

Diplomarbeit

Numerische Studie zu Vorentlastungsfaktoren bei oberflächennahen Tunneln

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

der

Technischen Universität Graz

im

Mai 2010

Verfasser: **Markus Wohlfahrt**

Betreuung: **Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut F. Schweiger**

Dipl.-Ing. Franz Tschuchnigg

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, Mai 2010

Markus Wohlfahrt

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit werden zweidimensionale und dreidimensionale numerische FE-Berechnungen von Tunneln zur Ermittlung von Vorentlastungsfaktoren durchgeführt.

Als Basis dient ein Tunnel, der mit einer Überdeckung von 4,5 m bzw. mit 30 m berechnet wird. Das Modell besteht aus zwei Bodenschichten, deren Schichtdicke in den Berechnungen variiert wird. Es werden die Verformungen der Tunnelkrone sowie die Normalkräfte und die Biegemomente in der Tunnelschale für die ermittelten Vorentlastungsfaktoren verglichen. Zur Simulation der Lastreduktion durch die Vorentlastung wird im zweidimensionalen Modell das Stützlastverfahren herangezogen.

Abstract

In this diploma thesis two-dimensional and three-dimensional numerical calculations of tunnel excavations are carried out to identify pre-relaxation factors.

For the calculation a tunnel with 4,5 m depth overburden is considered respectively 30 m. The model consists of two soil layers with varying thickness in the calculations. The settlements in the tunnel crown as well as normal force and bending moment in the lining are compared for different pre-relaxation factors. In the two-dimensional model the load reduction method is used.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Stoffgesetz	2
2.1	Mohr-Coulomb Modell	2
3	Modellbildung	4
3.1	Der Tunnelquerschnitt	4
3.1.1	Die Tunnelgeometrie	4
3.1.2	Die vereinfachte Geometrie	5
3.2	Materialparameter und Bodenschichtung.....	6
3.3	Die Modellgröße	8
3.4	Vergleich Tunnelgeometrie und vereinfachte Geometrie	8
3.5	Das FE-Netz.....	9
3.5.1	Plaxis 2D	9
3.5.2	Plaxis 3D Tunnel	11
3.6	Berechnungsablauf 2D Modell.....	12
3.7	Berechnungsablauf 3D Modell.....	13
4	Der Vorentlastungsfaktor	14
4.1	Ausgangswerte aus der 3D-Berechnung	15
4.2	Berechnung der Vorentlastungsfaktoren über das Verhältnis der 3D-Firstverformungen	16
4.3	Kalibrierung der Firstsetzung der 2D-Berechnung an der 3D-Berechnung.....	19
4.4	Linear-elastische Berechnung für Schichtdicke Boden 10,0m.....	20
5	Auswertung der Schnittkräfte	22
5.1	Schnittkräfte in Abhängigkeit der Spritzbetoneigenschaften.....	22
5.2	Schnittkräfte für Schichtdicke Boden 5,5 m, vereinfachte Geometrie	24
5.2.1	Vergleich der Normalkräfte	25
5.2.2	Vergleich der Verformungsfiguren und Rückrechnung der Normalkräfte.....	27
5.2.3	Vergleich der Biegemomente.....	29
5.3	Schnittkräfte tieferliegender Tunnel, Überdeckung 30,0 m.....	31
5.3.1	Vergleich der Normalkräfte	31
5.3.2	Vergleich der Biegemomente.....	33
5.3.3	Der Einfluss der Spritzbetonschale auf die Firstverformungen.....	34
5.3.4	Ermittlung des Vorentlastungsfaktors nach Kielbassa [3].....	35
5.4	Auflösung des Rohrschirms	40

5.4.1	Das Modell	41
5.4.2	Berechnung der Vorentlastung aus dem Firstverformungsverhältnis	42
5.4.3	Berechnung der Vorentlastungsfaktoren über Kalibrierung der Firstsetzung der 2D-Berechnung an der 3D-Berechnung.....	42
5.4.4	Auswertung der Verschiebungen	42
5.4.5	Auswertung der Normalkräfte	43
6	Zusammenfassung	46
	Anhang A.....	48
A.1	Ergebnisse der Firstverformungen für zwei Vorentlastungsfaktoren	48
A.2	Schnittkräfte Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie	49
A.3	Schnittkräfte Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie	51
A.4	Schnittkräfte Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie	54
A.5	Schnittkräfte Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie	56
	Abbildungsverzeichnis.....	59
	Tabellenverzeichnis.....	62
	Literaturverzeichnis.....	63

1 Einleitung

Für Berechnungen von Bauwerken werden meist Computer mit spezieller Software verwendet. Geotechnische Strukturen wie z.B. Tunnelbauten werden im Allgemeinen mit Hilfe von numerischen Methoden analysiert, wobei in der Geotechnik vorwiegend die Finite Elemente Methode zum Einsatz kommt. Sie wird auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Durch gestiegene Rechnerkapazitäten ist es heutzutage möglich, realitätsnahe Berechnungen über dreidimensionale Simulationen durchzuführen. Dabei werden räumliche Einflüsse erfasst, die in einem zweidimensionalen Modell nicht berücksichtigt werden können. Daher müssen bei zweidimensionalen Berechnungen von Tunnelausbrüchen die sogenannten Vorentlastungsfaktoren eingesetzt werden. Sie sollen die sich aus dem Vortrieb ergebende Kräfteumlagerung im Gebirge, in der Zeit vom Ausbruch bis zum Einbau der Spritzbetonschale, näherungsweise berücksichtigen.

Es gibt mehrere Arten die Vorentlastung zu berücksichtigen. In dieser Arbeit wird das Stützlastverfahren verwendet. Bei diesem Verfahren werden für den Vorentlastungsfaktor β , Werte in einer Bandbreite zwischen 0,2 und 0,8 angegeben.

In den nächsten Abschnitten werden an Hand von Gegenüberstellungen zwischen 2D- und 3D-Berechnungen die Vorentlastungsfaktoren für verschiedene Tunnel ermittelt und die Setzungen, sowie die Normalkräfte und die Biegemomente in der Tunnelschale aus diesen Berechnungen miteinander verglichen.

2 Das Stoffgesetz

Für die Beschreibung des Materialverhaltens von Böden werden Stoffgesetze verwendet. Um ein realistisches Verhalten des Bodens in einer Finiten Elemente Berechnung abzubilden, ist es unerlässlich, ein geeignetes Stoffgesetz für die Modellierung zu wählen. Zur Anwendung in den folgenden Berechnungen kommt das Mohr-Coulomb Modell als einfaches Stoffgesetz.

2.1 Mohr-Coulomb Modell

Das MC-Modell ist ein einfaches Stoffgesetz mit linear-elastischem ideal-plastischem Materialverhalten.

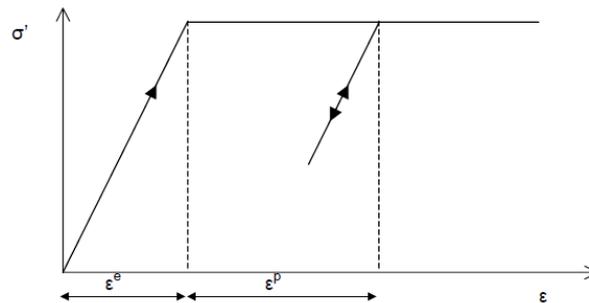


Abb. 2.1: Linear-elastisch ideal-plastisches Materialverhalten [5]

Die Belastung, Ent- und Wiederbelastung erfolgt im Spannungs-Dehnungsdiagramm (Abb. 2.1) linear-elastisch. Ein allfällig auftretender plastischer Anteil der Dehnung ϵ^p bleibt bei einer Entlastung irreversibel vorhanden und die Fließspannung ist gleich der Bruchspannung. Es werden folgende Parameter für die Beschreibung des Verhaltens verwendet:

- E-Modul [kN/m²]
- Poissonzahl ν [-]
- Reibungswinkel φ [°]
- Kohäsion c [kN/m²]
- Dilatanzwinkel ψ [°]

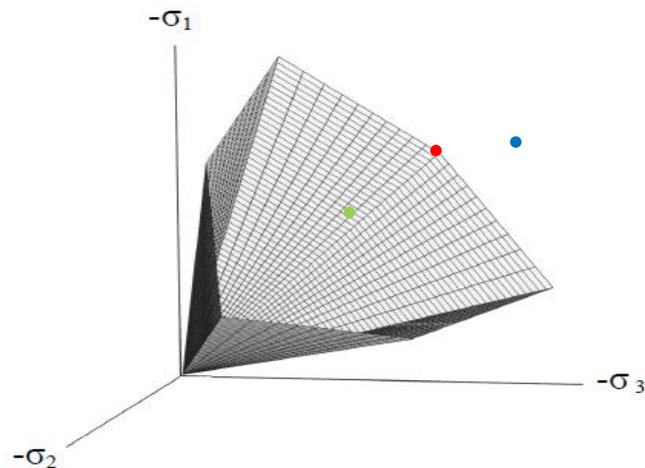


Abb. 2.2: Fließoberfläche im 3D Hauptspannungsraum, $c=0$ [5]

Befindet sich ein Punkt (grün) im Hauptspannungsraum innerhalb der Fließoberfläche, so verhält sich das Material elastisch. Trifft der Punkt (rot) jedoch die Oberfläche wird das Materialverhalten plastisch. Ein Spannungspunkt (blau) außerhalb der Fließoberfläche kann nicht auftreten bzw. ist nicht möglich.

3 Modellbildung

Die Berechnung der 2D-Modelle erfolgt in Plaxis 2D V9.1. Das Finite Elemente (FE-) Netz wird mit 6-knotigen Dreieckselementen mit einer quadratischen Ansatzfunktion generiert. Es werden die 6-knotigen anstatt den 15-knotigen Elementen in 2D verwendet, da diese in der Ebene die gleiche Anzahl an Integrationspunkten aufweisen und somit mit den 15-knotigen Elementen der 3D-Berechnung vergleichbar sind.

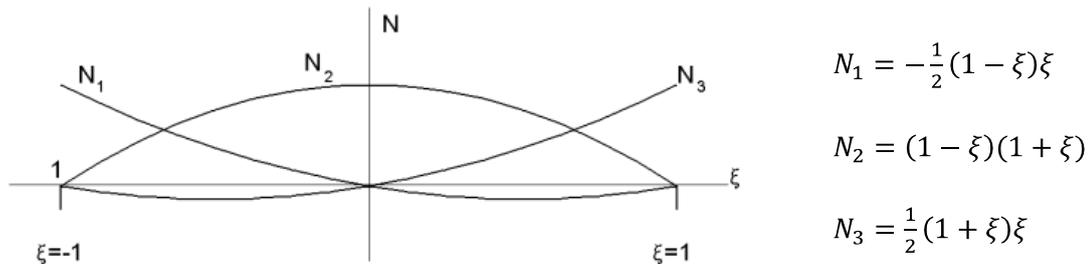


Abb. 3.1: Ansatzfunktionen für 3-knotige Linienelemente [5]

Die 3D-Berechnung der Tunnel wird mit Plaxis 3D Tunnel V2.4 durchgeführt. In der 3D-Berechnung kommen 15-knotige Prismen-Elemente zum Einsatz. Die Ansatzfunktion ist auch bei diesem Elementtyp quadratisch.

3.1 Der Tunnelquerschnitt

Als Basis für die Berechnungen dient ein tatsächlich ausgeführtes Tunnelprofil mit seinen Abmessungen und den zugehörigen Materialparametern. Der Tunnelquerschnitt wird für die vorliegende Untersuchung hinsichtlich seiner Geometrie vereinfacht. Als Sicherung des ausgebrochenen Querschnitts wird Spritzbeton mit einer zusätzlichen Ankerung im Ulmenbereich und der Ortsbrust verwendet. Die Spritzbetonschale wird im First- und Ulmenbereich mit einer konstanten Stärke von 30 cm ausgeführt. Die Sohle des Tunnels erhält keine Spritzbetonschale. Der Tunnel weist bezüglich der senkrechten Achse eine Symmetrieebene auf, die in die Modellierung mit einbezogen wird.

3.1.1 Die Tunnelgeometrie

In Abb. 3.2 ist die Tunnelgeometrie des Beispieltunnels dargestellt. Die Anker im Ulmenbereich werden in der Berechnung mit einer Kohäsionserhöhung erfasst, was zu einer Verschmierung der Wirkung der einzelnen Anker führt. Im 2D-Modell ist es möglich sie als Einzelanker zu modellieren, im 3D-Modell jedoch nicht. Daher wird für eine Vergleichbarkeit der beiden Berechnungen die gleiche Modellierung mit Kohäsionserhöhung verwendet.

Zusätzlich wird von einer konstanten Überdeckung der Tunnelfirste ausgegangen und eine konstante Schichtdicke der oberen Bodenschicht angenommen. Die Tunnelschale wird aus mehreren Kreisbögen segmentweise zusammengesetzt.

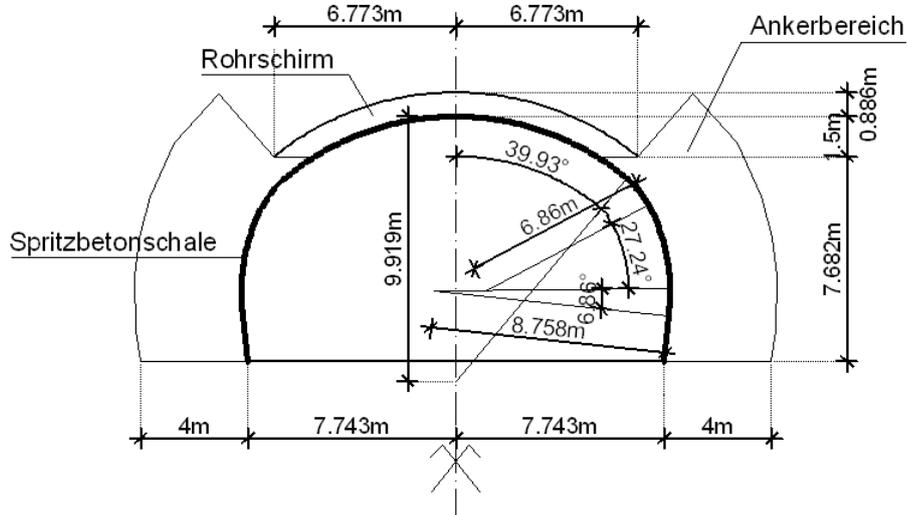


Abb. 3.2: Tunnelgeometrie

Der Rohrschirm über der Firste hat eine Stärke von rund 90 cm und lagert auf der tiefer liegenden Bodenschicht Fels auf (siehe Abb. 3.5). Diese Tunnelgeometrie wird nur in einer Vergleichsberechnung verwendet.

3.1.2 Die vereinfachte Geometrie

Bei den Berechnungen und Auswertungen wird für die Modelle vorwiegend die vereinfachte Geometrie verwendet. Bei der vereinfachten Geometrie besteht die Tunnelschale aus einem Halbkreisbogen mit unten anschließendem geradem Sohlbereich. Der Ausbruch hat eine Fläche von rund 201 m². Der Rohrschirm liegt mit einer Breite von 13 m und einer Stärke von einem Meter mittig über der Tunnelfirste.

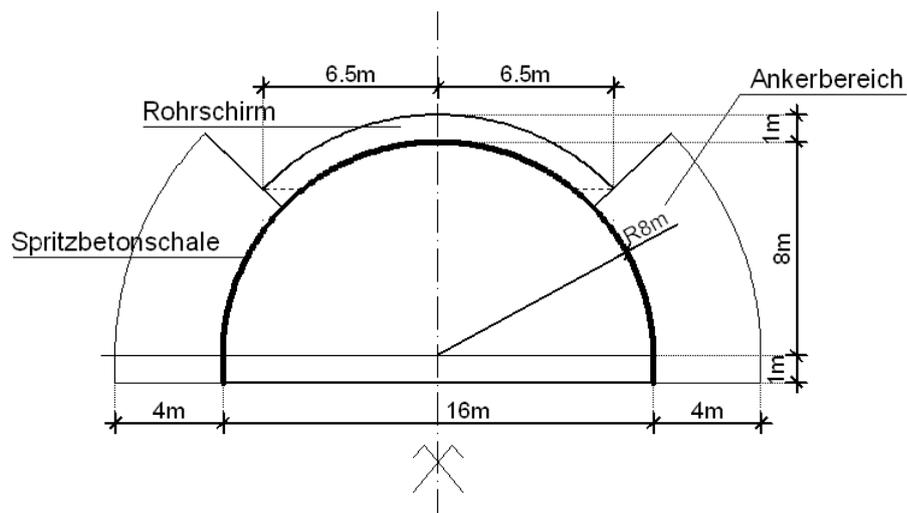


Abb. 3.3: vereinfachte Geometrie

Der Abschluss des Rohrschirms erfolgt je nach Schichtdicke der oberen Bodenschicht entweder horizontal oder senkrecht auf die Tunnelschale. Beträgt diese Schichtdicke 5,5 m, so endet der Rohrschirm wie in Abb. 3.3 als gestrichelte Linie gezeigt. Vergrößert sich jedoch die Schichtdicke der oberen Bodenschicht, so wird der Rohrschirm-Cluster senkrecht auf die Tunnelschale abgeschnitten.

Mit der vereinfachten Geometrie werden zwei Tunnel mit verschiedener Überlagerung berechnet. Die Überdeckung des Firstpunktes der Tunnelschale des oberflächennahen Tunnels beträgt vier Meter und die des tieferliegenden Tunnels 30 m. Die Bezeichnung „tieferliegender Tunnel“ wird hier zur besseren Unterscheidung der Berechnungen gewählt.

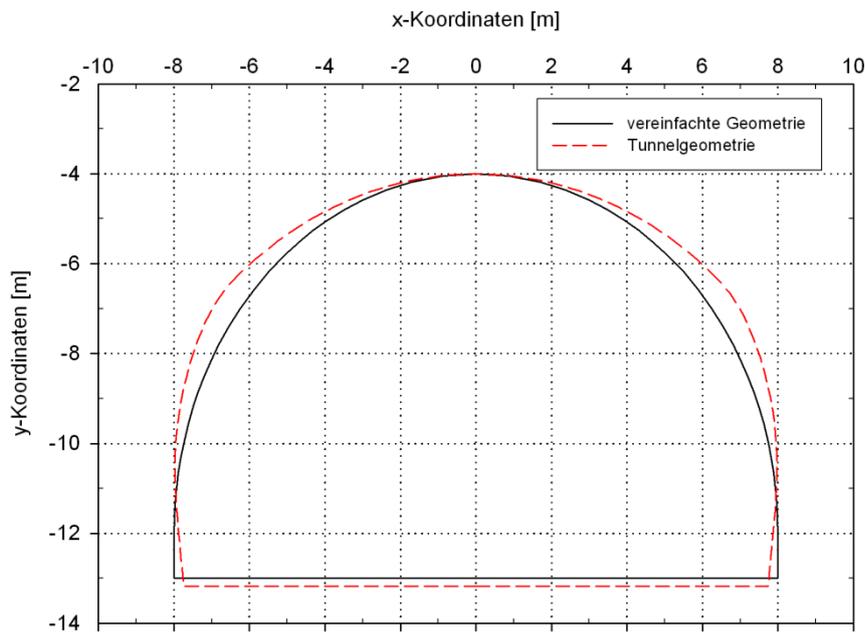


Abb. 3.4: Vergleich Tunnelgeometrie und vereinfachte Geometrie

3.2 Materialparameter und Bodenschichtung

Nachfolgend sind in Tab. 3.1 die Materialparameter der einzelnen Bodenschichten angeführt, die für die Berechnung der Modelle verwendet werden.

Bezeichnung	γ [kN/m ³]	E [Mpa]	ν [-]	c [kPa]	ϕ [°]	K ₀ [-]
Boden	22	50	0,3	5	35	0,5
Fels	24	2000	0,2	250	45	0,8
Zwischenschicht	22	50	0,3	20	35	0,5

Tab. 3.1: Materialparameter Boden

Die Zwischenschicht wird bei den Berechnungen mit der Schichtdicke von 7,0 m bis 10,0 m für den Boden zwischen dem Fels und dem darüber liegenden Boden eingeführt.

In Tab. 3.2 sind die Materialparameter der Sicherung des Tunnelausbruchs mittels Spritzbeton und die des Rohrschirms, der teilweise in den Berechnungen verwendet wird, angegeben.

Bezeichnung	γ [kN/m ³]	E [Mpa]	ν [-]	c [kPa]	ϕ [°]
Rohrschirm	24	2500	0,3	100	30
Spritzbeton jung	24	7500	0,2		
Spritzbeton alt	24	15000	0,2		

Tab. 3.2: Materialparameter Auskleidung

Die Berechnung der Spritzbetonschale erfolgt mit dem linear-elastischen Stoffgesetz. Die Anker im seitlichen Bereich der Ulme werden in den entsprechenden Bodenschichten mittels Erhöhung der Kohäsion um $\Delta c = 60$ kPa berücksichtigt. Die Anker in der Ortsbrust befinden sich nur im Bereich der Schicht „Boden“ und werden mit derselben Kohäsionserhöhung wie im Ulmenbereich modelliert.

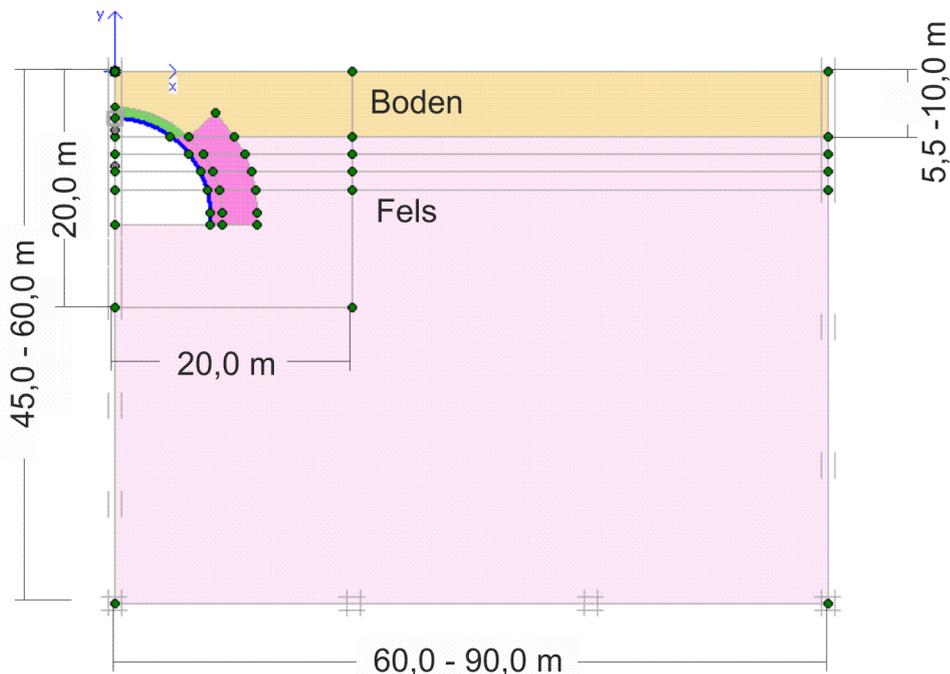


Abb. 3.5: Bodenschichtung und Modellgrößen für die weitere Berechnung

3.3 Die Modellgröße

Ein wichtiger Punkt bei der FE-Berechnung ist die Modellgröße. Das Modell soll groß genug sein, um eventuelle Einflüsse der Randbedingungen zu eliminieren und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Im weiteren Sinn ist jedoch darauf zu achten, dass das Modell nicht zu groß wird, da sich die Rechenzeiten der 3D Modelle sehr stark erhöhen bzw. das Modell aufgrund zu vieler Elemente nicht mehr berechnet werden kann.

Die benötigten Modellgrößen wurden mittels Modellstudien mit 2D-Berechnungen festgelegt. Die Auswertung erfolgte für die Setzung an der Oberfläche des Modells über der Tunnelfirste, sowie für die Normalkräfte und Biegemomente in der Tunnelschale. Für die Berechnung der Modellstudie wurden FE-Netze mit 15-knotigen Elementen verwendet, die jedoch in weiterer Folge für die Vergleichbarkeit mit den 3D-Berechnungen auf 6-knotige Elemente reduziert wurden.

Die Netze der Modellstudie wurden in den Berechnungen im Bereich des Tunnels verfeinert, um das Verhalten des Ausbruchs besser abbilden zu können

Die Berechnungsschritte der Modellstudie gliedern sich wie folgt:

- Rohrschirm
- Vorentlastung von 50% ($M_{stage}=0,5$)
- Vollausbuch Tunnelquerschnitt + Einbau Spritzbeton jung

Die Modellgröße für den oberflächennahen Tunnel in Abb. 3.5 wurde anhand der Modellstudie mit einer Breite von 60 m und einer Tiefe von 45 m festgelegt. Der tieferliegende Tunnel mit einer Überdeckung von 30 m wird mit einer Modellbreite von 90 m und einer Modelltiefe von 60 m berechnet.

Es werden auch die Empfehlungen des Arbeitskreis 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ [1] eingehalten. Der horizontale Abstand des Modellrandes zur Tunnelachse ist mit vier bis fünf Mal dem Tunneldurchmesser und die Modelltiefe unter dem Tunnel mit zwei bis drei Durchmessern als Richtwert angegeben.

3.4 Vergleich Tunnelgeometrie und vereinfachte Geometrie

Der Vergleich der Tunnelgeometrie und der vereinfachten Geometrie erfolgt über eine Gegenüberstellung der Firstverformung der beiden Modelle nach einer Vorentlastung von 50%.

Der Tunnel mit der Tunnelgeometrie ergab eine Verformung von ca. 4 mm. Im Vergleich dazu wurde mit der vereinfachten Geometrie und den gleichen Eingangsparametern nur eine Verformung von 2 mm berechnet. Der Unterschied von der Firstverformung der

Tunnelgeometrie und der vereinfachten Geometrie beträgt somit 50%. Es ist ersichtlich, dass die Firstverformung entscheidend von der Geometrie des Tunnels abhängt.

3.5 Das FE-Netz

3.5.1 Plaxis 2D

Die Außenkante des Ankerbereichs weist einen kreisförmigen Verlauf mit einem Radius von zwölf Metern und einen Mittelpunkt bei einem Meter über der Sohle in der Symmetrieebene auf. Bei der Modellierung dieses Kreisbogens werden um den Koordinatenursprung sehr verzerrte Elemente generiert. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wird der Kreisbogen über einen Polygonzug angenähert. Die Schnittpunkte des Kreisbogens mit den Geometrielinien der Bodenschichten dienen als Punkte für das Polygon. Dadurch wird eine gleichmäßigere Diskretisierung erreicht.

Das 2D-Modell wird als ebener Dehnungszustand abgebildet mit $\varepsilon_z=0$. Dies entspricht einem Tunnel mit unendlich langer Ausdehnung und gleichbleibender Belastung.

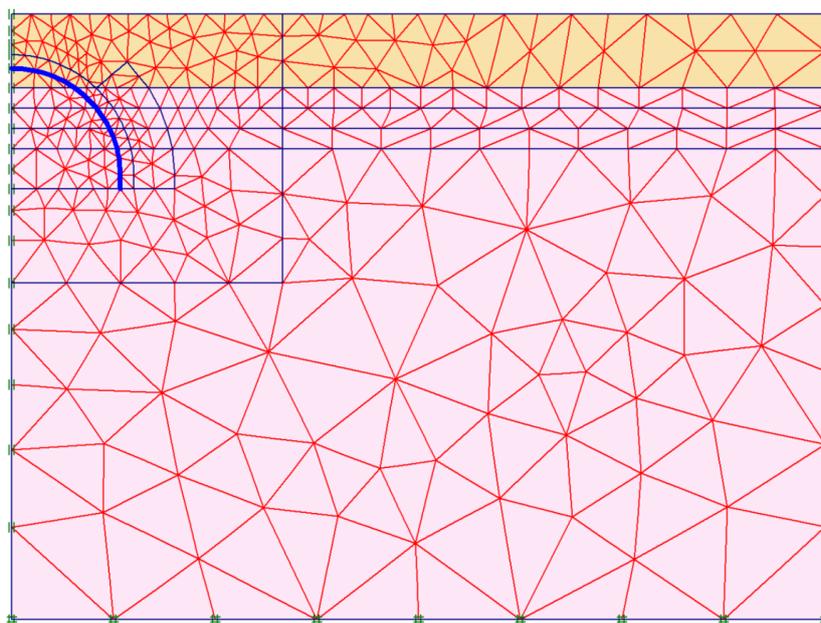


Abb. 3.6: 2D FE-Netz oberflächennaher Tunnel

Die Randbedingungen für die einzelnen Modelle sind gleich. Der untere Modellrand ist in beide Richtungen fest gehalten. Die seitlichen Ränder werden in horizontaler Richtung gehalten und sind in vertikaler Richtung verschieblich gelagert. Der obere Rand des Modells ist frei in alle Richtungen. Aufgrund der vertikalen Symmetrieachse wird nur die Hälfte des Tunnels für die Berechnung abgebildet.

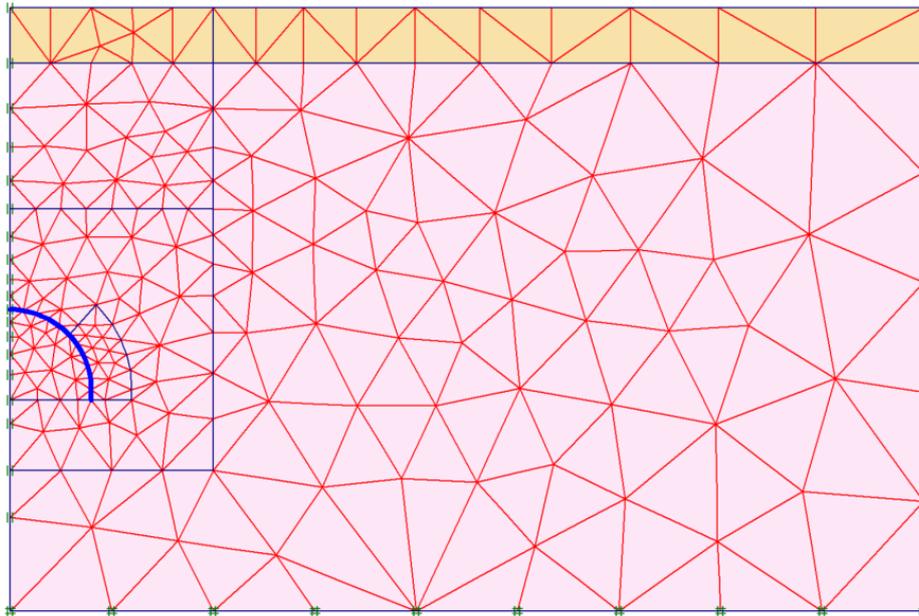


Abb. 3.7: 2D FE-Netz tieferliegender Tunnel

Die Schichtdicke des Bodens für den oberflächennahen Tunnel variiert in den Berechnungen in 1,5 m Schritten von 5,5 m bis 10,0 m. Die Geometrielinien sind bereits in das Modell integriert um den späteren Schichtwechsel leichter zu ermöglichen und dabei das FE-Netz beizubehalten.

Während bei einer erneuten Generierung des FE-Netzes in Plaxis 2D alle Berechnungsphasen automatisch aktualisiert werden, sind diese in Plaxis 3D Tunnel neu einzugeben. Das in Abb. 3.6 dargestellte Netz des oberflächennahen Tunnels besteht aus 595 Elementen.

Beim Modell „tieferliegender“ Tunnel (siehe Abb. 3.7) erfolgt die Diskretisierung des 2D-Modells mit 355 Elementen. Die geringere Anzahl der Elemente gegenüber dem oberflächennahen Tunnel beruht auf den unterschiedlichen Modelllängen der 3D-Modelle. Da dieser Tunnel eine Überdeckung von 30 m besitzt, ist ein längeres Modell für die Ausschaltung der Einflüsse der Randbedingungen erforderlich. Im 3D-Modell kann nur eine bestimmte Anzahl von Elementen berechnet werden. Deshalb musste im Querschnitt die Anzahl der Elemente verringert werden, um in dem vergrößerten 3D-Modell die praktisch handhabbare Elementanzahl von 65.000 Elementen nicht zu überschreiten.

3.5.2 Plaxis 3D Tunnel

Die Erstellung des Netzes erfolgt nach den gleichen Gesichtspunkten wie in Plaxis 2D.

Als Ausgangsnetz für die Generierung des 3D Netzes dient eine Ebene in 2D. Diese Ebene entspricht im Wesentlichen dem Netz des 2D-Modells. Durch Parallelverschiebung in z-Richtung wird die 2D-Ebene in ein 3D Netz übergeführt.

Der Abstand der einzelnen Ebenen beträgt auf einer Länge von 100 m jeweils einen Meter. Im Anschluss daran sind für den oberflächennahen Tunnel noch fünf weitere Ebenen mit zehn Metern Abstand eingefügt. Die Anzahl der benötigten Elemente für dieses Modell beträgt 61.845 (siehe Abb. 3.8).

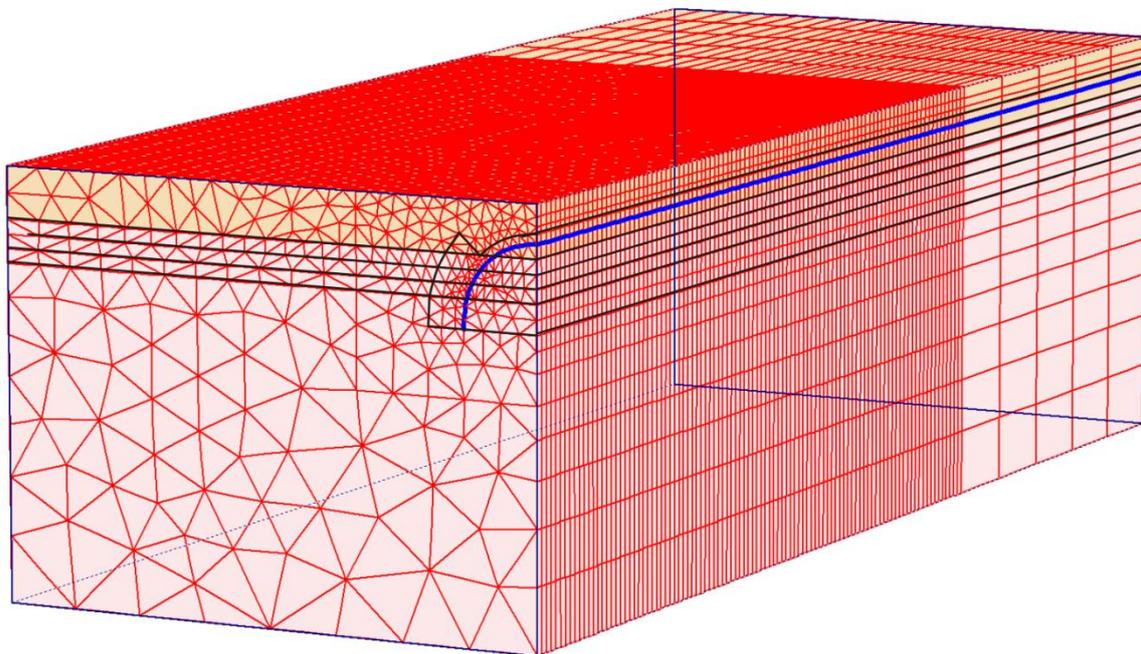


Abb. 3.8: 3D FE-Netz für oberflächennahen Tunnel mit Strukturen

Die Berechnung des tieferliegenden Tunnels benötigt ein größeres Modell um den Einfluss der Randbedingungen zu eliminieren und eine gleichbleibende Setzung zu erreichen. Der Abstand der ersten und letzten drei Ebenen beträgt zehn Meter. Dazwischen befinden sich 130 m mit einem Abstand von einem Meter je Ebene, was eine Gesamtlänge von 170 m ergibt. Dieses FE-Netz besteht aus insgesamt 63.918 Elementen.

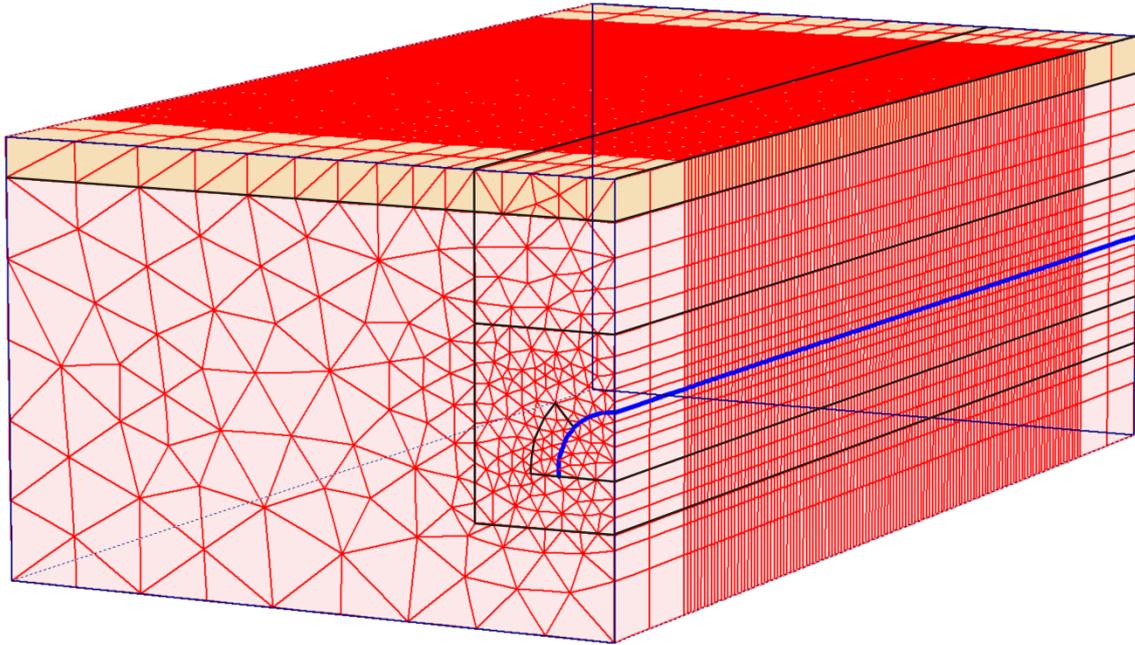


Abb. 3.9: 3D FE-Netz für tieferliegenden Tunnel mit Strukturen

3.6 Berechnungsablauf 2D Modell

Die Berechnung mit den ermittelten Vorentlastungsfaktoren aus der 3D-Berechnung erfolgt in einem ebenen Modell. Zur Simulation der Ausbruchvorgänge werden die dafür benötigten Schritte in aufeinanderfolgende Phasen unterteilt. Diese Berechnungsschritte gliedern sich in folgende Punkte:

- Einbau Rohrschirm
- Vorentlastung Mstage = ?
- Vollausbuch Tunnelquerschnitt, Aktivierung der Tunnelschale mit der Steifigkeit Spritzbeton jung, Kohäsionserhöhung im Ankerbereich

oder

- Einbau Rohrschirm
- Vorentlastung Mstage = ?
- Vollausbuch Tunnelquerschnitt, Aktivierung der Tunnelschale mit der Steifigkeit Spritzbeton alt, Kohäsionserhöhung im Ankerbereich

Es erfolgt hier eine Unterteilung in zwei Berechnungen für den Spritzbeton jung und Spritzbeton alt. Werden diese zwei Phasen in einer Berechnung nacheinander berechnet, so ergeben sich für die zweite Phase keine neuen Setzungen bzw. Schnittkräfte in der Tunnelschale, da nur ein Materialwechsel, jedoch kein Lastwechsel vorgenommen wird. In beiden Fällen wird die Berechnung mit Mstage = 1 abgeschlossen.

3.7 Berechnungsablauf 3D Modell

Der Tunnelquerschnitt wird als gesamter Querschnitt mit einer Abschlagslänge von 2 m ausgebrochen. Die einzelnen Abschläge sind in zwei Scheiben in z-Richtung unterteilt, was eine Elementdicke von einem Meter ergibt. Der Berechnungsablauf der 3D Modelle gliedert sich wie folgt:

- Einbau Rohrschirm 14 m vorausseilend, Abstand Rohrschirmende zur Ortsbrust mindestens 2 m
- Vollausbuch Tunnelquerschnitt in i und $i+1$:
 - Erhöhung der Kohäsion der Bodenschicht Boden an der Ortsbrust in $i+2$ und $i+3$
 - Deaktivierung der Bodencluster im Tunnelquerschnitt in i und $i+1$
 - Aktivierung der Tunnelschale mit den Materialparametern Spritzbeton jung in $i-1$ und $i-2$
 - Kohäsionserhöhung in der Ulme im Ankerbereich in $i-1$ und $i-2$
 - Erhöhung der Steifigkeit der Tunnelschale von Spritzbeton jung auf Spritzbeton alt in $i-3$ und $i-4$

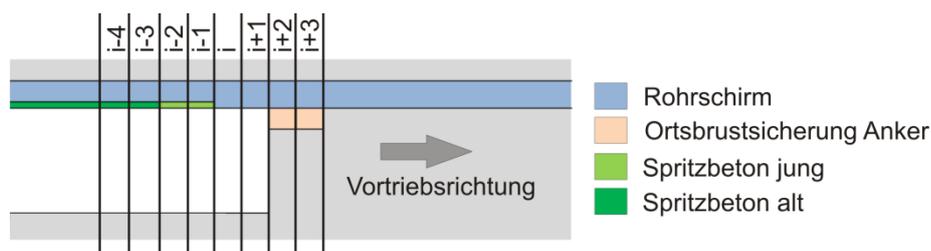


Abb. 3.10: Schema Berechnungsablauf, eine Phase

Der Einbau des Rohrschirms erfolgt überschneidend. Das heißt, wenn sich das Rohrschirmende im Abstand von zwei Metern vor der Ortsbrust befindet, wird bereits der nächste Abschnitt mit 14 m aktiviert, wobei effektiv nur zwölf Meter zusätzlich wirken und sich zwei Meter überschneiden.

Beim tieferliegenden Tunnel erfolgt die Berechnung analog zur vorangestellten Gliederung, jedoch mit dem Unterschied, dass kein Rohrschirm zur Anwendung kommt.

4 Der Vorentlastungsfaktor

Ein sehr häufig verwendetes Verfahren zur Abbildung von räumlichen bzw. zeitabhängigen Einflüssen in 2D-Modellen ist das Stützlastverfahren. Hierbei gliedert sich die Berechnung in zwei Phasen. In der ersten Phase wird ein Cluster im Modell deaktiviert und Kräfte in den vorhandenen freien Knoten aufgebracht, die dem initiellen Spannungszustand p_{init} entsprechen. Diese Knotenkräfte werden durch einen Vorentlastungsfaktor $1-\beta$ reduziert. Der Ansatz von β für diese sogenannte Vorentlastung beruht entweder auf Erfahrung oder er wird über 3D Berechnungen ermittelt. Er kann auch über Messergebnisse während des Baus eines Tunnels für weitere Berechnungen kalibriert werden.

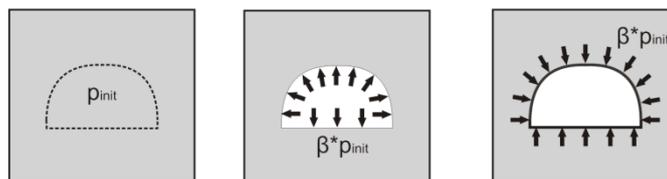


Abb. 4.1: Schema Stützlastverfahren

In der zweiten Phase, einem weiteren Berechnungsschritt, werden die noch vorhandenen Kräfte $\beta \cdot p_{init}$ auf die nun eingebaute Tunnelschale und den umgebenden Boden gleichmäßig aufgebracht. Es ergeben sich somit zusätzliche Verformungen, die Schnittkräfte in der Tunnelschale verursachen. In Plaxis wird diese Vorentlastung über die Eingabe von M_{stage} gesteuert. M_{stage} entspricht dabei dem Vorentlastungsfaktor:

$$M_{stage} = 1 - \beta$$

Je nach Ansatz des Vorentlastungsfaktors werden die Schnittkräfte in der Tunnelschale ermittelt. Kleine Faktoren für β bedeuten einen späteren Einbau der Tunnelschale und führen somit zu geringeren Schnittgrößen und größeren Verformungen des Ausbruchquerschnitts. Umgekehrt ergeben größere Faktoren für β kleinere Verformungen und größere Schnittkräfte, da die Last früher auf die Tunnelschale einwirkt. Der Vorentlastungsfaktor spiegelt im übertragenen Sinn auch die Zeit wieder, die zwischen dem Ausbruch des Tunnelquerschnitts und dem Einbau der Spritzbetonschale vergeht. Der Vorentlastungsfaktor kann einen Wert von $0 < \beta < 1$ annehmen. Null bedeutet, dass keine Spritzbetonschale eingebaut wird und eins bedeutet, dass keine Entspannung des umgebenden Gebirges erfolgt, bevor die Tunnelschale eingebaut wird und somit alle Kräfte auf die Tunnelschale einwirken.

Es gibt noch weitere Verfahren, um diesen Effekt abzubilden. Im sogenannten Stützkernverfahren wird zum Beispiel die Steifigkeit des Bodens im Ausbruchquerschnitt reduziert.

4.1 Ausgangswerte aus der 3D-Berechnung

Die Berechnung des Vorentlastungsfaktors erfolgt an drei Messquerschnitten des 3D Modells. Hierbei werden die Ebenen bei 52 m, 53 m und 54 m für den oberflächennahen Tunnel herangezogen. Beim tieferliegenden Tunnel sind dies analog die Stationen 84 m, 85 m und 86 m. Diese Ebenen befinden sich außerhalb der beeinflussenden Randbedingungen und bilden einen Ausbruchsritt von zwei Metern ab. Die y-Achse ist nach oben positiv, das heißt das Setzungen als negative Werte auftreten.

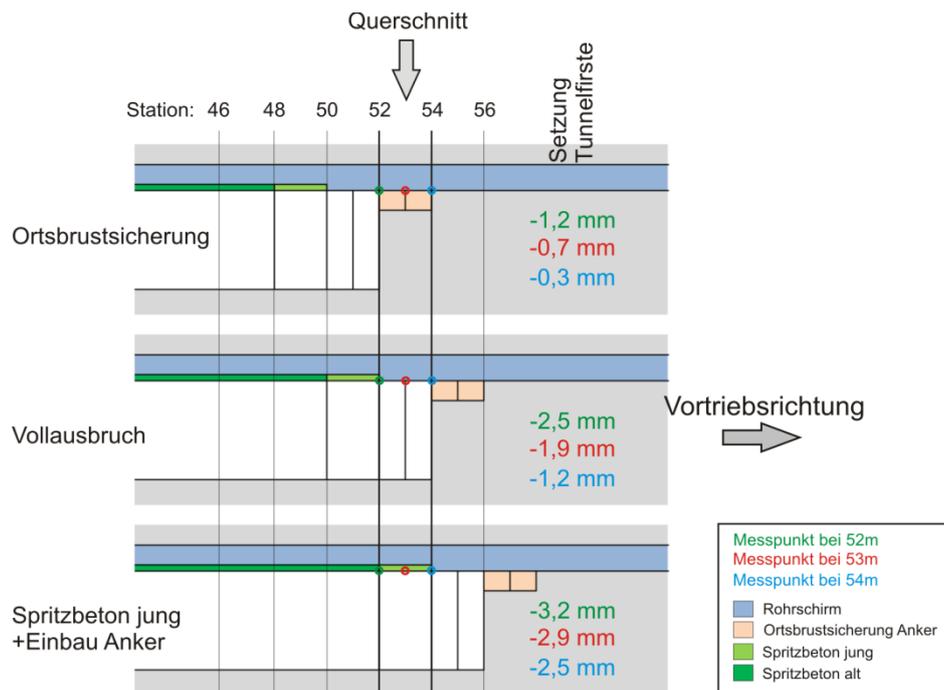


Abb. 4.2: Auftretende Setzungen beim Ausbruchvorgang

In Abb. 4.2 sind die drei aufeinanderfolgenden Schritte des Ausbruchvorganges der Berechnung dargestellt. Die erste Phase zeigt den Ausbruch von 50 m bis 52 m, die Zweite den Ausbruch von 52 m bis 54 m und die Dritte den Ausbruch von 54 m bis 56 m. Im Querschnitt von 52 m bis 54 m sind die jeweiligen Auswirkungen der in den Phasen durchgeführten Steifigkeits- bzw. Materialänderungen ersichtlich. Die Darstellung und die angegebenen Verformungen beziehen sich auf das Ende dieser Phase. Für den tieferliegenden Tunnel gilt diese Beziehung analog im Querschnitt von 84 m bis 86 m.

Die Verformungen der Tunnelfirste in den einzelnen Phasen sind in den Farben der Messpunkte dargestellt. Die angegebenen Werte stammen aus der 3D-Berechnung des Tunnels mit der Schichtdicke des Bodens von 5,5 m bei Station 53 m. Diese Werte dienen zur Kalibrierung der Vorentlastung für die 2D-Berechnung.

Es ist darauf zu achten, dass die Station bei 54 m nicht mit dem Grundgedanken der eigentlichen Vorentlastung konform ist, da sie sich nach dem Ausbruch in dieser Phase noch an der Ortsbrust befindet.

4.2 Berechnung der Vorentlastungsfaktoren über das Verhältnis der 3D-Firstverformungen

Die erste Ermittlung der Vorentlastungsfaktoren basiert auf dem Verhältnis von Setzungen aus der 3D-Berechnung wie folgt:

$$M_{stage} = \frac{U_{y, \text{Beginn Spritzbeton jung}}}{U_{y, \text{steady state}}}$$

In weiterer Folge werden anhand des Messquerschnittes bei 53 m die Zusammenhänge näher erläutert. $U_{y, \text{Beginn Spritzbeton jung}}$ stellt die Verformung nach Vollausbuch des Tunnelquerschnitts vor Einbau des Spritzbetons jung dar. In Abb. 4.3 ist die Firstverformung in Abhängigkeit vom Ausbruchfortschritt dargestellt. $U_{y, \text{steady state}}$ ist die Gesamtverformung nach Abschluss des kompletten Tunnelausbruchs und Einbau der Tunnelschale mit den Eigenschaften von Spritzbeton alt.

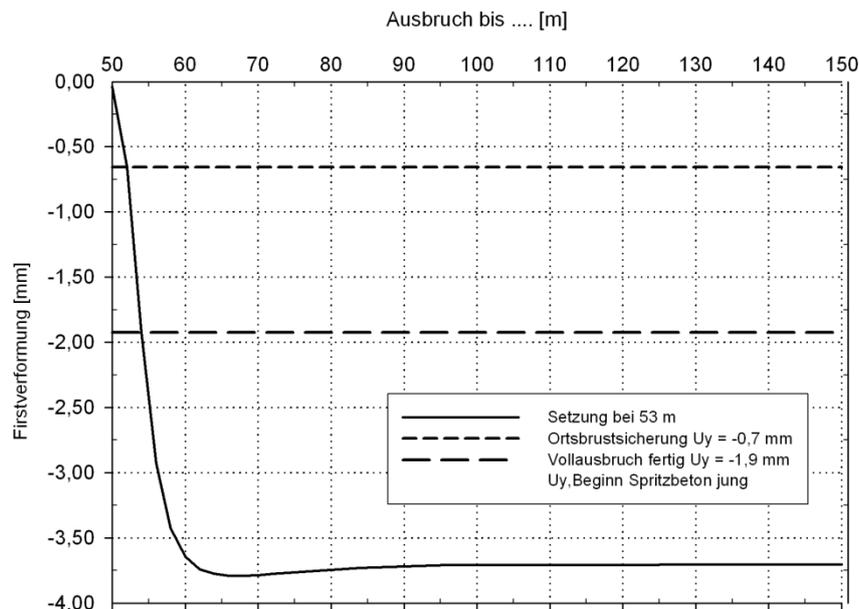


Abb. 4.3: Setzungen Tunnelfirste, Messpunkt bei 53 m, oberflächennaher Tunnel, Boden: 5,5 m

Die Endsetzung der Tunnelfirste wird als Mittelwert der Setzungen im „steady state“ Zustand angegeben. In Abb. 4.4 ist der Einfluss des Rohrschirms auf die Setzungen im Längsschnitt ersichtlich. Nach Aktivierung des Rohrschirms für den nächsten Abschnitt sind die Setzungen geringer als am Ende dieses Abschnitts, was die Schwankungsbreite von -3,6 mm bis -4,0 mm erklärt.

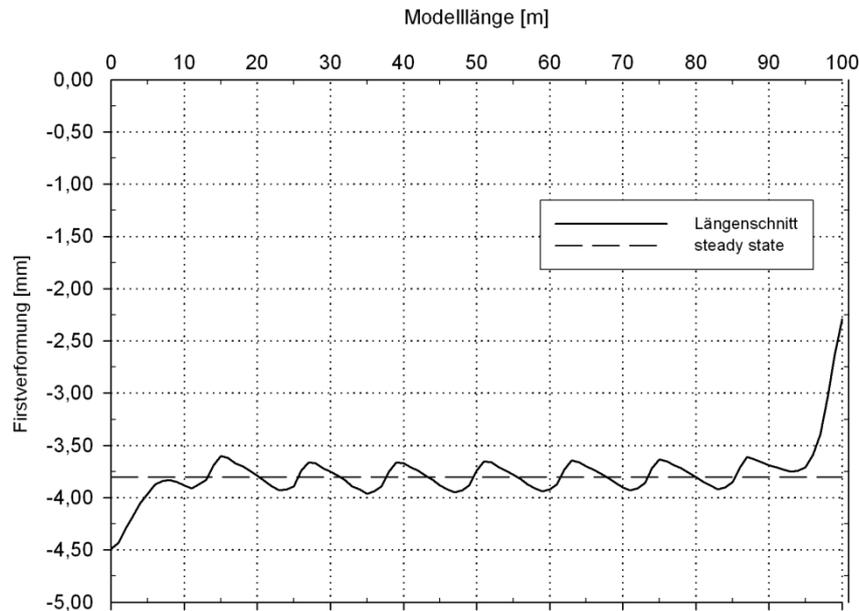


Abb. 4.4: Verformungsschwankungen in Abhängigkeit der Lage des Ausbruchsquerschnitts zum Einbau des Rohrschirms

Die Endsetzung für den Messquerschnitt bei 53 m ergibt sich zu $U_y, steady state = -3,8$ mm. Aus dem Setzungsverhältnis der Firstverformungen ergibt sich folgende Vorentlastung:

$$M_{stage} = \frac{-1,9}{-3,8} = 0,51$$

Die Endsetzungen im tieferliegenden Tunnel werden analog zum oberflächennahen Tunnel als Mittelwert der Setzungen im „steady state“ Bereich angenommen. Es treten auch hier kleinere Schwankungen in den Verformungen auf, die jedoch nicht das Ausmaß der Berechnung mit dem Rohrschirm annehmen und auf die einzelnen Abschlüge im Tunnelausbruch zurückzuführen sind.

Mit dem ermittelten Vorentlastungsfaktor wird die Berechnung der Tunnel im 2D-Modell durchgeführt. Für die Endsetzung wird, wie bereits vorher beschrieben, mit den Eigenschaften für Spritzbeton jung oder Spritzbeton alt die Berechnung zu Ende geführt.

In Tab. 4.1 sind die Ergebnisse der 2D-Berechnung mit den Ergebnissen aus der 3D-Berechnung für die betrachteten Stationen der Modelle gegenübergestellt. Die endgültige Firstverformung der 2D-Berechnung, die mit $U_y, steady state$ aus der 3D-Berechnung vergleichbar ist, wird zwischen $U_y, SB\ jung$ und $U_y, SB\ alt$ angenommen.

$U_y, steady state$ wird in der Tabelle mit der zugehörigen Schwankungsbreite der 3D-Setzungen angegeben. Alle angegebenen Werte wurden nach der Berechnung auf eine Stelle bzw. bei M_{stage} auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet.

3D Berechnung						2D Berechnung mit erhaltenem Mstage		
Schichtdicke Boden	Station [m]	Uy, Beginn SB jung [mm]	Uy, steady state [mm]		Mstage [-]	Uy, Vorentlastung [mm]	Uy, SB jung [mm]	Uy, SB alt [mm]
5,5 m, vereinfachte G.	52 m	-2,5	-3,8	min. -3,6	0,65	-4,6	-6,3	-5,5
	53 m	-1,9		max. -4,0	0,51	-2,5	-4,3	-3,4
5,5 m, Tunnelgeometrie	52 m	-4,0	-6,5	min. -6,3	0,61	-12,1	-14,9	-13,7
	53 m	-3,0		max. -6,8	0,46	-3,5	-7,2	-5,6
7,0 m, vereinfachte G.	52 m	-4,2	-6,3	min. -6,0	0,66	collapse, Mstage=0,65		
	53 m	-3,4		max. -6,6	0,54	-16,9	-18,9	-18,0
8,5 m, vereinfachte G.	52 m	-5,6	-8,8	min. -8,4	0,64	collapse, Mstage=0,53		
	53 m	-4,7		max. -9,1	0,54	collapse, Mstage=0,53		
10,0 m, vereinfachte G.	52 m	-7,4	-11,2	min. -11,3	0,66	collapse, Mstage=0,51		
	53 m	-6,3		max. -12,3	0,56	collapse, Mstage=0,51		
5,5 m, vereinfachte G., Überdeckung 30,0m	84 m	-2,9	-5,2	min. -5,2	0,55	-3,1	-5,4	-5,2
	85 m	-2,4		max. -5,2	0,46	-2,6	-5,3	-5,0

Tab. 4.1: Ergebnisse Vorentlastung aus Verformungsverhältnis 3D-Berechnung an der Tunnelfirste und Ergebnisse aus der 2D-Berechnung mit Mstage

Es ist ersichtlich, dass teilweise die Firstverformungen U_y , Vorentlastung der 2D-Berechnung stark von der 3D-Berechnung abweichen. Teilweise kam es bereits bei geringeren Vorentlastungen als bei der Berechnung ermittelt zum Versagen des Modells.

Mit der Berechnung der Vorentlastung über das Verhältnis der Firstverformungen kann somit bei oberflächennahen Tunneln kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. In der 2D-Berechnung sind die Firstverformungen teilweise 200 % höher als in der 3D-Berechnung.

Für den tieferliegenden Tunnel mit 30 m Überdeckung entsprechen die Firstverformungen der 2D-Berechnung denen der 3D-Berechnung. Die Werte für die Vorentlastung variieren in den Messpunkten um 18 % von 0,46 bis 0,55. Daher ist es schwierig, einen Vorentlastungsfaktor für den gesamten Tunnel anzugeben, da er von der Lage des betrachteten Punktes im Ausbruchquerschnitt abhängig ist.

Ergänzend wurde mit dieser Methode auch das Setzungsverhältnis für zwei Modelle mit den Setzungen an der Oberfläche in der Symmetrieachse ermittelt. In Tab. 4.2 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

3D Berechnung						2D Berechnung mit Mstage		
Schichtdicke Boden	Station [m]	Uy, Beginn SB jung [mm]	Uy, steady state [mm]		Mstage [-]	Uy, Vorentlastung [mm]	Uy, SB jung [mm]	Uy, SB alt [mm]
5,5 m, vereinfachte G.	52 m	-1,9	-3,3	min. -3,2	0,57	-2,4	-4,0	-3,2
	53 m	-1,4		max. -3,4	0,43	-1,8	-3,5	-2,7
5,5 m, vereinfachte G., Überdeckung 30,0m	84 m	-1,2	-2,6	min. -2,6	0,46	-1,3	-2,7	-2,6
	85 m	-1,2		max. -2,6	0,44	-1,2	-2,7	-2,6

Tab. 4.2: Ergebnisse Vorentlastung aus Setzungsverhältnis 3D-Berechnung an der Oberfläche und Ergebnisse aus der 2D-Berechnung mit Mstage

Die Ergebnisse der 3D-Berechnung entsprechen beim oberflächennahen Tunnel nur im Endzustand in Station 52 m und 53 m den Ergebnissen der 2D-Berechnung. Bei der Verformung U_y , Vorentlastung ergibt sich im Vergleich der 2D-Berechnung mit der 3D-Berechnung keine Übereinstimmung.

Beim tieferliegenden Tunnel stimmen die Ergebnisse der Vorentlastung und der Endsetzung auch in der 2D-Berechnung überein.

Die Schwankungsbreite der Vorentlastungsfaktoren für den tieferliegenden Tunnel beträgt nur vier Prozent. Für diesen Tunnel kann der Vorentlastungsfaktor durch das Verhältnis der Firstverformungen rechnerisch ermittelt werden.

4.3 Kalibrierung der Firstsetzung der 2D-Berechnung an der 3D-Berechnung

Die Berechnung der Vorentlastungsfaktoren über das Setzungsverhältnis lieferte für den oberflächennahen Tunnel keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Daher wird eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Vorentlastung vorgestellt.

Diese Möglichkeit stellt die iterative Kalibrierung der Vorentlastungsfaktoren über die Verformungen der 2D-Berechnung an der 3D-Berechnung dar. Dabei wird die Verformung U_y , *Beginn SB jung* in der 2D-Berechnung mit dem Wert der Vorentlastung so eingestellt, dass die Verformungen am jeweiligen Punkt mit der 3D-Berechnung übereinstimmen.

Nach dieser Kalibrierung wird mit den Eigenschaften der Tunnelschale für Spritzbeton jung bzw. Spritzbeton alt die Berechnung fortgesetzt und beendet.

In Tab. 4.3 erfolgt die Gegenüberstellung der einzelnen Berechnungen mit den kalibrierten Vorentlastungsfaktoren an der Tunnelfirste.

In blau sind die erhaltenen Firstsetzungen aus der 3D-Berechnung und deren zugehörige Bandbreite angegeben. Der Bereich mit der roten Markierung enthält die Firstverformungen der 2D-Berechnung mit den kalibrierten Vorentlastungsfaktoren.

Die Werte für die *steady state*-Setzung aus der 3D-Berechnung müssen zwischen den Werten U_y , *SB jung* und U_y , *SB alt* liegen.

Schichtdicke Boden	Station [m]	3D Berechnung			2D Berechnung			
		U_y , Beginn SB jung [mm]	U_y steady state, 3D Berechnung [mm]		Mstage [-]	U_y , Vorentlastung [mm]	U_y , SB jung [mm]	U_y , SB alt [mm]
5,5 m, vereinfachte G.	52 m	-2,5	-3,8	min. -3,6	0,52	-2,5	-4,3	-3,4
	53 m	-1,9		max. -4,0	0,39	-1,9	-3,9	-3,0
5,5 m, Tunnelgeometrie	52 m	-4,0	-6,5	min. -6,3	0,50	-4,0	-7,6	-6,0
	53 m	-3,0		max. -6,8	0,40	-3,0	-6,8	-5,2
7,0 m, vereinfachte G.	52 m	-4,2	-6,3	min. -6,0	0,16	-4,2	-6,7	-5,6
	53 m	-3,4		max. -6,6	0,13	-3,4	-6,0	-4,9
8,5 m, vereinfachte G.	52 m	-5,6	-8,8	min. -8,4	0,14	-5,6	-8,5	-7,2
	53 m	-4,7		max. -9,1	0,12	-4,7	-7,6	-6,3
10,0 m, vereinfachte G.	52 m	-7,4	-11,2	min. -11,3	0,14	-7,4	-10,7	-9,2
	53 m	-6,3		max. -12,3	0,12	-6,3	-9,6	-8,1
5,5 m, vereinfachte G., Überdeckung 30,0m	84 m	-2,9	-5,2	min. -5,2	0,51	-2,9	-5,3	-5,1
	85 m	-2,4		max. -5,2	0,43	-2,4	-5,3	-5,0

Tab. 4.3: Ergebnisse Vorentlastung aus Kalibrierung 2D U_y , Vorentlastung auf 3D U_y , *Beginn SB jung* an der Tunnelfirste

Beim oberflächennahen Tunnel liegen die Endverformungen bis zu einer Schichtdicke des Bodens von 7,0 m zumindest bei der Station 52 m zwischen den Verformungen U_y , $SB\ jung$ und U_y , $SB\ alt$. Bei den größeren Schichtdicken ergibt sich selbst bei der Berechnung mit der geringen Steifigkeit des Spritzbeton jung keine Übereinstimmung der Endverformungen.

Im Gegensatz dazu liegen beim tieferliegenden Tunnel auch die Endverformungen in Station 84 m und 85 m der 3D-Berechnung im Bereich der 2D-Berechnung.

Bei den Setzungen an der Oberfläche ergibt sich wieder das gleiche Bild wie bei der Berechnung der Vorentlastung über das Setzungsverhältnis unter Punkt 4.2. Beim tieferliegenden Tunnel befinden sich alle Setzungen der 3D-Berechnung mit annähernd gleichen Vorentlastungsfaktoren im Bereich der 2D-Berechnung im Endzustand. Für den oberflächennahen Tunnel gilt das nur bei der Station 52 m.

Schichtdicke Boden	Station [m]	3D Berechnung			2D Berechnung			
		U_y , Beginn SB jung [mm]	U_y steady state, 3D Berechnung [mm]		Mstage [-]	U_y , Vorentlastung [mm]	U_y , SB jung [mm]	U_y , SB alt [mm]
5,5 m, vereinfachte G.	52 m	-1,9	-3,3	min. -3,2	0,44	-1,9	-3,6	-2,7
	53 m	-1,4		max. -3,4	0,34	-1,4	-3,2	-2,4
5,5 m, vereinfachte G., Überdeckung 30,0m	84 m	-1,2	-2,6	min. -2,6	0,43	-1,2	-2,7	-2,5
	85 m	-1,2		max. -2,6	0,41	-1,2	-2,7	-2,5

Tab. 4.4: Ergebnisse Vorentlastung aus Kalibrierung 2D U_y , Vorentlastung auf 3D U_y , Beginn SB jung an der Oberfläche

In der Berechnung des Modells mit einer Schichtdicke von 10,0 m für den Boden ergaben sich in der 2D-Berechnung mit den geringeren Steifigkeiten für Spritzbeton jung Setzungen mit Werten unter denen der 3D-Berechnung. Um die Ursache dafür festzustellen, wurden im Anschluss linear-elastische Berechnungen durchgeführt.

4.4 Linear-elastische Berechnung für Schichtdicke Boden 10,0m

Für die linear-elastischen Berechnungen wurden die unter 3.2 angeführten Bodenparameter beibehalten und das verwendete Stoffgesetz von Mohr-Coulomb auf linear-elastisch geändert. Um den Einfluss einzelner Parameter im Modell festzustellen, wurden diese in der Berechnung variiert. Dazu zählt z.B. die Änderung der Dicke der Spritzbetonschale oder die Entfernung des Rohrschirms. In Tab. 4.5 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen angeführt.

Schichtdicke Boden		3D Berechnung				2D Berechnung			
		Uy, Beginn SB jung [mm]	Uy, steady state [mm]			Mstage [-]	Uy, Vorentlastung [mm]	Uy, SB jung [mm]	Uy, SB alt [mm]
10,0 m, vereinfachte G. Station 52m	linear-elast.	-6,8	-10,2	-9,8	-10,6	0,14	-6,8	-10,0	-8,6
	SB 15cm	-8,2	-13,0	-12,6	-13,4	0,17	-8,2	-13,2	-11,0
	SB 5cm	-10,9	-18,9	-18,5	-19,4	0,22	-10,9	-20,7	-16,9
	SB 1cm	-15,6	-31,4	-30,8	-32,0	0,32	-15,6	-35,3	-30,0
	ohne RS	-12,4	-18,1	-16,9	-18,8	0,18	-12,4	-17,3	-15,0
			min.	max.					

Tab. 4.5: Ergebnisse linear-elastische Berechnung, Verformung Uy an der Tunnelfirste

Der Einfluss der Plastizität auf die zuvor unterschiedlichen Endsetzungen der Berechnung konnte durch die linear elastische Berechnung mit der Dicke der Tunnelschale von 30 cm und unter Beibehaltung des Rohrschirms ausgeschlossen werden. Hier ergaben die Setzungen der Tunnelfirste wie bei der Berechnung mit Mohr-Coulomb keine Übereinstimmung.

Da bei der linear-elastischen Berechnung kein Versagen auftreten kann, wird die Berechnung noch einmal ohne Rohrschirm (ohne RS) wiederholt, um den Einfluss des Rohrschirms auf die Berechnung ebenfalls, wie zuvor die Plastizität, ausschließen zu können. Es ist ersichtlich, dass die Setzungen trotzdem zu gering sind.

In weiteren Berechnungen wurde die Dicke der Spritzbetonschale reduziert, um den Einfluss derselben zu ermitteln. Der ursprüngliche Rohrschirm bleibt bei dieser Berechnung ohne Änderungen erhalten. Es ist ersichtlich, dass bei der Berechnung mit 1 cm Spritzbetonschalendicke (annähernd keine Spritzbetonschale vorhanden) und bei 5 cm die Firstverformungen in der 2D-Berechnung erreicht werden. Die Spritzbetonschale mit 1cm wurde als Ersatz für eine Berechnung ohne Spritzbetonschale verwendet, da bei einer Geometrieänderung alle Berechnungsphasen in der 3D-Berechnung neu definiert werden müssen. Diese Annäherung an eine fehlende Spritzbetonschale wurde als ausreichend genau erachtet.

Der Einfluss auf die Berechnung im Modell mit Mohr-Coulomb ergibt sich somit aus der relativen Steifigkeit zwischen dem weichen Boden und der steifen Schale. Dadurch ergeben sich im 2D-Modell im Gegensatz zum 3D-Modell unterschiedliche Endsetzungen.

5 Auswertung der Schnittkräfte

Die Auswertung der Schnittkräfte erfolgt in der Tunnelschale für die Eigenschaften Spritzbeton jung und Spritzbeton alt. Es werden die Normalkräfte und die Biegemomente in der Tunnelschale der 2D- und der 3D-Berechnungen gegenübergestellt.

Der Vergleich der Schnittkräfte kann aufgrund unterschiedlicher Ausgabe der Ergebnisse der Programme Plaxis 2D und Plaxis 3D Tunnel nicht an derselben Stelle im Modell durchgeführt werden. In Plaxis 2D erfolgen die Ausgabe der Schnittkräfte und die Ausgabe der Verformungen an den Knotenpunkten der Elemente. Plaxis 3D Tunnel hingegen gibt die Schnittkräfte in den Gauß-Punkten der Mittelfläche der Plattenelemente aus und die Verformungen in den Knotenpunkten der Elemente.

Für den Vergleich erfolgt nun bei den 3D-Schnittkräften eine lineare Extrapolation in die Ebene der Knotenpunkte.

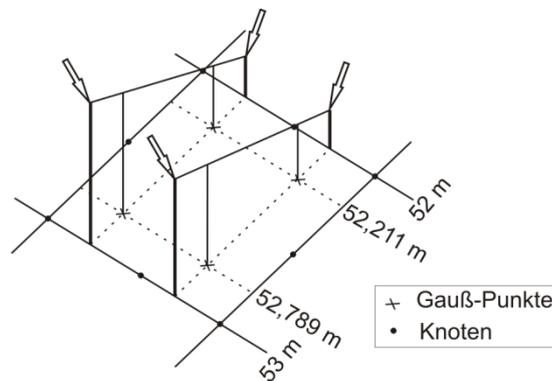


Abb. 5.1: Extrapolation der Schnittkräfte

Wie Abb. 5.1 zeigt, treten die so errechneten Werte nur in der Ebene der Knotenpunkte auf, nicht jedoch in den Knoten selbst.

5.1 Schnittkräfte in Abhängigkeit der Spritzbetoneigenschaften

In den vorherigen Berechnungen zur Ermittlung der Vorentlastungsfaktoren wurden die Eigenschaften des Spritzbetons nicht mehr geändert, sondern mit den jeweiligen Steifigkeiten zu Ende gerechnet. Dabei kann jedoch nicht ermittelt werden, welcher Anteil der Schnittkräfte im Spritzbeton jung und welcher im Spritzbeton alt auftritt.

Daher wird für die Aufteilung der Schnittkräfte ein weiterer Vorentlastungsfaktor eingeführt. Es handelt sich dabei um eine nicht vollendete Berechnungsphase, an deren Ende die Steifigkeit in der Spritzbetonschale erhöht wird. Im Anschluss wird mit den Eigenschaften vom Spritzbeton alt die Berechnung beendet. Dieser Vorgang ist in Abb. 5.2 für die Setzungen dargestellt.

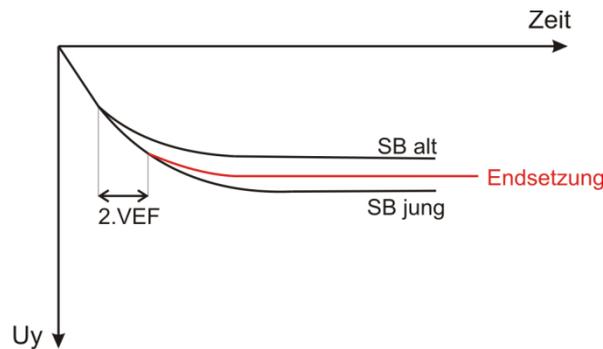


Abb. 5.2: Wechsel Spritzbeton jung zu Spritzbeton alt nach 2.Vorentlastung

Die Berechnungsschritte gliedern sich wie folgt:

- Einbau Rohrschirm
- Vorentlastung Mstage = ?
- Vollausbuch Tunnelquerschnitt, Aktivierung der Tunnelschale mit der Steifigkeit Spritzbeton jung, Kohäsionserhöhung im Ankerbereich, Mstage = ?
- Änderung der Steifigkeit der Tunnelschale von Spritzbeton jung zu Spritzbeton alt Mstage = 1

Der Vorentlastungsfaktor für den Spritzbeton jung wird so eingestellt, dass die Setzungen in der Tunnelfirste der 2D-Berechnung mit denen der 3D-Berechnung übereinstimmen. Für diesen Fall ergeben sich im Spritzbeton alt für den Endzustand im 2D-Modell teils geringere Setzungen.

Alternativ könnte die Berechnung des zweiten Vorentlastungsfaktors über die Setzungen der Tunnelfirste im Endzustand erfolgen. Dabei ergeben sich jedoch teils höhere Setzungen für den Zustand Spritzbeton jung.

	Uy aus 3D Berechnung [mm]	Mstage [-]	Uy aus 2D Berechnung [mm]	Uy aus 3D Berechnung [mm]	Mstage [-]	Uy aus 2D Berechnung [mm]
	Station 52 m, Boden 5,5 m, vereinfachte Geometrie			Station 53 m, Boden 5,5 m, vereinfachte Geometrie		
Vorentlastung	-2,5	0,51	-2,5	-1,9	0,39	-1,9
Spritzbeton jung + Anker	-3,2	0,48	-3,2	-2,9	0,60	-2,9
Spritzbeton alt (steady state)	-3,7 (-3,8)		-3,7	-3,7 (-3,8)		-3,4
	Station 84 m, Boden 5,5 m, vereinfachte G., 30 m Überdeckung			Station 85 m, Boden 5,5 m, vereinfachte G., 30 m Überdeckung		
Vorentlastung	-2,9	0,51	-2,9	-2,4	0,43	-2,4
Spritzbeton jung + Anker	-3,4	0,23	-3,4	-3,2	0,28	-3,2
Spritzbeton alt (steady state)	-5,2 (-5,2)		-5,1	-5,2 (-5,2)		-5,1

Tab. 5.1: Ergebnisse der Firstverformungen mit zwei Vorentlastungsfaktoren

In Tab. 5.1 sind die ermittelten Vorentlastungsfaktoren und die zugehörigen Firstverformungen der 2D-Berechnung dargestellt. Die Ergebnisse für die Vorentlastung und Spritzbeton jung + Anker stimmen in der 2D- und der 3D-Berechnung überein. In Station 52 m ergeben sich für den Endzustand dieselben Firstverformungen, die auch den „steady state“-Setzungen entsprechen. Bei Station 53 m tritt ein Unterschied von 0,4 mm zur Endsetzung in der 3D-Berechnung bei der Schichtdicke des Bodens mit

5,5 m auf. Beim Tunnel in 30 m Tiefe ist die Endsetzung nicht von der Station abhängig, da beide Berechnungen dieselben Ergebnisse liefern.

Für diese beiden Fälle (siehe Tab. 5.1) wurden die zugehörigen Oberflächensetzungen in Station 52 m verglichen. Beim oberflächennahen Tunnel ergab die 2D-Berechnung -3,3 mm und die 3D-Berechnung -3,2 mm. Der tieferliegende Tunnel ergab in 2D und in 3D jeweils die gleichen Verformungen von -2,2 mm. Somit werden auch die Oberflächensetzungen bei der Kalibrierung der Vorentlastung an der Firstverformung gut abgebildet.

Die Ergebnisse für die anderen Modelle, mit den unterschiedlichen Stärken der Bodenschicht, sind im Anhang A dargestellt. Dasselbe gilt für die Auswertung und den Vergleich der Schnittkräfte dieser Modelle.

5.2 Schnittkräfte für Schichtdicke Boden 5,5 m, vereinfachte Geometrie

Wie in Abb. 5.1 gezeigt, erfolgt die Auswertung der Schnittkräfte im 3D-Modell bei den Stationen 52, 53 und 54 m. In der 2D-Berechnung wurden die Vorentlastungsfaktoren über die Verformungen an den Stationen 52 m und 53 m kalibriert. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Firstverformungen an diesen Punkten für die Endsetzung, werden beide für die weitere Auswertung in 2D verwendet.

In den folgenden Diagrammen mit den Schnittkräften sind alle betrachteten Stationen der 3D-Berechnung mit ihrer Bezeichnung dargestellt. Zur besseren Unterscheidung der Ergebnisse werden die Bezeichnungen der 2D-Berechnung geändert.

Die in Station 52 m kalibrierten Firstverformungen der 2D-Berechnung werden mit 2D links bezeichnet und die in Station 53 m kalibrierten Firstverformungen werden mit 2D Mitte bezeichnet (siehe Abb. 5.3).

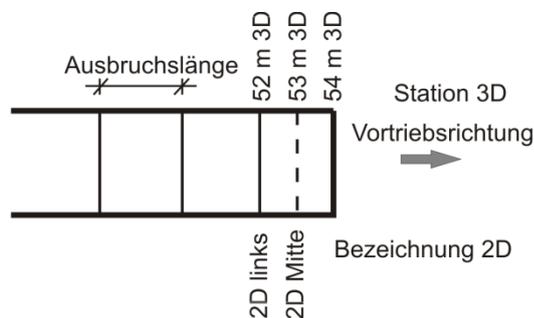


Abb. 5.3: Bezeichnungen für die Auswertung

Die Schnittkräfte werden in Umfangsrichtung vom Firstpunkt ausgehend dargestellt. Die auftretenden Druckkräfte werden mit negativen Vorzeichen angegeben.

5.2.1 Vergleich der Normalkräfte

In Abb. 5.4 sind die Normalkräfte für den Spritzbeton jung dargestellt. Der Verlauf der 3D-Normalkräfte ist in den betrachteten Stationen ähnlich. Die Normalkräfte an der Tunnelfirste ergeben eine Bandbreite von -225 kN/m bis -125 kN/m.

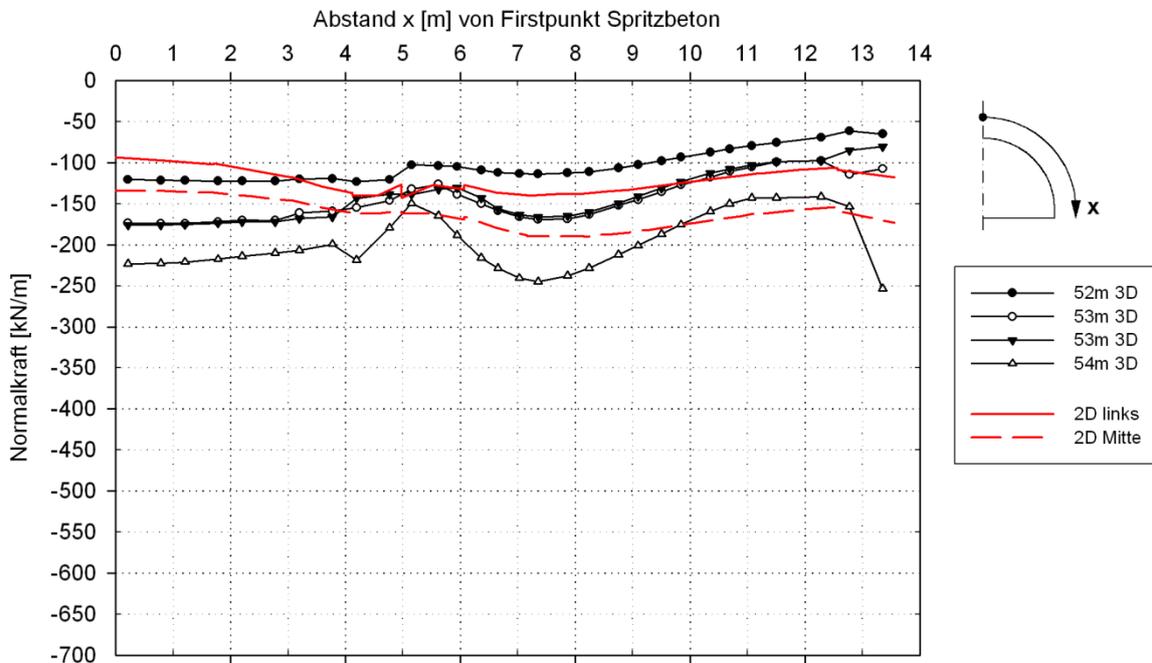


Abb. 5.4: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m

Die Normalkräfte in der Tunnelschale sind in der 3D-Berechnung bei Station 54 m höher als bei Station 52 m im betrachteten Ausbruchsquerschnitt. Diese höheren Normalkräfte sind in jedem Abschnitt (siehe Abb. 5.5) des Tunnelvortriebs zu beobachten.

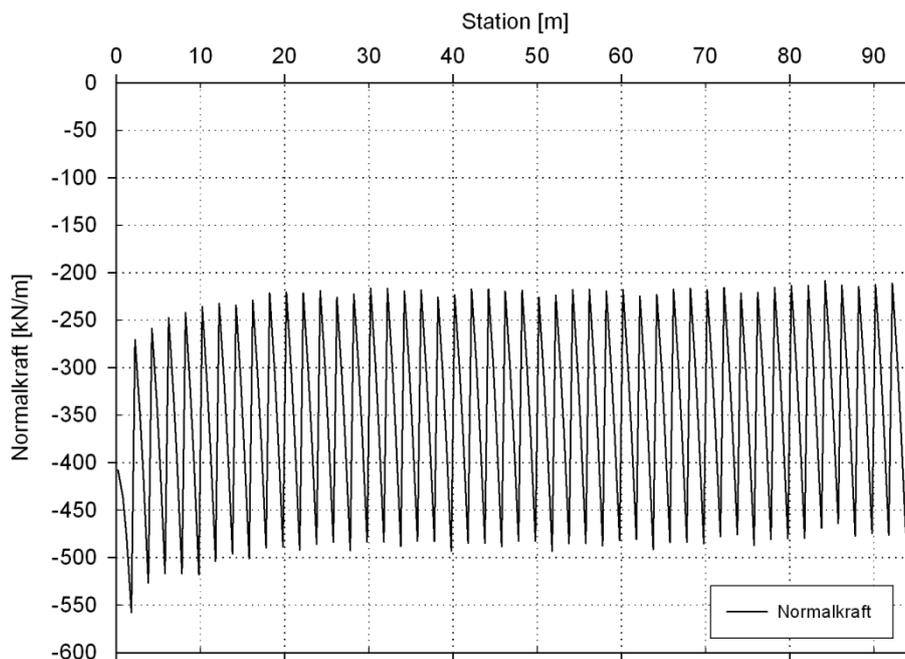


Abb. 5.5: Normalkraftverlauf Firstpunkt Spritzbeton jung, Längenschnitt

Der Effekt resultiert aus der Gewölbetragswirkung (Abb. 5.6) des umgebenden Bodens. Der ungestützte Abschlag und der Bereich vor der Ortsbrust stützen sich auf die Spritzbetonschale, wobei der größere Anteil auf den der Ortsbrust näheren Bereich wirkt.

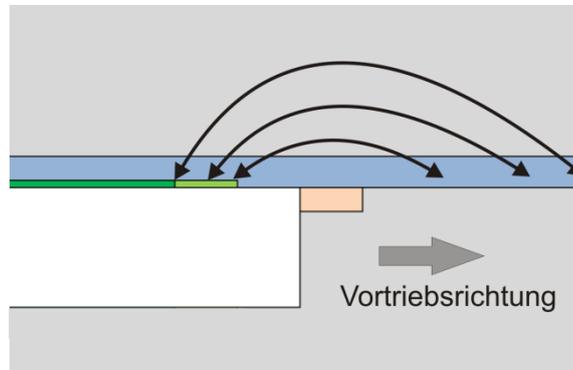


Abb. 5.6: Gewölbetragswirkung

Die 2D-Normalkräfte befinden sich im unteren bis mittleren Bereich der 3D-Normalkräfte. Der Verlauf der 2D-Normalkräfte ist im Ulmenbereich flacher als der 3D-Verlauf. Die Normalkräfte 2D-Mitte sind erwartungsgemäß etwas höher als in 2D-links.

Der Fußpunkt wird aufgrund von numerischen Einflüssen in der Berechnung nicht näher betrachtet.

Im Endzustand (siehe Abb. 5.7) befinden sich die Normalkräfte der 2D-Berechnung im mittleren bis unteren Bereich der 3D-Berechnung. Die Bandbreite erhöht sich auf -525 kN/m bis -195 kN/m.

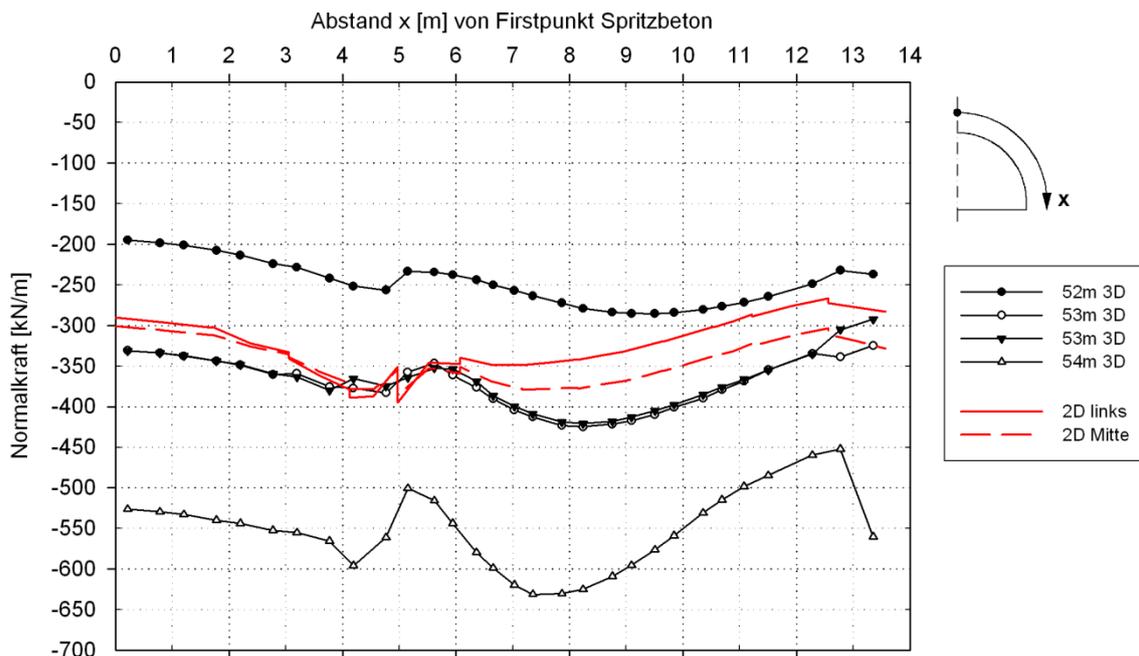


Abb. 5.7: Normalkraftverlauf Endzustand

5.2.2 Vergleich der Verformungsfiguren und Rückrechnung der Normalkräfte

Die Auswertung der Normalkräfte ergab unterschiedliche Verläufe über den Umfang des Tunnelquerschnitts, obwohl die Firstsetzungen in der 2D-Berechnung den Firstsetzungen der 3D-Berechnung entsprechen. In Abb. 5.8 erfolgt der Vergleich der Verformungsfiguren für den Boden mit einer Schichtdicke von 5,5 m, wobei negative Werte die Verschiebungen in Richtung des ausgebrochenen Tunnelquerschnitts darstellen.

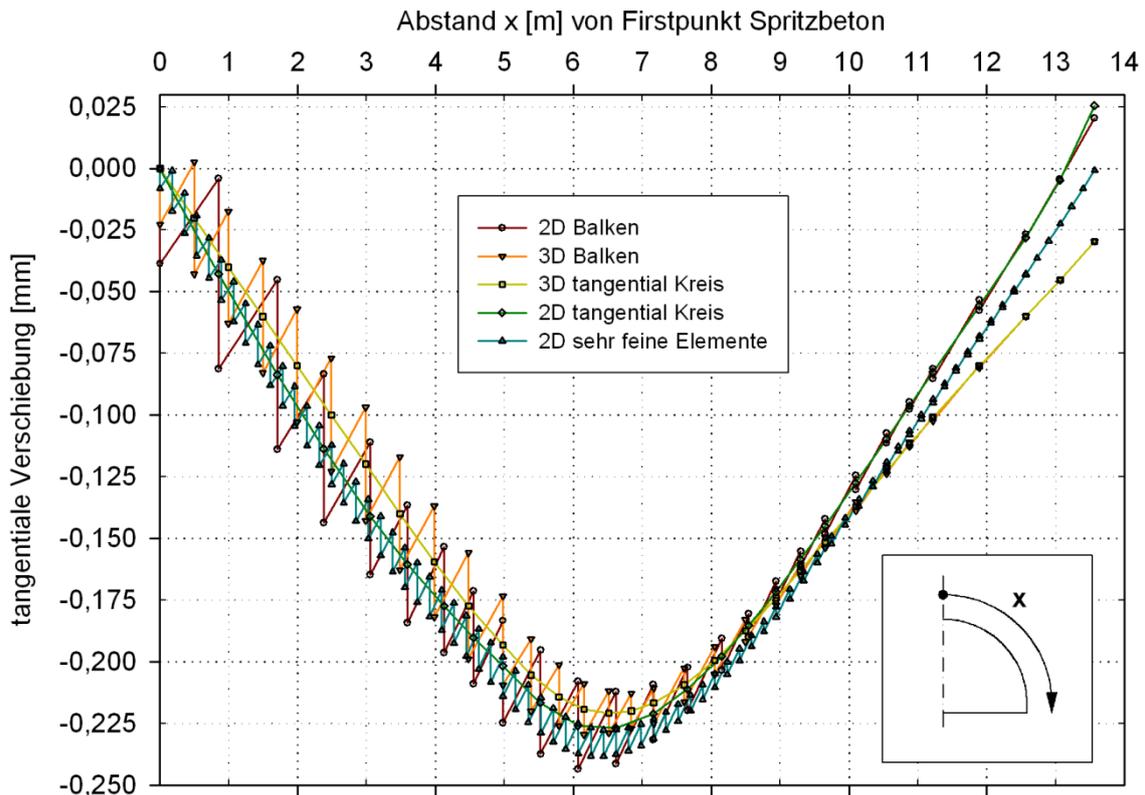


Abb. 5.8: Verschiebung der Tunnelschale, Spritzbeton jung

In Plaxis werden Normalkräfte nur aus Verschiebungen in Richtung der Tunnelschalenachse hervorgerufen. Das entspricht der Balkentheorie. In Abb. 5.8 sind die Verschiebungen in den Knoten aufgetragen, die aus der 2D- und der 3D-Berechnung auf die Achse des jeweiligen Elements umgerechnet wurden (2D- und 3D Balken).

Als Vergleich sind mit denselben Verformungen aus Plaxis die Verschiebungen tangential an den Kreis eingezeichnet. Diese tangentialen Verschiebungen bilden den Mittelwert der beiden Verschiebungen aus der Balkentheorie.

Es wurde noch eine weitere Berechnung mit sehr feiner Diskretisierung durchgeführt. Dabei erfolgte eine Annäherung der gezackten Linien an die gleichmäßig verlaufenden Linien. Bei unendlich feiner Diskretisierung entsteht daraus ein glatter Verlauf, da sich die geraden Elemente annähernd als Kreis darstellen.

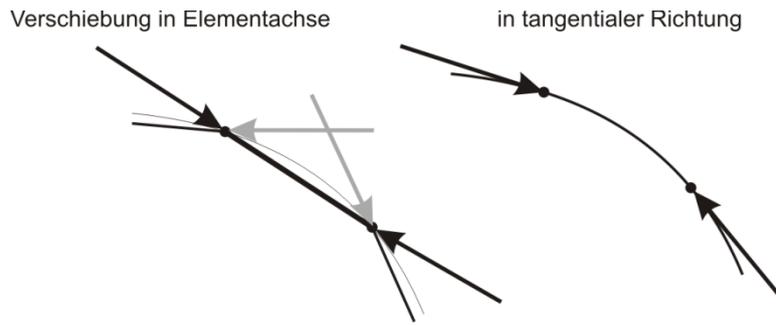


Abb. 5.9: Verschiebungen im Bezug auf die Tunnelschale

Die Rückrechnung der Normalkräfte aus den Verschiebungen erfolgt über folgenden Zusammenhang:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{N}{A} \quad \text{und} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$N = EA_{mod} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{wobei} \quad EA_{mod} = \frac{EA}{1 - \nu^2}$$

Die Reduktion der Dehnsteifigkeit für EA_{mod} wird in Plaxis durchgeführt, sobald ein Wert für die Poissonzahl eingegeben wird. Als Empfehlung wird im Handbuch von Plaxis [2] die Eingabe der Poissonzahl z.B. für Betonwände angeführt.

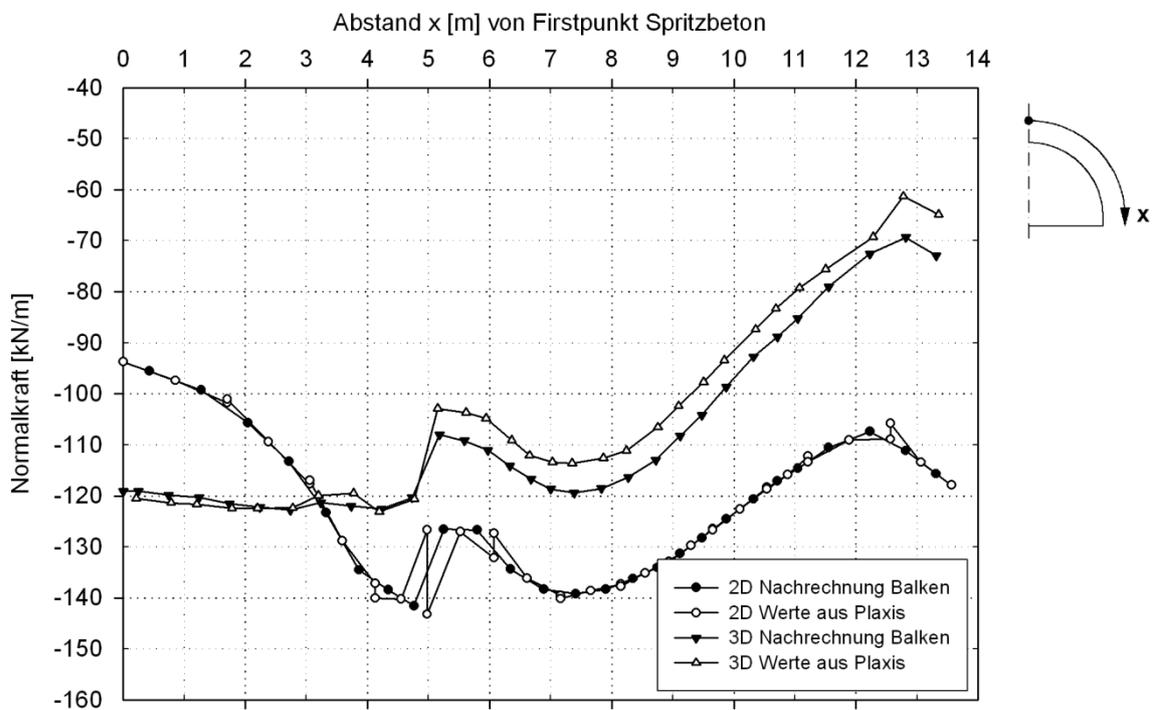


Abb. 5.10: Nachrechnung Normalkraft über Verschiebungen, Spritzbeton jung

Die Ergebnisse der Nachrechnung in 2D entsprechen den Schnittkräften aus Plaxis 2D. In der Nachrechnung der 3D-Normalkräfte weicht der Verlauf im Ulmenbereich geringfügig von den ausgegebenen Werten aus Plaxis 3D Tunnel ab. Daraus ist zu schließen, dass bei den gekrümmten 3D-Schalenelementen Normalkräfte nicht ausschließlich aus axialen Dehnungen berechnet werden.

5.2.3 Vergleich der Biegemomente

Die Auswertung der Biegemomente erfolgt analog der Auswertung der Normalkräfte in Umfangsrichtung der Spritzbetonschale. Auch sie werden gemäß Abb. 5.1 extrapoliert, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Die Biegemomente sind in der 3D- sowie in der 2D-Berechnung gering und erreichen im Ulmenbereich einen Maximalwert von ca. -2,5 kNm/m für die Tunnelschale mit den Steifigkeiten von Spritzbeton jung. Die Ausschläge des Biegemomentenverlaufs treten im Übergang vom Rohrschirm zum Fels und im Fußbereich auf.

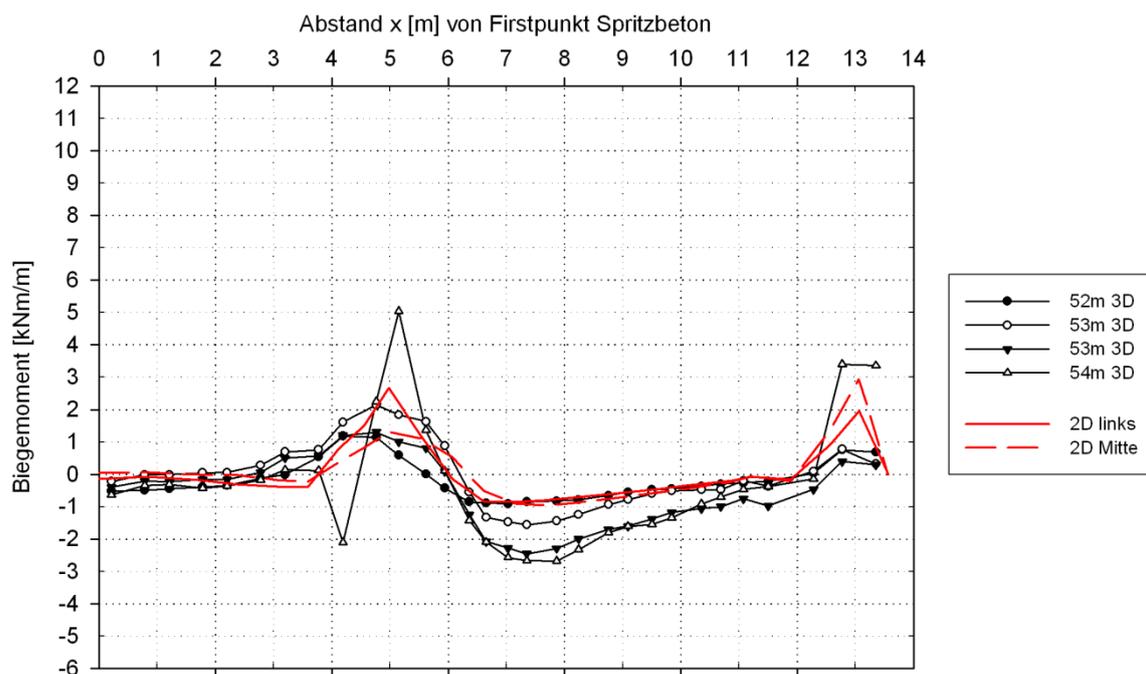


Abb. 5.11: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung

Im Endzustand in Abb. 5.12 verdoppeln sich die Maximalwerte in 3D auf ca. -5 kNm/m. Der Verlauf ändert sich nicht in seiner Form.

Die 2D-Biegemomente erhöhen sich entsprechend den 3D-Werten, wobei die Größe der Werte gering bleibt.

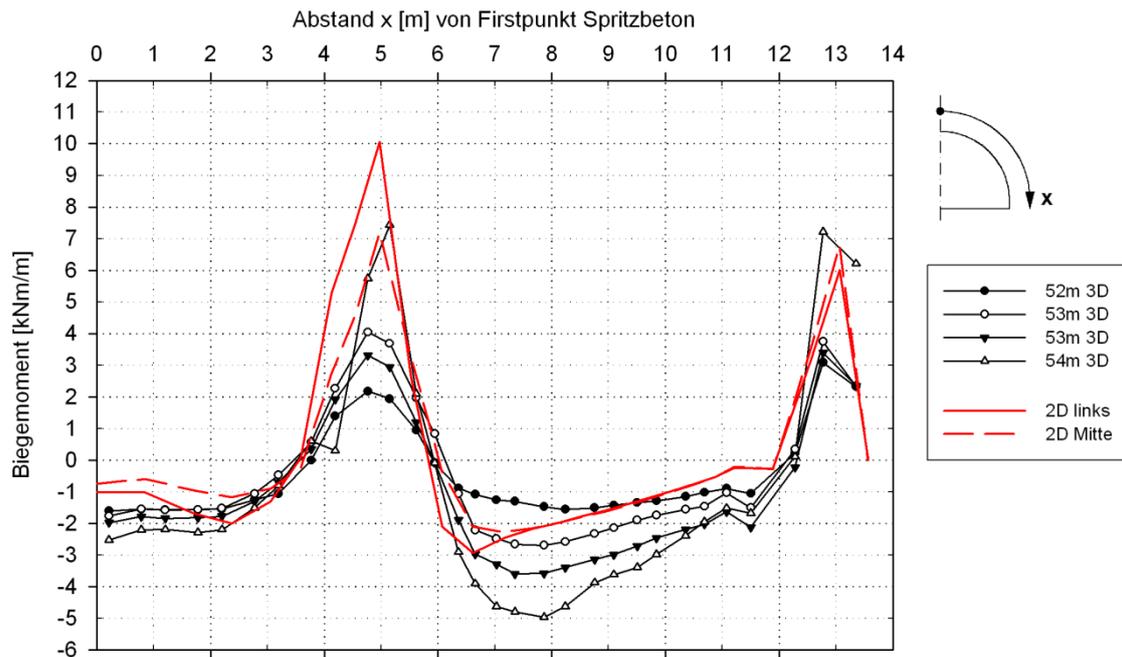


Abb. 5.12: Biegemomentenverlauf Endzustand

Wie bei den Normalkräften ist auch bei den Biegemomenten eine Rückrechnung aus den Verschiebungen möglich.

Der Zusammenhang nach der Balkentheorie ist wie folgt:

$$M = -EI \cdot w''$$

Die Biegelinie stellt die Verschiebungen in radialer Richtung u_r über den Umfang des Tunnelquerschnitts dar.

Die Ableitung wird hier durch das Verhältnis $\frac{\Delta u_r}{l}$ gebildet. Daraus ergibt sich der Mittelpunkt des ursprünglichen Elements als neuer Ausgangspunkt. Durch die zweimalige Ableitung und die sehr geringen Biegemomente aus der Berechnung entsteht ein Fehler, der zu groß, ist um aussagekräftige Ergebnisse für die Nachrechnung zu erhalten.

5.3 Schnittkräfte tieferliegender Tunnel, Überdeckung 30,0 m

Die Schnittkräfte werden aufgrund des größeren Modells bei 84, 85 und 86 m (siehe Abb. 5.13) ausgewertet. In der 2D-Berechnung wurden die Vorentlastungsfaktoren über die Verformungen an den Stationen 84 m und 85 m kalibriert.

Die in Station 84 m kalibrierten Firstverformungen der 2D-Berechnung werden mit 2D links bezeichnet und die in Station 85 m kalibrierten Firstverformungen werden mit 2D Mitte bezeichnet. (siehe Abb. 5.13)

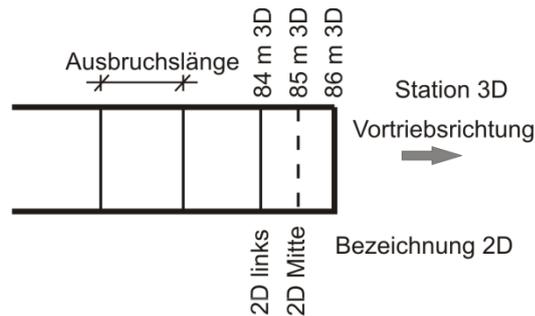


Abb. 5.13: Bezeichnungen für die Auswertung des tieferliegenden Tunnels

Die Schnittkräfte werden auch beim tieferliegenden Tunnel in Umfangsrichtung vom Firstpunkt ausgehend dargestellt. Die auftretenden Druckkräfte werden mit negativen Vorzeichen angegeben.

5.3.1 Vergleich der Normalkräfte

Die Normalkräfte zeigen die gleiche Annäherung der 2D-Berechnung an die 3D-Berechnung wie beim Modell mit der Schichtdicke Boden 5,5 m. Bei der Steifigkeit der Tunnelschale Spritzbeton jung stimmt die Normalkraft der Berechnung 2D links mit der Normalkraft der 3D-Berechnung bei Station 84 m sehr gut überein. Die Berechnung 2D Mitte liefert höhere Schnittkräfte, die annähernd der Station 85 m entsprechen.

Die Normalkräfte bei Station 86 m weichen erheblich von den 2D-Normalkräften ab. Die Abweichung in der Tunnelfirste beträgt ca. -155 kN/m. Die Maximalwerte von -570 kN/m im Fußbereich werden deutlich unterschritten.

Die Werte der 2D-Normalkräfte liegen im unteren bis mittleren Bereich der 3D-Normalkraftverläufe.

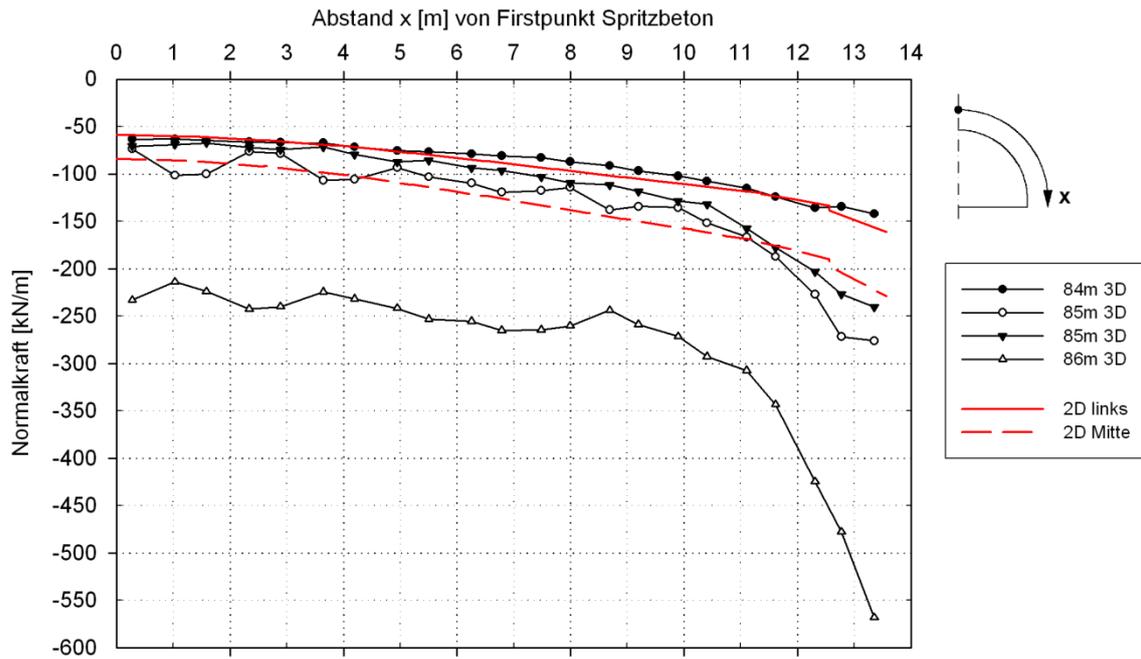


Abb. 5.14: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, tieferliegender Tunnel

Im Endzustand verlaufen die 2D-Normalkräfte an der Firste im Bereich der Station 86 m und nähern sich im Ulmenbereich der Station 85 m an. Es werden im Gegensatz zum Spritzbeton jung mittlere bis obere Werte abgebildet. Die Maximalwerte im Fußbereich im Endzustand von ca. -1300 kN/m werden um -300 kN/m in der 2D-Berechnung unterschritten.

Am Firstpunkt ergibt 2D Mitte im Gegensatz zu 86 m 3D nur um -50 kN/m geringere Normalkräfte. Die Form des 3D-Normalkraftverlaufs spiegelt sich in der 2D-Berechnung in einer flacheren Form wieder.

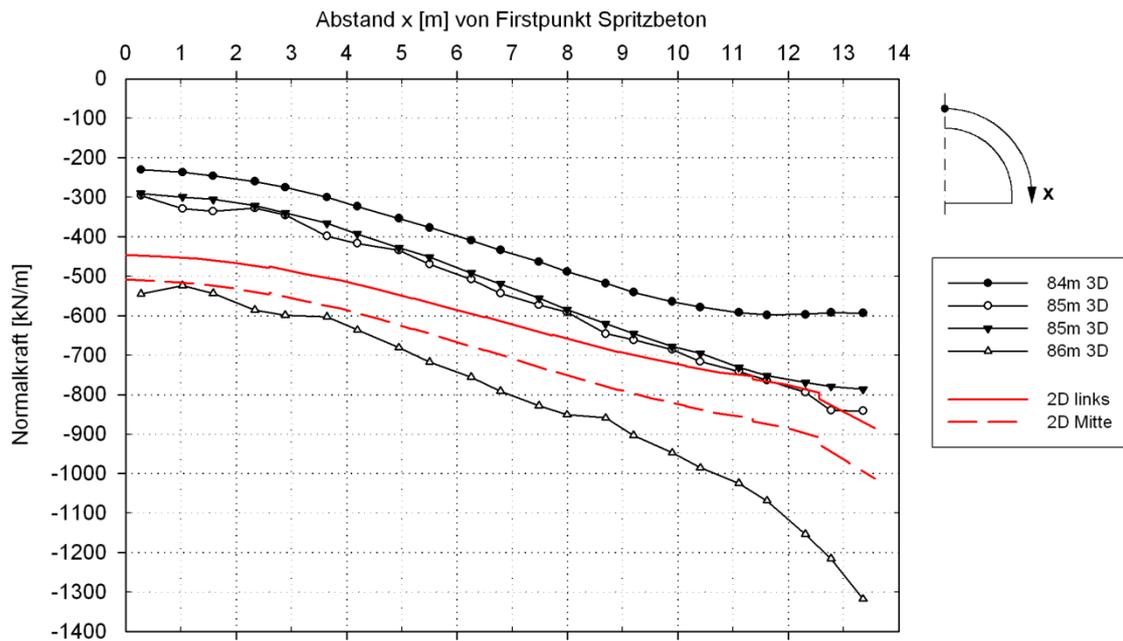


Abb. 5.15: Normalkraftverlauf Endzustand, tieferliegender Tunnel

5.3.2 Vergleich der Biegemomente

Die Biegemomente ergeben in der 3D-Berechnung nach Einbau der Spritzbetonschale jung Werte bis -4 kNm/m. Der Ausschlag am Fußpunkt hängt mit der Modellierung der Tunnelschale zusammen und wird nicht näher betrachtet. Die 2D-Berechnung liefert im Zustand Spritzbeton jung und im Endzustand annähernd keine Biegemomente. Die Werte pendeln im Diagramm um die Nulllinie.

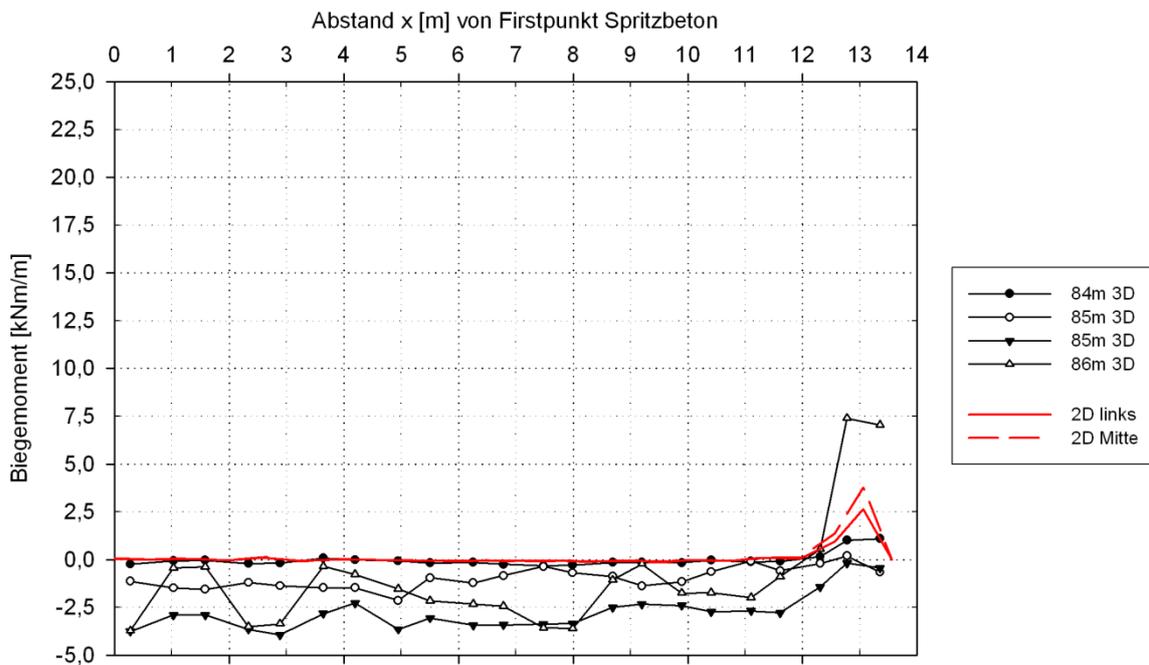


Abb. 5.16: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, tieferliegender Tunnel

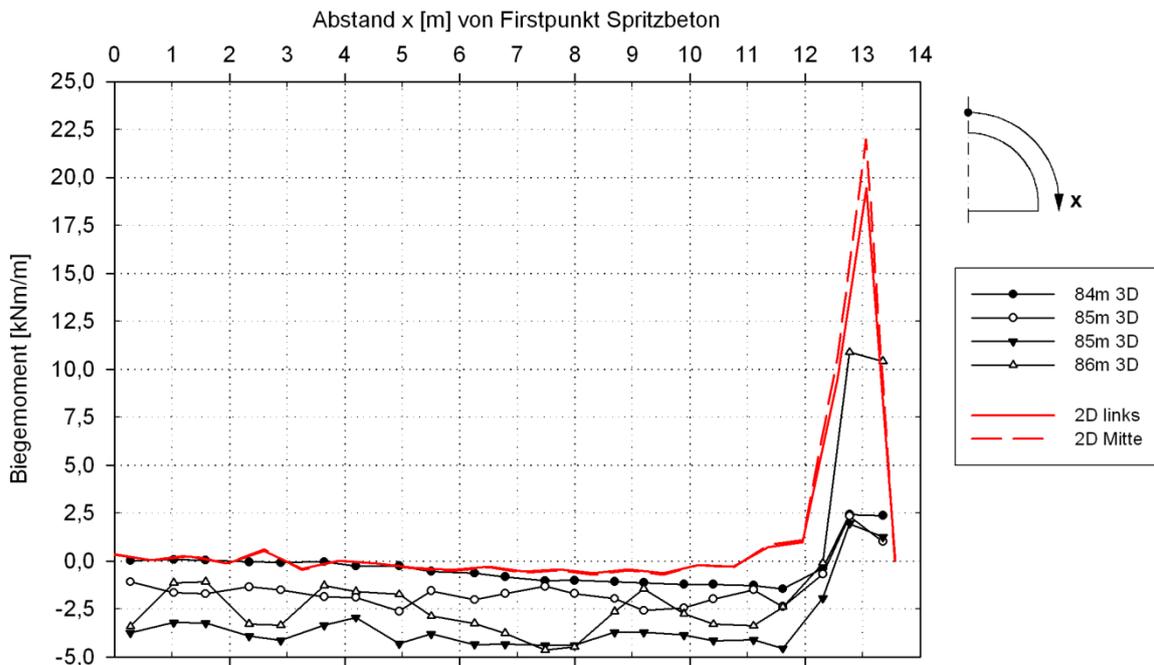


Abb. 5.17: Biegemomentenverlauf Endzustand, tieferliegender Tunnel

Im Endzustand erhöhen sich die Biegemomente mit Ausnahme des Fußpunktes um ca. 20 %. Es gibt auch keine signifikanten Ausschläge im Biegemomentenverlauf. Die wechselnden Werte für die Biegemomente in den beiden Stationen bei 85 m ergeben sich aus der Extrapolation. Aufgrund der Geringfügigkeit der berechneten Biegemomente ist keine weitere Interpretation der Ergebnisse möglich.

5.3.3 Der Einfluss der Spritzbetonschale auf die Firstverformungen

Es wird hier die Abhängigkeit der Firstsetzung vom Einbau der Tunnelschale zu verschiedenen Zeitpunkten für den tieferliegenden Tunnel untersucht. Dazu werden unterschiedliche 2D-Modelle mit unterschiedlichen Vorentlastungsfaktoren miteinander verglichen.

Der Ausbruchquerschnitt des tieferliegenden Tunnels befindet sich zur Gänze im Fels. Die Steifigkeit des Felses ist im Vergleich zum darüber liegenden Boden 40-mal höher. Dabei treten im Vergleich zum oberflächennahen Tunnel kaum plastische Verformungen auf.

Den unteren Grenzwert für die Firstsetzung bildet bei der Berechnung eine „wished-in-place“ (WIP) Berechnung mit den Eigenschaften für Spritzbeton alt. Bei dieser Methode wird keine Vorentlastung verwendet und der Tunnel ohne Unterscheidung in Berechnungsphasen sofort im Endzustand berechnet. Das heißt, dass der Einbau der Tunnelschale und der Anker, sowie der Ausbruch in einem Schritt erfolgen.

Der obere Grenzwert wird durch den Vollausschub ohne Einbau einer Spritzbetonschale bestimmt. Der Fels ist in diesem Modell so tragfähig, dass kein Versagen bei der Berechnung mit dem MC-Modell auftritt.

Als weitere Verläufe sind in Abb. 5.18 die Berechnungen mit einem Vorentlastungsfaktor (VEF) und zu Ende gerechneten Spritzbetoneigenschaften (SB) jung oder alt und eine Berechnung mit zwei Vorentlastungsfaktoren dargestellt.

Die Vorentlastungsfaktoren stammen aus der Berechnung des tieferliegenden Tunnels bei Station 84m.

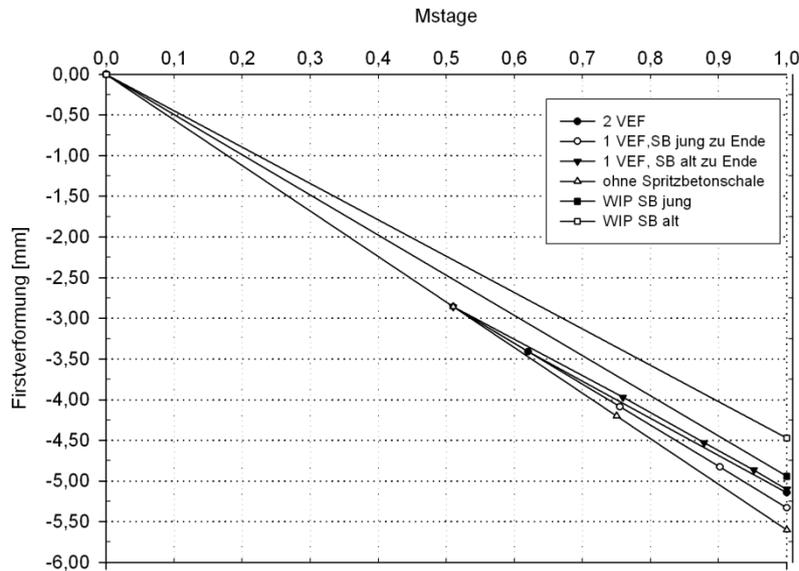


Abb. 5.18: Firstverformungen in Abhängigkeit des Einbaus der Spritzbetonschale

Die Bandbreite der Firstverformung reicht von 4,5 mm bis 5,6 mm. Werden nur die Berechnungen mit Vorentlastung verglichen, so ergeben sich Firstverformungen für die Methode mit einem Vorentlastungsfaktor und Spritzbeton alt, sowie mit zwei Vorentlastungsfaktoren von 5,1 mm. Die Setzung für die Berechnung ohne Spritzbetonschale ergibt 5,6 mm. Der Unterschied beträgt damit rund 9 %.

Die geringe Variation der Endsetzung zeigt, dass die Tunnelschale kaum Einfluss auf auftretende Verformungen hat. Die Systemänderung durch die Aktivierung der Tunnelschale ist gering.

5.3.4 Ermittlung des Vorentlastungsfaktors nach Kielbassa [3]

Der Vorentlastungsfaktor für den tieferliegenden Tunnel wurde in Tab. 4.3 für die Station 52 m mit 51 % ermittelt.

Als Vergleichslösung wurde die Ermittlung der Vorentlastung nach Kielbassa [3] durchgeführt. Dabei ergibt sich mit dem äquivalenten Radius von 7,7 m für den Ausbruch des Tunnels eine Reduktion der Kräfte vor dem Einbau des Spritzbeton jung von ~66 %. Das Verfahren nach Kielbassa wurde für das linear-elastische Stoffgesetz entwickelt. Da beim tieferliegenden Tunnel annähernd keine Plastizität auftritt, ist ein Vergleich mit dem zuvor ermittelten Ergebnis möglich.

Der Unterschied in der Vorentlastung beträgt rund 15 %. Dadurch entstehen in der Tunnelschale kleinere Schnittkräfte und die Verformungen an der Tunnelfirste werden vergrößert.

Für eine Verifizierung der ermittelten Ergebnisse wurde versucht, die Ergebnisse des Beispiels aus [3] nachzurechnen. Im 3D-Modell wurden von Kielbassa 20-knotige Quaderelemente mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet.

Die Materialparameter sind wie folgt angegeben:

E-Modul Gebirge für die jeweilige Bodenschicht:

mo2: $E = 100 \text{ MN/m}^2$ mo1: $E = 500 \text{ MN/m}^2$ mm: $E = 500 \text{ MN/m}^2$

Wichte Gebirge: $\gamma = 24,5 \text{ kN/m}^3$

Querdehnzahl: $\nu = 0,2$

Seitendruckbeiwert: $k_0 = 0,3$

Abschlagslänge: 1,70 m

Schalendicke Tunnelschale: $d = 0,25 \text{ m}$

E-Modul Beton: $E = 15000 \text{ MN/m}^2$

Überdeckung Tunnelfirste: $H_{\bar{u}} = 20 \text{ m}$

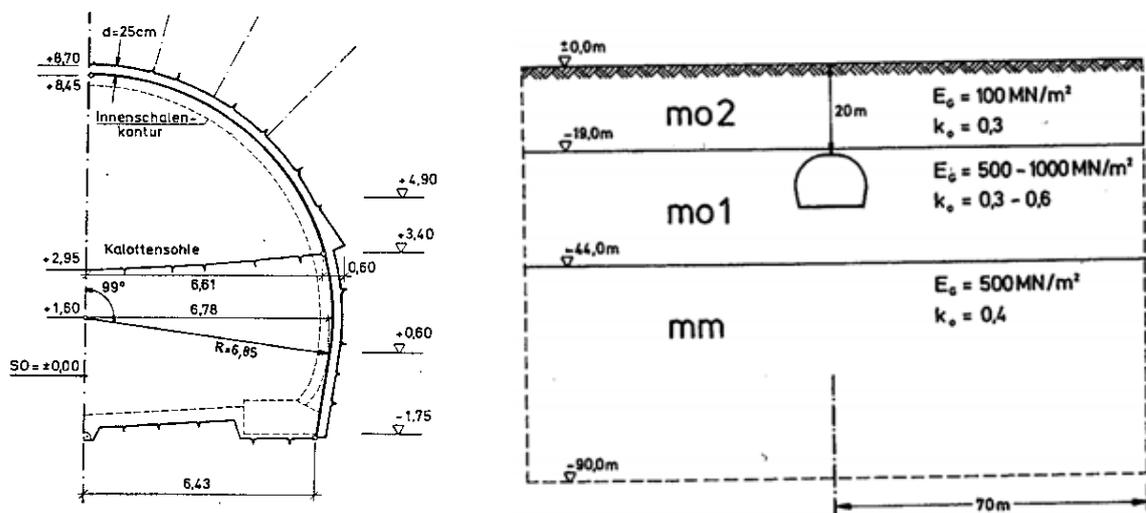


Abb. 5.19: Tunnelquerschnitt mit Abmessungen, Modellgröße mit Tiefe der Bodenschichten [3]

Die Abmessungen des Tunnelquerschnitt in Abb. 5.19 werden übernommen, jedoch ist in der Nachrechnung der Ausbruchbereich gleich dem freien Bereich innerhalb der Spritzbetonschale.

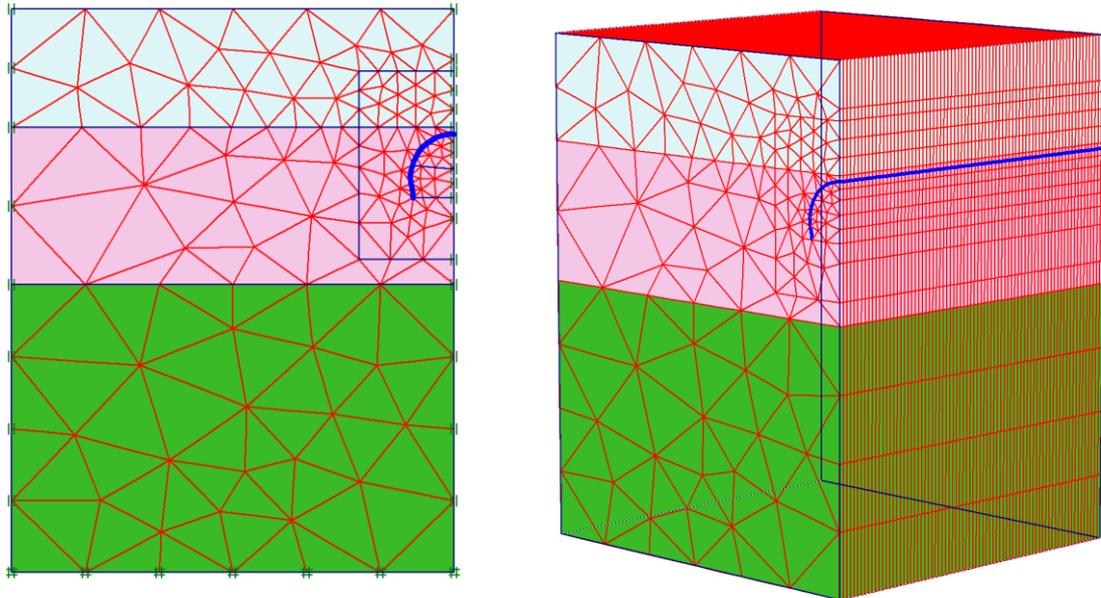


Abb. 5.20: 2D FE-Netz, 3D-FE Netz für die Nachrechnung des Beispiels von Kielbassa

Die 2D-Berechnung erfolgt mit 6-knotigen Elementen, die 3D-Berechnung mit 15-knotigen Prismen-Elementen. Es wird, wie bei Kielbassa, eine quadratische Ansatzfunktion verwendet und das generierte FE-Netz ist in Abb. 5.20 dargestellt.

Das Modell für die Nachrechnung wird mit einer Breite von 70 m, einer Tiefe von 90 m und einer Länge von 65,5 m dem originalen Modell angepasst. Die Abschlagslänge beträgt 1,70 m.

Die Abschlagslänge wird in Längsrichtung in zwei Elemente unterteilt was Elementdicken von 85 cm zur Folge hat. Der Ausbruch erfolgt als Kalottenausbruch. Die Strosse ist im Tunnelquerschnitt in Abb. 5.19 eingezeichnet, wird aber in den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt.

Bei Kielbassa wird die Vorentlastung in zwei Teile gespalten und als „2-step“-Modell bezeichnet. Es werden getrennte Faktoren für die vertikale und die horizontale Vorentlastung ermittelt. Dabei werden zwei Faktoren für die Entlastung, also den Zustand des Ausbruchs und zwei für die auf die Tunnelschale effektiv wirkenden Kräfte berechnet.

Daraus folgen die vier Faktoren s_v^r , s_v^e , k_r^0 , k_e^0 für folgenden Zusammenhang mit dem primären Spannungszustand σ_v^{prim} :

$$p_v^r = s_v^r * \sigma_v^{prim} \quad p_v^e = s_v^e * \sigma_v^{prim}$$

$$p_h^r = k_r^0 * p_v^r \quad p_h^e = k_e^0 * p_v^e$$

r... Entlastungsanteil auf freien Querschnitt

e...effektiver Anteil auf Tunnelschale

Die einzelnen Faktoren werden über Diagramme ermittelt und ergeben sich für das Beispiel zu $s_v^r = 47\%$ und $s_v^e = 49\%$, sowie $k_0^r = 0,45$ und $k_0^e = 0,15$.

In der 3D-Berechnung der Nachrechnung wird im Tunnelquerschnitt die Kalotte in Scheibe i und $i+1$ ausgebrochen und im gleichen Schritt die Tunnelschale in der Kalotte in Scheibe $i-1$ und $i-2$ eingebaut.

Für die 2D-Berechnung sind zwei Modelle erstellt worden, die gemeinsam das 2-step-Modell ergeben. Das erste Modell wird für die Berechnung der Setzungen während der Vorentlastung verwendet. Dabei erfolgt eine Abminderung mit den zuvor ermittelten Faktoren der Bodenwichte zu

$$\gamma^r = \gamma \cdot \frac{s_v^r}{100\%} = 24,5 \cdot 0,47 = 11,5 \text{ kN/m}^3$$

und anstatt $k_0 = 0,3$ wird für die Bodenschichten $k_0^r = 0,45$ verwendet.

Im zweiten Modell, das für die Kräfte in der Tunnelschale und die effektiven Setzungen der Tunnelschale verantwortlich ist, erfolgt ebenfalls eine Abminderung der Bodenwichte zu

$$\gamma^e = \gamma \cdot \frac{s_v^e}{100\%} = 24,5 \cdot 0,49 = 12,0 \text{ kN/m}^3$$

und k_0 wird zu $k_0^e = 0,15$ geändert. Die gesamten Verformungen der Tunnelfirste und der darüber liegenden Punkte ergeben sich aus der Superposition der beiden Modelle. Beide Modelle werden mit $Mstage = 1$ berechnet, da die Vorentlastung bereits in den Faktoren enthalten ist.

Bei der Nachrechnung wird auch eine WIP-Berechnung durchgeführt, die der 1-step Berechnung von Kielbassa entspricht.

In Abb. 5.21 werden die Ergebnisse der Nachrechnungen mit den originalen Kielbassa-Ergebnissen verglichen. Dabei ist ersichtlich, dass die 3D-Nachrechnung mit Kielbassa annähernd übereinstimmt und eine geringe Abweichung von 1,3 mm ergibt.

In der 2D-Berechnung sind die Abweichungen größer. Bei der WIP-Berechnung sind die Verformungen in der Tunnelfirste um 2,8 mm größer als bei der 2D 1-step Methode. Diese Berechnung stimmt jedoch vom Berechnungsprinzip am besten mit Kielbassa überein.

Bei der 2-step Methode wird ein noch größerer Unterschied von 3,3 mm festgestellt. Wird diese Berechnung konventionell nach der in Abschnitt 4.3 dargestellten Methode aus im 2D-Modell kalibrierten Vorentlastungsfaktoren ermittelt, so ergibt sich eine Endsetzung in der Tunnelfirste von 26 mm. Diese ist um 4,4 mm größer als die Verformungen bei Kielbassa.

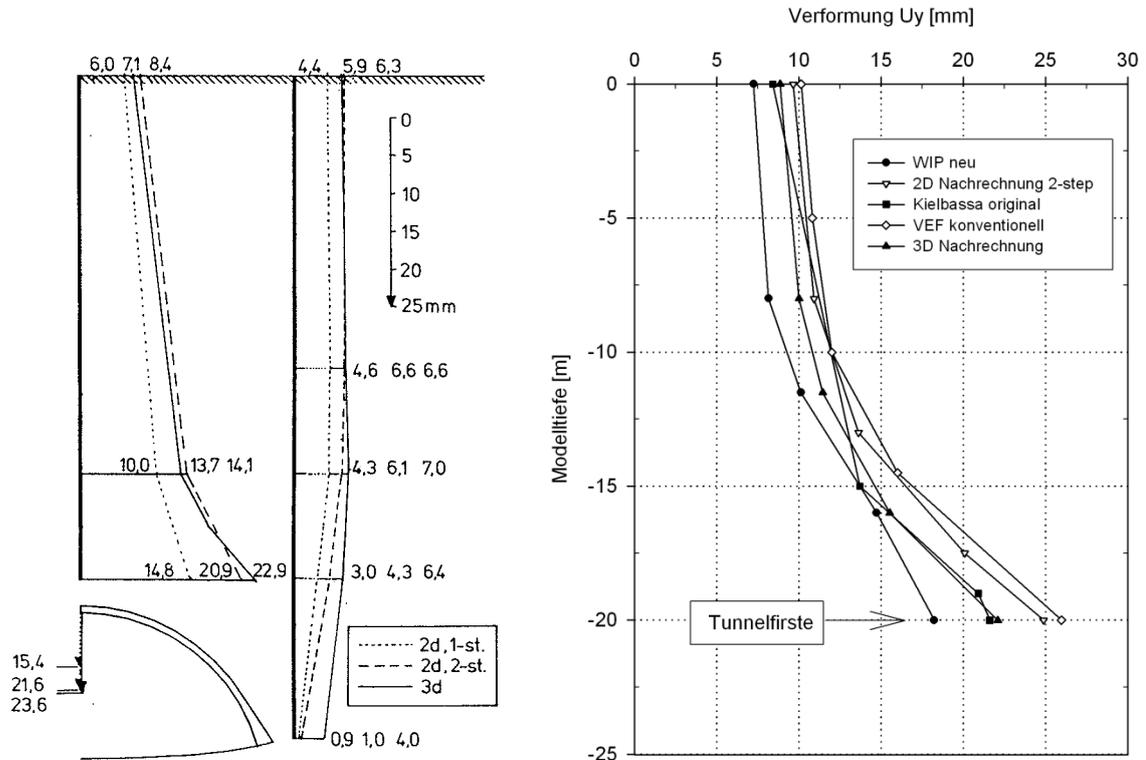


Abb. 5.21: Vergleich der Ergebnisse Kielbassa (links) [3] mit der Nachrechnung (rechts)

3D Berechnung		2D 1-step		2D 2-step	
Tiefe [m]	Verformung [mm]	Tiefe [m]	Verformung [mm]	Tiefe [m]	Vorentlastung [mm]
0,0	-7,1	0,0	-6,0	0,0	-8,4
-15,0	-13,7	-15,0	-10,0	-15,0	-14,1
-19,0	-22,9	-19,0	-14,8	-19,0	-20,9
-20,0	-23,6	-20,0	-15,4	-20,0	-21,6

Tab. 5.2: Ergebnisse von Kielbassa

3D Berechnung		2D WIP		Kielbassa Nachrechnung			
Tiefe [m]	Verformung [mm]	Tiefe [m]	Verformung [mm]	Tiefe [m]	Vorentlastung [mm]	Tunnelschale [mm]	Gesamtverformung [mm]
0,0	-8,9	0,0	-7,2	0,0	-5,9	-3,7	-9,6
-8,0	-10,0	-8,0	-8,2	-8,0	-6,7	-4,2	-10,9
-11,5	-11,4	-13,0	-10,1	-13,0	-8,4	-5,2	-13,6
-16,0	-15,5	-17,5	-14,7	-17,5	-12,5	-7,6	-20,1
-20,0	-22,1	-20,0	-18,2	-20,0	-15,4	-9,4	-24,9

Tab. 5.3: Werte für die Nachrechnung von Kielbassa

Die Ergebnisse von Kielbassa stimmen mit der äquivalenten Nachrechnung nicht überein. Die Abweichung der Firstverformung beträgt 15 % und sie erhöht sich bei der konventionellen Nachrechnung noch um 5 %.

Ein weiterer Vergleich der Vorentlastung nach Kielbassa wird nicht durchgeführt, da bereits bei linear-elastischer Berechnung die Verformungen differieren und somit eine Übertragung auf die MC-Berechnungen in diesem Fall nicht sinnvoll erscheint.

5.4 Auflösung des Rohrschirms

Der Rohrschirm wurde in den vorangegangenen Berechnungen als homogener Cluster über der Tunnelfirste mit erhöhten Steifigkeiten im Modell berücksichtigt. Die Steifigkeiten werden wie bei den Ankern über den freien Boden und die Rohre des Rohrschirms verschmiert. Diese Art der Modellierung beeinflusst das Tragverhalten des Tunnels. Im 3D-Modell wirkt der Rohrschirm als Überzug über die kurze Spannrichtung. Es ergibt sich somit eine Längstragwirkung.

Im 2D-Modell kann sich dieser Effekt aufgrund des ebenen Dehnungszustandes nicht ausbilden, da nur ein Teil des in Längsrichtung unendlich gedachten Modells betrachtet wird. In diesem Fall bildet sich eine Tragwirkung in Querrichtung des Tunnelquerschnitts aus. Dabei wirkt der Rohrschirm wie ein Balken in Querrichtung über dem Tunnel. Die freien Zwischenräume zwischen den Rohren sind bei dieser Modellierung somit voll tragfähig.

In der Realität bildet sich ein Traggewölbe zwischen den Rohren aus und der Boden im Zwischenraum ist deutlich weicher als die Rohre. Somit wird die Steifigkeit bei der Modellierung des Rohrschirms überschätzt.

In der Literatur findet man Berechnungen, bei denen die Rohre des Rohrschirms einzeln modelliert werden. Dazu wird als Beispiel in [4] die Modellierung vom Rohrschirm mit Einzelementen und als homogener Bereich mit Messungen eines Tunnelvortriebs verglichen. Die Setzungen beim homogenen Bereich sind deutlich geringer als bei den modellierten Einzelrohren und den Messungen. In Plaxis ist die Modellierung einzelner Rohre jedoch nicht möglich.

Um die unterschiedlichen Steifigkeiten dennoch zu simulieren, wird in einer weiteren Berechnung der Rohrschirm in einzelne Cluster mit unterschiedlichen Steifigkeiten aufgeteilt. Die Cluster mit der höheren Steifigkeit sollen die Rohre widerspiegeln, die Cluster mit der niedrigeren Steifigkeit den Boden zwischen den Rohren.

Die Aufteilung der Steifigkeiten erfolgt nach folgendem Prinzip:

$$E_{\text{Rohrschirm}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

Der Rohrschirm wurde wie in den vorhergehenden Rechnungen mit einem E-Modul von 2700 MPa angesetzt. Für die Aufteilung der Steifigkeiten auf die einzelnen Cluster ergeben sich die Materialparameter aus Tab. 5.4.

Bezeichnung	γ [kN/m ³]	E [Mpa]	ν [-]	c [kPa]	φ [°]
Parameter 1	24	4900	0,3	100	30
Parameter 2	24	100	0,3	100	30

Tab. 5.4: Materialparameter für den aufgelösten Rohrschirm

Der Parameter 1 wird für die Cluster der Rohre und Parameter 2 für die Cluster des dazwischen liegenden Bodens verwendet. Die Modellierung des Rohrschirms erfolgt in 2D analog der Modellierung in 3D.

5.4.1 Das Modell

Der vorhandene Rohrschirm wird in 13 gleich große Abschnitte unterteilt. Sieben Abschnitten wird Parameter 1 und sechs Abschnitten Parameter 2 zugewiesen.

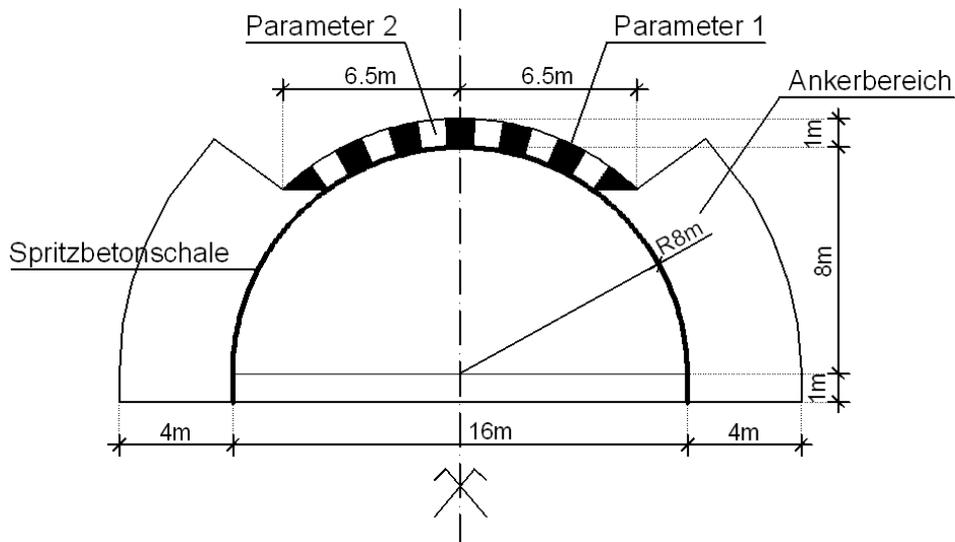


Abb. 5.22: Querschnitt mit Schema des aufgelösten Rohrschirms

Die Bodenkennwerte und die Parameter für Tunnelschale und Anker werden unverändert aus Abschnitt 3.2 übernommen.

5.4.2 Berechnung der Vorentlastung aus dem Firstverformungsverhältnis

Die Berechnung der Vorentlastung aus dem Verformungsverhältnis erfolgt analog dem Abschnitt 4.2.

3D Berechnung					2D Berechnung mit erhaltenem Mstage			
Schichtdicke Boden	Station [m]	Uy, Beginn SB jung [mm]	Uy, steady state [mm]		Mstage [-]	Uy, Vorentlastung [mm]	Uy, SB jung [mm]	Uy, SB alt [mm]
5,5 m, vereinfachte G.	52 m	-4,6	-6,5	min. -6,3 max. -6,7	0,71	collapse, Mstage=0,60		

Tab. 5.5: Ergebnisse Vorentlastung aus Setzungsverhältnis 3D Berechnung, Ergebnisse 2D-Berechnung an der Tunnelfirste

Der Vorentlastungsfaktor mit diesem Ansatz wurde hier nur ergänzend ermittelt. Die anschließende 2D-Berechnung wurde nicht zu Ende gerechnet, da der Tunnel bereits bei Mstage=0,6 versagte.

5.4.3 Berechnung der Vorentlastungsfaktoren über Kalibrierung der Firstsetzung der 2D-Berechnung an der 3D-Berechnung

Die Berechnung der Vorentlastung erfolgt wie in Abschnitt 4.3, jedoch wurde hier mit zwei Vorentlastungsfaktoren gearbeitet, um die Aufteilung der Schnittkräfte in die Spritzbetonschale jung und alt zu ermitteln. In Tab. 5.6 sind die Ergebnisse dieser Berechnung für Station 52 m dargestellt. Die Firstverformungen der 3D-Berechnungen stimmen mit denen der 2D-Berechnung gut überein.

	Uy aus 3D Berechnung	Mstage	Uy aus Berechnung 2D
	Rohrschirm aufgelöst		
Vorentlastung	-4,6	0,25	-4,6
SB jung + Anker	-5,9	0,45	-5,9
SB alt (steady state)	-6,3 (-6,5)		-6,7

Tab. 5.6: Ergebnisse der Firstverformungen mit zwei Vorentlastungsfaktoren

5.4.4 Auswertung der Verschiebungen

Für die kalibrierten Firstverformungen mit zwei Vorentlastungsfaktoren ergeben sich für die Spritzbetonschale jung die in Abb. 5.23 dargestellten Verschiebungen. Die Werte für die Verschiebungen sind in die Richtung des ausgebrochenen Querschnitts mit positiven Vorzeichen dargestellt. Es ergibt sich in der 2D- und 3D-Berechnung ein sehr ähnlicher Verlauf der totalen Verschiebungen, was auf das gleiche Tragverhalten schließen lässt.

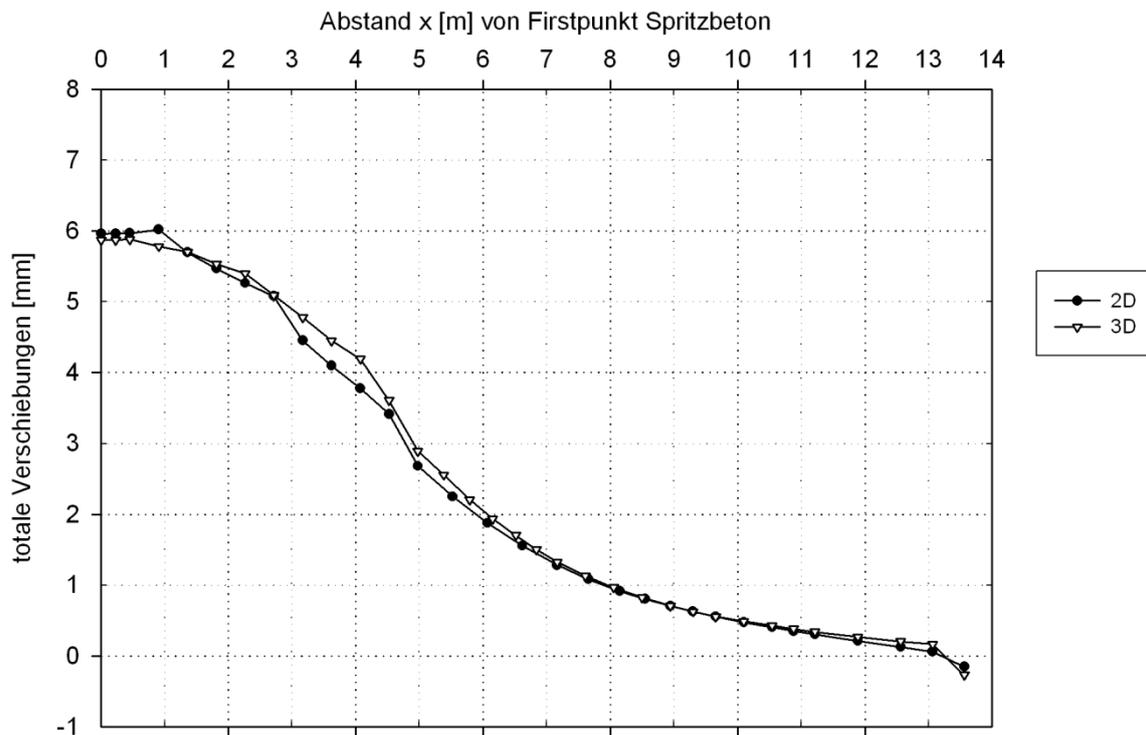


Abb. 5.23: Totale Verschiebungen für Modell mit aufgelöstem Rohrschirm, Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m

Die Verformungen mit dem homogenen Rohrschirm aus der vorherigen Berechnung waren mit 3,2 mm an der Firste nur halb so groß wie bei der Berechnung mit aufgelöstem Rohrschirm. Es ist ersichtlich, dass bei der Berechnung mit aufgelöstem Rohrschirm die Verformungen deutlich zunehmen.

5.4.5 Auswertung der Normalkräfte

Für den Vergleich der Schnittkräfte der 2D-Berechnung mit der 3D-Berechnung wird der Normalkraftverlauf in der Spritzbetonschale jung dargestellt. 2D links entspricht, wie in Abb. 5.3, der Station bei 52 m im 3D-Modell.

Für die Station 52 m ergeben die 2D- und 3D-Berechnung im Firstbereich ähnliche Verläufe. In der Ulme weicht der Verlauf von 2D zu 3D ab und wird flacher. Die Sprünge im Firstbereich in der 2D-Berechnung sind etwas ausgeprägter als in der 3D-Berechnung in Station 52 m.

Die Werte der 2D-Berechnung liegen beim Rohrschirm im unteren und in der Ulme im mittleren bis oberen Bereich der 3D-Berechnung. Die Maximalwerte der 3D-Berechnung werden nicht abgebildet.

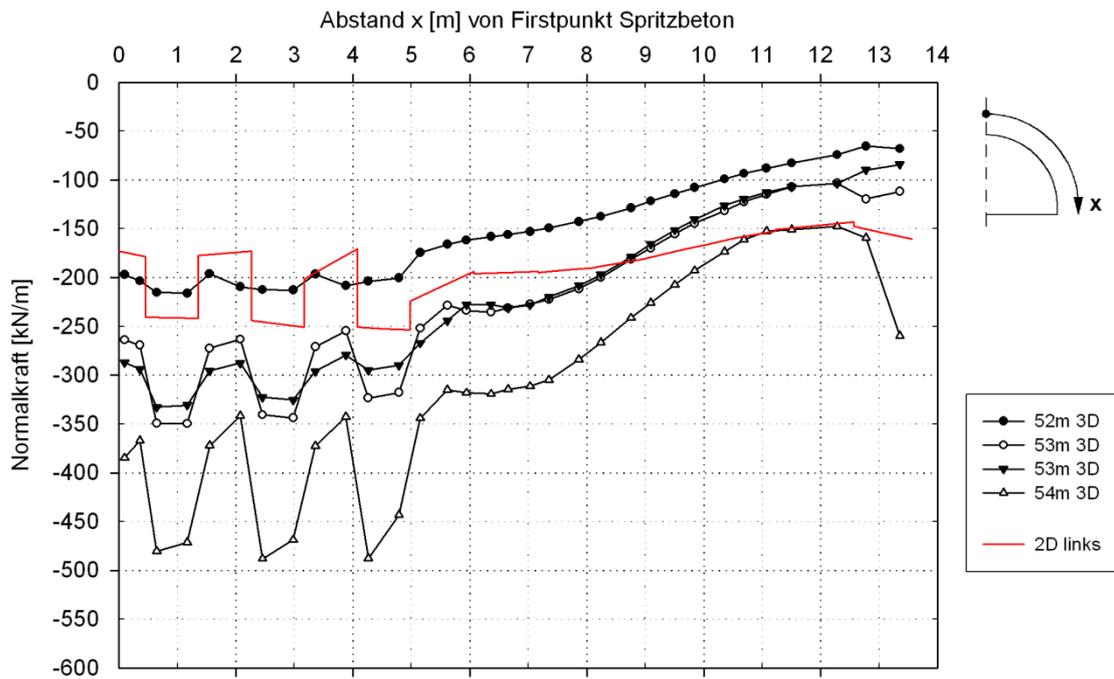


Abb. 5.24: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, aufgelöster Rohrschirm

Die Normalkräfte des aufgelösten Rohrschirms sind um rund 100 bis 250 kN/m höher als in der zuvor durchgeführten Berechnung mit dem homogenen Bereich (siehe Abb. 5.4).

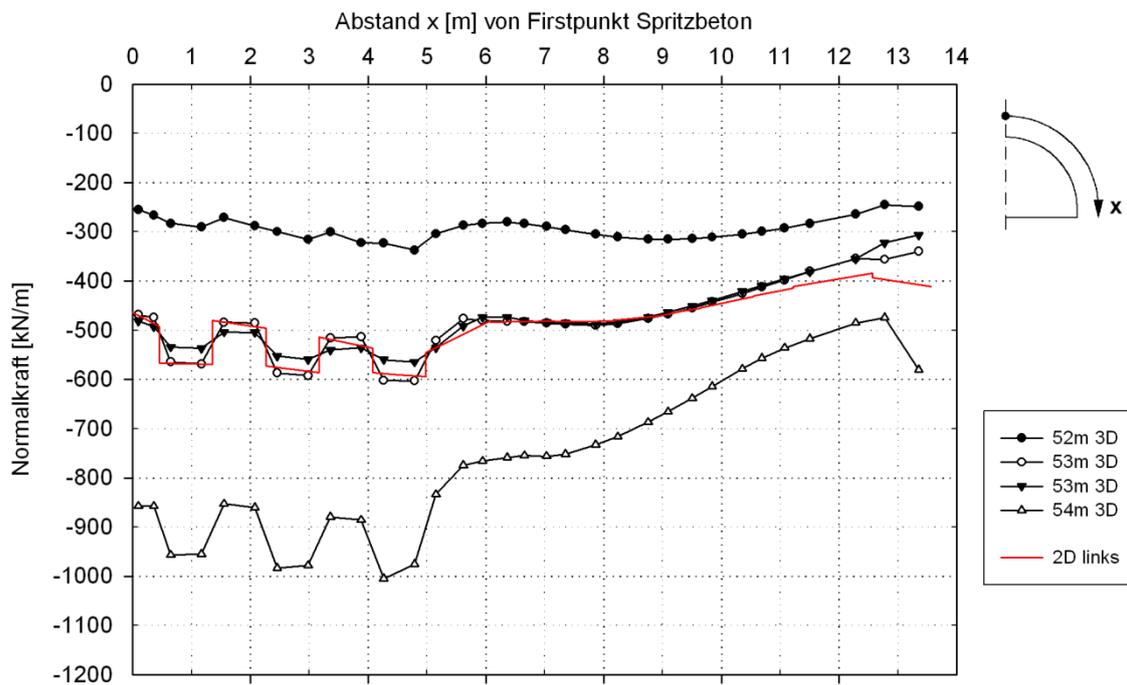


Abb. 5.25: Normalkraftverlauf Endzustand, aufgelöster Rohrschirm

Im Endzustand ergeben die Normalkräfte in der 3D-Berechnung Maximalwerte um -1000 kN/m. Die Normalkräfte der 2D-Berechnung stimmen mit der der 3D-Berechnung bei Station 53 m sehr gut überein. Die Bandbreite der Normalkräfte ist jedoch mit Werten

von -250 kN/m bis -1000 kN/m sehr groß. Die errechneten Werte der 2D-Berechnung sollten sich immer in dieser Bandbreite befinden.

Die Verläufe der Normalkräfte in der 2D-Berechnung für Spritzbeton jung und den Endzustand weisen im Bereich des Rohrschirms einen flacheren Verlauf gegenüber der Berechnung des Rohrschirms als homogener Bereich auf.

Die Schnittkräfte in der Tunnelschale sind mit der Berechnung des aufgelösten Rohrschirms tendenziell höher als in den vorangegangenen Berechnungen. Der Rohrschirm ist durch die Aufteilung in die zwei Parameter weicher und es wird mehr Last auf die Tunnelschale übertragen.

Das Verhalten des Rohrschirms wird in der aufgelösten Berechnung realitätsnaher abgebildet. Der Verlauf der Normalkräfte im Endzustand der 2D-Berechnung entspricht dem der 3D-Berechnung.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden zweidimensionale und dreidimensionale Berechnungen von Tunneln durchgeführt und anschließend die Vorentlastungsfaktoren ermittelt.

Es hat sich gezeigt, dass die Berechnung dieser Faktoren über das Firstverformungsverhältnis für den dargestellten oberflächennahen Tunnel aus Abschnitt 4.2 nicht zielführend war. Dabei wurden Vorentlastungsfaktoren ermittelt, bei denen das Berechnungsmodell bereits vor Erreichen des Vorentlastungsfaktors versagte oder die Setzungen in der 2D-Berechnung die der 3D-Berechnung weit überstiegen.

Die Ermittlung der Vorentlastungsfaktoren über die Kalibrierung der Verformungen der Tunnelnirte lieferte eine gute Übereinstimmung der Firstverformungen zwischen 2D- und 3D-Modell. Ebenfalls konnten durch die Verwendung von zwei Vorentlastungsfaktoren in der 2D-Berechnung die Schnittkräfte in der Tunnelschale in den verschiedenen Alterungsphasen ermittelt werden.

Der Vergleich der Schnittkräfte hat jedoch gezeigt, dass es schwierig ist, die Bandbreite der Schnittkräfte aus der 3D-Berechnung in einer 2D-Berechnung abzubilden. Im weiteren Verlauf wurde festgestellt, dass auch bei gleichen Firstverformungen in 2D und 3D unterschiedliche Verformungsverläufe über den Tunnelumfang erhalten werden. Dies ist als Ursache für die Unterschiede in den Schnittkraftverläufen der 2D- und 3D-Berechnungen anzusehen.

Bei der Modellierung des Rohrschirms als verschmierter Bereich mit konstanter Steifigkeit bildet sich die Tragwirkung des Rohrschirms in der 2D-Berechnung in Umfangsrichtung aus. Da der Rohrschirm in der 3D-Berechnung und der Realität in Längsrichtung trägt, ist dieses Verhalten unrealistisch. Die aufgelöste Modellierung mit unterschiedlichen Steifigkeiten liefert eine bessere Annäherung an die Realität. Unter Umständen kann jedoch ein vorzeitiges Versagen des Bodens zwischen den Rohren auftreten. Um dem entgegen zu wirken, wäre eventuell eine Modellierung der Zwischenräume mit elastischen Materialparametern für das weiche Material zu untersuchen.

Die Übertragung von Vorentlastungsfaktoren zwischen Tunneln mit auch nur geringfügig abweichenden Geometrien erweist sich als schwierig. In den beiden Modellen mit der Bodenschichtdicke von 5,5 m ergaben die Berechnungen für die Tunnelgeometrie und die vereinfachte Geometrie deutlich unterschiedliche Verformungen für gleiche Vorentlastungsfaktoren.

Bei der Berechnung des tieferliegenden Tunnels im steifen Fels ist die Abbildung des Tragverhaltens in 2D mit Vorentlastungsfaktoren besser möglich als bei den oberflächennahen Tunneln, da die Tunnelschale keinen nennenswerten Einfluss auf die

Verformungen hat. Es ist jedoch empfehlenswert zwei Vorentlastungsfaktoren zu verwenden um die Schnittkräfte getrennt für Spritzbeton jung und alt zu erhalten.

Die Verwendung der Vorentlastungsfaktoren nach Kielbassa für oberflächennahe Tunnel ist problematisch, da selbst in der Nachrechnung ein deutlicher Unterschied zwischen Kielbassa und den Werten der Nachrechnung für die Verformungen auftrat. Ebenso ergab sich auch eine Abweichung des Vorentlastungsfaktors für den tieferliegenden Tunnel.

Anhang A

In diesem Anhang sind weitere Berechnungsergebnisse zu den vorherigen Ausführungen mit dem Mohr-Coulomb Modell aus Abschnitt 5 dargestellt. Die Berechnungen und Ermittlungen der Ergebnisse wurden bereits diskutiert, sodass hier nur mehr eine kurze Erklärung der Diagramme erfolgt.

Es werden ergänzend zu Abschnitt 5 die ermittelten Firstverformungen für die Berechnung mit zwei Vorentlastungsfaktoren, sowie die Schnittkräfte der Modelle mit den Schichtdicken 7,0 m und 8,5 m dargestellt. Ebenso erfolgt die Auswertung der Schnittkräfte des Modells mit der Tunnelgeometrie und der Schichtdicke 5,5 m.

A.1 Ergebnisse der Firstverformungen für zwei Vorentlastungsfaktoren

In Tab. A 1 sind die Ergebnisse für die weiteren Modelle mit einer Bodenschichtdicke von 7,0 m bis 10,0 m mit der vereinfachten Geometrie angeführt. Ebenso ist das Ergebnis für das Modell mit der 5,5 m starken Bodenschicht und der Tunnelgeometrie dargestellt. Diese Tabelle dient als Ergänzung zu Tab. 5.1.

	Uy aus 3D Berechnung [mm]	Mstage [-]	Uy aus 2D Berechnung [mm]	Uy aus 3D Berechnung [mm]	Mstage [-]	Uy aus 2D Berechnung [mm]
	Station 52 m, Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie			Station 53 m, Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie		
Vorentlastung	-4,0	0,50	-4,0	-3,0	0,40	-3,0
SB jung + Anker	-5,3	0,38	-5,3	-4,8	0,53	-4,8
SB alt (steady state)	-6,4 (-6,5)		-6,6	-6,4 (-6,5)		-5,9
	Station 52 m, Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie			Station 53 m, Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie		
Vorentlastung	-4,2	0,14	-4,2	-3,4	0,13	-3,4
SB jung + Anker	-5,1	0,38	-5,1	-4,7	0,49	-4,7
SB alt (steady state)	-6,0 (-6,3)		-5,9	-6,0 (-6,3)		-5,4
	Station 52 m, Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie			Station 53 m, Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie		
Vorentlastung	-5,6	0,14	-5,6	-4,7	0,12	-4,7
SB jung + Anker	-6,8	0,42	-6,8	-6,2	0,52	-6,2
SB alt (steady state)	-8,5 (-8,8)		-7,7	-8,5 (-8,8)		-7,0
	Station 52 m, Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie			Station 53 m, Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie		
Vorentlastung	-7,4	0,14	-7,4	-6,3	0,12	-6,3
SB jung + Anker	-8,8	0,43	-8,8	-8,0	0,53	-8,0
SB alt (steady state)	-11,0 (-11,2)		-9,8	-11,0 (-11,2)		-8,9

Tab. A 1: Ergebnisse Firstverformungen für zwei Vorentlastungsfaktoren

Die Ergebnisse der Firstverformungen in der 3D-Berechnung und der 2D-Berechnung in Station 52 m passen gut zusammen. In Station 53 m betragen die Abweichungen bis zu -2 mm.

A.2 Schnittkräfte Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie

Es folgt ergänzend die Auswertung der Schnittkräfte für die Tunnelgeometrie aus Abschnitt 3.1.1. Die Ergebnisse aus der vereinfachten Geometrie wurden bereits unter Abschnitt 5.2 dargestellt. Die Schichtdicke für den Boden beträgt 5,5 m.

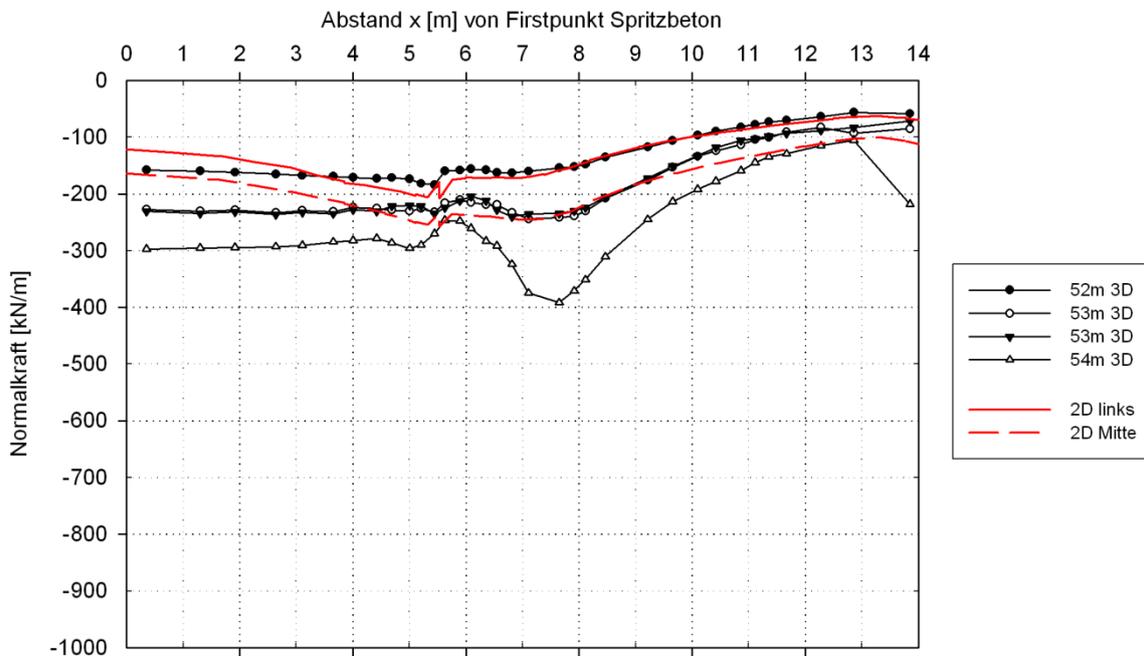


Abb. A 1: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie

Der Normalkraftverlauf der 2D-Berechnung in Abb. A 1 weicht im Bereich des Rohrschirms von der 3D-Berechnung ab. Der Bereich der Ulme liefert in 2D, sowie in 3D annähernd denselben Verlauf. Die Normalkräfte in der 3D-Berechnung haben eine Bandbreite an der Firste von -300 kN/m bei Station 54 m bis -150 kN/m bei Station 52m. Die 2D-Berechnung gibt Normalkräfte im mittleren bis unteren Bereich der 3D-Berechnung wieder.

Im Endzustand entspricht der 2D-Verlauf im Bereich der Firste annähernd dem 3D-Verlauf der Normalkräfte (siehe Abb. A 2). Im Ulmenbereich kommt es zu einer geringen Abweichung. Auch im Endzustand ergeben sich in der 2D-Berechnung im Vergleich zur 3D-Berechnung mittlere bis untere Normalkräfte.

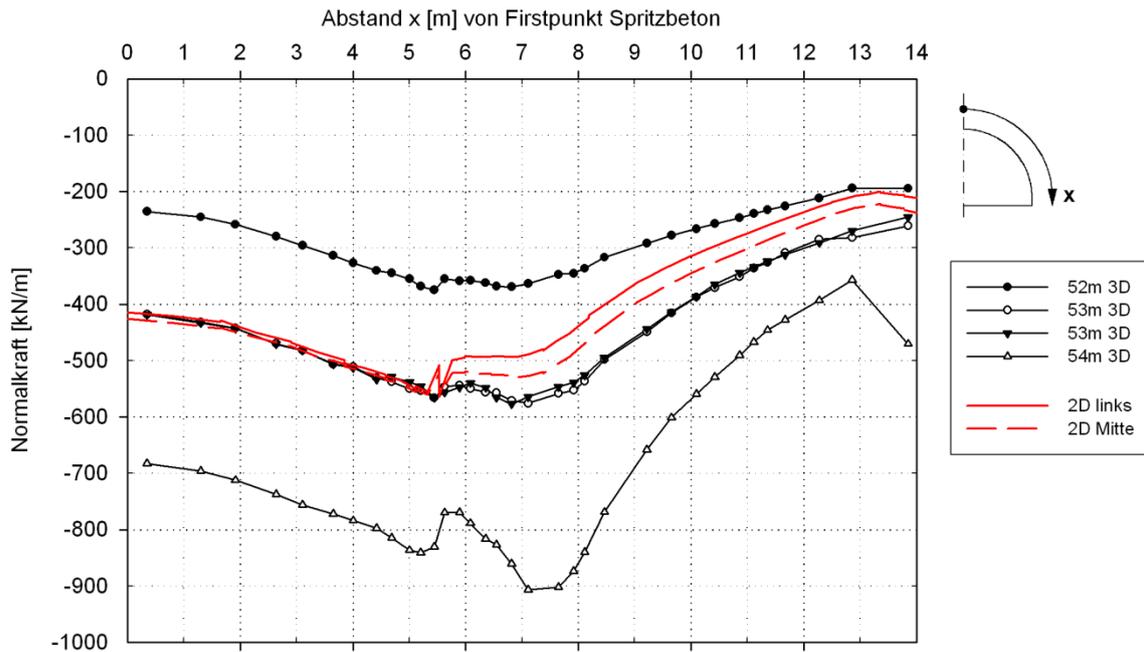


Abb. A 2: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie

Der Verlauf der Biegemomente in Abb. A 3 ist in der 2D- bzw. 3D-Berechnung nahezu identisch. Jedoch sind die Biegemomente in der Tunnelschale mit Maximalwerten von -7 kNm/m, für die Tunnelschale Spritzbeton jung, sehr gering. In der 2D-Berechnung treten unabhängig von den kalibrierten Setzungen der Stationen sehr ähnliche Verläufe der Biegemomente auf.

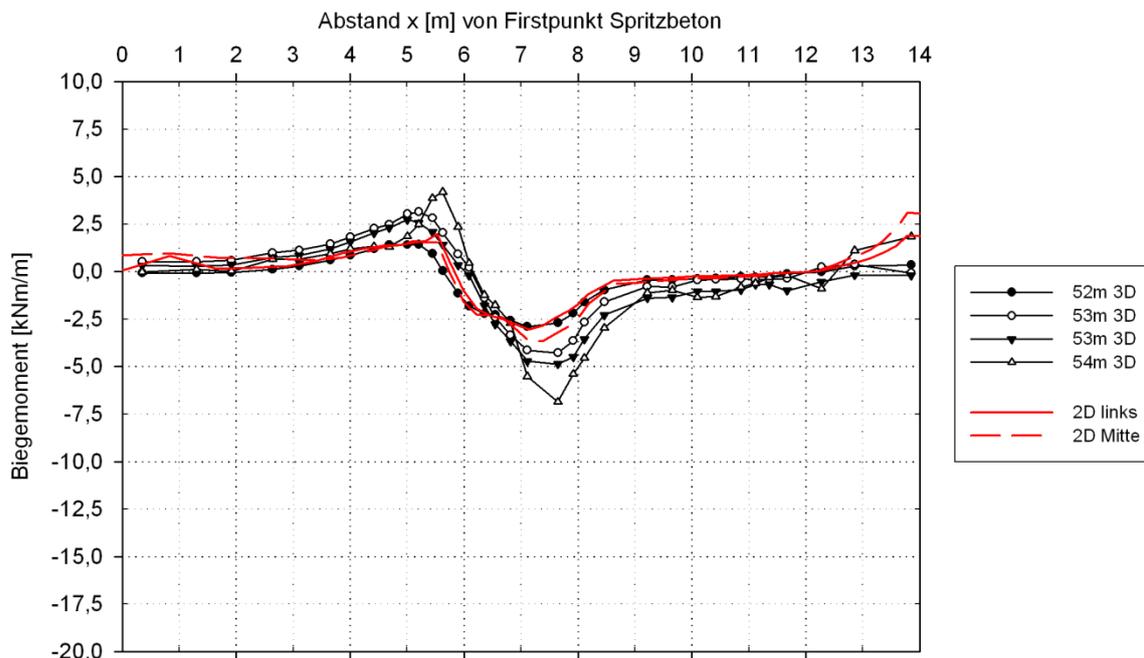


Abb. A 3: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie

Im Endzustand in Abb. A 4 erhöhen sich die Maximalwerte der Biegemomente auf -15 kNm/m. Jedoch gilt auch hier, dass die Werte für die Momente insgesamt sehr gering sind. Der Verlauf ändert sich nicht. Die 2D-Werte stimmen mit den Werten der 3D-Berechnung sehr gut überein.

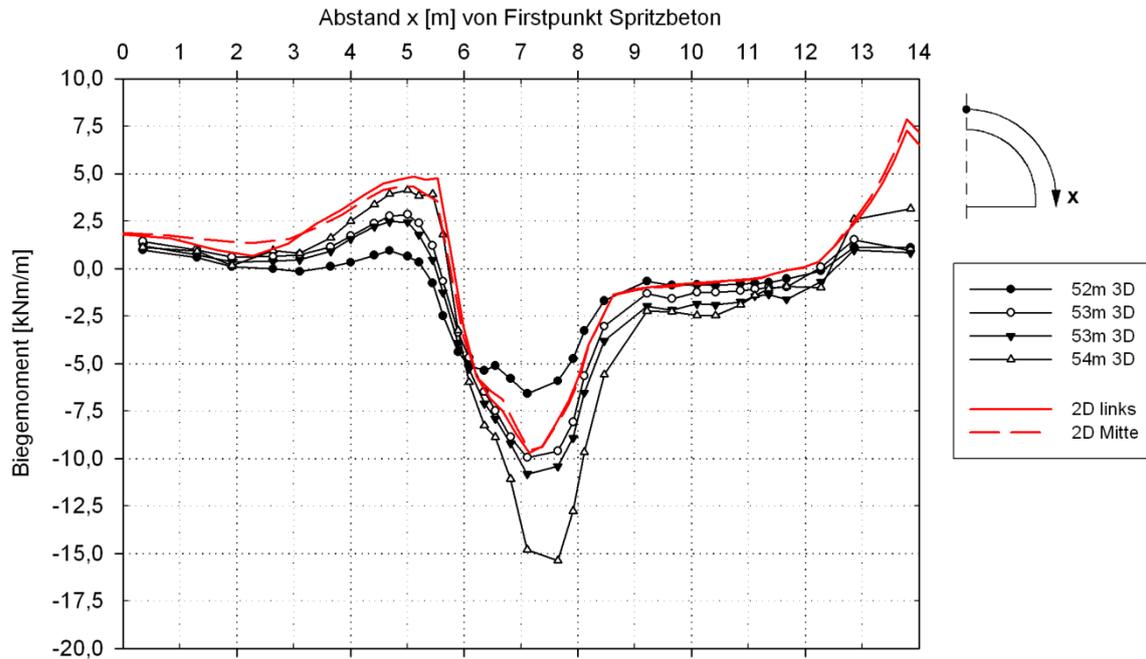


Abb. A 4: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie

A.3 Schnittkräfte Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie

Es folgt die Auswertung der Schnittkräfte für die vereinfachte Geometrie aus Abschnitt 3.1.2. Die Schichtdicke für den Boden beträgt 7,0 m und der Rohrschirm wird senkrecht zur Tunnelschale abgeschlossen. Es wird eine Zwischenschicht mit erhöhter Kohäsion von $c=20$ kPa im Gegensatz zum Boden über dem Fels eingeführt. Die anderen Bodenparameter des Bodens werden beibehalten.

Die Normalkräfte der 2D-Berechnung in Abb. A 5 befinden sich, wie in den anderen Modellen, im unteren bzw. mittleren Bereich der 3D-Berechnung. Im Bereich des Rohrschirms passen die Verläufe der 2D- und der 3D-Berechnung zusammen, im Bereich der Ulme kommt es wieder zu einer Abweichung. Die Werte belaufen sich in der 3D-Berechnung auf -110 kN/m bis -215 kN/m an der Tunnelfirste. Der Maximalwert beträgt ca. -520 kN/m.

Im Endzustand in Abb. A 6 befinden sich die Normalkräfte der 2D-Berechnung im mittleren Bereich der 3D-Berechnung. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Bandbreite der Maximalwerte der einzelnen Stationen von -400 kN/m bis -1100 kN/m sehr groß ist.

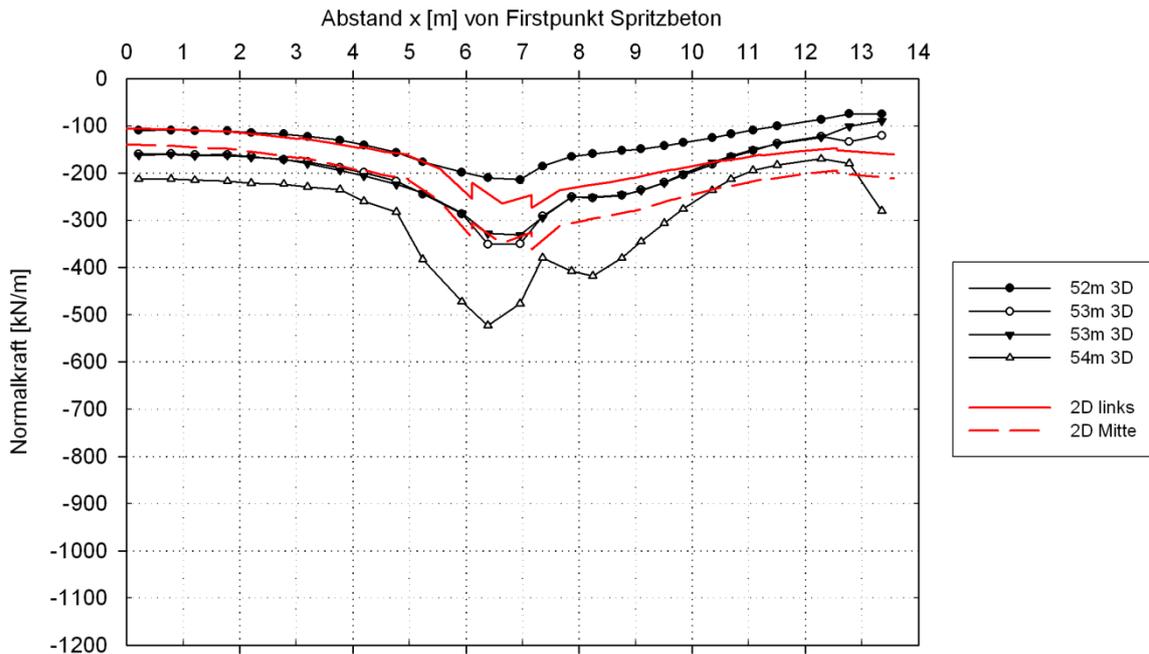


Abb. A 5: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie

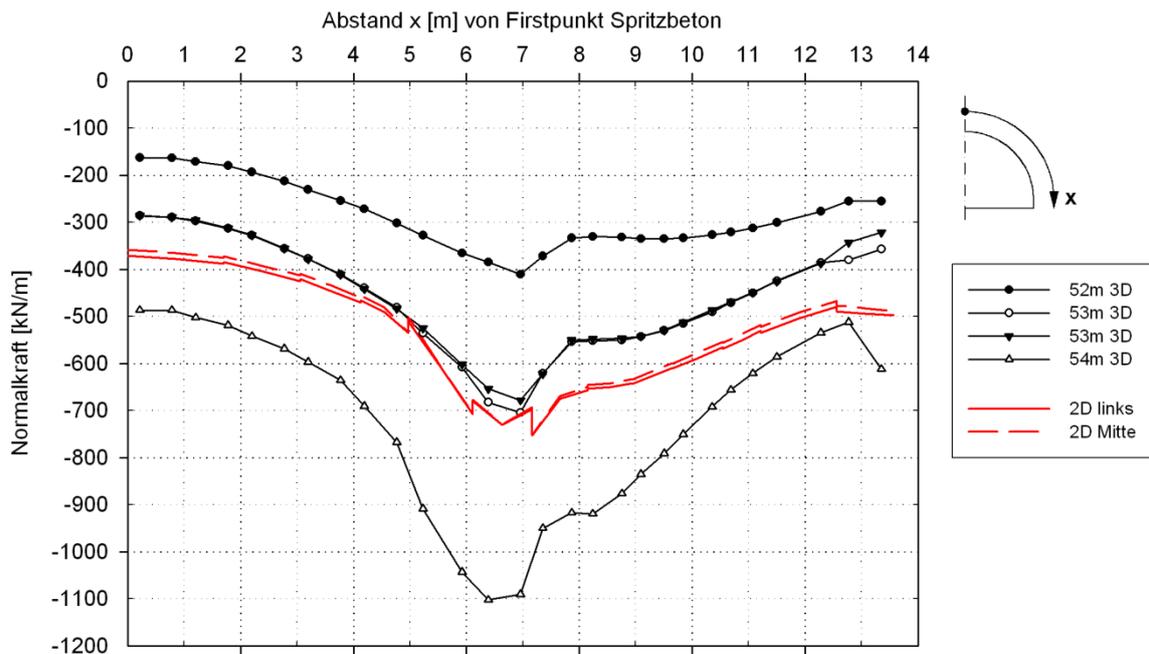


Abb. A 6: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie

Der Verlauf der Biegemomente des Modells mit der Schichtdicke des Bodens von 7,0 m für Spritzbeton jung in Abb. A 7 entspricht in der 2D-Berechnung annähernd der der 3D-Berechnung. Die Werte sind ebenfalls sehr gering. Im Bereich vom Ende des Rohrschirms bis zum Übergang von Boden auf Fels treten die Maximalwerte der Biegemomente auf. In der 3D-Berechnung ergeben die Werte 18 kNm/m und -10 kNm/m. Die 2D-Werte sind in diesem Bereich mit 8 kNm/m und -3 kNm/m kleiner und liegen im unteren Bereich der Biegemomente aus der 3D-Berechnung.

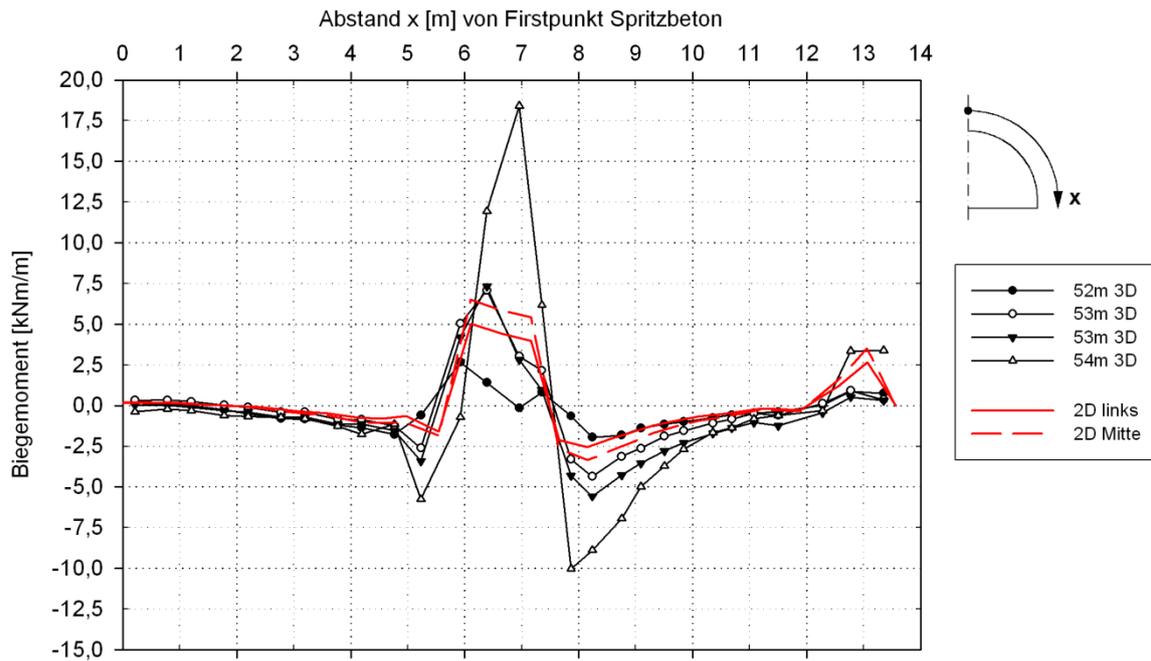


Abb. A 7: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie

Im Endzustand (siehe Abb. A 8) erhöhen sich die Biegemomente im Bereich der Tunnelfirste in der 3D-Berechnung auf 2,5 kNm/m. Die Maximalwerte gegenüber dem Spritzbeton jung ändern sich nur geringfügig. Die Maximalwerte der 2D-Berechnung entsprechen annähernd den Werten aus der 3D-Berechnung. Jedoch ist im 2D-Bereich der Firste nahezu kein Biegemoment vorhanden.

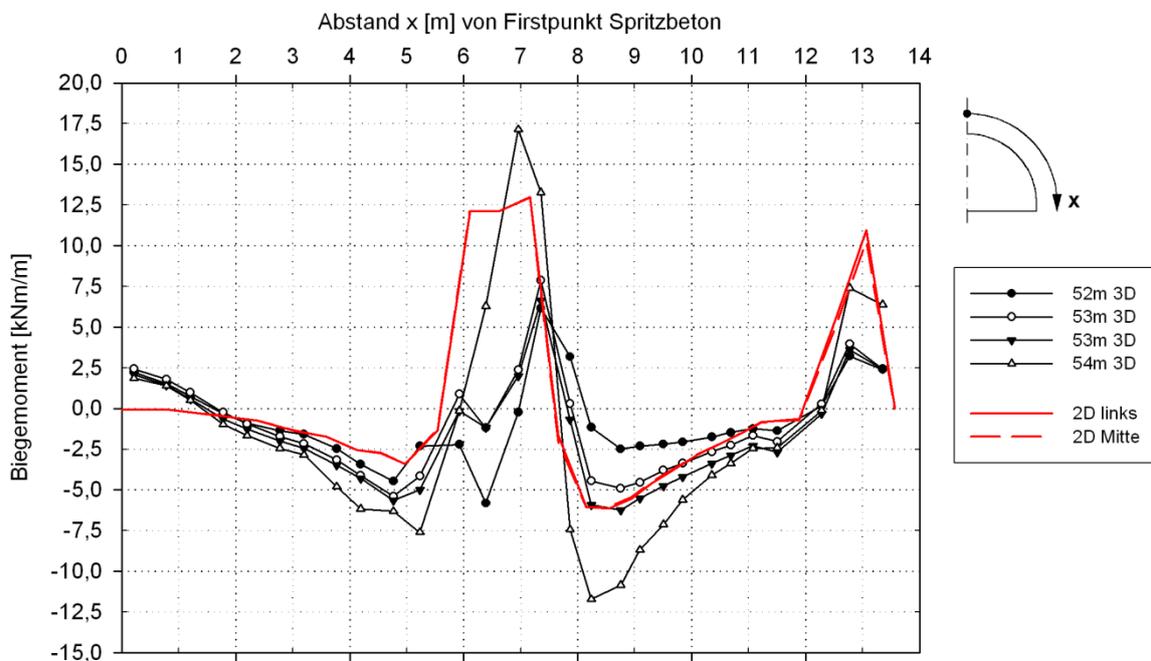


Abb. A 8: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie

A.4 Schnittkräfte Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie

Als nächster Punkt erfolgt die Auswertung des Modells mit der vereinfachten Geometrie aus Abschnitt 3.1.2 und einer Schichtdicke für den Boden mit 8,5 m.

Der Normalkraftverlauf der 2D-Berechnung in Abb. A 9, mit den Eigenschaften Spritzbeton jung für die Tunnelschale, entspricht im Bereich des Rohrschirms dem Verlauf der 3D-Berechnung. Die Maximalwerte der 3D-Berechnung treten, wie beim Modell mit 7,0 m Schichtdicke für den Boden, im Bereich zwischen Rohrschirmende und Übergang Boden zu Fels auf.

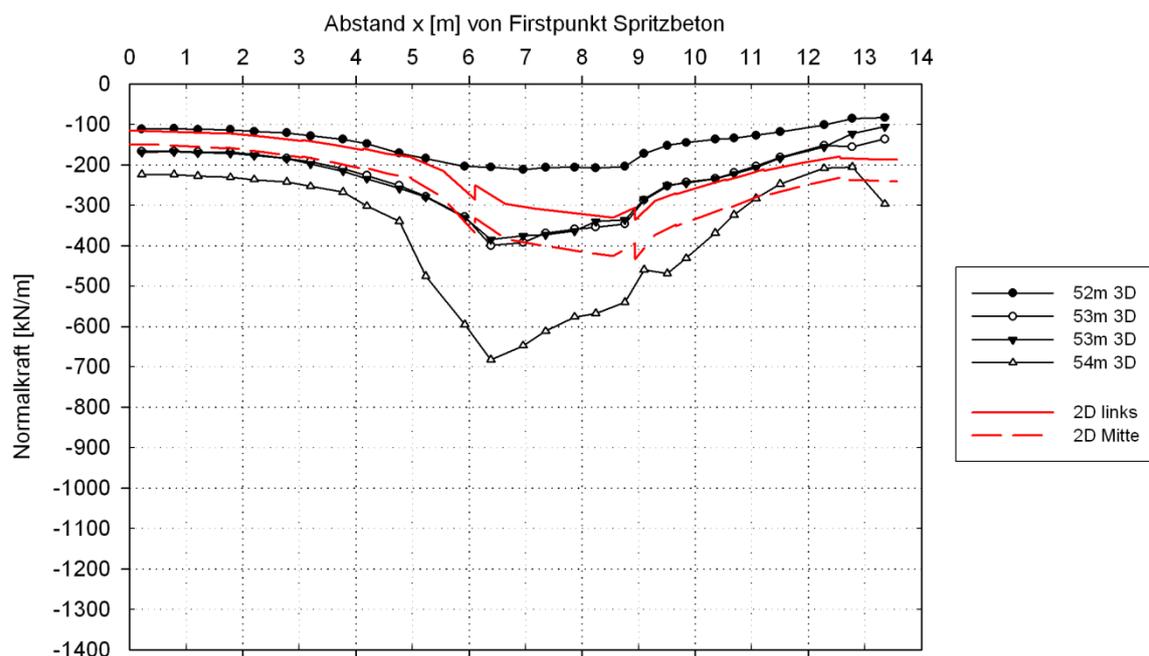


Abb. A 9: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie

Der Maximalwert der 3D-Berechnung beträgt -680 kN/m. Die Werte für die 2D-Berechnung liegen im mittleren bis unteren Bereich der 3D-Berechnung unter dem Rohrschirm. Im Bereich der Ulme bilden die 2D-Werte obere bis mittlere Normalkräfte der 3D-Berechnung ab.

Im Endzustand (siehe Abb. A 10) wurden in der 2D-Berechnung wieder die Mittelwerte der 3D-Berechnung ermittelt, die jedoch sehr stark von -1300 kN/m bis -150 kN/m streuen.

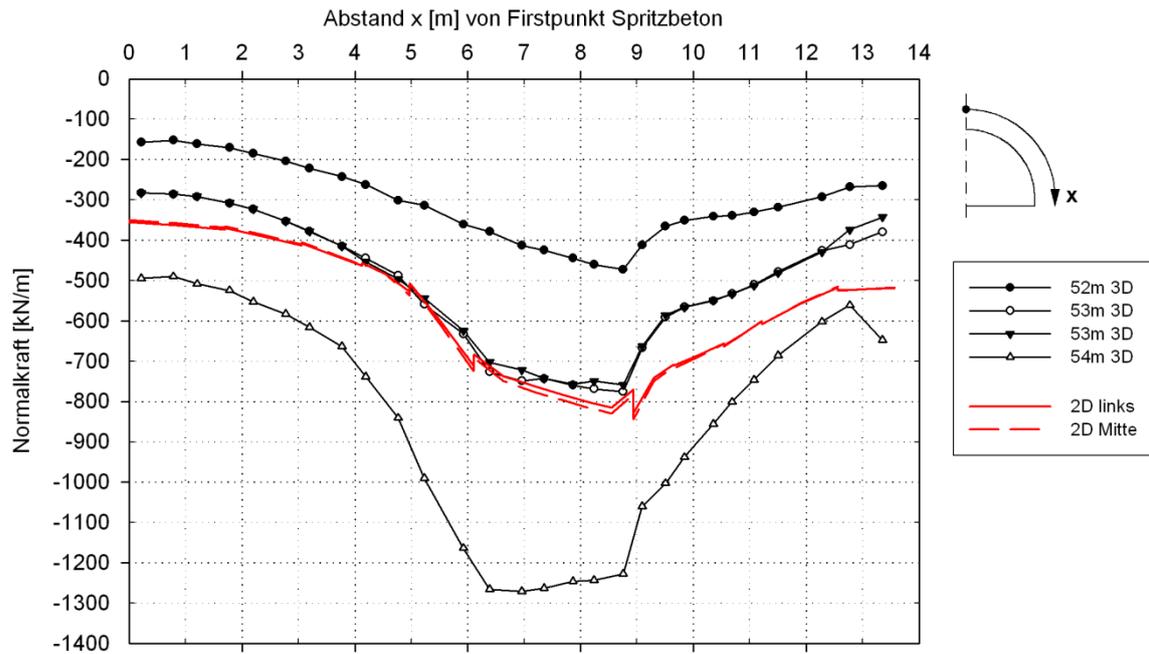


Abb. A 10: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie

Die Berechnung der Biegemomente in der Tunnelschale mit den Eigenschaften Spritzbeton jung liefert in der 2D-Berechnung nur näherungsweise die Werte der 3D-Berechnung. Die Maximalwerte weichen in 2D von 3D ab.

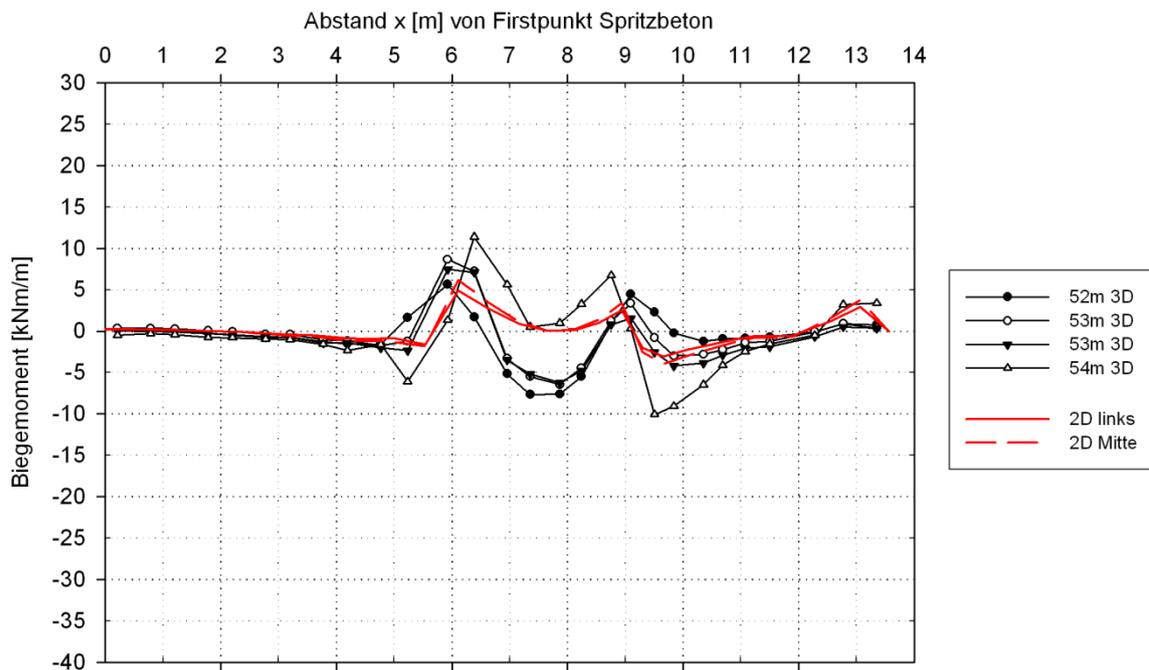


Abb. A 11: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie

Im Endzustand wird dieses Verhalten noch deutlicher sichtbar. In den Bereichen, in denen die Biegemomente sehr kleine Werte annehmen, stimmen sie in 2D und 3D überein. Der Ausschlag des Biegemoments mit dem Wert -27 kNm/m wird in der 2D-Berechnung nicht abgebildet. Hier treten an derselben Stelle keine Biegemomente auf.

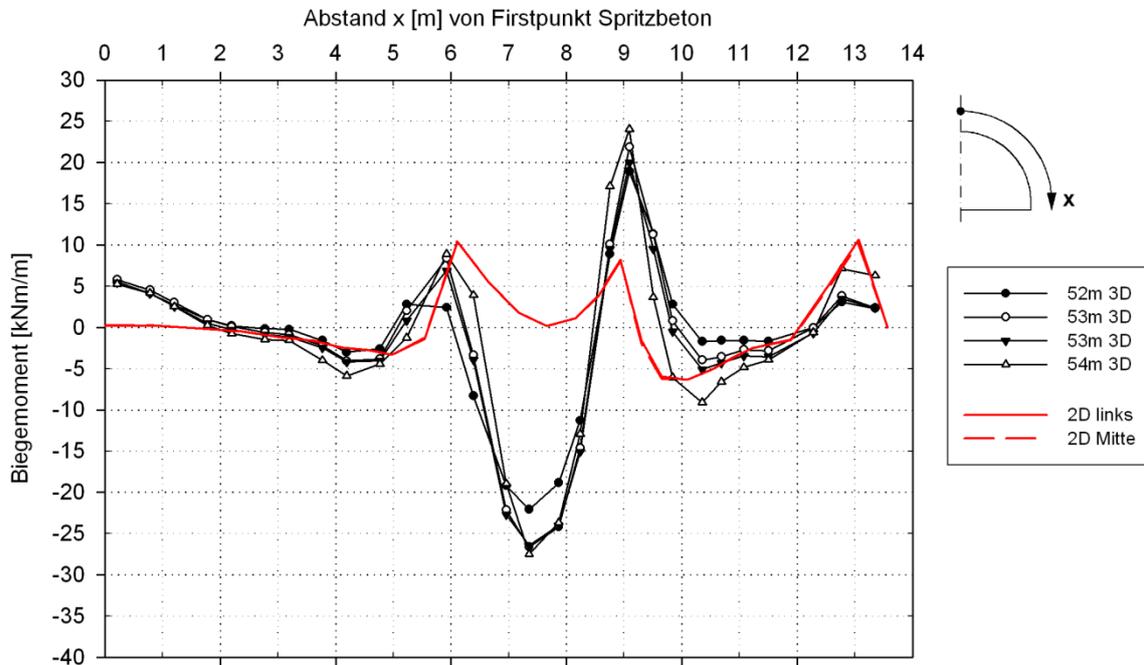


Abb. A 12: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie

A.5 Schnittkräfte Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie

Als letzter Punkt erfolgt die Auswertung des Modells mit der vereinfachten Tunnelgeometrie aus Abschnitt 3.1.2 und einer Schichtdicke für den Boden mit 10,0 m.

Der Normalkraftverlauf der 2D-Berechnung in Abb. A 13, mit den Eigenschaften Spritzbeton jung für die Tunnelschale, entspricht im Bereich des Rohrschirms dem Verlauf der 3D-Berechnung. Die Maximalwerte der 3D-Berechnung treten, wie beim Modell mit 8,5 m Schichtdicke für den Boden, im Bereich zwischen Rohrschirmende und Übergang Boden zu Fels auf.

Der Maximalwert der 3D-Berechnung beträgt -760 kN/m . Die Verteilung der 2D-Normalkräfte liegt wieder im unteren bis mittleren Bereich unter dem Rohrschirm und in der Ulme im mittleren bis oberen Bereich der 3D-Berechnung.

Im Endzustand (siehe Abb. A 14) verdoppeln sich die Werte der 3D-Berechnung und die Werte aus der 2D-Berechnung liegen im mittleren Wertebereich.

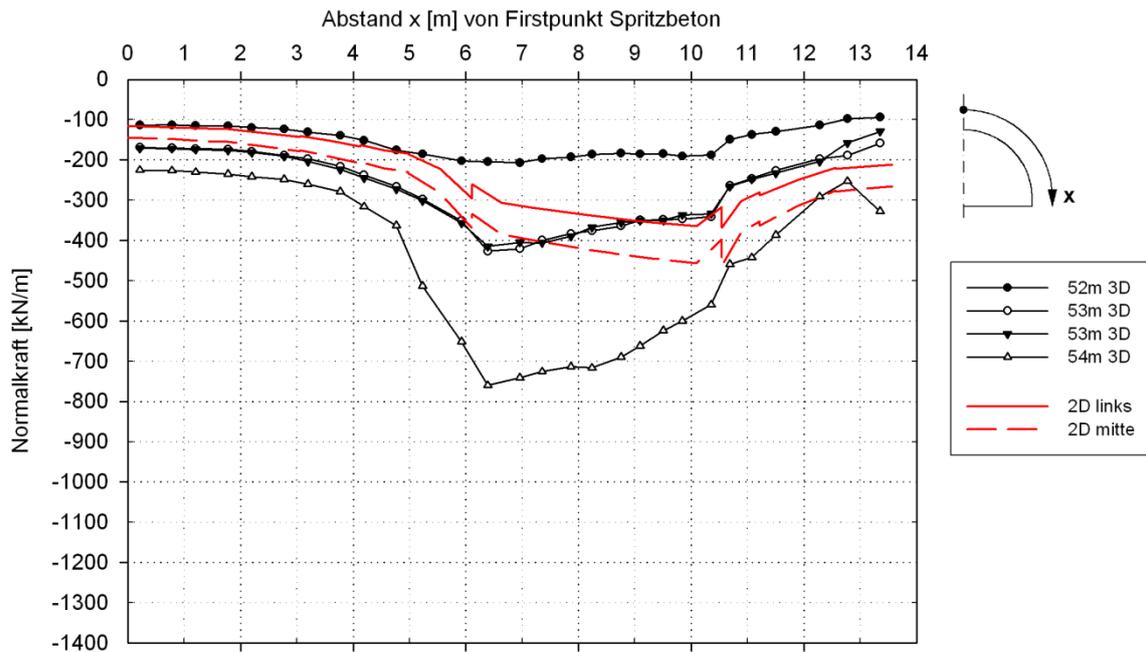


Abb. A 13: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie

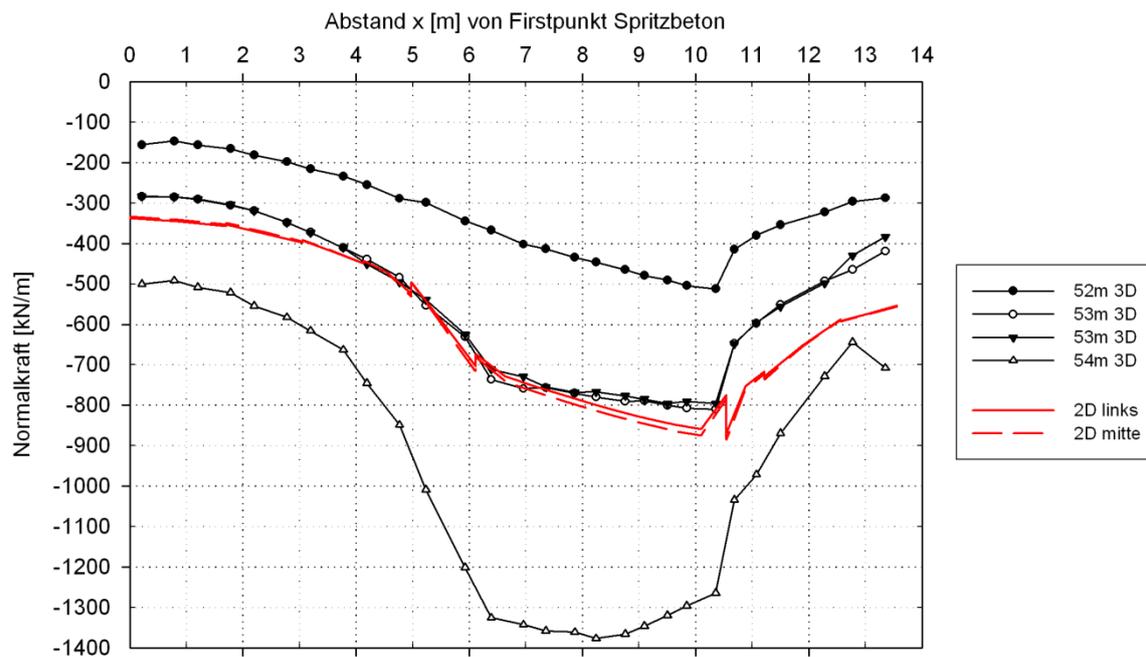


Abb. A 14: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie

Bei den Biegemomentverläufen zeigt sich dasselbe Bild wie in der Auswertung des Modells mit der Schichtdicke des Bodens von 8,5 m. Die kleinen Werte der 3D-Berechnung treten auch in der 2D-Berechnung auf, der Ausschlag in der Mitte wird jedoch nicht abgebildet.

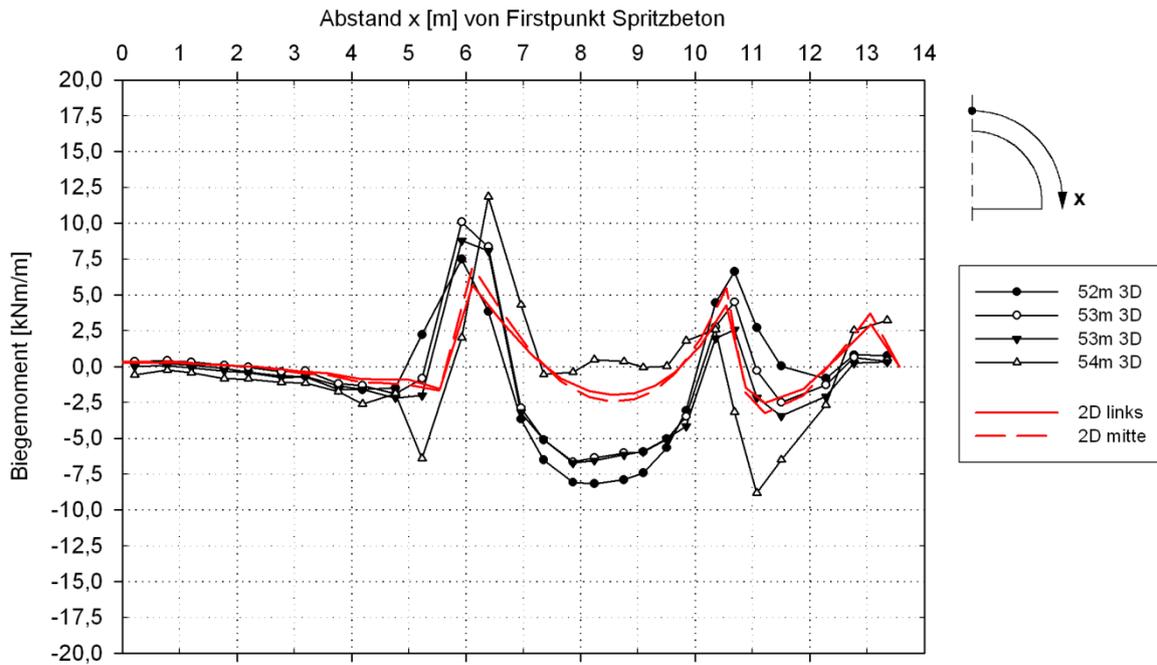


Abb. A 15: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie

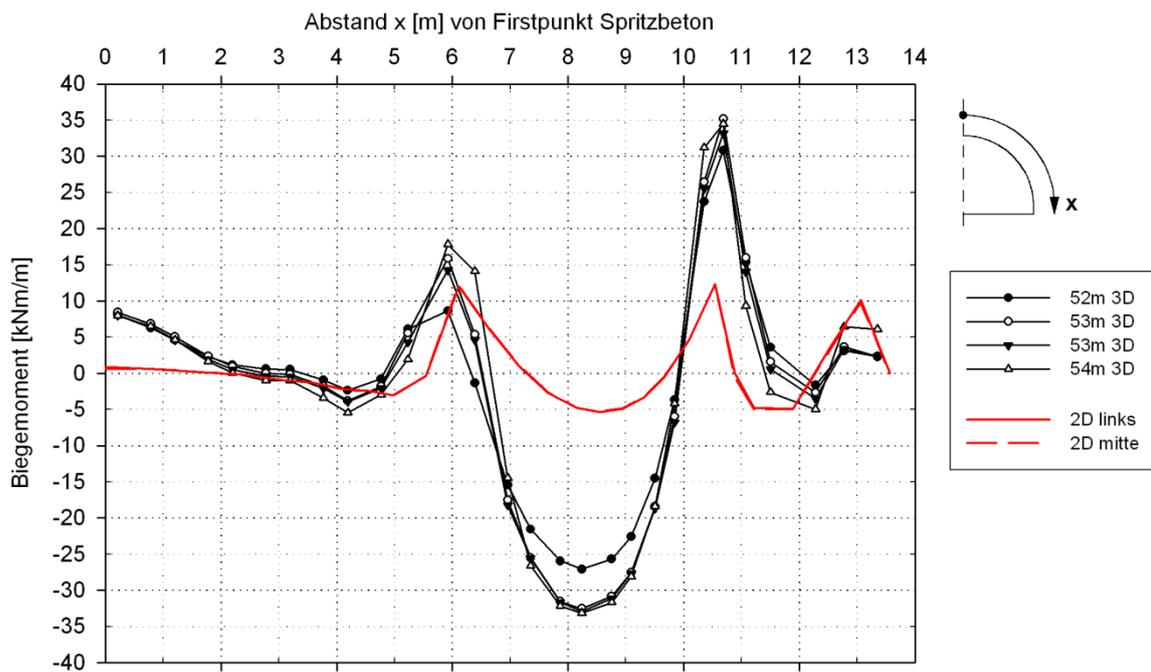


Abb. A 16: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Linear-elastisch ideal-plastisches Materialverhalten [5].....	2
Abb. 2.2: Fließoberfläche im 3D Hauptspannungsraum, $c=0$ [5]	2
Abb. 3.1: Ansatzfunktionen für 3-knotige Linienelemente [5].....	4
Abb. 3.2: Tunnelgeometrie.....	5
Abb. 3.3: vereinfachte Geometrie	5
Abb. 3.4: Vergleich Tunnelgeometrie und vereinfachte Geometrie.....	6
Abb. 3.5: Bodenschichtung und Modellgrößen für die weitere Berechnung.....	7
Abb. 3.6: 2D FE-Netz oberflächennaher Tunnel.....	9
Abb. 3.7: 2D FE-Netz tieferliegender Tunnel.....	10
Abb. 3.8: 3D FE-Netz für oberflächennahen Tunnel mit Strukturen.....	11
Abb. 3.9: 3D FE-Netz für tieferliegenden Tunnel mit Strukturen.....	12
Abb. 3.10: Schema Berechnungsablauf, eine Phase	13
Abb. 4.1: Schema Stützlastverfahren.....	14
Abb. 4.2: Auftretende Setzungen beim Ausbruchvorgang	15
Abb. 4.3: Setzungen Tunnelfirste, Messpunkt bei 53 m, oberflächennaher Tunnel, Boden: 5,5 m	16
Abb. 4.4: Verformungsschwankungen in Abhängigkeit der Lage des Ausbruchsquerschnitts zum Einbau des Rohrschirms.....	17
Abb. 5.1: Extrapolation der Schnittkräfte.....	22
Abb. 5.2: Wechsel Spritzbeton jung zu Spritzbeton alt nach 2.Vorentlastung.....	23
Abb. 5.3: Bezeichnungen für die Auswertung	24
Abb. 5.4: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m	25
Abb. 5.5: Normalkraftverlauf Firstpunkt Spritzbeton jung, Längenschnitt	25
Abb. 5.6: Gewölbetragswirkung	26

Abb. 5.7: Normalkraftverlauf Endzustand.....	26
Abb. 5.8: Verschiebung der Tunnelschale, Spritzbeton jung	27
Abb. 5.9: Verschiebungen im Bezug auf die Tunnelschale	28
Abb. 5.10: Nachrechnung Normalkraft über Verschiebungen, Spritzbeton jung	28
Abb. 5.11: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung	29
Abb. 5.12: Biegemomentenverlauf Endzustand	30
Abb. 5.13: Bezeichnungen für die Auswertung des tieferliegenden Tunnels	31
Abb. 5.14: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, tieferliegender Tunnel.....	32
Abb. 5.15: Normalkraftverlauf Endzustand, tieferliegender Tunnel.....	33
Abb. 5.16: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, tieferliegender Tunnel	33
Abb. 5.17: Biegemomentenverlauf Endzustand, tieferliegender Tunnel	34
Abb. 5.18: Firstverformungen in Abhängigkeit des Einbaus der Spritzbetonschale	35
Abb. 5.19: Tunnelquerschnitt mit Abmessungen, Modellgröße mit Tiefe der Bodenschichten [3]	36
Abb. 5.20: 2D FE-Netz, 3D-FE Netz für die Nachrechnung des Beispiels von Kielbassa	37
Abb. 5.21: Vergleich der Ergebnisse Kielbassa (links) [3] mit der Nachrechnung (rechts)	39
Abb. 5.22: Querschnitt mit Schema des aufgelösten Rohrschirms	41
Abb. 5.23: Totale Verschiebungen für Modell mit aufgelöstem Rohrschirm, Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m.....	43
Abb. 5.24: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, aufgelöster Rohrschirm.....	44
Abb. 5.25: Normalkraftverlauf Endzustand, aufgelöster Rohrschirm	44
Abb. A 1: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie.....	49
Abb. A 2: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie.....	50

Abb. A 3: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie.....	50
Abb. A 4: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 5,5 m, Tunnelgeometrie.....	51
Abb. A 5: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie.....	52
Abb. A 6: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie.....	52
Abb. A 7: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie.....	53
Abb. A 8: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 7,0 m, vereinfachte Geometrie.....	53
Abb. A 9: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie.....	54
Abb. A 10: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie.....	55
Abb. A 11: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie.....	55
Abb. A 12: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 8,5 m, vereinfachte Geometrie.....	56
Abb. A 13: Normalkraftverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie.....	57
Abb. A 14: Normalkraftverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie.....	57
Abb. A 15: Biegemomentenverlauf Spritzbeton jung, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie.....	58
Abb. A 16: Biegemomentenverlauf Endzustand, Schichtdicke Boden 10,0 m, vereinfachte Geometrie.....	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Materialparameter Boden.....	6
Tab. 3.2: Materialparameter Auskleidung.....	7
Tab. 4.1: Ergebnisse Vorentlastung aus Verformungsverhältnis 3D-Berechnung an der Tunnelfirste und Ergebnisse aus der 2D-Berechnung mit Mstage.....	18
Tab. 4.2: Ergebnisse Vorentlastung aus Setzungsverhältnis 3D-Berechnung an der Oberfläche und Ergebnisse aus der 2D-Berechnung mit Mstage.....	18
Tab. 4.3: Ergebnisse Vorentlastung aus Kalibrierung 2D U_y , Vorentlastung auf 3D U_y , Beginn SB jung an der Tunnelfirste.....	19
Tab. 4.4: Ergebnisse Vorentlastung aus Kalibrierung 2D U_y , Vorentlastung auf 3D U_y , Beginn SB jung an der Oberfläche.....	20
Tab. 4.5: Ergebnisse linear-elastische Berechnung, Verformung U_y an der Tunnelfirste	21
Tab. 5.1: Ergebnisse der Firstverformungen mit zwei Vorentlastungsfaktoren	23
Tab. 5.2: Ergebnisse von Kielbassa.....	39
Tab. 5.3: Werte für die Nachrechnung von Kielbassa	39
Tab. 5.4: Materialparameter für den aufgelösten Rohrschirm.....	41
Tab. 5.5: Ergebnisse Vorentlastung aus Setzungsverhältnis 3D Berechnung, Ergebnisse 2D-Berechnung an der Tunnelfirste	42
Tab. 5.6: Ergebnisse der Firstverformungen mit zwei Vorentlastungsfaktoren	42
Tab. A 1: Ergebnisse Firstverformungen für zwei Vorentlastungsfaktoren	48

Literaturverzeichnis

- [1]. **Meissner, H.** Tunnelbau unter Tage, Empfehlungen des AK 1.6 "Numerik in der Geotechnik", Abschnitt 2. *Geotechnik 19 (1996) Nr.2.* 99-108.
- [2]. **Plaxis bv.** *Plaxis 2D Reference Manual Version 9.0.* [Manual] Netherlands : Plaxis bv.
- [3]. **S. Kielbassa and H. Duddeck.** Stress-Strain Fields at the Tunnelling Face - Three Dimensional Analysis for Two-dimensional Technical Approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 1991, Bd. 24 (3), 115-132.
- [4]. **Volkman G.M., Button E.A. & Schubert W.** *A Contribution to the Design of Tunnels Supported by a Pipe Roof.* Proc. 41st U.S. Rock Mechanics Symp. : American Rock Mech. Assoc., June 17-21, Golden, CO, 2006.
- [5]. **Plaxis bv.** *Plaxis 2D Material Models Manual Version 9.0.* [Manual] Netherlands : Plaxis bv.