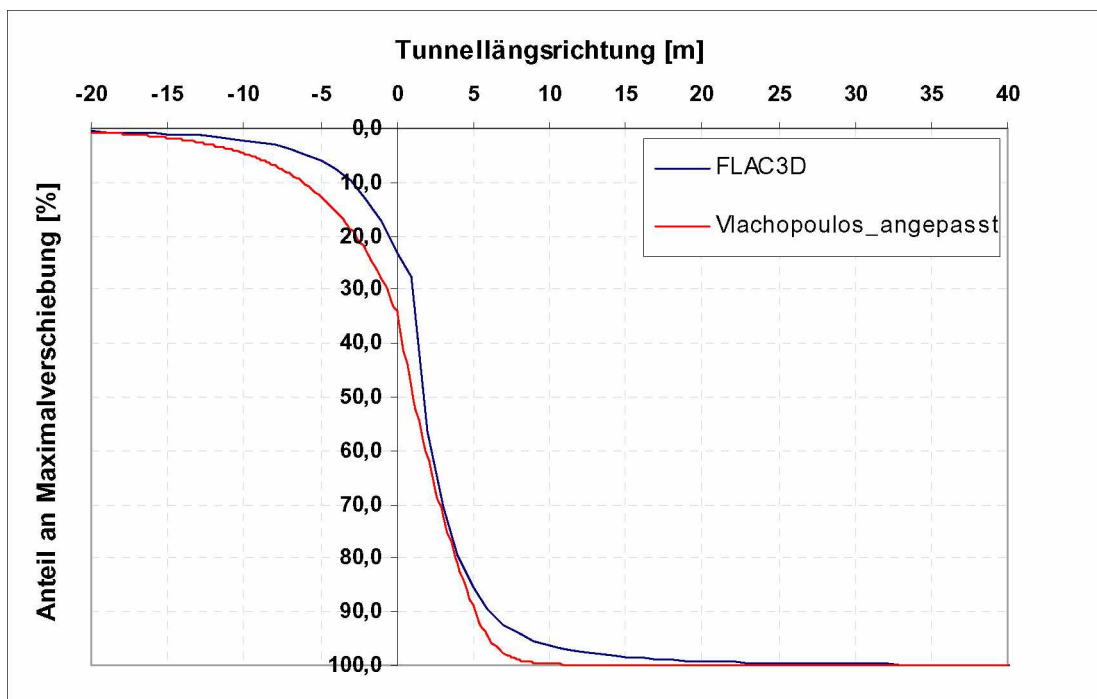
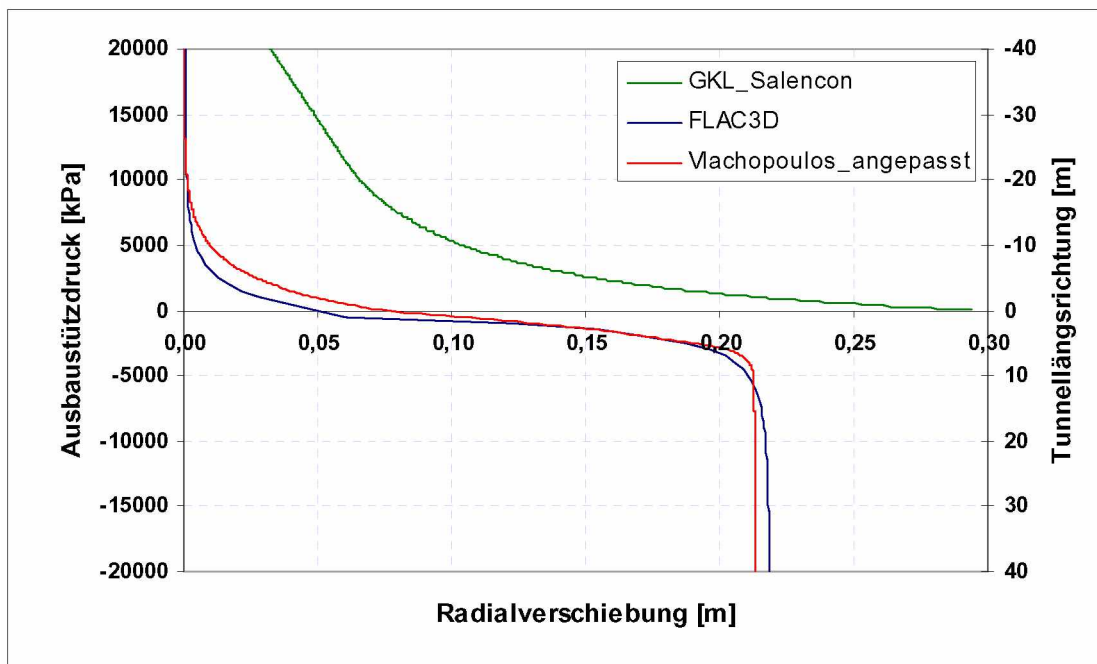
## Beispiel 40



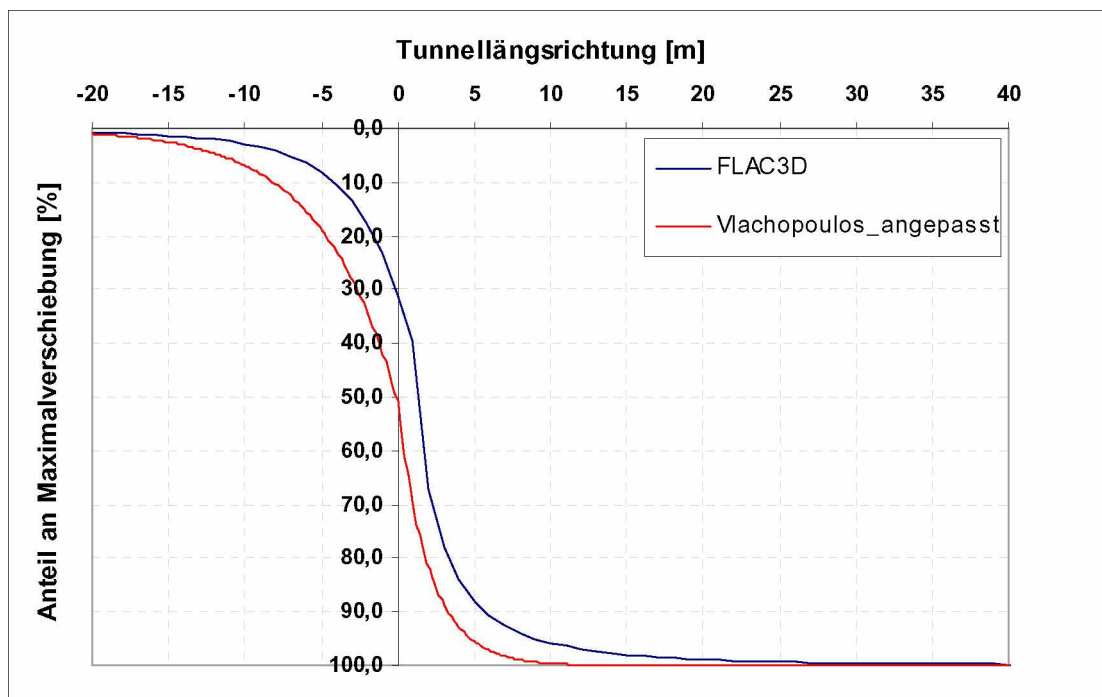
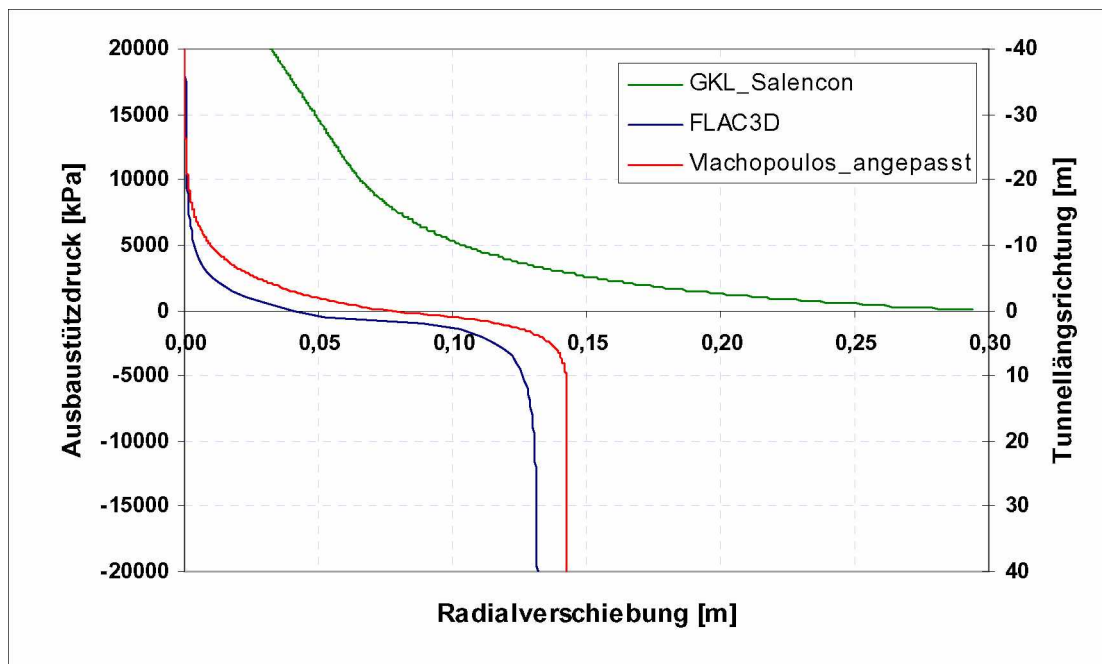
Beispiel 41



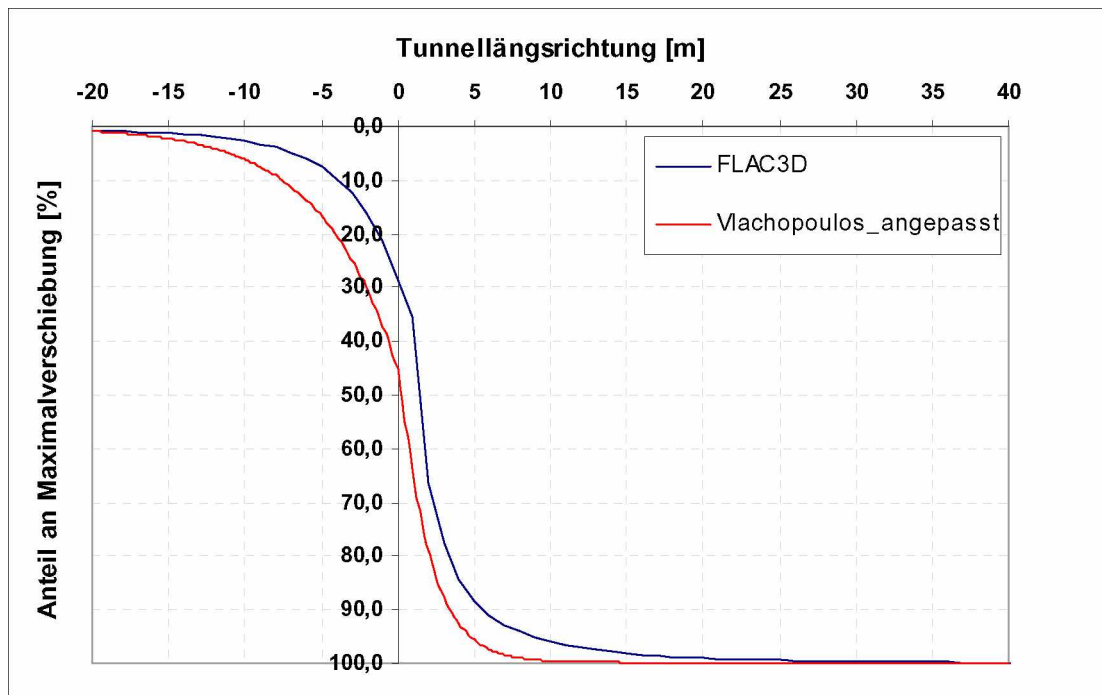
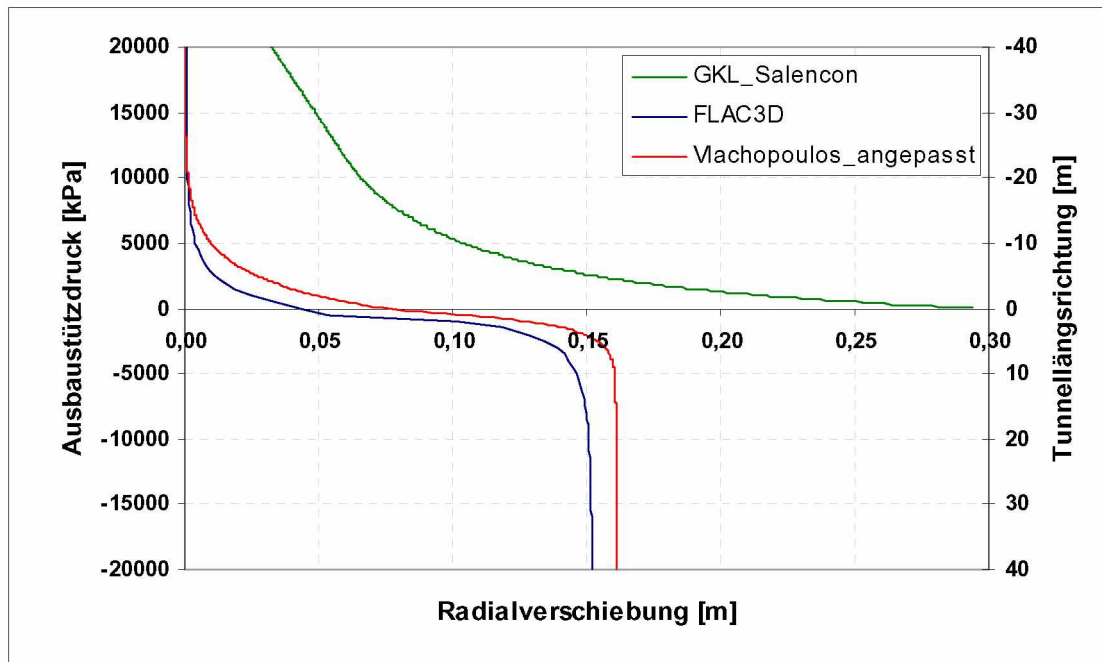
Beispiel 42



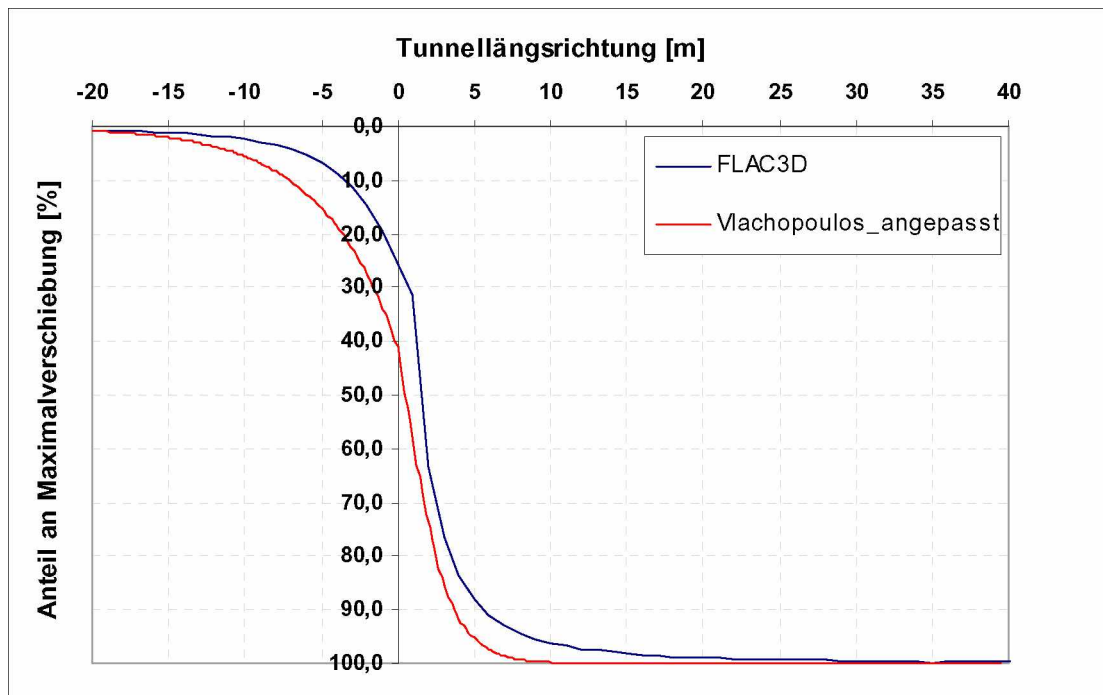
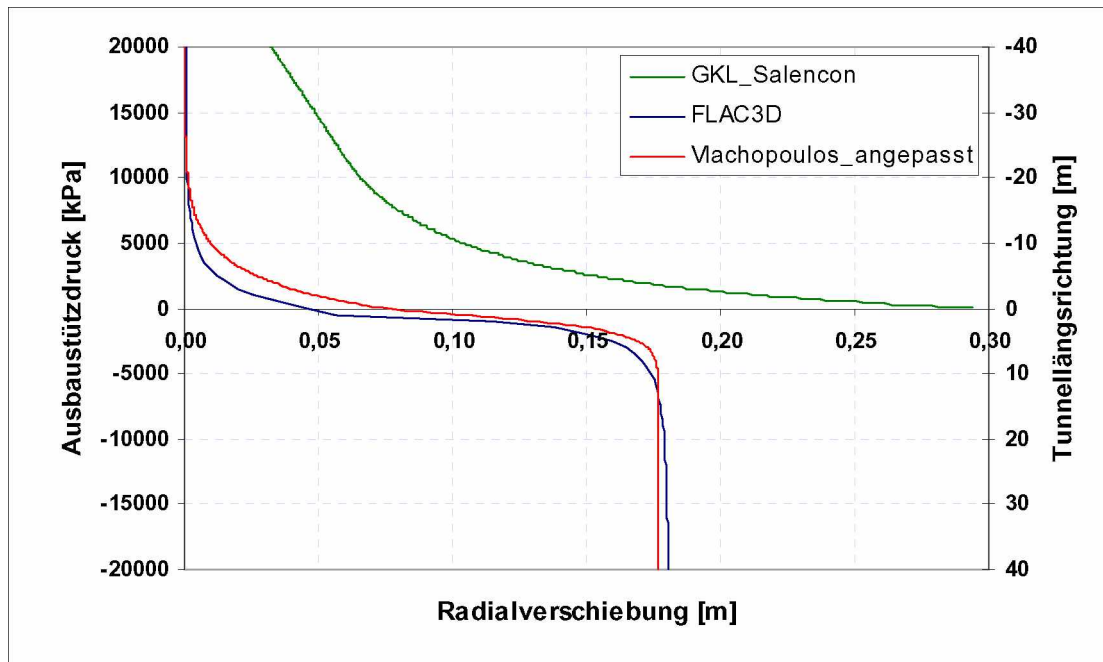
## Beispiel 43



## Beispiel 44

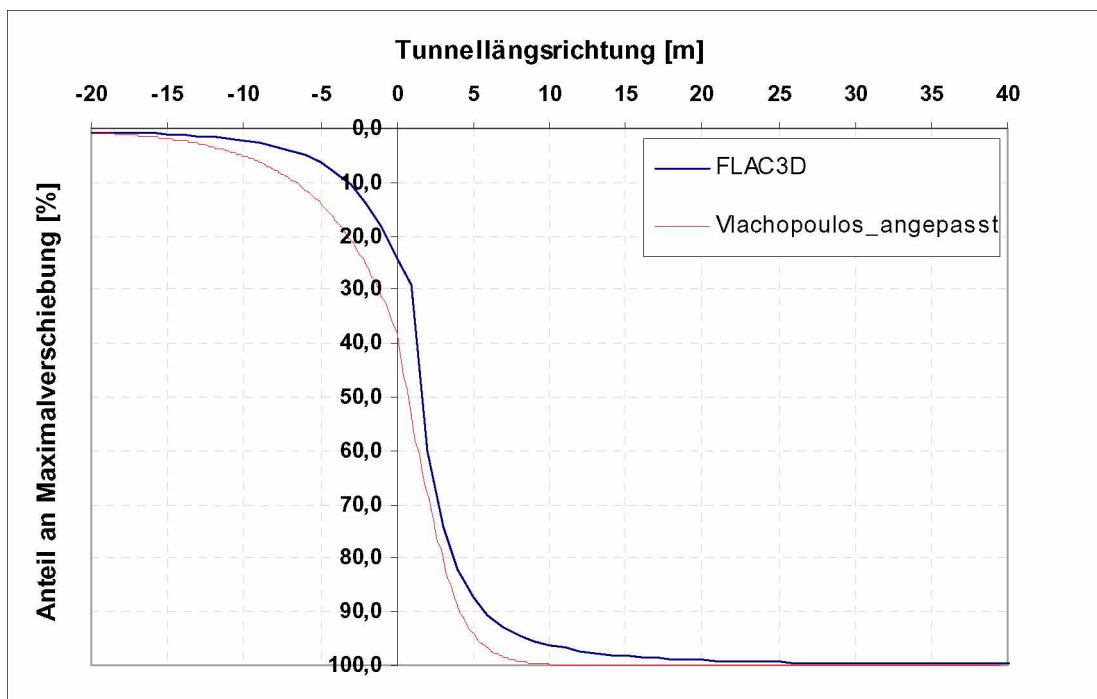
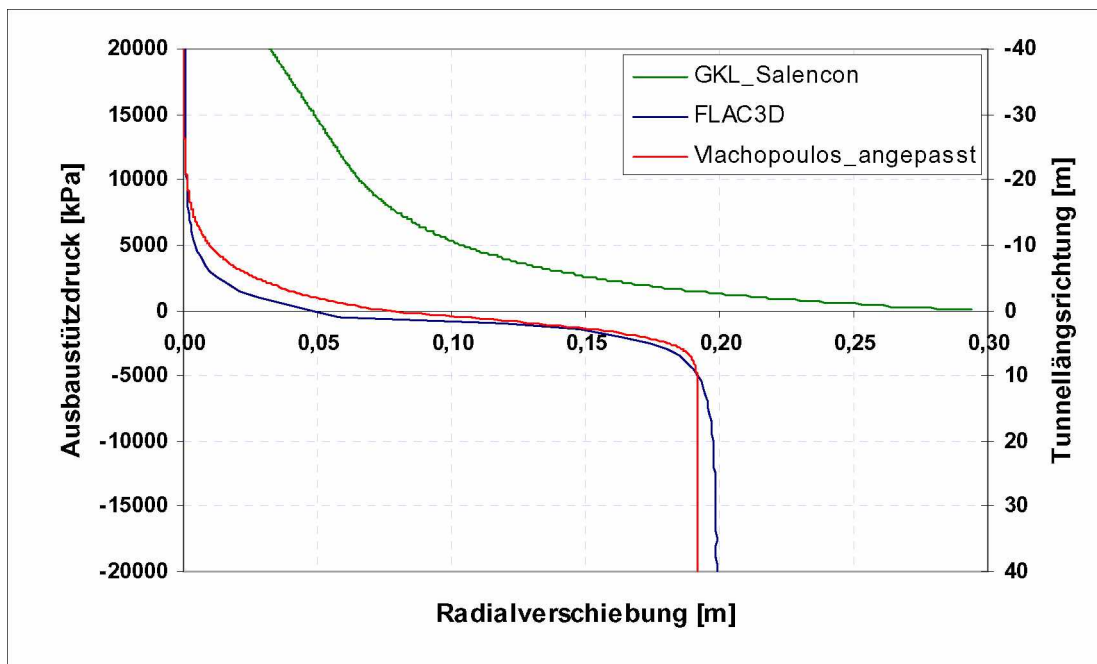


## Beispiel 45

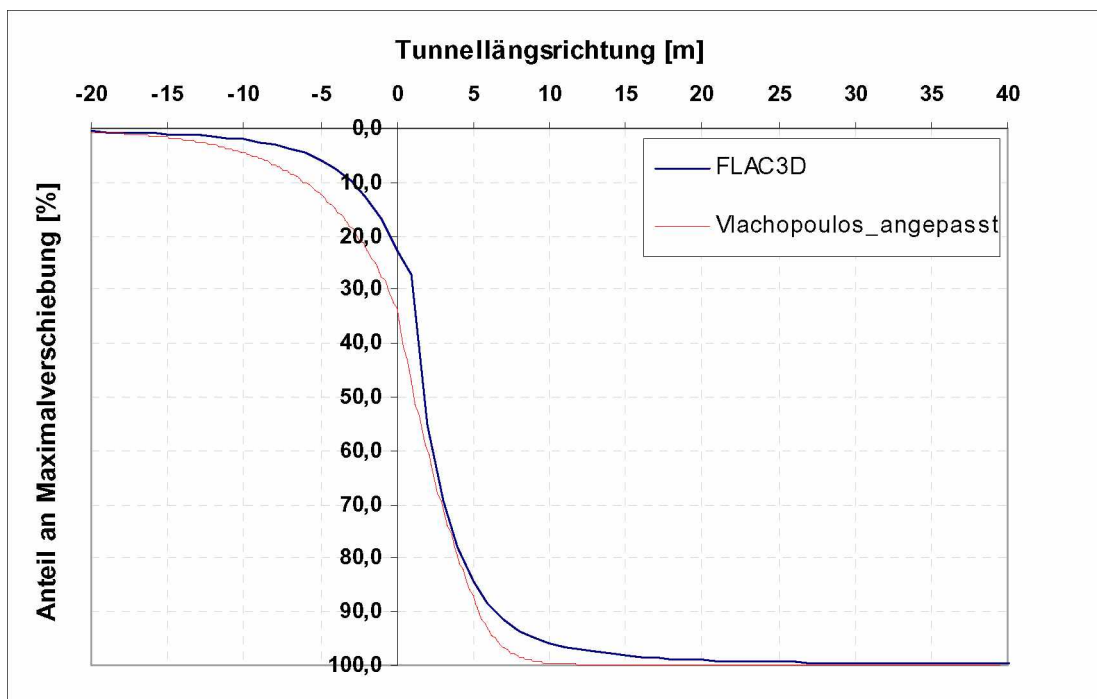
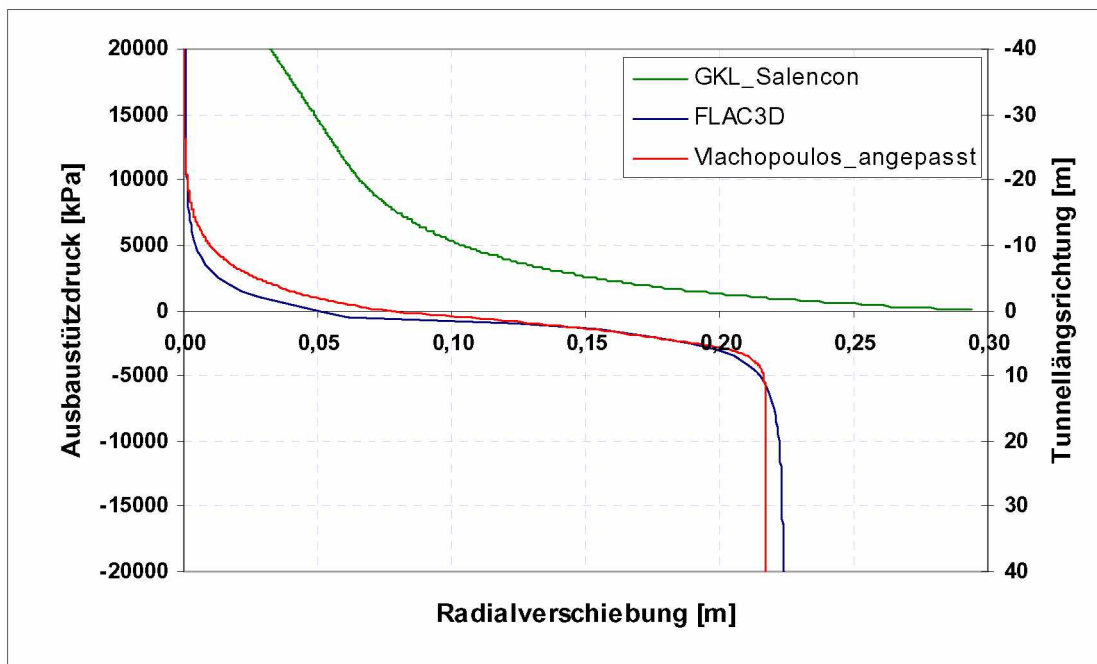




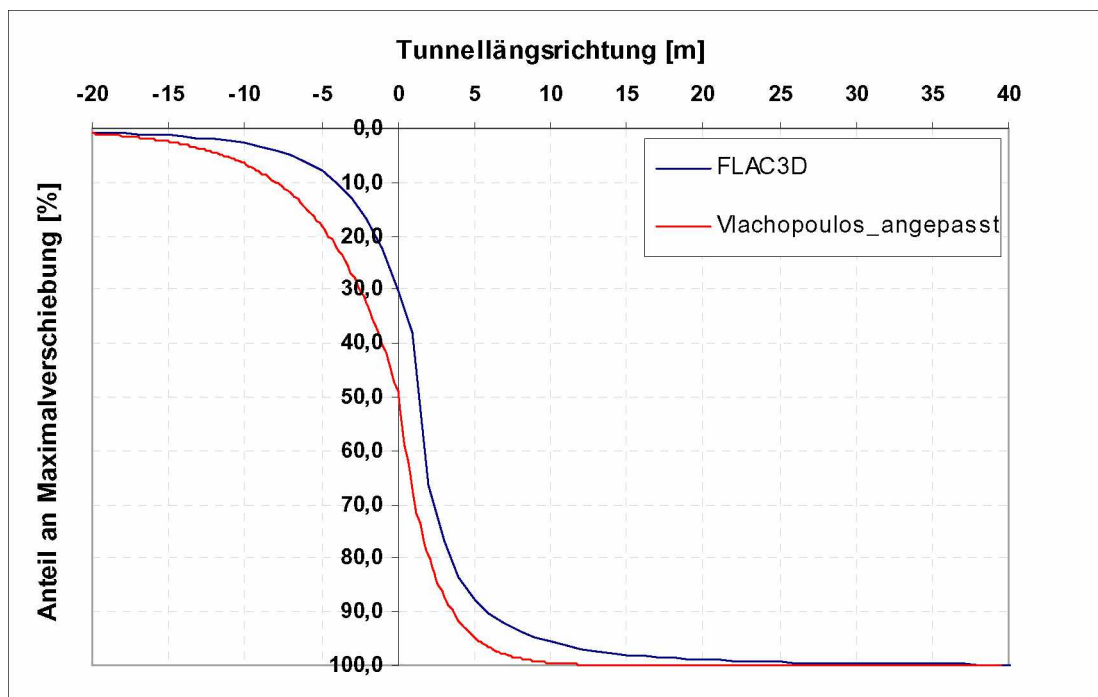
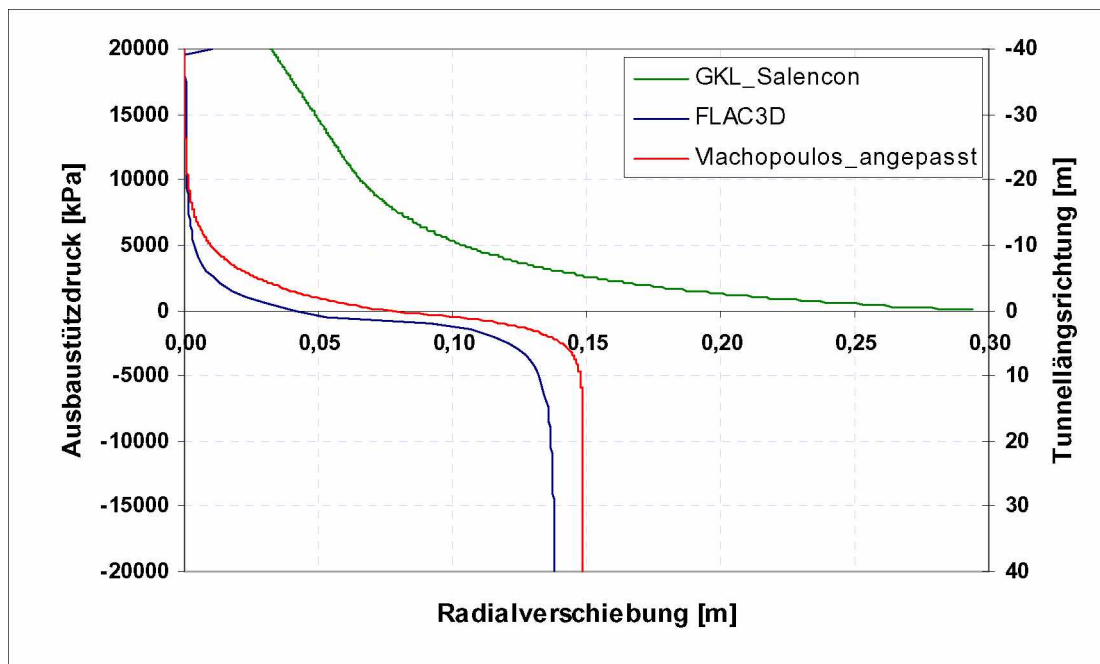
Beispiel 46



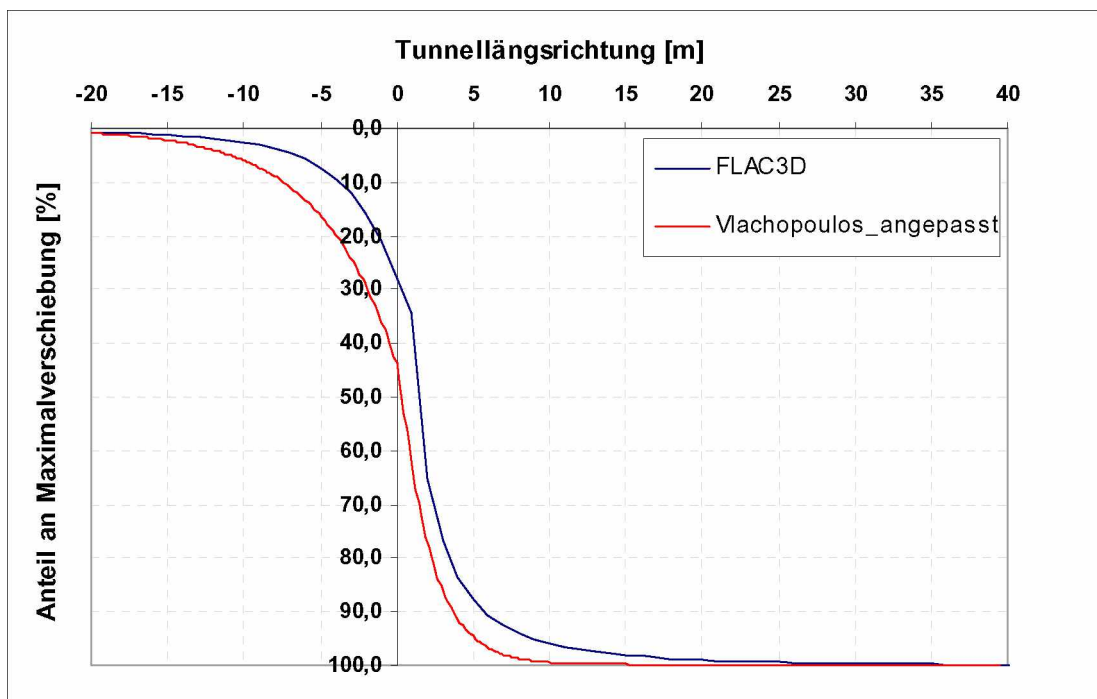
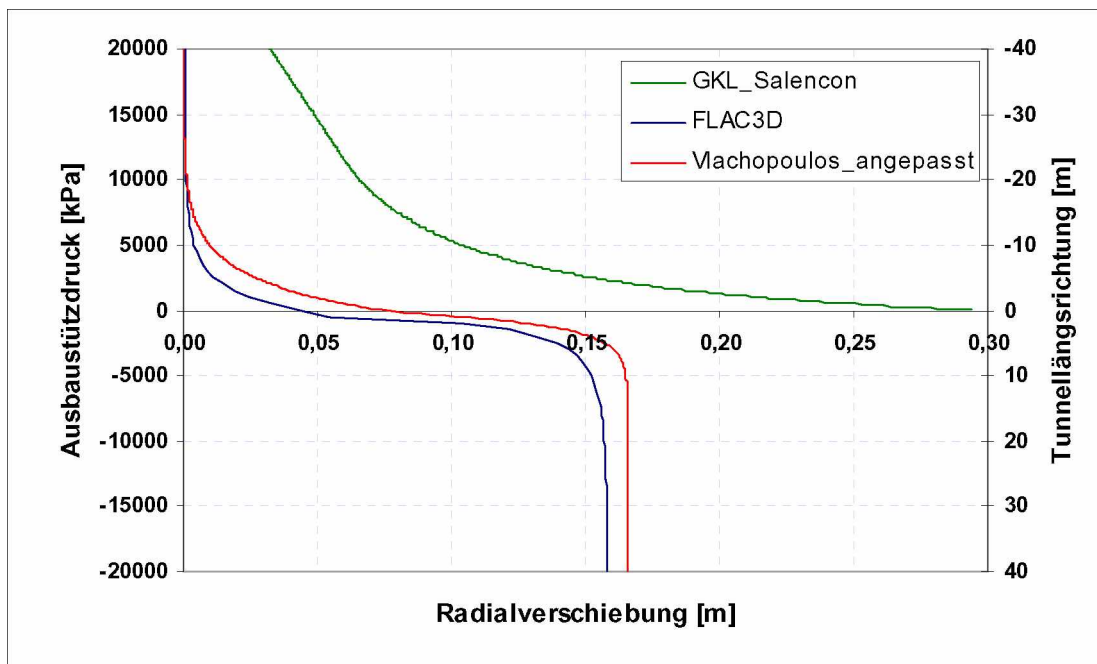
Beispiel 47



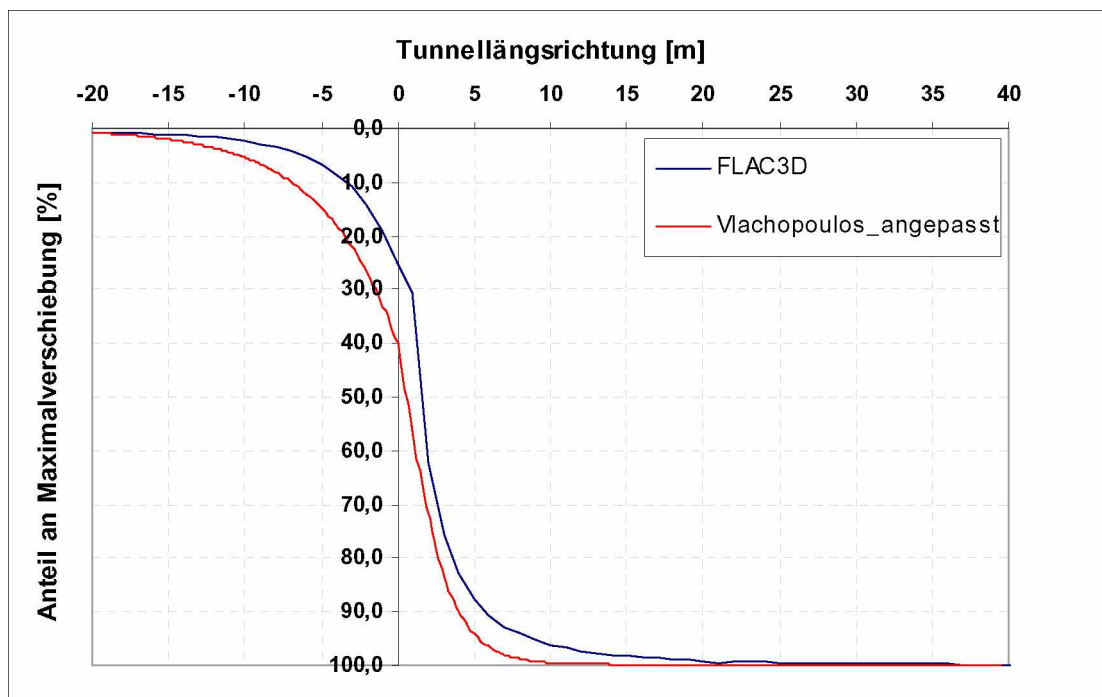
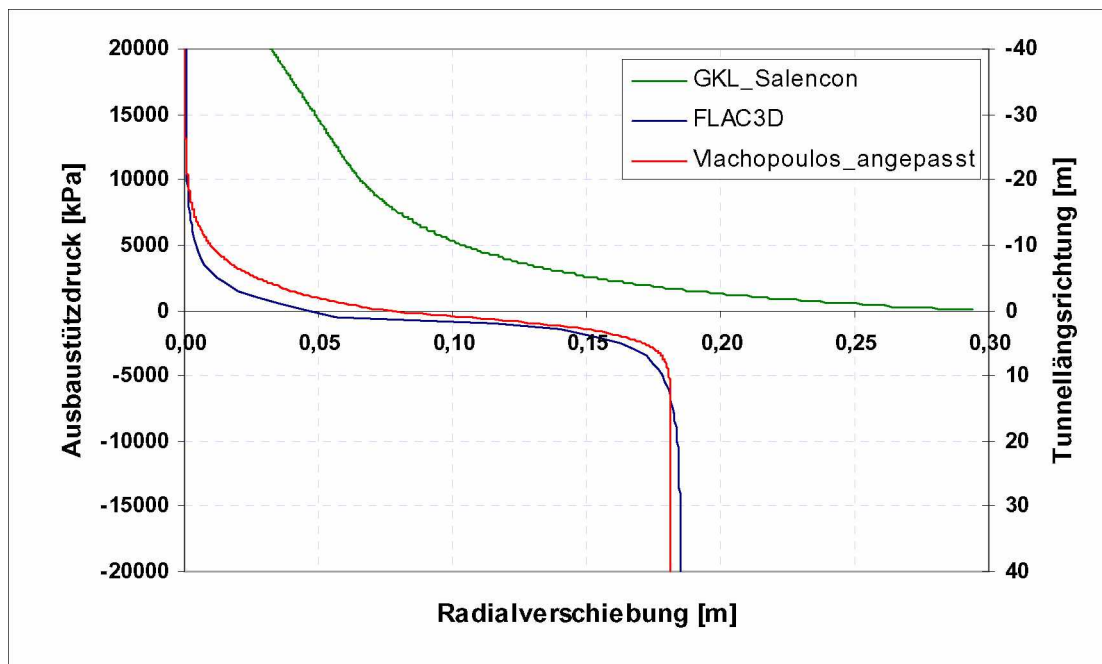
## Beispiel 48



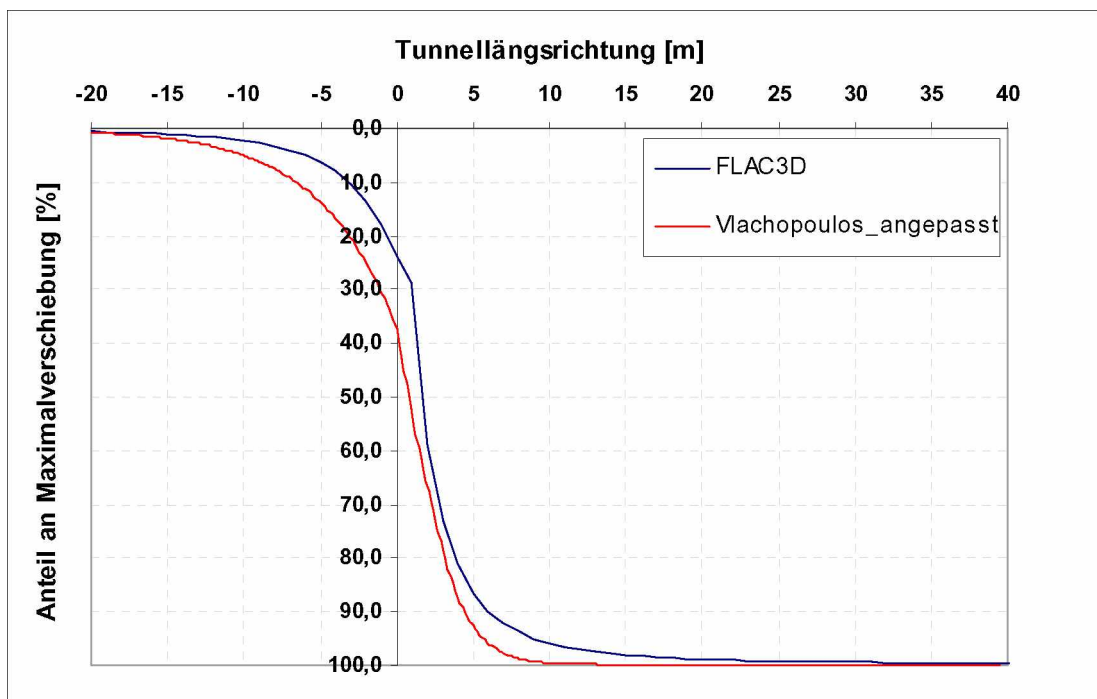
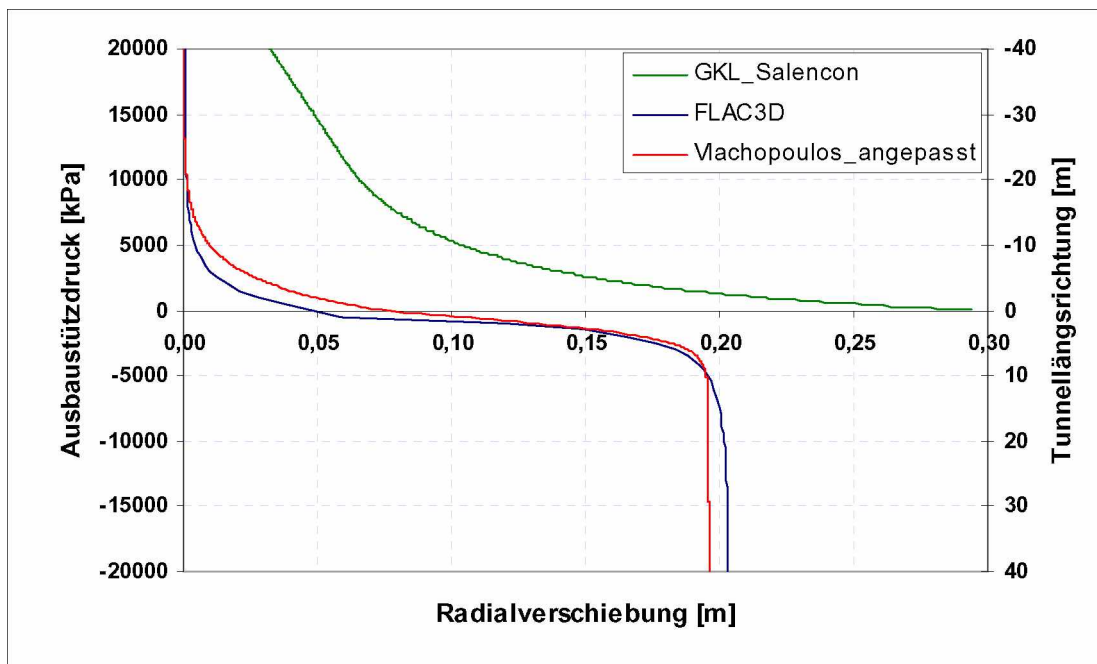
Beispiel 49



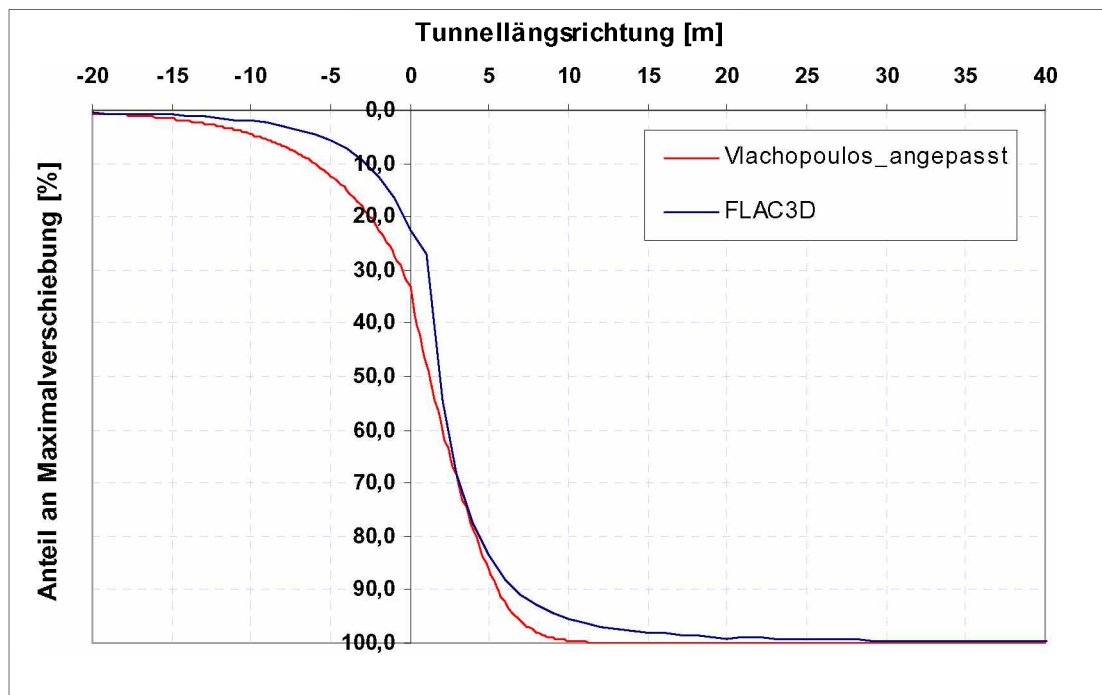
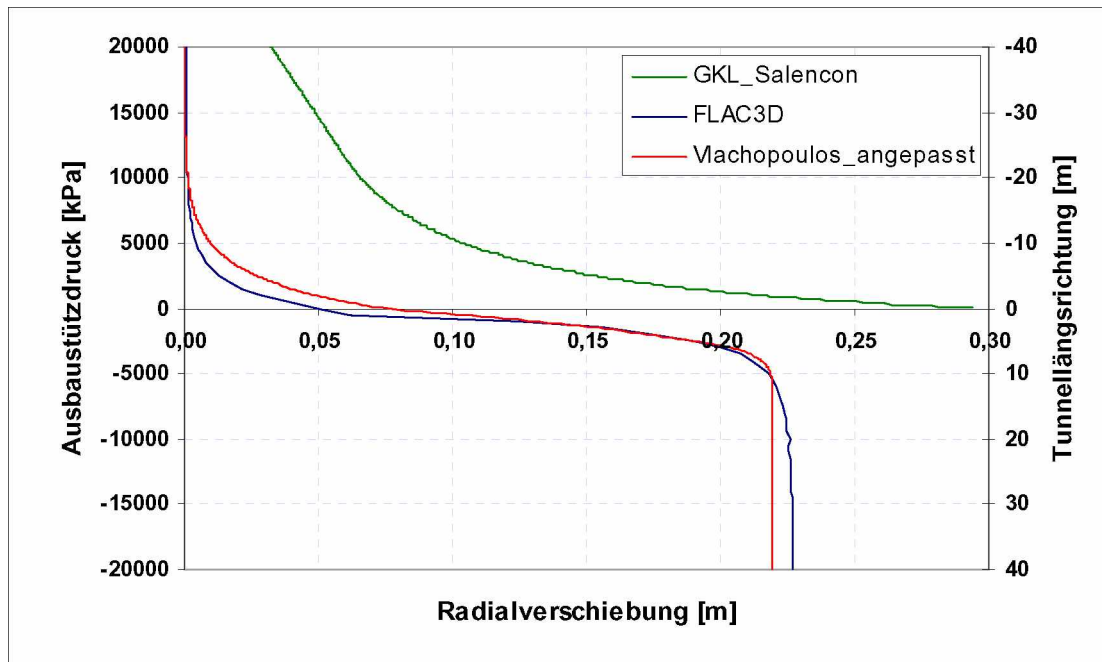
## Beispiel 50



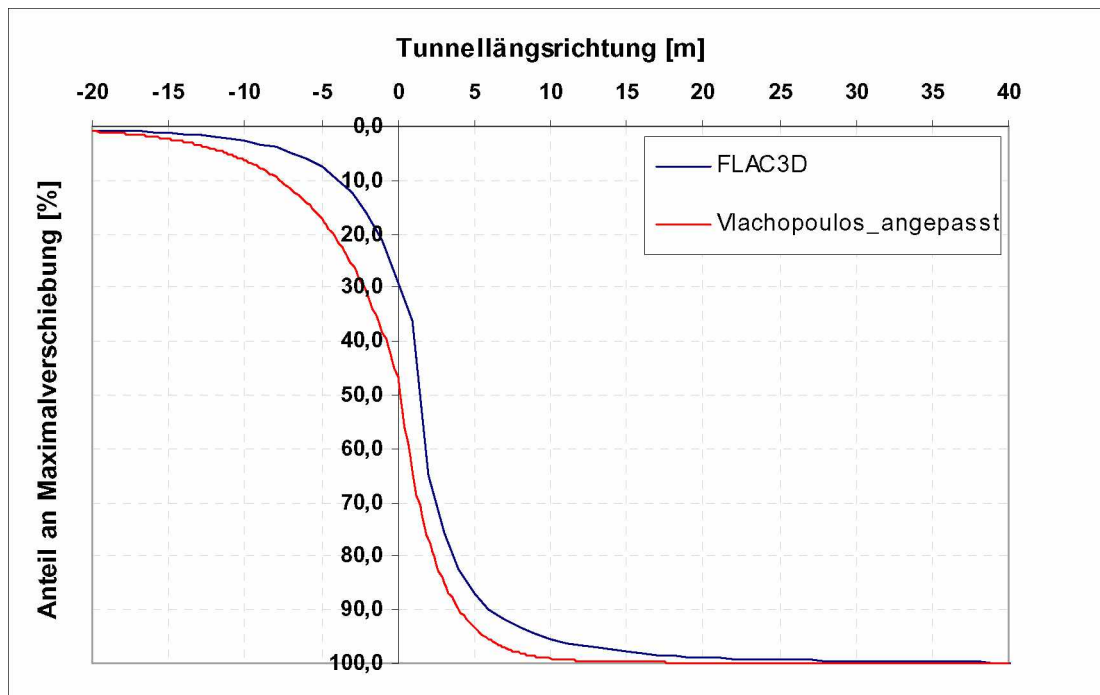
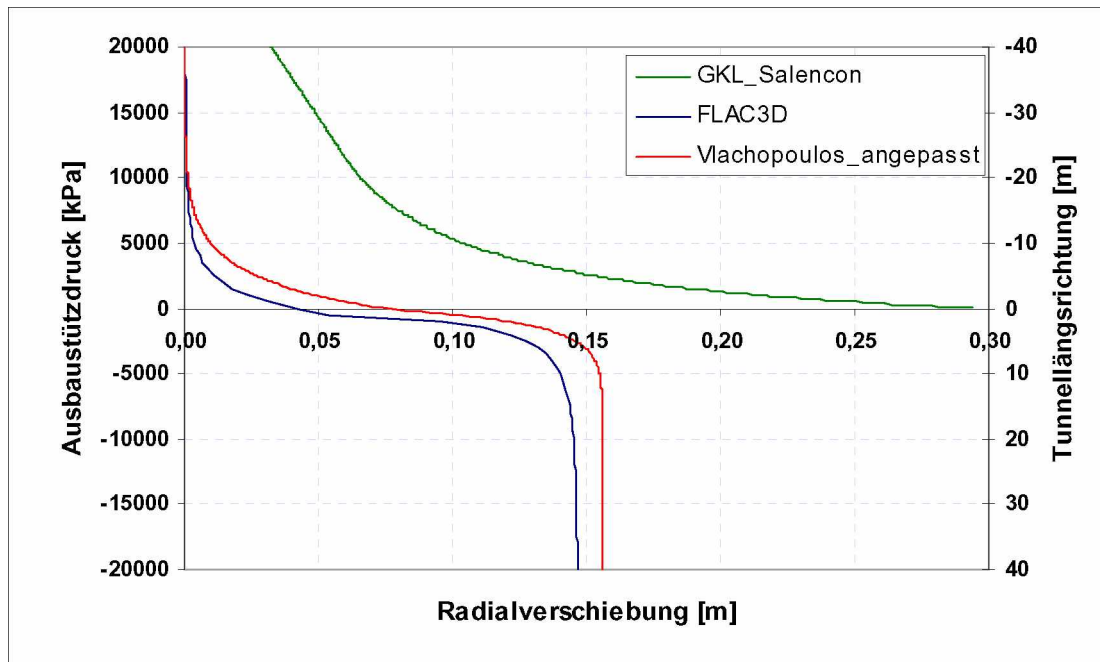
Beispiel 51



## Beispiel 52

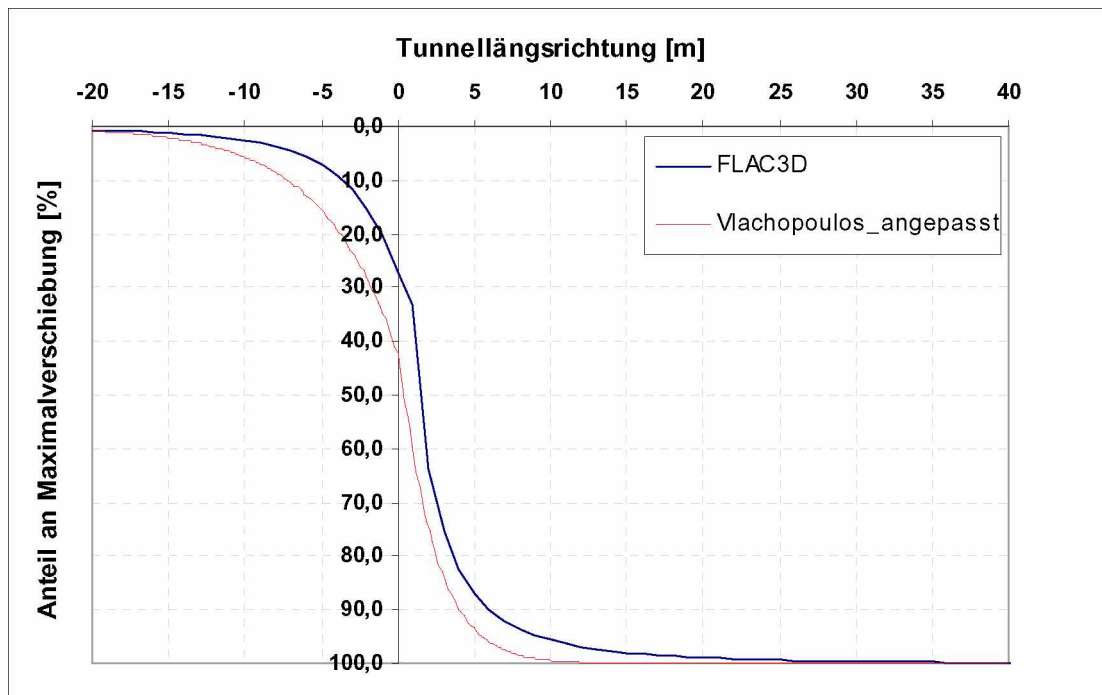
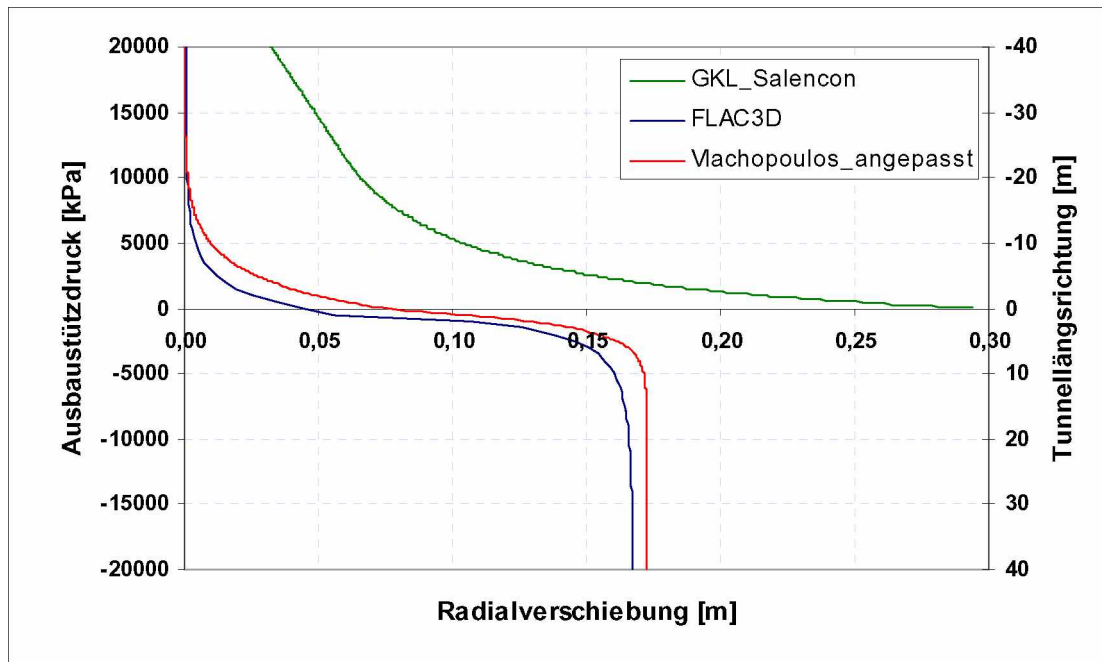


## Beispiel 53

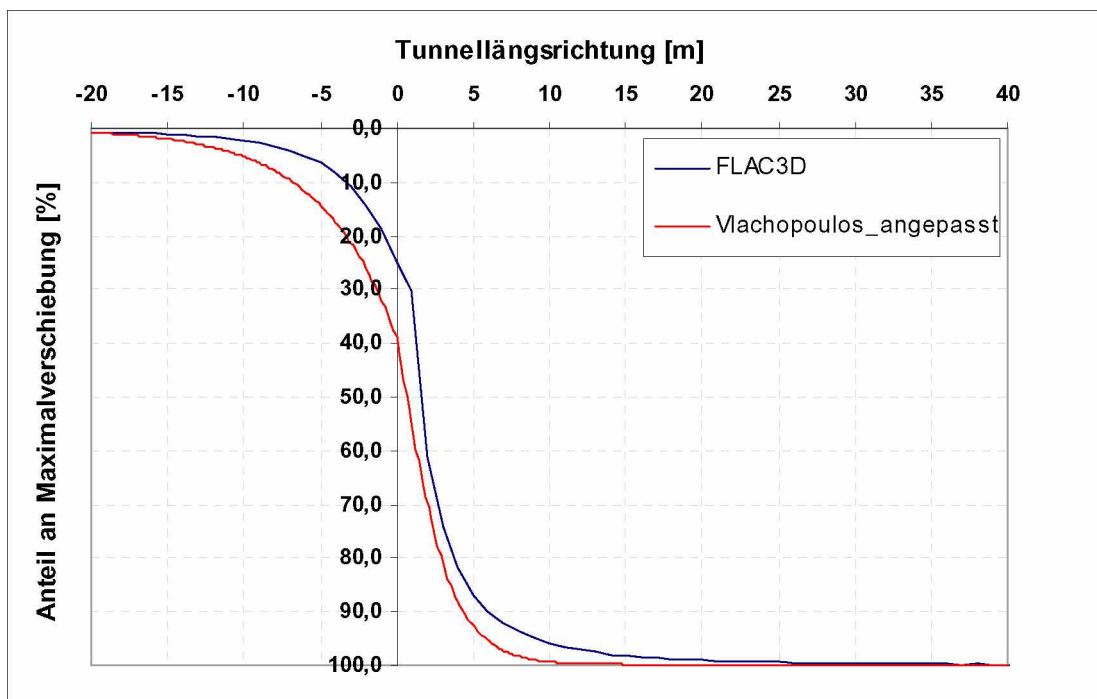
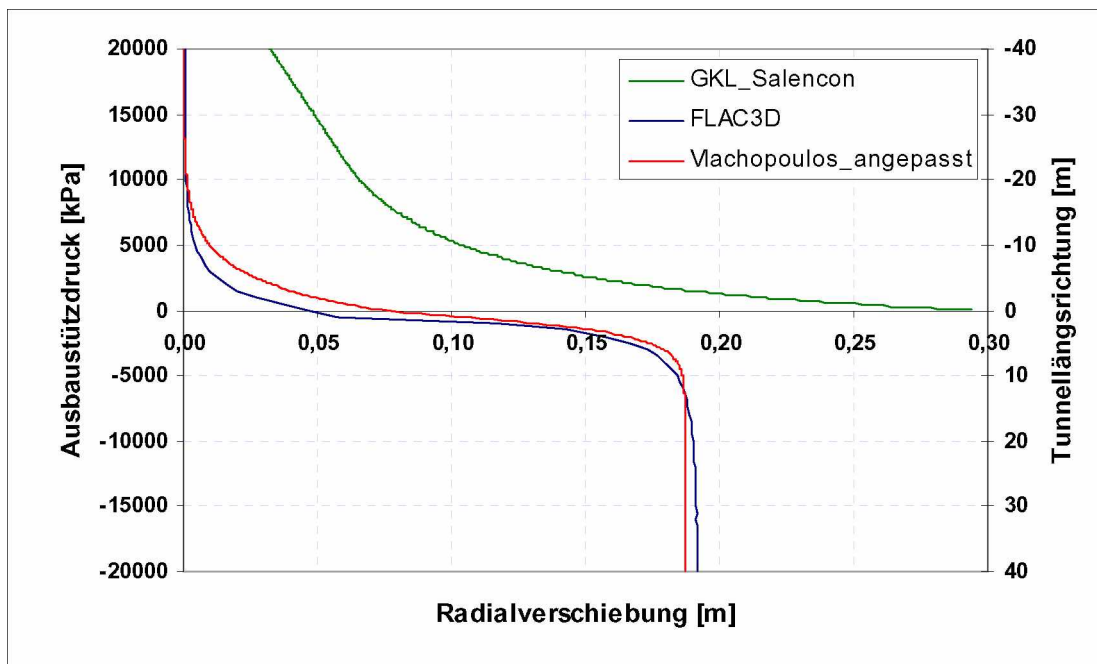




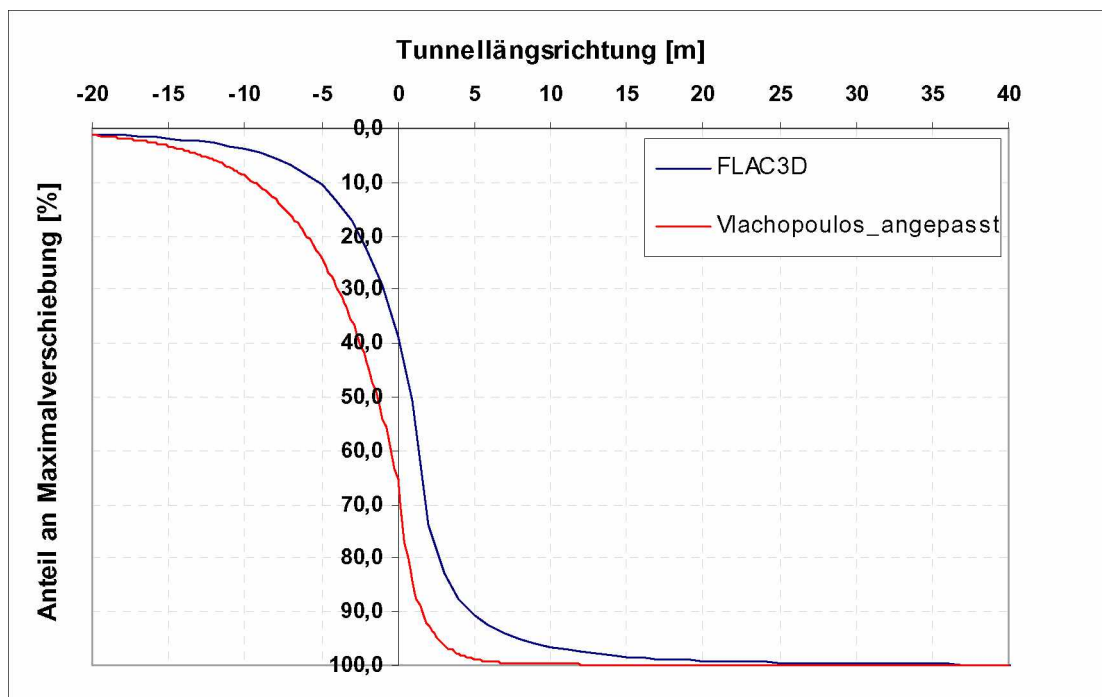
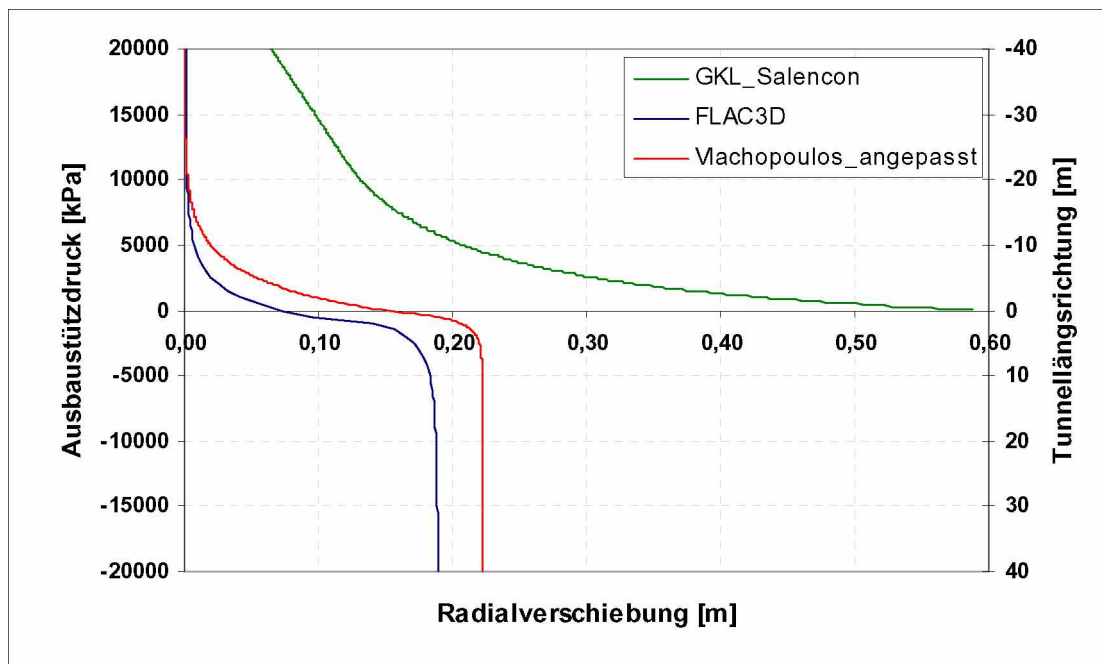
## Beispiel 54



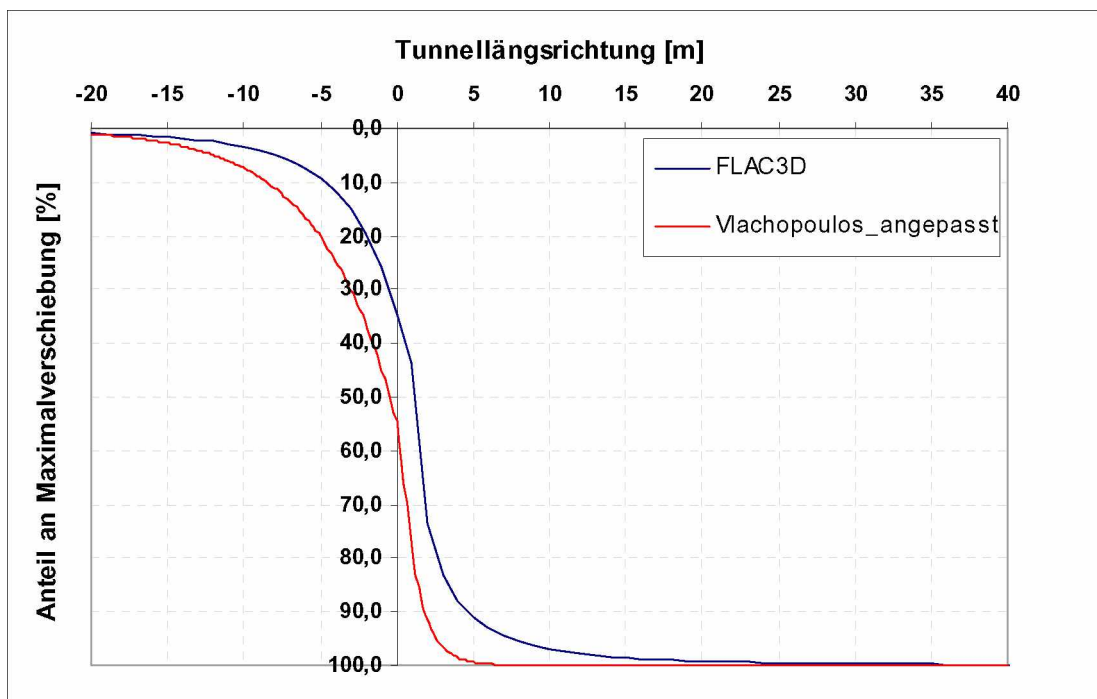
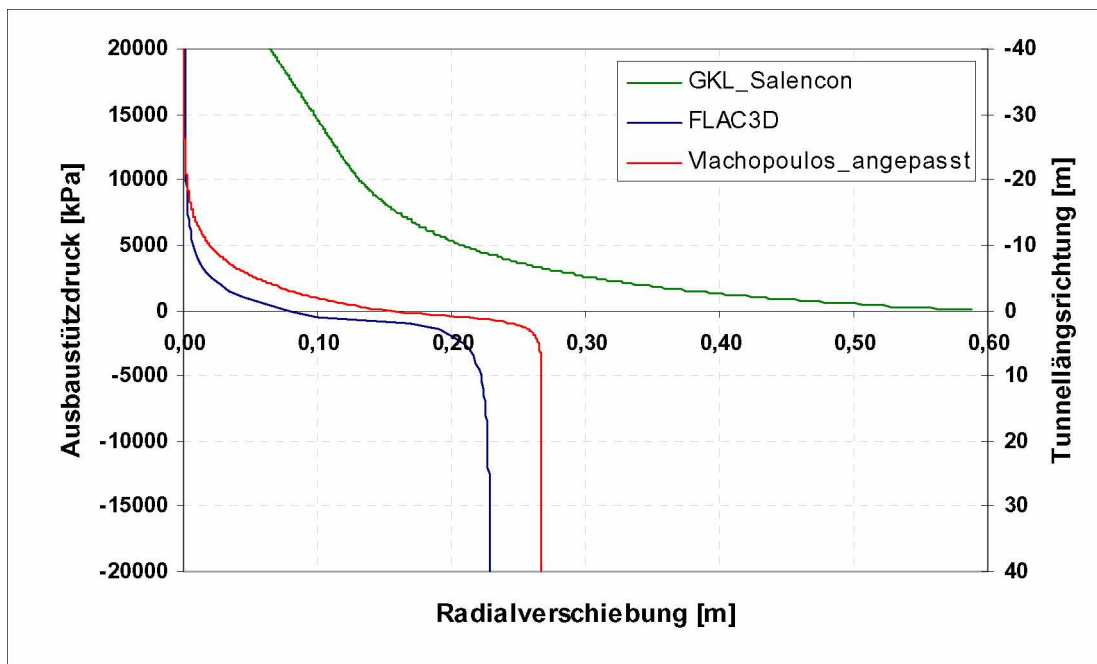
## Beispiel 55



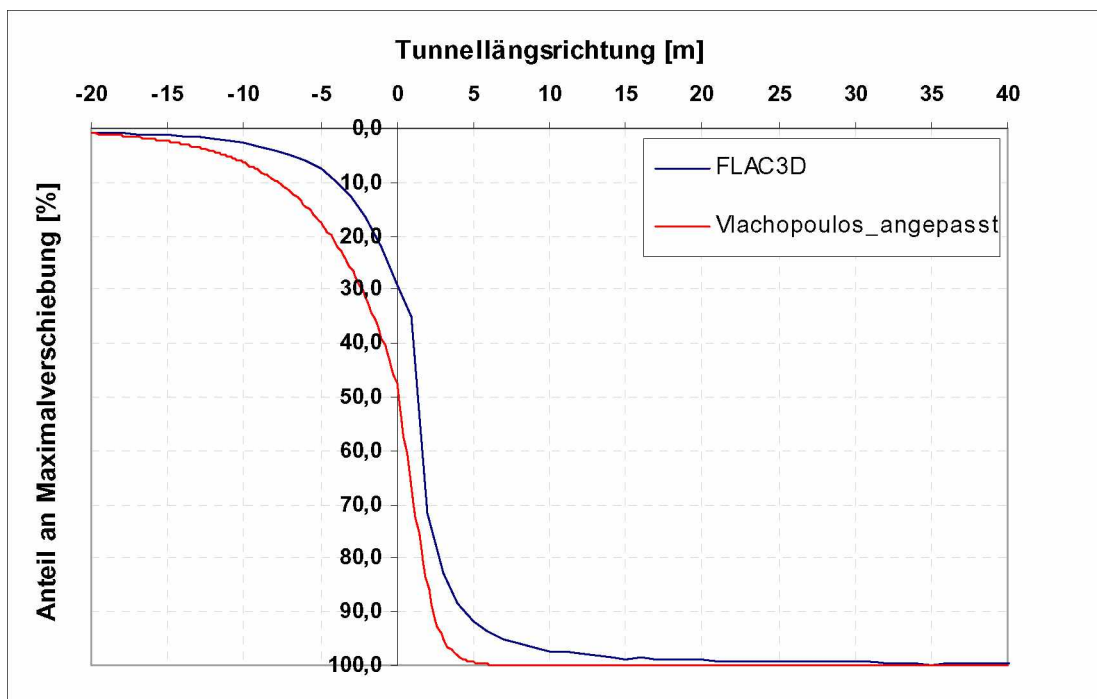
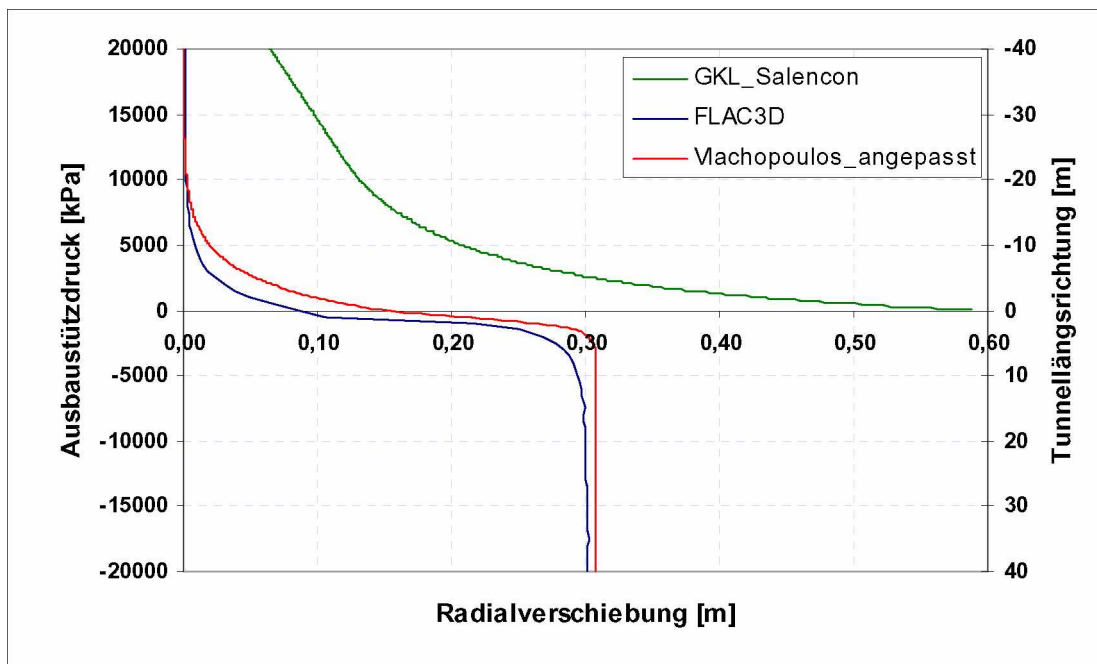
## Beispiel 56



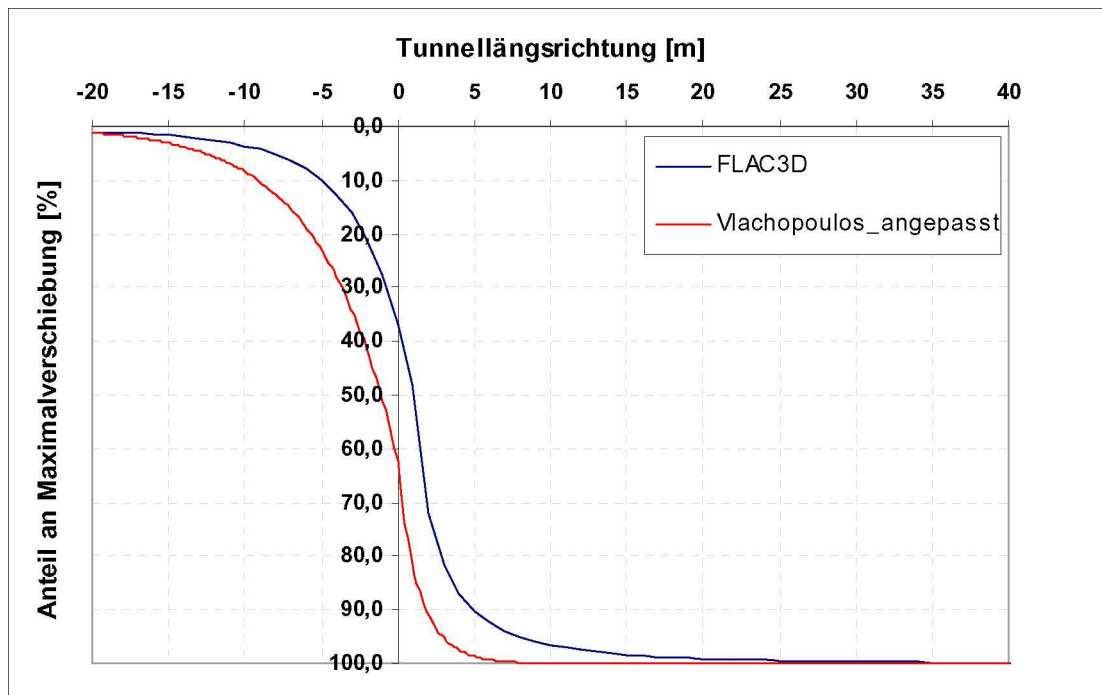
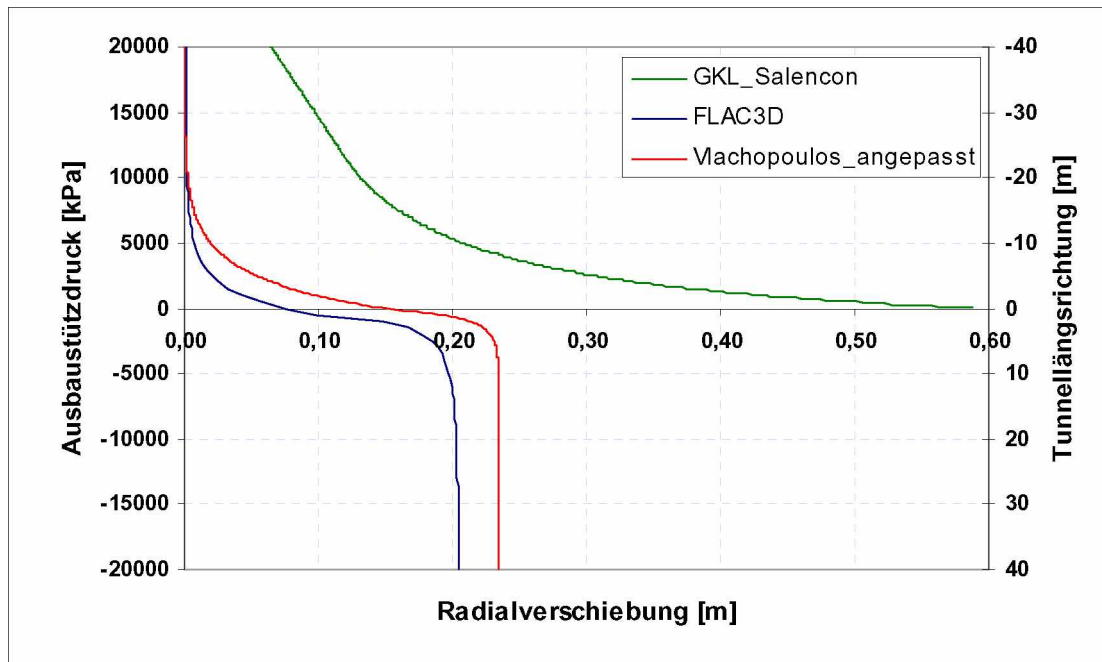
Beispiel 57



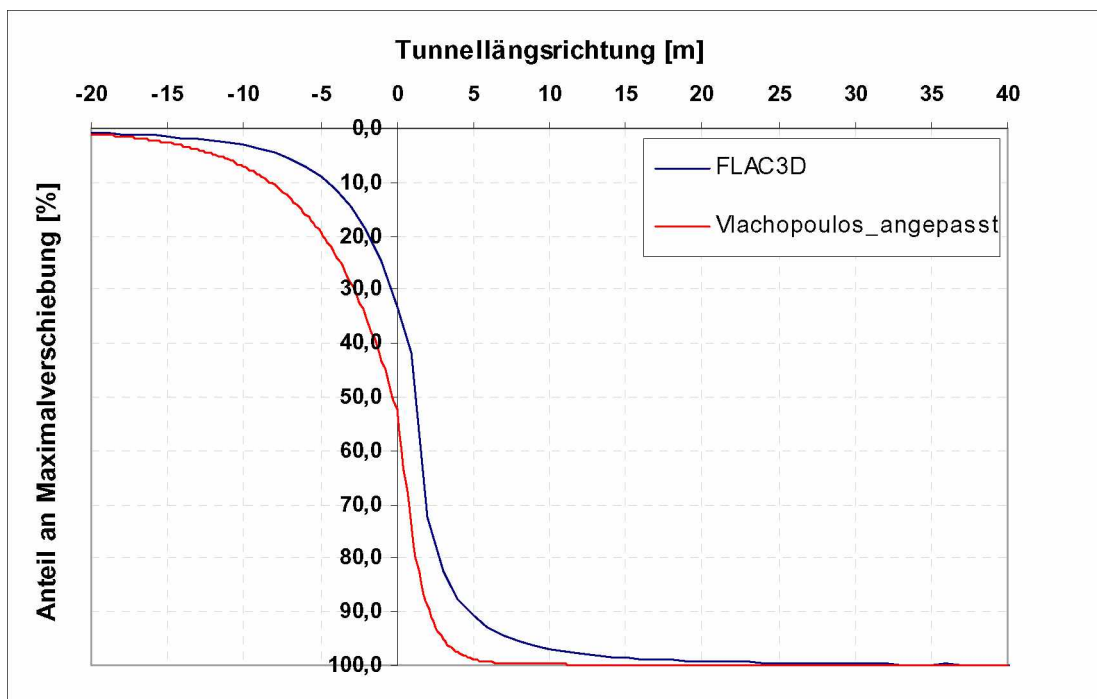
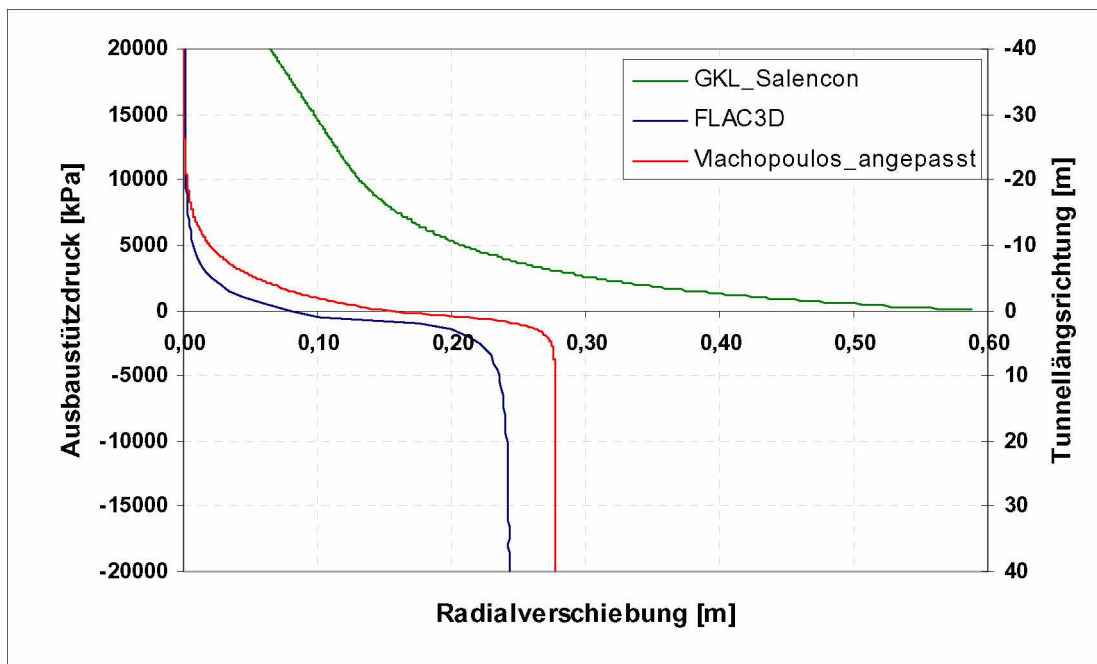
Beispiel 58



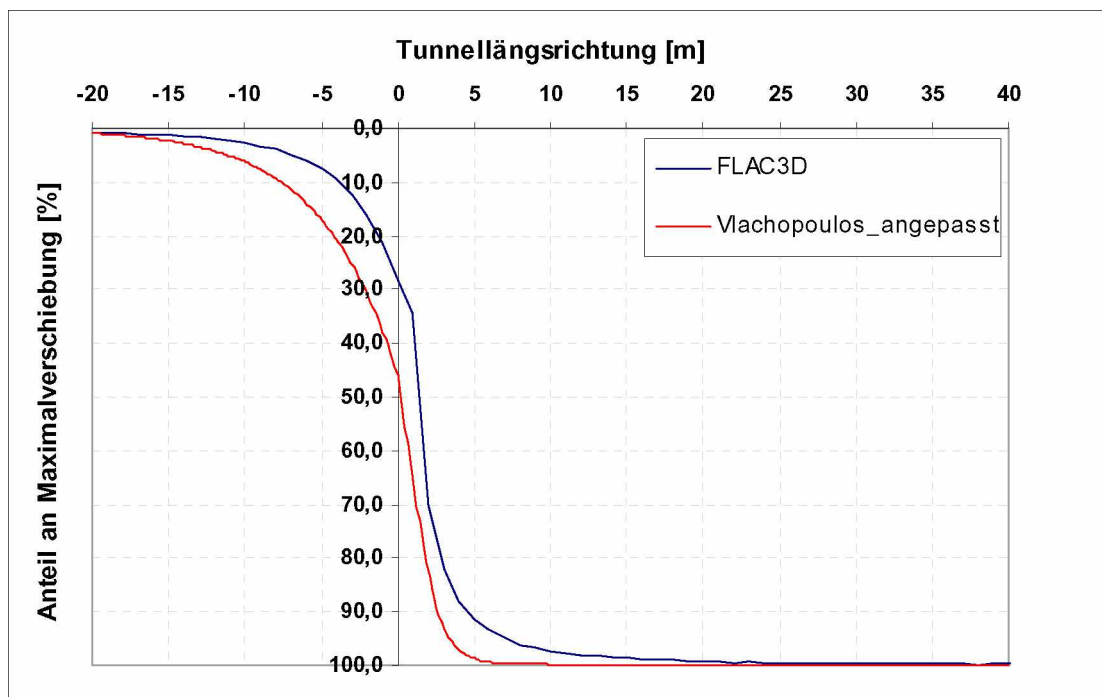
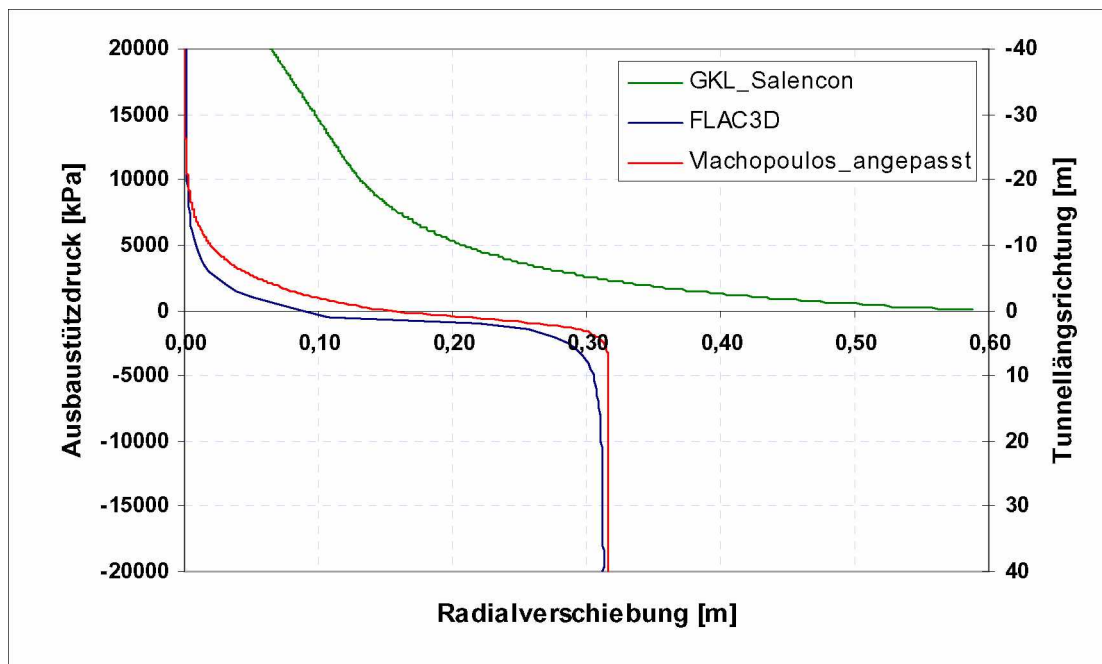
## Beispiel 59



Beispiel 60

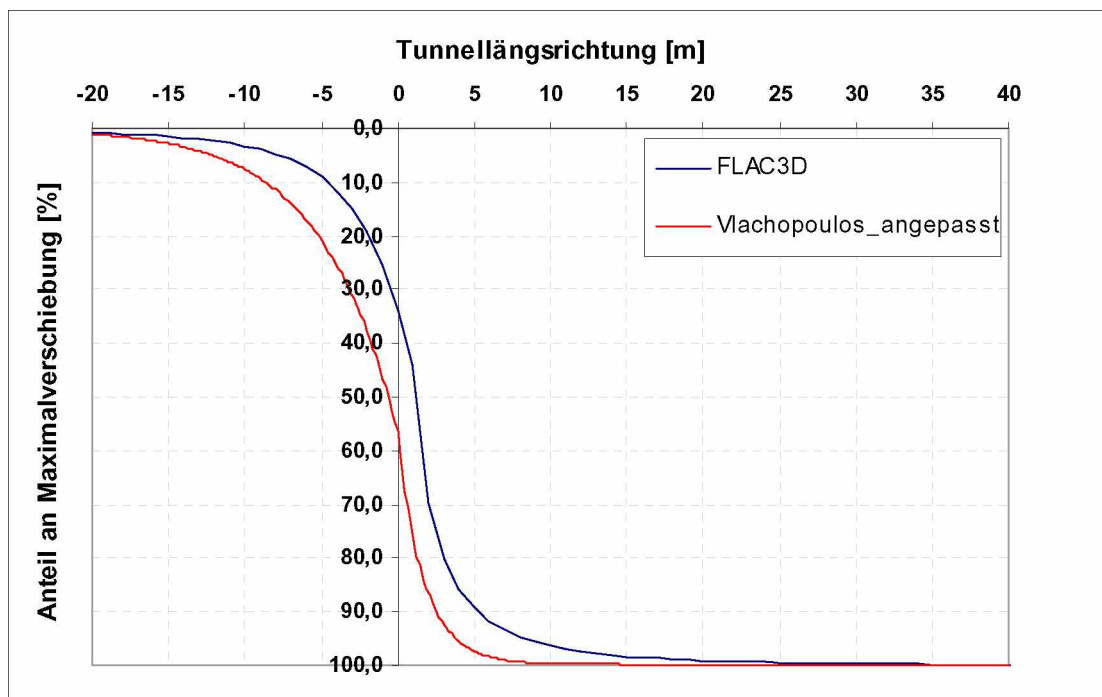
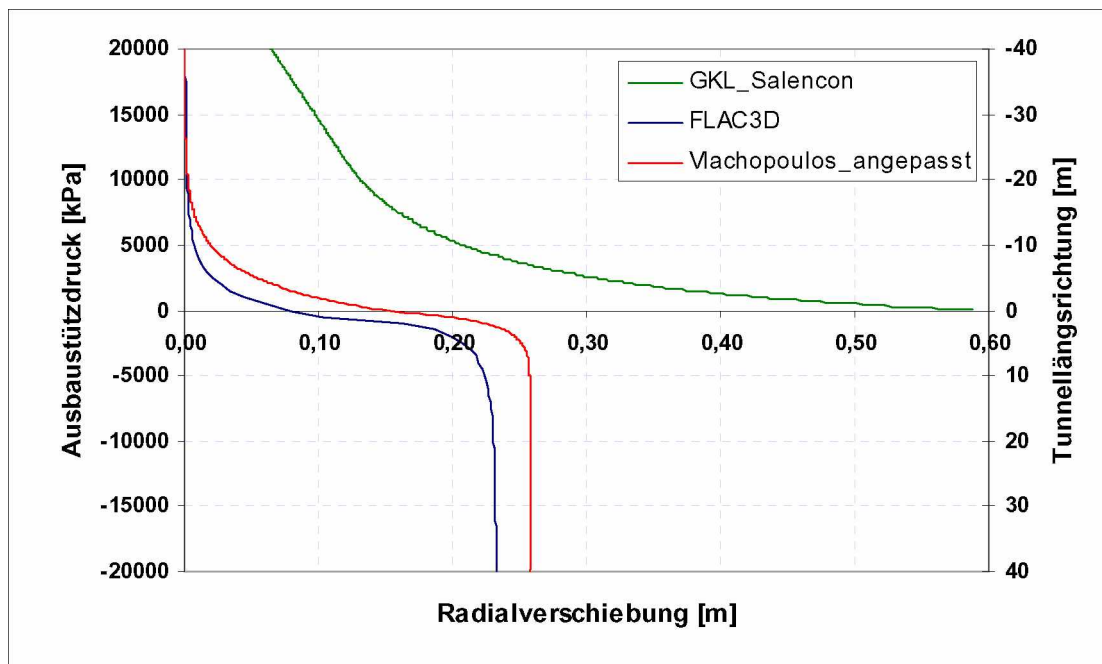


## Beispiel 61

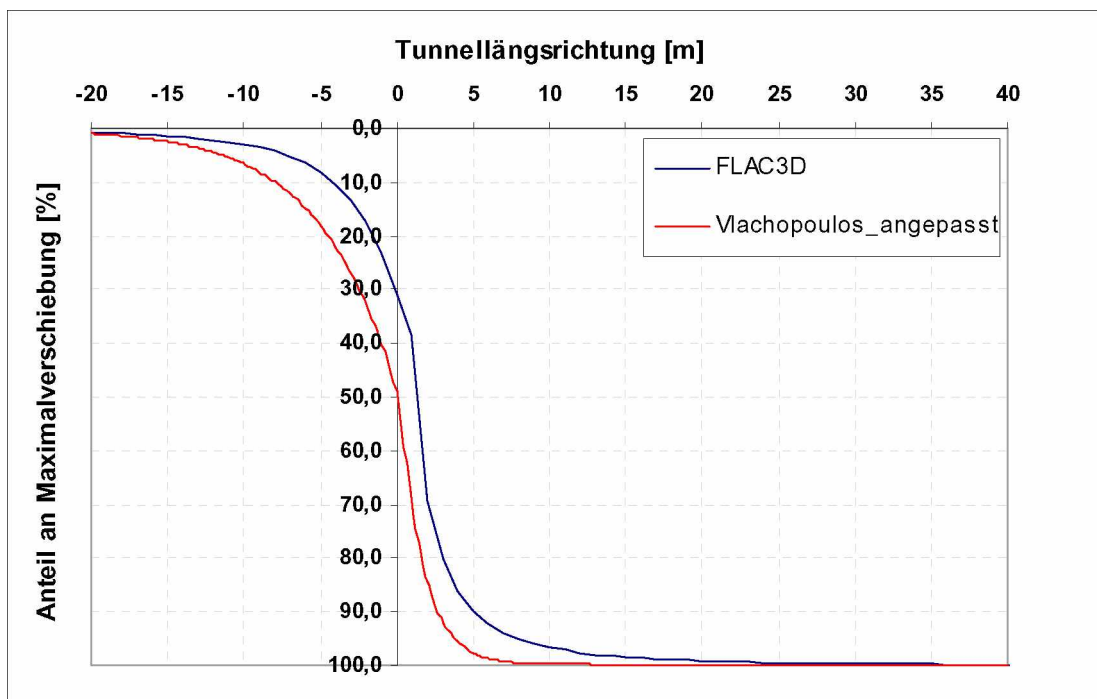
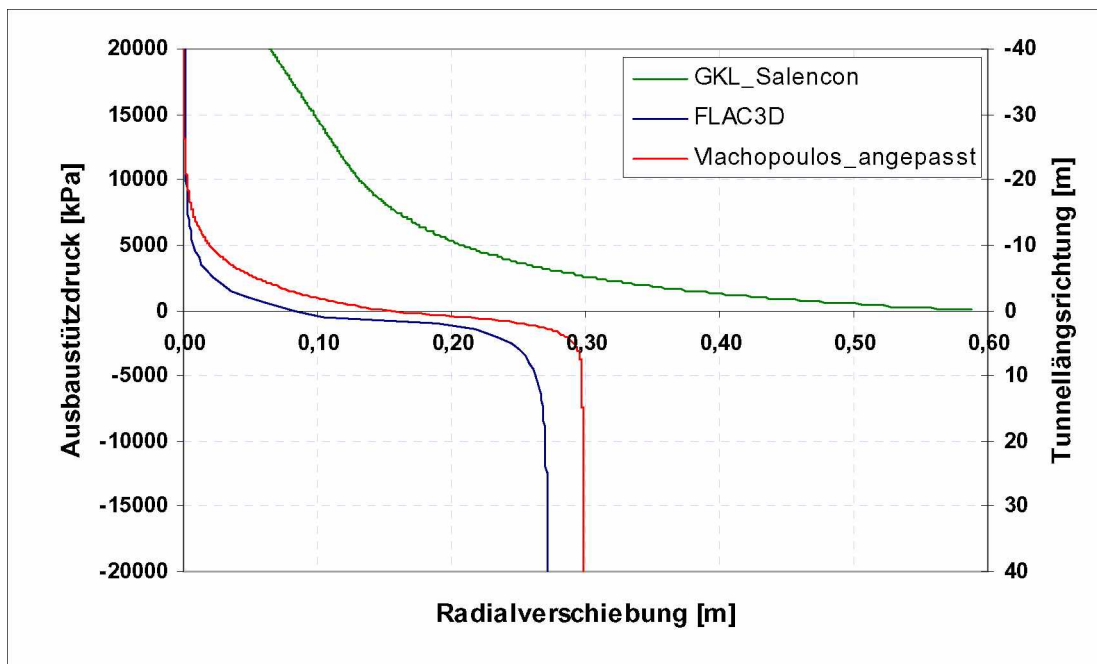




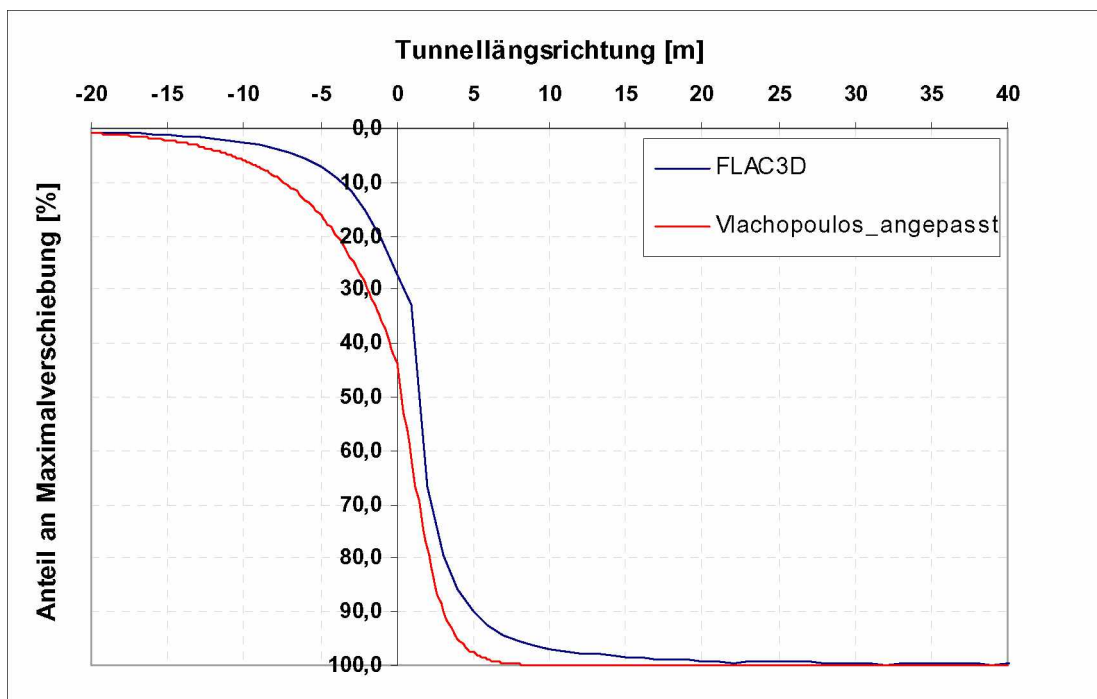
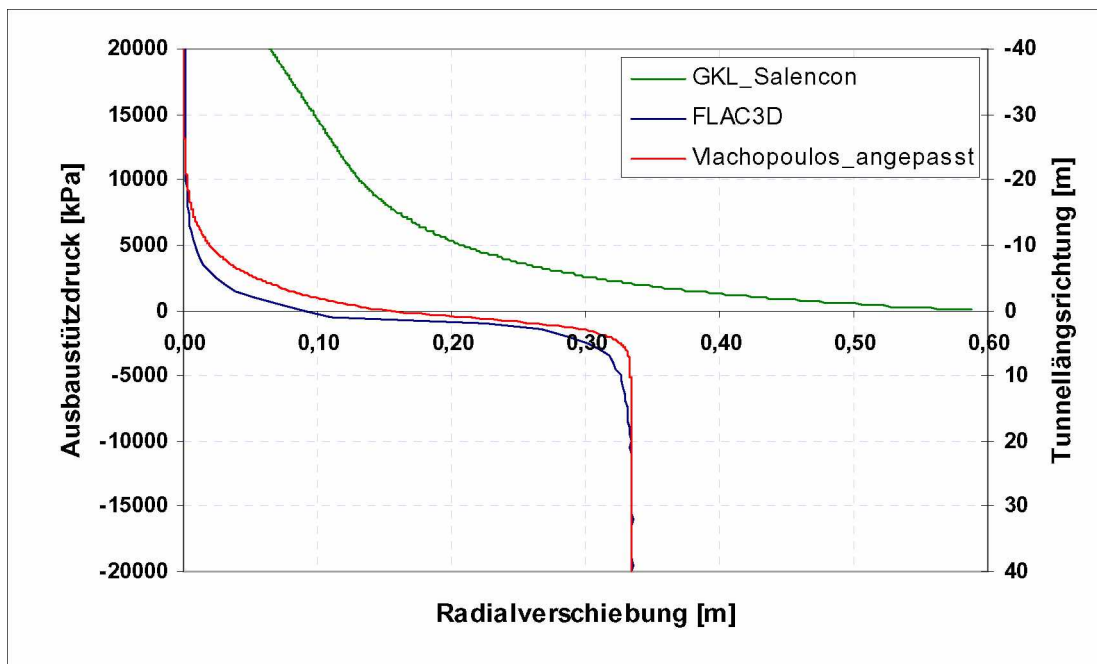
## Beispiel 62



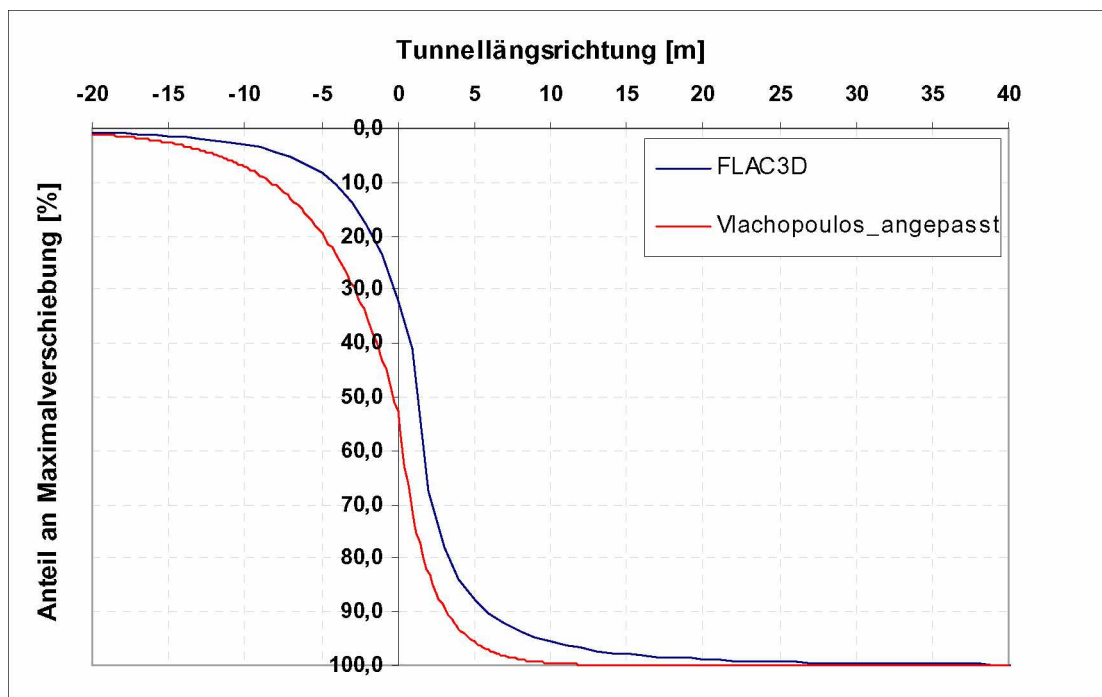
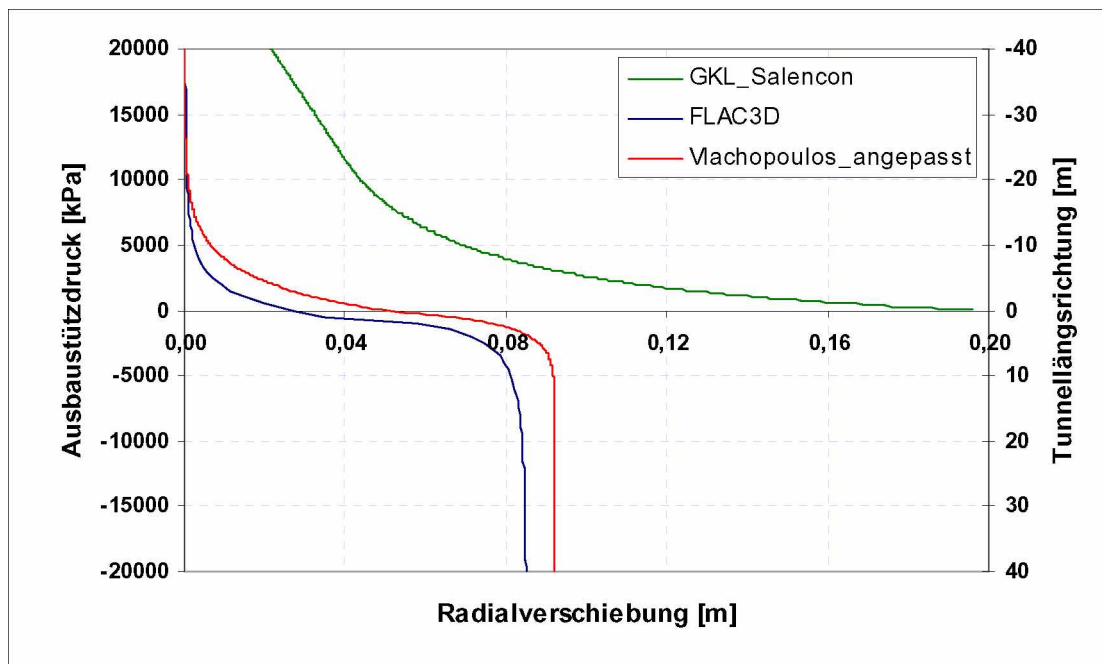
Beispiel 63



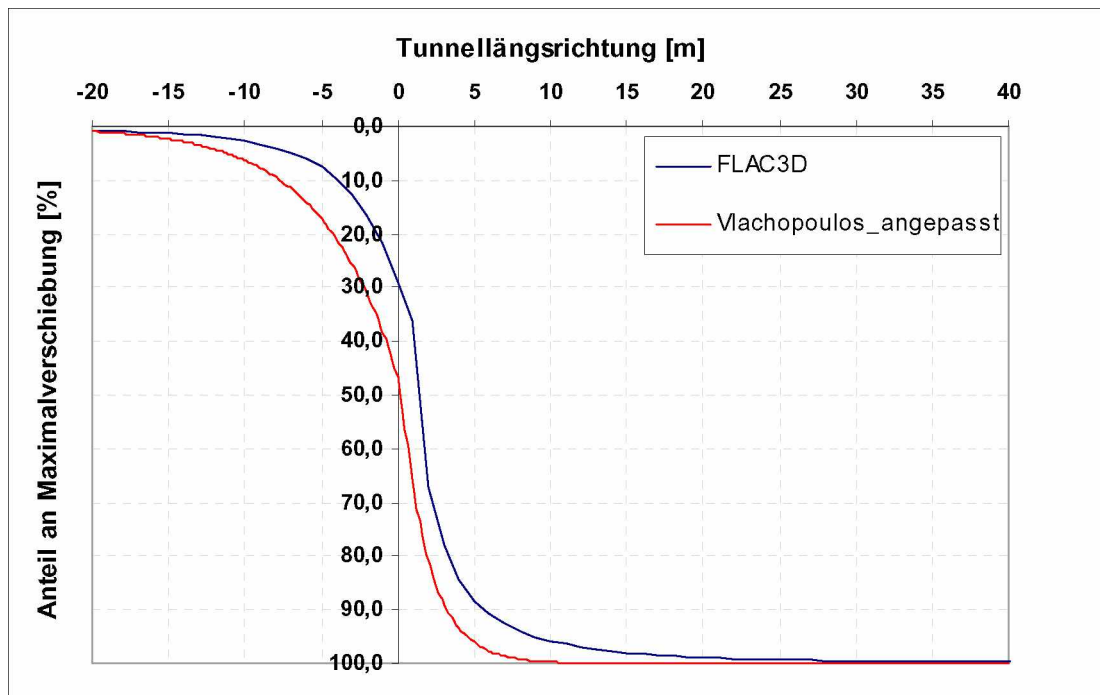
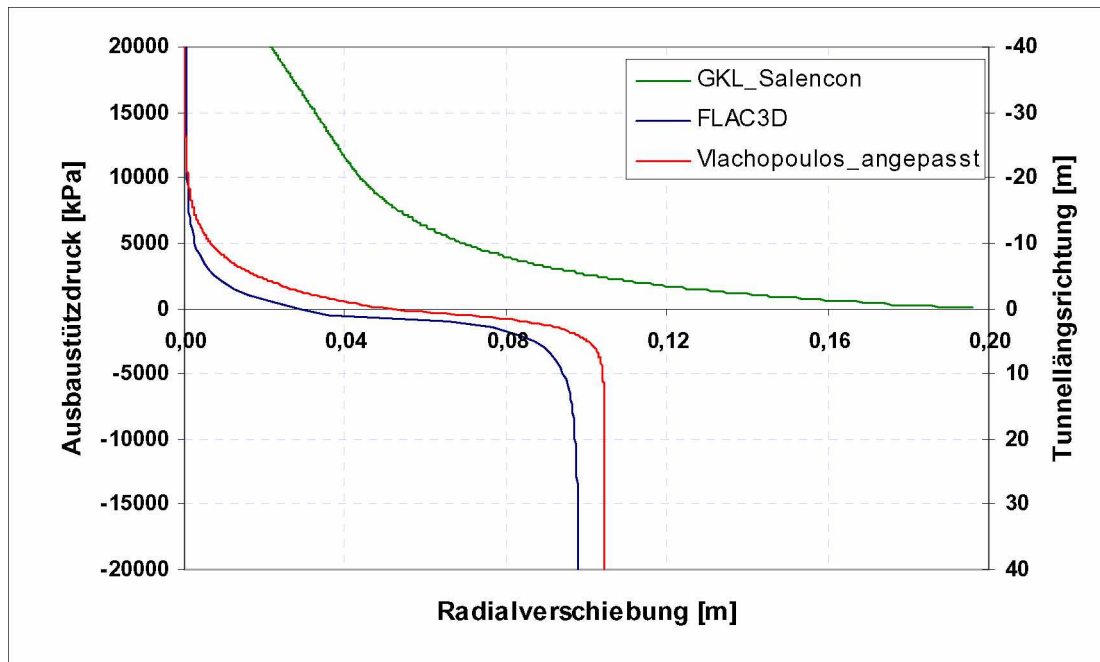
Beispiel 64



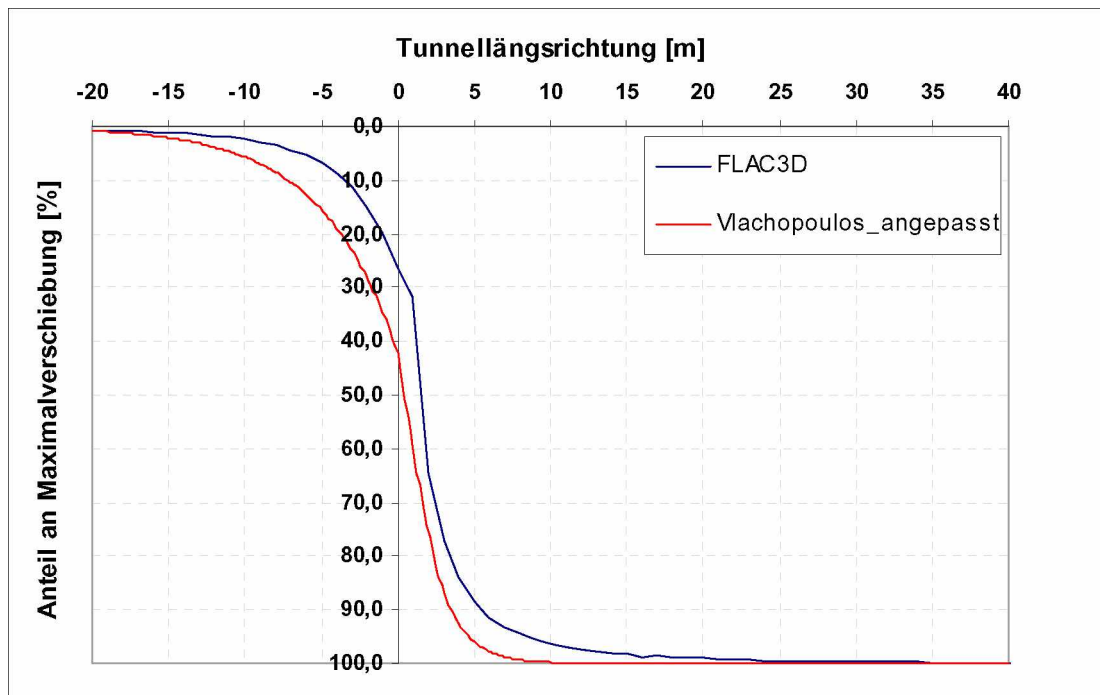
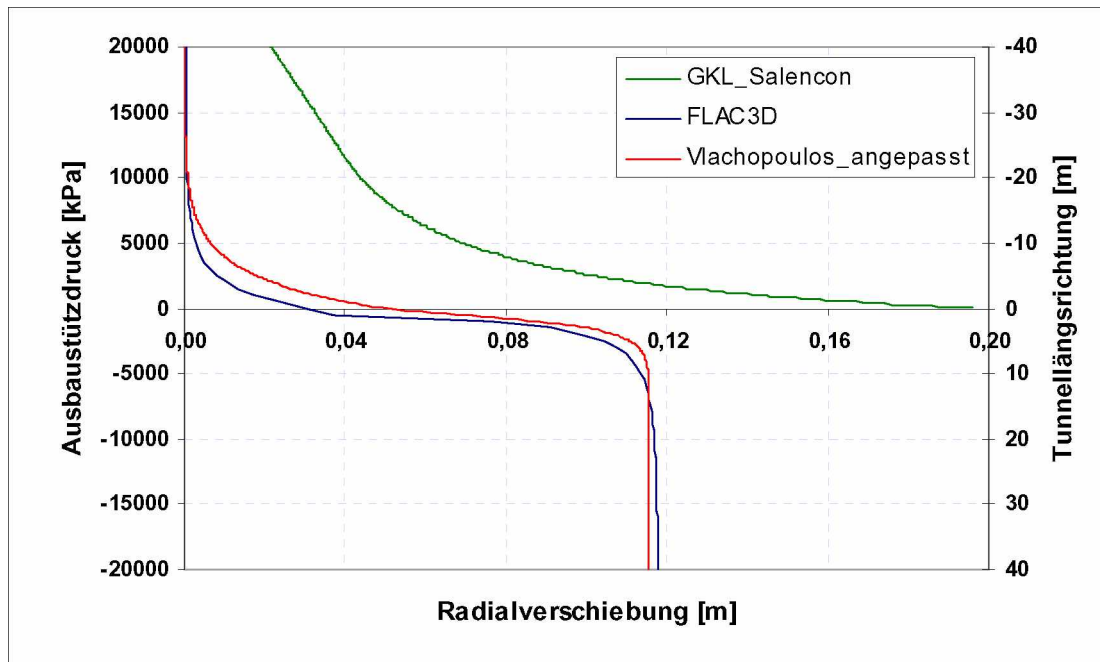
## Beispiel 65



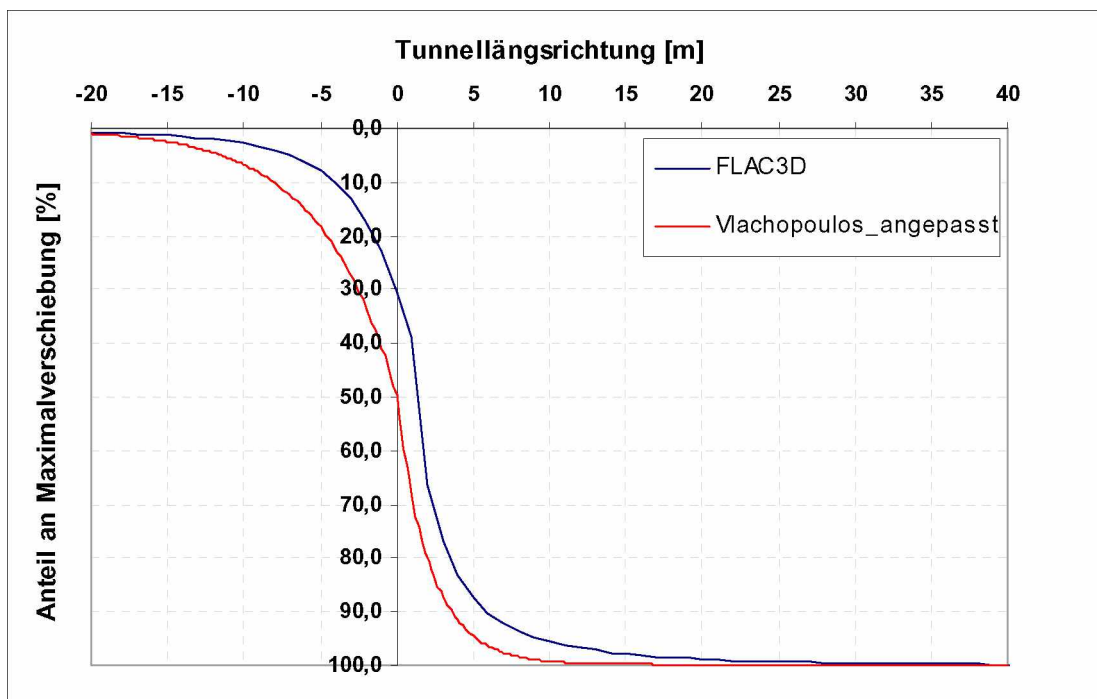
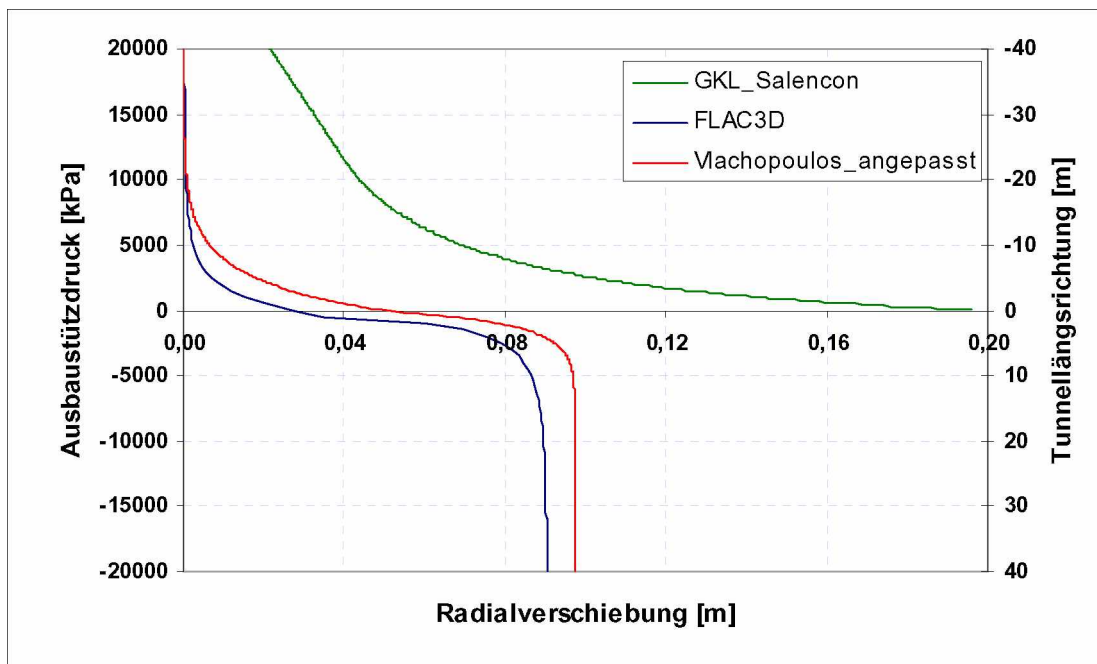
## Beispiel 66



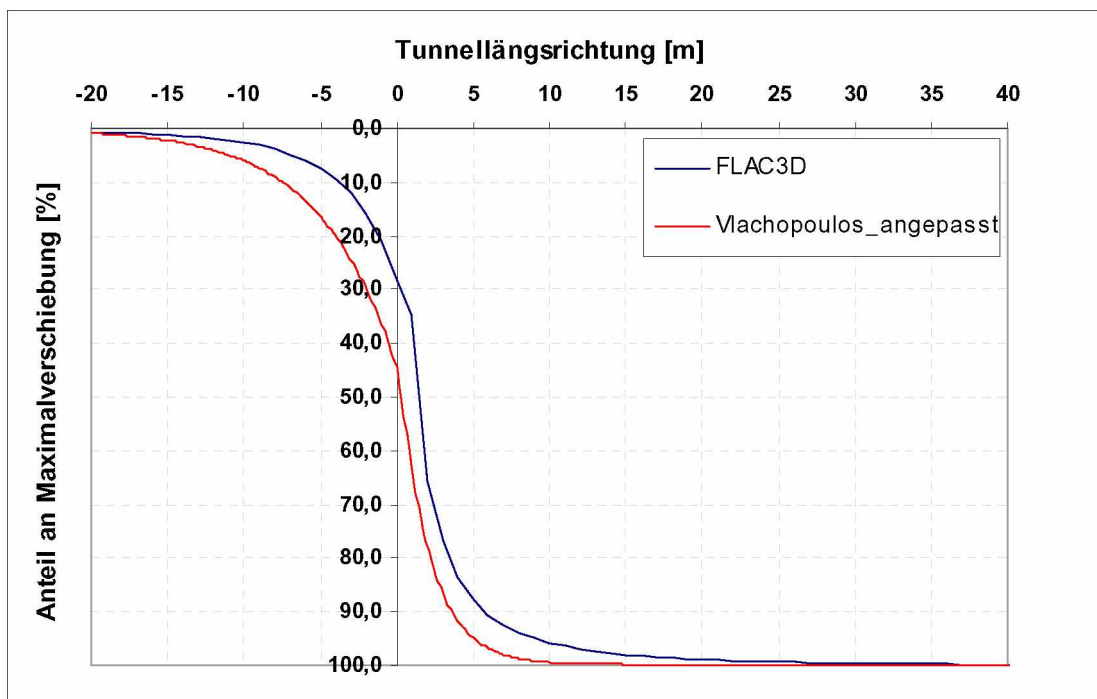
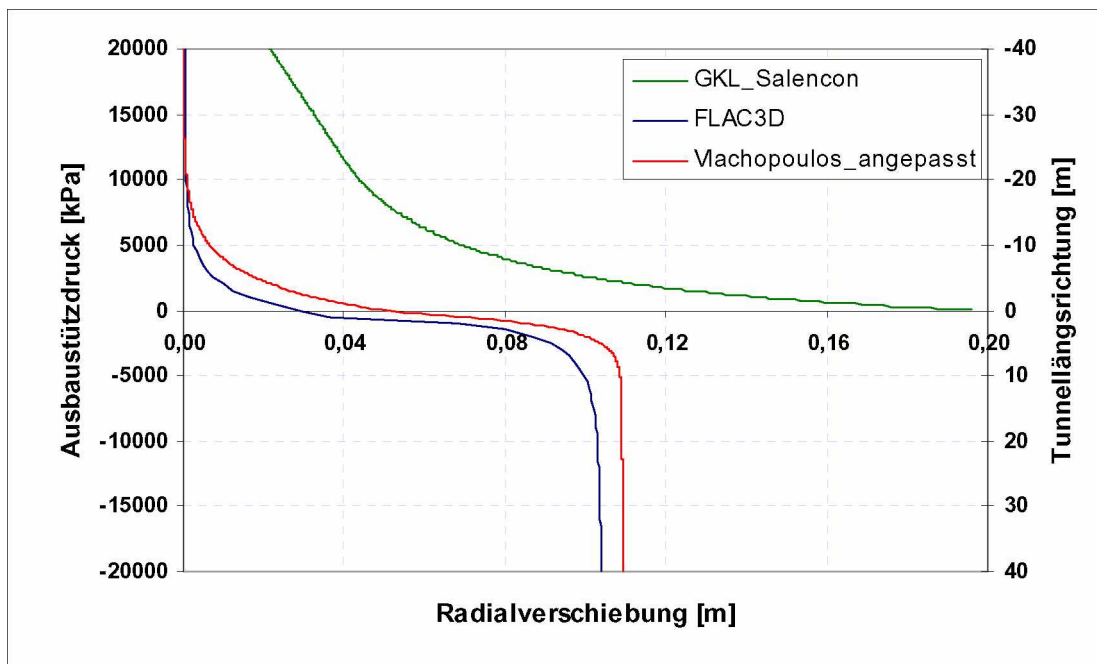
## Beispiel 67



Beispiel 68

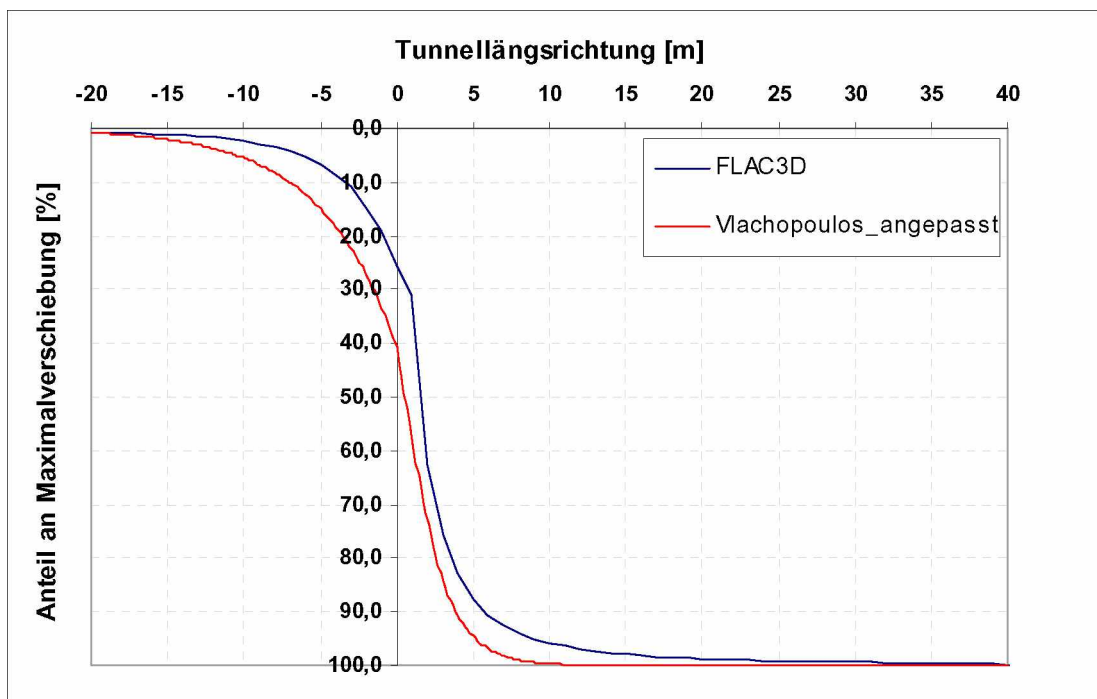
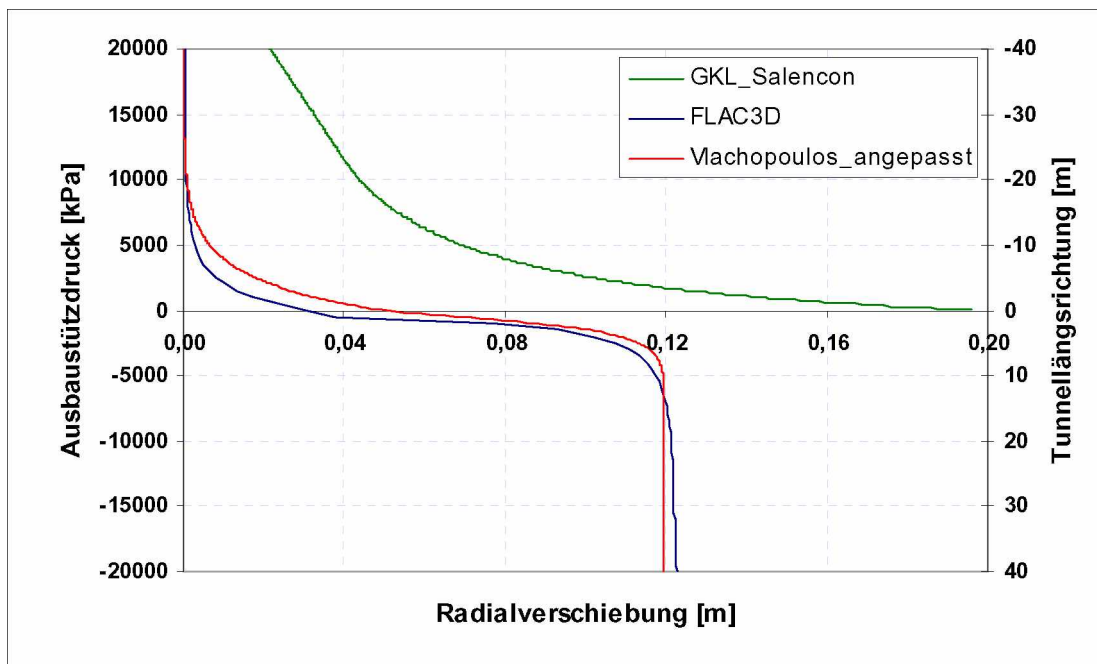


Beispiel 69

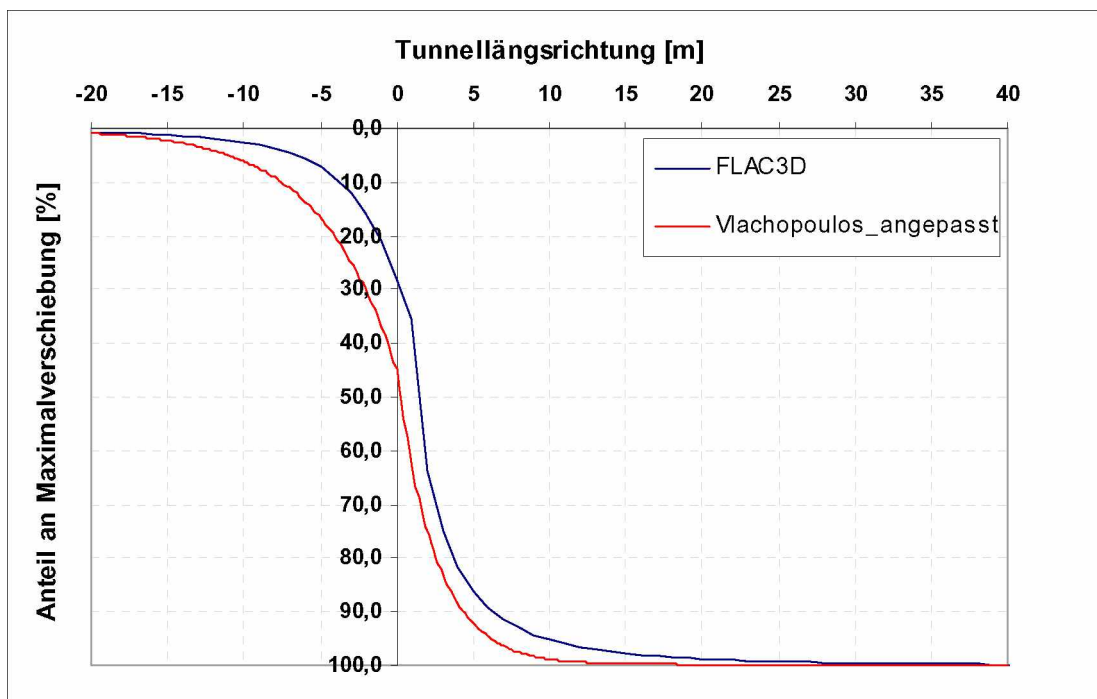
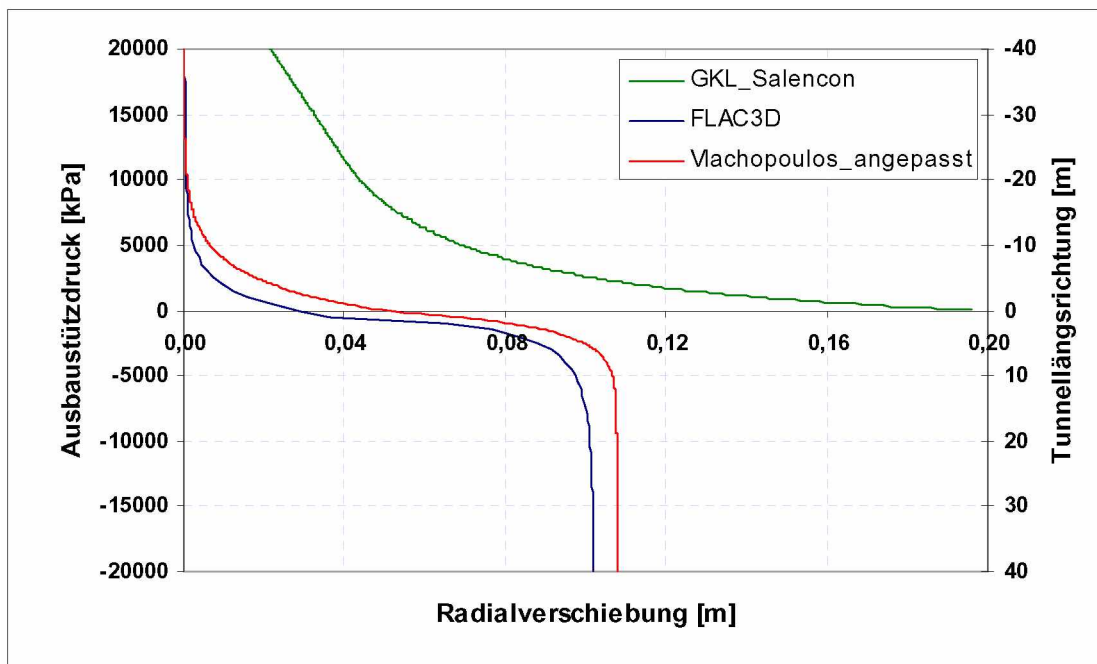




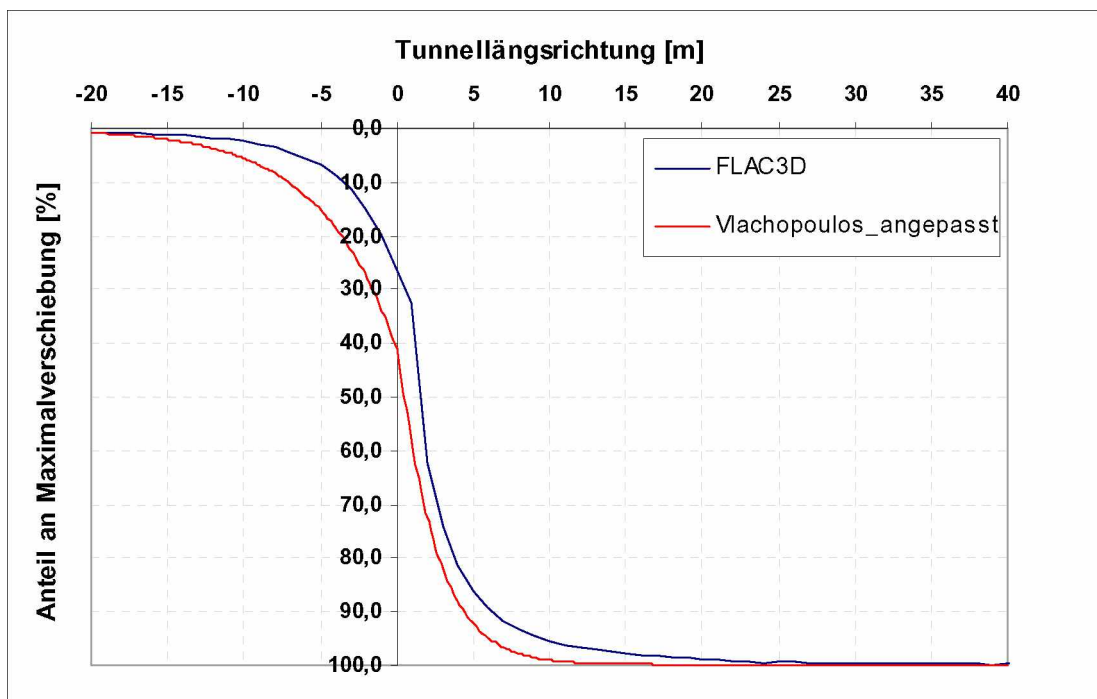
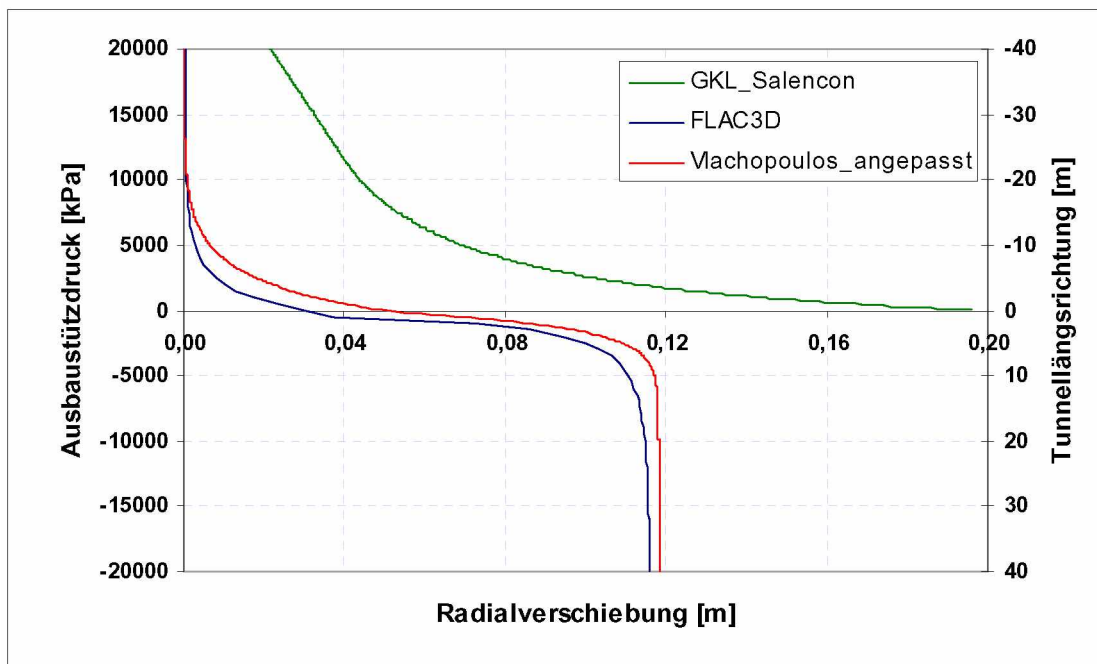
Beispiel 70



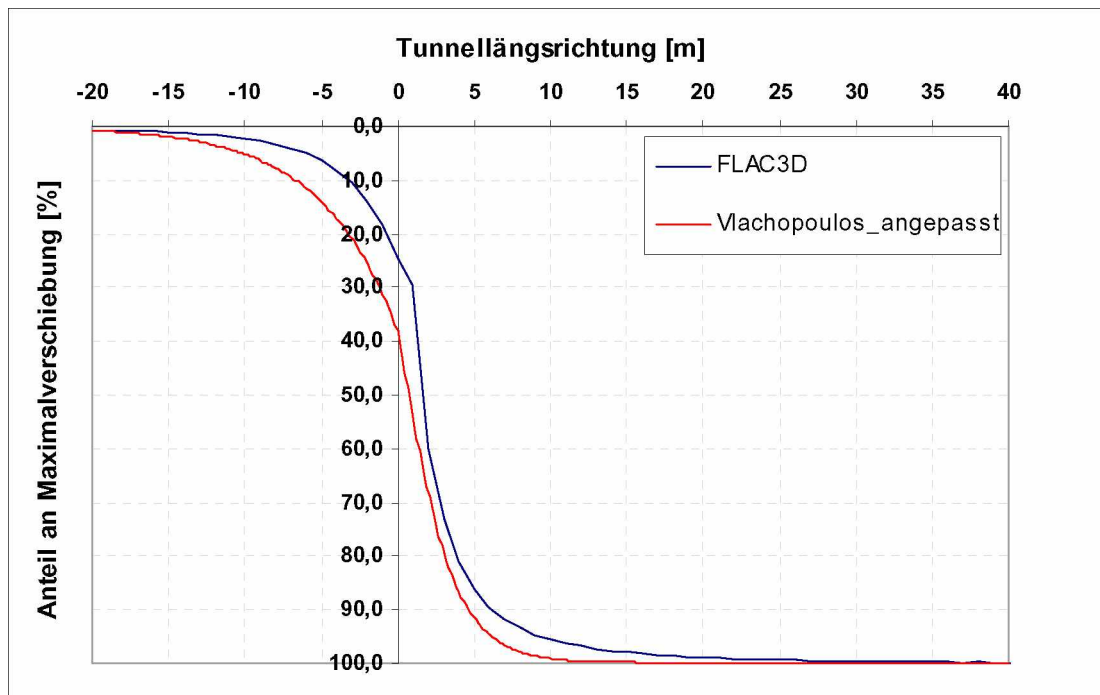
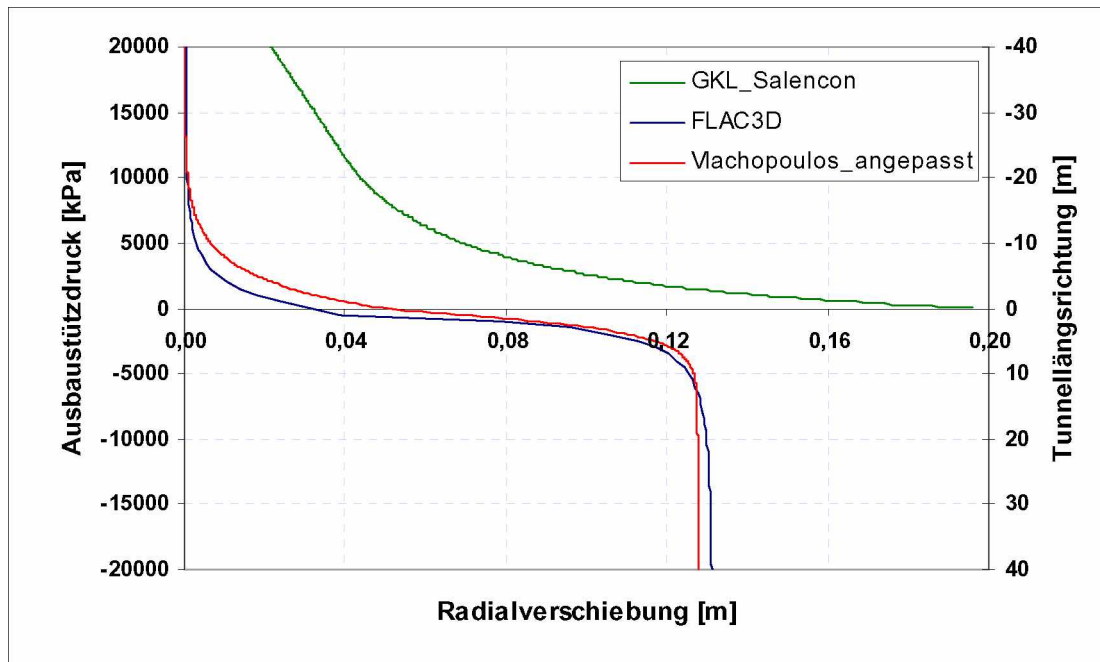
Beispiel 71



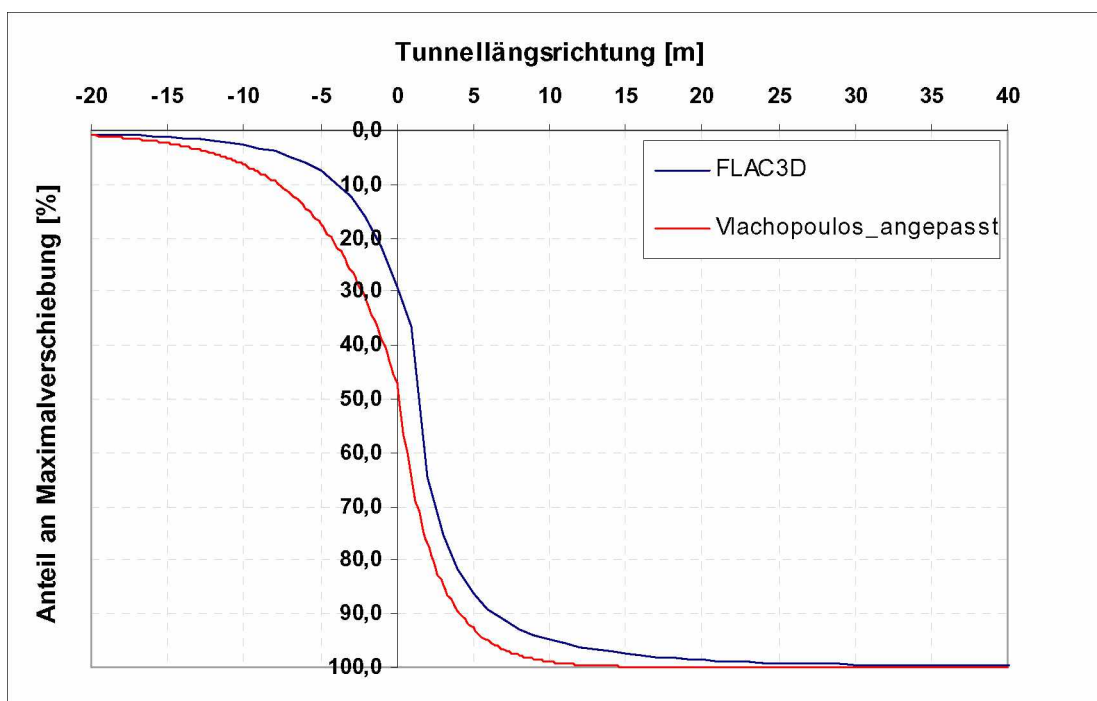
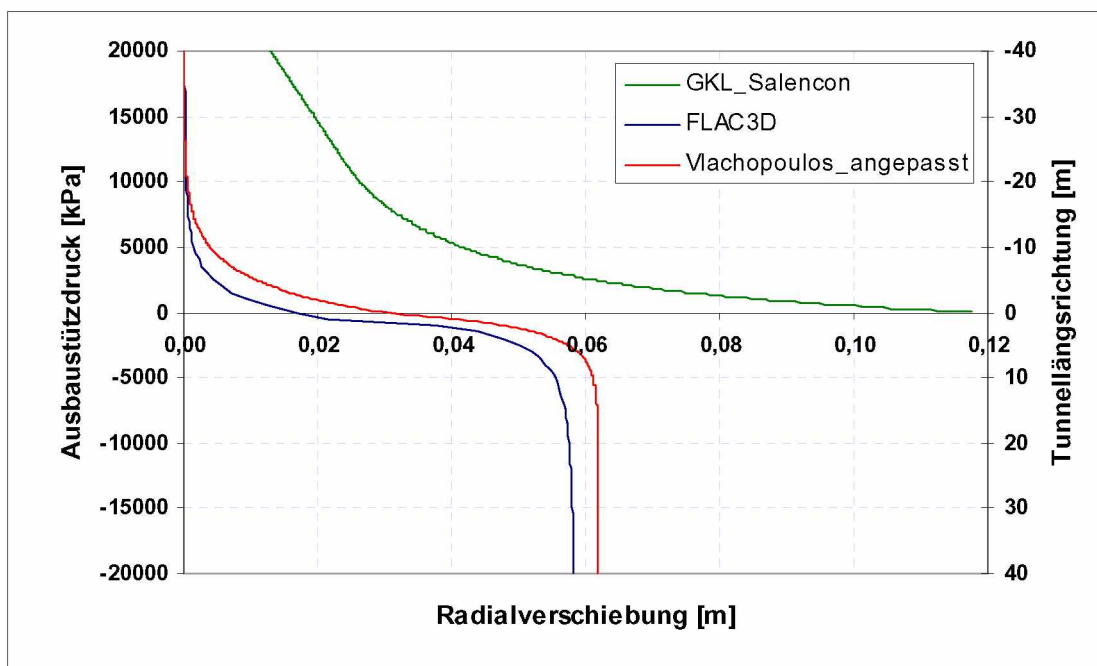
Beispiel 72



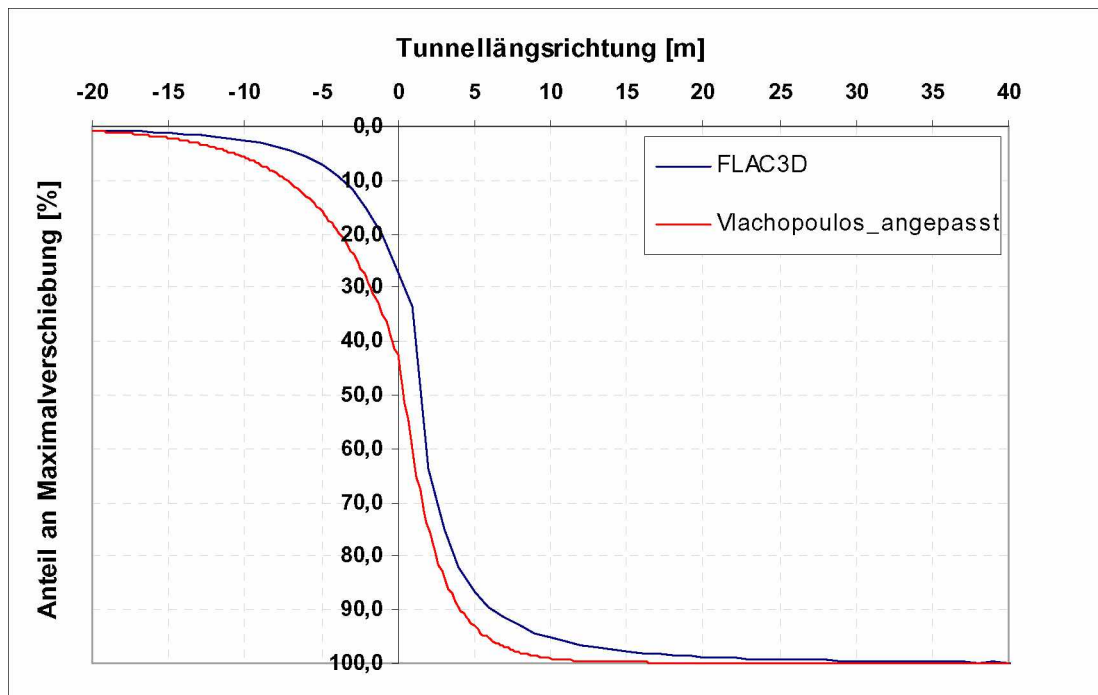
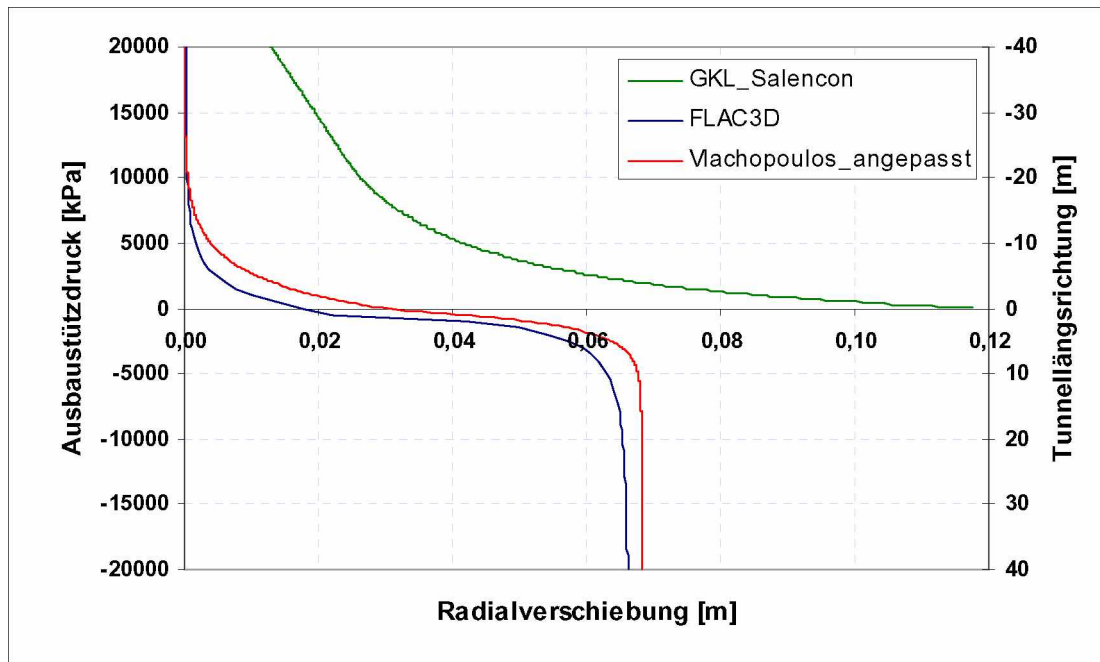
## Beispiel 73



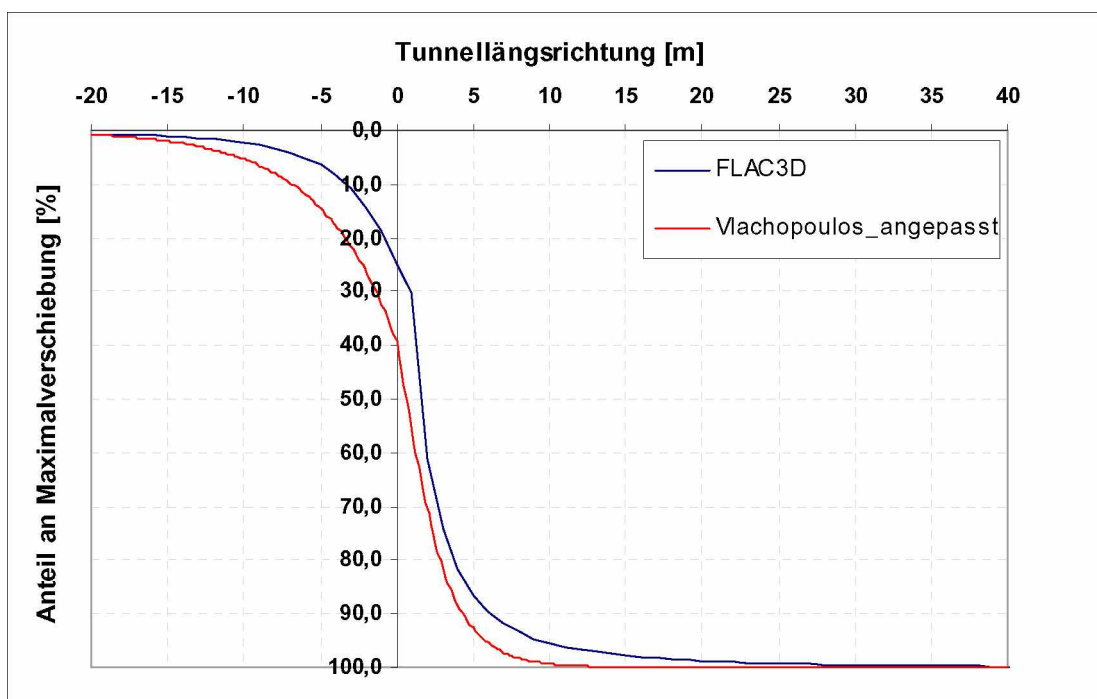
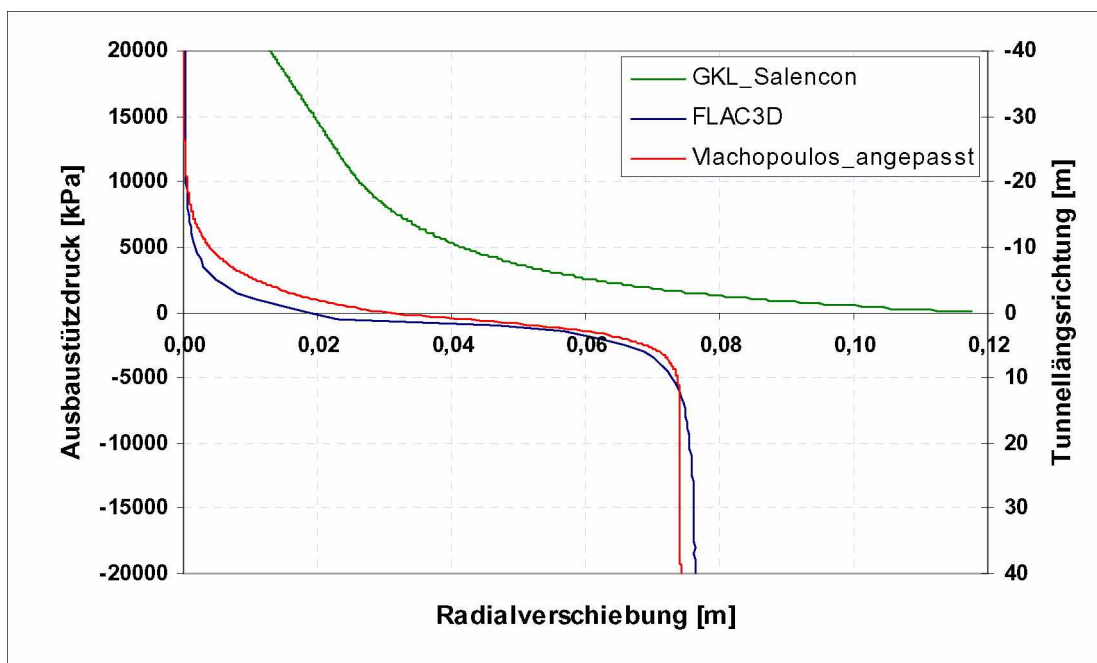
Beispiel 74



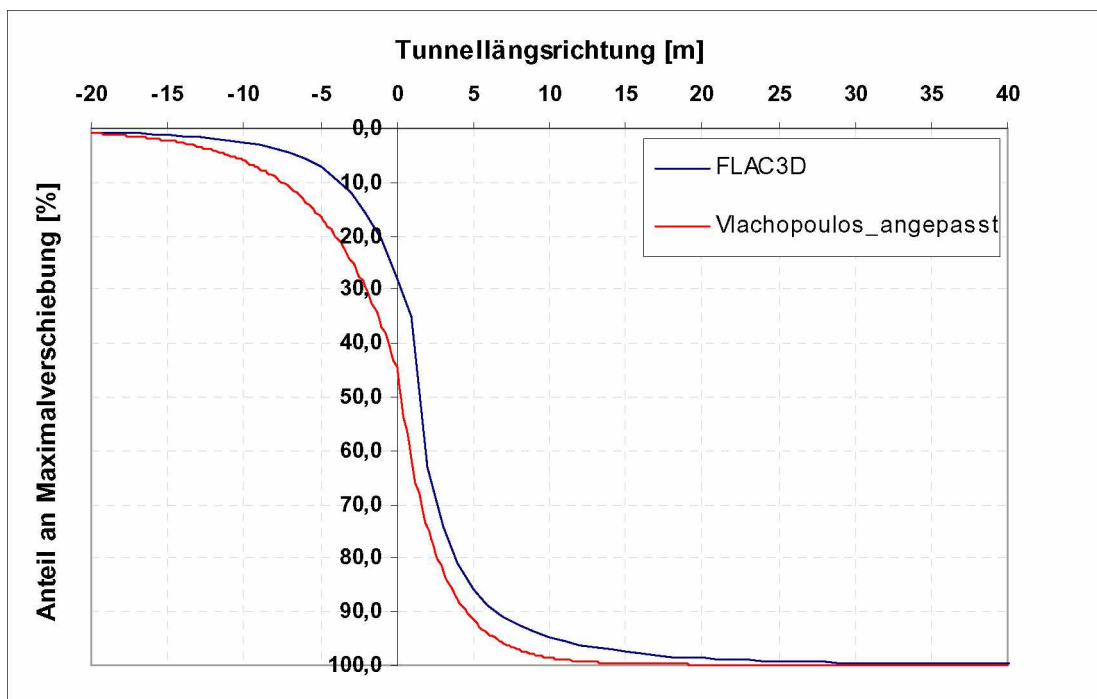
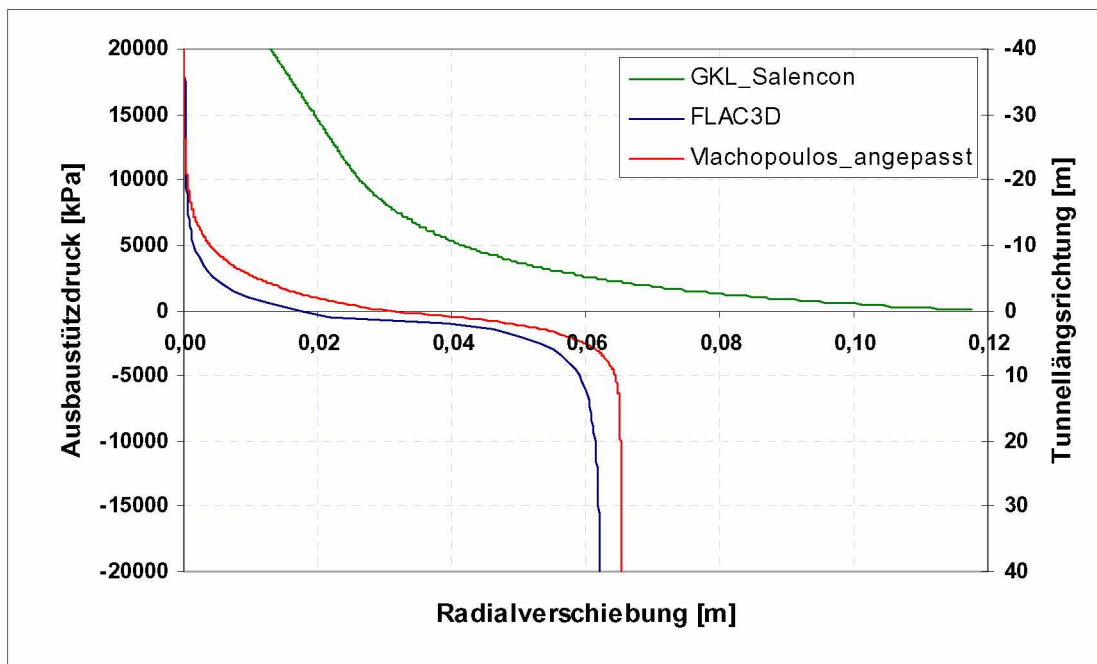
## Beispiel 75



## Beispiel 76

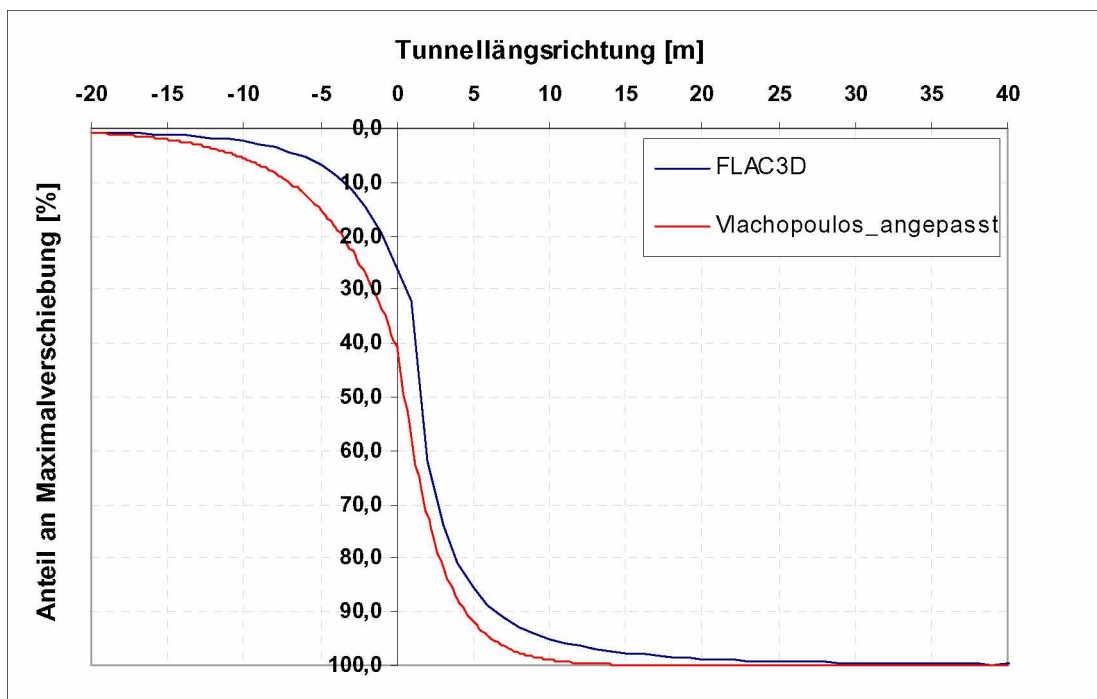
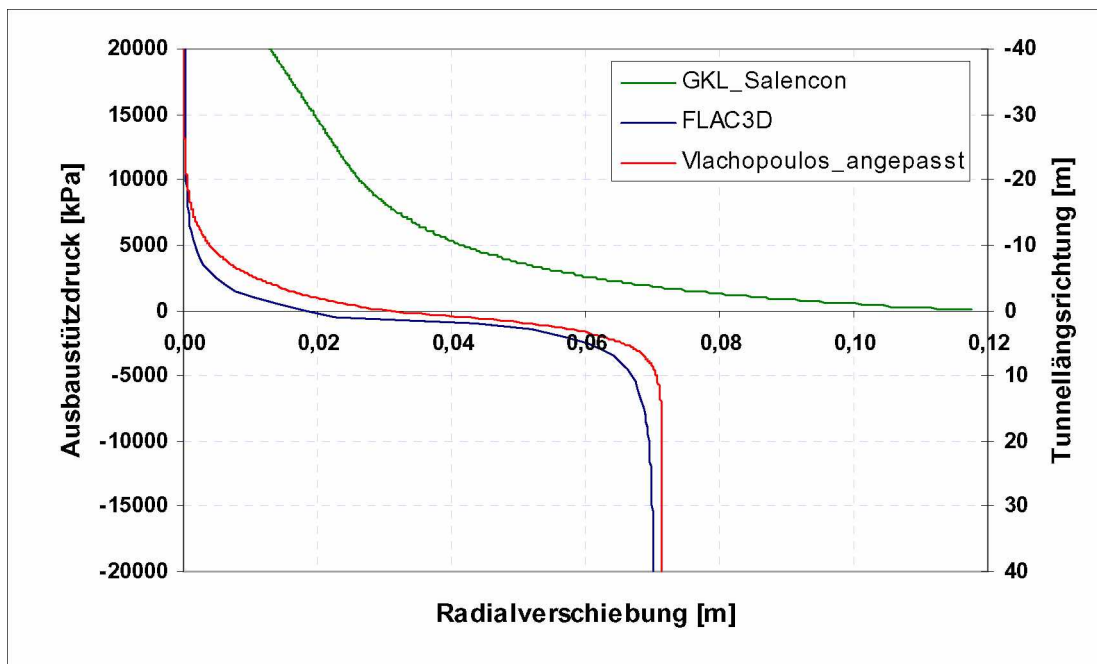


Beispiel 77

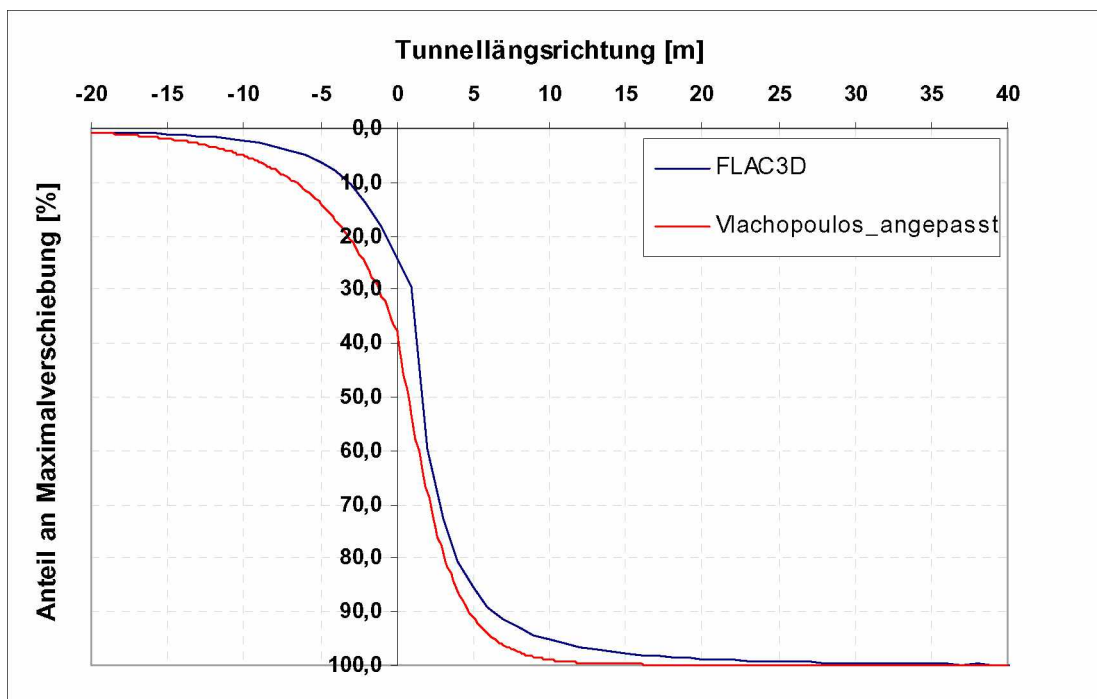
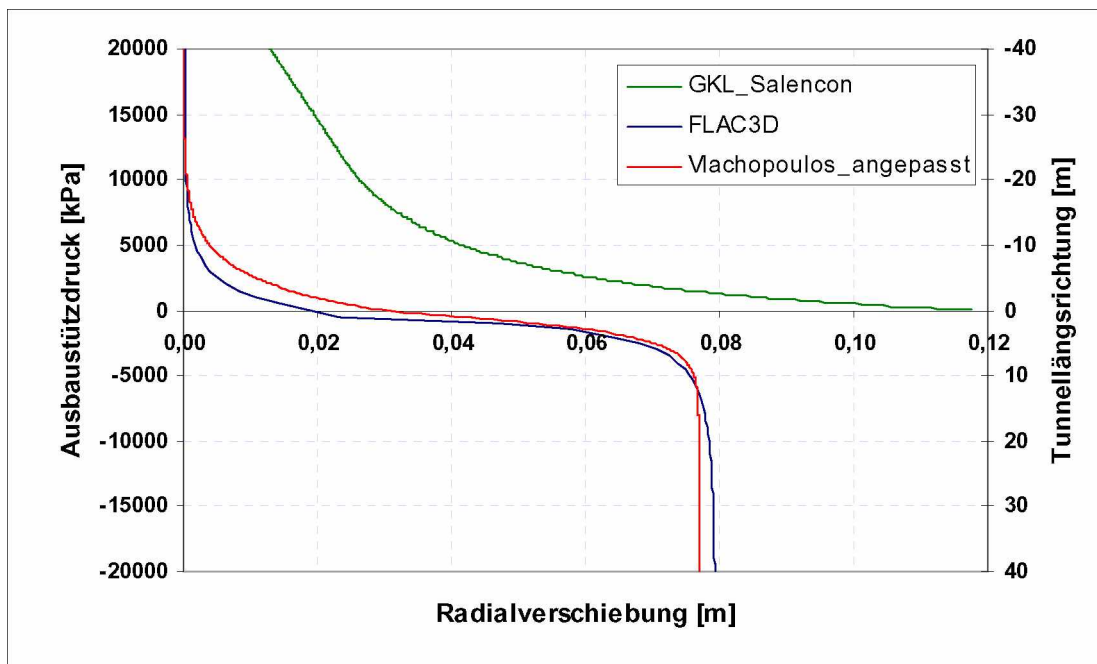




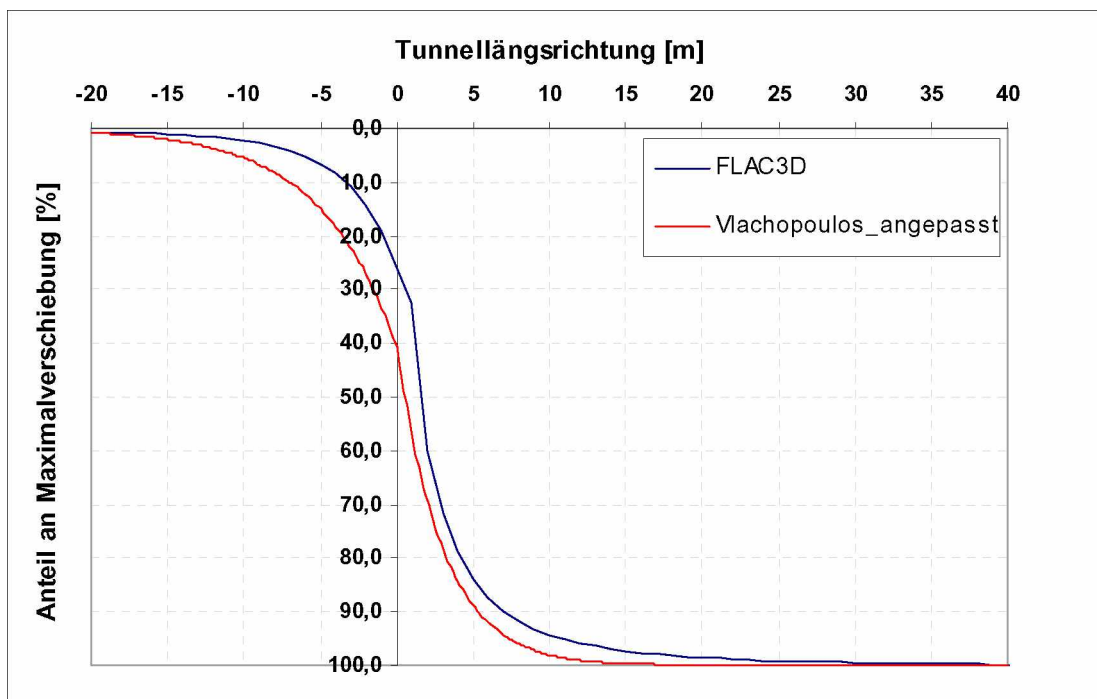
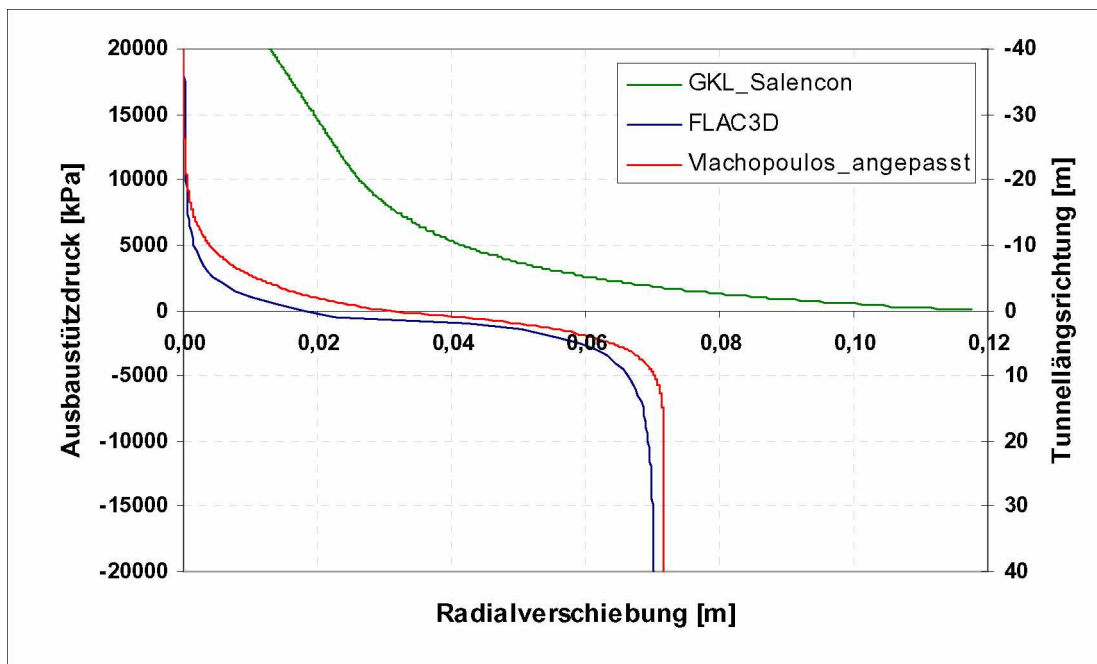
Beispiel 78



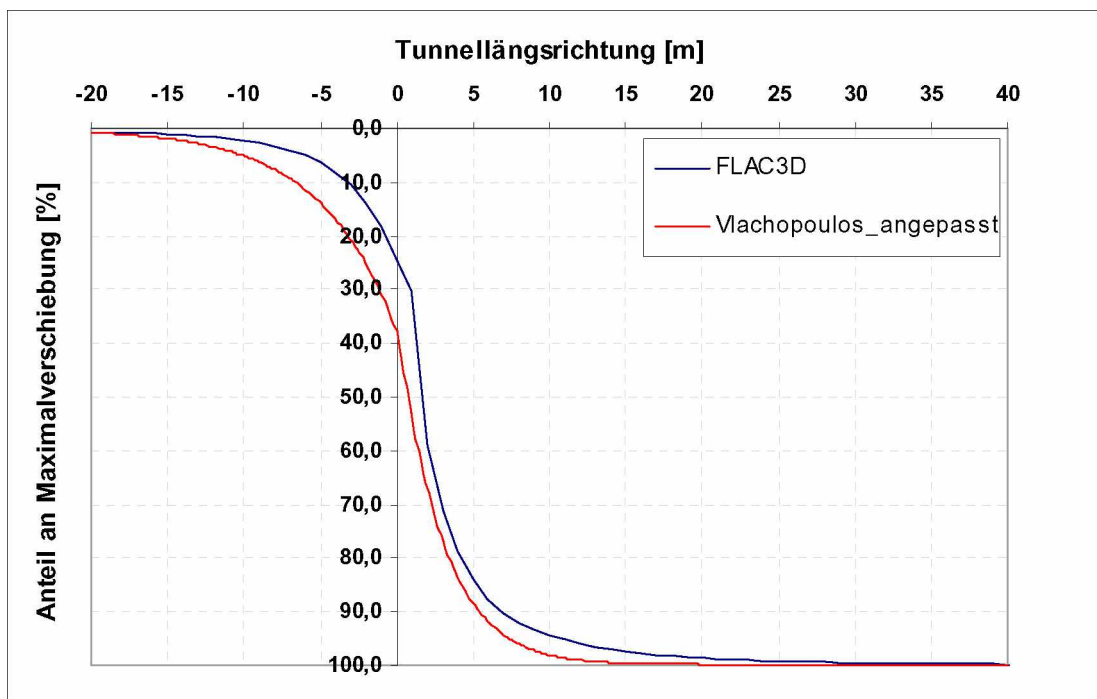
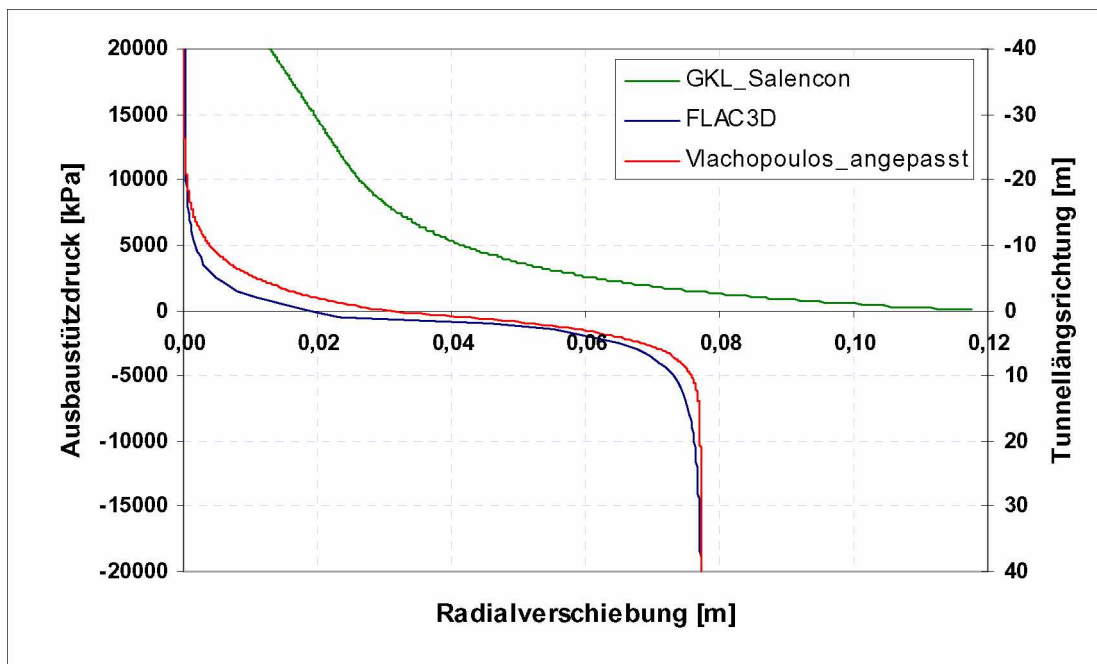
Beispiel 79



Beispiel 80



Beispiel 81



## Beispiel 82

