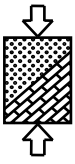


Kurzfassung

Parameterstudie zur Ermittlung der erforderlichen Steifigkeit des Ringraummaterials beim oberflächennahen Schildvortrieb

Finanzielle Unterstützung: Bilfinger Berger AG,
Bilfinger Berger Ingenieurbau GmbH
Niederlassung Tunnelbau, München



1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Steifigkeit des Ringraummaterials hat bei oberflächennahen Tunneln einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die Oberflächensetzungen als auch auf die Schnittgrößen im Tübbingausbau. Am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen (GiB) sollte hierzu eine Parameterstudie durchgeführt werden, um die erforderliche Steifigkeit des Ringraummaterials beim Schildvortrieb rechnerisch so zu bestimmen, dass die Oberflächensetzungen und die Schnittgrößen auf den Tübbingausbau minimiert werden. Im Rahmen der Parameterstudie wurden 2D Simulationen mit dem FE-Programm ABAQUS durchgeführt.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

2.1 Kenngrößen und Parameter

Die Parameterstudie beruht auf vereinfachten Grundlagen, wie sie oft in der Praxis angewendet werden. Die Simulationen wurden mit folgenden Kenngrößen durchgeführt:

- Tunneldurchmesser: 7 m.
- Tübbingausbau: 7+1
- Dicke Ringspalt: 20 cm
- Überdeckung: 2-facher Tunneldurchmesser
- 1 Röhre

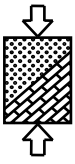
Der Baugrund wurde nach Mohr-Coulomb mit einem elastoplastischen Stoffgesetz, der Tübbingausbau und das Ringraummaterial mit einem elastischen Stoffgesetz modelliert. Jeder Rechenschritt wurde statisch im ebenen Dehnungszustand (2D) berechnet.

Im Rahmen der Parameterstudie wurden für den Untergrund ein weicher Ton, ein lockerer Sand und ein Kalkstein mit typischen Bodenparametern angesetzt. Weiterhin wurde die Steifigkeit des Ringraummaterials variiert. Hierzu wurden Steifigkeiten von 10 MN/m², 100 MN/m² und 10000 MN/m² und Querdehnzahlen von 0,2 und 0,4 als Grenzfälle für ein kompressibles bzw. nahezu inkompressibles Materialverhalten angesetzt. Die Tübbingdicke betrug 30 cm bzw. 50 cm.

2.2 Rechenschritte der Simulation

Bei den Simulationen wurden die Spannungen im Boden und im Tübbingausbau, sowie die Verformungen im Untergrund und an der Oberfläche berechnet. Dazu wurden drei Rechenschritte durchgeführt. Im Rechenschritt 1 wurde der Primärspannungszustand, im Rechenschritt 2 der Entspannungszustand beim Ausbruch und im Rechenschritt 3 der Spannungszustand nach Tübbingausbau und Ringraumverpressung simuliert.

Aus der Praxis ist bekannt, dass das Ringraummaterial einen Volumenverlust von ca. 15% infolge Konsolidierung erfährt. Um diesen Effekt in der Simulationen zu berücksichtigen, wurde der Rechenschritt 3 „Spannungszustand nach Tübbingausbau und Ringraumverpressung“ in zwei Rechenschritte unterteilt. Zunächst wird der Volumenverlust des Ringraummaterials infolge



Konsolidierung (Rechenschritt 3a) simuliert. Danach wird der Endzustand mit den zu untersuchenden Materialparametern des Ringraummaterials (Rechenschritt 3b) simuliert.

Im Rechenschritt 3a wurde dem Ringraummaterial eine abgeminderte Steifigkeit zugewiesen, so dass das Ringraummaterial den gewollten Volumenverlust von 15% erfuhr. Für den Rechenschritt 3b wurden folgende Variante berücksichtigt:

Variante a: In dieser Variante wurde die zu untersuchende Ringraumsteifigkeit eingesetzt. Bei dieser Variante trat in ABAQUS wegen des angenommenen elastischen Stoffverhaltens des Ringraummaterials das Problem auf, dass nach dem Rechenschritt 3a das Ringraummaterial eine bestimmte Spannung besaß, die im Rechenschritt 3b wegen der höheren Steifigkeit eine „Rückverformung“ im Ringraummaterial hervorrief.

Variante b: Bei dieser Variante wurden die berechneten Bodenspannungen um das verformte Ringraummaterial als externe Belastung auf das Ringraummaterial angebracht. Dabei besaß der Boden im Rechenschritt 3b kein Eigengewicht und keine Spannungen aus vorherigen Rechenschritten. Außerdem war das Ringraummaterial unverformt. Somit besaß das Ringraummaterial keine Spannungen, die eine „Rückverformung“ hervorrufen könnten. Jedoch wurde in diesem Rechenschritt die Interaktion zwischen Boden und Ringraummaterial nicht richtig simuliert.

2.3 Modellierung und Diskretisierung

2.3.1 Modellierung von Untergrund und Steuerspalt

Der Boden und der Tübbingausbau wurden mit Kontinuumselementen modelliert. Allen Kontinuumselementen sind die Kenngrößen des entsprechenden Materials zugewiesen.

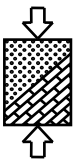
Im Primärspannungszustand (Rechenschritt 1) wurden die Elemente für das Ringraummaterial und den Tübbingausbau deaktiviert.

Der Entspannungszustand (Rechenschritt 2) wurde durch die Verformung des Bodens bis zum Schildmantel simuliert, die bei der Schildauffahrt eintreten. Bei der Verformung entspannt sich der Boden, wobei die Spannungen am Hohlraum abnehmen. Den Elementen für das Ringraummaterial wurde in diesem Rechenschritt eine sehr geringe Steifigkeit zugewiesen, um die numerischen Probleme bei der Aktivierung der Elemente des Ringraummaterials infolge einer starken Verzerrung zu verhindern. In diesem Schritt werden sie als „Luftlemente“ bezeichnet. In der Zwischenfläche zwischen dem Boden und dem Schildmantel herrscht Kontakt durch Reibung.

2.3.2 Modellierung des Ringraummaterials

Nach dem Entspannungszustand (Rechenschritt 2) wurden die Schild- und Luftlemente deaktiviert. Die Elemente des Ringraummaterials und des Tübbingausbaus wurden für den nachfolgenden Rechenschritt (Rechenschritt 3) aktiviert (Abbildung 1). Hierbei werden den Elementen des Ringraummaterials die zu untersuchenden Steifigkeiten (10 MN/m², 100 MN/m² und 10000 MN/m²) und Querdehnzahlen (0,2 und 0,4) zugewiesen. Die Zwischenfläche zwischen dem Ringraummaterial und dem Tübbingausbau wird in der FEM durch Kontakt simuliert, d.h. Normalkräfte greifen in der Fuge in radialer Richtung an und in tangentialer Richtung werden die Scherkräfte durch Reibung übertragen.

Bei Berücksichtigung des Volumenverlusts infolge Konsolidierung (Rechenschritt 3a) wurde die abgeminderte Steifigkeit in Abhängigkeit vom Untergrundtyp durch zusätzliche Simulationen nur



für Böden ermittelt. Für den lockeren Sand und den weichen Ton wurden abgeminderte Steifigkeiten von $0,45 \text{ MN/m}^2$ bzw. $0,70 \text{ MN/m}^2$ ermittelt. Bei Festgestein wie Kalkstein kann ein Volumenverlust infolge Konsolidierung ausgeschlossen werden.

Die Modellierung des Ringraummaterials mit Kontinuumselementen erlaubt eine Steifigkeit des Ringraummaterials sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung. Somit sind Zugspannungen im Ringraummaterial möglich, so dass auch eine Tragwirkung des Ringraummaterials gegeben ist. Außerdem konnte ein Einfluss der Querdehnzahl auf die Schnittgrößen und auf die Oberflächensetzungen untersucht werden.

Um Zugspannungen im Ringraummaterial auszuschließen, wurde außerdem das Ringraummaterial mit elastischen Stabelementen in radialer Richtung modelliert (Abbildung 1), so dass die Steifigkeit des Ringraummaterials nur noch radial wirkt. Die Stabelemente können somit als Federn angesehen werden. Mit dieser Modellierung findet keine Scherkraftübertragung zwischen Ringraummaterial und Tübbingausbau sowie keine Ringtragwirkung des Ringraummaterials statt.

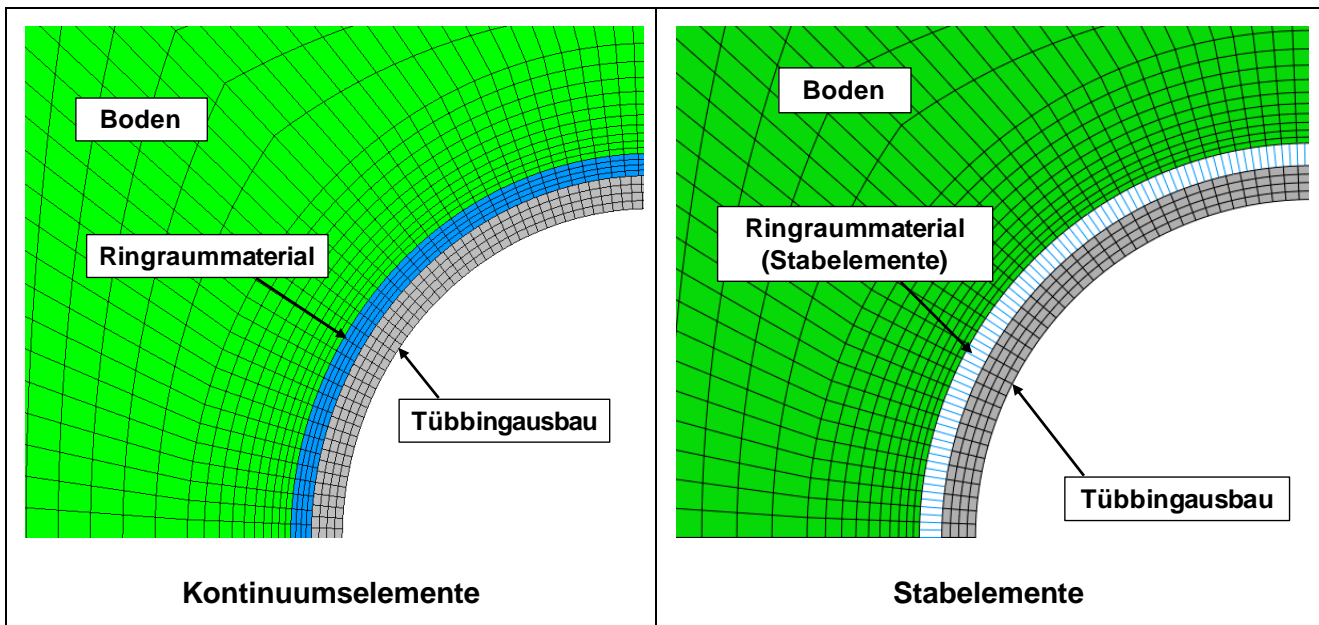


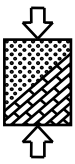
Abbildung 1: Modellierung des Ringraummaterials, Rechenschritt 3.

2.3.3 Modellierung des Tübbingausbaus

Um die Kriterien „Schnittgrößen für den Tübbingausbau“ und „Verformungen an der Oberfläche“ in ihrer ungünstigsten Kombination zu erhalten, wurden für die Modellierung des Tübbingausbaus zwei Modelle konzipiert, da es kein Modell gibt, das die Grenzfälle von beiden Kriterien (max. Schnittgrößen im Tübbingausbau und max. auftretende Verformungen) gleichzeitig wiedergibt.

Zunächst wurde im Modell A der Tübbingausbau als durchgehender Ring modelliert. Dadurch fanden wenige Spannungumlagerungen im Boden statt, so dass der Ring eine große Belastung aufnehmen musste und demzufolge die Schnittgrößen im Tübbingausbau als obere Grenze erhalten wurden.

Des Weiteren wurde im Modell B der Tübbingausbau mit Segmenten ohne feste konstruktive Verbindung modelliert, so dass sich die Tübbinge in radialer Richtung nur gebremst durch die Reibung frei verschieben konnten. Somit wurden die maximalen Verformungen an der Oberfläche



erhalten. Die Nachbildung des Tübbings entspricht üblichen Tübbingprofilen. Die Kontaktfläche zwischen den Tübbing in der Längsfuge weist eine Länge kleiner als die Tübbingdicke auf, um die Exzentrizität möglichst zu begrenzen. Der Kontakt zwischen den Tübbing wurde durch Reibung simuliert. Abbildung 2 zeigt die Modellierung von beiden Systemen.

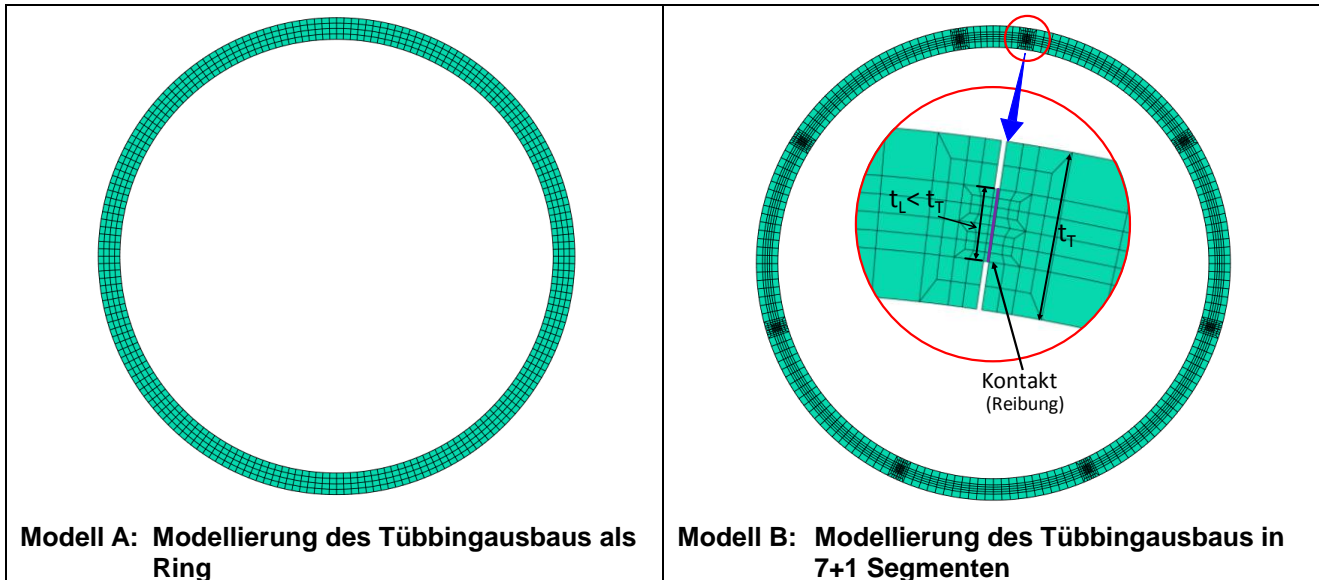


Abbildung 2: Modellierung des Tübbingausbaus

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.1 Simulationsergebnisse der Modellierung des Ringraummaterials mit Kontinuumselementen

Die Ergebnisse der Simulationen wurde für die drei Baugrundsituationen mit ihren entsprechenden Steifigkeiten (E_{Boden}) in Abhängigkeit von den drei zu untersuchenden Steifigkeiten des Ringraummaterials (E_{Ring}), den zwei unterschiedlichen Querdehnzahlen für das Ringraummaterial und zwei Tübbingdicken ausgewertet.

Maßgebend für das Kriterium „Schnittgrößen für den Tübbingausbau“ ist Modell A. Die Ergebnisse für den weichen Ton und den lockeren Sand haben gezeigt, dass das Ringraummaterial bei höheren Ringraumsteifigkeiten von 10000 MN/m^2 eine Tragwirkung aufweist, die Zugkräfte im Bereich der Firste und Sohle verursacht. Der Verlauf der Schnittgrößen für eine Ringraumsteifigkeit von 10000 MN/m^2 weicht deutlich von dem für Ringraumsteifigkeiten von 10 MN/m^2 und 100 MN/m^2 ab, die wiederum kaum zu unterscheiden sind. Bei 10000 MN/m^2 treten die kleinsten Momente auf (Abbildung 3). Für Kalkstein, der eine hohe Steifigkeit besitzt, sind die Schnittgrößen betragsmäßig kleiner und annähernd Null, so dass ein signifikanter Einfluss der Ringraumsteifigkeit ausgeschlossen werden kann.

Während eine Variation der Querdehnzahl des Ringraummaterials von 0,2 auf 0,4 keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat, kann ein dickerer Tübbingausbau von 50 cm mehr Spannungen aufnehmen. Aufgrund der höheren Steifigkeit werden die Schnittgrößen im Tübbingausbau größer. Während bei den Normalkräften der Unterschied der Verläufe gering ist, sind die unterschiedlichen Verläufe bei den Biegemomenten hingegen deutlicher.

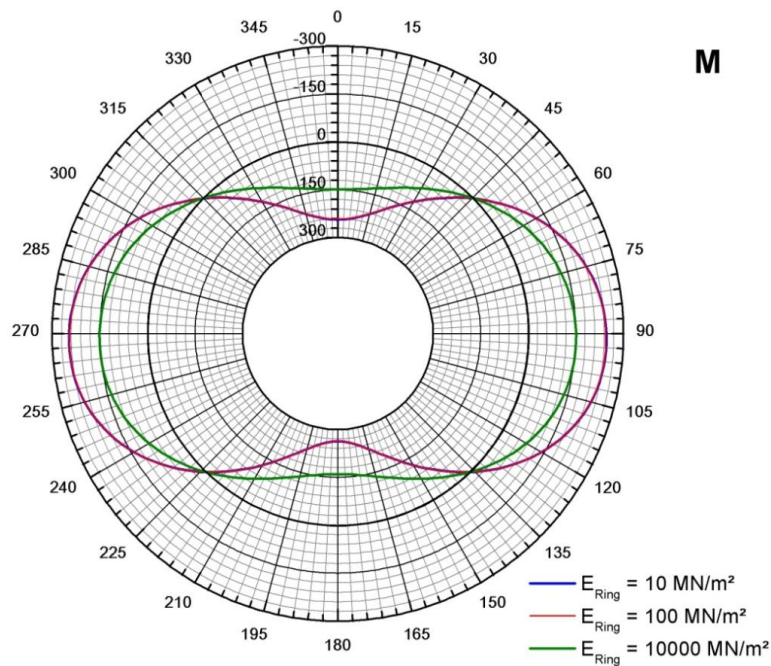
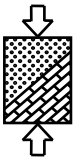


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Biegemomente im Tübbingausbau (kNm/m), Ton, $d_T = 30$ cm, $\nu = 0.2$, Modell A.

Für das Kriterium „Verformungen an der Oberfläche“ ist Modell B maßgebend. Die Oberflächensetzungen hängen hauptsächlich von dem Baugrundtyp ab. Ein Einfluss der Ringraumsteifigkeit auf die Oberflächensetzungen konnte nur für den weichen Ton erkannt werden (Abbildung 4). Je steifer das Ringraummaterial ist, desto kleiner werden die Oberflächensetzungen. Für den lockeren Sand ist der Einfluss sehr gering und für Kalkstein treten nur minimale Setzungen auf, so dass keine Abhängigkeit zwischen Oberflächensetzungen und Steifigkeit des Ringraummaterials festgestellt werden kann.

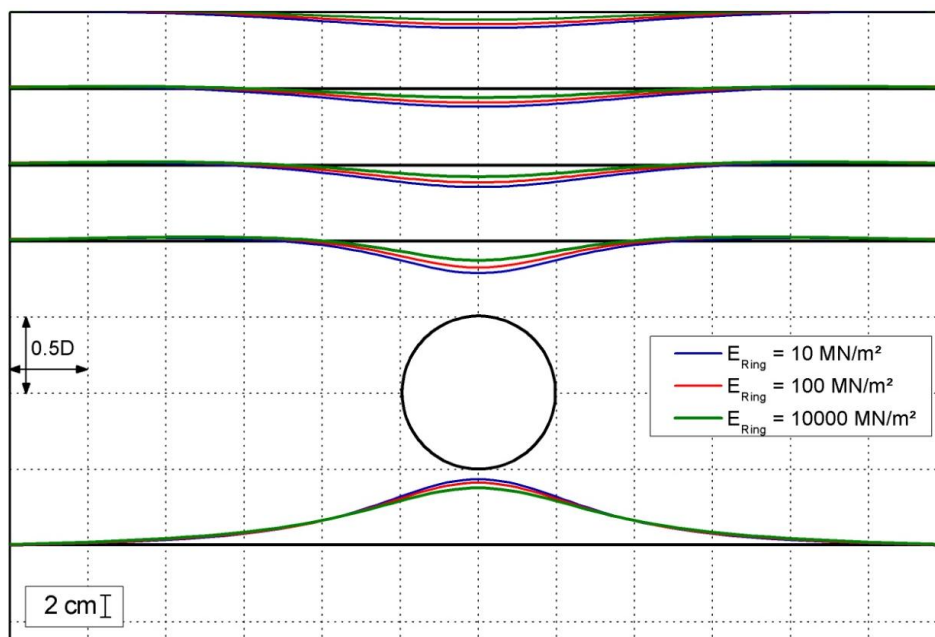
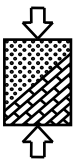


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Verformungen im Boden, Ton, $d_T = 30$ cm, $\nu = 0.2$, Modell B.



Es ist anzumerken, dass nach den Rechnungen die Endsetzungen an der Oberfläche bei weichem Ton geringer sind als beim Sand. Diese Ergebnisse entsprechen nicht der Realität. In dem Simulationsmodell werden die zeitabhängige Steifigkeitsentwicklung des Ringraummaterials sowie Setzungen infolge Konsolidierung des Bodens bei der statischen Berechnung nicht berücksichtigt.

Einen Einfluss der Querdehnzahl des Ringraummaterials auf die Verformungen im Boden war nicht zu erkennen. Ein dickerer Tübbingausbau (50 cm) hatte beim weichen Ton einen leichten Einfluss auf die Verformungen im Boden. Beim lockeren Sand war der Einfluss sehr gering, während beim Kalkstein kein Einfluss festgestellt werden konnte.

3.2 Simulationsergebnisse der Modellierung des Ringraummaterials mit Stabelementen

Die Ergebnisse mit Stabelementen haben gezeigt, dass die Ringraumsteifigkeit nur einen geringfügigen Einfluss auf die Schnittgrößen hat. Zwischen den Verläufen der Normalkräfte und Biegemomente für Ringraumsteifigkeiten von 10 MN/m², 100 MN/m² und 10000 MN/m² treten kaum Unterschiede auf (Abbildung 5). Allerdings sind die Biegemomente größer als diejenige mit Kontinuumselementen. Auf die Oberflächensetzungen hat die Ringraumsteifigkeit ebenfalls nur einen unerheblichen Einfluss.

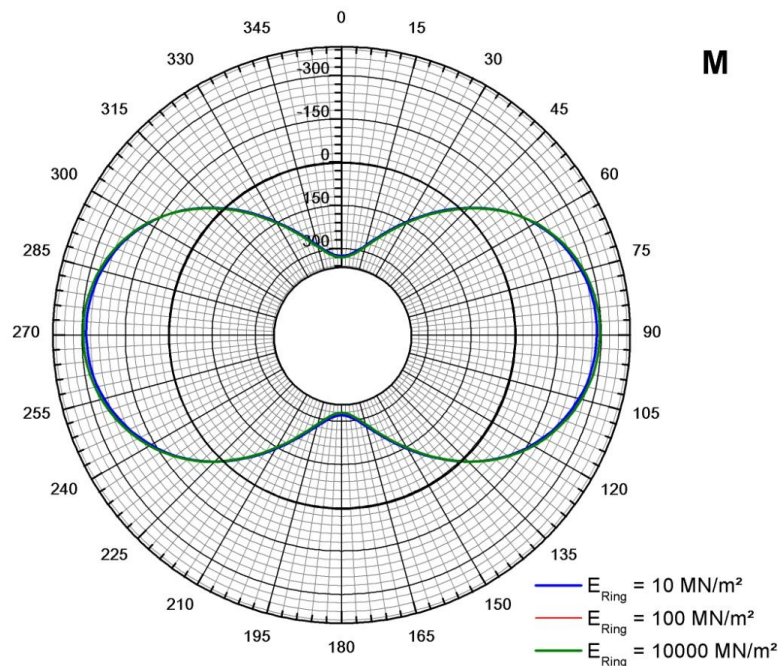
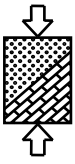


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Biegemomente im Tübbingausbau (kNm/m), Ton, $d_T = 30$ cm, Modell A.

3.3 Simulationsergebnisse mit Berücksichtigung des Volumenverlusts infolge Konsolidierung des Ringraummaterials

Der Volumenverlust infolge Konsolidierung hat einerseits einen günstigen Effekt auf die Schnittgrößen, andererseits einen ungünstigen auf die Oberflächensetzungen.

Der Verlauf der Schnittgrößen und der Oberflächensetzungen beider Varianten ist mit Vorsicht zu betrachten, da einerseits bei Variante a die aufgrund des im Rechenprogramm verwendeten linear



elastischen Stoffverhaltens verursachte elastische „Rückverformung“ des Ringraummaterials die Schnittgrößen beeinflusst und andererseits bei Variante b die Interaktion zwischen Boden und Ringraummaterial nicht konsequent über alle Rechenschritte simuliert wurde.

Allerdings kann Variante a als obere Abschätzung der Schnittgrößen geeignet sein, wenn das Verhältnis abgeminderter Ringraumsteifigkeit im Rechenschritt 3a (E_{Ring3a}) zu voller Ringraumsteifigkeit im Rechenschritt 3b (E_{Ring3b}) nicht zu groß wird, sowie bei steiferem Ringraummaterial gleich bleibt. Sonst werden die Schnittgrößen, wie beispielsweise das Biegemoment für eine Ringraumsteifigkeit von 10000 MN/m², verzerrt.

Mit Variante b ergaben sich kleinere Schnittgrößen als mit Variante a und es wurde festgestellt, dass die Ringraumsteifigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Schnittgrößen hat.

Verformungen im Boden können nur mit der Variante a bestimmt werden. Wegen des Effekts der „Rückverformungen“ gehen bei Variante a die Verformungen im Boden, die nach Rechenschritt 3a auftreten, mit steiferem Ringraummaterial zurück. Somit können für Variante a die Oberflächensetzungen nach Rechenschritt 3b (Endsetzungen) nicht als realitätsnah angesehen werden. Allerdings kann eine maximal mögliche Oberflächensetzung als obere Grenze abgeschätzt werden, indem die Oberflächensetzung aus der Verformung infolge Konsolidierung des Ringraummaterials und die maximale Firstsetzung nach Rechenschritt 3b aus Variante b summiert werden.

4 Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass der Einfluss der Ringraumsteifigkeit auf die Schnittgrößen im Tübbingausbau und die Oberflächensetzungen hauptsächlich von dem Baugrundtyp, der Auswahl des Elementtyps und des Stoffgesetzes des Ringraummaterials abhängig ist.

Für eine realitätsnahe Ermittlung der Schnittgrößen und Oberflächensetzungen soll im Bereich der Stoffgesetzmodellierung des Ringraummaterials noch weiter geforscht werden. Zum Beispiel soll mit einer zeitabhängigen Steifigkeitsentwicklung der Konsolidierungsprozess des Ringraummaterials abgebildet und in die Simulationen einbezogen werden.