

# Tunnelbau 2016

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

**DGGT**   
Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e. V.  
German Geotechnical Society



# Taschenbuch für den **Tunnelbau** **2016**

---

Kompodium der Tunnelbautechnologie  
Planungshilfe für den Tunnelbau

---

Herausgegeben von der DGGT ·  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

unter Mitwirkung von  
Dr. rer. nat. K. Laackmann (Federführung)  
Prof. Dr.-Ing. H. Balthaus  
Dipl.-Ing. O. Braach  
Dipl.-Ing. M. Breidenstein  
Ltd. Bazardirektor Dipl.-Ing. R. Frenzl  
Dipl.-Ing. W.-D. Friebe  
Dipl.-Ing. G. Glatzle  
Ministerialrat Dipl.-Ing. K. Goj  
Prof. Dr.-Ing. habil. A. Hettler  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl  
Dipl.-Ing. M. Meissner, M.BC.  
Dipl.-Ing. E. Scherer  
Dipl.-Ing. S. Schwaiger  
Dipl.-Ing. D. Stephan  
Prof. Dr.-Ing. M. Thewes  
Dr.-Ing. G. Wehrmeyer  
Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt

---

40. Jahrgang

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2015 Wilhelm Ernst & Sohn,  
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen,  
vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmi-  
gung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm  
oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Ma-  
schinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendba-  
re Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages).  
No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting,  
microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a ma-  
chine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sons-  
tigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme,  
dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es  
sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetz-  
lich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens  
markiert sind.

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin  
Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza  
Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Ebner & Spiegel, Ulm

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Print ISBN:** 978-3-433-03133-9  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60636-0  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60634-6  
**eMobi ISBN:** 978-3-433-60635-3  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60633-9

Anzeige entfernt

Anzeige entfernt

---

# Vorwort zum vierzigsten Jahrgang

---

Das Taschenbuch für den Tunnelbau greift seit nunmehr vier Jahrzehnten aktuelle Entwicklungen und Problemstellungen im Untertagebau auf, präsentiert innovative Lösungen und dokumentiert dabei den jeweils erreichten Stand der Technik. Es hat sich in seiner Gesamtheit zu einem praxisnahen Kompendium der Tunnelbautechnik entwickelt, auf das Auftraggeber, Planer und Bauausführende gerne zurückgreifen. Auch wenn das äußere Erscheinungsbild hinsichtlich Größe und Layout sich seit der ersten Ausgabe im Jahr 1976 nicht oder nur kaum verändert hat, entwickelten sich die Inhalte entsprechend den komplexer werdenden Aufgabenstellungen und den steigenden Bedürfnissen der am Tunnelbau Beteiligten weiter, was sich in der Anzahl der Rubriken und auch in der Zusammensetzung des Beirats widerspiegelt.

Im Mittelpunkt des Taschenbuchs für den Tunnelbau steht eine Reihe von Themen, die sich mit den Eigenschaften von Boden und Fels und deren Verhalten bei Belastung, mit der Dimensionierung und Gestaltung von untertägigen Bauwerken, mit Baumethoden in offener und geschlossener Bauweise, mit Maschinen und Geräten sowie Baustoffen und Bauteilen für den Tunnelbau befassen. Diese Themen wurden im Laufe der Zeit durch weitere Rubriken ergänzt, die z. B. den Tunnelbetrieb und die Sicherheit, das Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte behandeln oder über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte berichten.

Herausgeber und Verlag werden bei Einwerbung und Auswahl der Beiträge von Beginn an durch einen aktiven Beirat unterstützt. In den Anfangsjahren des Taschenbuchs für den Tunnelbau bestand dieser noch aus wenigen Hochschullehrern, die teilweise auch als beratende Ingenieure tätig waren. Heute ist der Beirat breiter aufgestellt und vertritt Bauherren, Bauindustrie, beratende Ingenieure, Maschinenhersteller und Zulieferer sowie Hochschule und Wissenschaft.

Die Beiträge in der Ausgabe 2016 behandeln die Themenbereiche Baugruben und Tunnel in offener Bauweise, maschineller Tunnelbau, Baustoffe und Bauteile, Forschung und Entwicklung, Instandsetzung und Nachrüstung, Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte sowie Praxisbeispiele.



(Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt)



(Dr. rer. nat. K. Laackmann)

---

# Inhalt

---

## **Baugruben und Tunnel in offener Bauweise**

<b>I. Eurocodebasierter Leitfaden für rechnerische Brandschutznachweise für Tunnel in offener Bauweise.....</b>	<b>1</b>
<i>Daniel Eickmeier, Carsten Peter, Armita Nasser</i>	
1 Einleitung.....	4
2 Rechnerische Brandschutznachweise .....	5
3 Untersuchungsergebnisse .....	13
4 Folgerungen für die Praxis .....	16

## **Maschineller Tunnelbau**

<b>I. Schaumkonditionierung bei Erddruckschilden .....</b>	<b>19</b>
<i>Gerhard Wehrmeyer</i>	
1 Einleitung/Historie .....	20
2 Vorteile/Nutzen .....	22
3 Maschinenteknik und Betrieb der Schaumkonditionierung ...	24
4 Schaumanlagen .....	32
5 Bedienung .....	34
6 Bentonitzugabe .....	34
7 Betriebliche Aspekte .....	36
8 Zusammenfassung.....	38

Anzeige entfernt

<b>II. Suspensionen mit erhöhter Dichte anstelle von Ballastierungen beim Hydroschildvortrieb der U-Bahnlinie U5 in Berlin</b> .....	39
<i>Lars Bayer, Peter Diete, Dietrich Fahlbusch, Markus Thewes, Britta Schöber, Jörg Seegers, Ernst-Rainer Tirpitz, Gerhard Wehrmeyer</i>	
1 Allgemeine Übersicht zum Projekt Weiterbau U-Bahnlinie U5 Berlin .....	40
2 Bereiche mit geplanter Ballastierung .....	45
3 Schwere Suspension als Alternative .....	49
4 Maschinentechnische Erfordernisse .....	56
5 Teststrecke .....	60
6 Neues Nachweiskonzept für die Aufbruchsicherheit .....	70
7 Unterquerung der Spree mit schwerer Suspension .....	74
8 Zusammenfassung.....	79

## **Baustoffe und Bauteile**

<b>I. Bemessung und Konstruktion von Längsfugen beim Tübbingausbau</b> .....	81
<i>Oliver Fischer, Gerald Schmidt-Thrö</i>	
1 Einleitung.....	82
2 Bezeichnungen.....	86
3 Grundlagen.....	87
4 Bemessung der Längsfuge .....	94
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	127

Anzeige entfernt

## **Forschung und Entwicklung**

<b>I. Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild-TVM in Lockergesteinen.....</b>	<b>135</b>
<i>Florian Köppl</i>	
1 Einführung .....	136
2 Datenanalyse.....	139
3 Einflussfaktoren.....	141
4 Empirisches Prognosemodell.....	154
5 Validierung des Prognosemodells.....	164
6 Diskussion und Ausblick .....	178
<b>II. Tunnelvortrieb im anhydritführenden Gebirge.....</b>	<b>185</b>
<i>Walter Wittke, Martin Wittke, Patricia Wittke-Gattermann</i>	
1 Einleitung.....	189
2 Unausgelaugter Gipskeuper .....	190
3 Erfahrungen aus dem Tunnelbau .....	193
4 Felsmechanisches Modell und Kennwerte .....	196
5 Quellgesetz.....	199
6 Vorgänge beim Tunnelbau.....	203
7 Grundlagen für den Entwurf und die Bemessung der Auskleidung.....	206
8 Abdichtungsbauwerke zur Unterbindung der Längsläufigkeit .....	212
<b>III. Innovationen bei der Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnelbau .....</b>	<b>219</b>
<i>Heiko Neher, Christoph Niklasch, Peter-Michael Mayer, Wolfgang Hornich, Christian Perl</i>	
1 Einführung .....	220
2 Planung von Gefrierverfahren.....	224

Anzeige entfernt

3	Ausführung von Gefrierverfahren .....	235
4	Fazit.....	251

## **Instandsetzung und Nachrüstung**

<b>I.</b>	<b>Bauliche Nachrüstung von Flucht- und Rettungswegen bei Straßentunneln .....</b>	<b>255</b>
	<i>Karl Goj, Bernhard Ettelt, Wolf-Dieter Friebe</i>	
1	Einleitung .....	256
2	Stand des Nachrüstungsprogramms .....	258
3	Besondere Bedeutung der Flucht- und Rettungswege .....	260
4	Bauliche Nachrüstung der Flucht- und Rettungswege anhand von Beispielen im Bereich der bayerischen Straßenbauverwaltung .....	264
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	283

## **Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte**

<b>I.</b>	<b>Bahnprojekt Stuttgart-Ulm: Der Albaufstieg – Partnerschaftliche Anpassung eines komplexen Bauvertrags nach Vertragsschluss.....</b>	<b>285</b>
	<i>Matthias Breidenstein</i>	
1	Der Planfeststellungsabschnitt PFA 2.2 Albaufstieg .....	286
2	Vortriebskonzept gemäß Planfeststellung für den Albaufstieg .....	294
3	Das beauftragte Vortriebskonzept zum Boßlertunnel mit kurzer Schildfahrt .....	295

Anzeige entfernt

4	Idee und Planungen zu einer verlängerten Schildfahrt .....	297
5	Vereinbarte Lösung mit langer Schildfahrt .....	303
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	305

## **Praxisbeispiele**

<b>I.</b>	<b>Crossrail Baulos C310: Herausforderungen des Tunnelvortriebs unter setzungsempfindlichen Gebäuden.....</b>	<b>307</b>
	<i>Andreas Rädle, Ester Karl, Riku Tauriainen</i>	
1	C310 Thames Tunnel Projektübersicht .....	308
2	Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten .....	311
3	SM-V-Vortrieb im Stadtgebiet von London .....	315
4	SM-V-Auswahl und Separieranlage .....	318
5	Stützdruckberechnungen .....	324
6	Stützdruckverlauf während des Tunnelvortriebs .....	329
7	Zusammenfassung .....	338

## **Tunnelbaubedarf**

Nach Warenuntergruppen gegliedertes Lieferantenverzeichnis.....	341
---	-----

## **Inserentenverzeichnis**

Alphabetisches Verzeichnis der Inserenten.....	357
--	-----

<b>Autorenverzeichnis .....</b>	<b>365</b>
---------------------------------	------------

Anzeige entfernt

Anzeige entfernt

---

# Baugruben und Tunnel in offener Bauweise

---

## I. Eurocodebasierter Leitfaden für rechnerische Brandschutznachweise für Tunnel in offener Bauweise

*In den zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen für Ingenieurbauwerke (ZTV-ING) [1], dem geltenden Regelwerk für Straßentunnel im Zuge von Bundesfernstraßen, ist das derzeitige rechnerische Nachweisverfahren zum baulichen Brandschutz für Rechteckrahmenquerschnitte im Teil 5 Abschnitt 2 über ein vereinfachtes Nachweisverfahren mit Ansatz eines Temperaturgradienten von 50 K in Wand und Decke geregelt. Alternativ kann nach ZTV-ING ein genauere rechnerischer Nachweis durchgeführt werden, der jedoch in der Praxis kaum angewendet wird, da hierzu bisher keine eindeutigen Regelungen zur Durchführung vorliegen.*

*Mit dem Forschungsvorhaben „Rechnerischer Nachweis des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise“ [2] wurden „genauere rechnerische Nachweise“ für typische Rechteckrahmenquerschnitte von Straßentunneln auf Basis des „Allgemeinen Rechenverfahrens“ nach DIN EN 1992-1-2 (Eurocode 2) [3] durchgeführt. Als ein Ergebnis dieses Forschungsvorhabens wurde festgehalten, dass das Berechnungsverfahren für den genaueren rechnerischen Nachweis in der Praxis noch nicht ausreichend erprobt ist.*

---

Autoren: Dipl.-Ing. Daniel Eickmeier, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Dipl.-Ing. Carsten Peter und Armita Nasseri, M. Sc. IMM – Ingenieurbüro Maidl & Maidl, Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Bochum

Taschenbuch für den Tunnelbau 2016

Herausgegeben von der DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.

© 2015 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

*Zur Verifizierung des genaueren rechnerischen Nachweises des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise wurde in dem gegenständlichen Forschungsvorhaben eine Erprobung des Nachweisverfahrens an einem aktuellen Ausführungsbeispiel durchgeführt. Weiter ist der in dem Forschungsvorhaben erstellte Leitfaden mit Musterstatik auf die zum 01.05.2013 vollzogene Einführung der Normengeneration des Eurocodes aktualisiert worden.*

*Auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse des genaueren rechnerischen Nachweisverfahrens wurde zudem ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für den Brandfall mit Vorgabe eines von der Bauteildicke abhängigen linearen äquivalenten Ersatztemperaturgradienten entwickelt.*

### **Euro Code-Based Guidelines for structural fire protection on open cut tunnels**

*In the ZTV-ING Part 5, Section 2 the current calculation method for structural fire protection for road tunnels (open cut method) is based on a simplified calculation method with the approach of a temperature gradient of 50 K. Under certain circumstances, an advanced calculation method has to be carried out. This method is not often used in practice, because there are no clear regulations on the procedure, yet.*

*In the research project „calculation method for structural fire protection for road tunnels (open cut method)” (BASt Book B94) [2] an “advanced calculation method” has been applied for common rectangular cross sections of frames by applying DIN EN 1992-1-2 (eurocode 2) [3]. As a result of the project it was detected, that those more accurate calculation methods are not sufficiently tested in practice.*

*Therefore for the verification of the “advanced calculation method” for constructional fire protection for road tunnels (open cut method), the calculation method was used and tested at a current design project. Furthermore the guide line of the research project,*

Anzeige entfernt

*including sample static, had to be updated to the new released standards of the euro code.*

*An independent comparative calculation was used to check, respectively to validate the results of the sample calculation (since 01/05/2013).*

*Based on the results of the advanced calculation method a simplified calculation method with a linear equivalent temperature gradient, dependent on the thickness of the lining was developed.*

## **1 Einleitung**

In den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) [1], dem Regelwerk für Bundesfernstraßentunnel, ist das rechnerische Nachweisverfahren zum baulichen Brandschutz für Rechteckrahmenquerschnitte geregelt. Demnach darf unter bestimmten Voraussetzungen – diese werden von den üblichen Rechteckrahmenquerschnitten i. d. R. erfüllt – der Nachweis des baulichen Brandschutzes vereinfacht über den Ansatz eines Temperaturgradienten von 50 K in Wand und Decke geführt werden.

Falls die Voraussetzungen nicht erfüllt werden bzw. falls aus dem vereinfachten Nachweis eine deutlich erhöhte Bewehrung gegenüber der Kaltbemessung resultiert, ist nach ZTV-ING ein genauerer rechnerischer Nachweis zu führen. Weitere Angaben zum genaueren rechnerischen Nachweis sind in den ZTV-ING nicht enthalten.

In der Praxis führt dies bisher dazu, dass in den Standsicherheitsnachweisen von Rechteckrahmenquerschnitten überwiegend der vereinfachte Brandschutznachweis nach ZTV-ING mit Ansatz eines Temperaturgradienten von 50 K angewendet wird. Der vereinfachte Brandschutznachweis kann bemessungsrelevant werden und bestimmt dann den erforderlichen Bewehrungsgehalt. Dies kann teilweise unwirtschaftliche Bewehrungsgehalte, insbesondere bei größeren Bauteildicken, zur Folge haben.

Mit dem Forschungsvorhaben FE 15.0502/2010/FRB, Rechnerischer Nachweis des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise [2], wurden genauere rechnerische Nachweise für typische Rechteckrahmenquerschnitte von Straßentunneln durchgeführt. Die Nachweise basieren auf dem allgemeinen Rechenverfahren nach DIN EN 1992-1-2 [3]. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Musterstatik als Leitfaden für die Anwendung des genaueren rechnerischen Nachweises erstellt. Weiter wurde der vereinfachte Nachweis weiterentwickelt, indem eine Abhängigkeit des Temperaturgradienten von der Bauteildicke definiert wurde.

Als ein Ergebnis des Forschungsvorhabens wurde festgehalten, dass das Berechnungsverfahren für den genaueren rechnerischen Nachweis in der Praxis noch nicht ausreichend erprobt ist und in Abhängigkeit der Berechnungsrandbedingungen und -algorithmen eine relativ große Streuung der Berechnungsergebnisse resultieren kann.

Zur Erprobung und Verifizierung des genaueren rechnerischen Nachweises des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise auf Basis des allgemeinen Rechenverfahrens nach DIN EN 1992-1-2 [3] wurde das Forschungsvorhaben FE 15.0582/2013/FRB [4] durchgeführt. Der Leitfaden mit Musterstatik ist auf die zum 01.05.2013 vollzogene Einführung der Normengeneration des Eurocodes aktualisiert worden. Vergleichend sind rechnerische Brandschutznachweise mit dem vereinfachten Ansatz des Temperaturgradienten von 50 K und dem weiterentwickelten, vereinfachten Ansatz mit bauteildickenabhängigen Temperaturgradienten durchgeführt worden. Weiter wurde eine Erprobung des Nachweisverfahrens an einem aktuellen Ausführungsbeispiel durchgeführt.

## **2 Rechnerische Brandschutznachweise**

Für die rechnerischen Brandschutznachweise für Tunnel in offener Bauweise (Rechteckrahmen) wurden im Forschungsvorhaben [4] drei verschiedene Verfahren angewendet.

### *Vereinfachter rechnerischer Brandschutznachweis nach ZTV-ING [1]*

Für ein- und zweizellige Rahmen mit Bauteildicken von 0,8 bis 1,6 m und Stützweiten bis 16 m kann ein vereinfachter rechnerischer Nachweis des Brandschutzes in der außergewöhnlichen Bemessungssituation über den Ansatz eines Temperaturgradienten von 50 K in Wand und Decke bei Ansatz der vollen Steifigkeit des Betonquerschnitts (Zustand I) geführt werden. Hinsichtlich der Anwendung des vereinfachten Verfahrens ist in den ZTV-ING folgende Einschränkung enthalten: „Resultiert aus dem vereinfachten Nachweis ein „wesentlich höherer“ Bewehrungsgrad und/oder liegen Abweichungen der Systemvoraussetzungen (d. h. Querschnittsdicken  $>1,6$  bzw.  $<0,8$  m und Stützweiten  $>16$  m) vor, ist ein genauere rechnerischer Nachweis durchzuführen.“ Die ZTV-ING enthalten im Weiteren aber keine eindeutigen bzw. standardisierten Vorgaben für genauere rechnerische Nachweise. Weiterhin ist keine quantitative Definition für einen wesentlich höheren Bewehrungsgrad vorhanden.

### *Genauerer rechnerischer Brandschutznachweis nach DIN EN 1992-1-2 [3]*

Die DIN EN 1992-1-2 enthält drei verschiedene Nachweisverfahren für den baulichen Brandschutz:

- Stufe 1: Tabellarisches Nachweisverfahren,
- Stufe 2: Vereinfachtes Rechenverfahren,
- Stufe 3: Allgemeines Rechenverfahren.

Das allgemeine Rechenverfahren (Stufe 3) stellt das detaillierteste der drei Nachweisverfahren dar. Für Tunnelbauwerke ist aufgrund der von der Einheitstemperaturkurve abweichenden Brandeinwirkung, der statischen Unbestimmtheit mit entsprechender Ausbildung von Zwängungen sowie dem nichtlinearen Trag- und Systemverhalten infolge der Bauwerk-Boden-Interaktion das allgemeine Rechenverfahren der zielführende rechnerische Brandschutznachweis.

Beim allgemeinen Rechenverfahren wird vorab im Rahmen einer thermischen Analyse die Temperaturverteilung im Bauteil

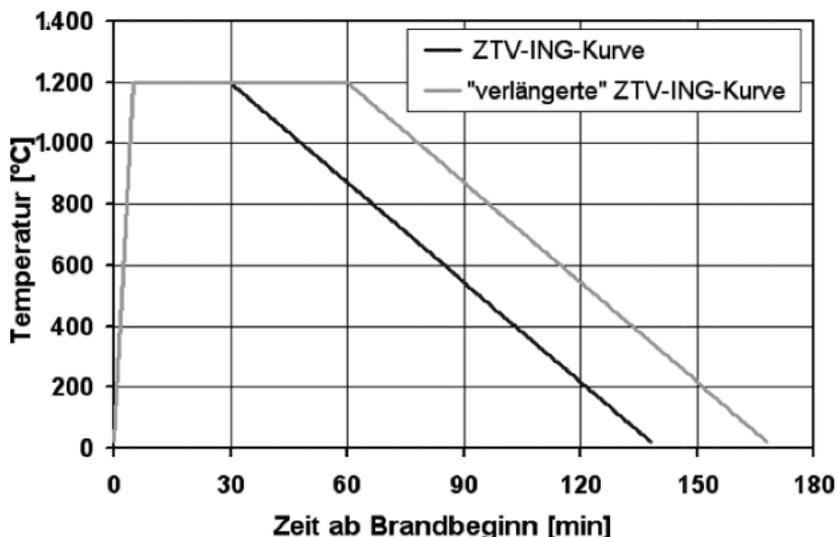


Bild 1. Brandkurven

aufgrund der maßgebenden Brandkurven berechnet. In den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 Nr. 10 [1] ist die Brandkurve für das Nachweisverfahren angegeben. Die verlängerte Brandkurve ist bei Bauwerken mit höheren Anforderungen an den baulichen Brandschutz, z. B. bei Tunneln unter Gewässern anzuwenden. Die beiden Brandkurven sind in Bild 1 dargestellt.

Die Ergebnisse der thermischen Analyse unter Einwirkung der ZTV-ING-Kurve sind in dem nachfolgenden Diagramm beispielhaft für eine Bauteildicke von 55 cm dargestellt (Bild 2). Jede Linie im Diagramm gibt die Temperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt im Bauteil an.

Bei der anschließenden mechanischen Analyse werden die resultierenden Zwängungen aus der Temperaturverteilung der thermischen Analyse mit den maßgebenden Gebrauchslastfällen (Kaltbemessung) überlagert und daraus die maßgebenden Schnittgrößen berechnet. Die Zwangsschnittgrößen im Brandfall entstehen aus der (verhinderten) thermischen Dehnung in Abhän-

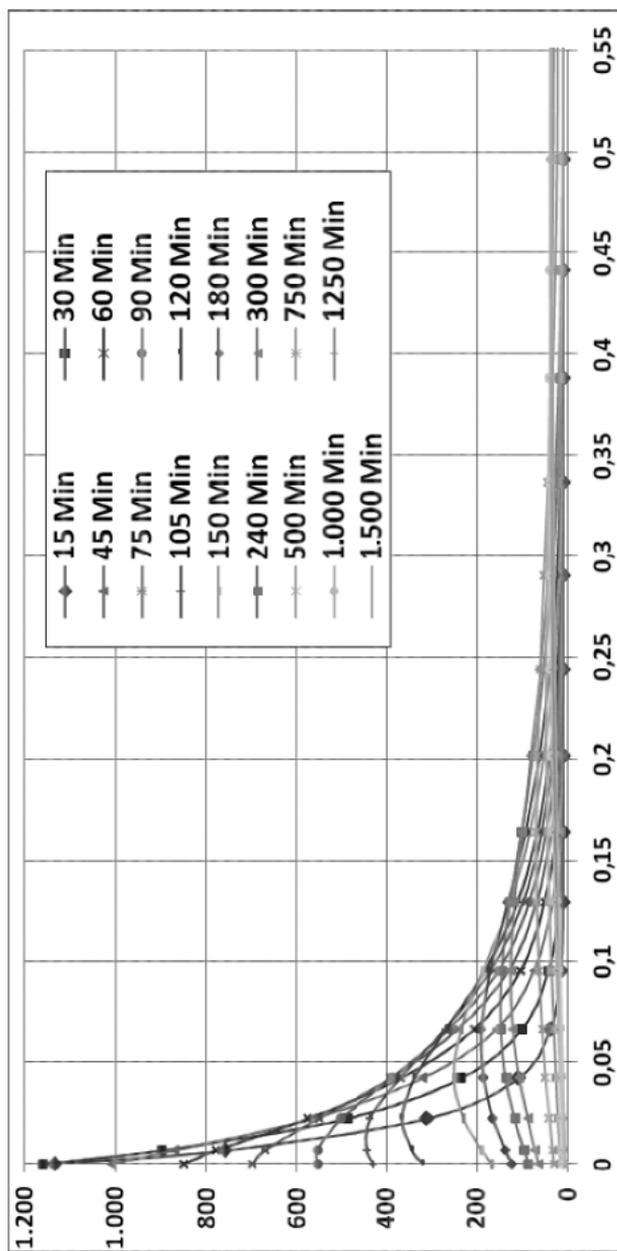


Bild 2. Temperaturverteilung für Beton unter Einwirkung der ZTV-ING-Kurve für Bauteildicke 55 cm

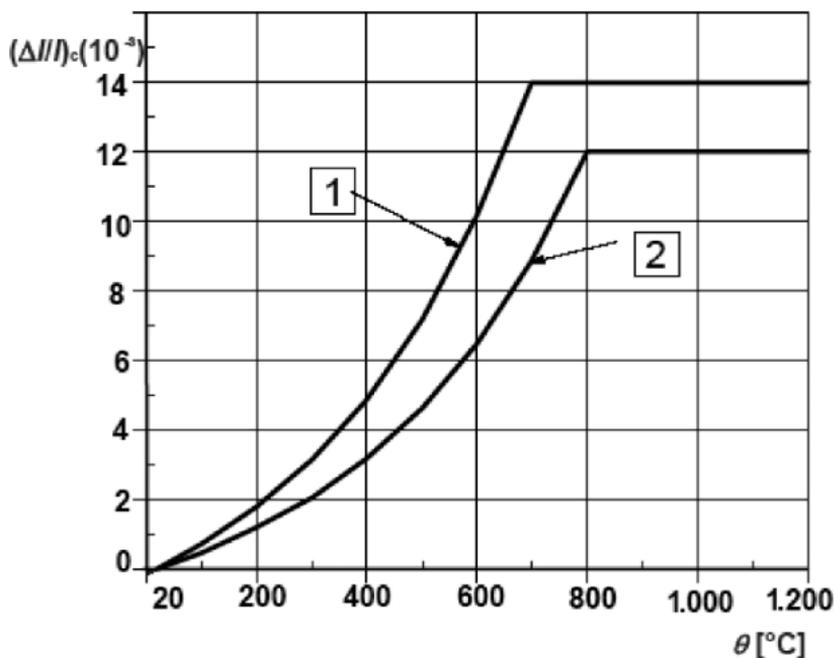


Bild 3. Thermische Dehnung von Beton [3]

gigkeit der Temperaturverteilung im Beton. Die Brandeinwirkung ist in der Wand und der Decke anzusetzen. Die Sohle ist vor der Brandeinwirkung durch den Sohlaufbau geschützt.

Bild 3 zeigt die Zunahme der Betondehnung in Abhängigkeit der Temperatur, wobei Kurve 1 den Verlauf mit quarzhaltigem Zuschlag und Kurve 2 mit kalksteinhaltigem Zuschlag darstellt.

Bei der mechanischen Analyse werden die Dehnungen aus der nichtlinearen Temperaturverteilung der thermischen Analyse mit den mechanischen Einwirkungen überlagert und daraus die maßgebenden Schnittgrößen unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften nach DIN EN 1992-1-2 [3] berechnet. Unter der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte ergeben sich die spannungserzeugenden Dehnungen in den

Ebenen bzw. Schichten bei einer einachsigen Biegung bezogen auf die Dehnungsnulllinie zu:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + z \cdot k_z - \varepsilon_{fi}(\Theta) \quad (1)$$

mit

$\varepsilon_0$	Axialdehnung,
$z$	Abstand zur Systemlinie,
$k_z$	Krümmung,
$\varepsilon_{fi}(\Theta)$	Dehnung aus Temperatur auf Grundlage von Bild 3.

Für den Querschnitt ist eine Schichtenunterteilung vorzunehmen. Jeder Schicht kann in der zeitabhängigen Berechnung in Abhängigkeit der bis zum betreffenden Zeitpunkt aufgetretenen maximalen Temperatur die entsprechende nichtlineare Betonarbeitslinie zugeordnet werden. Die Materialeigenschaften sind nach DIN EN 1992-1-2 [3] mit charakteristischen Kennwerten, d. h. mit einer Teilsicherheit  $\gamma_M = 1,0$  zu berücksichtigen. In der zeitabhängigen Berechnung sind die Betonmaterialeigenschaften aus dem vorherigen Zeitschritt als Ausgangswerte für den neuen Zeitschritt zu berücksichtigen. Bei Beton und kaltverformtem Betonstahl handelt es sich um irreversible Materialänderungen, wogegen bei warmgewalztem Betonstahl die temperaturabhängigen Festigkeitsreduzierungen reversibel sind, d. h., die Bewehrung hat nach der Abkühlung wieder die vollen Festigkeiten.

Die Schnittgrößenermittlung erfolgt iterativ im Zustand II (Steifigkeitsermittlung unter Berücksichtigung des gerissenen Querschnitts) unter Variation der Randdehnungen und Berücksichtigung der vorhandenen Bewehrung im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation nach DIN EN 1990 [5]. Die Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen sind erfüllt, wenn die inneren und äußeren Schnittgrößen unter Einhaltung der nach DIN EN 1992-1-2 [3] temperaturabhängigen, maximal zulässigen Beton- und Stahldehnungen übereinstimmen.

Es hat sich gezeigt, dass der genaue rechnerische Nachweis des Brandfalls in Form des allgemeinen Rechenverfahrens nach DIN EN 1992-1-2 [3] ein komplexes Berechnungsverfahren ist.

*Weiterentwickelter, vereinfachter rechnerischer Nachweis*

Mit dem im Forschungsvorhaben [2] weiterentwickelten, vereinfachten Berechnungsverfahren sind Berechnungen für den Brandfall mit üblichen Stabwerksprogrammen im Zustand I (ungerissener Zustand) möglich. In Ergänzung zum bisherigen vereinfachten Brandschutznachweis nach ZTV-ING (Ansatz eines linearen Temperaturgradienten von 50 K) wird bei diesem Verfahren die Bauteildicke berücksichtigt.

Den Einfluss der Bauteildicke zur Ermittlung des Zwangsbiegemoments aus der Temperatur zeigt die nachfolgende Gleichung:

$$M_{\Delta T} = E \cdot I \cdot \alpha_T \cdot \frac{\Delta T}{d} = \frac{E \cdot b \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_M}{12} \cdot d^2 \quad (2)$$

Dies bedeutet, bei Annahme einer vollständigen Zwängung, eine proportionale Abhängigkeit des Zwangsbiegemoments zum Quadrat der Bauteildicke  $d$ .

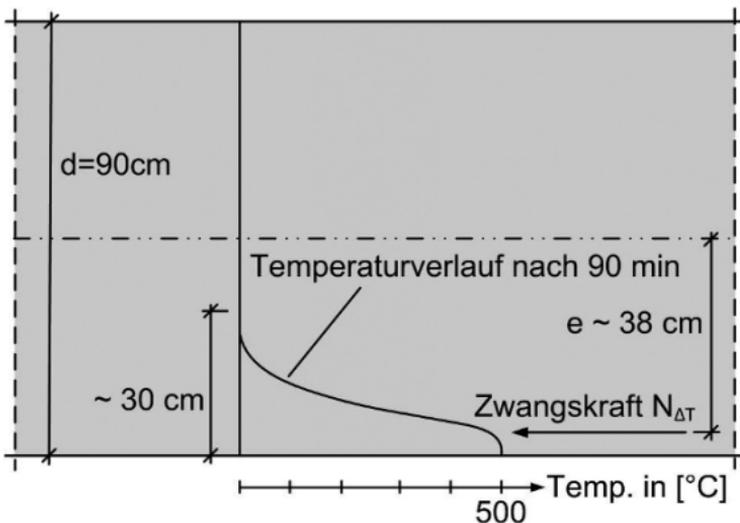


Bild 4. Zwangsnormalkraft  $N_{\Delta T}$  aus behinderter Dehnung durch Temperaturbeanspruchung

Die Ergebnisse der durchgeführten thermischen Analysen und die Erkenntnisse aus Brandversuchen zeigen, dass sich die Temperatureindringung im Bauteil bei einer Brandeinwirkung gemäß ZTV-ING-Kurve auf eine Tiefe von ca. 30 cm beschränkt. Eine Erhöhung der Bauteildicke führt damit lediglich zu einer Erhöhung des Zwangsbiegemoments im Verhältnis zum entsprechend vergrößerten Hebelarm zur Systemlinie.

$$M_{\Delta T} = N_{\Delta T} \cdot e \quad (3)$$

Es liegt damit theoretisch nur eine lineare Erhöhung des Temperaturzwangsbiegemoments zur Bauteildicke vor.

Im Forschungsvorhaben [2] sind unter Variation der statischen Systeme (d. h. Tunnelquerschnitte) und der Auflasten unter Einwirkung der ZTV-ING-Kurve bauteildickenabhängige, äquivalente Temperaturgradienten ermittelt worden. Die Ermittlung erfolgte dabei basierend auf einem Abgleich mit den Ergebnissen aus dem genaueren rechnerischen Nachweis.

Der weiterentwickelte, vereinfachte Nachweis basiert auf der Verwendung eines Betons mit PP-Fasern, d. h., es wurde von vernachlässigbaren Betonabplatzungen und damit vernachlässigbarer Beeinträchtigung der Materialeigenschaften (insbesondere der luftseitigen Biegebewehrung) während des Brands und nach dem Brand ausgegangen.

In Bild 7 (vgl. Abschnitt 3) sind die abgeleiteten, bauteildickenabhängigen äquivalenten Temperaturgradienten dargestellt.

In dem Forschungsvorhaben [2] wurde weiter abgeleitet, dass keine gesonderte Temperaturänderung  $\Delta T_N$  für die Normalkraft berücksichtigt werden muss, da bei einem Rechteckquerschnitt mit üblichen Bettungsbedingungen die Zwangsnormalkraft aus dem Brand nicht bemessungsrelevant ist bzw. die Zwangsnormalkraft sich günstig auf die Bemessung auswirkt und eine Vernachlässigung ein konservativer Ansatz ist.