



AUSTRIAN  
SOCIETY FOR  
GEOMECHANICS



ÖSTERREICHISCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
GEOMECHANIK

**Empfehlungen  
für die Bemessung von bewehrten  
Spritzbetonschalen im Hohlraumbau in  
Anlehnung an EN 1992 und EN 1997**

**2018**





# EMPFEHLUNGEN

**für die Bemessung von bewehrten Spritzbetonschalen  
im Hohlraumbau in Anlehnung an EN 1992 und EN 1997**



**Leitung**

*(in alphabetischer Reihenfolge)*

Brandtner Markus

IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH

**Mitglieder des Arbeitskreises**

*(in alphabetischer Reihenfolge)*

Hofmann Matthias

Brenner Basistunnel BBT SE

Paternesni Alessandra

Marche Polytechnic University

Saurer Erich

SKAVA consulting ZT GmbH

Schweiger Helmut F.

Technische Universität Graz

Walter Herbert

ZT Ingenieurkonsulent für Bauingenieurwesen

**Layout**

*(in alphabetischer Reihenfolge)*

Kluckner Alexander

Technische Universität Graz

**Review**

Diese Empfehlungen für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau in Anlehnung an EN 1992 und EN 1997 wurde zum Zwecke des Reviews einem ausgewählten Gremium von Fachexperten vorgelegt. Sämtliche Rückmeldungen wurden bearbeitet, Änderungsvorschläge gegebenenfalls eingearbeitet und die Ergebnisse den Reviewern zur Verfügung gestellt.

© ÖGG, Salzburg, 18. September 2018



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2. Geltungsbereich</b>	<b>1</b>
<b>3. Motivation</b>	<b>2</b>
<b>4. Nachzuweisende Grenzzustände</b>	<b>3</b>
4.1. Nachweis der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	3
4.2. Nachweis im Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS)	3
<b>5. Modellierung des Spritzbetons</b>	<b>4</b>
5.1. Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für den Spritzbeton	4
5.2. Zeitabhängiges Stoffmodell für den Spritzbeton	5
<b>6. Nachweisverfahren für Spritzbetonschalen im Sinne des Eurocode</b>	<b>5</b>
6.1. NV2* – Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für Spritzbeton	6
6.2. NV2* – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton	7
6.3. NV2* – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit abgeminderter Festigkeit	7
6.4. NV3 – Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für Spritzbeton	7
6.5. NV3 – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit charakteristischer Festigkeit	8
6.6. NV3+ - Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit Bemessungswerten für die Baugrund- und Spritzbetonfestigkeit	8
<b>7. Beurteilungen und Empfehlung</b>	<b>8</b>
<b>Literaturhinweise</b>	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>10</b>



## 1. VORWORT

Für die Bemessung der Stützmittel im Hohlraumbau kommen sowohl numerische als auch analytische Verfahren zum Einsatz. Eine wesentliche Bedeutung kommt dabei dem zu erwartenden Gebirgsdruck als auch der Interaktion zwischen Gebirge und Ausbau zu. In der Vergangenheit kam für die Bemessung das globale Sicherheitskonzept zum Einsatz, was spätestens mit der Einführung des Eurocodes in Frage gestellt wurde. Obwohl Nachweise für den Hohlraumbau nicht durch den Eurocode geregelt sind, werden in der Praxis die Nachweisstrategien im Wesentlichen an den Normen für Stahlbetonbau (Eurocode 2) und für geotechnische Aufgabenstellungen (Eurocode 7) ausgerichtet. Die aktuelle Situation lässt viele Interpretationsmöglichkeiten zu. Das vorliegende Dokument versteht sich als Hilfestellung bei der Wahl eines geeigneten Nachweisverfahrens bzw. der zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte.

Die Empfehlungen basieren auf Untersuchungen und Fallbeispielen, welche auszugsweise in [1] bzw. [2] veröffentlicht wurden.

## 2. GELTUNGSBEREICH

Die vorliegende Empfehlung bezieht sich ausschließlich auf den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit von bewehrten Spritzbetonschalen im Hohlraumbau unter Anwendung von numerischen Methoden. Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Diese Empfehlungen beziehen sich auf lastabtragende, bewehrte Spritzbetonschalen im Hohlraumbau. Die Empfehlung umfasst sowohl temporäre als auch permanente Spritzbetonschalen.

Die Wahl eines passenden Stoffmodells für den Baugrund bzw. den Spritzbeton wird dem Anwender überlassen und ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Die Anwendung dieser Empfehlung setzt voraus, dass den Bemessungsregeln der Eurocodes (z.B. die Duktilität und Stabilität betreffend), abgesehen von hier genannten Abweichungen, gefolgt wird.

### 3. MOTIVATION

Gemäß den Beschreibungen der geotechnischen Kategorien wird im Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1) z.B. der Tunnelbau der geotechnischen Kategorie 2 bzw. der geotechnischen Kategorie 3 zugehörig eingestuft.

Der Kategorie 2 werden Tunnel mit folgenden Randbedingungen zugeordnet [3]:

„Tunnel in hartem, ungeklüftetem Gestein und ohne besondere Wasserdichtigkeit oder andere Anforderungen.“

Tunnel in ungeklüftetem Festgestein kommen in der Realität sehr selten vor. Alle anderen Bauwerke, die nicht der geotechnischen Kategorie 1 oder 2 zuzuordnen sind, werden der geotechnischen Kategorie 3 zugewiesen. Diese wird in [3] wie folgt beschrieben:

„Die Geotechnische Kategorie 3 sollte im Allgemeinen nach anspruchsvolleren Vorgaben und Regeln als den in dieser Norm genannten untersucht werden.“

Diese Einstufung stellt eindeutig klar, dass für den Tunnel- bzw. Hohlraumbau in seiner vorwiegenden Ausprägung der Eurocode 7 nicht anzuwenden ist.

Ungeachtet dieses Sachverhaltes hat es sich jedoch im realen Projektgeschehen eingebürgert, dass das Teilsicherheitskonzept in Anlehnung an den Eurocode bei der Nachweisführung im Tunnel- bzw. Hohlraumbau angewandt wird. Da die Art der Nachweisführung bzw. das anzuwendende Nachweisverfahren nicht geregelt sind, lässt dies einen entsprechenden Interpretationsspielraum offen. Im Eurocode 7 sind drei Nachweisverfahren definiert, die sich in der Anwendung der Teilsicherheitsfaktoren auf Einwirkung, Festigkeitsparameter und Widerstände unterscheiden. In Österreich ist gemäß Nationalem Anhang für geotechnische Aufgabenstellungen mit Ausnahme der Standsicherheit für Böschungen ausschließlich das Nachweisverfahren 2 (NV2) anzuwenden, für letztgenannte geotechnische Bemessungssituation ist die Anwendung des Nachweisverfahren 3 (NV3) vorgeschrieben. Im Nationalen Anhang für Österreich wird jedoch ausdrücklich festgehalten, dass das NV3 auch dann für numerische Analysen herangezogen werden darf, wenn für konventionelle Verfahren das NV2 anzuwenden ist [4]. Das Nachweisverfahren 1 (NV1) kommt in Österreich nicht zur Anwendung.

## 4. NACHZUWEISENDE GRENZZUSTÄNDE

Der Nachweis in den Grenzzuständen kann durch unterschiedliche Methoden erbracht werden, vor allem:

- Modellversuche
- Beobachtungsmethode
- Berechnungen

Die Empfehlungen in diesem Dokument befassen sich ausschließlich mit der Bemessung durch Berechnung.

### 4.1. Nachweis der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

### 4.2. Nachweis im Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS)

Für die Dimensionierung der Spritzbetonschale ist vor allem das Versagen unter Berücksichtigung der Festigkeit der Baustoffe für den Widerstand entscheidend (STR). Dies impliziert, dass der Eurocode 7 in Verbindung mit dem Eurocode 2 anzuwenden ist.

Gemäß den Eurocodes ist die Anwendung eines Teilsicherheitsbeiwertes auf die Steifigkeit des Baugrundes oder des Spritzbetons nicht vorgesehen. Deshalb wird der Einfluss der Steifigkeit auf die Nachweisführung nicht weiter behandelt.

Die Nachweise haben unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Beanspruchungen (z.B. Schnittgrößen in der Spritzbetonschale), Baugrund- und Betonkenngrößen (Reibungswinkel, Kohäsion des Bodens und Festigkeit des Betons) und geotechnischen Widerständen (z.B. passiver Erddruck) zu erfolgen.

In den folgenden Kapiteln werden Nachweisverfahren vorgestellt, die im Eurocode grundsätzlich möglich sind.

#### 4.2.1. NV1 gemäß Eurocode 7

Beim NV1 (NV1-1 bzw. NV1-2) sind zwei Kombinationen zu untersuchen. Bei der ersten Kombination werden Teilsicherheitsbeiwerte auf die Einwirkungen angewendet. Bei der zweiten Kombination werden die veränderlichen Einwirkungen und die Baugrundkennwerte mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt. Es ist jeweils die ungünstige Variante maßgeblich.

#### 4.2.2. NV2 gemäß Eurocode 7

Beim NV2 werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Einwirkungen oder Beanspruchungen (Auswirkungen der Einwirkungen) und auf die Widerstände des Baugrunds angewendet.

Anmerkung: Beim NV2 ist, wegen der Schwierigkeit zwischen Belastung und Widerstand im Gebirge unterscheiden zu können, die Faktorisierung der Beanspruchungen (Auswirkung der Einwirkung bzw. Schnittkräfte) mit Teilsicherheitsfaktoren verbreitet. Diese Variante wird zur besseren Unterscheidung in der Literatur auch mit NV2\* bezeichnet [5].

#### 4.2.3. NV3 gemäß Eurocode 7

Bei diesem Verfahren werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die veränderlichen Einwirkungen (bei geotechnischen Einwirkungen, sonst auch auf ständige Einwirkungen) und auf die Festigkeit des Baugrundes angewendet. Der Eurocode 7 legt aber nicht fest, in welcher Weise Strukturelemente zu behandeln sind. In diesen Empfehlungen wird auch eine Variante des NV3 mit Faktorisierung der Festigkeit der Spritzbetonschale untersucht, welche zur besseren Unterscheidung in weiterer Folge mit NV3+ bezeichnet wird.

#### 4.2.4. „Nichtlineares Verfahren“ gemäß Eurocode 2, Kapitel 5.7

Beim Nachweis anhand des „Nichtlinearen Verfahrens“ im Sinne der ÖNORM EN 1992-1-1 [6] und EN 1992-2 [7] sollen für die Schnittkraftermittlung in Strukturelementen Baustoffeigenschaften verwendet werden, die die Steifigkeit realistisch darstellen und die Versagens-Unsicherheiten berücksichtigen. Die Einwirkungen sollen bis zu einem globalen Sicherheitsfaktor gesteigert werden, wodurch die Bemessung gleich mit abgedeckt wird.

Die Anwendung dieses Nachweisverfahrens für Spritzbetonschalen mit numerischen Methoden (z.B. FEM, FDM, DEM) ist problematisch, weil der Gebirgsdruck als maßgebende Einwirkung nicht explizit gesteigert werden kann, sondern sich aus der Berechnung ergibt.

#### 4.2.5. „Allgemeines Verfahren“ gemäß Eurocode 2, Kapitel 5.8.6

Das „Allgemeine Verfahren“ basiert auf einer nichtlinearen Berechnung der Schnittgrößen in Strukturelementen. Es gelten die allgemeinen Regeln für das „Nichtlineare Verfahren“ nach Eurocode 2, Kapitel 5.7. Bei diesem Verfahren wird mit Bemessungswerten der Betonfestigkeit gerechnet. Die Einwirkungen müssen mit den Bemessungswerten angesetzt werden. Es ist auch geregelt, wie die Betonsteifigkeit abgemindert werden muss.

Dieses Verfahren entspricht sinngemäß dem NV3 des Eurocode 7.

## 5. MODELLIERUNG DES SPRITZBETONS

Neben der Wahl des Nachweisverfahrens spielt die Modellierung des Spritzbetons bei der Bemessung von Spritzbetonschalen eine erhebliche Rolle.

### 5.1. Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für den Spritzbeton

Es ist weit verbreitet, die zeitliche Entwicklung der Steifigkeit des Spritzbetons mit abschnittsweise linear elastischem Materialverhalten zu modellieren. Den mechanischen Eigenschaften des Spritzbetons wird dadurch in sehr grober Annäherung durch Abstufung des E-Moduls dem Alter entsprechend Rechnung getragen. Zusätzlich kann eine Begrenzung der Spannungen bzw. des aufnehmbaren Momentes (plastisches Moment) erfolgen.

Es ist anzumerken, dass die Verträglichkeit der Verzerrungen explizit nachzuweisen ist, wenn diese durch das Stoffmodell nicht gegeben ist (z.B. Rotationsfähigkeit zur Gewährleistung eines duktilen Systemverhaltens bei Biegebeanspruchung).

Diese Vorgangsweise kann ein zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell nicht ersetzen.

## 5.2. Zeitabhängiges Stoffmodell für den Spritzbeton

Eine weitere Verfeinerung kann durch die Wahl eines zeitabhängigen Stoffmodelles bzw. der Berücksichtigung der Entwicklung der Festigkeit und der Steifigkeit des Spritzbetons erzielt werden. Dies erlaubt unter anderem eine realistischere Erfassung der Lastumlagerung vom Gebirge auf den jungen Spritzbeton. Gegebenenfalls können Verzerrungen zufolge Kriechen, Schwinden und Zwängungen aus dem Hydratationsprozess berücksichtigt werden.

## 6. NACHWEISVERFAHREN FÜR SPRITZBETONSCHALEN IM SINNE DES EUROCODE

Tunnel sind im Sinne des Eurocode 7 Stützbauwerke. Demnach ist sowohl der Nachweis von Grenzzuständen im Tragwerk (STR) als auch der Grenzzustände im Baugrund (GEO) zu betrachten. Die Tatsache, dass das umgebende Gebirge sowohl Widerstand als auch Einwirkung sein kann, erschwert die Nachweisführung. Beim Nachweisverfahren 3 wird dem Rechnung getragen, indem durch den Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte sowohl die Widerstände verkleinert, als auch die Einwirkungen vergrößert werden. Generell wird z.B. im Tunnelbau der Nachweis des zu erwartenden Systemverhaltens am Gesamtsystem aus Boden und Gebirge bevorzugt.

Eine grobe Unterteilung kann zwischen gängigen Nachweisverfahren, die auf Basis des NV2 aufbauen und jenen, die auf dem NV3 basieren, gemacht werden.

Darüber hinaus ist zu unterscheiden, welches Materialverhalten für den Spritzbeton zur Anwendung kommt. Daraus ergeben sich die in den folgenden Punkten beschriebenen Kombinationen aus Nachweisverfahren und Modellierung des Spritzbetons (siehe Tab. 1)

Tab. 1. Nachweisstrategien im Hohlraumbau

Abschnitt	NV	Zeitabhängiges Stoffmodell SpC	$\gamma_M$ Kohäsion	$\gamma_M \tan(\varphi)$	$\gamma_M$ SpC	$\gamma_E$ M-N <sup>1)</sup>	$\gamma_M$ M-N <sup>2)</sup>
6.1	NV2*	nein	1,00	1,00	1,00	1,35	1,50
6.2		ja	1,00	1,00	1,00	1,35	1,50
6.3		ja	1,00	1,00	$1,35 \cdot 1,50$ <sup>1)3)</sup>	-	-
6.4	NV3	nein	1,25	1,25	1,00	1,00	1,50
6.5		ja	1,25	1,25	1,00	1,00	1,50
6.6	NV3+	ja	1,25	1,25	1,50	-	-

<sup>1)</sup> Bei ständigen Einwirkungen

<sup>2)</sup> Überprüfung im Interaktionsdiagramm

<sup>3)</sup> Streng genommen nicht Eurocode-konform, eröffnet aber die Möglichkeit NV2 gemeinsam mit impliziter Bemessung anzuwenden (siehe [8])

### 6.1. NV2\* – Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für Spritzbeton

Diese Kombination ist am weitesten verbreitet und hat auch Eingang in die Richtlinie für die Bemessung von Tunneln im Lockergestein unter Bebauung gefunden [9].

In einem gesonderten Nachweis wird die Spritzbetonschale auf Grundlage von [6] bemessen. Die errechneten Schnittkräfte (M-N), Beanspruchungen oder auch Auswirkungen der Einwirkungen genannt, werden mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_E$  gemäß [10] beaufschlagt.

Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass Spannungsumlagerungen zufolge der Nichtlinearität des Spritzbetons nur im Zuge der Bemessung und nur innerhalb des nachzuweisenden Betonquerschnitts berücksichtigt werden. Dadurch kann sich eine zu konservative Bemessung der Spritzbetonschale ergeben. Des Weiteren kann im Fall einer Überschreitung der Tragfähigkeit des zu bemessenden Betonquerschnittes der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht mehr erbracht werden (siehe beispielhaft dafür Abb. 1). Eine Verstärkung des Querschnittes ist meist nicht zweckmäßig, da die daraus resultierende Erhöhung der Steifigkeit meist zu einer weiteren Zunahme des Moments im überbeanspruchten Bereich führt.

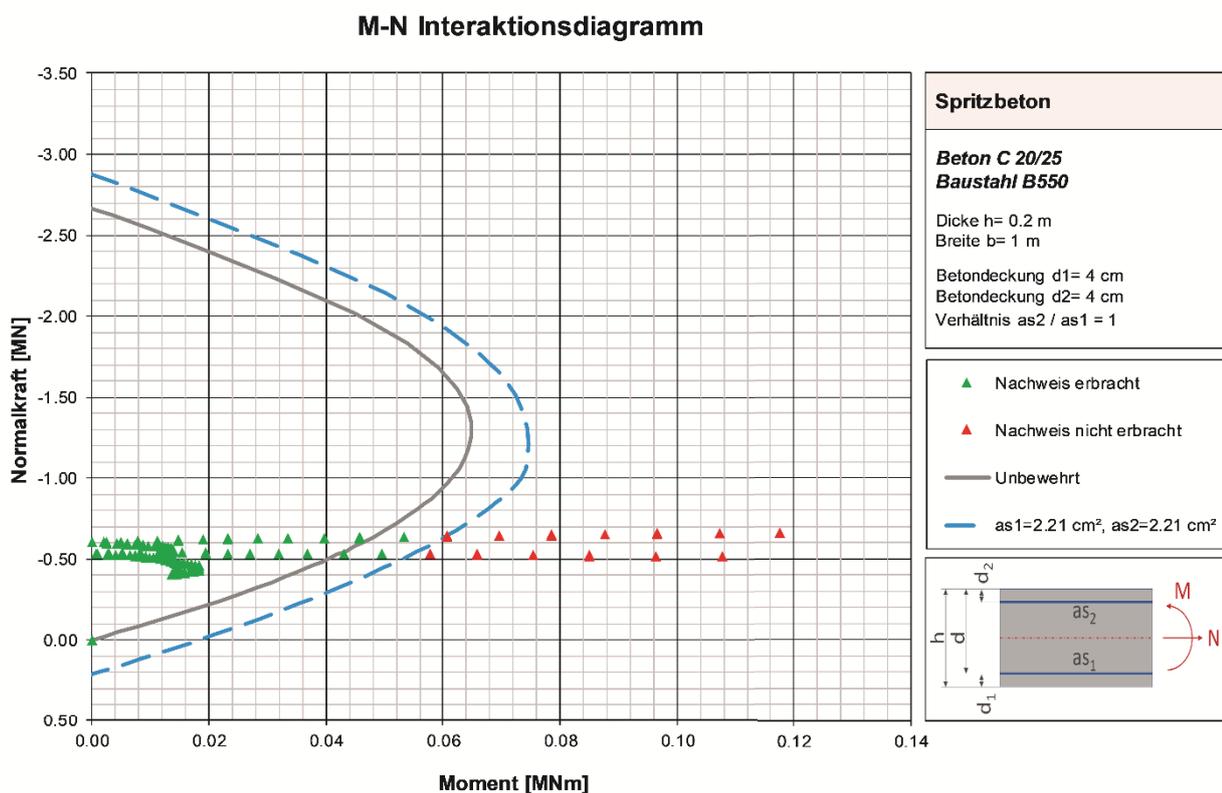


Abb. 1. M-N-Interaktionsdiagramm – Überschreitung der Tragfähigkeit

## 6.2. NV2\* – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton

Die Berücksichtigung eines zeitabhängigen, nichtlinearen Materialverhaltens für Spritzbeton fand im Vergleich zu den Bodenmodellen erst relativ spät Einzug in der Bemessung von Spritzbetonschalen. Eine Ausnahme stellt dabei das in [11] beschriebene visko-plastische Materialmodell dar. Visko-plastische Modelle bedürfen einer sorgfältigen Parameterwahl hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung, da möglicherweise das Kriechverhalten bzw. die Duktilität des Spritzbetonausbaus insgesamt überschätzt werden kann. In den letzten Jahren wurden auch Implementierungen von Spritzbetonmodellen auf Basis von [6] und [12] in den gängigen Softwarepaketen zugänglich. Stellvertretend dafür sei z.B. [13] [14] und [15] genannt. Diese Modelle ermöglichen in der Regel auch die Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der Festigkeit sowie die Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden.

Die Untersuchung [2] zeigt deutlich, dass die Wahl des Materialmodells für den Spritzbeton den größten Einfluss auf die Ergebnisse hat. In den Analysen konnte aufgezeigt werden, dass durch die Berücksichtigung eines realistischen Materialverhaltens meist geringere Schnittkräfte errechnet werden. Wird die charakteristische Festigkeit für den Spritzbeton in Rechnung gestellt, kommt es in manchen Fällen trotzdem vor, dass in Bereichen der Spritzbetonschale der Beton oder der Bewehrungsstahl voll ausgelastet ist. Dies kann mit Hilfe des M-N Interaktionsdiagramms überprüft werden (siehe Abb. 1). Ein Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist durch die volle Auslastung der Tragfähigkeit nicht mehr möglich, was aber nicht zwangsweise das Versagen des Gesamtsystems nach sich ziehen muss. In diesem Fall wird eine zusätzliche Berechnung gemäß 6.6 bzw. 6.3 zur Beurteilung der Gesamtstabilität dringend empfohlen, wobei der Nachweisführung gemäß 6.6 der Vorzug gegeben wird.

## 6.3. NV2\* – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit abgeminderter Festigkeit

Erfolgt die Faktorisierung der Spritzbetonfestigkeit sowohl mit dem Teilsicherheitsbeiwert für das Material als auch zusätzlich mit dem Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung, erübrigt sich der Nachweis des Betonquerschnittes im Nachgang. Durch die Faktorisierung mit beiden Beiwerten ist eine Überlastung der Spritzbetonschale rein rechnerisch ausgeschlossen. Da bei nichtlinearem Verhalten die Steifigkeit in direktem Zusammenhang mit der Festigkeit steht, ist zu beachten, dass bei dieser Vorgangsweise der Ausbau verhältnismäßig weich angenommen wird, wenn die Arbeitslinie nicht bezüglich der Grenzverzerrungen angepasst wird. Bei diesem Verfahren wird der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung sozusagen auf die Widerstandsseite verschoben und ist deshalb streng genommen nicht Eurocode konform. Eine solche Vorgangsweise eröffnet aber die Möglichkeit die Sicherheit wie bei NV2\* ausschließlich den Beanspruchungen und dem Material der Stützmittel zuzuordnen. Durch diesen Ansatz wird eine implizite Bemessung ermöglicht [8].

## 6.4. NV3 – Zeitunabhängiges, abschnittsweise linear elastisches Stoffmodell für Spritzbeton

Das NV3 in Zusammenhang mit linear elastischem Materialverhalten des Spritzbetons ist zwar konsistent im Sinne des Eurocodes, wird jedoch auf Grund der in Kapitel 6.1 genannten Nachteile nicht empfohlen.

### **6.5. NV3 – Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit charakteristischer Festigkeit**

Das NV3 in Zusammenhang mit nichtlinearem Materialverhalten des Spritzbetons mit charakteristischen Festigkeiten ist möglich, jedoch muss eine Bemessung im Nachgang erfolgen. Somit bietet die Vorgangsweise keine wesentlichen Vorteile.

### **6.6. NV3+ - Zeitabhängiges, nichtlineares Stoffmodell für Spritzbeton mit Bemessungswerten für die Baugrund- und Spritzbetonfestigkeit**

In den Untersuchungen in [2] konnte gezeigt werden, dass unter bestimmten Umständen das NV2 die Verhältnisse als zu günstig erscheinen lässt. Es ist daher in solchen Fällen anzuraten, zusätzlich zum NV2 mit Berücksichtigung von nichtlinearem Materialverhalten das NV3 mit faktorisierten Gebirgsfestigkeiten anzuwenden. Auf diese Weise wird die Tragfähigkeit des Gesamtsystems nachgewiesen, die Bemessung erfolgt auf diese Weise ebenfalls implizit. Die errechneten Verformungen auf Basis von Bemessungswerten sind jedoch nicht aussagekräftig.

## **7. BEURTEILUNGEN UND EMPFEHLUNG**

- Prinzipiell sind alle im EC7 definierten Nachweisverfahren zur Bemessung der Spritzbetonschale im Hohlraumbau zulässig.
- Moderne Programme bieten inzwischen mehrere Möglichkeiten zur Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens von Spritzbeton an. Es wird die Wahl eines geeigneten Stoffmodells zur Simulation der zeitlichen (nichtlinearen) Entwicklung der Festigkeit, der Steifigkeit und der Berücksichtigung des Kriechens empfohlen.
- Die Untersuchungen in [2] haben gezeigt, dass die Modellierung des Spritzbetons in Kombination mit den unterschiedlichen Nachweisverfahren eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der Tragfähigkeit spielt.
- Tunnel können als Stützbauwerke gesehen werden. Sie werden deshalb meist mit NV2\* nachgewiesen. Diese Nachweisführung kann als Standard beibehalten werden, wobei die Variante nach 6.2 empfohlen wird.
- Es wird darauf hingewiesen, dass NV2\* in gewissen Situationen (siehe [2]) unsichere Ergebnisse liefert. Eine zusätzliche Berechnung mit NV3+ kann in diesen Fällen mehr Klarheit über das Systemverhalten im Grenzzustand der Tragfähigkeit schaffen.
- Die Zeitpunkte, die für die Bemessung kritisch sein können, und als Zwischenbauzustände untersucht werden müssen, sind projektspezifisch festzulegen. Zwischenbauzustände, bei denen die Frühfestigkeit des Spritzbetons maßgebend ist, werden durch implizite Verfahren automatisch konsistent bemessen. Werden andere Nachweisverfahren als unter Punkt 6.3 oder 6.6 beschrieben verwendet, müssen bei den Nachweisen für Zwischenbauzustände die aktuellen Spritzbetonfestigkeiten explizit festgelegt werden.

## LITERATURHINWEISE

- [1] H. F. Schweiger, A. Paternesi und F. Tschuchnigg, „Eurocode 7-based design of SCL tunnels by means of numerical analyses,“ *Géotechnique*, Bd. 67, Nr. 9, pp. 837-844, 2017.
- [2] M. Brandtner, M. Hofmann, A. Paternesi, E. Saurer, H. F. Schweiger und H. Walter, „Entwicklung einer geeigneten Nachweisstrategie für Spritzbetonschalen im Tunnelbau,“ *Geomechanics and Tunnelling*, Bd. 11, Nr. 5, 2018.
- [3] ÖNORM EN 1997-1, Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, Wien: Austrian Standards, 2014.
- [4] ÖNORM B 1997-1, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen, Wien: Austrian Standards, 2013.
- [5] R. Frank, C. Bauduin, M. Driscoll, M. Kavvas, N. Krebs Ovesen, T. Orr, B. Schuppener und H. Gulvanessian, *Designers' Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules*, London: Thomas Telford Limited, 2005.
- [6] ÖNORM EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Wien: Austrian Standards, 2015.
- [7] ÖNORM EN 1992-2, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln (konsolidierte Fassung), Wien: Austrian Standards, 2012.
- [8] H. Walter, „Implicit ULS design using advanced constitutive laws within the framework of Eurocode 7,“ in *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007)*, Wien, 2007.
- [9] RVS 09.01.42, Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung, Wien: Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, 2013, März.
- [10] ÖNORM EN 1990, Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung, Wien: Austrian Standards, 2013.
- [11] G. Meschke, „Consideration of Aging of Shotcrete in the Context of a 3-D Viscoplastic Material Model,“ *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Bd. 39, Nr. 18, pp. 3123-3143, 1996.
- [12] Intern. Federation for Structural Concrete (fib), *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2013.
- [13] J. Lee und G. L. Fenves, „Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures,“ *Journal of Engineering Mechanics*, Bd. 124, Nr. 8, pp. 892-900, 1998.
- [14] B. Schädlich und H. F. Schweiger, „A new constitutive model for shotcrete,“ in *8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Delft, 2014.
- [15] M. Neuner, P. Gamnitzer und G. Hofstetter, „An Extended Damage Plasticity Model for Shotcrete: Formulation and Comparison with Other Shotcrete Models,“ *Materials*, Bd. 10, Nr. 82, p. 82, 2017.

## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 1. Nachweisstrategien im Hohlraumbau ..... 5

## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1. M-N-Interaktionsdiagramm – Überschreitung der Tragfähigkeit ..... 6



AUSTRIAN  
SOCIETY FOR  
GEOMECHANICS

ÖSTERREICHISCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
GEOMECHANIK

Innsbrucker Bundesstraße 67  
5020 Salzburg, Austria

Tel.: +43 662 875519  
Fax: +43 662 886748  
H.: [www.OEGG.at](http://www.OEGG.at)  
E.: [Salzburg@OEGG.at](mailto:Salzburg@OEGG.at)